

AZ ÖRVÉNYESSÉG ÉS A HELIKOPTEREK

BEVEZETÉS

A repülésben – és nem csak a repülésben – régóta elfogadott tény az, hogy az aerodinamikai erők keletkezése örvények keletkezésével kapcsolódik össze. Azt is mondhatjuk, hogy ez egy olyan fizikai jelenség, amelynek egyik oldala az aerodinamikai erő, másik – ettől elválaszthatatlan – oldala az örvény vagy cirkuláció.

Az örvényekkel már meglehetősen régóta foglalkoznak – a tudományosan megalapozott tárgyalásuk bevezetése Helmholtz nevéhez fűződik. A potenciális örvények területén úttörő jelentőségű munkát végzett Thomson – később lord Kelvin, Zsukovszkij, Kutta, Biot és Savart. A valóságos közegekben az örvények alakulása – mivel az örvény központi régiójában örvény-mag van – jelentősen különbözik a potenciális örvények viselkedésétől. E területen az úttörő munkát Lamb és Oseen végezte.

Napjainkig – természetesen – számos további kutató ért el igen jelentős eredményeket és elmondható, hogy az örvény-elméletek a repülés számos területén játszanak nagyon komoly szerepet. Csak megemlítjük, hogy az egyik, igen korszerűnek tartott, numerikus aerodinamikai (vagy áramlástan) módszer a „nagy örvény szimuláció”.

Az örvények egy része valamilyen aerodinamikai erőhöz közvetlenül kapcsolódik, más örvények esetén – amennyiben persze ezeket különböző örvénynek tekintjük – a kapcsolat közvetett. Ilyen például, a hordozó örvény, amely a felhajtó erőt és az indukált ellenállás egy részét kelti és a „más” örvényre példa a leúszó vagy indulási örvény, amelyet a hordozó örvény kelt.

A számítási modellek, amelyekben az örvényeket alkalmazzuk – pl. örvény-panel módszerek vagy a hordozóvonal elmélet – már régóta léteznek ugyan, de rohamos elterjedésük a számítógépeknek köszönhető. Ezek a modellek alapvetően két nagy csoportra oszthatók: az egyik, klasszikusnak nevezhető csoport a potenciális örvényeket alkalmazza és lényegében nem foglalkozik az örvények mozgásával. A másik csoport, a modernebb, figyelembe veszi, hogy azok az örvények vagy örvény-részek (pl. leúszó örvények), amelyek az őket keltő felülethez közvetlenül nem kapcsolódnak, az áramlási térrel együtt mozognak, illetve öregsznek, azaz az energiájuk disszipáció révén csökken. Ez a mozgás alapvetően a valóságos örvények esetében szimulálható jól – ilyen mozgásra példa a szárnyak vagy rotorlapátok mögött a leúszó örvények felcsavarodása.

Megemlítendő még, hogy harmadik lehetőségként az első és második módszer kombinálható – ezeket a szakirodalom hibrid módszereknek nevezi – azokban a tartományokban, ahol a csúsztató feszültség hatása jelentős, ott azzal számolunk is, ott pedig, ahol elhanyagolható, ideális közeget tételezünk fel.

A HELIKOPTER ÉS AZ ÖRVÉNYEK KAPCSOLATA

A helikopterek a levegőnél nehezebb, forgószárnyú repülőgépek családjába tartoznak. Így működésükben a különböző örvényeknek igen nagy a szerepe. A helikopterek tekintetében – bár ez az osztályozás más repülő eszközre is érvényes lehet – a következő örvény típusokat határozhatjuk meg:

- a rotorlapáton keletkező, illetve a rotorlapátról leúszó örvények;
- a farokrotor lapátjain keletkező, illetve az ezekről leúszó örvények – az első és második eset a helikopter üzemszerű működéséhez feltétlenül szükséges, ahhoz direkt módon kapcsolódó örvényeket foglalja össze;

- egyéb, a helikopter keltette örvények – ezek azok az örvények, amiket a helikopter kelt, de az üzemszerű működéshez nem szükségesek, sőt a megszüntetésük vagy csökkentésük, esetleg módosításuk kívánatos (pl. a törzsön illetve a törzs körül létrejövő örvények);
- talaj örvény, ami csak speciális esetben jön létre, éspedig a rotor saját áramlása indukálja – ezek azok az örvények, amelyek a helikopter működése miatt, de a külső környezeti viszonyoktól is függően jönnek létre;
- külső turbulencia vagy légörvény, ami a légkörben a helikoptertől függetlenül, de mástól (akadály, épület stb.) függően jön, vagy jöhet létre.

