

RTK

REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK

XXVII. évfolyam
2015. 3. szám

REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK

NEMZETI KÖZSZOLGÁLATI EGYETEM
KATONAI REPÜLŐ INTÉZET
TUDOMÁNYOS KIADVÁNYA

Online kiadás
HU ISSN 1789-770X
Nyomtatott kiadás
HU ISSN 1417-0604

IMPRESSZUM

Szerkesztőbizottság elnöke:
Prof. dr. Óvári Gyula ny. ezredes, CSc

Szerkesztőbizottság elnökhelyettese:
Dr. Békési Bertold alezredes, PhD

Főszerkesztő:
Dr. Békési Bertold alezredes, PhD

Szerkesztő és webszerkesztő:
Dr. Szilvássy László alezredes, PhD

Szerkesztőbizottság tagjai és egyben rovatvezetők:
Prof. dr. Makkay Imre ny. ezredes, CSc (Pilótanélküli repülő-eszközök)
Dr. Békési Bertold alezredes, PhD (Üzemeltetés, karbantartás)
Dr. Bottyán Zsolt százados, PhD (Repülésmeteorológiai)
Dr. Dunai Pál alezredes, PhD (Hallgatói)
Dr. Kavas László alezredes, PhD (Repülőműszaki)
Dr. Palik Mátyás alezredes, PhD (Légiközlekedés, légierő alkalmazás)
Dr. Szilvássy László alezredes, PhD (Multidiszciplináris)

A REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK című folyóirat a NEMZETI KÖZSZOLGÁLATI EGYETEM HADTUDOMÁNYI ÉS HONVÉDTISZTKÉPZŐ KAR KATONAI REPÜLŐ INTÉZET, illetve jogelődjei által alapított folyóiratának jogutódja, a repüléstudomány tematikus kiadványa.
A folyóirat célja lehetőséget teremteni a kutatók, az oktatók, doktori, valamint a mester- és alapképzésben résztvevő hallgatók kutatási eredményeik közzétételére a repüléstudomány-, illetve az ehhez kapcsolódó területeken.

MEGJELENÉS
A kiadvány évente három alkalommal jelenik meg, a megjelenő írások lektoráltak. A közlésre szánt tanulmányokat a Repüléstudományi Közlemények honlapján kell regisztrálni és feltölteni http://www.repulestudomany.hu/index_rtk.html. További részletekért látogasson el honlapunkra.

Kiadó: Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai Repülő Intézet
Kiadásért felelős: dr. Palik Mátyás alezredes, PhD
Szerkesztőség címe: 5008 Szolnok, Kilián út 1.
Levelezési cím: NKE Repüléstudományi Közlemények 5008 Szolnok, Pf.: 1.
Telefon: +36-56-510-535
e-mail: RepTudKozl@uni-nke.hu
HU ISSN 1789-770X (Online)
HU ISSN 1417-0604 (Nyomtatott)

TARTALOM

Koncz Annamária
A 8D problémamegoldó technika 7

Rohács József
Gondolatok, háttéranyagok a repülés, repülőipar stratégiai szerepéről 19

Gáti Balázs
UAV innovatív indítása – korszerű megoldás a középkorból 37

Számel Bence, Szabó Géza
Optimális ATC szektorkonfiguráció komplexitás alapú becslését végző döntéstámogató eszköz fejlesztése 51

Bera József, Pokorádi László
Légi forgalom környezetbiztonsági modelljének zajszempontú elemzése 65

Szilágyi Dénes
A felsőfokú repülő szakemberképzés helyzete hazánkban 89

Szabolcsi Róbert
UAV típusalkalmassági tanúsításának hazai és nemzetközi tapasztalatai 97

Békési Bertold, Szegedi Péter
Napjainkban fejlesztett fegyverrendszerek megjelenése a jövő hadszinterein, a tudásalkalmazás és fejlesztés szempontjából 105

Pásztor Endre, Beneda Károly Tamás
A TKT-1 kisméretű, oktatási és kutatási célú gázturbinás sugárhajtómű első tíz éve 117

Sándor Zsolt
A légiforgalmi szolgáltató és a légiforgalmi irányítás funkcionális modellezése 133

Adrienn Dineva, Annamária R. Várkonyi-Kóczy, József K. Tar
Wavelet-based Noise Removal Technique for Remote-ly-sensed Data 149

Madácsi Richárd
Data science technikák alkalmazása a futópálya-hatékonyság növelésében 159

Szaniszló Zsolt
"The Odd One Out". The Main Parachute of T-11 Parachute System 171

Dániel Rohács, József Rohács
Impact of Out-of-the-Box Approach on the Future Air Transportation System 189

Bozóki János, Kavas László, Óvári Gyula
Hagyományos és korszerű vizsgálati technológiák találkozása
a légijárműkarbantartás egy kiemelten fontos területén 207

Bicsák György
Genetic Algorithm Based Time Schedule Management
for Small Aerospace Companies 221

Markovits-Somogyi Rita
Intelligens közlekedési rendszerek a légiforgalmi irányításban 231

Siska Miklós
Airport city Ferihegyen: realitás, vagy álom? 241

Zoltán Belső, Balázs Gáti, István Koller, Péter Rucz, Antal Turóczi
Design of a Nonlinear State Estimator for Navigation
of Autonomous Aerial Vehicles 255

Péter Rucz, Zoltán Belső, Balázs Gáti, István Koller, Antal Turóczi
Design and Implementation of Nonlinear Control Systems
for Rotary and Fixed Wing UAVs 277

Gáti Balázs, Gausz Tamás, Jankovics István
Repülésmechanikai modellezés 300

SZERZŐK – AUTHORS

KONCZ Annamária okleveles gépészmérnök (MSc) konczannamaria@gmail.com	KONCZ Annamária Mechanical Engineer (MSc) konczannamaria@gmail.com
Dr. ROHÁCS József, PhD egyetemi tanár Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vasúti Járművek Repülőgépek és Hajók Tanszék jrohacs@vrht.bme.hu	ROHÁCS József, PhD Professor Budapest University of Technology and Economics Department of Aeronautics Naval Architecture and Railway Vehicles jrohacs@vrht.bme.hu
SZÁMEL Bence PhD hallgató Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedés- és Járműirányítási Tanszék szamel.bence@mail.bme.hu	SZÁMEL Bence PhD student Budapest University of Technology and Economics Department of Control for Transportation and Vehicle Systems szamel.bence@mail.bme.hu
Dr. SZABÓ Géza egyetemi docens Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedés- és Járműirányítási Tanszék szabo.geza@mail.bme.hu	Dr. SZABÓ Géza Associate Professor Budapest University of Technology and Economics Department of Control for Transportation and Vehicle Systems
Dr. BERA József, PhD környezetvédelmi szakértő Fonometro Bt. bera.jozsef@prosysmod.hu	BERA József, PhD expert of environmental protection Fonometro Limited partnership bera.jozsef@prosysmod.hu
Dr. POKORÁDI László, CSc egyetemi tanár Óbudai Egyetem pokoradi.laszlo@bgk.uni-obuda.hu	POKORÁDI László, CSc Professor Óbuda University pokoradi.laszlo@bgk.uni-obuda.hu
Dr. SZILÁGYI Dénes. PhD okl. gépészmérnök, repülőmérnök, főiskolai docens Nyíregyházi Főiskola szilagid@nyf.hu	SZILÁGYI Dénes. PhD mechanical eng., aerospace eng. college associate professor College of Nyíregyháza szilagid@nyf.hu
Prof. dr. SZABOLCSI Róbert tanszékvezető, egyetemi tanár Óbudai Egyetem szabolcsi.robert@bgk.uni-obuda.hu	Prof. dr. SZABOLCSI Róbert, PhD Head of Department, Professor Óbuda University szabolcsi.robert@bgk.uni-obuda.hu
Dr. BÉKÉSI Bertold alezredes, egyetemi docens Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Repülő Intézet Fedélzeti Rendszerek Tanszék bekesi.bertold@uni-nke.hu	BÉKÉSI Bertold, PhD Lieutenant Colonel, Associate Professor National University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Institute of Military Aviation Department of Aircraft Onboard Systems bekesi.bertold@uni-nke.hu

SZERZŐK – AUTHORS

Dr. SZEGEDI Péter alezredes, egyetemi docens Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Repülő Intézet Fedélzeti Rendszerek Tanszék szegedi.peter@uni-nke.hu	SZEGEDI Péter, PhD Lieutenant Colonel, Associate Professor National University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Institute of Military Aviation Department of Aircraft Onboard Systems szegedi.peter@uni-nke.hu
MADÁCSI Richárd Légiforgalmi rendszer- és eljárástervező HungaroControl Magyar Légiforgalmi Szolgálat Zrt. richard.madacsi@hungarocontrol.hu	MADÁCSI Richárd ATM system and procedure designer HungaroControl Hungarian Air Navigation Services Pte. Ltd. Co. richard.madacsi@hungarocontrol.hu
Dr. PÁSZTOR Endre professzor emeritus BME Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék epasztor@vrht.bme.hu	Dr. PÁSZTOR Endre professor emeritus BME Department of Aeronautics, Naval Architecture and Railway Vehicles epasztor@vrht.bme.hu
Dr. BENEDA Károly Tamás adjunktus BME Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék kbeneda@vrht.bme.hu	Dr. BENEDA Károly Tamás assistant professor BME Department of Aeronautics, Naval Architecture and Railway Vehicles kbeneda@vrht.bme.hu
Dr. SÁNDOR Zsolt légiforgalmi rendszertervező HungaroControl Zrt Légiforgalmi Módszertani és Koordinációs Osztály zsolt.sandor@hungarocontrol.hu	Dr. SÁNDOR Zsolt ATM System Designer ATS Operations Planning and Airport Coordination Department HungaroControl zsolt.sandor@hungarocontrol.hu
DINEVA Adrienn Ph.D. hallgató Óbudai Egyetem Alkalmazott Informatikai és Alkalmazott Matematikai Doktori Iskola Milánói Egyetem, Informatikai Doktori Iskola, Crema, Olaszország	DINEVA Adrienn Ph.D. student Óbuda University, Doctoral School of Applied Informatics and Applied Mathematics, Budapest, Hungary and Doctoral School of Computer Science, Universitá degli Studi di Milano, Crema Italy dineva.adrienn@bgk.uni-obuda.hu
R. VÁRKONYI-KÓCZY Annamária egyetemi tanár Óbudai Egyetem, Mechatronikai és Járműtechnikai Intézet Selye János Egyetem, Komárom, Szlovákia varkonyi-koczy@uni-obuda.hu	R. VÁRKONYI-KÓCZY Annamária full professor Óbuda University, Institute of Mechatronics and Vehicle Engineering, Budapest, Hungary and János Selye University, Komarno, Slovakia varkonyi-koczy@uni-obuda.hu
K. TAR József egyetemi tanár Óbudai egyetem, Neumann János Informatikai Kar tar.jozsef@uni-obuda.hu	K. TAR József full professor Óbuda University, Neumann Janos Faculty of Informatics tar.jozsef@uni-obuda.hu
SZANISZLÓ Zsolt százados, hatósági ejtőernyős Nemzeti Közlekedési Hatóság Légügyi Hivatal Állami Légügyi Főosztály szaniszlo.zsolt@nkh.gov.hu	SZANISZLÓ Zsolt (MSc) Captain authority parachutist National Transport Authority Aviation Authority State Aviation Division szaniszlo.zsolt@nkh.gov.hu

SZERZŐK – AUTHORS

Dr. ROHÁCS Dániel, PhD egyetemi docens Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vasúti Járművek Repülőgépek és Hajók Tanszék drohacs@vrht.bme.hu	ROHÁCS Dániel, PhD Associate Professor Budapest University of Technology and Economics Department of Aeronautics Naval Architecture and Railway Vehicles drohacs@vrht.bme.hu
BOZÓKI János ezredes, parancsnok MH Légijármű-javító Üzem leju.pk@mil.hu	BOZÓKI János colonel, commander Aircraft Repair Plant leju.pk@mil.hu
Dr. KAVAS László alezredes, egyetemi docens Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Repülő Intézet Repülő Sárkány-hajtómű Tanszék kavas.laszlo@uni-nke.hu	KAVAS László, PhD Lieutenant Colonel, Associate Professor National University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Institute of Military Aviation Department of Aircraft And Engine kavas.laszlo@uni-nke.hu
Dr. ÓVÁRI Gyula alezredes, egyetemi docens Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Repülő Intézet Repülő Sárkány-hajtómű Tanszék ovari.gyula@uni-nke.hu	ÓVÁRI Gyula, CSc Lieutenant Colonel, Associate Professor National University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Institute of Military Aviation Department of Aircraft And Engine ovari.gyula @uni-nke.hu
BICSÁK György egyetemi tanársegéd Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vasúti Járművek Repülőgépek és Hajók Tanszék gybicsak@vrht.bme.hu	BICSÁK György assistant lecturer Budapest University of Technology and Economics Department of Aeronautics Naval Architecture and Railway Vehicles gybicsak@vrht.bme.hu
MARKOVICS-SOMOGYI Rita támogató rendszerfejlesztő mérnök HungaroControl Zrt. rita.somogyi@hungarocontrol.hu	MARKOVICS-SOMOGYI Rita system development support engineer HungaroControl Pte. Ltd .Co rita.somogyi@hungarocontrol.hu
Dr. SISKA Miklós tudományos munkatárs KTI Közlekedéstudományi Intézet Nonprofit Kft. siska.miklos@kti.hu	Dr. SISKA Miklós researcher KTI Institute for Transport Sciences Non Profit Ltd. siska.miklos@kti.hu
BELSŐ Zoltán (MSc) tudományos segédmunkatárs Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamosmérnöki és Informatikai Kar Hálózati Rendszerek és Szolgáltatások Tanszék belso@hit.bme.hu	BELSŐ Zoltán (MSc) assistant research fellow Budapest University of Technology and Economics Faculty of Electrical Engineering and Informatics Department of Networked Systems and Services belso@hit.bme.hu
Dr. GÁTI Balázs, PhD egyetemi docens Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kar Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék bgati@vrht.bme.hu	Dr. GÁTI Balázs, PhD associate professor Budapest University of Technology and Economics Faculty of Mechanical Engineering Department of Aeronautics, Naval Architecture and Railway Vehicles bgati@vrht.bme.hu

Dr. KOLLER István (Dr. univ.) mestertanár Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamosmérnöki és Informatikai Kar Hálózati Rendszerek és Szolgáltatások Tanszék koller@hit.bme.hu	Dr. KOLLER István (Dr. univ.) assistant professor Budapest University of Technology and Economics Faculty of Electrical Engineering and Informatics Department of Networked Systems and Services koller@hit.bme.hu
Dr. RUCZ Péter, PhD tudományos segédmunkatárs Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamosmérnöki és Informatikai Kar Hálózati Rendszerek és Szolgáltatások Tanszék rucz@hit.bme.hu	Dr. RUCZ Péter, PhD assistant research fellow Budapest University of Technology and Economics Faculty of Electrical Engineering and Informatics Department of Networked Systems and Services rucz@hit.bme.hu
Dr. TURÓCZI Antal, PhD egyetemi adjunktus Óbudai Egyetem Neumann János Informatikai Kar turoczi.antal@nik.uni-obuda.hu	Dr. TURÓCZI Antal, PhD assistant professor Óbuda University Jonh von Neumann Faculty of Informatics turoczi.antal@nik.uni-obuda.hu
Dr. Gausz Tamás, PhD kutató gausz.tamas@gmail.hu	Dr. Gausz Tamás, PhD researcher gausz.tamas@gmail.hu
JANKOVICS István tanársegéd Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vasúti Járművek Repülőgépek és Hajók Tanszék ijankovics@vrht.bme.hu	JANKOVICS István Assistant professor Budapest University of Technology and Economics Department of Aeronautics Naval Architecture and Railway Vehicles ijankovics@vrht.bme.hu

Koncz Annamária

A 8D PROBLÉMAMEGOLDÓ TECHNIKA

A tanulmány a 8D problémamegoldó technikáról, és annak kapcsolatairól más minőségtechnikákkal szól. A 8D eljárás jellemzően az autóiparban használt technika, amely az elmúlt évek során nagy jelentőségre tett szert, hiszen nemcsak az autógyártó nagyvállalatok, hanem a teljes autóipari beszállító lánc alkalmazza. A 8D eljárás hiba ok kereső, és problémamegoldó módszer, amely a nevével megegyezően 8 lépésből áll. Ezek a lépések segítik a munkacsoportot a hiba szisztematikus kivizsgálásában. A dolgozat célja, hogy egyszerűsített példákon keresztül bemutassa a 8D metódust, és annak kombinálhatóságát más minőségügyi technikákkal.

Kulcsszavak: *8D eljárás, Ishikawa diagram, FMEA elemzés, Pareto-elv, minőségbiztosítás*

1. BEVEZETÉS

Napjaink autóiparában, és az ipar más területein is egyre nagyobb jelentőséget kap a minőségbiztosítás. Ez részben köszönhető az egyre nagyobb teret meghódító minőségközpontú gondolkodásmódnak, de javarészt ezt a kényszerűség okozza. Az autóiparban tevékenykedő gyártók a beépített alkatrészeket, részegységeket beszállítóktól szerzik be, ezért a nyomonkövethetőség rendkívül fontos, a minőségbiztosítás a beszállítói láncok átláthatóságát teszi lehetővé.

Ahogy Galla Jánosné munkájában bemutatja, hogy a 8D módszer szisztematikus, és analitikus gondolkodásmódot tesz lehetővé [4], úgy mutatjuk be tanulmányban pontról pontra az eljárás menetét. Annak érdekében, hogy a bizonyítsuk, a módszer széleskörűen használható, bemutatjuk Chlpeková, Večeřa és Šurinová [1] statisztikáját, a módszert használó vállalatokról.

A publikáció az alábbi fejezetektől áll: A 2. fejezet általános leírást ad a metodika használóiról, és használatáról. A 3. fejezet a 8D folyamat lépéseit írja le be részletesen, Galla Jánosné 8D Segédlete [4] alapján. Tanulmány ezt a gondolatmenetet követve mutatja be gyakorlati példákkal az egyes lépések kivitelezését (5 Miért? módszer, Ishikawa diagram, amelyet Czeglédy [2] nyomán mutatok be, Pareto-elv Vida alapján [8], etc.). A 8D eljárás szorosan beilleszthető a PDCA elv gyakorlati alkalmazásába [5]. A 4. fejezet mutatja be a 8D metódust kiegészítő egyéb minőségügyi technikákat, amelyek közül a legnagyobb jelentőséggel az FMEA bír. Az FMEA bemutatásánál Szamosi [6], és Szilágyi és szerzőtársai FMEA elemzése szolgál alapul [7], jelen tanulmány az általuk bemutatott német, VDA alapú minőségszemléletet képviseli. Az FMEA és a 8D metódus kapcsolatára mutatunk példát, egy a gyakorlatban használt szoftver segítségével.

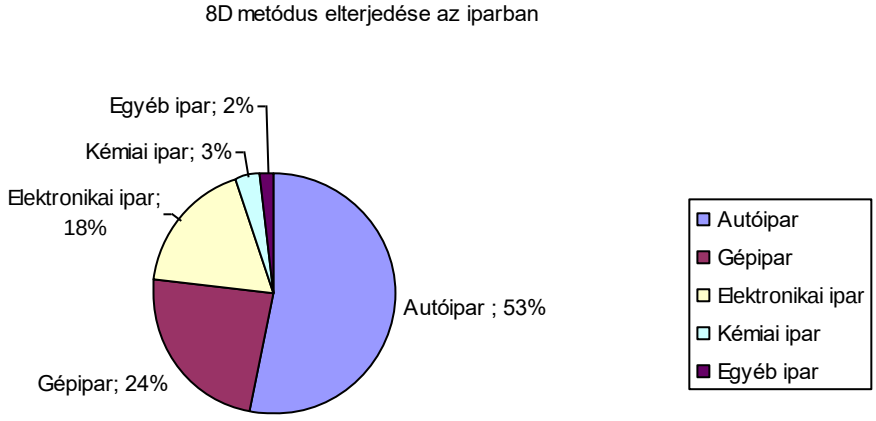
2. A 8D-RŐL ÁLTALÁBAN

A 8D eljárás egy, a gyakorlatban jól alkalmazható minőségügyi problémamegoldó technika, amelyet előszeretettel alkalmaznak az iparban, a sorozatgyártásra berendezkedett üzemekben (jellemzően az autóiparban). A módszert a Ford Motor Company fejlesztette ki. A célja az adott probléma azonnali kiküszöbölése, hosszú távú megszüntetése, azonban legfőként a probléma

gyökér okának definiálása. Az eljárás komplex, mivel számos eszközt vonultat fel a minőségügyi, gyártási problémák gyökérének feltárására.

Az eszközök a következőek lehetnek: ok-hatás diagramok, Pareto-diagramok, hisztogramok, ellenőrző kártyák, különböző grafikonok, Ishikawa-diagram, FMEA, 5 Miért? , és egyéb menedzsment módszerek.

A 8D eljárás jellemzően a nagyvállalatok, és a közepes vállalatok minőségbiztosítási rendszerének része. Párhuzam vonható az ipar fejlettsége, és a benne közreműködő vállalatok nagysága között, valamint elmondható, hogy minél komplexebb az előállított végtermék, annál több az előállításában közreműködők száma. A gépjárműgyártó nagyvállalatok számos beszállító nagyvállalatot foglalkoztatnak, ezért jellemzően ebben az iparágban magas a 8D eljárást használók száma (53%). Azonban más iparágakban is találkozhatunk a metódust felhasználó vállalatokkal. A felhasználók körében a gépipar (24%), az elektronikai ipar (18%), a kémiai ipar (3%) is képviselteti magát (1. ábra).



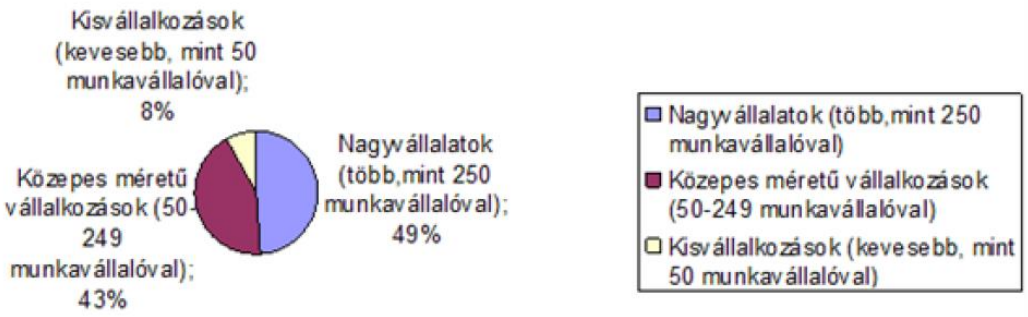
1.ábra A 8D metódus elterjedése [1]

Az elektronikai és a gépipar érintettsége annak is köszönhető, hogy beszállítóként érintettek az autóiparban. Az autóelektronikai beszállítóknak magas minőségügyi kritériumoknak kell megfelelniük. Az egyik nagyon fontos minőségügyi feltétel az azonosíthatóság, nyomon követhetőség. Mindez értendő a legkisebb részegységekre is, példaként a beültetett alkatrészekre (kondenzátorok, ellenállások, mikroprocesszorok. Ha egy vevő megreklamál egy elektronikai terméket, és a hiba kivizsgálása során a beszállító arra jut, hogy egy adott beépített alkatrész okozza a hibát, akkor be kell tudni azonosítani, hogy mely gyártott tételből (angolul lot, vagy batch) származik. Ugyanis ha a hiba az adott tételnél több alkatrésznél fellépett, akkor adott esetben termék visszahívása szükséges. A nyomon követhetőség teszi lehetővé azt, hogy tudjuk a hibás termékek számát, és fellelhetőségét.

Abban az esetben, ha a 250 főt alkalmazó vállalatokat nagyvállalatnak, az 50–249 főt alkalmazó vállalatot közepes vállalatnak, a kevesebb, mint 50 főt alkalmazó vállalatot kisvállalkozásnak tekintjük, akkor elmondható, hogy jellemzően a közepes, és a nagyvállalatok alkalmazzák a 8D eljárást.

Azonban a gyakorlat azt mutatja, hogy egyenes arányosság van az vállatok mérete és az alkalmazás valószínűsége között az érintett ipari szektorokban. Ez többek között gyakorlati szempontokra is visszavezethető.

A nagyobb, adott esetben multinacionális vállalatoknak bonyolultabb a beszállítói lánca, és számos feladatot külsős cégek végeznek el. Emiatt szükségessé válik a szisztematikus kivizsgálás egy adott minőségügyi hiba esetén (2. ábra).



2. ábra Vállalatok mérete, és a 8D használat összessége [1]

A 8D eljárás a nevéből adódóan nyolc lépésből áll:

- D1: A 8D csoport létrehozása;
- D2: A probléma leírása;
- D3: A hiba/probléma elszigetelése;
- D4: A hibát/problémát előidéző ok/okok feltárása;
- D5: A végleges hibajavító, problémamegoldó intézkedések kiválasztása;
- D6: A végleges hibajavító, problémamegoldó intézkedés(ek) megvalósítása;
- D6: A végleges hibajavító, problémamegoldó intézkedés(ek) megvalósítása;
- D7: Visszacsatolás;
- D8: A csoportmunka sikerének elismerése [4].

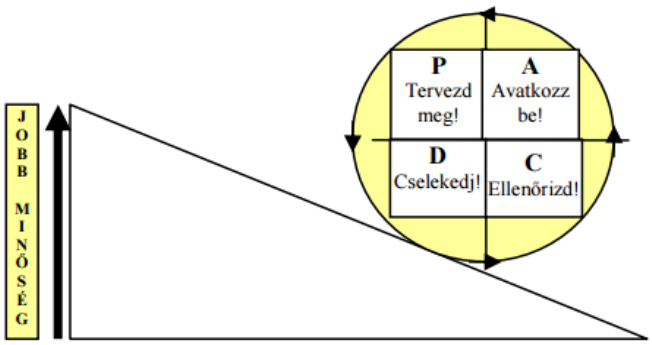
A nyolc lépés a Deming-ciklus (Plan-Do-Check-Act: Tervezd meg! – Cselekedj! – Ellenőrízd! – Avatkozz be!) szerint csoportosítható [1].

Az első csoportba a Tervezd meg! elv alapján a D1 (A 8D csoport létrehozása), és a D2 (A probléma leírása) pont tartozik.

A második csoportba tartozik a Cselekedj! elv szerint a D3 (A hiba/probléma elszigetelése), a D4 (A hibát/problémát előidéző ok/okok feltárása) és a D5(A végleges hibajavító, problémamegoldó intézkedések kiválasztása) lépés.

A harmadik csoportba az Ellenőrizd! elv szerint a D6 (A végleges hibajavító, problémamegoldó intézkedés(ek) megvalósítása) lépés tartozik.

A negyedik csoportba tartozik az Avatkozz be! elv alapján a D7 (Visszacsatolás) és a D8 (A csoportmunka sikerének elismerése) pont[1].



3.ábra A PDCA ciklus [5]

3. AZ ELJÁRÁS FOLYAMATA

A 8D folyamat elindítása előtt szükséges az adott terület minőségbiztosítási mérnökének döntése arról, hogy szükséges-e az adott hibára 8D-t „indítani”. Mivel a 8D csapathoz számos szakember kell, ezért erőforrás igényes folyamat. Ennek értelmében egy gép egyszeri meghibásodására nem célszerű 8D elemzés lefolytatása.

A 8D eljárás az autóipar elterjedt problémamegoldó metódusa, de használják a gépiparban, az elektronikai iparban, és a vegyiparban is [1].

3.1. D1: A 8D csoport létrehozása

A gyártási hiba kivizsgálása érdekében szükség van egy szakértői csapat létrehozására. A 8D csapat mindig eseti, a hiba területétől és jellegétől függően változik. Azonban minden 8D projekt esetén igaz, hogy szükséges egy projektfelelős (aki „kívülről” irányítja csapatot, támogatja a döntéshozatalt) és egy csoportvezető (aki „belülről” összefogja a csoport munkáját) a csapattagokon kívül. A csapat ideális létszáma 5–10 fő.

Egy klasszikus gyártó vállalat esetében a csapat a minőségbiztosítási mérnökből, felelős gyártómérnökből, tervezőmérnökből, vevői kapcsolattartóból, és az esettől függően más (logisztika, beszerzés, mintagyártás) területek képviselőiből áll. A hiba akkor tárható fel kellő hatékonysággal, ha sikerül egy multidiszciplináris csapatot felállítani, és minden érintett terület részt vesz az elemzésben. El kell kerülni, hogy a szerepkörökben átfedések legyenek, mivel ez lassíthatja a munkát. Ezen kívül szükséges a csapattagok szakértelmének megítélése is. Fontos, hogy a vizsgált termék/folyamat minden részt vevő számára kellően ismert legyen. A szakembereknek elég (szabad) idővel, szaktudással, jogkörrel kell rendelkezniük. Ha nincs elegendő idejük részt venni a csapatmunkában, akkor hátráltatják azt, ha nem rendelkeznek elegendő szaktudással, akkor szintúgy [4].

3.2. D2: A probléma leírása

Elsőként szükséges a gyártási folyamat, vagy gyártmány pontos leírása. A folyamatlépéseket dokumentálhatjuk fotókkal, munkautasításokkal, blokk diagramokkal. Az egyes lépésekhez hozzárendelendők a műszaki paraméterek.

A probléma pontos megértéshez szükséges a későbbiekben annak dokumentálása is, hogy a

nem-megfelelő folyamat miben tér el, az ideális, fentebb vázolt folyamattól. Számszerűsített, objektív tényekkel szükséges a probléma leírása. Ha a végtermék tulajdonságaiban, méreteiben eltérés tapasztalható akkor dokumentált mérések elvégzése szükséges.

Ebben a lépésben a probléma okával, okaival nem foglalkozik a csapat, ennek a lépésnek az a célja, hogy a problémát egy egyszerű tőmondattal definiálják [4].

3.3. D3: A hiba/probléma elszigetelése

Annak érdekében, hogy a hibát elszigeteljük (a belső-külső vevőktől, vagy a következő munkafolyamattól) azonnali intézkedéseket kell meghatározni. Az azonnali intézkedések célja nem a hiba végleges megszüntetése, hanem a hiba lokalizálása. Például, adott esetben az azonnali intézkedés lehet egy idomszeres, mérőórás ellenőrzés, a szórványos méreteltérések kiküszöbölésére, vagy a legyártott készletek leválogatása. Az ideiglenes intézkedéseket írásba szükséges foglalni, valamint a dolgozókat oktatásban kell részesíteni. Az azonnali intézkedés hatékonyságáról a végleges megelőző intézkedés bevezetéséig meg kell győződnünk.

Ezen kívül minden esetben szükséges megbizonyosodni arról, hogy az azonnali intézkedés nem okoz-e újabb problémát a gyártási folyamatban.

Az azonnali intézkedés az esetek nagy részében nem a hibaforrás megszüntetésére szolgál, hanem arra, hogy a hiba ne harapózhasson el [4].

3.4. D4: A hibát/problémát előidéző ok/okok feltárása

Ebben a lépésben a csapat tagjai megvizsgálják, hogy a tervezett folyamathoz képest valós-e a D2 lépésben leírt eltérés. Ha valós az eltérés, akkor szisztematikusan felfedik a hiba okokat [4].

A hiba okok legegyszerűbb meghatározására alkalmazhatjuk a 5Why? (5 Miért?) módszert. A módszer a következetes, ismétlődő kérdésfeltevésen alapul.

A példából látható, hogy a módszer egyszerű. A metódus a gyökér ok megtalálására való, nem intézkedések meghozatalára.

A hiba okok feltérképezésére felhasználható még az úgynevezett ok-okozat (Ishikawa) diagram [4].

Probléma: magas a selejt termékek száma	
1.Miért sok a selejt termék?	Azért, mert a félkész termékek rozsdásodnak.
2. Miért rozsdásodnak a félkész termékek?	Azért, mert a tároló dobozok nedvesek.
3. Miért nedvesek a szállítódobozok?	Azért, mert a szabadban tárolják őket.
4. Miért tárolják a szabadban őket?	Azért, mert a fedett raktárban nincs szabad hely.
5. Mért nincs hely a szabad raktárban hely?	Azért, mert túl nagy a raktárkészlet.

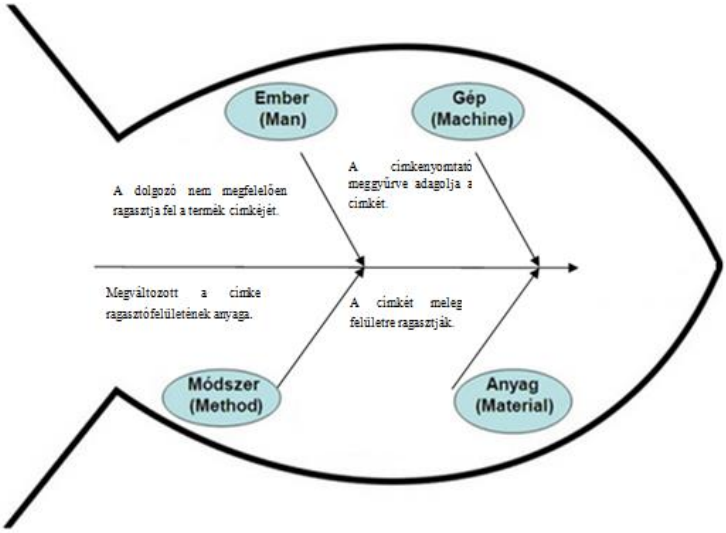
1. táblázat Példa az 5 Miért? módszer használatára

Az Ishikawa-diagram jobb oldalán, a hal „fejében” a definiált probléma áll. A hiba okait 4M, vagy 5M struktúra szerint lehet csoportosítani. A 4M struktúra a Man (ember), Machine (gép), Material (anyag), Measuring (mérés) csoportokból áll. Az 5M struktúra kiegészül még a Method (módszer) ponttal is [4]. Az Ishikawa-diagram felépítése, és az FMEA között párhuzamot vonhatunk a 4M, illetve az 5M kapcsán. Az FMEA a hiba okokat szintén négyes, vagy ötös tagolással bontja, hiszen a hibaképeket okozó hiba okok is ezekre a szintekre vezethetők vissza.

Példa az Ishikawa diagram használatára:

Probléma: A termék címkéje alatt levegő buborékok maradtak.

Okok: Emberi tényezőre visszavezethető hiba: a dolgozó nem megfelelően ragasztja fel a termék címkéjét.
Géphibára visszavezethető hiba: a címkenyomtató „meggyűrve” adagolja a címkét, amit nem lehet kisimítani.
Anyagra (alapanyagra) visszavezethető hiba: megváltozott a címke ragasztófelületének anyaga, nem tapad megfelelően a felülethez.
Módszertani hiba: a címkét meleg felületre ragasztják fel, ezért képződnek levegőbuborékok a címke alatt.



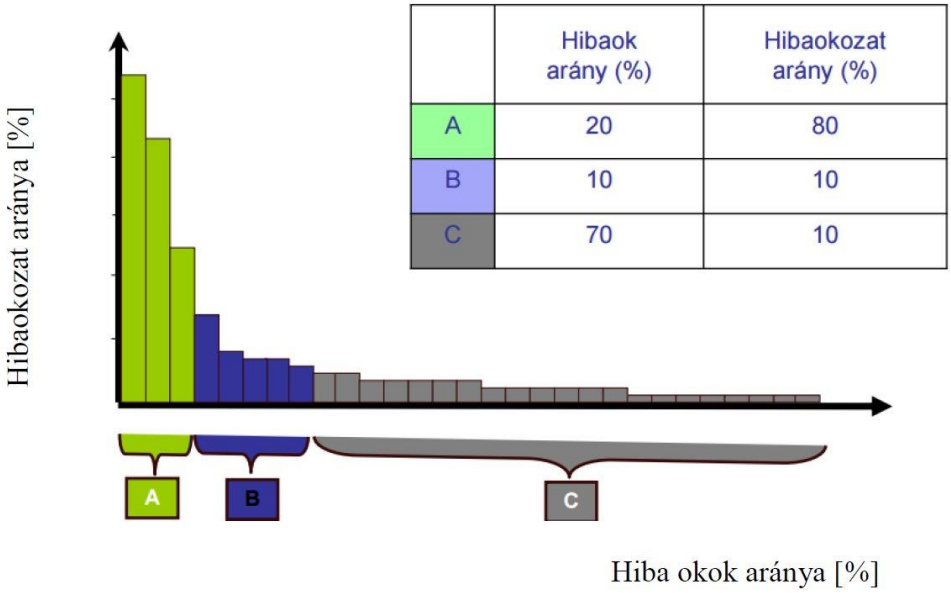
4. ábra Az Ishikawa-diagram

A módszer előnye a grafikus ábrázolás, amivel könnyen csoportosíthatók a hiba okok. Gyakorlatban a módszertani hibák megtalálása bizonyul nehezebbnek. Az Ishikawa-módszer hatékony, mivel egy hiba számos esetben több hiba okra vezethető vissza.

Egy másik jellemző technika a Pareto-elemzés. A módszer alapjául szolgáló Pareto-elv kimondja, hogy a hibák 80%-át a hiba okok 20%-át okozza. Joseph M. Juran nevezte el az elvet Vilfredo Pareto-ról, a XIX. századi közgazdászról [8].

A Pareto-elv szemléltetésére alkalmas a Pareto-diagram. A Pareto-diagram egy oszlop diagram, aminek értékei balról jobbra csökkenő értéket mutatnak. A függőleges tengelyen a hibaokozat aránya (%) kerül ábrázolásra, a vízszintesen a hiba okok aránya (%). A Pareto-diagram alkalmazható önmagában is, de lehet a P-FMEA (Process-Failure Mode and Effect Analysis: Folyamat Hibamód és Hatás Elemzés) része is. A gyakorlat azt mutatja, hogy a vevők a gyártó cégtől elvárják, hogy a P-FMEA részeként felmutassanak egy Pareto-elemzést is. A Pareto-

analízis elvégzése nem bizonyul nagy feladatnak, ugyanis az FMEA elkészítésére alkalmas eszközök („tool”-ok) alkalmasak az FMEA pontozása alapján az elemzés legenerálására is (ilyen tool többek között az IQ-RM nevű szoftver is [3]).



	Hibaok arány (%)	Hibaokozat arány (%)
A	20	80
B	10	10
C	70	10

5. ábra A Pareto-elv értelmezése Pareto-diagram segítségével [8]

Ha a D4-es lépésben definiált hiba ok még nem ismert a gyártásban, akkor átvezetésre kell kerülnie a P-FMEA-ba is. (A gyakorlatban a P-FMEA a hibaképekre összpontosít, és a hiba okokra hoz megelőző és detektáló intézkedéseket. Ez alapján elmondható, hogy egy hibaképet több hiba ok is okozhat. Példaként: ha a hibakép a sérült termék, a hiba ok lehet az, hogy egy dolgozó leejtette azt, de az is, hogy a termék a teszt berendezésre nem megfelelően csatlakozott rá, és emiatt megsérült.)

3.5. D5: A végleges hibajavító, problémamegoldó intézkedések kiválasztása

A hibaokok után meghatározásra, a kerülnek a megelőző és detektáló intézkedések, amelyek átvezetésre kerülnek a P-FMEA-ba, és adott esetben a Control Plan-ba is.

A Control Plan (Gyártásszabályozási Terv) űrlapján feltüntetendő a számszerűsíthető jellemzők mérési elve, és mérési gyakorisága.

A multidiszciplináris munkacsoportnak köszönhetően a különböző területen dolgozó kollégák javasolhatnak olyan megoldásokat, melyek már más területen beváltak.

3.6. D6: A végleges hibajavító, problémamegoldó intézkedés(ek) megvalósítása

A végleges hibajavító intézkedések bevezetése előtt az átmeneti intézkedéseket be kell szüntetni. A végleges hibajavító intézkedések hatása, csakúgy, mint az átmeneti intézkedéseké nem lehet káros a gyártási folyamatra nézve. Az intézkedéseket az összes releváns gyártási dokumentumban fel kell tüntetni (Control Plan, P-FMEA). Ha az intézkedés újabb ellenőrzés, úgy a Control Plan űrlapjára is szükséges felvenni, az ellenőrzendő dimenzió pontos meghatározása mellett.

A P-FMEA-ban lehetséges többlet információk feltüntetése is, mivel az intézkedések szétválaszthatók megelőző és detektáló intézkedésekké. Példaként: a megelőző intézkedések közé tartoznak a

különböző utasítások, az utasításokon alapuló oktatások, és a megelőző karbantartások; a detektáló intézkedések közé tartoznak a különböző villamos tesztek, optikai vizsgálatok, dolgozói átnézések.

A dolgozókat érintő változásokat fel kell vezetni a munkautasításokban, a dolgozókat oktatásban kell részesíteni a megváltozott folyamatokról [1].

3.7. D7: Visszacsatolás

A visszacsatolás a problémamegoldó folyamat hatékonyságát vizsgálja. Hibastatisztika, és állásidő információk alapján lemérhető, hogy a bevezetett intézkedés óta az adott hiba okra visszavezethető hibakép előfordult-e, és ha igen, detektálható volt-e.

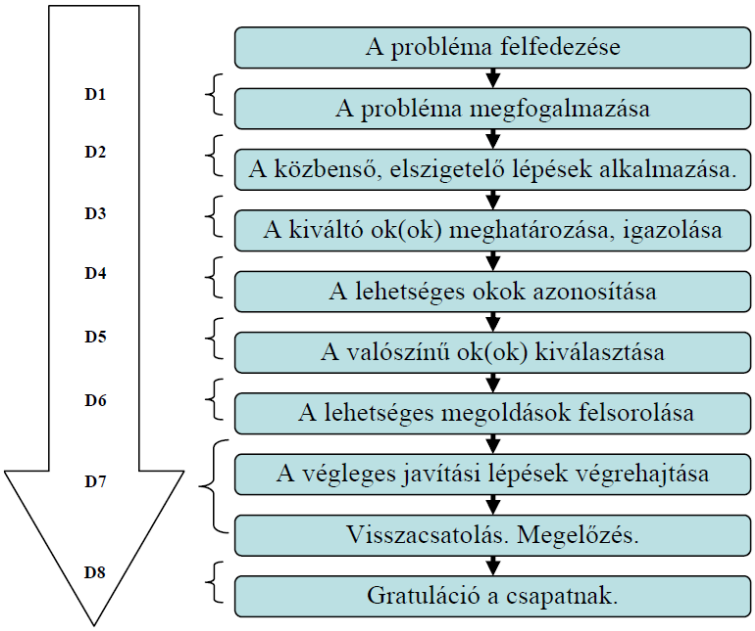
Fontos, hogy a gyártósoron dolgozó kollégák tapasztalatait is figyelembe vegyük a végleges intézkedések hatásáról, hatékonyságáról.

A visszacsatolás abban az esetben informatív, ha a gyártási dokumentálja a kieső termékeit,és a cellák, gyártósorok állásidejét.

A visszacsatolás azonban nemcsak a gyártó szervezetnek, és a belső vevőknek szól, hanem a külső vevőknek is. A vevők visszajelzést várnak a hiba okáról, de mindenekfelett arról, hogy a hiba hatékonyan, és tartósan megelőzésre került [4].

3.8. D8: A csoportmunka sikerének elismerése

A csoportmunka eredményét elismerjük, és megköszönjük a tagoknak a közreműködést. A munka végeztével feloszlatjuk a 8D csoportot [4].



6.ábra A 8D folyamat blokkdiagramja

4. A 8D KAPCSOLATA MÁS MINŐSÉGBIZTOSÍTÁSI TECHNIKÁKKAL

A tanulmány korábbi fejezeteiben érintőlegesen ejtettünk szót az FMEA-ról. Az FMEA (Failure Mode and Effect Analysis:Hibamód-és Hatás Elemzés) az Amerikai Egyesült Államokban került kifejlesztésre, a Boeing és a Martin Mariette vállalatok által. Az első kézikönyv

1957-ben jelent meg a módszer használatáról. Az FMEA-t használta a NASA is, elsőként az Apollo űrprogram keretein belül [7].

Az FMEA az autóipari többletkövetelmény rendszerek (QS9000, VDA) része. A QS9000 a Chrysler, a Ford és a GMA közös követelményrendszere. A QS9000 7.kötete foglalkozott az FMEA módszertannal. A VDA 4. kötete tartalmazza az FMEA módszertanra vonatkozó elképzeléseket [8]. A tanulmányomban a német tematika szerinti FMEA módszert mutatjuk be, amelynek az alapja a VDA.

Az FMEA-ban alkalmazott pontozásos módszer segíthet a megfelelő intézkedések meghozatalában.

A pontozás során három értéket szükséges megadni: a hibakép súlyossága (1–10-ig), a hiba ok detektálhatósága (1–10-ig), és a hiba ok gyakorisága (1–10-ig). Az FMEA szabályai szerint a legsúlyosabb hibakép 10-et, a legnehezebben felismerhető hiba ok 10-et, a leggyakoribb hiba 10-es értékelést kap. A súlyosság az S (angolul: severity), a detektálhatóság a D (angolul: detection), a gyakoriság az O (angolul: occurance) rövidítéssel szerepel az FMEA elemzések során.

A három tényező (S,O,D) szorzata adja az RPN (angolul:Risk Priority Number) értéket. Mivel az egyes tényezők maximális értéke 10, ezért az RPN maximális értéke 1000 [6].

A gyakorlatban a vevők egy FMEA audit esetén a 125 RPN-nél nagyobb pontokat kérik kilistázni. Mivel az RPN három tényező szorzatából áll, ezért a legmagasabbra értékelt pontok között találhatók a legsúlyosabb következményekkel járók, illetve azok, amelyek nehezen detektálhatók. Abban az esetben, ha egy vevői reklamáció kivizsgálása 8D folyamat végrehajtásával járt, úgy fontos, hogy a Folyamat FMEA-ba átvezethetők legyenek a végrehozott intézkedések. A 7. ábrán egy hibaháló látható, a korábbi Ishikawa példa nyomán.

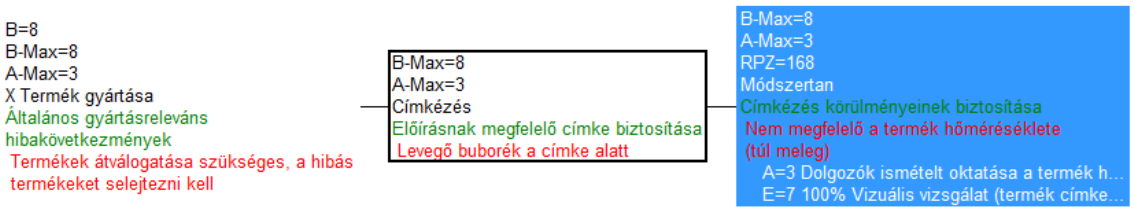
Hiba következménye: Temékek átválogatása szükséges, a hibás termékeket selejtezni kell. B=8

Hibakép: Levegő buborék a címke alatt

Hibaok (módszer): Nem megfelelő a termék hőmérséklete (túl meleg)

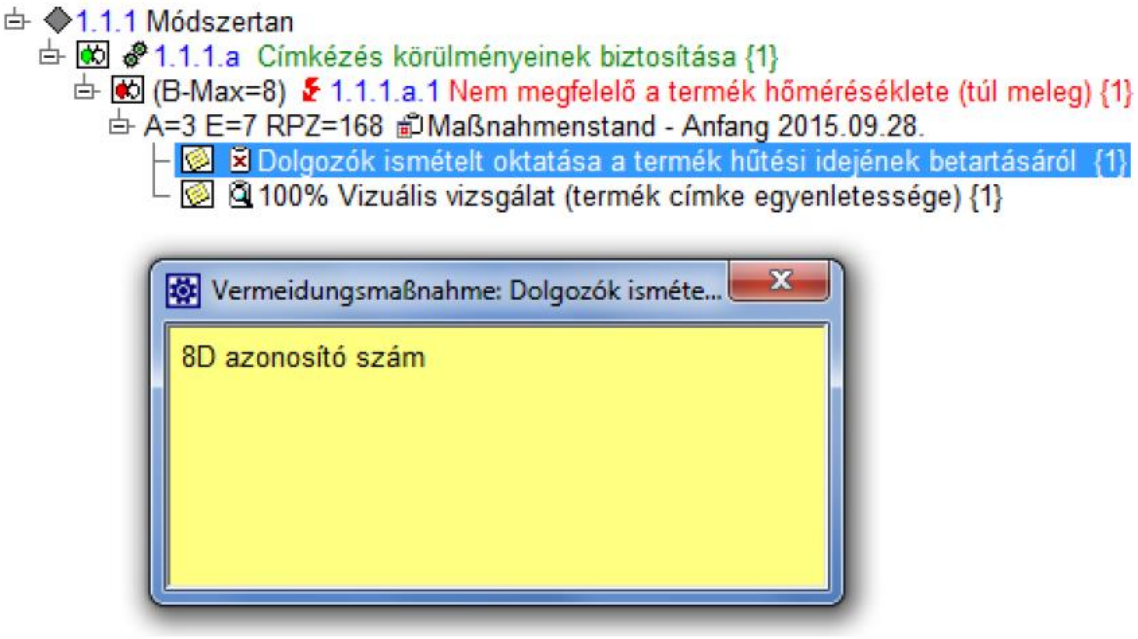
Megelőző intézkedés: Dolgozók ismételt oktatása a termék helyes felcímkézéséről. A=3

Detektáló intézkedés: 100% vizuális vizsgálat szükséges (termék címke megfelelősége az előírás alapján) E=7



7.ábra FMEA hibaháló (az Ishikawa példa alapján)

A 7. ábrán látható hibaháló az IQ-RM szoftver segítségével készült. A szoftver segítségével az FMEA elemzések űrlap formátumban, és a fent látható hibahálóban is elrendezhetők.



8.ábra 8D intézkedések feltüntetése az FMEA-ban

A 8. ábrán látható, hogy a 8D intézkedések az azonosító számukkal együtt feljegyezhetők megjegyzésként az elemzésben.

Így visszakövethető, hogy mely új hiba okok vezettek vevői reklamációhoz, és azok megelőzésére, és felismerésére milyen intézkedések születtek.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A tanulmány bemutatta a 8D eljárás jelentőségét, és alkalmazhatóságát az autóipari beszállító láncban. Abban az esetben látható át, üzemeltethető hatékonyan és fejleszthető egy minőségbiztosítási rendszer, ha annak alkotó elemei egymással szerves egészet alkotnak. A 8D metódus eszközei szintén minőségbiztosítási technikák (5 Miért?, Ishikawa diagram, Pareto-elemzés). A legfontosabb összefüggés a 8D és az FMEA között mutatható ki, hiszen a 8D problémák, és intézkedések a Folyamat FMEA fejlesztésére használhatók, ahogy ezt munkámban szemléltettem. A Szerző tervei között szerepel a 8D eljárás fejlesztési lehetőségeinek vizsgálata, és az FMEA elemzések módszertanának továbbfejlesztése.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] CHLPEKOVÁ, A,VEČEŘA, P., ŠURINOVÁ Y.: Enhancing the Effectiveness of Problem-Solving Processes through Employee Motivation and Involvement, International Journal of Engineering Business Management, http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/48081.pdf

[2] CZEGLÉDI LÁSZLÓ: Minőségmenedzsment, Eszterházy Károly Főiskola, http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0005_42_minosegmenedzsment_scorm_06/635_ishikawadiagram.html (2011)

[3] Dedicated risk analysis / FMEA software, http://www.fmea.co.uk/APIS_FMEA_software.html (2015.10.25)

[4] GALLA JÁNOSNÉ:8D segédlet, Óbudai Egyetem, Minőségbiztosítási Szakmérnök szakképzés (2012)

[5] HORVÁTHNÉ HOSZPODÁR KATALIN: A MINŐSÉG fokozódó szerepe a vállalatok piaci érvényesülésében, http://real.mtak.hu/18073/1/Faipar_55_12_7.pdf

[6] SZAMOSI BARNA, POKORÁDI LÁSZLÓ: Az interszubjektív tudás hatása az FMEA elemzésre, Műszaki tudományos közlemények 3. XX. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, 2015. Kolozsvár, pp. 275–278.

[7] SZILÁGYI GÁBOR, LUKÁCS KRISZTIÁN, SZAMOSI BARNA, POKORÁDI LÁSZLÓ: A QS 9000 és a VDA szerinti Hibamód és hatáselemzések összehasonlítása, Repüléstudományi Közlemények Különszám 2014. (e-dok.) url: http://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2014_cikkek/2014-2-33-0115_Szilagyi_Gabor_et_al.pdf

[8] VIDA CSABA: Vállalatirányítás IV, Pollack Mihály Műszaki Főiskolai Kar, ftp://witch.pmmf.hu:2001/Tanszeki_anyagok/Mernoki%20Menedzsment%20Tanszek/Oktatasi%20anyagok/Vallalatiranyitas/vallalatiranyitas_4.pdf, (2000)

THE 8D PROBLEM SOLVING METHOD

The aim of this paper is to introduce the 8D method and to point out its connections to other quality management tools. 8D is mainly used at the automotive industry and it became very popular in the last decade. It gained its popularity because not just the multinational car producers, but the whole automotive supply chain is using it. The method is used for tracing root causes and for solving problems. According to its name this quality process consists of 8 steps. These steps aid the work team to systematically analyze the failures. This paper introduces the method with simplified examples and points out its variability with other quality techniques.

Keywords: *8D method, Ishikawa diagram, FMEA, Pareto analysis, quality management*

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_3/2015-3-01-0227_Koncz_Annamaria.pdf

Rohács József

GONDOLATOK, HÁTTÉRANYAGOK A REPÜLÉS, REPÜLŐIPAR STRATÉGIAI SZEREPÉRŐL

A modern gazdaság alapvetően függ a tudás-alapú, csúcstechnológiák elérhetőségétől. E megoldások első számú forrása az űrkutatás, a repülőipar és a repülés, mely korszakváltás előtt áll. A gazdaság fejlesztésének stratégiai kérdése, hogyan lehet hozzáférni a csúcstechnológia forrásokhoz, miként tudják a gazdaság szereplői a tudás alapú csúcstechnológiákat értékelni, átvenni és alkalmazni. Nem véletlen, hogy a gyorsan fejlődő országok kiemelten kezelik a repülés és a repülőipar fejlesztését. Ez a rövid tanulmány a magyar repüléstudomány, repülőipar és repülés stratégiai fejlesztéséhez szeretne néhány fontos gondolattal, háttéranyaggal hozzájárulni.

Kulcsszavak: *repülés, repülőipar, gazdaságfejlesztés, iparfejlesztési stratégia, fejlesztési stratégia*

BEVEZETŐ

Lassan mindenki számára világos lesz, mit veszített a magyar túrizmus, a magyar gazdaság a MALÉV csődjével. Ennél is nagyobb baj az, hogy egy ország gazdasági szintje, gazdasági vitalitása súlyosan csökken, ha az ország nem építi ki a csúcstechnológiai forrásokhoz való csatlakozását, nem biztosítja a gazdaság szereplőinek a hozzáférését a ahhoz.

Ma az űrkutatás, a repülőipar, a repülés a csúcstechnológia fejlesztések első számú terepe és forrása, ezen belül a repülőiparé, – a repüléssel együtt – a harmadik korszakváltása előtt áll. A repülés története ugyanis két „S" görbével irható le [1][2][3]. Az első a géprepülés megjelenése és elterjedése, a kezdeti időszak; a második a polgári légiközlekedés, a kereskedelmi repülés kialakulása és kiteljesedése volt. A következő időszakot a radikálisan új technológiák, forradalmian új megoldások fogják jellemezni. Aki nem kapcsolódik be ezekbe a fejlesztésekbe, aki nem építi ki az új technológiákhoz a hozzáférését, az nyugodtan kijelentheti, a bozótlakók, szintjén szeretne élni. (Ma ugyan divatos a 10−12 ezer évvel ezelőtt élt emberek vélt étkezését követő un. paleo diéta, – bár senki nem tudja pontosan hogyan befolyásolta őseink élethosszát a „kezdetleges diéta" – de az biztos, harmadannyit éltek, mint mi.)

A repülőipar gyors fejlesztése igen komoly, összetett és nehéz feladat, hiszen az oktatástól a kutatás-fejlesztésen át a gyártásig, alkalmazásig terjed. Nem szabad azonban megijedni. Egy kis országnak, mint Magyarországnak, nem kell a meglévő repülőgépek helyett jobbat és hatékonyabbat kifejleszteni és gyártani. Az Airbus több, mint 120 ezer alkatrészt szerez be a beszállítóktól, akik száma elvileg csak néhány ezer, de nekik is vannak beszállítóik, és a "végén" mintegy 18 ezer vállalkozás működik közvetetten közre az Airbus nagyszerű légijárműveinek elkészítésében. Kezdetben elég egy ilyen nagyobb klubba bekerülni.

A megújulás a mobilitás növelésével, a személyes repülés megjelenésével az igény szerinti kiszolgálással a légi közlekedés egy új szintre lép, melyben a kisebb szereplőknek is új lehetőségek nyílnak, pl. az új műszerek, kialakításában, a kisrepülőgépek, valamint az infrastrukturális fejlesztésben. A lényeg, hogy a csúcstechnológia forráshoz kapcsolódva a teljes gazdaság teljesítménye az

utóbbi, a tudás-alapú megoldások függvényében értékelhető, tervezhető és fejleszthető. Ismerni kell a haladás útjait, eredményeit, azok alkalmazhatóságát a gazdaság minden területén.

A csúcstechnológia fejlesztési irányok és eredmények pontosabb ismerete jelentősen növelheti a gazdaság minden szektorának az eredményeit. Így közvetlen hatással lehet pl. a autóipari kutatásokra fejlesztésekre elköltött milliárdok eredményesebb felhasználására is.

Ez a tanulmány a magyar repüléstudomány, repülőipar és repülés stratégiai fejlesztéséhez szeretne néhány fontos gondolattal háttéranyaggal hozzájárulni: adalékot nyújtani olyan meghatározó kérdések megválaszolásához, hogy miért, mikor, hogyan, mivel, kikkel együttműködve, stb. léphetünk előre a magyar gazdaság e szektorának fellendítésében. (Természetesen – a gazdaság valamennyi más területéhez hasonlóan, a nemzetközi gyakorlatnak megfelelően – a fejlesztés stratégiáját itt sem egy személy, egy vállat határozza meg, hanem a szektor szereplőinek kell kidolgoznia azt, az összes résztvevő és a gazdaság érdekeinek megfelelően.)

1. EGY KIS TÖRTÉNELEM

A magyar repülések történetéről az első hiteles feljegyzések 1770-ból származnak [4], amikor Nyitra püspökének a rendelkezése nyomán Szepes-Béla piacán „nagy tömegek durva röheje és hangos kiáltozásai közepette" elégették az „ördög szekerét", mellyel Ciprián Jaisge fráter sikeres repüléseket hajtott végre (legalábbis a jelek szerint túlélte a kísérleteit).

A magyar repülés bölcsőjét Rákosmezőn ringatták. Az első magyar építésű repülőgép, az Adorján János által épített Libelle először 1909 december 9-én repült.

A József Nádor Egyetem Egyetemi Tanácsa – már a repülés úttörőinek a megjelenésekor – külön foglalkozott a repüléssel, mint új tudományos technológiai lehetőséggel és felkérte Bánki professzort, hogy előadásain foglalkozzon a repülés elméletével [3][5]. Az 1910/11-es tanév – először a magyar felsőoktatás történetében, és a világon is az elsők közt – ő tartott repüléselméleti előadásokat. Az egyik, világhírűvé vált tanítványa volt – az amerikaiak által a repülés atyjának nevezett – Kármán Tódor is.

A korabeli magyar vezetők is értették, milyen fontos, hogy országunk a technológiai fejlődés élbolyához tartozzon. 1911-ben a kereskedelmi miniszter ösztöndíjjal Franciaországba küldte Zsélyi Aladárt és Székely Bertalant, hogy tanulmányozzák a repülést. Zsélyi, Melczer Tíborral már 1912-ben megtervezi egy 500 LE-s, 34 utas szállítására alkalmas repülőgépet, melyet Aerobusznak neveztek el. (Kár, hogy abban az időben nem volt szokás a név levédése.) Zsélyi új technológiák iránti érdeklődését mutatta, hogy 1912/13-ban már gázturbinákkal kísérletezett.

Bleriot budapesti sikeres repülési bemutatói után hirtelen megnőtt a nagyszerű és lelkes magyar repülők eredményei iránti érdeklődés. A fejlődésre jellemzően, az I. világháború idején a monarchia magyar területén már 3 repülőgépgyárban mintegy 5 ezer ember dolgozott. Ezzel jelentős szakmai tudás, csúcstechnológiai ismeret halmozódott fel a korabeli Magyarországon.

A magyar emberek többségének Trianon egy fájó seb: egyik napról a másikra sok, sok testvér rekedt a haza óvó falain kívül. A szerződést ránk erőltetők „kiváló munkát" végeztek, hosszú időre semlegesítettek egy, az Európa közepét uraló, tehetséges, „titkos" nyelvet beszélő, „önfejű"

országot. Elvitték a bányavidéket (a természeti erőforrást), tönkretették a közlekedési, szállítási infrastruktúrát (a körvasút mentén rajzolták meg a határokat és azóta is a magyar közlekedés fővárosközpontú), elvettek egy sor a kulturális és tudásközpontot (színházakat, egyetemeket is fenntartó városokat), és felszámolták a csúcstechnológiai ágazatot, a repülőipart és a repülést.

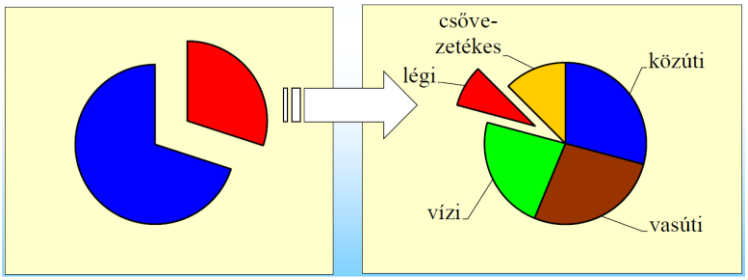
A fejlődést azonban nem lehet megállítani. lelkes fiatalok a műegyetemen már 1921-ben megalapították a Műegyetemi Sportrepülő Egyesületet (MSrE), mely sok magyar híres repülőgép-tervezőt és vezetőt adott a társadalomnak. A műegyetem és támogatóik sikereként 1934–35-ös tanévben megalakulhatott az első repüléssel foglalkozó tanszék Magyarországon. A titkos légügy, következetes és a mostani innovációs elképzelések kidolgozásához is támpontot adó fejlesztési elveket követve sikeresen megújította a magyar repülőipart. A II. világháború után a ennek alapjain teljesedhetett ki a magyar járműgyártás. Az ötvenes években a műegyetemen már öt tanszék foglalkozott a repüléstudomány különböző területeivel. Aztán jött 1956 az „önkéntes technológiai Trianonnal" [3]. Sikeresen minden oktatási és repülőipari bázist felszámoltak. (Az 1960-as évek végére már „hullottak" is a Malév gépei.) Ennek ellenére ezt a „nagyszerű" örökséget a rendszerváltás után, a mai napig nem sikerült ledolgozni. Különösen így van ez a „fejekben". Sokan gondolják még ma is, nincs repülőipar, nem kell fejleszteni az ágazatot. (Ne felejtsük el a Trabantot és Mercédeszt ugyanazok a németek gyártották, csak eltérő társadalmi, gazdasági rendszerekben.)

A magyar emberek kreatívak, vállalkozó szelleműek, keresik a kihívásokat, szeretik az új megoldásokat és az elsők közt foglalkoznak a tudásalapú és a radikálisan új technológiák fejlesztésével.
Számukra talán a támogatásnál is többet jelentene, ha korlátozások lebontása.

2. A REPÜLÉS SZEREPE A GAZDASÁGBAN

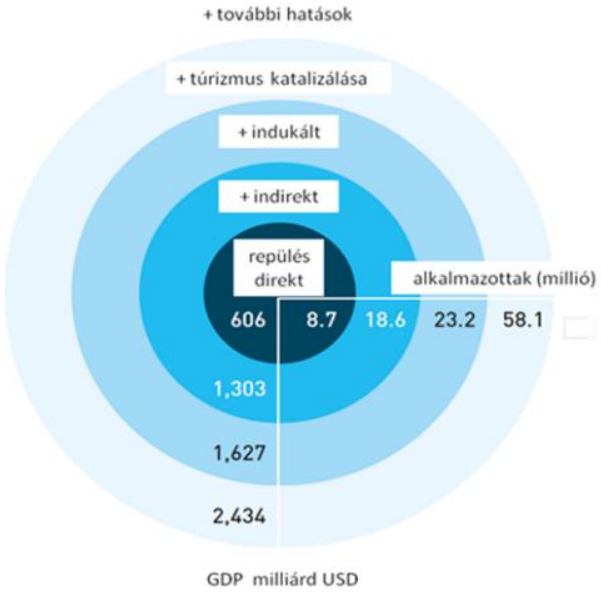
2.1. A repülés jelentősége

Nemzetközi adatok alapján, bármely termék árából a közlekedés, szállítás költsége mintegy 30%-ot tesz ki (köszönhetően az alapanyagok, félkész-termékek, alkatrészek késztermékek szállításának, elosztásának). Ebből, a légiközlekedés 10–12%-kal részesül (1. ábra). (A magyar adatok is ehhez hasonló helyzetet tükröznek. A lényeges különbség csak az olcsó, környezetkímélő vízi közlekedés részarányában van, ami sajnálatosan - még a magyar folyóviszonyok korlátozott képességeihez képest is – kisebb a kelleténél.)



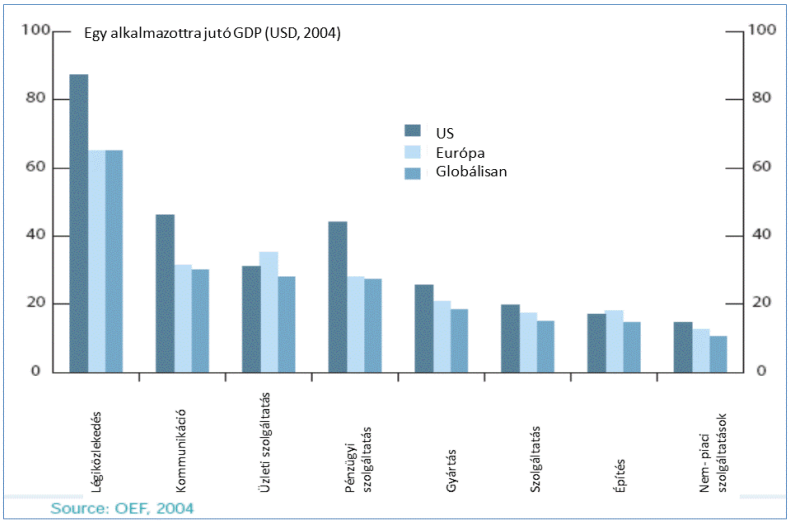
1. ábra A közlekedés és a légiközlekedés szerepe a gazdaságban [6]

A polgári légiközlekedés 2013-ban globálisan 3,1 milliárd utast szállított, a közel 50 ezer légijáraton végrehajtott 37,4 millió repülés során [7]. Közben a légiközlekedés 49,2 millió tonna árút is továbbított, ami a világkereskedelemben továbbított árú alig 5%-a, de értékét tekintve már 35%-a [7]. Ezt a nagyszerű teljesítményt 1397 kereskedelmi légiközlekedési vállalat, 3864 repülőteret alkalmazva, 173 navigációs szerviz támogatásával és 25332 repülőgéppel érte el [7]. A légiközlekedés minden közvetlen és közvetett hatását figyelembe véve összesen 58,1 millió embernek ad jól fizetett munkát (2. ábra) és megtermeli a globális GDP 3,4%-át. Ráadásul ez a hatás folyamatosan nő. 2004-ben a légiközlekedés globálisan mindössze 29 millió közvetlen és közvetetten foglalkoztatottal a GDP-nek csak a 2,4 %-át érte el [8]



2. ábra A légiközlekedés globális hatása a gazdaságra [7]

A légiközlekedés egyébként a leginkább tőkeintenzív ágazat (3. ábra), mivel a tudomány és a technológia legújabb eredményeit használja, gyorsan alkalmazkodik a változásokhoz és a résztvevő munkaerő is rendkívül képzett. A légiközlekedés egy alkalmazottra kitermelt GDP/év értéke mintegy három és félszer haladja meg a többi ágazat átlagértékét [8].



3. ábra Egyes gazdasági ágazatok egy alkalmazottra jutó GDP termelése, azaz tőkeintenzitása(ezer USD/év) [7]

A légiközlekedés másik előnye a többi ágazattal szemben, hogy a piaca évente 6–9%-kal bővül. E töretlen fejlődést látszólag megakasztják az olyan súlyos események, mint a 9/11-es terrortámadás, vagy az ázsiai madárinfluenza, de ezek hatása nem tartós, és a folyamatosan alkalmazott új megoldásoknak a légiközlekedési rendszer átalakulásának köszönhetően a növekedés mindig visszatér a 6–9%-os szinthez [9].

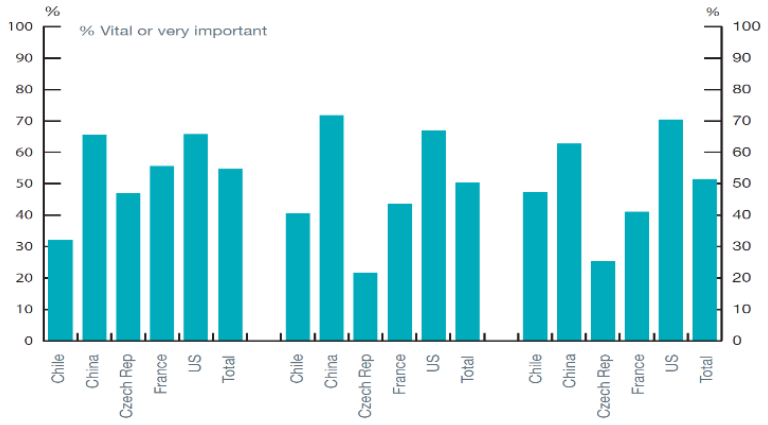
A légiközlekedés a gazdaság szerves része: a légi szállítás minden termék árában átlagosan 4%-ot tesz ki és dinamikusan növekszik.
A légi közlekedés a leginkább tőkeintenzív ágazat, azaz, az egy alkalmazottra jutó GDP „termelése" a legmagasabb, mivel a tudomány és a technológia legújabb eredményeit használja, gyorsan alkalmazkodik a változásokhoz és a munkaerő rendkívül képzett.
A repülőipar magyar emberek kreatívak, vállalkozó szelleműek, keresik a kihívásokat, szeretik az új megoldásokat és az elsők közt foglalkoznak a tudásalapú és a radikálisan új technológiák fejlesztésével.
Számukra talán a támogatásnál is többet jelentene, ha korlátozásokat lebontása.

2.2. A légiközlekedés hatása a gazdaságra

A felmérések szerint a légiközlekedésnek közvetlen hatása van a többi gazdasági ágazatra. A vállalkozások mintegy 40–70%-a kapcsolódik valamilyen formában a repüléshez, többek közt a szállítási kapacitás igénybevételével, a menedzsment gyakori utazásával, vagy éppen a vállalkozás (pl. szálloda) vevőinek az utazásaival. A vállalkozások vezetői szerint mindenesetre ilyen mértékben befolyásolja a vállalkozásuk (termelési) hatékonyságát a légi-közlekedés (4. ábra).

A légiközlekedés közvetlen segíti a vállalkozásokat, mivel

- bekapcsolja őket a globális kereskedelmi rendszerbe, lehetővé teszi a nemzetközi piacok elérését, és a részvételt a globális termelési rendszerben;
- hozzájárul a termelékenység, a globális kutatás-fejlesztés, az innováció és az üzleti tevékenység hatékonyságának a növeléséhez, lehetővé téve, hogy a vállalkozások hozzáférjenek a legjobb, magasan képezett, fegyelmezett és minőségi munkát végző humán erőforráshoz;
- támogatja a gyorsan növekvő turizmust és a hozzá kapcsolódó szolgáltatások fejlesztését, mely a modern világunkban egyúttal a globális gazdasági fejlődésének is alapja.



4. ábra Azon vállalkozások aránya, melyek szerint a légiközlekedés nagyon fontos, vitális eleme a hatékonyságuknak [8]

Az előzőeket jól mutatja, hogy a légiközlekedés közvetlen hatással van a befektetésekre és az innovációra. A vizsgálatok szerint az Európában befektető vállalkozások 52%-a tartja fontosnak a nemzetközi közlekedés meglétét és fejlettségét [8]. Ezen belül kiemelten kezelik a légi szállítás lehetőségét is.

A légiközlekedés – a vázolt hatások alapján – a gazdaság katalizátoraként működik. Közismert, hogy az autópályák mellett a gazdaság fellendül. A repülés a repülőterek környezetében – különösen - a regionális repülőterek környékén az autópályákhoz hasonlóan segíti a gazdaság fejlődését [6]. A nagyobb hatótávolságú és a nemzetközi repülés hatása ennél is jelentősebb. Nélküle nehezen képzelhető el a globális gazdaság. Egyfelől a félkész és a kész termékek ár/tömeg aránya egyre nő, ezért azok szállítása repülőgépekkel is gazdaságos. Másfelől az új technológiák élettartama eléggé kicsi, ezért a szállításukat repülőgépekkel kell megoldani. A számítógépek, vagy a mobil telefonok, informatikai eszközök ára lényegében fél – egy év alatt akár felére esik vissza. Nem lehet megengedni, hogy a termék többhetes hajóút során vándoroljon az egyik kontinensről a másikra. Az ezredfordulón a világkereskedelem érték szerinti harmadát, már légi úton szállították [10]. Az Egyesült Államok esetében ez azt jelenti, hogy az import harmada, az export fele már ma is repülőgépekkel érkezik [11].

A légiközlekedés gazdaságra gyakorolt hatásait egy 2006-ban készült felmérés [12] többek közt a következőkkel jellemezte:

- a nemzetközi légiközlekedésben a járatok számának a 10%-os emelkedésével együtt, a nemzetközi nagyvállalatok (regionális) központjaiban az alkalmazottak száma 4%-kal nő (sőt tudás-intenzív vállalkozásoknál ez az érték elérheti akár 8–12%-ot is),
- 2003-ban Kenya 50 ezer tonna virágot exportált légi úton,
- 2011-re Egyiptomban a túrizmusból származó bevételek elérték a GDP 12%-át, ami 2005-höz képest további 260 000 új munkahely megjelenését eredményezte.

A légiközlekedés és a gazdaság kapcsolatát Európában az 1. táblázat adatai jellemzik.

	Alkalmazottak		GDP (millió USD)	
	Direkt	Total (direkt, indirekt, indukált)	Direkt	Total (direkt, indirekt, indukált)
Repülőterek	156 000	409 500	17 542	46 048
Más repülőtéri munkák	308 141	808 869	13 399	35 171
Légiközlekedési vállalatok	748 070	1 963 683	52 724	138 400
Repülő- és űripar	313 978	1 020 428	34 349	111 633
Összesen	1 526 189	4 202 480	118 014	331 252

1. táblázat A légiközlekedés hatása az európai gazdaságban (2006 évi adatok [7])

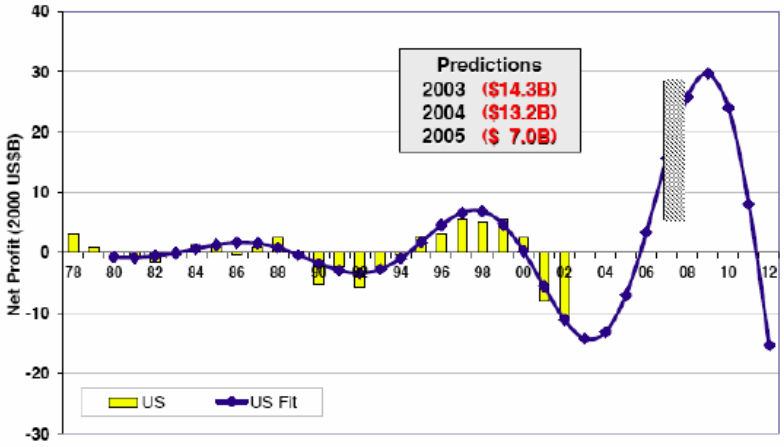
A légiközlekedés és a gazdaság kapcsolatát eléggé bonyolult számszerűsíteni. Az általánosan alkalmazott és elfogadott modell az egyes szektorok, ágazatok közötti belső kölcsönhatásokkal számolva az utasforgalomra és a teherszállításra önálló egyenletekkel dolgozik.

A légiközlekedés, a légi szállítás közvetlen, vagy közvetett úton az áruk és emberek szabad mozgását biztosítva a fejlett és a gyorsan fejlődő országok (pl. Kína) esetében a vállalkozások több, mint felének jelentősen befolyásolja az eredményességét.
A légiközlekedés diverzifikálása katalizátorként hat a regionális és térségi fejlesztésekre, bekapcsolva a területeke a tudásalapú és csúcstechnológiai fejlesztésekbe.

2.3. A légiközlekedés sajátosságai

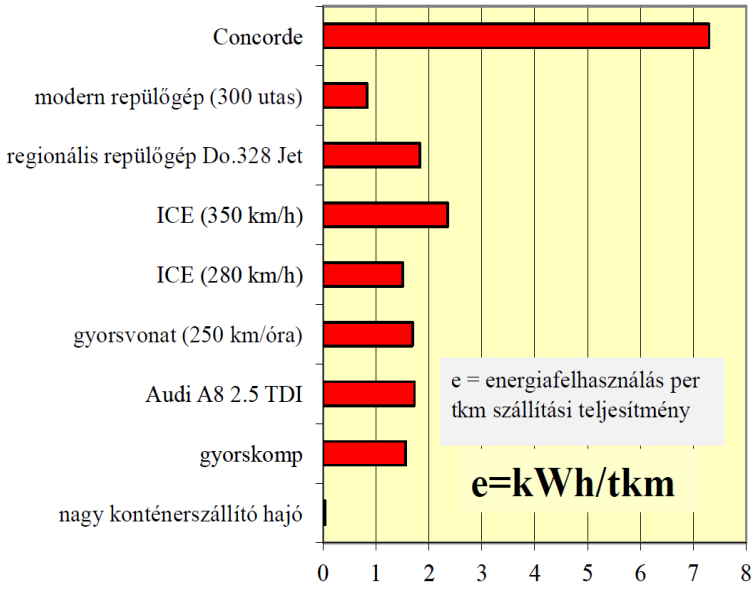
Egyes területeken a légiközlekedés jelentősen eltér a többi gazdasági szektor működésétől. Az egyik legjelentősebb sajátosságot az MIT (Massachusetts Institute of Technology) mutatta ki. (5. ábra). Azt észlelték, hogy a légitársaságok profit termelése ciklikusan, egyre nagyobb amplitúdóval változik [9], míg a légiközlekedéshez kapcsolódó többi vállalkozás (repülőgép-gyártás, karbantartás, légi szállítmányozás, repülőterek) gazdaságosan működik, működhet.

A légiközlekedés másik fontos sajátossága, hogy a GDP növekedése fokozottan növeli a légiközlekedés iránti igényt. Általában elmondható, hogy a GDP 1%-os növekedése a légi utasszállításban mintegy 2%-os, a teherszállításban pedig majd 3%-os növekedést generál.



5. ábra Az MIT által felfedezett periodicitás a légiközlekedési vállalatok profittermelő képességében [9]

A légiközlekedést igénybe vevők többsége tisztában van azzal, hogy a szállítási teljesítményre (utaskm-re) vetítve a repülés a legbiztonságosabb közlekedési eszköz. Sajnos ezen utasok többsége valamiért úgy gondolja, hogy egyben a légiközlekedés egy rendkívül környezetszennyező ágazat. Nos, a valóság ennek pontosan asz ellentéte. Egyfelől a repülőgépek üzemanyag-felhasználása, környezetterhelése minden évtizedben 10–15%-kal csökken. A fajlagos energetikai mutató, vagyis az egységnyi szállítási teljesítményre jutó energiafelhasználás (6. ábra) szempontjából a repülőgépek nemcsak felveszik a versenyt a többi közlekedési ágazattal, de a közúti és a vasúti közlekedésnél kedvezőbbek is [14].



6. ábra A különböző közlekedési eszközök fajlagos energetikai mutatói [14]

Különösen figyelemre méltó, hogy már az 1990-es évek közepén végzett vizsgálatok szerint is a nagysebességű vasúti szállítás energetikai hatékonysága mennyire elmarad egy korszerű repülőgép hasonló mutatóitól. A légiközlekedés további fontos előnyei, hogy részére kell a legkevesebb földterületet kivonni a hasznosításból, de még a repülőterek építésére felhasznált anyagmennyiség is kisebb, mint a többi közlekedési infrastruktúra esetén.

Mindezek alapján a légiközlekedés nemcsak biztonságos, hatékony, – a legnagyobb utazó sebességű szállítóeszközt alkalmazva – de egyben fenntartható is.

A légiközlekedés (és a repülőipar is), mint ágazat egy sor sajátosságot mutat, mind a profittermelés ingadozása, a hatékonyság, mind a ma már társadalmi szinten megjelenő új kihívások (védelem, ajtótól - ajtóig utazás hatékonysága, környezetterhelés csökkentése, fenntarthatóság) terén.
Megállapítható, hogy a légiközlekedés és a repülőipar már ma is az átlagosnál jobban megfelel a kihívásoknak, eredményesebben oldja meg az újonnan jelentkező feladatokat, mint a többi a csúcstechnológiák alkalmazásától „kissé távolabb" álló ágazatok.
A gazdaság fejlődése közvetlen növeli a légiszállítás iránti igényt, mégpedig a GDP 1%-os növelése a nemzetközi gyakorlatban 2–3%-os légiközlekedési igény növekedést generál.

3. A REPÜLŐIPAR ÉS A LÉGIKÖZLEKEDÉS FEJLŐDÉSI IRÁNYAI

3.1 A repülés problémái

Ma a repülés egy sor kihívással, megoldandó problémával küzd. Közülük is kiemelkednek az ár-konfliktus, a biztonság, a kapacitás problémái. Nem lehet megfeledkezni az olyan kihívásokról sem, mint a repülésvédelem, a környezeti terhelés növekedése, a technológiai fejlődés felgyorsulása, a szertifikációs idő csökkentésének szükségessége, vagy a szakemberképzés.

Mivel a repülés közvetlen kapcsolódik annak katonai területéhez is, ezért az ár-konfliktus, vagy más néven az árrobbanás talán a legérzékenyebb probléma.

Ma a költségek csökkentése határozza meg egy vállalkozás fejlesztési lehetőségeit. Az elemzések egyik érdekes és fontos területe a várható költségek becslése. A repülőgépeket a gyártók egyre több és fejlettebb rendszerrel, felszereléssel látják el. Ezek a repülőeszközök ténylegesen jóval többet tudnak az elődeiknél, de lényegesen drágábbak is. Megfigyelhető a repülőgépárak exponenciális emelkedése. Pontosan ez az árrobbanás jelenti az első problémát. A repülőgépek beszerzési költségeinek várható alakulására egy amerikai projekt hívta fel a figyelmet [15], melynek korabeli előrejelzése szerint az amerikai hadsereg éves költségvetése 2060 körül, az amerikai GNP 2140 körül, éves szinten meg fog egyezni egy stratégiai bombázó repülőgép árával, ha a jelenlegi fejlődési tendencia marad meg. Nem véletlen, hogy az amerikai kormány a jelenség felismerése után a többfunkciós F-16-osok leváltására készített JSF (Join Strike Fighter) repülőgépek árát a tervezés - fejlesztés időszakában már maximálta.

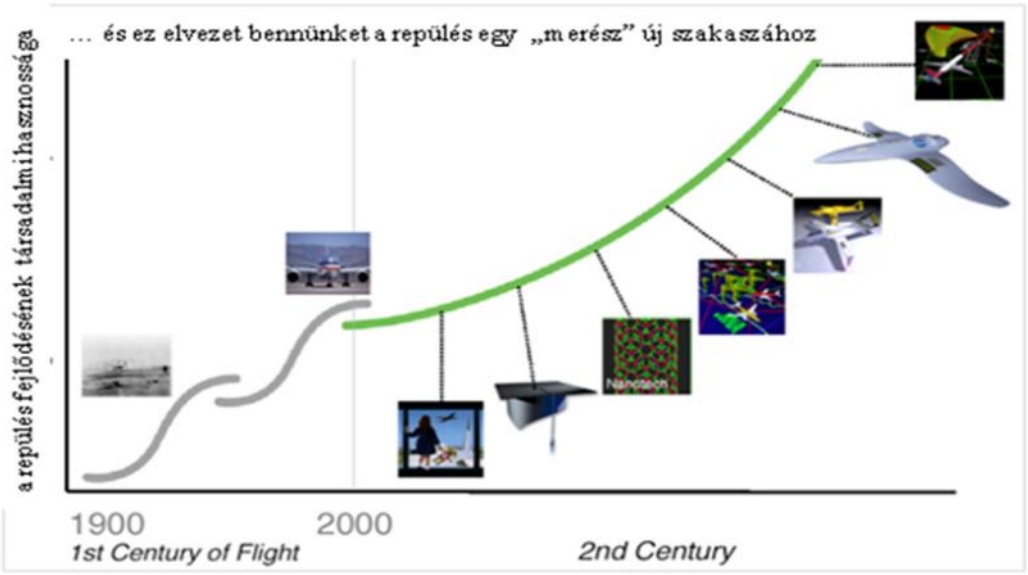
A légiközlekedés talán legnagyobb problémája a balesetek számának várható növekedése. Általános vélekedés szerint a repülési kockázatot, vagyis a légikatasztrófa bekövetkezésének a valószínűségét elfogadható költségszinten, - a jelenleg alkalmazható műszaki és technológiai megoldásokkal - továbbcsökkenteni már nem lehet. Mivel repülőgépek és a repülések száma korunkban gyorsan növekszik, ezért a balesetek abszolút száma is nő. Egy, kb. 15 éves NASA becslés szerint (lásd pl. [16][17]), mára már hetente kellene számolni egy légibusz nagyságú repülőgép katasztrófájával. Szerencsére a rendelkezésre álló adatok alapján ezt sikerült elkerülni, köszönhetően a legújabb technológiai eredmények (pl. a mikro-elektro-mechanikai rendszerek) alkalmazásán túl – és főképen - az új biztonság menedzsmenti eljárásoknak [17].

A légiközlekedés talán legsúlyosabb problémája, a repülőterek és a légtér kapacitási határának elérése. Jelenleg is komoly késések, és a „kitérő útvonalak” használata miatt jelentős 5–9% -os többlet tüzelőanyag-fogyasztást eredményező kapacitásgondok megoldása csak alapvetően új elvek bevezetésével oldható meg. Közben, ma már elvárás szinten jelenik meg, hogy az Európán belüli légi utak során, az utasok ajtótól-ajtóig három óra alatt eljussanak, a repülőtéren 15–20 percnél ne kelljen több időt tölteniük.

A repülés egy sor, a jövőjét alapvetően befolyásoló problémával küzd, amik megoldáshoz eredeti új ötletek, eljárások, technológiák, megoldások szükségesek.
Ez lehetőséget ad arra, hogy a repüléstudomány terén, eddig kevesebb eredményt felmutató, eredeti ötleteket és radikálisan új megoldást kínáló, új szereplők is bekapcsolódjanak a fejlesztésbe.

3.2. A fejlesztési sajátosságok

A repülés most tart a fejlődését leíró - az innováció diffúziós elméletéből ismert - második "S" görbe végénél. A harmadik „S” szakasz most kezdődik, bár ma még nem ismeret milyen technológiai újdonság fogja pontosan jellemezni ezt a szakaszt. A NASA előrejelzése [1] is egy sor technológiai újdonságra (7. ábra) hívja fel a figyelmet.



7. ábra A NASA előrejelzése a fejlődés lehetőségeiről [1]

A NASA „Blue Print” [1] érdekessége, hogy a repülésvédelem után másodikként az oktatást jeleníti meg. Az igazán új technológiák, mint a mikro – és nanotechnológia, a légtérhasználat megújítása, a kis, vagy személyes repülőgépek üzembeállítása, elviekben új, repülés közben a formáját változtató (morfológiai tulajdonságokkal bíró) légijárművek kifejlesztése, a Net központú informatikai rendszer alkalmazása, stb. csak ezek után következnek.

A repülés fejlesztés fő irányait egyébként egy sor sajátosság határozza meg, melyek közül a legfontosabbakat az alábbi bekezdés tartalmazza.

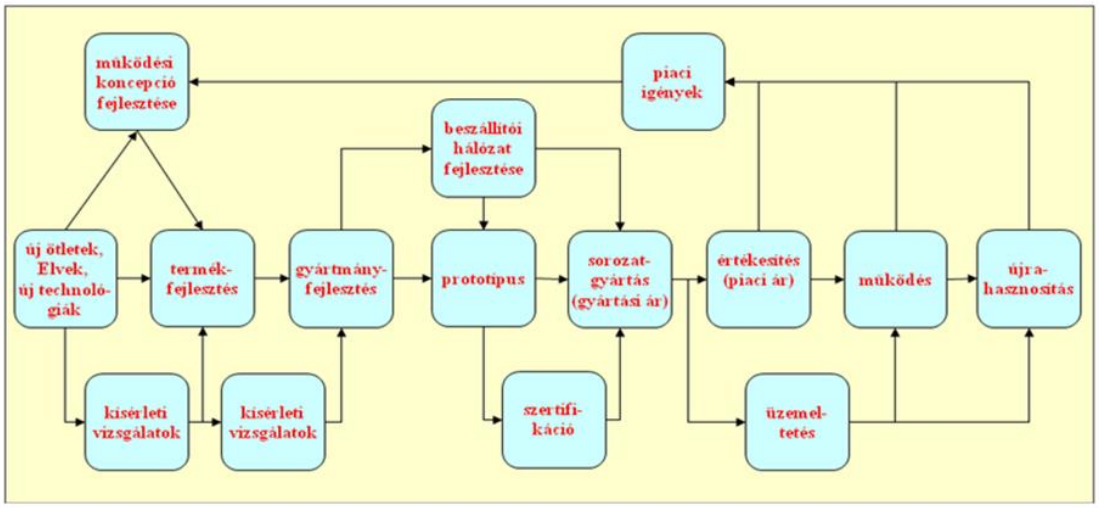
Megváltozott a fejlesztések iránya, melyen belül a repülőgépé elviekben megegyezik bármely korszerű termékével. A termékfejlesztés és a piaci értékesítés hagyományos iránya viszont megfordult. Korábban a mérnökök új ötleteket találtak ki, melyek alkalmazásával új terméket állítottak elő. A gyártás megszervezésekor kialakult egy gyártási ár. Az értékesítéskor pedig létrejött egy piaci ár. Persze a piacot jól meg kellett „dolgozni”, hogy a termék eladható legyen. A modern termékfejlesztés mindig a piactól indul. A piaci igények felmérése alapján specifikálják, mit, milyen áron lehet értékesíteni. A piaci árból képzik a gyártási árat. A mérnököknek pedig fel kell „tölteni” a leendő terméket azokkal az új, mérnöki ötletekkel, módszerekkel, melyek az elvárt specifikációjú terméket eredményezik.

A pici elvárás gyakran limitált árat jelent.

A modern fejlesztési folyamat a piaci igények felmérésével kezdődik, melynek során nem csak szimplán az eladható darabszámot, hanem a létrehozandó repülőgép piaci sikeréhez elérendő műszaki, gazdasági jellemzőket, repülési és használati értékeket is meghatározzák.

A piaci igények ismeretében dolgozható ki a működési koncepció (operational concept development), mely a felhasználó szempontjából határozza meg a repülőgép alkalmazásának a folyamatát (8. ábra). A működési koncepció alapján, a legújabb tudományos és technológiai eredményeket felhasználva, kísérleti vizsgálatokban ellenőrzött új ötletek, eljárások, módsze-rek alkalmazásával alakítják ki az új repülőgépet, mint terméket. A termékből a gyártmány-fejlesztés, azaz a gyártási technológiai kidolgozása a prototípusok és/vagy nullszéria elkészítése majd

a típus szertifikációs tesztelése, valamint a beszállítói hálózat teljes kialakítása után lesz ténylegesen repülőgép, mely már sorozatban gyártható.



8. ábra A repülőgépek modern fejlesztési, tervezési folyamata [18][19]

A modern repülőgép (termék)fejlesztés itt nem fejeződik be, mind az innovációs elmélet, mind a rendszerek műszaki elmélete alapján annak teljes életciklusával foglalkozni kell. Ezért nemcsak az értékesítés kialakítása és megszervezése szükséges, de a használatot, az üzemeltetési (kiszolgálási, karbantartási és javítási) folyamatokat és rendszert is elengedhetetlen megtervezni, szervezni, felügyelni és irányítani. A termék élete az újrahasznosítással fejeződik be.

A technológiák és a termékek teljes élettartam-ciklusra tervezését a systems engineering támogatja. A másik ilyen új tudományterület az innovációelmélet. Erről sokan sokfélét beszélnek, de csak kevesen ismerik és használják megfelelően.

A repülőgépek fejlesztése és gyártása olyan nagy feladat, hogy azt ma már csak nemzetközi kooperációban és fejlett innovációs menedzsmenttel hajtható végre sikeresen.

Az innovációs folyamatok kezelésében több megközelítés létezik. A legfejlettebb módszernek az un. ötödik generációs innovációs folyamat alkalmazását tekintik [20][21], melynek legfontosabb jellemzője a hálózat alapú, integrált rendszer alkalmazása. Ekkor a vállalkozás, stratégiai, partneri kapcsolatokat alakít ki a beszállítókkal és a vevőkkel, igénybe veszi a tanácsadó (expert) rendszereket, a külső támogató (outside support) vállalkozások segítségét, együttműködik velük a kutatások, a marketing stb. terén. Az ötödik generációs rendszerek mind stratégiai, mind megvalósíthatósági (enabling) jellemzőkkel rendelkeznek. A stratégiai elemek magukba foglalják (i) az idő-alapú stratégiákat (a termékek gyorsabb és hatékonyabb fejlesztését), (ii) a nem közvetlen árképző jellemzőket (pl. minőség) is figyelembe vevő tervezést, (iii) a vevők orientáltságát (a vevő van minden stratégia központjában), (iv) a stratégiai partnerséget a beszállítókkal, (v) az elektronikus adatfeldolgozást és számítást, (vi) a párhuzamos számításokat (paralel data-processing), (vii) a minőség ellenőrzés filozófiáját stb. A megvalósíthatóságot pedig a magasabb szintű szervezettség és rendszerintegráció, a flexibilis szervezeti struktúra, teljes belső adatbázisok, a külső adatbázisokhoz való effektív csatlakozás stb. teszi lehetővé.

A különböző generációs folyamatok eltérő technológiával és különböző piaci elfogadással rendelkeznek [22]. Általában elmondható, hogy az ötödik generációs innovációs folyamatok olyan

technológiákra épülnek, melyek átlépik a határokat, azaz az interdiszciplináris tudásnál is többet igényelnek, ugyanakkor flexibilisebb, az emberi gondolkodást utánzó (neurális) hálózatokra alapozott un. lágy (soft) innovációk piaci elfogadása lényegesen nagyobb. Az ötödik generációs folyamatok egyik jellemzője lehet a környezetterhelés csökkentése is, mivel az új technológiák alkalmazásakor ez ma már elengedhetetlen.

A következő kiemelendő sajátosság a korunkat meghatározó információ robbanás és az infokommunikációs rendszereknek, a számítástechnikának a gyors fejlődése, valamint azoknak a fejlesztésre, gyártásra, használatra gyakorolt hatása.

A modern gazdaság legfontosabb jellemzői:

- a rendszerszemlélet, benne a mérnöki rendszerelmélet alkalmazása,
- az innovációs folyamatok fejlett kezelése, irányítása,
- a modern, fejlett információ-kezelés,
- a hálózat-központúság,
- a valós idejű szituációelemzés,
- a valós idejű szimulációt alkalmazó döntés-előkészítés,
- a fejlett kontrol.

A vázolt sajátosságokkal bíró gazdaságirányítást integrált, vagy intelligens kommunikációs, irányító és ellenőrző rendszernek nevezik. Az integrált rendszer angol neve valamelyest kifejezőbb: Integrated (Intelligence) Communication Command and Control System. Röviden ez az IC^3 rendszer. (Ma már ezt a rendszert is kiegészítik a Computer szóval és IC^4 (vagy C4I) rendszernek nevezik [22].)

Az innováció-központú, tudásalapú információs társadalom és gazdaság legfontosabb, a fejlődést alapvetően behatároló törvényszerűségeit Holmes [2][23] a közlekedési és különösen a légiközlekedési rendszerek fejlődését befolyásoló törvényszerűségek közül a következőket emelte ki:

- *Moore törvénye* – a mikrochipek teljesítőképessége minden 18 hónap alatt megduplázódik;
- *Gilder törvény* – a kommunikációs sávszélesség, és ezzel a kommunikáció során átvitt információ mennyisége évente megháromszorozódik;
- *Metcalfe törvény* – a hálózatok értéke a hálózatba kapcsolt terminálok teljesítményének a négyzetével arányos;
- *a jólét íratlan törvénye* – az ember elherdálja a természeti javakat a jólét igényeinek kielégítésére,
- *a nagy forgalmi dugók íratlan* szabálya – a mennyiségi növekedéssel nem lehet megoldani a problémákat, pl. új elkerülő útszakasz csak ideiglenes megoldást kínál a csúcsforgalom elkerülésére (amíg azt a forgalom fel nem fedezi);
- Kurzweil gyorsuló visszatérés (Accelerating Returns) törvénye - a fejlődés exponenciálisan gyorsul;
- az információs társadalom alaptörvénye – az idő pénz.

Repülés egy új korszak előtt áll. A korszakváltás menete és a váltást generáló megoldások még pontosan nem határolhatók be.
Annyi bizonyos, hogy a fejlesztési filozófia változott. Annak sikeres végrehajtásához, a hagyományos alap (matematika, fizikai, anyagtudományok, stb.) és ágazat specifikus (aerodinamika, repülésmechanika, dinamika, kontrol, stb.) tudás mellett az új tudományok, első sorban az innovációelmélet, innováció menedzsment, a systems engineering és a logisztika alkalmazásán túl a jogi, társadalmi és egyéb, mint környezetvédelmi ismeretek is szükségesek. (Ennek az oktatásban, szakemberképzésben is meg kell jelennie.)
A fejlesztéseket alapvetően befolyásolják a legújabb tudományos - technika - technológiai eredmények, első sorban az informatika gyors fejlődése.

3.3. Lehetséges fejlesztési irányok

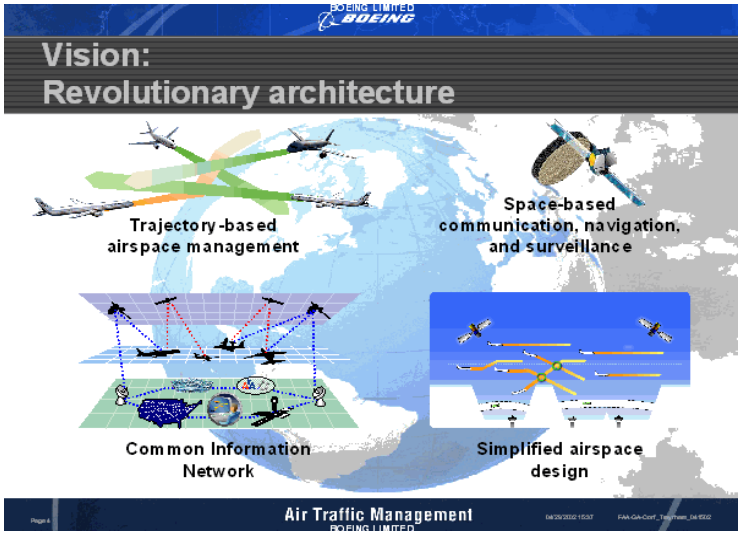
A modern tudomány sokféle megoldás kínál a repülés problémáinak megoldására. Közülük alapvetően hármat célszerű kiemelni.

Az *első* a számítástechnikai, mikroelektronika és infó-kommunikációs rendszerek további gyors térhódítása. Már ma is ott tartunk, hogy a repülőgépek árában a szoftverek költségei elérik az 50%-ot. Az áttörést az jelentené, hogy a biztonságosabb, környezetkímélőbb üzemeltetés megvalósításához szükséges logisztikai és menedzsmenti feladatok támogatására teljes integrált informatikai rendszerek alakulnának ki. Ezek legfontosabb jellemzői:

- egyedi repülőgépek állapotfelügyelő és diagnosztikai rendszereinek a kiépítése;
- az egyes repülőgépek és a légforgalom irányítói közötti teljes információcsere biztosítása;
- új információs és kommunikációs csatornák, rendszerek alkalmazása (pl. GPS alapú légi irányítás, mobil információs eszközök a kisgépes forgalomban);
- a fedélzeti és a külső (földi) megfigyelő rendszerek információinak az egyeztetése, együttes elemzése;
- automatizált szituációelemzés, a veszélyes helyzetek kialakulásának korai felis-merése,
- valós idejű szimulációk folytatása a döntések megfelelő előkészítésére;
- egységes irányítási rendszerek kialakítása.

Az ilyen rendszerek kialakulásának a feltételei már ma is adottak. Alkalmazásukkal pedig a technológiai lehetőségek teljes körű kiaknázása mellé felzárkózna a korszerű menedzsment.

Jó példa erre a légiforgalom irányításának forradalmi megújítására való törekvés (9. ábra).



9. ábra A Boeing felfogása az új, légi irányítási menedzsmentről [24] (a forradalmian új architektúra alapjai: repülési pálya alapú légiforgalmi irányítás, űrbázisú kommunikáció, navigáció és felügyelet, együttes információs hálózat, leegyszerűsített légtér-tervezés)

A *másik lehetőség*, hogy a fejlett innovációs folyamat alkalmazása fogja meghatározni a jövőt, a repülőgépek fő fejlesztési módszereit. A modern társadalmak gazdasági sikereinek meghatározó eleme az innováció. Az informatikai fejlődés egyben egy sor jelentős változást generál a légiközlekedésben (2. táblázat). Közülük is legfontosabb, hogy az eddigi fejlődési iránnyal szemben, a gyűjtő – elosztó un HUB repülőterek fejlesztéséről, az osztott direkt kapcsolatokra helyeződik át a hangsúly. Ezért növekszik a kisebb repülőgépek iránti igény, sok új repülőteret kapcsolnak be a globális közlekedésbe, azt igény szerint szervezik és így tovább.

Rendszer	**XX. sz.**	**XXI. sz.**
kommunikáció	analóg, beszéd-alapú, részes	digitális (VXML)
repülőtéri hálózat	gyűjtő – elosztó repülőterek	széleskörűen osztott
légiforgalmi szolgálat (szétválasztás és sorolás)	föld-központú	légi-központú
légi szállítási szolgáltatás	menetrendszerű	igény szerinti
repülőgép vezetése	két repülőgépvezető	egy repülőgépvezető
hálózati rendszerek	lineáris	nem lineáris
teher és csomagszállítás	nagy-sűrűségű piac, szállítás másnapra	„vékony” piac, szállítás aznapra
gazdasági viszonyok	központosított	diffúz
felelősségi rendszer	merev	lágy
növekedés	korlátozott	mérhető (felfelé, vagy lefelé)

2. táblázat A repülés, a légiközlekedés átmeneti állapotát meghatározó változások [25]

Végül a *harmadik fontos fejlesztési terület* a nano és mikro technológiák alkalmazása. A mikro technológia, általánosabban fogalmazva a MEMS (MEMS – Micro-Electro-Mechanical Systems) technológia a mikroelektronikában a hardverek gyártására kidolgozott mikro-, illetve nanotechnológia, az un mikrogépészet és a kontrol-elmélet együttes alkalmazására épül [26]. A mikrogépészet piciny beavatkozó elemek működési elveinek a kidolgozásával, a mikrogépek kifejlesztésével és gyártásával foglalkozik. Ezek a mikro beavatkozók első sorban a hagyományos technológiai lehetőségekre épülnek, és mágneses vagy elektrosztatikus terekkel működtetett mozgó elemekből állnak.

A MEMS technológia hihetetlen távlatokat nyit előttünk. melyre például jellemző, hogy a működtetéshez szükséges energia a méretcsökkenés 100 ezerszeresével arányos, a kristályszerkezeten belüli méreteknek köszönhetően a szilikon alapú mikroszerkezetben a szakítószilárdság ezerszer nagyobb, mint az acélé, és nincs kifáradás.

A mikrotechnológia teszi lehetővé az aktív érzékelők használatát, a beágyazott rendszerek alkalmazását, az osztott, nagyszámú vezeték nélküli érzékelővel működő monitoring és diagnosztikai rendszerek kialakítását, és így tovább.

A mikro technológiánál is jelentősebb eredményekkel kecsegtet a nano technológia. A nano méretű szerkezeti megoldások és szerkezetek alkalmazása forradalmasítja a XXI. század ipari termelését, és – a csökkenő mérettel együtt járó – kisebb anyagfelhasználás és a gyártás során kevesebb károsanyag kibocsátás biztosíthatja a világ fenntartható fejlődését.

A nanotechnológia az anyagtechnológiában - a nanocsövek, nanoszálak, az öngyógyító szerkezetek alkalmazásával különösen - a kompozit anyagok fejlesztésében mutat lényeges előnyöket [27].

Repülés korszakváltás hozó fejlesztésének lehetséges irányait alapvetően az informatikai robbanás eredményeinek az alkalmazását, az átmenetet jellemző radikális változások (pl. digitális adatátvitel, automatizálás, a közvetlen és igény alapú közlekedés, stb.) végigvitele, valamint a nano és a mikro technológiák fejlesztése és széles körű felhasználása jelentheti.

Ezek alapvetően tudás alapú technológiák (melyek árában a tudás jelentős, akár meghatározó részarányt képvisel), és radikálisan új megoldásokat eredményeznek, ami lehetőséget nyit új szereplők bekapcsolására, a szerepvállalás erősítésére a repüléstudományi kutatások, kooperatív fejlesztések és az alkalmazás globalizálása terén.

ÖSSZEFOGLALÁS

Jelenleg az előkészítés szakaszában van egy magyar repülőipari, légiközlekedési fejlesztési stratégia kidolgozása. Ez a cikk első sorban a stratégia kidolgozói, támogatói részére próbál segítséget nyújtani a repülés, a repülőipar jelentőségének, problémáinak és sajátosságainak a rövid bemutatásával. Az itt vázoltak alapvetően csak a stratégia kidolgozásakor figyelmet érdemlő gondolatok, háttér információk, anyagok összefoglalása.

A legfontosabb gondolatokat, következtetéseket az egyes pontok után közölt keretes kivonatok tartalmazzák.

A repülés fejlesztési stratégiáinak kidolgozásakor természetesen célszerű tanulmányozni a környező és a hasonló helyzetű országok gyakorlatát is. Külön figyelmet kell fordítani az „érdekek hálója” [28] módosító hatásaira.

Továbbá jó lenne, ha az eddig elkészült stratégiák (pl. a [29] légiközlekedéssel foglalkozó részének a megállapításait, vagy a több száz szakember részvételével kidolgozott Nemzeti Légügyi Stratégia [30], melynek a szakemberképzéssel foglalkozó fejezete pl. 28 fő közös munkája) útmutatásait is komolyabban vennék a döntéshozók.

Irodalom

[1] AERONAUTICS BLUEPRINT: Towards a Bold New Era in Aviation, National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2002. NASA, Washington, D.C.

[2] HOLMES, B. J. Innovation in air transportation system, lecture presented on "National Training Aircraft Symposium, Embry-Riddle Aeronautical University, March, 2009", available at http://www.docslide.com/innovation-in-air-transportation-systems/

[3] ROHÁCS, J. A repülőgépek fejlesztésének történetét meghatározó törvényszerűségek, (Laws determining the history of aircraft development) in "100 Éves a Géprepülés" Tudományos Konferencia Szolnok, 2003 április 1.", Nemzetvédelmi Egyetem, CD-ROM, pp. 1-23.

[4] CSANÁDI N., NAGYVÁRADI S., WINKLER L.: A magyar repülés története, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1974.

[5] ROHACS J.: Repülőmérnökök képzése a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen. "A Galambtól a Griffmadárig, A magyar katonai repülés története" (szerk. Dr. J. Szabó), HM Térképészeti és Nonprofit Kft., 2010, ISBN 978 963 257 183 6, 265-283 o.

[6] ROHÁCS, J., GAUSZ, ZS., GAUSZ, T., STEIGER, I.: Role of Regional Flight in Region Development „The Challenge of Next Millinium on Hungarian Aeronautical Scienes" (Edited by J. Rohács, Gy. Szabó, P. Ailer, Á. Veress), eR-Group, Budapest, 1999, pp. 375 – 384.

[7] Aviation benefits beyond borders, Powering global economic growth, employment, trade links, tourism and support for sustainable development through air transport, ATAG - Air Transport Action Group, 2014, http://aviationbenefits.org/media/26786/ATAG__AviationBenefits2014_FULL_LowRes.pdf

[8] AIR TRANSPORT DRIVES ECONOMIC AND SOCIAL PROGRESS, The economic and social benefits of air transport, 2005, http://www.icao.int/ATWorkshop/ATAG_SocialBenefitsAirTransport.pdf

[9] HANSMAN, R. J.: Overview of Recent Trends in the Airline Industry,

[10] http://www.nextor.org/Conferences/200406_Industry_Public/2004_06_21_John_Hansman.pdf

[11] HUBNER W., SAUVE, P.: Liberalizing Scenarios for International Air Transport, Journal of World Trade, 35, 2001, No. 5, 973-987.

[12] HUMMELS D. : Transportation costs and international trade in the second era of globalization, The Journal of Economic Perspectives 21,2007, 3: 131-154.

[13] THE ECONOMIC IMPACT OF AIR SERVICE LIBERALIZATION, InterVISTAS-ga2 Consulting, Inc. Washington, 2006, http://www.intervistas.com/4/reports/2006-06-07_EconomicImpactOfAirServiceLiberalization_FinalReport.pdf

[14] AIR TRANSPORT DRIVES ECONOMIC AND SOCIAL PROGRESS, The economic and social benefits of air transport 2008, ATAG (Air Transport Action Group, http://www.iata.org/NR/rdonlyres/5C57FE77-67FF-499C-A071-4E5E2216D728/0/atag_economic_social_benefits_2008.pdf

[15] VOLKER VON TEIN: Status and Trends in Commercial Transport Aircraft, Lecture on the ICAS'98 Conference, ref. number: ICAS-98-0.3, Melburne, 1998.

[16] HARRIS, W. L.: Product and process: a very non-linear relationship in aerospace, , Proceedings of the First International Conference on Nonlinear Problems in Aviation and Aerospace, (ed. by. Senath Sivasundaram), Embry-Riddle Aeronautical University, Daytona Beach, Florida, USA, 1996, pp. 693 – 717

[17] SHIN, J.: The NASA Aviation Safety Program: Overview, Nasa, 2000, NASA/TM—2000-209810, http://gltrs.grc.nasa.gov/reports/2000/TM-2000-209810.pdf

[18] ROHÁCS J., HORVÁTH ZS. CS.: A repülésbiztonság problémája és fejlesztési elvei, Repüléstudományi Közlemények (HU ISSN 1789-770X), XXV. évf. 2013 No. 3, 39 - 55. o

[19] ROHACS, J.: Product development philosophy, Proceedings of the International Conference on Innovation Technology in Design, Manufacturing and Production, 14-16 Sept. 2010 Praha, pp. 516 - 520.

[20] ROHACS, J., VOLOSCSUK, A., GECSE, T., OVARI, GY.: Innovation process management for reducing the time to market, Aerospace – The global industry, November 2 – 4, 2010, Exhibition Centre Frankfurt / Main Germany, Conference Proceedings, AIRTECH GmbH and Co. KG, 2010 ISBN 978-3-942939-00-3 p.21.

[21] ROTHWELL, R.: Towards the Fifth-Generation Innovation Process, International Marketing Review, Vol. 11., 1994, No.1. Pp. 7 - 30.

[22] Amidon, D. M. (1996): The Challenge of Fifth Generation R&D,

[23] http://www.entovation.com/gkp/challenge.htm

[24] COMMAND, CONTROL, COMMUNICATIONS, COMPUTERS & INTELLIGENCE. C4I technology Area Plan, Air Force material Command Wright-Patterson AFB Oh, US, report number: A767913, 1995.

[25] HOLMES, B. J.: Keynote address, Integrated Communications, Navigation, Surveillance (ICNS) Technology Workshop, Cleveland, Ohio, May 1, 2001, http://spacecom.grc.nasa.gov/icnsconf/docs/2001/CNS01_Evening_Keynote-Holmes.pdf
[26] Air traffic Management Revolutionary Concepts That Enable Air Traffic Growth While Cutting Delays, Boeing Air Traffic management, 6/2001
[27] HOLMES, B. J.: Transformation in Transportation Systems of the 21st Century, Invited lecture on the ICAS Congress, 2004, Yokohama, http://www.icas.org/media/pdf/ICAS Congress General Lectures/2004/F. ICAS 2004-Holmes.pdf
[28] MEMS AND MICROSTRUCTURES IN AEROSPACE APPLICATIONS (ed. by Osiander, R., Darrin, M. A., Champion, J. L.) CRC Press, Taylor and Francis Group, 2006
[29] MEYYAPPAN, M.: Nanotechnology in aerospace application, NATO, RTO-EN-AVT-129, 2007, http://ftp.rta.nato.int/public/PubFullText/RTO/EN/RTO-EN-AVT-129/EN-AVT-129-06.pdf
[30] Pintér I. A stratégiakészítés módszereinek meghatározottsága a honvédségben, Repüléstudományi Közlemények, 2001, 37 - 48 old.
[31] NEMZETI KÖZLEKEDÉSI STRATÉGIA (NKS) MENEDZSMENT ESZKÖZÖK VIZSGÁLATA, FŐMTERV, http://www.3k.gov.hu/remos_downloads/NKS_Menedzsment_eszkozok_vizsgalata.39.pdf (letöltve 2015 szeptember 20)
[32] NEMZETI LÉGÜGYI STRATÉGIA, 2011, Budapest, http://www.haif.org/archiv/NLS_Final.pdf (letöltve 2015 szeptember 20)

Toughts and background information about the strategic role of air transport and aeronatucal industry

The modern economy basically depends on accessibility of the knowledge-based and high technologies. The first level sources of these technologies are the space research, aeronautical industry and air transport that are at beginning of the step change in development. The strategic question of the economy development, how are these technology sources are accessible, how may the players of economy evaluate, assume and apply. There is a reason why the developing countries spend special attention on development strategy of the aeronautical industry. This short paper supports the Hungarian national aeronautics development strategy with some thoughts and background information.

Keywords: *air transport, aeronautical industry, economy development, industry development strategy, development strategy.*

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_3/2015-3-02-0225_Rohacs_Jozsef.pdf

Gáti Balázs

UAV INNOVATÍV INDÍTÁSA – KORSZERŰ MEGOLDÁS A KÖZÉPKORBÓL

A hajítógép a középkorban használatos ostromgép volt, amely a lövedéket az ellensúly helyzeti energiája segítségével indította magasan a föld fölött. Az AMORES (Autonomous MObile REmote Sensing) projekt keretében kidolgoztunk egy erre alapuló módszert merevszárnyú, pilótanélküli eszközök biztonságos magasságban történő indítására. Elméleti kutatásaink szerint az UAV rendszer szállítógépjárművének helyezeti energiáját felhasználva elérhető a szükséges indítási sebesség, és megfelelő állásszög, hosszdőlésszög valamint pályaszög is biztosítható. Az elméletet terepi tesztek sorozatával ellenőriztük, és fejlesztettük tovább. Így a középkori példánál jelentősen egyszerűbb támaszrendszert és egy elektromos csörlővel működtetett mechanizmust fejlesztettünk ki, amely a berendezés telepítését és felíjazását is el tudja végezni. Végeredményben egy egyszerű, karbantartásmentes és költséghatékony megoldást dolgoztunk ki merevszárnyú UAV-ok indítására, amely biztonságos magasságba képes emelni a légi eszközt az indítás során. A berendezés szabadalmi oltalom alatt áll.

Kulcsszavak:*UAV, katapult, trebuchet, többtest modell, prototípus, szabadalom*

BEVEZETŐ

A hajítógép („trebuchet”) olyan középkori ostromgép, amely egy parittyás mechanizmusból és egy ellensúlyból állt. A lövedék energiaszükségletét az ellensúly helyzeti energiájában tárolták. [1]



1. ábra Középkori hajítógép (trebuchet) [2]

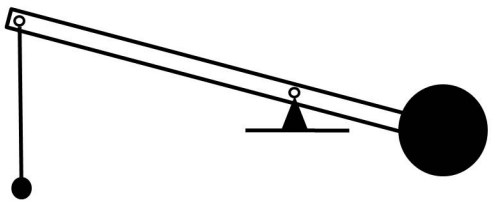
A hajítógépet jellemző, magasan történő indítás hasznos képesség a mai, merevszárnyú robotrepülőgépek indításánál is, mivel a széles körben alkalmazott katapultok [3][4][5], gumikötéles indítás (bungee start), csak alacsonyan és kis pályaszöggel tudják indítani a légi eszközöket, amely így nagy, akadálymentes területet igényel. Ezzel ellentétben egy hajítógép jópár méter magasan, azaz bokrok, kisebb fák, tábori berendezési tárgyak, kisebb épületek fölött bocsájtotta pályára a lövedéket. Így elkezdtük vizsgálni, hogy a hajítógép elve használható-e merevszárnyú robotrepülőgépek indítására.

PARITTYÁS MECHANIZMUS

A megnövekedett indítási magasság a hajítógép parittyás mechanizmusának eredménye, amely nehéz, falromboló lövedékek indítására volt ideális. Első lépésként azt vizsgáltuk, hogy egy hajítógépet optimalizálni lehet-e a viszonylag könnyű és lassú UAV-k céljára.

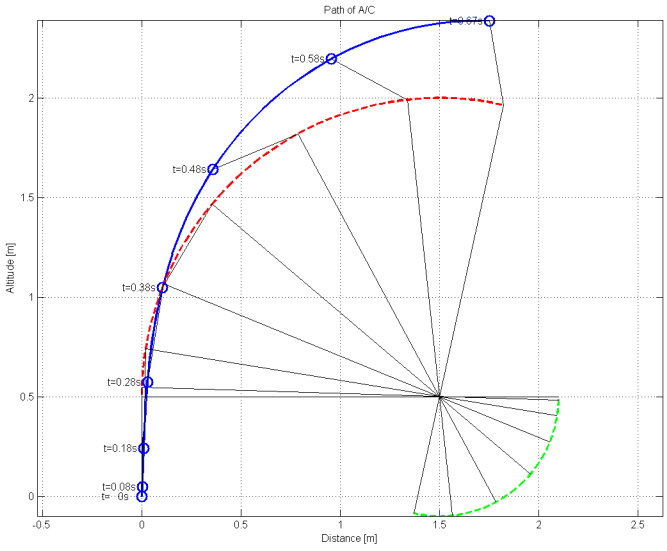
Szimuláció

Az első közelítő vizsgálatok céljából az ellensúlyt és a repülőgépet is pontszerű tömegnek feltételeztük, és felállítottunk egy két testből álló rendszert. Az első testet a pontszerű repülőgép és a vele merev kapcsolatban álló, de tömeggel nem rendelkező parittyakötél alkotta, míg a másikat a pontszerű ellensúly és a tömeggel szintén nem rendelkező hajítókar.

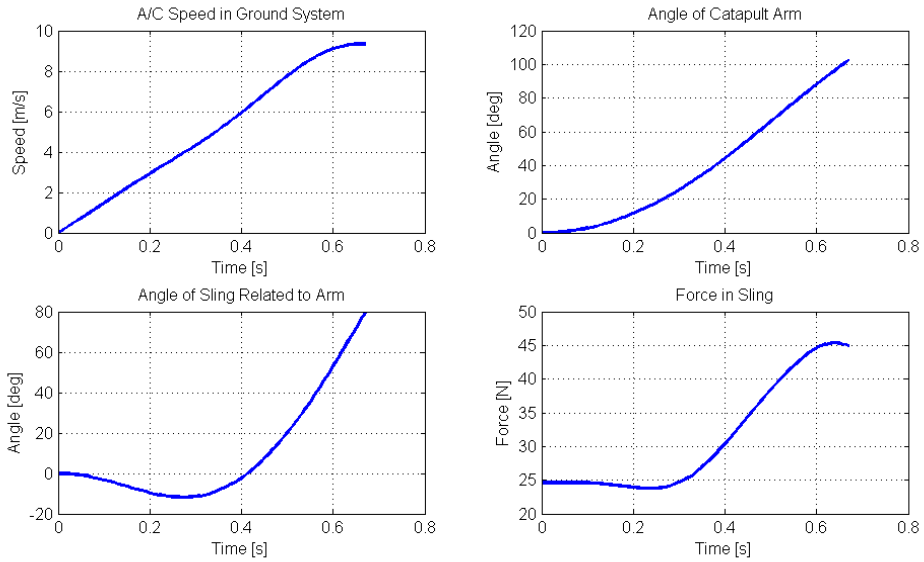


2. ábra Parittyás mechanizmus és ellensúly egyszerűsített modellje

A modell mozgását egy differenciálegyenlet rendszer segítségével számoltuk, melyet MATLAB környezetben implementáltuk, és a 4–5 rangú Runge-Kutta megoldóval integráltuk.



3. ábra A hajítógép egyszerűsített modelljével végzett szimuláció vázlata



4. ábra Az indítási jellemzők alakulása az idő függvényében

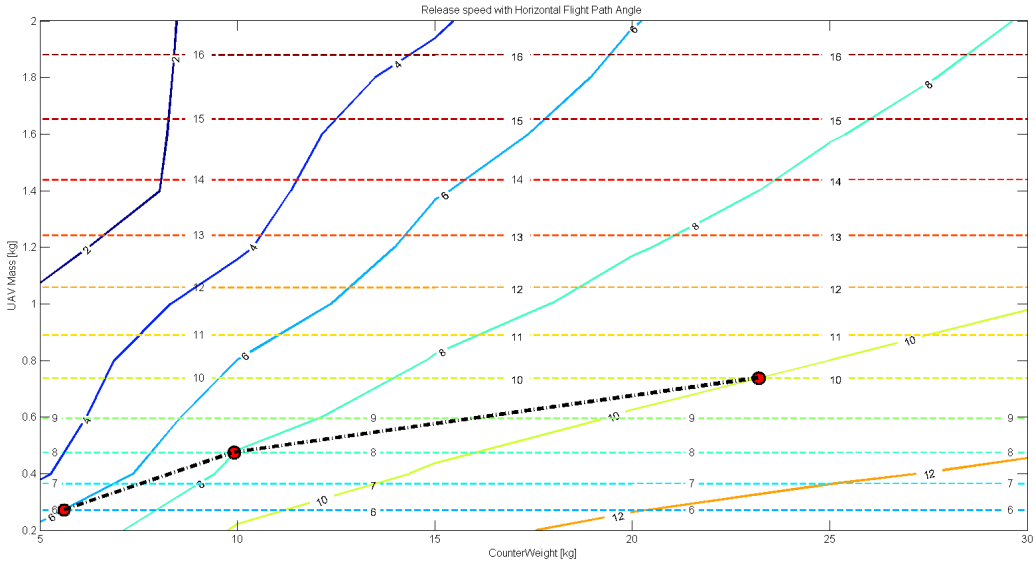
A 3. ábra mutatja be az indítás folyamatát, míg a 4. ábra a fontosabb jellemzők alakulásátaz indítás során. A hajítókar vízszintes helyzetben indul, majd az ellensúly elindul lefelé, és elfordítja a kart a forgástengely körül. Az indítás első fázisában a parittyakötél közel függőleges helyzetben marad, de t=0,4s környékén elkezd kilendülni az UAV-ot jelképező tömeggel együtt. A szimuláció végén a parittya közel párhuzamos lesz a hajítókarral, és az UAV eléri a pálya felső holtpontját.

A szimulációk szerint a hajítókar és a parittya közötti szög az indítás második fázisában szigorúan monoton nő, amely az UAV leoldása miatt fontos szempont.Az UAV sebessége a kezdeti pillanattól közel állandó gyorsulással növekszik, amely kedvezőbb a gumiköteles indításnál, ahol rögtön a kioldás után kiemelkedő gyorsulás tapasztalható. A parittyában ébredő erő eleinte közel állandó, majd fokozatosan emelkedni kezd a második fázisban, de kiugró érték itt sem tapasztalható.

Ezek alapján folytattuk a vizsgálatot, és a szimuláció bemenő paramétereinek hatását vizsgáltuk a szimuláció eredményére:

- ellensúly tömege;
- hajítókar hossza;
- forgástengely helye;
- parittya hossza;
- UAV tömege.

majd felállítottunk egy táblázatot a sikeres indítást eredményező paraméterkombinációkról.



5. ábra A szükséges és a rendelkezésre álló sebesség alakulása adott geometriájú UAV esetén

Az 5. ábrán látható diagram a szükséges és a rendelkezésre álló sebesség kapcsolatát mutatja egy adott geometriájú hajítógép és UAV (szárnyfelület S=0,1m^2, max. felhajtóerő tényező C_{Lmax}=1,2, tengerszint feletti magasság H=0m MSL) esetében különböző nagyságú ellensúly (vízszintes tengely) és felszálló tömeg (függőleges tengely) esetében. A színes folytonos vonalak kötik össze azokat a felszálló tömeg – ellensúlytömeg értékpárral jellemzett pontokat, melyek esetében a hajítógép ugyanakkora indítási sebességet biztosít (isovelocity görbék). A vonalakon látható szám az elérhető sebességet mutatja m/s mértékegységben. A szaggatott vonalak egy adott (a függőleges tengellyel alkotott metszéspontjukban leolvasható) felszálló tömeg esetén érvényes átesési sebességet mutatják, és azért vízszintesek, mert ez nem függ a katapult jellemzőitől, így az ellensúly tömegétől sem. Három vörös pontot helyeztünk el a diagramban, ahol azonos sebességhez tartozó folytonos és szaggatott vonalak metszik egymást (6 m/s, 8 m/s, 10 m/s) Ezekben a pontokban a hajítógép által biztosított sebesség megegyezik az UAV minimális sebességével. A diagramból kiolvasható, hogy a vizsgált szárnyfelülettel rendelkező UAV 0,5 kg felszálló tömeg esetén 10 kg ellensúllyal indítható. (Középső vörös pont.) Ha a felszálló tömeget 50%-kal megnöveljük (0,75 kg), akkor a sikeres indításhoz már 23,5 kg ellensúlyra van szükségünk, mivel nemcsak a gép tömege növekszik, hanem az átesési sebessége is, és ezzel az indításhoz szükséges sebesség is.

Validáció

A szimuláció eredményének validálása érdekében építettünk egy kis hajítógépet, melyet különböző ellensúlyokkal lehetett felszerelni. Figyeltünk rá, hogy az ellensúlyok a rögzítés tengelye körül csapágyazva el tudjanak fordulni, és így az ellensúly ne forduljon el a hajítókarral az indítások során, mivel ebben az esetben a forgásból származó redukált tömeg gyorsítását is figyelembe kellett volna venni, amit a szimulációban elhanyagoltunk (pontszerű ellensúly).

Egy strapabíró, EPP habból készült szabadon repülő modellel végeztük az első indításokat.



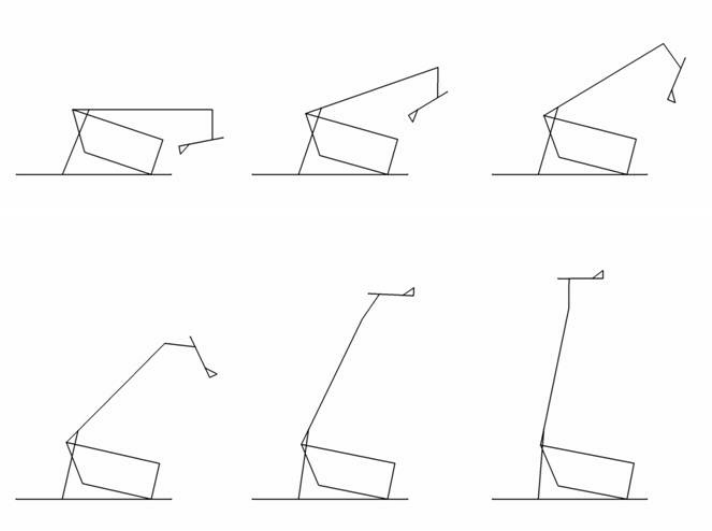
6. ábra Indítás a hajítógép kicsinyített modelljével

Az UAV egyszerű leoldását a katapult kar és a parittya kötél közötti szög szigorú, monoton növekedése teszi lehetővé. (4. ábra) A megoldás szintén a középkorból származik, és csak enyhén kellett módosítani az UAV alkalmazásokhoz, miközben meg lehetett tartani az egyszerűségét és megbízhatóságát: a hajítókar végére egy fémtüskét helyeztünk el (kioldótüske), melyre ráhúzzuk a parittya végére rögzített fém karikát. A kioldás akkor történik, amikor a parittyakötél olyan szögbe ér a karhoz képest, hogy a karika lecsúszik a kioldótüskéről. A kioldás pillanatát a kioldótüske szögével lehet pontosan behangolni.

MOBIL HAJÍTÓGÉP

Felépítés

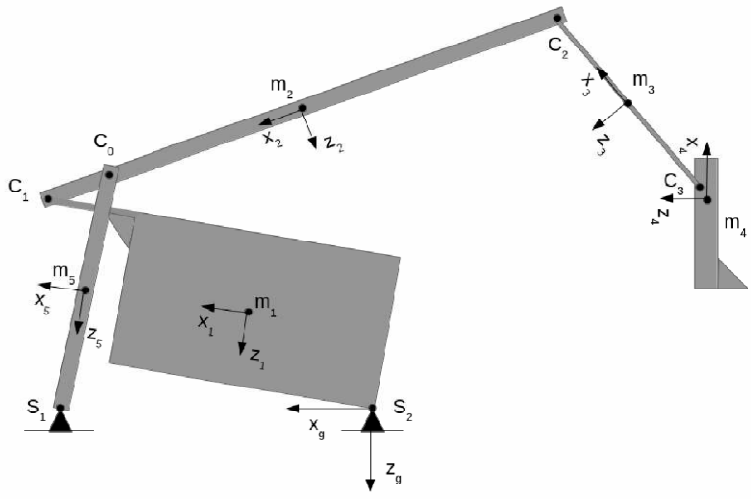
A kicsinyített modellel végzett ígéretes kezdeti tesztek után összegyűjtöttük egy ésszerűen használható, 1:1 arányú hajítógéppel szemben elvárt követelményeket, amellyel egy kb. 10 kg tömegű UAV indítható. A legfontosabb követelmény a mobilitás volt: az eszköznek könnyen szállíthatónak és könnyen telepíthetőnek kell lennie, hogy versenyképes legyen a jelenlegi megoldásokkal szemben. Ez a középkori hajítógépekről nem jelenthető ki az ellensúly és a robosztus állvány miatt (1. ábra). Azonban a követelmények teljesíthetőnek tűntek, ha a szállító jármű (szgk., terepjáró, kisteherautó) alkotja az ellensúlyt, amely az UAV rendszer elemeit és személyzetet is szállítja. Ezen kívül a középkori hajítógép nehéz állványzatát is könnyíteni és egyszerűsíteni kellett, mert nem lesz versenyképes a megoldás, ha több ember vagy drága motorok és/vagy aktuátorok szükségesek a mozgatáshoz, telepítéshez. A 7.ábrán látható szabadalmaztatott megoldás a szállító járművet ellensúlyként is használja, ugyanakkor kiváltja vele az állvány nagy részét is. A hajítógép működése a „lebegő karos” hajítógéphez áll a legközelebb [6], mivel nincs egy központi forgástengely, de itt görgők és pálya helyett továbbra is egyszerű csapágyak biztosítják a kapcsolatot az elemek között.



7. ábra A mobil hajítógép kinematikai vázlata

Ez a megoldás meglehetősen rendhagyónak tűnik, de ötvözi a magasan történő indítás biztonságát a várhatóan alacsony beszerzési és fenntartási költségekkel. Nincs szükség különleges, nagy teljesítményű energiatermelő eszközökre (pneumatika, hidraulika, elektromos gyorsító motor, gumikötegek stb.), amely tény alacsony gyártási költségeket és költséghatékony üzemeltetést vetít előre. A hagyományos katapultokra jellemző görgős kocsira szerelt bölcső, valamint a szennyeződésekre és sérülésekre érzékeny pálya elhagyása, illetve a végtelenül egyszerű karikás leoldó pedig a megbízhatóság terén bíztat jelentős előrelépést a jelenlegi katapultokhoz képest.

Szimuláció



8. ábra A mobil hajítógép többtest modellje

A mobil hajítógép tipikus, több testből álló rendszer, melyek elmélete jól ismert. (Pl. [7]). A 8. ábra szerint a rendszer öt merev testtel modellezhető. Az m_1 test a szállító jármű. Csak az egyik (első vagy hátsó) tengelye támaszkodik a talajra, míg a másikat felemeli az utólagosan rászerelt C_1 kapcsolódási pontban ébredő erő. Az m_2 test a hajítókar, az m_3 test a parittyakötél. Az m_5 test a támaszrúd, amely az m_2 test C_0 középső tengelyéhezkapcsolódik, miközben másik végével a talajra támaszkodik az S_1 pontban. Ezeket és a többi kapcsolódási pontot is ideá-

lis csuklókkal modelleztük. Minden testre a saját súlya és a kapcsolódási pontokban ébredő erők hatnak. Az UAV *(m_4)* az egyetlen tömeg, amelynél figyelembe vettük a rajta ébredő légerőket is.

