

Varga Béla

A WINGLETEK AERODINAMIKÁJA ÉS TÉRHÓDÍTÁSUK A REPÜLÉS KÜLKÖNBÖZŐ TERÜLETEIN

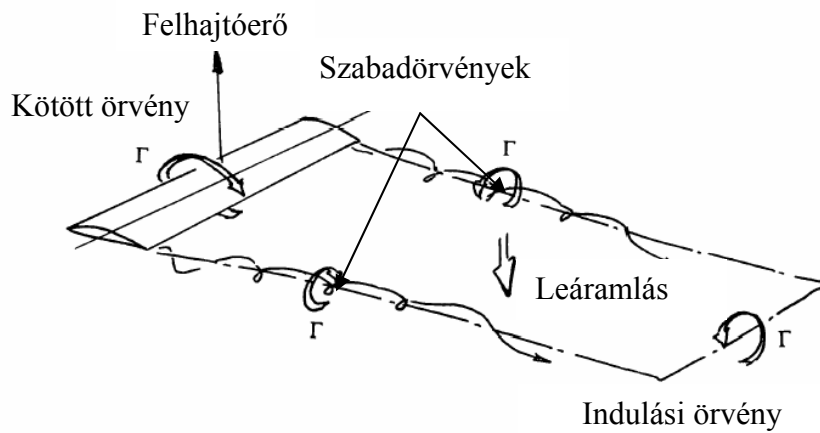
Az 1970-es évek végén a 80-as évek elején furcsa szerkezetek jelentek meg a repülőgépek szárnyvégein. Ezeket a jellegzetes szárnyvégi füleket nevezték el wingleteknek, ami a magyar terminológiában is elterjedt. A kezdetek persze nem voltak zökkenőmentesek, de hosszú és igen alapos kutatások, kísérletek, sokszor kudarcok után végül a vingletek eljutottak abba a stádiumba, hogy alkalmazásuk a repülés egyes területein mindennapossá vált. Ma szinte nem gyártanak olyan vitorlázó-repülőgépet, amely ne winglettel lenne szerelve, de az újabb utas és teherszállító gépek, business jetek jelentős részénél is találkozhatunk ezekkel a szerkezetekkel. Nézzük milyen jelenséghez kapcsolódik a wingletek alkalmazása, és hogyan fejti ki pozitív hatását.

AZ INDUKÁLT ELLENÁLLÁS

Az aerodinamikával foglalkozó szakemberek már az 1800-as években, jóval a gyakorlati repülés megkezdése előtt felfedezték, hogy véges szárnyak esetén nem csak profil ellenállás keletkezik, hanem egy olyan ellenállás is, amely kifejezetten a felhajtóerő keletkezéséhez kapcsolódik. Ez az ellenállás a szárny körüli áramlás háromdimenziós mivoltából adódik.

Ez azt jelenti, hogy a szárny alsó és felső felületei közötti nyomáskülönbség hatására a szárnyvég körül megkezdődik a nyomás kiegyenlítődése. Ez egy olyan örvényrendszer kialakulásához vezet, amely a forgáshoz szükséges energiát a repülőgép mozgásából nyeri, és ezzel közvetlenül felelős ennek az ellenállásnak, más néven indukált ellenállásnak a kialakulásáért.

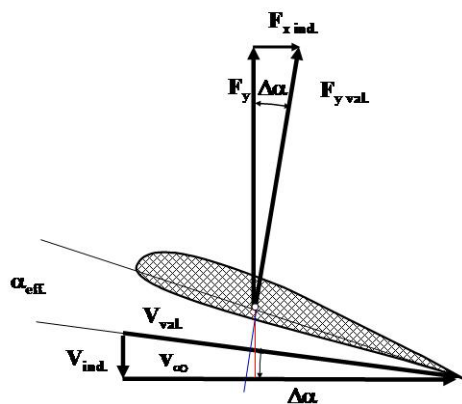
A kérdéssel Prandtl is foglalkozott, aki a véges szárnyat „patkó örvényrendszerrel” helyettesítette (1. ábra). A patkó örvény a „ Γ ” cirkulációjú kötött örvényből és a Helmholtz-féle örvénytételeknek megfelelően a szárnyvégeken ennek folytatását alkotó, szintén „ Γ ” cirkulációjú két szabad örvényből, valamint az úgynevezett indulási örvényből áll. Ez utóbbi azonban a repülőgép felszállása után a repülőtéren marad és a levegő súrlódása következtében hővé alakul [5].