A helikopterekkel foglalkozó szakirodalom az első két kategóriába tartozó örvényekkel kimerítően foglalkozik. Ebben a cikkben, első sorban azokkal az örvényekkel kívánunk foglalkozni, amelyek valamilyen szempontból problémás helyzetet eredményeznek.

A ROTORLAPÁTVÉG ÖRVÉNYEK ÉS HATÁSUK

A rotorlapátvég örvények a rotorlapátokról leúszó örvénysík felcsavarodása révén jönnek létre. A rotorlapátokon sajátos légerő-eloszlás jelentkezik: a lapátok belső részein kis erők keletkeznek, a külső részekben viszont igen nagy erők jönnek létre, végül a lapátvégen a felhajtó erő mindig nullára csökken. Ez azt jelenti, hogy a lapát menti erőváltozás a külső sugaraknál igen intenzív. Ebből következik, hogy a rotorlapátokról leúszó örvények a rotorlapátok külső részén igen erősek, a belső részekben pedig gyengék. Azért tehát, mert erős örvények, kis távolságon belül keletkeznek, a felcsavarodási folyamat igen gyorsan megy végbe – néhány lapát-húrhossznyi távolság elegendő a teljes felcsavarodáshoz.

A rotor, működése során, első közelítésben a forgás és az előrehaladás által meghatározott csavarvonal mentén hagyja hátra ezeket, a gyorsan felcsavarodott, intenzív örvényeket. Másrészt ezek az örvények egymás közelében léteznek és egymás hatására (az áramlásban jelentkező eredő indukált sebességgel) mozognak. Végeredményben, a többi repülő eszközhöz hasonlóan a rotorok mögött is kialakul az ún. szárnyvég örvény pár – mindössze a helikopter rotorok mögötti örvények viszonylagosan nagy intenzitásúak és az áramlási tér turbulenciája miatt viszonylag hamar le is csillapodnak. Ez egyébként azt jelenti, hogy egy helikopter örvényes nyomába egy másik repülővel berepülni úgy lehetséges, ha ez a másik repülő a helikopterhez viszonylag közel merészkedik – ekkor azonban rendkívül intenzív örvényt talál. Csak megemlítjük, hogy egy Mi 8-as helikopter mögött (rövid távon) olyan az örvényesség (pl. 400-500 [m²/s]), mint amelyet egy leszálló Boeing 757-300-as utasszállító repülőgép kelt. Egyébként egy Góbé típusú vitorlázó repülőgép által keltett örvényesség 20 [m²/s] körüli értékkel bír.

A rotorról leúszó örvények tekintetében három esetet érdemes megemlíteni:

- a rotorlapátvég örvények megközelítik, vagy éppen találkoznak egyik vagy másik rotorlapáttal – a szakirodalom ezt rotorlapát – lapátvégörvény kölcsönhatásnak nevezi (angol rövidítése: BVI);
- a rotorlapátvég örvények részben vagy egészen elfedik a farokrotort, megszüntetve vagy csökkentve ezzel a főrotor nyomatékát kiegyenlítő nyomatékot;
- a rotor mögötti örvényes nyom, az abba berepülő repülő eszköz veszélyes repülési állapotát okozhatja.