A rendszer mozgásának leírásához az impulzus törvényt írhatjuk fel minden egyes testre a saját magához kötött súlyponti koordinátarendszerben.

$$m_i \cdot \left[{}_i\underline{\dot{V}}_i + {}_i\underline{\Omega}_i \times {}_i\underline{V}_i \right] = \underline{\underline{M}}_{iG} \cdot {}_G\underline{G}_i + \sum_j \left({}_i\underline{CF}_j \right) + {}_i\underline{SF}_k + \underline{\underline{M}}_{iAi} \cdot {}_{Ai}\underline{AF}_i \tag{1}$$

ahol:

- m_i –*i*. test tömege;
- ${}_i\underline{V}_i$ –*i*. test sebessége a saját, testhez kötött koordinátarendszerében;
- ${}_i\underline{\Omega}_i$ –*i*. test szögsebessége a saját, testhez kötött koordinátarendszerében;
- $\underline{\underline{M}}_{iG}$ –transzformáló mátrix a földhöz kötött koordinátarendszerből az *i*. testhez kötött koordinátarendszerbe;
- ${}_G\underline{G}_i$ –*i*. test súlyereje a földhöz kötött koordinátarendszerében;
- ${}_i\underline{CF}_j$ –kapcsolati erő a C_j kapcsolódási pontban az *i*. testhez kötött koordinátarendszerben;
- ${}_i\underline{SF}_k$ – kapcsolati erő az S_k támaszpontban az *i*. testhez kötött koordinátarendszerben;
- $\underline{\underline{M}}_{iAi}$ – transzformáló mátrix az *i*. test mozgásvektorához kötött koordinátarendszeréből a saját magához kötött test koordináta rendszerbe;
- ${}_{Ai}\underline{AF}_i$ –*i*. testen ébredő légerő a saját mozgásvektorához kötött koordinátarendszerében.

A perdület egyenletet is fel kell írni minden testre szintén test koordinátarendszerben.

$${}_i\underline{\underline{I}}_i \cdot {}_i\underline{\dot{\Omega}}_i + {}_i\underline{\Omega}_i \times {}_i\underline{\underline{I}}_i \cdot {}_i\underline{\Omega}_i = \sum_j \left({}_i\underline{r}_{iCFj} \times {}_i\underline{CF}_i \right) + {}_i\underline{r}_{iSFk} \times {}_i\underline{SF}_k + {}_i\underline{r}_{iAi} \times \left(\underline{\underline{M}}_{iAi} \cdot {}_{Ai}\underline{AF}_i \right) + {}_i\underline{AM}_i \tag{2}$$

ahol:

- ${}_i\underline{\underline{I}}_i$ –*i*. test tehetetlenségi nyomatéka a saját, testhez kötött koordinátarendszerében;
- ${}_i\underline{r}_{iCFj}$ –*i*. test súlypontjából a C_j kapcsolódási pontba mutató helyvektor a saját test koordinátarendszerében felírva;
- ${}_i\underline{r}_{iSFk}$ –*i*. test súlypontjából az S_k támaszpontba mutató helyvektor a saját test koordinátarendszerében felírva;
- ${}_i\underline{r}_{iAi}$ –*i*. test súlypontjából a saját aerodinamikai középpontjába mutató helyvektor a saját test koordinátarendszerében felírva;
- ${}_i\underline{AM}_i$ –*i*. testre ható aerodinamikai nyomaték a saját test koordinátarendszerében felírva.

Az UAV-ra ható $\underline{{}_{Ai}AF_{i}}$ és $\underline{{}_{i}AM_{i}}$ értékét egy általános, 10kg-os kategóriába eső UAV-nak az XFLR5 alkalmazás [8] segítségével kiszámolt tényezői ($C_L$felhajtóerő tényező, C_D ellenállás tényező, $C_m$nyomatéki tényező) alapján számoltuk. A tényezők meghatározásához az állásszöget minden időlépésben kiszámítottuk az UAV-ot modellező m_5 test mozgásjellemzői alapján.

A kapcsolódási pontok által létrehozott kényszereket egy-egy ideális csuklóval modelleztük, amely megakadályozza a két test elmozdulását egymáshoz képest, így a kapcsolódási pont gyorsulása a két testben felírva egyenlő:

$$\underline{\underline{M_{Gi}}}\cdot\left[\underline{{}_{i}\dot{V}_{i}}+\underline{{}_{i}\Omega_{i}}\times\underline{{}_{i}V_{i}}+\underline{{}_{i}\dot{\Omega}_{i}}\times\underline{{}_{i}r_{iCk}}+\underline{{}_{i}\Omega_{i}}\times\left(\underline{{}_{i}\Omega_{i}}\times\underline{{}_{i}r_{iCk}}\right)\right]=\underline{\underline{M_{Gj}}}\cdot\left[\underline{{}_{j}\dot{V}_{j}}+\underline{{}_{j}\Omega_{j}}\times\underline{{}_{j}V_{j}}+\underline{{}_{j}\dot{\Omega}_{j}}\times\underline{{}_{j}r_{jCk}}+\underline{{}_{j}\Omega_{j}}\times\left(\underline{{}_{j}\Omega_{j}}\times\underline{{}_{j}r_{jCk}}\right)\right] \quad (3)$$

ahol:

- $\underline{{}_{i}r_{iCk}}$ –*i*. test súlypontjából a C_k kapcsolódási pontba mutató helyvektor a saját test koordináta rendszerében felírva;
- $\underline{\underline{M_{Gi}}}$ – transzformáló mátrix az *i*. testhez kötött koordinátarendszerből a földhöz kötött koordináta rendszerbe.

Az S_1, S_2 támaszpontok olyan kapcsolódási pontok, ahol az egyik test a talaj, így itt a gyorsulás zérus:

$$\underline{\underline{M_{Gi}}}\cdot\left[\underline{{}_{i}\dot{V}_{i}}+\underline{{}_{i}\Omega_{i}}\times\underline{{}_{i}V_{i}}+\underline{{}_{i}\dot{\Omega}_{i}}\times\underline{{}_{i}r_{iSFk}}+\underline{{}_{i}\Omega_{i}}\times\left(\underline{{}_{i}\Omega_{i}}\times\underline{{}_{i}r_{iSFk}}\right)\right]=\underline{0} \quad (4)$$

Végeredményben az egyenletrendszer öt impulzus egyenletet (1) és öt perdület egyenletet (2) tartalmaz a rendszert alkotó öt testnek megfelelően, valamint hat kényszer egyenletet a négy kapcsolódási pontnak (3) és a két támaszpontnak (4) megfelelően. Az egyenletek átrendezésével a következő alakú differenciálegyenlet rendszerre juthatunk:

$$\underline{\underline{A}}\cdot\underline{\dot{x}}=\underline{b}\left(\underline{x}\right) \quad (5)$$

Az ismeretleneket illetve azok deriváltjait tartalmazó vektor a következőképpen néz ki:

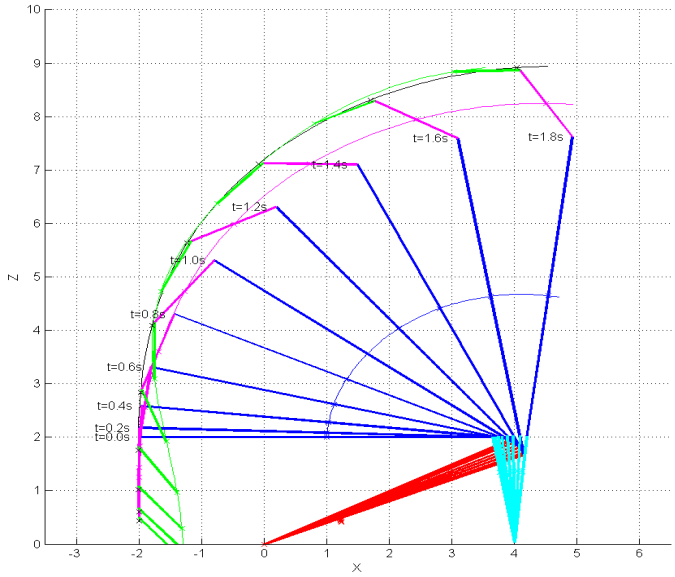
$$\dot{x}=\left[\underline{{}_{1}\dot{V}_{1}},\underline{{}_{1}\dot{\Omega}_{1}},\dot{\psi}_{1},\dot{\theta}_{1},\dot{\varphi}_{1},\underline{{}_{1}\dot{P}_{1}};\ldots;\ldots;\ldots;\dot{\psi}_{5},\dot{\theta}_{5},\dot{\varphi}_{5},\underline{{}_{5}\dot{P}_{5}};\underline{{}_{0}CF_{0}};\underline{{}_{1}CF_{1}};\underline{{}_{2}CF_{2}};\underline{{}_{3}CF_{3}};\underline{{}_{1}SF_{1}};\underline{{}_{2}SF_{2}}\right] \quad (6)$$

ahol:

- $\psi_i,\theta_i,\varphi_i$ – az *i*. test helyzetét leíró Euler szögek;
- $\underline{{}_{i}P_{i}}$ – az *i*. test súlypontja a saját magához kötött koordinátarendszerben leírva;
- $\underline{{}_{i}CF_{k}}$ – kapcsolati erő a C_k kapcsolódási pontban az *i*. testhez kötött koordinátarendszerben;
- $\underline{{}_{i}SF_{k}}$ – kapcsolati erő az S_k támaszpontban az *i*. testhez kötött koordinátarendszerben.

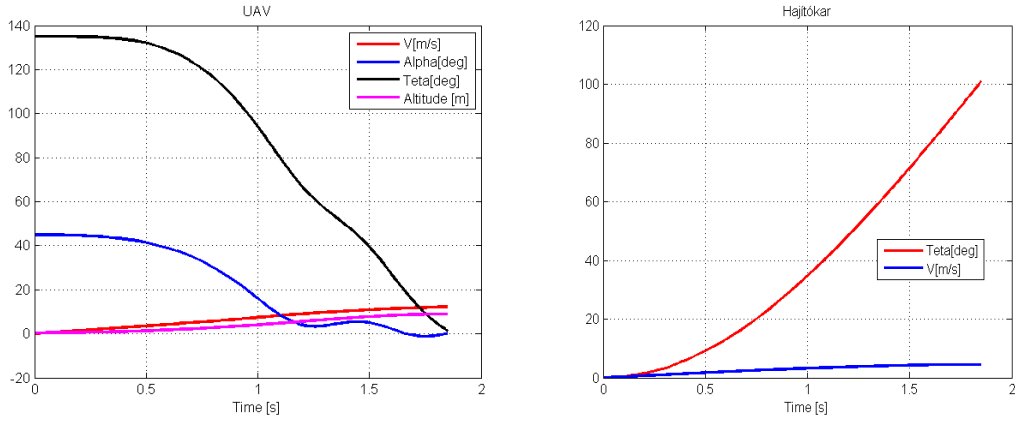
Az ismeretlenek deriváltjait tartalmazó vektor csak azért tartalmazza az erőket, hogy minden lépésben rendelkezésre álljanak. Az így kialakult egyenletrendszer (5) mindkét oldalát meg-

szorozva az $\underline{\underline{A}}$ mátrix numerikusan számított inverzével megkapjuk az ismeretlenek deriváltját. A már említett Runge-Kutta megoldót alkalmazva az ismeretlenek alakulása kiszámítható.



9. ábra Mobil hajítógép működésének szimulációja

A 9. ábra egy tipikus indítási folyamatot mutat be a mobil hajítógéppel. A zöld vonalak az UAV-ot jelképezik, a lilák a parittyakötelet, a kékek a hajítókart, a világoskékek pedig a támasz rudat. A járművet a piros vonal érzékelteti, amely a jármű kerekének földre támaszkodó pontját (vonal bal végpontja) kötik össze az utólag felszerelt kapcsolódási ponttal (vonal jobb végpontja), amihez a hajítókar is csatlakozik.



(a) (b)

10. ábra Az UAV (a) és a hajítókar (b) paramétereinek alakulása az indítás során

A szimuláció kiszámítja az indítás összes jellemzőjét, és így lehetővé teszi, hogy kiterjedten vizsgáljuk a szimuláció paramétereinek hatását az UAV leoldására és önálló repülésének kezdetére. A „Parittyás mechanizmus” főfejezet „Szimuláció” alfejezetében említett paramétereken túl már az UAV paramétereinek hatását is tudtuk vizsgálni, úgymint:

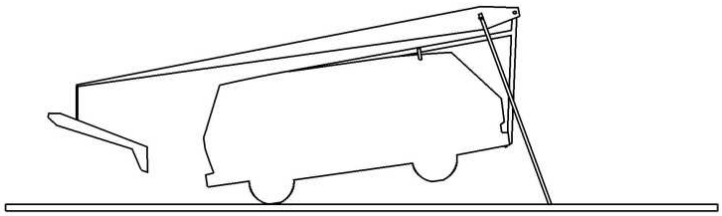
- felületi terhelés;
- poláris;
- súlypont;
- magassági kormány szöge;

- parittyakötél pozíciója a repülőgépen;
- kiinduló pozíció és helyzet.

Ugyanis ezek a paraméterek mind befolyásolják az UAV pályaszögét, sebességét és az állásszögét az önálló repülés első pillanatában.A vizsgálatraa parittya leoldásának optimális pillanatának meghatározásához van szükség. Ha túl korán válik önállóvá az UAV, akkor túl kicsi lesz a sebessége és túl meredek a pályaszöge, amely az átesés veszélyét hordozza magában. Túl későn történő leválás esetén a pályaszög negatívvá válhat, és az UAV a talaj felé indul nagy sebességgel, amely szintén géptöréshez vezethet, annak ellenére, hogy az UAV viszonylag magasan indul.

A teljes méretű„„proof-of-concept” változat megvalósítása

A sikeres szimulációk alátámasztották, hogy a mobil hajítógép működőképes, így megkezdtük a teljes méretű változat kifejlesztését. Ennek első változatát a számítások alapján optimálisnak tűnő méreteknél nagyobbra terveztük, hogy lehetőségünk legyen különböző kar arányokkal és forgástengely pozíciókkal is teszteket végezni a szimuláció validálására (11. ábra).Szállító gépjárműnek (és ellensúlynak) egy öreg, harmadik generációs VW Transportert választottunk, mert alacsony ára mellett a robosztus és a kevésbé formatervezett karosszéria ideális volt a szükséges csatlakozás pontok kialakítására, továbbá kellő térfogatot biztosított a felszerelések és a személyzet szállítására.



11. ábra A teljes méretű mobil hajítógép elrendezése

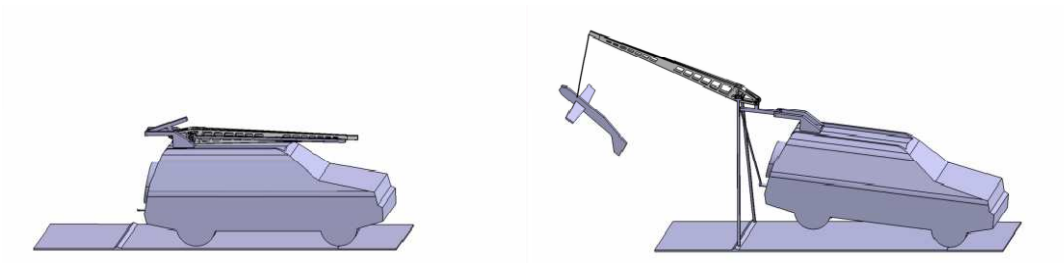
Az első teszt alkalmával lépésről-lépésre növeltük a karok arányát, és ezzel a gyorsító nyomatékot, illetve csak ballasztsúlyokat hajítottunk. Ezzel a valóságban is meggyőződtünk a berendezés kellő szilárdságáról és megbízhatóságáról. Ezzel validáltuk is a szimulációt, mert megbizonyosodtunk, hogy a valóságban is képesek vagyunk nagyobb tömegeket hajítani. Következő lépésként megkezdtük a beállítások megkeresését a kívánt tömeg, sebesség, és pályaszög eléréséhez. Erre a szimuláció több bizonytalan bemenő paramétere miatt volt szükség, ugyanis nem ismertük pontosan a gépjármű tömegét, súlypontját, tehetetlenségi nyomatékát. A videófelvételek elemzésével végzett verifikálás tapasztalatai alapján kiegészítettük a modellt a hajítókar légellenállásával is. Miután a szimuláció megegyezett a valósággal, áttértünk szabadadon repülő és távirányítású repülőgépek indítására, hogy a repülőgépek modelljét verifikáljuk. A verifikálás módszerére a cikk terjedelmi korlátai miatt nincs lehetőség kitérni (12. ábra).



12. ábra Távirányítású repülőgép indítása

Prototípus

A teljes méretű, proof-of-concept változat ígéretes eredményei alapján eldöntöttük, hogy egy gazdaságosan üzemeltethető, optimális prototípust is fejlesztünk, melynek alkatrészei felhajthatók a tetőcsomagtartóra, hogy a gépjármű így megfeleljen a közúti közlekedés szabályainak, de ugyanakkor egy fő személyzet 5–10 perc alatt telepíteni tudja. A cél egy 10kg tömegű robotrepülőgép indítására alkalmas rendszer megvalósítása. Első lépésként már a gazdaságossági és a műszaki szempontokat is együtt értelmezve kerestünk optimális szállítóeszközt az UAV rendszer és a hajítógép prototípus számára. Ennek során kiderült, hogy át kell dolgoznunk a mobil hajítógép eredeti elrendezését, ha a közúti közlekedés szabályait, a gyors telepítés követelményét és a gazdaságosan üzemeltethető jármű iránti igényt is ki akarjuk elégíteni. A prototípus koncepcióját a 13. ábra szemlélteti.

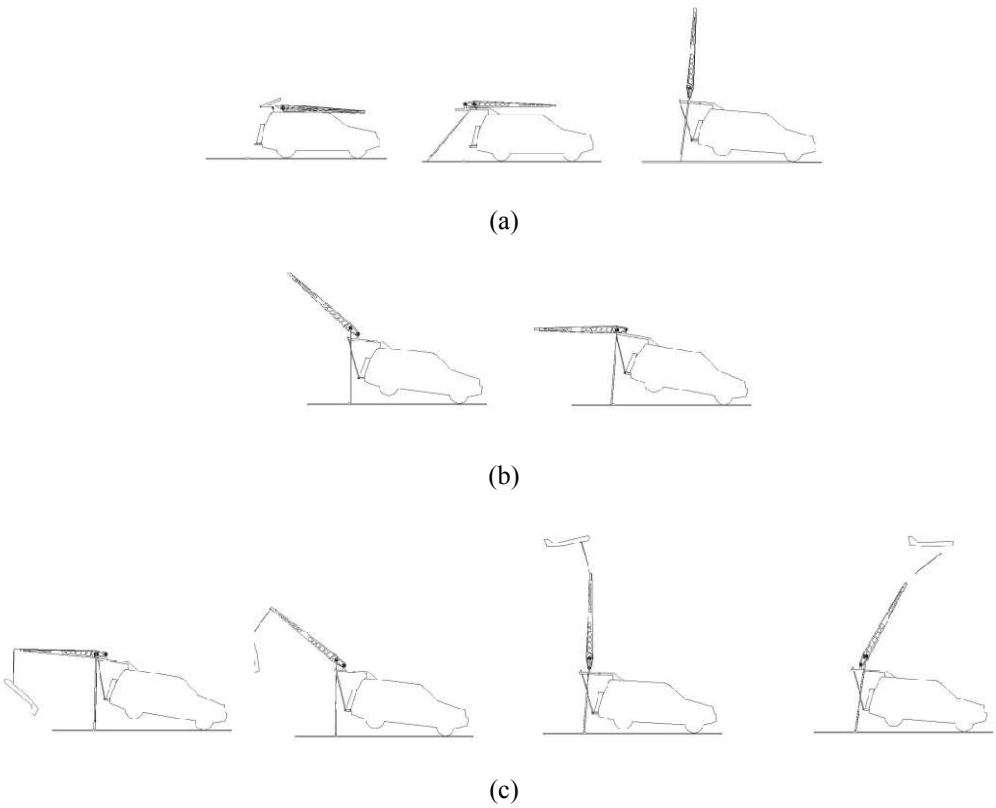


(a) (b)

13. ábra Prototípus koncepció rajza szállítási (a) és telepített (b) helyzetben

A prototípus esetében a kart le kellett rövidíteni az ilyen célra szóba jöhető, mai gépjárművek kisebb tömege miatt. Ez az indítási irány megváltoztatását is maga után vonta, azaz a hajítókar egyrészt a gépjármű hátulját emeli, másrészt indítási helyzetben a gépjárműtől elfele mutat, hogy több hely álljon rendelkezésre az UAV felkészítésére (13.b ábra). Ezzel a megoldással a potenciális közlekedési baleset során a gyalogosok vagy a szembe jövő járművekre veszélyt jelentő támaszrudak is távolabb kerülhetteka gépjármű elejétől. A teljes rendszer a tetőcsomagtartó rögzítési pontjaira csatlakozik kivéve a felfüggesztési pontot, amely a gépjármű alvázát emeli. A hajítógép telepítéshez elegendő egy fő, mivel a támaszrudak lehajtása után egyszerűen a gépjármű hátramenetével alaphelyzetbe hozható a rendszer (14.a ábra).A hajítógép felíjazásához (14.b ábra) szükséges teljesítményt már egy tetőcsomagtartóra rögzített, kereskedelemben kapható gépjármű csörlő biztosítja, amely igény szerint az alaphelyzet-

be telepítést is el tudja végezni. Ennek meghibásodása esetén kétfős személyzet kézi erővel is fel tudja íjazni a hajítógépet. Az indítás menetét a 14.c ábra mutatja be.



(a)

(b)

(c)

14. ábra A telepítés (a), az íjazás (b) és az indítás (c) menete

A tervezési fázis után egy négy kerék meghajtású Honda CRV típusú járművet választottunk szállítójárműnek. A cikk írásáig kb. 30 indítást végeztünk [9], melyből 10 indítás már egy kétmotoros, 10 kg felszállótömegű, 3m fesztávolságú saját tervezésű és építésű robotrepülőgépet emelt a magasba.(15. ábra)



15. ábra Indítás a prototípussal

ÖSSZEFOGLALÁS

A projekt célja egy indítóeszköz kifejlesztése volt, amely nemcsak felgyorsítja, hanem biztonságos magasságba is emeli a robotrepülőgépet. Megvalósíthatósági vizsgálatokat, modellkísérleteket, többtest szimulációkat, és validálást is elvégeztünk, hogy optimális megoldást találjunk. Végül egy újdonságerejű megoldás született, amely egyszerűbb, megbízhatóbb, gazdaságosabb a jelenleg alkalmazott megoldásoknál, és rendelkezik a biztonságos magasságban történő indítás képességével is. A megoldás szabadalom oltalom alatt áll.

A kutatást a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatta a KMR_12-1-2012-0121 „Piacorientált kutatás-fejlesztési tevékenység" projekt keretében.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] SAIMRE, T.: Trebuchet – a gravity-operated siege engine. In Estonian Journal of Archaeology, 2006, vol. 10, No.1, pp. 61-80,ISSN 1406-2933
[2] WIKIPEDIA THE FREE ENCYCLOPEDIA: Trebuchet, (online) url:https://en.wikipedia.org/wiki/Trebuchet (2015.03. 21.)
[3] RECK, R. First Design Study of an Electrical Catapult for Unmanned Air Vehicles in the Several Hundred Kilogram Range. *IEEE Transactions of Magnetics*, 2003, vol. 39, No.1, pp. 310-312, ISSN 0018-9464
[4] AIR & SPACE EUROPE: UAVs: Launch and recovery., 1999, vol. 1, No. 5–6, pp. 59-62, ISSN 1290-0958
[5] MILLER, B., VALORIA, C., WARNOCK, C, COUTLEE, J.:Lightweight UAV Launcher. Final project report. San Luis Obispo, California, USA, California Polytechnic State University, 2014, 51 p.
[6] WIKIPEDIA THE FREE ENCYCLOPEDIA: Floating arm trebuchet, (online) url:https://en.wikipedia.org/wiki/Floating_arm_trebuchet(2015.04.20.)
[7] SHABANA A. A.: Dynamics of Multibody Systems. Chicago, Cambridge University Press, 1989, 384 p. , ISBN 978-1-107-04265-0
[8] MESCHIA, F.: Model analysis with XFLR5. In RC Soaring Digest, 2008, vol. 25, No. 2, pp. 27-51.
[9] VIMEO Assisted Vertical Take-off (online) url:https://vimeo.com/148018204 (2015. 11. 02.)

INNOVATIVE LAUNCH OF A UAV – UP-TO-DATE SOLUTION FROM THE MIDDLE AGES

A trebuchet was a kind of siege engine in the Middle Ages that launched the projectiles well above the ground. The AMORES (Autonomous MObile REmote Sensing) project found a trebuchet-like solution to launch UAVs in safe altitude. The feasibility studies were based on a multibody model described with a non-linear differential equation system. Studies showed, that proper angle of attack, pitch angle, flightpath angle and airspeed can be provided for the UAV, while the energy demand of the launch can be stored in the potential energy of the transport vehicle of the UAS. The theory was verified by a series of launch tests. Subsequently a simplified supporting structure was constructed and a commercial car winch was applied to provide power for the installation and arming of the device. This way the device became a simple, maintenance free and cost effective solution for UAV launch with unique high release feature. The patent of the solution is pending.

Keywords: *UAV, launching device, trebuchet, multibody system, prototype, patent*

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_3/2015-3-03-0229_Gati_Balazs.pdf

Számel Bence, Szabó Géza

OPTIMÁLIS ATC[1] SZEKTORKONFIGURÁCIÓ KOMPLEXITÁS ALAPÚ BECSLÉSÉT VÉGZŐ DÖNTÉSTÁMOGATÓ ESZKÖZ FEJLESZTÉSE

A légiforgalmi irányítási rendszerek biztonságát (és hatékonyságát) nagymértékben befolyásolja az irányítók munkaterhelése. A munkaterhelés optimális szinten tartásához a légtér szektorainak számát és a szektorhatárokat (azaz a szektorkonfigurációt) dinamiksan változtatni kell az akutális forgalmi helyzet jellemzőinek megfelelően. A szektorkonfigurációval kapcsolatos döntéshozás rendkívül komplex feladat, ami indokolttá teszi az automatizált döntéstámogatást. Egy erre a célra fejlesztett eszköz létrehozása az automatizált döntési folyamat összetettsége miatt számos probléma megoldását igényli. Ebben a cikkben azt mutatjuk be, milyen követelményeknek kell egy, a szektorkonfiguráció automatizált meghatározását lehetővé tevő eszköznek megfelelnie, milyen fontosabb feladatokat kell az eszköz tervezése során megoldani és milyen további funkciók megvalósítására lehet alkalmas az eszköz a szektorkonfiguráció számítása mellett.

Kulcsszavak: *légiforgalmi irányítás, szektorizáció, komplexitás, döntéstámogatás*

1. BEVEZETÉS

A légiforgalmi irányítási (ATC) rendszerek biztonságának egyik legfontosabb jellemzője a légiforgalmi irányítók hibáinak gyakorisága és súlyossága, mivel ezen hibák vezethetnek légiforgalmi események (például a légijárművek közti előírt elkülönítés sérülése) kialakulásához vagy szélsőséges esetben balesetekhez. Az irányítói hibák gyakorisága szoros összefüggést mutat az irányítók mentális- és fizikai terhelésével [2], ami azt jelenti, hogy a terhelés optimalizálása egyike a lehetséges módszereknek az irányítói hibák kockázatának minimalizálására. A biztonságkritikus rendszerek operátorainak terhelése általában több tényezőből tevődik össze, amelyek között megtalálható a feladat-, információ-, munka- és mentális terhelés [3]. A továbbiakban az egyszerűbb fogalmazás kedvéért ezek együttes hatására munkaterhelésként hivatkozunk.

Az ATC területén a munkaterhelés optimalizálása a gyakorlatban a légtér szektorokra bontásával valósítható meg, feltéve, hogy az adott forgalmi szituáció fennállása esetén a szektorizációval kapcsolatos döntés meghozása során tudjuk, hogy milyen szektorszám és szektorhatárok (a továbbiakban szektorkonfiguráció) mellett lesz az egyes szektorok irányítóinak munkaterhelése az optimum közelében. Az említett döntést a légiforgalmi irányítók munkáját koordináló supervisor feladata meghozni, aki az optimálisnak tekintett szektorkonfigurációt részben előírások (például az egy irányító által kezelhető maximális légijárműszám), részben pedig saját tapasztalata és problémamegoldó képessége alapján határozza meg, figyelembe véve a várható forgalmi helyzet és a légtér különféle jellemzőit, valamint olyan további tényezőket, mint az időjárás vagy a műszaki rendszerek állapota.

Kutatásunk célja olyan döntéstámogató eszköz kifejlesztése, amely segíti a supervisorokat a fenti döntés meghozásában azáltal, hogy javaslatot tesz arra vonatkozóan, hogy a közeljövőben

[1] Air Traffic Control, Légiforgalmi irányítás

várhatóan kialakuló légiforgalmi szituációkhoz milyen szektorkonfiguráció lenne ideális. Ideális szektorkonfiguráció alatt azt a konfigurációt kell érteni, amelynek használata esetén az irányítók munkaterhelésének szintje a legközelebb esik az optimális szinthez. Más szavakkal kifejezve, az eszköz arra tenne javaslatot, hogy a várhatóan kialakuló forgalmi szituációkat hány irányítópár kezelje és az egyes irányítók mely szektorokért feleljenek.

Egy ilyen eszköz használata azért lenne előnyös, mert lehetővé tenné az olyan időszakok elkerülését a légiforgalmi irányításban, amikor egy (vagy több) irányító túlzottan magas vagy túlzottan alacsony munkaterhelésnek van kitéve. Ahogyan már utaltunk rá, a túlzottan magas és a túlzottan alacsony munkaterhelést azért kell elkerülni, mert mindkettő növeli az irányítói hibák gyakoriságát és súlyosságát, ezáltal veszélyeztetve a légi közlekedés biztonságát. Az alacsony munkaterheléssel járó időszakok emellett azért sem előnyösek, mert rontják a légiforgalmi irányítás hatékonyságát, mivel az ilyen helyzetekben általában kevesebb irányítóval is megoldható lenne a forgalom kezelése.

Az eszköz annyiban nyújtana többet a HungaroControl Zrt.-nél (és általában az ATC központoknál) jelenleg is használt hasonló célú eszközöknél, hogy amíg azok csak a légijárművek várható száma alapján jelzik előre, hogy mikor kell új szektort nyitni, illetve mikor lehet két szektort összevonni, addig a tervezett eszköz a forgalom számos különböző, a munkaterhelés szempontjából releváns jellemzőjét (komplexitását) is figyelembe veszi, hasonlóan a supervisorokhoz.

Azt, hogy egy, a felvázolt célt megvalósító döntéstámogató eszköz milyen követelményeknek kell, hogy megfeleljen, a 2. fejezetben foglaljuk össze. Mivel ezen követelmények megvalósítása többféleképpen történhet (például azért, mert a komplexitási tényezőknek többféle halmaza is figyelembe vehető, a komplexitás és a munkaterhelés kapcsolata pedig többféle módon is felírható), ezért a 3. fejezetben bemutatjuk, milyen döntéseket kell meghozni és milyen előzetes vizsgálatokat érdemes elvégezni az eszköz tényleges implementációja előtt. A 4. fejezetben azzal foglalkozunk, hogy az optimális szektorkonfiguráció becslésén felül milyen további funkciók ellátására lehet alkalmas a döntéstámogató eszköz. Az 5. fejezetben összefoglaljuk az eszköz fejlesztésével kapcsolatos eddigi eredményeket és felvázoljuk a fejlesztés közeljövőben várható további lépéseit.

2. A DÖNTÉSTÁMOGATÓ ESZKÖZZEL KAPCSOLATOS KÖVETELMÉNYEK

A szóban forgó döntéstámogató eszköz elsődleges funkciója tehát az optimális szektorkonfiguráció becslése, aminek megvalósítása érdekében röviden összefoglalva a következő feladatokat kell végrehajtania:

1. a várható légiforgalmi helyzet előrebecslése megadott időtávra vonatkozóan;
2. az előrebecsült forgalmi helyzet komplexitásának számítása;
3. a számított komplexitás alapján az optimális szektorkonfiguráció meghatározása a megfelelő algoritmus használatával;
4. a meghatározott optimális szektorkonfigurációra vonatkozó információ megjelenítése.

A szektorkonfiguráció változtatása (pontosabban az azzal kapcsolatos döntéshozás) napjaink ATC rendszereiben nem valós időben történik, hanem mindig a közeljövőben várható légiforgalmi helyzet alapján. Ennek megfelelően a döntéstámogató eszköznek is a jövőben várható forgalmi szituá-

ciókra vonatkozóan kell számításokat végeznie, aminek megvalósításához saját forgalom előrebecslő funkcióval kell rendelkeznie. A forgalom előrebecslésére vonatkozó követelmények meghatározásához fontos tisztázni, hogy milyen időtávra vonatkozóan kell a becslést elvégezni.

A becslés időtávlatával kapcsolatban azt mondhatjuk el, hogy minél hosszabb távra próbálunk becslést készíteni, annak a pontossága annál kisebb lesz (azaz annál nagyobb mértékben fognak eltérni a ténylegesen megvalósuló forgalmi helyzet jellemzői a becsült forgalmi helyzet jellemzőitől). Mivel a légiforgalmi irányítás területén dolgozó szakemberekkel folytatott konzultáció alapján az említett eltérés már 1–2 órás becslés esetén is elfogadhatatlanul nagy lenne, ezért ennél mindenképpen rövidebb időtávban érdemes gondolkodni.

A rövidebb időtáv kiválasztásakor ugyanazokat a tényezőket kell figyelembe venni, amelyeket a supervisornak is, amikor a szektorkonfiguráció megváltoztatásával kapcsolatos döntését meghozza. A döntés meghozását követően értesíteni kell a változás által érintett irányítókat, ami igénybe vehet néhány percnyi időt, különösen új szektor nyitása előtt, ha az új szektort később kezelő irányító nem tartózkodik a munkateremben. Emellett azt is figyelembe kell venni, hogy minden konfiguráció-változásnál van legalább egy olyan irányító, akinek az új konfigurációban a forgalomnak olyan részét kell irányítania, amely addig nem az ő felelőssége alá tartozott. Emiatt fontos, hogy a szektor irányításának tényleges átvétele előtt az irányító megismerkedjen az átvenni készült forgalommal, ami szintén időt vesz igénybe. Az előrebecslés időtávját tehát nem érdemes rövidebbre választani az értesítés és a felkészülés együttes időszükségleténél, ami körülbelül 15–20 perc. Azzal, hogy erre az időtávra vonatkozóan milyen adatok alapján és milyen módon lehetséges a forgalom előrebecslése, a 3. fejezetben foglalkozunk.

Ha rendelkezésre áll az előrebecsült forgalmi helyzet – azaz a légijárművek várható pozíciója, magassága, haladási iránya és sebessége (és ezek változása), valamint a légtér egyes részeire vonatkozó esetleges korlátozások – akkor lehetséges a forgalom különböző munkaterhelés növelő tényezőinek (komplexitási tényezőinek) kiszámítása, amit szintén automatizáltan kell, hogy elvégezzen az eszköz. Ilyen tényezők lehetnek többek között az emelkedő vagy süllyedő légijárművek száma, a forgalom összetartó vagy széttartó jellege, a konfliktusban lévő légijárműpárok száma, a szektorok kiterjedése vagy a zivatargócok száma. A komplexitási tényezőkre további példák láthatóak [1]-ben.

Azt, hogy a forgalomnak pontosan mely jellemzői és milyen mértékben járulnak hozzá a komplexitáshoz és ezáltal a munkaterheléshez, nehéz egyértelműen meghatározni. Az eszköz megbízható működéséhez ugyanakkor nem is fontos, hogy meghatározzuk a komplexitási tényezőknek valamilyen univerzális halmazát. Ehelyett elég egy olyan (kezdeti) tényezőhalmazt létrehozni, amelyről valamilyen előzetes becslés alapján úgy gondoljuk, hogy a segítségével jól kifejezhető az, hogy a különböző forgalmi szituációk mekkora munkaterhelést idéznek elő. Arról, hogy egy ilyen tényezőhalmazt milyen módszerrel lehetséges előállítani, szintén a 3. fejezetben lesz szó. Az eszköznek a működése során ezen tényezőhalmaz elemeinek értékeit kell tehát kiszámítania az adott időpillanathoz képest 15–20 perccel később várható légiforgalmi helyzetre vonatkozóan, lehetőleg valós időben. Fontos, hogy az eszköznek az említett kezdeti tényezőhalmaz használata mellett előállított eredményeinek megbízhatóságát vizsgálni kell az eszköz validálása során és ennek tükrében szükség esetén módosítani kell a tényezők halmazát.

Ha az eszköz megalkotta az előrebecsült forgalmi szituációt és kiszámította ahhoz a komplexitási tényezők értékeit, akkor a következő feladata a szektorkonfiguráció számítása a komplexitási értékek alapján. A komplexitási tényezők értékei és a szektorkonfiguráció közötti összefüggés matematikai leírására talán még annyira sem kínálkozik egyértelmű megoldás, mint a komplexitási tényezők halmazának meghatározására. Ennek részben az az oka, hogy az emberi munkaterhelés leírása önmagában is nehéz feladat, részben pedig az, hogy a szóban forgó összefüggés ATC központonként eltérő lehet. Mindezek ellenére van lehetőség arra, hogy megbecsüljük azt, hogy a különböző komplexitási tényezők milyen mértékben hatnak a munkaterhelésre, ha adatokat gyűjtünk olyan forgalmi szituációkról, amelyek esetében megbízható információink vannak mind a komplexitás, mind a munkaterhelés értékére vonatkozóan. Ezen információk birtokában – kellően nagyszámú forgalmi szituáció mellett – következtethetünk a komplexitás és a munkaterhelés között fennálló összefüggés jellegére, valamint az egyes komplexitási tényezőkhöz rendelhető súlyozó tényezők értékére. Ezek alapján pedig lehetségessé válik a munkaterhelés (és az ezzel szorosan összefüggő szektorkonfiguráció) becslése ismert komplexitású szituációkra.

Az eszköz implementációját megelőzően tehát meg kell alkotni és alkalmazni kell azt az algoritmust, amellyel a fenti összefüggés megállapítható. Ennek végrehajtására az egyik lehetséges módszert a 3. fejezetben ismertetjük. Ha az összefüggés és a komplexitási tényezőkhöz tartozó súlyszámok rendelkezésre állnak, akkor meg kell oldani, hogy az eszköz ezek segítségével képes legyen automatizált módon számítani az optimális szektorkonfigurációt a komplexitás alapján. Ennek megvalósításával kapcsolatban ugyanazt mondhatjuk el, amit a figyelembe vett komplexitási tényezők halmazának megalkotása kapcsán: a szektorkonfiguráció számításához alkalmazott logikát szintén módosítani kell szükség esetén, a validálás során megfigyelhető megbízhatóság függvényében.

A szektorkonfiguráció számításának követelményeivel kapcsolatban érdemes azt is megemlíteni, hogy elméletben lehetőség van arra, hogy az eszköz – a megfelelő intelligenciával ellátva – képes legyen ellenőrizni saját eredményeinek megbízhatóságát, például az alapján, hogy a supervisor az eseteknek mekkora hányadában fogadja el az eszköz által javasolt konfigurációt és mekkora hányadában bírálja felül azt. Egy ilyen önvalidáló mechanizmus (ha megadjuk számára az optimálisnak tekintett szektorkonfigurációkat a felülbírált javaslatokhoz) lehetőséget biztosítana arra, hogy az eszköz automatikusan módosítsa a komplexitási tényezőkhöz rendelt súlyszámokat vagy akár a figyelembe vett tényezők halmazát, ezáltal külső beavatkozás nélkül javítva saját eredményeinek megbízhatóságát.

Amellett, hogy az eszköz megbízható eredményeket szolgáltasson az optimális szektorkonfigurációra vonatkozóan, az is fontos követelmény, hogy ezen eredményeket a supervisor számára kellően informatív módon jelenítse meg. Ehhez az szükséges, hogy az eszköz kijelző egységén a konfigurációt alkotó szektorok általánosan használt azonosítói jelenjenek meg (pl. EL, EMUH, ET, WLM, WUHT) vagy a légtérnek valamilyen grafikus reprezentációja, amiben megjelennek az alkalmazandó szektorhatárok. Az eszköznek a szektorkonfiguráció előállításáért felelős modulja ugyanakkor a tervek szerint nem szolgáltat ehhez hasonló információt, hanem – ahogyan a 3. fejezetben látni fogjuk – például azt adhatja meg, hogy egy-egy lehetséges szektort az adott szituációban osztani kell, össze kell vonni vagy önállóan kell használni. Emiatt szükség van az eszközön belül egy olyan egységre is, amely ezen nehezen értelmezhető adatokat átalakítja a felvázolt informatív formátumok valamelyikére.

3. AZ ESZKÖZ TERVEZÉSE

3.1. Forgalom előrebecslése

Ahogyan az előző fejezetből kiderült, a döntéstámogató eszköznek a forgalmat 15-20 perces időtávra kell automatikusan előrebecsülnie. Ahhoz, hogy ez a funkció megvalósulhasson, először meg kell határoznunk, hogy milyen adatok használhatóak fel a forgalom becsléséhez és ezek alapján hogyan végezhető el a tényleges forgalombecslés. Mivel a döntéstámogató eszköz feladata a supervisorok intelligenciájának kiegészítése, ezért fontos, hogy az eszköz intelligenciája a supervisorok gondolkodásmódját tükrözze. A fenti két kérdésre tehát ennek a célnak a szem előtt tartásával érdemes keresni a választ.

A forgalom előrebecslését az itt felsorolt adatok alapján lehetséges elvégezni, tekintve, hogy a supervisorok is ezekre az adatokra támaszkodnak, amikor megbecsülik a közeljövőben várható forgalmi szituáció jellemzőit:

- radaradatok az aktuális légiforgalmi helyzetről;
- repülési terv adatok a járatok várható útvonaláról;
- időjárási adatok;
- légtérgazdálkodási adatok.

A légijármű-adatok (vagyis a radaradatok és a repülési terv adatok) egyebek mellett a légijárművek földrajzi pozíciójáról, sebességéről, haladási irányáról és repülési magasságáról szolgáltatnak valós idejűnek tekinthető információt. A radaradatok az aktuális forgalmi szituációról megbízható adatokat biztosítanak, de a forgalmi helyzet becslésére csak nagyon rövid (maximum 1–2 perces) időtáv esetén alkalmasak, mivel nem hordoznak információt a légijárművek felsorolt tulajdonságainak várható megváltozásáról. A jövőben várható irány-, sebesség- és magasság változásokról a repülési terv adatok szolgáltatnak információt, így azokat az előrebecslés során együtt érdemes használni a radaradatokkal.

Annak eldöntéséhez, hogy mindezt hogyan végezze az eszköz, ismét meg kell vizsgálnunk, hogy hogyan becsülik előre a forgalmat a supervisorok a radar- és repülési terv adatok alapján. Ahogyan említettük, a repülési terv adatok alkalmasabbak a forgalom jövőben várható állapotának előrejelzésére, ugyanakkor rendelkeznek azzal a hátránnyal, hogy csak a légtérben tartózkodó vagy oda rövid időn belül belépő repülőgépek esetében állnak rendelkezésre. Ennek oka az, hogy a repülési terv adatokat csak akkor lehet egy, a radar által észlelt járathoz hozzárendelni, ha azt sikerült azonosítani az előrebecsült útvonala alapján. Vannak tehát olyan repülőgépek, amelyekhez nem állnak rendelkezésre repülési terv adatok, így ezek esetében a supervisor (és ennek megfelelően a döntéstámogató eszköz is) a radaradatok alapján következtet a jövőbeli állapotra. A légtérben és annak közvetlen közelségében elhelyezkedő járművek esetében ugyanakkor a repülési terv adatok szolgáltatják a becslés elsődleges adatforrását, kivéve, ha a repülőgép útvonala valószínűsíthetően el fog térni a repülési tervben megadott útvonaltól (például irányítói utasítás következményeként). Utóbbi esetekben a radaradatok, illetve az adott járműnek adott utasítások ismerete szolgálhat a becslés alapjául.

Az időjárással és a légtérgazdálkodással kapcsolatos tényezők azáltal befolyásolhatják a légiforgalom alakulását, hogy a légtér egy részét a forgalom számára korlátozottá teszik. Az előidézett korlátozás tervezett (légtérgazdálkodáshoz kapcsolódó) esetben jelent kisebb problémát. Ennek

oka, hogy a kereskedelmi forgalom számára korlátozott légtérrészek általában jól definiált határokkal rendelkeznek, valamint az, hogy az ilyen jellegű korlátozások általában hosszú időre (legalább 24 óra) előre tervezettek. Ennek köszönhetően nem csak a supervisorok szereznek időben tudomást a várható korlátozásokról, hanem a repülési tervekben is figyelembe lehet venni azokat, ráadásul a forgalomra gyakorolt hatásuk (pl. kerülési utak alakulása) is jól tervezhető.

Nagyobb problémát jelentenek a légtér egy részét használhatatlanná tevő időjárási jelenségek (pl. zivatar), mivel az ezek által érintett légtértartomány az időben folyamatosan változik és gyakran csak a légijárművek és az irányítás között zajló kommunikációból derül ki, hogy a járművek milyen módon tervezik az érintett tartományt elkerülni. További probléma, hogy ezekkel kapcsolatosan nem állnak közvetlenül a supervisor rendelkezésére valós idejű, illetve a közeljövőre vonatkozó adatok, hanem csak azokra a meteorológiai szolgálattól kapott adatokra támaszkodhat, amelyek a légtér időjárásának néhány perccel korábbi állapotát jellemzik. Emiatt a supervisornak a várható időjárásra vonatkozóan is becslést kell készítenie, amit csak az időjárási jelenségeknek a döntés pillanatát megelőző percekben megfigyelt változásai alapján végezhet el. Ennek megfelelően az automatizált eszközt is ehhez hasonló becslések elvégzésére kell felkészíteni, vagy a becslést végző logikának néhány korábbi időpontban érvényes időjárási adathalmaz eltérése alapján kell kiszámítania a 15–20 perc múlva várható időjárási helyzetet. Ha tehát például a légtérben jelen lévő zivatargócok kiterjedése csökkenő tendenciát mutat vagy a zivatargócok mozgása alapján arra lehet számítani, hogy azok hamarosan elhagyják a légteret, akkor az eszköz feltételezheti, hogy a légtérnek a jelenleginél kisebb tartománya lesz az időjárás miatt korlátozott. Más esetekben azonban (ha a zivatar által érintett légtértartományok kiterjedése növekedett vagy nem változott az elmúlt időszakban) fontos, hogy az eszköz pesszimista becslést készítsen a korlátozott légtértartományokkal kapcsolatban és a biztonság érdekében inkább több szektort javasoljon annál, mint ami a végül kialakuló szituációban valóban szükséges lenne. Az időjárás automatizált becslésének nehézsége miatt érdemes az eszközt olyan funkcióval is ellátni, amely lehetővé teszi, hogy a supervisor szükség esetén manuálisan adhassa meg a várható időjárásra vonatkozó adatokat.

Akár az időjárás miatt, akár tervezett légtérkorlátozás miatt válik használhatatlanná a légtér egy része, a döntéstámogató eszköznek módosítania kell az előrebecsült repülési útvonalakat azon légijárművek esetében, amelyek útvonala érintené a korlátozott légtértartományt, valamint szükség esetén más légijárművekét is, ha azok konfliktusba kerülnének a módosított útvonalú járművekkel. Az eszköz létrehozása előtt tehát meg kell alkotni egy olyan algoritmust is, amelylyel lehetségessé válik a módosított útvonalak meghatározása. Fontos ugyanakkor megjegyezni, hogy a légtérkorlátozások miatti módosított útvonalszámításra nem feltétlenül van szükség, ha a légtérkorlátozásokat és az időjárást is a komplexitási tényezők egyikeként kezeljük. Arról, hogy ez milyen módszerrel valósítható meg, a következő alfejezetben lesz szó.

Az eddigieket összefoglalva azt mondhatjuk, hogy a forgalom előrebecslésének automatizálása 15–20 perces időtávra vonatkozóan megvalósítható lehet úgy, hogy a becslés bizonytalansága nem lesz nagyobb, mint a supervisorok saját becsléseiben rejlő bizonytalanság. A becslés alapjául a repülési terv adatok (azon repülőgépek esetén, amelyekhez rendelkezésre állnak) és a radaradatok (ismeretlen repülési tervvel rendelkező repülőgépek esetén) szolgálnak. Az ezek

alapján becsült forgalmi helyzetet módosítani kell aszerint, hogy milyen hatást gyakorolnak várhatóan a forgalomra a tervezetten vagy az időjárás miatt nem használható légtérrészek.

3.2. Komplexitási tényezők számítása

Ahogyan arra a 2. fejezetben utaltunk, a figyelembe vett komplexitási tényezők halmazának meghatározása során alkotnunk kell egy kezdeti tényezőhalmazt, amelyről feltételezzük, hogy jól reprezentálja a forgalmi helyzetek munkaterhelés generáló hatását. A tényezők kezdeti halmazát egy korábbi – az eszköz megvalósíthatóságának vizsgálatát célzó – kutatás során háromlépéses folyamat keretében határoztuk meg. Az első lépésben beszélgetést folytattunk néhány, a légiforgalmi irányítás szervezésének területén komoly tapasztalattal rendelkező szakemberrel, akik elmondták, hogy a magyarországi légtérben jellemzően milyen tényezők befolyásolják az irányítói munkaterhelést. A beszélgetés során sok tényezőt gyűjtöttünk össze, ezek azonban csak néhány szakember véleményét tükrözték, így a komplexitási tényezőkről történő információgyűjtést indokoltnak tűnt kiterjeszteni.

Az információgyűjtés második lépése a szakemberek szélesebb körének megkérdezése volt egy kérdőív segítségével, amely az első lépésben összegyűjtött tényezőket tartalmazta. A kérdőív kitöltőinek (légiforgalmi irányítóknak és supervisoroknak) azt kellett értékelniük, hogy a felsorolt tényezők mennyire vannak hatással a munkaterhelésükre. A kérdőív eredményeinek összefoglalását az 1. táblázat szemlélteti, az összeállítással és az eredményekkel kapcsolatosan pedig [5]-ben olvashatóak további részletek.

Tényező	Átlag
Időjárás (pl. zivatartevékenység)	4,57
Érkező, induló és átrepülő járatok aránya	3,86
Forgalom térbeli eloszlása ("sűrűsödési" helyek száma)	3,71
Emelkedő járatok száma	3,71
Frekvencia terheltsége	3,71
Összetartó útvonalon haladó járatpárok száma	3,57
Süllyedő járatok száma	3,57
Nyitva lévő különleges légterek száma	3,57
Útvonalak keresztezési pontjainak száma	3,43
Használható magassági szintek száma	3,29
Műszaki berendezések állapota	3,14
Pilóták kéréseinek száma (pl. magasság, irány)	2,86
Járatok sebességének változatossága	2,57
Járatok egymáshoz viszonyított haladási iránya	2,29

1. táblázat A komplexitási tényezők munkaterhelés növelő hatásának átlagos értékei

A harmadik lépésben azt kellett eldönteni, hogy a kérdőívben szereplő tényezők közül melyek azok, amelyek a munkaterhelés növelő hatás szempontjából fontosnak tekinthetőek, illetve amelyeket (aránylag csekély ráfordítással) ki lehet fejezni számszerű értékekkel. Utóbbi szempontnak volt köszönhető, hogy az említett korábbi kutatás során az időjárást kihagytuk a komplexitási tényezők vizsgált halmazából. Ez az elhanyagolás elfogadható volt az előzetes felmérés végrehajtása során, a döntéstámogató eszköz végleges verziójának tervezése során azonban

nem hagyható figyelmen kívül az időjárás, mivel a kérdőív eredményei alapján ez tekinthető a munkaterhelésre legnagyobb hatást gyakorló tényezőnek. Az eszköz implementálása előtt tehát meg kell oldani az időjárás számszerűsíthetőségének problémáját, vagyis találnunk kell valamilyen módszert arra, hogy olyan számértékekkel jellemezzük a légtérben uralkodó időjárást, hogy ezek alakulása arányos legyen a munkaterheléssel.

Mivel a döntéstámogató eszköz elsősorban a körzeti irányításban nyújtana segítséget a supervisoroknak és ezen a területen a zivatar jelenti a légiforgalmat elsődlegesen befolyásoló időjárási tényezőt, ezért az időjárás számszerűsítése során is a zivatarok jellemzőinek számszerű leírására helyezzük a hangsúlyt. Hasonlóan a légiforgalomhoz, a légtérben (vagy annak valamely szektorában) jelen lévő zivatargócok is többféle számértékkel jellemezhetőek. Ezek közé sorolható többek között a zivatargócok száma, azok földrajzi- és magassági kiterjedése, maximális- és átlagos intenzitása vagy a szektorhatároktól és egymástól mért távolsága. Nem tudjuk ugyanakkor azt, hogy ezen tényezők közül melyik milyen mértékben járul hozzá az irányítók munkaterheléséhez, ezért ezt érdemes egy ezzel a céllal elvégzett felmérés keretein belül kideríteni. Ennek egyik lehetséges módja például, ha aktív légiforgalmi irányítókat kérdezünk meg arról, hogy szerintük mekkora munkaterhelést generálnak a különböző jellemzőkkel rendelkező zivatargócok. Ezután valamilyen algoritmus (például neurális háló) segítségével következtetünk a zivatargócokat leíró különböző számértékek és a munkaterhelés közötti kapcsolatra, majd ez alapján megállapítjuk melyek a zivatargócok jellemzői közül a leginkább kritikusak és ezeket vesszük figyelembe a döntéstámogató eszköz fejlesztése során komplexitási tényezőként.

Az időjáráshoz hasonlóan az irányítás és a légijárművek közötti kommunikáció számszerűsítése is problémát jelent. A kommunikációszükséglet szintén számszerűsíthető lehet, például az üzenetváltások száma vagy azok összesített időtartama alapján. Felmerül ugyanakkor a kérdés, hogy érdemes-e a kommunikáció mennyiségét figyelembe venni, tekintve, hogy az üzenetváltásokat a legtöbb esetben olyan tényezők váltják ki, amelyek valamilyen módon maguk is hozzájárulnak a komplexitáshoz – például magasság, irány vagy sebességváltoztatás, szektorhatár átlépése, zivatarkerülés stb.

3.3. Az optimális szektorállapotok számítása

A szektorkonfiguráció komplexitás alapján történő számításának a gyakorlatban az egyik lehetséges módja a neurális hálós algoritmus használata, ahogyan az [1]-ben is látható. Szintén neurális háló alkalmazásával történt az optimálisnak tekintett szektorkonfigurációk számítása a korábban említett előzetes kutatás során. Ennek részletes eredményei [4]-ben és [6]-ban olvashatóak, a döntéstámogató eszköz működésének könnyebb megértése érdekében azonban itt is összefoglaljuk a neurális hálós módszeren alapuló szektorkonfiguráció becslés folyamatát.

A neurális háló működési elve hasonló az egyszerű függvény regresszióhoz. A háló funkciója általános esetben az, hogy megadott számú bemeneti tényező értékei alapján megadja meghatározott számú kimeneti tényező értékét. Ehhez természetesen meg kell határozni, hogy a bemeneti tényezők értékeiből milyen módon állíthatóak elő a kimeneti értékek, ami a háló tanításával lehetséges. A tanítás során meg kell adni, hogy a különböző bemeneti értékek esetén milyen értékeknek kell a kimeneten megjelenni, a háló pedig a megfelelő algoritmus használatával képes

kiszámítani, hogy milyen módon kell a bemeneti tényezőket súlyozni ahhoz, hogy az adott kimenetek (pontosabban az azokat minimális hibával közelítő értékek) előálljanak. A tanítást követően a háló tetszőleges bementi értékek alapján képes becslést adni a kimeneti értékekre vonatkozóan.

Az általunk vizsgált esetben a bementi tényezők az összegyűjtött komplexitási tényezők voltak. Mivel ezeknek terveztük a munkaterhelésre gyakorolt hatását vizsgálni, ezért a kimeneten munkaterhelés értékeket lett volna érdemes megjeleníteni. A munkaterhelés számszerűsítése ugyanakkor nehézkes, ezért célszerűbbnek tűnt inkább valamilyen, a munkaterheléshez szorosan kapcsolódó mennyiséget használni kimeneti tényezőként. Mivel a döntéstámogató eszköz feladata az, hogy az optimális szektorkonfigurációra tegyen javaslatot, ezért kézenfekvőnek tűnik kimenetként magát a szektorkonfigurációt használni. A szektorkonfiguráció természetesen nem tekinthető mennyiségnek, a szektorok állapota egy-egy forgalmi szituációban azonban igen.

Egy általános szektor háromféle állapotot vehet fel, aszerint, hogy összevonják-e más szektorral („merged" állapot), felosztják-e több szektorra („split" állapot) vagy önállóan használják („armed" állapot). Az állapotok már szolgálhatnak kimeneti tényezőkként, amelyek értéke 0 vagy 1 lehet attól függően, hogy az adott szektor az adott állapotban van-e. Tételezzük fel például, hogy egy adott forgalmi szituáció esetében az ideális szektorkonfigurációban a W, az ELMU és az EHT szektorok vannak nyitva. Ebben a helyzetben a teljes légtér és az E szektor állapota is „split", vagyis ezek állapota az 1 0 0 értékhármassal írható le (feltételezve, hogy a három érték a „split", „armed" és „merged" állapotot jelöli, ebben a sorrendben). A W, az ELMU és az EHT szektor állapota „armed", vagyis ezek a 0 1 0 értékkel jellemezhetőek, míg például az EL és az ET elemi szektor vagy W bármely elemi szektora „merged", ezért 0 0 1 értékhármas tartozik hozzá.

Ahogyan korábban utaltunk rá, a szektorkonfiguráció neurális hálóval történő becsléséhez a hálót tanítani kell, aminek az alapja ismert összetartozó bemeneti és kimeneti értékek egymáshoz rendelése. A tanításhoz szükség van tehát olyan forgalmi szituációkra, amelyeknek nem csak a komplexitását tudjuk leírni, de ismerjük a hozzájuk rendelhető optimális szektorkonfigurációt is. Az egyes forgalmi szituációkhoz az optimális szektorkonfiguráció meghatározásának egyik módja (amit az előzetes kutatás során is használtunk) a szituációk bemutatása aktív supervisoroknak és az ő szubjektív véleményük megkérdezése az optimális konfigurációval kapcsolatban. A vélemények beszerzése a gyakorlatban úgy történt, hogy a supervisoroknak megmutattuk a vizsgált forgalmi szituációk radarképét és megkérdeztük, hogy ha a bemutatotthoz hasonló szituáció kialakulására számítanának és nekik kellene dönteniük arról, hogy hány irányító kezelje a forgalmat és milyen szektorhatárokat alkalmazzanak, akkor milyen döntést hoznának.

A tanításhoz használt forgalmi szituációk kiválasztása és az ezekkel kapcsolatos konzultáció a supervisorokkal a döntéstámogató eszköz tervezésének egyik legfontosabb lépése. A feladat megfelelő végrehajtása azért fontos, mert az eszköz működésének alapjául szolgáló logika csak olyan forgalmi szituációkra vonatkozóan fog várhatóan megbízható eredményt adni, amelyek jellemzői nem térnek el nagyban a tanításhoz használt szituációk jellemzőitől. Más szóval, ha a lehetséges szituációk egy-egy jellegzetes csoportját (pl. olyan szituációk, amelyek során korlátozott légterek vannak nyitva vagy zivatargócok vannak a légtérben) kihagyjuk a tanításhoz használt szituációk köréből, akkor az ilyen szituációk esetében nem várhatunk megbízható döntési javaslatokat az eszköztől. A tervezési folyamat ezen lépésében tehát el kell dönteni, hogy

milyen forgalmi szituációk kialakulása esetén lehet leginkább hasznát venni az eszköznek és ezekhez hasonló szituációk munkaterhelés generáló hatásáról kérdezni a supervisorokat.

A légiforgalmi szituációkat, amelyekkel a supervisorok munkájuk során találkozhatnak, és amelyekhez az eszköznek javaslatot kell tennie a szektorkonfigurációra, két kategóriába sorolhatjuk aszerint, hogy „hétköznapi" vagy „rendkívüli" szituációkról van szó. Hétköznapinak azokat a szituációkat tekintjük, amelyekben a légijárművek száma és azok jellemzői nem térnek el nagymértékben az átlagosnak tekintett értékektől, nincs a légtérben különleges kezelést igénylő légijármű (pl. rádiókapcsolat megszakadása miatt), nincsenek használatban különleges légterek (vagy csak olyanok vannak nyitva, amelyek jelenléte megszokottnak számít) és nincsenek a forgalmat korlátozó időjárási tényezők. A rendkívüli szituációk értelemszerűen azok, amelyekre valamelyik felsorolt feltétel nem teljesül. A hétköznapi szituációkról feltételezhetjük, hogy fennállásuk esetén a supervisor viszonylag könnyen, rutinszerűen képes döntést hozni a szektorkonfigurációról, míg rendkívüli szituációk esetén ehhez több gondolkodásra van szükség és a döntés eredményeként előálló szektorkonfiguráció is kisebb valószínűséggel lesz a munkaterhelés szempontjából optimális. Ennek következtében tehát egy, a szektorkonfigurációra javaslatot tenni képes döntéstámogató eszköznek elsősorban rendkívüli szituációk esetében lehet hasznát venni, ami azt jelenti, hogy a tervezés során a neurális háló tanításához használt szituációk között is fontos, hogy legyen megfelelő számú rendkívülinek tekinthető szituáció is a hétköznapiak mellett. Ez egyúttal azt is jelenti, hogy nem elég a valóságban korábban megvalósult légiforgalmi szituációkat bevonni az eszköz tervezésébe, hanem mesterséges szituációkat is létre kell hozni, mivel a rendkívüli szituációk előkeresése a történeti radaradatok halmazából hosszadalmas feladat lenne, ráadásul nem biztos, hogy az igényeinknek megfelelő rendkívüli szituációkat adna eredményül. A neurális háló tanításához tehát érdemes mesterséges szituációkat is felhasználni, ezek megalkotása során pedig célszerű légiforgalmi irányítási szakemberek segítségét kérni, hogy biztosíthassuk, hogy az eszköz valóban azokban a helyzetekben nyújt segítséget, amelyekben az azt felhasználó supervisoroknak erre szükségük van.

A supervisorokkal folytatott beszélgetések során beszerzett szektorkonfigurációkat tekinthetjük optimálisnak a vizsgált szituációkhoz, így a továbbiakban ezekre fogunk optimális szektorkonfigurációként hivatkozni. Miután az optimális szektorkonfigurációk alapján meghatároztuk a különböző szektorok optimális állapotát, lehetségessé válik a háló tanítása, a tanított háló segítségével pedig az optimális szektorállapotok becslése a tanításba be nem vont forgalmi szituációkra vonatkozóan. A döntéstámogató eszköznek tehát az itt röviden bemutatott neurális hálós algoritmust kellene alkalmaznia a szektorállapotok meghatározására, miután kiszámította az előrebecsült forgalmi szituáció komplexitási tényezőinek értékeit.

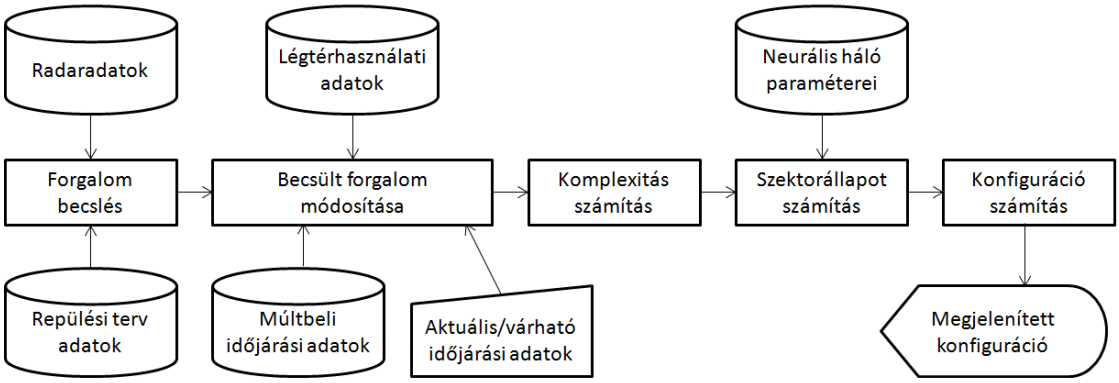
3.4. A szektorkonfiguráció előállítása

A szektorállapotok ugyanakkor önmagukban még nem tekinthetőek elég informatívnak ahhoz, hogy az eszköz kimeneti adataként szolgáljanak. Ha a supervisor csak arról kapna információt, hogy a várható forgalmi helyzet megfelelő kezeléséhez melyik lehetséges szektornak milyen állapotba kellene kerülnie, akkor saját intelligenciáját kellene használnia, hogy megkeresse azt a konfigurációt, amely mellett a kívánt szektorállapotok megvalósulhatnak. Ez nem csak időigényes feladat, de a hibázás lehetőségét is magában hordozza, ezért érdemes a döntéstámogató eszközt olyan funkcióval is ellátni, amely lehetővé teszi a szektorkonfiguráció előállítását az optimális szektorállapotokból.

Ha az eszköz által előállított optimális szektorállapotok megbízhatósága 100 % lenne, akkor a szektorkonfiguráció előállítása egyszerű lenne, mivel csak fel kellene sorolni azokat a szektorokat, amelyeket az eszköz szerint önállóan kell használni. A megbízhatóság ugyanakkor várhatóan soha nem éri el a 100%-os szintet, ami azt jelenti, hogy előfordulhatnak ellentmondások a szektorok optimális állapotai között. Tételezzük fel például, hogy egy adott szituáció esetében az eszköz azt számítja ki, hogy két egymást részben átfedő szektor (pl. EMUH és EUHT) számára is az lenne az ideális állapot, ha azokat önállóan használnák vagy azt, hogy egy két elemi szektorból előálló szektor (pl. EHT) optimális állapota az, ha kettéosztják, míg az azt alkotó elemi szektorok optimális állapota az, ha összevonják őket. Az eszköznek az ehhez hasonló esetekben is szolgáltatnia kell valamilyen információt a szektorkonfigurációról, ezért ennek meghatározására olyan algoritmust kell kidolgozni, amely képes az ellentmondásokat bizonyos szabályok alapján feloldani. Az ezt megvalósító algoritmusra [7]-ben látható példa.

Ha az eszköz előállította a szektorkonfigurációt a szektorállapotokból, akkor ezt valamilyen módon meg kell jelenítenie a supervisor számára, ami – ahogyan a 2. fejezetben is felvázoltuk – történhet szövegesen (például az önállóan használandó szektorok felsorolásával) és/vagy a szektorhatárok grafikus megjelenítésével. A megjelenítés mellett az is fontos, hogy az eszköz lehetőséget adjon a supervisornak arra, hogy az visszajelzést adhasson az előállított szektorkonfigurációval kapcsolatban, azaz jelezhesse, hogy elfogadja-e optimálisnak az adott konfigurációt vagy nem, illetve utóbbi esetben azt is megadhassa, hogy milyen más konfigurációt tartana optimálisnak.

Az 1. ábra összefoglalva szemlélteti, hogy az itt felsorolt követelmények megvalósításához milyen modulokkal kell a döntéstámogató eszköznek rendelkeznie.



1. ábra A döntéstámogató eszköz felépítése

4. AZ ESZKÖZ TOVÁBBI FELHASZNÁLÁSI LEHETŐSÉGEI

Az eddigiekben bemutatott döntéstámogató eszköz elsődleges funkciója az optimális szektorkonfiguráció meghatározása a várható forgalom jellemzői alapján. Ez azonban nem jelenti, hogy a szektorkonfiguráció-számítás lehet az eszköz egyetlen felhasználása, mivel az a belső logika módosításával vagy újabb modulok hozzáadásával alkalmassá tehető további feladatok ellátására, amelyeket az alábbiakban foglalunk össze.

Ahogyan arról az előző fejezetben is szó volt, az eszköz szektorkonfiguráció számításért felelős moduljának tanítása során lehetőség van arra, hogy az eszközt alkalmassá tegyük tetszőleges

légiforgalmi szituációk kezelésére, feltéve, hogy ezeket valamilyen módon (például szimulációval) elő tudjuk állítani. Ez azt is jelenti, hogy az eszközt nem csak olyan szituációk kezelésére készíthetjük fel, amilyenek jelenleg előfordulhatnak a gyakorlatban, hanem olyanokra is, amelyek megjelenésére a jövőben lehet számítani, például az ATC területén érvényes előírások vagy eljárások változása miatt. Ilyen változásra szolgáltat példát napjainkban az UAV[2]-k várható megjelenésének problémája az ellenőrzött légterekben, amivel részletesen [8] foglalkozik. Más szavakkal, az eszköz már az ATC rendszerben bekövetkező – a supervisorok döntéseit nagyban érintő – változások tényleges megvalósulása előtt alkalmassá tehető azok kezelésére. Ebből az következik, hogy az eszköz adott esetben felhasználható lehet a biztonsági vagy hatékonysági célú elemzés támogatására az ATC rendszert érintő tervezett változtatások előtt (például azáltal, hogy megmutatja, hogyan alakulna a szükséges szektorszám egy átlagos forgalmúnak tekintett nap folyamán a változás előtt és azt követően).

Az eszköz nem csak a tervezett változtatások hatásainak elemzését segítheti elő, hanem az aktuálisan alkalmazott rendszer paramétereinek validálását is. Ahogyan a bevezetésben utaltunk rá, napjaink ATC központjainak többségében (köztük a budapestiben is) a szektorok osztásával és összevonásával kapcsolatos egyetlen előírás az egy szektorban, egy időben maximálisan kezelhető légijárművek száma, más szóval a szektorkapacitás. Az, hogy más tényezők is szerepet kapnak-e a szektorkonfigurációval kapcsolatos döntésben, kizárólag a supervisoron múlik, vagyis az előírások önmagukban nem garantálják, hogy ezen tényezők is érvényesülni fognak. Emiatt fontos, hogy a légijárművek maximális számára vonatkozó előírásokat úgy alkossák meg, hogy ha a supervisor kizárólag ezekre alapozva hoz döntést, akkor se sérülhessenek az ATC rendszer biztonságával kapcsolatos követelmények. Az eszköz lehetőséget nyújthat arra, hogy segítségével ellenőrizzük, hogy az előírások megfelelnek-e a fenti követelményeknek. Ha például az eszköz által javasolt szektorszámok (amelyek közvetetten az aktív supervisorok véleményét tükrözik) rendre nagyobbak, mint az előírások alapján minimálisan használandó szektorszám, akkor feltételezhetjük, hogy az előírások önmagukban (a supervisor által hozzáadott intelligencia nélkül) nem garantálják a biztonságot.

Az eszköz segítségével nem csak az aktuális szektorkapacitás értékek validálhatóak, hanem a légtér aktuális szerkezete is. Elképzelhető például, hogy vannak a légtérben olyan szektorok, amelyekben rendszeresen alacsony az irányítók munkaterhelése, de nincs lehetőség ezek összevonására más szektorral, mert az összevont szektorban túl magas lenne a munkaterhelés. Ezzel párhuzamosan az is előfordulhat, hogy egy tovább nem osztható szektorban túl magas munkaterheléssel dolgoznak az irányítók. Az ilyen jellegű problémákra a szektorhatárok módosítása lehet a megoldás, ehhez azonban előbb ki kell deríteni, pontosan mely szektorokban figyelhetőek meg rendszeresen a fenti jelenségek. Ebben nyújthat segítséget az eszköz, ha kiegészítjük egy olyan egységgel, amely a szektorkonfigurációnak a szektorállapotokból történő előállítása során jelzi, ha valamelyik szektor nem az optimális állapotában került be a javasolt konfigurációba.

Fontos, hogy az előbbi kiegészítéssel az eszköz csak jelezni tudja a problémát, a szektorhatár módosítására nem tesz javaslatot. Ugyanakkor az sem megoldhatatlan, hogy az eszköz alkalmas

[2] Unmanned Aerial Vehicle, Személyzet nélküli légijármű

legyen a szektorhatárok módosítására (pontosabban az ezzel kapcsolatos javaslattételre) is. Ehhez egy olyan modullal kellene kiegészíteni, amely adott forgalomhoz képes kiszámítani, hogy hol kellene a szektorhatároknak elhelyezkedni ahhoz, hogy az egyes szektorok komplexitása (és ezáltal a munkaterhelése) az optimális tartományba essen és szektoronként csak minimálisan térjen el. Egy ilyen funkció megvalósítása azért is fontos, mert a légiforgalmi irányítási rendszerekben a közeljövőben várható a dinamikus szektorizáció bevezetése, azaz a munkaterhelés optimalizálása már nem csak szektorok nyitásával és zárásával lesz elérhető, hanem a szektorhatárok módosításával is. Emiatt egy szektorizációval foglalkozó döntéstámogató eszközzel kapcsolatban a jövőben várhatóan alapvető elvárás lesz, hogy képes legyen optimális szektorkonfiguráció mellett optimális szektorhatárokat is számítani.

A tervek szerint a döntéstámogató eszköz kezdetben a korábban felsorolt tényezőket, azaz a légijárművek jellemzőit, a légtér jellemzőit (ideértve az időjárási körülményeket is) és a műszaki eszközök állapotát venné figyelembe a szektorkonfiguráció meghatározása során. Ezek mellett ugyanakkor fontos tényező lehet a légiforgalmi irányítók állapota is. A szektorbontási lehetőségek korlátai – vagyis az állandó szektorhatárok – miatt elkerülhetetlen, hogy bizonyos forgalmi helyzetek mellett egyes irányítók magasabb munka- és stressz terheléssel dolgozzanak, mint mások. Annak érdekében, hogy ez az állapot ne maradjon fenn hosszabb ideig, törekedni kell arra, hogy a szektorkonfiguráció változtatását követően az addig magas terheléssel dolgozó irányítók a korábbinál alacsonyabb, míg az alacsony terhelés mellett dolgozók a korábbinál magasabb terhelésnek legyenek kitéve az új konfigurációban rájuk bízott szektor irányítása során. Ennek a megvalósítása szintén a supervisor feladata, ezért érdemes lehet erre szolgáló funkciókkal is ellátni a döntéstámogató eszközt. A gyakorlatban ez úgy valósulhat meg, hogy az eszköz valamilyen módon figyeli az irányítók stressz állapotát és olyan esetekben, amikor egy adott szituációhoz többféle szektorkonfiguráció is alkalmazható lenne (a biztonsági és hatékonysági követelmények azonos szintű teljesítése mellett), akkor ezek közül azt választja optimálisnak, amely mellett a fenti követelmény is teljesül.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A légiforgalmi irányítók munkáját koordináló supervisoroknak a szektorkonfigurációval – és ezáltal a forgalmat kezelő irányítók számával – kapcsolatos döntéseit célszerű automatizált döntéstámogató eszközzel támogatni, annak érdekében, hogy a döntések eredményeként az irányítók munkaterhelése optimális legyen. Egy ilyen eszköz működésének alapjául a légiforgalmi szituációk számszerű értékekkel kifejezett komplexitása szolgálhat, ami alapján például a korábban röviden ismertetett neurális hálós logika segítségével meghatározható az optimális munkaterhelést eredményező szektorszám és a szektorok határai. Az eszköz elméletben megvalósítható, a gyakorlati alkalmazásához azonban meg kell oldani néhány, a korábbi fejezetekben felvázolt problémát, ami általában a központi logika különféle algoritmusokkal történő kiegészítésével történhet.

Az eszköz tervezéséhez kapcsolódóan elvégzett előzetes felmérés eredményei alapján a neurális hálós logika segítségével az eszköz alkalmas lehet arra, hogy ellássa elsődleges funkcióját (az optimális szektorkonfiguráció meghatározását), ezért a jövőben érdemes elvégezni a fejlesztési folyamat további lépéseit. Ezek közé tartozik az említett kiegészítő algoritmusok megtervezése például a forgalom előrebecslése, az időjárási tényezők számszerű kifejezése vagy a

javasolt szektoroknak a szektorállapotokból történő meghatározása céljából. Szintén meg kell tervezni a logikáját azoknak a moduloknak, amelyek az eszközt olyan kiegészítő funkciókkal látják el, mint a szektorhatárok módosítása vagy az irányítók stressz állapotának figyelemmel kísérése. Ezt követően (vagy ezzel párhuzamosan) azt is meg kell vizsgálni, hogyan lenne beépíthető egy ilyen eszköz az olyan integrált automatizált légiforgalmi irányítási rendszerekbe, mint a HungaroControl Zrt. által használt MATIAS (vagyis például milyen formátumú adatokhoz juthat hozzá az eszköz és milyen interfészekkel kell rendelkeznie ezek kezeléséhez).

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] GIANAZZA, D., GUITTET, K.: Evaluation of air traffic complexity metrics using neural networks and sector status. Proceedings of the 2nd International Conference on Research in Air Transportation, ICRAT 2006, Belgrád, 2006

[2] RODGERS, M. D., MOGFORD, R. H., MOGFORD, L. S.: The relationship of sector characteristics to operational errors. FAA Aviation Medicine Report, 98/14, 1998

[3] ROHÁCS JÓZSEF, ROHÁCS DÁNIEL, JANKOVICS ISTVÁN: Járművezetők szubjektív döntéseinek vizsgálata. Innováció és fenntartható felszíni közlekedés, IFFK 2015, Budapest, pp. 14-22., 2015

[4] SZÁMEL BENCE DOMONKOS, MUDRA ISTVÁN, SZABÓ GÉZA: Applying Airspace Capacity Estimation Models to the Airspace of Hungary. Periodica Polytechnica: Transportation Engineering 43:(3) pp. 120-128., 2015

[5] SZÁMEL BENCE, SZABÓ GÉZA: Towards safer air traffic: Optimizing ATC controller workload by simulation with reduced set of parameters. Safety and Reliability: Methodology and Applications: ESREL2014, Wroclaw, pp. 979-987., 2014

[6] SZÁMEL BENCE DOMONKOS, SZABÓ GÉZA: Légtérkapacitás számítás elméleti modellek alapján. Repüléstudományi Közlemények, 26(2), pp. 296-318., 2014

[7] SZÁMEL BENCE DOMONKOS, SZABÓ GÉZA: Tapasztalati úton meghatározott légijárműszám alapú és komplexitás alapján matematikai módszerrel számított szektorkapacitás értékek korrelációjának vizsgálata. Innováció és fenntartható felszíni közlekedés, IFFK 2014, Budapest, pp. 231-240., 2014

[8] VAS TÍMEA, FEKETE CSABA: UAV az ellenőrzött repülőtér forgalmában, avagy egy szimuláció tapasztalatai. Repüléstudományi Közlemények, 25(2), pp. 371-383., 2013

DEVELOPING A DECISION SUPPORT TOOL FOR COMPLEXITY BASED ESTIMATION OF OPTIMAL ATC SECTORCONFIGURATION

The safety (and efficiency) of Air Traffic Control systems is largely influenced by controller workload. In order to keep the workload at an optimum level, the number and borders of sectors in the airspace (i.e. sector configuration) has to be changed dynamically in accordance with the characteristics of the actual traffic situation. Making a decision regarding sector configuration is a highly complex task which makes automated decision support reasonable. Implementing a tool developed for this purpose requires to solve numerous problems owing to the complexity of the automated decision process. In this paper, we will present the requirements to be satisfied by a tool that enables automated estimation of sector configuration, the objectives to complete in the design phase of such a tool and the functions that can be fulfilled by the tool beside calculating sector configuration.

Keywords: *air traffic control, sectorization, complexity, decision support*

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_3/2015-3-04-0237_Szamel_B-Szabo_G.pdf

Bera József – Pokorádi László

LÉGI FORGALOM KÖRNYEZETBIZTONSÁGI MODELLJÉNEK ZAJSZEMPONTÚ ELEMZÉSE

A légi közlekedés és a repülőgépipar fejlesztése napjainkban már felöleli a környezetvédelmi követelmények teljesítését is, a légi forgalom menedzselése és irányítása elképzelhetetlen a környezeti problémák kezelése nélkül. Ezáltal a hagyományos és a modern környezetszennyezés mennyiségi és minőségi különbségeiből fakadó modern környezeti probléma a légi közlekedés szerves részévé vált. A modern környezeti probléma értelmezésében az egyének és a társadalmak számára a repülés az átlagos élet szükséges velejárója, miközben egyre mélyebb és összetettebb a környezet védelmét, ezen belül a zaj elleni védelem érvényesülését megfogalmazó elvárás. A repülőterekhez kapcsolódó zajterhelés erősíti az érintett társadalmi csoportok részéről a zaj kezelésének jelentőségét. A repülési zaj csökkentése azonban csak olyan beavatkozások útján lehetséges, melyek a repülésbiztonságot is érintik, ezért a légi közlekedés és a környezeti zajterhelés vizsgálatára a környezetbiztonság keretein belül látunk megoldást.

Kulcsszavak: *légi közlekedés, környezeti zajterhelés, zaj kezelése, környezetbiztonság.*

1. BEVEZETÉS

Első áttekintésre talán nem ad összefüggő képet a *légi forgalom – környezetbiztonsági modell – zaj* fogalmakból alkotott gondolatsor a Tisztelt Olvasó számára. A modern környezetszennyezéssel kapcsolatos felvetések, valamint ezekre a felvetésekre adott válaszok azonban magyarázatot adnak egy ilyen szokásostól eltérő fogalmi összefüggésre. A kiinduló gondolatsor első eleme, hogy az antropogén eredetű környezeti igénybevétellel együtt kell említést tenni az emberi tevékenységek folytatásával szemben támasztott társadalmi és globális elvárásról is. Ez a kettősség eredményezte a modern környezetszennyezés kialakulását.

Modern környezetszennyezésről beszélünk a légi közlekedés esetében is, hiszen ahogy az általános emberi tevékenységekkel, úgy a légi járművek használatával, repülőterek üzemelte-tésével és a repüléssel szemben is országhatárokon túlnyúló, széleskörű igény alakult ki a XX. és a XXI. századokban. A légi forgalomtól származó környezetterhelés, ezen belül a környe-zeti zajhelyzet megértése és kezelése tehát napjainkban már megköveteli, hogy a hagyományos elszigetelt oksági láncolatban való gondolkodás helyébe a dinamikus rendszerek hálózati modellje kerüljön.

A légi közlekedés olyan tevékenységek sorába tartozik, melynek fenntartása alapvető a legtöbb ember számára, ma már elképzelhetetlen az emberi lét ezek hiányában. Gondoljunk csak bele, hogy mi lenne, ha leállítanánk valamely célországban a légi forgalmat. A repülőtereken egy-egy országba vagy régióba naponta belépő, illetve az onnan kilépő utasok számát, az utazások célját és fontosságát tekintve ez beláthatatlan következményekkel járna. A repülésben tevékenységet végzők tehát kiszolgálják a repüléssel szemben támasztott igényeket, nem tehetnek mást. A repülés ugyanakkor komplex környezethasználati folyamatot jelent, ami a repülésbiztonság kérdéskörét is érinti, különös tekintettel a repülési kockázatokra.

A megkezdett gondolatsor második eleme az a követelmény, hogy a környezetvédelem és a repülés,

mint műszaki folyamat között összhang alakuljon ki a környezeti hatások kialakulását befolyásoló összes jellemző megismerésével. A nem várt repülőesemények, balesetek és az üzemeltetésben bekövetkező meghibásodások a környezetvédelem egyes elemeit is magukban hordozzák, így az egyéb – emberi élet megóvása, javak megőrzése és védelme, célállomás biztonságos elérése – kiemelt szempontok mellett a repülési balesetekből adódó környezet-szennyezés bekövetkezési valószínűségét is csökkenteni kell. Ezért kiemelt jelentősége van a repülésre jellemző tervezésnek, üzemeltetési- és munkafegyelemnek, valamint folyamatos kontrollnak. Ezekbe a folyamatokba be lehet építeni a környezetvédelem eszközeit. Ez a lehetőség azonban csak akkor lesz adott, ha nem okoz zavart az üzemeltetési folyamatban, és a végrehajthatóságra tekintettel történik. Mindezek együttese vezet a környezetbiztonsághoz, mint a veszélymentes állapot fenntartásához a környezetvédelmi szempontú beavatkozások lehetőségén keresztül.

A környezettudomány keretein belül meghatározó környezeti probléma a zaj, a zajterhelés és a zaj elleni védelem megoldatlansága, amire számos kutató rávilágított kutatásai során. A környezeti zaj jelentőségét tágabb társadalmi vonatkozásban is értelmezhetjük, hiszen a kör-nyezeti hatások gazdasági következményeit tekintve stratégiai kérdésként jelenik meg, a zaj- és rezgésterhelés a kialakulás folyamatát és a kiváltott hatást tekintve napjainkban már ennek a stratégiának a meghatározó elemévé vált.

A gondolatsor harmadik eleme tehát a környezeti zaj, mellyel kapcsolatban azonnal felmerül a kérdés, miszerint: *mit nevezünk zajnak, és a különböző zajokat mikor soroljuk a káros környezeti hatások közé?*

A természetes környezetben is vannak zajok, amit zavarás hiányában a természet hangjainak nevezünk. A hangok az élethez tartozó jelenségek. A mérhető fizikai jellemzőket tekintve ezek gyakran hasonló értékkel bírnak, mint terhelt környezetben mért zajszint értékek. A hang az információ és az élmény eszköze mindaddig, amíg az ember a helytelen használat útján a hangot át nem alakítja zavaró hatássá. Ebből következik, hogy a hangot használjuk, tehát használati eszköz, az emberi lét és a földi élet része. Minden tevékenység és történés kötődik valamilyen hanghatáshoz, amit eltérő módon minősítünk. Az ember minősít, az állatvilág egyedei viselkedésükkel jeleznek. A hangot az ember helytelen viselkedéssel és használattal alakítja át zavaró hatássá. Fontos azonban, hogy hiánya is, túlzott mértéke is környezeti bizonytalanságot okoz.

A zaj keletkezését és környezetbe való kibocsátását, vagyis a térben okozott zavarás mértékét és jellegét elsődlegesen a forrás határozza meg. A zajcsökkentéshez ezért meg kell ismerni a forrás azon műszaki adatait és a zajkeltés jellemzőit, melyek szükségessé és egyben a zajforrás oldalán lehetővé teszik a zajcsökkentést. Minden esetben, amikor zajforrásról beszélünk, környezetvédelmi szempontból meghatározott kategóriába soroljuk az adott technikai eszközt, így a repülőeszközöket is. Ebből következik, hogy nem minden tevékenység vagy gép minősül zajforrásnak – nem minden zajforrás, ami forog és mozog –, csak az olyan hangforrásokból lesz zajforrás, melyek hangja valamilyen szempontból zajnak minősül, például emberi megítélés szerint a védendő környezetben kellemetlen zavaró és szubjektív észleléssel is jól elkülöníthető zavaró hatást okoz. A légi közlekedés szempontjából az adott vizsgálat függvényében zajforrás lehet maga a repülőeszköz, de a sajátos jellemzők miatt a légi forgalom is zajforrás.

A zavaró hatás kialakulását a kibocsátó forrás mellett az érintett környezet állapota is meghatározza. Ugyanis nem a repülési zaj jelenti az egyedüli zajterhelést a környezetben, egy-egy

helyszínen több különböző, és emiatt eltérő tulajdonságú kibocsátó forrástól származó zajterhelés is felléphet. Ez a környezeti alapállapot már kihatással van a vizsgálatba vont légi forgalmi zajra, mind az észlelés, mind a mérés és értékelés szempontjából.

Az eddigiekben elmondottak alapján látható, hogy környezetvédelmi szempontból is szükség-szerűvé vált a légi közlekedéstől származó zaj olyan vizsgálata, ami a környezetbiztonságra figyelemmel közelíti meg a problémát. Ezért lényeges, hogy zajcsökkentési célzattal való be-avatkozásnál a repülésbiztonság és ezen keresztül a környezetbiztonság érdekei ne sérüljenek, vagyis biztosítottak legyenek a végrehajtás feltételei, ezzel együtt a légi forgalom továbbra is az elvárásoknak megfelelő szolgáltatást jelentsen a szállítás és utaztatás vonatkozásában. Ezért vizsgáltuk a légi forgalom – környezetbiztonsági modell – zaj kapcsolatán keresztül a repülést, a repülés környezeti hatásait és repülési zajterhelést, illetve a zaj kezelése céljából szükséges és lehetséges beavatkozásokat.

2. KÖRNYEZETVÉDELMI HELYZETÉRTÉKELÉS

A környezetvédelmi elemzések jelentős része abból a feltételezésből indul ki, mintha csak az aktuálisan vizsgált környezeti hatás lépne fel egy-egy környezethasználati tevékenység során, azaz más környezeti hatással nem kellene számolni. Ebből fakadó hiányosság, hogy ez a megközelítés koncentrálva egy kiemelt környezeti tényezőre figyelmen kívül hagyja az egyéb környezeti hatásokat, valamint nem veszi kellő mértékben számításba az esetlegesen kialakuló kedvező környezetvédelmi eredményeket. A korszerű környezetbiztonsági elemzésekhez azonban olyan átfogó modell, illetve modellezési elv kialakítása szükséges, ami egységesen fedi le a környezet igénybevételét, mint rendszert, valamint az igénybevétellel érintett rendszerkörnyezetet.

A rendszerszemléletű elemzésen alapuló környezetbiztonsági modellalkotás tulajdonképpen a vizsgált környezeti helyzet teljes körű leírása a valóságos tulajdonságok alapján, melynek a környezetterhelési adatokon túl ki kell terjednie a kibocsátási oldalon a működést befolyásoló, valamint a környezeti oldalon az észlelést befolyásoló valamennyi jellemzőre, ami már rendszerszemléletű elemzést kíván.

2.1. Általános környezetvédelmi áttekintés

A XXI. században a környezetvédelem minden társadalom egyik alappillére, az emberiség számára a létfenntartás nélkülözhetetlen része. A környezetvédelmi helyzet közvetlenül és közvetve is kihat a gazdaság működésére és fejlődésére, a lakosság közérzetére és ezen keresztül az emberek részéről meghozott mindennapi döntésekre, az életvitel kialakítására. Sajnálatos tény ugyanakkor, hogy sokan csak akkor figyelnek fel a környezetvédelmi problémákra, amikor már a személyüket közvetlenül hátrányosan érintő helyzet alakul ki. Ilyen helyzet lehet például az utcán vagy a lakókörnyezetben megjelenő elhagyott hulladék, egy bűzhatás vagy jelentős porképződés, a közúti vagy vasúti forgalommal összefüggő zajterhelés, de ide tartozik a légi forgalom miatt fellépő zaj is.

Általános megközelítésben a környezetvédelem és a környezetgazdálkodás kialakulását a környezeti folyamatok felgyorsult változásai indokolják. A világban és egy-egy társadalomban zajló felgyorsult változások alapvetően környezetünket, annak biotikus és abiotikus elemeit érintik, ezért a talaj, a víz, a levegő és az élővilág, valamint a természeti erőforrások védelme előtérbe került. A

hagyományos értelemben alkalmazott környezetvédelem azonban a környezeti folyamatok megváltozott jellegére tekintettel célszerűen rögzítsük úgy, hogy a környezetvédelem az emberi tevékenységek és a környezethasználattal járó folyamatok káros következményeinek kiküszöbölésére irányuljon mind az anyagi, mind az energia jellegű terhelési folyamatokra kiterjedően.

A környezetvédelem, mint szóösszetétel a szakirodalomban vagy a lexikonokban az 1970-es évekig nem jelent meg önállóan. A környezetvédelmi kérdésekkel azonban a különböző szakterületek már ekkor is foglalkoztak, hiszen az erózió és a defláció ellen védekezni kellett, a szennyvíztisztítás feladatait el kellett látni, illetve a hulladékok elhelyezésekor vagy a zaj és rezgés elleni védelemben a közegészségügyi igények érvényesítése már a múlt század utolsó évtizedeiben is megjelent. Ezek egy-egy szakma szakkifejezései voltak.

Az emberiség életében bekövetkező tudományos-technikai fejlődés az energiaforrások feltárását, termelésbe vonását és fokozódó automatizálását, a termelékenység megsokszorozódását és a legkülönfélébb mesterségesen előállított anyagok felhasználását fokozta. Mindez magával hozta a közlekedés fejlődését is, a különböző közlekedési ágazatok, ezen belül a repülés ugrásszerű növekedésnek indult.

A közlekedés fejlődése mind a korszerű és egyre fejlettebb eszközök megjelenésével, mind a közlekedési hálózatok folyamatos kiépülésével hozzá járult a modern környezetszennyezés kialakulásához, miáltal az emberek az utazási és szállítási lehetőségekre ma már úgy tekintenek, mint a természetes és átlagos élet velejárója. Az országhatárokon átlépő utazók – akár munkavállalás és üzleti céllal, akár turizmus és látogatás céllal teszik ezt – kihasználják ezt a lehetőséget, mindenki a számára kínálkozó utazási formát választva tesz meg kisebb-nagyobb távolságokat. Az integrált közlekedési láncok egyik következménye, hogy napjainkban már a lokális környezeti problémák helyébe, illetve azok fennmaradása mellett az átfogó környezeti problémák jelentek meg, az egyszerűek helyébe komplex hatások léptek. Ennek egyik oka, hogy a környezeti hatás okaként azonosított tevékenységek is kiterjedtek.

Az országhatárok nyitottabbá válásával a közúti tranzitforgalom megélénkült, egyre gyakrabban alakulnak ki torlódások a határátkelőhelyeken és a jelentősebb forgalmi csomópontokban, a közutak fenntartási és üzemeltetési költségei növekedtek. Ezek együttese a környezeti igénybevétel fokozódásához vezettek. Ebbe nemcsak a tényleges közúti forgalomtól származó zajterhelés vagy levegőterheltségi szint tartozik bele, hanem az utak építésével, karbantartásával, felújításával, a közutak mentén keletkező elhagyott hulladékok gyűjtésével és szállításával kapcsolatos járulékos környezetterhelés is.



1. ábra Közúti és vasúti közlekedési folyosók Magyarországon

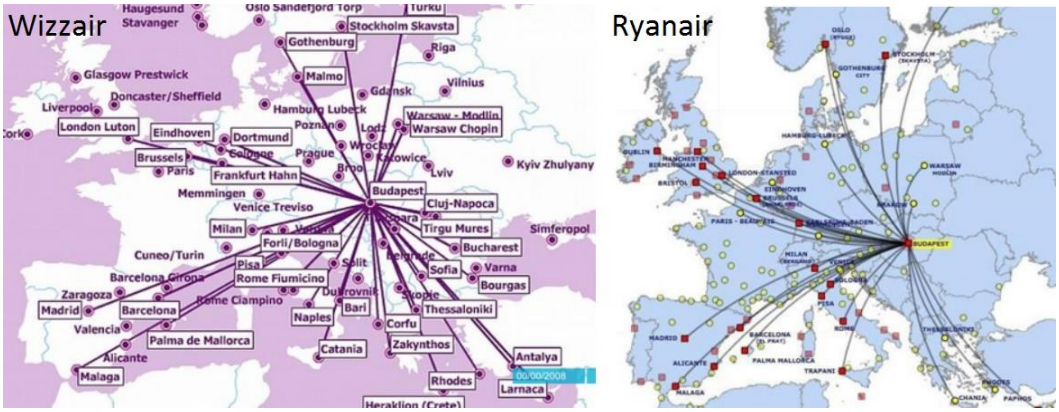
Hasonló gondokkal kell megbirkózni a vasúti közlekedés esetében is, melynél a közúttal szembeni különbségek a vasútüzemeltetés szabályozottságából adódnak, illetve említést kell tenni a

kötöttpályás közlekedési forma előnyeiről. Magyarország közúti és vasúti közlekedési folyosókat az 1. ábra szemlélteti.

A vízi úton való utazás és szállítmányozás Magyarországon a közúttal és a vasúttal szemben nem számottevő, jelenleg 5–10 % közé tehető. Ennek oka a rendelkezésre álló infrastruktúra és a szállító eszközök elavultsága, a folyóvizeink, elsősorban a Duna folyam vízmélysége a folyamatos teherhajózáshoz nem elég, kevés a kikötő. Mivel a lehetőségeket és az elérhető megoldásokat keressük mind a közlekedésben, mind a környezetvédelemben, a továbbiakban a légi közlekedésről kell említést tenni.

A nagy távolságok áthidalója a légi közlekedés. Gyors, a személyszállítás mellett az árufuvarozásban egyre nagyobb teret nyer, az értékes és viszonylag kistömegű áru szállításában gazdaságos. Ráadásul a távoli országokban lévő célállomások jelentős része közúton, vasúton vagy vízi úton nehezen, illetve hosszabb idő alatt közelíthető meg, ami a légi úton való utazást és szállítást helyezi előtérbe.

Másik szempont, hogy a földi közlekedési hálózatok kiépítése és fenntartása a tényleges forgalom mellett további jelentős környezetterhelést jelent, ami a területfoglalást és a környezet végleges megváltoztatását tekintve jelentős többlet terhelést jelent, mint a járművek zajkibocsátása és légszennyező anyag kibocsátása. A légi forgalom a repülőterek helyszínein és azok környezetében, illetve a légi folyosók vonatkozásában jelent környezetterhelést, de például a területfoglalás jóval kisebb, mint a közút vagy vasút esetében. A légi közlekedési hálózat jelenlegi kiépítettsége már lehetővé teszi, hogy bárhova eljussunk repülővel. Magyarországról átszállás nélkül elérhető térségek számára látható példa a teljesség igénye nélkül a 2. ábrán.



2. ábra Magyarországról légitársaságok járataival elérhető térségek (forrás: Wizzair, Ryanair)

A közlekedés valamennyi ágával szemben támasztott követelmény a XXI. században, hogy kisebb-nagyobb mértékben járuljon hozzá az utazásból és áruszállításból eredő környezetterhelés csökkentéséhez.

Egy ilyen elvárás megfogalmazása jelentős terhet ró a közlekedés szereplőire, ami a légi közlekedésre is igaz. Ezért a közlekedési ágazatokkal szemben támasztott működési-szolgáltatói igényt is figyelembe véve a lehetőségeket kell elsőként számba venni. Amíg az elvárható mértékű beavatkozások és intézkedések nem tisztázottak, valamint az okok teljes feltárása elmarad, a várt hatásokra hiába vár a közönség. Az elvárások alapgondolataként rögzítjük az alábbiakat: Lehetetlenre senki sem kötelezhető.

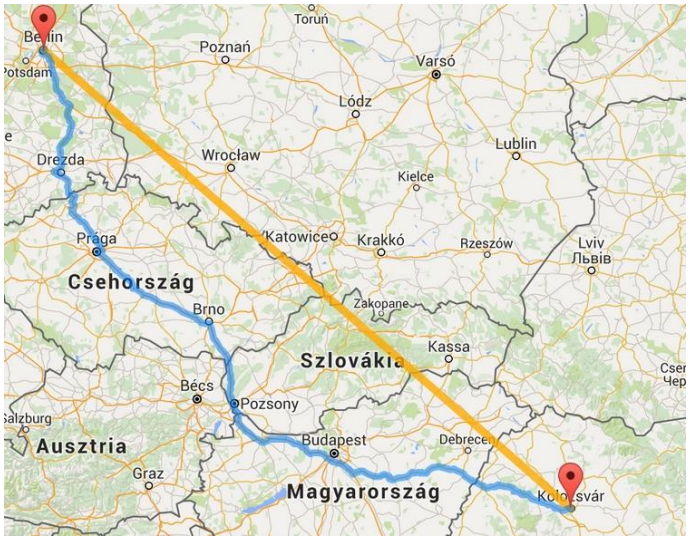
2.2. Repülőgép vagy más közlekedési eszköz kérdése

Annak eldöntéséhez, hogy egy utazás vagy egy szállítási művelet esetében melyik közlekedési mód kerüljön kiválasztásra, több szempont figyelembevétele is indokolt. A szempontrendszer vizsgálata azért is érdemel figyelmet, mivel a koncepcionális döntéshozatal elengedhetetlen része, és a környezetvédelem érdekeit is képviseli.

Az utazások és a különböző szállítmányok továbbításának egyik meghatározó tényezője az időtartam, vagyis a közlekedési eszköz használatával eltöltött idő. Mivel napjainkban egyre inkább növekszik a nagy távolságok megtételének igénye, az utazással eltöltött idő is előtérbe került. Utazási időre mutatunk példát az alábbiakban.

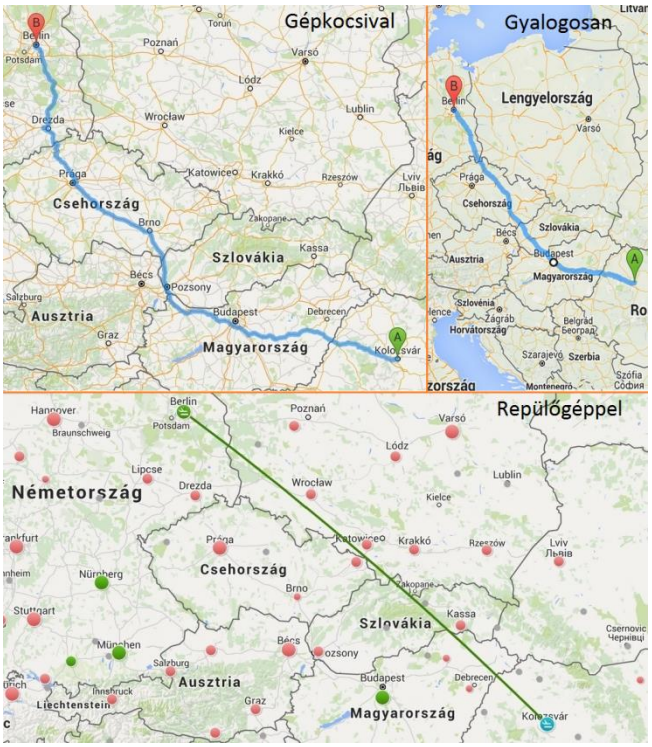
Legyen az utazás kiindulási helye Kolozsvár, az érkezési pont Berlin. Kettő közlekedési módot vizsgálunk, egyrészt egyénileg gépjárművel közúton, másrészt repülőgéppel. Az indulási és az érkezési pont közötti távolság légvonalban 1 007,2 km, átlagos útvonalon 1 287 km. A távolságok és a települések elhelyezkedése a 3. ábrán látható.

A 3. ábra alapján közúton az utazás a kiindulási és érkezési állomások között 5 ország területét érinti. Légvonalban 6 ország lehet érintett. Szembetűnő különbség a távolságokban van, az eltérés 279,8 km. A korszerű közlekedési eszközöket tekintve ez a távolságban kimutatható különbség nem tűnik jelentősnek, hiszen egy 130 km/h sebességgel haladó gépjárművel 2,15 óra alatt lehet megtenni ekkora távolságot. A probléma és a környezetvédelmi szempontból tett felvetés abból adódik, hogy nem csupán ezt a 2,15 órát kell utazással eltölteni, hanem jóval hosszabb időt, amihez ez csak hozzáadódik. Másik kérdés, hogy nem áll rendelkezésre a két település között kiépített autópálya, ami folyamatos haladást tenne lehetővé.



3. ábra Kolozsvár és Berlin közötti távolságok (forrástérkép: Google Earth)

Az utazási lehetőségek összevetése ennél pontosabb képet ad a kijelölt távolság megtételével kapcsolatosan attól függően, hogy a repülőgépet vagy a személygépjárművet választjuk az út megtételéhez. A két alternatíva összevetését a 4. ábrán mutatjuk be, a részletes adatokat az 1. táblázatban foglaljuk össze.



4. ábra Különböző utazási módok összevetése térképen (forrástérkép: Google Earth)

Ahogy a 4. ábrán és az 1. táblázat alapján látható, az utazási módok időtartama között különbségek már meghatározóan lehetnek, amit a bemutatott példa is alátámaszt. Repülőgéppel történő utazás esetén még elfogadható időt tölt az utas a járművön, míg a 14 órát meghaladó utazás már igen megterhelő lehet. Többszöri megállásra, pihenésre, étkezésre kényszerül az utazó. Napjainkban még elterjedten választják az emberek a nagyobb, akár több ezer km-es távolságok megtételéhez a gépkocsit, melynek egyéb, főként ingóságok szállítása és pénzügyi okai vannak. A hosszabb utazási idővel azonban a környezetet is nagyobb mértékben terhelik. Ez a járulékos probléma a közúti járművek használatával összefüggő környezetterhelés problémakörét bővíti, ami ma már nem is elhanyagolható méreteket öltött. Ennek egyik jele az utak, pihenőhelyek és határátkelőhelyek környezetében keletkező hulladék, melynek gyűjtése, szállítása és ártalmatlanítása szintén a környezet igénybevételével végezhető el. Határátkelőhelyen keletkező hulladékokra mutat példát az 5. ábra.

Utazási mód	Távolság	Időtartam
Gyalogosan	1 189 km	10 nap 2 óra
Gépkocsival	1 287 km	14 óra 22 perc
Repülőgéppel	1 007 km	6 óra 15 perc

1. táblázat Különböző utazási módok adatai

Az utazási távolságok befolyásolására a jelenlegi gazdasági és társadalmi viszonyok mellett nincs lehetőség, a szabad mozgás korlátozása – például Európai Unió tagországai között – nem lehetséges. Az utazásból és az áruszállításból eredő környezetterhelés csökkentésének másik lehetősége, hogy az utazással eltöltött időt csökkentjük. Ez a szándék ugyanakkor összefügg a modern környezetszennyezés kérdésével.



5. ábra Hulladékok közúti határátkelő helyen

A modern környezetszennyezés csökkentésével kapcsolatos további megállapítások:

- a nagytávolságú utazásoknál és szállításoknál a járműmozgásokkal összefüggő környezetterhelés mellett jelentős a járulékos környezeti kibocsátások hatása is, amit jelenleg még nem kezelünk megfelelő módon;
- a járulékos környezeti hatások mértéke az utazással eltöltött idő függvényében változik, a területi érintettség az utazási idővel növekszik;
- szabályozott, a kiindulási és az érkezési állomásokat érintő utazásoknál csökkenthető legnagyobb mértékben a járulékos környezeti hatás;
- a közösségi közlekedési eszközök használatával csökkenthetőek az utazással érintett területeken kialakuló környezetterhelés.

3. AMITŐL A REPÜLÉSI ZAJ MEGHATÁROZÓ LESZ

A biztonság, mint veszélymentes állapot gyakran jelenik meg a katasztrófák vonatkozásában, ebből az aspektusból megközelítve a katasztrófák előfordulása, következményei és az előrejelzés kap szerepet. Az emberi viselkedésformák szoros összefüggésbe hozhatók az igénybe vett környezettel, a katasztrófákkal kapcsolatban, de ezáltal a környezet a vészhelyzeten keresztül jelenik meg. Ebben az esetben az emberi élet mentése lesz az elsődleges szempont, ezáltal nem kap kellő hangsúlyt a környezet védelme. A környezetvédelmi szempontú megelőzés ugyanakkor képes biztosítani egy olyan veszélymentes állapot fenntartását, ami az emberi élet és az anyagi javak megóvására is kiterjed.

A modern környezetvédelemnek túl kell mutatnia a hagyományos értelemben megfogalmazott biztonságon, így szükségszerű azoknak a tudományos eredményeknek a megismerése, melyek a veszély megszüntetését az emberi tevékenységek és a környezeti igénybevétel közötti összhang megvalósulásával segítik elő. Ennek jelentőségére több kutató is rámutatott, ahogy felhívta erre a figyelmet Захваткин is, amikor az általános és a mezőgazdasági ökológián keresztül mutatja be a hagyományos tevékenységeket a környezetvédelmi perspektívákkal és módszertannal együtt. Az

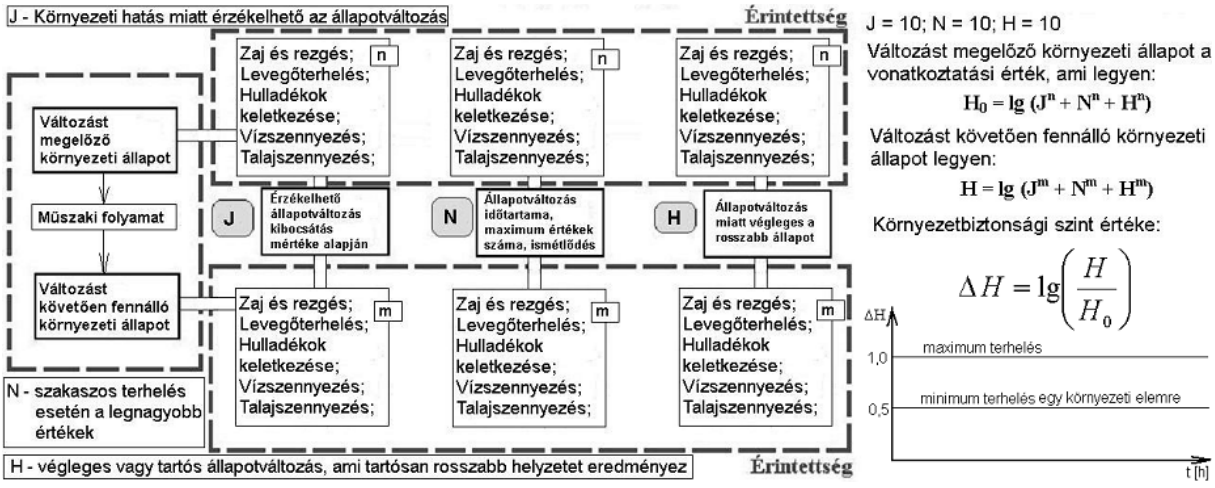
általa bemutatott módszertan szerint nem csak arra kell összpontosítani, hogy a megfogalmazott környezeti igények alkalmazkodjanak a mezőgazdasági termeléshez, hanem az általános elképzelést kell bővíteni a környezeti tényezők és a folyamatok rendszerelemzésével [1].

Ahogy az emberi tevékenységek többsége, úgy a légi közlekedés is összetett, valamint időben változó hatást gyakorol környezetére, a környezet részéről adott válaszreakciók ezért minden esetben változó jelleget mutatnak. A környezeti válaszreakciók fő jellemzője ebből adódóan a bizonytalan hatásmechanizmus, valamint a nem állandósult, instacioner állapot. Mivel a környezeti állapotjellemzők a forráshoz hasonlóan befolyásolják a kialakuló terhelés mértékét, jellegét és sokszor az időtartamát, azt lehet kijelenteni, hogy

- a környezet igénybevételével és a légi közlekedéshez tartozó környezet kapcsolódási pontjai is bizonytalanok;
- a környezet is hatással van a kialakuló terhelés jellemzőire, azon keresztül pedig a kibocsátó forrásra, azaz a repülési műveletekre.

Fontos, hogy mind a kibocsátási oldalon megjelenő pozitív és negatív jellegű eltéréseket, mind a környezeti jellemzőkben bekövetkező és a környezetterhelést befolyásoló változásokat együttesen vegyük figyelembe. Ennek azért tulajdonítunk jelentőséget, mert a környezetterhelést meghatározó jellemzők állapota nem köthető állandósult értékhez, ami a környezetterhelési állapotténezők bizonytalanságát eredményezi.

Környezetterhelés szempontjából ugyanakkor nem egyetlen hatásról vagy tényezőről beszélünk, hanem több eltérő, de a kibocsátási oldalt tekintve egymással összefüggésben lévő hatás érvényesül. Ezek együttes értékelése, vagy a helyes beavatkozás meghatározása a legtöbb esetben nehézkes, ezért az adott környezeti helyzetet kölcsönhatásokkal összekapcsolt elemek összességeként célszerű leírni és ebben a megközelítésben vizsgálni. Ehhez szükséges egy olyan értékelési módszer kidolgozása, melyből jobban kitűnik a hatások jelentősége, valamint a járulékos környezetterhelés mértéke. Erre mutat példát a *6. ábrán* összefoglalt javaslat.



6. ábra Környezeti hatások értékelése [2]

A közlekedéstől – természetesen a légi-, közúti-, vasúti- és vízi közlekedést együttesen tekintve – származó környezetterhelés jelentőségét növeli, hogy a környezet alapállapota tartósan vagy véglegesen változik meg azokon a területen, ahol egy közlekedési létesítmény megépül, és a tevékeny-

ség zajlik, ez a változás kisebb-nagyobb mértékű az adott helyzet függvényében. Van olyan speciális helyzet, amikor két fontos kérdés kiemelt szerepet kap egy közlekedési módozat értékelésénél:

- az időszakosan fellépő és rövidebb idejű és időnként megszűnő hatás kisebb eredő környezetterhelést jelent?
- a környezet állapotában várható-e maradandó, ismétlődő változás, vagy az állapotjellemzők visszaállnak az eredeti értékekre?

Ezek a kérdések főként azokban az esetekben kapnak jelentőséget, amikor egy szállítást speciális körülmények között kell megoldani, nagy tömegű szerkezeti egységek (például épületgépészeti elemek, tornyok vagy tartóoszlopok) beemelése és mozgatása a feladat, árut vagy személyeket kell rövid idő alatt nagy távolságra szállítani, esetleg nem áll rendelkezésre valamennyi közlekedési lehetőség – nincs kiépített út, a célterület vasútvonaltól távol helyezkedik el – egy adott feladat elvégzéséhez. Létezik ugyanakkor olyan helyzet, amikor a szállításra vagy a feladat végrehajtására csak egy közlekedési mód, például a repülés az egyedüli alternatíva. Ilyen a természetvédelmi területekre való időszakos berepülés is, ami kisebb beavatkozást jelent a szárazföldi közlekedési eszközökkel szemben olyan körülmények között, mint árvíz, szúnyoggyérítés, katasztrófa elhárítással összefüggő feladatok ellátása, vagy vezetékek ellenőrzése. Emellett a légi közlekedésben kiemelt jelentőséget kap a kiképzési repülés, ami szintén a biztonság kérdéskörét érinti, valamint a szabadidős vagy bemutató repülési tevékenység.

Amennyiben a speciális helyzeteket is nézzük, a légi közlekedés előnyeiről említést kell tenni a többi közlekedési ágazattal összehasonlítva. Például a területfoglalás mértéke elmarad a közutak vagy a vasút helyszükséglete mellett, rövid idő alatt nagy távolságok áthidalását teszi lehetővé, a jelentősebb környezeti hatás többnyire a repülőterek környezetére terjed ki, a földtani közeg terhelése csak a repülőtér területét érinti. A 6. ábrán feltüntetett szempontrendszer rávilágít arra, hogy légi közlekedés, illetve a légi jármű üzemeltetés esetén is tágabb értelemben kell mérlegelni a különböző környezeti hatások jelentőségét.

Egy repülőtér és a működéséhez kapcsolódó légi forgalom alaphelyzetben olyan rendszert alkot, amit a repülési tevékenység alapján viszonylagos pontossággal tudunk leírni. A tényleges környezeti igénybevétel azonban a hatáselemzésben már jelentős bizonytalanságot okoz, melynek következménye, hogy általános vélekedés szerint a vizsgálatba vont környezethasználati tevékenység, így akár a légi közlekedés jelentős környezeti hatással jár.

A jelentős környezeti hatás egy olyan összetett és időben változó meghatározás, ami számos tényezőn alapul, ugyanakkor ezeket a tényezőket külön-külön és együttesen is minősíteni szükséges. A hatások összevetése előtt az elkülönült vizsgálat eredménye ugyanakkor rávilágíthat egy-egy környezeti probléma jelentőségére.

A környezeti probléma mérlegelésének szempontjai:

- amikor egy környezeti hatás kezelésére rendelkezésre állnak a technikai- és rendszerfeltételek, a tényleges környezetterhelést ezek alkalmazása is befolyásolja;
- az üzemeltetés folyamatába milyen feltételekkel építhető be egy környezetvédelmi célzatú intézkedés vagy technológiai művelet;
- a környezetvédelmi eredményt adó műveletek a folyamat során mennyiben kapcsolódnak az üzemfenntartás műveleteihez;

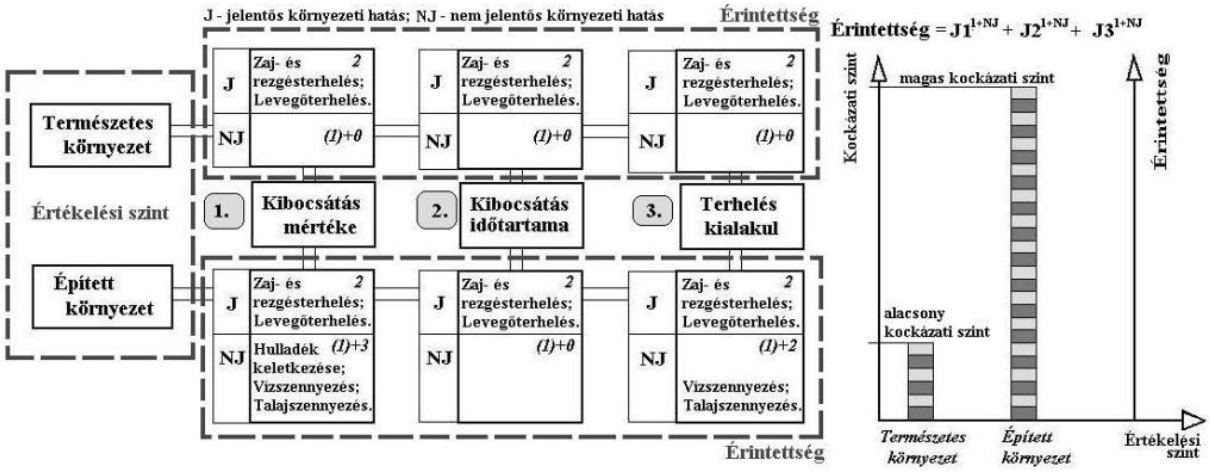
- amennyiben eredményesen valósul meg egy környezetvédelmi technológiai művelet, fennáll-e az eredetileg becsült környezetterhelési helyzet;
- a környezetterhelés folyamatossága, időszakos jellege, a környezetterhelési időszakokban fellépő terhelési értékek jellemzői.

A környezetvédelmi szempontok lehatárolása egy későbbi hatásbecslésnél a különböző események lehetséges kimeneteleinek értékelésére is befolyással lesz. A szempontok áttekintésével a légi közlekedés vonatkozásában az alábbi megállapítások tehetők:

- hulladékok káros hatása, földtani közeg, felszíni és felszín alatti víz érintettsége kezelhető környezeti hatást jelent, itt találkozunk a legkevesebb konfliktussal;
- levegőtisztaság védelme, zaj és rezgés elleni védelem, valamint ezekkel összefüggésben a természetvédelem és az épített környezet védelme a környezethasználat rendszere, a kijelölt rendszerhatárok és az aktuális rendszerkörnyezet bizonytalanságai miatt bonyolult és nehezen kezelhető, konfliktusokkal terhelt problémakört alkot;
- a repülőterek működésével és a repülőtér közelében megvalósuló átrepülésekkel összefüggésben fellépő környezeti zajterhelés esetenként, illetve lakóterületeken konfliktushelyzetet teremt, a zajhelyzetet mindig kiemelten kell kezelni.

A kockázati szintek értékelésére kidolgozott javaslatot a 7. ábrán foglaljuk össze.

A környezetvédelmi konfliktushelyzet kialakulásában és kezelésekor bárkiben felmerülhet a kérdés, hogy milyen indokok alapján sorolunk egy környezeti hatást más szennyezés vagy terhelési állapot elé, azaz mi alapozza meg a hatások súlyozását és fontosságát. Hiszen valamennyi környezetszennyezés esetén biztosítani kell a védelmet, illetve a szennyezés megszüntetéséről gondoskodni kell.



7. ábra Környezeti kockázati szint értékelése légi közlekedés vonatkozásában [2]

Ebből a szempontból rögzíteni kell a következőket. A környezetszennyezés – természetes forrásból származik vagy humán eredetű – a hatással érintett környezeti elemek eredeti, természetes tulajdonságát változtatja meg. A környezetkárosítás a szennyezés minőségét vagy mennyiségét tekintve már olyan mértékű, hogy az életkörülmények romlását okozza. A környezetkárosítás reverzibilis (helyreálló) vagy irreverzibilis (visszafordíthatatlan) állapot kialakulásához vezethet [3].

A környezetszennyezés és a környezetkárosítás bizonyos, a környezetünkben lévő anyagok vagy energiaformák elsajátításával, elmozdításával, illetve a környezet elemeibe való behelyezésével, bejuttatásával összefüggő folyamatok következménye. Ennél fogva a környezetszennyezés formái:

- anyagi jellegű;
- energia jellegű.

A *zaj* jelentéstartalma szerint nem kívánatos kellemetlen hang. A *hang* valamilyen közegben energia közlése miatt létrejövő rezgés. Az eddigiekben leírtak alapján a zaj energia jellegű környezetszennyezésnek minősül. Az energia jellegű környezetszennyezési forma nem csökkenti a környezeti probléma jelentőségét az anyagi jellegű – például hulladékok előállítása, szennyezőanyagok talajba vagy vizekbe juttatása – szennyezési formákhoz képest. A környezetre jellemző hangtér megváltozása valamilyen külső energiaközlés hatására következik be, ami a tér bármely pontján és bármely időpontjában bekövetkezhet. Emiatt időben és térben a különböző források miatt eltérő hangkeltési formákról beszélhetünk. A légi forgalom, így a repülőtér és az átrepülések ennek megfelelően elsősorban az energia jellegű szennyező források közé sorolhatók, míg másodlagos tényezőként jelenik meg az anyagi jellegű szennyezés.

Természetesen fenti megállapítás nem a szennyezés minősítését vagy háttérbe szorítását jelenti. Leginkább arra irányul, hogy a légi közlekedésben is megjelenik a kíméletes környezethasználat, mint lehetőség és kötelezettség. Erre való figyelemmel egy-egy szennyezés esetében rendelkezésre álló eszköz, technológia vagy intézkedési forma biztosítja, hogy egy adott kibocsátás a lehető legkisebb mértékű legyen, illetve lehetőség szerint ne is lépjen fel szennyezés. Ezen a ponton visszautalunk az előző fejezetben kifejtett megállapításra, miszerint bizonyos közlekedési formáknál az elhagyott hulladékok problémája valós és ennél fogva jelentős környezeti problémát jelent, de a közúti- és vasúti közlekedésben a létesítmények jellegéből és az üzemeltetés feltételeiből adódóan a földtani közeg védelme is folyamatosan napirenden van. Amennyiben egy-egy közlekedési ágazatban lehetőség nyílik valamely szennyezés csökkentésére és hatékony kezelésére, akkor azt meg kell tenni. Mindezek indokolják első megközelítésben, hogy a légi közlekedés esetén a környezeti zajterhelés problémáját tekintjük elsődlegesnek. Ezt a szempontot azonban más tényező is befolyásolja, ami az elsődleges megközelítés során leírtakkal együtt szintén a zaj elleni védelem kiemelt szerepét támasztja alá.

Ez a másodlagos tényező a környezetben kiváltott reakciókkal van összefüggésben. A hangokkal és a zajokkal kapcsolatban tudni kell, hogy ahol történik valami, ott hanghatásokkal és a helyzet függvényében zajjal is kell számolni. De a hangokból akkor lesz zaj, amennyiben a kialakuló hatást zavarónak, kellemetlennek ítéljük meg. Sajnálatos, hogy ezen a téren feledésbe merül egy nagyon fontos tényező, mégpedig a hatással érintett környezeti elem eredeti, természetes tulajdonságának megváltozása.

A zaj elleni védelem területén a problémakezelés elterjedt eszköze a terhelési – egyes esetekben a kibocsátási – határértékek alkalmazása, ami a háttérbe szorítja a környezet állapotváltozásának jelentőségét. Zaj esetén ez úgy történik, hogy átlag terhelési adatokat vetünk össze egyszámos határértékkel, ami ahhoz vezet, hogy a zajterhelés kialakulásának folyamata kevésbé lesz feltárva. Emiatt olyan tényezők megismerése marad el, ami a zajcsökkentés, illetve a légi jármű üzemeltetés folyamatába való beavatkozást segíteni elő.

A légi közlekedés környezetvédelmi rendszerét tekintve a rendszer lényegi elemei vesznek el vagy szorulnak háttérbe a vizsgálatoknál, amikor kizárólag egyszámos határértékekre hagyatko-

zunk. Ennek következménye a zavaró hatás helytelen értelmezése. A zajhatásokat leíró paramétereknél ugyanis a zavaró hatás kétféle módon jelentkezik. Egyrészt a repülés műveleti zaja, másrészt a zaj időbelisége miatt fellépő sztochasztikus jelleg miatt. Helyesen eljárva a repülési zajprobléma kezelésénél az esetleges zajcsökkentési célzatú szabályozást a repülési műveletek időbeliségére, abból adódó jellegére és a bekövetkezési gyakoriságra is szükséges kiterjeszteni.

Nem merülhet feledésbe egy harmadik tényező sem, ami a légi közlekedés, mint rendszer, és a zajjal érintettek, mint rendszerkörnyezet kapcsolatát meghatározza. A hulladékokat összegyűjtjük és újrahasznosítjuk, a keletkező szennyvizeket elvezetjük és megtisztítjuk, a levegőbe kerülő anyagokat erre alkalmas eszközökkel leválasztjuk, de ahol az ember megvetette a lábát, ott megjelenik a zaj is, és hosszú távon ott is marad [3]. A zaj az érintettekből azonnali reakciót vált ki, a környezet állapotváltozására zaj esetén alakul ki érzékenység határértékektől függetlenül. Ennek sarkalatos pontja, hogy

- mekkora a kibocsátó forrás és az észlelő közötti távolság;
- az észlelő milyen élethelyzetben van a repülési zaj észlelésekor;
- az élethelyzet függvényében melyek a zaj megítélésének szempontjai;
- előre láthatóan milyen hosszú időt tölt az észlelő a zajjal terhelt területen;
- milyen a környezet alapállapota és az alapállapotban bekövetkező változás mértéke.

A zaj észlelésével összefüggő különböző élethelyzetekre a 8. ábrán láthatók példák.



8. ábra Példa különböző élethelyzetekre zajjal terhelt környezetben

4. A LÉGI KÖZLEKEDÉS ÉS A KÖRNYEZET ÖSSZETŰZÉSE

Mindaddig, amíg egy repülőtér környezetében a környezeti zajra érzékeny terület található, a zaj ellen védendő területen élők és a légi közlekedés közötti ellentét is kialakul, illetve fennmarad. Az ellentét önmagában hordozza a konfliktushelyzet kialakulását is, ami a zaj észlelési oldal általi megítélésétől is függ. Ez a megítélés sok esetben sokkal rosszabb képest fest a műszeres mérési adatok és a határértékek összevetésével kapott értékelésnél. Más esetekben nem vezet tényleges zajprobléma kialakulásához, ehelyett elvárásként fogalmazódik meg. Mit tehet a repülőtér üzemeltetője a zajterhelés csökkentése, ezáltal a konfliktushelyzetek elkerülése érdekében? A következőkben erre a kérdésre keressük a választ.

Napjainkra kialakult az a társadalmi igény, ami a környezeti hatások között kiemelt figyelemmel kezeli a zajterhelést és szükségszerűvé teszi a zajcsökkentést. A légi közlekedéstől származó zaj a lakóterületek közelében végzett átrepülések, illetve fel- és leszállások következtében erősíti ezt az igényt az érintett társadalmi csoportok részéről. A repülési zaj csökkentése azonban csak olyan

eszközökkel és beavatkozások útján lehetséges, melyek a repülésbiztonságot is érintik, ezért a környezetbiztonság kérdéskörébe kell vonni, mint komplex folyamatot [4].

Repüléselmélet és a légi közlekedés tekintetében a környezetvédelem egyik jelentős szakterületét, a zaj elleni védelmet tárgyalja közel négy oldalon keresztül a Repülési Lexikon [5]. A környezeti hatások jelentősége szempontjából kiemelt figyelmet érdemel a *zajcsillapítás* címszó alatt megfogalmazott tény, miszerint „A zajcsillapítás napjaink repülésének egyik legfontosabb kérdése".

A repülőgépek által kibocsátott zaj csökkentésének lehetőségei [5] alapján:

- olyan repülőgép hajtóművek és sárkányszerkezetek létrehozása, melyek zajkibocsátása általában alacsony;
- a repülési manőverek olyan szervezése és irányítása, hogy a repülőgépek által kibocsátott zaj elsősorban a lakott területek felett, minimális legyen.

A járműszerkezeti megoldások mellett külön figyelmet érdemelnek a zajcsökkentő üzemeltetési eljárások, például a meredekebb emelkedés, kisebb hajtómű-teljesítmény, a megfelelő szárnymechanizáció-kitérítés, vagy a szárnymechanizáció késleltetett működtetése leszálláskor. Ezek ugyanakkor összefüggésbe hozhatók a repülésbiztonsággal, hiszen a repülési módozatokba való beavatkozást jelentik, a zajcsökkentett repülés megvalósítását célozzák meg.

Zajcsökkentett repülés *„a repülőtér környezetében a felszállás után, illetve a leszállás előtt a repülési pályának és/vagy a hajtómű üzemmódjának megváltoztatása a teljesítmény és gazdaságosság szempontjából optimálishoz viszonyítva a repülőtér környezetében bizonyos területeken fellépő zajszint csökkentésére"* [5].

Amennyiben bármilyen okból, így a környezetvédelem és környezetbiztonság, illetve zajcsökkentés érdekében beavatkozunk a repülésbe, arra csak a repülésbiztonságra tekintettel kerülhet sor [4]. A repülésbiztonság „a levegőben történő mozgásban komplex emberi tevékenység eredményeként létrehozott, az adott feltételek között optimális működőképességi, valószínűségi állapot" [5].

4.1. Légi forgalom szabályozása

Repülőtér működésével összefüggésben fellépő zajterhelés kezeléséhez – tekintettel meglévő repülőterekre és a üzemeltetett légi járművekre – a légi forgalom szabályozása elsődleges eszközként jelenik meg. A szabályozás alapját adja a rendelkezésre álló jogszabályi környezet, ami a jogszabályokban hivatkozott műszaki előírásokkal egészül ki. A szabályozás jellegzetessége, hogy az általános környezeti zaj és rezgés vonatkozású jogszabályok a légi közlekedésre kevésbé írnak elő kötelezettségeket, ezek a repülőterek zajgátló védőövezet kijelölésének szabályainál jelennek meg.

4.1.1. Zaj és rezgés elleni védelem fő szabályai

Zaj és rezgés ellen védendő környezetben és építmények környezetében a környezeti zajt és rezgést okozó üzemi, építési, szabadidős, valamint közlekedési zaj- vagy rezgésforrások üzemeltetésének, értékelésének és minősítésének zaj és rezgés vonatkozású keretszabályait a környezeti zaj és rezgés elleni védelem egyes szabályairól szóló 284/2007. (X. 29.) Korm. rendelet tartalmazza.

A *284/2007. (X. 29.) Korm. rendelet* meghatározza a következőket:

- a közlekedési zaj- vagy rezgésforrások körét;
- a környezeti zaj- vagy rezgésforrás üzemeltetőjét;

- szabályokat és kötelezettségeket a különböző környezeti zaj- és rezgésforrások létesítésével és működtetésével kapcsolatban;
- a veszélyes mértékű környezeti zaj és rezgés fogalmát.

Amellett, hogy a 284/2007. (X. 29.) Korm. rendelet tartalmazza a környezeti zaj és rezgés elleni védelem szabályait, a repülőtér üzemeltetésre, a légi közlekedésre és a légi jármű forgalomra a fogalmi meghatározásokon túl további előírást vagy kötelezettséget nem állapít meg és nem fogalmaz meg.

4.1.2. Zaj- és rezgésterhelési határértékek

A zaj és rezgés ellen védendő területek, illetve építmények és épületek figyelembevételével előírt zaj- és rezgésterhelési határértékek a környezeti zaj- és rezgésterhelési határértékek megállapításáról szóló *27/2008. (XII. 3.) KvVM-EüM együttes rendeletben* találhatók.

A *27/2008. (XII. 3.) KvVM-EüM együttes rendelet* tartalmazza a következőket:

- a megítélési szint (L_{AM}) fogalma;
- a megítélési szintben kifejezett határértékek;
- a jelentős zajterhelési határérték túllépés meghatározása;
- zajterhelési határértékek teljesülésének helye és szabályai.

A közlekedéstől származó zaj terhelési határértékei a zajtól védendő területeken a *27/2008. (XII. 3.) KvVM-EüM együttes rendelet* 3. mellékletben foglaltak alapján a repülőtértől, valamint a nem nyilvános fel- és leszállóhelyektől származó zajra előírt terhelési határértékeket a *2. táblázatban* foglaljuk össze.

A megítélési szint értelmezése a stratégiai zajtérképek, valamint az intézkedési tervek készítésének részletes szabályairól szóló *25/2004. (XII. 20.) KvVM rendelet* 3. számú melléklet 1.1. pontja és 5. számú melléklet 1.1. pontja szerint történik. Az $L_{AM,kö}$ megítélési szint meghatározására irányadó, a hivatkozott *25/2004. (XII. 20.) KvVM rendelet* szerinti módszer azonban a légi közlekedési zajra nem terjed ki.