1. ábra. Ideális patkó örvényrendszer.

A szabadörvények a szárny kilépőélén lefelé irányuló sebességet (v_{ind}) indukálnak, amelynek értéke változik a szárny terjedtsége mentén. Emiatt megváltozik a megfűvás iránya (V_{val}) és a felhajtóerő vektor is hátrafelé dől meg ($F_{y\ val}$). A hátradőlésből származó „x” irányú komponens lesz az indukált ellenállás ($F_{x\ ind}$) (2. ábra).

INDUKÁLT ELLENÁLLÁS



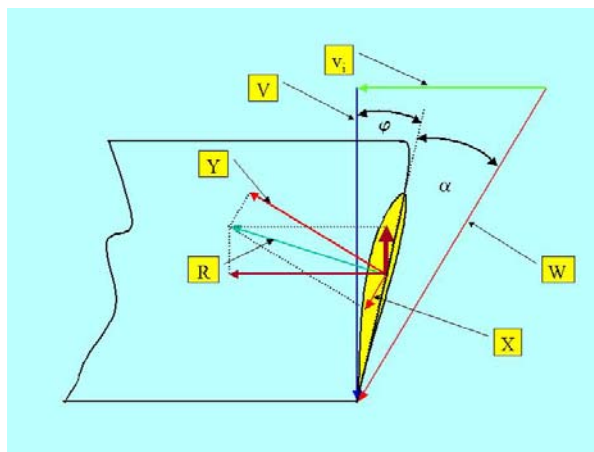
2. ábra. Profil körüli áramlási viszonyok és az indukált ellenállás

A felismerés után szinte azonnal megkezdődött ennek a jelenségnek a további kutatása, illetve azok az erőfeszítések, hogy valamilyen módon csökkentsék ezt a hatást. Frederick W. Lanchester az 1800-as évek végén felismerte, hogy a szárnyvégeken elhelyezett függőleges felületek jelentősen csökkentik az indukált ellenállás nagyságát kis sebességű (nagy felhajtóerő tényezővel) történő repülés esetén. Szabadalmát 1897-ben be is jegyeztette. Az alapvető probléma az volt, hogy nagy repülési sebességeknél (kis felhajtóerő tényező) esetén a függőleges felületeken keletkező járulékos profil ellenállás, az indukált ellenállás csökkenése ellenére, az összellenállás növekedéséhez vezetett.

A nehézségek ellenére a kutatók érdeklődése nem csökkent ez irányt a terület iránt, amit jelez, hogy könyvtárnyi irodalom foglalkozik a jelenséggel. Ennek ellenére a gyakorlatban jól használható megoldás a wingletek 80-as évekbeli megjelenéséig nem született.

HOGYAN CSÖKKENTI A WINGLET AZ INDUKÁLT ELLENÁLLÁST?

Mint az előző fejezetben már említésre került, a szárnyvégi zárólapok alkalmazása a repülés kezdeti időszakában felmerült, de ezek csupán, mint egyfajta „kerítés”, fizikai akadályt képeztek a szárnyvégi átlámlás útjában. Nagyobb repülési sebességeknél, amikor a szárnyvégi átlámlás jelentősen csökken, a zárólapokon keletkező profilellenállás már nagyobb, mint az elérhető indukált ellenállás csökkenés.



3. ábra. Áramlás a winglet profil körül.

Wingletek alkalmazásánál ennél bonyolultabb a helyzet. A wingletek nem egyszerű fizikai akadályt jelentenek a szárnyvégén átáramló közeg útjában, hanem a körülöttük kialakuló áramlás megváltoztatja a szárny áramlási rendszerét is úgy, hogy ezzel jelentősen lecsökken a szárnyon a terjedtség-menti áramlás.

