Gausz Tamás

ÖRVÉNYELMÉLETEK ALKALMAZÁSA HELIKOPTER ROTOROK AERODINAMIKAI VIZSGÁLATÁRA

A helikopter rotorok aerodinamikai számítására több módszer terjedt el. A klasszikus, az un. „háromszög" indukált sebesség-eloszláson alapuló módszer, amely azonban nem képes figyelembe venni a rotorlapátok geometriai-aerodinamikai jellemzőit. E módszert az előbb említett hátrány ellenére is továbbfejlesztették, mivel e hátrány annyiban előny is, hogy így a számítások jelentősen leegyszerűsödnek. Emiatt persze a számítási modellben nem jönnek létre egyes alapvető fizikai kapcsolódások, ami az eredmények pontosságát csökkenti és alkalmazhatóságának meglehetősen szűk határokat szab [1,2].

A számítógépek megjelenése e tudományterületen is lehetővé tette a munkaigényes, numerikus számítási eljárások alkalmazását. Ettől kezdve hódít teret az un. „lokális momentum"-ok elmélete, a kombinált impulzus-lapelem elmélet általános megfúvásra történő alkalmazása [4] és a helikopter rotorok örvényelmélete is [1,6].

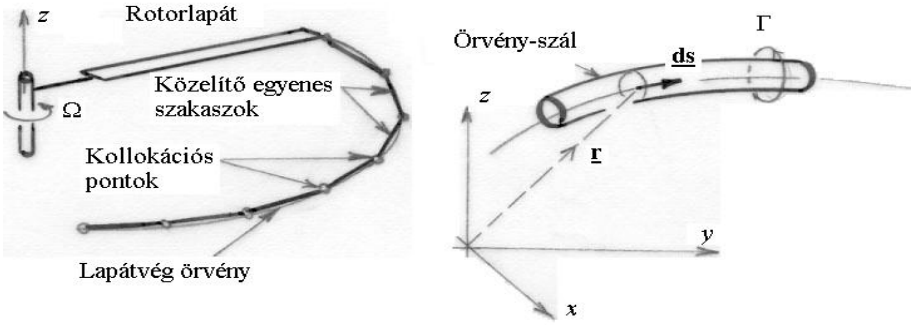
A merevszárnyú repülőgépek hordfelületének örvényelméleti módszerekkel történő számítása a múlt század 20-as éveiben kezdődött és a helikopterek megjelenésének időpontjára már számos módszert alkottak meg (Prandtl, Galuert, Munk, Weissinger stb.). E cikkben az örvényelméletek alkalmazási lehetőségeiről lesz szó.

ELMÉLETI ALAPOK

A helikopter rotorok aerodinamikai számításában az örvényelméletek a rotorlapátok által indukált sebességek meghatározására szolgálnak. A számítás legegyszerűbb esetében feltételezzük, hogy a teljes örvényrendszer a rotorlapátok végéről leúszó, szignifikáns lapátvég-örvénnyel helyettesíthető. Ezt tüntettük fel az 1. ábrán.

Az „S" görbe mentén elhelyezkedő örvényszál indukált sebesség-mezejének számítására a (klasszikus) Biot—Savart törvényt alkalmazzuk:

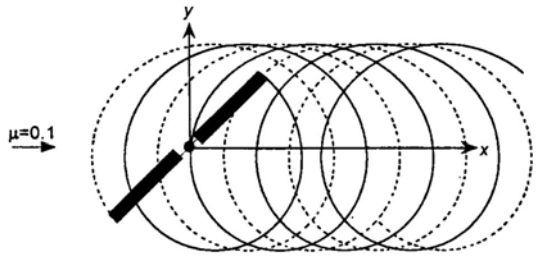
$$\underline{w} = \frac{\Gamma}{4\pi} \int_S \frac{\underline{ds} \times \underline{r}}{|\underline{r}|^3} \tag{1}$$