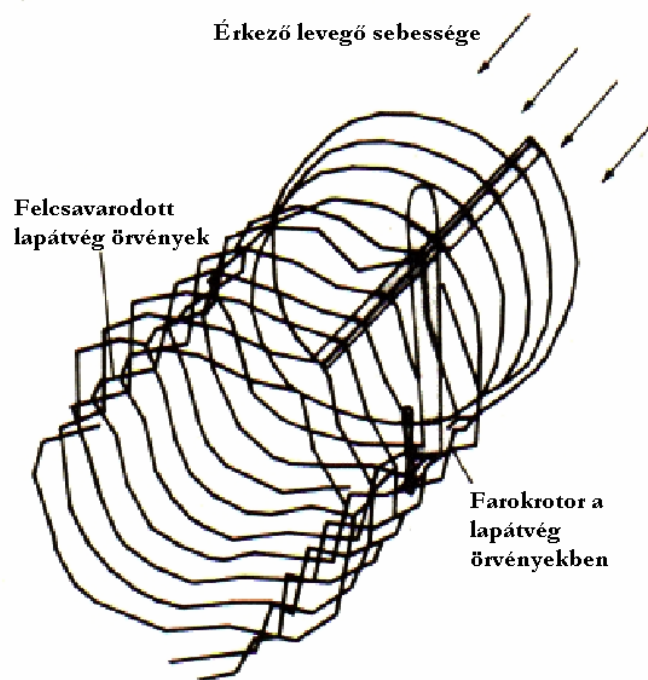
Az első esettel – a rotorlapát – lapátvégörvény kölcsönhatás esetével – kapcsolatban megjegyzendő, hogy annak következménye nem kívánatos rezgés, jelentős helyi dinamikus terhelés és zaj ([12]). E jelenségek elkerülése érdekében különböző repülési eljárásokat dolgoztak és dolgoznak ki ([10]).

A helikopter rotorok keltette zaj okozói közvetve vagy közvetlenül jórészt a rotorokon keletkező örvények. A rotorlapát – lapátvégörvény kölcsönhatás egy igen jelentős zajforrás is. A viszonylagos zajosság pedig mind polgári, mind katonai szempontból erősen hátrányos. A polgári légi közlekedésben használatos heliportok létesítését például jelentősen korlátozza a helikopterek környezetre gyakorolt zajterhelése. Ezért is jelentős a BVI-zaj csökkentésére irányuló repülési eljárások kidolgozása.

A BVI-zaj első közelítésben arányosnak tekinthető a rotor felületi terhelésével és a rotorlapátvég sebességével – a zajcsökkentés módja e tekintetben nyilvánvaló. Finomabb módszer a rotorlapátok speciális vezérlése: a magasabb harmónikusok szabályozása (HHC – „Higher Harmonic Control”), az egyedi lapátvezérlés (IBC – „Individual Blade Control”), illetve több, más aktív vagy passzív vezérlés. Hozzájárulhat a BVI-zaj csökkentéséhez a speciális lapátvég kialakítás is. Ezek konstrukciós paraméterek, amelyek alapvetően új típusokon alkalmazhatók és a fejlesztési költségeik is magasak.

A BVI-zaj lényegében minden helikopternél csökkenthető a megfelelő repülési paraméterek megválasztásával. E paraméterek meghatározása a konkrét helikopter típusokra elméleti vizsgálatokkal és mérésekkel lehetséges. Az AH-1 helikopter esetében például az átlagos repülési (megközelítési) sebesség esetén a kis vagy nagy süllyedési sebesség ajánlható. Természetesen az esetleges szél is befolyásolja a megközelítési viszonyokat és ezzel a BVI-zaj keltését. A legkedvezőbb repülési eljárásokat minden helikopter típushoz egyedileg kell meghatározni.

A farokrotor felépítése és működése nagyon hasonlít a főrotor felépítéséhez, illetve működéséhez, bár vannak jelentős különbségek is. Amennyiben a főrotorról leúszó valamelyik szárnyvég örvény a farokrotor közelébe kerül, azt részben vagy egészben elfedi, akkor a farokrotor körüláramlási viszonyai akár olyan mértékben is romolhatnak, hogy rajta korábban keletkező erő nagysága nullára csökken. Ez a törzs megpördülésével jár, amit többnyire jobb elkerülni. Emiatt bizonyos repülési irány és sebesség kombinációkat tiltanak ([7]).