Sorszám	Zajtól védendő terület	Határérték (L_{TH}) az $L_{AM,kö}$ megítélési szintre [dB]			
		A oszlop repülőtértől, illetve a nem nyilvános fel- és leszállóhelyektől származó zajra		B oszlop repülőtértől, illetve a nem nyilvános fel- és leszállóhelytől származó zajra	
		Nappal (06-22 h)	Éjjel (22-06 h)	Nappal (06-22 h)	Éjjel (22-06 h)
1.	Üdülőterület, különleges területek közül az egészségügyi terület	55	5	60	50
2.	Lakóterület (kisvárosias, kertvárosias, falusias, telepszerű beépítésű) az oktatási létesítmények területei, és a temetők, a zöldterület	60	50	65	55
3.	Lakóterület (nagyvárosias beépítésű), a vegyes terület	65	55	65	55
4.	Gazdasági terület	65	55	65	55

2. táblázat Zajterhelési határértékek [6]

A 2. táblázat „A” oszlopába tartoznak az olyan repülőterek, vagy nem nyilvános fel- és leszállóhelyek, ahol 5,7 tonna maximális felszálló tömegnél kisebb légcsavaros repülőgépek, illetve 2,73 tonna maximális felszálló tömegnél kisebb helikopterek közlekednek. A 2. táblázat „B” oszlopába tartoznak az olyan repülőterek, vagy nem nyilvános fel- és leszállóhelyek, ahol 5,7 tonna maximális felszálló tömegű vagy annál nagyobb légcsavaros repülőgépek, 2,73 tonna maximális felszálló tömegű vagy annál nagyobb helikopterek, valamint sugárhajtású légi járművek közlekednek.

4.1.3. Zaj- és rezgésterhelési követelmények ellenőrzése

A követelményértékek ellenőrzésére és az érintett területek adottságai szerinti alkalmazására vonatkozó előírásokat a zajkibocsátási határértékek megállapításának, valamint a zaj- és rezgéskibocsátás ellenőrzésének módjáról szóló *93/2007. (XII. 18.) KvVM rendelet* tartalmazza. Repülőtér és a légi közlekedés vonatkozásában a *93/2007. (XII. 18.) KvVM rendelet* 4. § (4) bekezdés szerint „A légi közlekedési zaj mérését az MSZ 13-183-3:1992 számú, illetve az MSZ 13-183-4:1992 számú szabvány alapján vagy azzal egyenértékű eredményt adó mérési módszerrel kell elvégezni.”

A légi közlekedéstől származó zajterhelés mért értékeinek dokumentálására külön jogszabályi – például a 25/2004. (XII. 20.) KvVM rendelet szerinti – hivatkozás nincs.

Fentiek alapján a *93/2007. (XII. 18.) KvVM rendelet,* ami zajkibocsátási határértékek megállapításának, valamint a zaj- és rezgéskibocsátás ellenőrzésének módjáról szól, csak a repülési zaj mérési módszerére fogalmaz meg előírást.

4.2. Zajgátló védőövezetek kijelölése

Repülőterek környezetében létesítendő zajgátló védőövezetek kijelölésének, hasznosításának és megszüntetésének szabályairól szól a *176/1997. (X. 11.) Korm. rendelet*. A rendelet hatálya a légiközlekedésről szóló *1995. évi XCVII. törvény* 37. §-ában meghatározott minden olyan repülőtérre kiterjed, amelyet motoros repülőgépek és helikopterek rendszeresen használnak.

A *176/1997. (X. 11.) Korm. rendelet* 2. § (1) bekezdése értelmében zajgátló védőövezet a repülőtér környezetének az a része, amelyen a repülőtér üzemeltetéséből számított mértékadó zajterhelés meghaladja a közlekedésből származó környezeti zajnak külön jogszabályban – ez jelenleg a környezeti zaj- és rezgésterhelési határértékek megállapításáról szóló *27/2008. (XII. 3.) KvVM-EüM együttes rendelet* – meghatározott zajterhelési határértékeit. Nem tartozik a zajgátló védőövezetbe a repülőtér telekhatárán belül lévő terület. A zajgátló védőövezetnek az a része, amelyen a környezeti zaj szempontjából védendő objektumok vagy védett természeti területek találhatók, fokozottan zajos területnek, illetve övezetnek minősül.

A zajgátló védőövezet önmagában a légi jármű működtetéstől és a repülőtér üzemeltetéstől, illetőleg a légi forgalomtól származó zaj elleni védelmet nem jelent, tehát a zaj ellen nem véd és nem gátolja a zaj terjedését. Ezért a fogalmi meghatározás félreértést okozhat. A zaj elleni védelmet a zajgátló védőövezet kijelöléséhez kapcsolódó követelményértékek előírása, valamint a légi forgalomra vonatkozóan előírt és a repülőtér üzemeltetőjére háruló zajcsökkentési feladatok jelentik. Ezért a *176/1997. (X. 11.) Korm. rendelet* szerinti zajgátló védőövezet kijelölésen keresztül nyílik lehetőség olyan intézkedésekre és beavatkozásokra, melyek a repülőtér működésétől származó légi közlekedési zaj szabályozását, kezelését és a zajterhelés csökkentését eredményezhetik.

4.3. Zajgátló védőövezetek kijelölésének műszaki szabályai

A repülőterek környezetében létesítendő zajgátló védőövezetek kijelölésének, hasznosításának és megszüntetésének részletes műszaki szabályairól szól a *18/1997. (X. 11.) KHVM-KTM együttes rendelet*.

A *18/1997. (X. 11.) KHVM-KTM együttes rendelet* tartalmában kiterjed a

- a zajgátló védőterület kiszámítására;
- a repülőtér környezetkímélő üzemeltetésére.

A jogszabályi előírásokat tekintve a zajgátló védőövezetek kijelölésének műszaki szabályait jelentős részben alkotják azok az intézkedések és korlátozások, melyek a környezeti zajterhelés csökkentését hivatottak elősegíteni és biztosítani. A kíméletes környezethasználat – ami ebben az esetben a légi közlekedéstől származó zajterhelés szabályozását jelenti – csak a *176/1997. (X. 11.) Korm. rendeletben* és a *18/1997. (X. 11.) KHVM-KTM együttes rendeletben* előírtak érvényesítésével, zajgátló védőövezetek útján biztosítható.

Magyarországon a repülőterek környezetében létesítendő zajgátló védőövezetek kijelölésének, hasznosításának és megszüntetésének részletes műszaki szabályai 1997-ben kerültek megállapításra a *18/1997. (X. 11.) KHVM-KTM együttes rendeletben*, melyben a jogalkotó a német AzB zajszámítási módszer 1971-es első változatának adaptációjával rögzítette a zajszámítási eljárást. Ezáltal a *18/1997. (X. 11.) KHVM-KTM együttes rendeletben* rögzített magyar számítási módszer a német számítási módszerrel megegyező módon egy számítási eljárásból, valamint a számításhoz tartozó adatbázisból és repülőgépek akusztikai osztálya szerinti besorolásból áll.

A számítási eljárás lényege, hogy a kijelölt terhelési pontokban fellépő mértékadó zajterhelést két összetevőből kell számolni, melyek a következők:

- levegőben végzett gépmozgásokra vonatkozó egyenértékű zajterhelés;
- földön végzett műveletekből származó egyenértékű zajterhelés.

A két összetevőn alapuló, a számítási leírás meghatározó összefüggés:

$$L_{eq,M} = 10 \cdot \lg\left(10^{0,1 \cdot L_{eq,R}} + 10^{0,1 \cdot L_{eq,F}}\right) \qquad (1)$$

ahol:

- $L_{eq,M}$ – mértékadó zajterhelés a repülőtér környezetének valamely pontján [dB];
- $L_{eq,R}$ – levegőben végzett gépmozgásokra vonatkozó egyenértékű zajterhelés [dB];
- $L_{eq,F}$ – földön végzett műveletekből származó egyenértékű zajterhelés [dB];

Az (1) összefüggés alapján látható, a számítási módszer meghatározó eleme, hogy a levegőben végzett gépmozgásoktól származó $L_{eq,R}$ zajterhelés és a földön végzett műveletektől származó $L_{eq,F}$ zajterhelés értékei egyaránt ismertek legyenek, ezáltal a számítási módszer megkülönböztető lehatárolással veszi figyelembe a repülőtér üzemeltetésből jelentkező eltérő jellegű zajhatásokat. A földön végzett műveletekből származó $L_{eq,F}$ egyenértékű zajterhelés meghatározása helyszíni műszeres mérésekkel tapasztalati úton megoldott, az ilyen típusú zajmérések elvégzésének nincs technikai, műszaki és műszerezettségi akadálya.

A földön végzett műveletekből származó $L_{eq,F}$ egyenértékű zajterhelés meghatározása:

$$L_{eq,F} = 10 \cdot \lg\left(\frac{1}{T_m} \cdot \sum_k T_k \cdot 10^{0,1 \cdot L_{Aeq,k}} \right) \quad (2)$$

ahol:

- k – az egyes, egymástól eltérő, számításba vett, földön végzett művelet típusok futó-idexe;
- $L_{Aeq,k}$ – a k-adik földi művelettípusnak a T_k időtartamra vonatkoztatott egyenértékű A-hangnyomásszintje a vizsgált ponton [dB];
- T_k – a k-adik típusú, földön végzett műveletből származó zajesemények összegzett hatáideje a teljes T_m megítélési idő alatt [s];
- T_m – megítélési idő, ami azonos a nappali 6.00-22.00 óra közötti 16 óra és az éjszakai 22.00-06.00 óra közötti 8 óra időszakkal.

Levegőben végzett gépmozgásokra vonatkozó $L_{eq,R}$ egyenértékű zajterhelés meghatározása:

$$L_{eq,R} = 10 \cdot \lg\left(\frac{T_0}{T_m} \cdot \sum_i 10^{0,1 \cdot L_{AE,i}} \right) \quad (3)$$

ahol:

- i – az összegzés futó-indexe a vizsgálati ponton a T_m megítélési időn belül figyelembe vett összes légi járműmozgásra nézve;
- $L_{AE,i}$ – a vizsgált ponton az i-edik zajeseményhez tartozó zajeseményszint [dBA];
- T_m – megítélési idő, melyre nézve a mértékadó műveletszám vonatkozik [s]
- T_o – 1 sec vonatkoztatási idő.

A (3) összefüggésben szereplő $L_{AE,i}$ zajeseményszintek meghatározása az alábbi:

$$L_{AE,i} = L_{A\max,i} + 10 \cdot \lg\left(\frac{\Pi_i}{2 \cdot T_0} \right) \quad (4)$$

ahol:

- $L_{Amax,i}$ – a vizsgált ponton az i-edik zajeseményhez tartozó, számítással meghatározandó A-hangnyomásszint [dBA];
- Π_i – a vizsgált ponton az i-edik zajeseményhez tartozó átrepülési idő [dBA];
- T_o – 1 sec vonatkoztatási idő.

A (3) és (4) összefüggésekhez több tényező tartozik, így az egyes gépkategóriák normatív zajkibocsátási adata, a pályagörbék szórási tartománya, a légköri csillapítás normatív adata, a terep befolyása a hangterjedésre. Meghatározó és vitára okot adó tényező a gépkategória normatív zajkibocsátási adata, melyre a légi közlekedés és a környezet közötti összetűzések gyakran visszavezethetők.

Az AzB 1971-es első változata, így a *18/1997. (X. 11.) KHVM-KTM együttes rendelet* is meghatározza a normatív zajkibocsátási adatbázist, ami a különböző gépkategóriák zajkibocsátására alkot csoportokat azáltal, hogy tartalmazza a csoportokra alkalmazható zaj-, teljesítmény-, repülési magasság- és repülési sebesség adatokat. Ezeket az adatokat a *18/1997. (X. 11.) KHVM-KTM együttes rendelet* 1. számú és 2. számú melléklete tartalmazza. Az adatbázis az 1990-es években Magyarországon elterjedten használt, illetve az akkoriban Budapestre érkező légi járművekre jellemző zajkibocsátási adatokat tartalmazza, az IL-76 vagy Tu-154 típusok jellemzőin alapul.

A légi jármű üzemeltetés nem a repülőtér üzemeltetőjének közvetlen feladata, a repülőtér csak fogadja és indítja, illetve kiszolgálja a légi közlekedési társaságok által üzemeltetett járműveket. A repülőtér üzemeltetője az általa fogadott légi járművekre vonatkozó szigorúbb – üzemeltetés szempontjából még teljesíthető – zajkibocsátási adatok előírásával azonban hatással van a légi járművek fejlesztőire és üzemeltetőire, ami a repülőgép építéssel elért eddigi zajcsökkentésre kimutathatóan kedvező hatással van. Ezért a környezeti zaj elleni védelem érdeke, hogy a repülőtér üzemeltetője az 1990-es években használt zajosnak tekintett repülőgépek helyett csak a csendesebb üzemnek megfelelni tudó légi járműveket fogadjon.

Látható, hogy szükséges az 1990-es években rögzített normatív zajkibocsátási adatok olyan irányú és mértékű módosítása, ami biztosítja a csendesebb üzemvitel megvalósíthatóságát. Ennek feltétele az is, hogy a repülőtéren fogadott és onnan indított légi járművek a normatív zajkibocsátási adatok tekintetében is feleljenek meg a kíméletes környezethasználat feltételeinek.

A *18/1997. (X. 11.) KHVM-KTM együttes rendelet* az 1971-ben megalkotott első AzB módszert alkalmazza. Ezt a légi jármű üzemeltetésben bekövetkezett fejlesztések nyomán 1971 óta többször módosították, a frissítés eredményeként alkották meg az AzB-75, AzB-84, AzB-95, AzB-96, illetve az AzB-99, valamint az AzB 2008-as számítási módszert.

Emellett az AzB 2008 az alkalmazott normatív zajadatbázison túl olyan adatokkal is kiegészült, melyek figyelembe veszik a repülőgép sugárfék miatt kialakuló többlet zajhatást, ami a számítás eredményét pontosabbá teszi. Ilyen jellegű rész-számítást a *18/1997. (X. 11.) KHVM-KTM együttes rendelet* nem tartalmaz, így alkalmazásával a sugárfék használatából eredő zajhatás nem számítható. A sugárfék a légi jármű sebességének csökkentésére szolgáló eszközcsalád, a sugárhajtású repülőgépek tolóerő-visszafordító szerkezetét jelenti. A sugárfék használata során a hajtómű magas fordulatszámon, nagy tolóerővel működik, és a gázsugár útjába helyezett akadályt jelent, ezáltal alkalmazása megnövekedett hanghatást okoz.

A zajgátló védőövezetek számítását nappali és éjszakai időszakra kell elvégezni, ami egyben azt is jelenti, hogy a vonatkoztatási idők is a nappali-éjszakai időszakoknak felelnek meg. Ez a feltétel kötelező érvénnyel bír, ettől eltérni a jelenleg hatályos jogszabályok alapján nem lehet. Így az egyedi zajeseményszinteket a nappali 16 óra és az éjszakai 8 óra megítélési időre kell vonatkoztatni, ebből eredően előfordulhat, hogy a szubjektív módon is észlelt, esetenként magasnak ítélt egyedi zajeseményszintek mellett az előírt határértékek még teljesülnek.

A *18/1997. (X. 11.) KHVM-KTM együttes rendelet* 5. § (1)–(3) bekezdésekben foglaltak a mértékadó nappali és éjszakai műveletszámok meghatározására vonatkoznak, melyek jelentőségét a (2) és (3) összefüggések is mutatják, hiszen a műveletszámok növelése vagy csökkentése befolyásolja a mértékadó zajterhelést. A műveletszán ezáltal központi szerepet kap a légi forgalomtól származó zajterhelés meghatározásában, egyben a zajpanaszok egyik állandó és sokat vitatott kérdésévé vált.

Meghatározó kérdés tehát a számítások és becslések kiindulási adata. Ezek között több is van, mely olyan módon befolyásolja a döntések meghozatalát, hogy a légi közlekedés és környezetének összetűzésekor a vita lezáratlanságát eredményezi. A (3) egyenlet alapján a műveletszám és a megítélési idő végeredményt befolyásoló hatása vitathatatlan. E kettő tényező közül a megítélési idő jogszabályban meghatározott érték, átgondolásánál a *secundumban* kifejezett mér-

tékegységtől célszerűen el kell rugaszkodni. A mértékegység megváltoztatása ugyanis nem lehetséges – időtartam kifejezése a cél –, de az időtartam hosszát meghatározó módszer módosítása már lehetséges. Tehát valójában nem a mértékegység lesz lényeges, hanem azok a részletek, melyek tartalmukban jelenleg hat hónapra kiterjedő időt jelentenek.

A műveletszám szintén alkalmas a légi közlekedés és a környezet összetűzésének alapjává. Visszatérő probléma, hogy az észlelési oldalon lévők nem fogadják el a repülőtér üzemeltetője által rögzített forgalmi adatokat, ami leginkább az átrepülések ismétlődésével és ebből eredő zavarással függ össze. A műveletszám kapcsolódik a megítélési időhöz, mivel egy hosszabb időtartamban a zajesemények száma kevésbé befolyásolja a (3) és (1) összefüggésekkel számolt zajterhelés értéket.

Kevesebb figyelmet kap a zajeseményhez tartozó A-hangnyomásszint érték, pedig meghatározása több tényező függvénye. A zajgátló védőövezet számításánál úgynevezett normatív zajteljesítményszint (L_W), valamint normatív spektrum adatok használata jelenik meg. A normatív spektrum adatoknál alkalmazott referencia távolság merevszárnyú repülőgépeknél 300 m, míg helikoptereknél 150 m. De mit tehetünk, amikor ettől eltérő távolságokban kialakuló zajterhelésre vagyunk kíváncsiak? Ehhez kapcsoltan több kérdés is megfogalmazódik, melyre zajmérési adatok alapján keresünk választ.

5. REPÜLÉSI ZAJADATOK ÁTTEKINTÉSE

Zajgátló védőövezet számításánál a zajgörbék alapján láthatóvá válik a repülőtér környezetének zajterhelése, illetve a határértékekkel való összevetés alapján a repülési zajjal érintett terület kiterjedése. Az érintettség ilyen jellegű meghatározása kötődik a határértékekhez, melyből a tényleges zavarásra még nem lehet teljes körű következtetést levonni. A zajpanaszok jelentős számban a zajeseményszintek mértékére vonatkozik és a szubjektív módon is észlelhető zajszint értékekre irányítja rá a figyelmet.

A zajgátló védőövezet meghatározásának alapja ugyanakkor a hosszú idejű megítélési idő, ami szintén állandó bírálatot kap. A megítélési idő nappali zajterhelésre nézve általában 10 368 × 103 másodperc (6 × 30 nap x 16 óra × 3600 sec), éjszakai zajterhelésre nézve pedig általában 5184 × 103 másodperc (6 × 30 × 8 óra × 3600 sec). Ez az eljárás a nappali 16 óra és éjszakai 8 óra megítélési idő alkalmazását tükrözi a legforgalmasabb 6 hónap figyelembevételével [7] [8]. A hosszú időtartamok miatt egy-egy zajesemény tényleges kiértékelése valójában a háttérbe szorul, ezzel a szubjektív zavarás minősítése nem lesz teljes.

Amennyiben a zajesemények nagyobb hangsúlyt kapnak, az esetleges beavatkozások hatása is érzékelhetőbb lesz az értékelés folyamatában. Célszerű tehát a jelenleginél nagyobb figyelmet szentelni a zajesemények elemzésére, hogy a légi forgalom módosításánál ne kizárólag a forgalom nagysága, aránya és eloszlása jelentse a lehetőséget a zajcsökkentéshez. Ezt a gondolatot folytatva a ténylegesen kimutatható A-hangnyomásszintek megismerése céljából helyszíni műszeres zajméréseket végeztünk a Budapest Liszt Ferenc Nemzetközi Repülőtér környezetében, a mért adatokból adunk ízelítőt a következőkben.

5.1. Zajmérés körülményei

A műszeres zajméréseket a repülőtértől dél-keletre, leszállóirányban a siklópálya alatt kijelölt mérési pontokban végeztük el. A mérési pontok helyzetét a 9. ábrán szemléltetjük.

A mérés helyszíne minden esetben szabad tér, beépítetlen terület. A mérési pontok környezetében szántóművelésre hasznosított általános mezőgazdasági övezet terül el, ahol a mérés idején zajkibocsátással járó tevékenység nem volt. A háttérterhelést a közutak és a távoli vasút forgalma határozta meg, üzemi zaj nem volt kimutatható. A mérési pontokat úgy jelöltük ki, hogy az átrepülési magasság arányosan növekedjen, így a siklópálya és a mérési pont közötti távolság 150 m, 300 m és 600 m volt. Ezáltal a mérésekre helyszínenként kétszeres repülési magasság mellett került sor.



9. ábra Zajmérési pontok helyzete (forrástérkép: Google Earth)

5.2. Mért adatok

Az elvégzett vizsgálat keretében a zajeseményekhez tartozó L_{Aeq} egyenértékű hangnyomásszinteket és $L_{Amax,i}$ hangnyomásszinteket mértük másodpercenkénti mintavételezéssel. A zaj adatok mellett rögzítettük az átrepülések adatait. A mérési eredményeket meghatározó egyik jellemző a mérési idő, azaz a zajesemény t_1 és t_2 időpontok közötti időtartama. A t_1 a zajesemény kezdetének időpontja, amikor az átrepülés során mért L_A hangnyomásszint az alapzajból határozottan kiemelkedik. A t_2 a zajesemény végének időpontja, amikor az átrepülés során mért L_A hangnyomásszint az alapzajban elvész.

A mérési eredmények alapján látható volt, hogy a t_1-t_2 időtartam a zajesemények függvényében jelentősen változik, a méréseknél több esetben is jelentős eltérések adódtak a hatásidőt tekintve. A zajesemény időtartamokat, azaz a hatásidők eltéréseit a 3. táblázatban foglaltuk össze. A zajesemény időtartamokkal összefüggő hatásidők változásait a 10. ábra szemlélteti.

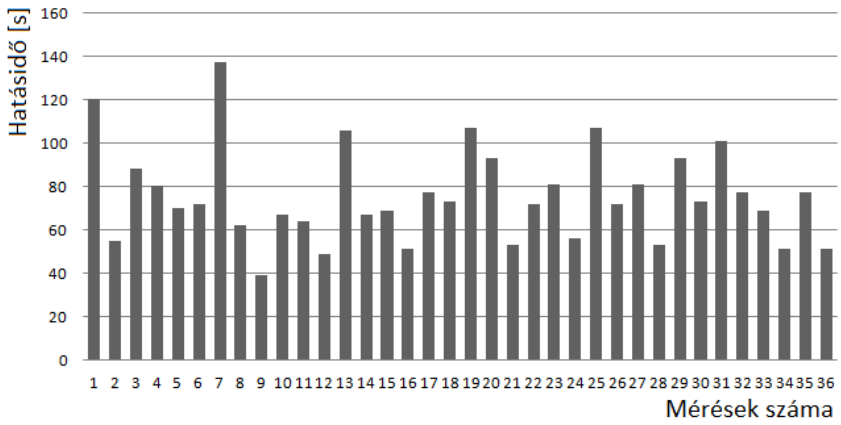
1. mérési pont (1 MP)	2. mérési pont (2 MP)	3. mérési pont (3 MP)
120 s, 55 s, 88 s, 80 s, 70 s, 72 s	106 s, 67 s, 69 s, 51 s, 77 s, 73 s	107 s, 72 s, 81 s, 53 s, 93 s, 73 s
137 s, 62 s, 39 s, 67 s, 64 s, 49 s	107 s, 93 s, 53 s, 72 s, 81 s, 56 s	101 s, 77 s, 69 s, 51 s, 77 s, 51 s

3. táblázat Zajesemény időtartamok 36 db mérés alapján

A 10. ábrán látható időtartam eltérések a terület háttérterhelése mellett a vizsgálatba vont légi jármű és repülési művelet jellemzőivel van összefüggésben. A mérési, így a hatásidők 51 s és 137 s között változtak.

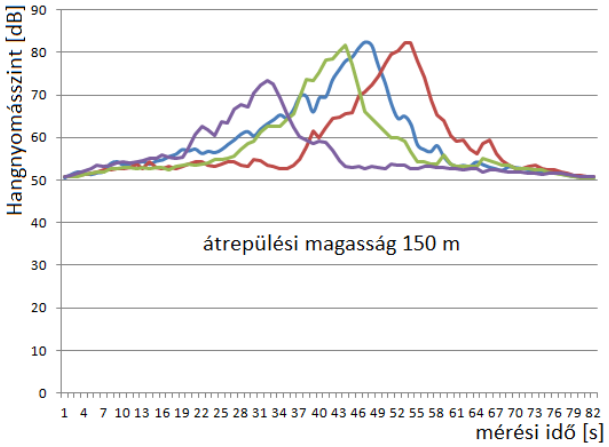
Ahogy a mérési időkben, úgy a mért A-hangnyomásszintekben is eltérés mutatkozik minden mérési pont esetében. A mért zajszint értékek mérési pontok szerinti bontásban a 11–13. ábrákon láthatók a következők szerint:

- a 11. ábrán az 1MP jelű mérési pontban rögzített adatok 150 m átrepülési magasság mellett;
- a 12. ábrán a 2MP jelű mérési pontban rögzített adatok 300 m átrepülési magasság mellett;
- a 13. ábrán a 3MP jelű mérési pontban rögzített adatok 600 m átrepülési magasság mellett.

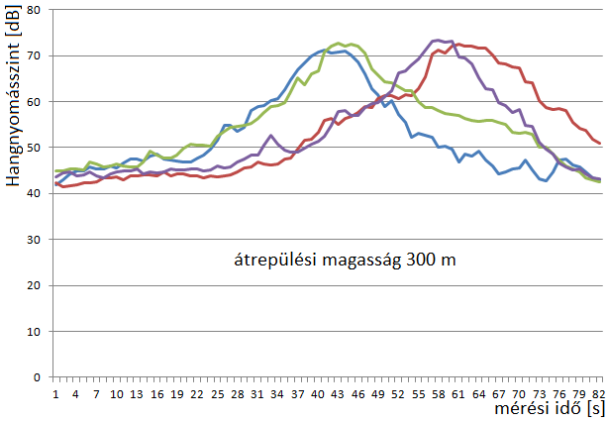


10. ábra Hatásidők változásai 36 db mérés alapján

Egymást követő átrepülésektől származó zajszint értékeket vetettünk össze, azokat a mérési eredményeket szemléltetjük, ahol a mérési időt 82 s időtartamban választottuk meg.



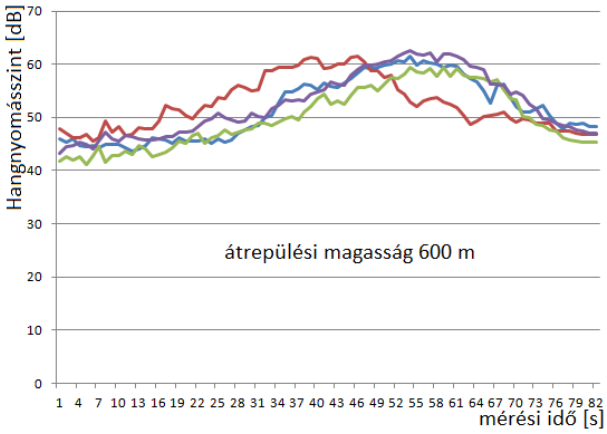
11. ábra Hangnyomásszint értékek 4 átrepülés alapján az 1MP jelű mérési pontban



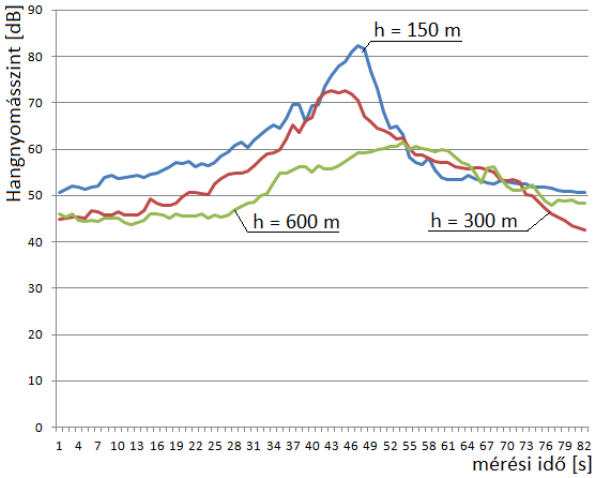
12. ábra Hangnyomásszint értékek 4 átrepülés alapján a 2MP jelű mérési pontban

Azonos mérési helyszínen és változatlan mérési körülmények mellett eltérő zajszint-idő függvényt kapunk, amit a környezet hangterjedésre gyakorolt hatása mellett a légi jármű tulajdonságai, a manőver és a repülési művelet jellemzői határoznak meg. Ezért minden átrepüléshez különböző zajszintek tartoznak, ebből következően minden zajeseménynél más-más a zavaró hatás folyamata is. A zavarás jobb kiértékeléséhez vezet, a legnagyobb zajszint értékek elem-

zése, ami kiterjedhet azok időtartamára és számára is. Az eltérő átrepülési magasságokhoz tartozó jellemző zajszintek összevetése a 14. ábrán látható.



13. ábra Hangnyomásszint értékek 4 átrepülés alapján a 3MP jelű mérési pontban



14. ábra Eltérő átrepülési magasságokhoz tartozó zajszint értékek

6. KONKLÚZIÓK

A modern környezetszennyezés egyik meghatározó problémája a környezeti zaj és a zaj elleni védelem. Általánosságban elmondható, hogy mindenkit érint kisebb-nagyobb mértékben, zajjal terhelt környezetben élünk. A modern környezetszennyezés azonban környezetbiztonsági kérdéseket is felvet amikor a szennyezés csökkentésére, illetve zajhatások esetén az elfogadható zajhelyzet kialakítására fogalmazunk meg igényt. Mivel a légi közlekedés vonatkozásában is összetett folyamatról beszélünk, a zajcsökkentési célzatú beavatkozásokkal is óvatosan kell bánni. A repülés komplex környezethasználati folyamatot jelent, ami a repülésbiztonság kérdéskörét is érinti, különös tekintettel a repülési kockázatokra.

Mivel a repülésbiztonságnak érintettnek kell lennie a környezetvédelmi beavatkozásokkal kapcsolatban, a zaj elleni védelemnek is tekintettel kell lennie erre a követelményre. Ráadásul nem lehet cél a légi közlekedés visszafojtása, mivel társadalmi és globális értelemben sem állunk azon a ponton, hogy egy közlekedési ágazat esetleges környezetvédelmi előnyeit figyelmen kívül hagyjuk. Ebből következően a jövőben előrelépést a környezetvédelem és a repülésbiztonság együttese adhat, célszerűen vizsgálni kell

a környezetbiztonság és a zaj elleni védelem összefüggéseit. Környezetvédelmi szempontból ez röviden úgy foglalható össze, hogy a nagyobb rossz elkerülése érdekében a kisebbet válasszuk.

Ennek érdekében vizsgáltuk a légi közlekedéssel összefüggő jelenlegi zajhelyzetet, a repülés, mint rendszer és a zajjal terhelt környezet, mint rendszerkörnyezet kapcsolatát. Sajnálatos módon ez a kapcsolat gyakran a lakossági zavarásban és abból fakadó tiltakozásban nyilvánul meg. Megjegyezzük, hogy a lakossági észrevételek többsége ma már úgy foglalható össze, miszerint kérdéseket keresünk meglévő válaszokra.

De mi a kihívás abban, ha valami elsőre sikerül? Miért ne adhatnánk a környezethasználó számára lehetőséget azzal, hogy a működés engedélyezése mellett fogalmazzuk meg az eredményes vagy előzetesen hatásosnak ítélt zajcsökkentési intézkedéseket. Ha elsőre nem teljesül a célkitűzés, akkor tovább kell dolgozni és módosítani a környezethasználati tevékenységen, tovább haladni a kijelölt úton. Ehhez a környezetvédelem oldalán is korszerűsítésre van szükség, amire zajmérési adatokat hoztunk fel példaként.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] ЗАХВАТКИН, Юрий: Основы общей и сельскохозяйственной экологии. Методология, традиции, перспективы, Либроком, Москва, 2013, p. 352.

[2] BERA József, POKORÁDI László: Environmental Risk Management of Air-Transport and Airport Development, Acta Technika Jaurinensis 5:(3), Győr, 2012, pp. 245-252

[3] BERA József, POKORÁDI László: Helikopterzaj elmélete és gyakorlata, Debrecen, Campus kiadó, 2010, 192 p.

[4] BERA József : Légi közlekedés környezetbiztonsági kapcsolatrendszerének modellezése a helikopterzaj tükrében, Doktori (PhD) értekezés, Budapest, Óbudai Egyetem Biztonságtudományi Doktori Iskola, 2015, 119 p.

[5] SZABÓ József (ed.): Repülési Lexikon, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1991, I. kötet 623 p., II. kötet 603 p.

[6] 27/2008. (XII. 3.) KvVM-EüM együttes rendelet a környezeti zaj- és rezgésterhelési határértékek megállapításáról

[7] 176/1997. (X. 11.) Korm. rendelet a repülőterek környezetében létesítendő zajgátló védőövezetek kijelölésének, hasznosításának és megszüntetésének szabályairól

[8] 18/1997. (X. 11.) KHVM-KTM együttes rendelet a repülőterek környezetében létesítendő zajgátló védőövezetek kijelölésének, hasznosításának és megszüntetésének részletes műszaki szabályairól

ANALYSIS OF THE ENVIRONMENTAL SAFETY MODEL OF AIR TRAFFIC, FROM THE ASPECT OF NOISE

The development of aviation and aeronautics industry nowadays covers the fulfillment of the environment protection requirements as well; managing and controlling air traffic shall not be viable without handling the environmental problems. Thereby the modern environmental problem due to the quantity and quality differences between traditional and modern environment pollution has become essential part of aviation. When individuals and societies are interpreting the modern environmental problems, aviation is a necessary component of everyday life, while the expectations enforcing the protection of the environment, namely the protection against noise is becoming greater and more comprehensive. The environmental load related to airports strengthens the significance of air load management expected by the social groups involved. However, reduction of aviation noise can only be achieved through interventions which effect aviation safety as well, therefore we foresee the solution in studying air traffic and environmental noise load within the framework of environmental safety.

***Key words**: aviation, environmental noise load, noise management, environmental safety.*



http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_3/2015-3-05-0236_Bera_J-Pokoradi_L.pdf

Szilágyi Dénes

A FELSŐFOKÚ REPÜLŐ SZAKEMBERKÉPZÉS HELYZETE HAZÁNKBAN

Történelmi és gazdasági okokból a politika nem kezeli helyénvalóan a légiközlekedést Magyarországon. Ennek egyik folyománya a szakember utánpótlás problémájához való kormányzati viszonyulás. Ennek az írásnak a célja a szakemberképzéssel kapcsolatos legfrissebb szakmai és kormányzati tevékenységek valamint a légiközlekedési ágazat szükségleteinek ismertetése. A cikk rámutat a kormányzat légiközlekedési szakemberképzéssel kapcsolatos legújabb rendeletének elhibázott mivoltára és javaslatot tesz a probléma megoldására, melyet részletesen indokol.

Kulcsszavak: *felsőoktatás, légiközlekedés, szakember utánpótlás, Part-FCL, Part-66, Part-ATCO, repülőmérnök*

TÖRTÉNETI ÁTTEKINTÉS

A légiközlekedés civil és honvédelmi jelentőségét, már az 1. világháború alatt felismerték. Nem véletlen, hogy a hazai repülőipart mindkét világháború után elsorvasztották. A kapcsolódó képzéseket (a konstruktőri szintűt alapvetően a BME-n folytak) mindkét háború alatt és után hagyták élni, illetve sikerült túlélniük azokat. 1956 után (megbízhatatlanság miatt) viszont ezeket a BME-n folyó legmagasabb szintű képzéseket is megszüntették. Az akkori színvonalat jól illusztrálja, hogy mai napig támaszkodhatunk az ebben az időszakban alkotott Műegyetemi szakirodalmakra, amelyekhez foghatót magyar nyelven, azóta sem sikerült létrehozni. Kifejezetten repülőműszaki szakemberképzés ezután alapvetően a Szovjetunióban (civil és katonai), illetve Szolnokon folyt (alapvetően katonai vonalon). Szolnokon a polgári képzést levelező formában 2010-ig folytathatták. Azóta nincs pl. mérnöki szintű civil KLGS[1] képzés hazánkban. A pilóták képzését központosítottan katonai vonalon, Szolnokon (1990 előtt a Szovjetunióban folytatott részképzésekkel, manapság NFTC[2]-vel együttműködésben), civil vonalon Nyíregyházán végezték és végzik most is. Szolnokon a képzés (repülő műszaki és pilóta) nagyon jó színvonalát teljesen aláásta a rendszerváltást követő sok átszervezés és a bolognai folyamat az által, hogy a jelenlegi oktatási struktúrában nincs elég idő a szakma oktatására! (Jelenleg a 210 kreditből csak ~90 tekinthető repülőműszakinak, de ebből is csak ~50 repülő-szakmai specifikus /gépész vagy avionikus/.) Nyíregyházán a pilótaképzés kezdetben alapvetően a mezőgazdasági repülés szakember utánpótlása céljából indult be 1968-ban, majd később az oktatás súlypontja áthelyeződött a kereskedelmi és közforgalmi pilóták képzésére. 1991-ben indult újra a konstruktőri szintű képzés a BME-n, de nem tudta és nem tudhatja megközelíteni a 2. VH utáni színvonalat, mert nem önálló szakon, hanem kezdetben közlekedésmérnöki, később járműmérnöki szakokon szakirányos képzésben zajlott és zajlik. Nyíregyházán is beindult 1998-ban kis létszámmal műszakiak mérnöki szintű képzése,

[1] KLGS avagy különleges technikus alapvetően a repülőelektronikáért felelős szakember. A Part-66 szerinti B2 és a nemzeti hatáskörben a 13/2012. (III. 6.) NFM rendelete alapján kiadható D2 jogosítással rendelkező személy.

[2] NATO Flying Training in Canada – Észak Atlanti Szövetség Kanadai Repülőkiképző Központ

mert a BME konstruktőri képzése nem felelt meg az alapvetően üzemeltető és karbantartó cégekből álló hazai légiközlekedési szektornak. Szerencsére Nyíregyházán önálló szakon folyt a képzés (1984-től repülő üzemmérnöki, 2000-től repülőmérnöki szakon) 2007-ig, amikor is az Oktatási Miniszter 2005-ös – akkor is nagy vihart kavart - rendeletére a kis szakokat megszüntették. Ettől kezdve a Közlekedésmérnök képzés szakirányos képzéseiként folyik Nyíregyházán a pilóta és a légiközlekedési műszaki szakirányokon. Ez utóbbi alapvetően az üzemeltető és karbantartó cégek műszaki hátterének felépítését, és működtetését végezni képes gépész-kar-bantartó szakember lenne. A piaci igények, az egységesített szakmai követelmények (EASA[3]) és képzési hiányosságok, illetve az egész ágazat kérdéseinek rendezésére 2011-ben sok ember önzetlen munkájának köszönhetően elkészült (és azóta is fiókban maradt) a "Magyar Légügyi Stratégia". E stratégia természetesen a szakember utánpótlással is részletesen foglalkozik. (pl. 28 tekintélyes szakemberből álló független bizottság foglalkozott az oktatással.)

A JELENLEGI HELYZET

2013. december: A nyíregyházi hallgatók demonstrációt szerveznek az EMMI elé, tiltakozásul a pilótaképzés teljes költségtérítésessé tétele miatt (nem kerül többe, mint egy orvosé és arányaikban nem mennek el többen, mint az orvosok). Ennek hatására az EMMI összehívott egy szakmai értekezletet (a felsőoktatásért felelős helyettes államtitkár vezetésével), ahol fény derült a piaci igények és a képzések között tátongó szakadékra valamint arra, hogy a megrendelői, EU-konform igények csak önálló képzési formában elégíthetőek ki lehet (tehát a szakma definiálhatja más szakmák beleszólása nélkül a saját követelményeit).

A Diákhitel 2 megoldást jelentett a pilótaképzés költségeinek fedezésére, de így csak a jól kereső közforgalmi pilóták utánpótlása oldódik meg hosszú távon, ezért a többi repülőszakember (légirendészet, légimentők, stb.) oktatása, továbbra is állami finanszírozást igényel(ne).

2014 eleje: Az EMMI felsőoktatásért felelős helyettes államtitkárának rendkívül konstruktív szervezésében (idő közben az oktatási hivatal élére helyezték) megindulnak a légiközlekedés szakember utánpótlását biztosító alapképzés – a repülőmérnök képzés – alapításával kapcsolatos munkálatok a BME, az NYF és később külső (EMMI-NKH) nyomásra a Debreceni Egyetem bevonásával. Szerettük volna a szolnokiakat (NKE-HHK-KRI) is bevonni ebbe a műhelymunkába, nekik azonban elöljárói intézkedésre ki kellett maradniuk ebből. Az EMMI felkérésére a folyamatot meglehetős eredményességgel az Nemzeti Közlekedési Hatóság Légügyi Hivatalának (NKH LH) Vezetője koordinálta. Az NKH-LH-nak szintén alapvető érdeke, hogy a repülőszakemberek olyan képzettségeket szerezhessenek, amelyeket mint hatóság ő maga is el tud fogadni és ahol szükséges ki tudja adni rá az u. n. szakszolgálati engedélyeket. Utóbbi, csak az EU képzési normáknak (Part-FCL[4], Part-66[5], Part-ATCO[6]) való megfelelés esetén lehetséges, viszont nélküle pilóta, műszaki, irányító, stb. munkát nem végezhet. Erre legjobban a kis

[3] European Aviation Safety Agency – Európai Repülésbiztonsági Ügynökség. Az Európai Bizottság alárendeltségébe tartozó szerv.

[4] Flight Crew Licensing – A pilótaképzésre vonatkozó közös európai szabvány.

[5] A karbantartó személyzetre vonatkozó közös európai szabvány.

[6] Air Traffic Control Officer – A légiforgalmi irányító személyzetre vonatkozó közös európai szabvány.

és közepes vállalkozások érzékenyek, ahol nem elegendő, hogy valaki mérnöki feladatokat lát el, hanem pl. karbantartó és üzemképesség tanúsító tevékenységet is végeznie kell.

A szakmai munka eredményeként létrejött (2015.03.16) *a REPÜLŐMÉRNÖK - AEROSPACE ENGINEERING szak koncepciója az alábbi szakirányokkal:*

1. *Hivatásos repülőgép vezető - Professional Pilot*
   - *szakmai terület: légitársasági pilóta, kereskedelmi pilóta;*
   - *a légijármű üzemeltető cégeknél vezető tisztségviselők (post holder légijármű üzemeltetésben és képzésben OPS[7]/ATO[8]);*
   - *EU-s Part-FCL képzés előírt tananyagát tartalmazza, elvégzésével CPL(A)[9] szakszolgálati engedély, ATPL(A)[10] theory credit bejegyzéssel kiváltható.*
2. *Repülőgépész - Aeronautical engineering*
   - *szakmai terület: elsődleges - repülőgép sárkány, hajtómű, másodlagos - elektromos és avionikai rendszer alap ismeretanyag;*
   - *légialkalmasság fenntartó, karbantartó mérnök, megfelelőségi, biztonsági, minőségügyi mérnök;*
   - *CAMO[11]/MRO[12]/MTO[13] szervezet (post holder) műszaki vezetését, működésének felügyeletét, ellenőrzését, irányítását végző mérnök;*
   - *EU-s Part-66 megfelelő szintű szakszolgálati engedélyhez elfogadtatható az elméleti ismeretanyag, repülőgép sárkány, hajtómű szakmai ismeretanyag, elektromos és avionikai rendszer alap ismeretanyag.*
3. *Légiközlekedési gazdálkodás - Business Administration in Aviation*
   - *szakmai terület: Airport Operations, Airline Operations, ATM[14] Operations gazdasági üzemeltetés, fejlesztés;*
   - *repülőtér, légitársaság, légijármű üzemeltető, földi kiszolgáló szervezet, képző szervezet, CAMO szervezet, karbantartó szervezet műszaki alapú gazdasági tervezését, irányítását végző mérnök;*
   - *EU-s és nemzetközi elvárt ismeretanyag, repülésüzemi szakszolgálati engedélyhez elfogadtatható: légijog, légiközlekedési rendszerek, hatósági eljárások, utas- és áru-kiszolgálási rendszerek, légitársaság pénzügyi és számviteli menedzsment, légiközlekedés és a környezetvédelem, interkulturális management, légitársasági gazdaságtan.*
4. *Légiközlekedési mérnök - Air Transportation Engineering*

[7] Operations – Alapvetően a kereskedelmi légiszállításra használt rövidítés, de vonatkozik valamennyi szervezetszerűen végrehajtott repülési tevékenységre is.

[8] Approved Training Organisation – Engedélyes pilótaképző szervezet.

[9] Commercial Pilot (Airplane) – Kereskedelmi pilótajogosítás (repülőgépekre).

[10] Air Transport Pilot Licence (Airplane) – Közforgalmi pilótajogosítás (repülőgépekre).

[11] Continuing Airworthiness Management Organisation – Légialkalmasság fenntartó szervezet.

[12] Maintenance Repair Organisation – Légijármű javító, karbantartó szervezet.

[13]Maintenance Training Organisation – Légijármű karbantartókat képző engedélyes szervezet.

[14] Air Traffic Management – Légiforgalmi Menedzsment. Magában foglalja a repülések végrehajtásához szükséges (irányító, tájékoztató, áramlásszervező, meteorológiai, léginavigációs, stb.) szolgáltatásokat.

- *szakmai terület: Airport Operations, Airline Operations, ATM Operations műszaki üzemeltetés, fejlesztés;*
- *repülőtér, légitársaság, légijármű üzemeltető, földi kiszolgáló szervezet, működésének felügyeletét, ellenőrzését, irányítását végző mérnök;*
- *EU-s és nemzetközi elvárt ismeretanyag, repülésüzemi szakszolgálati engedélyhez elfogadtatható: a légiforgalom irányítása, áramlásszervezés, légtérszerkezet, repülőterek, repülőtéri mozgásterület ismeretek, operation (üzemszervezés) ismeretek, minőségügyi rendszerek (SMS, compliance), repülésvédelmi és repülésbiztonsági ismeretek.*

5. *Légiforgalmi irányító - Air Traffic Control Officer*
   - *szakmai terület: Légiforgami irányító;*
   - *légiforgalmi szolgáltatóknál tervező, elemző, fejlesztő mérnök;*
   - *EU-s 805/2011 rendeletnek és Eurocontrol CCC-n alapul (Common Core Content) ismeretanyag, légiforgalmi irányító szakszolgálati engedélyhez elfogadtatható az elméleti és gyakorlati ismeretanyag.*
6. *Elektro- és irányítástechnika - Electronics and Control*
   - *szakmai terület: Elektromos és avionikai rendszer, KLGS, léginavigációs légiforgalmi berendezések földi és fedélzeti egyedi infokommunikációs (Fly-by-wire) rendszerek üzemeltetése és karbantartása;*
   - *karbantartó mérnök, megfelelőségi, minőségügyi mérnök;*
   - *MTO szervezet (post holder) vezetését, működésének felügyeletét, ellenőrzését, irányítását végző mérnök;*
   - *EU-s Part-66 megfelelő szintű szakszolgálati engedélyhez elfogadtatható az elméleti ismeretanyag, elektromos és avionikai rendszer szakmai ismeretanyag, sárkány, hajtómű alap ismeretanyag.*
7. *Űrmérnök - Space Engineer*
   - *szakmai terület: űrtechnika, űrtechnológia;*
   - *űrtechnológus, fejlesztő;*
   - *az Európai űrügynökségben betöltött tagság és az ezzel kapcsolatos standardoknak megfelelő szintű ismeretanyag.*

A szakirányok definiálásánál figyelembe vett szakmai alapelvek:

- *Elsődleges cél: olyan nemzetközi szintű repülőműszaki képzés létrehozása, mely a méltán híres magyar felsőoktatás hírnevét tovább növeli és magas hozzáadott értékkel hozzájárul hazánk versenyképességének növeléséhez, gazdaságának fejlődéséhez*
- *A légiközlekedés rendszere annyira összetett, hogy minden egyes megnevezett szakterületen széleskörű speciális szakmai ismeretanyag átadására van szükség*
- *A légiközlekedési rendszerek elemei (a teljesség nélkül):*
  - *repülőeszközök (merev- és forgószárnyú, gázturbinás, dugattyús, vitorlázó, ballon/léghajó, Ultralight, Autogyro, stb.), karbantartó szervezetek, légialkalmasság fenntartó szervezetek, légijármű üzemeltető szervezetek, légitársaságok*
  - *repülőterek, repülőtér üzemeltetők, repülőtéri építmények (futópálya, forgalmi területek, hangárok, terminálok, stb.)*

  - *utas és árukiszolgálás, földi kiszolgáló szervezetek*
  - *légterek, légiforgalmi szolgáltatás, navigációs és kommunikációs rendszerek*
  - *védelmi rendszerek (kerítésvédelem, utasbiztonsági ellenőrzés, átvilágító eszközök, stb.)*
  - *képző szervezetek, intézmények*
- *A teljes szakmai spektrum lefedésére és a piaci igényeket mindenben kielégítő mérnök utánpótlás kiképzésére a szakterületek szétválasztásával van lehetőség*
- *Az ismeretanyag nagy részben az EU által előírt, kisebb részben más nemzetközi szervezetek által meghatározott. A légiközlekedési szakmák gyakorlása többségében különböző szakszolgálati engedélyekhez, speciális hatósági jogosításokhoz kötött.*
- *Egyes szakterületek ezen indokok alapján - a hatósági engedélyekhez és jogosításokhoz elismertethető ismeretanyagra építve - önálló szakképzettséget adnak,*

Szakmai érvek a szak és szakirányok mellett:

- *A repülőmérnök képzés pozitív hatása a légiközlekedésben statisztikailag is kimutatható. Ahol nincs megfelelő felsőoktatási képzés, ott a baleseti statisztikák is rosszabbak, a repülésbiztonság (safety) csökken, esetlegesen az elvárt szint alá is*
- *A magyar légiközlekedési ágazat elementáris gazdasági érdeke a speciális szakképzettséggel rendelkező mérnök utánpótlás biztosítása. Megfelelő utánpótlás nélkül elkerülhetetlen a gazdasági és műszaki visszaesés.*
- *A repülés a leginkább tőkeintenzív ágazat*
- *A légiközlekedés technológiai transzfer szerepe kiemelkedő, fejlesztései a tudományos és technológiai fejlődés alapjául szolgálnak más iparágakban, tudományterületeken, ezáltal az ezen a területen végzett mérnökök más iparágakat is képesek katalizálni, a gazdaság más területeinek technológia színvonala is növelhető."*

Ebből látható, hogy az elméleti képzés alapkövetelményeként az egyes területre vonatkozó EU szabályozásokat FCL/66/ATCO illetve átfedés esetén, ezekből a szigorúbbat tekintjük. (Pl. az FCL helyett a 66-ot tekintjük alapnak a pilóták és a műszakiak esetén, különösen azért, mert a kis létszámok miatt közös szakmai alapozó tantárgyakat terveztünk.) Az alapkövetelményeken túl természetesen a korszerű repülőmérnöki ismeretek képezik a tananyagot és a gyakorlatok szakirányonként jórész elválnak.

2015. május eleje: Híre érkezett a minisztériumból, hogy a szakmai kezdeményezést figyelmen kívül kívánják hagyni és csak repülőgépvezető szakot akarnak indítani.

2015.05.07. E hír hatására egy tájékoztató levelet küldtünk a szakma jelentősebb képviselőinek a koncepció véleményezésére. (Ezt eredetileg későbbre terveztük, tantervvel együtt.) Az alábbi 1. táblázat mutatja válaszadók szükségleteit. Azok a cégek, akik forgalmi kiszolgálási műveleteket is végeznek, igénylik a két légiközlekedési szakirányt is. Valamennyi válaszadó igényelte a hivatásos repülőgépvezető, a repülőgépész és az elektro- és irányítástechnika szakirányokat.

Szervezet	RGV	Repülőgépész	Légiközlekedési gazdálkodás	Légiközlekedési mérnök	Légiforgalmi irányító	Elektro- irányítástechnika	Űrmérnök
ACE							
BASE Kft.							
Farnair							
Halley							
HUNALPA	Általános támogatás.						
Hungarocontrol	Érdemi válasz nem érkezett. A szakember utánpótlás stratégiája kialakulóban van. Felméri a hazai lehetőségeket.						
Jetstream2004							
KBSZ	Általános támogatás, a szinvnalas képzés alapvető fontosságának kihangsúlyozásával.						
Légimentő Kft							
Légirendészet							
LTB	Nem válaszolt.						
Magnus							
Malév GH							
MERESZ							
MM-Systems							
NKH-LH	Általános támogatás.						
Travel Service							
Wizz							

1. táblázat

2015. május vége: A Nyíregyházi Főiskola Rektora személyesen adta át a szakma képviselőinek támogató leveleit [2] az EMMI felsőoktatásért felelős államtitkárának. Ezen a találkozón a Rektor Úr azt firtató kérdésére miszerint miért tér el az EMMI a szakmai koncepciótól és miért nem veszi figyelembe a szakma képviselőinek (többek között az NKH-LH [3]) óhaját, az Államtitkár Úr azt nyilatkozta, hogy más szakmákban végzett szakemberek a végzésük után beletanulnak majd abba, amit a légiközlekedésben végezniük kell… E döntésnek semmilyen hivatalos formájú indoklását én a mai napig nem láttam, annak létezéséről nem tudok.

2015.06.09. Megjelenik a 139/2015. (VI. 9.) Korm. rendelet [1] amely a munkaadók és szakmai szervezetek, a szakhatóság és a képzést végző szervezetek konszenzusán alapuló, az EU és világszabványoknak megfelelő, 7 szakirányt tartalmazó **repülőmérnöki szak helyett** (ld. előbb) **hivatásos repülőgép-vezetői szakot hagyott jóvá**, ami nem teszi lehetővé az alapítandó új szakon belül más pl. repülő-műszaki szakemberek képzését. (Ennek a szaknak még a képzési és kimeneti követelményei - amit szintén a mi tanszékünkkel írattak meg - sincsenek jóváhagyva e cikk megírásának idején. Arról a tervezetről már nem is kívánok külön szólni, hogy e szakot (is) akkreditáció nélkül tervezik indítani). Nem látjuk a hivatásos repülőgép-vezető BSc kapcsolódási lehetőségeit az MSc képzéshez, és nagy kérdés, hogy mihez kezd egy pilóta ezzel a végzettséggel repülő-egészségügyi alkalmatlanság esetén?

Így utólag végig gondolva a történéseket, felmerül a kérdés, hogy akkor mi értelme volt a másfél éves munkának?

Indoklás

A fent nevezett kormányrendeletben megjelent képzési forma elégtelen mivoltára azon túl, hogy a szakma igényeinek nem felel meg az alábbi indokokat tudom felhozni:

1. A repülőipar egy alkalmazottra vetítve a legnagyobb GDP-t termeli. A légi közlekedés rendszere igen sajátosan működik, rendkívül nagy értékű az eszközparkjának működtetése, nagyon sok a speciális ismeretre, illetve azok speciális kombinációjára épül;
2. A légiközlekedési vállalkozások sajátossága, hogy profittermelő képességük növekvő amplitúdóval változik a nyereséges és veszteséges tartományokban, miközben a légiközlekedésben érdekelt többi vállalkozás haszonnal dolgozik.

3. A repülőipar és légiközlekedés másik specialitása, hogy ~20 évente teljes megújuláson megy át. Például az utóbbi negyven évben a profittermelő képességet a legjobban befolyásoló, biztonságos üzemeltetést szavatoló mérnöki tevékenységtől először - a biztonságos repülőgépek megjelenésével - eltolódott a szabad üléshelyeket értékesíteni tudó menedzserek felé, majd az utóbbi néhány évben visszatért a rendszerintegrátorként dolgozó mérnökökhöz. Ez persze teljesen új tevékenységet jelent a mérnöknek, mivel műszaki tudásán túl használnia kell a gazdasági, környezetvédelmi, biztonsági, védelmi, stb. ismereteit is.
4. Pontosan e sajátosságok miatt a repülőszakember képzést is nemzetközi szinten UN – ICAO[15], EU – EASA részletesen szabályozták, melyben kitérnek arra kinek, mit kell oktatni, (milyen tantárgyakat, milyen alapvető tematikák szerint, mennyi előadást és gyakorlati órát kell megtartani, milyen formában lehet vizsgázni, stb.). Az előírások egy sor munkavégzést csak a megfelelő végzettség, illetve un. szakszolgálati engedély birtokában engednek folytatni. A hallgatók számára (fizetésben is mintegy 30 %-os) előnyt jelent, ha a végzettséget tanúsító dokumentum már a szakmai végzettség elnevezésében is tartalmazza a nemzetközi követelmények szerinti minősítést. Ha ezeknek a szabályoknak meg akarunk felelni (mert elkerülhetetlen!) akkor viszont más szakterületeken „felesleges” ismeretanyagokat is kell oktatni;
5. Tapasztalatunk az, hogy repülő műszaki területen, főleg a kis és közepes vállalkozások esetén, Magyarországon jelenleg nagyobb a szakember hiány, mint a pilóták területén. Az 1. táblázatból jól látható az 1., 2., és 6. szakirányokra lenne azonnali nagy szükség hazánkban, mert már sok helyen fennakadásokat okoz a szakemberhiány. Olyan szakterületekről hiányoznak tehát, akiket más szakmák szakirányos képzésében (ez a jelenlegi helyzet) nem lehet kiképezni! **Fontolóra lehetne venni a szakirányok számának csökkentését a fent nevezett 3 szakirányra a szak indításakor, de mindenképp nyitva kell hagyni a lehetőséget a koncepciónak megfelelő jövőbeni bővítésre.**
6. A manapság bevezetésre kerülő duális képzési forma alkalmazása valamelyest javítana a helyzeten, mert több gyakorlati elemre biztosít lehetőséget, amelyre első sorban a műszaki felkészítésben lenne nagy szükség. A képzési kötöttségek (Part-FCL) miatt ez a forma a pilótaképzésben eleve nem megvalósítható, csak a többi szakirány esetén jöhet számításba. Sajnos nem oldható fel vele a jelenlegi helyzet ellentmondása, mert a duális képzés feszített ütemterve mellett még inkább szükség van az elmélet és a gyakorlat időbeli szinkronizációjára, miközben az elméletet a jelenlegi közlekedési és járműmérnöki képzésben megvalósíthatónál nagyobb mélységben és szélességben követeli meg a képzési minimumnak tekintett európai szabvány (Part-66). Tehát kijelenthető, hogy a duális képzési forma is csak akkor lehet igazán eredményes, ha önálló formában hozzák létre, mert csak így biztosítható az előírt elméleti ismeretek elsajátítása, sokkal jobban megvalósítható az elmélet-gyakorlat kívánt didaktikai sorrendje és lehet elegendő időt biztosítani a szükséges gyakorlat végrehajtására.

[15] International Civil Aviation Organisation – A Nemzetközi Polgári Repülési Szervezet, az ENSZ repüléssel foglalkozó szerve.

ÖSSZEFOGLALÁS

A nemzetközi (és a közös EU szabályozás miatt a hazai) elvárások teljesítése csak önálló - gondos és átfogó szakmai egyeztető munka eredményeként megtervezett - több szakirányos repülőmérnöki szak létesítésével oldható meg! Mivel még a hivatásos repülőgépvezető szak KKK sincs jóváhagyva, ezért javasoljuk a szak elnevezését módosítsák „repülőmérnök" szakra, melynek alapítási dokumentumait már 2015 tavaszára kidolgoztuk. Amennyiben ezt nem teszik meg, csak nagyon drága külföldi képzéseken lesznek megszerezhetőek azok a jogosítások, melyekkel betölthetőek azok a pozíciók (szakági vezető, tanúsító, stb.) amelyek a légiközlekedés működőképességének biztosításához elengedhetetlenek. Ez a helyzet a gazdasági kihatásain túl repülésbiztonsági kérdéseket is felvet, nem véletlen, hogy Közlekedésbiztonsági Szervezet (KBSz[16]) az elsők között csatlakozott a kezdeményezéshez.

HIVATKOZÁSOK

[1] Nemzeti Jogszabálytár: http://njt.hu/cgi_bin/njt_doc.cgi?docid=176043
[2] A levelek eredetije a minisztériumban van ezért csak a másolatokkal rendelkezünk.
[3] Az NKH-LH (Farkas András) 2014. február 13-án kelt levele.

THE STATUS OF THE ACADEMIC EDUCATION OF AVIATION PROFESSIONALS IN OUR COUNTRY

By historical and economical reason, the policy treats the aviation sector not appropriate in Hungary. The purpose of this paper to give description of the latest activities of government and professionals and of the aviation sector's needs related to professional training. The article points out the flawed nature of the latest regulation of the government related to aviation personnel training. The article proposes solutions to that problem which are justified detailed manner.

Keywords: *academic education, aeronautics, supply of professionals, Part-FCL, Part-66, Part-ATCO, aerospace engineer*

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_3/2015-3-06-0242_Szilagyi_Denes.pdf

[16] Közlekedésbiztonsági szervezet – A közlekedési eseményeket és baleseteket kivizsgáló független szakmai szervezet.

Szabolcsi Róbert

UAV TÍPUSALKALMASSÁGI TANÚSÍTÁSÁNAK HAZAI ÉS NEMZETKÖZI TAPASZTALATAI

A pilóta nélküli légijárművek (UAV) és a pilóta nélküli légijármű rendszerek (UAS) egyre szélesebb körű alkalmazását figyelhetjük meg napjainkban. A korábban D3 (Dirty–Dull–Dangerous) jelzővel illetett UAV-alkalmazások mára realitássá váltak, legalább is, nyilvánosan is elismerik az ilyen, vagy ehhez hasonló UAV alkalmazásokat [1][2]. A szerző célja bemutatni az UAV típusalkalmassági tanúsítások jelenleg helyzetét úgy hazai-, mint a nemzetközi szinten. A nemzetközi szabályok áttekintése során a szerző egy-egy reprezentatív katonai-, és polgári szabályrendszert mutat be. A nemzeti szabályozások közül a szerző az Amerikai Egyesült Államok Közlekedési Minisztériuma Szövetségi Légügyi Hivatalának (US DoT FAA) ajánlásait mutatja be. A rendelkezésre álló külföldi tapasztalatok összefoglaló értékelése után a szerző a hazai jogszabályalkotók számára nyújt segítséget javaslatai megfogalmazásával.
Kulcsszavak: *UAV, UAS, UAV/UAS típus alkalmassági tanúsítás, NATO, EASA, US DoT FAA*

BEVEZETÉS

A pilóta nélküli légijárművek és légijármű rendszerek típusalkalmassági tanúsítása a modern kor egyik fontos kihívása. Közelmúlt talán méltatlanul elhanyagolt híre, hogy az egyik európai vállalat/vállalkozás csődbe ment, mert a mintegy tizenöt ezres megrendelt, és előre kifizettet UAV-t (quadrotor) nem tudta időben és minőségben leszállítani a megrendelőinek. Nyilvánvaló, hogy számos oka lehet a sikertelenségnek, de nagy valószínűséggel az egyik tényező az UAV típus-alkalmasági tanúsítás hiánya volt. Tekintett a szabályozások hiányára, kevés olyan piaci szereplő akad, aki vállalva a piaci kockázatot, belevág egy komoly projektbe, és azt üzleti sikerre viszi. Bár számos nemzetközi (NATO, amerikai, ausztrál, osztrák, francia, olasz stb.) példa igazolja, hogy az UAV/UAS fejlesztések, kutatási programok még piaci mértékkel mérve is sikerre vihetőek, egyelőre, valahogyan a hazai- és a közép-európai országok példája azt mutatja, hogy nem sikerül áttörő sikert elérni. Meg kell barátkozni a gondolattal, hogy az európai uniós gondolkodás az UAV-t gazdasági kitörési pontban tekinti, és 2016-tól az új RPAS-rendszereket úgy kell fejleszteni, hogy a repülésbiztonság területén a képességei lehetővé tegyék az UAV-k repülését az integrált légtérben, minden különleges elkülönítés nélkül. Eme üzleti szektor a bevezetést követő első három évben vélelmezett üzleti volumene tizenöt milliárd USD nagyságrendű piaccal kecsegtet, munkahely teremtő képessége közel hetvenezer fős csak a tervező-, fejlesztő-, gyártó szektorban, ami 2050-re százötven ezer főre növekszik, az üzleti prognózisok szerint. Az Európai Repülésbiztonsági Ügynökség (EASA) 2014 őszén elkezdte a közös európai szabályrendszer kialakítását. E szabályrendszer kialakításához – előzetes regisztráció után – szakmai véleményeket lehetett fűzni 2014 októberében, online internetes felületen. Az előzetes véleménykérés ideje tavaly ősszel lezárult, hamarosan akár egy új európai uniós szabályrendszer is megjelenhet a rendelkezésre álló szabályozók palettáján. A szerző célja bemutatni néhány meglévő szabályrendszert, ami már akár több éve is sikeresen alkalmazott, és kiállta az élet próbáját: követett szabályrendszerré vált. Az egyes szabályozások elemzése után olyan következtetések várhatók, amelyek akár figyelembe is vehetőek a hazai szabályozást készítők által, ha egyáltalán van ilyen törekvés hazánkban.

ELŐZMÉNYEK, SZAKIRODALMAK

A pilóta nélküli légijárművek alkalmazása új területekre lépett: a *drón* szó valóban takarja az egyszeri katonai alkalmazást (személyek célzott likvidálása). A kamikaze drónok alkalmazása a közel-keleten és a Mediterránium-ban valósággá vált, ami egyben rettegett fegyverré is tette őket. A néhány publikált eset alátámasztotta, hogy az UAV képes személyek gyors és megbízható azonosítására, és a *célok* nagyon rövid idő alatti leküzdésére, illetve megsemmisítésére [1][2]. Az utóbbi néhány év sikeres UAV fejlesztései közé tartozik a METEOR-3MA TUAV célrepülőgép típusalkalmassági tanúsítása. Ebben az eljárásban a szerző az UAV robotpilótájának, és az automatikus repülésszabályozó rendszerének tanúsítását végezte el [3][4].
Az UAV típusalkalmassági tanúsítása során olyan egyszerű problémákkal találkozunk, hogy adott esetben a hazai szakmai nyelvben még egységes fogalmakkal, vagy definíciókkal sem bírunk. E kihívást volt hivatott megválaszolni a szerző [5][6][9] cikkei. A METEOR-3MA TUAV robotpilótájának tanúsítási tapasztalatai [3][4] arra ösztökélték a szerzőt, hogy az UAV automatikus repülésszabályozó rendszerei tanúsításakor jól alkalmazható követelményrendszert állítson fel [7][8][10][11][12]. A szerző multirotor (quadrotor) alapú UAV-rendszer koncepcióját vázolta, amely képes komplex biztonságtechnikai problémák megoldására [13][14].

EURÓPAI UNIÓS SZABÁLYOZÁSI TERVEK

Az „Európai Bizottság Közleménye az Európai Parlamentnek és a Tanácsnak, ami az „Új korszak a légi közlekedésben – A légiközlekedési piac megnyitása a távirányított légijármű-rendszerek biztonságos és fenntartható polgári felhasználása előtt” címet viselte, kétséget kizáróan fogalmazta meg, hogy a távirányított légijármű-rendszerek (RPAS) polgári alkalmazásai az EU-ban húzóágazattá válhatnak, és ennek egyik fontos, közismert és köztudott akadályaként a szabályozás hiányosságát jelölte meg [16].
Az Európai Repülésbiztonsági Ügynökség (EASA) együttműködve az Eurocontrol-lal, a JARUS-sal, az EUROCAE-val, a SESAR közös vállalkozással (SJU), az EDA-val, az ESA-val, az RPAS-gyártókkal és fejlesztőkkel, valamint a nemzeti polgári repülési hatóságokkal, olyan európai közös szabályozó rendszer kialakítását tervezi, amely lehetővé teszi, hogy az Európai Unió az RPAS-rendszerek polgári alkalmazása területén versenyképes termékekkel tud előállni, és az UAV/RPAS-rendszerek piacán a világban komoly versenytársként jelenik majd meg. Az EC Közlemény fontosabb megállapításai és döntései az alábbiak voltak [16]:

„1. intézkedés:

A Bizottság megvizsgálja az RPAS-eknek az európai légtérbe 2016-tól való integrálásához szükséges jogszabályi előfeltételeket, lefedve a koherens és hatékony politika biztosításához szükséges alapvető szabályozási kérdéseket, beleértve az EASA megfelelő hatáskörének kérdését is. Minden lehetséges jogalkotási intézkedés előtt hatástanulmány készül.

A Bizottság felkéri az EASA-t, hogy dolgozza ki a lehetőleg nemzetközi eljárásokon alapuló, kockázatarányos és hatékony konzultáció alapját képező végrehajtási szabályok elfogadásához szükséges véleményeket.

A Bizottság biztosítja, hogy a potenciális gyártók, üzemeltetők és egyéb érintett szervezetek könnyen hozzáférhessenek az alkalmazandó szabályozási kezdeményezések legfrissebb változatához, akár az 1998/34/EK irányelv szerinti értesítési rendszeren keresztül is.

2. intézkedés:
A Bizottság a rendelkezésre álló erőforrások keretei között biztosítja, hogy az RPAS-eknek az európai ATM-főtervbe való integrációjához szükségesnek talált K&F igényeket a SESAR2020 program megfelelő mértékben figyelembe vegye.
3. intézkedés:
A Bizottság biztosítja az RPAS-ek üzemeltetésével kapcsolatos védelmi kérdések figyelembevételét a jogellenes beavatkozások elkerüléséhez, hogy a gyártók és az üzemeltetők megtehessék a megfelelő óvintézkedéseket.
4. intézkedés:
A Bizottság megvizsgálja, hogy az RPAS-alkalmazások hogyan hozhatók összhangba az adatvédelmi szabályokkal. Konzultációkat szándékozik folytatni szakértőkkel és érdekelt felekkel; foglalkozni fog a hatáskörébe tartozó intézkedésekkel, esetleg figyelemfelhívó kampányokat is beleértve, az alapvető jogok védelmében; továbbá előmozdítja a nemzeti hatáskörbe tartozó intézkedések meghozatalát.
5. intézkedés:
A Bizottság megvizsgálja a jelenlegi polgári jogi felelősségi rendszert és felelősségbiztosítási rendszert érintő követelményeket. A hatásvizsgálat eredményei alapján megteszi a megfelelő kezdeményezéseket az igényekre szabott szabályozási keret biztosítása érdekében.
6. intézkedés:
A Bizottság konkrét intézkedéseket dolgoz ki a Horizont 2020 és a COSME programokon belül az RPAS-piac fejlődésének támogatására, és biztosítja, hogy az érintett szereplők, különösen a KKV-k, átfogó képet kapjanak ezekről az eszközökről. Létrehozza a szükséges együttműködési mechanizmusokat a SESAR Közös Vállalkozás keretében végzett munkával, hogy elkerülje az átfedéseket és hatékonyan használja a rendelkezésre álló erőforrásokat."
A szokásos, és kötelezően elvárt szakirodalmi hivatkozásokon túl a fenti szó szerinti idézettel a szerző célja az volt, hogyha valaki eddig elolvassa e cikket, nagyobb esélye van annak, hogy valaki komolyan is veszi azt, és az Európai Bizottság e témakörben meghozott intézkedéseit követendő normaként határozza meg.
Az Európai Bizottság tehát már tavaly megtette az első lépéseket, ami a fent felsorol intézkedésekből az első időszakra esett. Az RPAS/UAS rendszerek légtér-integrációs kérdései, az UAV kutatások és fejlesztések, az adatvédelemmel kapcsolatos kérdések már ma is sok szakmai műhelynek adnak munkát, és anyagi forrást a K&F tevékenységhez. Kérdés, hogy az EC által nemzeti hatáskörbe utalt kérdések hogyan rendeződnek, a hazai jogalkotók milyen elvi vonalvezetők mentén határozzák meg az RPAS/UAS használatának lehetőségeit, és feltételeit. Egyáltalán, komolyan veszik-e rájuk háruló feladatok

A „NATO STANAG 4761" SZABVÁNY

A NATO többéves jogszabály előkészítő tevékenységének eredményekért első olvasatban már 2007-ben közzé tett a pilóta nélküli légijármű rendszerek légialkalmassági követelményrendszerét és kérte a NATO tagállamokat, hogy csatlakozzanak a normarendszerhez a NATO szabvány ratifikálása révén [17]. Sajnos, a hazai döntéshozók úgy döntöttek, hogy hozzájárulnak a jogszabály bevezetéséhez, de a hazai jogrendbe azt nem vezetik be. Magyarország elfogadta azt, hogy a NATO-szabvány bevezetésre kerüljön az azt ratifikáló országokban: a hazai jogfelfogás szerint

gyakorlatilag **MÁSOK SZÁMÁRA** a hivatkozott szabványt bevezették, de a hazai jogrendbe azt nem ültették át, tehát a NATO STANAG 4671 szabvány hazai alkalmazására nem kerülhet sor [19]. A hivatkozott STANAG 4671 bevezetésére 2009-ben került sor.

Úgy vél(elmez)em, hogy a hazai döntéshozók motivációját, és gondolkodását megérteni nem túlságosan bonyolult: nem gördítettek akadályt az elé, hogy az avantgárdok, a képességekkel és eredményekkel bírók, a harcosok kivont karddal a kézben rohanjanak előre, és egyre újabb és újabb UAV típusokkal, újabb és újabb polgári-, és katonai UAV alkalmazásokkal jelenjenek meg a piacon. Tekintettel azonban arra, hogy a hazai szakmai-tudományos közélet, az UAV tervezők-; fejlesztők- és gyártók 2008-ban még nem készültek fel a jogszabály hazai bevezetésére: vélelmezhető az a viselkedés is, hogy magyarosan, hátra dőlve kivárjuk, hogy mi is fog történni ezen a piacon.

Közel egy évtized után láthatjuk, és beláthatjuk, hogy ez a kivárásra játszó magatartás hibás volt: elszaladt mellettünk a világ, és nem csak ezen a területen. Könnyű belátni, és elfogadni, hogy az UAV/UAS rendszerek állami-, és nem állami célú alkalmazásainak területén olyan diverzitást látunk, ami csodálattal, és egyben rémülettel is eltölt.

Csodáljuk az új alkalmazásokat számos területen (természetvédelem, precíziós mezőgazdaság, természeti jelenségek megfigyelése, kamikaze drónok kifejlesztése és alkalmazása stb.), és egyben rémülettel is tölt el, hogy a piac, és a világ az elmúlt években hogyan, milyen módon, és milyen mértékkel rohant el mellettünk.

Az UAV/UAS alkalmazások egyre gyarapodó, változatos sokrétűségét előre vetítő pozitív kitevőjű exponenciális függvények által vetített jövőkép sokak számára valósággá vált: be kell látni, hogy a pesszimista, kiváró magatartás, ami mások sikertelenségére hajazott: NEM JÖTT BE. Igen, eltelt közel tíz év, amíg a hazai UAV alkalmazások, és az új megoldások maradtak az időszakos, elkülönített légterek világában, és nem volt olyan, alkalmazható eredményekre vezető érdemi törekvés, amely a globális (európai-, euro-atlanti-, amerikai-, ázsiai-, BRIC-országok stb.) világban a felszínen tartotta volna azt az igényt, hogy a nemzetközi trendeknek akár csak a követése is számos előnnyel járhat a hazai UAV/UAS tervezők, fejlesztők és üzemeltetők részére.

Elképzelhető azonban az is, hogy a hazai döntéshozók még nem látták be, és nem fogadták el, hogy az Európai Bizottság Közleményében [16] adott víziók **valós** gazdasági eredményekkel kecsegtetnek: van üzleti haszon; van elérhető, olyan új képesség-halmaz, amire a szabadpiacon igény, fizetőképes kereslet van.

A szerző a maga részéről több alkalommal megtette a hivatkozott NATO szabvány [19] részletes ismertetését, így a téma iránt érdeklődőknek lehetőségük van magyar nyelven is hozzáférni a hivatkozott katonai szabványhoz.

US DoT FAA: ÚJ JOGSZABÁYLGYŰJTEMÉNY

Az elmúlt években számos alkalommal bizonyosodott be, hogy a Fehér Ház biztonsági szolgálata – sokszor neki fel nem róható okból – nem felel meg a vele szemben támasztott követelményeknek. Mit is jelent ez?! Az elmúlt mintegy két évben számos alkalommal szállt le multirotoros UAV (pl. quadrotor) a Fehér Ház pázsitján, vagy annak közvetlen közelében. Tekintettel azonban arra, hogy az UAV-kezelőket alig, vagy egyáltalán nem sikerült tetten érni, így eddig nem igazán alakult ki az angolszász precedens-jog: nem volt előzmény, és nem volt példa arra, hogy akár a polgári-, akár a büntetőjog hogyan szankcionálja az UAV-kezelők normasértését, ha egyáltalán az első ilyen esetek annak számítottak.

Az USA közlekedési minisztere 2015. február 15.-én közzétette az UAV/UAS polgári célú használatára vonatkozó első szabálygyűjteményét [18], amellyel kapcsolatban a szerző megjelentetett egy publikációt, amely felhívja erre a figyelmet, és elemzi a jogszabály fontosabb részeit [15]. A jogalkotó felfogása és megközelítése szerint, mivel még az USA-ban sem alakul ki az UAV/UAS ipar, ezért a 2014. évet bázis évnek tekintve, öt éves átmeneti időt adtak az új jogszabályok kialakítására, bevezetésére, alkalmazására, és a tapasztalatok gyűjtésére, és azok összegzésére.
Véleményem szerint messzemenően érvényesül a követő jogalkotás, ami lehetővé teszi, hogy az írott jog igazolja magát, bizonyítsa, hogy képes új területeket szabályozni, és az UAV/UAS szakma elfogadja a kiadott szabálygyűjteményt. Ha ez nem így történik, akkor nem várható el például, hogy valamely eldugott helyen lévő zsáktelepülés erdészetében felderítést végző UAV-operátor egy esetleges repülő eseményről, aminek akár szemtanúja sincs a kezelőn kívül, írásos jelentést készítsen a légügyi hivatal/hatóság részére.
A hivatkozott jogszabály-tervezet alapja lehet egy hazai szabály-gyűjteménynek. Kérdés, hogy a hazai szakmai-tudományos közélet, és a döntéshozók meg tudnak-e birkózni a kihívással, és el tudják-e fogadni, hogy a szerepük egy más szervezet által készített szabályrendszer magyarra fordítására korlátozódik, vagy esetleg van belső igénye, hogy a hazai UAV/UAS szabályrendszert maga alkossa meg, és maga kodifikálja, illetve kompilálja azt.

BEFEJEZÉS, EREDMÉNYEK

A pilóta nélküli légijárművek és légijármű rendszerek típus alkalmassági tanúsításának hazai tapasztalatai eléggé szűkösek, egy-két UAV típusra korlátozódik. A hatósági eljárások során felhalmozott tudás-, és tapasztalat még nem elegendő arra, hogy az egyes eseti tanúsítások eljárásrenddé alakuljanak.
Az UAV/UAS-szabályozások készítői alapvetően három módon közelíthetik meg a megoldandó feladatot. Az első szabályalkotás az előre mutató normarendszer kialakítása, amely elkészítésekor esetleges, és nem feltétlenül szükséges az UAV alkalmazók véleményének kikérése. E szabályalkotás velejárója a szankció-rendszer kidolgozása, és alkalmazása is. Ez a konzervatív megközelítés nem feltétlenül számol azzal, hogy egy túlszabályozott esetben a jog nem segíti majd az UAV/UAS technológiák fejlődését és elterjedését, hanem éppen ellenkezőleg, gátolja azt.
A szabályozások kialakítása során alkalmazható második elv a követő jogalkotás elve: egy előre megadott normarendszer, amelynek létrehozását széleskörű szakmai-, jogi-, üzleti szempontú vita előz meg, majd az ideiglenes normarendszer hatályba léptetése után akár több évvel megvizsgálják, mit igazol vissza a gyakorlat az előre mutató normák közül. A szabályrendszer lemerevítése akkor időszerű, ha van tapasztalat, hogyan működik a jog a gyakorlatban. E megközelítésben egy esetleges normasértés nem feltétlenül jár azonnali szankcióval, hanem inkább a rendszerben tevékenykedők konstruktív hozzáállására, segítő szakmai véleményére számít a normák finomításában, módosításában.
Végezetül, a harmadik mód, ez pedig nem más, mint a meglévő (jog)szabályok ratifikálása, átvétele. Ahogyan egy egysoros közlemény elutasította a NATO STANAG 4671 szabvány hazai jogrendbe történő átvételét [19], egy ilyen terjedelmű közlemény szólhat annak ratifikálásáról is. A világ számos országában létezik már valamilyen szabály-rendszer, vagy szabvány az UAV/UAS rendszerek típus-, és légialkalmassági megfelelésének tanúsításáról, ezeket a szabályokat egyszerűen át kell venni, és megoldódik számos olyan probléma, amely ma szinte

béklyóba köti a hazai UAV/UAS tervezőket, fejlesztőket, és lehetetlenné teszi komoly eredmények elérését ezen a területen.

Javaslatom megfontolásra a (jog)szabálykészítők számára, hogy első lépésben, végre valahára foglaljanak állást abban a kérdésben, hogy a szabályrendszer kialakításakor milyen utat kívánnak járni, ilyen módon kívánnak jogot alkotni. Ha ez a kérdés eldől, akkor már egyszerűbb az előttünk álló helyzet, mert látjuk, hogy mi a jogszabályalkotó alapvető szándéka, igényt tart-e adott esetben szakmai véleményekre, vagy sem?!

Az idő előre haladtával csak nő a lemaradásunk a nemzetközi porondon, komoly pályázati lehetőségektől esik el a szakma, lemarad az élenjáró országoktól, a meglévő képességeink pedig lassan elfogynak. Az idő sürget, és vélelmezhető, hogy az Európai Bizottság hamarosan kiadja a saját, EASA által összeállított szabályrendszerét, amelynek összeállítása során még lehet nemzeti érdekeket érvényesíteni, de egy pont után már csak a szabályok betartása, és betartatása marad a hivatalok, illetve a hatóságok számára.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] Kamikaze drónt fejlesztettek Izraelben, (online) url: http://index.hu/tech/2015/11/04/kamikazedront_fejlesztettek_izraelben/ (2015.11.04)

[2] Israel Is Already Selling Kamikaze Micro-Drones That Will Change Modern Warfare, (online) url: http://www.popularmechanics.com/flight/drones/a18032/hero-30-uvision-israeli-drone/ (2015.11.04)

[3] SZABOLCSI RÓBERT: TUAV automatikus repülésszabályozó rendszer típus- és légialkalmassági tanúsítása, Hadmérnök, ISSN: 1788-1919, VIII: (4), pp. 26-32. (2013)

[4] SZABOLCSI RÓBERT: Pilóta nélküli légijármű rendszerek légialkalmassági jellemzői, és a légialkalmassági tanúsítás követelményei, Szolnoki Tudományos Közlemények, XII. évf., 1. szám, ISSN 1419-256X (2060-3002), pp (64-75), 2013.

[5] RÓBERT SZABOLCSI: A New Concept of the Basic Terms and Definitions for Measuring the UAV and UAS Systems Compliance with Airworthiness Criteria, Bolyai Szemle, ISSN: 1416-1443, XXIII:(1), pp. 5-18. (2014)

[6] RÓBERT SZABOLCSI: A New Concept of the Unmanned Aerial Vehicles Flying and Handling Qualities, Bolyai Szemle, ISSN: 1416-1443, XXIII:(1.), pp. 19-26. (2014)

[7] RÓBERT SZABOLCSI: UAV Longitudinal Motion Flying Qualities Applied in Airworthiness Certification Procedure, Land Forces Academy Review, ISSN: 2247-840X, eISSN: 1582-6384, 74:(2), pp. 208-216. (2014)

[8] RÓBERT SZABOLCSI: Lateral/Directional Flying Qualities Applied in UAV Airworthiness Certification Process, Land Forces Academy Review, ISSN: 2247-840X, eISSN: 1582-6384, 3/2014: (75), pp. 336-346. (2014)

[9] RÓBERT SZABOLCSI: A New Approach of Certification of the Airworthiness of the UAV Automatic Flight Control System, Land Forces Academy Review, ISSN: 2247-840X, eISSN: 1582-6384, 4/2014: (76), pp. 423-431. (2014)

[10] SZABOLCSI RÓBERT: UAV automatikus repülésszabályozó rendszer típus- és légialkalmassági tanúsításának megfelelési kritériumai - oldalirányú mozgás, Bolyai Szemle, ISSN: 1416-1443, XXIII: (2) pp. 85-97. (2014)

[11] SZABOLCSI RÓBERT: UAV automatikus repülésszabályozó rendszer típus- és légialkalmassági tanúsításának megfelelési kritériumai - hosszirányú mozgás, Hadmérnök, ISSN: 1788-1919, 9: (2), pp. 149-157. (2014)

[12] SZABOLCSI RÓBERT: Pilóta nélküli légijárművek automatikus repülésszabályozó rendszerei típus- és légialkalmassági tanúsításának megfelelési kritériumai, Hadtudomány (online), eISSN: 1588-0605) 24: (1), pp. 90-104. (2014)

[13] RÓBERT SZABOLCSI: The Quadrotor-Based Night Watchbird UAV System Used in the Force Protection Tasks, Knowledge Based Organization Proceedings, ISSN: 1843-6722, 1/2015, pp. 101-107. (2015)

[14] SZABOLCSI RÓBERT: Night Watchbird UAV System: quadrotor alapú vagyonvédelmi-biztonsági rendszer előzetes koncepcionális-, és koncepcionális tervezése, Hadmérnök, ISSN: 1788-1919), 1/2015:, .évf, pp. 35-48. (2015)

[15] RÓBERT SZABOLCSI: Newest Provisions in Regulations Applied for Small Unmanned Aircraft Systems, Review of the Air Force Academy, ISSN: 1842-9238, eISSN: 2069-4733, No1(28)2015: pp. 7-12. (2015)

[16] Új korszak a légi közlekedésben – A légiközlekedési piac megnyitása a távirányított légijármű-rendszerek biztonságos és fenntartható polgári felhasználása előtt, (online) url: http://ec.europa.eu/transport/modes/air/doc/com(2014)207_hu.pdf (2015. 11. 20)

[17] NATO STANAG 4671 – Unmanned Aerial Vehicles Systems Airworthiness Requirements (USAR), NSA/0976(2009)-JAIS/4671, (online) url: http://everyspec.com/ (2015. 11. 20)
[18] Operation and Certification of Small Unmanned Aircraft Systems, US DoT FAA, Docket No.: FAA-2015-0150; Notice No. 15-01, (online) url: http://www.faa.gov/news/press_releases/news (2015. 11. 20)
[19] 47/2008. (HK 10.) HM VTI SZÁT közlemény NATO egységesítési egyezmények elfogadásáról, Honvédelmi Közlöny, CXXV. évf., 10. szám, 2008. június 24.

UAV Type Certification Experiences

Nowadays the Unmanned Aerial Vehicles (UAV) and Unmanned Aerial Systems (UAS) have more and more extensive applications both in governmental and non-governmental missions. Their former title of applications in D3 (Dirty–Dull–Dangerous) missions have turned to the reality, whether it is confirmed, or not [1][2]. The purpose of the author is to evaluate experiences of the UAV type worthiness certifications both in international and national relations. Fort the international relations one of the military and non-military representative legal systems will be highlighted and evaluated. The non-military legal system being evaluated is the FAA regulations, which are accessible for those ready to apply them. After review of the international regulations author will formulate his proposals for the Hungarian national regulations in the field of UAV certification procedures.
Keywords: *UAV, UAS, UAV/UAS type worthiness certification, NATO, EASA, US DoT FAA*

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_3/2015-3-07-0232_Szabolcsi_Robert.pdf

Békési Bertold, Szegedi Péter

NAPJAINKBAN FEJLESZTETT FEGYVERRENDSZEREK MEGJELENÉSE A JÖVŐ HADSZINTEREIN, A TUDÁSALKALMAZÁS ÉS FEJLESZTÉS SZEMPONTJÁBÓL

A hadiipar és az új az technológiák, eszközök fejlesztése napjainkban összefonódik egymással. Jelenleg is olyan fegyverek, fegyverrendszerek tesztelése van folyamatban, amelyek nemrég még csak a fantasztikus irodalom kedvelői előtt voltak „ismertek”, illetve néhány beavatott fejlesztő mérnök tervező asztalán léteztek. A hadiipar fejlődése egyet jelent az olyan technológiák fejlődésével is, amelyekből a társadalmak (a civil lakosság) kétszeresen is profitálhat: a biztonság garanciáján túl a mindennapi életéhez szükséges eszközök megjelenését is elősegíti. Amennyiben a szervezet képessé válik arra, hogy a ma problémáit és feladatait egységes, a tegnap, a ma és a holnap jellemző eszközeiből álló rendszerrel kezelje, vagyis a döntéshozatali rendszerét az intézmények által felhalmozott explicit és implicit tudások megtartásával, sőt tudatos gyűjtésével és fejlesztésével támogassa, ez a feladat sikerrel megoldható. A szerzők a cikkben az aktuálisan megismerhető katonai csúcstechnika néhány fegyverének, fegyverrendszerének bemutatásán keresztül törekednek rámutatni a hadviselés sajátosságainak változására, a fegyverek jövőbeni alkalmazásának lehetséges módjára.

Kulcsszavak: *haditechnikai újítások, fegyverrendszerek, katonai célú kutatások, tudásmenedzsment fejlesztés*

1. BEVEZETÉS

E téma vizsgálatakor elsőként célszerű áttekinteni, hogy mely fegyvereknek, milyen hatása lehet a jövő harctevékenységére, a hadviselés sajátosságainak folyamatos változásaira. Ezek, a fejlesztés különböző fázisaiban lévő - a kreatív elmék által megálmodott és a mérnöki kezek segítségével létrehozott - olyan haditechnikai eszközök, technikai újítások amelyek jövőbeni alkalmazása is feltételezhető és alapvető hatással lehetnek:

- akár két, vagy több, mai értelembe vett hagyományos haderő (pl.: Kína és az USA hadereje között potenciálisa kialakulható), kiterjedését, időbeli lefolyását, és intenzitását tekintve jelentősnek ítélhető összecsapásra;
- akár a két szemben álló fél képességeit vizsgálva aszimmetrikusnak nevezhető forgatókönyv szerint lezajló konfliktusban is (pl. városi harc).

Fontos szempont lehet a szükséges képesség kiválasztása is. Például a világ legjobb ötödik generációs harcászati repülőgépének meghatározó a hatása bizonyos harchelyzetekben, de a nagy repülési sebessége például alkalmatlanná teszi a városi harcokra jellemző méretű és elhelyezkedésű célok felett huzamos tartózkodásra, vagy kis kiterjedésű lakott településeken a harcban résztvevő alegységek megbízható felismerésére, megkülönböztetésére, ennek során az ellenséges élőerő pontos megsemmisítésére. Az is egyértelmű, hogy ilyen fegyverrendszert használni néhány AK-47-es gépkarabéllyal rendelkező irreguláris fegyveres harcképtelenné tételére, aligha költséghatékony megoldás. E a feladatra minden bizonnyal sokkal célszerűbb, és lényegesen olcsóbb is - például hyperstealth páncéllal és könnyű, „intelligens”, kis kaliberű lőszerekkel működő automata fegyverekkel felszerelt - különleges erők alkalmazása

A fejlesztés elérendő céljának meghatározása több fontos kérdés megválaszolását igényli. Közülük néhány fontosabb:

- számszerűsíthető-e, meghatározható-e az elérendő vagy kívánt hatást kiváltó eszköz fejlesztési célja kizárólagosan a pusztító képesség vagy a halálos áldozatok számát használva mérceként? Vagy éppen ellenkezőleg, a fegyver, fegyverrendszer képességeit kell úgy kialakítani, hogy elérjük, vagy működésképtelenné tegyük az ellenséges célpontokat, eszközöket miközben minimalizáljuk az emberi veszteségeket, illetve az eszközök végleges megsemmisítését?
- melyek azok a fejlesztési irányok, amelyek megakadályozhatják a kinetikus hadviselési módszerek alkalmazhatóságát, akár úgy, hogy megelőzve az ellenfelet megbénítják azon képességét, hogy katonai, vagy egyéb műveleteket folytasson?
- milyen szervezetek és szakemberek, hogyan fogják üzemeltetni ezeket az új fegyvereket, fegyverrendszereket? Hogyan lesznek képesek együttesen működtetni azokat a „régi", jelenleg is hadrendben tartott eszközparkkal?

Célszerű szem előtt tartani a hadviselés azon sajátosságát is, hogy a múlt, a megtörtént események hatása alapvetően meghatározza annak jövőbeli természetét, valamint azt is, hogy a régi rendszerek túlélőképessége sokszor jobb, mint ahogy azt a felületes szemlélő feltételezné.

A vizsgálódáshoz - nyilvános forrásokat felhasználva - listákról néhány olyan fegyvert, fegyverrendszert választottunk ki, amelyek többsége már a fejlesztés azon szakaszában van, hogy hamarosan, gyökeresen megváltoztathatja a jövőbeli hadviselés módját és formáját. A kiválasztás természeténél fogva hiányos, részben önkényes is, de mégis alkalmas lehet arra, hogy megmutassa azokat a, fegyverek fejlesztése területén lévő trendeket, felmerülő alkalmazási, szervezeti nehézségeket, amelyek valószínűleg befolyásolni, jellemezni fogják az elkövetkező évtizedeket, illetve hogy további gondolatokat is generáljon, mint például:

- hogyan változhatnak meg úgy a történések, hogy *a háború, már az első lövés eldörrenése előtt véget is érjen* [1][20][22]?
- megengedhető-e, hogy a „vegyes rendszerek" üzemeltetéséhez és üzembenntartásához szükséges tudás gyorsabban évüljön el, mint maguk a berendezések, rendszerek?

2. HADITECHNIKAI ÚJDONSÁGOK

2.1. Láthatatlansági köpeny?! (hyper stealth vagy quantum stealth technológia)

Manapság is őrült, futurisztikus dolognak tűnhet a láthatatlansági köpenyről szóló híradás, amelyről a meseíróknak köszönhetően mindenkinek van elképzelése, de a létezésében csak kevesen hisznek. A természetben előforduló alapanyagokat, ásványokat felhasználva, a tudósok régóta kutatnak olyan elemeket, amelyek nagymértékben csökkenthetik a célok hő- és vizuális detektálhatóságát. A Quantum Stealth technológiával készült eszközök - egyes híradások szerint - a látható fény és az infravörös frekvencia tartományban képesek erre. Az adott objektum körül hullámvezetők segítségével megtörik a fényt, így az álcázott objektumot nem, vagy csak nehezen észlelhető. A technológia - aminek részleteiről biztonsági okokból szinte semmit nem tudható - láthatatlanná teszi a felhasználót a látható, valamint az infravörös frekvenciatartományban működő, illetve a termikus érzékelők számára egyaránt.

Az ilyen irányú fejlesztések eredményei lehetővé tehetik a katonák számára (az általánosan kiképzettől a különleges erőkig), hogy ellenséges területen észrevétlenül hajtsanak végre feladatokat, vagy legalább is elég idő álljon a rendelkezésre, a kezdeményezés magukhoz ragadására. Ezek az eszközök csökkenthetik a sebesülések, sérülések kockázatát, miközben növelik a nagypontosságú, meglepetésszerű támadások, szabotázs és mesterlövész akciók végrehajtásának képességét a katonai műveletek során. Természetesen e technológia is komoly veszélyeket is rejthet, például, ha terrorista csoportok számára is elérhetővé válik [1][2][8][9][20].

2.2. Az elektromágneses (EM) ágyú

Ez az ágyú puskapor vagy üzemanyag helyett, 32 MJ elektromos energiát felhasználva, mágneses mező segítségével indítja a lövedékeket v_o=2000–2500 m/s kezdősebességgel – kísérletek eredményeként – akár 185 km távolságra. Az EM tüzérségi eszköz képessége számos előnyt nyújt támadó és védelmi műveletek során, úgy a precíziós csapások, mint a légvédelmi ellentevékenységek végrehajtásakor. Kedvező, hogy nem kell hagyományos lövedékek kilövéséhez szükséges robbanó és tűzveszélyes anyagokat alkalmazni, tárolni.

A jelenlegi tervek szerint a hatótávolságot ~370 km-re kívánják növelni, amelyhez 64 MJ energiára van szükség. Így, egy lövés az előzetes kutatások szerint mintegy 6 millió Amper áramerősséget igényel. Várhatóan még évek telnek el, amíg a kutatók megtalálják a módját, ekkora energia tárolására képes eszközök (kondenzátorok) létrehozásának, illetve az olyan az ágyú megépítéséhez szükséges alapanyagokat, technológiákat, amelyik nem esik darabokra minden egyes lövés után [1][3][20].

2.3. „Űrfegyverek” fejlesztése

A felettünk lévő világűrt - a nemzetközi megállapodások és szerződések ellenére - a jövő hadszínterévé tehetik azok a technológiai kutatások, fejlesztések, amelyek az űrfegyverkezés terén jelenleg is folynak. A lehetőségek legalább annyira határtalanok, mint amennyire szokatlanok, például a Holdra telepített rakétaindító-állomás és/vagy aszteroida elfogó rendszerekig (utóbbiak átirányíthatják az aszteroidákat egy földfelszíni célra).

A másik ilyen lehetőség az, hogy műholdakat, űrállomásokat szereljenek fel pl. nukleáris/nem nukleáris, elektromágneses impulzus (EMP), stb. fegyverekkel. Utóbbit a világűrből alkalmazva megbéníthatóak az ellenség katonai műveletei végzéséhez szükséges vezetési, irányítási rendszerek, megfigyelési, felderítő és titkosszolgálati berendezések, illetve elektromos hálózatok, műholdak, számítógépek, stb., a felhasználás mértékétől függően akár az egész ország teljes területén is, vagy annak csak egy részén. Egy hasonló elven működő „mesterlövész fegyver" akár véget is vethet a háborúnak már az első lövés eldörrenése előtt. A légkörben repülőgép platformokon, vagy földön telepített rakéta rendszereken keresztül (pl. ICBMs[1]) tüzelő elektromágneses impulzus fegyverek támadhatóak, elfoghatóak, vagy megelőző csapások mérhetők rájuk. Az orbitális pályán elhelyezett EMP fegyverek viszont, a legtöbb ország műveleti képességén (elérhetési hatótávolságán) kívül lennének, kivéve azokat, akik föld-világűr, vagy levegő-világűr úgynevezett „antisatellite” képességgel, vagy a kozmoszba telepített, felfegyverzett

[1] Intercontinental Ballistic Missile

mesterséges égitestekkel rendelkeznek. További előny, hogy a világűrből indított, – összeköttetéseket, vezetési-irányítási, információs, kommunikációs csatornákat, rendszereket megbénító – támadás sokkal rövidebb időt vesz igénybe, mint a megtámadott ország védelmi rendszerének a reakció ideje arra, hogy hatástalaníthassa az EMP fegyvert.

Egy, a még napjainkban sem elfeledett technológia, amely iránt az érdeklődés gyengült, de nem szűnt meg az évtizedek során, az ellenséges ballisztikus rakéták megsemmisítésének lehetősége, nagy energiájú, világűrbe telepített lézerekkel, lehetőleg az emelkedési fázisban[2]. Utóbbi előnye, hogy a legalacsonyabb repülési sebességű szakaszban történik a csapásmérés, így a sikeres megsemmisítés valószínűsége is nagyobb, ráadásul ez rendszerint még ellenséges terület felett történik. Ellentétben a jelenleg használt rakétavédelmi rendszerekkel – (pl. AEGIS), amelyet az ellenséges interkontinentális rakétaindító állomásaihoz a lehető legközelebb kell telepíteni – a világűrbe elhelyezett lézer platformok az ellenséges ország lég- és/vagy rakétavédelmi képességének magassági határain kívül állomásoztathatóak.

Feltételezhetően nőni fog a nagy hatótávolságú, (akár nukleáris!) ballisztikus rakéták és ezzel együttesen a világűrbe telepített lézer rakétaelfogó rendszerek birtoklására az igény. Ez együtt jár a költséges fejlesztési programjaik finanszírozásával, melynek eredményeként több ország, – köztük az úgynevezett „Rogue States” államok – is szert tehetnek a hozzáférés lehetőségére

Nyilvánvaló, hogy nem minden szcenarió valósítható meg a jelenlegi technológiai szinten, de már most prognosztizálható, hogy a világűr, mint hadszíntér jelen van a köztudatban, illetve hatással van a hadtudomány alakulására. [1][4][7][20].

2.4. Hiperszonikus cirkáló rakéták és a „prompt global strike” (azonnali globális csapás)

Amióta háborúkat vívnak egymással, természetes kívánalomként jelenik meg a bárhol és bármely időben végrehajtható, minél gyorsabb csapásmérés képességének birtoklása. A modern kori hadviselésre rendkívüli hatással volt a cirkáló rakéták megjelenése, mivel alkalmasak robbanófejeket nagy távolságra, pontosan célba juttatni. Ugyanakkor, amikor korunkban egy percnyi különbség is dönthet vereség és győzelem között, a cirkáló rakéták is túl lassúnak bizonyulhatnak. (Például, 80 percbe telt, hogy az Arab-tengeren lévő amerikai hadihajóról indított, földi célok elleni cirkáló rakéták (LACM[3]) elérjék az afganisztáni Al Qaeda kiképző táborokat. 1998-ban, a kenyai és tanzániai amerikai nagykövetségek elleni terrortámadásokat követően, a Mach 5-nél gyorsabban repülő, hiperszonikus rakétákkal, ugyan erre a támadásra már mindössze 12 perc alatt képesek lettek volna.)

[2] „boost-phase intercept” vagy BPI phase

[3] LACM - Land-Attack Cruise Missiles



1. ábra Boeing X-51A Waverider [25]

Ezen elvárás megvalósítására indult el 2001-ben a „prompt global strike" (azonnali globális csapás) program, amelyben az X-51A hiperszonikus cirkáló jármű (HCV[4]) fejlesztésére (1. ábra). Egyes híradások szerint, az USA haditengerészete állítólag egy tengeralattjáróról indítható, hiperszonikus rakétával kapcsolatos kutatásokat is folytat. Emellett Oroszország, Kína és India is tett lépéseket a hiperszonikus technológia fejlesztésére.

A világméretű fegyverkezési verseny folyamán megvalósuló „globális csapás" több célt is szolgálhat: az állami és a katonai vezetés-irányítási rendszerei, illetve egyéb nagy értékű célok elleni támadástól, a nagy pontosságú, mobil terrorista csoportok megsemmisítéséig, stb., de a felsorolás számos további elemmel is bővíthető. [5][6][20][23][25].

2.5. Pilóta nélküli járművek

Ahogy a technológia fejlődik, a pilóta nélküli légijárművek (UAV) - vagy újabban elterjedt nevükön drónok - gyorsan teret nyernek mindennapjainkban, átvéve többek között az olyan feladatok elvégzését is, amelyek az emberekre túlzottan kockázatosak. Az UAV-k szerepe egyre jelentősebb a légi, földi, illetve a tengeri műveletekben is. A drónok, a bombákat hatástalanító robotoktól a mini tengeralattjáróig, a hajófedélzetről indítható felderítő helikopterektől a nagy magasságban tevékenykedő precíziós támadásokat végrehajtó légi eszközökig a legtöbb esetben a feladatuk végrehajtása, illetve az arra történő felkészítésük során igénylik az emberi beavatkozást (szakemberek tevékenységét). A tudósok szerint rövidesen, - de talán még nem a közeli jövőben - a mesterséges intelligencia fejlettsége eljut arra a szintre, hogy az ember által létrehozott, megépített berendezések olyan, az alkotójától független döntéseket hozhatnak, amelyek kihatással lehetnek életre és halálra (információs szingularitás[5]!). Ez, perspektivikusan

[4] HCV - Hypersonic Cruise Vehicle

[5] Részletesen ld. Ray Kurzweil: A szingularitás küszöbén, Amikor az emberiség meghaladja a biológiát, AD ASTRA KIADÓ, 2013. pp. 1-867. ISBN 978-615-5229-25-1

is elengedhetetlenné teszi, hogy a harcfeladat teljesítése során végig megmaradjon az emberi felügyelet, benne az irányítás prioritása az UAV felett. [1][20].

2.6. A jövő harcászati repülőgépei a jelenben

Az ötödik generációs repülőgépek megjelenése jelentős áttörést eredményezett a katonai repülőgépek fejlesztési folyamatában, ami - döntően tetemes költségkihatásai miatt - rendkívül lassan haladt nyugaton és keleten egyaránt. Ezért létrehoztak egy úgynevezett (4+) generációt. Ezek, a meglévő 4. generációs vadászrepülőgépek olyan modernizált modifikációi, melyek már rendelkeznek egyes, az 5. generációsokra jellemző harcászati-műszaki tulajdonság(ok)kal. (Ilyenek pl. a JAS 39 NG Gripen, az Eurofighter Typhoon, a Rafale, a Szu–34 és a J–10, valamint az F–16 AM/BM/E/F/I, az F/A-18E/F Super Hornet és FA–18G Growler, a korszerűsített F–15C/D/E-k és az F–15I/K/SG-k.

Az előző generációkkal szemben támasztott követelmények mellet továbbiak jelentek meg, alapvetően az extrém manőverező képesség és az alacsony észlelhetőség [11][15][21].

A jelenleg legmodernebb, szolgálatban álló vadászrepülőgép, az amerikai F-22A Raptor mellett fokozatosan megjelent az új generáció többi tagja is: a Lockheed-Martin F-35 Lighting II., a Szuhoj PAK-FA (T-50), illetve a kínai Chengdu J-20-as és a Japán Mitsubishi ATD-X.

Az ötödik generációs repülőgépek főbb jellemzői:

- alacsony észlelhetőség a rádiólokációs és infravörös tartományokban;
- a törzsbe süllyesztett fegyvertérben elhelyezett intelligens bombák és rakéták (a sisakba épített célzórendszerek melyek a pilóta fej- és szemmozgását követve működtethetőek);
- szupercirkáló üzemmód[6];
- némileg javított manőverező képesség hangsebesség feletti repüléskor;
- multifunkcionalitás (alkalmasság légiharcra, szárazföldi csapatok támogatására és felderítésre, valamint légi, földi és tengeri célpontok megsemmisítésére);
- a körkörös látást és érzékelést lehetővé tevő különleges optikai és elektronikai érzékelők.

A repülőgépek sárkányszerkezete részben kompozit anyagokból készül, rendkívüli teherviselő képességgel rendelkezik, és hajtómű(vek) vektorálható tolóereje, szuper manőverező képes-séget[7] biztosít a repülés minden fázisában. Valamennyi fedélzeti rendszer működését nagy-teljesítményű számítógépekből álló informatikai rendszer irányítja, felügyeli [12][13][21].

Az eltérő alkalmazási koncepciók eltérő konstrukciós filozófiákhoz vezetnek. Az orosz ötödik generációs vadászrepülőgépeknél egyik legfontosabb konstrukciós követelmény a manőverező képesség és lehetőleg a fegyverek célzó és működőképességének fenntartása un. határ-üzemmódokat[8] meghaladó repülési helyzetben is. Az USA vadászrepülőgépeinél - repülésbiztonsági megfontolásból - rendszerint a fedélzeti repülésirányító rendszer mesterségesen korlátozza a

[6] A repülőgép képese hajtóműveik utánégető működtetése nélkül is folyamatos hangsebesség feletti repülésre.

[7] A hajtóművekből kiáramló gázsugár irányának elfordításával, - rendszerint együttműködve a statikusan instabil repülőgép aerodinamikai elven működő külső kormányszerveivel - rendkívül intenzív térbeli helyzet és/vagy mozgásállapot változtatásra képesek, határ üzemmódokat meghaladó repülési helyzetekben is megőrizve az irányíthatóságot.

[8] a hagyományos, stabil repülőgép kormányozhatóságának és/vagy levegőben maradásának határhelyzetei.

kritikus repülési üzemmódra történő kijutás lehetőségét. (Az eltérő követelményrendszer oka alapvetően a két nagyhatalom stratégáinak, a korszerű vadászrepülőgépek közel-légiharcáról alkotott, alapvetően különböző nézeteiben keresendő!) [12][21].



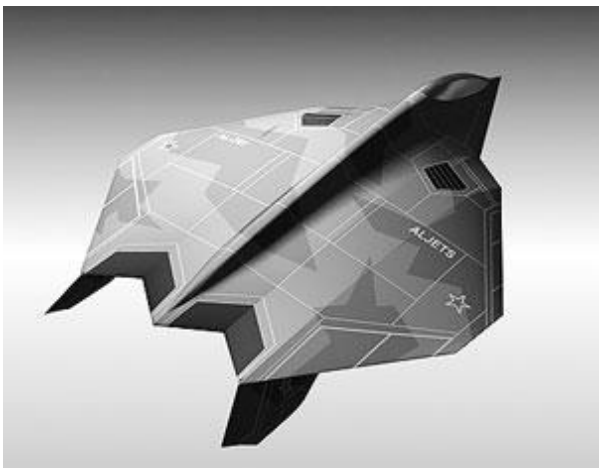
2. ábra F-22 Raptor [26]; F-35A Lightning II [27]; Szuhoj PAK-FA [28];
Chengdu J-20 [29]; ATD-X (Shinshin) [30]

Az USA visszalépése a szuper manőverezhetőség fejlesztése terén, a repülőgép-fegyverzet gyors fejlődésének köszönhető (sisakra szerelt célmegjelölő és új önirányító rakéta rendszerek, amelyeknek már nincs szükségük a cél mögé kerüléséhez). Azt feltételezik, hogy ezek alkalmazásával a légi összecsapások döntően közepes és nagy távolságokon történnek, így intenzív manőverezést igénylő közel-légiharcra is csak elvétve lehet szükség. Az alacsony radar észlelhetőség is segíti az ellenséges célt "elsőnek meglátni, elsőként tüzelni" elv megvalósítását, ami szintén hozzájárul a szupermanőverező képesség konstrukciós visszafogásához.

Az amerikai monopólium fokozatos megszűnése az ötödik generációs vadászrepülőgép létrehozásában rámutatott arra, hogy fontos a „szuper irányíthatóság”. (Például: ha két lopakodó repülőgép találkozik, – feltételezve hogy mindkettő radarja hasonló teljesítményű – akkor e repülőgépek harci taktikája visszatér a korábbi generációknál alkalmazottakhoz) [12][21].

Míg az USA tökélyre akarta fejleszteni láthatatlanságot, addig az oroszok kevésbé foglalkoznak azzal, hogy a repülőgép hátulról mennyire észlelhető, a hajtóműveket nem rejtették el. Ezzel, és a szárny kialakításával viszont jobb manőverező képességet és nagyobb repülési sebességet értek el. A kínai konstrukció is hasonló koncepciót követ, melynél különösen szembetűnő a hajtóművek kiképzése. A J-20-asról a közelmúltban kezdtek képek kiszivárogni, amikor is megkezdődtek a gurulási és repülési tesztek. A repülőgép az elvárásoknak megfelelő formai kialakítást kapta, radar sugarakat elnyelő felülettel, rejtett fegyverzettel [10][21].

Érzékelhetően az ötödik generációs repülőgépek fejlesztését viszonylag jól meghatározható követelményrendszer szerint történik, viszont a hatodik generációs repülőeszközök tekintetében még a kritériumok nem egységesek, a követelmények kidolgozása a kezdeti stádiumban van. Az egyértelműen látszik, hogy e konstrukciók létrehozása során támaszkodnak az előző generációk során elért eredményekre. Az USA-ban önállóan (3. ábra) és Franciaországgal közösen, de Japánban és Oroszország is megkezdődtek már e projektek érdemi előmunkálatai.



3. ábra Egy hatodik generációs repülőgép koncepció látványterve [19]

Vélhetően, ez a repülőgép már pilóta nélküli lesz és a fegyverrendszeréhez - többek között - az elektromágneses ágyú és/vagy lézerfegyver is tartozik, repülési sebessége meghaladhatja az ötödik generációsokét. A nyugati projekteknél is kevesebbet lehet tudni, a kínai fegyveres erők, a hatodik generációs repülőgépgép-fejlesztési irányáról [16][17][21]. A sériagyártású, hiperszonikus sebességű, lézer és/vagy EMP fegyverzetet hordozó repülőeszközök tömeges megjelenésére valószínűsíthetően azért még várni kell néhány évtizedet. [18][19][21][23]

3. A TUDÁS ALKALMAZÁSA, FEJLESZTÉSE

Korunk technológiai fejlődési üteme sohasem látott méreteket öltött, és egyre gyorsul. Figyelembe véve azonban a jelenleg is használt rendszereink amortizációját az tapasztalható, hogy a műszaki fejlődés különböző szintjét képviselő – benne a gyakorlatban már inkább csak eszmei értékkel bíró, illetve esetenként a legkorszerűbb – eszközöket és rendszereket kell együttesen, összehangoltan működtetni. Az ilyen „sokgenerációs” rendszerek üzemeltetéséhez szükséges tudás megalkotása, fenntartása, fejlesztése azonban a jelen anyagi feltételek mellett is elengedhetetlenül szükséges, a kitűzött célok elérése érdekében.

Amennyiben a működtetett rendszer szempontjából vizsgáljuk a helyzetet, úgy vagy az eszközök és a tudás folyamatos, sőt egyre gyorsuló megújulását kell biztosítani, vagy a régi, régebbi és még régebbi berendezések üzemeltetését külön erőfeszítésekkel és ráfordításokkal szükséges fenntartani. Együttes használatuk az új és újabb eszközökkel hatványozottan ráfordítást igényel. Nem csupán a szerkezetek avulnak el, alkatrészeik válnak egyre nehezebben pótolhatóvá, helyettesíthetővé, de azok a vezetési-irányítási, hálózatszervezési, működtetési stb. elvek és módszerek is, amelyekbe valaha illeszkedtek. Korábban - részben-egészben - más környezetben, más problémákat, más feladat-végrehajtási rendben oldottak meg a felhasználóik, mint amilyenekkel ma szembesülnek. Kellemetlen illeszkedési zavarokat okoz, amennyiben a hozzá képest túl régi, vagy túl modern (esetleg csak más!) technológiákat, tudásokat, gyakorlatokat, szabályokat stb. kell összhangba hozni.

A komoly elméleti és gyakorlati felkészítést igénylő rendszerek vegyes, akár nemzetközi környezetben való üzemeltetése csak olyan megfelelően sokoldalúvá képzett, – vagyis a régi és az új ismeretekkel és rugalmas, megoldáskereső beállítottsággal egyaránt rendelkező – gyakorlott szakember-gárda segítségével valósulhat meg, amelynek kialakítása és felkészítése roppant költséges, ugyanakkor eredményességük az üzemeltetett eszközök és eszközrendszerek képességei, valamint a felhasználási körülmények (pl. intézményi szabályok és más korlátok)- által erősen behatárolt.

A centralizált szervezetek természetszerűleg hajlamosak arra, hogy a szervezeti tudásgondozást, mint felesleges, sőt káros, magával a centralizáció elvével szemben menő tevékenységet elhanyagolják. Ezáltal, mellesleg tönkreteszik a szervezeti innováció, a belső motiváltság-építés, a munkahelyi szakmai és személyiségfejlődés, sőt a szervezetfejlődés és megújulás legfontosabb építőelemeit is. Az elhanyagolt, nem fejlesztett tudás, képesség hamar elveszti relevanciáját, alkalmazhatóságát, túlhalad rajta a világ. Ezt a hajlamot leküzdendő külön, vezetői tudatosságra, figyelemre és erőfeszítésre van szükség.

A szervezeti tudás tudatos és célirányos menedzselésének egyik legfontosabb jellemzője a naprakészség és „jövőlátás", ami bizonyos agilitást és rugalmasságot is megkövetel a részt-vevőktől. Az eredményességet segítő személyiségjellemzők (elemzőképesség, kreativitás, intuitivitás, kapcsolatépítő készségek, gyakorlatiasság stb.) megléte természetszerűleg segítik az egyént és a szervezetet a tudás megszerzésében, átadásában és alkalmazásában, ugyan-akkor tanulhatóak, fejleszthetőek (tanulandók, fejlesztendők) is. A szervezeti tudásmenedzsment-rendszerek kialakításának és fejlesztésének tehát a megfelelő képességfejlesztő szimulációs tréningek és egyéb (főleg belső, munkahelyi) képzések is szerves részei lesznek, akár a szervezeti mentoring-tevékenység kiegészítéseként, akár annak kialakításához és fejlesztéséhez hozzájáruló folyamatként.

A jelenleg elvárható biztos és aktuális tudással is tulajdonképpen már rendelkező szervezetek (megfelelő szakmai segítséggel és vezetői támogatás mellett) képesek lehetnek felmérni a saját jövőbeli teljesítményükre vonatkozó hatásokat. A szervezet által elvárt kompetenciákhoz rendelt szakmai, tárgyi ismeretek (explicit tudás), a problémamegoldó képességek és a tapasztalatból szerzett intuíciók, sejtések és érzések (implicit vagy tacit tudás) megtartása, fejlesztése alapvető szervezeti érdek.

Új tudás leginkább különböző ismeretek kölcsönhatásából keletkezik, létrehozása szempontjából tehát igen fontos, hogy a folyamatban résztvevők csoportja milyen összetételű. A dinamikusan változó környezet esetén a biztonság látszatát kelthetik az időben és térben közelebbi esetleg távolabbi,

más környezetben működő tapasztalatok kritikátlan átvétele, amelyek a szervezet túlélési esélyeit alapvetően megkérdőjelezhetik. A kényes egyensúly megtalálása a régi és új ismeretek alkalmazásakor a túlélés alapfeltétele, de a stratégiai szemlélet fontossága aligha kérdőjelezhető meg. A szervezet jövőjével kapcsolatosan elmondható, hogy erősen behatárolt a múltbeli képességei által, ami viszont nem azt jelenti, hogy minden esetben el kell vetni (vagy akár hogy el kell fogadni) a múltat, sokkal inkább azt foglalja magába, hogy folyamatosan újra kell értékelni. A szervezet és az adott szakma jövője szempontjából a régi rutinok, beidegződések elvetése legalább olyan fontos eleme a fejlődésnek, mint a (változást nem gátló) hagyományok ápolása vagy az új tudás megszerzése. Ennek a hatását, a rendszer (környezet-hajtotta, ezért csak nehezen kikövetkeztethető) mozgásából és komplexitásából fakadó bizonytalansággal járó veszélyeket csökkenthetik azok a formális és informális intézmények, amelyeket a közös szokások, rutinok, bevett, de folyamatosan újraalakuló és frissülő gyakorlatok, szabályok és törvények alakítanak ki, és amelyek meghatározzák az egyének, szervezetrészek, szervezetek kapcsolatát, működését.

A tudás (a tacit tudást is beleértve), a tapasztalatra és gyakorlottságra építkezve, erősen kötődik ahhoz a közösséghez, egyénhez, amely létrehozta, így a szervezetfejlesztési tevékenységünk során rájuk javasolt koncentrálni, mert ők biztosíthatják a megfelelő alapot az új létrehozásához, a megrendelői elvárások és a környezeti követelmények teljesítéséhez. Ez az alkalmazkodási folyamat magába foglalja a meglévő képességek, technológiák, elvek, működési folyamatok jobb kiaknázását vagy kibontakoztatását, szabványosítását, fejlesztését, átalakítását és megváltoztatását, újrarendezését, illetve az új alternatívákkal való kísérletezést is [22][24].

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A társadalom, a széleskörűen értelmezett biztonsági környezet, jelene és valószínűsített jövőbeli változásai is alapvető szerepet játszanak az új ismeretek azonosításában és beépítésében. A jelen fejlesztéseinek néhány példáját kiragadva igyekeztünk bemutatni, hogy az eddig csak a sci-fi irodalomban olvasható történetek ugyanúgy valósággá válhatnak, mint ahogy évszázadokkal korábbi elődeink fantáziájában is megjelent például a repülés, ami ma már mindenki számára természetessé teszi, hogy a légtér nem csak a madaraké.

Természetesen a fejlesztés alatt álló eszközök, mint például robotok az emberi értékek szerint nem értelmes, érző lények, de a – pl. Moore-törvény[9] szerint – fejlődő számítástechnikai teljesítményük olyan lehetőségeket biztosíthat, amelyek a helyzet, szituáció előrejelző és felismerő, illetve alkalmazkodó és döntéshozó képességeiket is jelentősen megnövelhetik. Hovatovább, a harci szerepköreiket kiterjesztve, a robotok felruházhatóak élet-halál feletti döntések meghozatalának lehetőségével, helyettesítve, egyben óvva a saját kiképzett katonákat, mentesítve őket az ilyen elhatározás dilemmái okozta pszichológiai terhektől is. Ugyanakkor nem hagyhatóak figyelmen kívül azok az egyelőre megoldatlan biztonsági, etikai és morális felvetések[10] sem, amelyek az alkotó ember fel-

[9] **Moore-törvénye** az a tapasztalati megfigyelés, mely szerint a technológiai fejlődésben az integrált áramkörök összetettsége – a legalacsonyabb árú ilyen komponenst figyelembe véve – körülbelül 18 hónaponként megduplázódik, (https://hu.wikipedia.org/wiki/Moore-t%C3%B6rv%C3%A9ny)

[10] Részletesen ld. 7. lábjegyzetben utalt szakirodalom!

ügyelete alól esetlegesen kicsúszó, – önfejlesztő képességük okán akár öntörvényűvé váló, szélsőséges esetben az ember(iség) ellen forduló – robotok/kiborgok nehezen prognosztizálható tevékenységében rejlő, potenciális veszélyekre hívják fel a figyelmet.

A néhány kiragadott példából is látható, hogy a mérnöki találékonyság és tudás mire lehet képes a jövőben is. Olyan lehetőségeket és képességeket adnak az erre hivatottak kezébe, amellyel jól átgondolt és felelősségteljes döntéseket csak azok tudnak hozni, akik előtt a jövő nem csak egy jelenlegi probléma kezelésének a helye, hanem a tudásuk fejlesztésének lehetőségét is magába foglaló felelősség.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] J. MICHAEL COLE: Five Futuristic Weapons That Could Change Warfare. (online) url: http://nationalinterest.org/commentary/five-futuristic-weapons-could-change-warfare-9866 (2015.04.22.)

[2] GUY CRAMER: Quantum Stealth; The Invisible Military Becomes A Reality. (online) url: http://www.hyperstealth.com/Quantum-Stealth/ (2015.04.22.)

[3] Naval Air Warfare and Weapons Department. Electromagnetic Railgun. (online) url: http://www.onr.navy.mil/~/media/Files/Fact-Sheets/35/Electromagnetic%20Rail-gun_Dec%2029%202014.ashx (2015.04.25.)

[4] Weapons for Space War. (online) url: http://www.space.com/19-top-10-space-weapons.html (2015.04.25.)

[5] AMY F. WOOLF: Conventional Prompt Global Strike and Long-Range Ballistic Missiles: Background and Issues. (online) url: https://fas.org/sgp/crs/nuke/R41464.pdf (2015.04.25.)

[6] NOAH SHACHTMAN: Hypersonic Cruise Missile: America's New Global Strike Weapon (online) url: http://www.popularmechanics.com/military/a1101/4203874/ (2015.04.27.)

[7] ANDREI AKULOV: Prompt Global Strike: Another Stride to Ambitious Incarnation (online) url: http://m.strategic-culture.org/news/2014/02/13/prompt-global-strike-another-stride-ambitious-incarnation.html (2015.04.27.)

[8] GEOFFREY INGERSOLL, ROBERT JOHNSON: New Camouflage Technology Could Make US Troops Invisible. (online) url: http://www.businessinsider.com/cnn-new-camoflague-technology-makes-troops-invisible-2012-12#ixzz3fPOfYsyJhttp://www.businessinsider.com/cnn-new-camoflague-technology-makes-troops-invisible-2012-12 (2015.04.29.)

[9] BRIDGETTE MEINHOLD: Texas Researchers Design World's First Battery-Powered Invisibility Cloak (online) url: http://www.ecouterre.com/texas-researchers-design-worlds-first-battery-powered-invisibility-cloak/ (2015.04.29.)

[10] TEMESVÁRI PÉTER: Ezek a repülők döntik el a jövő háborúit. (online) url: http://www.origo.hu/techbazis/internet/20130412-ezek-a-harci-repulok-fogjak-eldonteni-a-jovo-haboruit.html (2015.04.29.)

[11] WIKIPEDIA THE FREE ENCYCLOPEDIA: Negyedik generációs vadászrepülőgép. (online) url: https://hu.wikipedia.org/wiki/Negyedik_gener%C3%A1ci%C3%B3s_vad%C3%A1szrep%C3%BCl%C5%91g%C3%A9p (2015.03.15.)

[12] WIKIPEDIA THE FREE ENCYCLOPEDIA: Истребитель пятого поколения. (online) url: https://ru.wikipedia.org/wiki/Истребитель_пятого_поколения (2015.05.14)

[13] Истребитель 5 поколения. (online) url: http://vpk.name/library/5-e_porolenie.html (2015.06.22)

[14] J-20 «первого этапа» способен стать «убийцей авианосцев» и поступить на вооружение. (online) url: http://vpk.name/news/129886_j20_pervogo_etapa_sposoben_stat_ubiicei_avianoscev_i_postupit_na_vooruzhenie.html (2015.04.29)

[15] GYÁRTÓ ISTVÁN: Kína titokban kifejlesztette az 5. generációs vadászgépét. (online) url: http://jovonk.info/2011/01/05/kina-titokban-kifejlesztette-az-5-generacios-vadaszgepet (2015.04.29)

[16] СЕРГЕЙ ТАБАРИНЦЕВ-РОМАНОВ: Истребитель шестого поколения в России создадут по советским заделам. (online) url: http://www.nakanune.ru/articles/19565/ (2015.04.29)

[17] VASZILIJ KASIN: Kína és a hatodik generációs vadászgép (online) url: http://hungarian.ruvr.ru/2012_12_31/Kna-es-a-hatodik-generacios-vadaszgep/ (2015.04.29)

[18] Какими будут истребители шестого поколения. http://news.rambler.ru/29016089/ (2015.06.24)

[19] ГЕННАДИЙ НЕЧАЕВ: Какими будут истребители шестого поколения (online) url: http://www.vz.ru/society/2015/2/4/727673.html (2015.05.15)
[20] BÉKÉSI BERTOLD, SZEGEDI PÉTER: Gondolatok a jövőbeni fegyverek alkalmazási lehetőségeiről. XIV. Természet-, Műszaki- és Gazdaságtudományok Alkalmazása Nemzetközi Konferencia. Szombathely, 2015.05.16., Nyugat-magyarországi Egyetem, 2015. 183-188. oldal (ISBN: 978 963 359 053 9)
[21] BÉKÉSI BERTOLD, SZEGEDI PÉTER: Trendek a vadászrepülőgépek legújabb generációinak fejlesztésére alkalmazására. XIV. Természet-, Műszaki- és Gazdaságtudományok Alkalmazása Nemzetközi Konferencia. Szombathely, 2015.05.16., Nyugat-magyarországi Egyetem, 2015. 151-162. oldal (ISBN: 978 963 359 053 9)
[22] Dr. KORONVÁRY PÉTER Dr. SZEGEDI PÉTER: Tudásalkalmazás és tudásgondozás, Budapest Hadmérnök, 2015. 4. szám 217-226. oldal, (ISSN 1788-1919)
[23] Dr. BÉKÉSI BERTOLD, Dr. SZEGEDI PÉTER: Napjaink fegyverrendszer fejlesztési trendjei. Economica (Szolnok) 2015. 4/2. szám 158-168. oldal (ISSN: 1585-6216)
[24] Dr. BÉKÉSI BERTOLD, Dr. SZEGEDI PÉTER: Napjaink fegyverrendszer fejlesztési trendjei. IX. Alföldi Tudományos Tájgazdálkodási Napok, Szolnoki Főiskola, 2015. noveber 10. (előadva)
[25] TOMKA JÁNOS: A megosztott tudás hatalom. Harmat Kiadó, Budapest, 2009.
[26] LINDSEY CALDWELL: U.S. Air Force to develop new hypersonic jet. (online) url: http://www.slashgear.com/u-s-air-force-to-develop-new-hypersonic-jet-02386437/ (2015.06.24)
[27] TYLER ROGOWAY: The F-22 Raptor Bloodies Its Talons In First Attack Over Syria. (online) url: http://foxtrotalpha.jalopnik.com/the-f-22-raptor-finally-bloodies-its-talons-in-attack-o-1637984159 (2015.11.23)
[28] F-35 Lightning II Joint Strike Fighter. (online) url: http://www.copybook.com/military/fact-files/f_35_lightning_joint_strike_fighter (2015.11.23)
[29] DAVE MAJUMDAR: The Russian Air Force's Super Weapon: Beware the PAK-FA Stealth Fighter (online) url: http://nationalinterest.org/feature/the-russian-air-forces-super-weapon-beware-the-pak-fa-11742 (2015.11.23)
[30] JEFFREY LIN, P. W. SINGER: 6th J-20 Stealth Fighter rolls out, more to soon follow - China on track to operate asia's first stealth fighters. (online) url: http://www.popsci.com/6th-j-20-stealth-fighter-rolls-out-more-soon-follow (2015.11.23)
[31] DEFENCE BLOG: New Photo of Japanese ATD-X Shinshin stealth fighter aircraft (online) url: http://defence-blog.com/news/new-photo-of-japanese-atd-x-shinshin-stealth-fighter-aircraft.html (2015.11.23)

DEVELOPING WEAPON SYSTEMS IN FUTURE THEATRES OF WAR WITH RESPECT TO KNOWLEDGE APPLICATION AND DEVELOPMENT

Nowadays, defence industry and the development of new technologies intertwine. Recently, weapons and weapon systems are being tested that, little before, only science-fiction fans could believe to be possible and it was but a few professional insiders, mainly developers, who were encouraged to have anything like this on their design desks. Today, the development of the defense industry is synonymous with that of new technologies from which societies benefit in at least two ways: (1) they improve social and national safety and security, and (2) provide new tools for everyday use. Careful choice of the right combination of gadgets, techniques, methods, methodologies, skills etc. – the explicit and tacit knowledge to be collected, used and developed in our institutions – is a managerial decision of concern. The article aims to introduce readers to some features of the evolving change being presently experienced in modern warfare through some examples of the up-to-date weapons, weapon systems and technologies, and let them have a glance also at their possible forms of use in the close future.

Keywords: military innovations, weapon systems, military research, knowledge management, development

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_3/2015-3-08-0223_Bekesi_B-Szegedi_P.pdf

Pásztor Endre, Beneda Károly Tamás

A TKT-1 KISMÉRETŰ, OKTATÁSI ÉS KUTATÁSI CÉLÚ GÁZTURBINÁS SUGÁRHAJTÓMŰ ELSŐ TÍZ ÉVE

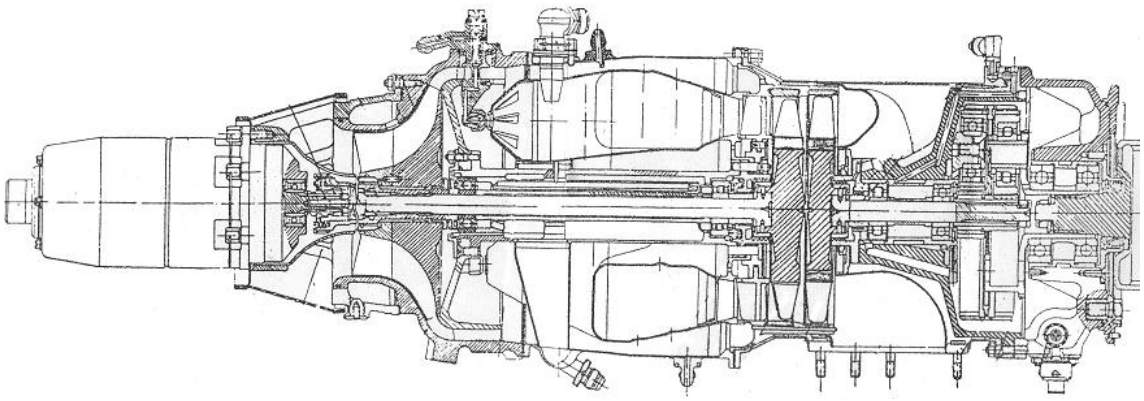
2005-ben a BME akkori Repülőgépek és Hajók Tanszékén egy nagyszabású fejlesztői munka vette kezdetét, melynek célja egy kisméretű, oktatási és kutatási célra egyaránt használható sugárhajtómű létrehozása volt. Az előzetes vizsgálatok és építés bő két évet vett igénybe, mire megvalósult a próbapad, és az első üzemi próbák kezdetüket vehették. Azóta számos tekintetben bővült, fejlődött a berendezés, a hallgatók bevonása mind tanórák, mind pedig szakdolgozatok, diplomatervek kapcsán folyamatos, ezáltal is lehetővé téve a repülőgép-hajtóművek terén szerzett gyakorlati tudást számukra. Jelen cikk célja, hogy bemutassa az átalakítás folyamatát, a használat eredményeit az elmúlt tíz év tükrében.