1. ábra. Rotorlapátvég örvény

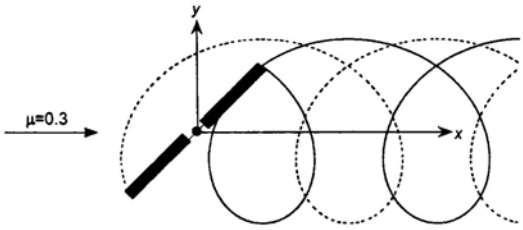
Az (1) egyenletben a cirkuláció (Γ) az ismeretlen, értékét úgy határozzuk meg, hogy az eredő áramlás — ami a repülési sebességnek és a rotorlapát mozgásainak megfelelő megfúvásból és az örvények által indukált sebességekből áll — a rotorlapáthoz simuljon. Ez azt jelenti, hogy a rotorlapátok húrjának (3/4)-én elhelyezkedő ellenőrző pontokban (4. ábra) az eredő áramlás a profilt éppen érintő irányból éri.

Az örvényelméletek alkalmazása a merev szárnyak esetén sem mindig egyszerű. A pontos eredményhez szükséges a leúszó örvények pályájának (felcsavarodásának) vizsgálata. Ez a kérdés fokozottan igaz a rotoroknál. A rotorokról leúszó örvények pályája kis sebességű repülés esetén a 2. ábrán látható.



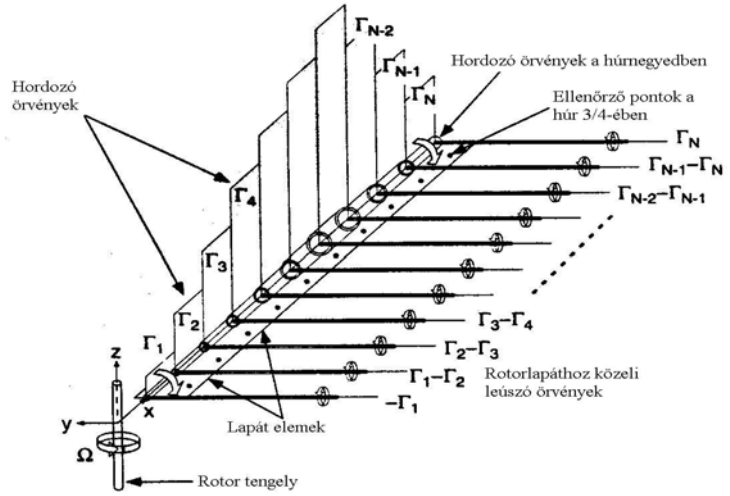
2. ábra. Leúszó rotorlapátvég örvények

A 2. ábrán feltüntetett pályák un. „előírt” pályák — ezeket a rotorlapát és a helikopter mozgása egyértelműen meghatározza, az örvények indukált sebességének nincs szerepe benne. (A μ az előrehaladási szám, a repülési sebesség rotorlapátvég síkba eső összetevőjének és a rotorlapátvég kerületi sebességének hányadosa). Ugyanezen pályákat, nagy repülési sebesség esetén a 3. ábrán tüntettük fel.



3. ábra. Leúszó rotorlapátvég örvények

A 3. ábrán feltüntetett pályák valamivel jobb helyzetet tükröznek, mint a 2. ábrán lévők, mivel itt az egyes örvények „ritkábban” helyezkednek el, de minkét ábráról látszik, hogy a leúszó örvények szerepe az indukált sebességek alakításában — különösen egyes régiókban — igen jelentős. Ez pedig igen komoly számítási hibák forrása lehet, mivel a leúszó örvények pályáját igen nehéz kellő pontossággal megállapítani.