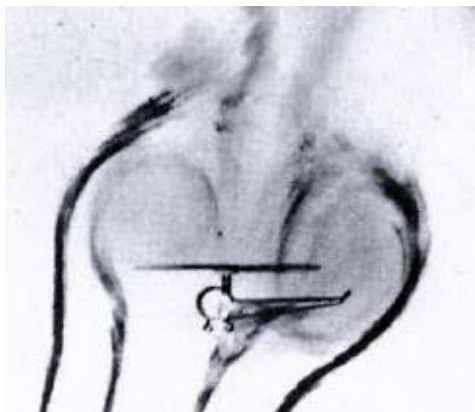


1. ábra. Farokrotor a főrotor örvényében

A helikopter rotorja mögötti örvényesség – mint azt már említettük – igen intenzív, de viszonylag hamar csillapodik. Ezért nem túl gyakori, hogy más légijármű ebbe az örvénybe kerülne.

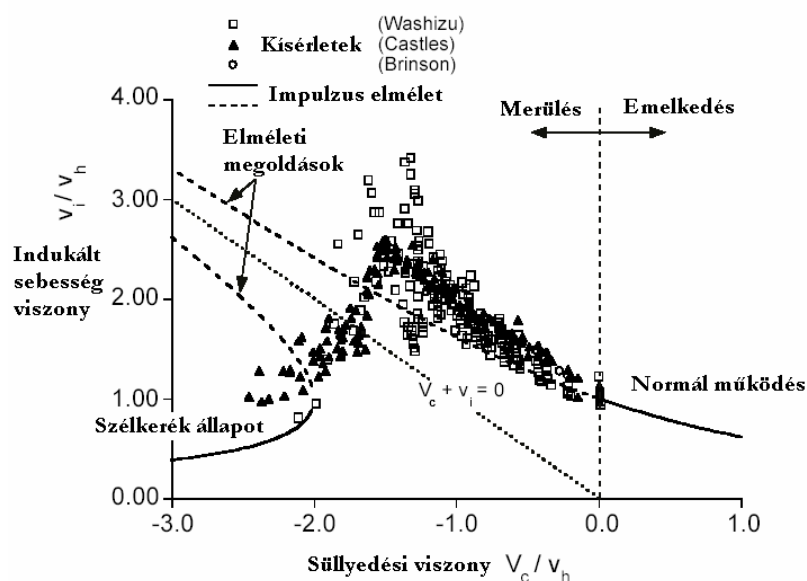
AZ ÖRVÉNYGYŰRŰ ÁLLAPOT

A helikopter rotorok függőleges merülés esetén – ha az alulról érkező légáramlás sebessége megközelíti a rotoron keletkező indukált sebesség értékét – örvénygyűrű állapotba kerülhetnek. Ez az állapot azt jelenti, hogy a rotoron áthaladó levegő egy zárt örvénygyűrűt alkot és a környező légáram ezt az örvénygyűrűt, megkerüli. Ennek következtében a helikopter kormányozhatósága rendkívül nagy mértékben csökken és megszűnik a rotor emelő ereje.



2. ábra. Helikopter modell örvénygyűrűben – füsttel láthatóvá tett áramlás

Ehelyett az emelő erő helyett a rotort körüláramló környezeti levegő légellenállása jelenik meg – mivel azonban ez a légellenállás jóval kisebb az eredeti emelő erőnél, a helikopter zuhanni kezd. Az örvénygyűrű állapotból lefelé gyorsulva kizuhanni lehet, amikor a függőleges sebesség elég nagy, akkor az alulról érkező légáramlás az örvénygyűrűt a főrotorról mintegy lefújja, ezzel a kormányok ismét működésképpessé válnak. Ez egy meglehetősen veszélyes helyzet tehát, amely, elegendő magasság híján a földön, töréssel fejeződik be.