A 3. ábra szemlélteti a winglet profil körüli áramlás alakulását. Leegyszerűsítve a winglet a következőképpen fejt ki a hatását. A kiválasztott winglet metszetet a repülési sebességből (V) és a szárnyvégi örvényekből származó kerületi sebesség (v_i) összegzése után kapott eredő megfűvás (W) éri. Így a wingleten keletkező eredő erőnek (R) optimális esetben lesz egy haladási irányba eső komponense, amelyet tekinthetünk úgy, mint egy járulékos vonóerő. Ezen kívül természetesen a winglet profil is eltéríti az áramlást, ami azt jelenti, hogy az eredő megfűvás (W) iránya a winglet után közel párhuzamossá válik a repülési iránnyal, csökkentve ezzel a szárnyon a terjedtség-menti áramlást.

A hatás tehát kettős: egyrészt pozitív hatással lesz a wingleten keletkező vonóerő, másrészt a szárnyvégi örvények intenzitása jelentősen csökken, csökkentve ezzel a szárnyon a terjedtség-menti áramlást és ezzel a keletkező indukált ellenállást.

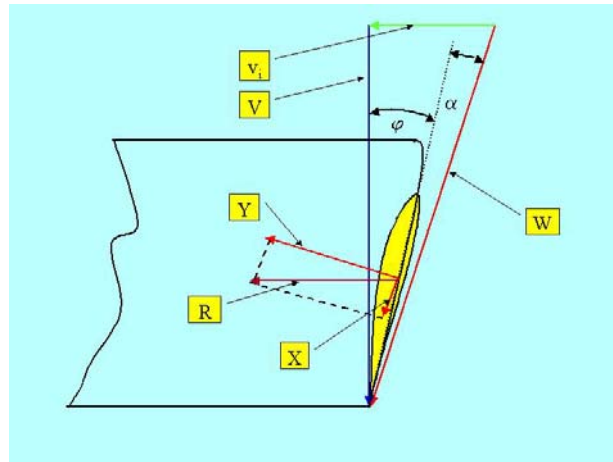
A hatás jobb megértése miatt a wingletet hasonlíthatjuk egy olyan légcsavarhoz is, ahol nem a légcsavart forgatjuk, hanem a légcavar körül forgatjuk meg a levegőt. Optimális esetben (megfelelő állásszög), a winglet „légcavarlapáton” is keletkezik vonóerő, azonban ellentétben a légcavarral, amely megforgatja a levegőáramot a winglet lefékezi a levegőáram forgását, így az előbb már említett módon csökkentve a szárnyvégi örvények intenzitását.

A nehézséget itt az jelenti, hogy sem a „légcavarlapát” beállítási szöge (φ), sem pedig a „légcavarlapát” fordulatszáma ($\sim v_i$) nem szabályozható. Ez utóbbit tekintve ugyan a részecskék az örvénymagban a Rankine-féle örvények esetében, ami a szárnyvégi örvényrendszert is jellemzi, merevtestszerűen forognak, a forgás szögsebessége azonban jelentősen változik a repülési sebesség függvényében. Ez azt jelenti, hogy a winglet profilok megfűvási viszonyai rendkívül széles tartományban változnak a repülési sebesség függvényében.

Kis repülési sebességnél (V) ugyanis a szárnyvégi örvényben az adott metszethez tartozó kerületi sebesség (v_i) magas, ami azt jelenti, hogy az állásszög közelít a kritikus állásszöghöz. A winglet beállítási szöge többé-kevésbé akkor tekinthető optimálisnak, ha a szárnyon és a wingleten nagyjából egyszerre következik be az átesés.

Növekvő repülési sebesség (V) esetén az állásszög csökken, az eredő erő (R) lassan hátrahajlik és a repülési irányba eső komponense már hátrafelé fog mutatni. Valahol ennél az állásszögnél, illetve a hozzátartozó sebességnél a

winglet már ellenállás növekedést fog okozni (az indukált ellenállás csökkenése már minimális lesz, az eredő erő (R) további elfordulása pedig már ellenállást növel). A 4. ábra éppen a határesetet ábrázolja.



4. ábra A winglet megfűvási viszonyai növekvő repülési sebességnél.