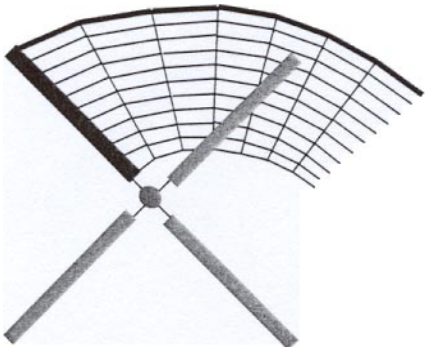


4. ábra. Hordozó és leúszó örvények

Pontosabb vizsgálat esetén figyelembe kell venni, hogy a rotorlapáton keletkező felhajtóerő változásának következtében az egész rotorlapát mögött cirkuláció úszik le (4. ábra).

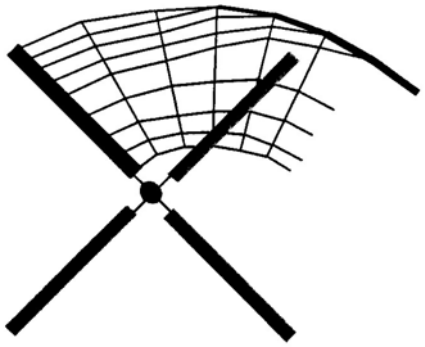
A helikopter rotorok korszerű számításában a lapáthossz mentén változó megoszlású hordozóörvénnyel történő számolás alapkövetelmény — az egyetlen lapátvég-örvény feltételezése csak minőségi vizsgálatokban engedhető meg. Ez a helyzet azonban további jelentős számítási nehézségeket okoz: a keletkező örvényrendszer mozgási viszonyainak vizsgálata nagyon számításigényes feladat, továbbá numerikus problémák is fellépnek.

Az egy lapátról a változó cirkulációjú következtében (előrehaladó repülésben keletkező) leúszó örvények legegyszerűbb esete az 5. ábrán látható.



5. ábra. Rotorlapátról leúszó örvény-felület

A fenti esetben a leúszó örvény-felület előírt geometriájú, pl. nem csavarodik fel, ez a számításokban hibát okoz. E hiba csökkentése érdekében figyelembe vehető az örvény-felület felcsavarodása is:

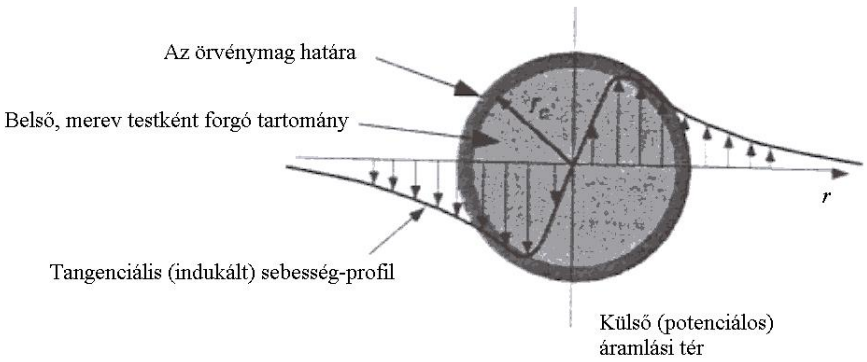


6. ábra. Rotorlapátról leúszó, felcsavarodó örvény-felület

Az eddigiekben feltételeztük, hogy az örvények potenciálosak, tehát az általuk indukált sebességet a Biot—Savart törvény (1) alapján lehet kiszámítani. Ilyen számításokat — kézzel — már az 1930-as években is végeztek. Rosenhead 1931-ben végzett számításait [5] ismerteti; már ekkor kiderült, hogy egy örvény rendszer egymás indukált sebesség-mezejében mozogva nem tart egy, konvergens helyzethez, hanem a tapasztalatnak is megfelelően, a Helmholtz féle instabilitás következtében kaotikus állapot felé tart. (Ez a kaotikus állapot tapsztalható a felcsavarodó szárnyvég-örvények magjában). A rotorlapátról leúszó örvény-felület mozgásának vizsgálatakor, amikor sok, viszonylag intenzív örvény egymáshoz közel mozog, a klasszikus modell nem alkalmazható, új modellre van szükség.