3. ábra. Az örvénygyűrű állapot sebesség-viszonyai

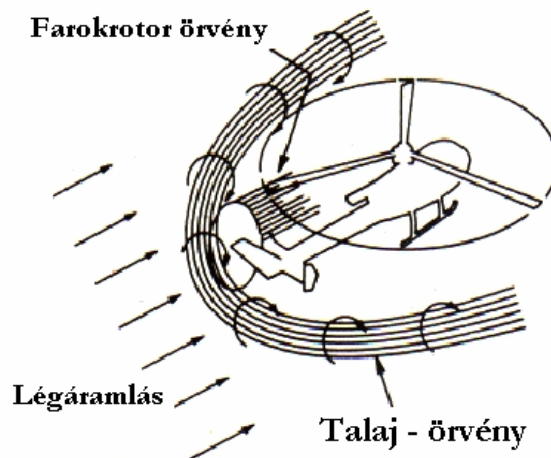
A 3. ábrán a „ v_h ” a függeszkeszedsbeli indukált sebességet, a „ V_c ” az emelkedési (süllyedési) sebességet és a „ v_i ” az aktuális indukált sebességet jelöli. Jól látható az ábrán a mérési pontok halmaza. Ez egy olyan halmaz, melybe (akár szemmértékkal) berajzolható egy várható-érték görbe. Ez a „Normál működés” és a „Szélkerék állapot” folytonos vonalait köti össze. Közelítőleg megállapítható, hogy az örvénygyűrű állapot a $V_c/v_h \approx -2.0$ értéknél szűnik meg. Ennél kisebb merülési sebességeknél a rotoron keletkező erő ingadozása a $30 \div 50$ %-ot is elérheti.

E tekintetben a farokrotor meglehetősen hasonló a főrotorhoz és így a farokrotor környezetében is kialakulhat, illetve helytelen vezetéssel kialakítható az örvénygyűrű állapot. Ez ugyan nyilván nem vezet a helikopter zuhanásához, de a kiegyenlítő nyomaték időleges megszűnését és ezzel a helikopter függőleges tengely körüli megpördülését okozza.

Az örvénygyűrű állapot elkerülendő, az egyes helikopter típusok repülési eljárásait úgy határozzák meg, hogy ennek az állapotnak a bekövetkezési valószínűsége elegendően kicsi legyen. Példaként tekintsük a következőket: az R-44 helikopter esetében megadnak egy repülési sebességhez tartozó varió értéket: Pl: 30 kts / 300 ft/min R-44 (magyarul kb 55 km/h alatt 1,5 m/s értéknél jobban nem lehet süllyedni, ez a Ka-26 helikopternél 60 km/h és 2 m/s.

A TALAJ-ÖRVÉNYEK

A talaj közelében működő helikopter rotor lefele haladó légsugarát a talaj elfordítja. Ez az elfordítás a párnahatás okozója, de ezen túl, adott körülmények között a rotor képes a már egyszer felgyorsított levegőt felülről újra beszívni és ezzel alakítja ki a talaj-örvényt.

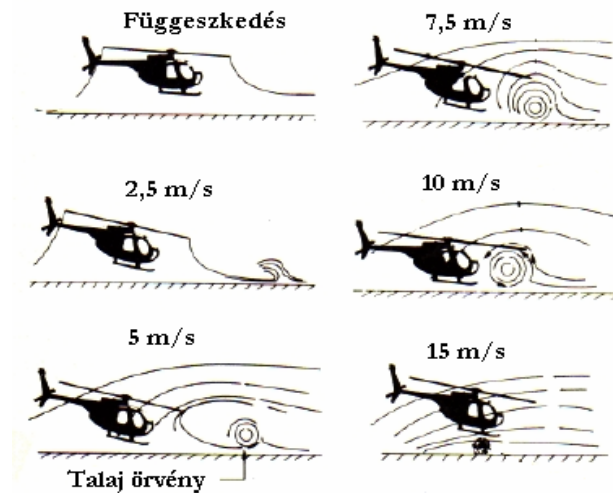


4. ábra. Talaj örvény kialakulása hátrafele haladó repülésben

A 4. ábrán egy ilyen, talaj örvény látható. Ez a sajátos helyzet akkor alakulhat ki, ha a helikopter kis magasságban hátrafelé repül, vagy hátszélben lebeg. Az egyrotoros – farokrotoros elrendezésű helikopterek esetében ez a helyzet a farokrotor normális működését zavarhatja, ami rossz esetben a helikopter bepördüléséhez vezet.