Kulcsszavak: *gázturbinás sugárhajtómű, gázturbinás próbapad, teljes hatáskörű digitális elektronikus szabályozás, változtatható keresztmetszetű fúvócső, mérő-adatgyűjtő rendszer*

BEVEZETÉS

Két – egy pályáját elhagyni készülő és egy pályakezdő – oktató elhatározta, hogy épít, illetve átalakít egy korszerű, kisméretű sugárhajtóművet, repülőgép indító gázturbinából, oktatási és kutatási feladatok ellátására.

A sugárhajtóművet egy TSz-21 típusú indító gázturbinából alakították ki, mely eredetileg a MiG-23 és Szu-22 harci repülőgépekben teljesített szolgálatot a Magyar Honvédség kötelékében. A munkálatokat a Közlekedés- és Gépészmérnöki Karok rokon tanszékeinek körében élénk érdeklődés és segíteni akarás kísérte.



1. ábra A TSz-21 indító gázturbina hosszmetszeti képe [18]

A munkának mindvégig motorja volt és maradt laboratóriumunk technikusa, aki rendkívüli szakmai tudással, találékonysággal és lelkesedéssel segítette és ténylegesen végezte ezen fejlesztéssel kapcsolatos szerteágazó tevékenységét. Munkájának színvonalára való hivatkozásul megemlítjük, hogy ő kezdeményezte és hozta létre a hajtómű változtatható kiömlő keresztmetszetű fúvócsövét, amely azóta is kifogástalanul működik.

Néha felbukkant, elsősorban saját tanszékünk részéről halvány, szkeptikus vélekedés is, amelynek lényege az volt, dicsérendő ez a törekvés, de a tanszéknek nem hoz anyagi hasznot. Megjegyezzük, hogy a munka a nagy takarékoskodás időszakában, a nadrágszíj meghúzás jegyében kezdődött. Válaszunk az volt, hogy ezt a kísérleti sugárhajtóművet az oktató és kutató munka színvonalának növelése céljából készítjük, és nem az azonnali és közvetlen anyagi haszon érdekében.

A Tanszéken emellett számos más repülőműszaki témájú kutatás-fejlesztés is folyik, melyeknek részeredményei azonban kölcsönösen alkalmazhatóak az eltérő rendeltetésű célokra is. Kiemelendő ezek közül a tanszéki laborberendezések mérő- és adatgyűjtő rendszerének korszerűsítése kapcsán végzett fejlesztő munkát [15], valamint a Controller Area Network (CAN) elektronikus kommunikációs busszal kapcsolatos kísérletek, mely a TKT-1 szabályozórendszerében is jelentős szerepet kapott [11], illetve az a számos munka, melyek a kisméretű gázturbinás hajtóművek alkalmazási lehetőségeiről szólnak, pl. [19].

A KÍSÉRLETI GÁZTURBINÁS SUGÁRHAJTÓMŰ KIALAKÍTÁSA

Az építés kezdeti szakasza

Az átalakítandó, eredeti, működőképes indító gázturbinát (lásd 1. ábra) a Légierő bocsátotta rendelkezésünkre két példányban, könyvjóváírással, térítés nélkül. Ezért az önzetlen segítségért ezúton is köszönetet mondunk. A végül átalakításra került példány (gyári száma 0302301134) egyébként a 01-es oldalszámú MiG-23MF vadászrepülőgépben teljesített szolgálatot, mígnem 1994. december 5-én kiszerelték és konzerválták, mert a jegyzőkönyv tanúsága szerint „bizonytalanul indít”.

A Szolnoki Repülőtiszti Főiskolán tárolt selejtítendő műszaki alkatrészek közül jó néhány, még használható berendezést válogattunk ki. Az SzRTF-nek, ill. jogutódjainak nyújtott segítségéért is köszönetet mondunk.

Az elkészült sugárhajtómű üzemeltetéséhez tüzelő- és kenőanyag is szükséges volt, méghozzá nem elhanyagolható mennyiségben. Ezt a kecskeméti Központi Légijármű Javítóüzem bizonyos technológiai folyamatoknál leeresztésre kerülő, tiszta, de már tényleges üzemben, repülőgépben fel nem használható maradékokból biztosította rendelkezésünkre. Köszönet érte.
A fejlesztési, átalakítási munka nehezen szétválaszthatóan, de alapjában három síkon folyt. Termikus-áramlástechnikai és szilárdsági ellenőrző számítások, az átalakítás tervezése és tényleges kivitelezése, vizsgálatok, szakmai-tudományos kísérletek.

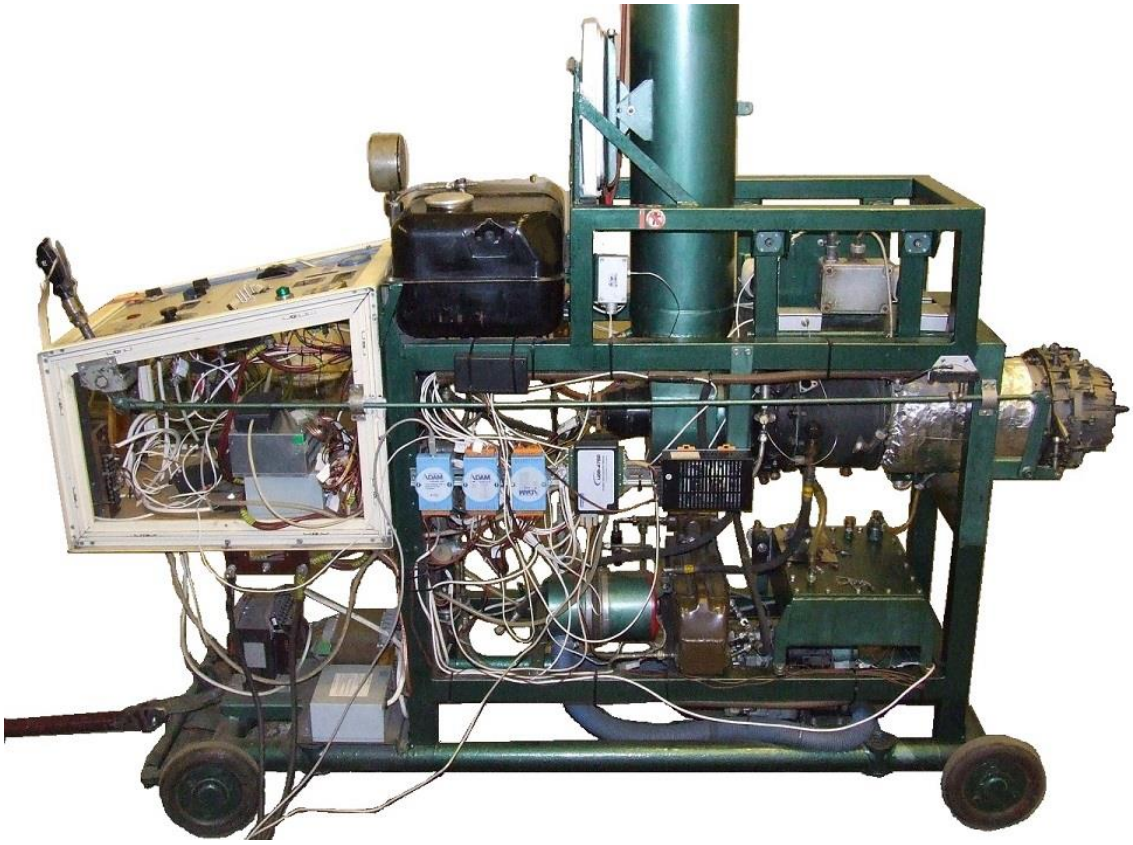
Az első fázis témája az átalakítandó hajtómű üzemi viszonyainak vizsgálata, ellenőrző számításai, a hajtómű tulajdonságainak megismerése és várható teljesítményeinek meghatározása volt. E munkálatok TDK dolgozat keretében kezdődtek [4], majd egyre inkább kibővültek, s eredményeikről különböző bel- és külföldi konferenciákon számoltunk be [5]. E témából számos diplomaterv is készült (lásd később), melyek az átalakítás és a hajtómű ellenőrző számításainak egy-egy fontos mozzanatát dolgozták fel. Ezek a diplomatervek egyrészt a hallgatók munkájának színvonalát is emelték, másrészt jelentős segítséget nyújtottak a teljes komplex feladat megoldásához. Talán itt célszerű és aktuális megemlíteni, hogy ezen berendezés kísérleti eredményeinek felhasználásával egy azóta sikeresen megvédett PhD disszertáció is készült [7].

Feltétlenül megemlítendő, hogy az üzemképes hajtóművet laboratóriumi gyakorlatok keretében a repülőgépész hallhatóknak is bemutatjuk, méréseket végeznek vele és rajta. Jelenleg két választható tárgy keretében is lehetőség van közelebbi ismereteket szerezni, ezek a Gázturbinák méréstechnikája és a Gázturbinák elektronikus szabályozása címen váltakozva, őszi ill. tavaszi félévben kerülnek meghirdetésre. Ezen hajtómű indítása mindig eseményszámba ment, mert ez ugyan kicsi, kísérleti berendezés, mégis jelentős mértékben pótolja az óriási hajtómű nagyon költséges indítása és üzeme közben szerzett tapasztalatokat, élményeket.

A működő kísérleti hajtóművet több műszaki csoportnak is bemutattuk, működésével a szakemberek igen élénk érdeklődését váltva ki. Megtekintette a berendezést az MTA Áramlás- és Hőtechnikai Bizottsága (2009. május 21-én), illetve azóta szorosabb együttműködés jött létre a Kassai Műszaki Egyetem Repülőmérnöki Karával [2], valamint a brno-i egyetem hasonló fejlesztéseket végző munkacsoportjával is.

A sugárhajtómű és a próbapad kialakítása

A kutató-fejlesztő munka második pontjában a berendezés átalakításának megtervezése és kivitelezése volt, bár az egyes főbb szakaszokat nagyon nehéz egymástól még közelítően is különválasztani. A munkának ebben a fázisában a volt Vasúti Járművek és Rendszeranalízis Tanszék akkor még aktív tanszéki mérnöke a hajtómű felfüggesztésének megoldásával és a tolóerő mérőberendezés kialakításával vette ki a részét. A próbapadot a 2. ábra mutatja.



2. ábra A sugárhajtómű próbapadja

A hajtómű kenőolaját visszahűtő radiátort a Budaörsi Repülőgépes Növényvédő Szolgálat egyik vezetőjétől kaptuk. Munkánkban különösen nagy segítséget jelentett az Aerotechnika

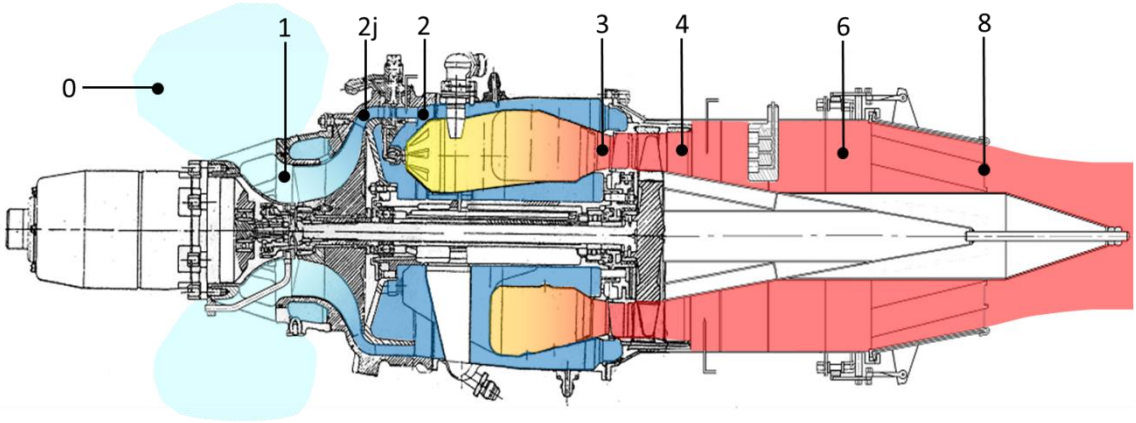
Vállalat pénzbeli támogatása, amelyet a műszerek, elsősorban különféle hőmérők beszerzésére használtunk fel. A Gépészmérnöki Kar Energetikai Gépek és Rendszerek nevű „testvér-tanszéke” több, elsősorban toroid transzformátorok átadásával segítette munkánkat.

A villamos problémák megoldásában a Közlekedésmérnöki Kar ilyen irányú tanszéke nyújtott segítséget.

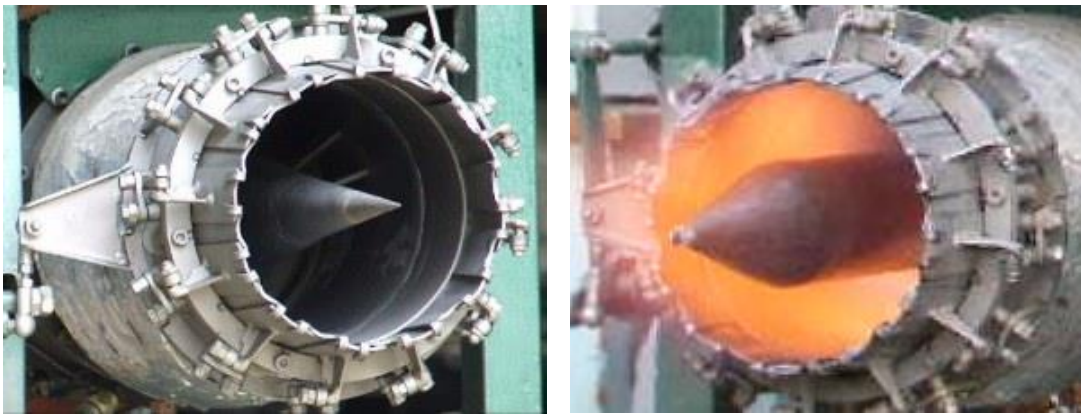
A hajtómű egyenfeszültségű indító motorjának áramellátása több problémát okozott. Transzformátorral nyert, több száz amperes váltóáram egyenirányításának megoldása nehézségbe ütközött. Több, sikertelen próbálkozás után akkumulátorból nyert egyenárammal és lényegében a saját indító-szabályozó egységének felhasználásával oldottuk meg végül.

Ezen indító gázturbina eredeti állapotában tengelyteljesítményt szolgáltatott, mely az indítandó berendezést nagy áttételű bolygóműves fordulatszám-csökkentő áttételen keresztül forgatta meg. Ezt a reduktort – és az azt meghajtó egyfokozatú axiális munkaturbinát – leszereltük, és a már említett technikusunk mestermunkáját, a folyamatosan változtatható keresztmetszetű fúvócsövet építettük a helyére. A 3. ábrán tekinthető meg a jelenlegi változat hosszmetszeti képe a jellegzetes aerodinamikai keresztmetszetek számozásával együtt. Ennek a kilépő keresztmetszetnek a kialakításakor ügyeltünk arra, hogy a fúvócső legfeljebb akkora terhelést hozhasson létre a sugárhajtóműnek, mint amekkorát a munkaturbina okozott. A kezdeti konstrukcióban a keresztmetszet jóval nagyobb volt, ez kisebb terhelést jelentett, a tapasztalatok alapján azonban további szűkítés, és ezáltal tolóerő növekedés volt elérhető, melyet a 4. ábra mutat összehasonlításképpen.

A gázturbina centrifugális, radiális kompresszorral működik. Az ilyen nagyságú centrifugális kompresszorok már többnyire gyengén hátrahajló lapátozással készülnek. Az érdeklődő olvasó ennek a megoldásnak a termikus-áramlástani tulajdonságairól az [16] irodalomban kaphat bővebb felvilágosítást.



3. ábra A TKT-1 gázturbinás sugárhajtómű hosszmetszeti képe a jellegzetes keresztmetszetek jelöléseivel



4. ábra A TKT-1 eredeti és jelenlegi (nagyobb központi kúppal csökkentett keresztmetszetű) GSF szerkezete

Az eredeti indító gázturbinán a tüzelő- és kenőanyag szivattyúk egy egységben helyezkedtek el, önálló villanymotoros hajtással. Ezt a megoldást, némi változtatással megtartottuk: a várhatóan hosszabb üzemidők miatt két egységet állítottunk üzembe, egyikben a tüzelőanyag-, a másikban az olajszivattyút hagytuk meg.

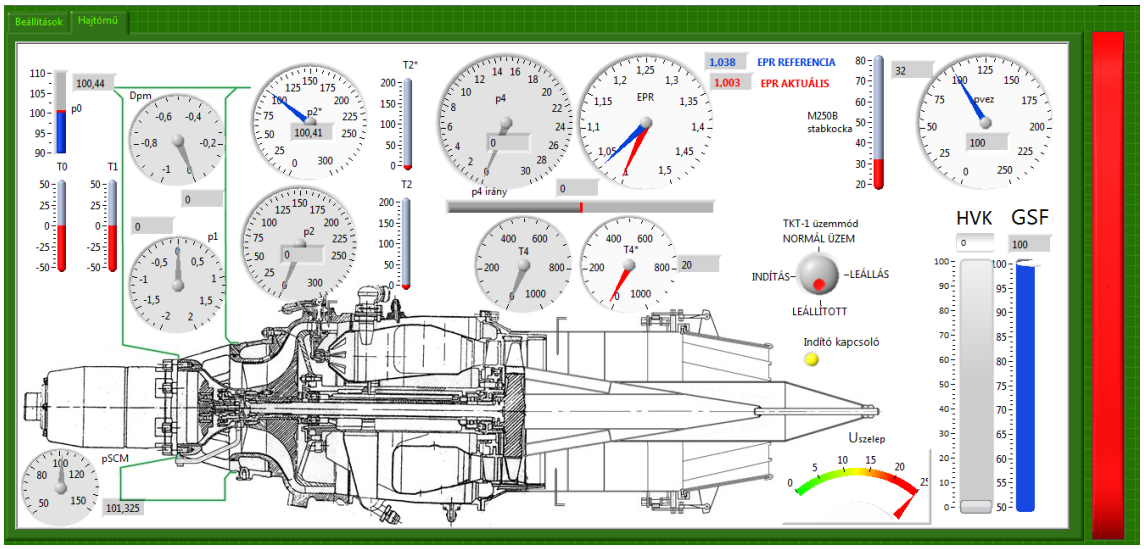
A hajtómű fordulatszámának meghatározásával sok gondunk volt. Az eredeti konstrukción nem volt lehetőség a mérésére, effajta eszköz elhelyezésére nem volt elegendő hely. Végül, több sikertelen konstrukció után a kompresszor tárcsájának megfestésével és optikai elven működő eszközt építettünk be az indítómotor tengelykapcsolóját áramvonalazó burkolaton belülre, ahol mindössze 5 mm széles gyűrű alakú helyen kellett elrendezni a szükséges alkatrészeket. Próbálkoztunk a fordulatszámmérés termikus úton történő megoldásával, azonban pontossága vitatható volt.

A gázturbina a próbapadra történő felszereléskor egy hosszú függőleges szívócsatornát kapott, melynek célja kettős. Egyrészt biztosítja a kezelőszemélyzet biztonságát azáltal, hogy fej feletti térségből történik a beszívás, ez pedig a gázturbina szempontjából is kedvező, mert az idegen tárgyak bekerülésének esélye is minimális. Másrészt pedig a beszívó szájnak a DIN 5221 szabvány szerinti kialakításával nyert mérőperem segítségével a hajtómű által aktuálisan beszívott levegőmennyiség is meghatározható.

A TKT-1 ÜZEMELTETÉSE

Kezdeti próbálkozások

2007. december 5-én megtörtént az első sikeres üzemmódra kifutás, és ezzel megkezdődött a sugárhajtómű üzemi tesztelésének folyamata. Kezdetben még csak minimális mennyiségű adat mérése volt lehetséges, illetve a rendszer a felhasznált műszerek jellegéből adódóan csak pillanatnyi leolvasást tett lehetővé. Ez természetesen nyilvánvalóvá tette, hogy komplex mérő-adatgyűjtő rendszer kiépítése válik szükségessé a lehető legrövidebb időn belül. 2008 tavaszán ez meg is valósult, az automatikus rögzítéssel és valósidejű megjelenítéssel rendelkező program megfelelt az elvárásoknak. A meglévő hőelemek mellett a nyomások piezorezisztív érzékelőkkel történő mérésével a legfontosabb adatok immár a teljes üzemelésre vonatkozóan kiértékelhetőek voltak a mérés befejeztét követően is. A pillanatnyi leolvasás megkönnyítése érdekében a szoftver a jellemző értékeket a gázturbina metszeti képén mutatja meg, mely az 5. ábrán tekinthető meg.



5. ábra A mérő-adatgyűjtő program képe

Üzemeltetési tapasztalatok

Az automatikus indító rendszer már 2008 nyarán elkészült, ezzel is növelve a megbízhatóságot és egyszerűsítve a kezelők munkáját. Az első kivitel egy egyszerű monostabil multivibrátor volt a széles körben alkalmazott 555 típusú integrált áramkör segítségével, mely 10 másodperces késleltetést biztosított az indítómotor és a gyújtás működtetésére. Amennyiben ezen időintervallumon belül az indítómotorban elhelyezett röpsúlyos kapcsoló elérte a lekapcsolási fordulatszámot, az bontotta az áramkört, az indítómotor védelme érdekében. Ha a tüzelőanyag-betáplálás ennyi időn belül nem vezetett az égés megindulásához, az indítási kísérlet automatikus megszakítását is biztosította az áramkör.

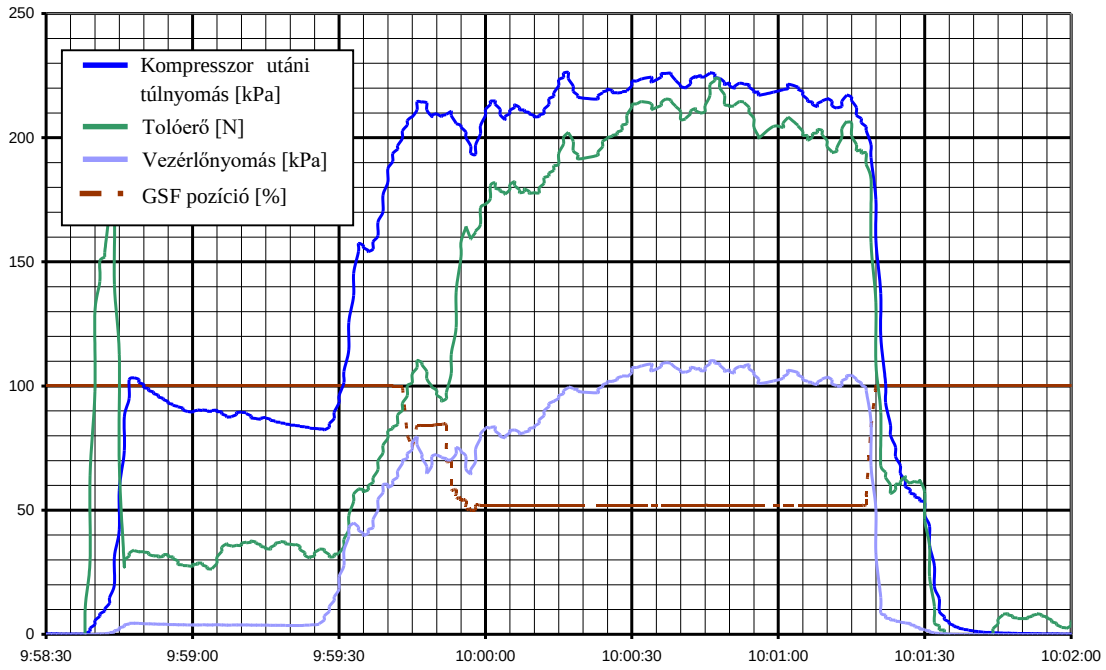
Az elmúlt több mint 7 év során összesen 184 indítási kísérletet hajtottunk végre, melyből 120 zárult teljes sikerrel. Érdekes, hogy a kezdeti sikeresség 65% környékén volt az első két (teljes) évben, 2010-ben érte el a rendszer akkori fejlettségének legfelsőbb fokát, és produkált 100%-os sikert. 2011-től megkezdődtek az elektronikus szabályozásnak a munkálatai, itt a még kipróbálatlan rendszer gyermekbetegségeinek következtében esett vissza ideiglenesen a sikeresség, ami a kezdeti nehézségek elhárítását követően ismételten emelkedő tendenciát mutat.

Év	*Indítási kísérlet*	*Sikeres indítás*	*Üzemmódra kifutás*	*Sikeresség, %*	*Üzemidő (ó:pp:mm)*	
					Éves	Összesített
2007	19	11	6	31,6	0:05:50	0:05:50
2008	46	32	29	63,0	0:34:22	0:39:12
2009	44	29	29	65,9	1:13:47	1:52:59
2010	8	8	8	100,0	0.43:37	2:35:36
2011	31	24	22	71,0	1:50:49	4:24:25
2012	14	10	10	71,4	0:40:31	5:04:56
2013	10	9	9	90,0	1:23:51	6:36:45
2014	5	5	5	100,0	0:51:32	7:26:17
2015	7	7	2	28,6	0:05:16	7:31:33

1. táblázat A TKT-1 eddigi üzemelésének összesítése

Végül az idei év a teljes hatáskörű elektronikus szabályozó rendszer bevezetésének köszönhetően ismételten jelentős romlást mutat, de hozzátesszük, hogy a csekély számú indítás miatt a tényleges érték nem feltétlenül összemérhető az előző évek számadataival, ill. reményeink szerint ez a mutató a cikk megírását követően még javulhat. Az összegzést az 1. táblázat mutatja.

Először csupán rövid, 2–4 perces járatásokat végeztünk. 2010-ben már 5–10 perces üzemeléseket hajtottunk végre, melyek a hajtómű dinamikai viselkedését voltak hivatottak feltárni a szabályozórendszer megalkotása céljából. Ekkor szembesültünk a sokkal rövidebb működési időkre tervezett rendszerelemek gyengéivel, pl. a tüzelőanyag-szivattyú nyomáscsökkenésével, mely többször alapjárat alá történő lassulást jelentett, és lehetetlenné tette a normál üzemállapot újbóli elérését. Egy ilyen jellemző üzemviszonyokat taglaló diagram látható a 6. ábrán. Az ábra bal oldalán, a regisztrátum kezdetétől számított kb. 15 másodperc elteltével kezdődik a hajtómű indítása, mely nagyjából 5 másodperc alatt eléri az alapjárati állapotot, de ez nem stabil, hanem csökkenő tendenciát mutat (az ábra a kompresszor utáni túlnyomást szemlélteti, mely arányos a fordulatszámmal), ami jelentős probléma, ha állandósult üzemállapotot szeretnénk vizsgálni. A mérés még a kézi üzemmód-állítás időszakában készült, mely egyértelműen rávilágít e megközelítés hibájára, mely szerint magasabb üzemmódokon sem lehetséges korrekt, stabil üzemállapotot előidézni, a paraméterek sztochasztikus változása megnehezíti a mérési eredmények értékelését. Nyilvánvaló volt tehát, hogy automatikus szabályozó rendszerre szükség van, melynek részleteit a cikkben később tesszük közzé.



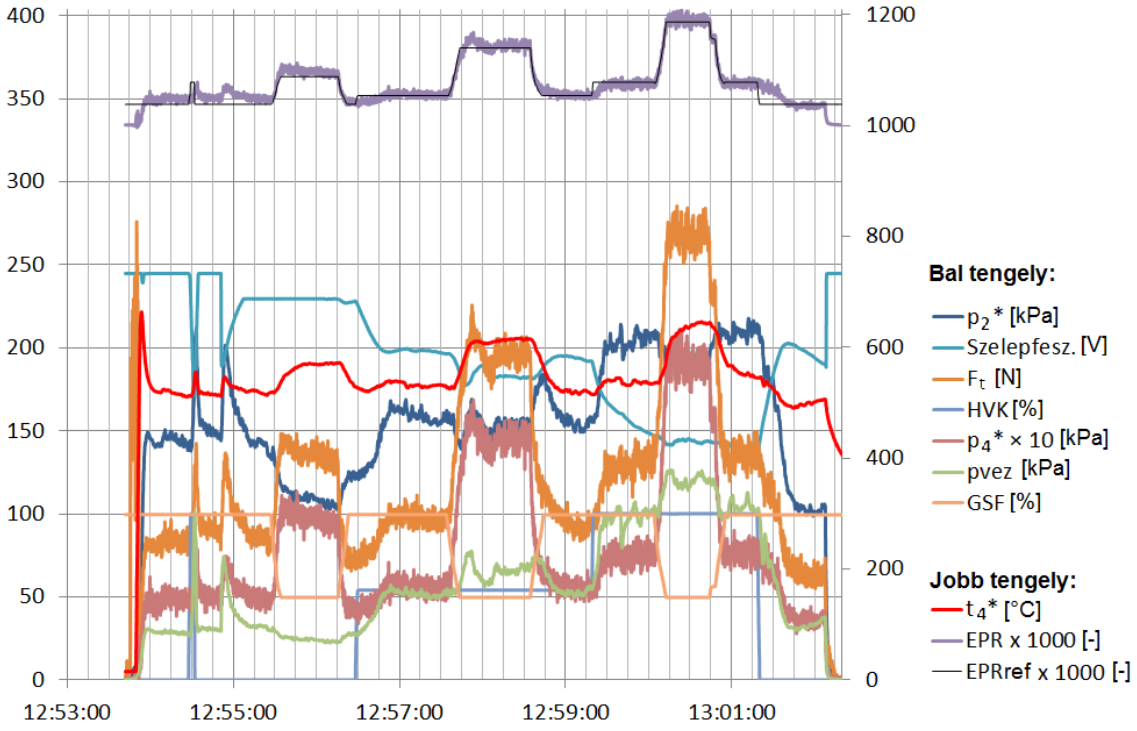
6. ábra Egy korai üzemelés (2010) jellemzői

Tekintettel az oktatási jellegre, bizonyos körülmények között – természetesen oktatói felügyelet mellett – hallgatók is végezhetnek méréseket a gázturbinán. Ehhez természetesen szükség volt a repülésben elterjedten alkalmazott dokumentációhoz hasonló leírás létrehozására, mely támaszul szolgálhat a berendezéssel ismerkedő hallgatók részére, hogy az adott feladat kivitelezése

kellő biztonsággal történhessen. Ehhez az üzembentartási kézikönyvhöz is számos mérést végeztünk, többek között a gázsugár hőmérséklet-eloszlását a tartózkodási helyek kiválasztása céljából, valamint a környezet zajterhelésének vizsgálatát is.

A szabályozó rendszer megalkotását követően a mérések mind minőségi, mind mennyiségi oldalról jelentős változáson mentek keresztül. Az üzemállapot a korábbiakhoz mérten jóval stabilabb lett, az elért üzemidő egyetlen indításból többször is meghaladta a tíz percet, s volt alkalom, hogy a 19 percet is elértük (2014. március 26-án 19’05” volt az egy járatás során elért rekord üzemidő).

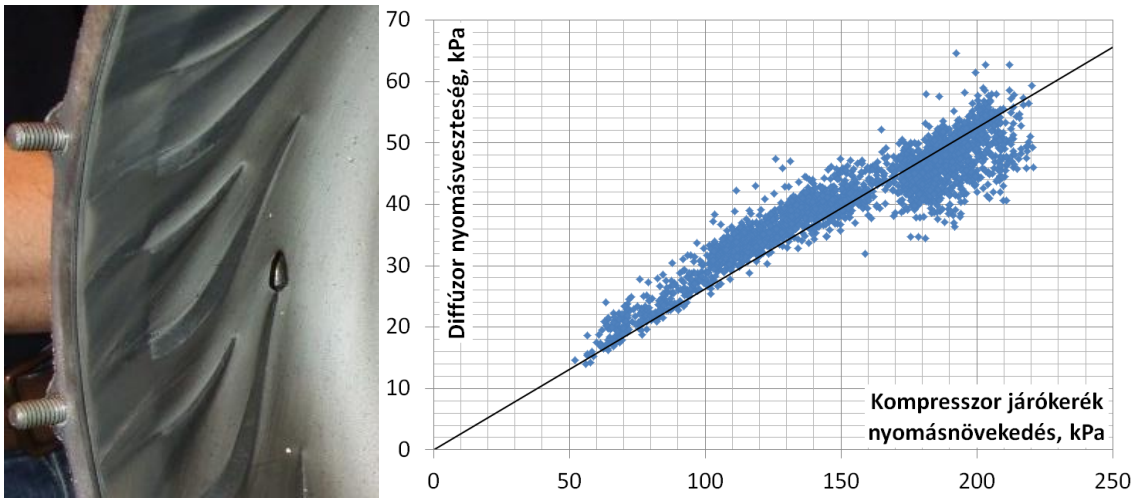
Egy tipikus működés adatfolyamát mutatja a 7. ábra. A diagram felső részén a jobb oldali tengelyhez tartozó EPR aktuális és referencia értékeinek 1000-szeresei láthatóak (tekintettel arra, hogy ezek az 1,0…1,2 tartományban mozognak normál üzemi viszonyok között a TKT-1 esetében). Amint megfigyelhető, a fő szabályozási paraméter alapvetően megfelelő módon követi a kijelölt referenciát, csak néhány esetben tapasztalható kisebb eltérés közöttük. Az utolsó lassítási folyamat 13:01:15 körül mutat jelentősebb késlekedést, itt azóta a szabályozórendszer módosításával már sikerült az anomáliát kiküszöbölni. A diagram alsó részén található adathalmaz többnyire a bal oldali tengelyhez tartozik, kivétel a turbina utáni gázhő, t_4^*, ez nagysága okán szintén a jobb oldali tengely értékeivel van összhangban. Fontos kiemelni ezek közül a tolóerő alakulását, mely egyértelmű összefüggést mutat az EPR értékének változásával, tehát teljes mértékben alkalmas a tolóerő közvetett szabályozására.



7. ábra Egy üzemelés jellemzői a szabályozórendszerrel (2013)

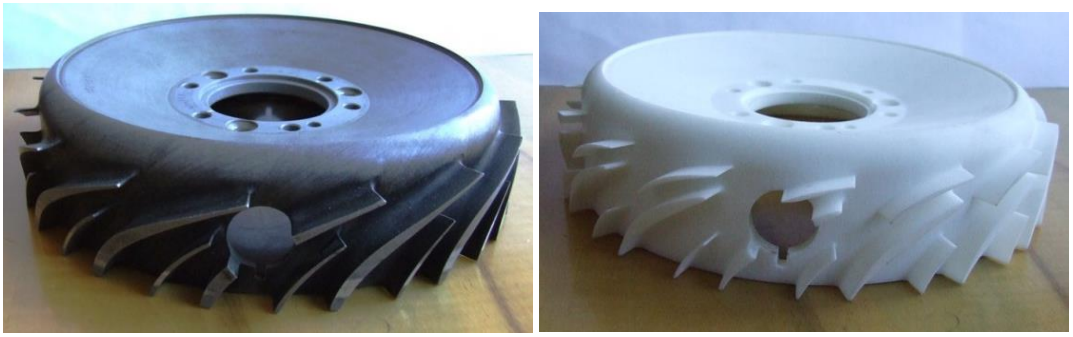
A mérési eredményeink alapján kiderült, hogy a centrifugális kompresszor diffúzorának igen jelentős nyomásvesztesége van, mely felkeltette az érdeklődést egy új, kedvezőbb konstrukció megalkotására. A – szétszerelés után – szemmel látható leválási nyomok a ház belső falán és a mérési eredmények a 8. ábrán láthatóak. Ez azt is jelenti, hogy a névleges 3,5-es nyomásviszony esetében

már 90 kPa a várható diffúzor nyomásveszteség, vagyis a járókerék önmagában 4,4-nyi torlóponti nyomásviszonyt hozna létre, de ennek tekintélyes hányada elvész az állólapátozásban.



8. ábra A centrifugálkompresszor diffúzorában megfigyelhető leválási nyomok

Tekintettel arra, hogy teherviselő feladatot nem lát el a hajtómű szerkezetében, illetve nem mozgó komponensről van szó, a megvalósítás viszonylag egyszerűnek tekinthető, legalábbis a forgórész áttervezésének kérdésköréhez képest. Egy jelenleg készülő diplomaterv keretében a elkészült és beépítésre került egy javított lapátozású diffúzor, melyet a 9. ábra mutat, az eredetivel összehasonlításban.



9. ábra Az eredeti diffúzor és az áttervezett változat

Alkalmazás az oktatásban

A sugárhajtóművel kapcsolatban születtek már sikeres tudományos diákköri munkák, kezdvén a fiatalabb szerzőtárs 2005-ben végzett termikus-áramlástani számításaival az átalakítást illetően; Zipszer Gábor 2008-ban a kompresszor aktív pompázsgátló rendszerének numerikus áramlástani vizsgálatát végezte el, míg Pallag Nándor 2011-es munkájában a gázturbina körfolyamat numerikus áramlástani modellezését készítette el.

Diplomatervek és szakdolgozatok:

- Beneda Károly 2006 (matematikai modell)
- Sándor István 2008 (mérő-adatgyűjtő rendszer)
- Sziroczák Dávid 2009 (állítható belépő terelő lapátsor számítása, tervezése);
- Szabó András 2009 (tolóerő-vektoráló berendezés tervezése, számítása);
- Bánsági Zoltán 2010 (üzemidő számítás és turbina végeselemes analízise);

- Kóti Dávid 2010 (szívócsatorna numerikus számítása);
- Pallag Nándor 2010 (turbina lapáthűtés vizsgálata, BSc);
- Balásházy János 2011 (elektronikus szabályozó megalkotása);
- Rácz Gábor 2011 (segédberendezés áttételház tervezése)
- Horváth Ádám 2013 (hajtómű nyomásviszony (EPR) alapú szabályozás megvalósítása)
- Pallag Nándor 2013 (gázturbina körfolyamat numerikus áramlástani modellezése MSc);
- Leposa Norbert 2013 (hajtómű teljesítményviszony (TPR) alapú szabályozás megvalósítása)
- Tolnai András 2014 (rezgésmérés és diagnosztika, MSc)
- *Kovács Péter 2015 (gázsebesség-fokozó redőnyzet automatikus állító rendszerének tervezése – folyamatban)*

Azt is fontos megemlíteni, hogy egy jelenleg folyamatban lévő PhD munka esetében bár nem ez a fő vizsgálatok tárgya, de kiváló eredményeket szolgáltat a felállított elméleti összefüggések validálására [10].

Tantárgyak: A Gázturbinák méréstechnikája c. választható tantárgy először 2009 őszén indult, jelentős érdeklődéssel, összesen 12 hallgató teljesítette ezen alkalommal. Azóta már csaknem harmincra emelkedett az összlétszám, viszont meg kell jegyezni, hogy csak őszi félévekben indul, valamint 2011-ben az Egyetem lebontotta az Ae labor egy jelentős részét, ezzel csaknem teljesen ellehetetlenítve a kísérleti berendezés üzemét, és a normális rend csupán 2012-re állt helyre. Azóta a Közlekedés- és Járműmérnöki Kar döntése nyomán a megmaradt labor helyiségei közül számosat átvett a Gépjárművek és Járműgyártás Tanszék, és mindössze egy nagycsarnok maradt a VRHT birtokában. Ezzel további nehézségeket okoztak, mivel műhely híján csak a laborfoglalkozások szünetében lehetséges a fejlesztő munka a berendezésen, ami igencsak lecsökkenti a hatékonyságot, mivel Tanszékünk négy évfolyamszintű tárgy félévente összesen közel ötszáz hallgatójának tart laborokat, ami lényegében a félév nagy részében teljesen leköti a labor kapacitását. Ezen problémák dacára 2015 tavaszán elindult Gázturbinák elektronikus szabályozása mely a terv szerint a másik tárgy kiegészítéseként tavaszi félévekben kerül meghirdetésre. Az első alkalommal 13 fő teljesítette a tárgyat.

Nemzetközi kapcsolatok

A sugárhajtóműves próbapad megépítésének ötletét eredetileg a Kassai Műszaki Egyetemen hasonló gázturbinán alapuló MPM-20 adta. Az ottani kutatókkal 2009-ben kezdődött az azóta is ápolt kapcsolat, melyet több ízben történő kölcsönös látogatások, illetve egymás munkájának segítése révén erősítünk. Az ottani fejlesztések javarészt a szabályozással kapcsolatban folynak [13], a TKT-1 esetében pedig a folyamatosan állítható gázkiáramlás-sebességfokozó redőnyzet jelentett olyan többletet, melyet az együttműködés során megoszthattunk egymással [3].

A kassai kollégákkal kialakult kapcsolat nyomán 2013 tavaszán a brnoi Honvédelmi Egyetem Légierő és Repülőgépek Tanszékének munkatársai tettek látogatást és szemlélték meg a TKT–1-est. Az ottani kisméretű gázturbinás próbapad szintén hasonló alapokon került kifejlesztésre [17], és emellett a centrifugális kompresszorok instabil jelenségeinek és azok megakadályozására szolgáló rendszerek vizsgálata folyik ott [14].

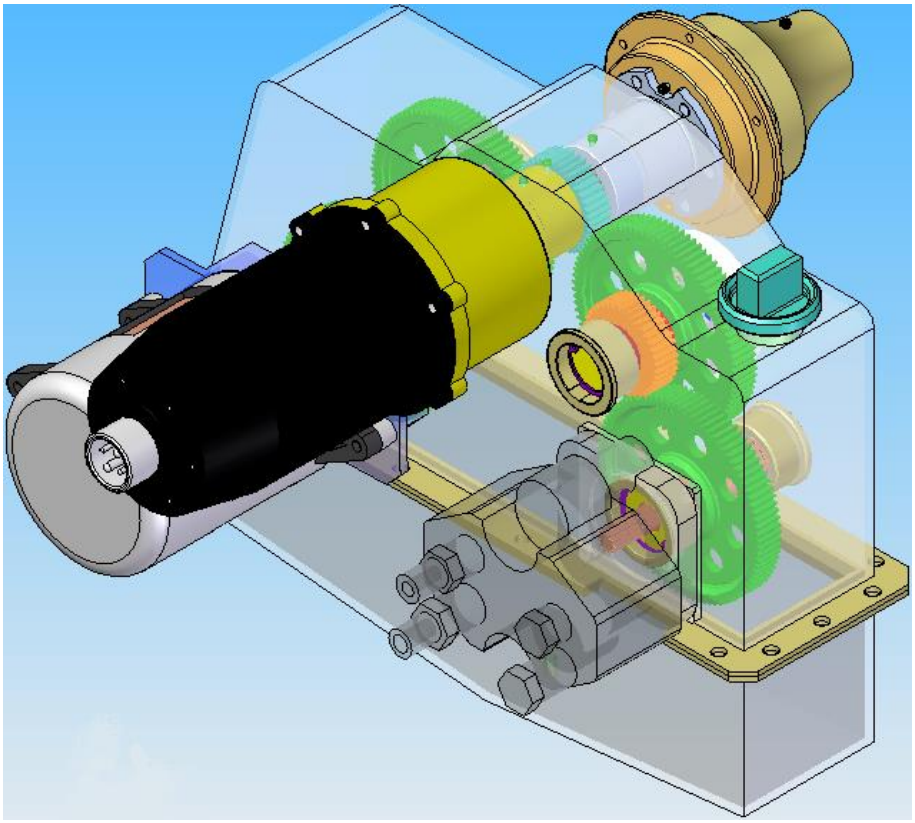
FEJLESZTÉSEK AZ ÜZEMBE ÁLLÍTÁS ÓTA

A szivattyúegység próbapadja

Az egyre hosszabb üzemelések az eredetileg 40 másodpercnyi egyhuzamban végzett munkára készült szivattyúegységeknek a normálistól eltérő viselkedését hozták, mint az a fentiekben megállapításra került. Annak érdekében, hogy a rendellenességek és a későbbiekben bemutatásra kerülő meghajtásházhoz történő illesztés kapcsán felmerülő vizsgálatokat elvégezhessük, létrehoztunk egy különálló próbapadot, mely a 924-es tüzelőanyag-olaj szivattyúegység ellenőrzésére szolgál. A kialakításról a [12] cikkben számoltunk be részletesen.

Segédberendezések áttételháza

Egy BSc szakdolgozat keretében egy hallgató megtervezte a segédberendezések áttételházát, mely szükségtelenné tenné a szivattyúk villamos meghajtását, és ezzel jóval kedvezőbb üzemeltetési viszonyokat tudna teremteni. Az áttételház alkatrészei nemrégiben elkészültek a kiskunfélegyházi Ho-Fém Kft. jóvoltából, és reményeink szerint a közeljövőben megkezdődhetnek az első félüzemi próbái. A meghajtásház és a rá épített segédberendezések látványterve a 10. ábrán látható [12].



10. ábra A segédberendezések áttételházának terve

Teljes hatáskörű digitális, elektronikus szabályozórendszer (FADEC[1])

Amint arról már 2009-ben számot adtunk [6], az egyik legérdekesebb és legösszetettebb feladat a szabályozórendszer megalkotása és fejlesztése. Az első hosszabb kísérletek után 2011-ben már megvolt a kellő tapasztalat a gázturbina viselkedését illetően, és megindulhatott az első, egyszerű elektronikus szabályozó tervezése, mely a kezelő által kiválasztott munkapont beállítását és megtartását volt képes megvalósítani, miközben minden egyéb feladat (indítási és leállítási sorrendvezérlés, stb.) maradt kézi kivitelezésű. Ezt a rendszert PELE fantázianéven hoztuk létre [8].

A szabályozó több továbbfejlesztésen ment keresztül, és a FADEC rendszer előfutáraként először próbáltunk ki rajta újfajta szabályozási törvényszerűségeket, úgy mint EPR[2] és TPR[3], melyek definíciói az alábbiakban láthatóak, amikben az indexek egybevágnak a 3. ábra jelöléseivel.

$$EPR = \frac{p_4^*}{p_1^*} \tag{1}$$

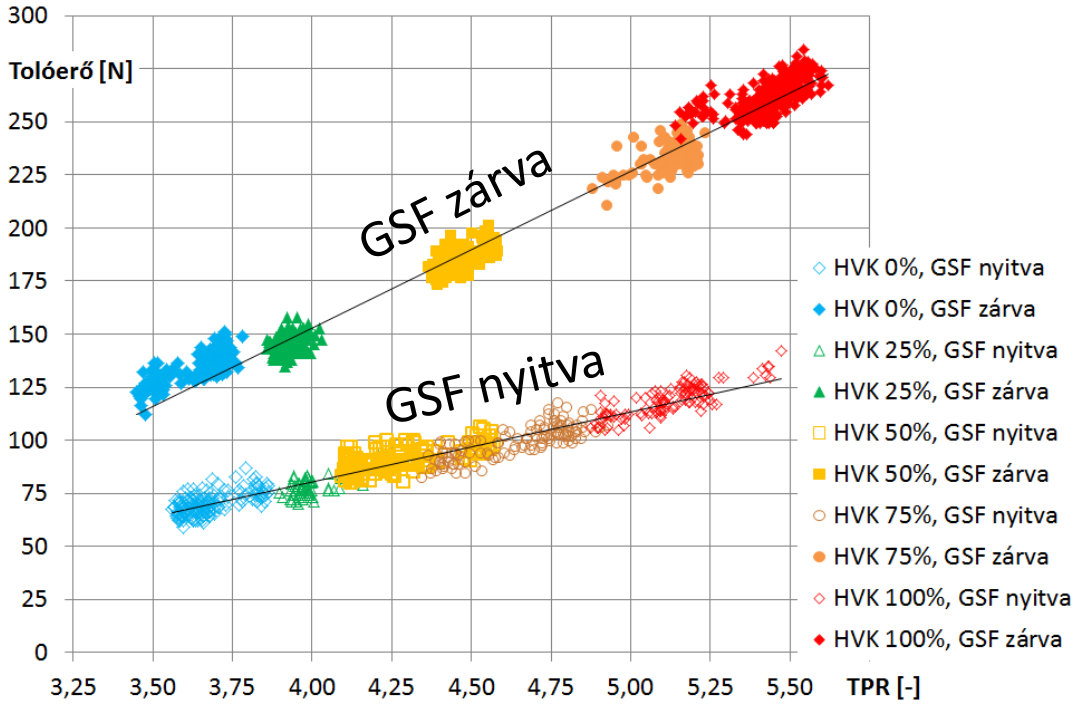
$$TPR = \frac{p_2^*}{p_1^*} \cdot \sqrt{\frac{T_3^*}{T_1^*}} \tag{2}$$

ahol p_1^* a kompresszor előtti, p_2^* a kompresszor utáni, valamint p_4^* a turbina utáni torlóponti nyomás. A turbina előtti torlóponti hőmérsékletet T_3^*, a kompresszor előttit T_1^* jelöli. Az utóbbi paramétert a Rolls-Royce kezdte el használni legfejlettebb nagy kétáramúsági fokú hajtóművein [20]. Szerzőtársunk bizonyította, hogy nemcsak kétáramú hajtóműveken alkalmazható ez a módszer [9], hanem egyáramú sugárhajtóművek esetében is tökéletes kapcsolat található a TPR paraméter és a tolóerő között, tehát ez a jellemző használható a szabályozás alapjául. Megjegyzendő, hogy a gyakorlatban a turbina előtti hőmérséklet mérése több okból kifolyólag nehézkes, ezért a kialakított rendszerek – köztük a TKT-1-é is – a turbina utáni hőmérséklettel helyettesíti. Ez a TKT-1-en gyűjtött mérési adatok alapján a 11. ábrán látható.

A szabályozórendszer teljes egészében saját fejlesztés, a moduláris hardverelemektől kezdve a szoftverig bezárólag. Létrehozásakor fontos szempont volt, hogy a berendezés oktatási célokkal is rendelkezik, így ennek a rendszernek a nagy hajtóművek hasonló egységeit is modelleznie kell, hogy a hallgatók tapasztalatot szerezhessenek ezen a téren is.

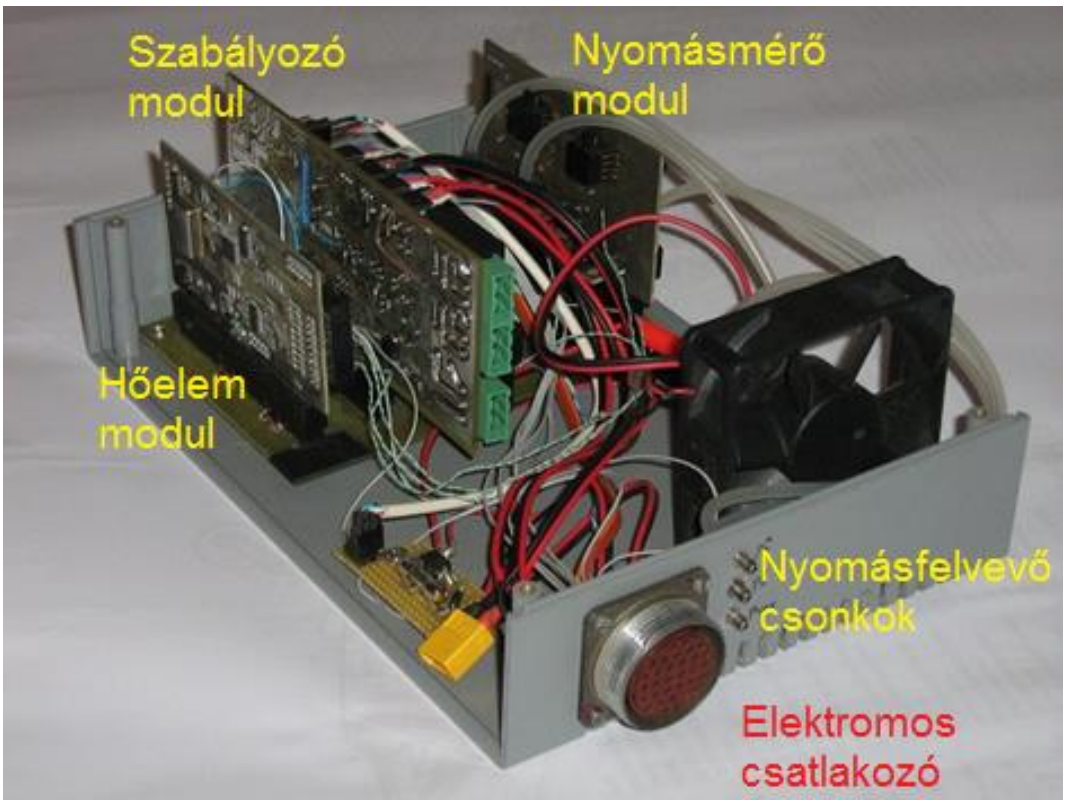
A szabályozó moduláris felépítésű, az egyes, jól körülhatárolható feladatok ellátásáért különálló áramkörök felelnek. A jelenlegi kiépítésben (lásd 12. ábra) rendelkezünk egy nyomás- és egy hőmérséklet-mérő modullal, valamint a szabályozás megvalósításáért felelős egységgel. A későbbiekben tervezzük egy második csatorna beépítését, mellyel a napjainkban elterjedt kétcsatornás kialakítások működése is vizsgálható lenne.

[1] FADEC: Full Authority Digital Electronic Control, teljes hatáskörű digitális, elektronikus szabályozórendszer
[2] EPR: Engine Pressure Ratio, hajtómű nyomásviszony
[3] TPR: Turbofan Power Ratio, hajtómű teljesítményviszony



11. ábra Tolóerő és TPR összefüggése a TKT-1 sugárhajtómű esetében

A fő szabályozásért felelős modul szoftvere jelenleg egy egyszerű proporcionális-integráló-deriváló (PID) algoritmust implementál, mely az EPR szerinti üzemmódot valósítja meg (a TPR külön programként opcionálisan választható). A gázturbina átviteli függvényének meghatározásakor nagyban támaszkodtunk a [21] irodalomban közöltekre, valamint a Tanszéken korábban ebben a témakörben megvédett doktori munka során nyert eredményekre [1].



12. ábra A szabályozó rendszer jelenlegi kialakítása

ÖSSZEFOGLALÁS

Elért eredmények

A szerzők sikeresen létrehoztak egy kísérleti sugárhajtóműves berendezést, mely oktatási és kutatási feladatok terén is megállja a helyét. Viszonylag kicsiny mérete gazdaságos üzemeltetést tesz lehetővé, de mivel nem túlzottan miniatűr, az egyes mérési feladatok megvalósítása sem ütközik túlzott nehézségekbe.

A gázturbina az elmúlt nyolc évben, amikor már tényleges üzemeltetésekre is sor került, általában megbízhatóan működött, egyes rendszerelemek gyengeségei, gyermekbetegségei miatt természetesen tapasztaltunk rendellenességeket, de ezek sosem vezettek meg nem engedett üzemállapothoz.

A kialakított mérő-adatgyűjtő rendszer alapos ismereteket szolgáltat, mellyel megalapozható volt a korszerű, FADEC elven kialakított szabályozás.

A hajtómű jelentős szolgálatot tett az elmúlt években végzett repülőgépész szakos hallgatóknak, akik ily módon igen fontos ismeretekre tettek szert a gázturbina üzemeltetésével, termodinamikai jellemzőivel kapcsolatban.

Továbbfejlesztési lehetőségek

A sugárhajtómű az eredeti elképzelésekhez képest jelentősen fejlődött az elmúlt évek során, de ez természetesen nem jelenti azt, hogy ne lenne lehetőség további módosításokra, javításokra. Mivel ilyen helyzetben igen széles a lehetőségek tárháza, csupán átfogó képet próbálunk meg felvázolni a legfontosabbak megemlítésével.

A gázturbina módosítása, forgó- vagy állólapátok optimalizálásával kedvezőbb üzemi viszonyok teremthetőek, illetve erre vonatkozó módszerek próbálhatóak ki.

Napjainkban az alternatív hajtóanyagok szintén fontos kutatási területet képviselnek, ezen a téren is jelentős kutatások végezhetőek.

Szándékozunk sugárfordító rendszert is kiépíteni, mellyel tovább bővíthetőek a próbapad képességei. Ezen felül a tolóerő vektorálás lehetősége is számottevő jelentőséggel bír.

A rendszerek kapcsán a szabályozás területén számottevő a perspektíva. Lehetőség nyílik másfajta szabályozási algoritmusok, illetve törvényszerűségek tesztelésére, illetve a meglévő komponensek továbbfejlesztésére. Tekintettel a sugárhajtómű széles üzemmód-tartományban mutatott nemlineáris viselkedésére, effajta szabályozási rendszer létrehozása nagyfokú előrelépést jelentene a mostanihoz képest.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] AILER PIROSKA: Mathematical Modeling of a Low-Power Gas Turbine Engine and its Control System. ICAS 2000 Congress, pp. 752.1-7 (online) http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2000/PAPERS/ICA0752.PDF (2015. 11. 22.)

[2] R. ANDOGA, L. FŐZŐ, L. MADARÁSZ, és T. KAROL': A Digital Diagnostic System for a Small Turbojet Engine. Acta Polytechnica Hungarica. Vol. 10, no. 4, 2013, pp. 45-58. ISSN 1785-8860 (online) url: http://www.uni-obuda.hu/journal/Andoga_Fozo_Madarasz_Karol_42.pdf (2015. 11. 16)

[3] R. ANDOGA, M. KOMJÁTY, L. FŐZŐ, L. MADARÁSZ: Design of the variable exhaust nozzle control system for a small turbojet engine MPM-20. SAMI 2014, IEEE 12th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics, proceedings: January 23-25, 2014, Herľany, Slovakia. IEEE , 2014 pp. 195-199. - ISBN 978-1-4799-3441-6

[4] BENEDA KÁROLY: Épülő kisméretű kísérleti sugárhajtómű termikus-áramlástani számítása és átalakításának problémái. TDK dolgozat, BME, 2005.

[5] BENEDA KÁROLY: Kisméretű kísérleti sugárhajtómű építése. Szolnoki Repüléstudományi Konferencia, 2006, (online) http://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2006_cikkek/beneda_karoly.pdf (2015. 11. 16)

[6] BENEDA KÁROLY TAMÁS: Teljes hatáskörű digitális gázturbina szabályzás (FADEC) fejlesztése kisméretű sugárhajtóműves berendezéshez. Szolnoki Repüléstudományi Konferencia, 2009, (online) http://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2009_cikkek/Beneda_Karoly_Tamas.pdf (2015. 11. 16)

[7] BENEDA KÁROLY: Development of active surge control devices for centrifugal compressors. PhD értekezés, BME, 2013. (online) https://repozitorium.omikk.bme.hu/bitstream/handle/10890/1243/ertekezes.pdf?sequence=1&isAllowed=y (2015. 11. 16)

[8] BENEDA KÁROLY: Hajtómű nyomásviszony (EPR) alapú szabályozás megvalósítása a TKT-1 gázturbinás sugárhajtóművön. Szolnoki Repüléstudományi Konferencia, 2014, (online) http://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2014_cikkek/2014-2-17-0154_Beneda_Karoly_Tamas.pdf (2015. 11.22)

[9] BENEDA KÁROLY: Modular Electronic Turbojet Control System Based on TPR. Acta Avionica, Vol. XVII., 31 – No. 1 (2015), pp. 2-14. ISSN 1335-9479.

[10] BICSÁK GYÖRGY, FOROOZAN ZARE, VERESS ÁRPÁD: Gázturbina égésfolyamatának vizsgálata különböző égésmodellekkel. A Jövő Járműve: Járműipari Innováció 2012:(3/4) pp. 46-51. (2012)

[11] BICSÁK, GY., JANKOVICS I.: High level software support of aircdraft and design skill development. READ 2012 Conference, Brno, Oct. 17-18, 2012, CD-ROM Proceedings, Paper_READ2012_Jankovics_István_Bicsák_Gyorgy, pp 1 - 15, ISSN 1425-2104.

[12] HORVÁTH ÁDÁM, TÓTH VILMOS, és BENEDA KÁROLY TAMÁS: A TKT-1 gázturbinás sugárhajtómű tüzelőanyag- és szabályozórendszerének fejlesztése. Szolnoki Repüléstudományi Konferencia, 2012, (online) http://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2012_cikkek/70_Horvath_Adam-Toth_Vilmos-Beneda_Karoly-Lektoralt.pdf (2015. 11. 22.)

[13] J. HRABOVSKÝ, R. ANDOGA, L. FŐZŐ: Designing a digitally controlled fuel system for an experimental small turbojet engine. CINTI 2014, 15th IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics. Proceedings, November 19-21, 2014, Budapest. IEEE, 2014 pp. 491-496. ISBN 978-1-4799-5337-0

[14] JILEK, A.; KMOCH, P.; POLEDNO, M.: Internal recirculation channel application in centrifugal compressors, International Conference on Military Technologies (ICMT), 2015, vol., no., pp.1-6, 19-21 May 2015, Brno, doi: 10.1109/MILTECHS.2015.7153675

[15] NAGY A. és JANKOVICS I.: Laboratóriumi berendezések mérő és adatgyűjtő rendszereinek korszerűsítése a BME Repülőgépek és Hajók Tanszék hő- és áramlástechnikai laboratóriumában. Repüléstudományi Közlemények XXV. (2013/1) pp. 53-60. (online) http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2013_1/2013-1-05-Nagy_Andras-Jankovics_Istvan.pdf (2015. 11. 22.)

[16] PÁSZTOR E., VARGA B.: Energy and Aerodynamic Examination of Slightly Backward Leaning Impeller Blading of Small Centrifugal Compressors. Periodica Polytechnica Transportation Engineering, Budapest 43(4), pp. 199-205, 2015, doi: 10.3311/PPtr.8093

[17] JIŘI PEČINKA, ADOLF JÍLEK: Preliminary Design of a Low-Cost Mobile Test Cell for Small Gas Turbine Engines. ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition. DOI: 10.1115/GT2012-69419

[18] Re/872. Az 55 típusú hajtómű műszaki üzembentartási szakutasítás 2. könyv. Honvédelmi Minisztérium, 1980.

[19] J. ROHACS, AND D. ROHACS: Ride Control for the Personal Plane. Proceedings of the 28th International Congress of the Aeronautical Sciences (ICAS), ISBN 978-0-95653333-1-9, ICAS 2012-5.3.2, Brisbane, Australia, Sept. 23 – 28, 2012.

[20] A. L. ROWE, N. KURZ: Control System for a Ducted Fan Gas Turbine Engine. United States Patent No. 5887419, 1999, (online) http://patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US5887419.pdf (2015. 11. 16)
[21] A. WATANABE, S. M. ÖLÇMEN, R. LELAND, K. W. WHITAKER, és L. C. TREVINO, "Soft Computing Applications on SR-30 Turbojet Engine," 1st AIAA Intelligent Systems AIAA Technical Conference. Paper Number 2004-6444, (online), url: http://www.turbinetechnologies.com/portals/0/pdfs/gas_turbine_tech_sheets/nasa-marshall.pdf (2015.10.25)

FIRST TEN YEARS OF TKT-1 SMALL SCALE GAS TURBINE ENGINE FOR EDUCATIONAL AND RESEARCH PURPOSES

In 2005, at the former Department of Aircraft and Ships of BME a monumental development work has begun, which had the goal to establish a small scale turbojet engine for both educational and research purposes. The initial investigations and reconstruction of a free shaft gas turbine have consumed more than two years, until the test bench has been created and the first operational tests have been conducted. The equipment has been developed in many aspects further, the involvement of students is quite broad ranging from electable subjects as well as BSc and Master Theses, so the students have the possibility to gather practical knowledge of aircraft gas turbine engines. The aim of this article is to demonstrate the process of reconstruction, the results of operation in the mirror of the past ten years.

Keywords: *gas turbine engine, gas turbine test bench, Full Authority Digital Electronic Control, variable convergent nozzle, data acquisition system*

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_3/2015-3-09-0238_Pasztor_E-Beneda_K_T.pdf

Sándor Zsolt

A LÉGIFORGALMI SZOLGÁLTATÓ ÉS A LÉGIFORGALMI IRÁNYÍTÁS FUNKCIONÁLIS MODELLEZÉSE

A légiforgalmi irányítás komplex folyamata az irányítói szervezeten belüli egységek között szoros együttműködést követel. A légiforgalmi irányítási feladatok elvégzése során jelentős mennyiségű információk kezelése valósul meg, melyek a légiforgalmi irányítás funkcionális modellezésével azonosíthatók. Így szisztematikusan feltárható az egyes szervezeti egységek által ellátott feladatok és az ezekhez kapcsolódóan kezelt információk, mely segítségével kialakítható az információszerkezeti modell, ami átfogó módon, csoportosítva tartalmazza a légiforgalmi irányítás során kezelt adatokat. A modell alapot biztosíthat olyan komplex tartalomszolgáltató rendszerek kialakításához, melyek képesek együttesen kezelni a légiforgalmi irányítással és tágabb környezetben, a légiközlekedéssel kapcsolatos adatokat. Az ilyen rendszerek alkalmazása hozzájárul a forgalomszervezés hatékonyságának növeléséhez és a gazdaságosabb üzemeltetéshez mind a földi, mind a légi üzemeltetői szervezetek esetén.

Kulcsszavak: *funkcionális modellezés, légiforgalmi irányítás, információs rendszer elemzése, információszerkezeti modell*

1. BEVEZETÉS

A közlekedés alágazatain belül a légiközlekedés az, aminek nemzetközi volta miatt a szabványosítás a legkorábban és a legnagyobb mértékben megtörtént a második világháborút követően az iparág fellendülésével. Annak ellenére, hogy ez a közlekedési alágazat a leginkább szabályozott, tudományos szempontból a leginkább alul dokumentált. Mind a hazai, mind a nemzetközi szakirodalomban kevés olyan tudományos értékű közlemény található, mely rendszerszemléletű megközelítéssel végzett vizsgálati és kutatási eredményeket mutat be a légiforgalmi irányítás átfogó funkcionális modellezésének területéről.

A légijárművek közlekedése során a légiközlekedési iparág szereplőinél (légitársaságok, repülőterek, légiforgalmi irányító központok stb.) jelentős mennyiségű adat keletkezik – több mint bármely közlekedési alágazatnál –, azonban ezek komplex módon történő feldolgozása és felhasználása nem valósul meg.

A gyűjtött adatok közül minden szereplő csak a számára hasznos, és a munkájához elengedhetetlenül szükséges adatokat dolgozza fel és tárolja. Ennek részben a piaci verseny és a versenytársaktól való félelem, részben a kapcsolódó rendszerek nagymértékű széttagoltsága az oka, mely történelmi és rendszerfejlesztési okokra vezethető vissza.

A léginavigációs szolgáltatók a hatékonyabb forgalomkezelés érdekében olyan csatornákat alakítottak ki, melyek segítségével az információk megoszthatók, így növelve a légiforgalmi irányítás hatékonyságát a repülés minden idősíkján (stratégia, taktikai és operatív szintű tervezés), fenntartva a megfelelő biztonsági szinteket.

A különböző információk megosztása diverz, a legtöbb esetben egymástól teljesen független rendszeren valósul meg. Így a szomszédos vagy a közvetlen (funkcionális) összeköttetésben

lévő egységek között az információk megosztása megvalósul, azonban a többi rendszerrel és egységgel való integrált adatkezelés már nem [1].

A EUROCONTROL[1] és az FAA[2] által támogatott SWIM (System Wide Information Management) kezdeményezés célja, hogy olyan platformot alakítson ki a légiközlekedési iparági szereplők számára, ahol átfogó módon, egy közös felületen férhetnek hozzá a szükséges információkhoz. Így támogatva őket a minél hatékonyabb légiközlekedés kialakításában (üzemanyagtakarékosabb és időben pontosabb a költségek csökkentése érdekében). Ennek érdekében célul tűzték ki a különböző rendszerekből származó adatok integrált kezelését [2][3].

Jelen cikk célja, hogy a légiforgalmi szolgáltató és azon belül a légiforgalmi irányítás funkcionális modellezése által bemutassa a légiforgalmi irányítás információrendszerének modelljét, amely szisztematikusan és átfogó módon tartalmazza a kezelt információkat. Az információszerkezeti modell alapot nyújthat olyan komplex rendszerek kialakításához, melyek képesek együttesen kezelni a légiforgalmi irányítással és tágabb környezetben a légiközlekedéssel kapcsolatos adatokat. A komplex rendszerek országhatárokon átívelő alkalmazása hozzájárul a forgalomszervezés hatékonyságának növeléséhez, a biztonságosabb légiközlekedéshez, a környezetszennyezés csökkenéséhez és a gazdaságosabb üzemeltetéshez mind a földi, mind a légi üzemeltetői szervezetek esetén.

Az átfogó telematikai integráció számos lépcsőből áll, és jelentős időráfordítást igényel. A cikkben összefoglalt eredmények ezt a folyamatot támogatják a rendelkezésre álló információk rendszerezésével, így támogatva a SWIM projekt megvalósulását.

2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

A légiforgalmi irányítás és a légiforgalmi irányítórendszer funkcionális modellezésével meglehetősen kevés tudományos publikáció látott napvilágot. A rendszerfejlesztő cégek és nagy rendszerházak végeznek ilyen jellegű tevékenységeket, de eredményeiket a kiélezett versenykörnyezet miatt nem adják közre. Ezen tevékenységek során képződő dokumentumok bár rendszerszemléletű megközelítéssel íródnak, elsősorban tájékoztatási és oktatási, nem pedig tudományos célokat szolgálnak [4][5][6][7].

Az ily módon keletkező dokumentumokra nem lehet úgy tekinteni, mint átfogó teljes értékű közleményekre, mivel a légiforgalmi szolgáltatás rendszerének komplex módú modellezése hiányzik belőlük, annak csupán egyes elemeinek modellezését írják le [8][9][10]. Ennek ellenére figyelemfelkeltő hatással bírnak, ugyanis együttesen írják le a funkcionális ATM rendszer humán, műszaki és információkezelő összetevőit.

Az irodalomkutatás egyik jelentős megállapítása, hogy a modellezés területén a szerzők eltérő módon definiálják a *funkciókat* és a *funkcionalitást*. Ezekre a fogalmakra elsődlegesen úgy tekintenek, mint egy adott, specifikus, egyedi tevékenység, miközben a funkció kifejezés sokkal szélesebb körű és jelentősebb információkezelő egységre utal.

[1] Európai szervezet a légiközlekedés biztonságáért

[2] Federal Aviation Administration – Amerikai Egyesült Államok Légügyi Hivatal

A legtöbb kutató a rendszerszemléletű megközelítést teljes módon leegyszerűsíti egy – a légiforgalmi irányító által végzett – adott tevékenység modellezésére, melyeket elsősorban humán faktor elemzések készítésénél szoktak elvégezni, pszichológiai megközelítést alkalmazva. Ennek következtében a kutatók csak egy-egy emberi tevékenységet vizsgálnak az irányítással összefüggésben. Ezt a modellezést is leginkább csak akkor alkalmazzák, amikor az emberi tevékenységek gépi rendszerekkel való kiváltását tanulmányozzák [11][12][13][14].

A szakmai terminológia és az összefüggések eltérő értelmezésének következménye, hogy a kutatók a *modellezés* kifejezés alatt a forgalmi modellezést értik, továbbá ezen belül is forgalomáramlás modellezését és annak aspektusait.

A szakirodalomban keveredik a funkció (function) és a felépítés (structure) kifejezések használata. Jelen kutatás a felépítés (structure) kifejezéshez közelebb áll, azonban a nemzetközi irodalomban ezt inkább a légterek fizikai szerkezetére, illetve a számítógépes hálózatokra alkalmazzák [15][16].

Annak ellenére, hogy a szakirodalom számos modellezési módszert említ, ezek alkalmazása a funkcionális ATM rendszer átfogó modellezéséhez – rendszerszemléletű megközelítést felhasználva – még nem történt meg. A strukturált rendszerfejlesztési módszertan (SADT) – mely később az IDEF0 modellezési nyelvben lett szabványosítva – egy jól definiált, kialakított modellezési nyelv [17][18][19]. A FRAM – *functional resonance accident* – modell a társadalmi-műszaki rendszereket a funkciók segítségével írja le, nem pedig a felépítése alapján, és célja, hogy a nem lineáris összefüggések alapján rögzítse az ilyen jellegű rendszerek tulajdonságait [20].

Az említett modellezési módszereket csak egyes specifikus tevékenységek leírására használják, miközben jelentős potenciállal rendelkeznek a teljes rendszer felírásához is.

3. A LÉGIFORGALMI IRÁNYÍTÁS MODELLEZÉSE

A modell kialakítása során figyelembe vettem a légiforgalmi szolgáltató (ANSP) és a funkcionális légiforgalmi menedzsment (ATM) rendszer statikus (felépítés) és dinamikus (működés) struktúráját is, valamint mindezen belül a légiforgalmi irányítás rendszerét (ATC). Azonosítottam az alkotóelemeket (szolgálatok), a bennük lezajló folyamatokat (információkezelési műveletek), az ezekhez tartozó információkat (kezelt adatok) és mind ezek elvégzéséhez felhasznált gépi rendszereket.

A gépi komponensek részletes vizsgálatától eltekintettem, mivel az abban megvalósuló folyamatok a mindenkori műszaki fejlettségtől függnek. Ennek ellenére a gépi rendszerek funkcióját minden esetben azonosítottam.

A teljes légiközlekedést, mint rendszert, a légiközlekedési folyamatokban résztvevő szereplők és a működést befolyásoló, az iparági szereplők információs rendszereinek sokasága együttesen alkotja. Ezen belül helyezkedik el a légiforgalmi irányítás információs rendszere, mely jelen cikk vizsgálatát képezi. Az információs rendszer(ek) biztosítják az alapfolyamatok kezelését, azokra ráépülve, kiszolgálva az iparági szereplőket.

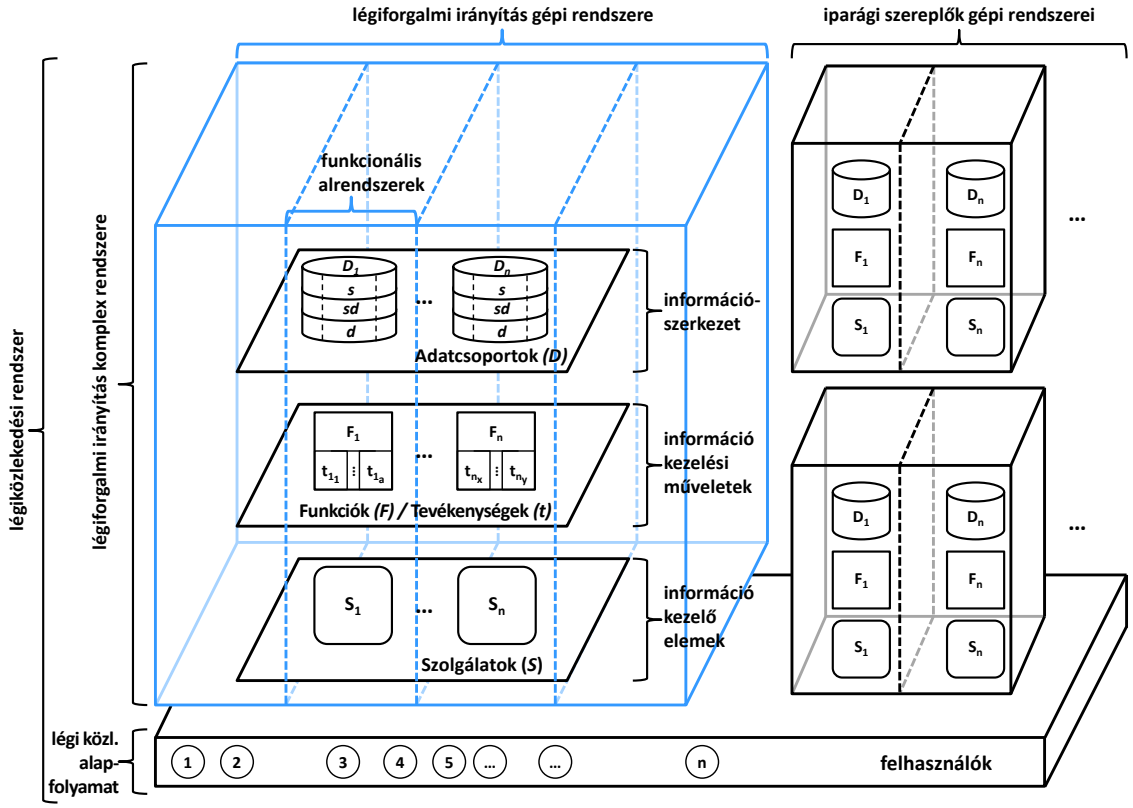
A 1. ábra szemlélteti a **légiforgalmi irányítás komplex rendszerének modelljét** és környezetét. Az ábrán megjelöltem a rendszert alkotó összetevőket (szolgálatok, funkciók, adatcsoportok). A szolgálat-funkció tekintetében a funkció a fő rendezőelv, mivel a szervezeti jellemzők esetén fennáll a változás lehetősége, miközben a funkciók állandók (légiforgalmi irányítás területén előre jól meghatározott funkciókat kell biztosítani).

A ***gépi rendszerek*** – melyek számos funkcionális alrendszerből állnak – összekapcsolják a komplex rendszer összetevőit, és biztosítják a működéshez szükséges információk tárolását, továbbítását és feldolgozását. Ezen kívül ***interfész*** szerepet töltenek be a felhasználók és a gépi komponensek valamint, az iparági szereplők fő és alrendszerei között az adatcsere megvalósítása érdekében.

A légiforgalmi irányítás területén a nagyfokú szabályozottságnak köszönhetően az egyes információkezelési műveletek jól meghatározottak, és – az esetek döntő többségében – egyértelműen hozzárendelhetők az információkezelő elemekhez (humán összetevők). Így funkcionalitás tekintetében a szolgálatok és funkciók között jellemzően átfedés mentes kapcsolatok alakíthatók ki.

A gépi rendszerek esetén a komplex rendszerek miatt lehetségesek a funkcionális átfedések. A funkciók tekintetében az információkezelő elemek és információkezelési műveletek közötti hozzárendelés a funkcionális alrendszerek esetén egyértelműen, átfedés mentesen meghatározhatók.

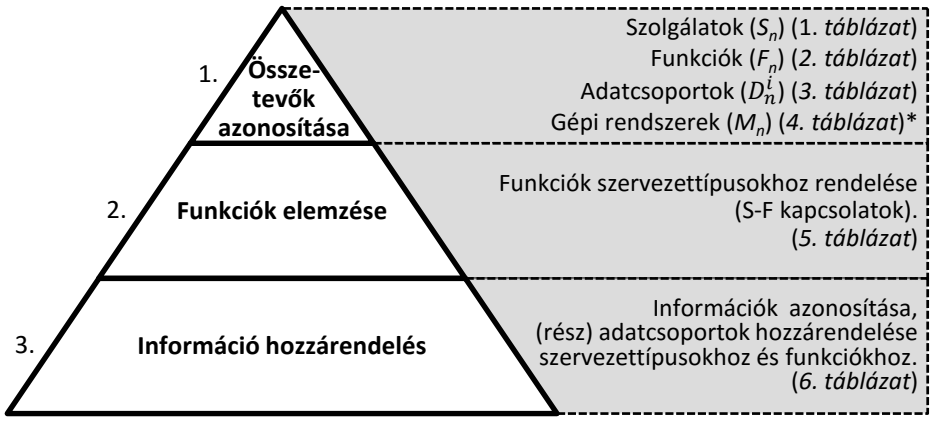
Az **összetevők közötti összefüggések** alapján kidolgoztam a légiforgalmi irányítás **információrendszerét**. Ehhez feltártam és elemeztem a szolgálatok által kezelt információkat, majd azokat egységes rendszerbe foglalva alakítottam ki **a légiforgalmi irányítás információszerkezeti modelljét**.



1. ábra A légiforgalmi irányítás komplex rendszerének modellje és környezete

4. AZ INFORMÁCIÓSZERKEZET MODELLEZÉSI MÓDSZERE

Leképeztem a légiforgalmi szolgáltatón belül, a légiforgalmi irányítási rendszer szerkezetét, összetevőit és a folyamatait, valamint feltérképeztem a gépi rendszereket is. Szolgálat, funkció, adatcsoport sorrendű megközelítést alkalmaztam – kiegészítve az alkalmazott gépi rendszerekkel –, fokozatosan bővítve a vizsgálatot horizontális (modell kiterjedtség), majd vertikális (modell részletezettsége) irányban is. A bővítési irányok diszkréten elválnak egymástól. A 2. ábra összefoglalja a modellépítés lépéseit és logikáját. A lépések sorrendje logikai egymásra épülést követ a rendszer- és folyamatszemléletű megközelítés szerint.



2. ábra Információszerkezeti modell kialakításának lépései

4.1. Összetevők azonosítása

A legfontosabb összetevők:

A. szolgálat (*jelölése:* S_n),
B. funkció (*jelölése:* F_n),
C. adatcsoport (*jelölése:* D_n^i),
D. gépi rendszer (*jelölése:* M_n)*.

Szolgálatok (S_n)

A légiforgalmi szolgáltatón belül a légiforgalmi funkcionális ATM rendszer szereplőit ***feladatkörük alapján*** (alapfolyamathoz kapcsolódóan ellátott főbb feladatok) csoportosítottam (1. táblázat). Tekintettel a funkcionális ATM rendszer összetettségére a táblázat tartalmazza az egyes szolgálatok magasabb szintű funkcionális blokkokba való besorolásait is. A szolgálatok leírását a nevük után zárójelben tűntettem fel.

Funkciók (F_n)

A szolgálatok által végzett feladatok és a légiforgalmi irányítás biztosításához kapcsolódó egyéb ***szolgáltatások alapján*** meghatároztam a légiforgalmi irányítással összefüggő fő funkciókat és magasabb szintű funkcionális blokkokba (***FB$_n$***) való besorolásaikat (2. táblázat). A nem közismert funkciók magyarázata a táblázat után található.

* A gépi rendszerek elemzése nem képezi jelen cikk alapját, csupán a jobb megértés érdekében kerültek feltüntetésre.

Adatcsoportok (D_n^i)

A kezelt adatokat a rendezettség és a kezelhetőség érdekében a tartalom és az időbeli érvényesség alapján csoportokba soroltam, melyet a 3. táblázat szemléltet. Így a hasonló, de mégis eltérő tartalmat leképező adatok együttesen kezelhetők. Az elemzés során csak azokat az adatokat azonosítottam, melyek közvetlenül kapcsolódnak az operatív légiforgalmi irányítási tevékenységekhez. Ezek alapján az alábbi adatcsoportokat határoztam meg:

1. Forgalmi és útvonal adatok (légijárművek mozgásával kapcsolatos adatok)
2. Légi infrastruktúra adatai (légterekkel, szektorokkal, repülőterekkel, útvonalakkal, stb. összefüggő adatok)
3. Tájékoztatási adatok (légijárművek biztonságos üzemeltetéséhez szükséges adatok)
4. Berendezés adatok (műszaki infrastruktúrára vonatkozó adatok)

A statikus adatok hosszabb időn át változatlanok, érvényességük időbeli állandósága nagyobb, mint egy hónap. A féldinamikus adatok tartalmazhatnak gyakrabban változó tartalmakat is, így ezek időbeli állandósága egy hónap és néhány óra között változhat. A dinamikus adatok időbeli állandósága jóval kisebb, sok esetben akár másodpercenként is változhatnak.

Adatok jelölése: D_n^i *n* jelöli az adatcsoport sorszámát, *i* a dinamikát

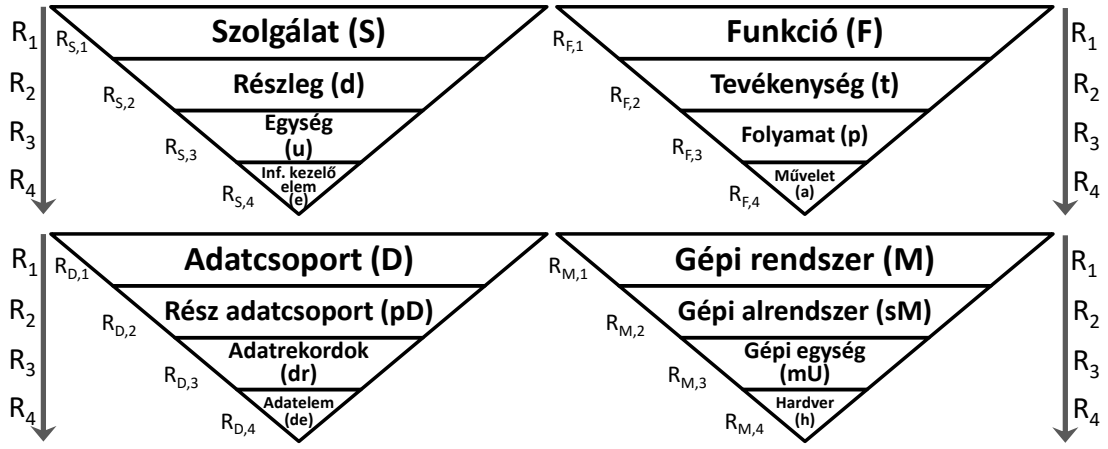
Dinamika:

S - statikus, SD - féldinamikus, D - dinamikus (beleértve a valósidejű adatokat is).

Gépi rendszerek (M_n)

Az irányítással összefüggő tevékenységek elvégzését a gépi rendszerek és azon belül a funkcionális alrendszerek támogatják. Az egyes rendszerek a legtöbb esetben egymástól függetlenül, integráltság nélkül üzemelnek. A 4. táblázatban foglaltam össze az irányítási feladatok elvégzéséhez közvetlenül és közvetve felhasznált rendszereket.

Az információszerkezeti modell minden összetevője további alacsonyabb szintű elemekre bontható. A 3. ábra szemlélteti az összetevők felbontási mélységének növelését. A fordított piramis az összetevőkön belüli egyre kisebb egységeket jelöli, ahogy a felbontás egyre részletesebbé válik. Az összetevők (építőelemek) kiterjedtsége és számossága egymással fordítottan arányos. Az elemek jelölését felbontási szintenként, összetevőnként a zárójeles kifejezés tartalmazza, mely egyértelműen azonosítja az egyes összetevőkhöz tartozó elemeket. A gépi rendszerek mélyebb szintű vizsgálata nem célja a cikknek, így az ábrán e komponens nem került feltűntetésre.



3. ábra Az információszerkezeti modell vertikális kiterjesztése összetevők szerint

Jelölés	Légiforgalmi szolgáltató felbontása a különböző szolgálatokra és azok magasabb szintű funkcionális blokkokba való besorolásuk				
S_1	**Körzeti irányító szolgálat (ACC)** (illetékességi légteret átrepülő légijárművek irányításáért felelős szolgálat)	**Légiforgalmi irányító szolgálat (ATC)**	**Légiforgalmi szolgálat (ATS)**	**ATM szolgálat**	**Légiforgalmi szolgáltató (ANSP)**
S_2	**Bevezető irányító szolgálat (APP)** (repülőtereket megközelítő és onnan induló légijárművek irányításáért felelős szolgálat)				
S_3	**Repülőtéri irányító szolgálat (TWR)** (repülőtéri mozgásokért, a fel és leszállások biztosításáért felelős szolgálat)				
S_4	**Légiforgalmi tanácsadó szolgálat (ADV)** (nem ellenőrzött légtérben a forgalom kikerülésére vonatkozó tanácsok nyújtását ellátó szolgálat)	**Repülés-tájékoztató szolgálat (FIC)**			
S_5	**Repüléstájékoztató szolgálat (FIS)** (nem ellenőrzött légtérben a következő érvényű tájékoztatások nyújtását végző szolgálat)				
S_6	**Légtérgazdálkodó szolgálat (AMC)** (polgári és katonai légtérhasználati igényeket összehangoló szolgálat)				
S_7	**Áramlásszervező szolgálat (FMP)** (rendelkezésre álló légtér és irányítói kapacitás függvényében a járatszabályozást biztosító szolgálat a túlterhelésmentes irányítói munka érdekében)				
S_8	**Meteorológiai szolgálat (MET)** (repülésmeteorológiai adatok biztosítását végző szolgálat)				
S_9	**AFTN távközlési szolgálat** (AFTN hálózaton keresztül továbbított üzenetek eljuttatását biztosító szolgálat)			**CNS - ATM műszaki szolgálatok**	
S_{10}	**ATM-et kiszolgáló műszaki infrastruktúra-üzemeltető szolgálat (CNS)** (légiforgalmi irányítás ellátásához szükséges kommunikációs, navigációs és felderítő rendszerek működését biztosító szolgálat – munkatermen kívüli oldal)				
S_{11}	**Rendszerüzemeltetési szolgálat** (légiforgalmi irányításhoz használt informatikai berendezések és rendszerek működését biztosító szolgálat – munkateremi oldal)				
S_{12}	**NOTAM iroda** (NOTAM táviratok elkészítéséért és továbbításáért felelős szolgálat)			**Légiforgalmi tájékoztató szolgálat (AIS)**	
S_{13}	**Repülés-bejelentő iroda (ARO)** Nemzetközi induló légijáratok adminisztrációjáért felelős szolgálat				
S_{14}	**Publikációs és statikus adatkezelő szolgálat (PUB/SDM)** (repülést érintő statikus adatok kezelését és a kapcsolódó publikációk elkészítését végző szolgálat)				
S_{15}	**Repülésbiztonsági szolgálat (Safety)** (repülésbiztonsági kérdések kezelését biztosító szolgálat)			**Egyéb, az ATM működést támogató szolgálatok**	
S_{16}	**Rendszerfejlesztési szolgálat** (irányítási rendszerek fejlesztésében résztvevő szolgálat)				
S_{17}	**Adminisztrációs szolgálat** (munkavégzést támogató területek együttes megnevezése: jog, HR, oktatás, képzés stb.)				

1. táblázat Szolgálatok

Jelölés	Funkciók		Funkció blokk
F_1	Körzeti irányítás (átrepülő légijárművek irányítása)		Ellenőrzött légterekben és repülőtereken nyújtott légiforgalmi szolgáltatás
F_2	Közelkörzeti irányítás (TMA-n belüli, induló és érkező légijárművek irányítása)		
F_3	Repülőtéri irányítás (érkező és induló légijárművek kezelése)		
F_4	Repülési adatkezelés - adatfeldolgozás és adatközlés		
F_5	Riasztó szolgálat ellátása		
F_6	Légiforgalmi tanácsadás		Nem ellenőrzött légterekben és repülőtereken történő légiforgalmi szolgáltatás
F_7	Repüléstájékoztatás		
F_8	Repülési adatkezelés - adatfeldolgozás és adatközlés		
F_9	Riasztó szolgálat ellátása		
F_{10}	Előtaktikai légtérgazdálkodás		Légtérgazdálkodás
F_{11}	Taktikai légtérgazdálkodás		
F_{12}	Adminisztráció		
F_{13}	Elő-taktikai koordináció		Légiforgalmi áramlásszervezés
F_{14}	Taktikai koordináció		
F_{15}	Együttműködés		
F_{16}	Adminisztráció		
F_{17}	Repülésmeteorológiai észlelés és előrejelzés		Repülésmeteorológiai szolgáltatás
F_{18}	Légijáratok kiszolgálásához szükséges meteorológiai információk kezelése		
F_{19}	Repülésmeteorológiai táviratok kezelése (METAR, TAF, SIGMET, VOLMET stb.)		
F_{20}	AFTN hálózati szolgáltatások biztosítása (szolgáltatás felügyelet, üzenetek kezelése)		
F_{21}	Kommunikációs és adatátviteli berendezések üzemeltetése	Légiforgalmi irányítás ellátásához szükséges munkatermen kívüli, telepített infrastruktúra-üzemeltetés	Műszaki infrastruktúra üzemeltetése
F_{22}	Navigációs berendezések üzemeltetése		
F_{23}	Felderítő- és radar rendszerek üzemeltetése		
F_{24}	Légiforgalmi irányító központ rendszereinek műszaki felügyelete és üzemeltetése	Munkateremhez és a repülőtérhez kapcsolódó műszaki infrastruktúra üzemeltetése	
F_{25}	Kültéri (repülőtéri), telepített műszaki berendezések üzemeltetése		
F_{26}	Légiforgalmi távközlési hálózatok üzemeltetése		
F_{27}	NOTAM kezelés (szerkesztés, kiadás)		Légiforgalmi tájékoztatás
F_{28}	Repülési tervek feldolgozása	Repülés-bejelentés	
F_{29}	Repülés előtti tájékoztatás		
F_{30}	Repülés utáni esemény-bejelentés		
F_{31}	Statikus adatkezelés		
F_{32}	AIP szerkesztés		
F_{33}	Eseménykivizsgálás		ATM működés támogatása
F_{34}	Repülésbiztonsági ellenőrzések, kutatások és elemzések elvégzése		
F_{35}	ATM irányítási rendszerek fejlesztése szoftver és hardver oldalról		
F_{36}	Irányításhoz szükséges adminisztráció és támogató tevékenységek		

2. táblázat: Funkciók

Funkciók magyarázata:

F_1: Illetékességi szektort átrepülő légijárművek irányítása, és közöttük a biztonságos repüléshez szükséges elkülönítés (vízszintes vagy függőleges) létrehozása.

F_2: Repülőterek közelkörzetében az induló légijárművek irányítása a felszállástól a Körzeti irányító központ (ACC[4]) kijelölt átadási magasság eléréséig. Az érkező légijárművek bevezetése a végső megközelítést követő leszállásig. Irányítás során a légijárművek között a biztonságos repüléshez szükséges vízszintes és függőleges elkülönítés biztosítása.

F_3: Felszállási és leszállási engedélyek kiadása, induló járatok előkészítése (a repülés megkezdéséhez szükséges engedélyek beszerzése és megadása, repülőtéri mozgás irányítása), érkező járatok repülőtéri fogadása (futópálya és a légijármű számára kijelölt állóhely közötti földi mozgás koordinálása).

F_4, F_8: Manuális beavatkozást igénylő repülési adatok kezelése és továbbítása nemzetközi hálózatok felhasználásával, valamint a szomszédos államok ATS szolgálataival való adatcsere és szóbeli információtovábbítás.

F_5, F_9: Ellenőrzött és nem ellenőrzött légtérben az illetékes szervezetek értesítése a kutatásra és mentési segítségre szoruló légi járműről

F_6-F_7: Nem ellenőrzött légtérben repülő légijármű-vezetők számára tájékoztatás nyújtása az aktuális forgalmi és meteorológiai állapotokról.

F_{10}: Polgári és állami légtérhasználati-igények kezelése, összehangolása, felhasználási tervek készítése.

F_{11}: Tényleges légtérhasználati igénybevételek kezelése, koordináció a légtérigénylőkkel a használatról.

F_{12}: Légtérhasználattal kapcsolatos adminisztrációs tevékenységek összessége.

F_{13}: Várható forgalmi adatok és a taktikai intézkedések meghatározása, környezeti adatok (kapacitáscsökkenés esetén az új kapacitásadatok) cseréje és koordináció az illetékes nemzetközi szervezetekkel, terhelésszámítás.

F_{14}: Forgalomkövetés, kapacitásértékeket befolyásoló események jelentése és kezelése, résidő koordinálás.

F_{15}: Kapcsolattartás azon iparági szereplőkkel, akiket a kapacitáskorlátozás elrendelése érint.

F_{16}: Áramlásszervezéssel kapcsolatos adminisztrációs tevékenységek összessége.

F_{20}: Nemzeti és nemzetközi AFTN hálózat szolgáltatásainak folyamatos biztosítása, a rendszer által biztosított távirat-továbbítási funkció folyamatos ellenőrzése.

F_{31}: Repülést érintő statikus adatok kezelése.

F_{32}: Léginavigációs kiadványok szerkesztése.

F_{33}: Légiforgalmi irányítással összefüggő események kivizsgálása.

F_{36}: Minden olyan tevékenység együttesen, mely a szolgálat működését biztosítja, és annak működéséhez elengedhetetlen.

[4] Area Control Center

	Statikus adatok - *s*	Féldinamikus adatok - *sd*	Dinamikus adatok - *d*
1. Forgalmi és útvonal adatok	D_1^s	D_1^{sd}	D_1^d
	-	- menetrendi adatok - résidő adatok - várható terhelési és forgalomáramlási adatok - járatok tervezett útvonal adatai - várható korlátozások adatai - koordinációs adatok tervezéshez	- aktuális forgalmi adatok (forgalomáramlási adatok, kapacitáskorlátozási adatok) - repülési tervvel összefüggő adatok - megtett útvonal adatok - légijármű aktuális repülési és pozíció adatai - koordinációs adatok forgalomszervezéshez és résidő-kiosztáshoz - repülőtéri forgalomkezelési adatok - kényszerhelyzeti adatok
2. Légi infrastruktúra adatai	D_2^s	D_2^{sd}	D_2^d
	- útvonalak és útvonalpont adatok - légterek és szektorok adatai - előzetes kapacitásadatok - stratégiai légtérkezelési adatok - stratégiai légtér-felhasználási tervadatok	- várható szektorterhelési adatok - szektorizációs tervadatok - előzetes légtér-felhasználási adatok (igények és foglalások) - Napi Légtérfelhasználási Terv	- aktuális és rövid távú előre becsült szektorterhelési és szektorhasználati adatok - pontosított, koordinált és tényleges légtérhasználati adatok
3. Tájékoztatási adatok	D_3^s	D_3^{sd}	D_3^d
	- légiforgalmi statikus adatok - AIP adatok	- légiforgalmi táviratok (pl. NOTAM, SIGMET, stb.) - előre jelzett meteorológiai adatok	- aktuális meteorológiai adatok (SIGMET, VOLMET, TAF, stb.) - légiforgalmi táviratok (NOTAM)
4. Berendezés adatok	D_4^s	D_4^{sd}	D_4^d
	- berendezésekre vonatkozó általános adatok	- karbantartási adatok	- berendezések állapot adatai - szolgáltatások üzemeltetési adatai

3. táblázat Adatcsoportok

Jelölés	Rendszer megnevezése
M_1	**Beszédüzemű kommunikációs rendszer** (Légiforgalmi irányítók (országon belül és kívül) és a külső ATS (Air Traffic Services) egységek egymás közötti beszédüzemű kapcsolattartására)
M_2	**Rádió és adat kommunikációs rendszer** (Levegő-föld összeköttetés a 118–137 MHz (VHF) és 225-400 MHz (UHF) sávokban, valamint a föld és levegő közötti adatkommunikációs csatorna - *CPDLC*)
M_3	**Komplex légiforgalmi irányító rendszer** (radar adat és repülési terv adat feldolgozás és információ megjelenítése az operatív felhasználók számára, valamint felügyeleti és kezelési lehetőség biztosítása műszaki személyzet számára) *pl. MATIAS (Magyar AuTomated and Integrated Air Traffic Control System) by Thales*
M_4	**Back – up légiforgalmi irányító rendszer** (tartalék radar és repülési adatokat megjelenítő rendszer)
M_5	**Automatic terminal information service (ATIS)** (Automatikus közelkörzeti tájékoztató szolgálat rádiórendszere, mely aktuális, rutin jellegű tájékoztatásokat biztosít az érkező és induló légi járművek részére)
M_6	**A-SMGCS - Advanced Surface Movement Guidance and Control System** (földfelszíni mozgásokat ellenőrző és irányító rendszer)
M_7	**Repülőtéri meteorológiai adatgyűjtő és feldolgozó rendszer** (biztosítja az adatgyűjtést és a repülésmeteorológiai táviratok elkészítését)
M_8	**Futópálya foglaltság jelző és ILS vezérlő rendszer**
M_9	**Repülőtéri fénytechnikai rendszer**
M_{10}	**Meteorológiai előrejelző rendszer**
M_{11}	**AFTN hálózat** - Aeronautical Fixed Telecommunication Network (operatív repülési adat, valamint repülést érintő információ közlemények kezelését biztosító hálózat)
M_{12}	**OLDI kapcsolatok** – on-line data interchange (operatív repülési adatok cseréjét biztosítja közleményváltások formájában a szomszédos ATS egységekkel)
M_{13}	**IFPS - Integrated Initial Flight Plan Processing System** (központi repülési terveket feldolgozó rendszer, melyet az EUROCONTROL üzemeltet)
M_{14}	**ETFMS - Enhanced Tactical Flow Management System** (áramlásszervezést biztosító rendszer, mely képes időbeli előrebecslést adni a forgalom várható alakulásáról)
M_{15}	**CASA - Computer Assisted Slot Allocation** (résidő koordinálást biztosító rendszer)
M_{16}	**CHMI - Collaboration Human Machine Interface** (központi kapacitásgazdálkodást biztosító rendszer, mely európai szinten biztosítja a légtérhasználati adatokat, országhatárokat átívelően)
M_{17}	**EAD - European AIS Database** (európai statikus repülési adatokat tartalmazó adatbázis)

4. táblázat Gépi rendszerek

4.2. Funkciók elemzése (S-F kapcsolatok)

Az összetevők azonosítását követően vizsgálataimat a szolgálatok és funkciók összerendelésével folytattam. A **szolgálatok** és azon belül a **feladatkörök alapján** meghatároztam, hogy melyik szolgálat mely **funkció ellátásáért felelős**. Így a szolgálatokhoz hozzárendeltem a funkciókat. Az eredményeket az 5. táblázat szemlélteti. A repülési iparág erőteljes szabványosítása által a funkciók és szolgálatok egymással egyértelműen megfeleltethetők, minimális átfedéssel. Az átfedések csak a funkciók szintjén léteznek, tevékenységek és folyamatok szintjén már nem.

		Szolgálat																
		ATC			FIC		AMC	FMP	MET	AFTN	Műszak		AIS			Támogató		
		S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}	S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{14}	S_{15}	S_{16}	S_{17}
Funkció	F_1	X	X	X														
	F_2		X															
	F_3			X														
	F_4	X	X	X														
	F_5	X	X	X														
	F_6				X													
	F_7					X												
	F_8				X	X												
	F_9				X	X												
	F_{10}						X											
	F_{11}						X											
	F_{12}						X											
	F_{13}							X										
	F_{14}							X										
	F_{15}							X										
	F_{16}							X										
	F_{17}								X									
	F_{18}								X									
	F_{19}								X									
	F_{20}									X								
	F_{21}										X							
	F_{22}										X							
	F_{23}										X							
	F_{24}											X						
	F_{25}											X						
	F_{26}											X						
	F_{27}						X						X					
	F_{28}				X	X								X				
	F_{29}			X	X	X								X				
	F_{30}			X	X	X								X				
	F_{31}														X			
	F_{32}														X			
	F_{33}															X		
	F_{34}															X		X
	F_{35}																X	
	F_{36}																	X

5. táblázat Szervezettípusok és funkciók összerendelése

Csupán a funkciók ismerete nem elegendő a kezelt információk azonosításához, ugyanis egy-egy funkcióhoz számos tevékenység tartozik. Emiatt a (S-F) összerendelést követően egy szinttel mélyebb vizsgálatot végeztem; a *funkciókat* tevékenységekre bontottam. Az összerendeléseknél meghatároztam, hogy egy szolgálat a funkciói ellátásakor milyen tevékenységeket folytat. A szolgálat – funkció összerendelés jelentette a kezelt adatcsoportok meghatározásának alapját.

3. Információ hozzárendelés

A szolgálatok által végzett tevékenységek ismeretében **azonosítottam a kezelt információkat**, melyeket az információszerkezeti mátrix tartalmaz. A mátrix struktúráját az 6. táblázat szem-

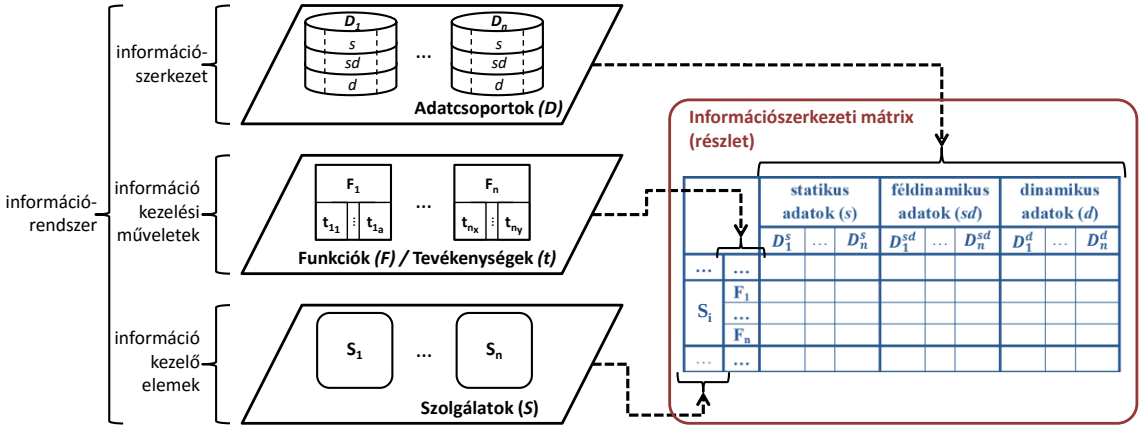
lélteti. A táblázat sorfejlécei a szolgálatokat és a funkciót mutatják. A függőleges oszlopok cellái az egyes szolgálatok által ellátott funkcióhoz kapcsolódóan kezelt információkat tartalmazzák adatcsoportokba sorolva. A mátrix cellái a kezelt (rész) adatcsoportokat tartalmazza.

		statikus adatok			**féldinamikus adatok**			**dinamikus adatok**		
Si	**Fi**	D_1^s	…	D_4^s	D_1^{sd}	…	D_4^{sd}	D_1^d	…	D_4^d
S1	**F1**									
	…									
	F39									
…	**F1**									
	…									
	F39									
S18	**F1**									
	…									
	F39									

6. táblázat: Információszerkezeti mátrix felépítése

5. AZ INFORMÁCIÓSZERKEZETI MODELL

Az **információszerkezeti** modell a kezelt információk szerkezete az összetevők alapján. A modell egy mátrix formájában mutatja meg, hogy egy szolgálat, egy funkciójának ellátásához milyen adatcsoportok szükségesek. A modell egy strukturált adatszerkezet, a légiforgalmi irányításhoz kapcsolódóan kezelt információk azonosítása és csoportosítása érdekében. A mátrix cellái a kezelt információkat tartalmazzák (4. ábra). A gépi rendszerek által végzett információkezelési műveletek ismeretében a mátrixban megjeleníthetők a gépi rendszerek is a kezelt információkhoz kapcsolva.



4. ábra A légiforgalmi irányítás információszerkezeti modellje

6. ÖSSZEFOGLALÓ

A légiforgalmi irányítással összefüggő adatok integrált kezelését és az ezekhez történő hozzáférést a nemzetközi iparági szervezetek támogatják. A kialakított modell segítségével az információk integrált kezelése megvalósítható, így biztosítva az iparági szereplők közötti gyors és költséghatékony információáramlást. Az integráció időszükséglete jelentős, és számos lépésből áll, melynek első fázisához járul hozzá a kialakított információrendszeri modell.

Az új műszaki megoldások által rendelkezésre álló számítási és tárolási kapacitások mára már lehetőséget kínálnak a nagy mennyiségben keletkező adatok valós idejű feldolgozására és továbbítására. Az integráció megvalósításával csökkenthető a légiközlekedési iparági rendszerek fragmentáltsága és az adatbirtokos felé fennálló függőségi kitettség. Ezzel párhuzamosan biztosítható az adatokhoz való gyors és pontos hozzáférés, még akkor is, ha a hálózatba összekapcsolt rendszerek egy egy eleme kiesik.

A felhő alapú szolgáltatások elterjedésével és az új biztonsági megoldások implementálásával a kritikus adatok távoli kezelése is elérhetővé válik, így a hozzáférhetőség javul. Ezzel együtt új iparági szolgáltatások elterjedése várható, melyhez a szükséges integrációs platformot a nagy rendszerházak által fejlesztett globális kiterjedésű, integrált adatkezelést és hozzáférést biztosító rendszerek kínálják – hasonlóan, a légitársasági informatikai rendszerek működéséhez. A komplex és integrált szolgáltatások országhatárokat átívelően, globális kiterjedésben támogatják a jövőben a légiforgalmi irányítással összefüggő tevékenységeket, így egyszerűsítve a szolgálatok működését.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] ICAO Doc 10039 - MANUAL ON SYSTEM WIDE INFORMATION MANAGEMENT (SWIM) CONCEPT. International Civil Aviation Organization. 999 Robert Bourassa Boulevard, Montréal, Quebec, Canada H3C 5H7

[2] Kampichler, W., Eier, D.: A D-MILS console subsystem for advanced ATM communication services. Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2014 IEEE/AIAA 33rd. 5-9 Oct. 2014 Colorado Springs, CO pp. 6D2-1 - 6D2-8. DOI: 10.1109/DASC.2014.6979505

[3] EUROCONTROL – SESAR: SWIM Concept of Operations. 2013.

[4] Bayen, A., Tomlin, C. 2005. A case study: Air Traffic Management systems, Encyclopedia of Life Support Systems, Al Gogaisi (Ed.), UNESCO-EOLSS Publishers Co. Ltd. Ref: 6:43:28:8

[5] Boeing Commercial Airplane Group. Air Traffic Management Concept Baseline Definition, NEXTOR Report # RR-97-3, Oct. 31, 1997.

[6] Haraldsdottir, A., Schwab, R. W., Alcabin, M. S. 1998. Air Traffic Management Capacity-Driven Operational Concept Through 2015. 2nd USA/EUROPE AIR TRAFFIC MANAGEMENT R&D SEMINAR Orlando, 1st - 4th December 1998.

[7] Bayen, A. 2003. Computational control of networks of dynamical systems: application to the National Airspace System, Stanford University, Department of Aeronautics and Astronautics.

[8] Donohue, G. L. 2001. Air Transportation Systems Engineering. AIAA. ISBN 9781600864445

[9] Reports on Leading Edge Engineering from the 1997 NAE Symposium on Frontiers of Engineering. National Academy of Engineering. National Academies Press, 1998. ISBN 0309059836, 9780309059831

[10] Nolan, M. 2010. Fundamentals of Air Traffic Control Cengage Learning, ISBN 1435482727, 9781435482722

[11] Woltjer, R., Hollnagel, E. 2008. Functional modeling for risk assessment of automation in a changing air traffic management environment. 4th International Conference on Working on Safety. Crete, Greece.

[12] Ahmad, S, Saxena, V. 2008. Design of Formal Air Traffic Control Systemt Hrough UML. UbiCC Journal - Volume 3 Number 6 , Volume 3 No. 6

[13] European Organisation for the Safety of Air Navigation - Model of the Cognitive Aspects of Air Traffic Control. HUM.ET1.ST01.1000-REP-02 1997.

[14] Prandini, M., Piroddi, L., Puechmorel, S., and S. L. Brazdilova. 2011. Toward air traffic complexity assessment in new generation air traffic management systems. IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 12, no. 3, pp.809 -818 2011 DOI: 10.1109/TITS.2011.2113175

[15] Menon P. K., Sweriduk, G. D., Bilimoria, K. D. 2004. New Approach for Modeling, Analysis, and Control of Air Traffic Flow. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 27, No. 5. pp. 737-744. doi: 10.2514/1.2556

[16] Filho, D. A., Falcão, E. A. 2012. Analysis of Airspace Traffic Structure and Air Traffic Control Techniques. Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Aeronautics and Astronautics. 187 p. 2012 http://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/76097/820457211-MIT.pdf?sequence=2

[17] Marca, D. A., McGowan, C. L. (1988). SADT: Structured analysis and design technique. McGraw-Hill.
[18] Ross, D. T. (1977). Structured Analysis (SA): A language for communicating ideas. IEEE Transactions on Software Engineering, SE-3(1), 16–34.
[19] Ross, D. T. (1985). Applications and extensions of SADT. Computer, 18(4), 25–34.
[20] Hollnagel, E. 2004. Barriers and accident prevention. Aldershot, UK: Ashgate, 226 p. ISBN: 978-0-754-64301-2

FUNCTIONAL MODELLING OF THE OPERATION OF THE AIR NAVIGATION SERVICE PROVIDER

The complex processes of air traffic control require close cooperation between the intra-organizational units. During the fulfilment of the air traffic control tasks significant amount of information is managed. Necessary information for the tasks can be identified by the functional modelling of air traffic control. Thus, the tasks fulfilled by a given organizational unit and the managed information connected to the tasks can be revealed systematically. Therethrough it is possible to create the information structure model which contains comprehensively all information managed by air traffic control. This model provides the basis for the establishment of complex content provider systems which can manage information regarding air traffic control and even aviation related data jointly. The application of these systems contributes to the increase of the efficiency of traffic operations and the more economical operations even in case of air or ground based aviation organizations.

Keywords: *functional modelling, air traffic control, analysis of information systems, information structure*

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_3/2015-3-10-0246_Sandor_Zsolt.pdf

Adrienn Dineva, Annamária R. Várkonyi-Kóczy, József K. Tar

WAVELET-BASED NOISE REMOVAL TECHNIQUE FOR REMOTELY-SENSED DATA

Filtering of the LiDAR data is challenging due to the complex distribution of the surface and the various types of contaminating noises. Also the collected data contain much information that requires the appropriate pre-processing in order to generate good In this paper a new approach has been proposed for denoising and processing LiDar data. The proposed method utilize the advantages of multiresolution analysis and robust fitting. It has been shown that it excellently removes both additive noise and artifacts with retaining the important parts of the surface model. The method requires only low resolution levels and is able to avoid data loss.

Keywords: *wavelet shrinkage, multiresolution analysis, remotely-sensed data, noise cancellation, robust fitting*

INTRODUCTION

Noise cancellation is a primary issue of the theory and practice of signal processing. Several areas of engineering practice benefit from such algorithms, for instance monitoring and fault detection applications, data mining, feature identification in satellite images, etc. LIDAR (LIght Detection And Ranging) is a remote sensing technique based on laser technology. It measures the two way travel time of the emitted laser pulses to determine the distance between the sensor and the ground With LiDAR (Light Detection and Ranging) or airborne laser scanning instruments mounted in aircrafts it has become possible to directly map the elevation of the surface beneath the aircraft's flight path. Combined with a Global Positioning System (GPS) and an Inertial Measurement Unit (IMU), LIDAR can generate a three-dimensional (3D) dense, georeferenced point clouds for the reflective terrain surface

The database collected by LIDAR is a point cloud in three dimensions which contain points returned from the terrain objects, including ground, buildings, bridges, vehicles, trees, and other non-ground features. For many applications it is important to detect, separated, or removed the artifacts in order to generate the digital elevation model [1]. While other applications require the precise reconstruction of the objects. Thus pre-processing is amost important step which includes operations such as remove of systematic errors, filtering, feature detection and extraction,etc. [1]. A comprehensive overview of the major applications of airborne and terrestrial laser scanning can be found in for e.g. [2].

Filtering of the LiDAR data is challenging due to the complex distribution of the surface and the various types of contaminating noises. Also the collected data contain much information that requires the appropriate pre-processing in order to generate good DEMs (Digital Elevation Model) or DSMs (Digital Surface Model) [3][4].

Traditional approaches, such as linear filtering, can smooth the corrupted signal, but with weak feature localization and incomplete noise suppression. Nonlinear filters have been proposed to overcome these limitations.

Among the classical signal processing methods, wavelet-based noise reduction has been successfully applied to filter data, because it provides information at a level of detail, which is not available with Fourier-based methods [5]. Several studies have been carried out regarding the utilization of wavelet theory, for e.g. see [6]. The discrete wavelet transform analyses the signal at different frequency scales with different resolutions by reducing the signal into approximate and detail information. For removing noise, wavelet shrinkage employs nonlinear soft thresholding functions in the wavelet domain. The popularity of this nonparametric method is due to the excellent localization and feature extracting behavior. However several threshold estimators exists, it is still a challenging task to select the appropriate shrinkage method that fits to the type of signal and contaminating noise and further, is robust against impulse type noises [7][8][9].The other major issue in noise reduction is minimizing the effects of extreme values or elements that deviate from the observation pattern (outliers) [10][11]. LiDAR signals contain detailed information and may also contain outliers and random noise, as well as speckle noises that should be filtered out in order to obtain good quality final results.

Several aerial reconnaissance tasks require real-time immediate processing of the data. In order to obtain a good quality result in short time, fast and improved denoising methods are needed. This paper presents a new adaptive shrinkage approach applying adaptive robust fitting technique in the wavelet domain. Using the advantages of multiresolution analysis and robust fitting, efficient denoising can be obtained at low resolution levels providing simultaneously high density impulse noise removal. The proposed algorithm has been tested on LiDAR elevation data. Simulation results demonstrate the applicability of the proposed scheme and ensures good performance by correctly removing the noises and also the spikes and artifacts.

WAVELET SHRINKAGE

1 Basics on Wavelet Transform

In this section we give short outline on the background of wavelet transform. The wavelet transform (WT) maps a time function into a two-dimensional function of ϕ (scale) and τ (translation of the wavelet function along the time axis). Signal $s(t) \in L^2$ is assumed to be a square integrable meaning

$$\int s^2(t)dt < \infty \,. \tag{1}$$

The continuous wavelet transform (CWT) of s(t) is given by [5]

$$CWT = \frac{1}{\sqrt{\phi}} \int s(t)\psi\left(\frac{t-\tau}{\phi}\right)., \tag{2}$$

where $\psi(t)$ denotes the basic (mother) wavelet function. In comparision with the STFT (short time Fourier Transform), in the WT the window width changes mean the dilation or compression a carrier frequency ω_0 becomes ω_0 / ϕ for a window width change from T to ϕ T. When the $\psi(n)$ is a discretization of $\psi(t)$ the discrete WT can be written as follows,

$$DWT(k,n) = 2^{-\frac{k}{2}} \sum_n s(n)\psi(2^{-k}n - m), \tag{3}$$

where k,m integers.

2 Principles of Multiresolution Analysis

The idea of multiresolution analysis (MRA) lies in dividing a signal s(n) into a set of (frequency) scales. of 2^{-k}. Associating with each scale (frequency band) is a subspace of V^k. Formally, let's consider a sequence of increasing nested spaces $\{0\} \subset \ldots V_{-1} \subset V_0 \subset V_1 \ldots \subset H$, that form the basic resolution structure. The scaling function is $\phi \in H$, and its integer $\tau_n \phi$ translates ($n \in Z$) form an orthonormal basis for one of the subspaces V_k of *H*.

Let $\{V_k : V_k \in H\}$ be an increasing sequence of subspaces and $\phi \in V_0$. The multiresolution analysis of the pair $(\{V_k\},\phi)$ of *H* is defined as follows according to [8]

- there is a function $\phi \in V_0$, such that $\tau_n \phi_n$ is an orthonormal basis for V_0 , and
- if any arbitrary function $f \in V_k$ then $D_2 f \in V_{k+1}$ (dilation invariance), further,
- $\overline{\cup V_j} = H$ and $\cap V_j = \{0\}$ (completeness).

Basically, the MRA representation can be constructed by by the integer translation and power of two dilations (denoted by D_2) of the scaling function ϕ. Under the assumption that $(\{V_k\},\phi)$ is a multiresolution analysis of H, let $L_{\phi,k}$ denote the representation associated with the sequence of functions $D_{2^k}\tau_n\phi$. For an arbitrary function $f \in H$, it's k^{th} resolution representation can be written as [5][8],

$$L_{\varphi,k} f = \left\{(f, D_{2^K}\tau_n\phi)\right\} = \left\{(f * D_{2^K}\phi)(2^{-k}n)\right\} \tag{4}$$

a discrete sequence of dilations and translation. Generating an orthonormal basis requires orthogonality between the levels, e.g. the subspaces V_k are not orthogonal to each other. It is necessary to define an auxiliary sequence of subspaces $\{W_k: W_{k+1} \in H\}$, complementary to V_k and orthogonal to V_{k+1}, for each level k that characterizes the difference between V_k and V_{k+1} - which are the wavelet subspaces, so

$V_{k+1} = V_k + W_k$, and

$V_k \perp W_k$.

As the scaling function ϕ, the candidate analyzing wavelet is also a member of V_i , thus there are unique sequences (the scaling filter coefficients) $\{h_n\} = L_{\phi,1}\phi$ and (the wavelet filter coefficients) $\{g_n\} = L_{\phi,1}\psi$, such that, we can formulate the scaling function [8]

$$\phi(t) = \sum_n h_n \phi(2t - n) \tag{5}$$

and the wavelet function [8]

$$\psi(t) = \sum_n g_n \phi(2t - n) \tag{6}$$

3 Wavelet Shrinkage

The first step of wavelet shrinkage is the decomposition of signal into the wavelet (detail and approximate) coefficients, as described in the previous section. The general idea behind wavelet shrinkage is to replace these coefficients with small magnitude to zero (hard thresholding), or set their value to the λ threshold level [12]. Then, the reconstruction process performs the inverse discrete wavelet transform (IDWT). Most of the widely known shrinkage methods construct nonlinear threshold functions based on statistical considerations. An effective and smoothness-adaptive method (SureShrink) is proposed to thresholds each dyadic resolution level using the principle of Stein's Unbiased Estimate of Risk [13][14]. The universal bound thresholding rule also provides good results with low computational complexity [13]; the rule is defined, as follows,

$$\eta = \sigma_{MAD}\sqrt{2\log s_j}, \tag{7}$$

where $\sigma_{MAD} = \frac{\text{median}(\omega_j)}{0.6745}$ denotes the absolute median deviation..The Heuristic Sure thresholding rule is introduced by a heuristic combination of the SureShrink and the universal bound [13];

$$\eta = \begin{cases} \eta_{UB} & \text{if} \quad p \geq q \\ \min(\eta_{Sure}, \eta_{UB}) & \text{if} \quad p < q \end{cases} \tag{8}$$

where $p = \frac{m-k}{k}$ and $q = (\log_2 k)^{\frac{3}{2}}$, $m = \sum_{i=1}^{k} h_i^2$. The Minimax estimator is also a preferred technique [9], the rule is given by

$$\eta = \begin{cases} \sigma_{MAD}(0.3936 + 0.1829\log_2 s) & \text{if } s > 32 \\ 0 & \text{if } s < 32 \end{cases} \tag{9}$$

The specific choice of the wavelet function, decomposition level, and thresholding rule allows to construct many different shrinkage procedures. Further, the details of signal and also the type of contaminating noise.

ADAPTIVE SMOOTHING IN THE WAVELET TRANSFORM DOMAIN

1 Robust Fitting and Outlier Detection

Many works have been published on eliminating the outliers during the signal pre-processing. It has been proven, that the robust local polynomial regression technique is a very powerful technique for such problems [15]. At first, consider the classical noise suppression problem:

$$y_i = f(t) + \varepsilon_i \qquad i=1,...,s \tag{10}$$

where y_i is the observed noisy data and ε_i represents the random noise, which is an independent and identically distributed (iid) process, and (t) stands for time. Let *f* denote the unknown function. The principle of the local polynomial regression (loess) procedure can be summarized as follows. Function *f*(t) can be approximated by fitting a regression surface to the data by determining a local neighbourhood of an arbitrary (t_0). These neighbouring points are weighted depending on their distance from (t_0). The closer points get larger w_i weights [16]. The estimate $\hat{f}$ is obtained by fitting a linear or quadratic polynomial using the weighted values from the neighbourhood. Because this procedure relies on least squares regression,it is known that this

is vulnerable to outliers that can significantly degrade the result. In order to introduce robustness in the procedure an iterative reweighting is proposed with bisquare method [16]. Detailed description of these procedures can be read in [17].

2 Noise-cancellation of Remotely-sensed Data

In order to produce a good elevation model from LiDar data that meets the required accuracy an appropriate noise cancellation method should be applied. There are sevearl source of noise that can occur in airborn the laser scanning system that can distort the data. In a previous work of the autors, it has been shown that the application of robust fitting in the wavelet trasform domain can remove excellently different types of contaminating noises [18]. In the present paper we demonstrate that the improved version of the previous method is suitable for preprocessing LiDar data. The proposed method includes the following steps. Firstly, the raw data of the vertical direction is decomposed with orthogonal wavelet functions that correctly divide the detail and approximate coefficients of the signal. Then, a local polynomial regression curve is fitted on the coefficients with w_i weights. After computing the residuals the robust weights are calculated with bisquare function and the fitting is repeated with these new weights. Finally, the inverse discrete wavelet transform reconstructs the data from such modified coefficients.

3 Simulation Results

The performance of the proposed method has been tested on a set of raw LiDar point cloud obtained from [19][20] that corrupted with additive white Gaussian noise and impulse noises (Fig.1.). The dataset consists of 4772 points. The results have been compared with two other shrinkage algorithms. The simulation has been built by using Matlab8. The performance has been measured by the root mean square error (RMSE) and the signal to noise ratio (SNR), given by the formula below

$$\mathrm{SNR}_{\mathrm{dB}} = 10\mathrm{x}\log_{10}\frac{\sigma^2{}_{\mathrm{s}}}{\sigma^2{}_{\mathrm{n}}} \tag{11}$$

where $\sigma^2{}_{\mathrm{s}}$ denotes the variation of the signal after denoising and $\sigma^2{}_{\mathrm{n}}$ is the variation of the eliminated noise. For the decomposition an orthogonal symlet has been applied [5] . The results are summarized in Table1. Fig. 2. shows the result of denoising with the Heuristic Sure method using 5 levels of decomposition while Fig. 3. displays the result for using minimax shrinkage rule at 8 level of decomposition. It can be observed that the classical shrinkage methods cannot handle the outliers. In Fig 4. the performance of the proposed method can be observed using 3 levels of decomposition.

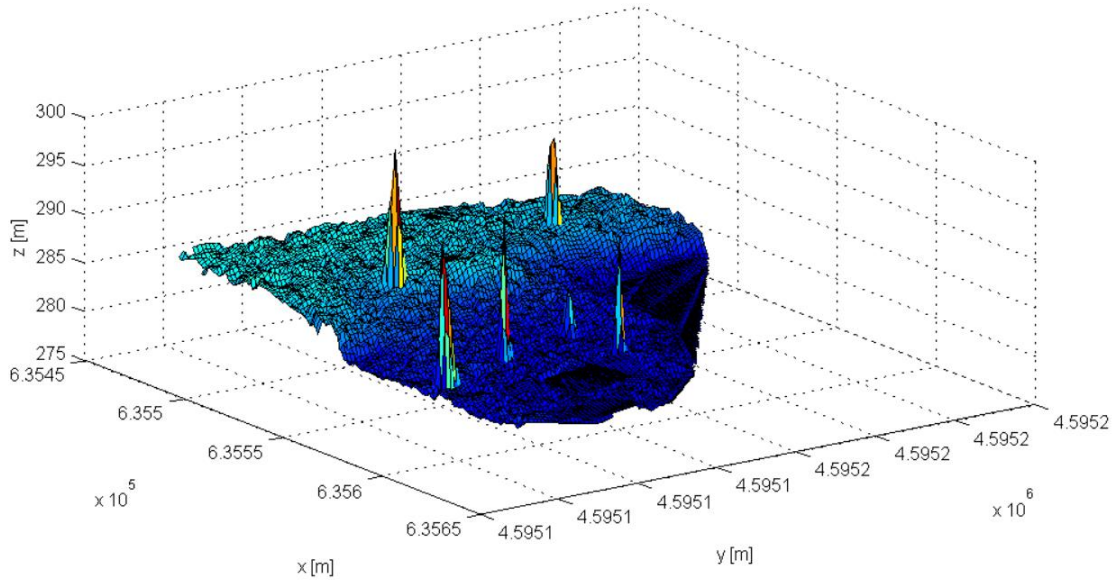


Figure 1.: Raw LiDar data with additive white Gaussian noise and impulse – type noises

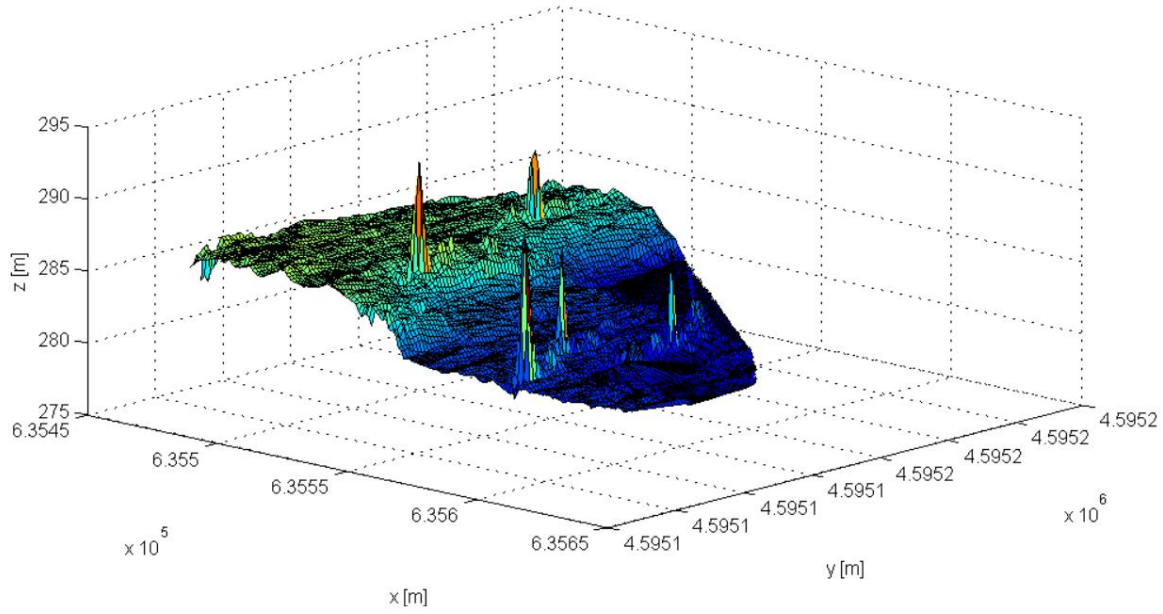


Figure 2.: Result of noise removal with Heuristic Sure method.

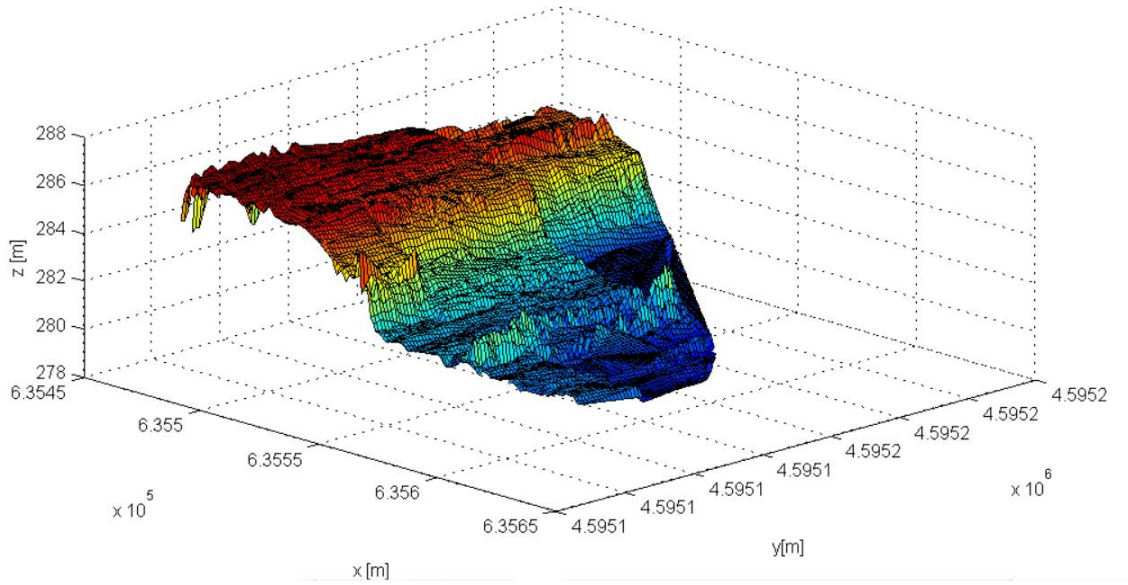


Figure 3.: Result of noise removal with Minimax shrinkage method.

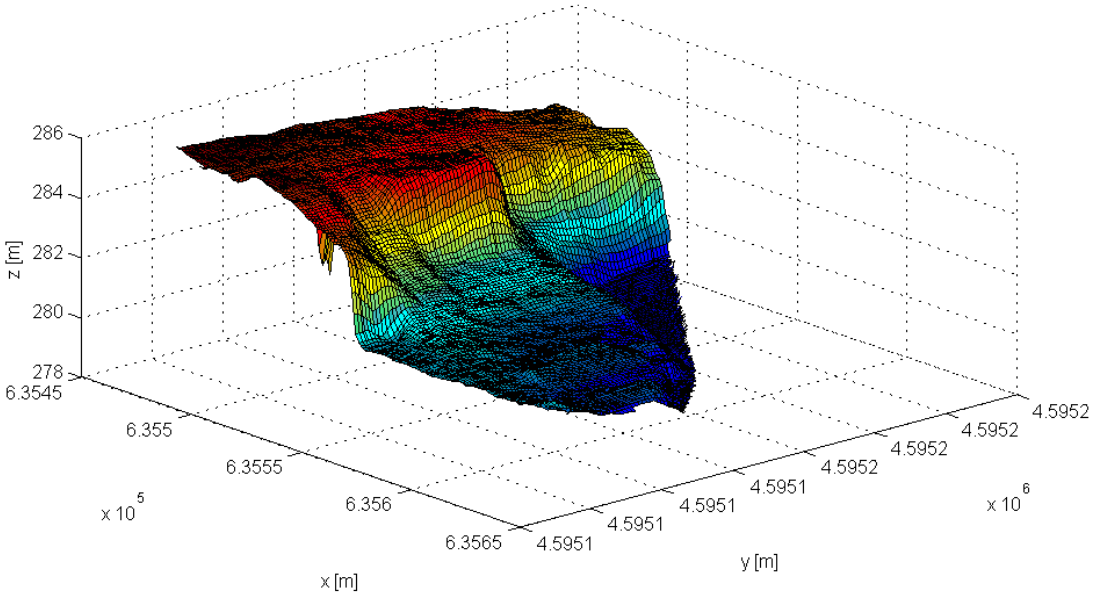


Figure 4.: Result of noise removal with robust fitting in the wavelet transform domain.