VÉGES ÁTMÉRŐJŰ ÖRVÉNY

Az eddigiekben feltételeztük, hogy az örvényszálak keresztmetszete nagyon kicsi, gyakorlatilag nulla — tehát az örvényszál egy geometriai görbével leírható. Ez azt is jelenti, hogy az örvényszál rotációja tart a végtelen felé — úgy, hogy a rotáció és a keresztmetszet szorzat-integráljának határértéke egy véges szám, a cirkuláció. Ez egy matematikai absztrakció, alkalmazását a felhasználásával kapott eredmények támasztják alá. A rotorok aerodinamikai számításában ez az absztrakció, igényes számítás esetében már nem engedhető meg — ezért ezekben az esetekben valamely, véges sugarú örvény-maggal rendelkező modellt alkalmaznak. Az örvény fizikai modellje a 7. ábrán látható.



7. ábra. Véges sugarú örvény-mag

A véges sugarú örvény-mag belső része közel merev testszerűen forog, ezt a feltételezést az örvénykísérletek igazolják.

Az örvények sebesség eloszlásának leírására több modellt dolgoztak ki. A legegyszerűbb a Rankine-modell.

$$w_t = \begin{cases} \left(\dfrac{\Gamma}{2\pi\, r_c}\right)\bar{r} & ha\ 0 \le \bar{r} \le 1 \\ \left(\dfrac{\Gamma}{2\pi\, r_c}\right)\dfrac{1}{\bar{r}} & ha\quad \bar{r} > 1 \end{cases} \tag{2}$$

ahol: $\bar{r} = r / r_c$

w_t — a tangenciális indukált sebesség.

A Rankine-modell igen egyszerű, de a valóságtól távoli eredményeket ad. A következő lépés a Lamb—Oseen modell volt, melyet a Navier—Stokes egyenlet speciális megoldására alapoztak:

$$w_t = \frac{\Gamma}{2\pi\, r_c} \frac{1}{\bar{r}} \left(1 - e^{-\alpha \bar{r}^{-2}}\right) \tag{3}$$

ahol: α — 1.25643

Vatisas és szerzőtársai az 1990-es években fejlesztették ki a következő örvény-mag-modell családot:

$$w_t = \left(\frac{\Gamma}{2\pi\, r_c}\right) \frac{\bar{r}}{\left(1 + \bar{r}^{-2n}\right)^{\frac{1}{n}}} \tag{4}$$

ahol: *n* — egész szám, értéke pl. mérések alapján választható.

Ez a modell az *n = 2* esetben elég közel fut a Lamb—Oseen modellhez; mindkét modell jól alkalmazható és az eredmények viszonylag közel vannak a méréssel kapható eredményekhez. Csak megjegyezzük, hogy az $n \to \infty$ esetben a Vatisas-modell a Rankine-modellhez tart.

Az örvényekkel kapcsolatos pontosabb vizsgálatok megmutatták, hogy a tangenciális indukált sebesség mellett még radiális és axiális indukált sebesség is létezik.

Az axiális indukált sebesség komponens (w_z) — ez „A” konstans figyelembe vételével — a következőképpen írható:

$$w_z = -\frac{A}{z}\left[1 - \frac{r^2}{\left(r_c^{\,2n} + r^{2n}\right)^{\frac{1}{n}}}\right] \tag{5}$$