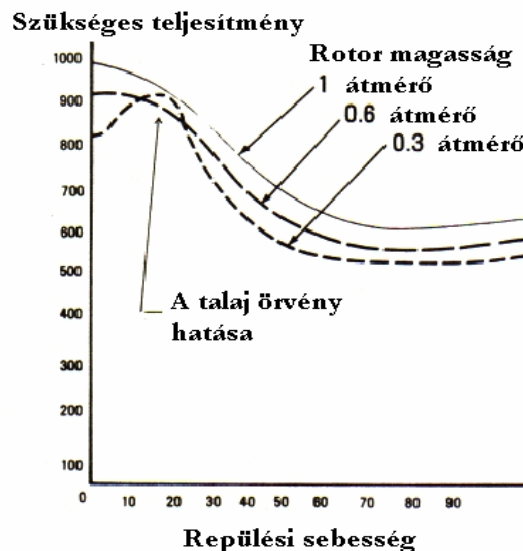
A talaj örvény azonban nem csak a farokrotor működését zavarhatja, hanem hathat magára a főrotorra is. Amint azt az örvénygyűrű állapotnál már bemutattuk, ha a rotor örvénybe kerül, a működési feltételei határozottan romlanak. A talaj örvény rendszerint csak a rotor egy részét fedi el, ezért a működés nem válik lehetetlenné, de alapvetően két problémához vezet. Részben a felhajtóerő előállításához nagyobb teljesítmény szükséges – ez a hajtómű megfelelő szabályozását teszi szükségessé. Részben pedig

megváltozik a csapkodó mozgás, ami ciklikus kormányzást tesz szükségessé. A gyakorlat szerint teherrel a Ka-26 leesik, ha a repülőgép vezető nem nyomja át ezen – azt nehéz megszokni, hogy nagyon kicsi a magasság és mégis nyomni kell a botot. Egyébként kis felületi terhelésű (terheletlen) gép esetében ez jól érezhető, negatív bólintó nyomatékot eredményez (csapkodó mozgás) és rezgési jelenséget okoz. De ez jelentkezik leszálláskor is, amikor földközeli lassít a gép. És valóban a farokrotoros esetben útirányú instabilitást is okoz. A teljesítmény növelése miatt a nyomatéki egyensúly is újra beállítandó, azaz a farokrotort is szabályozni kell. A csapkodó mozgásban fellépő kérés miatt (amit nagyvonalúan 90 fok körüli értékre tehetünk) pedig a ciklikus kormányt is a megfelelő helyzetbe kell állítani.



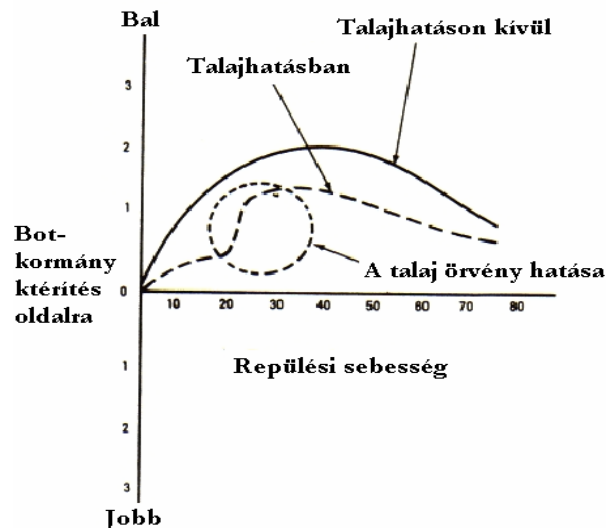
5. ábra. A talaj örvény kifejlődése és megszűnése

Az 5. ábrán feltüntetett kép-sorozat bal oldali oszlopa a talaj örvény kialakulásának folyamatát mutatja be. A jobb oldali oszlop felső képe azt mutatja, amikor a talaj örvény a legnagyobb hatását fejti ki. A középső és az alsó kép a kirepülés fázisait ábrázolja. Ez földközeli leszállás előtti megközelítéskor is nagyon intenzíven jelen van, csak akkor lassul a gép és ezért fordított a sorrend.