Látható, hogy csak egy szűk tartomány lesz, ahol igazán optimálisan működik a winglet. Ennek megfelelően nagyon gondosan kell megválasztani a winglet geometriáját, így a winglet profil(oka)t, a winglet magasságát, terjedtség-menti húrmegoszlását, nyílazását, de talán ezek közül is legfontosabb a helyes beállítási szög (ϕ), illetve elcsavarás megválasztása. A cél mindenképpen az, hogy a teljes repülési sebességtartományban sehol ne okozzon a winglet ellenállás növekedést a winglet nélküli szárnyal összehasonlítva.

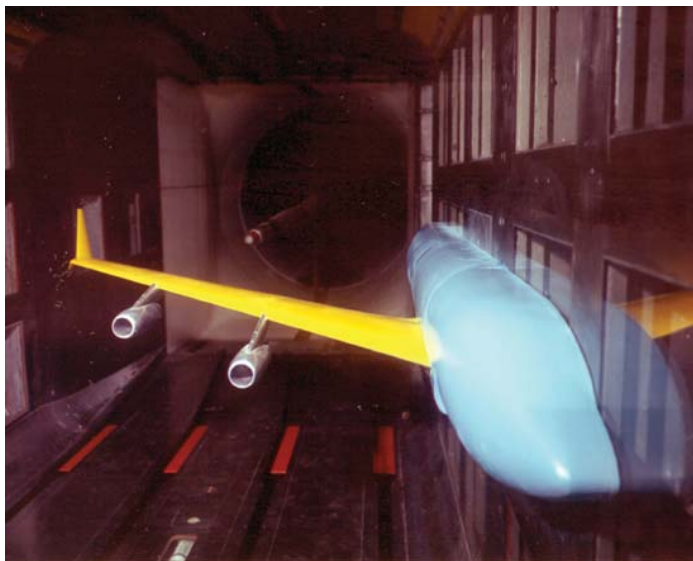
WINGLETEK A SZUBSZONIKUS REPÜLÉSBEN

Mint az előző fejezetekben említettem az indukált ellenállás részaránya az összellenállásban különösen magas a kis sebességgel és nagy állásszöggel végrehajtott repülések esetén. Elmondható azonban, hogy a szubszonikus tartomány felső határánál szintén igen jelentős az indukált ellenállás hatása, amely itt elérheti az összellenállás 50 %-át.

A kérdéssel Richard T. Whitcomb kezdett el foglalkozni, akinek nevéhez a szuperkritikus profilok kifejlesztése is kapcsolódott. Úgy gondolta, hogy egy helyesen megválasztott winglet konfigurációval, csökkentve az indukált ellenállást, jelentős üzemanyag-fogyasztáscsökkentés, illetve hatótávolság növelés lenne elérhető a szubszonikus repülési tartományban is. Az ellenzők azt

hangsúlyozták, hogy ugyanez a hatás elérhető azzal is, ha egyszerűen megnövelik az adott repülőgép fesztávolságát. Ez azonban természetesen növeli a szárny hajlító-igénybevételét is. Hozzá kell tenni, hogy wingletek alkalmazása is növeli a hajlító-nyomatékot, de ugyanakkora indukált ellenállás csökkenéshez ez a hajlító-nyomaték növekmény jelentősen kisebb lesz. Ugyanakkor lehetnek még egyéb korlátozó kritériumok, amelyek esetleg egyébként sem tennék lehetővé a fesztávolság növelését.

A kezdeti fél-fesztávú modellkísérletek a NASA Langley kutatóintézet 2,4 m széles transzonikus szélcsatornájában folytak 1974 és 76 között.



5.ábra. A KC-135-ös fél-fesztávú modellje a szélcsatornában.

A kísérletek azt mutatták, hogy egy tipikus szubszonikus (utas)szállító repülőgépnél az indukált ellenállás 20 %-al csökkenhet, a jósági szám (c_y/c_x) pedig 9 %-al növekedhet wingletek alkalmazásával. A jósági szám növekménye winglettel ugyanakkora hajlító-igénybevétel növekedést feltételezve kétszerese volt annak, mintha megnövelt fesztávot alkalmaztak volna.