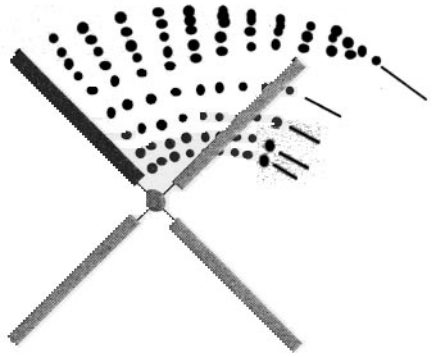
A radiális indukált sebesség komponens (w_r) az axiálishoz hasonló összefüggésből számítható:

$$w_r = -\frac{A\, r}{2\, z^2}\left[1 - \frac{r^2}{\left(r_c^{\,2n} + r^{2n}\right)^{\frac{1}{n}}}\right] \tag{6}$$

Az örvényekre illetve az örvény-rendszerekre több megmaradási tétel vonatkozik — ezek egyike az energia-megmaradás elve. Valóságos (súrlódásos) közegben az örvény energiája disszipálódik (hővé alakul), ami részben a cirkuláció értékének csökkenésében, részben az örvénymag illetve az örvényes zóna kiterjedésének növekedésében nyilvánul meg. A kérdés pontosabb vizsgálata meghaladja e cikk kereteit, csak megjegyezzük, hogy a cirkuláció értéke nagyjából exponenciálisan csökken (a Lamb—Oseen modell exponenciális tagjához hasonlóan), az örvénymag sugara pedig az örvény létezési idejének négyzetgyökével arányosan nő.

ÖRVÉNY-CSOMAGOK

A szerző ismeretei szerint e téren a legkorszerűbb számolási eljárás az örvény-csomagok módszere (vortex blob method). Ez a módszer térbeli, háromdimenziós örvény-csomagok súrlódás következtében létrejöttével és ezek mozgásával foglalkozik. Ilyen örvény-csomagokkal lehet pl. határréteget modellezni vagy henger körül kialakuló áramlást vizsgálni. Egy henger körüli áramlás vizsgálatára 10 000-es Reynolds számnál kb. 5000 örvény-csomag szükséges és elegendő is. A módszernek, természetesen különböző változatai léteznek, törekszenek az örvény-csomagok számának csökkentésére, illetve másik oldalról a méretük növelésére, hiszen az örvény-csomagok nagy száma miatt elvész az örvény-módszerek azon alapvető előnye, hogy a teljes áramlási teret meg tudjuk határozni egy kis részének vizsgálatával. A helikopter rotorokra alkalmazott, örvény csomagok használatát mutatja a 8. ábra.



8. ábra, Örvény-csomagok (vortex blob method)

ZÁRÓ MEGJEGYZÉSEK

Az örvényelméletek helikoptereknél történő alkalmazására jelenleg is komoly erőfeszítéseket tesznek. Ma több, a helikopterek repülését szimuláló komplex program létezik — pl. a RAPID+ elnevezésű program-csomag örvény modelljében még előírt pályán leúszó örvények szerepelnek.

Az örvény-modellek jelenleg még intenzíven kutatott kérdése a leúszó örvények kölcsönhatása egymással, a helikopter felületével (törzs, faroktartó) és a farokrotorral. E problémák megoldásához az elméleti kutatásnak nagy szüksége van a gyakorlati mérésekre.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] BRAMWELL, A.R.S.: Helicopter Dynamics, Edward Arnold, London, 1976.
[2] GLAUERT, H.: Grundlagen der Tragflügel und Luftschraubentheorie, Springer, Berlin, 1929.
[3] GAUSZ, T.: Helikopterek, BME Mérnöki Továbbképző Intézet, 1982.
[4] GAUSZ, T.: Helikopter rotorok működésének integrált szimulációja, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, Repüléstudományi Közlemények, XI. évf. 26. Szám, 1999.
[5] LEONARD, A.: Vortex Methods for Flow Simulation, Journal of Comp. Phys., 1980.
[6] MARTINOV, A.K.: Teorija nyeszusevo vinta, Masinosztroenyije, 1973.
[7] STAUFENBIEL, R.: Zur Begründung und Anwendung der Kirchoff-Funktion in der Wirbeldynamik, RWTH Aachen, 1983.