6. ábra. A repüléshez szükséges teljesítmény változása

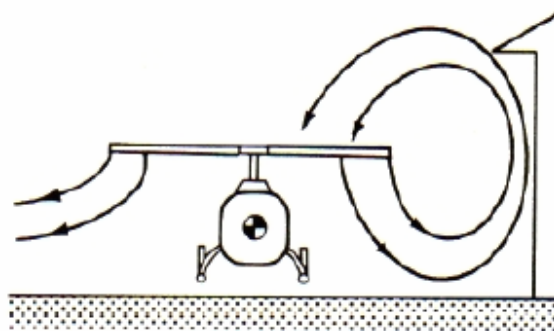
A talaj örvény hatása – természetesen – csak kis magasságban jelentkezik. A 6. ábráról leolvasható, hogy ha a rotor belépő része elég alacsonyan van, akkor jelentkezik ez a hatás. Leolvasható továbbá az is, hogy a repüléshez szükséges teljesítmény a talaj örvény jelenlétekor – amint azt már említettük – megnövekszik. Emiatt és a farokrotor áramterének megzavarása miatt is teljesítmény-növelés és oldalkormány belépés válik szükségessé.



7. ábra. Csűrőkormány kitérítés

A 7. ábrán a talaj örvény csapkodó mozgásra gyakorolt hatása látszik: a csapkodó mozgás késése miatt a talaj örvény hatását a csűrőkormány kitérítésével kell ellensúlyozni.

A talaj örvény – ha a kialakulásának feltételei adottak – mindenképpen létrejön. Figyelni kell azonban a környezetre: az ebből a szempontból helytelenül megválasztott fel- vagy leszállóhely különösen veszélyes lehet. Példaként tekintsük az alábbi ábrán vázolt esetet:



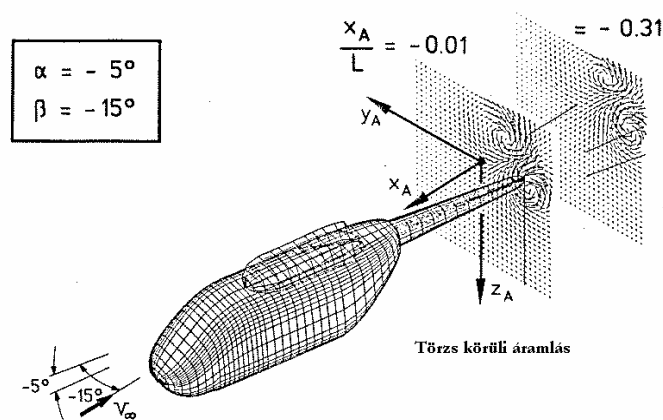
8. ábra. Földközeli örvénygyűrű kialakulása

A földközeli repüléskor a környezet, az akadályok és a szélirány figyelembe vétele rendkívül fontos. Alapvetően kerülendő a feltehetően erősen turbulens zónák és tekintetbe kell venni azt is, hogy a repülési manőverek teret igényelnek – vagyis adott esetben a repülési terület ugyan megfelelő, de a repülés folytatásához szükséges, megfelelő áramlási viszonyokkal rendelkező tér már esetleg nem áll rendelkezésre.

EGYÉB ÖRVÉNYEK

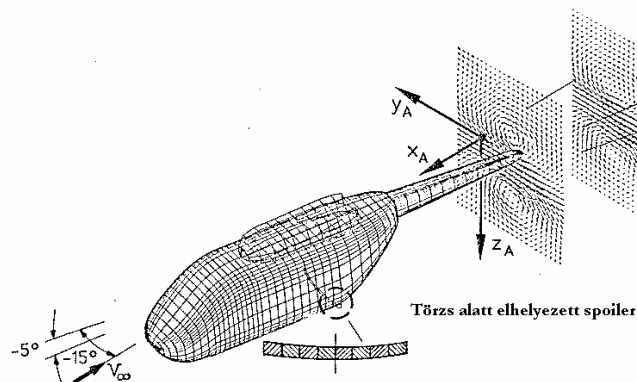
A helikopter repülése során örvények keletkeznek mindenütt, ahol légerő is keletkezik. Ezek közül a legjelentősebb talán a törzs, amely erősen változó áramlási viszonyok között működik és több okból sem lehet elegendően áramvonalasra készíteni, vagyis a különböző repülési állapotokban a törzs különböző részeiről örvények válnak le.