A nagy repülőgépgyártók érdeklődéssel figyelték a kísérleteket, de a biztató eredmények ellenére a kezdeti időszakban megoszlottak a vélemények. A Boeing például 1977-ben a 747-es új modifikációjánál úgy gondolta, hogy a várható gazdasági haszon nem fedezi a szerkezeti módosítás költségeit. A Lockheed L-1011-es repülőgépén is a fesztáv növelését favorizálta kiegészítve az aktív vezérlés terheléscsökkentő hatásával.

A kísérleteket alapvetően a klasszikus (utas)szállító repülőgépekre végezték, de a gyakorlati hasznosítás a business jeteknél kezdődött meg. 1977-ben a Learjet megalkotta a Learjet Model 28-at, amely az első winglettel szerelt sugárhajtású gép és egyben az első sorozatban gyártott winglettel szerelt gép lett. A Gulfstream szintén alkalmazni kezdte a wingleteket a Gulfstream III, IV és V típusoknál. Különösen a Gulfstream V vált sikeressé. Hatótávolsága elérte a 6500 tengeri mérföldet, az utazósebessége pedig a 0,89 Mach értéket.



6. ábra. Boeing 747-400, az első nagy kereskedelmi repülőgép winglettel.

1985-ben a Boeing is beadta a derekát és a 747-400-as változatnál rendszeresítette a wingleteket, ami 3 %-al növelte meg a repülőgép hatótávolságát. Ezután a wingletek alkalmazása a kereskedelmi repülésben is egyre elterjedtebbé vált [3].

WINGLETEK A VITORLÁZÓREPÜLÉSBEN

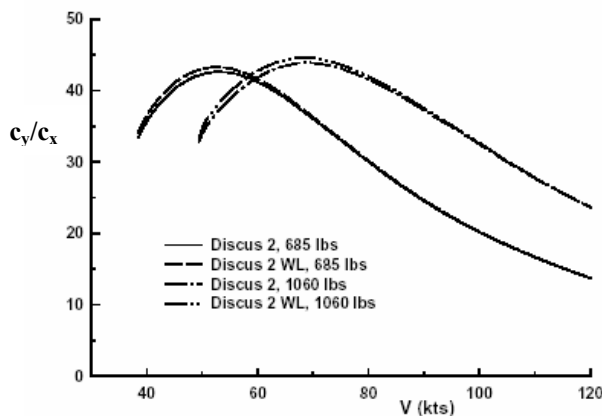
A vitorlázó-repülésben a 80-as években vetődött fel a wingletek alkalmazásának lehetősége. A kezdeti időszakban a kísérletek főleg Mark D. Maughmer a Pennsylvanai Állami Egyetem Repülőmérnöki Tanszéke professzorának nevéhez fűződik. A kísérletek egy akkor korszerűnek számító standard osztályú vitorlázó-repülőgéppel kezdődtek, ami főleg különböző wingletek próbálgatását jelentette. Később a módszerek finomodtak és képessé váltak az egyes szárnyak indukált ellenállásának megfelelő pontosságú meghatározására, illetve képessé

váltak annak meghatározására, hogy a winglet geometriájának megváltoztatása milyen pozitív, vagy negatív hatással lesz a gép repülőtulajdonságaira.

A vitorlázórepülésben bonyolítja a helyzetet az, hogy repülési sebességtartományuk viszonylag széles. Míg termikelés közben a repülőgép sebessége 80-100 km/h, addig erős átlagemelések esetén a termikek közötti siklási sebesség meghaladhatja a 200 km/h-t. Ha a winglet a kis repülési sebességekre lenne optimalizálva (ebben a tartományban biztosítaná a maximális indukált ellenállás csökkentését), magasabb sebességtartományban ez már ellenállás növekedést okozhatna.