	Original noisy data	Denoised data (heursure)	Denoised data (minmax)	Denoised data (robust fitting in wavelet domain)
SNR [dB]	3.29891 E+01	3.7991270E+01	4.00261E+01	5.75986 E+01
RMSE	1.54890E+00	1.0324	1.1230	0.532
Time [s]		1.11579E+00	1.79541E+00	1.02549E+00

Table 1: Simulation Results

CONCLUSIONS

In this paper a new approach has been proposed for denoising and processing LiDar data. The quality of the point cloud data produced by airborne lase scanning depends on several factors for instance the GPS and Inertial Measurement Unit accuracy, angular accuracy, extended GPS base lines and boresight calibration, etc. LiDAR signals contain detailed information and may also contain outliers and random noise, as well as speckle noises that should be filtered out in order to obtain good quality final results.

The proposed method utilize the advantages of multiresolution analysis and robust fitting. It has been shown that it excellently removes both additive noise and artifacts with retaining the important parts of the surface model. The method requires only low resolution levels and is able to avoid data loss.

ACKNOWLEDGEMENT

This work has been sponsored by the Hungarian National Scientific Research Fund (OTKA 105846).

REFERENCES

[1] BALTASAVIAS, E.P.: Airborne laser scanning: basic relations and formulas. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54, pp. 199-214., 1999

[2] VOSSELMANN, G, MAA, H.G. (Eds.): Airborne and Terrestrial Laser Scanning, Whittles Publishing, ISBN 978-1904445-87-6, 320 p., 2010

[3] SITHOLE, G., VOSSELMANN, G.: Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. ISPRS JPRS. Volume 59, Issues 1-2., 2004

[4] BROVELLI, M. A., Cannata M. and Longoni U. M.: LIDAR data filtering and DTM interpolation within GRASS, *Transactions in GIS*, vol. 8, iss. 2, pp. 155-174., 2004

[5] DAUBECHIES, I.: The Wavelet Transform, Time Frequency Localization and Signal Analysis, IEEE Trans. Inform. Theory 36, 961–1005, 1990

[6] SOUMELIDIDS, A., BOKOR, J., SCHIPP, F., Applying hyperbolic wavelet constructions in the identification of signals and systems, SYSID 2009. 15th IFAC symposium on system identification, Saint-Malo, Kidlington: Elsevier; IFAC; Kidlington, pp. 1334-1339., 2009

[7] DONOHO D.L., JOHNSTONE, I.M.: Adapting to Unknown Smoothness via Wavelet Shrinkage, Journal of the American Statistical Association 90, 1200–1224, 1995

[8] TEOLIS, A.: Computational Signal Processing with Wavelets, Birkhauser Boston, 1998

[9] DONOHO D.L., JOHNSTONE, I.M: Minimax Estimation via Wavelet Shrinkage, Annals of Statistics 26,pp.879–921, 1998

[10] lVERA-AZCARATE, A. et al.: Outlier detection in satellite data using spatial coherence,. Remote Sensing of Environment 119,pp. 84–91, 2012

[11] FOX, J.: Nonparametric Simple Regression, Thousand Oaks, CA: Sage Publication Inc., 2000

[12] DONOHO, D.L.: De-noising by Soft-thresholding, IEEE Trans. on Inf. Theory 41(3),pp. 613–627, 1995

[13] DONOHO D.L., JOHNSTONE, I.M.: Ideal Spatial Adaptation via Wavelet Shrinkage, Biometrika 81,pp. 425–445, 1994

[14] STEIN, CHARLES, M.: Estimation of the Mean of a Multivariate Normal Distribution, The Annals of Statistics 9(6),pp. 1135—1151, 1981

[15] ROUSSEEUW, P. J., LEROY, A. M.: Robust Regression and Outlier Detection, John Wiley & Sons, 2005

[16] CLEVELAND, W. S.: Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatterplots, Journal of the Am. Stat. Ass. 74,pp. 829–836, 1979

[17] CLEVELAND W. S., McGILL, R.: The Many Faces of Scatterplot, Journal of the Am. Stat. Ass. 79, pp. 829–836, 1984

[18] A. DINEVA, A. R. VÁRKONYI-KÓCZY, J.K.TAR:Camarinha-Matos L M, Baldissera T A, Di Orio G, Marques F (Ed.) Improved Denoising with Robust Fitting in the Wavelet Transform Domain, Costa da Caparica, Portugal,2015.04.13-2015.04.15.,(IFIP Advances in Information and Communication Technology;Technological Innovation for Cloud-Based Engineering Systems 450.),Cham: Springer International Publishing, ISBN:978-3-319-16765-7, 2015

[19] INDIANAMAP FRAMEWORK DATA, http://www.indianamap.org

[20] OPENTOPOGRAPHY, http://opentopo.sdsc.edu/datasets

TÁVÉRZÉKELT ADATOK WAVELET-ALAPÚ ZAJSZŰRÉSE

A légi lézerszkennelésből (airborne LiDAR – Light Detection and Ranging) nyert adatok zajszűrése a kívánt pontosságú digitális terepmodellelőállításához napjainkban is kihívást jelent. A LiDar pontfelhő számos forrásból eredő torzításokat tartalmazhat. Jelen munkában a LiDar adatok előfeldogozásához alkalmas wavelet-alapú eljárást mutatunk be. A wavelet segítségével alacsony felbontási szinten is jól elkülöníthetők a zaj és a jel fontos részleteit tartalmazó atomok. Ezekre alkalmazva a robusztus illesztést az extreme értékek, torzítások is eltávolíthatók szemben a klasszikus shrinkage eljárásokkal.

Kulcsszavak: *wavelet transzformáció, multirezolúciós felbontás,távérzékelt datok, zajszűrés,robusztus illesztés*

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_3/2015-3-11-0235_Dineva_Adrienn_et_al.pdf

Madácsi Richárd

DATA SCIENCE TECHNIKÁK ALKALMAZÁSA A FUTÓPÁLYA-HATÉKONYSÁG NÖVELÉSÉBEN

A futópálya hatékonyság növelése fontos célja a SESAR[1]-nak. Több potenciális megoldás is létezik a végső egyenesen való térközök szűkítésére, ami a megfelelő repülésbiztonsági kritériumok betartása mellett növeli a futópálya áteresztő képességét. Ennek a törekvésnek a támogatásához segítségül hívhatjuk a data science területet is, különös tekintettel a gépi tanulási algoritmusokra. A cél, megbecsülni egy érkező légijármű futópálya-elhagyási helyét, és az alapján a futópálya-foglaltsági időből származtatható térköz csökkenthető. Fontos továbbá becsülni egy adott gurulóúton való futópálya-elhagyás valószínűségét, hogy a csökkentett térköz okozta repülésbiztonsági kockázatokat még időben kezelni lehessen.

Kulcsszavak: *data science, machine learning, futópálya-hatékonyság, repülésbiztonság*

BEVEZETÉS

A HungaroControl Magyar Légiforgalmi Szolgálat Zrt-nél más komoly, nagy cégekhez hasonlóan temérdek adat keletkezik. 20–30 évvel ezelőtt, amikor adattároló és feldolgozó kapacitás nem volt elérhető áron megfelelő minőségben, még bocsánatos bűnnek számított, hogy a bitekben, bájtokban összegyűlt tudás a virtuális szemétdombra került. 2015-ben azonban egy modern ANSP[2] már nem engedheti meg magának, hogy a fokozódó nemzetközi versenyben ne legyen tisztában működésének minden rezdülésével, és azokra ne reagáljon a megfelelő módon.

Az adatok felhasználását tekintve azonban az emberekben sokszor egy statikus kép él a magyar terminológia hiányában data science-ként emlegetett területtel kapcsolatban. Ezt a tudományt, foglalkozást űző szakemberekre vonatkozó általános definíció szerint a data scientist feladata az adatokban rejlő rejtett összefüggések, értékes tudás kibányászása. Ez viszont távolról sem jelenti azt, hogy az eltárolt adatokból néhány lekérdezéssel, és a lekérdezés eredményéből valamely statisztikai mutató számításával bezárul a data scientist tevékenységi köre. Jelen cikk célja annak bemutatása, hogy hogyan lehet légiforgalmi irányítói támogató eszköz fejlesztésében felhasználni a fejlett, adattudósok által használt algoritmusokat, módszereket.

FUTÓPÁLYA-HATÉKONYSÁG

Európai törekvés, hogy a repülőtér kapacitását, ami a European ATM Master Plan[3] kontextusában a futópálya-áteresztő képességet jelenti, legalább 14%-kal növeljék [1]. Ez egyelőre a legnagyobb forgalmú „best-in-class” reptereket érinti kötelezően.

A futópálya-kapacitást érkező forgalom tekintetében a végső egyenesen a két egymást követő légijármű között tartandó térközök nagysága befolyásolja. Ezeknek a térközöknek két alapvető

[1] Single European Sky ATM Research - Egységes Európai Égbolt légiforgalom-szervezési Kutatási Program
[2] Air Navigation Service Providers – Léginavigációs szolgáltató
[3] Európai Légiforgalmi Szolgáltatási Főterv

funkciója van; veszélyes közelség megelőzése a levegőben, valamint veszélyes közelség megelőzése a földön. Az előbbire példa a radar- és turbulencia elkülönítési minimum, az utóbbira pedig a pályaelhagyási időkből számított, időben történő pályaelhagyást biztosító térköz (futópálya-elkülönítés). Értelemszerűen ezen értékek csökkentésével növelhető egy futópálya érkező kapacitása. A kérdés az, hogy hogyan.

Radarelkülönítési minimum

A radarelkülönítési minimum csökkentése a legegyszerűbb, hiszen az egy nemzetközi előíráson alapul, ami viszont egy komoly kockázatelemzésen. A SESAR 6.8.1 projekt egyik célja a 2NM radarelkülönítési minimum bevezetése a megkívánt felderítési teljesítmény (Required Surveillance Performance – RSP) előírásokon keresztül [2].

Turbulencia elkülönítési minimum

A turbulencia esetére előírt értékek csökkentésére több, egymásra épülő javaslat létezik. Az első lépés a jelenlegi, több mint 40 éves, légijármű kategóriákra alapuló ICAO[4] szabályok felülvizsgálata. Az Eurocontrol[5] RECAT-EU programja szintén légijármű kategóriákat vesz alapul, de sokkal nagyobb felbontásban, így egyszerre tudja a hatékonyságot és a repülésbiztonsági szintet növelni [3][4]. A következő lépés a légijármű kategóriákról a légijármű típusokra való áttérés. Ez egy elkülönítési mátrixot jelent, ahol a sorok és oszlopok egy-egy légijármű típust jelentenek, a mátrixban szereplő értékek pedig az adott géppárra vonatkozó (Pair Wise Separation) turbulencia elkülönítési minimumok[4]. Ennél is tovább megy a dinamikus páronkénti szeparáció elve, ami már nem egy statikus elkülönítési mátrix használatát írja elő, hanem egy olyan függvény felállítását tűzi ki célul, amely a légijármű típusán kívül figyelembe veszi az időjárási körülményeket, valamint a légijármű által lesugárzott, dinamikus paramétereket [4][5].

Időn alapuló elkülönítés

A jelenlegi, távolságban meghatározott turbulencia elkülönítési minimumok nem veszik figyelembe az adott helyzet meteorológiai jellemzőit. Erős szembeszélben a végső egyenesen egymást követő légijárművek föld feletti sebessége csökken, így megnő a köztük lévő időkülönbség. Az első légijármű által keltett esetleges turbulencia eloszlásához viszont egy adott, időben meghatározott érték szükséges. Emiatt bizonyos szélviszonyok mellett a rendszer túl konzervatív, és így pazarlóvá válik [5]. Ennek megoldására merült fel az időn alapuló elkülönítés koncepciója, ahol a légiforgalmi irányítóknak már nem egy adott távolságot kell biztosítani két légijármű között abban a pillanatban, amikor az első légijármű átrepüli a küszöböt [6], hanem egy idő értéket.

Az időn alapuló elkülönítés módszerét abban az esetben is érdemes használni, amikor a futópálya infrastruktúra nem teszi lehetővé a lehető legkisebb radarelkülönítési minimum alkalmazását, mert a futópálya-foglatsági időkből számított térköz nagyobb elkülönítést tesz szükségessé.

[4] International Civil Aviation Organization - Nemzetközi Polgári Repülési Szervezet
[5] Európai szervezet a légi közlekedés biztonságáért

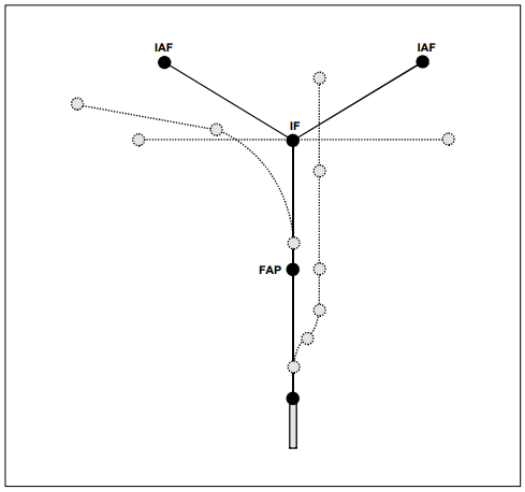
Futópálya-foglaltsági idő menedzsment

A futópálya-elkülönítés végső egyenesre vonatkozó követelményei egyértelműen a futópálya-foglaltsági időkből (Runway Occupancy Time – ROT) származtathatók. Ebből következően érdemes ezt a paramétert is megpróbálni úgy befolyásolni, hogy abból hatékonyság növekedés származzon a repülésbiztonsági mutatók romlása nélkül. Ezek módjai az optimalizált fékezés leszállás után egy adott gurulóúton való elhagyás érdekében [8] valamint a ROT becslése a légijármű karakterisztikái alapján [7].

AUTOMATIZÁLÁS

A futópálya-hatékonyság növelését célzó tervekből egyértelműen látható, hogy a végső egyenesen való radarirányítói működés magas fokú automatizálást von maga után. A jelenlegi munkamódszer szerint a légijárművek végső egyenesre helyezésekor a bevezető irányító a hazai jogszabályokban és az ATS kézikönyvben lefektetett szabályoknak, elkülönítési értékeknek megfelelően dolgozik, ahol a szükséges értékeket az irányító a relatív kevés esetre való tekintettel fejben tudja tartani. A géppáronként eltérő értékeket előíró szeparációs mátrix viszont már annyi adatot tartalmazna, amit nem lehet megtanulni. Ha ezek nem is fix értékek, hanem szituációról szituációra változnak, akkor az adott helyzetre vonatkozó számított elkülönítés értékeket az irányító számára meg kell jeleníteni a radarképernyőn. Az időn alapuló elkülönítés koncepciója is szükségessé teszi a szeparációs indikátorok elhelyezését a végső egyenesen, amely az időben számított, de a légiforgalmi irányító radarképernyőjére távolságban megjelenített elkülönítések pontos nagyságát jelölik [5].

A végső egyenesen való radarirányítás magas fokú automatizálása mellett további érv a nem egyenes szakaszú végső megközelítéssel rendelkező légiforgalmi eljárások megjelenése. Természetesen az akadályok és a domborzati viszonyok kevés repülőtéren indokolják ezeknek a fejlett eljárásoknak az alkalmazását, de nem szabad megfeledkezni a zajvédelmi problémákról, amelyre hathatós megoldást jelenthet ez a fejlesztés [8].



1. ábra Fordulót tartalmazó és egyenes megközelítés [11]

A fenti ábrán látható szituáció könnyen előállhat a jövőben, amikor a zajvédelmi eljárást lerepülni képes járatok párhuzamosan üzemelnek majd a hagyományos végső egyenest használó érkezőkkel. A küszöbre előírt, időn vagy távolságon alapuló térköz létrejöttét és fenntartását szemmel szinte lehetetlen a fenti eljárás konfigurációban biztosítani, így szükséges az irányítói eszközök fejlesztése. A HungaroControl már alkalmaz egy olyan eszközt [12], amely a hátralévő útvonalak hosszát méri, és annak különbségét kijelzi a légiforgalmi irányítóknak, ami a több különböző útvonalon végrehajtott megközelítés esetére is megfelelő megoldást nyújt. Mivel az eszköz tetszőleges szükséges térköz érték bevitelét lehetővé teszi, ezért mind a szeparációs mátrix, mind pedig az időn alapuló elkülönítés támogatására alkalmas.

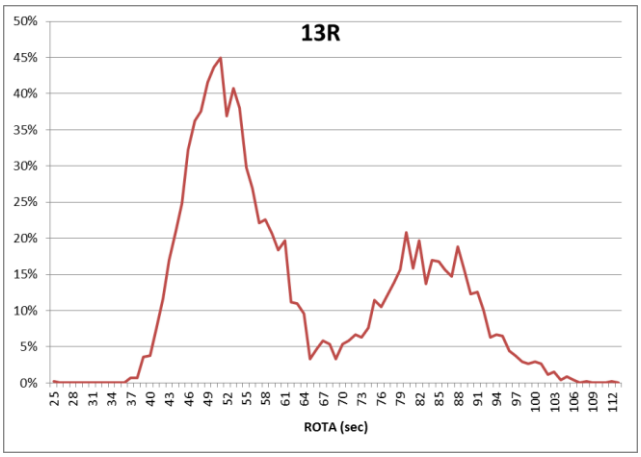
Amennyiben elfogadható az az érvelés, hogy a magasabb fokú automatizálásra a jövőben szükség lesz, továbbá már jelenleg is létezik egy eszköz, ami a várható előírásokkal, fejlesztési irányokkal kompatibilis, érdemes elgondolkodni, hogy milyen egyéb extra funkciót lehet beépíteni.

FEJLESZTÉSI JAVASLAT

Ahhoz, hogy a végső egyenesen a futópálya-elkülönítés nagyságát befolyásoló pályaelhagyási időt becsüljük, a légijármű tulajdonságait már a végső megközelítés előtt meg kell figyelni, ebben a fázisban viszont még szinte azonos paraméterekkel üzemelnek az érkezők. A pályaelhagyási idő többek között függhet a küszöbátrepülési sebességtől, a kilebegtetés hosszától, a talaj menti széliránytól és erősségtől, a futópályán való fékezést befolyásoló tényezőktől. Ezen tényezők megfigyelése és futópálya-foglaltsági idő becslésében való felhasználása már túl késő ahhoz, hogy az eredmények alapján esetlegesen kisebb térközt hozhasson létre a bevezető irányító a végső egyenesre való ráhelyezésnél a futópálya áteresztőképességének növelése érdekében.

Azt viszont könnyebben megállapíthatjuk, hogy bizonyos géptípusok bizonyos meteorológiai körülmények mellett képesek például a LHBP6 13R jelű futópályáját a J4 gurulóúton elhagyni. Ez azért fontos, mert az alábbi diagramon is látható, hogy a különböző gurulóutak pályaelhagyásra való használata több móduszú pályaelhagyási idő eloszláshoz vezet. A végső egyenesre vonatkozó futópálya elkülönítéshez a legrosszabb esettel számoltunk annak érdekében, hogy a repülésbiztonsági kritériumok által meghatározott számot ne lépje túl semmilyen körülmény esetén sem a futópálya sértések száma. Ebből következően, ha nagy pontossággal meg tudnánk állapítani a futópálya elhagyásának várható helyét, akkor az adott (például J4) gurulóúthoz tartozó legrosszabb értéket vennénk figyelembe (~70 sec) a teljes eloszlás legrosszabb értéke helyett (~110 sec). Ez a végső egyenesen előírt térközökben is nagyságrendileg hasonló csökkenést vonna maga után.

[6] Budapest Liszt Ferenc Nemzetközi repülőtér ICAO kódja



2. ábra Futópálya-foglaltsági idők 13R pálya esetén, érkezők

A gurulóút becslése viszont önmagában még nem megoldás. Mi történik akkor, ha mégsem azon a ponton hagyja el az érkező a pályát, amire a radarirányító számára előírt térköz lett számolva?

Az időn alapuló elkülönítés koncepcióját használva a könnyebb megértés érdekében, tételezzük fel, hogy a J4 gurulóutat és legrosszabb esetben 70 másodperces pályaelhagyást feltételezve az előírt időbeli elkülönítés is éppen 70 másodperc. Mivel az elkülönítés a pályaküszöbre vonatkoztatva van előírva, ha az első légijármű 70 másodperc alatt nem tudja elhagyni a pályát, akkor a második érkező már átrepülte a küszöböt és lényegében leszállt, így futópályasértés történt. Ha tehát a repülőtéri irányító azt látja, hogy az első érkező nem hagyja el a pályát J4 gurulóúton, akkor a 70 másodperc már biztos nem lesz elég a pálya végén való elhagyásra, viszont a következő érkező ebben a helyzetben már nem biztos, hogy utasítható a megközelítés megszakítására (3. ábra).



3. ábra

A feladat tehát nem pusztán a várható gurulóút becslése, hanem egy „safety tool” megalkotása is. Utóbbi célja annak a valószínűségnek a számítása, hogy a leszálló, futópályán fékező légijármű a várt gurulóúton elhagyja a pályát. Ez az eszköz a tervek szerint már akkor figyelmeztetné a repülőtéri irányítót a második érkező átstartoltatásának szükségességéről, amikor egyrészt még „szemmel” nem egyértelműen megítélhető a forgalmi helyzet, másrészt a soron következő légijármű nem repülte át a megszakított megközelítés kiadásának legkésőbbi pontját.

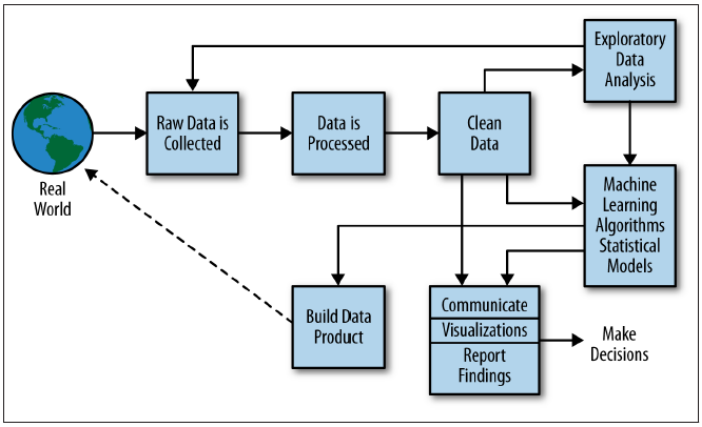
A fejlesztés abban az esetben is használható, ha a gurulóutak becslését, és az ebből következő alternatív térközértékek használatát egyelőre nem vezetik be. A légiforgalmi irányító akkor engedélyezheti a leszállást, amennyiben „kellő biztosíték van arra, hogy amikor a légijármű keresztezi a futópálya küszöbét a 7.9.1 vagy a 7.10 pontban előírt elkülönítés fenn fog állni…”. A jogszabály[7] 7.9.1 pontja pedig kimondja, hogy a „végső megközelítés során általában nem engedélyezhető, hogy a légi jármű keresztezze a futópálya küszöbét mindaddig, amíg az előtte elindult légi jármű át nem repülte a használatos futópálya végét, vagy fordulóba nem kezdett, vagy amíg az összes előtte leszállt légi jármű szabaddá nem tette a használatos futópályát”. Tehát az irányítónak nem egy objektív helyzetet kell kiértékelni, hanem meg kell ítélni, hogy adott helyzet fenn fog-e állni a jövőben. Mivel erre nincs semmilyen támpont a tapasztalaton kívül, a konzervatív, biztonság irányába történő hibázás adott esetben felesleges átstartoláshoz vezethet. Ha egy algoritmus számolja az időben való pályaelhagyás esélyét, az kétesélyes helyzetben a leszállási engedély kiadása körüli dilemmákat is segítene megoldani.

Mivel az ANSP-k rengeteg adattal rendelkeznek mind a végső megközelítésen való működésről (radar) mind pedig a földi manőverekről (ASMGCS[8]), a fejlesztési javaslat megvalósításához érdemes ezekhez az adatokhoz fordulni. A légiforgalmi irányító a tapasztalatát tudja hasznosítani a már említett, leszállási engedély kiadásához szükséges helyzetmegítélésben. Ebből következően érdemes lenne valahogy összesíteni a tapasztalatokat. Egy légiforgalmi irányító az összes leszállás töredékével szembesül, ami a tapasztalatát tudja gyarapítani. Ha minden létező légijármű manőverből szeretnénk egy tapasztalati adatbázist építeni a hatékonyabb munkavégzés elősegítésére, akkor a gépi tanulás (machine learning) területhez kell fordulni.

GÉPI TANULÁS

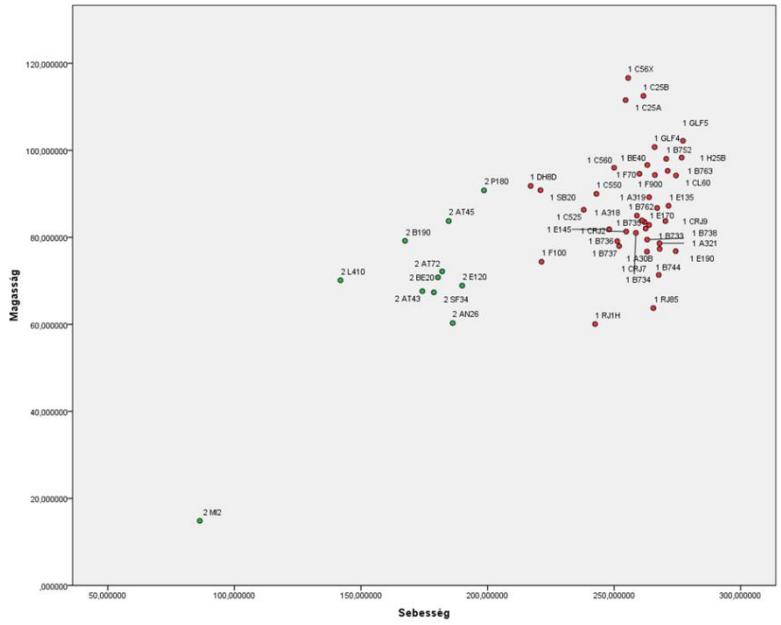
A data science általánosságban egy üzleti probléma adatokra való lefordítását, adatok gyűjtését, feldolgozását, tisztítását és formázását jelenti [13], amelyben a gépi tanulás szerepe sokszor elsikkad. Ahhoz, hogy data science-ről beszélhessünk, az adatbázisban tárolt adatok használatán túl szükséges adat termékek létrehozása is [14]. Ehhez viszont az adatokkal modelleket kell építeni, hogy megérthessük az adatok által reprezentált világot, aminek egyik módja a gépi tanulási algoritmusok használata.

[7] A légiforgalom irányításának szabályairól 16/2000. (XI. 22.) KöViM rendelet
[8] Advanced Surface Movement Guidance and Control System - Kiterjesztett földi mozgást felderítő és ellenőrző rendszer



4. ábra Data science workflow [15]

A gépi tanulási algoritmusokat többnyire előrejelzésre, osztályozásra és klaszterezésre használják [15], valamint két alapvető csoportba sorolhatjuk őket: felügyelt és felügyelet nélküli tanulás [15]. Utóbbira jó példa a HungaroControl ATS[9] kézikönyvének felülvizsgálatakor alkalmazott légijármű kategorizálás sebesség és emelkedési mérték alapján. Az induló légijárművek elkülönítéséhez két értéket használnak a TWR[10] légiforgalmi irányítók, 5NM valamint 7NM. Az előbbire példa a jet majd légcsavaros géppár, az utóbbira pedig a fordított eset. Az irányítói tapasztalat szerint bizonyos gyorsabb turboprop típus esetén az előírt minimumnál nagyobb térközt érdemes tartani. Így felmerül a kérdés, hogy a hajtómű alapján való megkülönböztetéssel az elkülönítési értékek megfelelően szavatolják-e az elvárt repülésbiztonsági szintet. A légijármű típusok említett paraméterek alapján való két klaszterbe sorolása hozzávetőlegesen a jet-turboprop kategóriákat adta vissza, két fontos kivétellel. A DH8D és SB20 turboprop típusok a jellemzői alapján inkább a jet-ekhez sorolandók.



5. ábra Légijármű típusok klaszterezése

[9] Air Traffic Services – Légiforgalmi szolgálatok
[10] Aerodrome control tower – Repülőtéri irányító torony

Tehát a felügyelet nélküli tanulás oly módon végez például csoportosítást, hogy nem adunk meg az algoritmus számára jó válaszokat, rábízzuk az algoritmusra, hogy a rejtett mintákat magától felfedje.

Felügyelet nélküli tanulási módszerek a teljesség igénye nélkül:

- K-közép módszer (k-means clustering);
- hierarchikus klaszterezés (hierarchical clustering);
- nem negatív mátrix faktorizáció (non-negative matrix factorization);
- független komponens analízis (principal component analysis.

Mivel a célváltozó (futópályaelhagyás helye, futópályaelhagyási idő) a tanulóhalmazban ismert, alkalmazhatunk felügyelt tanulást a fejlesztési javaslat megvalósításához.

Felügyelt tanulási módszerek:

- neurális hálózat;
- döntési fa (decision tree);
- naive bayes;
- kNN (k nearest neighbours).

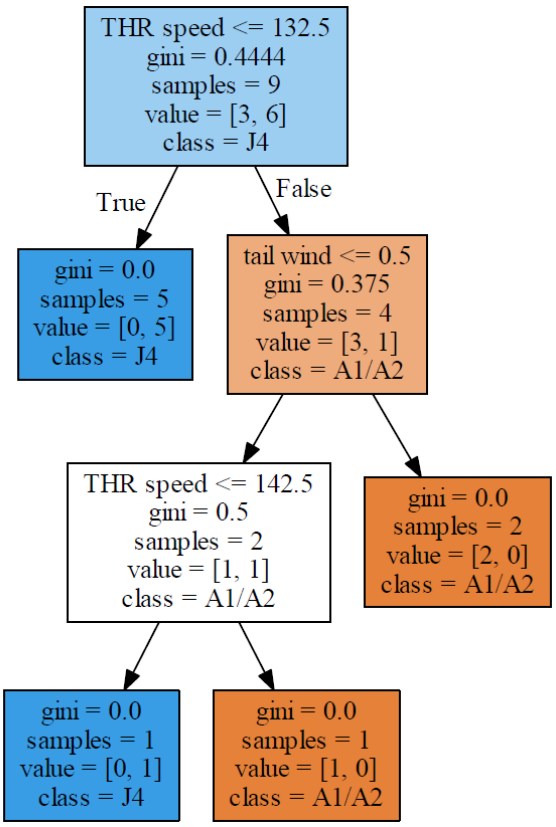
ALGORITMUSOK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

Neurális hálózat

Az első megoldási lehetőség a neurális hálózatok alkalmazása. Mivel a kifejlesztendő eszköz egyfajta „safety net”-ként üzemelne, ezért előnyös egy megoldásnál, ha a működési modell könnyen interpretálható. Ennek célja kettős. Egyrészt az eszköz használatbavételéhez szükséges repülésbiztonsági dokumentációban annál könnyebb bizonyítani az új működési környezet repülésbiztonsági megfelelőségét, minél inkább átlátható maga a működési mechanizmus. Továbbá nem szabad elfelejteni, hogy az eszközt emberek használnák, így nekik bízniuk kell a módszer helyességében. Mivel a neurális hálózatokban az egyes neuronokhoz tartozó súlyváltozók konkrét jelentése még egy egyszerűbb hálózatban is bizonytalan, ezért ebben a problémában a használata nem szerencsés, csak ha nagyságrendileg ad pontosabb eredményt a többi algoritmusnál.

Döntési fa

A könnyen interpretálhatóság követelményének való megfeleléshez a kézenfekvő megoldás a döntési fa használata. A CART (Classification and Regression Tree) algoritmusa átnézi az összes, modellben használatos változót, rekurzív módon, lépésről lépésre megkeresi azt a paramétert, amely a klasszifikáció szempontjából legjobban meghatározzák az eredményt, és az alapján felosztja az adatokat [17]. Ennek az algoritmusnak az eredménye egy olyan, fa reprezentációba megjeleníthető ha-egyébként (if-else) rendszer, amely könnyen áttekinthető, és egy megfigyelt paraméterlistával könnyen és gyorsan lefuttatható. Például a fa tanítása után előálló potenciális megoldás J4-on való pályaelhagyásra fiktív adatok felhasználásával:



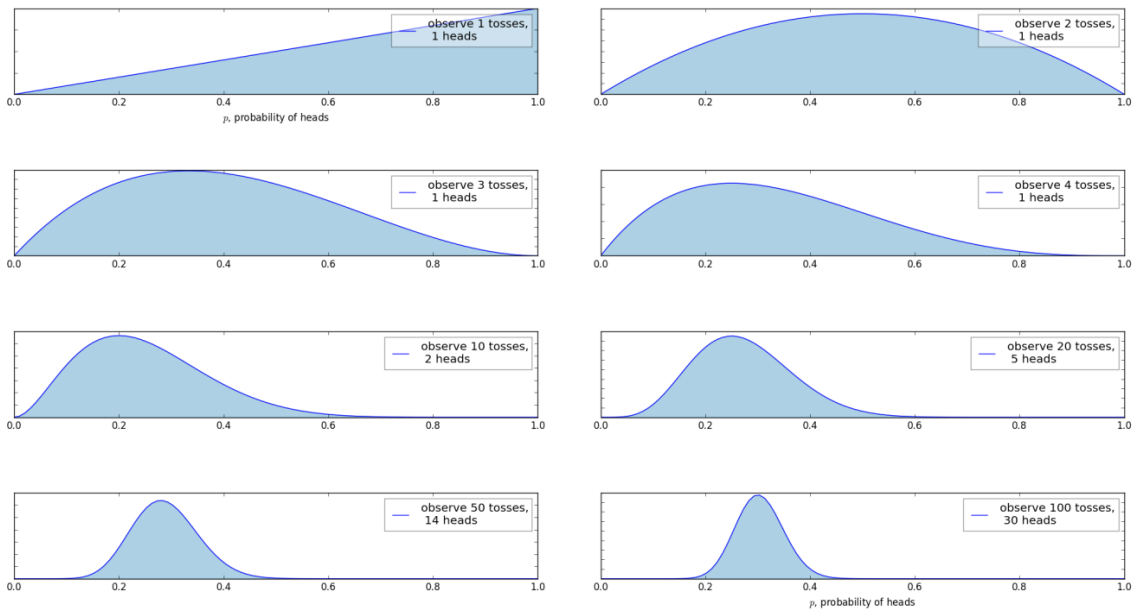
6. ábra Fiktív döntési fa J4 vagy pályavégi (A1/A2) elhagyásra

A döntési fa eredménye egy igen-nem válasz a pályaelhagyást illetően. A modell működésének jósági foka, a helyes válasz valószínűsége csak globálisan értelmezhető, és a teszthalmazon való futtatás eredménye. Arról nincs információ, hogy egy konkrét esetben mekkora az esélye a helyes outputnak. Ez azonban alááshatja a rendszerbe vetett bizalmat az felhasználónál, hiszen mi történik, ha az átlagostól nagymértékben eltérő működést figyel meg (például túl sokáig tart a kilebegtetés). A döntési fán alapuló rendszer egy adott megbízhatósággal üzemel, amely az átlagos eseteken alapul, mint ahogy a légiforgalmi irányító tapasztalata is. Tehát pont akkor nem biztos, hogy tud segíteni, amikor kellene.

Naive Bayes

Egy leszálló légijármű paramétereit illetve azok változásait megfigyelve az irányító a tapasztalatát használva egy adott pontossággal meg tudja ítélni egy helyzet bekövetkeztének esélyét, és az alapján döntést hoz. A matematika nyelvére lefordítva ez azt jelenti, hogy az irányító egy esemény bekövetkeztének előzetes (a priori) valószínűségét a megfigyelt adatok ismeretében felülvizsgálja, és kialakítja magában a megfigyelés utáni (posteriori) valószínűséget.

Mekkora egy érme feldobásánál a fej esélye? Az a priori, tapasztalati esély alapján 50%-ot várnánk, de ezt módosíthatják egy kísérlet eredményei. Ahogy egyre többször figyeljük meg az érme feldobásának eredményét, úgy egyre pontosabb posteriori valószínűségeket kapunk (7. ábra).



7. ábra Bayes-i statisztika alkalmazása egy érme feldobása során a „fej” valószínűségének becslésére, [18] alapján

A jelen problémára vonatkozó leegyszerűsített modellben például a következő gondolatmenettel élhetünk:

A 13R futópálya küszöbét 120 csomónál lassabban átrepülő érkezők hány százaléka hagyja el a pályát J4 gurulóúton? Mekkora a valószínűsége ezek után a J4-on való elhagyásnak, ha egy légijármű 120 csomónál lassabban repüli át a küszöböt?

$$P(J4|paraméter) = \frac{P(paraméter|J4) * P(J4)}{P(paraméter)}$$

Természetesen a valóságban a küszöb átrepülésen kívül még számos más paramétert figyelembe kell venni, de az alaplogika ugyanez. Ennek a megoldásnak mind a működése, mind pedig az eredménye könnyen értelmezhető, hiszen az egy adott helyzetre vonatkozó valószínűség. Ez utóbbi abból a szempontból is nagyon fontos, hogy amikor az eszköz azt tanácsolja, hogy a leszállási engedélyt ki lehet adni a soron következő érkezőnek, mert a pályaelhagyás a várt helyen meg fog történni, akkor az irányító nem csak az algoritmus átlagos pontosságát ismeri, de az adott helyzetre vonatkoztatva is kap egy becslést (pl.: J4=99% A1/A2=1%).

A módszer nevében szereplő naív jelző annak köszönhető, hogy ennek a metódusnak az alapváltozatában feltételezzük, hogy a különböző paraméterek egymástól függetlenek, így a Bayes-tételben a különböző paraméterhez tartozó tagokat egyszerűen össze lehet szorozni. Ha a modellünkben a leszállás utáni sebességek alakulását kívánjuk (többek között) figyelembe venni, és azokat például tizedmérföldönként mérni, akkor a függetlenség feltétele már nem áll fenn.

kNN

Ha a már említett módon a sebességek alakulását tekintjük elsődleges információforrásnak, akkor mondhatjuk, hogy ha egy fajta lassulási görbével rendelkező járat képes a J4-on való pályaelhagyásra, akkor az ahhoz hasonló sebességparaméterekkel rendelkező másik érkező is valószínűleg képes lesz. „Ha magát a működési koncepciót nehéz megfogalmazni, de ha látjuk a

paramétereket, akkor egyértelmű mire gondolunk, a k számú legközelebbi szomszéd módszert érdemes használni" [19].

A küszöbátrepülés utáni sebességek adott távolságonként való mérési eredményéből képezhető egy vektor. Ezen vektorok között értelmezhető például az euklideszi távolság. A klasszifikáció pedig a konkrét eset (landoló légijármű) megfigyelt paramétereiből (sebesség) előálló vektor k számú legközelebbi, tanulóhalmazban lévő szomszédjai által meghatározott érték. Tehát ha például k=10 esetén 8 légijármű elhagyta J4-on a pályát, 2 pedig nem, akkor az eredmény a J4-on való pályaelhagyás. A módszer a hasonlóságon alapul, ami miatt az működés értelmezése nem annyira magától értetődő, mint például a döntési fánál, de jobb, mint a neurális hálózatoknál. A kNN algoritmus képes egy valószínűséget is, mint eredményt megadni, így a naive bayes módszerhez hasonlóan az eredmény maga jól használható az operatív munkavégzés során.

Fontos az algoritmus paraméterezése. Mennyi legyen a k értéke? Milyen egyéb paramétereket vegyen még figyelembe és milyen súllyal? Ezen kérdések megválaszolásához használható többek között a genetikus algoritmus, amit a szerző légiforgalmi eljárástervezési probléma megoldásához is felhasznált már [20]. A használandó értékek súlyai és a k változó a gének, a maximalizálandó függvény pedig az osztályozó algoritmus helyes válaszainak aránya a teszt halmazon.

Konklúzió, kutatás folytatása

A feladat tehát adott. A data science munkafolyamat kezdeti lépései (adatgyűjtés, nyers adatok konvertálása, adattisztítás, az adatokkal való ismerkedés, alapvető összefüggések vizsgálata) megtörténtek. A cikkben a szerző áttekintette a feladat megoldásához potenciálisan felhasználható algoritmusokat azok előnyeivel és hátrányaival. A feladat következő része a különböző algoritmusok optimalizálása, illetve azok eredményeinek összevetése a végleges megoldás kialakításához. Amennyiben sikerül megfelelő pontosságot elérni a becslésben, akkor a következő lépés az eszköz HMI-jének (human machine interface) kialakítása. A megfelelő pontosság, mint mérőszám kialakításához további adatfeldolgozás szükséges a légiforgalmi irányítói állománynak a feladat tekintetében meglévő becslési pontosságának feltérképezéséhez.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] European ATM Master Plan, Edition 2, October 2012, pp. 19.

[2] Alan R. Groskreutz, Pablo Muñoz Dominguez: Required Surveillance Performance for reduced minimal-pair arrival separations. Eleventh USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2015)

[3] Eurocontrol, Future airport operations (online), url:http://www.eurocontrol.int/articles/recat-eu (2015.11.19)

[4] Eurocontrol, Future airport operations (online), url:http://www.eurocontrol.int/articles/pair-wise-separations-pws-recat-2 (2015.11.19)

[5] eATM Portal, European ATM Master Plan, Wake Vortex separations based on Dynamic Aircraft Characteristics (online), url:https://www.atmmasterplan.eu/oisteps/AO-0307 (2015.11.19)Charles Morris, John Peters, Peter Choroba: Validation of the Time Based Separation concept at London Heathrow Airport. Tenth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2013)

[6] Gerben van Baren, Catherine Chalon-Morgan, Vincent Treve: The current practice of separation delivery at major European airports, Eleventh USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2015)

[7] eATM Portal, European ATM Master Plan, Optimised braking to vacate at a pre-selected runway exit coordinated with Ground ATC by voice (online), url:https://www.atmmasterplan.eu/oisteps/AO-0702 (2015.11.19)

[8] eATM Portal, European ATM Master Plan, Predicted and reduced Runway Occupancy Time (ROT) using aircraft performance (online), url:https://www.atmmasterplan.eu/oisteps/AO-0704 (2015.11.19)
[9] R. Geister, T. Dautermann, V. Mollwitz, C. Hanses, and H. Becker: 3D-Precision Curved Approaches:
[10] A Cockpit View on ATM, Tenth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2013)
[11] ICAO Doc 9905, Required Navigation Performance Authorization Required (RNP AR) Procedure Design Manual, First Edition – 2009
[12] Madácsi Richárd, Baráth Márta, Dr. Sándor Zsolt, PhD.: Az érkező légiforgalom folyamatos süllyedéssel végzett megközelítését biztosító irányítói támogatóeszköz koncepciója, Közlekedéstudományi Szemle
[13] Joel Grus: Data Science from Scratch, First principles with python, O'Reilly Media 2015
[14] Mike Loukides: What is Data Science? The future belongs to the companies and people that turn data into products, O'Reilly Media
[15] Rachel Schutt, Cathy O'Neil: Doing Data Science, Straight talk from the frontline, O'Reilly Media 2014
[16] Jason Bell: Machine Learning, Hands-on for developers and technical professionals, John Wiley & Sons, Inc. 2015
[17] Toby Segaran: Programming Collective Intelligence, O'Reilly Media 2007
[18] Cam Davidson-Pilon: Probabilistic Programming & Bayesian Methods for Hackers, http://camdavidsonpilon.github.io/Probabilistic-Programming-and-Bayesian-Methods-for-Hackers/
[19] Brett Lantz: MAchine Learning with R, Second Edition, Packt Publishing, 2015
[20] Baráth Márta, Madácsi Richárd: MSA optimalizálás genetikus algoritmussal, IFFK 2014

USING DATA SCIENCE TECHNIQUES TO IMPROVE RUNWAY THROUGHPUT

Improving runway efficiency is a major goal of SESAR. There are a couple of potential solutions to reduce the necessary spacing between arrivals on final approach, which can lead to runway throughput improvement provided that other safety measures are still in force. In order to achieve this, data science can be used as well in general and machine learning algorithms in particular. The aim is to estimate the taxiway where the landing aircraft is going to vacate the runway so that the runway occupancy times associated with that taxiway could be used upon which separation minima is based. It is also important to estimate the probability of vacating the runway via the previously estimated taxiway to enable mitigation measures to work efficiently and in a timely manner to handle risk resulting from the reduction of spacing.

Keywords: *data science, machine learning, runway efficiency, safety*

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_3/2015-3-12-0230_Madacsi_Richard.pdf

Szaniszló Zsolt

"THE ODD ONE OUT". THE MAIN PARACHUTE OF T-11 PARACHUTE SYSTEM

Two years ago as a member of the NTA AA SAD's official delegation visiting the industrial centre of the Airborne Systems North America (ASNA), Santa Ana, California State. During a meeting on the wall of the ASNA's Management's building I noticed the Award of the Congress of the United States of America in a framed picture. In the picture there was a spectacular canopied airborne troop main parachute. It was my „first rendezvous" with the T-11. I was so impressed that I started further researches on this parachute. My study presents type T-11 system's main parachute's „unusual" deployment system and the structure of canopy are responsible for paratrooper's safe landing. Apart from its characteristics and specifications, the study describes those technical solutions based on aerodynamical principles concisely which was intended to increase the safety level of the T-11's in military implementation.

Keywords: *parachute system, airborne, mass dropping, controlled deployment system, parachute canopy*

INTRODUCTION

Nevertheless my study is focused on the T-11's main parachute, an explanation why designing a new type of troop parachute was necessary. Therefore I am going to introduce not only those reasons which had lead to start the innovation process and in addition those elementary aerodynamic principles which determined the essential characteristics of „the new-born".

PRESENTATION OF THE ANCESTOR: THE T-10

The T-10 (Figure 1) conventional shaped parachute was first seen in 1952 [1] after the World War II. laying the ground for the basis of modern American personnel airborne troop parachute systems. This non-maneuverable type is undoubtedly one of the best known convencional canopy-shaped military parachutes: not only „the basic" but newer, modifiabled versions of T-10 have been introduced at several armies of the world (Figure 2).



Figure 1. „The old": T-10 system's main parachute in the air [2]



Figure 2. Pakistani paratrooper woman with a newer version of T-10 dropped from a Russian made Mi-17 transport helicopter [3]

The system - consists of a main (back) and a reserve (chest) parachute – provides a guarantee for its appliers as stated in the table below (Table 1).

Type	T-10	T-10R
Design:	10% extended skirt	solid flat
Diameter (D_0) [ft (m)]:	35.0 (10.668)	24.0 (7.315)
Number of gores [ea]:	30	24
Length of suspensions lines (L_s) [ft (m)]:	25.5 (7.772)	20 (6.096)
Strength of suspensions lines [lbf (N)]:	375 (1668.681)	550 (2447.398)
Effective L_s/D_0:	0.728	0.833
Canopy material:	1.1 oz/yd^2 nylon	1.1 oz/yd^2 nylon
Parachute weight [lb (kg)]:	13.85 (6.282)	10.4 (4.717)
Maximum drop speed [KIAS[1] (km/h)]:	150 (277.8)	

Table 1. Basic parameters of T-10 parachute system's main parts [4]

During decades of the „Cold War" the United States of America started several parachute innovations [5] in order to correct those problems[2] occured many times during deployment and landing-phase of „the basic" T-10's usage[3].

The next „three main areas" were included in the scope of „the old" – „the basic" version of T-10 - investigation:

- the safety of deployment,
- the stability of descent,
- the safety of landing [6].

Innovation programmes based on T-10, generated a „family tree" with these members: T-10, T-10A, T-10B (Figure 3), T-10C, T-10C(2), T-10D, MC[4]-1, MC1-1, MC1-1B (Figure 4), MC1-1C, MC1-1D, MC1-2, MC-2, MC-3 (Para-Commander) [7].

Among the useful technical innovations we must underline the application of anti-inversion net placed on the edge of the lower lateral band of round canopy assembly (see: Figure 3) to avoid the above mentioned canopy malfunction. The special slot-system was designed on the surface by extension of the air-permeability of canopy's fabric to decrease the level of deployment forces. This lead to recognition that canopy slots can be used direct the canopy and the result of this the first maneuverable versions of „the ancestor" emerged.

[1] British/American official abbreviation of the Knots (measured) Instrument Air Speed. – remark of the Author.

[2] The first and undoubtedly the most typical partial canopy malfunction problem is the „Mae West" (see: Figure 10) (nickname given by the airborne soldiers of the United States Army). – remark of the Author.

[3] These activities could be seen not only in the western but in the eastern part of the world as well: the Soviet parachute-designers made a decision to update their well-known D-1 airborne troop parachute. This type was commonly used in the Warsaw Pact's armies in 1970s and in 1980s. „D"-letter refers to the possible application areas of it: Airborne Troop Parachute („Десантный" – in Russian). - remark of the Author.

[4] „MC"-letters refer to one of the main characteristics of parachute: Maneuverable Canopy. – remark of the Author.

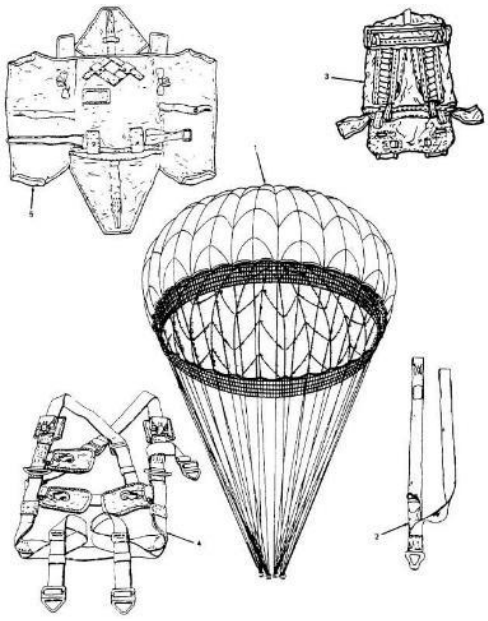


Figure 3. The components of main T-10B Personnel Troop Parachute: pack tray-, deployment bag-, harness-, canopy- (with anti-inversion net) and riser assemblies [8]



Figure 4. The MC1-1B Maneuverable Troop Parachute. The paratrooper can control the accidental drift above the planned Drop Zone [9]

These technical inventions modified „the basic" T-10 and resulted new versions -, but these new improvements may not be suitable for the continously increasing level of war challenges [10] which determined the necessity for creation small special operation units. Nevertheless vision of the western military theoretics for mass dropping units (Figure 5) has yet been future-proof.



Figure 5. Paratroopers equipped with T-10D personnel troop parachute system over a Drop Zone during a mass dropping airborne exercise, these days [11]

Therefore new types of personnel parachute system must be designed for the airborne troops of the United States Army to extend the following criterias achieved by T-10: mass dropping with

individual weapon systems and equipment[5] from transport aircraft flies max. 150[6] KIAS (277.8 km/h) at low level altitude[7] [12]. And – of course – the primary requirement have not been changed: **paratroopers must land uninjured to start his/her mission**.

THE NEW INNOVATION PROGRAMMES OF PERSONNEL AIRBORNE PARACHUTE SYSTEMS

Two main programmes were initialized in the middle of 1990s: the SOFTAPS[8] and the ATPS[9]. These names would refer to future applicants of parachute systems: the first new type would be designed for the Special Operation Forces only and the second one for the „conventional" airborne units of the United States Army.

The number ones of these programmes – the steerable MC-6 and the **non steerable T-11**[10] (Figure 6) **airborne troop parachute system**, including the same reserve parachute type: T-11R – were designed by engineer-teams of the Para-Flite, Inc.: the predecessor of the ASNA.



Figure 6. T-11 airborne parachute system. The main parts of it: T-11R (reserve) parachute on chest (left) and T-11 (main) non steerable parachute on back of the airborne soldier (right). The shapes of canopies can be seen in the background [14]

[5] Meaning that the new parachute can be used maximum all up weight was 400 lb (181.44 kg) contrary to the T-10C's 360 lb (163.296 kg). – remark of the Author.

[6] In this context it should be stressed the above mentioned canopy malfunction occures over 130 KIAS (240.76 km/h). – remark of the Author.

[7] It means that the planned minimum drop altitude was 500 ft (152.4 m). These requirements were based on the experiences of airbone operation „Retribution" in Panama, 1989 [13]. – remark of the Author.

[8] British/American official abbreviation of Special Operation Forces Tactical Assault Parachute System. – remark of the Author.

[9] British/American official abbreviation of Advancad Tactical Parachute System. – remark of the Author.

[10] Its sign was XT-11 during the innovation-process and the practical tests in the ATPS programme. The letter „X" referred to the „Experimental" status of the parachute. – remark of the Author.

According to the subject of this study I am going to focuse on marginally introducing the main military requirements what the winner type of the ATPS programme has to meet. Moreover I am going to mention the several technical solutions partly based on the aerodynamic principles of parachute's deployment and the shape of canopy. I am also going to cover finally the achieved performance of the new type in connection with the above-mentioned „three main areas" of parachute's investigation.

THE BORN OF THE NEW CANOPY-SHAPED AIRBORNE TROOP PARACHUTE

The main requirements the new type had to meet

The primary characteristics of the new main parachute were determined as follows:

1. the deployment system must be the widely-known static line system, although partial modification had to be made to avoid the partial or total canopy malfunctions,
2. the shape of canopy must be conventional or similar structure.

The new main components of „the new born"

The deployment system

The static line deployment system[11] (Figure 7) of T-10 has an effective method: the canopy, covered by the deployment bag is pulled out from the pack tray assembly (parachute pack). After stretching of suspension lines the canopy is pulled out from the main deployment bag to the air-flow and it starts filling up by air-mass.

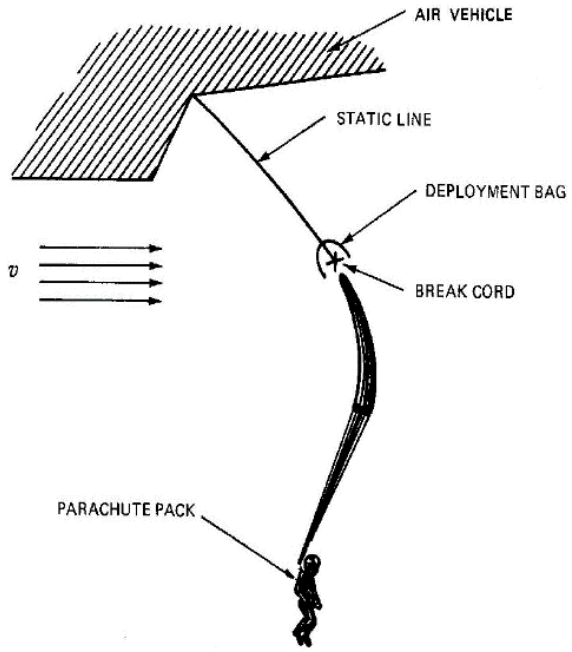


Figure 7. The scheme of uncontrolled deployment system of T-10 [15]

[11] In several parachute bibliographies this system is named as Heinecke-system. – remark of the Author.

Observing „the ancestor" of „the new born" we can see the lack of ripcord handle assembly, which is a general characteristic of the American-made airborne troop parachutes. That is why the static line assembly is the only one[12] which starts the deployment of parachute system. And in the foreseen future the main operator – the United States Army – has not, and – perhaps - will not want to change it.

Therefore designers had to partially change the T-10's uncontrolled deployment system and equip it with new elements.

The new parachute deployment system must be fulfil the following requirements:

1. To minimize the parachute **snatch force**[13] by controlling incrementally the deployment of the parachute, and by keeping the parachute canopy closed until line stretch occurs. The main contributing factor to high snatch loads before line stretch is the acceleration of the air-mass in a partially inflated canopy.
2. To keep tension on all parts of deploying parachute. Tension prevents the „sailing-effect" (Figures 8 and 9) of the canopy.



Figure 8. T-10D static line parachute dropping from a C-130 „Hercules" heavy transport aircraft [17]



Figure 9. T-10D static line parachute dropping from a C-130 „Hercules" heavy transport aircraft [18]

The canopy's fluttering movement can cause several canopy malfunctions: entanglement, canopy damage, line-overs, and canopy – partial or complete – inversions. The development of these malfunctions is a negative result of the non-symmetrical canopy's filling-up (Figure 10).

[12] It is interesting to know: this practice has never been applied on Soviet/Russian-made parachutes. Not only the military, but every type of personnel parachute system have been equipped with a ripcord assembly: parachutists must be able to start the parachute's deployment during falling. Pulling out the ripcord handle assembly simultaneously with static line assembly can duplicate the effectiveness of canopy's deployment. This is very essential for the safety of canopy's deployment. – remark of the Author.

[13] The snatch force means a shock produced on the load, it is generated when the canopy assembly „escapes" from its deployment bag and becomes suddenly accelerated (towed) and takes the same speed of airflow. It comes just prior to opening shock [16]. Snatch force is the peak value of the forces produced on the parachute (see: Figures 11 and 12) during the deployment-process prior to canopy inflation. - remark of the Author.

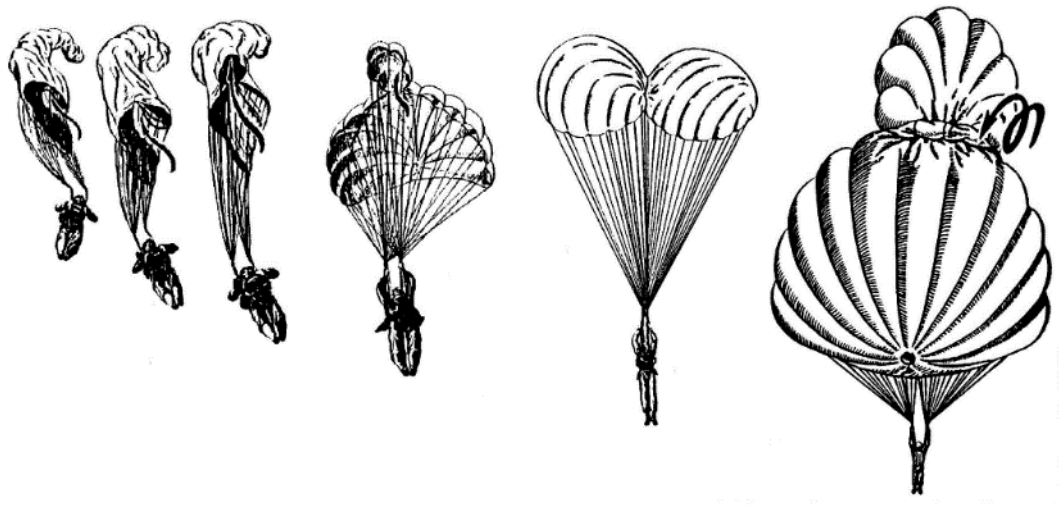


Figure 10. Forming of the partial inversion of the canopy – the so called „Mae West" – and its result: the parachute with its divided canopy [18]

3. To minimize opening time and opening force[14] which – in certain cases – lead to irregularities and delayed action during parachute deployment and inflation [19].

Although engineers continously improved the canopy's design of „the old" version and equipped with supplementary components of its deployment system (Figures 11 and 12), those had not yet been enough to support the new requirements concerning maximum all up weight.

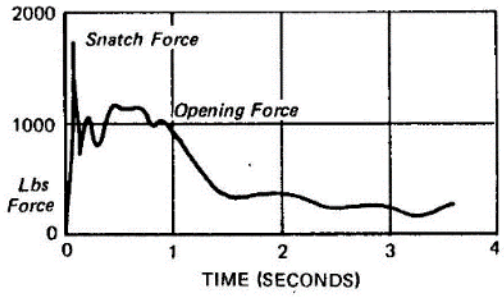


Figure 11. Deployment forces of a 28" flat circular canopy without deployment device [18]

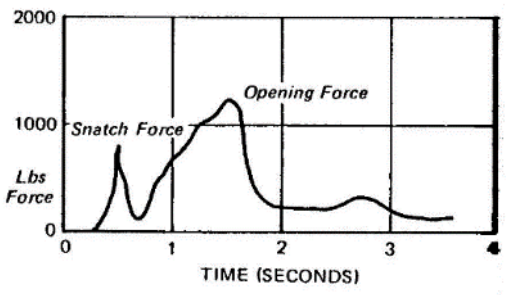


Figure 12. Deployment forces of a 28" flat circular canopy with deployment bag [18]

It was obvious that a special device of deployment system must be designed for the canopy's low lateral band. The task was not only to delay the dynamic deployment of canopy – similar to the **reefing-cord** (Figure 13) – but to secure the separation of the riser assemblies. The technical solution was based on the **slider**[15] (Figure 14): a device which can glide along the suspension lines at an appropriate speed to the harness assembly during canopy inflation.

[14] The opening force means that decelerating force exerted on the load during canopy inflation, following the snatch force (see: Figures 11 and 12). It caused by the acceleration of the opening canopy in connection with the air-mass. This process is determined by the canopy's filling rate depends on its porosity, size and shape. – remark of the Author.

[15] The original slider was patented by J. Floyd Smith in 1948. – remark of the Author.

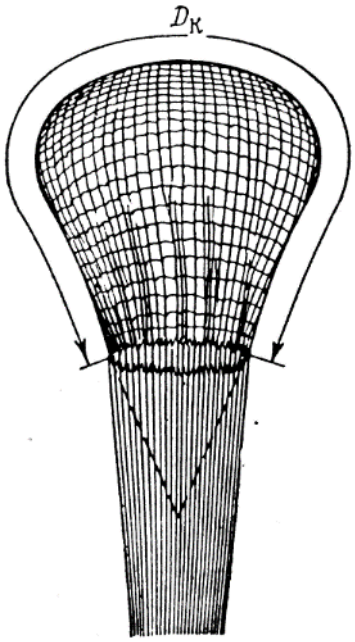


Figure 13. The scheme of reefing-cord placed at the canopy's low lateral band [20]

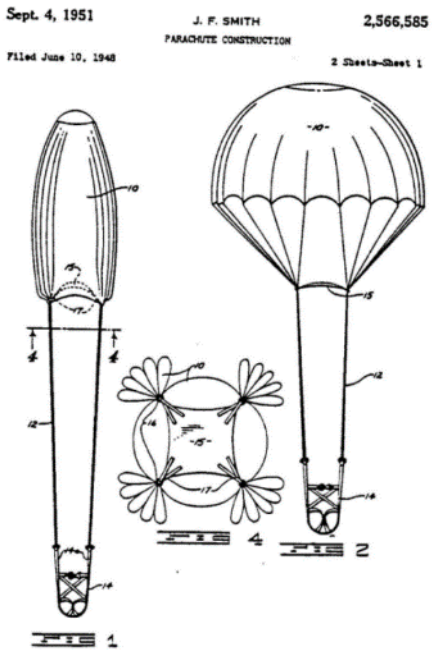


Figure 14. The patent drawing of the original Smith slider from 1951 [21]

The designed, new deployment bag (Figure 15) of the „new-born" was mainly same like „the ancestor's", but the slider made of a special web fabric (Figure 16) which secures the optimal level of air-mass to the inner part of the new parachute's canopy.





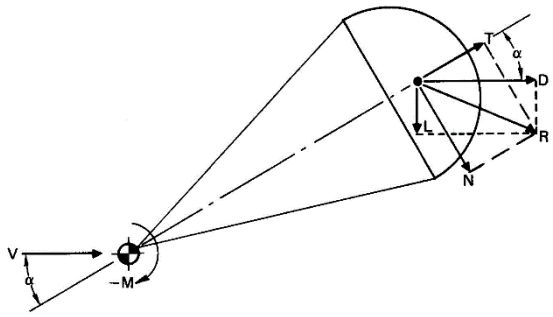
Figure 15. The front and the back side of the T-11's deployment bag and static line [22]



Figure 16. The T-11's special formed slider made from web fabric [23]

The undisturbed air intake and the avoidance of canopy malfunctions are secured by steadily strengthed assemblies of parachute system. Therefore it had to be equipped by a pilot chute[16], similar to the ram-air parachutes. The aerodynamic forces generated on the parachute system during its deployment (Figure 17) verify the usefulness of the pilot chute's application (Figure 18).

[16] There are many pilot chutes in several areas of parachuting, which are initialized by the force of the built-in spring. The T-11's pilot chute liberates from the main deployment bag after break cord between the static line and the main parachute canopy brakes (see: Figure 19). – remark of the Author.



Where:

v – velocity at a point of undisturbed flow [ft/s (m/s)]
α – angle of attack [deg]
M – moment [lbf·ft (N·m)]
R – resultant force [lbf (N)]
L – lift [lbf (N)]
D – drag [lbf (N)]
N – normal force [lbf (N)]
T – tangential force [lbf (N)]

Figure 17. Aerodynamic forces acting on the parachute canopy during its deployment [24]



Figure 18. A snapshot about the deployment of T-11 system's main parachute. The pilot chute can be seen on the top of the parachute canopy [25]

At the moment of dropping the paratrooper-parachute complex has not got vertical speed, but its horizontal speed is equivalent to the KIAS of the aircraft. Then the air-mass's drogue effect is reducing its horizontal speed to zero countinously and the gravity is increasing its vertical speed during the fall. Under real life conditions the direction of air intake's velocity into canopy[17] is very important connected to the angle of attack during deployment (see: Figure 17).

During the fall after the brake cord brakes (see: Figure 7) the specially designed pilot chute holds the parachute's canopy and suspension lines in strengthed position[18] parallel with the direction of the velocity at a point of undisturbed flow. (see: Figure 17).

According to engineer calculations: after dropping, within cc. 2 seconds from aircraft horizontal speed the parachute brakes to zero speed. This phenomenon is caused by the drogue force of the pilot chute created by the large amount of undisturbed flow. The drogue pulls out the canopy and its suspension lines and risers, but these are thrown back by the pilot chute horizontally, opposite the flight direction. Therefore canopy starts opening when the paratrooper-parachute complex lays on the flow horizontally (Figure 19), then starts turning into vertical direction (see: Figures 17 and 18).

[17] The air intake velocity is the vectorial amount of vertical and horizontal velocities. During experimental phase parachute canopies are mostly examined and tested in wind-tunnel. (Note: While during the wind-tunnel tests the air intake is always parallel with the symmetrical axle of the parachute, among real situations the angle of attack is not concerged to zero, mainly.) - remark of the Author.

[18] Similar aerodynamic effects act on the pilot chute as on the main parachute canopy but these amount of forces are not equivalent. These forces on the pilot chute will reduce to zero after the total inflation of the main canopy. - remark of the Author.

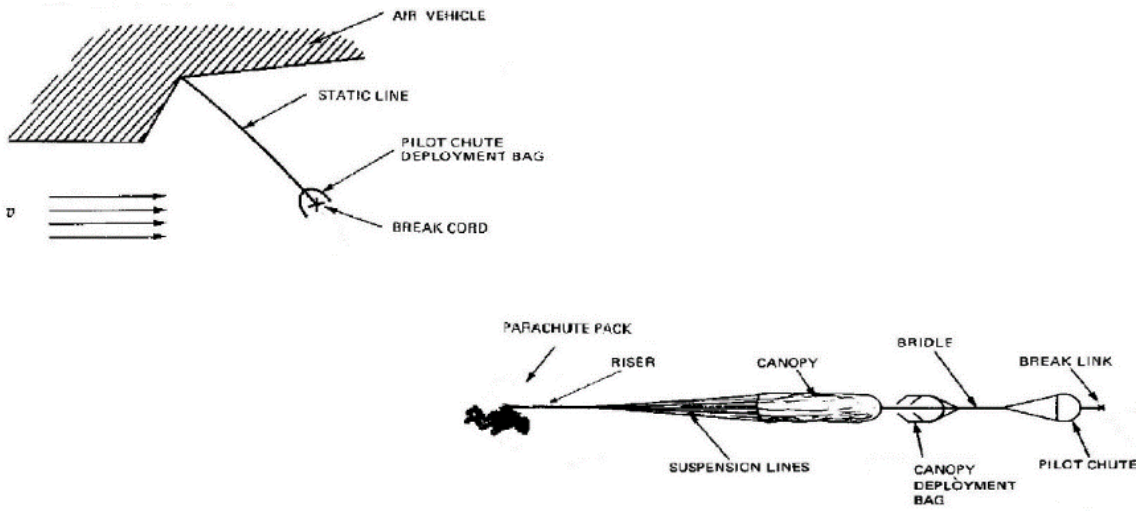


Figure 19. The scheme of controlled deployment system of T-11 [26]

Unfortunatelly the aftermath of „sailing-effect" is remained in part, so had to be add a special shaped deployment bag[19] to the canopy (Figures 20 and 21) to cover and save it from the air intake's velocity up to that moment when the air-intake direction comes parallel to the symmetrical axle of the parachute. It is necessery to eliminate the above mentioned types of canopy malfunctions based on the „sailing-effect" (see: Figures 8 and 9).



Figure 20. The T-11's pilot chute, connector link and deployment bag of its main canopy [27]



Figure 21. The identification signs on the deployment bag of T-11 canopy [28]

Besides the engineer calculations of deployment, real life tests validated the reliability of this controlled deployment system (Figure 22).

[19] This subsystem is named as deployment sleeve or canopy sleeve by several parachute bibliographies. – remark of the Author.



Figure 22. After brake cord's braking the resultant force acting on the pilot chute has started stretching the suspension lines and the sleeve covered canopy of T-11 system's main parachute [29]

Comparing the deployment process of T-10 (Figure 23) and T-11 (Figure 24) main parachutes the difference is very spectacular: the „sailing-effect" can be observed just at the canopies of the newer version of „the old" system (see: the two T-10D main parachutes are under-behind the transport aircraft's fuselage, in Figure 23).



Figure 23. Paratroopers equipped with T-10D static line parachutes dropping from C-17 „Globemaster III" heavy transport aircraft [30]



Figure 24. Paratroopers equipped with T-11 static line parachutes dropping from C-130 „Hercules" heavy transport aircraft [31]

In conclusion, for the reasons set out above: these accessories could modify the uncontrolled static line deployment system of „the old" to become a more reliable, controlled deployment, reserving the characteristic of its original static line initialization.

The practical tests demonstrated the in about 6 seconds inflation [32] of the T-11 main parachute canopy, so the opening shock is reduced significantly. The tests undoubtedly proved that the unique canopy sleeve-equipped and special shaped slider-controlled deployment subsystems fulfiled the expectations, together with its new shape of canopy, the deployment of the airborne troop parachute became safer.

The first from „the three objectives of the investigation" was achieved (the safety of deployment).

The shape of main parachute's canopy

The new shape of canopy contributes to the safety of deployment of the airborne troop parachute but it plays a fundamental role in the remaining two of „the three main objectives of the investigation". The airborne troop parachutes' stability of descent and the safety of landing are exclusively depending on it.

The designers implemented a highly modified and refined version of cross/cruciform shaped canopy for the role of the main parachute's canopy. The shape of the new canopy (Figure 25) were based on the cross/cruciform canopy but the physical dimensions (see: Table 2) were similar to the so called box-typed pilot chute[20] (Figure 26) canopy.

[20] Note: This canopy was not a new product in the parachute industry, it was used as a very reliable pilot chute. And using as a main airborne troop parachute system canopy was not a unique idea: the former Soviet parachute designers had made several experiments in this subject in 1940s and 1950s. - remark of the Author.

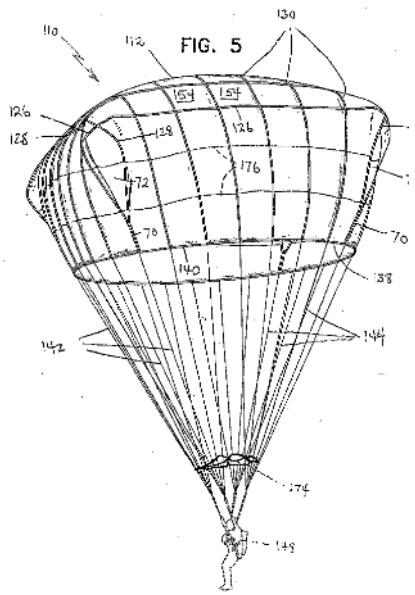


Figure 25. The designed shape of main parachute by Jean C. Berland from Para-Flite Inc. [33]

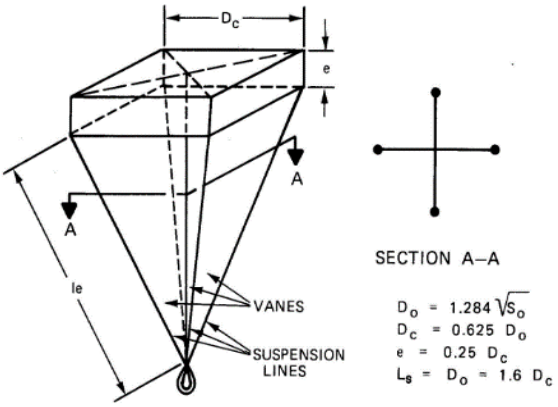


Figure 26. The scheme and the main dimensions of box-type pilot chute [34]

The parameters and the shape of canopy – based on the planned maximum all up weight of paratrooper-individual equipments-parachute system combination – insures secure slower rates of descent[21] and decreased oscillation[22] under canopy (Figure 27).

Any mid-air collisions of paratroopers during descending phase may occure, fortunatelly these (Figure 28) have not had a direct effect on safe landings.



Figure 27. Descending paratrooper under the canopy of T-11 main parachute. On the upper part of canopy surface can be seen the pilot chute and the deployment sleeve [37]



Figure 28. Bad experience: the landing paratrooper slipped through the corner's hole of his comrade's T-11 main canopy during the descent phase. Fortunatelly the landing ended without injury [38]

[21] The T-10D's rate of descent is 22 ft/s (6.705 m/s) [40], the T-11 guarantees a lower rate of descent (see: Table 2). The T-11's canopy is 28 percent larger than the T-10's. - remark of the Author.

[22] The rate of oscillation angle less than 5 degrees [36].

According to the manufacturer's official data, the special canopy shape has resulted remarkable reduction in landing injuries: greater than 75% over 3,000 jumps [39].

The second and the third from „the three objectives of the investigation" were achieved (stability of descent and safety of landing).

THE RESULT: T-11 PERSONNEL AIRBORNE PARACHUTE SYSTEMS

The total T-11 system – consisted of a main and a reserve parachute parts as well – guarantees similar characteristics of its „ancestor" (Table 2):

Type	**T-11** [40]	**T-11R** [41]
Design:	cross/cruciform	aeroconical
Hem diameter (D_0) [ft (m)]:	28.6 (8.717)	20.3 (6.187)
Number of gores [ea]:	28	20
Length of suspensions lines (L_s) [ft (m)]:	20.78 (6.333)	20.3 (6.187)
Strength of suspensions lines [lbf (N)]:	unknown by the Author	650 (294.84)
Effective L_s/D_0:	0.84	1
Canopy material:	unknown by the Author	IV Type, low porosity FG 504 (MIL/PIA-C-44378 T4) nylon
Parachute weight [lb (kg)]:	36.8 (16.692)	14.9 (6.758)
Rate of descent [ft/s (m/s)]:	18 (5.486)	27 (8.229)
Maximum drop speed [KIAS (km/h)]:	150 (277.8)	
Maximum deployment altitude [ft (m)]:	7500 (2286)	
Minimum deployment altitude [ft (m)]:	500 (152.4)	150 (45.72)

Table 2. Basic parameters of T-11 parachute system's main parts

These parameters seemed to be very attractive based on the requirements of the whole ATPS programme: the winner type was chosen from a five-parachute systems-groups after a display dropping-process above the shooting range and Drop Zone „Yuma" on 7–8 June 2004. (87 drops with torso in total). Then on 3 August 2004 and on May 2005 (with test-jumpers only with the later winner type: the T-11) [42]. From this time the letter „X" - the sign of experimental version of parachute type's - was not visible anymore on the assemblies of the system.

The T-11 was introduced to the United States Army in 2010. After the preliminary success a decision was made to replace more than 52,000 T-10 parachute systems of the United States Army with the new T-11 [43]. But this triumph was overshadowed by deaths of American paratroopers: four parachute-comrades [51] died in training with T-11. The application of T-11 was suspended for the time of investigations. These days the indroduction process re-started, so remember: the usage of this special shaped canopy-type as main airborne troop parachute has just started (Figure 29) its military carrier…



Figure 29. Descending American and Indonesian paratroopers equipped with M1950 Weapons Case and Parachute Drop Bag (PDB) cuddled by the harness assemblies of their T-11 parachute systems, after mass dropping during airborne exercise „Garuda shield" on 18 June 2013 [44]

CONCLUSION

As mentioned: the proliferation of using these special parachute systems is witnessed nowadays, but it does not mean that „the T-10 family" will disappear. „The ancient" and its „descendants" have been still used and I am sure it will be in service for a long period, traditionaly in basic airborne training courses for the new – and perhaps not only American – paratrooper-generations (Figure 30).



Figure 30. Nigerian paratroopers are ready to static line jump with MC1-1B parachute from a G222 „Alenia" transport aircraft [45]

To write this study I was inspired by the picture of the Award of the Congress of the United States of America (Figure 31) and I got the opportunity to collect a huge amount of information in the birth place (Figure 32) of T-10 and T-11 parachute systems.



Figure 31. The picture of descending T-11 main parachute on the Award of the Congress of the United States of America [46]

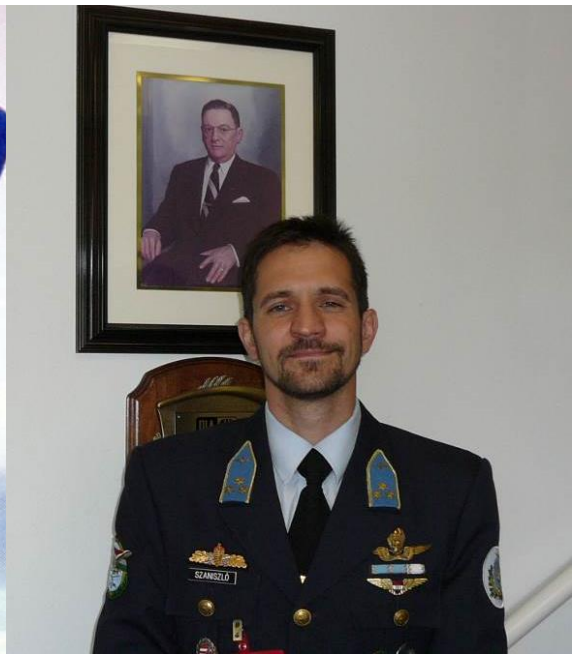


Figure 32. The Author of this study during the official visit in front of the picture of Mr. Elek Puskas, the Founder-President of the Para-Flite Inc. [47]

Therefore these pictures and technical parameters are from the official brochure of the manufacturer have been supplemented other useful parameters from the official publications of the United States Army for this study.

However I think it is just „one side of the coin". The theoretical knowledge is just a small part of the preparation for parachute dropping, gaining practical experience is most important. Fortunatelly I got a chance to jump with T-11 parachute system more than one year after „the first rendezvous" so that I could extend my theoretical knowledge with my own practical experiences as well.

That real life experience has successfully managed to crown my study on T-11 parachute system.

In my next study I will publish the circumstances of that parachute dropping and my approximate, preliminary aerodynamical calculations about:

- the time of canopy's deployment,
- the values of snatch and opening forces,
- the total time from dropping to landing.

REFERENCES

[1] GlobalSecurity.org: T-10 Parachute (e-doc) url: http://www.globalsecurity.org/military/systems/aircraft/systems/t-10.htm (24.11.2012.)
[2] BalckFive: (e-doc), url: http://www.blackfive.net/.a/6a00d8341bfadb53ef019104c58172970c-pi (18.10.2015)
[3] The News Tribe: (e-doc), url: http://www.thenewstribe.com/wp-content/uploads/2013/07/pk-2.jpg (19.02.2015)
[4] T. W. KNACKE: Parachute Recovery Systems Design Manual. NWC TP 6575 Para Publishing, Santa Barbara, California, 1992. ISBN 0-915516-85-3, p. 8-47.

[5] Katonai ejtőernyőzés Magyarországon. Egyetemi jegyzet, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, Budapest, 2005. p. 99.
[6] D. R. DENNIS: Legújabb fejlemények az ejtőernyő technológiában. Ejtőernyős Tájékoztató 1984/2 (Aeronautical Journal November, 1983.) KM LRI Repüléstudományi és Tájékoztató Központ Kiadványa, Budapest, 1984. pp. 8.
[7] T. W. KNACKE: Parachute Recovery Systems Design Manual. NWC TP 6575 Para Publishing, Santa Barbara, California, 1992. ISBN 0-915516-85-3, p. 8-46.
[8] Integrated publishing: (e-doc), url: http://www.parachutemanuals.tpub.com/TM-10-1670-271-23P/css/TM-10-1670-271-23P_227.htm (11.10.2015)
[9] url: http://cfile235.uf.daum.net/image/173F8F3F4F2C7B061C6282 (10.11.2015)
[10] Defence Update: (e-doc), url: http://defense-update.com/20140605_parachuting-accident-puts-t-11-parachute-safety-in-question. html.ViQA77mhfIU (18.10.2015)
[11] Wikimedia Commons: (e-doc), url: https://commons.wikimedia.org/wiki/File: Defense.gov News Photo 110910-GO452-406-U. S. Army paratroopers_from_the_82nd_Airborne_Division_descend_to_the_ground_after_jumping_out_of_a_C-17_Globemaster_III_aircraft_over_drop_zone.jpg (18.10.2015)
[12] Where technology takes flight, Airborne Mission Ready Products, Parachute Aerial Delivery Systems. (Official brochure of Airborne Systems North America, 2011.), p. 7.
[13] Капитан 2 ранга С. ПРОКОФЬЕВ: АМЕРИКАНСКАЯ ДЕСАНТНАЯ ПАРАШЮТНАЯ СИСТЕМА Т-11, Зарубежное военное обозрение №10 2007 г. pp. 56-59. (e-doc) url: http://publ.lib.ru/ARCHIVES/Z/"Zarubejnoe_voennoe_obozrenie"/_"Zarubejnoe_voennoe_obozrenie".html#2007 (25.11.2015.)
[14] Combat Reform: (e-doc), url: http://www.combatreform.org/ATPSarmydumbasscontinues.jpg (21.11.2015)
[15] T. W. KNACKE: Parachute Recovery Systems Design Manual. NWC TP 6575 Para Publishing, Santa Barbara, California, 1992. ISBN 0-915516-85-3, p. 6-5.
[16] DAN POYNTER: The Parachute Manual. A Technical Treatise on Aerodynamic Decelerators. Santa Barbara, CA 93140-4232, USA, 1991. ISBN 0-915516-80-2, p. 310.
[17] Wikimedia Commons: (e-doc), url: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/d4/SCIE_T10_image1.jpg/300px-SCIET10_image1.jpg (23.08.2014)
[18] DAN POYNTER: The Parachute Manual. A Technical Treatise on Aerodynamic Decelerators. Santa Barbara, CA 93140-4232, USA, 1991. ISBN 0-915516-80-2, pp. 311-312, 314.
[19] T. W. KNACKE: Parachute Recovery Systems Design Manual. NWC TP 6575 Para Publishing, Santa Barbara, California, 1992. ISBN 0-915516-85-3, p. 6-2.
[20] Н. А. ЛОБАНОВ: Основы расчёта и конструктирования парашютов. Москва, Издательство Машиностроение, 1965. Г-27188. p. 170.
[21] DAN POYNTER: The Parachute Manual. A Technical Treatise on Aerodynamic Decelerators. Santa Barbara, CA 93140-4232, USA, 1991. ISBN 0-915516-80-2, p. 242.
[22] Photo is from the Author's collection. It was taken in Papa Air Base, 25.02.2015. by the Author.
[23] Photo is from the Author's collection. It was taken in Papa Air Base, 25. 02.2015. by the Author.
[24] T. W. KNACKE: Parachute Recovery Systems Design Manual. NWC TP 6575 Para Publishing, Santa Barbara, California, 1992. ISBN 0-915516-85-3, p. 4-13.
[25] Farmaroc: (e-doc), url: http://far-maroc.forumpro.fr/t2019p585-us-army (04.01.2015)
[26] Figure is made by the Author based on Figure 6-3, 6-4. from T. W. KNACKE: Parachute Recovery Systems Design Manual. NWC TP 6575 Para Publishing, Santa Barbara, California, 1992. ISBN 0-915516-85-3, pp. 6-5, 6-6.
[27] Photo is from the Author's collection. It was taken in Papa Air Base, 25.02.2015 by the Author.
[28] Photo is from the Author's collection. It was taken in Papa Air Base, 25.02.2015 by the Author.
[29] Полковник О.Мартьянов: ПАРАШЮТИСТЫ ИЗ "ФОРТ-БЕННИНГ" url: http://www.liveinternet.ru/users/657082/post183488623/page1.html (02.12.2015)
[30] Flickr: (e-doc), url: https://www.flickr.com/photos/usairforce/8674235229/in/photostream/lightbox/ (04.10.2015)
[31] U.S. Department of Defense: (e-doc), url: http://archive.defense.gov/photoessays/photoessaySS.aspx?id=5557&cachebuster=463 (04.10.2015)
[32] T-11 Non-Steerable Troop Parachute System. Airborne Systems Dedicated To Preserving The Safety Of The Mission And Its People. (Official brochure of Airborne Systems Family of Brands: GQ Parachutes, Irvin Aerospace, Para-Flite, Aircraft Materials (AML), 2013.)
[33] Cruciform parachute with arms attached (EP 1317374 B1), (e-doc), url: http://www.google.com/patents/EP1317374B1?cl=en (29.03.2015)

[34] T. W. KNACKE: Parachute Recovery Systems Design Manual. NWC TP 6575 Para Publishing, Santa Barbara, California, 1992. ISBN 0-915516-85-3, p. 6-45.
[35] fayobserver.com: (e-doc), url: http://www.fayobserver.com/18th Airborne Corps suspends jumps following death - Fayetteville Observer Military & Fort Bragg News (25.11.2015)
[36] T-11 Non-Steerable Troop Parachute System. Where technology takes flight, Airborne Mission Ready Products, Parachute Aerial Delivery Systems. (Official brochure of Airborne Systems North America, 2013.)
[37] Where technology takes flight, Airborne Mission Ready Products, Parachute Aerial Delivery Systems. (Official brochure of Airborne Systems North America, 2011.), p. 6.
[38] Photo is from the Author's collection. It was taken in Papa Air Base, 19. 06. 2014. by the Flight Safety Officer of the Joint Command of the Hungarian Defence Forces.
[39] T-11 Non-Steerable Troop Parachute System. Airborne Systems Dedicated To Preserving The Safety Of The Mission And Its People. (Official brochure of Airborne Systems Family of Brands: GQ Parachutes, Irvin Aerospace, Para-Flite, Aircraft Materials (AML), 2013.)
[40] T-11 Non-Steerable Troop Parachute System. Airborne Systems Dedicated To Preserving The Safety Of The Mission And Its People. (Official brochure of Airborne Systems Family of Brands: GQ Parachutes, Irvin Aerospace, Para-Flite, Aircraft Materials (AML), 2013.)
[41] Data Sheet of T-11R attached to the Hungarian Military Type Certificate of MC-6 Airborne Troop Parachute System (Official edition of NTA AA SAD, 2013.)
[42] ABC11: 82nd Airborne Division Paratrooper Dies in Airborne Training Incident (e-doc) url: http://abc11.com/news/fort-bragg-paratrooper-dies-in-jump-exercise-/88809/ (02.12.2015)
[43] T-11 Non-Steerable Troop Parachute System. Airborne Systems Dedicated To Preserving The Safety Of The Mission And Its People. (Official brochure of Airborne Systems Family of Brands: GQ Parachutes, Irvin Aerospace, Para-Flite, Aircraft Materials (AML), 2013.), p. 6.
[44] U.S. Department of Defense: (e-doc), url: http://archive.defense.gov/photoessays/PhotoEssaySS.aspx?ID=4025 (02.12.2015)
[45] Beegeagle's Blog: (e-doc), url: https://beegeagle.wordpress.com/2012/11/02/nigerian-army-paratroopers/ (05.08.2015)
[46] Photo is from the Author's collection. It was taken in the building of the ASNA's Management, Santa Ana, California, 11.10.2013. by the Author
[47] Photo is from the Author's collection. It was taken in the building of the ASNA's Management, Santa Ana, California, 11.10.2013. by Ms. Yvonne Wade from the ASNA

„A KAKUKKTOJÁS".A T-11 EJTŐERNYŐRENDSZER FŐ EJTŐERNYŐJE

Két évvel ezelőtt a NKH LH ÁLF hivatalos delegációja tagjaként látogatást tettem az Airborne Systems North America (ASNA) Kalifornia állambeli, Santa Anában települt ipari létesítményében. Ennek során az ASNA Igazgatótanácsa épületében észrevettem az Amerikai Egyesült Államok Kongresszusának fényképkeretbe foglalt, hivatalos elismerő oklevelét. A fénykép egy rendkívül látványos kupolával ellátott légideszant fő ejtőernyőt ábrázolt. Ez volt „az első találkozásom" a T-11-essel. Olyan módon a hatása alá kerültem, hogy tudományos kutatásokat kezdtem az ejtőernyővel kapcsolatosan. Tanulmányom a később T-11 típusjelzést kapott rendszer fő ejtőernyőjének „szokásostól eltérő" nyitási rendszerét és kupolaszerkezetét mutatja be, ezek felelnek az ejtőernyős sérülésmentes földetéréséért. A technikai jellemzők és adatok mellett azokat az aerodinamikai törvényszerűségeken alapuló műszaki megoldásokat is leírja röviden, amelyek a T-11 katonai alkalmazását biztonságosabbá teszik.

Kulcsszavak: *ejtőernyő rendszer, légideszant, tömeges dobás, szabályozott nyitási rendszer, ejtőernyő kupola*

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_3/2015-3-13-0244_Szaniszlo_Zsolt.pdf

Dániel Rohács, József Rohács

IMPACT OF OUT-OF-THE-BOX APPROACH ON THE FUTURE AIR TRANSPORTATION SYSTEM

The goal of this paper is to present the impact of the so-called out-of-the-box thinking on the future development of the air transportation system. It (i) shortly explains the approach based on out-of-the-box thinking (or thinking outside the box), (ii) introduces some of the most appealing original solutions and (iii) shows a systematic out-of-the-box approach to problem solving on a selected innovative operational concept (addressing the radical reduction of the environmental impact related to the take-off and landing processes). Finally, the paper defines the methodology related to the development and evaluation of original solutions.

Keywords: *out-of-the-box thinking, disruptive technology, future air transportation, aircraft take-off and landing*

INTRODUCTION

The stakeholders of the aeronautical industry defined challenging visions and future targets (e.g. NASA Blue Print [1], European Aeronautics: A vision 2020 [2], Flightpath 2050 [3], ACARE Strategic Research and Innovation Agenda [4]), to (i) better fulfill customer requirements, (ii) cope with the present problems of air transportation, and (iii) ensure that the future air transportation will be sustainable, greener, safer, more secure, efficient, and time/cost effective. These documents underline, that aviation passed through two major S-curve developments (Fig. 1), basically known from the innovation diffusion theory [5]. The first is related to the pioneering era, while the second to the introduction of the gas turbines and the development of the commercial aviation after World War II.

These major S-curves could be also decomposed to smaller S-curves related to „smaller" innovative technologies within the given period, as shown more detailed in the representation of the second period of aviation history in the Fig. 2.

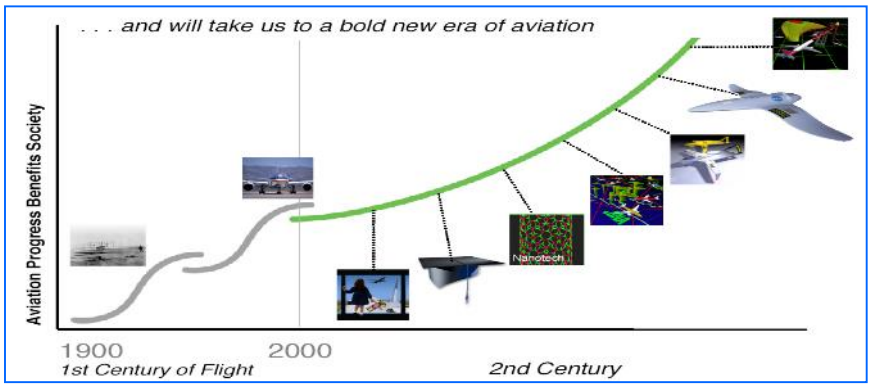


Fig. 1. Areas having strong influences on the future aviation [1]

S-curves are initiated due to different approaches in technology development. Technology developments could be classified into the so-called (i) innovative and (ii) disruptive technologies

[7][8][9]. While the first maintains and continuously improve the available existing technologies, the second rather aims to broader and develop new markets and provide new functionality, which, in turn, may disrupt the existing market and rebuilt it on the other, higher level (Fig. 3).

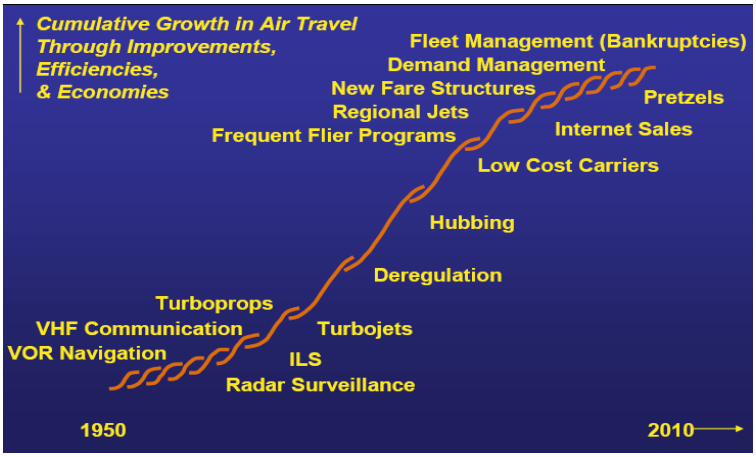


Fig. 2. More detailed description of the second `S curve` of aviation [6]

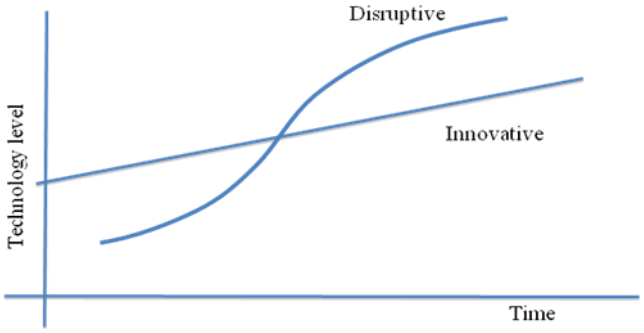


Fig. 3. Different technology developments [9]

Therefore, at the end section of an S-curve, new major technologies and advanced innovative solutions based on disruptive solutions (revolutionary new technologies) are favorable to initiate a new S-Curve, and thus ensure a proper technological development.

According to the NASA (Fig. 1), the third S-curve should be launched, since the challenging aviation targets require outstanding results based on innovative solutions, instead of implementing marginal modifications leading to marginal gains. However, the visions and SRIAs cannot define exactly the guiding (technological) principles, but the development direction (Fig. 1) and general goals [1][2][3][4] to be reached (like reduction of the aircraft emissions by 50–80%). It is thus clear that innovative solutions and the disruptive technology development require an original way of thinking, unconventional approaches in problem solving, which is usually called out-of-the-box thinking.

1. THINKING OUT-OF-THE-BOKSZ

According to the Oxford Dictionary[1], thinking out-of-the-box (or thinking outside the box, or out-

[1] http://www.oxforddictionaries.com/definition/english/think-outside-or-out-of-the-box

of-the-box thinking) means an approach in which thinking is original or creative. Others[2] gives an analogical definition: thinking outside the box is a metaphor that means to think differently, unconventionally, or from a new perspective, that often refers to novel or creative thinking.

It seems that the most known original solution of the intractable problems is cutting the Gordian knot by Alexander Great. Another good example is the story about the egg of Columbus published by the Italian historian Girolamo Benzoni in 1565 [10][11]. From these, at least two important conclusions might be derived:

- original (out-of-the-box thinking) solution is a new solution that has never used before and unknown for the other, however
- after initiating and accepting the new original solution, it is often seen as easy, repeatable and „not remarkably new" anymore.

While the first known unconventional, very original solutions appeared many hundred years ago, the term out-of-the-box dates back to the 1970s, only.

Generally, out-of-the-box thinking, as creativity can be learned and trained from the early children's, even baby's years. The society and education system however, play a crucial role in the development and use of such competence. This is due to the fact that the society in general has no time to evaluate and accept the original solutions, and rather prefers people thinking on the „traditional way". As a consequence, the education system is pressing the students „in the box".

In addition, we may also forget that the original solutions are often simple solutions. For example, the eye of the fruit fly is roughly equivalent to a 26×26 pixel array covering one visual hemi field [12], which is ridiculously low compared to state-of-the-art artificial vision, and about 150 000 times „worse" than human eye retina [12][13]. This means, we would be able to find significantly better solutions for vision control, where the biological concept-based control could be established on simplified basis. However, it is a problem to return to the development of simple solutions, since too much new and applicable technologies are to born, and we are far from using all the possibilities.

Thinking out-of-the-box and more particularly its importance on the technological development was also outlined by NASA administrator, Daniel S. Goldin, in the lecture titled „Aviation Daydreaming" presented on the SAE World Aviation Congress in 1999 [14]. He called up our attention for a nice citation. As T.E. Lawrence[3] wrote ... *„Those who dream by night in the dusty recesses of their minds, wake in the day to find that it was vanity: but the dreamers of the day are dangerous men, for they may act on their dreams with open eyes, to make it possible."* ... and as Mr. Goldin finished his speech: „So become daydreamers". It seems that this is the right approach, let thus permit the young generation to dream with open eyes.

[2] Wikipedia The Free Encyclopedia: Thinking outside the boksz, e-doc. (online), url: https://en.wikipedia.org/wiki/Thinking_outside_the_box

[3] Lawrence, T. E. Seven Pillars of Wisdom, Wordsworth Editions Limited, Ware, 1997 p. 7.

2. SOME POSSIBLE ORIGINAL SOLUTIONS

As specified above, NASA defined [1] the beginning of the second S-curve in the history of aviation with the development of the gas turbines. The scientific development and inventory process of gas turbine took long time. The first steam - powered turbine engine was created by the Greek mathematicians Hero of Alexandria. His turbine, called aeolipile, consisted of a hollow sphere and four canted nozzles[4]. The sphere was rotating freely on two feed tubes that carried steam from the boiler. 2,000 years later, the Hungarian Aladár Zselyi investigated the analogical stream machine [15]. (By the way, in 1912, Aladar Zselyi and Tibor Melczer designed a new large 34 seat aircraft called „Airbus". - Unfortunately they did not make a trademark for this name). Another Hungarian Jendrassik designed and built a small 100 horsepower gas turbine for research purposes. One year later, he developed a larger turbine that would become the CS-1, the world's first working turboprop engine [16][17].

The invention of the gas turbine demonstrates that even the disruptive technologies, the radically new ideas are to born over long development processes. Such processes need common (state and European) support, because the profit oriented companies cannot spend their funds on radically new ideas, which only generate profit on the longer term. Therefore, the co-called breakthrough innovation must be initiated by universities and small innovative, creative companies, SMEs (Fig. 4.).

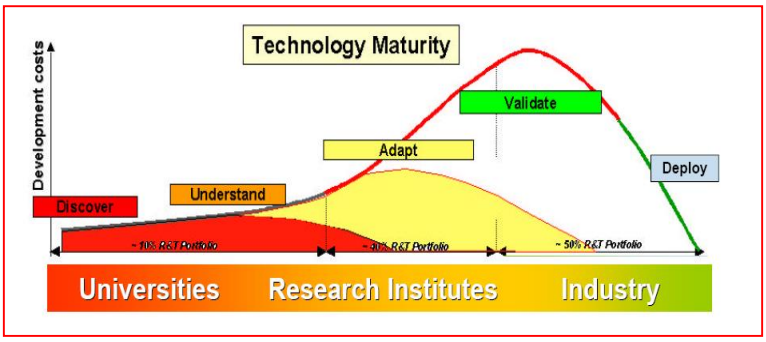


Fig. 4. Vision of Airbus [18] on technology development process

Seeing this, it is not a coincidence that in Europe, the first idea on the cruiser-feeder concept was published [19] about 25 years earlier, than the Commission started to fund such ideas. [20][21]. The original idea [19] was to use the same type of numerous smaller aircraft, which in-flight could be connected together into one large flying object to continuously circulate at cruising altitude (Fig. 5). In the vicinity of the arrival airport, a smaller part of the large aircraft could be disconnected to bring passengers down.

The relevant EU projects dealing with slightly different solutions. For example, the RECREATE project [20] develop feeders with cabin container (Fig. 6.a.) while the MAAT [21] consortia creates an original solution based on aerostats (Fig. 6.b.).

[4] see for example in „Fireman - Navy firefighter, Fireman training manual", http://firecontrol-man.tpub.com/14104/ (accessed at Nov. 20, 2015)

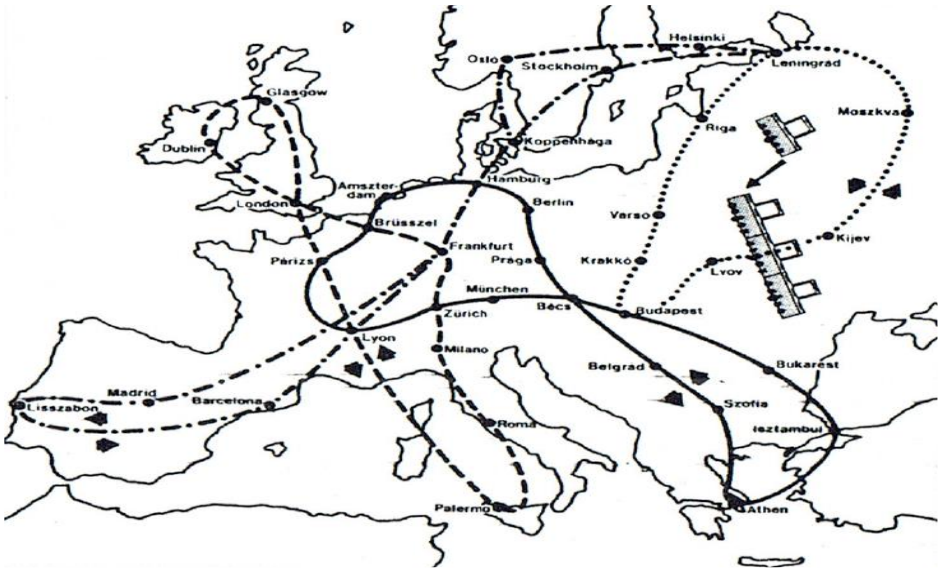


Fig. 5. A cruiser - feeder concept (using the flying object) that continuously circulates at cruising altitude [19]

a.) 

b.) 

Fig. 6. The cruiser - feeder concept of the RECREATE [20] anad the MAAT projects [21]

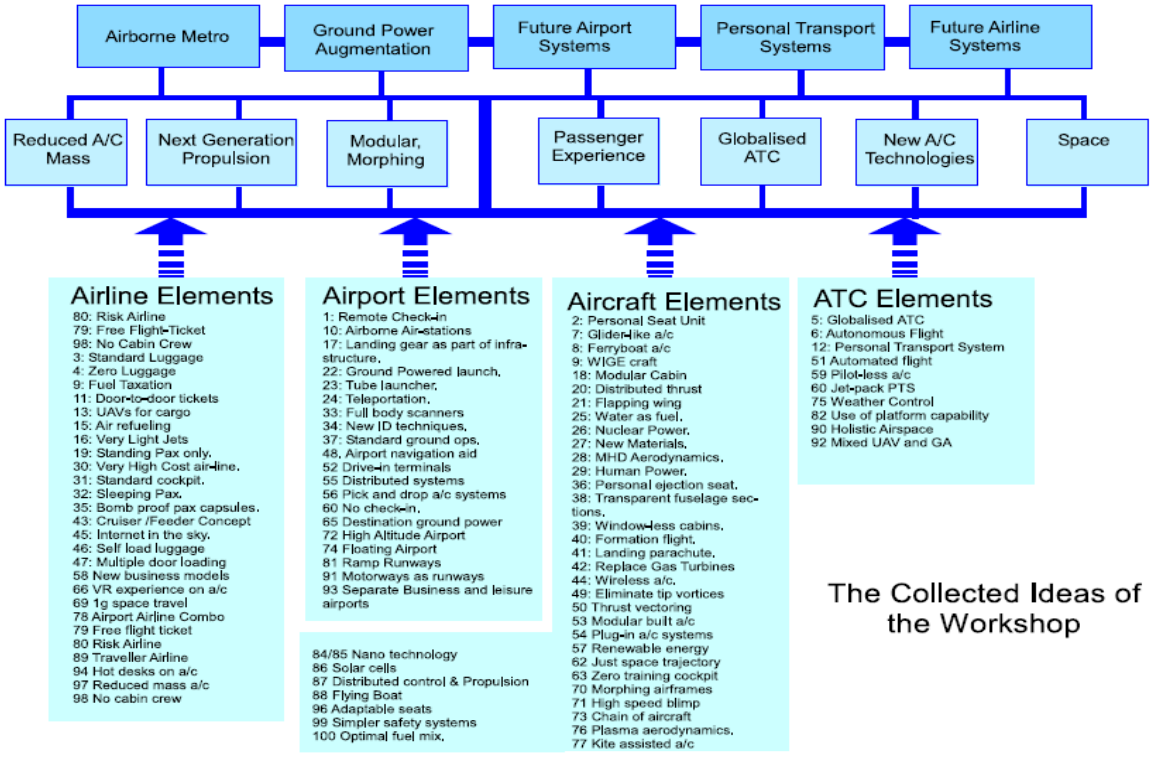


Fig. 7 The results of „Out-of-the-box" project [22]: list of collected ideas passed the first level evaluation

The leaders of the World economy (US, Japan, Russia, EU) use the same out-of-the-box philosophy and preliminary define the possible future development (of aviation [1][2][3][4]) by supporting breakthrough innovation.

Following to this idea, at first, the Commission initiated and supported a project titled „Out-of-the-box" [22]. The participants of the project defined several really new ideas, new solutions to cope with the present problems of aviation. On the first workshop, several hundred ideas were analysed, and finally, the experts named the top 100 most appealing ideas (Fig. 7.).

The potential project ideas included ideas, which z

- already deployed or soon deployable (as internet on-board, development of very light jets, personal aircraft (Fig. 8)),
- might be applied after a relatively short-term development (like pilot-less aircraft, thrust vectoring including the thrust unit control, box-wing aircraft (Fig. 9.a.),



Fig. 8. Different solution for personal air transport [22]

- need considerable research and development (for example refuelling the aircraft (Fig. 9.b),
- might require significant investments (as floating airport (Fig. 9.c)),
- could be introduced into operation after a long-term research and development phase (as the cruiser-feeder concept or use of ground powered assisted take-off and landing - see next point), and
- might not be accepted by the society (like the transport of sleeping passengers (Fig. 9.d).

a.) 

b.) 

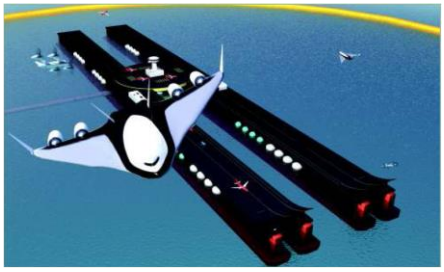
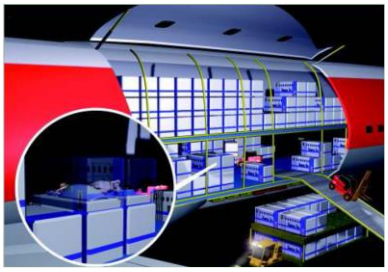
c.)  d.) 

Fig. 9. Box-wing (a), refuellin (b), floting airport (c) and sleping passenger concepts [22]

As numerous ideas proposed in the „Out-of-the-box" project [22] addressed radically green take-off and landing processes, these are addressed more in detail in the following chapter (Fig. 10).

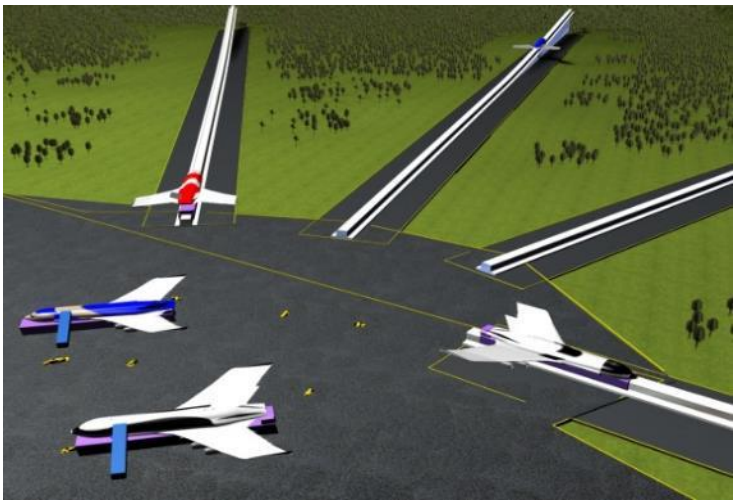


Fig. 10. The use of magnetic levitation technology to to assist the aircraft take-off and landing [22]

3. RADICALLY NEW GREEN SOLUTIONS FOR THE TAKE-OFF AND LANDING PROCESSES

Numerous innovative concepts seeking radically new solutions to cut the environmental problems at the airport vicinities. Recognizing the importance of the domain, this paragraphs outlines some of the most appealing concepts [23][24].

A. Take-off with limited fuel and fuelling at high altitude

This is the less radical concept (due to the existing refueling technology at military aircraft), which is also relatively easy to adapt. Once fuelling at high flight altitude (Fig. 9.b), the take-off weight could be reduced by 15–25 %, and the take-off velocity by 7–12 %. Naturally, the required fuel for take-off would be also decreased by 25–40 %, while the rate of climb could be augmented. Unfortunately, the large fuel tankers require almost 92–93 % of the energy required for the take-off procedures of all served aircraft. However, the large aircraft can be operated from airport far from the cities and therefore the solution might reduce the noise and chemical emissions at the airport regions used by commercial air transport.

B. Ground assisted lift generation

The concept is based on the use of vertical micro jets built in the runway to increase the aircraft lift (Fig. 11.a). The concept requires significant amount of investments and a special pneumatic control system.

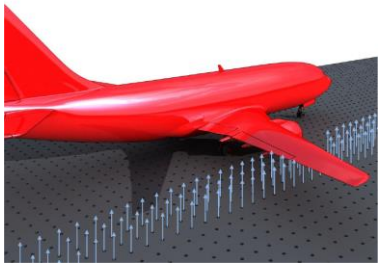
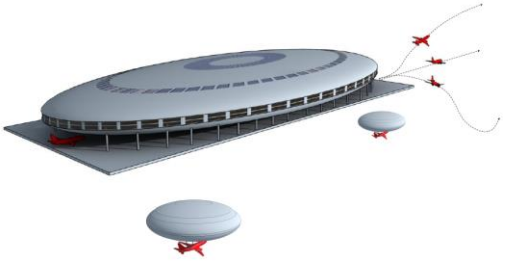
a.)  b.) 

Fig. 11. "ground assiting lift generation (a) and aircraft lifting (b) [23][24]

C. Lifting up - down the aircraft by aerostatic ships

The idea is to lift up the aircraft before take-off to the altitude of 1,500–1,800 meters by a special aircraft carrier aerostatic balloons or ships (Fig. 11.b). The aircraft will be accelerated on the short distance (about 500 m) on a special rigid runway hanged under a large airship and finally will reach the stable horizontal flight or further climb after acceleration in descent.

D. Airport in the sky

It is already foreseen that the technology „will be soon" available to develop and build an airport at high altitude, approximately 10 km above the sea level. As shown in the Fig. 12, such airport could be based on the top of several large airships being connected to the land with flexible cables. The passengers and cargo could be transferred to the airport platform by lifts moving on the holding cables.

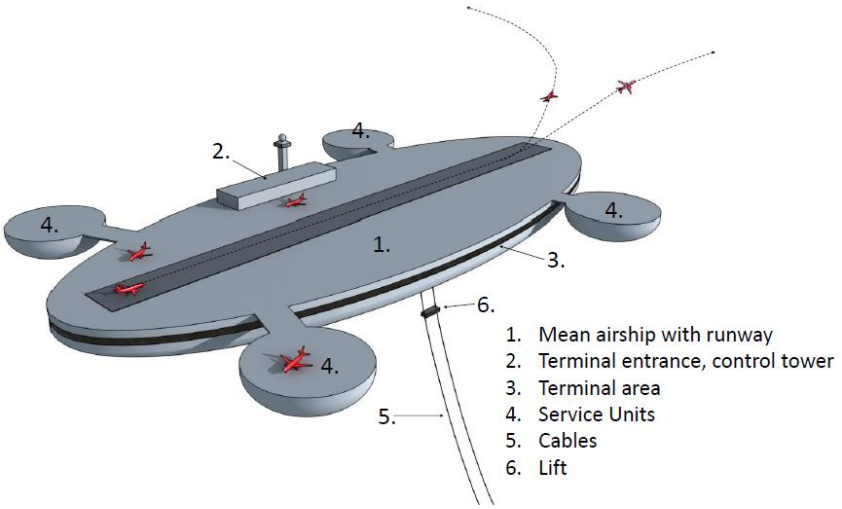


Fig. 12. Airport in the sky [24]

E. Airport above the city

The society problems, emission and noise at the airport vicinities could be solved, once the airport would be lifted to about 450–600 m above the city (Fig. 13) [25]. That is less than the 300 meters

of altitude, where the emission and noise might generate society problems. The airport construction could be shielded to further limit the noise propagation towards the urban areas.

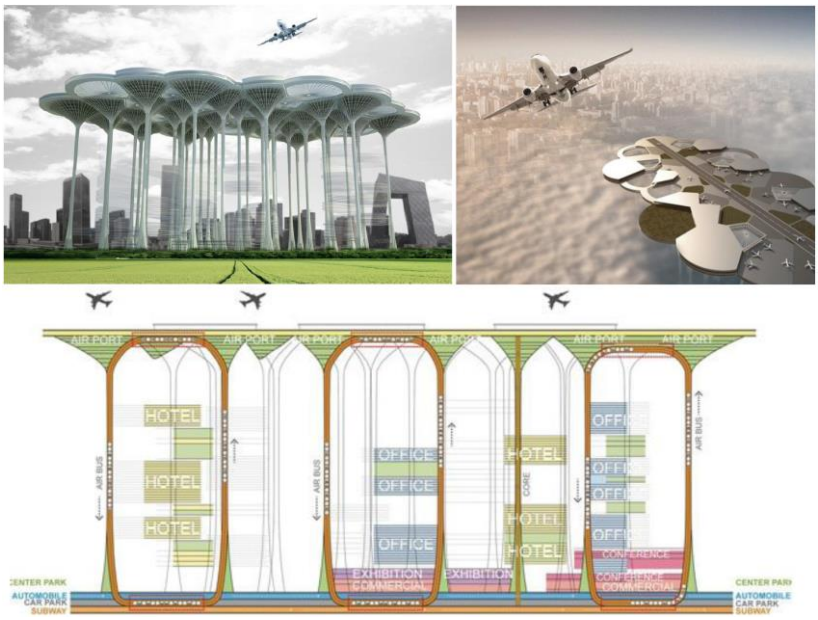


Fig. 13. Airport above the city [25]

The project MAAT develops a resembling concept, as shown in the Figure 14.

F. Underground airport

To cut emissions related to holdings and increase airport capacity, an innovative investigation performed at EUROCONTROL [26] proposed the multi-level runway concept (Fig. 15). The upper is simply placed above the lower runway, and built on concrete pylons. Naturally, this leads to numerous safety and other problems, such as wake vortex or air ventilation.



Fig. 14. The idea developed by the MAAT project [21]



Fig. 15. Possible implementation of the two level runway to Heathrow Airport [26]

G. Cruiser - feeder concept

In the cruiser - feeder concept (Fig. 6), a series of large cruiser airplanes are envisioned to fly continuously on fixed routes (in a cost effective cruise flight phase) over the major cities, to serve relatively small feeder aircraft connecting the cruiser to the airports on the ground. The feeders could be designed for a short range of flight from the airport to the rendezvous points with the cruisers, therefore their take-off weight could be reduced by approximately 25–35% relatively to the presently operated aircraft. In addition, this concept also permits to cut the number of take-off and landings by about 25–40%, due to the elimination of transit flights at the airport level.

H. Ground based energy supply - microwave energy supply

The project idea uses the new microwave energy transfer technology that was tested in practice [27]. The transferred energy could be used directly by the engines or the thrust could be generated by the distributed electric driven ventilators.

I. Electric engine accelerators

In the electric engine accelerator concept, the take-off process is assisted by extra electric engines (Fig. 16), which after take-off and climb (to about 400 meters) will be detached from the aircraft and returned to the airport as a small UAVs, to be later connected to another aircraft to assist their landing. The energy can be supplied from accumulators (carried by the electric UAVs) or (especially on and near to ground) served by microwave energy transfer [24].

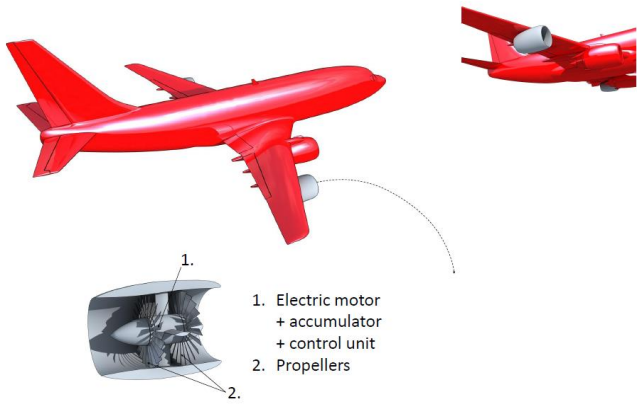


Figure 16: Use of electric engine - UAV for take-off and landing

J. Electromagnetic aircraft launch system (EMALS)

The Electromagnetic aircraft launch system [27][28] is investigated by the US Navy, as it is predicted that the proposed system may generate about 30% greater energy capability (Fig. 17.a). Such system can be applied to assist the take-off of the conventional aircraft (Fig. 17.b.). The use of EMALS to assist the conventional aircraft take-off could be based on existing systems without any extra problems, but the noise and the emitted emission reduction, would only be marginal.

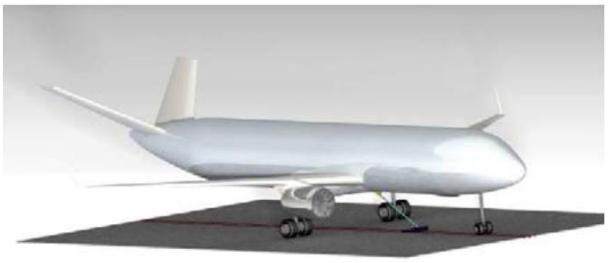
a.)  b.) 

Fig. 17. EMALS applications: a.) built for full-scale test [28] at the Naval Air Engineering Station in Lakehurst, b.) and the concept investigated by TU Delft [29]

K. Use of magnetic levitation technology

One of the most promising ideas – aiming to radically cut the environmental impact over the TOL – is related to the concept of flying without an undercarriage and use magnetic levitation as a ground-based power to assist the aircraft take-off and landing processes. Once the aircraft is levitated above a maglev track over the TOL, this unique solution is expected to considerably reduce the aircraft weight (as no undercarriage is needed), and less fuel would be required to carry on-board. In addition, if maglev power is applied to accelerate and decelerate the aircraft on the ground, then the engine power could be reduced, resulting in less engine weight, less drag and further fuel consumption reduction. Using ground power could also cut CO_2 and NO_x emissions at airports whilst noise levels could be substantially reduced since only airframe (and engine with reduced power) noise will be produced during take-off. Moreover, less weight decreases the wake vortex that affects the airport capacity issues, whilst the production of aircraft having a smaller weight leads to savings on material costs.

The application of magnetic levitation is already extensively researched, developed and deployed in rail transportation. It has numerous operational, commercial systems, for example at (i) the Shanghai International Airport Transrapid system since 2004, (ii) the Nagoya Linimo system since 2005, (iii) the Daejon Rotem system since 2008. In addition, various maglev tracks/projects are under development, such as the Chuo Maglev Shinkansen track.

Being motivated by the promising results in rail transportation application, magnetic levitation opportunities were also explored in air transportation. At first, The US Naval Air Test Center started to investigate the domain and address electric catapult system, as early as 1946. The Navy [30] was very optimistic about their idea, and even envisioned that the catapult would be used in small, conveniently placed airports. Since then, the technology was improved considerably. In 2000, the US Naval Air Systems Command (NAVAIR) awarded General Atomic a prime contract for the design and manufacture of a prototype Electromagnetic Aircraft Launch

System (EMALS), to replace the C-13 steam catapults used on the aircraft carriers. The EMALS launch mechanism – as planned to be installed on aircraft carriers – was successfully tested with numerous military aircraft [30] between 2010 and 2011.

The NASA Marshall Space Flight Center in Huntsville was also looking for the potential in magnetic levitation technology. The idea was to use maglev as a ground-based power (Fig. 18.) to support launches of space aircraft [31]. Preliminary investigations suggested that maglev could significantly cut the costs of getting into the space, by saving 30–40% of the fuel required to perform the launch [32]. The further investigate the idea, numerous test tracks were made, including a 50 feet long outdoor system.



Fig. 18. NASA concept demonstration at Marshall Space Flight Center

The Russians were working on the possible use of magnetic levitation in the hypersonic cosmic airplane MIG-ACS domain [33][34].

In Europe, the EU funded GABRIEL[5] consortia [23] developed a special out-of-the-box project that targeted maglev technology to assist the aircraft take-off and landing processes. In short, this project assessed whether the use of maglev is to support the TOL is technologically feasible, safe, and cost-effective. The project defined the operational concept, evaluated the deployable maglev technologies, define the system elements, assessed the impact (in terms of aircraft weight, noise, emission, cost-benefit), and validated the concept on a small-scale maglev track. In addition, Airbus also mentions the option to launch aircraft with Maglev systems [35] very much in line with the Out-of-the-box project idea (Fig. 19.). Supported by regional funding in Hamburg, the German Airport 2030 project looked into the feasibility to create a launching facility. The launch system uses MAGLEV technology and looks for the launch of heavy aircraft like the A380. Total system cost is estimated at 500 million Euro per runway [36].

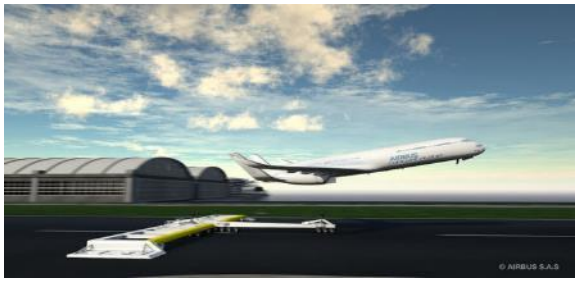


Fig. 19. The Airbus future concept [35]

[5] GABRIEL (Integrated Ground and on-Board system for Support of the Aircraft Safe Take-off and Landing – EU FP7 L1 project [23]

Recognizing the benefits of the concept, the Technology Roadmap 2013 [37] developed by the International Air Transport Association envisions the option of flying without an undercarriage to be in operation by 2032.

4. METHODOLOGY TO DEVELOP RADICALLY NEW CONCEPTS

Numerous recommendations and rules are proposed in the literature to use out-of-the-box thinking. One lists only five steps[6], another defines 11 ways[7]. The recommendations include even "ask the children" type of methods. Generally, creativity and ability to think out-of-the-box are the twin brothers [38], but creativity is more known and investigated.

The general philosophy of developing the originally new technologies and products is shown in the Figure 20.

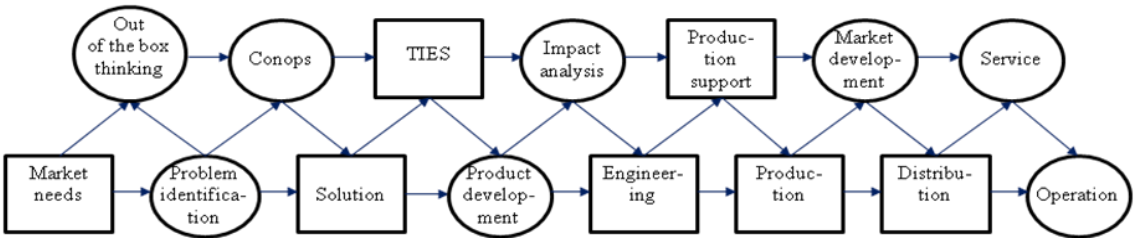


Fig. 20. general process of developing the product with out-of-the-box thinking (the circles show the difference beetwen the conventional and unconventional out-of-the-box thinking applied in the product development).

The process starts with the identification or foreknowledge of the market, and thus the society needs. Due to thinking out-of-the-box, the market and / or society needs can be identified as a problem to be solved. The most important step is to generate the concept of operations (ConOps) from which the solution can be derived. The concept of operations or operational concept is a „document" defining the characteristics of a proposed or developing system from the user point of view. It thus describes how to develop, implement and use of the proposed product by highly involving the user.

When the solution is developed, the required technologies (for the realization) must be chosen from the enabling and emerging technologies. This process is rather complicated and called as technology identification, evaluation and selection (TIES) [39]. That deals with simulation technique, compatibility and impact analyses, decision support methods, and uses e.g. the morphological, or technology impact matrices.

The solution itself is not a product, and thus the product should be developed, which might require new original ways of preliminary designs.

The selected technologies and preliminary determined performance of the product allows to perform the impact analysis, e.g. prediction and analysis of the environmental impact, safety and security aspects, cost benefit calculation, society acceptation. This analysis also includes the concept validation and verification.

[6] 5 steps to thinking outside of the box, http://www.inc.com/matthew-swyers/5-steps-to-thinking-outside-of-the-box.html
[7] 11 ways to think outside the box, http://www.lifehack.org/articles/featured/11-ways-to-think-outside-the-box.html

The engineering is the detailed design of the product. It is a process of design the structural solutions, use of mufti-goal, multi-disciplinary optimization, determination of the load and operational envelops, analysis of the structural integrity, fabrication of the required prototypes, and certification tests.

The production support and production process development might require to use unconventional solutions as well, as the developed radically new product is probably based on revolutionary new technologies.

For the new product, especially for the radically new technologies and products, the market should be also developed. So, such new product needs new type of market, service (maintenance, repairing technologies and methods), and new way of operation.

The EU funded out-of-the-box GABRIEL [23] project (which intended to use magnetic levitation as a ground-based power to assist and take-off and landing processes and flying without an undercarriage), is a good example to demonstrate, how to use creative, unconventional, and original out-of-the-box thinking in problem solving.

At first, the society needs were defined, such as air transportation demand, or environmental impact reduction. After the investigation of the potential solutions, the MagLev assisted take-off and landing was identified as the most effective technology. The consortia [23][24][40] developed a series of operational concepts including the possible solutions for transition periods, and several airport layout scenarios.

The possible solutions were analyzed according to their effect on e.g. the required aircraft modification, potential cut in the aircraft weight, influences on the passengers terminal flows, and the envisaged impact on the take-off and landing procedures, turnaround time, safety, emitted emission, noise, and security aspects [42]. Finally, the detailed analysis suggested to choose a principle based on a *cart-sledge system* (Fig. 21.). As the aircraft has no undercarriage, the cart is primarily supposed to carry the aircraft while ground-born and perform the ground movements, while the sledge includes the necessary magnetic levitation systems, while also permitting to yaw and pitch the cart, and thus facilitate the positioning over the TOL processes (Fig. 21).



Fig. 21. Aircraft landing on the cart-sledge system in general situation

After the concept development, the team (i) defined the core system elements (including the required aircraft modifications, the ground-based system and airport elements, and the dedicated control systems), (ii) analyzed in detail the impact on the aircraft weight, fuel consumption, emitted emission [41], noise, safety and security aspects. Investigations also covered a

mature cost-benefit analysis. Regarding for example safety, it was found that landing on the cart-sledge system, as well as emergency landing on airports not being equipped with the dedicated maglev system require further attention. Accordingly, a special focus was devoted to emergency landings, with numerous alternative solutions investigated and proposed, as showed in the Figure 22.

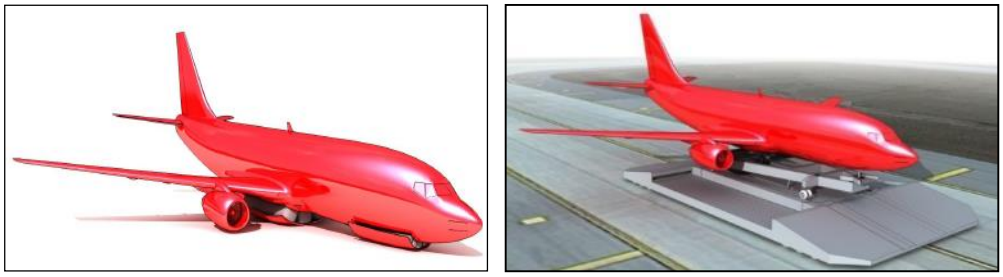


Fig. 22. An example of the investigated emergency landing solutions: lightweight skids (left) and emergency cart (right).

Regarding the landings on the cart-sledge system, a dedicated highly accurate so-called rendezvous control system was designed and developed, which permit autnous landing at the required landing accuracy [42].

Finally, the proposed concept was validated (Fig. 23). For the validation of the technical feasibility of the maglev track under the developed operational concept, a special small-scaled magnetic levitation track was designed and built with a length of almost 6 meters [43]. For the validation of the rendezvous control system, a small scale validation system composed of a validation aircraft, a validation rendezvous control system and two types of validation ground systems (one consisting of a small conventional electric cart, and another of a small scaled validation maglev track [44]) were used. The first system was intended to analyze the practical feasibility of the developed control concept, while the second to validate the overall concept and analyze the landings on the developed small-scaled maglev track.

The validation results showed that the concept is (i) technologically feasible, and (ii) the developed GABRIEL rendezvous control concept permits landings – on the rendezvous platform being moved and levitated by the maglev track –at the required accuracy.



Fig. 23. The validation experiments of the rendezvous control system on the electric cart (left) and on the validation maglev track (right).

Altogether, investigations of the concept found that:

- the envisioned maglev assisted TOL processes are technologically feasible (as demonstrated with the experiments), while also meeting the requirements (e.g. in accuracy),
- the deployment of the concept is safe and secure,

- the concept brings substantial benefits:
  - reduction of aircraft weight and fuel consumption up to 9.3 and 18.1% respectively (in case of mid-size passenger aircraft),
  - reduction of noise during the take-off (up to −64%) and the landing phases (up to 19%) depending on the SEL,
  - reduction of the emitted emissions over all phases of flight, but especially over the take-off by 38–58% depending on the take-off scenario implemented,
  - positive cost-benefit ratio, or cost savings up to € 1,467.26 per flight (on a typical European flight with a mid-size passenger aircraft).

CONCLUSIONS

This paper was dealing with the basis of out-of-the-box thinking. It analyzed the importance of innovation, radically new ideas and out-of-the-box thinking, which contain unconventional, even radically new, so-called disruptive technologies and solutions.

The paper shortly explained the term and the method of out-of-the-box thinking (or thinking outside the box) metaphor.

Recognizing the importance of environmental load reduction at the airport surroundings, the paper outlined some of the most appealing out-of-the-box concepts related to the domain, to clearly demonstrate the potential, the level of maturity and the innovation capability related to out-of-the-box thinking.

Finally, the paper gave the basic methodology to develop out-of-the-box concepts, and showed the major steps over the example of the GABRIEL project.

ACKNOWLEDGEMENT

The research of this paper is a part of the GABRIEL project, which received funding from the European Community's Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013) under Grant Agreement No. 284884.

REFERENCES

[1] NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION "NASA Aeronautics Blueprint: Towards a Bold New Era in Aviation." Washington, D.C., 2002.
[2] EUROPEAN AERONAUTICS: A VISION 2020. Report of the Group of personalities, ACARE, Brussels http://www.acare4europe.com/docs/Vision%202020.pdf (05/03/2013)
[3] FLIGHTPATH 2050, EUROPE'S VISION FOR AVIATION. Report of the High Level Group on Aviation Research, Directorate-General for Research and Innovation, Directorate General for Mobility and Transport, European Commission, 2011
[4] STRATEGIC RESEARCH AND INNOVATION AGENDA (SRIA) vol.1., ACARE, 2011, www.acare4europe.org
[5] ROGERS, E.M., 1983. The Diffusion of Innovations. 3rd Edition, Free Press, New York, NY.
[6] HOLMES, B. J. "Transformation in Transportation Systems of the 21st Century", invited lecture on the ICAS Congress, 4. of September, Yokohama, Japan. 2004,
[7] http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2004/PAPERS/600.PDF, (accessed at Nov. 20, 2015)
[8] CHRISTENSEN, C.M. The ongoing process of building a theory of disruption. Journal of Product Innovation Management, 23, 2006, 39–55.