A törzsről leváló örvények intenzitását nyilván csökkenteni kellene, de legalább az eloszlását a repülés számára kedvező módon célszerű befolyásolni. [1]-ben például olyan, a törzs alá helyezett spoilerrel foglalkoznak, amelyek a törzs hátsó része körüli örvények eloszlását előnyösen befolyásolják.



9. ábra. Törzs mögötti áramkép

A 9. ábrán a törzs mögött kialakuló áramkép látható. Az adott áramlási viszonyok között, [1] szerint a törzs mögötti „Trefftz” síkban egy aszimmetrikusan elhelyezkedő örvény-párt találunk. Ez az örvény-pár nyilván nem a legkedvezőbb, hiszen az ilyen elhelyezkedés oldalerő keletkezést is jelez.



10. ábra. Törzs mögötti áramkép, spoiler esetén

Amennyiben a törzs alatt, keresztben egy alkalmas spoilert helyezünk el, a törzs mögötti áramképet jelentősen javíthatjuk. Ez az eljárás részben hasznos, hiszen viszonylag kis módosítással jelentős javulást ér el, részben pedig tanulságos, hiszen a kedvező hatás kis beavatkozással érhető el – a spoiler elhelyezése azonban egyáltalán nem nyilvánvaló: ennek a megoldásnak a megtalálása komoly kutató munkát igényelt.

Az örvények keletkezése a légerők keletkezésével jár együtt – mivel a repüléshez szükségünk van légerőkre, ezért az örvények keltése elkerülhetetlen. Másrészt az örvények szükséges és hasznos voltak mellett több, előnytelen hatással is járhatnak. Ez utóbbi hatások fizikai természetének megismerése és esetleges mérséklése igen fontos feladat.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] AMTSBERG, J. – AHMED, S.R.: Influence of Rear End Spoiler on Aerodynamic Characteristics and Wake Structure of a Helicopter Fuselage, 11th European Rotorcraft Forum, 1985, London
- [2] BRAMWELL, A.R.S.: Helicopter Dynamics, Edward-Arnold Ltd, 1976
- [3] GAUSZ, T.: Helikopterek, BME Mérnöktovábbképző Intézet Budapest, 1982.
- [4] GAUSZ, T. - SZILÁGYI, D.: Rotor blade air loads evaluation based on structural deformation VSDIA2004, Budapest, 8-10 Nov. 2004
- [5] GAUSZ, T.: Valóságos örvények, 100 éves a géprepülés - a katonai rendszerek repülőgépei Szolnok, 2003. ápr. 4.
- [6] GAUSZ, T.: Blade Vortex Interaction Problem at Helicopter Rotors Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'03) The 12th International Conference on Fluid Flow Technologies Budapest, Sept. 3-6 2003, pp. 1080-1085
- [7] LEISHMAN, J.G.: Principles of Helicopter Aerodynamics, Cambridge University Press, 2000
- [8] МИЛЬ, М. Л.: Вертолеты расчет и проектирование 1 Аэродинамика Машиностроение Москва 1966.
- [9] PROUTY, R.: Flight in Turbulent Air, Rotor & Wing
- [10] SCHMITZ, F.H. – GOPALAN, G. – SIM, B.W.: Flight Trajectory Management to Reduce Helicopter Blade-Vortex Interaction Noise with Head/Tailwind Effects, University of Maryland, Alfred Gessow Rotorcraft Excellence Center, 2003
- [11] STEPNIIEWSKY, W. Z. – KEYS, C. N.: Rotary-Wing Aerodynamics; Dover Publications, Inc., New York 1984.
- [12] SZILÁGYI, D.: Rotorlapátok terheléseinek dinamikai és aerodinamikai vizsgálata PhD Disszertáció, 2003 TUB Budapest
- [13] YOUNG, R.A.: Helicopter Engineering, Arnold Press Company, New York, 1949