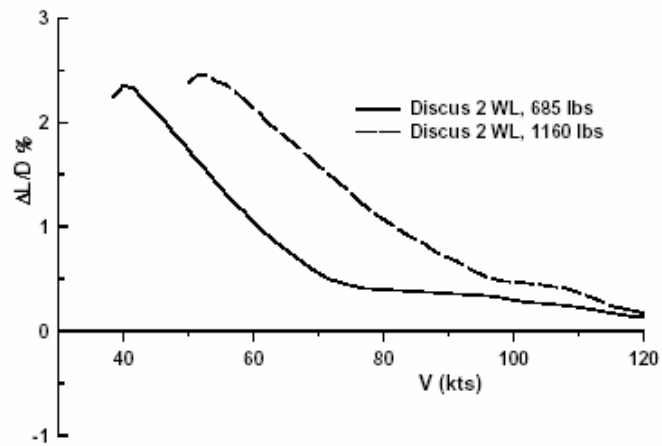
A fő cél tehát nem az indukált ellenállás mindenáron való csökkentése lett, hanem a winglet pozitív hatásának kiterjesztése az egész repülési tartományra.

Az 7. ábrán láthatjuk a Discus 2 vitorlázó-repülőgép jósági számának változását a repülési sebesség függvényében víztöltés nélkül (685 lbs) alapkivitelben és winglettel ellátva (WL), illetve ugyanezt a víz ballasztal ellátott (1060 lbs) gépre is. Látható, hogy a jósági szám növekedése a winglet hatására egyik esetben sem túl erőteljes.



7. ábra. A Discus 2 jósági számának (c_y/c_x) változása winglet hatására.

A változás jobban követhető a 8. ábrán, amely a víztöltés nélküli (685 lbs) és víz ballasztal (1060 lbs) ellátott, winglettel szerelt gép jósági számának százalékos változását mutatja a winglet nélküli gép jósági számához képest. Látható, hogy kis sebességtartományban a jósági szám növekedése kb. 2,5 %-os. Nagysebességű siklás esetén a jósági szám változása elenyésző, de itt sem tapasztalható teljesítményromlás [1].



8. ábra. A Discus 2 jósaági számának százalékos változása a winglet hatására.



9. ábra. Ventus 2bx vitorlázó-repülőgép winglettel.

A két diagramból látszik, hogy a teljesítmény nyereség nem túl nagy és az is főleg gyenge termikes időben aknázható ki. Két méteres átlagemelések után a várható átlagsebesség növekedés mindössze 0,5 %-os. Hozzá kell azonban tenni azt is, hogy mint bármely versenysportban a világ élvonala rendkívül szoros és ilyen kiélezett versenyben az ilyen kis különbségek is döntőek lehetnek [2].

ÖSSZEFOGLALÁS

Azt mondhatjuk, hogy a 70-es, 80-as évek bizonytalansága után a wingletek teret nyertek a repülésben. Manapság már szinte a repülés minden területén találkozhatunk vele, és nem nagyon van olyan szakember, aki megkérdőjelezné létjogosultságukat. Külön iparág alakult arra, hogy az eredetileg nem winglettel gyártott idősebb gépeket utólag ellássák ezzel a szerkezettel, természetesen az illetékes légügyi hatóságok előírásrendszereit betartva.

A másik nagy alkalmazási területen, a vitorlázórepülésben is döntővé vált a wingletes gépek részaránya. Míg 1991-ben, Texasban megrendezett vitorlázórepülő világbajnokságon a résztvevő 105 repülőgépből 15 használt wingletet, addig ma már minden korszerű teljesítmény vitorlázó-repülőgépre legalább opcióként rendelkezésre áll a winglet.

A wingleteket olyan speciális területeken is használják, mint a mezőgazdasági repülés, ahol a teljesítményjavítás helyett, vagy mellett például az optimális szóráskép kialakítása a fő cél [4].

IRODALOMJEGYZÉK:

- [1] MAUGHMER, Mark D.: About winglets,
<http://www.mandhsoaring.com/articles/WL-Soaring.pdf>.
- [2] MAUGHMER, Mark D.: The design of winglets for high-performance sailplanes, http://www.mandhsoaring.com/articles/Winglet_Design.pdf.
- [3] <http://oea.larc.nasa.gov/PAIS/Concept2Reality/winglets.html#top>.
- [4] DR. POKORÁDI László, TAMÁS Ferenc.: A szárnyvégi felületek vizsgálata napjainkban, ZMNE RI Repüléstudományi Közlemények, 1977/1.
- [5] DR. RÁCZ Elemér.: Repülőgépek, Tankönyvkiadó, Budapest, 1978.