[9] YU, D, HANG, C. C. A reflective review of Disruptive Innovation Theory, International Journal of Management Reviews (2009) doi: 10.1111/j.1468-2370.2009.00272.x
[10] ROHACS, J.: New Technology Development and Deployment, The proceedings of the First International Scientific Workshop Extremal and Record-Breaking flights of the UAVs and the Aircraft with Electrical power plant, ERBA 2013, ISBN 978-5-9905203-1-8, pp. 4 – 17.
[11] BENZONI, G. (1565), Historia del Mondo Nuovo; Venice. English translation History of the New World by Girolamo Benzoni, Hakluyt Society, London, 1857.
[12] BÁRDOSI V. Kolumbuisz tojása. Adalékok egy közismert szólás eredetéhez, 2Szó- és szólásmagyarázatok, http://www.c3.hu/~nyelvor/period/1354/135409.pdf (visited at 17 nov. 20159
[13] ZUFFEREY, J-C. Bio-Inspired Vision-Based Flying robots, Thesis N0. 3194 (2005), École, Polytechnique, Fédérale, de Lausanne, Lausanne, 2005.
[14] ROHACS, J. Development of the control based on the biological principles, ICAS Congress, Hamburg, 2006 Sept. CD-ROM, ICAS, 2006,
[15] http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2006/PAPERS/609.PDF (accessed at Nov. 20, 2015)
[16] GOLDIN, D. S. Aviation Daydreamers, Word Aviation Congress, Oct. 19, 1999, http://www.nasa.gov/home/hqnews/Goldin/1999/WAC.pdf (accessed at Nov. 20, 2015.)
[17] ZSELYI, A., MAREK, J. Die Gas - Turbine, Berlin-Charlottenburg : Volckmann, 1913.
[18] EL-SAYED, A. F. Aircraft propulsion and gas turbine engines, CRC press, Taylor and Francis Group, 2008,
[19] FÜLEKY A. Jendrassik György, a gázturbina atyja, Nemzetvédelmi Egyetem, Közlemények, 255 - 266. old., http://portal.zmne.hu/download/konyvtar/digitgy/nek/2005_1/20_fuleky.pdf
[20] SCHMITT, D. Bigger, faster, greener, cheaper? Developing the AIRBUS response to the European Vision 2020 demands, lecture presented on 24th ICAS Congress Yokohama, Aug. 31, 2004. http://www.icas.org/media/pdf/ICAS%20Congress%20General%20Lectures/2004/C.%20ICAS%202004-Schmitt,%20Airbus.pdf
[21] ROHÁCS J. Csoda repülők - repülő csodák: Mindig a levegőben, Élet és Tudomány, 1983, VI. 17., 748-750 o.
[22] RECREATE - REsearch on a CRuiser Enabled Air Transport Environment, EU FP7 project, http://cordis.europa.eu/project/rcn/99678_en.html
[23] MAAT - Multibody Advanced Airship for Transport, EU FP7 project, http://www.eumaat.info/ (accessed at Nov. 20, 2015.
[24] TRUMAN, T, A. DE GRAAFF. Out-of-the-box, Ideas about the future of air transport, Part 2, EC Directorate-general for research, ACARE, Brussels, 2007.
[25] "GABRIEL (Integrated Ground and on-Board system for Support of the Aircraft Safe Take-off and Landing – EU FP7 L1 project, Grant Agreement Number - 284884)", CD-ROM (containing the major reports), © GABRIEL - Rea-Tech and Slot Consulting, Budapest, 2014 (see the www.gabriel-project.eu, 2011-2014)
[26] ROHACS, J., ROHACS, D. The potential application method of magnetic levitation technology – as a ground-based power – to assist the aircraft take-off and landing processes, Journal of Aircraft Engineering and Aerospace Technology, Vol. 86, issue 3. 2014, pp. 188-197
[27] HONG, Z. Y., ZHANG, X. T. (2012) "Airport Skyscraper", eVolo Architect Magazin, Skyscraper Competition, 2012, http://www.evolo.us/competition/airport-skyscraper/ or http://www.evolo.us/competition/airportskyscraper/#
[28] MATAS, M. BROCHARD, M. "The airport of the future or what can be the airport in the year 2020 and after", Innovative Research, Activity report, EUROCONTROL Experimental Centre, Bretigny, France, 2004, pp. 47-51.
[29] DOYLE, M. R., SAMUEL, D. J., CONWAY, T., AND KLIMOWSKI, R. R. (1995) "Electromagnetic Aircraft Launch System - EMALS," IEEE, Vol. 31, No. 1, pp. 528–533.
[30] ELECTRIC CATAPULT LAUNCHER, The Science News-Letter, Vol. 50, No. 11 (Sep. 14, 1946), pp. 172-175, https://www.sciencenews.org/archive/electric-catapult- launcher?mode=magazine&context =3323&tgt=nr
[31] EECKELS, C. B. H. "Magnetic assisted take-off for commercial aircraft, A conceptual design study" MSc Thesis, TU Delft, 2012, Delft,
[32] CAVAS, P.C. "Navy's magnetic launch system a success". NavyTimes, Dec 20, 2010. http://www.navytimes.com/news/2010/12/navy-magnetic-launch-success-122010/ (12/11/2011).
[33] WOLCOTT, B.: "Induction for the Birds". The American Society of Mechanical Engineers, 1999. http://www.askmar.com/Inductrack/2000-2%20Inductrack%20ASME.pdf (accessed at Nov. 20, 2015)
[34] RADFORD, T. "NASA takes up idea pioneered by Briton". The Guardian, 11th of October, 1999.

[35] BATENIN, V.M., .BITYURIN, V.A, IVANOV, G.S., INOZEMZEV, N.N., GOROZHANKIN, P.A.: Electromagnetic complex concept for the horizontal start and landing of a reusable airspace aircraft. 48th International Astrounatical Congress, October 6-10, 1997, Turin, Italy
[36] МИГ-АКС АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА,
[37] http://www.testpilot.ru/russia/mikoyan/aks/migaks.htm
[38] AIRBUS: "Eco-Climb". Airbus. http://www.airbus.com/innovation/future-by-airbus/smarter-skies/aircraft-take-off-in-continuous-eco-climb/ (04/09/2014).
[39] CHOWSON, E. "Konstruktiver entwurf und dimensionierung einer flugzeugseitigen schnittstelle zwischen fahrwerklosen verkehrsflugzeugen und einem bodengebundenen fahrwerksystem", Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2010, Document ID: 161503, http://www.mbptech.de/Bilder/(W43-38)161503-DLRK-Vortrag_Erik.pdf (cited at 12.02,2015)
[40] IATA TECHNOLOGY ROADMAP 2013, IATA (International Air Transportation Association), http://www.iata.org/whatwedo/environment/Documents/technology-roadmap-2013.pdf
[41] VANGUNDY, A. B. 101 activities for teaching creativity and problem solving, Pfeiffer, ebook, 2004, http://www.bio-nica.info/biblioteca/VanGoundy2005101ActivitiesTeaching.pdf, (acessed at Nov. 20, 2005)
[42] KIRBY, M. R. "A methodology for technology identification, evaluation and selection in conceptual and preliminary aircraft design", PhD Thesis, Georgia Institute of Technology, 2001
[43] ROHACS, D., KISGYORGY, L., HORVÁTH, ZS. CS. Magnetic levitation and its experimental use in rail and air transportation, Universitas-Győr Nonprofit Kft., Györ, 2015. 115 p
[44] ROHACS D, VOSKUIJL M, ROHACS J, SCHOUSTRA R-J. Preliminary Evaluation of the Environmental Impact Related to Take-off and Landings Supported with Ground-Based (MAGLEV) Power, Journal of Aerospace Operation, 2:(3-4) pp. 161-180. (2013)
[45] WU, P., VOSKUIJL, M., VAN TOOREN, M., AND VELDHUIS, L. (2015). "Take-Off and Landing Using Ground-Based Power-Simulation of Critical Landing Load Cases Using Multibody Dynamics." J. Aerosp. Eng. , 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000520 , 04015070
[46] FALKOWSKI K., SIBILSKI K., 2013, Magnetic levitation system for take-off and landing airplane – project GABRIEL, COMSOL Conference 2013, Rotterdam,
[47] http://www.comsol.com/paper/download/182061/falkowski_paper.pdf
[48] ROHACS D, VOSKUIJL M, SIEPENKOTTER, N. Evaluation of Landing Characteristics Achieved by Simulations and Flight Tests on a Small-Scaled Model Related to Magnetically Levitated Advanced Take -Off and Landing Operations, Proceedings of the 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS), St. Petersburg, Russia, 2014.09.07-2014.09.12.2014. Paper Rohacs_et al. 9 p. (ISBN:3-932182-80-4)

AZ OUT-OF-THE-BOX GONDOLKODÁSMÓD HATÁSA A LEGIKÖZLEKEDÉSI RENDSZER JÖVŐJÉRE

A cikk az úgynevezett out-of-the-box gondolkodásmód légiközlekedésre gyakorolt hatásával foglalkozik. Összefoglalja az out-of-the-box megközelítés lényegét, betekintést ad néhány kiemelkedő out-of-the-box megoldásba, szisztematikusan bemutatja az out-of-the-box megközelítés problémamegoldó jellegét egy választott területen (a fel- és leszállási folyamatokhoz köthető környezetkárosító hatások radikális csökkentése), majd meghatározza az innovatív megoldások definiálásához, és fejlesztéséhez használható alapvető metódust.

Keywords: *out-of-the-box gondolkodásmód, légi közlekedés jövője, repülő eszközök fel- és leszállása*

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_3/2015-3-14-0243_Rohacs_D-Rohacs_J.pdf

Bozóki János, Kavas László, Óvári Gyula

HAGYOMÁNYOS ÉS KORSZERŰ VIZSGÁLATI TECHNOLÓGIÁK TALÁLKOZÁSA A LÉGIJÁRMŰKARBANTARTÁS EGY KIEMELTEN FONTOS TERÜLETÉN

A 90-es évek közepétől a Magyar Honvédség légierejében, a negyedik generációs repülőgépek megjelenésével korszerű üzemeltetési rendszerek kerültek bevezetésre, amelyeknek egyik fontos eleme a megfelelő roncsolásmentes anyagvizsgálati módszerek alkalmazása. Egyre több speciális igény fogalmazódik meg az NDT eljárásokkal szemben, mint például a folytonossági hiányok geometriájának, térbeli elhelyezkedésének, méretének a vizuális megjelenítése és dokumentálása. A katonai alkalmazás elengedhetetlen feltétele a mobilitás, tehát akár harctéri körülmények között is használható legyen. Jelen publikáció bemutat egy, a katonai légijárművek üzemeltetése során alkalmazható, nagy térbeli felbontóképességgel rendelkező mágnesszenzorra épülő örvényáramú mérőszonda alkalmazási lehetőséget. A bemutatott mérőszonda alkalmazással az anyaghiba elhelyezkedéséről, esetleges térbeli kiterjedéséről is információt kapunk. Ennek gyakorlati jelentősége akkor nyilvánul meg igazán, amikor kritikus elhelyezkedésű vagy méretű hibahelyeket kell megkülönböztetni a biztonság számára irreleváns egyéb anyaghibáktól, illetve a konstrukciós elemek hatásaitól.

Kulcsszavak: *harcászati repülőgépek; roncsolásmentes anyagvizsgálat, mágnesszenzor, örvényáramú roncsolásmentes anyagvizsgálat, helikopter;*

1. BEVEZETÉS

Korunk nemzetközi biztonságpolitikai változásait követve a magyar fegyveres erők is folyamatos szervezeti és funkcionális változásokon mentek keresztül. A Magyar Honvédség (MH) tömeghadseregből, azonnal bevethető haderővé alakult át, mellyel aktív résztvevőjévé vált NATO-műveleteknek. A 90-es évek közepétől napjainkig az MH légierejének kötelékében számos új, a kor technikai színvonalán álló haditechnikai eszköz állt hadrendbe (JAS-39 EBS HU Gripen, MiG-29 vadászrepülőgépek). Utóbbiak megjelenése szükségessé tette modern üzemeltetési és diagnosztikai rendszerek alkalmazását is, melyek egyik speciális eleme a roncsolásmentes anyagvizsgálat. Ezekre a megoldandó feladatok széles skálája, valamint az egyes módszerek alkalmazhatóságának korlátai miatt van szükség. Hibadetektálásra több, különböző vizsgálati eljárás létezik, melyek teljesítőképessége egyrészt eltérő, másrészt alkalmazhatóságuk nagymértékben függ a vizsgálandó tárgy méretétől, jellegzetességeitől, a rendelkezésre álló mérési időtől, környezeti viszonyoktól, így felhasználhatósági összevetésük sem lehet teljes mértékben egzakt. A megoldandó feladat tisztázását követően, a legjobban megfelelő roncsolás-mentes vizsgálati eljárást, vagy ezek célszerű kombinációját szükséges alkalmazni. Ennek metodikája nagymértékben függ a vizsgálati tárgyakban várható hibaféleségek típusától, méretétől, irányítottságától, a keresett folytonossági hiány pozíciójától, felületi mélységi helyzetétől. E publikáció egy, a katonai légijárművek üzemeltetése során felhasználható, nagy térbeli felbontóképességgel rendelkező, mágneses szenzorra épülő örvényáramos roncsolás-mentes anyagvizsgálati (Eddy Current Test) (ET)[1] módszer alkalmazási lehetőségét mutatja be. A mérőszondát felhasználva az anyaghiba elhelyezkedéséről, esetleges térbeli kiter-

[1] ET - Eddy Current Test (örvényáramú roncsolásmentes anyagvizsgálat)

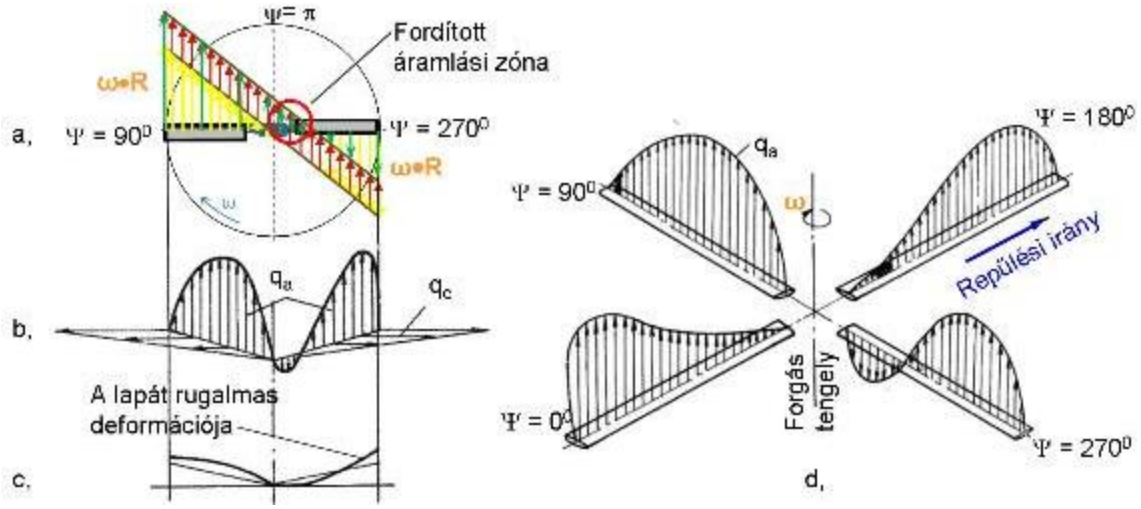
jedéséről is információt kapunk. Ennek gyakorlati jelentősége markánsan akkor jelentkezik, amikor kritikus elhelyezkedésű, vagy méretű hibahelyeket kell megkülönböztetni, a biztonság számára irreleváns, egyéb anyaghibáktól, illetve a konstrukciós elemek hatásaitól.

2. EXTRÉM REPÜLŐGÉPTERHELÉSEK VIZSGÁLATI LEHETŐSÉGE

A repülőeszközök elvárt, illetőleg előírt gazdasági-hatékonysági és biztonsági mutatókkal bíró működése, - a gondos tervezést, gyártást követően - csak az üzemeltetés során folyamatosan fenntartott, magas színvonalú állapotellenőrzés biztosításával lehetséges. Ennek meghatározó területe, a megbízható működés szempontjából kiemelkedő fontosságú, nagy terheléseknek kitett szerkezeti elemek (szárnyak, forgószárnyak, légcsavarok, a hajtóművek forgó és/vagy termikusan terhelt gépegységei [10][11], futóművek [8], fedélzeti fegyverek [9] rögzítési pontjai stb.) műszaki állapotának folyamatos, nagy pontosságú mérése, figyelemmel kisérése, majd a szükséges javítási, karbantartási munkálatok pontos végrehajtása.

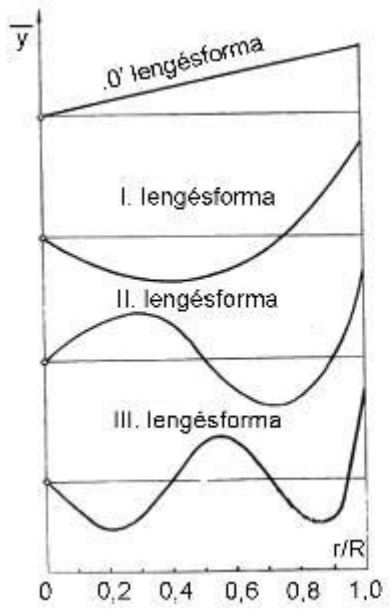
2.1. A forgószárnyak terhelése [1]

A helikopterek legnagyobb váltakozó aerodinamikai és mechanikus terhelésnek kitett szerkezeti eleme a - ferde átáramlási üzemmódon működő (haladó mozgást végző) - forgószárny. Ennek lapátjain a megfúvási viszonyok, a teljes körülfordulása során, minden ψ azimuthelyzetben változnak (1.a. ábra), melynek következményeként rajtuk folyamatosan, periódikusan változó nagyságú és terjedtség menti eloszlású légerők ébrednek (1.b. és d. ábra). Utóbbi felhajtóerő összetevője (q_a) a vonóerő síkjában a lapátok csapkodó mozgását, terjedtség menti megoszlásának váltakozása pedig ciklikusan váltakozó, rugalmas deformációját (hajlító lengések) hozza létre azokon (1.c. ábra).

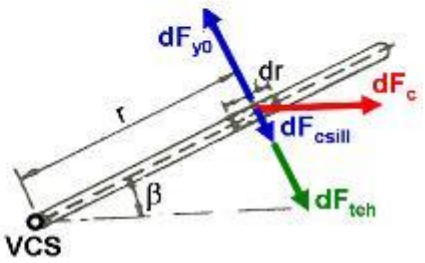


1. ábra Forgószárny terhelése és deformációja ferdeátáramlási üzemmódon [7]

A forgószárny repülési üzemmódjától, anyaga, szilárdsági, merevségi, rugalmassági és tömegviszonyaitól (EI, GI_p, m stb,) függően a lapátok lengésformája (tónusa) is különböző lehet (2. ábra).



2. ábra Forgószárny lapát lengésformák [7]



3. ábra Csapkodó lapáton keletkező erők [7]

Megjegyzés: e cikkben, a forgószárny lapátok légerő terhelés okozta periodikus csavaró igénybevételek elemzésétől – a nagyságrendi különbségek miatt – eltekintünk.

A vonóerő síkjában a csapkodó mozgást végző lapátok vízszintes csuklóhoz (VCS), (vagy csukló nélküli lapátbekötéshez) viszonyított pillanatnyi egyensúlyát a folyamatosan változó erők (F_{y0} – felhajtóerő, F_{csill} – aerodinamikai csillapítóerő, F_c – centrifugális erő, F_{teh} – tehetetlenségi erő) nyomatékának egyensúlya határozza meg (3. ábra):

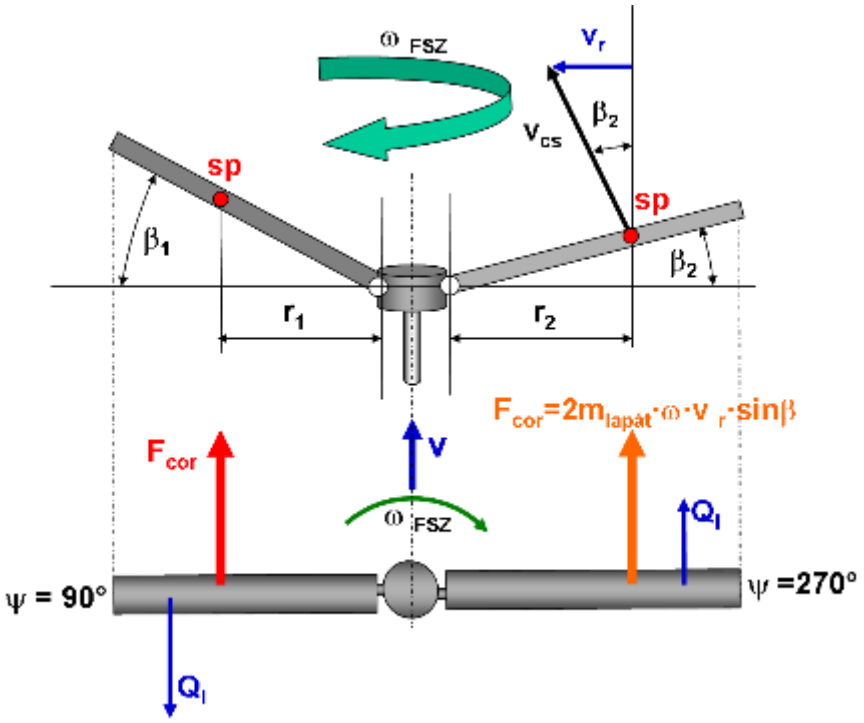
$$\Sigma dM_{vcs} = dMF_{y0} - dM_{Fcsil} - dM_{Fc} - dM_{Fteh} = 0 \qquad (1)$$

A forgó-haladó csapkodó mozgást végző lapátokon, Coriolis-erők (F_{cor}) is ébrednek (4. ábra), melyek azokat a forgás síkjában lengőmozgásra (az előrehaladó, felcsapó lapátokat sietésre, a hátrahaladókat késésre) késztetik.

Mindezek konklúziójaként megállapítható, hogy:

- a – ferde átáramlási üzemmódon működő – forgószárny-lapátokon, közel állandó nagyságúnak tekinthető centrifugális (F_c), valamint a periodikusan váltakozó nagyságú F_{y0}, F_{csill}, F_{teh}, illetve F_{cor} erők nagy statikus igénybevételekre szuperponálódó jelentős dinamikus igénybevételeket eredményeznek;
- a repülésbiztonság szempontjából kiemelt fontosságú, komplex igénybevételeknek kitett forgószárnyban létrejövő anyaghibák – fém eszközökhöz rendszeresített – hagyományos eszközökkel történő műszeres detektálása számos konstrukciónál azért nem lehetséges, mert a lapátokat a gyártók többsége már a 60–70-es évektől szendvics szerkezetűre, illetve műanyagból (5. ábra), napjainkra pedig már az agyakat is gyakran döntően kompozit elemekből készítik (6. ábra).

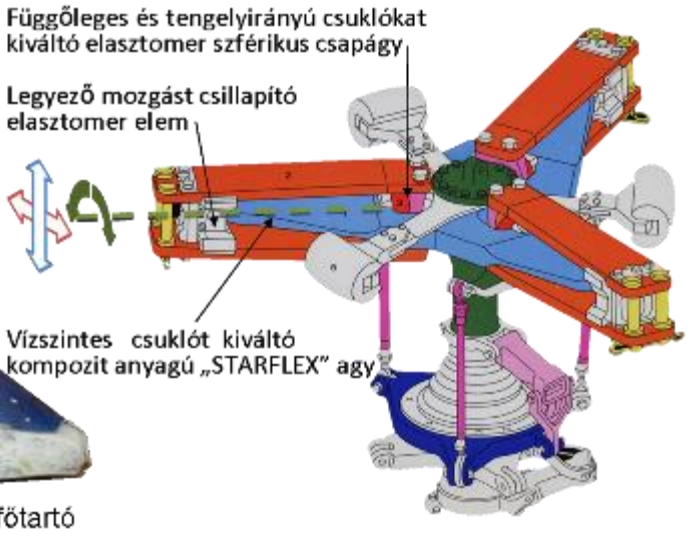
Következtetés: szükség van új, magas megbízhatóságú módszerek, eszközök és eljárások fejlesztésére, kimunkálására a műanyag, kompozit szerkezeti elemek anyaghibáinak megbízható detektálására.



4. ábra Coriolis-erők keletkezése [7]



5. ábra Ka-26 forgószárny lapát metszet (saját fotó)



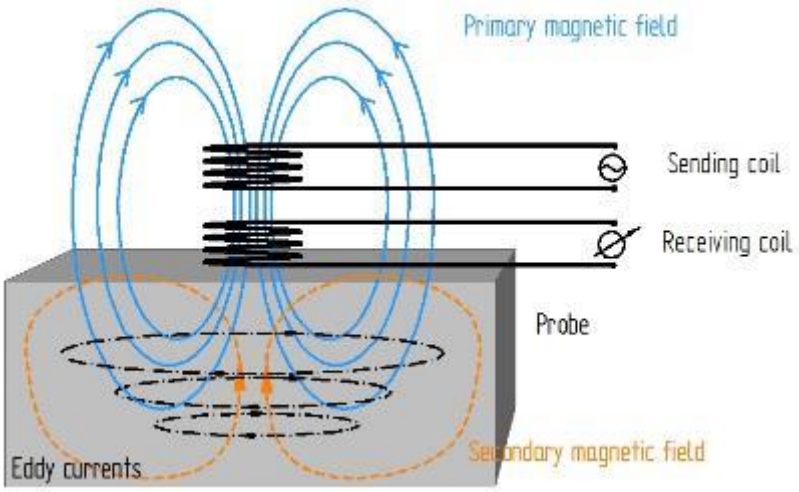
6. ábra Kompozit forgószárny agy [7]

3. ÖRVÉNYÁRAMÚ ANYAGVIZSGÁLÓ BERENDEZÉS ALKALMAZÁSA KATONAI LÉGIJÁRMŰVEK ÜZEMELTETÉSÉBEN

3.1. Örvényáramos roncsolásmentes anyagvizsgált

Az örvényáramos anyagvizsgálat, illetve méréstechnika működési alapelve az elektromos vezető (továbbiakban csak vezető) anyagok és váltakozó mágneses tér között kialakuló fizikai kölcsönhatásból adódik. Ha vezető anyagot változó mágneses térbe helyeznek, az indukció jelensége alapján bennük elektromos feszültség keletkezik, amely hatására elektromos áram indul meg. Mivel egy homogén anyag belsejében nincs korlát a lehetséges áramutakra vonatkozólag,

azért az így kialakuló térben eloszlással rendelkező áramot örvényáramnak nevezzük. Ennek térbeli eloszlása, – egyéb feltételek hiányában – a Lenz törvényének megfelelően alakul ki: az örvényáramok saját mágnestere a külső mágnestér anyagba történő behatolását igyekszik megakadályozni, mivel az tükörként részben visszaveri a külső hatást.



6. ábra Örvényáramos roncsolásmentes anyagvizsgálat elvi vázlata [6]

Ebből adódóan az örvényáramok térbeli eloszlása ez esetben a gerjesztő külső mágnestér, illetve annak térbeli eloszlása, valamint az anyagi minőség (vezetőképesség és mágneses permeabilitás) által meghatározott (6. ábra) [3][5].

A klasszikus örvényáramú méréstechnikában az anyag és a külső mágnestér közötti eredő kölcsönhatás mértékének változását mérik. Ugyanis a vizsgált anyag belsejében megtalálható hibahelyek (folytonossági hibák, vagy bizonyos szerkezeti elváltozások: pl. fázisátalakulások) lokálisan befolyásolják az anyag vezetőképességét. Ez pedig visszahat a kialakuló örvényáram eloszlás térbeli szerkezetére és intenzitására, így az anyag mágnestérrel szembeni eredő visszatükröző képességére is. A gyakorlatban az anyag és a mágnestér közötti kialakuló kölcsönhatás mértékének vizsgálatára egy egyszerű tekercset ún. impedanciatekercset alkalmaznak. Egy adott geometriájú tekercs által létrehozott mágneses térenergiája ugyanis a tekercsben folyó áramon, a tekercs terében található anyagok mágneses tulajdonságainak, illetve a kialakuló mágnestér térbeli eloszlásának függvénye. A térbeli eloszlást viszont a vizsgálandó anyag, illetve az abban található hibák befolyásolják. Ezáltal a hibahelyek az impedanciatekercs mágneses terének energiájára, így impedanciájára is visszahatnak. A klasszikus módszer egyik hátránya, hogy az alkalmazott impedanciatekercs körül a teljes mágneses átgerjesztett térfogatból szolgáltat információt, ami a gyakorlatban jelentősen csökkenti az elérhető térbeli felbontást. A gerjesztés irányában, a vizsgált minta felületére merőlegesen egy homogén anyag belsejében az örvényáramok eloszlása egy exponenciálisan lecsengő függvény szerint alakul. A csillapodás mértéke a vezetőképesség, a permeabilitas és a mágnestér frekvenciájának függvénye. Minél nagyobb ez a frekvencia, annál intenzívebb a kölcsönhatás, tehát annál erősebben csillapodnak a mélység függvényében az örvényáramok, azaz annál kisebb az ún. behatolási mélység. A klasszikus örvényáramú méréstechnika esetében a jobb térbeli felbontás érdekében csökkenteni kell az impedanciatekercs geometriai méretét, ami az impedanciájának jelentős csökkenésével jár együtt. A mérés elve tehát az, hogy a mágneses mező változását érzékeny elektronikus eszközökkel mérni lehet. A

mérés során a vizsgált tárgyban haladó áram impedanciájának változást mérjük. Az impedancia az (1) összefüggés segítségével határozható meg [3].

$$Z = R \bullet \sin \omega \bullet t + X_L \bullet \cos \omega \bullet t \qquad (2)$$

ahol:

- Z – impedancia [Ω],
- R – ellenállás [Ω],
- X_L- induktivitás [Ω],
- ω - körfrekvencia [l/s],
- t – fázisidő [s].

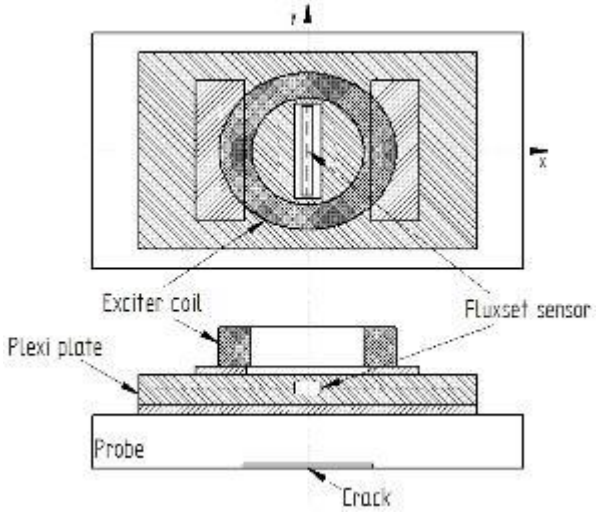
A (2) kifejezésből a Z vektor nagysága (abszolút értéke),

$$|Z| = \sqrt{X_L^2 + R^2} \text{ a fázisszöge pedig } \quad \varphi = \operatorname{arctg}\left(\frac{X_L}{R}\right) \qquad (3)$$

3.2. Mágnesszenzor alkalmazásának jelentősége

A klasszikus örvényáramú anyagvizsgálat lehetőségeiben rejlő ellentmondásokat a gerjesztés és az érzékelés szétválasztásával lehet feloldani. Ez a szeparáció lehetővé teszi, hogy olyan gerjesztőteret alkalmazzunk, amely esetében a kimutatandó hibahely a lehető legjobban megzavarja az anyag belsejében az örvényáramok eloszlását; illetve, hogy a mérőelemet térben úgy helyezzük el, hogy az a lehető legérzékenyebb módon észlelje ezt a zavart (az örvényáramok térbeli eloszlásának torzulása hatására, a mágnestérben megjelenő torzulásokat). A kellő behatolási mélység biztosítására elektromosan jól vezető anyagok (pl. alumínium) esetében az alkalmazható gerjesztőtér-frekvencia mindössze néhány kHz. Ilyen alacsony frekvenciájú mágnesteret induktív módon már nehézkes mérni, nagy érzékenységet pedig egyéb fizikai okok miatt lehetetlen elérni. Így kézenfekvő, hogy az örvényáramú anyagvizsgálati mérőfejben az érzékelő elem szerepét egy magas szenzibilitású mágnesszenzor (Fluxset) töltse be. A kisméretű Fluxset mágneses térmérő eszközt két tulajdonsága teszi ideálissá az örvényáramú anyagvizsgálatra:

- nagy térbeli felbontóképesség (jobb, mint 50 μm);
- frekvencia-független érzékenysége, (mely, a nagy behatolási mélységet igénylő alacsonyfrekvenciás vizsgálatok során döntő jelentőségű).

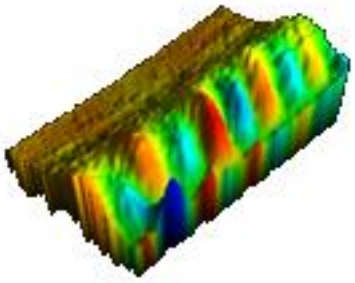


7. ábra Örvényáramú mérés elrendezés elvi vázlata [6]

A 7. ábrán az örvényáramú mérés elrendezés elvi vázlata látható. A gerjesztő tekercs az örvényáramok létrehozására szolgál a vizsgálandó, elektromosan vezető mintában. Az utóbbi felületéhez közel elhelyezkedő mágnesestér-mérő szenzor, az örvényáramok által keltett mágneses teret méri. A szenzor a hosszirányú mágneses terekre érzékeny, a keresztirányúakra érzéketlen. Ha az elektromos vezetőképességet befolyásoló bármilyen hiba van az anyagban (repedés, légbuborék, zárvány stb.), akkor ott az örvényáramok által keltett mágneses tér lokálisan megváltozik, ami a szenzor jelének változását eredményezi [2][4].

3.3. A mágneses képalkotás jelentősége és sajátosságai

A nagy térbeli felbontóképességgel rendelkező Fluxset mágnesszenzorra épülő örvényáramú mérőszonda alkalmazásával létrejön annak lehetősége, hogy az anyagvizsgálat során, ne csak a tanulmányozott alkatrész egy-egy pontján végzett mérés számértékeiből következtessünk az anyaghiba jelenlétére, hanem annak elhelyezkedéséről, esetleg térbeli kiterjedéséről is információt kaphassunk. Ennek gyakorlati jelentősége akkor nyilvánul meg igazán, amikor kritikus elhelyezkedésű, vagy méretű hibahelyeket kell megkülönböztetni, a biztonság számára irreleváns egyéb anyaghibáktól, illetve a konstrukciós elemek hatásaitól. A Fluxset mérőfej ugyanis lehetővé teszi a hibahely környezetének térbeli (felület menti) kézzel történő letapogatását, amely letapogatás az egyes mérési ponthoz képest hatalmas mennyiségű többlet információval szolgál. Ezt az információmennyiséget a „FluxGet" mérőszoftver képpé tudja alakítani. A mágneses tér, – ahogy azt a Maxwell egyenletek leírják – ún. örvényes (forrásmentes) tér. Azaz, zárt és teljes rendszerben (az örvényáramú mérésben a kölcsönhatásban résztvevő környezete ennek tekinthető) a mágneses tér erővonalai, a fluxusvonalak zártak. Ebből adódóan a vizsgált mintadarab felületén mérhető mágneses tértorzulások ún. kettős, dipólus jellegűek, azaz a ki és visszatérő erővonalakból épülnek fel. Ezért az adott hibahelyről készült mágneses mezőkép a hiba geometriájához képest összetettebb, értelmezése gyakorlatot igényel. (8. ábra) [1].



8. ábra Helikopter forgószárny lapát méhsejt-szerkezetéről alkotott kép [saját fotó]

3.4. A mért fizikai mennyiség

A mágnesszenzoros örvényáramú mérőfej a vizsgált mintadarabban kialakuló örvényáram eloszlás térbeli torzulásait méri az örvényáramok mágnese mezejében tapasztalható mágneses térbeli torzulások érzékelésével. A mért fizikai mennyiség tehát mágneses térerő, melynek frekvenciája azonos a gerjesztő térerővel, így az e tér hatására indukált örvényáramok frekvenciájával. Szinuszos (egy frekvenciás) gerjesztés esetén és lineáris közegben a visszamért mágneses tér is egyetlen frekvenciakomponenst tartalmaz, melyet két paraméter ír le és a (4) összefüggés segítségével határozható meg:

$$\bar{M}(t) = M_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi) = X_0 \cdot \cos(\omega t) + Y_0 \cdot \sin(\omega t) = \bar{X}(t) + \bar{Y}(t) \qquad (4)$$

ahol:

- $\vec{M}$(t) - a mágneses tér szenzorirányú térbeli komponensének időfüggvénye,
- M_0 - az amplitúdó vagy magnitúdó (a mágneses tér erőssége);
- φ - a mágneses tér fázishelyzete;
- $\omega=2\pi f f$ - a mágneses tér körfrekvenciája;
- f - a mágneses tér frekvenciája;
- t az idő;
- X_0 a mágneses tér ún. valós részének nagysága;
- Y_0 a mágneses tér ún. képzetes részének nagysága;
- $\vec{X}$(t) illetve $\vec{Y}$(t) a mágneses tér valós illetve képzetes részének időfüggvénye.

Tehát a mérésadatgyűjtő rendszerben a mérőfej minden térbeli helyzetéhez két skalármennyiség: X és Y, vagy M_0 és φ értékek tartoznak, illetve ezek kerülnek ábrázolásra [1].

3.5. A „FluxGet" örvényáramú roncsolásmentes anyagvizsgálati berendezés felépítése

A „FluxGet" örvényáramú roncsolásmentes anyagvizsgálati berendezés vezető és/vagy mágnese anyagok vizsgálatára szolgáló független mérőrendszer. A berendezés tápellátása a hordozható személyi számítógép saját akkumulátoráról, illetve közvetve, az ehhez a számítógéphez csatlakoztatott hálózati tápegységről valósul meg. A berendezés működés közben más készülékhez nem kapcsolódik. Az örvényáramú mérőfej a kábelen keresztül csatlakozik a hordozható személyi számítógép USB és analóg portjaihoz. A számítógép tápellátását (opcionálisan) a hozzá tartozó tápegység szolgáltatja (9. ábra).



9. ábra A „FluxGet" mérőrendszer fő funkcionális egységei [saját fotó]

3.5.1 A „FluxGet" mérőrendszer fő funkcionális egységei

- hardver elemek:
- hordozható személyi számítógép;
- örvényáramú mérőfej(ek);
- szoftver elemek:
- „FluxGet" mérés-adatgyűjtő és kiértékelő szoftver:
- felhasználói kezelőfelület és adatgyűjtő rendszer;
- DSP Lock-In jelelemző rendszer;

- USB portos mérőfej-kommunikációs rendszer;
- 3D megjelenítést végző grafikus motor.

A mérőrendszerhez további, különböző mérési feladatokhoz optimalizált mérőfej is csatlakoztatható.

3.5.2 Az örvényáramú mérőfej

Az örvényáramú mérőfej feladata, a mérésadatgyűjtést végző hordozható számítógép számára adatokat szolgáltatni a vizsgált mintadarab felületén mérhető mágnestér nagyságáról, illetve a mérőfej térbeli (felület menti) elhelyezkedéséről. Ezen kívül tartalmazza a vizsgált mintadarab mágneses gerjesztéséhez szükséges elektronikai és mágneses funkcionális egységeket.

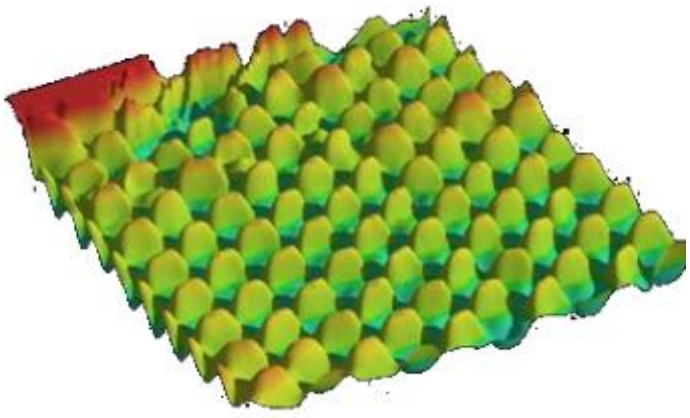
3.5.3 Az örvényáramú mérőfej kialakítása

Az örvényáramú mérőfej központi funkcionális egysége a Fluxset szenzorra épülő mérőszonda. Ez tartalmazza a vizsgált anyag mágneses gerjesztéséhez szükséges mágnesköröket, elektronikát; valamint magát a szenzort, illetve az ennek működtetéséhez szükséges elektronikát. A mérőfej mozgásáról, illetve mindenkori térbeli pozíciójáról a fejébe épített két nagyfelbontású optikai érzékelő szolgáltat információt.

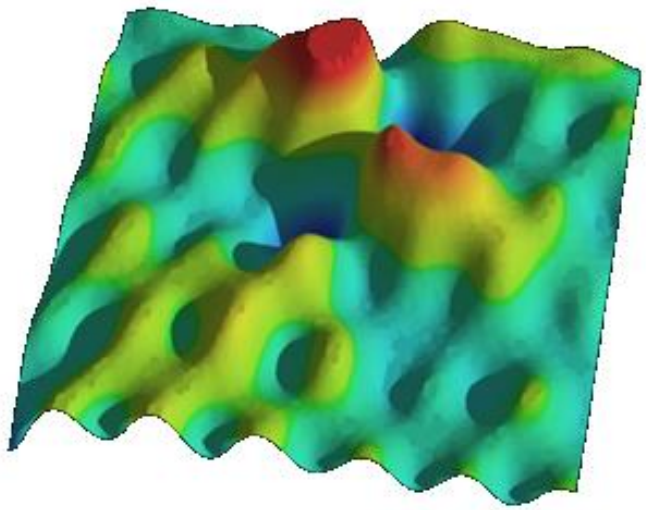
4. A „FLUXGET” ÖRVÉNYÁRAMÚ RONCSOLÁS MENTES ANYAGVIZSGÁLATI BERENDEZÉS ALKALMAZÁSI TERÜLETEI

4.1 Méhsejt építésű szerkezeti elemek

A repülőgépek sárkányszerkezetének (például a nagyfelületű, méhsejt építésű szárnyszerkezeti elemek) átvizsgálásakor egy átfogó, kisebb felbontású kép létrehozását követően, a problémás területekre szűkítve a vizsgálatot, lehetséges a felbontás a pontosság növelésével lokalizálni a folytonossági hiányt, vagy deformációt. A bonyolultabb belső szerkezetű, összetett, többrétegű anyagok esetében is megvalósítható a képalkotás. Helikopter forgószárny lapát méhsejt szerkezetének a „FluxGet” örvényáramú roncsolásmentes anyagvizsgálati berendezés segítségével készített képei láthatóak az 10. és a 11. ábrán [2].



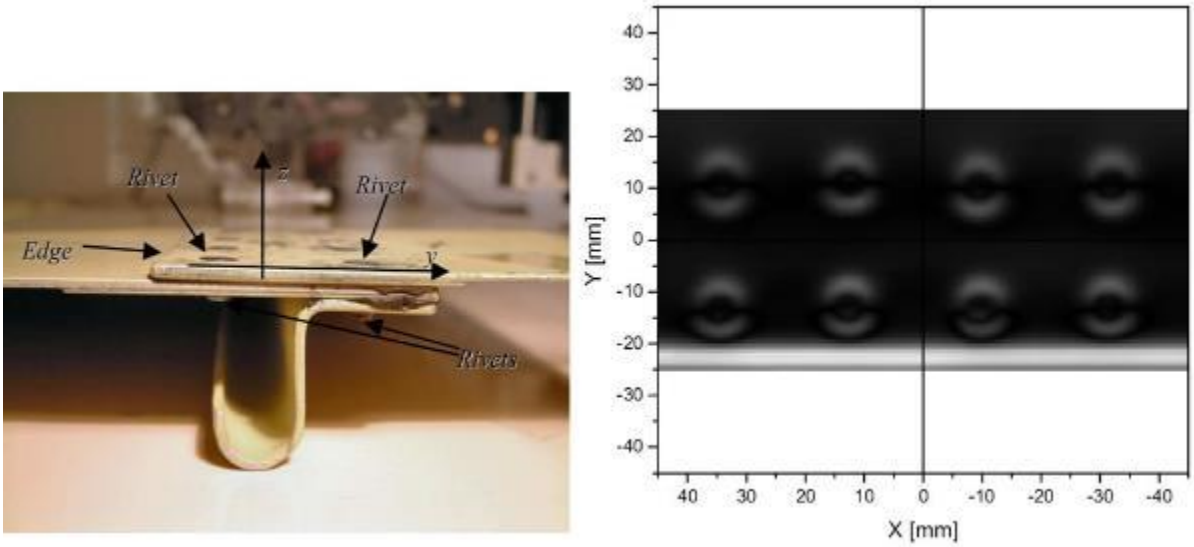
10.ábra Helikopter forgószárny lapát ép méhsejt-szerkezetéről alkotott kép [saját fotó]



11. ábra Helikopter forgószárny lapát deformálódott méhsejt-szerkezetéről alkotott kép [saját fotó]

4.2. Anyagfolytonossági hiány többrétegű, szegecselt szerkezetekben

Legtöbb olyan esetben, ahol többrétegű, szegecselt szerkezeteket (12.a. ábra) vizsgálunk, az elsődleges probléma nem a közvetlenül, vizuálisan is tanulmányozható felső, vagy külső borítás szegecsei körüli repedések meghatározása, hanem a belsőbb rétegek integritásának vizsgálata. A detektáláshoz szükséges behatolási mélység elérése érdekében csökkenteni kell a behatolási hullám frekvenciáját. A változtatás eredményeképpen jól láthatóak az alsó lemezben elhelyezkedő szegecsek. (12.b. ábra) [6]



a. b.

12. ábra Többrétegű szegecselt repülőgép alkatrész és a róla alkotott kép [6]

4.3. A forgószárny lapát borításragasztás állapotának hagyományos módszerrel történő ellenőrzése

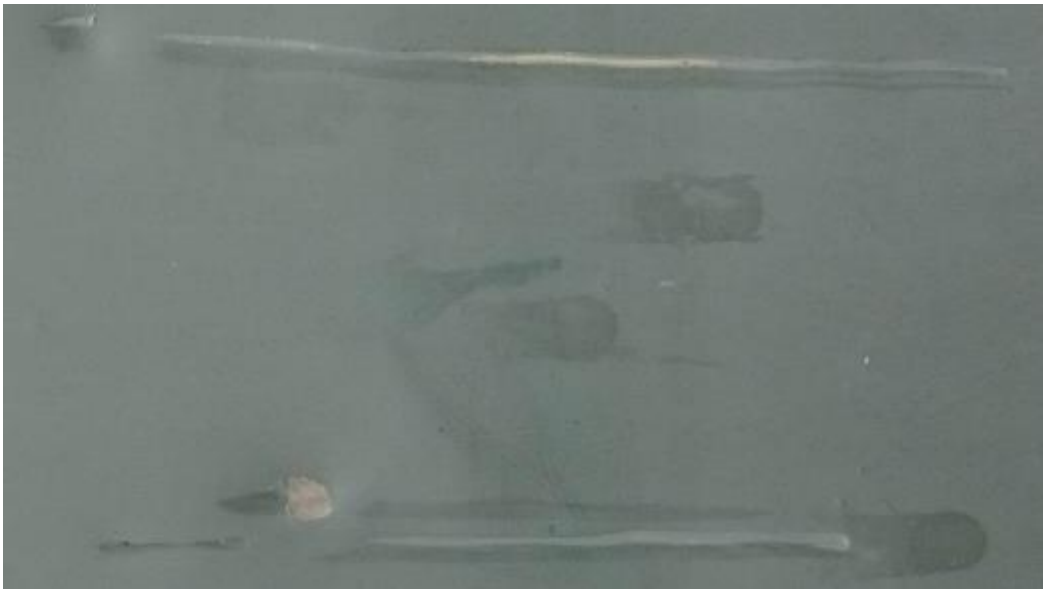
A hazai, orosz gyártmányú katonai helikopterek forgószárny lapátjai állapotellenőrzésére vonatkozó üzemeltetési utasítás, mind a mai napig, egy meglehetősen elavult vizsgálati technológiát ír elő. A gyakorlat az bizonyítja, hogy az előzőekben felvázolt korszerű méhsejt konstrukció szerkezeti deformáció kimutatási képesség megléte ellenére, a kevésbé pontos és egyáltalán

nem képies módszer is megfelelően szolgálja az üzemképesség elvárt szintű biztosítását. Évtizedek óta nem történt repülő esemény, katasztrófa forgószárny lapát, vagy farok-légcsavar lapátok ragasztott kötéseinek hibájából. Viszont az is igaz, hogy ez a módszer a lapátok állapot szerinti üzembentartását, vagy éppen az esetlegesen szükséges üzemidő hosszabbítását nem támogatja. Ezért (is) megállapítható, hogy az előző fejezetben leírtaknak van inkább létjogosultsága. Ez pedig már az üzembentartás gazdaságosabbá tételéhez tartozó kijelentés. A lapátok ellenőrzése természetesen kellően képzett és megfelelően nagy gyakorlattal rendelkező repülőgép szerelőt, vagy technikust kíván – és erre a munkát szervező vezetőknek nagyon is figyelniük kell – mivel a lapátborítás és a méhsejt töltőanyag ragasztása állapotának megítélése, a meghibásodások peremei tartományában, nagymértékben szubjektív (13. ábra).

A hagyományos, kopogtatós módszer esetében egy, a felválás határvonalának meghatározása ±5 mm pontossággal valósul meg a szakemberek saját bevallása szerint. Tehát egy névleg 50 mm átmérőjű borításfelválásnál, a sérült terület $A_{sérült}$ = 1962,5 mm^2 nagyságú. A fenti bizonytalanság alapján ezt az ellenőrzés meghatározhatja $A'_{sérült}$ = 1589,625 mm^2-nek is, vagy $A_{sérült}$ = 2374, 625 mm^2-nek is. Mint az látható, számottevő eltérések jöhetnek létre a valóságos hibaméret és a mért érték között. A riadalom elkerülésére itt leszögezhető, hogy a lapátokra megengedett hibaméretek a fenti példában láthatónál jóval nagyobbak,

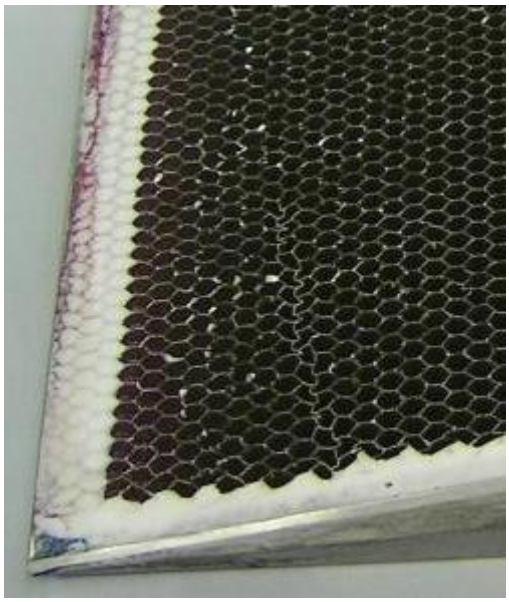
- a lapátvég felé eső utolsó 6 szekcióban 150 cm^2;
- az ettől beljebb lévő szekciókban 200 cm^2;

a borítás és a méhsejt töltőanyag elválásának megengedett maximális összterülete, a lapátok egy-egy oldalára vonatkoztatva.



13. ábra Egy lapátsérülés külső lenyomata [saját fotó]

A lapátok gyártóinál is javult a ragasztási technológia megbízhatósága, napjainkban szinte kizárólag a forgószárnylapát szele által felkapott, és a lapát borításának csapódó valamilyen szilárd test (apró kavics, jég darabka) okoz lokális ragasztási sérülést (lásd 14. és 16. ábra).



14. ábra Sérült és ép részeket is tartalmazó méhsejt szerkezet [saját fotó]

A lapát borítás ragasztásának ellenőrzése meglehetősen egyszerű. Kopogtatásos eljárásnak nevezik, és eszköze egy kisméretű, 10–15 g tömegű textolit kalapács (15. ábra). Természetesen a vizsgálatot megelőzően a lapát felületeinek előkészítéséről gondoskodni kell. Csak tiszta és száraz felületeken végezhető el az ellenőrzés. A vizsgálatot végző repülőgép szerelő egy profi zenész képességeit is birtokolja. Az eredményesség, a siker kulcsa: könnyű kéz és abszolút hallás, na meg megfelelő fizikai erőnlét! A lapát borítás és méhsejt töltőanyag ragasztott kapcsolatának minőségét ugyanis úgy kell elvégezni, hogy:

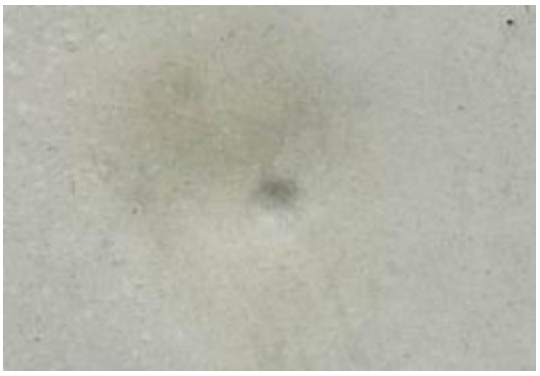
- a textolit kalapács kb. (az ellenőrzött felülettől számított) 10–15 mm magasságból való szabad leejtésével kell a kopogtatást elvégezni;
- enyhe ütések alkalmazásával a kalapács felemelési magassága nem haladhatja meg a 10 mm-t,
- a lapát főtartója és a hátsó hosszmerevítőjétől számított 25 mm-es távolságon kívül eső tartományban a lapát teljes felületét végig kell kopogtatni alul és fölül egyaránt;
- a kopogtatást úgy kell elvégezni, hogy a lapát borításán nem keletkezhet ütögetési nyom.



15. ábra A lapátsérülés ellenőrző készlet, benne a kopogtató kalapácsok [saját fotó]

A ragasztott szerkezet ellenőrzése során az egyetlen hibajelzés a „kalapácsütés” hatására keletkező hanghatás megváltozásából adódik, tehát a hiba-indikáció e módszernél is közvetett. A

problémás hely kiterjedésének, az ép és sérült rész határvonalának eltalálása pedig, - mint már utaltunk rá - eléggé szubjektív. Példaként a 16. ábrán látható benyomódást szolgál, ahol érzékelhető a külső szemlélőnek is, hogy mennyire nem éles egy sérülés határvonala.



16. ábra Egy sérülés helye a borítás oldaláról észlelve [saját fotó]

Amennyiben a feltárt borítás-felválás mértéke eléri a 150 cm^2, illetve 200 cm^2–es méretet, a hatályos üzembentartási utasítás, a jelenleg rendszeresített orosz/szovjet gyártmányú helikopter esetében nem lapátcserét, hanem minden repülési nap után ellenőrzést írt elő.

5. KONKLÚZIÓ

A bemutatott mérőszonda alkalmazásával, a katonai légijárművek üzemeltetése során kialakuló anyagfolytonossági hiányok elhelyezkedéséről, esetleges térbeli kiterjedéséről is nyerhető információ. Ennek gyakorlati jelentősége akkor jelentkezik igazán, amikor kritikus elhelyezkedésű, vagy méretű hibahelyeket kell megkülönböztetni, a biztonság számára irreleváns egyéb anyaghibáktól, illetve a konstrukciós elemek hatásaitól. A légijárművek hadrafoghatóságának biztosításához magas szintű kiképzettséggel, gyakorlattal és felszereltséggel rendelkező szakemberek közreműködése szükségesek.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] G. Vértesy, A. Gasparics, J. Szöllösy, “High sensitivity magnetic field sensor” Sensors and Actuators, 85 (2000) pp. 202–208

[2] Vértesy Gábor Gasparics Antal Pávó József “Elektromágneses roncsolásmentes anyagvizsgálat nagy érzékenységű mágnesestér-mérő szenzor alkalmazásával” http://www.anyagvizsgaloklapja.hu/avl/cikkek/05_02_Vertesy_Gasparics_Pavo.pdf

[3] Dr. Tóth L. Serge C. : Roncsolásmentes vizsgálati módszerek, Miskolci Egyetem, Miskolc, 1999. http://www.muszeroldal.hu/assistance/roncsolasmentesvizsgalatok.pdf

[4] Gasparics Antal: FLUXET SZENZORRA ÉPÜLŐ ELEKTROMÁGNESES RONCSOLÁSMENTES ANYAGVIZSGÁLATI MÓDSZER Doktori (PhD) értekezés Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem 2005. 46. oldal

[5] Bozóki János: Légijárművek harci sérüléseinek roncsolásmentes anyagvizsgálati eljárásai. Repüléstudományi Közlemények XXI. évf. 3. szám (2009), 8. oldal

[6] Dr. Antal Gasparics, Dr.Gábor Vértesy, Péter Barna, Tibor Farkas and János Szöllősy SUPPRESSING EFFECTS IN NDT BY THE HELP OF MAGNETIC IMAGING

[7] Óvári Gyula: Helikopter-szerkezettan I. KGYRMF Szolnok 1986

[8] Óvári Gyula: Helikopter-szerkezettan II. KGYRMF Szolnok 1986

[9] Szilvássy László A harci helikopterek fegyverrendszerének modernizációs lehetőségei a magyar honvédségben, MTA Debreceni Akadémiai Bizottság, 2011. 35 p. Elektronikus Műszaki Füzetek; X..) (ISBN:978-963-7064-26-5)

[10] Varga Béla Helikopter gázturbinás hajtóművek optimális nyomásviszonyai a turbina előtti gázhőmérséklet és a gépegység veszteségek függvényében SZOLNOKI TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK XVI: pp. 218-234. (2012)
[11] Varga Béla: Specific net work or thermal cycle efficiency, one of the questions engineers must face designing helicopter turboshaft engines REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK 2013/különszám: pp. 78-88. (2013)

MEETING OF TRADITIONAL AND MODERN TEST TECHNOLOGIES IN PRIORITY AERIA OF AIRCRAFT MAINTENANCE

Since mid-1990s until these days, by applying fourth generation fighters in the Hungarian Defence Forces, modern operating and maintenance environment and systems have also been introduced demanding the fundamental need for appropriate Non Destructive Testing methods. End-users demand higher and more specific standards against NDT methods for more functions such as the ability to record and visualize the geometrical, - and dimensional location and the size of possible surface flaws. Mobility is a crucial factor for the use of NDT in Military environment. That is, tests could be performed in field conditions as well. This publication is aimed to provide an overview of how a certain eddy current test probe using high- resolution magnetic sensors can be applied for military aircraft maintenance. Using this test probe enables specialists to gain information on the actual extent and dimensions of the flaws in the material. The practical value of this kind of testing applies when it comes to tell the difference between a flaw - at a critical place or in a critical size - that badly affects the entire structure and one that is irrelevant to security measures.

Keywords: *fighter aircraft, helicopter, Nondestructive Test Methods to Aircraft Structure Elements, Eddy Current Test, high-resolution magnetic sensors, information on the actual extent and dimensions of the flaws in the material.*

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_3/2015-3-15-0245-Bozoki_J-Kavas_L-Ovari_Gy.pdf

György Bicsák

GENETIC ALGORITHM BASED TIME SCHEDULE MANAGEMENT FOR SMALL AEROSPACE COMPANIES

Time schedule management is a really up-to-date problem considering the opposite interests of the employers and employees in the working hours. In order to maximize the profit employers are tended to overload their workers, which leads to exhaustion and because of that profit reduction. In the case of smaller aerospace companies, where the employees have to work not only in a specified area but they are involved in more than one projects, and additionally the company has to meet with more and stricter demands and rules, the time scheduling often becomes a number one priority. The scheduling is usually done manually taking several days or weeks of iterative repair after the feedback from the employees. The scope of this paper is to investigate a genetic algorithm (GA) for time schedule management purposes for a small, Part-147 organization: to investigate the environment, and influencing constraints, objectives.

Keywords: *genetic algorithm, time schedule management, Part-147, SWOT analysis*

INTRODUCTION

As technology continuously develops, time has been becoming the highest priority from all the respected management parameters. In the global stock market dollar millions can be earned or lost in nanoseconds by applying stock-optimizing algorithms software with high-performance computers.

Time management has already a wide-range of appliance, and several approaches. According to the Pareto Principle (or usually known as 80-20 rule), the vast majority of impact in anything comes from a small proportion of activities, people or effort, and focuses on the 20% of the activities or tasks are most important. The Pickle Jar Theory states that the more important tasks have to be done at first, and the less important work can be done in the spaces between and after a major project or tasks. Maslow's Theory focuses on the higher goals of fulfilment, spirituality and well-being. It assumes that in the interests of greater efficiency sacrificing bigger things, like satisfaction, then it is a moot victory. These general time-management methods have got implementations in particular fields from everyday usage, up to schedule management processes in large, international companies.

But aerospace industry requires more specific solutions generally. Recently, the breakthrough innovations and leading technologies [16] or intelligent systems [12] are usually appears in the aerospace industry despite the strict regulations.

More and more problems are solved with different kind of optimization methods from the aerodynamic design or dynamic mathematic model build-up problems [3], through the inverse design problems [18], to the process-management optimization problems, but most of these methods are subject to several undesirable restrictions. [15] These methods require the knowledge derivatives of the given particular field for each parameter, or combination of parameters for higher order of coupling. To evolve a particular solution for a given problem can demand significant man-hour,

which is not affordable for smaller companies, meanwhile at larger organizations whole departments can deal with the problem. So smaller companies require smarter, more cost-efficient solutions, which are also capable to reduce the workload of the employees. [4]

Specific Demands of a Part-147 Training Organization

The operation of a PART-147 Maintenance Training Organization is strictly determined by numerous regulations and laws, like European Aviation Safety Agency (EASA), or the European Aviation Authorities (EU NAA). The operational requirements are defined by the EASA Annex IV (Part-147) for approved training organizations which conduct training and testing of certifying staff. The knowledge of specific subject modules in accordance with Appendix I must be proven by examinations. In accordance with EASA Part-145 the Aircraft Maintenance Licence (AML) can be issued after a defined period of experience in a maintenance organisation. This time interval can be reduced if the applicant participates in an approved training course, organized by a Part-147 company, which is capable to guarantee this minimum standard in theoretical and practical training.

The main functions/duties of a Part-147 organization:

- Managing and maintaining an adequate facility which must include appropriate facilities for the use of training courses, and securely storing of assessment papers, completed students answer papers, and every related document.
- Maintaining, monitoring, and auditing the Training Material and Question Bank
- Maintain and Manage an Archive
- Ensure a professional staff with appropriate qualifications, organize necessary self-development trainings in order to maintain or upgrade the instructors competence
- Organize different training courses (type training, continuation training, other trainings)

Of course additional operative tasks have to be also handled. These wide range of duties, especially at a small company, such as AEROK Ltd. where the total staff number is only 9, the organization of these tasks is a daily problem which calls for novel, innovative ideas. The article is scoped to investigate a possibility to one of the biggest challenges of the company: automatizing the time-scheduling management processes with applying genetic algorithm methods.

GENETIC ALGORITHM FUNDAMENTALS

General Algorithm (GA) is a relatively new solution tool for optimization problems in a really wide range. The method is inspired by the genetic processes of biological organisms, and the evolution itself. The natural selection and “survival of the fittest” can be observed in these organisms, over many generations and populations, firstly stated by Charles Darwin in “The Origin of Species”. By implementing this process, the GAs are able to “evolve” solutions of the real world problems, and lately of different engineering problems, if the coding is suitable. [5]

The fundamentals and basic principles of GAs have been laid down by John Holland in 1975 [11]. The processes which are essential to evolution are simulated by GAs in natural populations. GAs are relatively young algorithms, therefore it is strictly determined which biological processes are essential for evolution and which processes have less or no role.

Individuals in the nature compete with each other for food, water or shelter, in short for resources. Furthermore the members of the same species often compete to attract a mate. The most successful individuals in surviving and attracting mates will have a relatively larger numbers of offspring, meanwhile poorly performing individuals have chance to produce less, or even no spring at all. Because of this pattern the highly adapted, or generally called "fit" individuals' genes are spreading to an increasing number in each successive generation. "Superfit" offspring can be produced by the combination of good characteristics from different ancestors, whose fitness is even greater than either of the parents. Of course, this process is resulted in species evolving to become more suited to their environment from generation to generation. [5]

The motor of the evolution of the species is the random mutation: the mutation of the species' genetic code can resulted in better or worse springs.

The GAs use the same algorithm, but the best solution is searched during the process with using the same considerations, while in nature the living conditions are changing continuously. The GAs are built up from the following main steps: [1]

1. Initialization: the algorithm sets up the possible solutions; determines the population
2. Evaluation: the algorithm calculates the fitness function, and the fitness of the given population
3. Selection: from the actual solutions the algorithm selects two parents according to their fitness (there are numerous selection schemes, but generally the better the fitness, the bigger chance to be selected)
4. Crossover: the parents are crossed with a crossover possibility to form a new offspring (children). If no crossover was performed, offspring is an exact copy of parents
5. Mutation: new offspring is mutated at each position in chromosome with a mutation probability.
6. Reproduction: The new offspring takes the parents place in the new population; the population is upgraded.
7. Termination criteria: If the termination criteria is satisfied, the algorithm is stopped, and the best solution is the current population.
8. End of process.

The process is illustrated by Figure 1.

One of the biggest challenge is to determine the genetic code, which involves the description of possible solutions, the initial population. At the same time the evaluation criteria have to be specified. Finally, the parameters of the algorithm, even those which are selected heuristically, have to be determined, like the size of the population, reproduction rate, mutation rate. After all the initial population can be created automatically. [2]

Two basic types of genetic algorithms are known depending on whether they are searching the better solutions in genotype or phenotype level. The genotype is the sum of the stored information in the genes, which determines the species outlook, or called phenotype. In programming level this means that the decoding function has to be well determined. [2]

The GA generates the phenotypes from the possibilities described in genotype space, which can be imagined as a super-structure, or as individual species. After evaluating each species, the

evaluation space can be determined, and then the GA fitness space can be derived, as it is illustrated in Figure 2. [2]

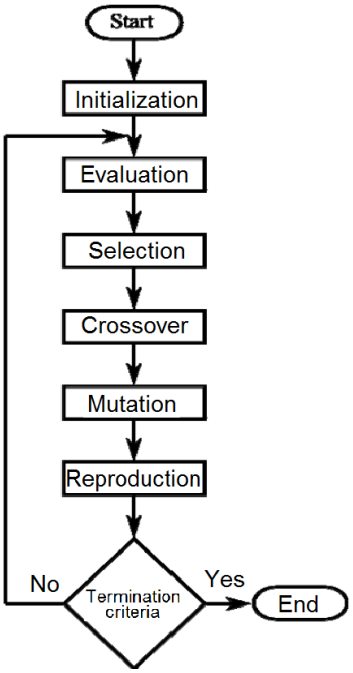


Figure 1. The genetic algorithm flowchart

The main advantage of GAs that by their nature, they lend themselves to parallel-execution, which provides a significantly faster optimization process. However, parallelizing the code used for evaluation is still a challenge.

According to their power and flexibility, their application is possible at a wide and ever growing range of optimization problems. The solution method allows to find globally competitive optima in large and complex search spaces. Furthermore, even a "standard" genetic algorithm is able to handle such problems, which cannot be solved with traditional optimization methods, such as: [6]

- discrete spaces
- nonlinear, discontinuous evaluation functions
- nonlinear, discontinuous constraints.

This capability makes possible for GAs to be applied to a different scheduling applications in a wide variety of domains like:

- supply chain management,
- shop/flow scheduling [7]
- class/timetable scheduling, [10]
- urban transit system,
- logistic delivery system,
- crew scheduling,
- exam scheduling, [17]
- training organization, optimization
- project management, scheduling…

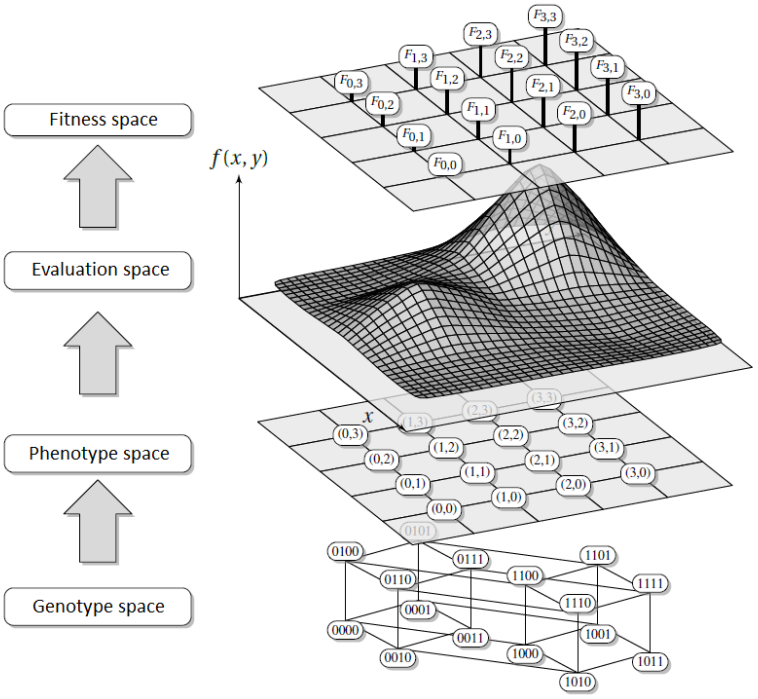


Figure 2. The different spaces (genotype, phenotype, evaluation and fitness) of a genetic algorithm and their connection [2]

Disadvantages

Especially if the crossover operator does not maintain genetic material, the population will not improve and the genetic algorithm will perform no better than a random search. Sometimes, the result is not mathematically correct, or the algorithm is not even converging. Another disadvantage that local peaks should be avoided in the fitness landscape, but sometimes the method stucks at one instead of the global optima. [14]

In the following, the necessary initial steps are investigated for a special implementation of the genetic algorithms for a small Par-147 training organization time-schedule problem.

DETERMINATION OF THE INFLUENCING PARAMETERS AND THE INVESTIGATED PROBLEM

The scope of the recent paper is to investigate the constraints of a time-scheduling method for a small Part-147 organization, in order to find the optimal initial date for a new training course, and to make the scheduling process automatic. It is essential to specify the constraints, because they determine the inlet boundary conditions and outcomes of the method, furthermore are defining the feasibility of a schedule. The objectives define the optimality of a schedule. The main difference between them is that constraints must be satisfied, while objectives should be satisfied. [13] With other terms, constraints are usually called as hard constraints, and objectives are referred as light constraints. [9]

Two types of outcomes can be received: those which satisfy the hard constraints are the feasible solutions, those which satisfy not only the hard constraints but the light constraints also, are the optimal schedule. [8] The problematic part is to determine the objective measures, which indicate the goodness/fitness of a schedule. In the case of project scheduling problems the goal is

to minimize the duration of the project, which seems reasonable for this particular case, when the duration of a training course should be as short as it is possible.

The other difficulty is the objectives' conflict. For example is it practical to schedule one instructor for whole day, because then the students' attention is not split, but teaching 7 hours straight is really stressful, thus the performance of the instructor can decay, so it is also reasonable to divide one work day between two instructors. Multiple objectives require a mechanism for defining the relationship between conflicting objectives in order according to the priorities of the company. [13]

Finally, the optimal solution has to provide a back-up plan, for example if an instructor is ill, or is somehow not available. If the optimal scheduling consists only one realization possibility, the first disturbance will crush the timetable, and only the manual intervention can handle the situation. Even better, if the algorithm operates in real-time: meaning of any disturbance occurs, the algorithm can find another good solution automatically.

Hard constraints

The hard constraints are responsible to investigate whether the given solution is feasible and acceptable. The actual population, and the particular solution have to fit into these type of constraints. The hard constraints are determined by the time (we are not able to teach 25 hours a day, however it would be great), laws, regulations, the instructed training material and the exams. According to this, the following hard constraints have to be taken into consideration:

- **Work day**: One day can contain maximum 7 training hours (1 hour contains 50 minutes of class and 10 minutes of break). Minimum training hours are not determined, but the closer minimum hours to 7, the better the solution.
- **Work week**: One work week contains 5 work days, but in special circumstances Saturday can be also used, thus a work week can be 6 days long. At least 1 rest day has to be provided for the participants.
- **Duration**: The number of lessons are determined for each training course, it can't be lower or higher.
- **Holidays**: Lessons can't be planned on holidays.
- **Training program**: The training program (in agreement with the Training Need Analysis) contains each instructed ATA chapter, and their hour requirement.
- **Exams**: One exam per week has to be scheduled in order to avoid the piling of the training material. The length of the exam is determined by the involved chapters, but practically 2 hours length is recommended.
- **Training material structure**: The order of some lectures are determined, like the course has to be started with "General description".
- **Lecture length**: The length of each instructed ATA chapter is determined, and can't be changed.
- **Availability of the instructors**: Depending on their activity, in some particular time-intervals they are not available.
- **Inherence of lectures**: If an ATA chapter has started, it has to be finished within one week.

Light constraints

These type of constraints should be realized, but they don't have to be. Generally the light constraints are rated with penalty points, and the goal is to minimize the penalty points. The optimal solution is found, when the sum of the penalty points are zero. But considering that how much light constraints have effect on the time-scheduling, it is almost impossible to completely eliminate these penalty points. The following light constraints have to be taken into consideration:

- **Exam scheduling**: An exam should be scheduled in the morning, for better performance. The only exception is the last exam.
- **Daily inherence of lectures**: It is preferred to schedule one ATA chapter to one day, and if it is possible not divide them (for example if an ATA chapter requires 5 hours, it shouldn't be separated to two days)
- **Single class avoidance**: It should be avoided to schedule a single class for a day, if the given ATA chapter is longer than one hour.
- **Pre-requirements**: Some of the ATA chapters requires the knowledge of other ATA chapters. During the scheduling these pre-requirements should be taken into consideration.
- **Requests of instructors**: Some instructors prefers forenoon, or afternoon lectures.
- **Training start and finish time**: The elapsed time between the start and finish of a training course should be minimized, sith the participating maintenance personnel have to minimize the loss of work time.
- **Instructor accommodation cost**: In the case of a training course organized abroad, the accommodation costs should be minimized.
- **Instructor travel cost**: In the case of a training course organized abroad, the travel costs should be minimized.

Goodness/Fitness

The goodness or fitness of a scheduling has to be inspected. Of course the hard constraints have to be satisfied, if a schedule does not fit, then it is not a feasible solution. The penalty points of the lights constraints determines actually the goodness of a solution, the higher the sum of the penalty points, the worse the schedule. The main goal is to minimize the elapsed time between the start and finish date of a training course. Besides the price of a course, the time demand is the second most important factor, which determines how much participants want to attend. The time, maintenance personnel spends in course is a work time, which is maximized, or even denied in special parts of the year (like near to peak season).

Besides the competitiveness the operational costs have to be minimized, especially when a course is organized abroad. In that case the company has to solve the travelling and accommodation of the instructors, thus in that case it is not suitable to separate the ATA chapters to different weeks or even days, which are taught by the same instructor. By setting constant costs both for travelling and for the accommodation these parameters can be taken into consideration. It is also solvable to automatize the cost-calculation by integrating online databases, web pages; but the invested costs probably wouldn't be remuneratory.

The advantage of this method is that is can be designed to operate in real-time mode; meaning if the training schedule has to be changed because of any unforeseeable event, the algorithm would be able to reschedule the lecture automatically, alert the instructors or even participants by using Microsoft Office macros or Google applications.

Conclusions, further plans

After investigating the problem, the environment, and influencing parameters, the followings can be concluded: the genetic algorithm provide a novel approach for time-scheduling from the viewpoint of a small Part-147 organization. The summarization of the topic is included in the following SWOT analysis (see Figure 3), which illustrates the strengths, weaknesses, opportunities, threats of the topic.

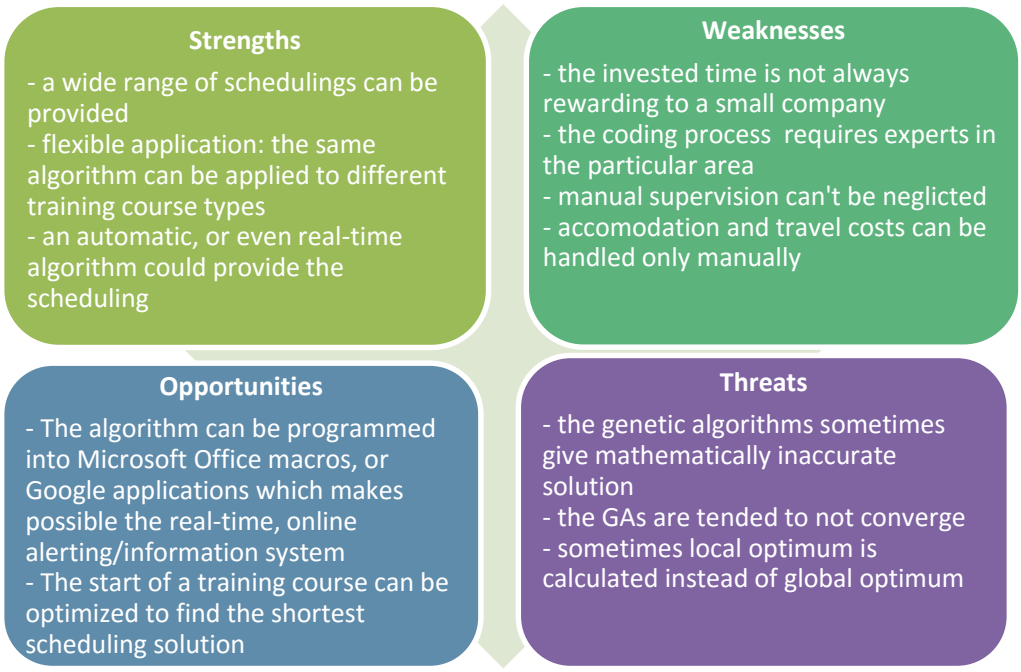


Figure 3. SWOT analysis of applying genetic algorithms for a Part-147 organization time-scheduling management processes

REFERENCES

[1] ADEWUMI IO, OLUWATOYINBO FI, OMOYAJOWO AO, AJISEGIRI GO, AKINSETE AE: Genetic algorithm: a veritable tool for solving agricultural extension agents travelling problem, Adewumi et al., Agrotechnology 2015, 4:2, ISSN: 2168-9881

[2] BALOGH SÁNDOR: Többszempontú gazdasági döntéseket segítő genetikus algoritmus kidolgozása és alkalmazásai, Doktori Értekezés, Kaposvári Egyetem, Gazdaságtudományi Kar, 2009

[3] BENEDA KÁROLY, ROHÁCS JÓZSEF.: Dynamic Model of Variable Inducer Shroud Bleed for Centrifugal Compressor Surge Suppression, International Review of Aerospace Engineering 6: (3) pp. 163-173. Paper online, 2013

[4] BICSÁK GYÖRGY, SZIROCZÁK DÁVID, ROHÁCS DÁNIEL: Developing New Project Management Tools for Small Aeronautical Companies, International Conference on Innovative Technologies IN-TECH 2010, Prague 14-16/09/2010, LPM TISK, 2010. pp. 386-389., ISBN:978-80-904502-2-6

[5] DAVID BEASLEY, DAVID R. BULL, RALPH R. MARTIN: An overview of genetic algorithms: Part 1, Fundamentals, University Computing, 1993, http://mat.uab.cat/~alseda/MasterOpt/Beasley93GA1.pdf (30.11.2015.)

[6] David Montana, Marshall Brinn, Sean Moore, Garrett Bidwell: Genetic Algorithms for Complex, Real-Time Scheduling, Systems, Man, and Cybernetics, 1998. 1998 IEEE International Conference on Volume:3), 11/14/1998, ISSN: 1062-922X

[7] FRANK WERNER: Genetic algorithms or shop scheduling problems: a survey, AMS Subject Classification: 90B35, 90C57, http://mat.uab.cat/~alseda/MasterOpt/p11-31.pdf (30.11.2015)

[8] HATWÁGNER FERENC MIKLÓS: Nagy számításidejű, folytonos változójú célfüggvények optimalizációja evolúciós számítások segítségével, Doktori értekezés, Infrastrukturális Rendszerek Modellezése és Fejlesztése, Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola, Győr, 2012

[9] HIDEG ATTILA: Órarendtervezés genetikus algoritmus segítségével, TDK dolgozat, BME-VIK, Automatizálási és Alkalmazott Informatikai Tanszék
[10] JEFFREY W. HERRMANN, CHUNG-YEE LEE: Solving a Class Scheduling Problem with genetic algorithm, ORSA Journal on Computing, Vol. 7, No 4, Fall 1995, 0899-1499/95/0704-0443
[11] JOHN H. HOLLAND: Adaption in natural and artificial systems, University of Michigan Press, 1975 / MIT Press, 1992, ISBN: 9780262082136
[12] K. KRISHNAKUMAR: Intelligent Systems for aerospace engineering – an overview, http://ti.arc.nasa.gov/m/pub-archive/364h/0364%20(Krishna).pdf (11.30.2015)
[13] MATTHEW BARTSCHI WALL: A genetic algorithm for resource-constrained scheduling, Doctoral Thesis, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, June 1996
[14] MELANIE MITCHELL: An Introduction to Genetic Algorithms, A Bradford Book The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, 5th printing, 1999, ISBN 0−262−13316−4 (HB)
[15] MURRAY B. ANDERSON: Genetic algorithms in aerospace design: substantial progress, tremendous potential, Sverdrup Technology Inc., ADM001519. RTO-EN-022, 01/06/2003
[16] ROHÁCS JÓZSEF, ROHÁCS DÁNIEL: The Potential Application Method of Magnetic Levitation Technology – as a Ground-Based Power – to Assist the Aircraft Take-Off and Landing Processes, Aircraft Engineering and Aerosapce Technology vol. 86, issue 3. (2014) on-line proceedings pp188-197
[17] SUJIT KUMAR JHA: Exam timetabling problem using genetic algorithm, IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology, Volume: 03 Issue: 05, May-2014 eISSN: 2319-1163
[18] VERESS ÁRPÁD, GALLINA TIBOR, ROHÁCS JÓZSEF: Fast and Robust Inverse Design Method for Internal and Cascade Flows, International Review of Aerospace Engineering (IREASE), ISSN 1973-7459 Vol. 3 N. 1. pp. 41-50. February, 2010

GENETIKUS ALGORITMUS ALAPÚ IDŐBEOSZTÁS-MENEDZSMENT KIS REPÜLŐIPARI CÉGEKNEK

Az időbeosztás-menedzsment egy olyan aktuális probléma, melynek megoldását folytonosan nehezíti a munkáltatók és munkavállalók ellentétes érdeke a dolgozott órák tekintetében. A profit maximalizálásának érdekében a munkáltatók mindig megpróbálják több és több munkára bízni a beosztottakat, mely viszont kimerültséghez vezet, mely ~~a~~ pont a profit csökkenését eredményezi. Kisebb repülőipari cégeknél, ahol egy-egy munkavállalónak ráadásul nem csak egy adott szakterülettel kell foglalkoznia, hanem általában több, egymástól eltérő projecten is, a cégnek magának ráadásul sokkal szigorúbb feltételeknek kell megfelelnie, mint a gazdasági szektor más területein. Így az időbeosztás menedzsment igen nagy prioritással rendelkezik. Általában az időbeosztások manuálisan, több napos munkával, és utólagos korrekcióval készülnek el. Ezen cikk célja egy genetikus algoritmusra épülő, automatikus időbeosztó rendszer koncepcionális vizsgálatának elvégzése, mely lehetővé teszi egy Part-147-es szervezet automatikus tanfolyami beosztásának elkészítését.

Kulcsszavak: *genetikus algoritmus, időbeosztás management, Part-147, SWOT analízis*

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_3/2015-3-16-0248_Bicsak_Gyorgy.pdf

Markovits-Somogyi Rita

INTELLIGENS KÖZLEKEDÉSI RENDSZEREK A LÉGIFORGALMI IRÁNYÍTÁSBAN

Az intelligens közlekedési rendszerek (Intelligent Transport Systems – ITS) fogalma először a közúti közlekedés területén jelent meg; használata innen terjedt el a többi közlekedési alágazatban is. Az Európai Parlament és Tanács meghatározása szerint „az intelligens közlekedési rendszerek fejlett alkalmazások, amelyek célja, hogy tényleges intelligencia megtestesítése nélkül innovatív szolgáltatásokat nyújtsanak a különféle közlekedési módokhoz és a forgalomirányításhoz kapcsolódóan." A légiközlekedési ágazatban az ITS-megoldások súlypontját a SESAR-program (Single European Sky ATM Research) jelenti, amely a légiforgalmi irányítás infrastruktúrájának modernizálását tűzte ki célul; és amely a légi forgalom biztonságát, valamint zavartalan lefolyását hivatott biztosítani a következő harminc évben. A cikk a HungaroControl Magyar Légiforgalmi Szolgálatnál jelenleg futó fejlesztések tükrében, műszaki-technológiai szempontból mutatja be a SESAR-programon belül megvalósuló ITS-alkalmazásokat, különös tekintettel a CPDLC-projektre (controller-pilot data link communications) és a távoli toronyirányítás kialakítására.

Kulcsszavak: *SESAR, intelligens közlekedési rendszerek, CPDLC, távoli toronyirányítás*

BEVEZETÉS

Az intelligens közlekedési rendszerek fogalma a közúti közlekedésből terjedt el a többi közlekedési alágazatba. Az intelligens közlekedési rendszereknek a közúti közlekedés területén történő kiépítésére, valamint a más közlekedési módokhoz való kapcsolódására vonatkozó keretről szóló 2010/40/EU irányelv meghatározása szerint intelligens közlekedési rendszerek (ITS[1]) olyan rendszerek, amelyekben információs és kommunikációs technológiákat alkalmaznak a közúti közlekedés területén, beleértve az infrastruktúrát, a járműveket és a felhasználókat is, a forgalomirányításban és a mobilitás kezelésében, valamint a más közlekedési módokhoz való kapcsolódási pontok vonatkozásában [1]. Ez a meghatározás ráillik a légiközlekedés utóbbi ötven évben folyamatosan fejlesztett és alkalmazott szervezési és irányítási eljárásaira (összefoglalásul ld. [2]). A légiforgalom ugyanis (i) az elsődleges és a másodlagos radarokkal, valamint további eljárásokkal állandóan ellenőrzött, (ii) a forgalom szereplői és irányítói közt, azaz a légiforgalmi irányítók és az ellenőrzött légtérben közlekedő légijárművek vezetői közt folyamatos a kommunikáció, (iii) a forgalom az intenzitásától, a légköri viszonyoktól stb. függően aktívan irányított, továbbá (iv) költség és/vagy környezeti terhelés minimumára optimált. A légi közlekedés területén az Európai Bizottság a SESAR projektcsoport[2] keretében megvalósuló alkalmazásokat intelligens közlekedési rendszerek fejlesztésének tekinti [3].

A SESAR-programot [4] 2004-ben indították az Egységes Európai Égbolt kezdeményezés [5][6] műszaki-technológiai pilléreként. 2007-ben követező lépést jelentette a *SESAR Joint Undertaking*, egy PPP[3]-típusú társaság megalakítása, amely arra volt hivatott, hogy a légiforgalmi

[1] intelligent transport systems
[2] Single European Sky Air Traffic Management Research
[3] public-private partnership

irányításban (ATM[4]) fellelhető ismeretek és erőforrásokat összefogja, és így meghatározza, kutassa, fejlessze, valamint validálja a SESAR megoldásait. A megvalósult fejlesztéseket a 2014-ben légitársaságokból, repülőterekből és légiforgalmi irányító szolgálatokból (ANSP-kből[5]) megalakult *SESAR Deployment Manager* koordinálja [7].

A SESAR-programon belül meg kell még említeni a *Pilot Common Projectet*, amely a SESAR első fázisának számító SESAR 1-en belül egy olyan kísérleti összehangolt programcsomag, amely a megvalósítás első lépéseit tartalmazza kijelölt területeken. A SESAR második fázisát a SESAR 2020 jelenti.

Mind a tudományos életben [8], mind az üzemeltetésben számos kutatási és fejlesztési projekt indult a SESAR-hoz kapcsolódóan. A HungaroControl Magyar Légiforgalmi Szolgálatnál is nagyszámú olyan fejlesztés valósult meg a közelmúltban, illetve van éppen folyamatban, amelyek a SESAR-program, és így az intelligens közlekedési rendszerek magyarországi alkalmazásainak tekinthetők. A cikk további részeiben ezek közül az ITS-megoldások közül mutatunk be néhány kiemelkedő alkalmazást. A CPDLC, a Netbriefing és a WALTER a közelmúltban bevezetett, már működő rendszerek; míg a távoli toronyirányítás implementációja jelenleg van folyamatban.

A KÖZELMÚLTBAN MEGVALÓSULT FEJLESZTÉSEK

CPDLC

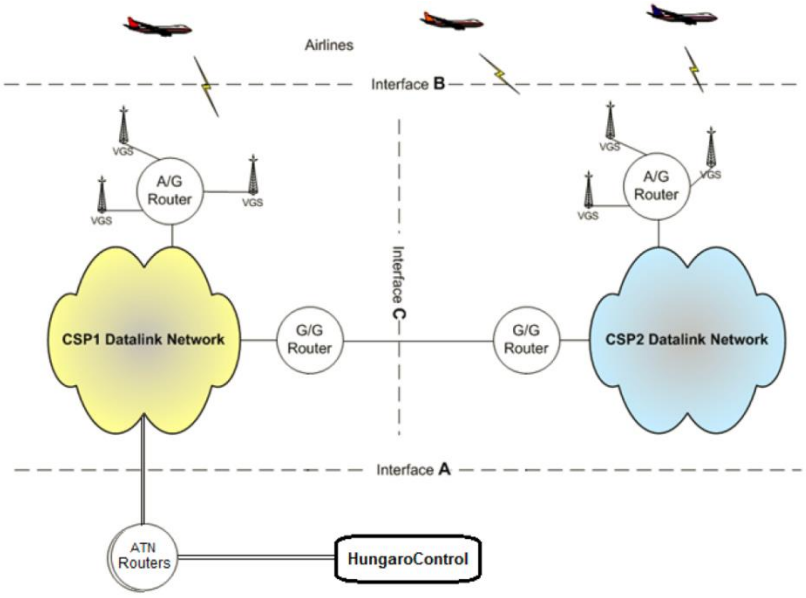
A CPDLC[6] a pilóta és a légiforgalmi irányító közötti szöveges üzenetváltásokat lehetővé tevő alkalmazás. Használata révén csökkenthető a légiforgalmi irányításban használt hangfrekvenciák foglaltsága, és lehetővé teszi a CPDLC-alapú automatizációt [9]. Az Európai Bizottság döntése értelmében Európa érintett tagállamaiban 2018-tól kötelező ennek a *Datalink* szolgáltatásnak a bevezetése [10]. A HungaroControl 2014 márciusában nyújtott be pályázatot egy, az európai ATM korszerűsítésére vonatkozó célokat megfogalmazó munkaprogram keretében megjelenő felhívásra, amelyet az INEA és az Európai Bizottság el is fogadott. A CPDLC-funkciót a magyar légiforgalmi irányító szoftver, a MATIAS idén megvalósult szoftverfejlesztése révén került be a magyar rendszerbe. Elsőként a gyári átvételi tesztelés fázisa arról szólt, hogy a rendszer a specifikációknak megfelelően integrált egységként működik-e. A szoftvert ezután 2014 októberében telepítették a HC MATIAS Offline rendszerére. A következő hónapban pedig lezajlott a helyszíni átvételi tesztelés, amely során a kollégák azt ellenőrizték, hogy az addigi tapasztalatok alapján már javított szoftververzió megfelel-e a specifikációban meghatározott követelményeknek, valamint hogy alkalmas-e az éles irányításra [10].

A MATIAS rendszer Build 10.1 verzió elsődleges célja a CPDLC-szolgáltatás vonatkozásában a CPDLC-adatfeldolgozás és az információ megjelenítése a HungaroControl operatív felhasználói számára, valamint felügyeleti és kezelési lehetőség biztosítása a HungaroControl műszaki szakemberei számára. Az ATN Router feladata a MATIAS irányító rendszer kapcsolódásának

[4] Air Transport Management
[5] Air Navigation Service Provider
[6] Controller-Pilot Data-Link Communications

biztosítása a CPDLC-szolgáltatáshoz szükséges telekommunikációs szolgáltatást biztosító szolgáltatók (SITA, ARINC) ATN hálózatához [11].

A SITA és az ARINC cégek a CPDLC-szolgáltatáshoz szükséges, Magyarországon és a szomszédos országok légtereinek puffer területein megfelelő fedést biztosító telekommunikációs szolgáltatást biztosítanak.



1. ábra ATN adatkapcsolat szolgáltatás határok és interfészek [11]

A CPDLC-rendszer komponensei [11]:
MATIAS-rendszer

- A **Flight Data Processing System** feldolgozza a külső interfészeken keresztül beérkezett repülési terv adatokat és kezeli a repülési terveket. A repülési tervek az AFTN illetve OLDI közleményekből az RPL adatbázisból vagy az operatív munkahelyekről érkezhetnek, frissülhetnek.
- A **Data Communication System** repülési terv és az Aeronautical Information feldolgozás funkciók külső kommunikációját támogatja. A DCMS a **LINES** berendezéshez kapcsolódik. Szintén támogatja az Aeronautical Information és a repülési tervadat feldolgozást.
- Az **Air/Ground Communication System** biztosítja CM/CPDLC képességet.
- A **Controller Working Position System** támogatja a Human/Machine Interface működést az operatív működést támogató funkciók ellátása érdekében.

ATN Router

- Az ATN Router feladata az MATIAS irányító rendszer kapcsolódásának biztosítása a CPDLC alkalmazáshoz szükséges telekommunikációs szolgáltatást biztosító szolgáltatók (SITA, ARINC) ATN-hálózatához.
- Az ATN Router fő funkciói az útvonalválasztási információ karbantartása, aktualizálása, szétosztása a hálózatban rendelkezésre álló többi ATN Routeren és végfelhasználói rendszeren keresztül és annak megfelelően az ATN végfelhasználói rendszerek között generált adatforgalom továbbítása [11].

SITA telekommunikációs szolgáltatás

- A SITA telekommunikációs szolgáltatás képessé teszi a MATIAS rendszert, hogy infrastruktúráját felhasználva kétoldalú adatkapcsolatot létesítsen és tartson fenn a CPDLC-képes légijárművekkel. Mivel az ATN Routeren keresztül a MATIAS rendszerhez csak egy telekommunikációs szolgáltató kapcsolódhat, a SITA biztosít kapcsolatot az ARINC és a MATIAS-rendszer között is [11].

ARINC telekommunikációs szolgáltatás

- Az ARINC telekommunikációs szolgáltatás keretében képessé teszi a MATIAS rendszert, hogy infrastruktúráját felhasználva kétoldalú adatkapcsolatot létesítsen és tartson fenn a CPDLC-képes légijárművekkel [11].

A CPDLC-adatkapcsolat szolgáltatás tervezett bevezetése Budapest FIR[7]-ben FL285[8]-től FL660-ig terjedően, kizárólagosan az ACC[9]-légtérben történik meg. A CPDLC-adatkapcsolat üzem tényleges alsó határa módosulhat az operatív tapasztalatok függvényében, mivel a lefedettség lehetővé teszi már FL095 felett a CPDLC használatát, amelyet a folyó repülési tesztek igazolnak [11].

A légijármű személyzetével történő CPDLC-adatkapcsolat kommunikációt a rádiófrekvencián történő szóbeli kommunikációhoz hasonlóan csak az illetékes szektor EC[10] légiforgalmi irányítója végzi. A CPDLC adatkapcsolat kommunikációra a Budapest ACC-ben minden szektor jogosult lesz, míg az APP[11], TWR[12] és FIC[13] munkahelyeken nem lesz lehetőség a CPDLC adatkapcsolat kommunikációra. Ugyanakkor az arra képes szomszédos ACC egységek között lehetőség lesz a CPDLC adatkapcsolat átadására/átvételére.

A MATIAS-rendszerben a munka megkönnyítése és a gyors áttekinthetőség érdekében a CPDLC adatkapcsolat kommunikáció a légijármű személyzetével a radarcímke megfelelő mezőin keresztül, jelek, színkódok és alfanumerikus értékek segítségével zajlik [11].

A CPDLC az Európai Unió a Transzeurópai Közlekedési Hálózat (TEN-T) keretén belül támogatott projekt (2013-HU-40005-P), amely része a MATIAS Build 10.1 projektnek. A csúcstechnológiai újítást lehetővé tévő beruházás összértéke eléri a 2 milliárd forintot (6,8 millió euró), amelynek 80 százalékát a költségvetési támogatásban nem részesülő HungaroControl Zrt. saját forrásaiból finanszíroz, míg a fennmaradó összeget, több mint 420 millió forintot (1,4 millió euró) az Európai Unió a TEN-T keretében biztosítja [10].

Netbriefing

Nemrégiben bevezetett gyakorlati és már megvalósult alkalmazás az ún. Netbriefing szolgáltatás, amely a kisgépes pilótáknak nyújt kényelmes és korszerű megoldást a repülési tervek benyújtásához. Az elmúlt tíz évben 28 ezerről 42 ezerre nőtt a magyar légtérben a repülési terv benyújtására jogszabályilag nem kötelezett repülések száma. Ugyanakkor a hazai repülésbiz-

[7] Flight Information Region

[8] 285 repülési szint (*flight level*), 28,500 láb magasság

[9] Area Control Centre: útvonali légiforgalmi irányító szolgálat

[10] Executive controller: a pilótákkal való kapcsolattartásért felelős légiforgalmi irányító

[11] Approach: bevezető irányító szolgálat

[12] tower: toronyirányító szolgálat

[13] fligh information centres: körzeti repüléstájékoztató részleg

tonság [12] nagyfokú növekedését jelenti az érintett pilóták számára, ha a repülésüket megelőzően benyújtanak repülési tervet, hiszen ezzel biztosítják maguknak azt a szolgáltatást, amelyet a magyar légiforgalmi szolgáltató ingyenesen biztosít: szükség esetén a kutatás és mentés megindítását a baja került légi jármű részére. Most az érintett pilóták, akik körülbelül három-ötezren vannak hazánkban, a Netbriefing-alkalmazás segítségével egy ingyenes regisztrációt követően adhatják le a repülési tervüket, amely így automatikusan bekerül a repülésbejelentő irodába, további feldolgozás céljaira. Ezáltal gyorsabbá válik a repülési tervek kezelése, leadása és tárolása is; és a korábbi repülési tervek is könnyebben hozzáférhetőek [13].

A pilóták további informatikai támogatását szolgálja az is, hogy a Netbriefing felületén egy helyen állnak rendelkezésére adatok a tervezett útvonal és a rendeltetési repülőtér időjárásáról; az aktuális NOTAM[14]-okról, és a tervezett érkezési repülőtér futópálya-felületéről szóló információk; továbbá az állandó/eseti légterek tervezett működési ideje is.

WALTER

A WALTER, a Web Alapú Légiforgalmi Tájékoztató Elektronikus Rendszer egy olyan korszerű, kényelmes és egyszerűen kezelhető szolgáltatás, amellyel bárki megjelenítheti a légi járművek pozícióját és adatait egy adott időpontban, Budapest vonzáskörzetén belül. A rendszert támogató szoftvert a HungaroControl kezdeményezése és tervei alapján a KTI Közlekedéstudományi Intézet Nonprofit Kft. Közlekedésinformatikai Központja fejlesztette ki és helyezte üzembe [14]. A HungaroControl honlapján elérhető új rendszer naprakész adatokat szolgáltat a főváros feletti légi forgalom alakulásáról, így rendkívül fontos szerepet játszik a lakosság és az önkormányzatok korrekt tájékoztatásában [15].

Műszaki újdonságnak számít, hogy a WALTER oldalát tápláló információk radaradatok feldolgozásából származnak. Bár radaradat minden légi járműről érkezik, a hívójel csak akkor érkezik meg az adott járműről, ha van és be van kapcsolva a fedélzeti másodlagos jeladó. A WALTER-alkalmazásban használt széles körű és dinamikusan frissülő radaradatok segítségével a tájékoztatás pontossá és teljes körűvé tehető. Tehát a rendszer a radaradatok felhasználásának segítségével a Budapest TMA (manőverezési) területén (a főváros mintegy 90 km-es vonzáskörzetén belül) közlekedő polgári, az állami, és a katonai légi járművekről is szolgáltat adatot. Azonban – nemzetbiztonsági okok miatt – az utóbbi két kategória járműveinek nem minden adata tekinthető meg.

Az általunk megadott észlelési adatok alapján megjelenő légi járműveknek az alábbi adatai tekinthetők meg egy adott jármű kiválasztásával:

- a pozíció,
- haladási irány,
- talajszint feletti magasság,
- induló és célállomás neve,
- géptípus,
- hívójel és
- a legkisebb, légvonalban mért távolság, amely az észlelési pont és a légi jármű között előfordult, valamint

[14] Notice to Airmen

- az utóbbi, legkisebb távolság előfordulási időpontja.

Az alkalmazás a Mozilla Firefox, Google Chrome, Internet Explorer, Safari böngészőkkel használható; és alapvetően a Google-tól származó térképeken alapszik [16].

EGY JELENLEG KIÉPÍTÉS ALATT LÉVŐ MEGOLDÁS: TÁVOLI TORONYIRÁNYÍTÁS

A távoli toronyirányítás igénye először praktikus okokból merült fel a HungaroControlnál. A jelenleg használt toronyépület műszaki állapota nem teszi lehetővé, hogy középtávon fenntartható legyen a biztonságos repülőtéri irányítás, egy teljes körű torony épület rekonstrukció a ’80-as években átadott épület állapota miatt pedig 3–5 éven belül szükséges. S bár napjainkban nem tervezett egy ilyen modernizáció, ha az lenne, a felújítási munkálatok idejére akkor is biztosítani kellene egy alternatív helyet. Ugyanis az épület szükséges teljes körű infrastrukturális felújítása – amely magában foglalja a torony kabint is – minden bizonnyal ellehetetlenítené az irányítási feladatok biztonságos végzését. Egy toronyfelújítás vélhetően több hónapos időtartamára pedig szóba sem jöhet, mivel az az említett időszakban teljes repülőtér zárással járna [17]. Egy távoli, virtuális torony megvalósítása megoldást jelenthet az irányítótorony romló műszaki állapota miatt felmerülő problémákra [18].

A legmodernebb légiforgalmi technológiák jelenleg már lehetővé teszik, hogy a HungaroControl a jelenlegi torony épületből történő irányítási kapacitásnak megfelelő, és annak biztonsági szintjét felülmúló teljes értékű toronyirányítást valósítson meg az ANS III légiforgalmi irányítóközpontjában. A HC a távoli toronyirányítás (rTWR) kialakítását gazdaságossági szempontok alapján is megvizsgálta és azt megvalósíthatónak találta.

A remote tower megvalósításával a következő területeken érhető el fejlődés [19]:

- repülésbiztonság;
- alacsonyabb fenntartási költség a reptéren;
- alacsonyabb költséggel nyújtható irányítási szolgáltatás a légtér használók számára;
- hatékonyabb humán erőforrás felhasználás;
- magasabb helyzet-tudatosság az alacsony láthatóság esetén használható képjavítás és infrakamerák segítségével;
- magasabb forgalmi kapacitás alacsony láthatóság esetén;
- magasabb forgalmi kapacitás kényszerhelyzeti szituációkban.

A HungaroControlnál ez azt jelenti, hogy első lépésben a jelenlegi toronyban használt rendszerek duplikálása történik meg az ANSIII épületben kialakított munkateremben. Második lépésben az A-SMGCS[15] rendszer és egy kamera rendszer integrálásával biztosítjuk a teljes értékű éles irányítási környezetet. A HungaroControlnak ez a remote tower stratégiája felkeltette az érdeklődését a SESAR JU-nak is, és a HC lehetőséget kapott arra, hogy egy ún. Large Scale Demonstraion

[15] Advanced Surface Movemement Guidance Control System: felszíni felderítőrendszer

(LSD) keretében bemutathassa a technológia képességeit. Az LSD pályázat teljesítésre a készenléti munkateremet tervezzük használni, ezért a kialakításakor a fenti integráció beépítésre kerül, azonban kényszerhelyzeti használat esetén nem vesszük igénybe a kamera rendszert [17].

Távoli toronyirányítás vidéki repülőtereken

A SESAR keretében kifejezetten a kis forgalmú (50 000 mozgás/év, egy futópálya, egy időben egy mozgású) repülőterekre fejlesztették ki az ún. „*single remote tower*" koncepciót. A toronyirányító szakszemélyzet felé elvárás, hogy folyamatosan megfigyelés alatt tartsák a felelősségi körükbe tartozó repülőteret és közvetlen környékét (ICAO DOC 4444 7.1.1.2). Az új elképzelés szerint az irányító személyzetet nem feltétlenül a repülőtéren kell elhelyezni, hanem a repülőtér képét kell az irányítókhoz eljuttatni pl. zárt láncú TV-kamerák segítségével (DOC 9426 ATS Planning Document 2.1.2 fejezete). Az irányítási szolgálat kialakításánál ekkor a legerősebb fizikai korlát alkalmazásától mentesülve lehetséges a költséghatékonyság szempontjának előtérbe helyezése, úgy hogy a repülésbiztonság nem sérül [20].

Így tehát a budapesti repülőtér távoli irányításának sikeres megvalósulása esetén felmerülhet az rTWR helyiségéből kisebb repterek forgalmának irányítási lehetősége is (pl. Debrecen, Sármellék); amelynek a gazdasági/műszaki megvalósíthatóságát vizsgálja a HungaroControl.

ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen tanulmány a légiforgalmi irányítás területén alkalmazott intelligens közlekedési rendszerek néhány kiemelkedő és a napjainkban megvalósult vagy éppen megvalósulás alatt lévő megoldását vonultatta fel. A CPDLC-alkalmazás olyan adatkapcsolati rendszer a pilóta és a légiforgalmi irányító között, amely az írott üzenetváltás lehetőségének megteremetésével képes a hangkommunikációs frekvenciák foglaltságának csökkentésére, és így az erőforráshatékonyság növelésére a légiforgalmi irányításban. Európában 2018-tól kötelező a használata, a magyar légiforgalmi szolgálat 2015 novemberében vezette be a szolgáltatást.

Már gyakorlatban bevezetetett ITS-megoldásokra ad példát a Netbriefing rendszer és a WALTER. A Netbriefing a kisgépes pilótáknak nyújt lehetőséget a repülési terveik online leadására, és a repülésükkel kapcsolatos adatgyűjtésre, tájékozódásra. A WALTER a főváros feletti légi forgalom alakulásáról szolgáltat naprakész adatokat, ezáltal szolgálva a lakosság tájékoztatását.

Végül egy fejlesztés alatt lévő ITS-megoldás a távoli toronyirányítás, amely az adott repülőtértől független helyszínről képes a toronyirányítás feladatait ellátni, és így nem csak a Budapest Liszt Ferenc Nemzetközi Repülőtér esetében lehet alkalmazható, hanem akár más, vidéki repülőterek irányítási feladatait is átveheti.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] Az EURÓPAI PARLALMENT és TANÁCS 2010/40/EU IRÁNYELVE az intelligens közlekedési rendszereknek a közúti közlekedés területén történő kiépítésére, valamint a más közlekedési módokhoz való kapcsolódására vonatkozó keretről (2010. július 7.) 4. cikk 1. bekezdés

[2] WOLGANG HELMREICH: Third Annual Thematic Research Summary – Intelligent Transport Systems Deliverable D2.E-3.5; Issue 1.0, DG Energy and Transport (URL: http://www.transport-research.info/sites/default/files/thematic-analysis/20060831_115338_67931_User-aspects_D2E_3-5__issue1-0.pdf)

[3] Az Európai Bizottság Mobilitásért és Közlekedésért Felelős Főigazgatóságának (DG MOVE) honlapja url: http://ec.europa.eu/transport/themes/its/air_en.htm (2015.11.21.)

[4] Alfredo Gomez, Benoit Fonck, André Ayoun, Gianni Inzerillo: Concurrent System Engineering in Air Traffic Management: Steering the SESAR Program, Proceedings of the Posters Workshop at Complex Systems Design and Management (URL: http://ceur-ws.org/Vol-1085/04-paper.pdf)

[5] Szepessy Kornél: SESAR – A Közös Európai Légtér és Magyarország kapcsolódási pontjai, Magyar Mérnöki Kamara Közlekedési Tagozatának konferenciája, Balatonföldvár, 2012. május 15-17.

[6] Sztrunga Erzsébet: Légiforgalmi útvonaltervezés az Egységes Európai Légtérben, BGF EU Working Papers, 2011.02.05. (URL: http://elib.kkf.hu/ewp_11/2011_2_05.pdf)

[7] Proposed European ATM Master Plan Edition 2015, draft, July 2015

[8] Andrés Arranz, Izaro Etxebarria, Carlos Regidor, Borja Escribano: Intelligent Modelling of the Air Transport Network, Third SESAR Innovation Days, Stockholm, 2013. nov. 26-28. (URL: http://www.sesarinnovationdays.eu/files/SIDs/2013/SID-2013-32.pdf)

[9] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION: Global Operational Datalink Document (GOLD) Second Ed. (2013.04.26.)

[10] Finiséhez érkezett a CPDLC-TEN-T projekt, HC Radar, 2016/6, pp. 4-5.

[11] HungaroContol CPDLC Műszaki dokumentáció v.1.0. készítették: Szabó Gábor, Brunecker Károly, Heisig András, Bajkó Gábor

[12] ROHÁCS DÁNIEL: The current state and vision of the national transport safety: Air transportation In: Horváth Zsolt Csaba, Kisgyörgy Lajos, Ágoston György, Rohács Dániel, Actual questions of transport safety in the new millennium. 184 p. Győr: Universitas-Győr Nonprofit Kft., 2015. pp. 64-88.

[13] Homebriefing: biztonságosabban repülhetnek a kisgépek, a Nemzeti Közlekedési Hatóság honlapján megjelent tájékoztatás, 2015.07.23. (URL: https://www.nkh.gov.hu/hir-megjelenito/-/hir/644875/homebriefing-biztonsagosabban-repulhetnek-a-kisgepek)

[14] A HUNGAROCONTROL HONLAPJA: WALTER: Elindult a Web Alapú Légiforgalmi Tájékoztató Elektronikus rendszer (online) url: http://www.hungarocontrol.hu/sajtoszoba/hirek/WALTER-web-alapu-legiforgalmi-tajekoztato-rendszer (2015.11.24.)

[15] SZŐKE KATALIN: Elindult a Web Alapú Légiforgalmi Elektronikus Tájékoztató Rendszer, HungaroControl Sajtóközlemény, 2015. 01. 21. (URL: http://www.hungarocontrol.hu/download/6b3337032abbb11d95793f518ca61cba.pdf)

[16] A WALTER-RENDSZER HONLAPJA url: http://walter.hungarocontrol.hu (2015.11.19.)

[17] Dudás Dezső, SZALÓKY PÉTER: Repülőtéri légiforgalmi irányítási koncepció (cTWR) – Távoli toronyirányítási koncepció kialakítása, HungaroControl munkaanyag

[18] Dudás Dezső, Markovits-Somogyi Rita, Török Ádám: Virtuális repülőtéri irányítóközpont Közlekedésbiztonság: A Nemzeti Közlekedési Hatóság szakmai lapja, 2012/4. pp. 14-17.

[19] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION: The Aviation System Block Upgrade (ASBU) Document, 2013.03.28.

[20] DUDÁS DEZSŐ: Távoli toronyirányítás – Regionális repülőterek korszerű irányítási szolgálata, HungaroControl belső munkaanyag 2015.

Intelligent Transport Systems in Air Traffic Management

The notion of intelligent transport systems (ITS) first emerged in the area of road transport, from where it was adapted to the other modes of transport. As based on the definition of the European Parliament and Council, intelligent transport systems are advanced applications which without embodying intelligence as such aim to provide innovative services relating to different modes of transport and traffic management and enable various users to be better informed and make safer, more coordinated and 'smarter' use of transport networks. Within aviation, the cornerstone of ITS is the SESAR programme (Single European Sky ATM Research) which aims to modernize air traffic control infrastructure in order to ensure the safety and fluidity of air transport worldwide over the next 30 years. The article presents ITS solutions within SESAR implemented by HungaroControl, with special emphasis on the CPDLC (controller-pilot data link communications) and remote tower (rTWR) project.

Keywords: *SESAR, intelligent transport systems, CPDLC, rTWR*

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_3/2015-3-18-0239_Markovits-Somogyi_Rita.pdf

Siska Miklós

AIRPORT CITY FERIHEGYEN: REALITÁS, VAGY ÁLOM?

Az utóbbi évtizedekben a globalizálódó világpiac hívta életre azokat a változásokat, amelyeknek eredményeként a repülőterek környezetük gazdaságfejlesztésének motorjává váltak. Az „airLED" projektben azt vizsgáltuk, hogy miként lehet közép-európai regionális repülőtereket és környezetüket "airport city"-vé fejleszteni. Ennek során az érintett térségek stakeholderei komplex, policentrikus területfejlesztési stratégiákat dolgoztak ki a szintén a projekt keretében készült közös módszertan alapján. Minden érintett régióban széles körű egyeztetések során, az érintett felek párbeszédét elősegítő munka révén jöttek létre azok a stratégiai fejlesztési tervek, amelyek az egyes térségekben, így például Magyarországon is, az érvényes, szélesebb körű területfejlesztési koncepciókba is beépültek. A projektben résztvevő közép-európai regionális repülőterek közül első sorban a budapesti Liszt Ferenc Nemzetközi Repülőtér és környezete rendelkezik mindazokkal a feltételekkel, amelyek ahhoz szükségesek, hogy a repülőtér és vonzáskörzete „airport city"-vé fejlődhessen. A jelen írás ezt mutatja be részletesebben.

Kulcsszavak: *„airport city", repülőterek hatása az urbanizációra, összeköttetés, nemzetközi együttműködés*

Manapság a növekedési centrumokat el sem tudjuk képzelni repülőterek nélkül. A légi közlekedés jellemzői miatt, különösen a szárazföldek belsejében, a repülőterek szükségképpen távol fekszenek a városok üzleti negyedeitől (central business district – CBD). Mindazonáltal az utazók egyik alapvető kívánsága, hogy végcéljukat a lehető legrövidebb idő alatt érjék el. Éppen ezért az egyik fontos szempont, hogy jó összeköttetéseket teremtsünk a repülőterek és a város üzleti központja, illetve a lakóterületek között. Ebben a vonatkozásban kiemelkedő a repülőterek és az üzleti negyedek közötti közforgalmú közlekedési és úthálózati kapcsolatok színvonala, kapacitása. De hasonlóan fontos az is, hogy a repülőterek megfelelő szolgáltatásokat nyújtsanak az utazók számára: az utas tájékoztatás, a jól megközelíthető tranzit állomások, parkolók stb. terén.

Az Európai Unió Regionális Fejlesztési Alapjának Közép-Európa Programja keretében finanszírozott "airLED" projekt egyik kiemelt célja volt, a többek között ezt a szempontot is szem előtt tartó, olyan stratégiai fejlesztési tervek, illetve azok módszertanának kidolgozása, amelyekben az érintett térség regionális repülőterei és környezetük áll a középpontban. Ezek a tervek a múlt század hetvenes éveiben megjelent „Airport City" koncepció talaján készültek. A következőkben a projekt résztvevőit, az elméleti hátteret és a Liszt Ferenc Budapesti Nemzetközi Repülőteret és környezetét központba állító fejlesztési tervet mutatom be.

AZ „airLED" PROJEKT

Négy ország négy regionális repülőterének öt önkormányzata, valamint további négy kutató, illetve terület- és gazdaságfejlesztéssel foglalkozó szervezete 2012 júliusa és 2014 decembere között valósította meg az „airLED" projektet. Erről bővebben a http://airled.eu/ honlapon találhatnak információkat. A jelen írásban a munkának kifejezetten a Budapest Liszt Ferenc Nemzetközi Repülőtér fejlesztéséhez kapcsolódó eredményeit ismertetem.

Az „airLED” projektben Magyarországról Budapest Főváros 18. kerülete és a Vecsés város Önkormányzata, valamint a KTI Közlekedéstudományi Intézet Non-profit Kft., Lengyelországról Mazovia Vajdaság Önkormányzata és a krakkói Urbanizációs Intézet., Olaszországból Emilia-Romagna Tartomány és a Közlekedési és Logisztikai Intézet Alapítvány, valamint Szlovéniából Cerklje Önkormányzata és a kranji Gazdaságfejlesztési Központ Kft. vett részt.

Az érintett regionális repülőterek a budapesti mellett a lengyelországi Modlin, az olaszországi Bologna és a szlovéniai Ljubljana város repülőterei voltak. Ezek közül a budapesti és a ljubljanai országuk meghatározó repülőterei, korábban a nemzeti légitársaságok bázisai voltak. Bologna szintén nemzetközi repülőtér, tartományi központ, de korántsem volt olyan fontos a régió életében, mint az előbbi kettő. Modlin pedig eredetileg katonai repülőtérként szolgált, a városközponthoz túlságosan is közel fekvő, korlátozott terjeszkedési lehetőségekkel bíró varsói repülőtér kisegítésére lenne hivatott.

Az „airLED” projekt keretében több tanulmány készült, amelyek többek között az európai helyzetet, a fellelhető jó gyakorlatokat mutatják be, továbbá módszertant adott az egyes projekt partnereknek a saját regionális repülőterük integrált, policentrikus stratégiai fejlesztési terveinek elkészítéséhez. Emellett számos megbeszélést folytattak le a projekt partnerek a repülőtereik fejlesztésében érdekeltekkel, politikai és gazdasági döntéshozókkal, civil szervezetekkel. Népszerűsítették befektetői konferenciákon az egyes repülőtereket, illetve magát a projektet, s mindehhez közös propaganda anyagok is készültek.

Cikkemben először az európai repülőtereknek a légiforgalmi piac liberalizálása utáni helyzetéről, a kihívásokra adott válaszokról, majd az „airport city” koncepcióról, végül pedig a projekt keretében a budapesti regionális repülőtérre vonatkozó fejlesztési elképzelésekről írok.

AZ EURÓPAI REPÜLŐTEREK HÁLÓZATÁNAK ÁTALAKULÁSA AZ UTÓBBI ÉVTIZEDEKBEN ÉS AZ „AIRPORT CITY” KONCEPCIÓ

Az Airport Council International Europe (ACI-EUROPE[1]) egy publikációjában 4 kategóriába sorolja a repülőtereket [1]:

- kis, regionális repülőterek: kevesebb, mint 5 millió utas/év;
- regionális repülőterek: 5–10 millió utas/év;
- másodlagos csomópontok: 10–25 millió utas/év és
- fő csomópontok: több mint 25 millió utas/év.

Az EUROSTAT adatbázisában 869 európai repülőtér szerepel, amelyek közül 386-re találhatunk 2014-re vonatkozóan olyan adatokat, mint:

- utasszám,
- le- és felszállások száma,
- szállított áru mennyisége tonnában.

[1] ACI EUROPE 46 európai ország több mint 450 repülőterét képviseli, amelyek az európai kereskedelmi légi forgalom 90%-át adják, évente több mint 1,5 milliárd utassal; www.aci-europe.org

A többi repülőtérre nem közöl adatot az EUROSTAT, ami persze nem föltétlenül jelenti azt, hogy azokon ne bonyolódna le forgalom. A 386 repülőtér között csak 324 olyan található, amelyik évente több mint 100 ezer utast szolgál ki (érkező, induló és tranzit forgalom együtt), amint az az 1. táblázatban látható. Az EUROSTAT által publikált adatok szerint az adatot közlő európai repülőterek:

- 16,1%-a 2014-ben kevesebb, mint 100 000 utast szolgált ki;
- 39,6%-át 100 000–1 000 000 utas használta;
- 26,9%-ának volt 1–5 millió utasa és
- csak a repülőterek 17,4%-án fordult meg több mint 5 millió utas.

Más szavakkal: Európában a repülőterek 82,6%-a legföljebb csak regionális repülőtérnek számít. Megfigyelhető az a tendencia, hogy az utóbbi években is folytatódik Európában a forgalom nagysága szerinti koncentráció a repülőterek piacán. A 100 000 utasnál kevesebbet kiszolgáló repülőterek több mint 2/3-a ugyanis bezárta kapuit a 2010 óta eltelt öt évben. Ugyanakkor a nagy (évente több mint 5 millió utas) és a jelentős (évente 1–5 millió utas) forgalmat lebonyolító repülőterek száma viszonylag stabilnak tekinthető (60–70, illetve minimális ingadozással 257 légiforgalmi kikötő).

Repülőtér utasforgalma (fő)	2010	2011	2012	2013	2014
0–100 000	194	142	81	82	62
100 001–1 000 000	146	150	158	154	153
1 000 001–5 000 000	111	107	107	104	104
5 000 001–	59	66	64	65	67

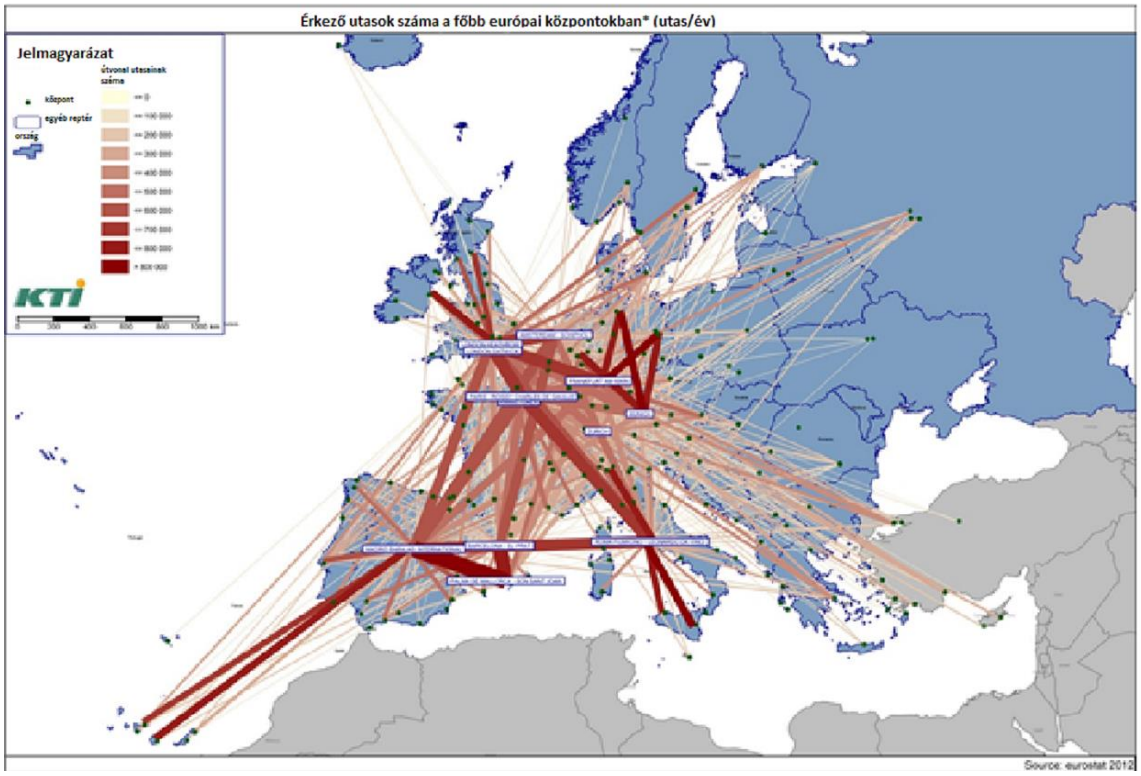
1. táblázat Európai repülőterek számának alakulása 2010-2014 között éves utasforgalmuk szerint [2]

A fontosabb európai repülőterek elhelyezkedése viszonylag szorosan kapcsolódik az adott régió gazdasági fejlettségéhez, függetlenül attól, hogy mekkora közöttük a távolság. Más szavakkal: a fejlettebb régiókban sokkal több nagy forgalmú repülőtér található, mint a gazdaságilag kevéssé fejlett térségekben. Hasonlóan szoros kapcsolat mutatható ki a népsűrűséggel és a K+F szektorban foglalkoztatottak számával is. A gazdasági fejlődés motorjainak térségeiben nagyobb a népsűrűség és a humántőke „sűrűsége" is. S ezekben az urbanizált térségekben találhatók a nagyobb forgalmú repülőterek is. Emellett a kiemelt turisztikai célpontok repülőtereinek forgalma tűnik szembe, hiszen a szűkösen rendelkezésre álló idő lehető legnagyobb részét igyekszenek az emberek úti céljukon tölteni. A legfontosabb utasforgalmi áramlásokat a 1. ábra mutatja.

A tanulmány szerint a repülőterek nem csak helyi jelentőségű gazdasági egységek, hanem stratégiai fontosságú helyük van annak a közösségnek a szempontjából, amelyet kiszolgálnak. Ha valamiért csökken a repülőtér szolgáltatásai iránti kereslet, akkor ezt a nagy értékű „állóeszközt" nem lehet egyszerűen leépíteni, vagy átköltöztetni, mint ahogyan azt megtehették a vállalatok a különböző összeszerelő iparágak esetében az elmúlt évtizedekben.

A költségek döntő része – amelyeknek legnagyobb tétele az amortizáció, de nem elhanyagolhatók a biztonságra fordított ráfordítások sem – fix költség. Ha egy légitársaság elhagyja az adott repülőteret, az általa generált igényt gyakorlatilag igen nehéz rövid idő alatt pótolni, miközben a költségek nem csökkenthetők arányosan. S nem csak a repüléssel kapcsolatos szol-

gáltatások iránti kereslet csökken ekkor, hanem az egyéb szolgáltatások igénybevétele is visszaesik. Ez pedig mérsékeli a változatlan költségek melletti bevételeket, végső soron a repülőtér rentabilitását. Éppen ezért alapvető fontosságú minden légiforgalmi kikötő esetében a megfelelő szintű kapacitás kihasználtság. Ezért igyekszik mindegyik az adott földrajzi körzetben a lehető legjobb szolgáltatást nyújtani, hogy minél nagyobb forgalmat, ezáltal bevételt tudjon elérni. Nem feledkezhetünk meg ugyanis arról a tényről, hogy napjainkban Európa lakosainak mintegy 2/3-a két órás utazási távolságon belül legalább kettő repülőtér közül választhat! S a tények azt bizonyítják, hogy választ is.



1. ábra Főbb légi utasforgalmi útvonalak Európában [3]

Az ACI EUROPE a vázolt folyamatok miatt többek között egy olyan tanulmányt is megrendelt, amelyik az európai repülőterek közötti versenyhelyzetet elemezte. [4] Ez többek között megállapította, hogy az Unió bővítése eredményeként az utóbbi tíz évben az európai polgárok élvezhették az egyes régiók közötti gazdasági és turisztikai kapcsolatok bővülésének előnyeit még akkor is, ha ezt az időszakot egy elhúzódó válság is terhelte. Ezek az előnyök többek között köszönhetők az európai légi közlekedési piac liberalizálási folyamata kiteljesedésének is. Ugyanakkor mindez együtt járt a légi közlekedés üzleti modelljének változásával is.

Egyrészt a kormányok már nem kívánják teljes egészében finanszírozni a repülőtéri infrastruktúrákat, miközben a légi társaságok korlátozásmentesen férhetnek hozzá az Európát behálózó repülőterek által nyújtott szolgáltatásokhoz. Így a – részben, vagy teljesen közpénzekből finanszírozott – repülőtereknek át kell(ett) alakulniuk egyszerű infrastruktúra szolgáltatókból önfinanszírozó, diverzifikált és versenyképes üzleti vállalkozásokká.

Másrészt a válság következtében kevesebb, de sokkal dominánsabb repülőtársaság működik a piacon. Közben a korábbi pont-hub-pontra szerveződő forgalom helyébe a pontból pontba történő szállítás lépett. Ilyen körülmények között a lazább-szorosabb szövetségekbe tömörült repülőtársaságok igen gyorsan hozhatnak arra vonatkozó döntéseket, hogy honnan és hova indítanak új járatokat, illetve, hogy melyik két pont között közlekedő járatokat zárják be gyakorlatilag egyik napról a másikra. A fokozódó verseny azt jelenti, hogy új üzleti modellek bevezetése vált egyre sürgetőbbé. Minden egyes repülőtérnek meg kell találnia azt a számára egyedi piacot, ahol javíthatja pozícióit és tevékenysége hatékonyságát.

Napjainkban az európai repülőterek mintegy 160 ezer embert foglalkoztatnak közvetlenül, de indirekt módon 1,2 millió munkahely található az európai repülőtereken. Minden 1000 repülőtéri munkahely további 2100 munkahelyet teremt az egyes nemzetgazdaságok szintjén. Ez egyben azt is jelenti, hogy a repülőterekkel összefüggő munkahelyek mintegy 60 milliárd euróval járulnak hozzá a teljes európai GDP-hez [1]. Az európai repülőterek bevételeinek mára már csak mintegy fele származik a szorosan vett repülőtéri szolgáltatásokból, de egyes esetekben a nem repülőtéri szolgáltatások részaránya elérheti akár a 70%-ot is.

Az európai gazdasági válság felgyorsította ezt az átalakulási folyamatot, ugyanakkor megerősítette a fapados légitársaságok piaci pozícióit. Ez utóbbiak váltak meghatározóvá az Európán belüli forgalomban, így egyre fontosabbá vált a legmegfelelőbb helyszínek megtalálása. Összességében a mintegy 400 európai repülőtér versenyez a néhány légitársaság „kegyeiért", s ebben a versenyben természetes módon lesznek nyertesek és vesztesek egyaránt. Mivel ezek az új üzleti modellek nem egymást kölcsönösen kizáró változatok, minden egyes repülőtérnek piaci pozíciójához megfelelően illeszkedő, testre szabott megoldást kell találnia. Ezért létfontosságú a tevékenységek diverzifikálása és az innovációs képesség. Közben pedig nem elhanyagolható az a versenypiaci hatás sem, amit a nagysebességű vasutak fejlesztésével támaszt a szárazföldi közlekedés. Napjainkban a 200–400 km-es távolságra fekvő úti célok esetében a teljes utazási időt figyelembe véve már reális alternatíva lehet a vasút a repülőgéppel szemben. Ez utóbbiak a CBD-ből sokkal rövidebb idő alatt megközelíthetők, nincs hosszadalmas biztonsági ellenőrzés és a tényleges úti cél is általában a vasút állomáshoz közel fekszik.

Az ACI a megjelent új üzleti modelleket a következők szerint osztályozta [1]:

- ***Repülőtér hálózat:*** koordinált repülőtér csoport nemzeti és/vagy regionális szinten (pl.: AENA – Spanyolország, LFV – Svédország, PPL – Lengyelország, Manchester Airport Group – UK);
- ***Légitársaságok szövetségének fő csomópontjai:*** ahol a főbb légitársaság szövetségek járatai kapcsolódnak egymáshoz (Pl.: London Heathrow, Paris Charles de Gaulle, Frankfurt am Main);
- ***Airport city:*** olyan repülőtér, amely minden főbb városi szolgáltatást nyújt anélkül, hogy a területet el kellene hagyni (Pl.: München, Zürich);
- ***Multi-modális repülőtér:*** erős intermodális kapcsolatokkal rendelkező „airport city" (Pl.: Amsterdam – Schiphol);
- ***Végcél repülőtér:*** amely csak a saját közösségének nyújt kereskedelmi és egyéb szolgáltatásokat (Pl.: Athén);

- ***Üzleti forgalom:*** üzleti forgalomra szabott repülőtér (menetrend szerinti és/vagy nem menetrend szerinti járatok (Pl.: London City, Farnborough, Le Bourget, Pér);
- ***"Fapados" bázis:*** fapados légitársaságokra fókuszáló repülőtér (Pl.: Bergamo, Charleroi, London Stansted);
- ***Légifuvar repülőtér:*** a légi fuvarozó társaságok igényeire specializálódott repülőtér (Pl.: Liege, Leipzig).

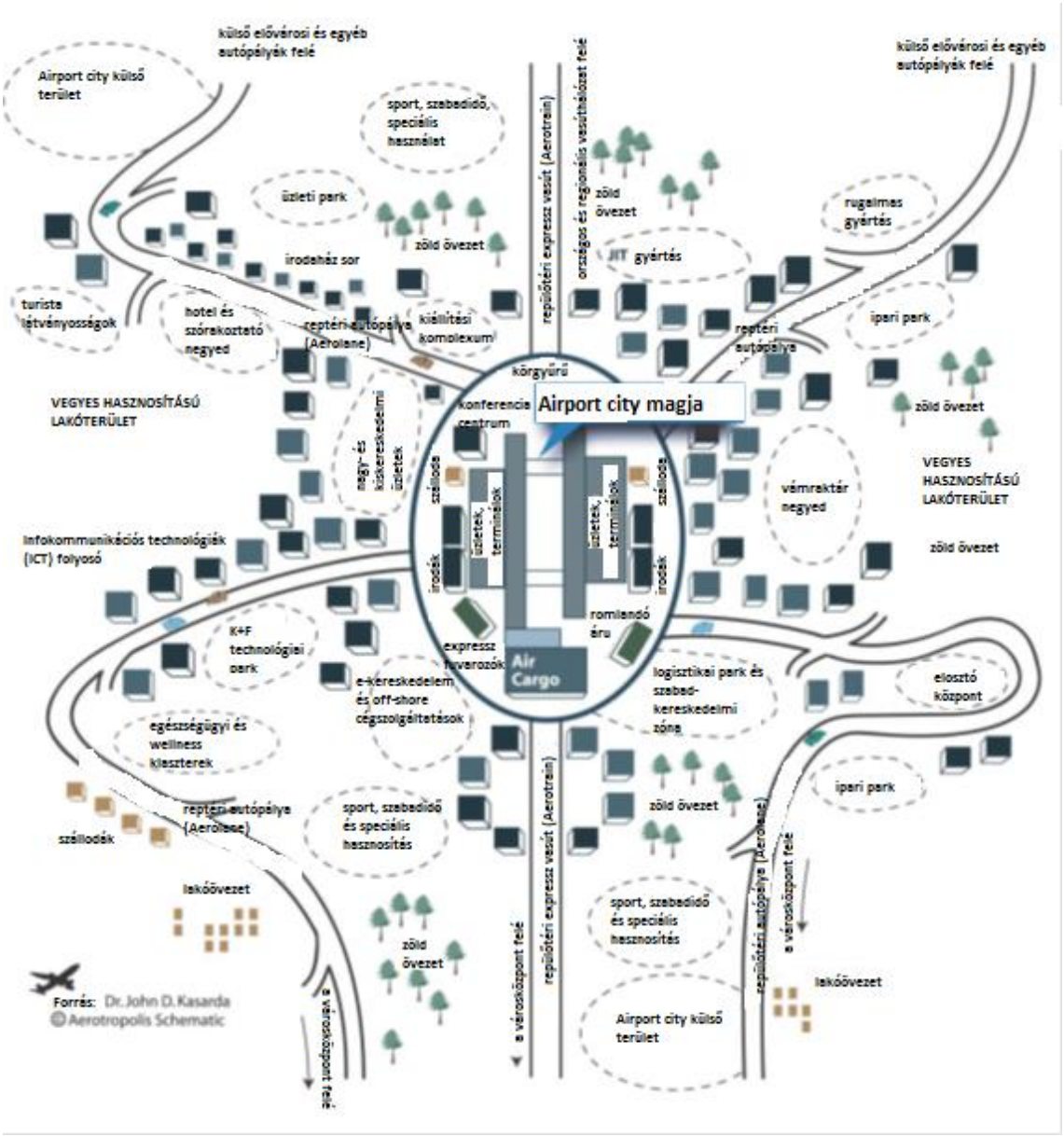
A témánk szempontjából kiemelt fontosságú "airport city" koncepciót először talán H. McKinley Conway publikálta 1977-ben „The Airport City: And the Future Intermodal Transportation" című írásában. Igazán ismertté azonban Dr. John D. Kasarda tette a még a kilencvenes években, majd azt követően folyamatosan megjelenő írásaiban.

Az eredetileg városfejlesztési témakörben kifejtett elképzelés alapja az a megállapítás, hogy a repülőterek soha nem statikusak, hanem folyamatosan változik alakjuk és funkciójuk is. A repülőtér szerinte egy területfejlesztési koncepció középpontjában helyezkedik el, ami abból indul ki, hogy a légiforgalmi kikötők már régen nem csak azok a helyek, ahol a repülőgépek le- és felszállnak. A legtöbbjük számos, a repüléssel nem szorosan összefüggő létesítményt, szolgáltatást is magába foglal. Ilyen szolgáltatások lehetnek például szállodák, vendéglátóhelyek, üzletek, kiállítási és konferencia termek és terek, irodák, logisztikai és akár ipari termelő bázisok stb.

A repülőtér dinamizálhatja környezetét, a gazdasági fejlődés motorja, de legalábbis katalizátora lehet. Éppen ezért kiemelkedő jelentőségű, hogy a repülőtér milyen (közúti, vasúti, esetleg vízi) összeköttetésekkel rendelkezik a szorosabb környezetében található üzleti negyedekkel, lakó területekkel, illetve vonzáskörzete távolabbi településeivel valamint a többi repülőtérrel. Egy ideális „airport city" szerkezetét mutatja a 2. ábra.

2008-ban Dr. Kasarda a következőképpen összegezte a koncepció lényegét [6]:
"A repülőtéri terminálok gyorsan váltak luxus bevásárló központokká, valamint kiállító és szabadidős helyekké. Többé már nem csak újságárusokra, gyorséttermekre és vámmentes boltokra szorítkozik a kínálatuk, hanem márkás butikok, specialitásokat áruló üzletek és felső kategóriás éttermek is találhatók bennük a szórakoztató és kulturális lehetőségek mellett. A Hong Kong International például több mint 30 márkás ruhaüzletet, a Singapore Changi mozikat, szaunát és trópusi lepke röptetőt üzemeltet, míg a Las Vegas McCarran repülőtéren egy múzeum, az Amsterdam Schipholon pedig egy holland mestereket bemutató képzőművészeti galéria található.

Ismét mások ettől eltérő kínálattal rendelkeznek, mint például Frankfurt – ahol a világ legnagyobb repülőtéri orvosi rendelője található, ahol évente több mint 36 ezer pácienst szolgálnak ki –, vagy a Detroit Metro amelynek 420 szobás Westin Hotelje közvetlenül a fő terminálon helyezkedik el, vagy a Dallas Ft. Worth Grand Hyatt szállodája, amely számos amerikai vállalat számára nyújt repülővel megközelíthető virtuális vállalati központot. A Beijing Capital Airport bankokat foglal magába, míg a Stockholm Arlanda kápolnáját intenzíven hasznosítják a pl. 2007-ben közel 500 esküvővel. A legtöbb nagyobb repülőtér természetesen diverzifikálja, bővíti és fejleszti kiskereskedelmi kínálatát, gyakran bevásárló utcákat, galériákat, éttermi zónákat, művészeti, szórakoztató és kulturális részeket alakítanak ki. Ezeket egészítik ki a helyi specialitásokat kínáló üzletek és étkezési lehetőségek."



2. ábra Airport city koncepció [5]

A fejlesztések egy részének hátterében az áll, hogy a repülővel utazók jövedelme jóval a nemzeti átlag fölött van (jellemzően 3–5-ször nagyobb) és jóval többen fordulnak meg egy–egy nagyobb repülőtéren, mint a bevásárló központokban. Ezért aztán a repülőterek üzleteiben az egy négyzetméterre eső forgalom is jóval nagyobb, mint máshol. Következésképpen a repülőtereken az üzletek bérleti díjai közelítik a belvárosi üzletek bérleti díjait. Ráadásul a repülőterek az előbb említetteken kívül vendéglátóhelyeket, irodákat, valamint a szállítási időre érzékeny termékek előállításához, kezeléséhez logisztikai és szabadkereskedelmi zónákat és létesítményeket is kínálnak.

A repülőterek tevékenységüket az előbbieken kívül még hirdetésekkel, parkolókkal egészítik ki úgy, hogy napjainkban a fontosabb repülőterek bevételeinek nagyobbik hányada származik már a nem szorosan vett repülőtéri szolgáltatásokból (mint pl. landolási díjak, beszállóhely bérlés, utas-kiszolgálási díj stb.). A repülőterek lényegében sok olyan tevékenységhez nyújtanak teret, amelyeket régebben a város üzleti negyedében végeztek, így egyre inkább

multimodális, regionális és országos üzleti központokká válnak. Ez a változás tett számos városi repülőteret „airport city-vé", repülőtér várossá.

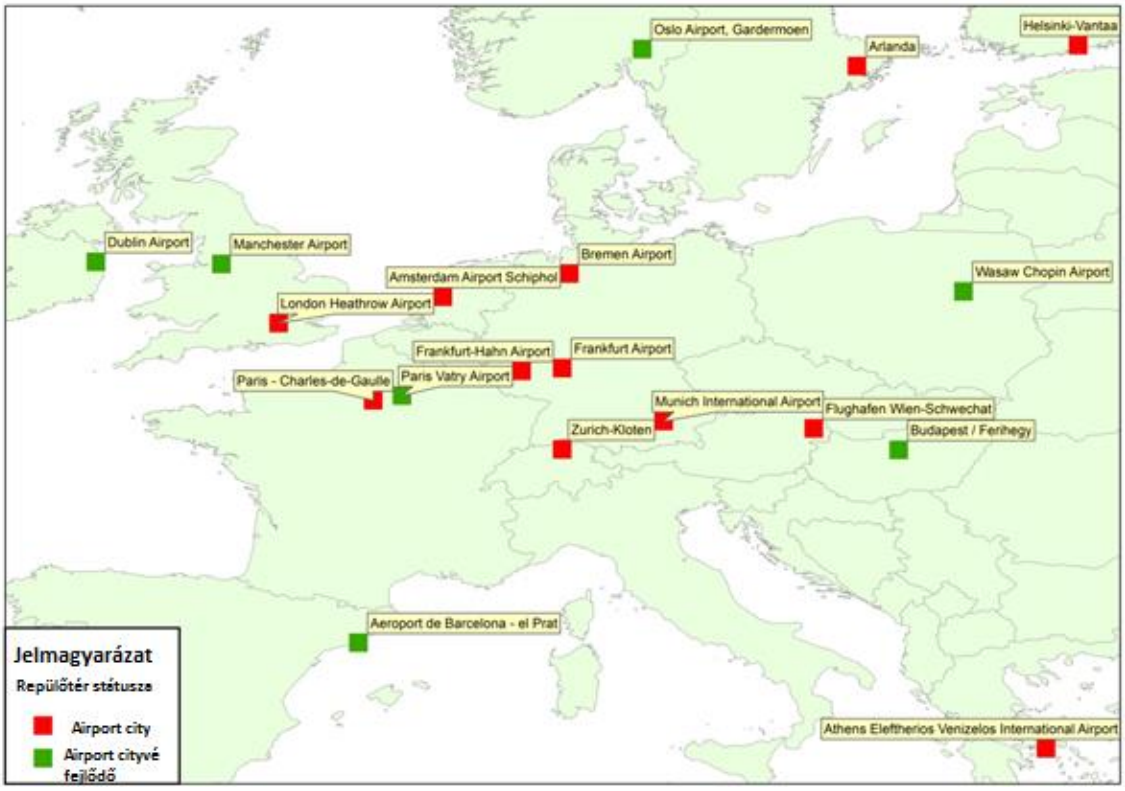
Dr. Kasarda egy másik írásában [7] megállapítja, hogy bár napjainkban a legtöbb aerotropolis (városi funkciókkal is rendelkező repülőtér) szervesen, spontán módon fejlődött ki, a jövőben érezhetően javítható azok szerkezete a megfelelően kidolgozott infrastruktúra és városfejlesztési stratégiák révén. Ezekben többek között az alábbiakra kell különös figyelmet fordítani:

- kifejezetten a városközpontokat és a repülőteret összekötő gyorsforgalmi utakra és vasutakra;
- a speciális, csak teherautók számára fenntartott sávokra;
- a főbb csomópontok között idő-érték alapján kell a hálózatokat tervezni a távolságon alapuló módszerek helyett;
- a repülés-igényes gazdasági ágakat a repülőterek közelébe kell telepíteni, ezzel is csökkentve a városon belüli közlekedési igényeket és javítani az elérési időket;
- a repülőterek környezetében a javak kezelését (gyártás, raktározás, szállítás) fizikailag is el kell választani az egyéb tevékenységektől;
- a zaj- és levegőszennyezés szempontjából érzékeny gazdasági és lakóövezeti fejlesztéseket az intenzíven használt repülési útvonalaktól távol kell elhelyezni.

Dr. Kasarda rendszeresen közreadja a világon fellelhető, már működő, vagy legalábbis fejlesztési fázisban lévő, városi funkciókkal is rendelkező repülőterek listáját [8]. A legfrissebb listán 45 működő „aerotropolis" és „airport city" szerepel, amelyből 12 található Európában (lásd: 3. ábra).

A koncepciót széles körben átvették és alkalmazzák különböző repülőterek stratégiai fejlesztési projektjeiben nem csak az USA-ban, hanem szerte a világon. Az „airport cityt" tekinthetjük egy olyan fizikailag megjelenő „internetnek", amely összekapcsolja egymással a világ különböző részein található ellátási láncokat, turisztikai központokat, a személyes találkozásra alkalmas üzleti tárgyalások helyszíneit, a gyors szállítási igényű termékek (mint pl. mikroelektronikai, gyógyszer-, repülőgép-, orvosi műszer ipar, egyes friss mezőgazdasági termékek stb.) előállításának és felhasználásának helyszíneit. S természetesen az olyan, viszonylag nagy „repülésigényű" szolgáltatásokat nyújtó tevékenységeket is kiszolgálja, mint amilyen például az informatika, a pénzügyi és üzleti tanácsadás, a legkülönfélébb területek kutatás-fejlesztési tevékenységei, az oktatás.

Vannak természetesen olyan kétségek is az „airport city" fejlesztési koncepcióval kapcsolatban, amelyek semmiképpen sem hagyhatók figyelmen kívül. [9] Legelső sorban a légiközlekedés jelenlegi formájának hosszútávú fenntarthatóságát kell megemlítenünk, hiszen az teljes egészében a fosszilis üzemanyagokra épül. Ennek legkomolyabb következménye pedig az, hogy a jelenlegi állapotában csak véges ideig tartható fenn a légi közlekedés, hiszen a föld kőolaj készletei nem végtelenek. S légi közlekedés nélkül pedig repülőterek sincsenek. A városi funkciókkal is rendelkező repülőterek fejlesztése tehát azt feltételezi, hogy a légi közlekedés radikális technológiai változásokon megy keresztül az elkövetkező 50 év folyamán. Ne feledkezzünk meg arról, hogy az első kísérletek az alternatív, de legalábbis üzemanyag takarékos megoldásokra már közismertek.



3. ábra Aerotropolis-ok és airport city-k Európában, 2013 [8]

További kétségként jelenik meg, hogy adott esetben kritikus azoknak az infrastruktúráknak a koncentrációja, amelyek nem kizárólag a légi közlekedéshez kapcsolhatók. Az aerotropolisban nagy értékű állóeszközök jelennek meg, ahol ráadásul más infrastruktúra elemek is kiépülnek, azok csomópontja lesz: ilyenek a vasutak és a közutak. Ebből következően ezeken a helyeken így sokkal nagyobb biztonsági kockázat alakulhat ki, mint azoknak a repülőtereknek az esetében, amelyek csak a légi forgalmat szolgálják ki. Ez természetesen bármely infrastruktúra konglomerátum esetében felvethető.

S végül, de nem utolsó sorban meg kell említeni azt is, hogy általánosságban is kérdéses, hogy kijelenthető-e az, hogy a légi közlekedés valóban a gazdasági tevékenység motorjának tekinthető, s adott esetben helyettesítheti-e más, a nemzetközi gazdasági fejlődést stimuláló tényezők hatását. Egyes kutatók inkább úgy fogalmaznak, hogy a repülőtér vonzáskörzetének fejlesztésében a repülőtér lehet a legnagyobb partner, de semmiképpen sem léphet a többi tényező helyébe (mint pl.: a tengeri, közúti és vasúti szállítás) ebben az összefüggésben.

A BUDAPEST LISZT FERENC NEMZETKÖZI REPÜLŐTÉR „AIRPORT CITY”-VÉ FEJLESZTÉSÉNEK LEHETŐSÉGEI

A Budapest Liszt Ferenc Nemzetközi Repülőtér policentrikus, stratégiai fejlesztési tervét a projektben résztvevő önkormányzatok megbízásából a Város-Teampannon Kft. és a Pestterv Kft. készítette el. A továbbiakban ennek a tanulmánynak fontosabb, témánk szempontjából releváns megállapításait ismertetem. [10] Először foglalkozzunk az adottságokkal, a jelenlegi helyzettel.

A Budapest Liszt Ferenc Nemzetközi Repülőtér rendelkezik mindazokkal a kritériumokkal, amelyekkel egy „airport city”-nek rendelkeznie kell, kivéve a szállodát. Meg kell azonban jegyezni, hogy elfogadható időn belül találhatók mgfelelő színvonalú szálláshelyek. A legnagyobb gond talán az, hogy bár a repülőtérnek hivatalosan két terminálja van, a gyakorlatban az 1-es terminál már jó ideje, gyakorlatilag a MALÉV csődje óta nem fogad menetrendszerinti járatokat. Emiatt az addig ott tevékenykedő üzleteket, irodákat, éttermeket, szolgáltatókat át kellett helyezni a 2-es terminál épületébe. Habár az 1-es terminál kiesett az utasforgalom kiszolgálásából, az épület nem maradt kihasználatlanul. Különböző rendezvények céljára hasznosítják, illetve egyes irodák változatlanul itt találhatók. Fontos tényező, hogy már ma is számos vállalkozás található a repülőtér egyéb épületeiben: a DHL, a Lufthansa Technik stb. A repülőtér nem csak utasforgalmat, hanem áruforgalmat is kiszolgál, bár bizonyos áruféleségek esetében gondot okoz, hogy nincs a repülőtéren megfelelő hűtőházi kapacitás.

A repülőtér és a városközpont közötti individuális és közforgalmú közlekedési összeköttetés nem kielégítő. A számos problémát felvető „gyorsforgalmi út” mellett csak egy autóbusz vonal hivatott az évi közel 10 millió fős utasforgalmat kiszolgálni. Ráadásul az utóbbi időben még taxival is csak igen komplikáltan közelíthető meg a repülőtéri terminál, hiszen az érkező utasokat szállító bérkocsiknak igen rövid időn, néhány percen belül el kell hagyniuk az övezetet, ellenkező esetben aránytalanul magas összeget kellene megfizetniük. Magán gépjárművel pedig gyakorlatilag megközelíthetetlenek a terminál épületei a magas belépési díjak miatt.

A repülőtér közúti összeköttetése a tágabb értelemben vett vonzáskörzettel az M0 autópálya gyűrű révén jó, hiszen azon keresztül a sugaras szerkezetű főút hálózat minden eleme akadálytalanul csatlakozik a repülőtéri bevezető szakaszhoz. Ugyanakkor a közvetlen környezetben található településekkel az összeköttetés az egyéb utakon nem zökkenőmentes.

Habár a hivatalos vasúti menetrendben szerepel Ferihegy, a valóságban azonban semmilyen utasforgalmat nem képes kiszolgálni, hiszen a vasúti megálló az 1-es terminálnál található, ahonnan a 2-es terminál több kilométerre helyezkedik el. Az utasnak tehát igénybe kell(ene) venni az egyetlen autóbusz járatot ahhoz, hogy eljusson a 2-es terminálra. A repülőtérre bevezető iparvágány alapvetően csak az üzemanyag szállítást oldja meg, légifuvar árut nem szállítanak rajta.

A repülőtér a lakott területekhez viszonylag közel helyezkedik el, számos lakóépület található közvetlen, 2 km-es körzetén belül. Ugyanakkor egészen közel a repülőtérhez számos üzlet, logisztikai létesítmény, szálloda, raktárak, ipari üzemek is találhatók. A közvetlen közelben olyan létesítmények is fellelhetők, amelyek ugyan nem kifejezetten konferencia központként üzemelnek (pl.: kulturális központ), de akár ilyen célra is igénybe vehetők, valamint léteznek sportlétesítmények, wellness szolgáltatók stb. Számos kisebb szállás szolgáltató és irodaház is kínálja szolgáltatásait a közelben, de nem koncentráltan, hanem szétszórtan. Ezeken kívül a közelben működik többek között a Wizzair és a Hungarocontrol oktató központja, mindkettő az 1-es terminálon. Nincsenek viszont kiállítások és vásárok rendezésre alkalmas terek a közelben, azok inkább a főváros szívében, illetve távolabbi kerületekben találhatók. Az 1-es terminál konferencia központként való hasznosítása is pótlólagos beruházásokat igényelne.

A jelenleg mezőgazdasági hasznosítású területek nagy része fejlesztési területként szerepel az egyes környező települések rendezési terveiben (Vecsés, Ecser), de barna mezős beruházásokra

alkalmas területek is találhatók a közelben (18. kerület). A repülőtér is elegendő területtel rendelkezik bármilyen további fejlesztéshez, de egyelőre korlátozott a beruházók érdeklődése. A fejlesztések a következőkre fókuszálhatnának.

Kutatás, fejlesztés és innováció

Nincs túl nagy esély arra, hogy kutató és technológiai park létesüljön a repülőteret a városközponttal összekötő folyosó mentén, de erre nincs is különösebb szükség. Már jelenleg is a közelbe települt a Bosch kutató központja, s viszonylag jól elérhető a lágymányosi innovációs központ. (BME, ELTE, Telekom, Lufthansa Systems, IBM stb.) Ugyanígy a Petőfi és a Rákóczi híd között a pesti oldalon található szolgáltató cégek (Vodafone, K&H Bank, Morgan Stanley stb.) irodaházai is, amelyek szintén az átlagosnál nagyobb arányban igénylik a jó légi összeköttetést. Ugyanakkor fontos lehet még a már régen elérhető közelségben megtelepedett egészségügyi intézmények (Semmelweis Orvostudományi Egyetem, Nemzeti Epidemiológiai Központ, Gottsegen György Nemzeti Kardiológiai Intézet, Nemzeti Foglalkozásegészségügyi és Higiéniai Intézet stb.) és a Richter Gedeon Gyógyszeripari Nyrt. is.

Vámszabad terület és vámraktár, tranzit terület

Azt megelőzően, hogy Magyarország csatlakozott volna az Európai Unióhoz, itt működött a MALÉV Ferihegy vámszabad terület, amelyet a csatlakozás után bezártak, amit esetleg újra lehetne nyitni, hiszen a légifuvarok révén az Unión kívülről származó, majd szintén az Unión kívülre szállítandó termékeket lehetne feldolgozni, amennyiben az uniós szabályozással összhangban álló megoldást lehetne találni, illetve a tevékenység kellő rentabilitással végezhető.

JIT termelés, gyors szállítás igényű termékek előállítása

JIT és rugalmasan változtatható gyártósorokat alkalmazó termelő egységek még nem jelentek meg nagyobb számban a közelben (kivéve a Flextronics-ot a Gyömrői úton). Ezeknek a vállalatoknak igen fontos, hogy gyorsan eljussanak vevőikhez, illetve beszállítóikhoz a viszonylag kis súlyú és kiterjedésű, de magas hozzáadott értéket képviselő termékeikkel. Ezen kívül még a környék zöldség és gyümölcstermelő vállalkozásai számára lehet érdekes adott esetben terményeik légi úton történő szállítása. Mindegyik termék esetében fontos ezen felül a jó közúti és vasúti összeköttetés is, az utóbbiak esetében pedig szükség lenne a hűtőházi kapacitások fejlesztésére is.

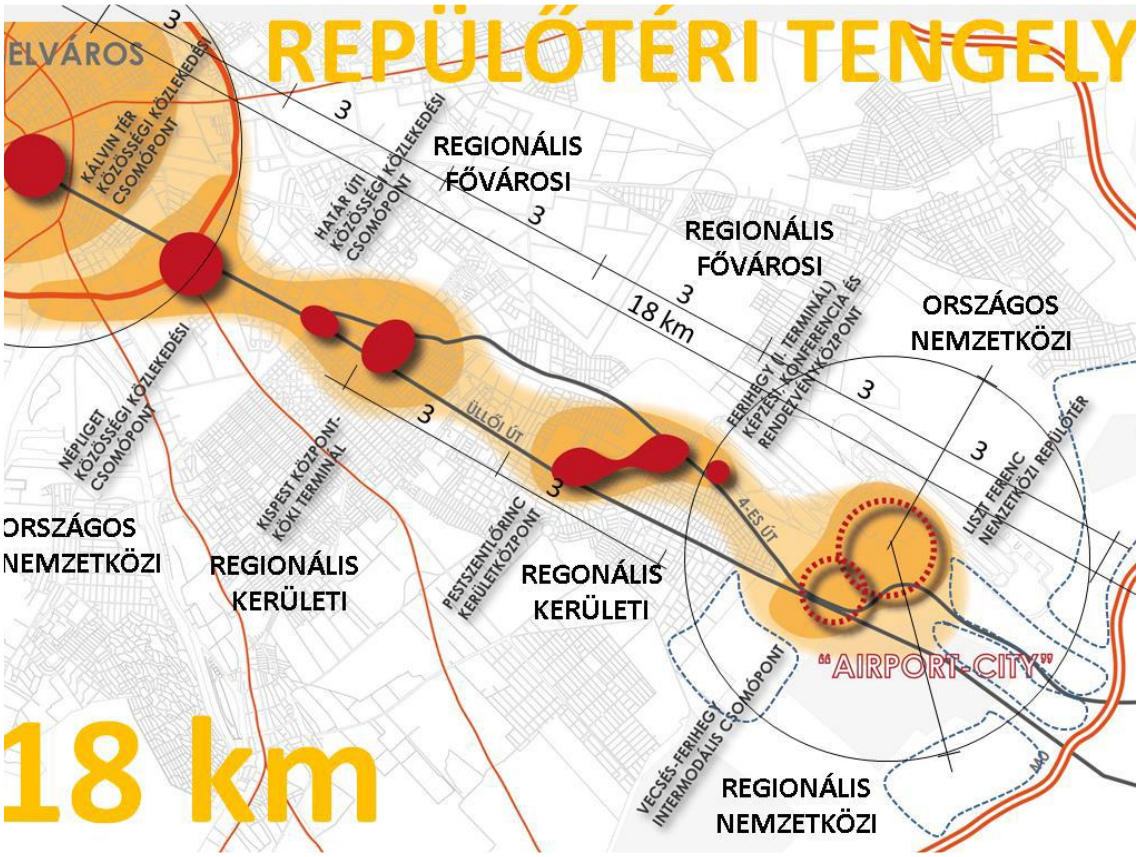
Adminisztratív, szállodai, szórakoztató, kulturális és egyéb közintézmények

A legutóbbi időkig a budapesti iroda piac súlyos válságot élt át. Az utóbbi időben viszont úgy tűnik, hogy a város kezd kilábalni ebből a helyzetből. Így tere lehet a korábban elképzelt, de időlegesen leállított fejlesztések újra indításának is. Az iroda piacnál valamivel jobb helyzetben volt/van a szálloda és szórakoztató létesítmények fejlesztése. A viszonylag nagyobb vásárlóerővel bíró turizmus növekszik, ezért a szállodai férőhelyek és a szórakoztató létesítmények iránti kereslet is javul régiónkban. További lehetőségeket jelenthetne, ha valamelyik európai uniós intézmény, vagy nagyobb nemzetközi vállalat központi, vagy legalábbis regionális központi irodája jelenne meg a repülőtér környékén. Ennek elengedhetetlen előfeltétele, hogy javuljon Magyarország általános megítélése az Európai Unióban. Ez azonban már nem terület-, vagy közlekedésfejlesztési kérdés.

Repülőtéri tengely

A helyzetelemzést, a lehetőségeket és az „airLED” projekt keretében széles körben, több alkalommal folytatott megbeszélések (majd’ egy tucat Regional Development Council Board – RDCB; regionális fejlesztési tanácskozó testület ülések) eredményeit figyelembe véve alakult ki a „Repülőtéri tengely” elképzelés. [10] (Lásd: 4. ábra) Ennek lényege, hogy a zöld- és barnamezős fejlesztési elképzeléseket, az „airport city” koncepciót és a távlati terveket úgy hangolják össze, hogy szervesen egymáshoz csatlakozva tegyék meg a szükséges intézkedéseket, lépéseket. A repülőteret és a CBD-t összekötő „folyosó” mentén alakulnának ki azok a funkciók és terek, amelyek kiszolgálják mindazokat az intézményeket, amelyek révén a Budapest Liszt Ferenc Nemzetközi Repülőtér valóban „airport city”-vé válhat, miközben az annak előnyeit messzemenően hasznosítani tudó városrészek fejlesztése is további plusz impulzust kaphat.

Nagyon fontos megemlíteni azt is, hogy az „airLED” projekt keretében a stakeholderek között kialakult párbeszéd eredményeként már kézzelfogható, megvalósult fejlesztési dokumentumok is születtek. Kiemelkedő ezek közül, hogy a projekt keretében megjelent komplex fejlesztési elképzeléseket átvette a Pest Megyei Területfejlesztési Program 2014–2020 is, illetve, hogy a projekt megállapításai alapján Pest megye Önkormányzata Közgyűlése határozatot hozott további, a fejlesztéseket megalapozó munkák elvégzéséről.



4. ábra Repülőtéri tengely [10]

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] An Outlook for Europe's Airports, Facing the Challenges of the 21th Century; ACI-EUROPE 2010
[2] Európai repülőterek számának alakulása 2010-2014 között éves utasforgalmuk szerint; forrás: EUROSTAT adatai alapján saját szerkesztés; http://ec.europa.eu/eurostat/data/database
[3] Főbb légi utasforgalmi útvonalak Európában; forrás: EUROSTAT adatai alapján saját szerkesztés; http://ec.europa.eu/eurostat/data/database
[4] martin hvidt thelle, torben thorø pedersen and frederik harhoff: Airport Competition in Europe, Copenhagen Economics, June, 2012 - ACI-EUROPE
[5] Airport city koncepció; forrás: http://www.aerotropolis.com/files/AerotropolisSchematic.jpg
[6] John D. Kasarda: Airport Cities: The Evolution; Chapter 1; Insight Media, London, 2008
[7] John D. Kasarda: The Way Forward; Global Airport Cities; Insight Media, London, 2010.
[8] Aerotropolis-ok és airport city-k Európában, 2013: http://www.aerotropolis.com/files/2013_AerotropolisStatus.pdf
[9] Michael B. Charles, Paul Barnes, Neal Ryan, Julia Clayton : Airport futures: Towards a critique of the aerotropolis model; Elsevier: Futures Volume 39, Issue 9, November 2007, Pages 1009–1028 (online) http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016328707000699
[10] Szántó Katalin, Csoma Dániel Áron, Gyetvai Márton, Schuchmann Péter, Károlyi János: Budapest Liszt Ferenc Nemzetközi Repülőtér térsége integrált térségfejlesztési terv; belső munkaanyag a 4CE485P4 számú, az Európai Unió Regionális Fejlesztési Alapja keretében működő Central Europe Project keretében megvalósult „airLED" projekt eredményeként. Budapest, 2014.

AIRPOR CITY IN FERIHEGY: A DREAM OR REALITY?

In the last decade globalizing world markets have established those changes which have converted airports and their adjacent areas into catalysts for local economic development. The „airLED" project studied the possibilities how to convert Central European regional airports into „airport cities". The stakeholders of the interested areas have elaborated their own complex, polycentric spatial development plans on the basis of the common methodology elaborated within the project. In every region were held meetings where the strategic plans were established during wider consultations which are part of the regional spatial development concepts of the region, as it is the case in Hungary. Among the Central-European regional airports which have participated in the project first of all "Liszt Ferenc Budapest International Airport" and its' adjacent area is which disposes with all those pre-conditions which are needed to became to an „airport city". This paper discusses it more in detail.

Keywords: *airport cities, airports' impact on urban development, connectivity, transnational cooperation*

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_3/2015-3-18-0234_Siska_Miklos.pdf

Zoltán Belső, Balázs Gáti, István Koller, Péter Rucz, Antal Turóczi

DESIGN OF A NONLINEAR STATE ESTIMATOR FOR NAVIGATION OF AUTONOMOUS AERIAL VEHICLES

The aim of this paper is to present a novel approach for the design and implementation of an onboard nonlinear state estimation system for an autonomous aerial vehicle. The tasks of such a system include collection of measurement data from different navigation sensors, and estimation of all the quantities describing the system's state of motion based on the system dynamics and the measurement data. The widely accepted method for such a sensor fusion problem is the Kalman filter in the case of a linear system. The dynamics of a rigid body inherently involves nonlinearity, therefore a nonlinear extension of the Kalman filter is needed. The proposed solution relies on the Unscented Kalman Filter (UKF) technique with making use of both the quaternion and Rodrigues parameters representations of the attitude. The developed method is tested in MATLAB and implemented in the onboard embedded system in C code. The applicability of the proposed method is demonstrated in this paper by means of various examples.

Keywords: *UAV, sensor fusion, Unscented Kalman Filter (UKF), quaternion, Rodrigues parameters*

INTRODUCTION

The task of navigation and control of an autonomous aerial vehicle (sometimes called UAV) is the task of the robotic pilot or autopilot. The autopilot system consists of sensors for the detection of the state of motion of the system, actuators for applying forces and an embedded microprocessor and appropriate software to execute the control algorithm. The control algorithm is responsible for producing the appropriate driving signals for the actuators in order to keep the vehicle on the desired trajectory. This is accomplished by comparing the actual state (more precisely the estimation of the actual state) with the desired reference signal. The reference of the state variables is produced by the guidance algorithm based on the (estimation of the) actual state and the desired flight path. The estimation of the actual state of motion is produced by the state estimation algorithm from the navigation sensor measurements (Figure 1). This paper focuses only on the state estimation algorithm. The control and guidance algorithms are discussed in more detail in the accompanying paper [1].

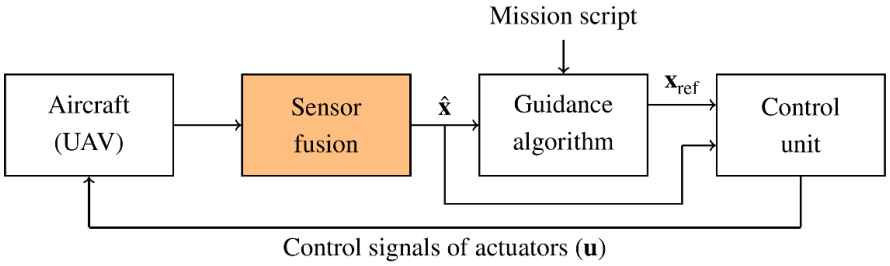


Figure 1. The autopilot in an UAV system

The first step in the control of an autonomous robotic vehicle is determining its position and state of motion. The vehicle as a rigid body has six degrees of freedom (6DoF): the position of its center of mass in some reference frame (three degrees) and its orientation (another three degrees).

In order to describe the state of motion of the vehicle we must choose a reference frame. One obvious choice would be the one attached to fixed stars. Its greatest advantage is that it is an inertial frame of reference, so the laws of mechanics take their simplest forms. In case of a vehicle working in the geographical vicinity of its starting position it would be natural to choose the starting point as the origin of the reference frame and attach the frame to the Earth. This is not an inertial frame of reference in strict sense,[1] but in our case the difference is negligible. Thus, the most common choice is the north-east-down (NED) system, called the Earth frame.

One of the difficulties using the Earth frame is that the quantities describing the vehicle's moment of inertia are changing as the vehicle turns (changes its orientation). We can attach the axes of the coordinate system to the principal axes of the vehicle body: the x-axis points in the forward direction, the y-axis points to the right and the z-axis points downwards. We could fix the frame's origin at the vehicle's center of mass, but in that case the position would always be [0, 0, 0], which is rather useless. Therefore we define the body frame as follows: the origin of the frame fixed at the same point as the reference Earth frame origin, but the orientation of the axes are attached to the principal axes of the vehicle's body [1][3].

The motion of the center of mass obeys Newton's laws. These are a set of linear differential equations expressed in the Earth frame. However, the description of the orientation which is the rotation between the reference frame and the frame attached to the body is inherently nonlinear. Rotation can be represented in terms of rotation angles, but use of angle values involves the usage of trigonometric functions which are not linear. There are descriptions of rotation in which not the angle is the state variable but some quantity related to its sinusoid. In these cases the trigonometric functions may be eliminated but in exchange other nonlinear functions (like square and square root) are involved. These issues are examined in the next section in detail.

During the processing some quantities are expressed in Earth frame while others are expressed in body frame. Time to time we need to transform the quantities from body frame to Earth frame and back, which involves multiplying state variables with each other. This is again a nonlinear operation, so we need to deal with nonlinear techniques [4][5].

DESCRIPTION OF ORIENTATION

The orientation (also called angular position or attitude) is a part of the description of the state of motion of a rigid body. This is the transformation that rotates the Earth frame into the body frame.

The orientation of the vehicle must be incorporated into the state space in some way, therefore its representation must be chosen appropriately. The orientation being a rotation in three-dimensional space can be described in several ways. In the following we summarize the advantages and drawbacks of the most common representations.

[1] We need to calculate with the Coriolis force caused by the Earth's rotation and some more complex transformation if we want to take into consideration the Earth's rather complex motion relative to the fixed stars.

Rotation matrix

A rotation transformation can be described by a rotation matrix (or direction cosine matrix, DCM). A rotation matrix in a three-dimensional space is a 3 by 3 matrix with nine real elements. The DCMs are orthonormal matrices, so their inverse coincides with their transpose.

The greatest advantage of DCMs is the ease of calculating the transformed version of a given vector: obtained by a vector by matrix multiplication.

The disadvantage of the DCM representation is redundancy. It has nine elements for describing the three degrees of freedom of the 3D rotation operation. The orthogonal property means a strong correlation between the elements which must be preserved during transformations. If we include the redundant DCM representation in the state space the covariance matrix of the state will be singular, and the system we get is not controllable [6].

Euler angles

Another natural description of a rotation in three-dimensional space is by three rotations around the three main axes of the body. Unfortunately the order of the rotations does matter, altogether there are 12 possibilities. The most commonly used order is rotation around the x, then the y, and finally the z-axis. These are the roll, pitch and yaw angles, respectively.

The Euler angles have three dimensions for describing the three degree of freedom system. For small angles (in the vicinity of level straight flight) it has a nice linear behavior by the approximation of $\sin(x)$ by x.

From the Euler angles description we can always get the rotation matrix description by:

$$\mathbf{R}_{\mathrm{DCM}} = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & \cos\theta\sin\psi & -\sin\theta \\ -\cos\theta\sin\psi + \sin\phi\sin\theta\cos\psi & \cos\phi\cos\psi + \sin\phi\sin\theta\sin\psi & \sin\phi\cos\theta \\ \sin\phi\sin\psi + \cos\phi\sin\theta\cos\psi & -\sin\phi\cos\psi + \cos\phi\sin\theta\sin\psi & \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix}, \tag{1}$$

where ϕ, θ, ψ are roll, pitch, yaw, respectively.

The Euler angle representation has some well-known drawbacks. First of all it has a discontinuity at ±180°, which is one of the most severe non-linearity one can face with. The second problem is the so-called gimbal lock: For some orientations the description is not unique. For the roll–pitch–yaw order this occurs when the pitch angle is ±90°, in this case the roll and yaw angles describe a rotation around the same axis. This way we lose one degree of freedom, which leads to a singularity in the system equations [6].

Quaternions

The orientation is a rotation, hence it can be represented by a rotation axis and a rotation angle. Let the rotation axis be the unit vector k and the rotation angle be α. Hence we can represent an orientation (and any rotation) by a unit quaternion:

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \cos\frac{\alpha}{2} \\ k_x \sin\frac{\alpha}{2} \\ k_y \sin\frac{\alpha}{2} \\ k_z \sin\frac{\alpha}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}. \tag{2}$$

This way for every orientation there are two unit quaternion representations: the sing of k and α are interchangeable. If we restrict our description having only positive angles then the representation is unique.

Quaternions are similarly easy to use as rotation matrices: two rotations in series is the quaternion product of the two representing quaternions, and rotating a vector is expressed as a vector by quaternion product. The quaternion representation is also free from the discontinuity problem the Euler angles representation has. A quaternion represents a three degrees of freedom system by four values, therefore the same redundancy problem arises as in the case of DCMs [6][7].

Rodrigues parameters

The Rodrigues parameters are a three-dimensional representation of a rotation projecting the four-dimensional hypersphere of unit quaternions onto a three-dimensional hyperplane. By placing the projection point and the hyperplane into different locations different variants of the Rodrigues parameters can be constructed. Choosing the projection focal point to be [-1, 0, 0, 0] and the first coordinate of the hyperplane to be 0 (Figure 2) we get a singularity free parameter representation up to a principal rotation of ±360°, also free from the gimbal lock phenomenon.

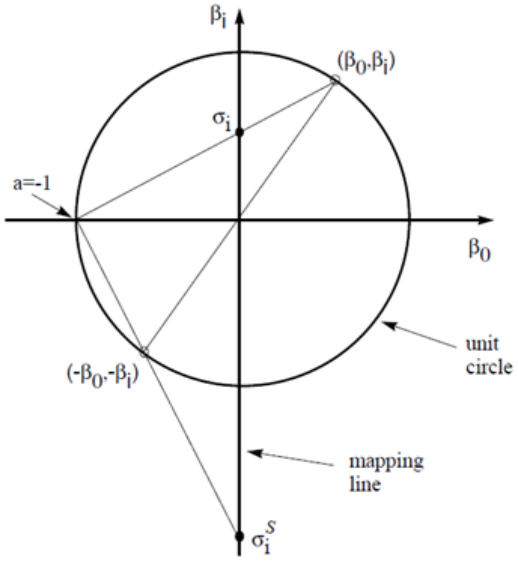


Figure 2. The Rodrigues projection demonstated in 2 dimensions. [8]

The Rodrigues parameters s_i are derived from the quaternion elements q_i with the following formula:

$$s_i = \frac{q_i}{1 + q_0}, \qquad i = 1, 2, 3. \tag{3}$$

The transformation in the opposite direction reads as:

$$q_0 = \frac{1 - s^{\mathrm{T}} s}{1 + s^{\mathrm{T}} s}, \qquad q_i = \frac{2 s_i}{1 + s^{\mathrm{T}} s}, \qquad i = 1,\ 2,\ 3. \tag{4}$$

The rotation matrix representation of a rotation described by a set of Rodrigues parameters can be calculated as follows:

$$\mathbf{R}_{\mathrm{DCM}} = \frac{1}{(1+n)^2} \begin{bmatrix} 4\left(s_1^2 - s_2^2 - s_3^2\right) + u^2 & 8 s_1 s_2 + 4 s_3 u & 8 s_1 s_3 - 4 s_2 u \\ 8 s_2 s_1 - 4 s_3 u & 4\left(-s_1^2 + s_2^2 - s_3^2\right) + u^2 & 8 s_2 s_3 + 4 s_1 u \\ 8 s_3 s_1 + s_2 u & 8 s_3 s_2 - 4 s_1 u & 4\left(-s_1^2 - s_2^2 + s_3^2\right) + u^2 \end{bmatrix}, \tag{5}$$

where $n = \mathbf{s}^T \mathbf{s}$ is the norm square of the Rodrigues parameters vector and $u = 1 - n$.

One additional advantage of using Rodrigues parameters for describing the orientation is that for small angles they are approximately proportional to the Euler angles, so similar linear approximation apply to them.

This way for the unit quaternions whose first element is positive (this is one half of all the unit quaternions, representing all possible rotations) we get Rodrigues parameters inside the unit sphere. The other half of the unit quaternions are mapped to the Rodrigues parameters outside the unit sphere, having counterparts (representing the same rotation) inside the unit sphere. This way the transition at the ±180° rotation boundary is smooth, but in case of large angles we are far from the linear approximation [8].

NAVIGATION SENSORS AND SENSOR FUSION

Navigation is based on data coming from various sensors. For some state variables there are direct measurements available. For example, the GPS sensor can measure the absolute position in the Earth frame. Some sensors measure in the body frame. For some other state variables there are no direct measurements, these states can only be obtained by derivation which may cause increased uncertainty or accumulation of errors.

In the following the advantages and disadvantages of different sensors are addressed.

Absolute measurement sensors

There are some sensors that can measure some of the state variables in our reference frame, that is the Earth frame. These measurements are sometimes called absolute measurements (opposing to relative or difference measurements, which measure the rate of change of some quantity).

The most commonly used absolute measurement is GPS position. It provides the absolute geographical position in the Earth frame. By differentiation we could get the velocity in the Earth frame, but due to the inaccuracy (the noise) of the position measurement, it would be practically useless. Most GPS receiver units provide an independent velocity measurement in the Earth frame based on the Doppler principle.

An other type of absolute measurement is the altitude measurement based on barometric pressure. Although the values must be corrected by the pressure measured on the reference

height, during the typical operation time window of an autonomous device the measurement can be regarded as an absolute altitude above the surface.

Inertial sensors

Inertial sensors are sensing the change of the object's state of motion. The two most commonly used inertial sensors are the accelerometer, and the angular velocity sensor (called gyroscope in this context). The third sensor widely used in conjunction with the previous two is a magnetic field sensor. Although it has nothing to do with the change of the object's state of motion, as a sensor it has very similar properties to true inertial sensors, and the three types of sensors are commonly used together for attaining the object's state of motion. A system composed of inertial sensors is sometimes called inertial measurement unit or IMU.

In a strapdown navigation system all of these sensors measure in the body frame. The measurements have some errors. The measured values are corrupted by noise and other sensor errors. The noise can be well considered as zero mean additive white Gaussian noise. The offset and scale error can theoretically be eliminated by calibration [9][10]. The problem here is that the error may change over time and temperature, so the calibration procedure must be repeated frequently.

Utilizing these measurements we can derive the attitude in several ways. By integrating the angular velocity over time from a starting orientation we may get the attitude. The inherent and inevitable problem here is that we also integrate the noise added to the measurement. By integrating a zero mean noise we get a random walk process. This problem can only be eliminated by some kind of absolute measurement.

The accelerometer measures both the specific force and the gravitational acceleration. If the body (the center of mass) does not accelerate we get the gravitational vector alone. Together with the Earth's magnetic vector measured by the magnetometer we may get an absolute measurement for the orientation.

On the other hand if the orientation is known the gravitational acceleration can be subtracted from the measured acceleration to get the acceleration of the center of mass. By integration we can get the linear velocity, and by one more integration we get the position. The same problem applies here as in the case of angular velocity and orientation: integrating the noise added to the measurement causes a random walk. Double integration makes the problem even more severe.

Sensor fusion problem

As we have seen previously all of the sensors have some errors. Not all of the state variables can be measured directly, but for most of the state variables we have several derivations, each having its own weaknesses and advantages. The method of taking different measurements and derived quantities for the same value and combining (averaging) them together is called sensor fusion.

In the case of a 6DoF system a special problem has to be overcome: some of the measurements are available in the Earth frame, some others are available in the body frame. Since these are measurements for the same principal value, they should be fusioned together. We must choose one of the two frames and transform the values that are given in the other. The transformation is the rotation representing the orientation, which is part of the state space itself. That is, we do

not know the exact value of the transformation, we only have the estimation of it. That is extremely problematic when the measurements (directly or indirectly) are used for the estimation of the orientation. The system could be underdetermined and may not converge. This situation must be detected and some change of the system model may be required based on the available measurements. In the sequel a possible solution for that problem is proposed.

THE KALMAN FILTER

Linear optimal estimation problem

The Kalman filter is the optimal solution for state space estimation of linear systems based on measurements corrupted by additive zero mean Gaussian white noise with known covariance. The filter is optimal in the sense of minimizing the mean square of the estimation error. The Kalman filter can be regarded as a special case of the least mean square method.

Instead of giving the exact derivation of the Kalman filter (which can be found in many good books, e.g. [9][12]) we just state the most common form. We restrict the description to the discrete time version.

Given a linear system with $\mathbf{x}(n)$ as the state vector and $\mathbf{u}(n)$ as the input vector for every n time instance:

$$\mathbf{x}(n+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(n) + \mathbf{B}\mathbf{u}(n) + \mathbf{w}(n). \tag{6}$$

Here the matrices $\mathbf{A}$ and $\mathbf{B}$ together represent the linear system of equations describing the state transition through the T_s sampling time interval. $\mathbf{w}(n)$ is the so-called process noise, representing all the effects and errors not exactly modeled by the system equations. We suppose that the process noise comes from many independent sources and these are small enough to be described by a set of independent zero mean normally distributed random variables with covariance matrix $\mathbf{Q}(n)$.

The outputs of the system are the quantities for which we have direct measurements, denoted by the vector $\mathbf{y}(n)$:

$$\mathbf{y}(n) = \mathbf{C}\mathbf{x}(n) + \mathbf{v}(n). \tag{7}$$

Here the matrix $\mathbf{C}$ represents a linear mapping (function) between the states and the measurements, and $\mathbf{v}(n)$ denotes to the noise of the measurement, described by a set of independent zero mean normal distribution random variables with covariance matrix $\mathbf{R}(n)$.

The exact value of $\mathbf{x}(n)$ is not known, it can only be estimated. Let us denote the latter by $\hat{\mathbf{x}}(n)$, which is a random variable itself with normal distribution. The expected value of $\hat{\mathbf{x}}(n)$ is $\mathbf{x}(n)$, and the covariance is denoted by $\mathbf{P}(n)$. This is the uncertainty we know about $\mathbf{x}(n)$.

The Kalman filter works in two steps. The first is called 'innovation', that is when the system equations are applied:

$$\mathbf{x}^{-} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}(n) + \mathbf{B}\mathbf{u}(n). \tag{8}$$

That is the expected value of the transformed state vector. From that we can make a prediction about the output values (the measurements):

$$\hat{\mathbf{y}}(n) = \mathbf{C}\mathbf{x}^{-}(n). \tag{9}$$

After performing the actual measurements we can make a difference between the prediction and the reality:

$$\mathbf{d}(n) = \mathbf{y}(n) - \hat{\mathbf{y}}(n). \tag{10}$$

Here comes the second step, the so-called 'correction':

$$\mathbf{x}^{+} = \mathbf{x}^{-} + \mathbf{K}_n\mathbf{d}(n). \tag{11}$$

This way we get an estimation of the state vector in the next time instance:

$$\hat{\mathbf{x}}(n+1) = \mathbf{x}^{+}. \tag{12}$$

The block diagram of the Kalman filter can be seen on Figure 3.

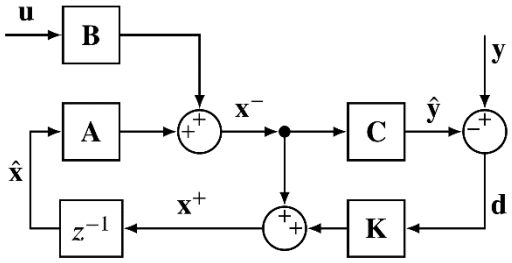


Figure 3. The Kalman filter

The $\mathbf{K}_n$ feedback matrix is calculated based on the covariance of the estimation and the measurement noise so that we get the new state estimation as a weighted average of the predicted and the measured values.

The covariance (uncertainty) of the state vector after the innovation is expressed as:

$$\mathbf{P}_n^{-} = \mathbf{A}\mathbf{P}_{n-1}\mathbf{A}^{\mathrm{T}} + \mathbf{Q}_n. \tag{13}$$

This is obtained by calculating the covariance of the transformation of a normal distribution random variable added to the process noise covariance.

$\mathbf{K}_n$ is calculated as:

$$\mathbf{K}_n = \mathbf{P}_n^{-}\mathbf{C}^{\mathrm{T}}\left(\mathbf{C}\mathbf{P}_n^{-}\mathbf{C}^{\mathrm{T}} + \mathbf{R}_n\right)^{-1} = \mathbf{P}_n^{+}\mathbf{C}^{\mathrm{T}}\mathbf{R}_n^{-1}. \tag{14}$$

Note that $\mathbf{K}_n$ depends only on the noise covariance matrices (**R** and **Q**) and the system matrices (**A** and **C**) and of course on $\mathbf{P}_0$. In a linear system it is independent of the actual measurement and the values of the state variables.

The covariance (uncertainty) of the state vector after the correction is expressed as:

$$\begin{aligned}\mathbf{P}_n = \mathbf{P}_n^{+} &= \left(\mathbf{I} - \mathbf{K}_n\mathbf{C}\right)\mathbf{P}_n^{-}\left(\mathbf{I} - \mathbf{K}_n\mathbf{C}\right)^{\mathrm{T}} + \mathbf{K}_n\mathbf{R}_n\mathbf{K}_n^{\mathrm{T}} \\ &= \left(\mathbf{P}_n^{-1} + \mathbf{C}^{\mathrm{T}}\mathbf{R}_n^{-1}\mathbf{C}\right)^{-1} = \left(\mathbf{I} - \mathbf{K}_n\mathbf{C}\right)\mathbf{P}_n^{-}.\end{aligned} \tag{15}$$

In the case of a linear system with time invariant (constant) noise covariance matrices the uncertainty matrix (**P**) and the feedback matrix (**K**) have a steady state value, the calculations in

equations (13)–(15) do not need to be performed in every time step. The steady state **K** can be precalculated and equations (8)–(12) applied in every time step.

Extended Kalman Filter

When the system is nonlinear we can use linear approximation and apply the Kalman filter on the latter. One way of doing so is the method of linearization about an operating point. We can calculate a different linear approximation based on the Jacobian method and use a different system matrix for every time instance.

This method is called extended Kalman filter (EKF). In this case there is no steady state value for the feedback matrix, the equations (8)–(15) must be calculated for every time step.

The linearization can be made by other methods too. One other method is called 'State Dependent Coefficients' (SDC) or 'State Dependent Riccati Equation' (SDRE). The nonlinear system equation

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) \tag{16}$$

is factorized into a state dependent coefficients form as:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x})\mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x})\mathbf{u}, \tag{17}$$

and the Kalman filter equations (8)–(15) are applied to the state dependent matrices.

The problem of factorization of the system equations is discussed in more detail in the accompanying paper [1].

Unscented Kalman Filter

In the Kalman filter the feedback matrix (**K**) is calculated using the covariance matrices by equation (14). The noise covariance matrices (**R** and **Q**) are considered given, but the state covariance matrix (**P**) is calculated based on the linear transformation of a normally distributed random variable.

In case of a nonlinear system there is no general formula for calculating the expected value and the covariance of the transformed random variable (furthermore the transformed random variable does not necessarily follow the normal distribution).

By approximating some way the transformed mean and covariance of the state variables ($\hat{\mathbf{x}}$) and the predicted output ($\hat{\mathbf{y}}$) and the crosscorrelation between these two we can calculate the feedback matrix.

This approximation for a random vector **x** with covariance **P** can be made by carefully choosing sigma points ($\mathbf{x}^{\sigma}$) around the vector **x** in a way that the mean of the sigma points gives the **x** and covariance of these sigma points gives **P** (

Figure 4). Then, by making the nonlinear transformation on all sigma points the mean and covariance of the transformed sigma points serve as an estimation of the transformed mean and covariance of the random variable **x**.

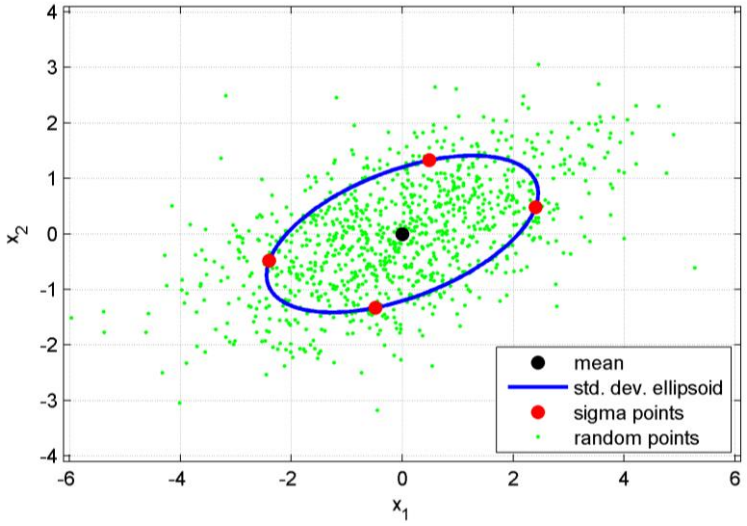


Figure 4. Generation of sigma points

The method is the following (denote the state vector by $\mathbf{x}(n)$, its dimension by N, its covariance by $\mathbf{P}_n$):

1. In each timestep n for the state vector $\mathbf{x}(n)$ choose $2N$ sigma points $\mathbf{x}_i^\sigma$ as:

$$\mathbf{x}_i^\sigma, \mathbf{x}_{N+i}^\sigma = \mathbf{x}_n \pm \boldsymbol{\sigma}_i, \quad i = 1 \dots N, \tag{18}$$

where $\boldsymbol{\sigma}_i$ is chosen as the rows of the $\sqrt{N\mathbf{P}_n}$ matrix. This way the statistics of the sigma points gives the statistics of the $\mathbf{x}(n)$ random variable.

2. For these sigma points apply the system equation. Denote the transoformed sigma points by $\mathbf{x}_i^{\sigma*}$. The mean of these transformed points will be the estimate for the new state vector:

$$\hat{\mathbf{x}}^- = \frac{1}{2N}\sum_{i=1}^{2N} \mathbf{x}_i^{\sigma*}, \tag{19}$$

and the covariance of the trasformed points is:

$$\hat{\mathbf{P}}^- = \frac{1}{2N}\sum_{i=1}^{2N} \left(\mathbf{x}_i^{\sigma*} - \hat{\mathbf{x}}^{\sigma-}\right)\left(\mathbf{x}_i^{\sigma*} - \hat{\mathbf{x}}^{\sigma-}\right)^{\mathrm{T}}. \tag{20}$$

Adding the covariance of the process noise ($\mathbf{Q}$) we get:

$$\mathbf{P}^- = \hat{\mathbf{P}}^- + \mathbf{Q}. \tag{21}$$

3. In order to estimate the output vector ($\hat{y}$) and its covariance create sigma points around $\hat{\mathbf{x}}^-$ with the help of $\mathbf{P}^-$. Apply the output equation on these sigma points and denote the result by $\mathbf{y}_i^\sigma$. The mean of these vectors will be the estimation $\hat{\mathbf{y}}$. Calcuate the covariance of the $\mathbf{y}_i^\sigma$ vectors ($\mathbf{P}_{yy}$) and the crosscorrelation with the $\mathbf{x}_i^{\sigma*}$ vectors:

$$\mathbf{P}_{yy} = \frac{1}{2N}\sum_{i=1}^{2N} \left(\mathbf{y}_i^\sigma - \hat{\mathbf{y}}\right)\left(\mathbf{y}_i^\sigma - \hat{\mathbf{y}}\right)^{\mathrm{T}}, \tag{22a}$$

$$\mathbf{P}_{xy} = \frac{1}{2N}\sum_{i=1}^{2N} \left(\mathbf{x}_i^{\sigma*} - \hat{\mathbf{x}}^{\sigma-}\right)\left(\mathbf{y}_i^\sigma - \hat{\mathbf{y}}\right)^{\mathrm{T}}. \tag{22b}$$

4. Calculate the feedback matrix as:

$$\mathbf{K}_n = \mathbf{P}_{xy} \cdot \mathbf{P}_{yy}^{-1}. \tag{23}$$

Calculate the estimator of the state vector and its covariance after correction:

$$\mathbf{x}_{n+1} = \hat{\mathbf{x}}^{+} = \mathbf{x}^{-} + \mathbf{K}_n \left(\mathbf{y}_n - \hat{\mathbf{y}}\right), \tag{24}$$

$$\mathbf{P}_{n+1} = \mathbf{P}^{+} = \mathbf{P}^{-} + \mathbf{K}_n \left(\mathbf{P}_{yy} + \mathbf{R}\right) \mathbf{K}_n^{\mathrm{T}}. \tag{25}$$

The blockdiagram of the whole process is depicted on Figure 5.

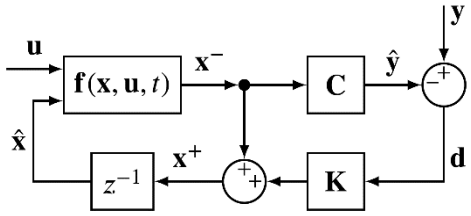


Figure 5. The Kalman filter with nonlinear system function

State space augmentation

The method above assumes that the process and measurement noises act in a linear manner (as additive white Gaussian noise) to the otherwise nonlinear system. Colored noise (not following Gaussian distribution and/or not being independent) can be handled as appropriately filtered white noise. The system equations and the state space can be extended by the filter equations and internal states.

In many practical cases there is no better assumption for the noises but the white Gaussian noise, but in the system equations the noises do not act in a linear way. This is a case for example when two state variables (both with their process noise added) are multiplied.

In this case the state space does not need to be truly extended, only the system equations are written as if the noise values would be incorporated into the state vector. Sigma points need to be generated around the zero noise vector and the system equations are applied to them. The statistics of the transformed $\mathbf{x}_i^{\sigma *}$ vectors yield the estimation $\hat{\mathbf{x}}^{-}$ and its covariance $\widehat{\mathbf{P}}^{-}$, but the $\mathbf{Q}$ matrix does not need to be added to $\widehat{\mathbf{P}}^{-}$ as it has already been taken into consideration in the augmentation procedure.

IMPLEMENTATION OF UKF

In this section the implementation choices for the Kalman filter are investigated. The implementation is based on the Unscented Kalman Filter algorithm with state space augmentation. For handling the gimbal lock problem a special state space choice is applied. For handling the severe nonlinearities arising during attitude measurement a virtual measurement procedure is defined.

State space choice

The state space must represent the state of motion of the vehicle including its three degrees of freedom translation and also its orientation and angular velocity. For the linear motion there are measurements available for the position and the acceleration, therefore the position, the velocity and the acceleration

should all be included in the state space. The estimation of the offset of the gyroscope sensor is also included in the hope of the successful compensation of this disturbing effect.

The proposed choice of state space is the following:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{r} \\ \boldsymbol{\beta}^{(\mathrm{B})} \\ \boldsymbol{\omega}^{(\mathrm{B})} \\ \mathbf{a}^{(\mathrm{B})} \\ \mathbf{v}^{(\mathrm{E})} \\ \mathbf{p}^{(\mathrm{E})} \end{bmatrix}, \tag{26}$$

where **p**, **v** and **a** are the position, velocity and acceleration vectors, **ω** is the angular velocity vector and **β** is its estimated offset, **r** is the Rodrigues parameter triplet, while the upper index $^{(\mathrm{B})}$ or $^{(\mathrm{E})}$ means that the quantity is represented in the body or the Earth frame, respectively.

The Rodrigues parameters vector is a minimal representation of the orientation behaving nicely for small angles but as discussed in the navigation sensors section it has discontinuity, therefore it is not applicable for representing arbitrary angles. The quaternion representation is free from discontinuities but it is a redundant representation resulting in a singular covariance matrix which causes numerical difficulties. The absolute orientation is chosen to be stored in a separate quaternion **q** while the Rodrigues parameters representing the difference to the quaternion (delta Rodrigues parameters) are stored in state space. The covariance matrix (**P**) is updated based on the Rodrigues parameters.

The system equations for the integration step are written using quaternions. The delta Rodrigues parameters for each sigma point are converted to delta quaternions ($\delta\mathbf{q}_i$) using formula (4) and multiplied by the stored quaternion:

$$\mathbf{q}_0 = \mathbf{q}^+ \tag{27a}$$

$$\mathbf{q}_i = \delta\mathbf{q}_i \otimes \mathbf{q}^+, \tag{27b}$$

where $\mathbf{q}^+$ is from the previous step and $\otimes$ denotes to quaternion multiplication.

The integration is as follows:

$$\mathbf{q}_i^{\mathrm{tr}} = \mathbf{q}_i + \frac{1}{2} T_{\mathrm{s}} \cdot \boldsymbol{\Xi}_i \boldsymbol{\omega}, \tag{28}$$

where

$$\boldsymbol{\Xi} = \begin{bmatrix} -q_1 & -q_2 & -q_3 \\ q_0 & -q_3 & q_2 \\ q_3 & q_0 & -q_1 \\ -q_2 & q_1 & q_0 \end{bmatrix}. \tag{29}$$

From the transformed quaternions we compute the transformed delta qutaternions:

$$\delta q_i^{\mathrm{tr}} = q_i^{\mathrm{tr}} \otimes \overline{q_0^{\mathrm{tr}}}, \tag{30}$$

and finally the transformed delta quaternions are converted to transformed delta Rodrigues parameters.

The other state variables are integrated as usual:

$$\boldsymbol{\beta}^{(\mathrm{B})\mathrm{tr}} = \boldsymbol{\beta}^{(\mathrm{B})}, \tag{31a}$$

$$\boldsymbol{\omega}^{(\mathrm{B})\mathrm{tr}} = \boldsymbol{\omega}^{(\mathrm{B})}, \tag{31b}$$

$$\mathbf{a}^{(\mathrm{B})\mathrm{tr}} = \mathbf{a}^{(\mathrm{B})}, \tag{31c}$$

$$\mathbf{v}^{(\mathrm{E})\mathrm{tr}} = \mathbf{v}^{(\mathrm{E})} + T_\mathrm{s}\mathbf{a}^{(\mathrm{E})}, \tag{31d}$$

$$\mathbf{p}^{(\mathrm{E})\mathrm{tr}} = \mathbf{p}^{(\mathrm{E})} + T_\mathrm{s}\mathbf{v}^{(\mathrm{E})} + \tfrac{1}{2}T_\mathrm{s}^2\mathbf{a}^{(\mathrm{E})}. \tag{31e}$$

The statistics for the covariance matrix **P** is calculated from the state vector containing the delta Rodrigues parameters according to the rules presented in the previous section.

The output equation is the following:

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \mathbf{r} \\ \boldsymbol{\omega}^{*(\mathrm{B})} \\ \mathbf{a}^{*(\mathrm{B})} \\ \mathbf{p}^{(\mathrm{E})} \end{bmatrix}, \tag{32}$$

where $\mathbf{a}^{*(B)}$ and $\boldsymbol{\omega}^{*(B)}$ are formed to be directly comparable to the measurable values:

$$\mathbf{a}^{*(\mathrm{B})} = \mathbf{a}^{(\mathrm{B})} + \mathbf{g}^{(\mathrm{B})}, \tag{33a}$$

$$\boldsymbol{\omega}^{*(\mathrm{B})} = \boldsymbol{\omega}^{(\mathrm{B})} + \boldsymbol{\beta}, \tag{33b}$$

where **g** denotes to the gravitational acceleration.

The **r** Rodrigues vector is not directly measurable, but a virtual measurement is defined for the attitude measurement based on vector measurements. This virtual measurement is discussed in detail in the following subsection. After the correction step the stored quaternion ($\mathbf{q}^+$ in the previous step) is updated by the delta Rodrigues parameters resulting in the new $\mathbf{q}^+$.

Virtual attitude measurements

In many navigation applications, the attitude determination is based on vector or direction observations. In the case of small UAVs, these reference directions are usually the Earth's magnetic field vector and the gravity vector. Measuring the known reference vectors in the airplane-fixed body frame the orientation of the airplane can be estimated. Almost all attitude determination algorithms using vector observations are based on the minimization of the loss function:

$$L(\mathbf{A}) = \frac{1}{2}\sum_i a_i \left|\mathbf{b}_i - \mathbf{A}\mathbf{r}_i\right|^2 \tag{34}$$

or in alternative form:

$$L(\mathbf{A}) = \sum_i {a_i}^2 - \mathrm{tr}(\mathbf{A}\mathbf{B}^\mathrm{T}), \quad \text{where} \quad \mathbf{B} = \sum_i a_i \mathbf{b}_i \mathbf{r}_i^\mathrm{T}, \tag{35}$$

proposed by G. Wahba [13]. In equation (34) and (35) $\mathbf{b}_i$ denotes a set of unit vectors measured in the body frame, $\mathbf{r}_i$ are the corresponding unit vectors in a reference frame, and a_i are non-negative weights. The problem is to find the orthogonal matrix **A** that minimizes the above loss function. There are several different algorithms to find **A**, but they have different robustness, speed and accuracy properties. The most robust yet computationally most intensive algorithm is based on the singular value decomposition of **B**:

$$\mathbf{B} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^{\mathrm{T}} = \mathbf{U}\,\langle \Sigma_{11}, \Sigma_{22}, \Sigma_{33} \rangle\,\mathbf{V}^{\mathrm{T}}, \tag{36}$$

where **U** and **V** are orthogonal matrices and the singular values obey the inequalities $\sum_{11} \geq \sum_{22} \geq \sum_{33} \geq 0$. The optimal orientation defined by the optimal rotation matrix can be calculated as [14]:

$$\mathbf{A}_{\mathrm{opt}} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^{\mathrm{T}} = \mathbf{U}\,\langle 1, \quad 1, \quad \det(\mathbf{U}) \cdot \det(\mathbf{V}) \rangle\,\mathbf{V}^{\mathrm{T}}. \tag{37}$$

This rotation matrix can be converted to the orientation representation used in the state space.

Switching between models

In a real environment special conditions can occur that must be handled properly. The robustness of the system means that it can react and behave properly in cases outside the normal operating conditions.

In our system the position and attitude estimation is based both on the GPS and IMU sensors. The interaction between the GPS and the IMU sensors is twofold:

1. The GSP sensor produces measurement data less frequently than the IMU. In the cycles between two GPS sensor measurement the position data is updated by integration of the acceleration estimate.
2. The gravity vector measurement is based on the accelerometer sensor by subtracting the linear acceleration, which is corrected by the position data from the GPS sensor.

The GPS signal is sometimes lost due to various disturbances. The navigation system must be prepared to be able to work without GSP data. In our system this case is handled by switching to a reduced system model whenever the position estimate becomes uncertain. The problems that arise in case of GPS signal outages:

1. The acceleration data obtained by the accelerometer sensor is not corrected by the GPS position data become uncertain, which causes instability in the gravity vector measurement.
2. Large uncertainty values in the **P** covariance matrix can cause numerical instabilities at the matrix square root calculation during the generation of sigma points.

In the reduced model the following simplifications apply:

1. The accelerometer is assumed to be measuring solely the $\mathbf{g}^{(B)}$ vector. This approximation is correct when the linear acceleration of the center of mass is small enough ($|\mathbf{a}| \ll |\mathbf{g}|$).
2. In the **P** covariance matrix the values belonging to the $\mathbf{v}^{(E)}$ velocity and the $\mathbf{p}^{(E)}$ position vectors are not updated but kept constantly equal to the initial $\mathbf{P}_0$ values. These $\mathbf{P}_0$ values are large enough to allow fast convergence should the GPS data become available again, but at the same time small enough to guarantee numerical stability.

3. All the feedback from the position data is disabled by zeroing the columns of the $\mathbf{K}_n$ matrix belonging to the position measurement.

Matlab simulation and embedded implementation in C

For the quantitative analysis of the proposed algorithm a Matlab simulation model is created. The input of the simulation is the ideal measurement data corrupted by artificial noise and other errors. The input data can be created by different sources. For simple cases a Simulink model of the 6DoF rigid body is used. For a more realistic case the mathematical model of a real life UAV and the airplane simulation method introduced in [15] are utilized. Finally, the same Matlab model is used to test the algorithm on collected real sensor readings. The Matlab code is created using only basic linear algebraic operations (no special toolbox is used) in order to facilitate the translation to C code.

The goal is to create a realtime application running on an embedded ARM processor under Linux operating system. The performance of the system depends highly on the efficient implementation of the linear algebraic operations. Some of the latter are quite complicated, like the Householder transformation or the QR decomposition. For this matter the LAPACK library [16] is utilized. The C version of the algorithm is created in such manner that the Matlab input data can also be used for its testing. The estimation data produced by the C algorithm can be imported into Matlab and the results can easily be compared. Finally, the implementation is tested realtime, fed by real sensor data, and both the raw measurements and the estimation data are saved for later analysis in Matlab.

CASE STUDIES

In the sequel, we demonstrate the capabilities of the implemented UKF algorithm by means of simulated measurement data. The preprocessing (input data file generation) and the postprocessing (output data visualization) were carried out using Matlab.

The case study presented here simulates forces and moments acting on a 6DoF rigid body. Let us suppose there are inertial sensors and GPS fixed to the center of mass of the simulated body. The motion of the body and the ideal (noiseless and errorless) measurement readings were simulated in Simulink. Artificial band limited white Gaussian noise and other errors were added to the ideal measurements according to the datasheet parameters of real sensors used in our experimental system.

Loss of GPS signal

In the following the behavior of the presented implementation will be investigated in the case of GPS signal loss. The sampling time of the algorithm and the inertial sensors is $T_S^{\mathrm{IMU}} = 0.01\mathrm{s}$ while the sampling time of the GPS measurements is $T_S^{\mathrm{GPS}} = 0.1$ s. The simulation time interval is $T_{\mathrm{sim}} = 200$ s. During the simulation GPS outages were assumed in the time intervals $20\ \mathrm{s} < t \leq 60\ \mathrm{s}$ and $100\ \mathrm{s} < t \leq 160\ \mathrm{s}$.

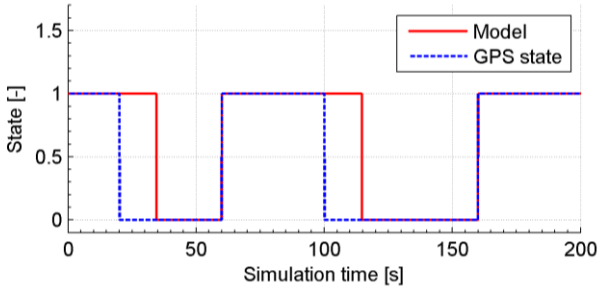


Figure 6. Model switch and GPS outages

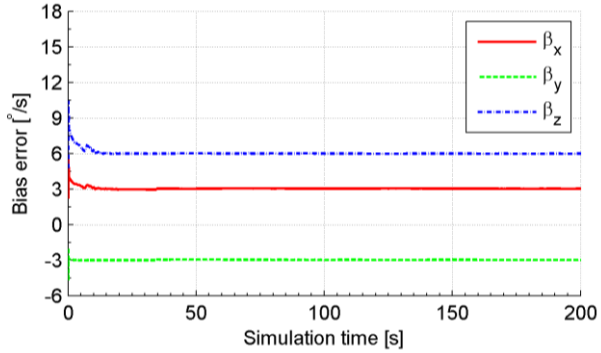


Figure 7. Gyroscope bias estimation

In Figure 6 the system model switch and GPS signal outages can be seen. The value 1 means normal system model and strong GPS signal, while the value 0 means reduced system model and GPS outages, respectively. Selecting an appropriate value for the maximal acceptable position covariance in $\mathbf{P}_{\max}$ the normal system model double integrating the acceleration can provide usable position information up to 13 s after GPS outage. Selecting an appropriate value for the minimal acceptable position covariance in $P_{\min}$ an instant system model switch (in a single sampling interval) can be achieved when GPS measurement becomes available again.

In the simulation the modeled gyroscope measurement data is corrupted by noise and bias error. The knowledge or the proper estimation of the bias term is crucial in attitude estimation. The bias term is set to $[\beta_x\ \beta_y\ \beta_z]^{\mathrm{T}} = [+3 \quad -3 \quad +6]^{\mathrm{T}}$ °/s. As can be seen in Figure 7 the bias converges fast (in couple of seconds) to the correct value. The GPS outages do not affect the bias estimation process.

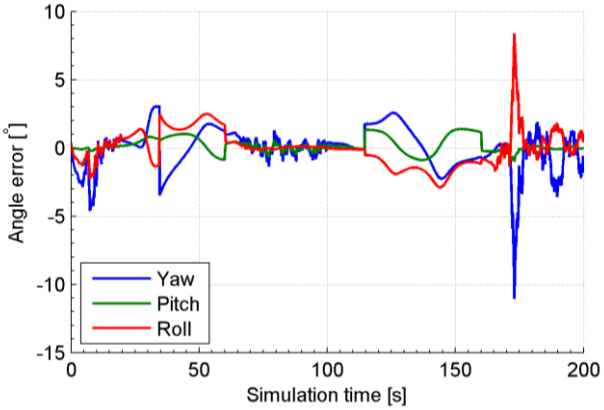


Figure 8. Orientation estimation error in Euler angles

In Figure 8 the error of the orientation estimation can be seen. During GPS outages the error variation is smoother yet higher. At $t \approx 170$ s a high Euler angle error can be observed, but it is a false error signal due to the gimbal lock effect. The variance of the Euler angle error calculated in the simulation time interval is

$$\boldsymbol{\sigma}_{\text{Euler}}^{\text{norm}} = \begin{bmatrix} \sigma_\psi & \sigma_\theta & \sigma_\phi \end{bmatrix}^{\text{T}} = \begin{bmatrix} 1.56° & 0.27° & 1.03° \end{bmatrix}^{\text{T}} \tag{38a}$$

$$\boldsymbol{\sigma}_{\text{Euler}}^{\text{redu}} = \begin{bmatrix} \sigma_\psi & \sigma_\theta & \sigma_\phi \end{bmatrix}^{\text{T}} = \begin{bmatrix} 1.61° & 0.92° & 1.74° \end{bmatrix}^{\text{T}}, \tag{38b}$$

where $\boldsymbol{\sigma}_{\text{Euler}}^{\text{norm}}$ and $\boldsymbol{\sigma}_{\text{Euler}}^{\text{redu}}$ are variances belonging to the normal and reduced system models respectively. The simulation results show the GPS measurement based correction has a significant influence on the orientation estimation when the body is subject to a long-term acceleration. However, in the present simulation the attitude estimation error remained in an acceptable range even in the case of the reduced system model.

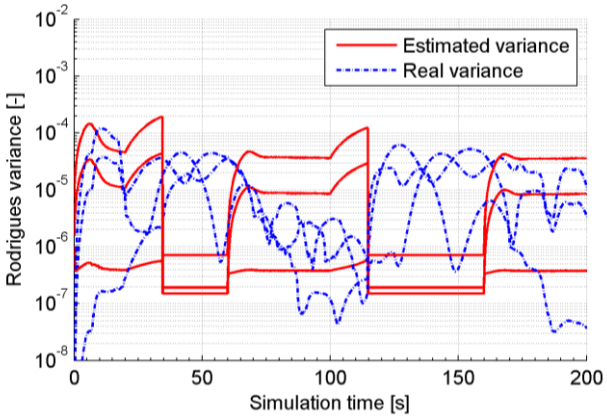


Figure 9. Time function of the variation of the Rodigues parameters

Beside the state estimation, the Kalman filter also provides an estimation of the covariance matrix of the state variables. In Figure 9 the time function of the diagonal elements of the covariance matrix can be seen corresponding to the Rodrigues parameters. To enhance the visibility a sliding window averaging filter is applied. The results show that the estimated and real variances are close using the normal system model; however, in case of the reduced system model the estimated variances are lower than the real ones.

As can be seen in Figure 10 the position estimation in the x–y plane starting from the $(x, y, z) = (0, 0, 0)$ point is close to the ideal trajectory. However, the error of the position estimation is continuously increasing during GPS outages. The error of the position estimation from the ideal trajectory can be characterized by the calculated variances:

$$\boldsymbol{\sigma}_{\text{pos}}^{\text{norm}} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \sigma_y & \sigma_z \end{bmatrix}^{\text{T}} = \begin{bmatrix} 1.85\,\text{m} & 2.45\,\text{m} & 2.86\,\text{m} \end{bmatrix}^{\text{T}} \tag{39a}$$

$$\boldsymbol{\sigma}_{\text{pos}}^{\text{redu}} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \sigma_y & \sigma_z \end{bmatrix}^{\text{T}} = \begin{bmatrix} 106.0\,\text{m} & 51.64\,\text{m} & 13.41\,\text{m} \end{bmatrix}^{\text{T}}. \tag{39b}$$

In the absence of GPS measurements, the variance of the position estimation with the reduced system model is clearly unusable. It should be noted that this situation is identified based on the operating mode of the filter and the end user can be notified.

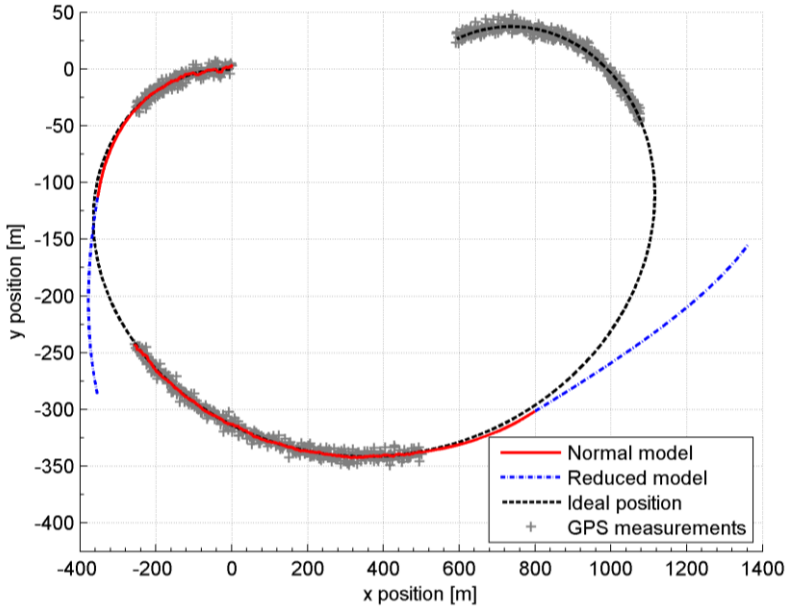
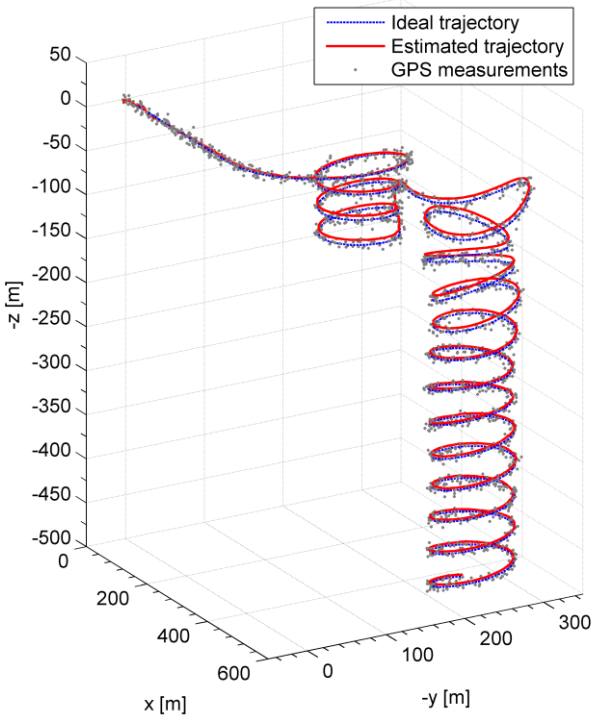


Figure 10. Position estimation using normal and reduced models

Airplane in a descending spin

It is a hard task to estimate the state of an airplane when it is exposed to large accelerations and angular velocities during aggressive maneuvers. To demonstrate the capabilities of the proposed state estimation algorithm, sensor (gyroscope, accelerometer, magnetometer and GPS) measurement readings of a spinning UAV were simulated using the mathematical model of a real life UAV and the airplane simulation method introduced in [15].



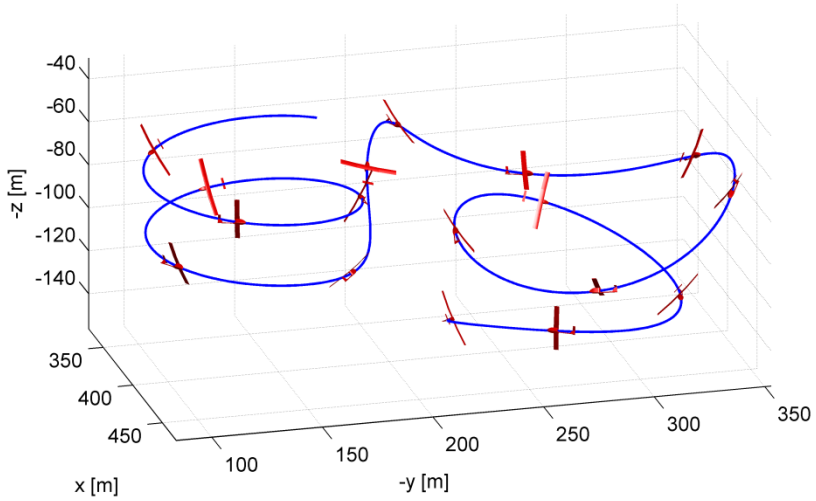


Figure 11. Position measurement and estimation (top) and a part of the simulated trajectory (bottom)

As seen in Figure 11 after a short straight flight, the plane was driven into a descending spin. Beside the gravity vector the onboard accelerometer measurement is also affected by the acceleration of the plane. The difficulty of the orientation estimation arises when the acceleration of the airplane is comparable to the gravity vector that is the case in the simulation results presented in Figure 12. The part of the trajectory where the largest accelerations occur is illustrated on the bottom panel of Figure 11. As can be seen on Figure 12 the estimation of the acceleration is quite accurate.

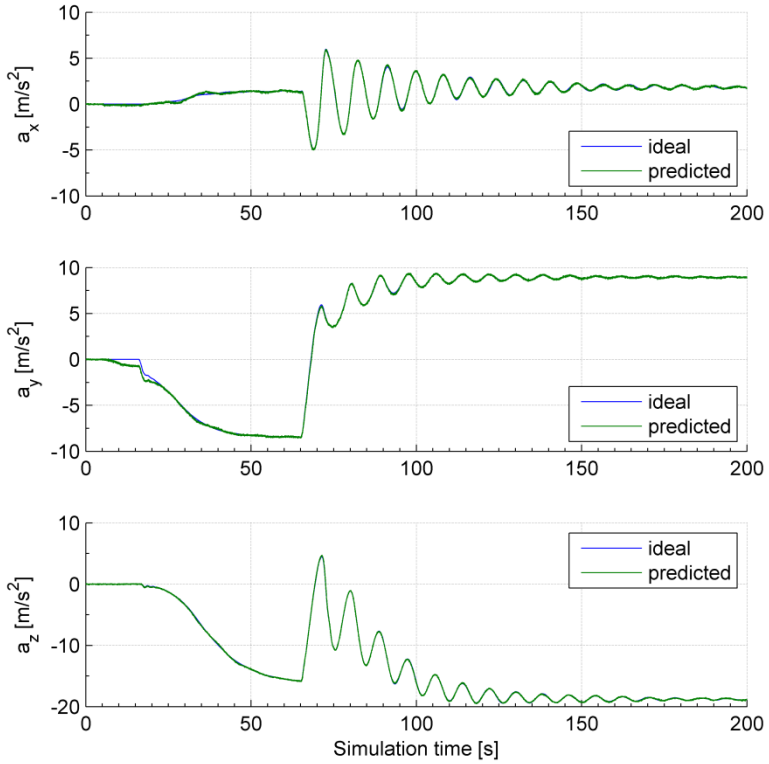


Figure 12. The acceleration during simulation

Theoretically, in order to acquire the gravity vector for the virtual measurement of the orientation the accelerometer readings are corrected by the GPS measurement. This correction is incorporated into our UKF implementation. As can be seen in Figure 13 the proposed state estimation algorithm can estimate the orientation of the UAV with acceptable error. The largest attitude estimation errors observable in the first interval of the simulation are due to the initial converging state of the filter.

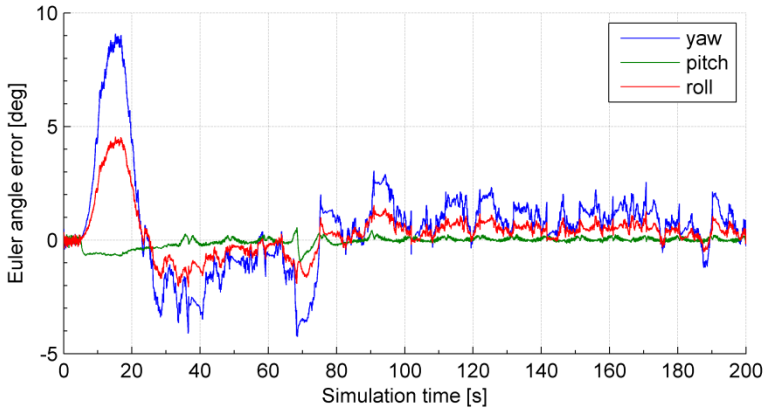


Figure 13. The orientatin error

The variance of the Euler angle, the acceleration, the velocity and the position estimation errors calculated in the simulation time interval are:

$$\boldsymbol{\sigma}_{\text{pos}} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \sigma_y & \sigma_z \end{bmatrix}^{\text{T}} = \begin{bmatrix} 1.26\,\text{m} & 1.42\,\text{m} & 3.87\,\text{m} \end{bmatrix}^{\text{T}} \tag{40a}$$

$$\boldsymbol{\sigma}_{\text{vel}} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \sigma_y & \sigma_z \end{bmatrix}^{\text{T}} = \begin{bmatrix} 0.52\,\text{m/s} & 0.81\,\text{m/s} & 0.50\,\text{m/s} \end{bmatrix}^{\text{T}} \tag{40b}$$

$$\boldsymbol{\sigma}_{\text{acc}} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \sigma_y & \sigma_z \end{bmatrix}^{\text{T}} = \begin{bmatrix} 0.095\,\text{m/s}^2 & 0.17\,\text{m/s}^2 & 0.081\,\text{m/s}^2 \end{bmatrix}^{\text{T}} \tag{40c}$$

$$\boldsymbol{\sigma}_{\text{Euler}} = \begin{bmatrix} \sigma_\psi & \sigma_\theta & \sigma_\phi \end{bmatrix}^{\text{T}} = \begin{bmatrix} 2.23° & 0.23° & 1.10° \end{bmatrix}^{\text{T}}. \tag{40d}$$

Performance of the implementation

The execution time of our algorithm was 15 s in a today's average PC meaning 7.5% CPU load in a real time implementation. In contrast, the execution time was 60 s in our embedded experimental system meaning 30% CPU load of a single core of the four core system with real time measurements. Based on these results it can be stated that this highly complicated sensor fusion algorithm can be used in practice on a relatively small and cheap embedded system.

CONCLUSIONS AND OUTLOOK

In this paper the task of state estimation of unmanned aerial vehicles was discussed. The nonlinear behavior of the orientation description was introduced and the advantages and drawbacks of various possible attitude representations were discussed. After surveying the properties of some navigation sensors the Kalman filter and some of its nonlinear extensions were presented. A possible solution of the problem based on the Unscented Kalman Filter algorithm was presen-

ted. A Matlab simulation and a C implementation of the proposed algorithm were also discussed. The implementation utilizes the LAPACK library and runs effectively in an embedded onboard computer with ARM processor and Linux operating system. Several scenarios were tested during the study, including the outage of the GPS signal, the elimination of the gyroscope offset and the effect of severe accelerations during aggressive maneuvers. The results presented in the case studies section of the paper indicate that the proposed sensor fusion algorithm could also be applied in real-life UAV flight scenarios.

There are several aspects of the implementation that could benefit from further study. The effect of magnetic anomalies corrupting the measurements of the magnetic sensor is out of the scope of this paper. However, these anomalies inevitably occur in real environments. Such distortions can be caused by either soft and hard iron part of the vehicles or the currents running in the vicinity of the sensors. Such anomalies must be eliminated or at least reduced in a successful application by means of a sophisticated calibration procedure. Another possibility for further development is optimizing the computational effort of the algorithm. Although it was shown that the computational power of such an embedded system is capable of running the implementation, further optimization of the algorithm can speed up the execution time providing safety and offloaded CPU.

ACKNOWLEDGEMENT

The Hungarian government, in the form of a KMR_12-1-2012-0121 Research and Developement Project, named “AMORES” (Autonomous Mobile Remote Sensing), supported the research presented in this paper. The authors gratefully acknowledge this financial support.

LITERATURE

[1] P. RUCZ, Z. BELSŐ, B. GÁTI, I. KOLLER, A. TURÓCZI: Design and implementation of nonlinear control systems for rotary and fixed wing UAVs, submitted for publication into the same volume
[2] S. H. STOVALL: Basic Inertial Navigation, Naval Air Warfare Center Weapons Division, 1997. (Online) url: http://www.globalsecurity.org/space/library/report/1997/basicnav.pdf (2015.11.27)
[3] C.-P. FRITZEN: Machine dynamics and system dynamics, 2014. (Online) url: http://www.mb.uni-siegen.de/imr3/lehre/dynamics/skript_2014/md_script_ss2014.pdf (2015.11.27)
[4] H. K. KHALIL: Nonlinear systems. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, third edition edition, 2001.
[5] A. ISIDORI: Nonlinear control systems, Volume I. Springer-Verlag, London, third edition edition, 1995.
[6] Y.-B. JIA: Quaternions and rotations: Problem solving techniques for applied computer science, 2013. Lecturer Notes. (Online) url: http://web.cs.iastate.edu/~cs577/handouts/quaternion.pdf (2015.11.27)
[7] N. TRAWNY, S. I. ROUMELIOTIS: Indirect Kalman filter for 3D attitude estimation: A tutorial for quaternion algebra. Technical Report 2005-002, Rev. 57, University of Minnesota, March 2005. (Online) url: http://www-users.cs.umn.edu/~trawny/Publications/Quaternions_3D.pdf (2015.11.27)
[8] H. SCHAUB, J. L. JUNKINS: Stereographic orientation parameters for attitude dynamics: A generalization of the Rodrigues parameters. Journal of Astronautical Sciences, 44(1):1–19, 1996.
[9] D. GEBRE-EGZIABHER, G. H. ELKAIMY, J. D. POWELLZ, B. W. PARKINSONX: A non-linear, two-step estimation algorithm for calibrating solid-state strapdown magnetometers. Department of Aeronautics and Astronautics, Stanford University. (Online) url: http://waas.stanford.edu/papers/Gebre_ICINS_2001_ins201.pdf (2015.11.27)
[10] S. Bonnet, C. Bassompierre, C. Godin, S. Lesecq, A. Barraud: Calibration methods for inertial and magnetic sensors. Sensors and Actuators A 156 (2009) 302–311. url: http://www-ist.cea.fr/publicea/exl-doc/200900000986.pdf (2015.11.27)

[11] P. S. MAYBECK: Stochastic models, estimation and control: Volume 1. Academic Press, 1982.
[12] D. SIMON: Optimal state esimation. Wiley & Sons, 2006.
[13] WAHBA, GRACE: A Least Squares Estimate of Spacecraft Attitude, SIAM Review, Vol. 7, No. 3, July 1965, p. 409.
[14] F. L. MARKLEY, D. MORTARI: How to estimate attitude from vector observations. In AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference, Girdwood, Alaska, August 1999.
[15] T. GAUSZ, B. GÁTI. Merevszárnyú és többrotoros légi eszközök modellje precíziós repülési feladatok szimulációjához, 2013. AMORES projekt, kutatási jelentés.
[16] NETLIB Repository at UTK and ORNL. (online) url: http://netlib.org/ (2015.11.27)

NEMLINEÁRIS ÁLLAPOTBECSLŐ TERVEZÉSE ROBOTREPÜLŐGÉPEK NAVIGÁCIÓJÁHOZ

Jelen cikk célja egy új módszer bemutatása robotrepülőgépek nemlineáris fedélzeti állapotbecslő rendszerének tervezéséhez és megalósításához. A feladat magában foglalja különböző navigációs szenzorokból származó mérési adatok gyűjtését és a rendszer dinamikája valamint a gyűjtött mérési adatok alapján a rendszer mozgásállapotát leíró értékek becslését. Ilyen szenzorfúziós feladat megoldására lineáris rendszerek esetében a széleskörben elterjedt megoldás a Kálmán-szűrő alkalmazása. Mivel a kiterjedt merev testek dinamikai leírása eredendően nemlineáris, a Kálmán-szűrő nemlineáris kiterjesztésére van szükség. Az általunk javasolt módszer az úgynevezett Unscented Kalman Filter (UKF) technikán alapul. Az orientáció leírására kvaterniók és Rodrigues-paraméterek egyidejű használatát javasoljuk. A kifejlesztett módszert MATLAB-ban teszteltük, majd egy, a fedélzeti beágyazott környezetben futó C kódú implementációt készítettünk. A módszer alkalmazásának lehetőségeit a cikkben példákkal is szemléltetjük.

Kulcsszavak: *UAV, szenzorfúzió, Unscented Kalman Filter (UKF), kvaternió, Rodrigues-paraméterek*

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_3/2015-3-19-0241_Belso_Z_et_al.pdf

Péter Rucz, Zoltán Belső, Balázs Gáti, István Koller, Antal Turóczi

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF NONLINEAR CONTROL SYSTEMS FOR ROTARY AND FIXED WING UAVS

The aim of this paper is to present a novel approach for the design and implementation of onboard nonlinear control systems for different types of unmanned air vehicles. The essential difficulty of creating such controllers is the inherent nonlinearity of the dynamics of the system, which also introduces a great complexity. Our proposed approach relies on an automatic state dependent coefficient (SDC) factorization procedure, which is capable of handling the dynamic equations of the system on a symbolic level. The resulting linearized system representation is solved by the state dependent Riccati equation (SDRE) method. The applicability of the proposed methodology is demonstrated in this paper by means of various examples.

***Keywords**: UAV, nonlinear controller, automatic SDC factorization, state dependent Riccati equation (SDRE)*

INTRODUCTION

In unmanned air vehicles (UAVs) all flight maneuvers are carried out by a robot pilot that controls the aircraft. This means that all the delicate tasks which are performed by skilled pilots in case of ordinary aircrafts have to be handled by a computer program, i.e., the autopilot. The autopilot has to be capable of estimating the expected motion of the vehicle and must be able to produce the control signals for executing the flight plan. These tasks are performed by different computational units in the autopilot whose common structure is depicted in Figure 1.

The sensor fusion unit collects data from the navigational sensors and estimates the orientation and state of motion of the vehicle. The estimated state vector is denoted by $\hat{\mathbf{x}}$. The guidance algorithm compares the actual path of the aircraft with the flight plan and issues commands for correcting the deviations from the desired path. The commands of the guidance unit can also be interpreted as a reference state vector denoted hereafter by $\mathbf{x}_{\text{ref}}$. Finally, the control unit calculates the necessary actions and creates the control signals for the actuators based on the estimated and reference state vectors. When built into the UAV, the three units form a closed control loop together with the sensors and actuators of the aircraft. This paper, however, focuses only on the control unit in the sequel. The state estimation is discussed in more detail in the accompanying paper [1]. A possible solution to the guidance problem is addressed later in the present paper.

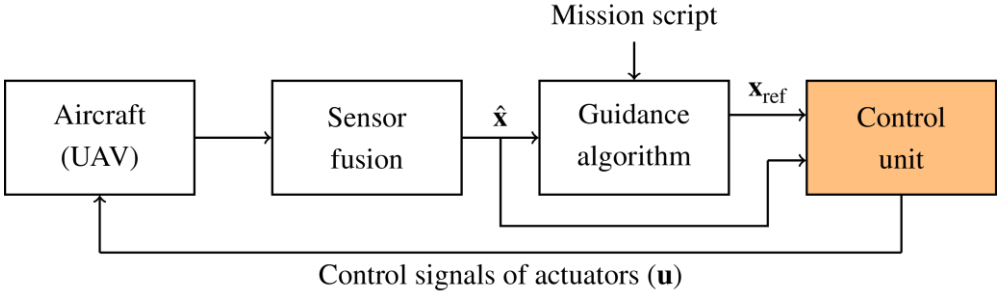


Figure 1. Common structure of a UAV autopilot

To produce the appropriate control signals **u** the control unit of the autopilot must be aware of the dynamics of the aircraft. Moreover, to arrive at a safe and robust flight control, the autopilot has to be able to mitigate the effects of unexpected disturbances such as gusts of wind. Additionally, an efficient control algorithm should produce control signals that are affordable in cost, i.e. ones that do not consume large amounts of energy from the battery. Unfortunately, these criteria are not straightforward to satisfy at once due to the complexity of the system. The main source of this complexity is the nonlinear nature of the problem at hand: both the dynamics of the aircraft (i.e. the partial differential equations relating the state variables) and the connections between the control signals and the resulting forces and moments acting on the vehicle are inherently nonlinear. Contrary to the case of linear systems there are no general methods for designing optimal controllers for systems with nonlinear dynamics. In general, the solution to the nonlinear problem is sought by linearization for which different approaches can be applied. [2][3]

In this paper we introduce a novel approach for developing and implementing nonlinear control systems for different types of UAVs. The proposed technique relies on the state dependent Riccati equation (SDRE) method [4][5] and an automatic factorization approach. This method is beneficial regarding the following aspects. First, the automatic symbolic factorization enables the generation of the system matrices directly from the partial differential equations (PDEs) and ensures that each term is represented correctly in the factorized system. Second, it is straightforward to generate low level computer code from the factorized output. The generated codes can directly be uploaded to the onboard navigational computer. We show by means of hardware-in-the-loop simulations that the proposed approach can efficiently be applied for implementing nonlinear control systems for rotary and fixed wing UAVs.

The subsequent sections of the paper are structured as follows. The next chapter briefly introduces the theory of optimal control systems and discusses the optimal solution of the linear problem and its state dependent version. The automatic factorization method and its implementation are introduced next. Then, the applications of the established nonlinear control method are demonstrated by an academic and two real-life examples. Finally, the paper is concluded by a brief summary and outlook on further research possibilities.

OPTIMAL CONTROL

In this section the mathematical model of a general nonlinear controller is introduced. Then, optimal control is discussed briefly and the special case of linear quadratic regulators (LQR) is addressed. Finally, the state dependent Riccati equation is considered.

A dynamic system can generally be described by its state and output equations which read in their common form as

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t), \tag{1}$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t). \tag{2}$$

Hereafter **x** is the state vector, **u** denotes the input vector of the system, both depending on the time variable t. Differentiation with respect to time is denoted by the upper dot. The vector **y**

is the so-called output vector containing the measurable outputs of the system. In the most general case, both functions **f** and **g** can depend on the time variable. The state equation (1) is a general system of nonlinear differential equations in which all relations can depend on the actual state vector and the input vector.

In a state control system the objective is to generate a control signal $\mathbf{u}(t)$ that makes the state vector converge to a given reference state $\mathbf{x}_{\mathrm{ref}}$. This objective is arrived at by introducing a feedback mechanism that relates the control signal $\mathbf{u}(t)$ with the error vector $\mathbf{x}_{\mathrm{e}} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_{\mathrm{ref}}$.

Optimal control solves the feedback problem by minimizing a predefined cost functional, denoted by $J(\mathbf{u})$ here:

$$J(\mathbf{u}) = p\left(t_c, \mathbf{x}(t_c)\right) + q \int_{t_0}^{t_c} h\left(t, \mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)\right)\, \mathrm{d}t. \tag{3}$$

The control is assumed to be limited to the time interval $t \in [t_0, t_c]$. The cost functional defines the penalty for the deviation of the state vector $\mathbf{x}(t)$ from the reference state by integrating it together with the control signal $\mathbf{u}(t)$ weighted by the functions h and p and the scalar q. Formally, the optimal control signal $\mathbf{u}_{\mathrm{opt}}(t)$ is the one that minimizes the functional $J(\mathbf{u})$:

$$\mathbf{u}_{\mathrm{opt}} = \arg\min_{\mathbf{u}} \{J(\mathbf{u})\}. \tag{4}$$

The special case of a linear, time invariant dynamic system for which the state and output equations read as

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}x + \mathbf{B}\mathbf{u}, \tag{5}$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u} \tag{6}$$

and the cost functional is quadratic is referred to as the linear quadratic regulator (LQR) problem. The LQR problem is of special interest since this is the only case where a general optimal control can be found in closed form [6]. Figure 2 shows the control loop of the linear system. As it is seen the feedback is introduced by means of the feedback matrix **K**.

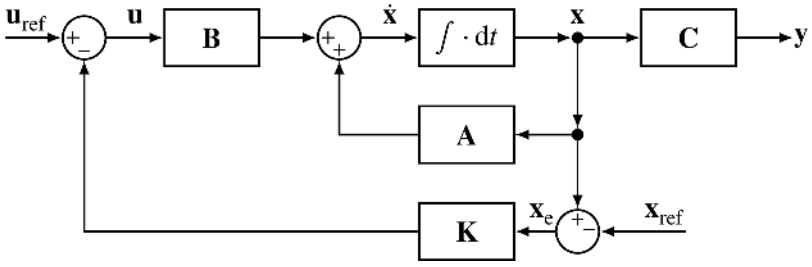


Figure 2. Feedback mechanism in the LQR system

In the LQR case with taking the limit $t_c \to \infty$ the cost functional takes the form

$$J(\mathbf{u}) = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{\infty} \left(\mathbf{x}(t)^{\mathrm{T}}\mathbf{Q}\mathbf{x}(t) + \mathbf{u}(t)^{\mathrm{T}}\mathbf{R}\mathbf{u}(t)\right)\, \mathrm{d}t, \tag{7}$$

with **R** and **Q** being positive semidefinite weighting matrices. The feedback matrix **K** is found by solving the Riccati equation

$$\mathbf{P}\mathbf{A} + \mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{P} - \mathbf{P}\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^{\mathrm{T}}\mathbf{P} + \mathbf{Q} = \mathbf{0} \tag{8}$$

for the matrix **P**. The feedback matrix **K** and the control signal $\mathbf{u}(t)$ are finally obtained as

$$\mathbf{K} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^{\mathrm{T}}\mathbf{P} \qquad \text{and} \qquad \mathbf{u}(t) = -\mathbf{K}\mathbf{x}_{\mathrm{c}}(t) + \mathbf{u}_{\mathrm{ref}}, \tag{9}$$

where $\mathbf{u}_{\mathrm{ref}}$ is the reference control signal. In case of nonlinear systems a possible solution for finding a suitable (but theoretically not optimal) control is the extension of the LQR problem. This extension is attained by the factorization of the general system equation (1) as

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{u})\mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}, \mathbf{u})\mathbf{u}. \tag{10}$$

Note that time independence was assumed here without the loss of generality. This extension can be used if the so-called state dependent coefficient (SDC) form (10) of the problem exists. In this case the same equations (8) and (9) can be used to find the control signal $\mathbf{u}(t)$. However, the matrices **P** and **K** will also be state dependent; thus, this approach is referred to as the state dependent Riccati equation (SDRE) method [4]. In the following the SDRE method is utilized for designing control systems for different UAV applications.

Unfortunately, as discussed in the next section, it is not trivial to find a suitable SDC form of the system equations, even if such factorizations of the problem exist. To preserve the controllability of the original nonlinear system, the factorized matrices $\mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ and $\mathbf{B}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ must be constructed in such manner that the corresponding linear systems are controllable for all possible states **x**.

AUTOMATIC SDC FACTORIZATION

The factorization problem

To the best knowledge of the authors there is no general approach for finding the best SDC factorization of a nonlinear system. For some very simple nonlinear systems the optimal factorization can be found analytically; however, this is not the case for complex, real-life systems. The general difficulty of the factorization is that the SDC form is not unique. Even the simplest systems can have a continuum number of possible factorizations. Let us consider the following two-dimensional example

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_1 x_2 \\ \dot{x}_2 &= -x_2 + u. \end{aligned} \tag{11}$$

The system matrices **A** and **B** can be factorized as

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \mu x_2 & (1-\mu)x_1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \qquad \text{and} \qquad \mathbf{B}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \tag{12}$$

The parameter μ can be an arbitrary real number, which means that a continuum number of possible solutions exist. However, different choices of μ result in different behaviors of the linearized system. By choosing $\mu = 1$ the linearized system becomes unconditionally uncontrollable, while any other choice of μ results in a controllable system, provided that x_1 is not zero. The uncontrollability of the former choice ($\mu = 1$) is explained by the fact that the factorized form does not represent the dependence of $\dot{x}_1$ on x_2 in this case, as the coefficient A_{12} is

zero. This way, the state variable x_1 becomes uncontrollable. In order to preserve the controllability property of the original nonlinear system it is important that all relations between the state and input variables are represented in the factorized system as well.

The proposed algorithm

Our proposed solution for the factorization problem ensures that all relations between the state and input variables in the nonlinear are also represented in the linearized system by an automatic, equal factorization of product terms. The algorithm distributes multivariate polynomial terms equally among each variable, while leaves non-polynomial terms in their original form. An important property of the algorithm is that the computation is done without evaluating the derivatives of the vector valued function **f** (i.e., the Jacobi matrix). Thus, the computational costs of the proposed method are moderate. This approach is simple, yet it can provide a suitable solution in a number of control applications as will be demonstrated in the sequel.

A simple example is given here to illustrate the mechanism of the algorithm. Let us consider a three-dimensional system with $\mathbf{x} = [x_1\ x_2\ x_3]^{\mathrm{T}}$ and a scalar control signal u. Let us define the first PDE of the system as

$$\dot{x}_1 = x_1^2 + x_1 x_2 x_3^2 + x_2^2 u. \tag{13}$$

Note that the other PDEs are indifferent with respect to the factorization of the first PDE. The right hand side of (13) consists of three multivariate polynomial terms, having one (x_1), three (x_1, x_2, x_3), and two (x_2, u) variables, respectively. Distributing the terms equally leads to the form

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 = {} & 1 \cdot x_1 \cdot [x_1] + \\ & + \frac{1}{3} \cdot x_2 x_3^2 \cdot [x_1] + \frac{1}{3} \cdot x_1 x_3^2 \cdot [x_2] + \frac{1}{3} \cdot x_1 x_2 x_3 \cdot [x_3] + \\ & + \frac{1}{2} \cdot x_2 u \cdot [x_2] + \frac{1}{2} \cdot x_2^2 \cdot [u],\end{aligned} \tag{14}$$

where the factorization of the three terms are shown in separate lines. Here and in the following the state or control variable to which the given term is assigned is shown in square brackets for the sake of enhanced visibility. Finally, after rearranging the terms we get

$$\dot{x}_1 = \left(x_1 + \frac{1}{3} x_2 x_3^2\right) \cdot [x_1] + \left(\frac{1}{3} x_1 x_3^2 + \frac{1}{2} x_2 u\right) \cdot [x_2] + \left(\frac{1}{3} x_1 x_2 x_3\right) \cdot [x_3] + \left(\frac{1}{2} x_2^2\right) \cdot [u], \tag{15}$$

with the expressions in parentheses holding the coefficients A_{11}, A_{12}, A_{13}, and B_{11} of the matrices $\mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ and $\mathbf{B}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$, respectively. To attain the other coefficients the same steps are repeated for the other equations.

This approach leads to the following properties of the SDC form:

1. The result $\mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{u})\mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}, \mathbf{u})\mathbf{u}$ equals $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ for all **x** and **u** vectors.
2. The hyperplanes resulting from the linearization are generally not tangential to the surfaces described by the functions $f_i(\mathbf{x}, \mathbf{u})$, with f_i denoting the i-th component of **f**.

The above properties are illustrated in Figure 3 for a simple polynomial function in one dimension. As it can be seen, the proposed factorization can result in curves having remarkably different slopes than the tangent lines. In particular, for the second linearization point at $x = 1.75$ the slopes have

different signs. Nevertheless, the detailed mathematical analysis of the proposed approach is not an objective of this paper; we focus on the possible applications of the technique instead.

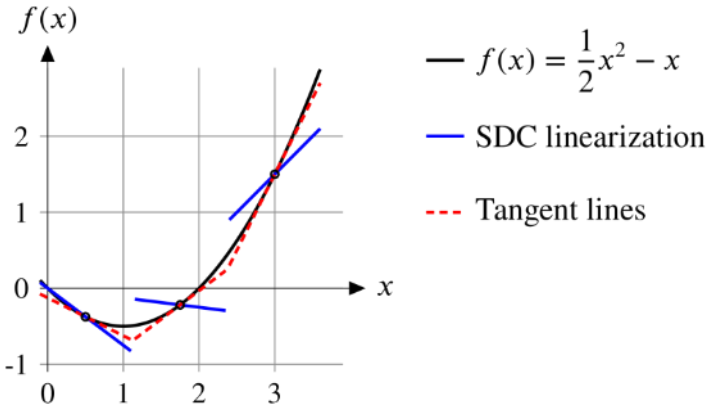


Figure 3. Result of the SDC linearization of a simple, one-dimensional function using the proposed algorithm

Implementation

The objective of the implementation introduced in this section is the automatic generation of controller codes for different UAV setups. For this purpose the proposed automatic factorization algorithm is utilized. The generated codes are intended to be used both in an embedded environment (the onboard computer of the UAV) and in laboratory simulations for testing and tuning different control algorithms. The workflow of the algorithm is illustrated in Figure 4. The main steps of the implementation are the following:

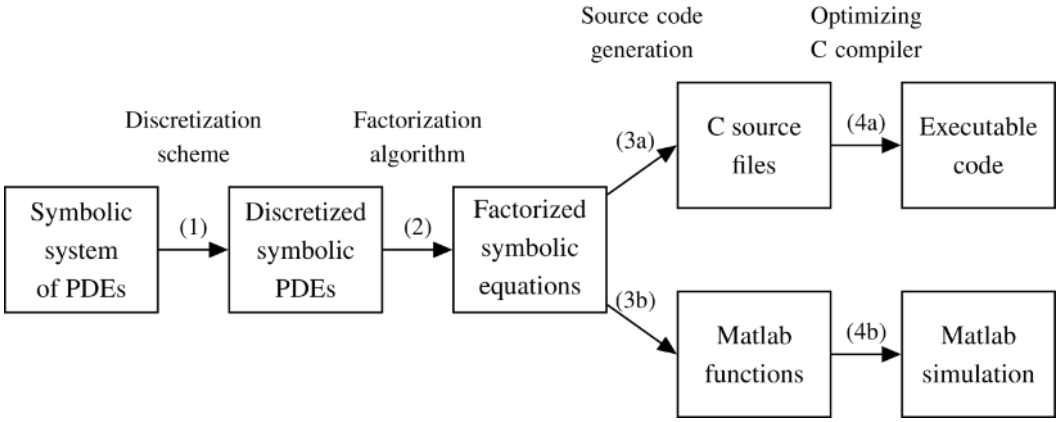


Figure 4. Workflow of control system implementation using automatic SDC factorization

(1) The input of the algorithm is the system of partial differential equations describing the dynamics of the UAV in a symbolic form. These PDEs are discretized using a predefined time stepping scheme. In general, the simple forward time scheme is suitable.

(2) The discretized PDEs are factorized by the automatic factorization algorithm. The result is a function that computes the matrices $\mathbf{A}(\mathbf{x},\mathbf{u})$ and $\mathbf{B}(\mathbf{x},\mathbf{u})$ for the given $\mathbf{x}$ and $\mathbf{u}$ inputs.

(3) The resulting functions can be used exported as (a) C source files or (b) Matlab functions. This step is performed by a source code generating routine.

(4) To be able to run the control algorithm on the embedded computer, the C sources must be compiled and an executable code must be generated. This is done by means of an

optimizing compiler that ensures the best possible performance of the executable code. Thus, a code suited for the limited computational power of the onboard computer is obtained. Alternatively, the factorized forms can readily be exported as Matlab functions for performing different types of simulations in a PC environment.

Steps (1) to (3) are carried out exploiting the capabilities of Matlab's Symbolic math toolbox [7]. The latter makes running the factorization algorithm on the symbolic level feasible.

Since the control algorithm must run real-time in the UAV, it must be capable of performing the computationally involving tasks so that the critical timing conditions are satisfied. Furthermore, beside the control unit, the sensor fusion can also contain computationally heavy steps. The guidance unit does not require much computational effort. In the penultimate chapter of this paper we show by means of hardware-in-the-loop simulations that our implementation fulfils these requirements.

In the SDRE control, the solution of the Riccati equation (8) is the computationally most expensive step. In the discretized form equation (8) takes a bit different form; however, the solution is attained in similar steps. This involves solving an eigenvalue problem of order $2n$, where n is the number of state space dimensions. There are different approaches for solving the discrete Riccati equation. A direct method is described in [8]. An alternative method that improves the numerical behavior of the implementation based on the generalized eigenvalue problem was published in [9]. The latter method was implemented in C language using the LAPACK library. As far as Matlab simulations are concerned, continuous and discrete time LQR problems can readily be solved using the functions named "lqr" and "dlqr", respectively.

AN ACADEMIC EXAMPE

In this section a simplified example is presented which illustrates the limitations of linear controllers in UAV applications. On the other hand, the solution for the same problem using a nonlinear controller is also given here. For the demonstration an academic case is chosen: a rotary wing aircraft that has only two rotors and which can move only in two dimensions. Before discussing the example application in detail, the general equations of aircraft dynamics and their nonlinear nature are addressed.

General governing equations of aircraft dynamics

In general the motion of a UAV can be described as the motion of a rigid body with six degrees of freedom: its three-dimensional translation and rotation. These quantities can be defined in different coordinate systems. Specifically, we use two different coordinate systems in the following: the Earth reference frame with North–East–Down (NED) axes, and the body frame with its axes rotating together with the vehicle. Quantities represented in the Earth and body frames are denoted by the upper indices (E) and (B), respectively.

The translation of a rigid body is governed by Newton's laws of motion, which can be written in the following form:

$$\dot{\mathbf{p}}^{(\mathrm{E})} = \mathbf{v}^{(\mathrm{E})}, \tag{16}$$

$$\dot{\mathbf{v}}^{(\mathrm{E})} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{N}\mathbf{F}_i^{(\mathrm{E})} + \mathbf{G}^{(\mathrm{E})}. \tag{17}$$

Hereafter $\mathbf{p}$ and $\mathbf{v}$ denote the position and velocity vectors, respectively. The takeoff weight of the aircraft is m, and it is assumed that there are N elements on the aircraft that create the forces $\mathbf{F}_i$ $(i = 1, 2, \ldots N)$, such as propellers, lifting surfaces, and others. The effect of gravity is taken into account with $\mathbf{G}$ representing the gravitational acceleration vector. Equations (16) and (17) can also be written in the body frame; however, for the time being the Earth frame representation is used.

The rotational motion of a rigid body is described by the attitude and its dynamics. There are different possibilities for representing the attitude, such as Euler angles, rotation matrices, or quaternions. First the rotation is described using quaternions, while later an alternative description using Rodrigues parameters is also introduced. A more detailed discussion of attitude representations is found in the accompanying paper [1].

The dynamics of the attitude using the quaternion representation are written as

$$\dot{\mathbf{q}} = \frac{1}{2}\Xi\boldsymbol{\omega}^{(\mathrm{B})} = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} -q_1 & -q_2 & -q_3 \\ q_0 & -q_3 & q_2 \\ q_3 & q_0 & -q_1 \\ -q_2 & q_1 & q_0 \end{bmatrix}\boldsymbol{\omega}^{(\mathrm{B})}, \tag{18}$$

where $\mathbf{q}$ is the quaternion holding the current attitude of the body, and $\boldsymbol{\omega}^{(\mathrm{B})}$ denotes the angular velocity of the rigid body in the body frame. The rate of change of angular velocity is derived from the torques acting on the body as

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}^{(\mathrm{B})} = \left(\mathbf{I}^{(\mathrm{B})}\right)^{-1}\left(-\boldsymbol{\omega}^{(\mathrm{B})} \times \left(\mathbf{I}^{(\mathrm{B})}\boldsymbol{\omega}^{(\mathrm{B})}\right) + \sum_{i=1}^{N}\mathbf{M}_i^{(\mathrm{B})}\right), \tag{19}$$

with $\mathbf{I}$ denoting the moment of inertia matrix of the body, and $\mathbf{M}_i$ $(i = 1, 2, \ldots N)$ representing the moments generated by the forces $\mathbf{F}_i$. The symbol × represents the cross product. Contrary to the case of translational movement, it is more useful to describe the rotational movement in body frame since in the latter frame the matrix $\mathbf{I}^{(\mathrm{B})}$ is constant.

Equations (16)–(19) are the common dynamic equations of all UAV control applications. It can directly be seen that the rotation equation (19) is inherently nonlinear in all applications of our interest. The application-specific property of these equations is the way in which the forces and moments are related to the state and control variables. Naturally, the latter can be remarkably different for different kinds of aircrafts, as it is shown in the subsequent chapters.

In a state control framework the choice of the attitude representation is important with respect to the controllability of the system. For example, rotation matrices and quaternions are not minimal representations of the attitude since their components are not independent. This means that systems with state spaces containing quantities of these kinds are not controllable after linearization. There-

fore, the quaternion representation used in equation (18) cannot be used in a SDRE control application. While Euler angles are a minimal representation of the attitude, they suffer from the problem of singularities, also known as the gimbal lock effect. In this paper we use an alternative representation, the so-called Rodrigues parameters. The latter can be defined by means of a projection of four-dimensional quaternions onto a three-dimensional hyperplane, see details in [10].

The dynamics of the Rodrigues parameters $\boldsymbol{\sigma}$ are given by the equation

$$\begin{bmatrix} \dot{\sigma}_1 \\ \dot{\sigma}_2 \\ \dot{\sigma}_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{4}\begin{bmatrix} 1+\sigma_1^2-\sigma_2^2-\sigma_3^2 & 2(\sigma_1\sigma_2-\sigma_3) & 2(\sigma_1\sigma_3-\sigma_2) \\ 2(\sigma_2\sigma_1+\sigma_3) & 1-\sigma_1^2+\sigma_2^2-\sigma_3^2 & 2(\sigma_2\sigma_3-\sigma_1) \\ 2(\sigma_3\sigma_1-\sigma_2) & 2(\sigma_3\sigma_2+\sigma_1) & 1-\sigma_1^2-\sigma_2^2+\sigma_3^2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}^{(B)}. \qquad (20)$$

The direction cosine matrix (DCM, also known as rotation matrix), denoted here by $\mathbf{R}_{\mathrm{DCM}}$ can be expressed from the Rodrigues parameters as

$$\mathbf{R}_{\mathrm{DCM}} = \frac{1}{(1+n)^2}\begin{bmatrix} 4\left(\sigma_1^2-\sigma_2^2-\sigma_3^2\right)+s^2 & 8\sigma_1\sigma_2+4\sigma_3 s & 8\sigma_1\sigma_3-4\sigma_2 s \\ 8\sigma_2\sigma_1-4\sigma_3 s & 4\left(-\sigma_1^2+\sigma_2^2-\sigma_3^2\right)+s^2 & 8\sigma_2\sigma_3+4\sigma_1 s \\ 8\sigma_3\sigma_1+\sigma_2 s & 8\sigma_3\sigma_2-4\sigma_1 s & 4\left(-\sigma_1^2-\sigma_2^2+\sigma_3^2\right)+s^2 \end{bmatrix} \qquad (21)$$

Here $n = \boldsymbol{\sigma}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\sigma}$ is the square norm of the Rodrigues parameters and $s = 1 - n$. The Rodrigues parameter representation of the attitude provides a singularity-free description of rotations in the range from $-360°$ to $+360°$ along all three axes.

The Rodrigues parameters also have an attractive property regarding the SDC factorization: equation (20) consists only of multivariate polynomial terms. The same holds for the matrix on the right hand side of equation (21). It was already seen that such terms are handled efficiently by the automatic factorization algorithm introduced above. In the subsequent examples and applications these advantageous properties of the Rodrigues parameters are heavily exploited.

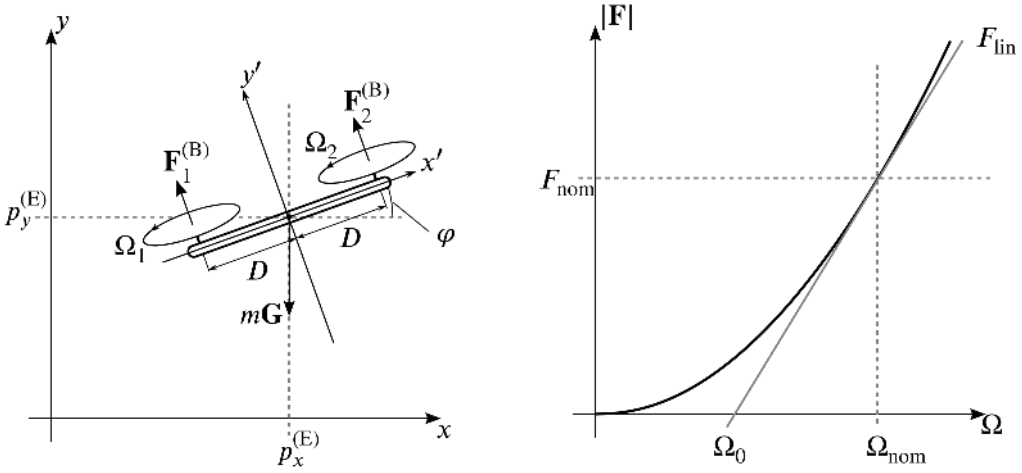


Figure 5. Schematic of the two-dimensional copter (left), linearization of lift forces (right)

A two-dimensional rotary wing aircraft

The schematic of the two-dimensional copter is shown in the left hand side of Figure 5. It is assumed that the copter moves in the x–y plane in the Earth frame. The body frame is defined

by the axes x' and y', and it is rotated by the angle φ compared to the Earth frame. For the sake of simplicity it is also assumed that the lift forces $\mathbf{F}_1$ and $\mathbf{F}_2$ generated by the rotors are parallel to the y' axis. The magnitudes of the lift forces are proportional to the angular velocities of the rotors Ω_1 and Ω_2 squared, related by the lift force coefficient C_L as

$$\left|\mathbf{F}_i\right| = C_L \Omega_i^2 \qquad i = 1, 2. \tag{22}$$

The corresponding moments are attained as $\mathbf{M}_i = \mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_i$ with $\mathbf{r}_i$ denoting the vector from the center of gravity of the aircraft and the center of the i-th rotor. For the sake of simplicity, it is assumed that the two rotors are located at $(\pm D, 0)$ in the body frame as shown in the left panel of Figure 5. The control signals u_i drive the angular velocities of the rotors through a first order low-pass filter with the time-constant τ.

We define the ten-dimensional state space of the aircraft as $\mathbf{x} = \left[\boldsymbol{\xi}^{(\mathrm{E})}\ \mathbf{p}^{(\mathrm{E})}\ \mathbf{v}^{(\mathrm{E})}\ \sigma\ \omega\ \boldsymbol{\Omega}\right]^{\mathrm{T}}$, with $\boldsymbol{\xi}^{(\mathrm{E})}$ denoting integral of the position error. The latter is introduced to be able to follow the position reference signals without remainder errors. In the two-dimensional system the angular velocity of the body is the same in the Earth and body frames, therefore these frame notations are omitted. It is worth noting that in two dimensions equations (20) and (21) for the single Rodrigues parameter σ are written as

$$\dot{\sigma} = \frac{1}{4}\left(1 + \sigma^2\right)\omega, \tag{23}$$

$$\mathbf{R}_{\mathrm{DCM}}^{(2\mathrm{D})} = \frac{1}{1 + 2\sigma^2 + \sigma^4}\begin{bmatrix} 1 - 2\sigma^2 + \sigma^4 & 4\sigma(1 - \sigma^2) \\ -4\sigma(1 - \sigma^2) & 1 - 2\sigma^2 + \sigma^4 \end{bmatrix}. \tag{24}$$

Using the above state space choice the full system of state equations for the copter reads as

$$\dot{\boldsymbol{\xi}}^{(\mathrm{E})} = \mathbf{p}^{(\mathrm{E})} - \mathbf{p}_{\mathrm{ref}}^{(\mathrm{E})} \tag{25a}$$

$$\dot{\mathbf{p}}^{(\mathrm{E})} = \mathbf{v}^{(\mathrm{E})} \tag{25b}$$

$$\dot{\mathbf{v}}^{(\mathrm{E})} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{rot}}} \mathbf{F}_i^{(\mathrm{E})} - \mathbf{G}^{(\mathrm{E})} \tag{25c}$$

$$\dot{\sigma} = \frac{1}{4}\left(1 + \sigma^2\right)\omega \tag{25d}$$

$$\dot{\omega} = I^{-1}\left(-\omega I \omega + \sum_{i=1}^{N_{\mathrm{rot}}} M_i\right) \tag{25e}$$

$$\dot{\Omega}_i = \frac{1}{\tau}\left(u_i - \Omega_i\right) \tag{25f}$$

with N_{rot} denoting the number of rotors, and in this example $N_{\mathrm{rot}} = 2$.

The state of zero acceleration is of particular interest in the sequel, therefore we define the nominal lift force F_{nom} and the nominal angular velocity of the rotors Ω_{nom} as

$$F_{\mathrm{nom}} = m\,|\mathbf{G}| \qquad \rightarrow \qquad \Omega_{\mathrm{nom}} = \sqrt{\frac{m\,|\mathbf{G}|}{C_L N_{\mathrm{rot}}}}. \tag{26}$$

Limits for the maximal and minimal angular velocities are introduced as $\Omega_{\min} = 0$ and $\Omega_{\max} = 2\Omega_{\text{nom}}$. These constraints are enforced by the saturation of the driving signals u_i.

Both for the linear and nonlinear controllers the simple forward discretization scheme is used:

$$\mathbf{x}^{(n+1)} \approx \mathbf{x}^{(n)} + T_s \dot{\mathbf{x}}^{(n)}, \tag{27}$$

where the upper indices in parentheses refer to the n-th and $n+1$-th time steps, respectively, and T_s denotes the sampling time. In the following examples $T_s = 0.01$ s is chosen, which corresponds to the control loop frequency $f_s = 100$ Hz. The other parameters of the system were chosen as: $D = 0.35$ m, $m = 2$ kg, $C_L = 10\ \text{N}/(\text{krad/s})^2$, $I = 0.082\ \text{kgm}^2$, $\tau = 0.032$ s, and $G = 9.81\ \text{m/s}^2$.

Here, and in the following parts of the paper the system simulation is always performed using equations (16)–(19) and the simple time discretization scheme (27). Thus, in the simulations the vehicles are always treated as rigid bodies with six degrees of freedom.

Linear controller solution

First, a linearized solution is discussed, which is based on the assumption that the aircraft operates near to its stable equilibrium state. The following conditions are assumed.

1. The angle φ is assumed to be small, that is $|\varphi| \ll \pi/2$. This way, the approximations $\sin\varphi \approx \varphi$ and $\cos\varphi \approx 1$ can be applied. It is also observed that for small angles the connection with the Rodrigues parameter $\varphi \approx 4\sigma$ holds.
2. The angular velocity of the body is small, i.e. $\omega \approx 0$.
3. The velocity is also assumed to be small, so that $|\mathbf{v}| \approx 0$.

Equation (22) is linearized as shown in the right hand side of Figure 5, i.e.

$$\left|\mathbf{F}_{i,\text{lin}}\right| = C_{L,\text{lin}} \cdot \Omega_{i,\text{lin}}, \tag{28}$$

where

$$C_{L,\text{lin}} = 2C_L\Omega_{\text{nom}} \qquad \text{and} \qquad \Omega_{i,\text{lin}} = \Omega_i - \Omega_0 = \Omega_i - \frac{\Omega_{\text{nom}}}{2}. \tag{29}$$

The equations for the acceleration are linearized as

$$\dot{v}_x = -\frac{1}{m}C_L\left(\sum_{i=1}^{N_{\text{rot}}}\Omega_i^2\right)\sin\varphi \approx -4\frac{N_{\text{rot}}}{m}C_L\Omega_{\text{nom}}^2 \cdot [\sigma], \tag{30}$$

$$\dot{v}_y = \frac{1}{m}C_L\left(\sum_{i=1}^{N_{\text{rot}}}\Omega_i^2\right)\cos\varphi - |\mathbf{G}| \approx \frac{1}{m}C_{L,\text{lin}} \cdot \left[\Omega'_{1,\text{lin}}\right] + \frac{1}{m}C_{L,\text{lin}} \cdot \left[\Omega'_{2,\text{lin}}\right]. \tag{31}$$

Making use of the relation (26), the notation $\Omega'_{i,\text{lin}} = \Omega_{i,\text{lin}} - \Omega_0 = \Omega_i - \Omega_{\text{nom}}$ was introduced. Finally, the nonlinear relation for the angular acceleration is transformed as

$$\dot{\omega} = I^{-1}\left(\underbrace{-\omega I\omega}_{\approx 0} + \sum_{i=1}^{N_{\text{rot}}}\mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_i\right) \approx -\frac{DC_{L,\text{lin}}}{I}\left[\Omega'_{1,\text{lin}}\right] + \frac{DC_{L,\text{lin}}}{I}\left[\Omega'_{2,\text{lin}}\right]. \tag{32}$$

Note that in the linear case the state variables Ω_i are replaced by the linearized variables $\Omega'_{i,\mathrm{lin}}$ in the state space. The relation of the latter variables to the driving signals remains the same as given in equation (25) if the signals $u_{i,\mathrm{lin}} = u_i - \Omega_{\mathrm{nom}}$ are introduced in place of u_i. Using the above approximations the system of equations (25) is fully linearized in the vicinity of the stable equilibrium position.

Results of an example simulation using the linear controller are shown in Figure 6. The starting state of the system was the equilibrium state except for the angle φ which was set as $\varphi(0) = 5°$. The simulation was performed on a 25 s long maneuver. The reference position signals are shown in the left panel of Figure 6 by the dashed lines. The copter is commanded to go upwards 15 meters, then to go 10 meters right, and finally to descend 15 meters. Moving in the direction of the x-axis is only possible by controlling the attitude (angle φ) of the copter. As shown in the right panel of Figure 6, in this example configuration the linear controller operates in the domain $-30° < \varphi < 30°$. Observing the actual trajectory shown by the continuous lines in the left panel of Figure 6, it is seen that the controller can follow the reference signals with a small delay and a minimal overshoot. It is worth mentioning that the delay and overshoot properties are configured in the LQR control system by tuning the weighting matrices **R** and **Q** in equation (7). This issue is addressed in the last section of this paper.

While the linear control can provide good results and very low computational costs at the same in the vicinity of the equilibrium state, it cannot operate far from the equilibrium point. In this example the angle φ is clearly a limiting factor; the controller cannot be expected to work properly if the condition $|\varphi| < \pi/2$ is violated. In the next paragraphs it is demonstrated that such limitations can be overcome by using a nonlinear control system.

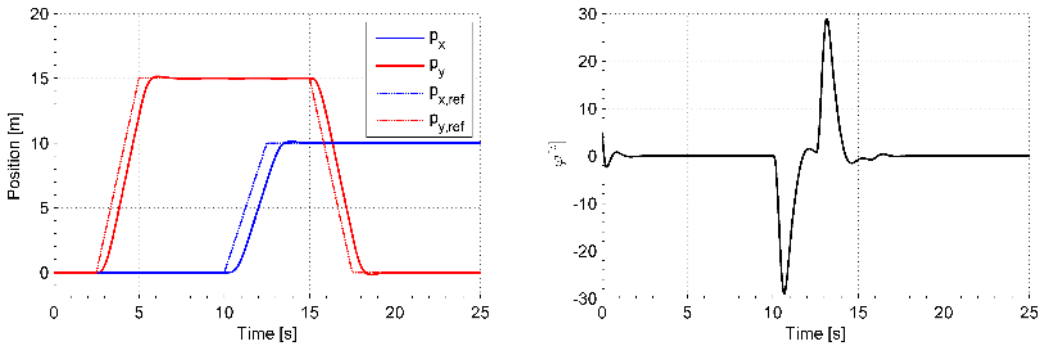


Figure 6. Example results of the linear control of a two-dimensional hypothetical copter

Nonlinear SDRE controller

In the nonlinear controller none of the linear approximations are used. Instead, the following "trick" is introduced in the equation for the acceleration. To be able to take the effect of the gravitational acceleration **G** into account a dummy variable x_d is introduced, and equation (25c) is written in the form

$$\dot{\mathbf{v}}^{(\mathrm{E})} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{rot}}} \mathbf{F}_i^{(\mathrm{E})} - x_d \mathbf{G}^{(\mathrm{E})}. \tag{33}$$

The dummy variable is included in the state space and its dynamics are expressed as

$$\dot{x}_d = -\lambda_d x_d, \tag{34}$$

where λ_d is a positive real constant, and thus x_d is seen by the controller as a globally stable state variable. For such a state variable no feedback is needed and its weight in the weighting matrix $\mathbf{Q}$ can be set to zero for the cost functional defined by equation (7). However, in each control cycle $x_d = 1$ is set manually, thus, by means of equation (33) the effect of the gravitational acceleration is taken into account correctly in the nonlinear controller.

Since equation (33) incorporates the forces in the Earth frame $\mathbf{F}_i^{(\mathrm{E})}$, while the direction of the forces depend on the attitude of the aircraft, the DCM defined in equation (24) is utilized to transform the lift forces into the Earth frame. Hence, equation (33) becomes a nonlinear relation of the variables σ and Ω_i. Equations (25d) and (25e) are also nonlinear.

To have the same control signals as in the linear case, the rotor angular velocities are shifted by utilizing the state variables $\Omega_i' = \Omega_i - \Omega_{\mathrm{nom}}$ and the control signals $u_i' = u_i - \Omega_{\mathrm{nom}}$. By this choice $u' = 0$ is obtained in the equilibrium state. As it was discussed in the linear controller case, these substitutions do not affect the dynamics of the state variables. The factorized matrices $\mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ and $\mathbf{B}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ are constructed using the automatic factorization algorithm discussed above.

Figure 7 demonstrates the stabilization of the 2D hypothetical copter from an extreme starting attitude $\varphi(0) = 120°$. As it can be seen the copter returns to a stable state after a few seconds of initial transient movement. In the left panel of Figure 7 the copter's response to the same reference signal that was shown in Figure 6 for the linear controller is displayed. It can be seen that in this configuration the controller gives a slower response to the reference signal and the overshoot is also increased a little. However, it should be noted that in this case the weighting matrices $\mathbf{Q}$ and $\mathbf{R}$ were chosen to achieve a wide region of stability and not to provide the smallest delay and overshoot. A possible improvement to achieve both a wide region of stability and small delay and overshoot at the same time is to adaptively tune the weighting matrices depending on the actual state of motion of the aircraft. This possibility is yet to be explored and is out of the scope of this paper.

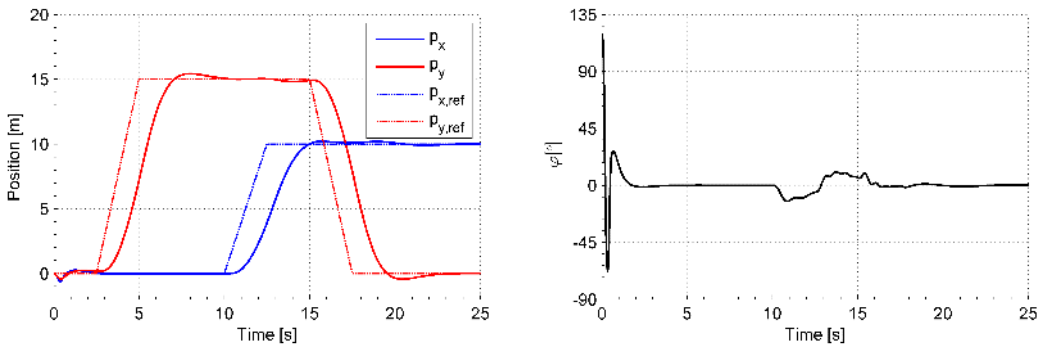


Figure 7. Stabilization of the 2D copter from extreme starting attitude using nonlinear control

The results shown in Figure 7 indicate that our proposed nonlinear control solution is applicable in UAV control systems as it can extend the region of stability of conventional linear controllers. Therefore, the applicability of the proposed methodology in real UAVs is examined in the sequel.

NONLINEAR CONTROL OF A DJI-F450 QUADROCOPTER

The DJI-F450 quadrocopter

In this section the simulation of the nonlinear control of a DJI-F450 type quadrocopter is discussed. This quadrocopter is a general purpose commercially available rotary wing airframe. The mechanical parameters of the airframe were identified as listed in Table 1. It is noted that the airframe can be mounted with different motors, rotors, and electronic devices. The values given in Table 1 correspond to a specific configuration assembled in the frame of this study. The notation $\langle\cdot\rangle$ in the table stands for a diagonal matrix of the given elements.

The controller for the quadrocopter is based on the applications of the relations given as equation (25). However, in order to get a more realistic model some modifications are introduced compared to the two-dimensional case. In the 3D model it is useful to take the effect of gyroscopic moments and drag forces into account. The force $\mathbf{F}_i$ and the torque $\mathbf{M}_i$ induced by the i-th rotor are expressed as

$$\mathbf{F}_i^{(\mathrm{B})} = C_L \mathbf{d}_i \Omega_i^2 \tag{35}$$

$$\mathbf{M}_i^{(\mathrm{B})} = \mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_i^{(\mathrm{B})} - C_D \mathbf{d}_i s_i \Omega_i^2 + \boldsymbol{\omega}^{(\mathrm{B})} \times I_p \mathbf{d}_i s_i \Omega_i, \tag{36}$$

where $\mathbf{d}_i$ is the direction of the lift force (expressed in the body frame), s_i is the sign of the angular velocity of the i-th rotor, I_p is the inertia of a rotor and motor pair and C_D is the drag coefficient. For the sake of simplicity, it is assumed that C_L, C_D, and I_p are the same for all four motor–rotor pairs. The three terms on the right hand side of equation (36) are associated with the torque generated by lift forces, drag forces, and gyroscopic moments, respectively.

Since the system is three-dimensional, the dynamics of the Rodrigues parameters are governed by equation (20) instead of equation (25c). As it was discussed above, the Rodrigues parameters provide a singularity-free description of the attitude in the $-360°$ to $+360°$ range. To be able to perform maneuvers consisting of more than one turns, an alternative interpretation of the Rodrigues parameters is used here. A reference coordinate system represented by the rotation matrix $\mathbf{R}_{\mathrm{ref}}$ is introduced, and the Rodrigues parameters are interpreted as attitude errors compared to the reference orientation. Thus, the transformation from the Earth to the body frame is described by the DCM denoted by $\mathbf{R}_{\mathrm{DCM}}$ given as

$$\mathbf{R}_{\mathrm{DCM}} = \mathbf{R}_{\mathrm{rod}} \mathbf{R}_{\mathrm{ref}}, \tag{37}$$

where $\mathbf{R}_{\mathrm{rod}}$ is calculated from the Rodrigues parameters using equation (21). Since the attitude error is always in the $-180°$ to $+180°$ range, the description of the attitude becomes free of singularities even for maneuvers including several turns around an axis.

The eighteen-dimensional state space of the controller includes the position and the velocity of the aircraft in the Earth frame, the Rodrigues parameter triplet, the angular velocity of the UAV in the body frame, the angular velocity of each rotor, the integral of the position error along the z-axis only and the dummy variable introduced by equations (33) and (34). Similar to the case of the hypothetical copter, the control signals u_i are assumed to drive the angular velocities of the rotors through a first order low-pass filter represented by the time-constant τ. The latter

assumption may be considered as an oversimplification; however, measurements performed on the motor controller indicated that this simplification is suitable.

Parameter	Notation	Value
Takeoff weight	m	1.4 kg
Moment of inertia matrix	$I^{(\mathrm{B})}$	$\langle 0.0104, 0.0104, 0.0196\rangle$ kgm^2
Lift coefficient of rotors	C_L	27.153 N/(krad/s)^2
Drag coefficient of rotors	C_D	0.607 N/(krad/s)^2
Inertia of a rotor and motor pair	I_p	$1.375 \cdot 10^{-3}$ kgm^2
Nominal angular velocity of rotors	Ω_{nom}	3395 RPM
Rotor positions	r_i	$(\pm 0.16, \pm 0.16, 0)$ m
Lift force directions	d_i	$(0, 0, -1)$ [−]
Rotor angular velocity signs	s_i	$(-1, +1, -1, +1)$ [−]

Table 1. Parameters of the DJI-F450 airframe

Matlab simulation

The nonlinear controller for the DJI-F450 copter was first implemented in the frame of a Matlab simulation. Again, the proposed SDC factorization method was utilized to attain the system matrices. To simulate the limited computational resources available on the onboard computer, the update of the factorized matrices $\mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ and $\mathbf{B}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ was performed only every tenth cycle of the simulation. Thus, the control rule $\mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{x}_{\mathrm{e}}$ is calculated in each simulation cycle, whereas the feedback matrix $\mathbf{K}$ is updated (and the state dependent Riccati equation is solved) only every tenth cycle. This means a significant reduction of the required computational effort.

The simulation of an example flight path is shown in Figure 8. The sixty-second-long flight plan consists of three parts. (1) In the first 10 seconds the quadrocopter is commanded to take off from the origin and to reach the first waypoint at $(0, 10, -10)$ m. (2) Then, in the next 20 seconds, the copter travels 20 meters along the x-axis and rotates two whole rounds around the z-axis in the positive direction. (3) Finally, in the last 30 seconds the copter ascends another 10 meters while making a half circle with 10 meters radius to arrive to the last waypoint at $(20, -10, -20)$ m. All reference states except the position and the yaw angle are zero during the whole maneuver. As it is seen in Figure 8, the controller makes the copter follow the reference path with very small errors. Note that the y and the z axes are mirrored in the left panel of Figure 8 due to the limitations of the plotting program. The forward direction of the airframe is indicated by the red rotors in Figure 8.

The resulting Euler angles are shown in the right panel of Figure 8. It is seen that the copter follows the reference yaw angle with a small delay. The two complete turns around the z-axis are also performed with maintaining small errors. It can be assessed that the implemented controller is capable of driving the copter in case of usual flight commands.

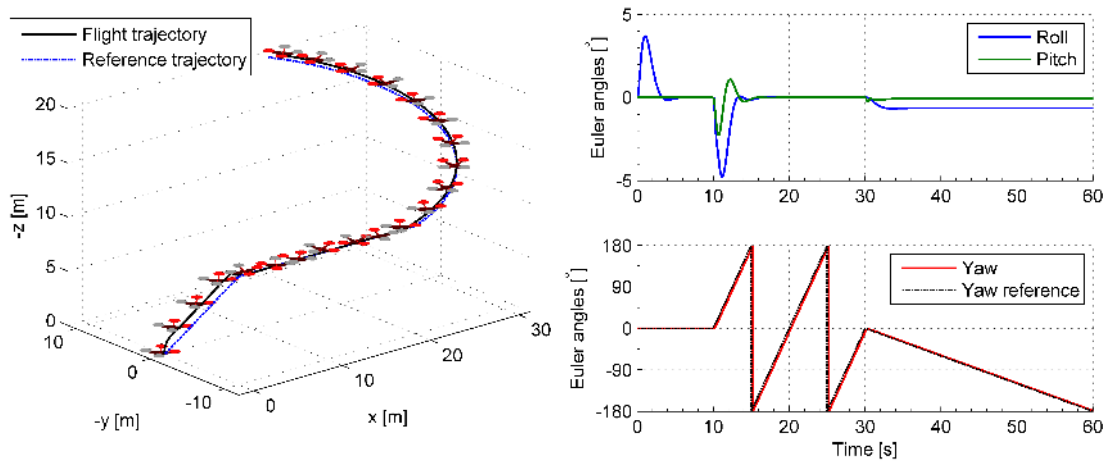


Figure 8. Simulation of flying a test trajectory with the DJI-F450 quadrocopter using SDRE control

In order to examine the robustness of the controller, another simulation was performed in which the copter was started from an instable state: the initial roll angle φ was set as $\varphi(0) = 150°$. This corresponds to a nearly upside-down attitude. For the sake of simplicity, the initial values of the other state variables correspond to the equilibrium state, which is also the reference state in this case. The results of a ten-second-long simulation are shown in Figure 9. It is seen that the copter is stabilized in a few seconds. Apparently, during the stabilization process, the aircraft only loses less than 1 meter of altitude. In the y direction the maximum deviation from the reference position is around 3.5 meters. The small loss in altitude is due to the incorporation of the position integral along the z-axis into the state space. Results illustrated in Figures 8 and 9 indicate that the proposed control method is applicable in real UAVs and can handle both normal and extraordinary flight conditions.

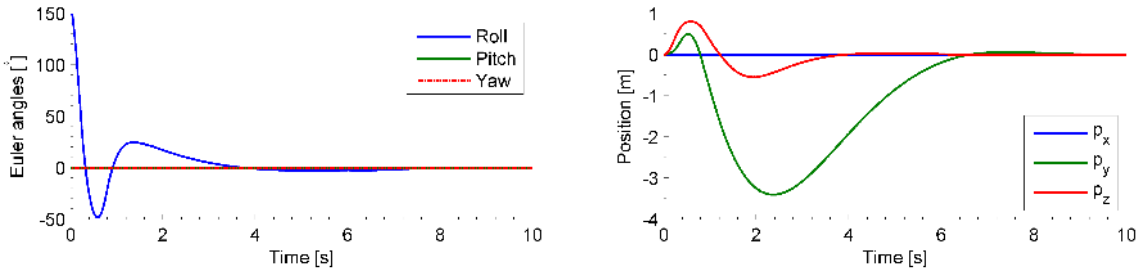


Figure 9. Stabilization of the DJI-F450 quadrocopter using SDRE control from an extreme attitude

Hardware-in-the-loop simulation

To test the control unit inside the embedded environment of the onboard computer, a hardware-in-the-loop simulation was also performed. In this case, the controller is not run in a PC simulation but an executable is generated by means of the steps (3a) and (4a) as shown in Figure 4. Contrary to the simulations presented so far, in this case the whole autopilot system was tested, i.e. all three blocks (sensor fusion algorithm, guidance, and control) were running real-time on the onboard computer as illustrated in Figure 1. Furthermore, beside the navigational tasks, a communication task is also incorporated into the system. This way, the aircraft was controlled from the user interface of the ground control station (GCS) application. Finally, it is also worth mentioning that

opposed to a real-life flight scenario the system simulation (modeling the dynamics of a rigid body with six degrees of freedom) was also implemented inside the onboard computer.

The simulation scenario consists of the following steps. First, the user can construct a flight plan composed of various mission items (waypoints, loitering etc). Then, a mission script is generated and transferred to the vehicle. Upon receiving the script the vehicle checks if all the items in the script are valid. If a valid script was received the execution of the flight plan can begin. In the simulation environment, at the beginning the simulated vehicle is transferred automatically to the home position and starts the flight from there.

During the simulated flight fictitious sensor signals corrupted by noise, offset, and distortion on purpose are generated based on the simulated state of motion of the aircraft. To model the behavior of real sensor measurements the statistical properties of the noise and offset were chosen corresponding to the information given in the data sheets of the onboard sensors. From these corrupted signals the sensor fusion algorithm [1] predicts the actual state of the vehicle. A simple guidance method generates the reference signal for the controller such that the aircraft always heads towards the current waypoint. When a waypoint is reached, the vehicle hovers and turns around the z-axis towards the next waypoint.

A snapshot of the user interface of our Ground Control Station application (GCS) during the hardware-in-the-loop simulation is shown in Figure 10. As seen, the map and the flight plan is shown in the left of the screen, with the green line indicating the path of the vehicle. In the top right part an artificial horizon is visible which helps the pilot and the operator in case of flight by remote control. The bottom right part of the screen is occupied by a customizable dashboard on which different functions and measured values can be plotted. As shown in the figure, the controller operates properly in the embedded environment and is capable of producing control signals in a real-time manner. Moreover, it is also seen that the control unit can work in cooperation with the sensor fusion and guidance units.



Figure 10. Hardware-in-the-loop simulation of the DJI-F450 copter in the ground control station

NONLINEAR CONTROL OF AN X8 RIGID WING UAV

Aerodynamic forces in the nonlinear control system

Similar to the rotary wing aircrafts discussed above, the control of a rigid wind aircraft also relies on the dynamics of a rigid body, governed by equations (16)–(19). However, in a rigid wing aircraft the forces and moments acting on the body have a much more complex dependence on the state of motion of the vehicle and the state of the actuators. For example, the deflections of different control surfaces affect the resulting lift and drag forces significantly. In the sequel the lift, drag, and propulsion forces are evaluated based on the study of Gausz & Gáti [11]. The incorporation of these forces into the SDRE controller also involves some simplifications which are discussed briefly in the following paragraphs.

The lift and drag forces are assumed to act in the aerodynamic center (AC) of the wing, as depicted in the right panel of Figure 11. The aerodynamic center of each wing is calculated making use of the mean aerodynamic chord (MAC). The aerodynamic forces are usually expressed in the non-inertial aerodynamic (or wind) coordinate system denoted here by the upper index (A). In the calculation the so-called surface coordinate system (fixed and aligned to the lifting surface) is also utilized and denoted by the upper index (S).

The relative air speed $\mathbf{V}$ of the aerodynamic center of a lifting surface is expressed in the body frame as

$$\mathbf{V}^{(\mathrm{B})} = \mathbf{v}^{(\mathrm{B})} + \boldsymbol{\omega}^{(\mathrm{B})} \times \mathbf{r}_{\mathrm{AC}}^{(\mathrm{B})} - \mathbf{V}_{\mathrm{wind}}^{(\mathrm{B})} - \mathbf{V}_{\mathrm{ind}}^{(\mathrm{B})}, \tag{38}$$

where $\mathbf{r}_{\mathrm{AC}}^{(\mathrm{B})}$ is the vector from the center of gravity (CG) to the AC, $\mathbf{V}_{\mathrm{wind}}^{(\mathrm{B})}$ is the speed of wind expressed in the body frame, and $\mathbf{V}_{\mathrm{ind}}^{(\mathrm{B})}$ is the so-called induced air speed. The aerodynamic force generated by the i-th lifting surface is expressed as

$$\mathbf{F}_i^{(\mathrm{A})} = \frac{\rho}{2} \left|\mathbf{V}_i\right|^2 S_i \begin{bmatrix} -C_{i,D} \\ 0 \\ -C_{i,L} \end{bmatrix}, \tag{39}$$

where ρ is the density of air, $\mathbf{V}_i$ and S_i are the relative air speed and the area of the i-th lifting surface, with the former obtained using equation (38). The lift and drag coefficients of the i-th surface are denoted by $C_{i,L}$ and $C_{i,D}$, respectively. The aerodynamic forces generated by each lifting surface are transformed into the body frame using the relation

$$\mathbf{F}^{(\mathrm{B})} = \mathbf{R}_{(\mathrm{S})}^{(\mathrm{B})} \mathbf{R}_{(\mathrm{A})}^{(\mathrm{S})} \mathbf{F}^{(\mathrm{A})}, \tag{40}$$

where the rotation matrices $\mathbf{R}_{(\mathrm{S})}^{(\mathrm{B})}$ and $\mathbf{R}_{(\mathrm{A})}^{(\mathrm{S})}$ denote transformations from the frame shown in the lower index to the frame shown in the upper index.

The coefficients C_L and C_D depend on the angle of attack α. Based on the study of Gausz & Gáti [11] the following approximations are introduced. For the lift forces

$$C_L \approx C_{L\alpha} \sin\alpha \approx C_{L\alpha} \frac{V_z^{(S)}}{|\mathbf{V}|} \qquad \text{pre-stall,}$$
$$C_L = kC_{L\alpha}\alpha_s \sin 2\alpha \approx kC_{L\alpha}\alpha_s \cdot 2\frac{V_x^{(S)} V_z^{(S)}}{|\mathbf{V}|^2} \qquad \text{post-stall.} \tag{41}$$

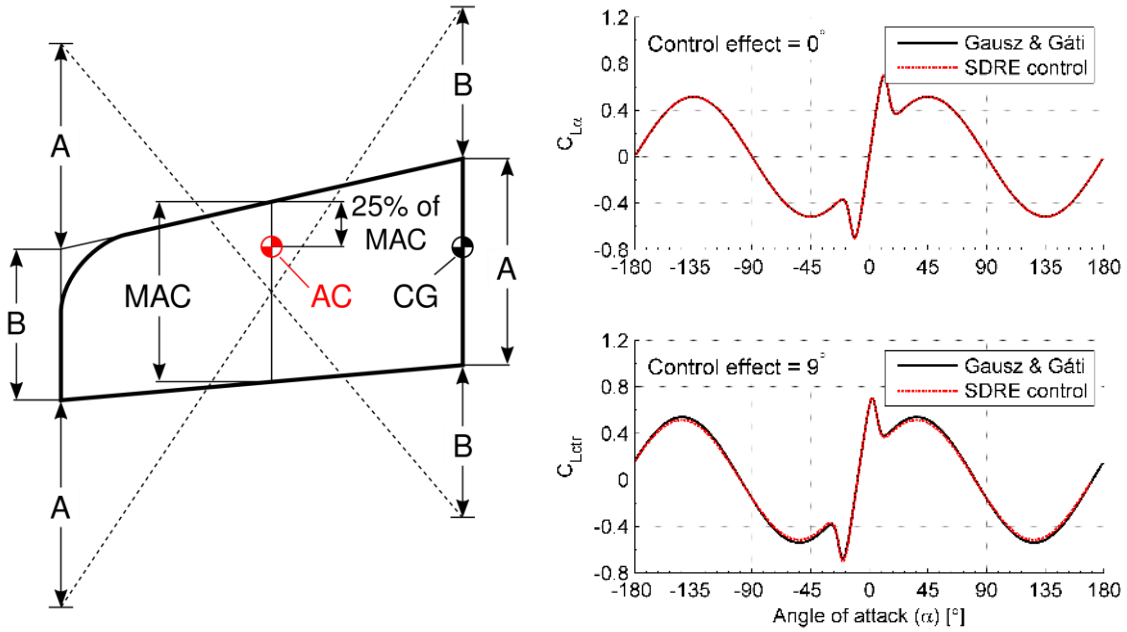


Figure 11. Definition of the aerodynamic center of a wing (left), lift forces and their approximations (right)

Here $C_{L\alpha}$ is the specific lift force coefficient, α_s is the critical angle of attack and k is a constant factor. The drag forces are approximated as

$$C_D \approx C_{D0} + C_{D\max} \cdot \left(C_{L\alpha} \frac{V_z^{(S)}}{|\mathbf{V}|} \right)^2, \tag{42}$$

with C_{D0} and $C_{D\max}$ denoting the drag force coefficients at $\alpha = 0°$ and $\alpha = 90°$, respectively.

Each wing can be mounted with control surfaces, whose effect are taken into account by the modification of the angle of attack. The modified angle α_{ctr} is attained as

$$\alpha_{\text{ctr}} = \alpha + \frac{\partial\alpha}{\partial\delta}\delta, \tag{43}$$

with δ denoting the deflection of the control surface from the equilibrium position and $\partial\alpha/\partial\delta$ is the control efficiency. The deflection of the control surfaces also result in a change of the aerodynamic forces represented by $\Delta\mathbf{F}^{(A)}$, which reads as

$$\Delta\mathbf{F}^{(A)} = \frac{\rho}{2}|\mathbf{V}|^2 S_{\text{ctr}} \begin{bmatrix} -(C_{D\text{ctr}} - C_D) \\ 0 \\ -(C_{L\text{ctr}} - C_L) \end{bmatrix}, \tag{44}$$

where S_{ctr}, $C_{D\text{ctr}}$, and $C_{L\text{ctr}}$ are the area, the drag, and the lift coefficients of the control surface, respectively. The results of the approximations introduced in equation (41) are compared to the

results of the original equations of [11] in the right panel of Figure 11. In the top diagram, the control surface is in its trimmed state, whereas in the bottom diagram a state with $\Delta\alpha = \partial\alpha/\partial\delta \cdot \delta = 9°$ is shown. As it can be seen, the introduced approximations closely follow the original curves for the whole range of the angle of attack. It is worth noting that the above simplifications were chosen to make the SDC factorization of the system feasible.

The thrust generated by the propulsion is taken into account in a similar way as in the case of the quadrocopter; however, the dependence of the thrust coefficient on the advance ratio [11] is also taken into consideration in this case. For the sake of brevity, the corresponding equations are omitted here.

From the above discussion it is clear that the deflection of the control surfaces are related to the state of motion of the rigid wing aircraft in a complex manner. In order to reduce this complexity to some extent, the following approximations are also introduced.

1. The effect of the wind and induced velocities are neglected in equation (38).
2. During normal flight, only the z-component of the angular velocity $\boldsymbol{\omega}^{(\mathrm{B})}$ can be significantly different from zero. This means a further simplification to equation (38).
3. For the calculation of the rotation matrix $\mathbf{R}_{(\mathrm{A})}^{(\mathrm{S})}$ it is assumed that $V_y^{(\mathrm{S})}$ and $V_z^{(\mathrm{S})}$ are small compared to $V_x^{(\mathrm{S})}$. This results in a remarkable simplification of the symbolic expression of the rotation matrix $\mathbf{R}_{(\mathrm{A})}^{(\mathrm{S})}$.
4. The body of the aircraft can produce both lift and drag forces in reality. However, the former are neglected in the control model.

Control of the X8 UAV

The X8 is a commercially available foam airframe. An X8 aircraft assembled in the frame of our project is shown in Figure 12. The X8 is a flying wing aircraft, controllable by a single propulsion system located at the back of the body and two hinged control surfaces, one for each wing. A small winglet is present on the end of both wings.



Figure 12. AMORES X8 aircraft during flight

In the control system, it is assumed that the control signals drive the deflections of the control surfaces and to the angular velocity of the propeller through first order low-pass filters. The control signals are introduced as

$$\dot{\Omega} = \frac{1}{\tau_p}\left(u_p - \Omega\right), \tag{45}$$

$$\dot{\delta}^{\pm} = \frac{1}{\tau_\delta}\left(u^{\pm} - \delta^{\pm}\right). \tag{46}$$

Here Ω is the angular velocity of the propeller and u_p is its driving signal. The quantities $\delta^{\pm}$ symbolize $\delta_1 \pm \delta_2$, where δ_i is the deflection of the i-th control surface. The corresponding control signals are denoted by $u^{\pm}$. The time-constants of the low-pass filters are denoted by τ_p and τ_δ, respectively. The seventeen-dimensional state space consists of the position of the aircraft, its velocity represented in the body frame, the Rodrigues parameter triplet, the angular velocity of the body, the three control state variables (Ω, δ^+, and δ^-), the integral of the position error along the z-axis and the dummy variable x_d. Since the velocity of the body is expressed in the body frame equation (17) is replaced by the relation

$$\dot{\mathbf{v}}^{(\mathrm{B})} = \boldsymbol{\omega}^{(\mathrm{B})} \times \mathbf{v}^{(\mathrm{B})} + \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{aero}}} \mathbf{F}_i^{(\mathrm{B})} + \mathbf{R}_{\mathrm{DCM}}\mathbf{G}^{(\mathrm{E})}, \tag{47}$$

with N_{aero} denoting the total number of components creating aerodynamic forces. In our case $N_{\mathrm{aero}} = 4$ as the X8 airframe has two wings, a body, and one propulsion system. For the implementation of the control system, precise identification of the aircraft was also required. The most important parameters of the system were identified as listed in Table 2.

The control of the X8 aircraft was simulated inside Matlab utilizing the automatic factorization procedure again. To generate the reference signals, the so-called L1 guidance algorithm was used as defined in [12]. This simple guidance algorithm provides a lateral acceleration command based on the deviation from the desired trajectory.

Parameter	Notation	Value
Takeoff weight	m	3.2 kg
Moment of inertia matrix	$I^{(\mathrm{B})}$	$\langle 0.8, 0.06, 0.86\rangle$ kgm^2
Wing span	–	2.22 m
Wing areas	S_i	0.345 m^2
Specific lift coefficient	$C_{L\alpha}$	4.37 [−]
Minimal drag coefficient	C_{D0}	0.009 [−]
Critical angle of attack	α_s	13.5°
Effective control surface area	S_{ctr}	0.175 m^2
Control efficiency	$\partial\alpha/\partial\delta$	0.3 [−]
Nominal (trim) velocity	v_{nom}	12 m/s
Nominal angular velocity of propeller	Ω_{nom}	2750 RPM
Inertia of propulsion	I_p	$1.4 \cdot 10^{-3}$ kgm^2

Table 2. Identified parameters of the X8 aircraft

The results of the simulation are displayed in Figures 13 and 14. The flight plan consists of a number of waypoints, as shown in the left panel of Figure 13. The position of the aircraft is also displayed on the right hand side of the figure, where the reference signals are notated by dashed lines. As seen, the vehicle closely follows the reference path with a maximal deviation of around 10 meters.

The resulting Euler angles are displayed in the left panel of Figure 14. The reference signals are indicated by dashed lines again. The switching between waypoints are clearly visible in the reference signals. It is noted that in this case both the reference position and Euler angles are generated online during the simulation. The control state variables are shown in the right hand side of Figure 14. As it can be seen, the control is achieved by using both the deflectors and the propulsion, as expected. It is also seen that the control signals vary smoothly in time, which indicates that the dynamics of the controller are well fitted to the dynamics of the system. Comparing the deflections of the control surfaces and the Euler angles, the effect of the control on the attitude is clearly observable.

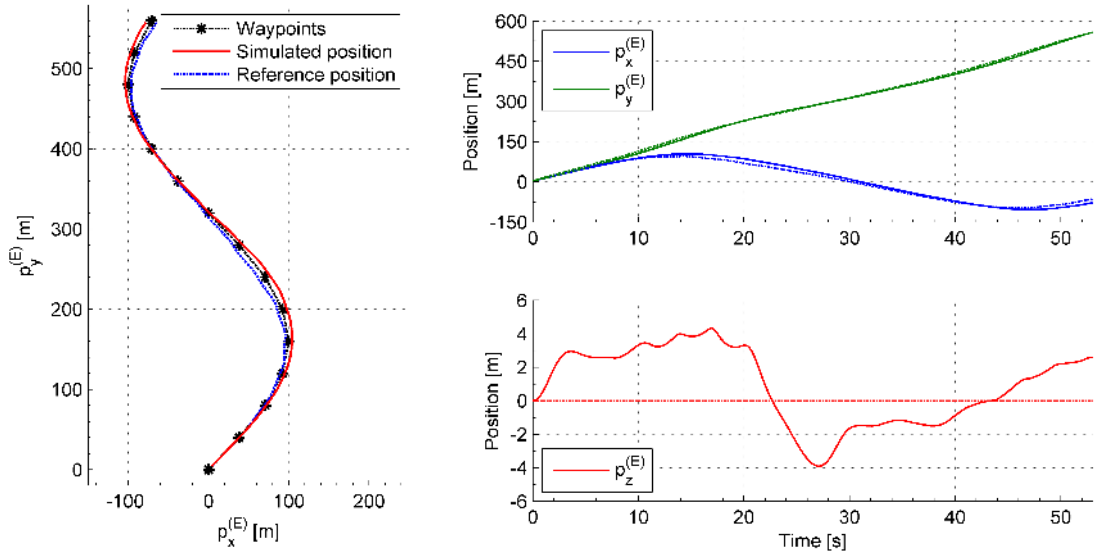


Figure 13. Simulated flight control of the X8 aircraft: waypoints and path (left), position signals (right)

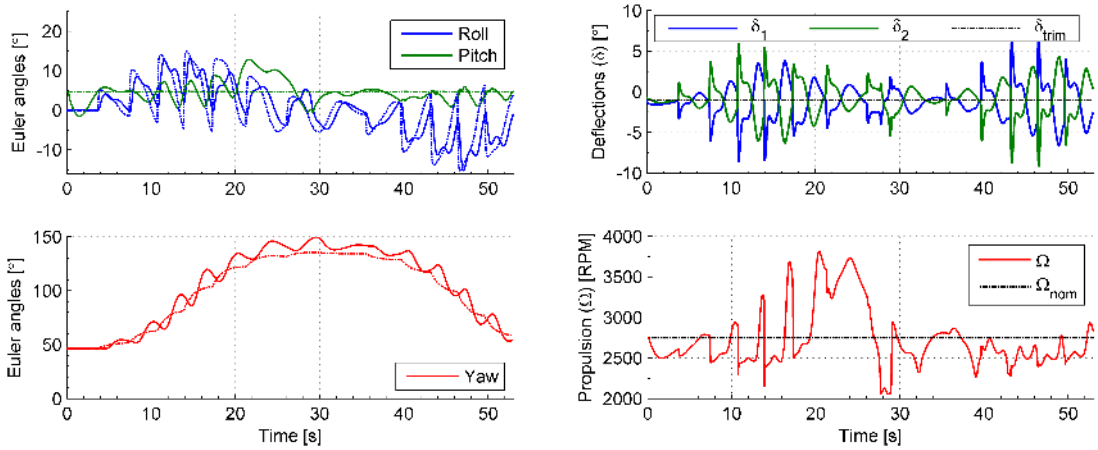


Figure 14. Simulated flight control of the X8 aircraft: Euler angles (left) and control variables (right)

Based on the above results it can be assessed that the proposed nonlinear control approach is applicable also in a rigid wing UAV control system. It should be emphasized that incorporating the aerodynamic force calculation represented by equations (38)–(44) introduces a great complexity in the control equations. The simulation results indicate that the proposed control method is capable of handling this enhanced complexity.

CONCLUSIONS AND OUTLOOK

In this paper a nonlinear control approach based on the state dependent Riccati equation (SDRE) method was introduced. For the generation of the state dependent coefficients (SDC) form of the system matrices an automatic symbolic factorization algorithm was proposed. This algorithm was utilized in different UAV control applications, including academic and real-life examples. It was shown that the suggested nonlinear control approach can overcome the limitations of common linear controllers and can provide an extended domain of stability. Several scenarios were tested during the study, including Matlab modeling and hardware-in-the-loop simulations. It was also demonstrated that the proposed control algorithm can also operate in an embedded hardware environment.

Case	**State space dimensions** n	**Number of terms in** $\mathbf{A}(\mathbf{x},\mathbf{u})$	**Number of terms in** $\mathbf{B}(\mathbf{x},\mathbf{u})$
Hypothetic 2D copter	11	64	2
DJI-F450 quadrocopter, $\mathbf{v}^{(\mathrm{B})}$	18	692	4
DJI-F450 quadrocopter, $\mathbf{v}^{(\mathrm{E})}$	18	1 356	4
X8 rigid wing aircraft	17	2 094	3

Table 3. SDC factorization properties of the UAV systems discussed in the paper

It was seen that the nonlinearity of the dynamic equations introduces a great complexity in the system. The number of factorized terms in the SDC form are summarized in Table 3 for the different UAV systems discussed in the paper. It is seen that the real-life examples involve several hundreds of terms, which would be rather tedious to evaluate manually. Thus, the automatic factorization procedure can be well exploited in real-life UAV control systems. It is worth mentioning that in the case of the DJI-F450 quadrocopter the choice of the coordinate frame for the acceleration equation – see equations (17) and (47) – results in a huge difference regarding the number of factorized terms. The two cases are denoted by $\mathbf{v}^{(\mathrm{E})}$ and $\mathbf{v}^{(\mathrm{B})}$ in the table, respectively.

The detailed mathematical analysis of the proposed factorization algorithm was out of the scope of this paper; however, the rigorous analysis of the resulting stability regions are indeed of great importance for validating the methodology. Another possibility for further studies is the method of constructing the weighting matrices $\mathbf{Q}$ and $\mathbf{R}$. To the best knowledge of the authors there are no general method for this issue, while the choice has a great influence on the performance of the resulting control system. These two particular issues have high priority in the short term research plan of the authors.

ACKNOWLEDGMENTS

The research presented in this paper was supported by the Hungarian government in the form of a KMR_12-1-2012-0121 Research and Development Project named “AMORES” (Autonomous Mobile Remote Sensing). The authors gratefully acknowledge this financial support. The authors also thank the contributions of I. Jankovics (identification of the DJI-F450 and X8 UAVs) and G. Firtha (implementation of the L1 guidance method).

REFERENCES

[1] Z. BELSŐ, B. GÁTI, I. KOLLER, P. RUCZ, A. TURÓCZI. Design of a nonlinear state estimator for navigation of autonomous aerial vehicles. Submitted for publication into the same volume.
[2] A. ISIDORI. Nonlinear control systems, Volumes I–II. Springer-Verlag, London, 1999.
[3] H. K. KHALIL. Nonlinear Systems, Prentice Hall, New Jersey, 2002.
[4] K. D. HAMMET. Control of Nonlinear Systems via State Feedback State-Dependent Riccati Equation Techniques, Dissertation, Air Force Institute of Technology, 1997.
[5] E. B. ERDEM. Analysis and Real-time Implementation of State-dependent Riccati Equation Controlled Systems. PhD thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2001.
[6] P. S. MAYBECK. Stochastic models, estimation and control: Volume 1. Academic Press, 1982.
[7] THE MATHWORKS INC. Matlab symbolic math toolbox. (online) url: http://www.mathworks.com/products/symbolic/ (2015.11.24.)
[8] A. J. LAUB. A Schur method for solving algebraic Riccati equations. IEEE Transactions on Automatic Control, 24(6):913–921, 1979.
[9] T. PAPPAS, A. J. LAUB, N. R. SANDELL. On the Numerical Solution of the Discrete-Time Algebraic Riccati Equation. IEEE Transactions on Automatic Control, 25(4):631–641, 1980.
[10] H. SCHAUB, J. L. JUNKINS. Stereographic orientation parameters for attitude dynamics: A generalization of the Rodrigues parameters. Journal of Astronautical Sciences, 44(1):1–19, 1996.
[11] T. GAUSZ, B. GÁTI. Merevszárnyú és többrotoros légi eszközök modellje precíziós repülési feladatok szimulációjához, 2013. AMORES projekt, kutatási jelentés.
[12] S. PARK, J. DEYST, AND J.P. HOW. A new nonlinear guidance logic for trajectory tracking. Proceedings of the AIAA Conference. on Guidance, Navigation, and Control, 2004.

NEMLINEÁRIS SZABÁLYZÓRENDSZEREK TERVEZÉSE ÉS MEGVALÓSÍTÁSA FORGÓ- ÉS MEREVSZÁRNYAS ROBOTREPÜLŐGÉPEKHEZ

Jelen cikk célja egy új módszer bemutatása robotrepülőgépek nemlineáris fedélzeti irányítási rendszereinek tervezéséhez és megvalósításához. A megoldandó feladat legfőbb kihívását a rendszer viselkedését leíró dinamikai egyenletek nemlineáris természete jelenti, mely egyben a megtervezendő szabályzó nagy komplexitásával is jár. Az általunk javasolt módszer egy automatikus állapotfüggő (SDC) faktorizációs eljáráson alapszik, mely képes a rendszeregyenleteket szimbolikus formában is kezelni. Az ennek segítségével létrejövő linearizált rendszerreprezentációt az állapotfüggő Riccati-egyenlet (SDRE) módszerrel oldjuk meg. A javasolt módszer alkalmazásának lehetőségeit a cikkben több példával is szemléltetjük.

***Kulcsszavak**: UAV, nemlineáris szabályzó, automatikus SDC faktorizáció, állapotfüggő Riccati-egyenlet (SDRE)*

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_3/2015-3-20-0240_Rucz_P_et_al.pdf

Gáti Balázs, Gausz Tamás, Jankovics István

REPÜLÉSMECHANIKAI MODELLEZÉS

Az irányítástechnika modern elméleti és gyakorlati eszközeinek fejlődésével a hagyományos és az ember nélküli repülő eszközök repülésmechanikai modellezése is egyre fontosabb szerepet kap. A repülésmechanikai modell keret egyenlete a repülő eszközhöz rögzített rendszerben felírt mozgásmennyiség és perdület megmaradásra épülő mozgásegyenlet rendszer. Ezt a leírást teszi teljessé a repülő eszközök pályáját és orientációját leíró, kinematikai modell. A – merev vagy forgószárnyas – repülő eszközök mozgását az aerodinamikai, tehetetlenségi és rugalmas erők, illetve nyomatékok határozzák meg. Ezek meghatározására több-felület modellt és a teljes állásszög tartományon számított légerő tényezőket vezetünk be, illetve utalunk az időben változó hatásokra is. Fontossága miatt külön foglalkozunk a légcsavarok hatásainak vizsgálatával. Az elméletek gyakorlati ellenőrzése történt meg több, ember nélküli repülő eszköz elektronikusan rögzített repülési adatainak kiértékelésével.

Kulcsszavak: *repülés mechanika, légcsavar, aerodinamikai modell, átesés, UAV*

BEVEZETÉS

A repülésmechanika első főfeladata a repülő eszköz adott vezérlés hatására bekövetkező mozgásának meghatározása. A második főfeladat pedig adott mozgásállapot (pl. pálya) eléréséhez szükséges vezérlés (pl. kormánykitérítések) meghatározását jelenti. Ebben a cikkben az első főfeladattal foglalkozunk, habár ez annak érdekében is történik, hogy – a megfelelő irányítástechnikai modell segítségével – meghatározott repülési feladatok teljesíthetők legyenek.

A repülőgépek, általában rugalmasak, vagyis a repülésmechanikai vizsgálatokban a viselkedésüket a deformálható testek mechanikájának tanítása alapján írhatjuk le. Az általános leírás leggyakrabban a mechanikai rendszerekre vonatkozó, Hamilton féle variációs elv alapján felírt Euler-Lagrange egyenlet-rendszerrel történik. Ennek egy, egyszerű esetre vonatkozó, konkrét alkalmazási példája lehet [8] III. fejezete, vagy VII.2. pontja.

A másik, gyakran alkalmazott lehetőség a mozgásmennyiség és a perdület megmaradás alapján felírt mozgásegyenlet rendszer alkalmazása. Rögtön le kell szögezni, hogy a két módszer végeredménye azonos – nincs kétféle dinamika. Erre, a rugalmas repülőgépre érvényes mód-szerre egy, igen egyszerű példa lehet [8] 6.1. számpéldája. Ebben a példában a merev és a rugalmas szárny együtt, az úgynevezett sajátlengésképek és a hozzájuk rendelt sajátkörfrekvencia felhasználásával, az általánosított tömegek és általánosított erők bevezetésével vizsgálható.

Jelen a munkában a repülő eszközt merevnek tekintettük, jóllehet a rugalmasság, különösen a szárnyak hajlító és csavaró mozgása jelentős hatással bír és ezeket a jövőben várhatóan figyelembe kell majd venni. Ez a kiterjesztés azonban, az amúgy is bonyolult mozgásegyenlet rendszert túlságosan nehezen kezelhetővé tette volna. Illetve, a rugalmasság figyelembe vételével mindenképpen számolni kellett volna a légerők és nyomatékaik időbeni változásának hatásával is. Ez pedig, jelenleg még nagyon nehezen kezelhető probléma.

AZ ALKALMAZOTT KOORDINÁTA RENDSZEREK

Bevezetésként megjegyezzük, hogy a merev testek kinematikájának tárgyalásában előfordul rotáció és orientáció. A rotáció, a mi értelmezésünkben az egyetlen koordináta rendszerben különböző helyzeteket elfoglaló merev test elfordulását jelenti. Orientációnak viszont egy koordináta rendszer egy másik, viszonyítási rendszernek tekintett koordináta rendszerhez képesti elfordulását nevezünk. A rotációval például a robottechnikai vizsgálatokban vagy a számító-gépes grafikában találkozhatunk. A repülés mechanikában viszont alapvetően az orientáció fordul elő. Ezért a következőkben a „forgatás" szót az orientációról írottak értelmében használjuk. Fontos leszögezni, hogy egy, adott rotációnak a neki megfelelő orientáció éppen az inverze.

A következő vizsgálatokban inercia rendszerként alkalmazzuk a Földhöz rögzített koordináta rendszert, bár ez inercia-rendszerként csak kisebb földrajzi távolságok esetén használható. Ezt a koordináta rendszert az x_E, y_E és z_E tengely-hármas határozza meg. Az x_E és y_E tengelyek a vízszintes síkban helyezkednek el, a z_E függőlegesen lefele mutat. A három tengely ortogonális, jobbrendszert alkot. Az origót a Föld felszínének egy pontjához rögzítjük. A pályaszámítás és az elfordulás (orientáció) meghatározása ebben a rendszerben történik.

Másodikként a testhez – repülő eszközhöz – rögzített koordináta rendszert definiáljuk: ezt, a szintén ortogonális, jobbsodrású rendszert az x_B, y_B és z_B tengelyek feszítik ki. Az x_B a repülőgép hossztengelye és az origót általában – hacsak ez lehetséges – a repülő eszköz súlypontjában rögzítjük. A test koordináta rendszer tengelyeihez képest a merevnek tekintett repülő eszköz pontjai – kivéve a légcsavarokat és például a kormánylapokat – nem mozdulnak el.

Harmadikként a forgó egységekhez – légcsavarokhoz – rögzített koordináta rendszert rögzítjük. A légcsavarokat, a nagy fordulatszámukra tekintettel, tárcsaként tekintjük, azaz a légcsavarokhoz rögzített koordináta rendszerek a test koordináta rendszerhez képest mozdulatlanok, végig a vizsgálat során valamilyen, eleve adott helyzetet foglalnak el. Minden légcsavarhoz saját, jobbsodrású, ortogonális koordináta rendszert rendelünk (x_{Pi}, y_{Pi} és z_{Pi} – ahol az x_{Pi} tengely az adott légcsavar gépszerkezettani forgástengelye, az y_{Pi}, z_{Pi} tengelyek pedig a forgássíkot feszítik ki). Az i=1,2...n értéket vesz fel, itt az „n" a forgó részek, légcsavarok száma.

Nagyon fontos kérdés a koordináta rendszerek közötti kapcsolat megadása. Mi, alapvetően az Euler szögek Tait-Bryan féle változatát használjuk ([4], [13]) – ebben az esetben a koordináta rendszerek közötti kapcsolatot rendre a z, y' és végül az x'' tengelyek körüli rész el-forgatások alapján meghatározható transzformációs mátrix adja meg. Tekintsünk két példát:

$$\underline{V}^E = \underline{\underline{M}}_{EB} \cdot \underline{V}^B \text{ vagy } \underline{\omega}_{Pi}{}^B = \underline{\underline{M}}_{BPi} \cdot \underline{\omega}_{Pi}{}^{Pi}; \quad (1)$$

Az (1) bal oldalán az „$\underline{\underline{M}}_{EB}$" transzformációs mátrix segítségével a „$\underline{V}$" repülési sebességet transzformáltuk a test (*B*) koordináta rendszerből a Fölhöz rögzített (*E*) rendszerbe. Az indexek a koordináta rendszerre utalnak: a sebességnél a jobb, felső index jelzi ezt; a mátrixnál a jobb, alsó index első része a cél rendszert, a második a kiinduló rendszert mutatja. Az (1) jobb oldalán – példaként – az i-edik légcsavar szögsebességét transzformáltuk a légcsavar saját koordináta rendszeréből (*Pi*) a test koordináta rendszerbe (*B*). Megjegyezzük, hogy ennek a második transzformációnak a mátrixa a vizsgálatainkban állandó.

Napjainkban elterjedten használják a kvaterniók módszerét. A „*q*” kvaterniót írhatjuk Hamilton féle alakban ((2) második tagja), skalár-vektor alakban ((2) harmadik tagja) és szám-négyesként ((2) negyedik tagja):

$$\mathrm{q} = \mathrm{e}_0 + \mathrm{e}_1\underline{\mathrm{i}} + \mathrm{e}_2\underline{\mathrm{j}} + \mathrm{e}_3\underline{\mathrm{k}} = \left(\mathrm{e}_0, \underline{\mathrm{e}}\right) = \{\mathrm{e}_0, \mathrm{e}_1, \mathrm{e}_2, \mathrm{e}_3\}; \tag{2}$$

A repülés mechanikában, az elforgatások leírására, kezelésére az egység kvaterniókat alkalmazzuk. Ezeket az alábbi, Euler paraméterek segítségével építhetjük fel:

$$\begin{aligned}
\mathrm{e}_0 &= \pm\left[\cos\left(\frac{\phi}{2}\right)\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\cos\left(\frac{\psi}{2}\right) + \sin\left(\frac{\phi}{2}\right)\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\sin\left(\frac{\psi}{2}\right)\right] \\
\mathrm{e}_1 &= \pm\left[\sin\left(\frac{\phi}{2}\right)\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\cos\left(\frac{\psi}{2}\right) + \cos\left(\frac{\phi}{2}\right)\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\sin\left(\frac{\psi}{2}\right)\right] \\
\mathrm{e}_2 &= \pm\left[\cos\left(\frac{\phi}{2}\right)\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\cos\left(\frac{\psi}{2}\right) + \sin\left(\frac{\phi}{2}\right)\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\sin\left(\frac{\psi}{2}\right)\right] \\
\mathrm{e}_3 &= \pm\left[\cos\left(\frac{\phi}{2}\right)\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\sin\left(\frac{\psi}{2}\right) + \sin\left(\frac{\phi}{2}\right)\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\cos\left(\frac{\psi}{2}\right)\right];
\end{aligned} \tag{3}$$

ahol: ϕ – a bedöntési szög, θ – a pályaszög és ψ – az irányszög – ezek az Euler szögek.

Az elforgatást jellemző „*q*” kvaternió skalár-vektor alakjában a skalár tag az elforgatási szög (δ) felének koszinusza, a „*t*” vektor pedig a forgatás tengelyét kijelölő egységvektor:

$$\mathrm{q} = \cos\frac{\delta}{2} + \underline{\mathrm{t}}\sin\frac{\delta}{2} = \mathrm{e}^{\underline{\mathrm{t}}\frac{\delta}{2}}; \tag{4}$$

A (4) kifejezés jobb oldalára írtuk az egység kvaternió speciális, Euler féle alakját. Ebből rögtön látszik, hogy az egység kvaternió inverze éppen a konjugáltja. Illetve az (1) szerinti elforgatást a megfelelő kvaternióval – itt a „*B*” rendszerből az „*E*” rendszerbe a következő módon lehet megvalósítani:

$$\underline{\mathrm{r}}^{\mathrm{E}} = \hat{\mathrm{q}}\underline{\mathrm{r}}^{\mathrm{B}} \Longrightarrow \underline{\underline{\mathrm{M}}}_{\mathrm{EB}} = \begin{bmatrix} \mathrm{e}_0^2 + \mathrm{e}_1^2 - \mathrm{e}_2^2 - \mathrm{e}_3^2 & 2(\mathrm{e}_1\mathrm{e}_2 + \mathrm{e}_0\mathrm{e}_3) & 2(\mathrm{e}_1\mathrm{e}_2 - \mathrm{e}_0\mathrm{e}_2) \\ 2(\mathrm{e}_1\mathrm{e}_2 - \mathrm{e}_0\mathrm{e}_3) & \mathrm{e}_0^2 - \mathrm{e}_1^2 + \mathrm{e}_2^2 - \mathrm{e}_3^2 & 2(\mathrm{e}_2\mathrm{e}_3 + \mathrm{e}_0\mathrm{e}_1) \\ 2(\mathrm{e}_0\mathrm{e}_2 + \mathrm{e}_1\mathrm{e}_3) & 2(\mathrm{e}_2\mathrm{e}_3 - \mathrm{e}_0\mathrm{e}_1) & \mathrm{e}_0^2 - \mathrm{e}_1^2 + \mathrm{e}_2^2 + \mathrm{e}_3^2 \end{bmatrix}; \tag{5}$$

A kvaterniókkal történő számolással kapcsolatban két problémát említünk. Az első a (3) egyenletben látható kettős előjel – ezt megfelelő konvencióval kell megoldani – azaz mindig az egyik, de ugyanazt az előjelet kell választani. A másik az, hogy az egység kvaterniónak a számolás során mindvégig – sok-sok számítási lépés után is, a számítási pontosságon belül – egységnyinek kell maradnia. Erre a követelményre pontosítási algoritmust építenek.

A repülő eszköz térbeli helyzetét mi a Földhöz rögzített koordináta rendszerben adjuk meg, jóllehet nagyobb léptékben gondolkozva, például nagyobb távolságok berepülésekor felmerülő navigációs feladatok megoldásához más rendszerek is szükségesek. Az elmozdulást az (1) kifejezés bal oldalán meghatározott $\underline{V_E^E}$ repülési sebesség összetevőinek integrálásával számítjuk. Az elfordulásokat (az orientációt) pedig a megfelelő szögsebesség összetevők ismeretében, szintén integrálással határozzuk meg. Az általunk alkalmazott Euler szögek esetében, ez a számítás a $\theta = \pm 90°$ esetén szinguláris válik – ezért érdemes például kvaterniók módszerét alkalmazni, amely módszer korlátozás nélkül alkalmazható. A térbeli helyzet és az elfordulások számítására elsőrendű, közönséges differenciálegyenletek szolgálnak – ezeket általában kinematikai egyenleteknek nevezzük.

A kinematikai kérdések között említjük meg a szél hatását. Ez, leggyakrabban a szélsebesség megadásával írható le, de általánosabb vizsgálat esetén a légtömegek forgását is figyelembe vehetjük. Ezt a hatást, a Földhöz rögzített koordináta rendszerben a következő módon lehet leírni:

$$\underline{\mathrm{V}}_{\mathrm{E}}^{\mathrm{E}} = \underline{\mathrm{V}}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{E}} + \underline{\mathrm{V}}_{\mathrm{W}}^{\mathrm{E}} \text{ és } \underline{\omega}_{\mathrm{E}}^{\mathrm{E}} = \underline{\omega}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{E}} + \underline{\omega}_{\mathrm{W}}^{\mathrm{E}}; \tag{6}$$

ahol:

- $\underline{V}_E^E$ a repülő eszköz abszolút (Földhöz viszonyított) sebessége;
- $\underline{V}_A^E$ a repülő eszköz aerodinamikai (levegőhöz viszonyított) sebessége;
- $\underline{V}_W^E$ a szél sebessége, a Földhöz viszonyított koordináta rendszerben;
- $\underline{\omega}_E^E$ a repülő eszköz abszolút (Földhöz viszonyított) szögsebessége;
- $\underline{\omega}_A^E$ a repülő eszköz aerodinamikai (levegőhöz viszonyított) szögsebessége;
- $\underline{\omega}_W^E$ a levegő szögsebessége, a Földhöz viszonyított koordináta rendszerben;

Megjegyzendő, hogy a szélsebesség, illetve a levegő szögsebessége valójában egy-egy fizikai mezőt jelent, melyeket térbeli, leginkább véletlenszerű eloszlásokkal jellemezhetünk.

A következő számításokban a repülő eszköz súlypontjának sebessége mellett szerepet kap majd egy-egy meghatározott pont sebessége is. Ez a test koordináta rendszer origójának – a súlypontnak – a sebességéből és a test szögsebességével számított, forgásból származó sebesség összegeként állítható elő (számoljunk a test koordináta rendszerben):

$$\underline{\mathrm{V}}_{\mathrm{E}}^{\mathrm{B}}(\mathrm{P}) = \underline{\mathrm{V}}_{\mathrm{E}}^{\mathrm{B}}(\mathrm{O}) + \underline{\omega}_{0}^{\mathrm{B}} \times \overrightarrow{\mathrm{OP}}^{\mathrm{B}} \tag{7}$$

ahol:

- $\underline{V}_E^B(P)$ a repülő eszköz „P ” pontjának abszolút sebessége;
- $\underline{V}_E^B(O)$ a repülő eszköz súlypontjának abszolút sebessége;
- $\underline{\omega}_0^B$ a repülő eszköz Földhöz viszonyított szögsebessége, szabad vektor;
- $\overrightarrow{OP}^B$ az origóból induló, a repülő eszköz „P ” pontjába mutató vektor.

Az (7)-ből az abszolút sebességet számíthatjuk – esetenként az aerodinamikai sebességre van szükség, ez (6) alapján számítható, illetve a használatos koordináta rendszerbe az (1)-ben bemutatott módon transzformálható.

A repülő eszközök vizsgálatának állapotteres modelljében, a kinematikai vizsgálatokból, általában a térbeli elmozdulást meghatározó három koordináta és az orientációt jellemző három szög származik.

A MOZGÁSEGYENLET RENDSZER

A mozgásmennyiség megmaradásán alapuló vektor differenciálegyenlet inercia rendszerben érvényes és kimondja, hogy a mozgásmennyiség (a tömeg és a sebesség szorzata) időegységre vonatkozó megváltozásának forrása a testre ható – itt a merev repülő eszközre ható – külső, eredő erő (a (8) egyenlet jobb oldalai). Feltéve, hogy a repülő eszköz tömege a repülés során nem változik, kapjuk a jobb oldalon álló, Newton II. törvénye néven ismert összefüggést:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}\left(\mathrm{m}\underline{\mathrm{V}}\right) = \underline{\mathrm{F}} \longrightarrow \dot{\mathrm{m}}\underline{\mathrm{V}} + \mathrm{m}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}\underline{\mathrm{V}} = \underline{\mathrm{F}} \longrightarrow \mathrm{m}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}\underline{\mathrm{V}} = \underline{\mathrm{F}} \longrightarrow \mathrm{m}\underline{\mathrm{a}}_{\mathrm{ABSZ}} = \underline{\mathrm{F}}; \tag{8}$$

Írjuk fel ezt a (8) egyenletet, úgy, hogy az abszolút gyorsulást a szállító és a relatív gyorsulás összegeként adjuk meg (9, baloldal). A (merev) testhez (mereven) rögzített koordináta rendszer miatt a relatív gyorsulás értéke nulla. Ebben az esetben az általában valamely szögsebességgel forgó koordináta rendszer kezdőpontjának, a Földhöz rögzített koordináta rendszerhez képesti, szállító gyorsulása az alábbi, jól ismert alakban írható. Használjuk az általában szokásos, test koordináta rendszert (9) jobb oldali kifejezése):

$$\mathrm{m}\left(\underline{\mathrm{a}}_{\mathrm{SZÁLL}}+\underline{\mathrm{a}}_{\mathrm{REL}}\right)=\underline{\mathrm{F}}\longrightarrow \mathrm{m}\left(\frac{\delta}{\delta \mathrm{t}}\underline{\mathrm{V}}_{\mathrm{E}}^{\mathrm{B}}+\underline{\underline{\omega}}_{\mathrm{E}}^{\mathrm{B}}\times\underline{\mathrm{V}}_{\mathrm{E}}^{\mathrm{B}}\right)=\underline{\mathrm{F}}^{\mathrm{B}}; \tag{9}$$

ahol:

- m a test – repülő eszköz – tömege;
- $\underline{a}_{ABSZ}$ a test egy pontjának, gyakran a súlypontnak az abszolút gyorsulása;
- $\underline{a}_{REL}$ a test egy pontjának a relatív gyorsulása;
- $\underline{a}_{SZÁLL}$ a test koordináta rendszer origójának a (szállító) gyorsulása;
- $\underline{F}^{B}$ a külső erők (súlyerő + légerők + propulziós erők) eredője, a test koordináta rendszerben;
- $\delta \underline{V}_E^B/\delta t$ a repülési sebesség idő szerinti megváltozása, a test koordináta rendszerben;
- $\underline{\omega}_E^B \times \underline{V}_E^B$ a repülési sebesség szállító megváltozása, a test koordináta rendszerben.

A repülő eszköz mozgásának vizsgálatában explicit differenciálegyenletet írunk fel – a (9) egyenletet átrendezve írható:

$$\dot{\underline{\mathrm{V}}}_{\mathrm{E}}^{\mathrm{B}}=\left(\underline{\mathrm{F}}^{\mathrm{B}}/\mathrm{m}\right)-\underline{\underline{\omega}}_{\mathrm{E}}^{\mathrm{B}}\times\underline{\mathrm{V}}_{\mathrm{E}}^{\mathrm{B}}; \tag{10}$$

A perdület megmaradására épülő, gyakran nyomatékinak is nevezett vektor differenciálegyenlet, nem inercia rendszerre vonatkozó (egy lehetséges) alakja – első lépésben koordináta rendszert nem kijelölve – az alábbi:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}\underline{\pi}=\left(\underline{\mathrm{r}}\times\underline{\mathrm{F}}\right)\longrightarrow\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}\left(\underline{\underline{\Theta}}\underline{\omega}\right)+\sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}}\left(\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}\underline{\pi}_{\mathrm{FT,i}}\right)=\underline{\mathrm{M}}_0-\left(\underline{\rho}_{\mathrm{S}}\times\underline{\mathrm{a}}_0\right)\mathrm{m} \tag{11}$$

ahol:

- $\underline{\pi}=\underline{\underline{\Theta}}\underline{\omega}$ a perdület vektora, illetve ennek idő szerinti deriváltja;
- $\underline{r}\times\underline{F}=\underline{M}_0$ az külső, eredő erő test koordináta rendszer origójára vonatkozó nyomatéka;
- $\underline{\underline{\Theta}}$ a repülő eszköz tehetetlenségi tenzora;
- $\underline{\omega}$ a test (repülő eszköz) szögsebessége;
- $\underline{\pi}_{FT,i}$ az i-edik (összesen n darab) forgó elem saját perdülete, illetve ennek idő szerinti megváltozása;
- $\underline{\rho}_S$ a súlypont helyvektora (például $\underline{\rho}_S^B$ a testhez rögzített koordináta rendszerben);
- $\underline{a}_0$ a választandó koordináta rendszer kezdőpontjának gyorsulása.

A (11) egyenletet lényegében mindig a testhez rögzített koordináta rendszerben írjuk fel. Mivel ez egy olyan koordináta rendszer, amely forgó mozgást is végez, azért az idő szerinti deriválást a (9) egyenletnél már bemutatott módon a relatív és a szállító megváltozás összegeként írjuk.

Vegyük figyelembe, hogy a tehetetlenségi tenzor a test koordináta rend-szerben állandó (leginkább ezért használjuk ezt a rendszert), és legyen a koordináta rendszer origója pontosan a súlypont, akkor ((12)-ben minden mennyiséget a test koordináta rendszerben adunk meg):

$$\underline{\underline{\Theta}}^{B}\frac{\delta}{\delta t}\underline{\omega}_0^B+\left(\underline{\omega}_0^B\times\underline{\underline{\Theta}}^{B}\underline{\omega}_0^B\right)+\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\delta}{\delta t}\underline{\pi}_{\mathrm{FT,i}}^{B}+\underline{\omega}_0^B\times\underline{\pi}_{\mathrm{FT,i}}^{B}\right)=\underline{M}_0^B; \tag{12}$$

ahol:

- $\underline{\omega}_0^B$ a repülő eszköz egészének a szögsebessége;
- $\underline{\pi}_{\mathrm{FT,i}}^{B}=\underline{\underline{M}}_{BPi}\left[\underline{\underline{\Theta}}_{Pi}^{Pi}\left(\underline{\underline{M}}_{PiB}\underline{\omega}_0^B+\underline{\omega}_{Pi}{}^{Pi}\right)\right]$, az „i"-edik légcsavar perdülete;
- $\underline{\underline{M}}_{BPi}=\underline{\underline{M}}_{PiB}^{T}$ a légcsavar és a test koordináta rendszer közti transzformáció mátrixa.

Felhasználva a mátrix szorzás asszociativitását, fejezzük ki (12)-ből a szögsebességek idő szerinti deriváltját:

$$\dot{\underline{\omega}}_0^B=\underline{\underline{R}}^{-1}\left\{\underline{M}_0^B-\underline{\omega}_0^B\times\left(\underline{\underline{\Theta}}^{B}\underline{\omega}_0^B\right)-\sum_{i=0}^{n}\underline{\underline{M}}_{BPi}\left(\underline{\underline{\Theta}}_{Pi}^{Pi}\dot{\underline{\omega}}_{Pi}^{Pi}\right)\right\}-$$

$$-\underline{\underline{R}}^{-1}\left\{\sum_{i=1}^{n}\underline{\underline{M}}_{BPi}\left[\left(\underline{\underline{M}}_{PiB}\underline{\omega}_0^B\right)\times\left(\underline{\underline{\Theta}}_{Pi}^{Pi}\left(\underline{\underline{M}}_{PiB}\underline{\omega}_0^B+\underline{\omega}_{Pi}{}^{Pi}\right)\right)\right]\right\}; \tag{13}$$

ahol:

- $\underline{\underline{R}}=\underline{\underline{\Theta}}^{B}+\sum_{i=1}^{n}\underline{\underline{M}}_{BPi}\,\underline{\underline{\Theta}}_{Pi}^{Pi}\underline{\underline{M}}_{PiB}$ a mátrix elemeinek számértéke egy-egy repülési esetre állandó.

Tekintsük a repülő eszköz úgynevezett, „$\underline{x}$" állapot vektorát. Ennek eleme – többek között – a három sebesség és szögsebesség összetevő, illetve a légcsavarok szögsebessége is. Tekintsük továbbá a vezérlő jellemzőkből alkotott „$\underline{u}$" vektort. Legyen végül „$\underline{z}$" a környezeti jellemzők vektora. Ez például a szélsebességet – amely rendszerint véletlenszerűen változik – is magában foglalja. A repülő eszközre ható külső erők – melyek mindegyike kötött vaktor, azaz egy, meghatározott hatásvonallal bírnak – általában az állapot vektor, a vezérlő vektor és a környezeti jellemzők függvényében állnak elő:

$$\underline{\mathrm{F}}=\underline{\mathrm{F}}(\underline{\mathrm{x}},\underline{\mathrm{u}},\underline{\mathrm{z}},\dots) \tag{14}$$

Különösen igényes számításoknál figyelembe lehet venni azt, hogy egyes aerodinamikai erők nem csak a pillanatnyi állapottól, hanem – például a leúszó örvények hatásának figyelembe vétele miatt – az elmúlt állapotoknak is a függvényei (ebben az értelemben retardált rendszerrel számolhatunk). A (14)-ben szereplő „$\underline{F}$ " erő a súlyerő, az aerodinamikai erők (ellenállás erő és felhajtóerő eredője) és a propulziós erők összege. A perdület megmaradási egyenletben szereplő nyomaték pedig a (14) szerint számított külső erőknek a választott koordináta rendszer origójára vonatkozó nyomatéka.

Ezzel rendelkezésünkre áll a (10) és (13), két, közönséges, explicit, normált differenciálegyenlet rendszer – ezekből (a test koordináta rendszerben) a sebesség összetevők és a szögsebesség összetevők idő szerinti deriváltja (azaz a gyorsulások és szöggyorsulások) meg-határozhatók. Ezen jellemzők integrálásával követhető a sebesség és a szögsebesség idő szerinti lefutása. További integrálással pedig a repülő eszköz helyzete és orientációja számítható.

AERODINAMIKAI MODELL

Célunk egy olyan szimuláció létrehozása volt, melynek felhasználásával különböző kialakítású és működési elvű légi eszközök széles skálájának szimulálására válunk képessé.

A fent ismertetett mozgásegyenlet rendszer megoldásához szükségünk van a szimulált légi eszközre ható külső erők és nyomatékok meghatározására a mozgásegyenlet által megkövetelt koordináta rendszerben.

Az eszközre ható külső erők kezelésére több megoldás ismeretes. Kezelhetjük az azonos jellegű erőket együttesen, mint a teljes gépre ható erők eredőjeként, pl. az ellenállás erő esetén a teljes repülőgép ellenállását vesszük figyelembe, melyet egy a teljes repülőgépet reprezentáló ellenállás tényező formájában adunk meg. Az erő által a súlypontra kifejtett nyomatékot pedig külön nyomatékként, egy külön nyomatéki tényezővel adunk meg. Ennek a módszernek hátránya, hogy minden helyzetet külön tényezőkkel és derivatívokkal kell megadni annak érdekében, hogy minden paraméter változását (állásszög, csúszási szög, kormánykitérítések, stb.) figyelembe vegyük [15]. Emellett a különböző típusú eszközök szimulálása más és más modell felírását igényelné, melynek kezelése nehézkessé válna, egyenként kellene őket leprogramoznunk.

Lineáris modellek esetén a tényezőkkel és derivatívokkal felírt modell megfelelő módszer, azonban széles üzemmód tartományokon ez a megoldás már nem, vagy csak igen nehezen számítható, mert minden egyes tényezőt és derivatívot az adott repülési helyzetnek megfelelően kellene megadni.

Moduláris felépítésű több felület modell

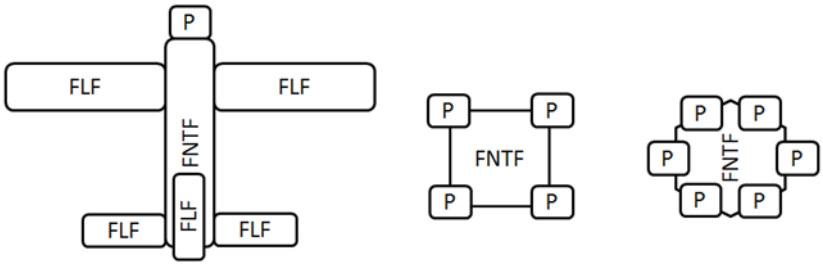
A fent említett problémák kiküszöbölésére, vagy legalábbis azok mérséklésére alkalmaztuk a moduláris felépítésű modellt, melynek alkalmazásával egymástól lényegesen eltérő felépítésű modelleket is képesek vagyunk szimulálni. Míg egy merevszárnyú repülőgép fő alkotóelemei a szárnyak, vezérsíkok, a törzs és a hajtást adó motorok és légcsavarok, addig a multikopterek esetén ez csak motorokra, légcsavarokra és törzsre redukálódik. A kétféle eszköz működése és alapvető paraméterei is jelentősen eltérnek egymástól.

Az általunk szimulált merev testre ható erőket és nyomatékokat a következők adják:

- súlyerő;
- felhajtóerőt létrehozó felületek (FLF);
- felhajtóerőt nem termelő felületek (csak ellenállást okoz felületek) (FNTF);
- propulziós rendszer (motor és légcsavar együttese) (P).

A súlyerő kivételével mindegyik elemre létrehoztunk egy általánosított modult, melyek együttes alkalmazásával felépíthető egy tetszőleges kialakítású repülőgép modell.

A felhajtóerőt létrehozó felületek modult alkalmazhatjuk a szárnyak, vezérsíkok, vagy különálló kormányfelületek modellezésére. A felhajtóerőt nem termelő felületeket, a csak ellenállás termelő elemek, mint pl. a törzs, vagy egyéb külső függesztmények modellezésére használhatjuk. A propulziós rendszert pedig a merevszárnyú repülőgépeken és multikoptereken alkalmazott motorok modellezésére használhatjuk.



1. ábra Hagyományos elrendezésű egymotoros merevszárnyú repülőgép, quadcopter és hexacopter moduláris modelljének felépítése

Az egyes felületeken ébredő légerőket a felület AC (aerodinamikai középpontjában) vesszük fel. A felületet érő áramlás irányát és sebességét is ebben a pontban számított megfúvás jellemzőiből határozzuk meg test koordináta rendszerben (ezért a B indexet elhagyjuk az összefüggéséből).

$$\underline{V}_{AC} = \underline{V} + \underline{\omega} \times \underline{r}_{AC} - \underline{V}_{wind} - \underline{V}_{ind} \tag{15}$$

Bevezetve a felület koordináta rendszerét, melyet a felület test koordináta rendszerhez képesti beállítási illetve V-belállítási szögének felhasználásával kapunk, számíthatjuk a felület megfúvási sebesség vektorát az AC pontban.

$$\underline{V}_{AC}^{S} = \underline{\underline{M}}_{SB} \cdot \underline{V}_{AC}^{B} \tag{16}$$

Az AC pontbeli sebességvektor ismeretében már számítható az állásszög, a csúszási szög, valamint az eredő megfúvási sebesség. Ennek segítségével meghatározhatók a légerők és nyomatékok a felület szél koordináta rendszerében, ezeket már csak át kell számítani a mozgásegyenlet megoldásához szükséges test koordináta rendszerbe.

$$\underline{F}^{B} = \underline{\underline{M}}_{BS} \cdot \underline{\underline{M}}_{SW} \cdot \underline{F}^{W} \tag{17}$$

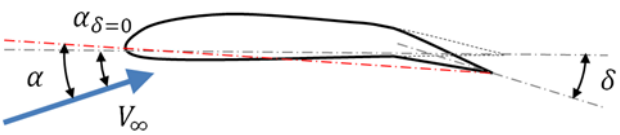
A felületen ébredő nyomatékok:

$$\underline{M}^{B} = \underline{\underline{M}}_{BS} \cdot \underline{\underline{M}}_{SW} \cdot \underline{M}^{W} + \underline{r}_{AC} \times \underline{F}^{B} \tag{18}$$

Kormányfelületek

Következő fontos feladat a szimulált eszközök irányíthatóságát biztosító kormányzás megvalósítása. A szimulációban a kormányzás definiálására alapvetően két módszer lehetséges, de felhajtóerő termelő felületenként csak egy kormány és kormányzási mód definiálható.

Az első módszer a kormánylap definiálására, hogy egy hagyományos, a felület kilépőélén elhelyezett, lefelé és felfelé is kitéríthető lap kerül definiálásra, mellyel szimulálható a kormány, vagy az ívelőlap hatása. Definiáláskor a kormánylap geometriai jellemzőin túl (pl.: húrhossz, fesztáv) egy úgynevezett kormányhatásosságot is definiálni kell.



2. ábra Hagyományos kormánylap

A modell a kormánylap kitérítés hatását állásszög változásként írja le, amihez a kormányhatásosságot az állásszög kormánykitérítési szög deriváltjaként definiálhatjuk, és a (19) szerint számíthatjuk.

$$\alpha = \alpha_{\delta=0} + \frac{\partial \alpha}{\partial \delta} \cdot \delta \tag{19}$$

Másik módszer a külön kormánylap nélküli, osztatlan, felhajtóerőt termelő felület elforgatásával (balansz kormány) teszi lehetővé a szimulált repülőgép kormányzását úgy, hogy ezzel közvetlen módon befolyásolja a felület állásszögét.



3. ábra Osztatlan felületként működő kormánylap állásszögének értelmezése

A teljes felület állásszöge a közepes aerodinamikai húrnál a repülőgép testkoordináta rendszerben értelmezett építési vízszinteséhez mért állásszögének, a felület beállítási szögének függvényében számolható.

$$\alpha = \alpha_{\mathrm{FRL}} + \mathrm{i}_{\mathrm{base}} + \delta \tag{20}$$

Ahol α_{FRL} a test koordináta rendszerben értelmezett állásszög, i_{base} a felület 0°-os kormánykitéréshez tartozó állásszöge, δ pedig kormánylap kitérítésének szöge.

Indukált sebesség

Minden felhajtóerőt termelő hordfelület megváltoztatja az áramlás irányát (indukált sebesség), így minden felület hat az áramlás irányában mögötte elhelyezkedő felületet érő áramlás irányára és nagyságára is. Abból a közelítésből kiindulva, hogy egy szimmetrikus hordfelület a teljes fesztávolságával megegyező átmérőjű áramcsőben áramló levegőre van hatással, az indukált sebességet a következő kifejezéssel közelíthetjük a hordfelület szél koordinátarendszerében:

$$\underline{\mathrm{V}}_{\mathrm{ind}} = \frac{-2 \cdot (\underline{\mathrm{F}} + \Delta \underline{\mathrm{F}})}{2 \cdot \rho \cdot \left(\frac{\mathrm{b}}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot |\underline{\mathrm{V}}|} \tag{21}$$

ahol b a teljes fesztávolság, ρ a levegő sűrűsége, $\underline{V}$ a felületet érő áramlás sebességvektora, $\underline{F}$ és $\Delta\underline{F}$ a felületen és a kormánylapon ébredő erő.

Az így kapott indukált sebességet hozzá kell adni a hordfelület mögött található hordfelületek megfúvási irányához, a megfelelő koordináta transzformációk után. Ezzel pl. a szárny mögött elhelyezkedő vezérsíkon ébredő erő pontosabban számolható, ami hatással van a gép stabilitására is.

A szimuláció tetszőleges konfigurációjú gépek modellezésére kellett, hogy alkalmas legyen, így az algoritmust és a bemenő paramétereket úgy kellett kialakítani, hogy komolyabb, a felhasználó beavatkozását igénylő algoritmusbeli módosítások nélkül is képes legyen ellátni a feladatát. Ehhez egy kapcsolati mátrix került definiálásra a repülőgép tulajdonságait leíró paraméterek között, melyben a repülőgép definiálásakor megadható, hogy mely felületek hatnak egymásra a normális repülési helyzetben. Ez a megoldás bár egyszerű, de korlátai között meg kell

említeni, hogy a normál repülési helyzettől jelentősen eltérő repülési manőverek esetén pontatlan eredményt ad. Ezért a későbbiekben egy olyan futásidőben futó algoritmus kialakítása és szimulációba építése lesz szükséges, ami a pillanatnyi repülési helyzetnek megfelelően képes a kapcsolati mátrix elemeit változtatni az egymásra hatás pontosabb leírása érdekében.

Átesés után

Célként tűztük ki, hogy a szimuláció széles repülési tartományban szolgáltasson eredményeket, így lehetővé téve, hogy ne csak egy előre definiált trimmhelyzet körüli szűk tartományban legyen alkalmas a repülés szimulálására. Ennek érdekében felhajtóerő tényező és ellenállás tényező értékeit az állásszög függvényében 0-360°-is tartományon kívántuk megadni. Ehhez az állásszög három tartományra osztottuk.

Átesés előtti tartomány

Ebben a tartományban a felhajtóerő tényező jellemzően lineáris, melyet egy meredekséggel tudunk leírni.

$$\mathrm{C_L} = \mathrm{C_{L\alpha}} \cdot \alpha \tag{22}$$

Egy adott geometriájú hordfelület esetében a $C_{L\alpha}$ értéke szélcsatorna adatokra vagy valamilyen aerodinamikai számítás (CFX, XFLR5, Tornado stb.) eredményeire alapulhat.

Az ellenállás tényezőt a következő képlet alapján számoljuk:

$$\mathrm{C_D} = \mathrm{C_{D0}} + \frac{\mathrm{C_L^2}}{\pi \cdot \mathrm{AR} \cdot \mathrm{Osw}} \tag{23}$$

A nulla felhajtóerőhöz tartozó ellenállás (C_{D0}) és az Oswald faktor (Osw) értékét külső forrásokból származó adatok alapján kell meghatározni, melyek lehetnek akár valamilyen számítás eredményei is. A karcsúság (AR) értéke szimmetrikus hordfelület esetén a hordfelület fél fesztávolságával számolt karcsúság kétszerese.

A szárnynyomatéki tényező egy C_{m0} konstans értékkel jól leírható, melyet a hordfelület geometriája alapján külső forrásokból lehet meghatározni.

Átesés utáni tartomány

Ebben a tartományban a hordfelületek légerő tényezőit a síklap karakterisztikájával közelítettük, melynél a jellemzőket elsődlegesen a szárnykarcsúság határozza meg, nem pedig az alkalmazott profil jellemzői [11].

Eszerint a felhajtóerő tényező:

$$\mathrm{C_L} = \frac{\mathrm{C_{Dmax}}}{2} \cdot \sin 2\alpha + \mathrm{A_2} \cdot \frac{\cos^2 2\alpha}{\sin \alpha} \tag{24}$$

ahol

$$\mathrm{A_2} = (\mathrm{C_{Ds}} - \mathrm{C_{Dmax}} \cdot \sin \alpha_\mathrm{S}) \cdot \frac{\sin \alpha_\mathrm{s}}{\cos^2 \alpha_\mathrm{s}}) \tag{25}$$

Az ellenállás tényező:

$$\mathrm{C_D} = \mathrm{C_{Dmax}} \cdot \sin^2 \alpha + \mathrm{B_2} \cdot \cos \alpha \tag{26}$$

ahol

$$C_D = 1{,}11 + 0.018AR \tag{27}$$

$$B_2 = \frac{C_{Ds} - C_{Dmax} \sin^2 \alpha_s}{\cos \alpha_s} \tag{28}$$

Ahol az s index a kritikus állásszögre utal.

Átmeneti tartomány

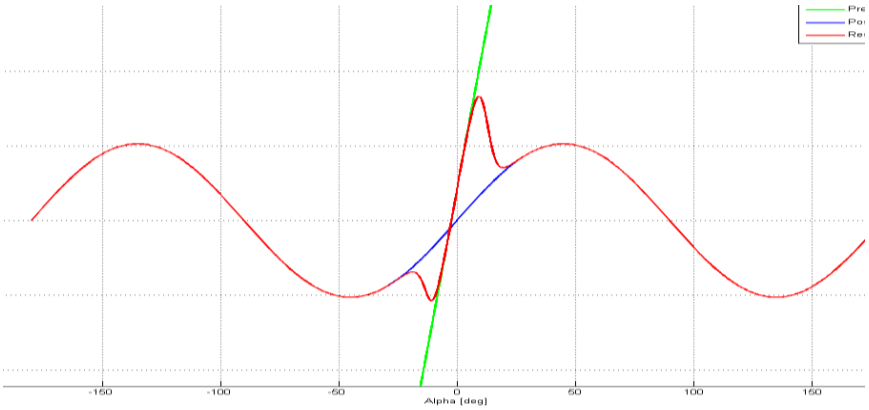
Az átesés előtti és átesési után tartományt összekötő szűk tartományon a [3] alapján egy szigmoid átmeneti függvényt alkalmaztunk:

$$\sigma(\alpha) = \frac{1 - e^{-M(\alpha - \alpha_s)} + e^{M(\alpha + \alpha_s)}}{(1 + e^{-M(\alpha - \alpha_s)}) \cdot (1 + e^{M(\alpha + \alpha_s)})} \tag{29}$$

Így a keresett tényező megkapható

$$C(\alpha) = [1 - \sigma(\alpha)] \cdot C_{pre}(\alpha) + \sigma(\alpha) \cdot C_{post}(\alpha) \tag{30}$$

Ezek alapján a statikus felhajtóerő tényező állásszög diagram a 4. ábrán látható módon alakul.

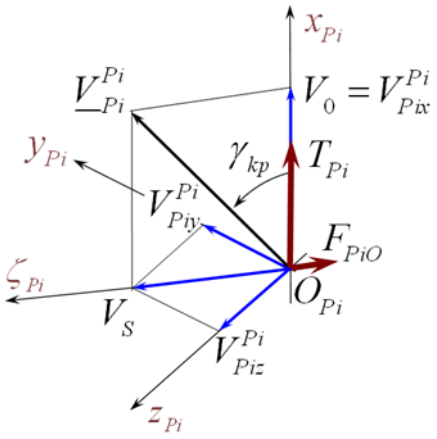


4. ábra Felhajtóerő tényező a teljes állásszög tartományon

A LÉGCSAVAR MODELL

Propulziós erőt valamely, arra alkalmas szerkezet – például légcsavar, gázturbina, reaktív hajtómű – hoz létre. A vizsgálatainkban részletesebben, a hazai viszonyok között adódó feladatoknál legjelentősebbnek mondható légcsavarokkal foglalkozunk (nem túl ritkák az olyan repülő eszközök, amelyek négy vagy akár nyolc légcsavarral is rendelkeznek). Tekintsünk példaként egy légcsavart, illetve az ahhoz rendelt koordináta rendszer origóját. Ennek a pontnak a levegőhöz viszonyított sebességét (7)-nél leírtak szerint határozzuk meg.

Bontsuk fel a levegőhöz viszonyított sebességet tengelyirányú (V_0) és a forgássíkba eső (V_S) összetevőre (az egyszerűség kedvéért tekintsük a nulla szélsebesség esetét):



5. ábra Sebességek és erők a légcsavar koordináta rendszer origójában

Ennek megfelelően a légcsavaron keletkező erő a tengelyirányú (hagyományosan propulziós-nak nevezett erő – F_{Pi}) és oldalirányú (F_{PiO}) összetevőre bontható fel. A következőkben ezen erők számításával foglakozunk, de a végeredményt dimenziótlan alakban is keressük. A vizsgálatot – amely részletesen nem közölhető – főképpen [7], [9] és [10]-re alapozzuk.

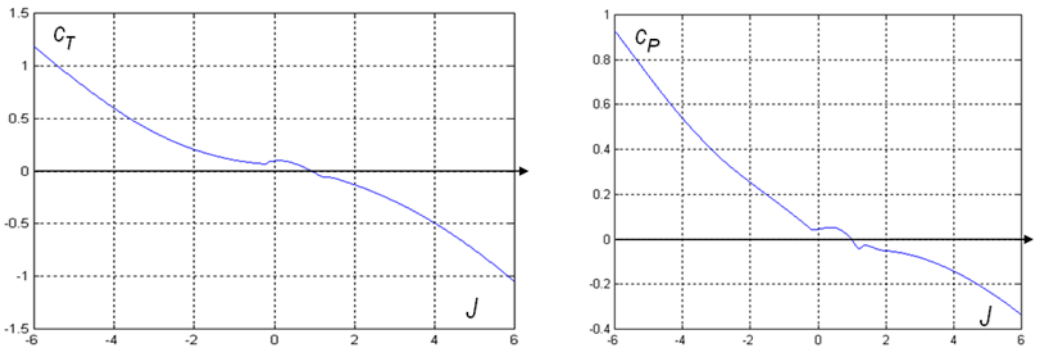
A propulziós erő, a nyomaték és a forgatáshoz szükséges teljesítmény számítása

A tengelyirányú átáramlás vizsgálatára a [9]-ben, illetve [10]-ben leírtak szerint, a hagyományostól (pl. [13]-ban leírt eljárás) kissé eltérő, Schmitz eljárást választottuk. A vonóerő, illetve a felvett teljesítmény számértékéből az alábbi, általánosan használható, dimenziótlan tényezőket alkalmazzuk:

$$c_T = T/\left(\rho n_{mp}^2 D^4\right) \text{ és } c_P = P/\left(\rho n_{mp}^3 D^5\right); \tag{31}$$

A szimulációhoz szükség van a szimulálni kívánt repülő eszközön működő légcsavar geometriai és működési jellemzőire. Itt, példaként az APC 14x10E jelű légcsavarra elvégzett számítás eredményeit mutatjuk be (6. ábra).

A számítás nem érvényes az örvénygyűrű állapotra. A szimulációban ezt a [14]-ben adott mérés eredményeinek középértéke alapján számítottuk, úgy, hogy amint az a 6. ábrán is látható, a görbék folytonosak legyenek.



6. ábra Légcsavar vonóerő és teljesítmény tényezője, az előrehaladási fok függvényében

Az oldalirányú erő

A repülő eszközök repülése során a légcsavart (légcsavarokat) a legritkább esetben éri pontosan szemből a légáram; általában ferde megfúvásban működnek (5. ábra). A következőkben feltesszük, hogy az oldalirányú megfúvás sebessége a tengelyirányú megfúvás sebességéhez képest kicsi, illetve az oldalirányú levegősebesség összetevő jelentősen kisebb, mint a légcsavar lapátok lapátvég sebessége.

Az itt következő megfontolás, illetve számolás elméleti jellegű, ellenőrzése, elmélyítése méréssel lenne lehetséges. Tegyük fel, hogy oldalirányú erő keletkezik a légcsavar sugár irányának megváltozása, illetve az oldalirányú áramlás miatti tárcsasúrlódás következtében. A második erő-összetevő számítása a következő módon lehetséges:

$$F_{o1} = \frac{\rho}{2} V_s^2 \frac{D^2\pi}{4} c_{D0}; \tag{32}$$

Vagyis feltesszük, hogy az alak-ellenállás csak a V_s oldalirányú megfúvásból következik, illetve, feltesszük, hogy c_{D0} az alak-ellenállás tényező értéke; a szimulációkban 0.05 számértékkel közelítettük.

Feltesszük, hogy a súrlódás miatti mozgásmennyiség csere miatt csökkenti az oldalirányú megfúvási sebességet. Vagyis feltettük, hogy a tengelyirányban számított tömegáram helyett az oldalirányú sebességgel számított tömegáramot kell figyelembe venni. A fenti kifejezés rögtön a kétszeres indukált sebességet adja – emiatt a mozgásmennyiség változásból származó oldalerő értéke:

$$F_{02} = \dot{m}\Delta V_s = \dot{m}\frac{F_{o1}}{\dot{m}}\frac{V_0}{V_s} = F_{o1}\frac{V_0}{V_s} = \frac{\rho}{2} V_s^2 \frac{D^2\pi}{4} c_{D0}\frac{V_0}{V_s} = \frac{\rho}{2} V_s \frac{D^2\pi}{4} c_{D0}|V_0|; \tag{33}$$

A fenti kifejezés utolsó tagjában a V_0 sebesség abszolút értékét vettük, mivel ez a sebesség pozitív és negatív egyaránt lehet, miközben az eredő oldalirányú erő mindig a V_s sebesség-összetevő egyenesén fekszik és vele ellentétes értelmű. Az eredő erő a két rész összege, számértéke, a választott számértékek esetében, a feltételeink mellett, a tengelyirányú erőnek a töredéke.

Ezzel a légcsavaron keletkező eredő erő, az adott légcsavarhoz kötött koordináta rendszerben kiszámolható. A szimulációban ezeket az erőket (is) a test koordináta rendszerbe számoljuk át:

$$\underline{F}_{Pi}^{B} = \underline{\underline{M}}_{BPi}\underline{F}_{Pi}^{Pi} = \underline{\underline{M}}_{BPi}\begin{bmatrix} T_{Pi} \\ F_{PiOY} \\ F_{PiOZ} \end{bmatrix}; \tag{34}$$

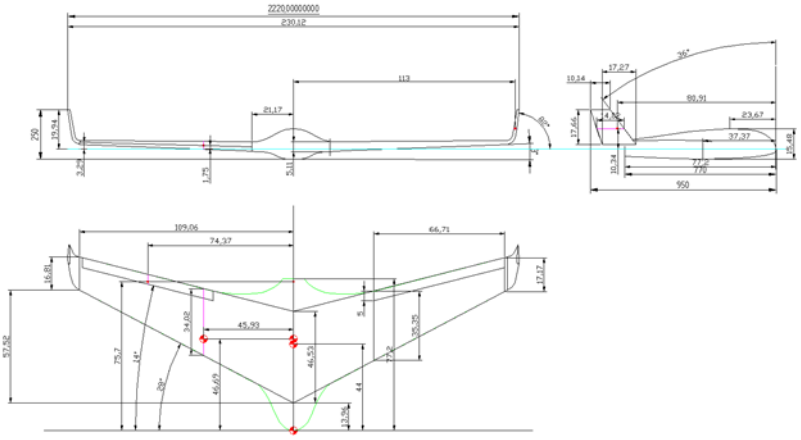
Az erőket tehát a megfelelő légcsavar koordináta rendszer origójában érvényes sebesség alapján meghatározott előrehaladási fok függvényében, a (31), illetve (34) alapján határozzuk meg. A test koordináta rendszer origójára vonatkozó nyomatékukat pedig a megfelelő helyvektor és erő vektor vektori szorzata adja meg.

PARAMÉTEREK FELTÖLTÉSE

Méréssel

Méréssel meghatározható paraméterek legnagyobb csoportját a geometriai méretek adják, melyek a közvetlen szimulációs felhasználás mellett nélkülözhetetlenek a számítással meghatározható paraméterek számításainál is.

A különböző repülő modellek esetében a szimulációhoz fontos bemenő méretek megállapítása nem mindig volt közvetlenül mérhető a gépek mérete, alakja vagy a méréshez rendelkezésre álló eszközök és helyszín korlátai miatt. Ennek köszönhetően a geometriai paraméterek meghatározása minden esetben a repülőgép méreteinek felmérésével kezdődött, melynek felhasználásával elkészítettük a gépek pontos 3 nézeti rajzait. A rajzokról pedig már a kívánt méretek egyszerűen méréssel, vagy szerkesztéssel adódódtak.



7. ábra Mérések eredményeiből megrajzolt X8-as 3 nézeti rajza

A geometriai tulajdonságok mellett fontos jellemzője a modellezett eszköznek a tömege, annak eloszlása és súlypontjának helye. Az eszközök tömegét egyszerű mérleggel mértük meg egy alap konfigurációban, ami nem egyezik meg a repülésre felkészített modell konfigurációjával és így tömege és tömegeloszlása sem azonos. Ennek oka, a rendelkezésre álló mérlegek mérési tartománya, mely több eszköz esetében jóval a repülési tömeg alatt volt. Másrészről a repülőeszközök a repülési feladatnak megfelelően különböző felszereltséggel és elrendezéssel teljesítik a feladataikat, ami változást jelent a tömegben és annak eloszlásában is.

Hogy ezt kezelni tudjuk a szimulációk során és különböző konfigurációban végrehajtott repüléseket is szimulálni tudjunk, lemértük az egyes sárkányok, sárkány részegységek (szárny, törzs, vezérsíkok stb.), kiegészítő eszközök (akkumulátorok, fényképezőgépek stb.) tömegét, meghatároztuk tömegközéppontját, melyekből számítható a repülésre felkészített gépek pontos tömege és súlypontjának helye.

A repülő eszközök tömegeloszlását leíró tehetetlenségi nyomatékok meghatározását az eszközök jellegéből adódóan kétféle módon határoztuk meg. Multikopterek esetében a kis méret és tömeg lehetővé tette, hogy a különböző tengelyek mentén értelmezett tehetetlenségi nyomatékokat méréssel határozzuk meg, melynek során az eszközt valamely tengelye körül meglengettük és a lengésidőből számítottuk a súlypontra vett tehetetlenségi nyomatékot. A számítást a felfogás és a lengetés tengelyének egymáshoz képesti viszonya alapján egyszerű fizikai ingaként vagy bifiláris ingaként végezhetjük el a mért adatokból.

Egyszerű fizikai inga összefüggése:

$$I = mgL\left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 \tag{35}$$

ahol:

- ✈ m a tömeg [kg];

- L a lengetés tengelye és a súlypont távolsága [m];
- T a mért periódusidő [s].

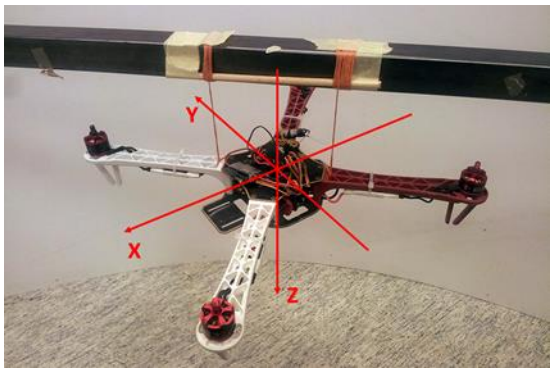
Innen a súlypontra vett tehetetlenségi nyomaték a Steiner-tétel felhasználásával számítható.

$$I_s = I - mL^2 \tag{36}$$

A bifiláris inga modellt a multikopterek függőleges tengely körüli tehetetlenségi nyomatékának meghatározásához használtuk, mely egyben a súlyponton is átmegy, így ez az összefüggés a használt mérési elrendezésben közvetlenül a súlyponti tehetetlenségi nyomatékot adja:

$$I_s = \frac{mgd^2}{4l}\left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 \tag{37}$$

Ahol: d – a függesztések közötti távolság [m], l – a függesztések hossza [m]



8. ábra Lengetési kísérlethez felfüggesztett F450-es modell.

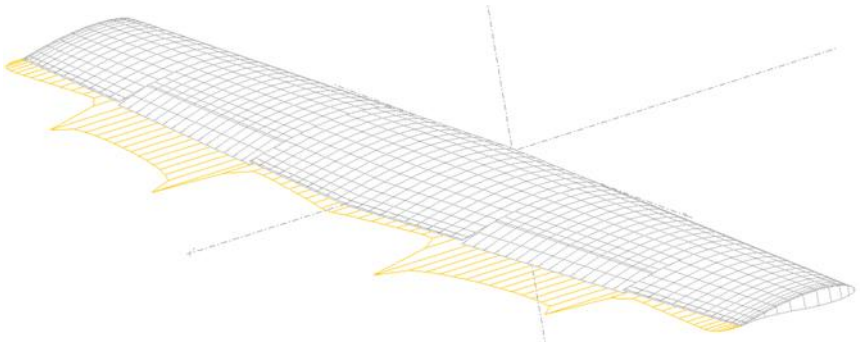
Ezzel megkaptuk a sárkányszerkezet tehetetlenségi nyomaték tenzorát, ami nem egyezik meg a végleges repülésre felkészített gép azonos fizikai jellemzőivel. További méréssel és számítással meghatároztuk a felszerelésre kerülő elemek tehetetlenségi nyomatékit, és így már a mechanikából közismert összefüggések segítségével meghatározhattuk a repülésre felkészített repülőgépek tehetetlenségi tenzorait.

A multikoptereknél lényegesen nagyobb merevszárnyú gépeknél a tehetetlenségi nyomatékokat, a méréshez megfelelő hely és eszközök hiányában a geometriai, tömeg és súlypont adatokból, egyszerű geometriai formákra történő felbontás után manuális számítással határoztuk meg minden repülési konfigurációra.

A szimulációhoz szükséges egyéb paraméterek, mint a motorok vonóereje, nyomatéka, a modelleken alkalmazott szervók mozgásjellemzői szintén méréssel kerültek meghatározásra.

Számítással

Az aerodinamikai paraméterek, melyek az ébredő légerők és nyomatékok meghatározásához kellenek a szimulációban számítással kerültek meghatározásra, melyhez elsődlegesen a széles körben alkalmazott XFLR5 programot [14] használtuk, melyet ellenőrzésképpen saját örvénypanel módszert használó algoritmusunkkal is ellenőriztünk.



9. ábra Observer szárnya 5 fokra kitérített fékszárnyakkal.

A programmal történő számításokhoz a geometriai méretek felhasználásával létrehoztuk a merevszárnyú gépek és azok részegységeinek örvénypanel modelljét, melyekre különböző Reynolds-számokon számításokat végeztünk és egyszerűbb esetekben ellenőriztünk a saját algoritmusunkkal is . A szárnyak és vezérsíkok kitérített kormánnyal ellátott modelljeit is elkészítettük, hogy számításokat végezhessünk a kormányok hatását leíró tényezők meghatározásához is (38).

$$\frac{d\alpha}{d\delta} = \frac{dC_L}{d\delta} \cdot \frac{d\delta}{d\alpha} = \frac{dC_L}{d\delta} \cdot \frac{1}{C_L^{\alpha}} \approx \frac{C_{L\,\delta=10} - C_{L\,\delta=0}}{\delta} \cdot \frac{1}{C_{L\,\delta=10}^{\alpha}} \tag{38}$$

A számítással kapott paraméterekhez illesztettük a modellben használt aerodinamikai tényezők széles állásszög tartományú viselkedését leíró modellt.

Repülési mérések

A szimulációkhoz szükséges paraméterek kellő pontosságú megállapításához több esetben nem elméleti összefüggések vagy szakirodalmi források segítségével lehet eljutni, hanem mérések segítségével. Elsősorban a légerő tényezők kapcsán van sok olyan adatra is szükség, melyeket közvetlen méréssel nem lehet meghatározni. Ezek meghatározásához repülés közben kell adatokat gyűjteni.



10. ábra A mérőrepülőgép

A repülési mérések módszerének kidolgozásához egy repülőgépet építettünk. A gép méreteinek meghatározásakor a praktikusság és a pontosság közötti kompromisszumot kellett meghozni. Minél nehezebb egy gép, annál pontosabban lehet vele mérni, azonban annál körülményesebb

a használata, és annál kevesebb mérést lehet vele elvégezni adott idő alatt, adott erő-forrást feltételezve.

Az AMORES projekt adottságai alapján egy felsőszárnyas, hagyományos elrendezésű gép mellett döntöttünk, melynek törzse és szárnya is üvegszállal erősített habmag. (10. ábra)

A repülőgép adatai:

- felszállótömeg : 2700 g
- fesztávolság : 1500 mm
- szárnyfelület : 0,375 m2

A mérőrendszer adatai:

- AHRS : Xsens MTi-G
- áram- és feszültségmérő : Sparkfun Current Sensor 90A
- magasság és sebességmérő : EagleTree Airspeed and Altitude Sensor
- robotpilóta és adatgyűjtő rndsz. : Paparazzi TWOG 1.0

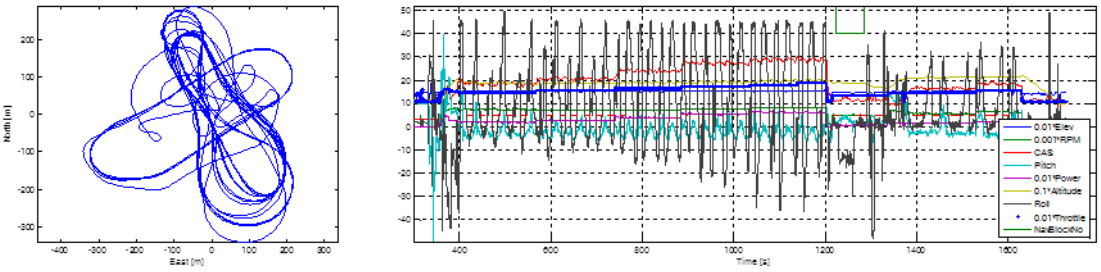
A mérőrendszerrel a következő légi méréseket végeztük:

2013. november 04	új motorbeállítások tesztelése	1022 mp
2013. november 11	fordulatszámmérő földi kalibrálása	371 mp
2013. november 12	trimmhelyzet beállítása	607 mp
	oldalkormány és AUTO1 beállítása	851 mp
	AUTO2 tesztelése	680 mp
	időtartam repülés	3480 mp
2013. november 14	AUTO2 beállítása	969 mp
	AUTO2 beállítása	447 mp
	AUTO2 tesztelés	1390 mp
	AUTO2 beállítása	543 mp
2013. november 15	AUTO2 finomhangolás	897 mp
	Penauld-diagram mérése	1235 mp
	Penauld-diagram széllel párhuzamosan	2759 mp
2013. november 16	Autoairspeed hangolás	2999 mp
2013. november 17	Autoairspeed finomhangolás, Penauld diagr.	1601 mp
	Válasz doublet típusú gerjesztésre	742 mp
2013. november 22	Navigáció hangolás, új rádió firmware teszt	1598 mp
	Navigáció hangolás	622 mp
2013. november 30	Átkonfigurált mixek tesztelése	523 mp
	RPM mérés ellenőrzése	1085 mp
Összesen:		**7ó 11p 50mp**

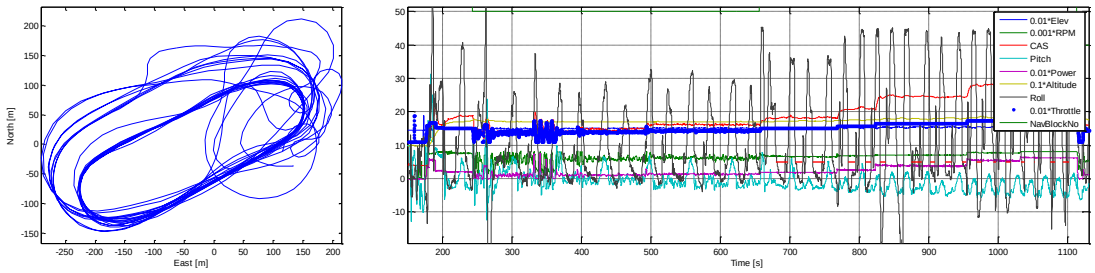
1. táblázat Repülési napló

A több, mint hét órányi adat nagy része a repülőgép, a mérőrendszer és a robotpilóta tesztelése és beállítása során keletkezett. Eközben a rendszer megbízhatóan működött, javításra nem volt szükség. A robotpilóta behangolását kellett elvégezni, és mérésekhez szükséges időjárási minimumokat kitapasztalni. Megállapítottuk, hogy egy 8,0 kg/m2 felületi terhelésű repülőgép esetében 1 m/s-os talajmenti alapszél mellett még értékelhető mérési eredmények születnek, és így a trimmhelyzetekben érvényes repülési paraméterek már megállapíthatók.

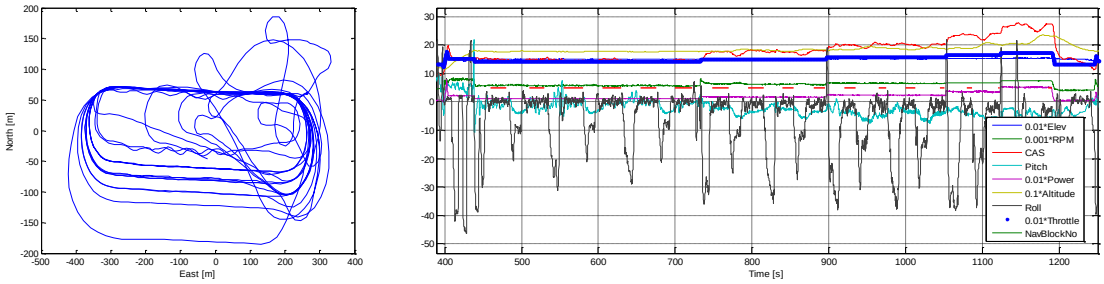
A november 15-i, 17-i és 30-i repülések szolgáltak a gép jellemzőinek kvantitatív meghatározására. Mindhárom nap ovális pályán különböző, előre beállított gázkarállás (PWM kitöltési tényező) mellett repült a gép állandó magasságon, egyenletes sebességgel.



11. ábra 2013. november 15-i mérés



12. ábra 2013. november 17-i mérés

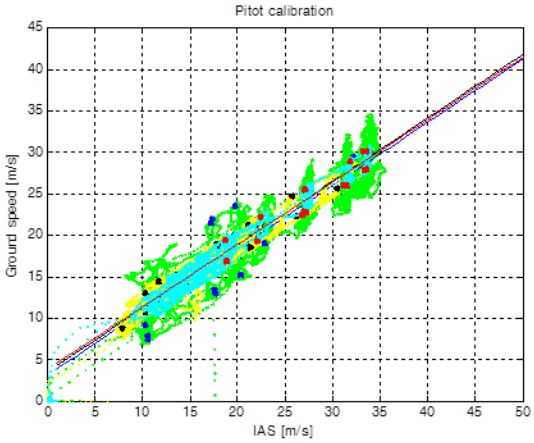


13. ábra A 2013. november 30-i mérés

A fenti mérések során azokat a legalább 10 mp-es mérési szakaszokat tekintettük érvényes trimmhelyzetnek, amelyekre igaz:

- bedöntés : $-5° < \varphi < +5°$
- sebesség : $\Delta CAS < 1$ m/s
- magasság : $\Delta h < 1$m
- hosszdőlésszög : $\Delta\vartheta < 1.5°$

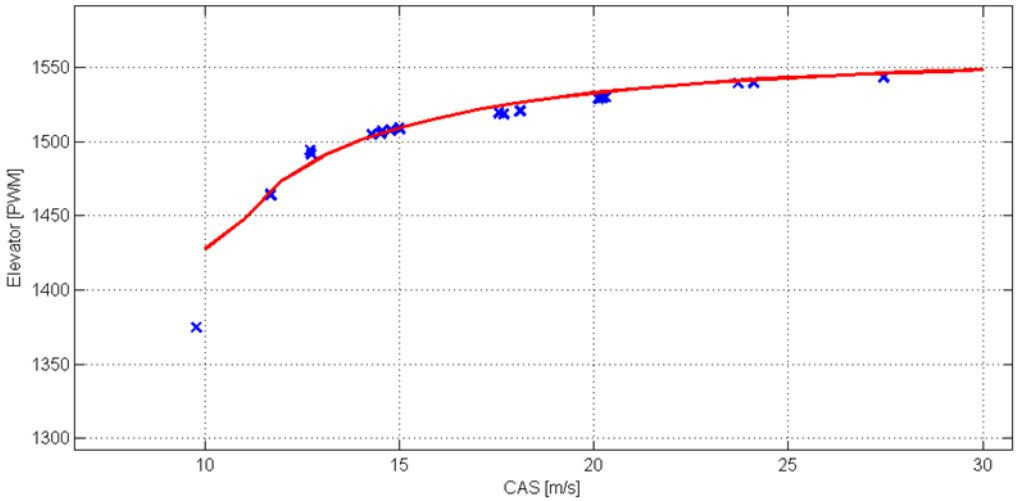
Első lépésként a sebességmérőt kalibráltuk. A széliránnyal párhuzamos, egyenes repülések során mértük GPS segítségével a talaj fölötti sebességet (GS) valamint egy Pitot cső segítségével az indikált sebességet (IAS). A kettő kapcsolatát mutatja a 14. ábra. A pontfelhő az összes mért pontpárt, a kiemelt pontok a trimmhelyezetek átlagolt értékpárjait ábrázolják.



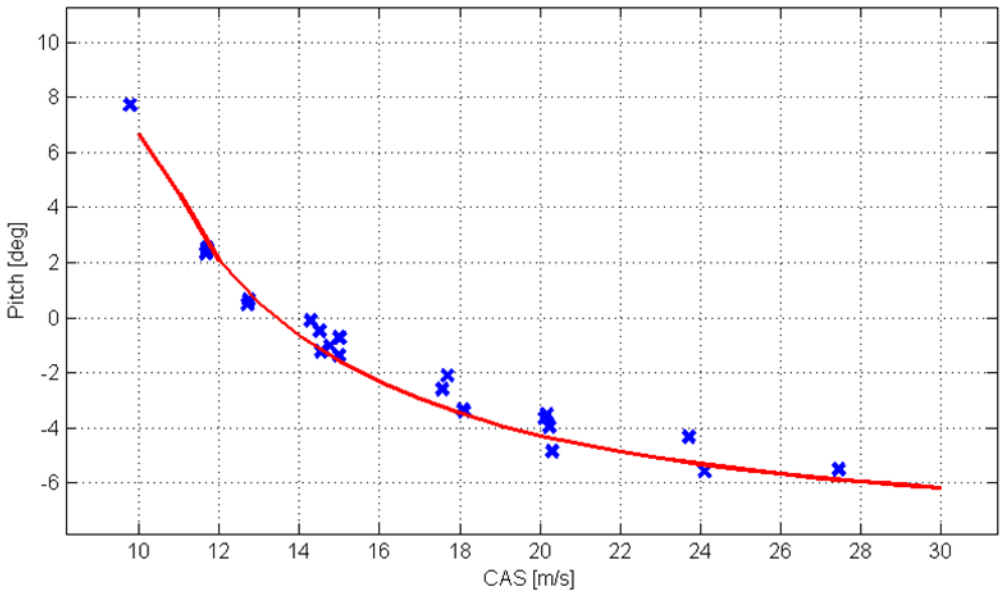
14. ábra A sebességmérő kalibrálása

A szél mentén és a széllel szemben megtett szakaszok összevetésével kiküszöböltük a szélsebességet a GS-ből, és így határoztuk meg a valódi sebességet (TAS). A levegő aktuális sűrűségét egy Kestrel 4500 típusú műszerrel mértük, és ennek figyelembevételével számoltuk az ekvivalens légsebességet (EAS), amely a kis sebességre való tekintettel megegyezett a kalibrált sebességgel (CAS). A CAS és az adatrögzítő által mért indikált sebesség (IAS) összevetésével kalibráltuk a sebességmérőt.

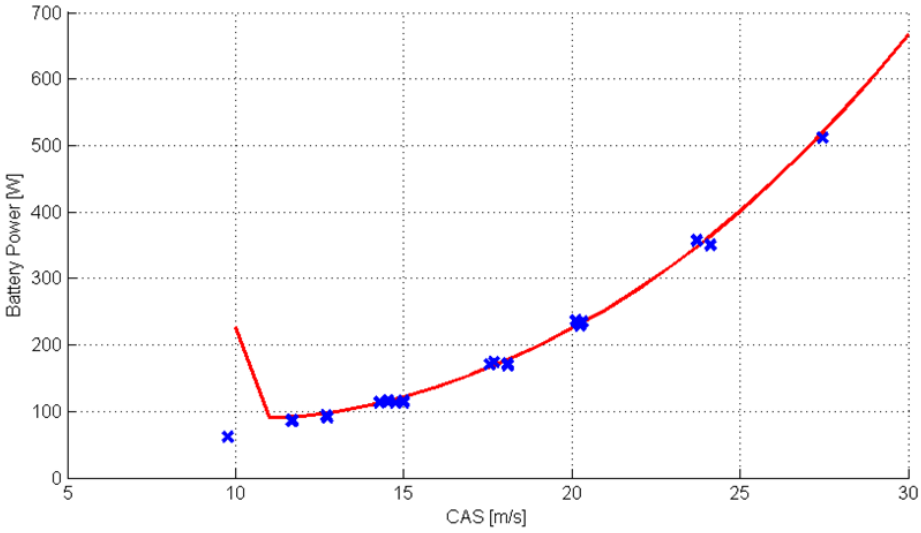
Következő lépésként a trimmhelyzeti feltételeknek megfelelő mérési szakaszokon meghatároztuk a magassági kormány helyzetének, a hosszdőlésszögnek és az akkumulátor által leadott teljesítménynek az átlagát, és ábrázoltuk a szimuláció trimmhelyzeti számításának eredményével. A modellben addig változtattuk a kormányhatásosságot, a felhajtóerő meredekséget, valamint a poláris paramétereit, amíg a mérés és a szimuláció eredménye megegyezett. Így a modellt identifikáltuk.



15. ábra Magassági kormány helyzete a sebesség függvényében trimmszámítással (piros) és mérések alapján (kék)



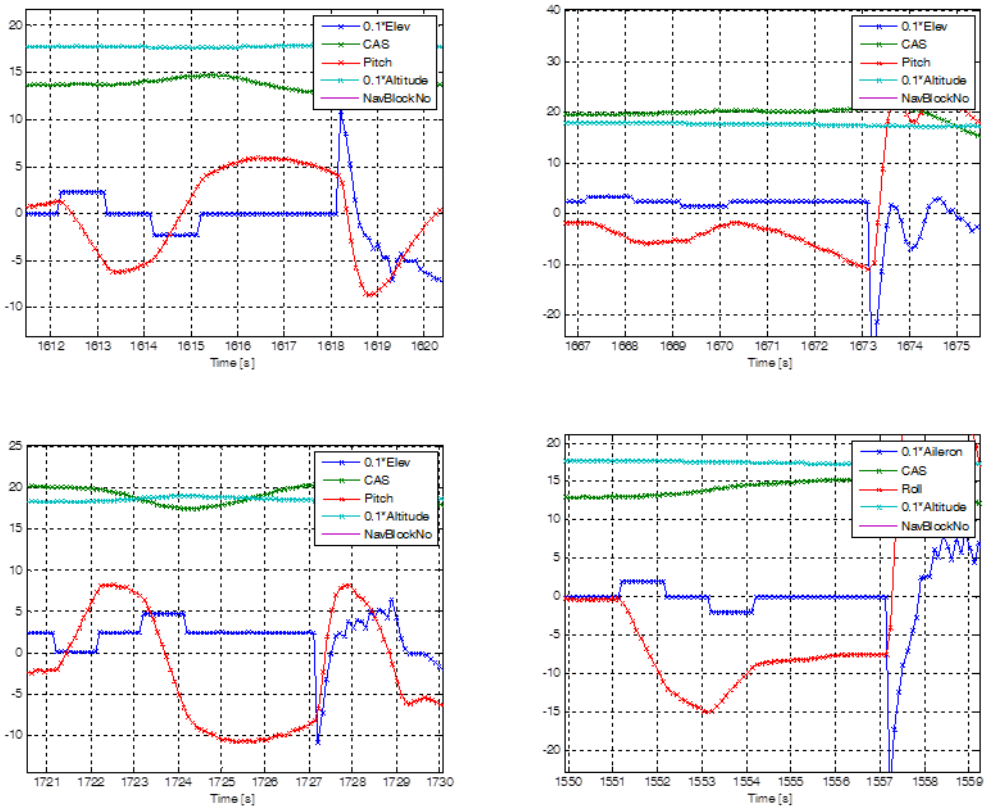
16. ábra Hosszdőlésszög a sebesség függvényében trimmszámítással (piros) és mérések alapján (kék)



17. ábra Akkumulátorból felvett teljesítmény a sebesség függvényében trimmszámítással (piros) és mérések alapján (kék)

A mérések további elemzésekor olyan önellentmondásra bukkantunk, amely csak a fordulatszámmérés hibájával tudtunk magyarázni. A hiba okát nem sikerült egyelőre megállapítani, mert a labor mérések során a jelenséget nem tudtuk reprodukálni. Emiatt a motor és a légcsavar hatásfokáról, valamint együttműködéséről kvantitatív adatok nem születtek az adott repülőgép esetében, de kvalitatív értékelésünk szerint a mérési módszer az érzékelő kijavítása után ezen a téren is megbízható eredményt fog szolgáltatni. A szimulációban a labormérések alapján 60% összhatásfokot vettünk fel a légcsavar-motor-szabályzó egységre.

A mérések során vizsgáltuk különböző mértékű doublet típusú gerjesztő jelek hatását is a magassági és a csűrőkormányon különböző sebességeknél. A doublet matematikailag a Dirac függvény deriváltja. Paraméter identifikálás céljából végzett mérések során a bemenő jelek pozitív, illetve negatív irányba történő megváltoztatásával helyettesítik.



18. ábra: Doublet gerjesztés a magassági kormányon (a, b, c) és a csűrőkormányon (d)

A logokból egyértelműen megállapítható, hogy

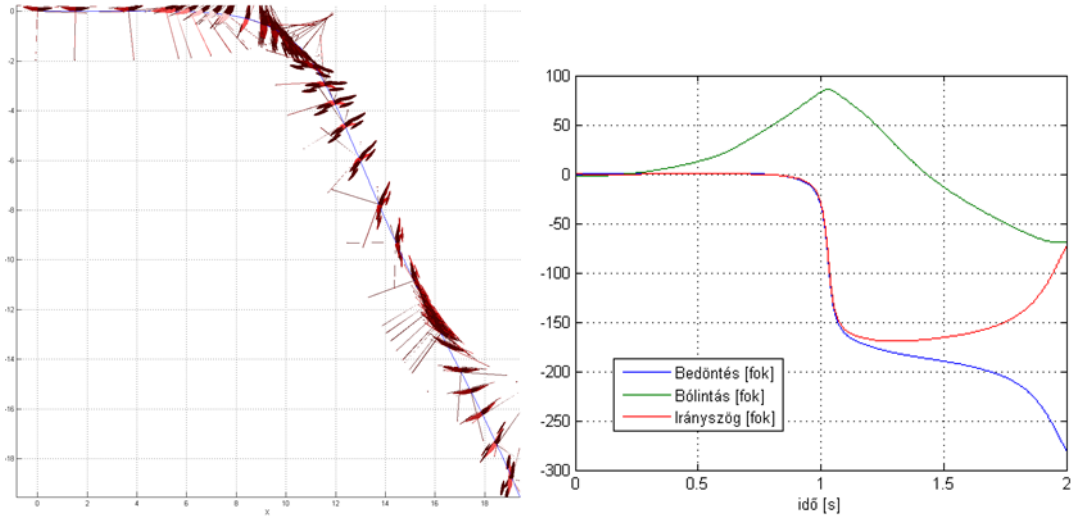
- az alkalmazott doublet-ek megfelelő mértékben gerjesztik a repülőgép mozgását;
- az Xsens érzékelő alkalmas a repülőgép válaszának mérésére;
- a mintavételezés még éppen megfelelő.

Ezzel elértük a kitűzött célt, azaz kidolgoztunk és végrehajtottunk olyan mérőrepüléseket, melyekkel az adott érzékelők és mérőrendszer segítségével a repülőgép trimmhelyzeteit és dinamikus válaszai meghatározhatók. A mérések ismételhetőségét is demonstráltuk.

SZIMULÁCIÓ, EREDMÉNYEK

Ebben a fejezetben röviden bemutatjuk pár repülési szituáción keresztül a szimuláció működését.

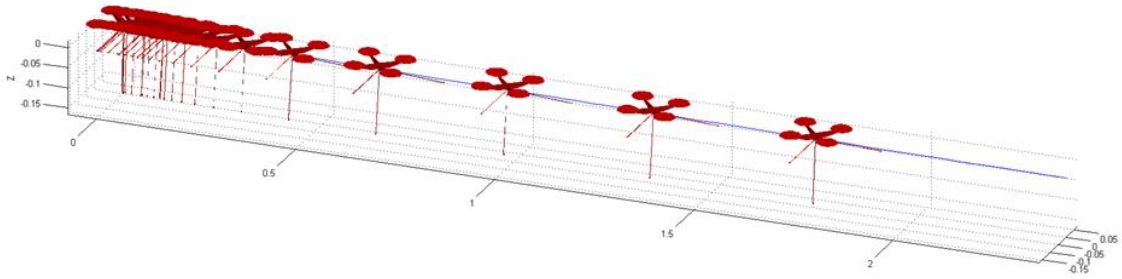
A 19. ábrán egy magára hagyott F450-es quadcopter modellje látható, amint 10m/s kezdősebességgel vízszintes irányban trimmhelyzetből indítva a szimulációt, a trimmhelyzetnek megfelelően konstans vezérlőjelekkel repül.



19. ábra F450-es repülése pilóta nélkül

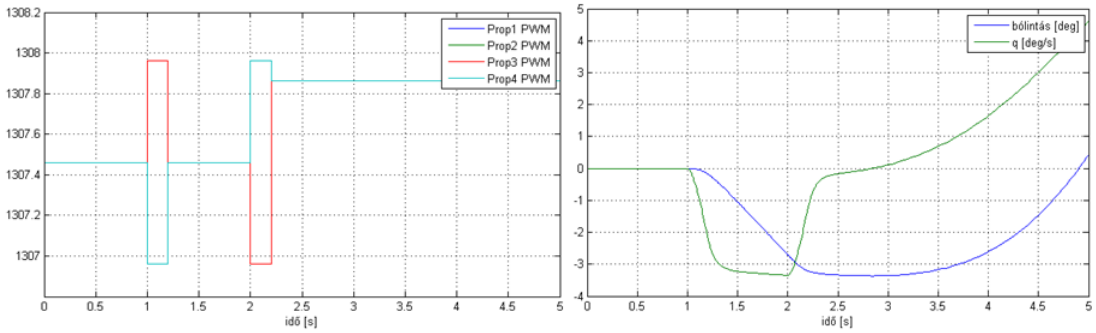
Az eredményekből jól látható a multikopterek instabil hajlama. Ennek következtében a bólintási szöge növekvő ütemben pozitív irányban növekszik, majd háthelyzetbe fordul.

A 20. ábrán egy szabályzó nélküli quadcopter látható, ami lebegésből (V=0) előre bólintó mozgást elindító, majd a mozgást megállítani próbáló vezérlő jelek hatására megindul.



20. ábra F450-es elindulása lebegésből

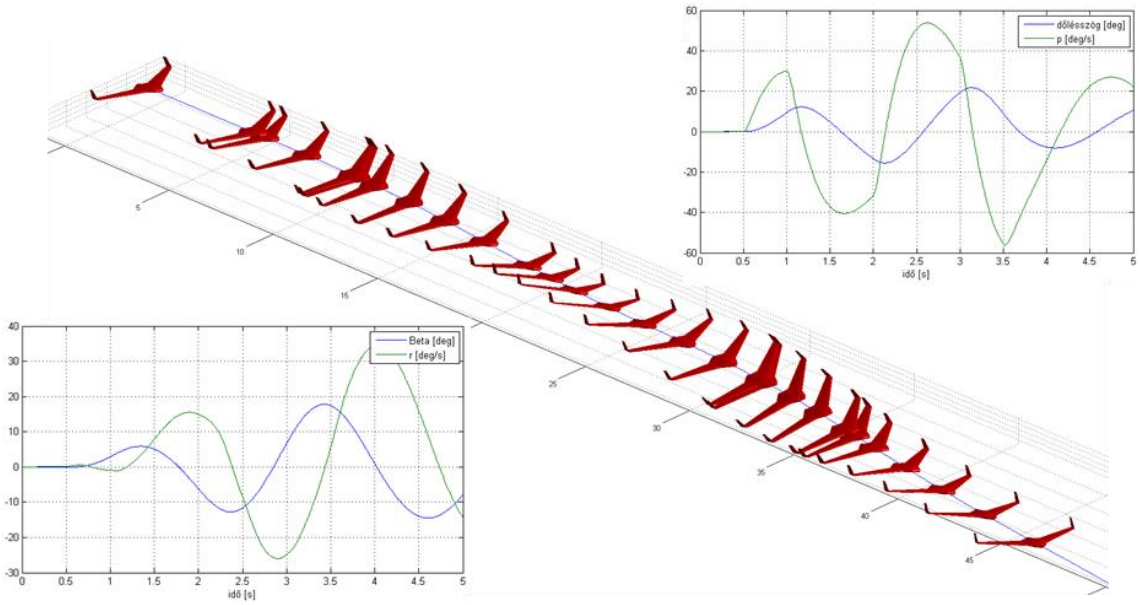
A 21. ábrán láthatók a motorok vezérlő jelei, melyek a bólintó mozgást indítják el és próbálják megállítani. Az ábrán látszik, hogy az előrehaladási sebesség növekedésével a kopter bólintó szögsebessége és bólintási szöge is egyre gyorsuló mértékben növekedésnek indul a kopter instabil hajlama miatt.



21. ábra Motorok vezérlő jelei és a rájuk adott válasz (bólintási szög, bólintó szögsebesség) az idő függvényében

A 22. ábrán az X8-as modellt láthatjuk, mely minimális sebességhez közeli sebességen végez billegtetést. A billegtetés hatására kapcsolt mozgásként jól megfigyelhető a szimulált repülőgép

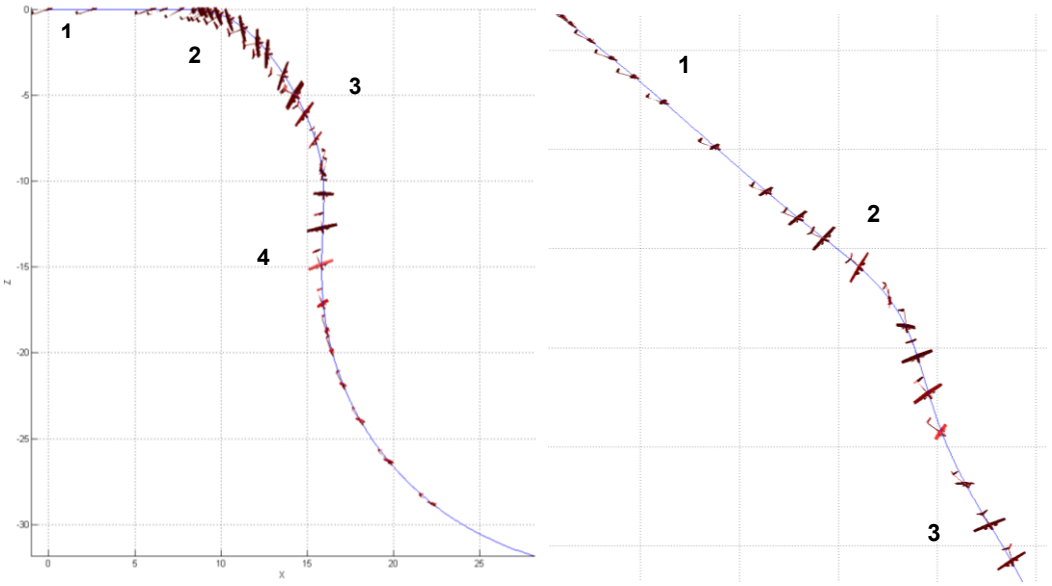
legyező mozgása, mely egyre erősödő jelleget mutat. Mind a csúszási szög, mind a legyező szögsebesség tekintetében.



22. ábra X8-as billegtetése és a dőlésszög, orsózó szögsebesség (jobb felső diagram) valamint a csúszási szög és legyező szögsebesség (bal alsó diagram) az idő függvényében

Az X8-as szimulációban mutatott viselkedése jól megfigyelhető a valós repülőgép mozgási jellemzőin is, különösen kis sebességű repülés során.

Az 23. bal oldali ábrán az Observer nevű repülőgép szimulált kissebességű repülésből (1 - slow flight) történő átesése (2 - power on stall) és leborulása (3 - departure) és a dugóhúzó kifejlődő szakasza látható, mely a magassági kormány kiengedésére azonnal megszűnik és a repülőgép magától visszaáll (4 - recovery) normál repülési helyzetbe.



23. ábra Observer lebillenése lassú repülésből (balra) és dugóhúzója kis sebességű siklásból (jobbra)

A 23. jobb oldali ábrán szintén az Observer látható, mely kis sebességű, átesési sebességen végrehajtott siklórepülés közben átesik, leborul és elindul a dugóhúzó kifejlődése.

ÖSSZEFOGLALÁS

Az irányítástechnika modern elméleti és gyakorlati eszközeinek fejlődésével a hagyományos és az ember nélküli repülő eszközök repülésmechanikai modellezése is egyre fontosabb szerepet kap. E feladatot célul kitűzve, hoztunk létre egy a – merev vagy forgószárnyas – repülő eszközök mozgását leíró egyenletrendszert megoldó szimulációt, melyben az ébredő nyomatékok és aerodinamikai erők meghatározására több-felület modellt, és a teljes állásszög tartományon számított légerő tényezőket vezettünk be. Fontossága miatt külön foglalkoztunk a légcsavarok hatásainak vizsgálatával, beleértve az oldalirányú megfúvás és örvénygyűrű állapotokat is. Több ember nélküli repülőeszköz elektronikusan rögzített repülési adatainak kiértékelésével ellenőriztük a számításokat. A cikk végén bemutattuk a szimulált repülőeszközök egy-egy jellemző viselkedési formáját.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatást a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatta a KMR_12-1-2012-0121 "Piacorientált kutatás-fejlesztési tevékenység" projekt keretében.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] ALLERTON, D.: Principles of Flight Simulation, ISBN: 978-0-470-75436-8, John Willey, 2009
[2] ASHLEY, H. – BISPLIGHOFF, R.L.: Principles of Aeroelasticity, John Wiley & Sons, New York, 1962
[3] BEARD R.W. – MCLAIN, T.W.: Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice, ISBN 9781400840601; Princetown University Press, 2012
[4] BERNER, P.: Orientation, Rotation, Velocity and Acceleration, and the SRM, SEDRIS, 2008,
[5] COOK, M.V.: Flight Dynamic Principles, ISBN 978-0-7506-6927-6, 2007, Elsevier
[6] FUNG, Y.C.: An Introduction to Aeroelasticity, ISBN 0-486-67871-7, Dover Publications, Inc. New York, 1993
[7] GÁTI, B. – GAUSZ T.: Merevszárnyú és többrotoros légi eszközök modellje precíziós repülési feladatok szimulációjához; ('Fixed wing and multirotor model for simulation of precision application'), Research report, 2013
[8] GAUSZ, T.: Aeroelasztikus jelenségek és dinamikai terhelés, (online) url: http://www.doksi.hu/get.php?lid=20964 (2015.10.20.)
[9] GAUSZ, T.: Bevezetés a forgószárnyak aerodinamikájába, (online) url: http://www.doksi.hu/get.php?lid=20743, (2015.10.20.)
[10] GAUSZ, T.: Légcsavarok, (online) url: http://www.doksi.hu/get.php?lid=15467 (2015.10.20.)
[11] MORIARTY, P.J.: AeroDyn Theory Manual, www.nrel.gov, 2004-2005
[12] QUEY, R.: Orientation Library, Ecole Nationale Superieure des Mines de Saint-Etienne, France, 2014
[13] RÁCZ, E.: A repülés mechanikája, Tankönyvkiadó, Budapest, 1953.
[14] XFLR5, url: www.xflr5.com
[15] JANKOVICS, I. – ROHÁCS, D. – ROHÁCS J.: Motion Simulation Model of a Special Acrobatic Aircraft Proceedings of the 12th MINI Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies (VSDIA 2010): Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, 2010.11.8-10. 616 p. Konferencia helye, ideje: Budapest, Magyarország, 2010.11.08-2010.11.10. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2012. pp. 393-401. (ISBN:978-963-313-058-2)

AEROMECHANICAL MODELING

With the development of modern control engineering, modelling of traditional and unmanned air vehicles has an increasingly important role. The equation of motion is written in the body coordinate system of a vehicle is based on conversation of momentum and angular momentum. Motion of airplanes and rotorcrafts is defined by aerodynamic, inertia, elastic forces and moments. For the determination of these forces, multi surface model was introduced and aerodynamic coefficients for wide range of angle of attack were calculated. Effects of propeller were deeply modelled because of its high importance. Several hours of flight tests were performed with UAVs to compare the reality with the developed model.

Keywords: *flight mechanics, propeller, aerodynamic model, stall, UAV*

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_3/2015-3-21-0332_Jankovics_Istvan_et_al.pdf