

## **KOAXIÁLIS ROTOROK AERODINAMIKAI ÉS DINAMIKAI MODELLEZÉSE**

Célkitűzésem, hogy létrehozzak egy aerodinamikai-dinamikai-aeroelasztikus viselkedés leírására alkalmas műszaki-matematikai-modellt, mely tetszőleges, egyenes vonalú stacionárius repülési állapotban képes modellezni a koaxiális rotorrendszert különös tekintettel annak alsó rotorjára. Ahhoz, hogy ezt elérjem, együtt kell vizsgálnom a merev és rugalmas lapátmozgásokat, a lapátok fölötti áramlási teret, és a lapátokon ébredő aerodinamikai erőket, figyelembe véve a felső rotor hatását és a profilok körüli áramlás instacionárius voltát egyaránt. A számítás alapja a kombinált impulzus-lapelem elmélet, melyet kiegészítve az ONERA modellel [8] és a felső lapátok lapátvég-örvényeinek hatásvizsgálatával, az indukált sebesség-eloszlás és az instacionárius hatások meghatározhatóak. Amennyiben ez sikeres, az így kapott eredmények felhasználhatóak a helikopter teljesítmény-számításaihoz, egyensúly vizsgálatokhoz, és végül de nem utolsósorban a lapátterhelések meghatározásával élettartam vizsgálatokhoz is. A kombinált impulzus-lapelem elmélet angol rövidítése a BEMT vagy a CBEMT, elméletileg jól ismert számítási módszer. Az általam alkalmazott, új örvényelméleti kiegészítéssel megvalósítható (az eredeti módszerből hiányzó) a lapátvég örvények nulla eredőjű hatásainak figyelembe vétele is (BEMVT).

### **A MODELL**

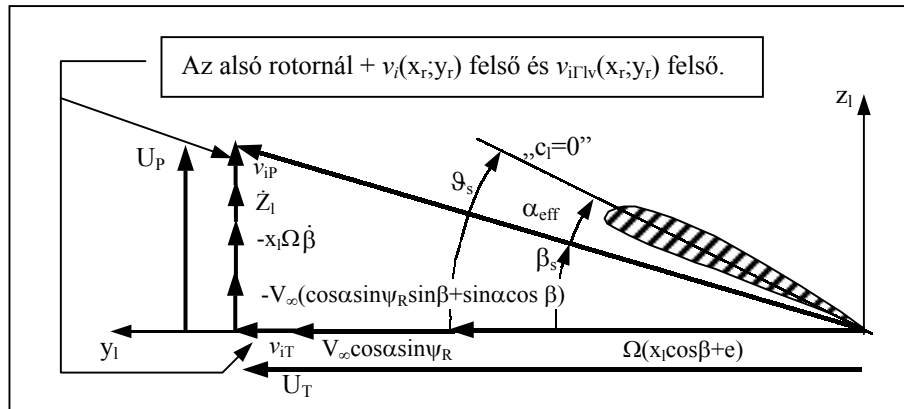
Mint azt már a bevezetésben is említettem, a számítási modell négy fő alpra támaszkodik. Ezek rövid áttekintése következik, a korábban e tárgykörben közzétett anyagok figyelembe vételével.

#### **Az impulzus tétel**

Az impulzus tétel alkalmazásakor a rotorok külön vizsgálatához az egyes rotorok áramcsövének keresztmetszetét a Galuert-féle összefüggésből kapott felület két azonos területű ellipszisre osztásával helyettesítettem [8]. Az ellipszis egyenletével a keresztmetszeti felületek nagyságát leíró  $K(yr)$  függvénnyel a rotorsík egy adott elemében meghatározhatóvá válik az áramlási keresztmetszet.

#### **Lapelem elmélet**

A lapelem használatához ismerni kell az egyes keresztmetszetekben, egy adott azimut helyzetnél a sebesség-összetevőket (1. ábra.) egyenes vonalú egyenletes vízszintes repülés esetére. Az alsó rotor esetén ezek az összetevők kiegészülnek a felső rotor által indukált sebességértékekkel valamint a felső rotorok lapátvég-örvényeinek hatásával. Ugyanakkor a számításban a lapátvégeknél egy, a lapátvég veszteségeket figyelembe vevő polinom segítségével a felhajtóerő tényező minden esetben 0 értékre van csökkentve a véges szárny figyelembe vétele okán.



1. ábra. A lapalelem sebességkomponensei

A profilok aerodinamikai tulajdonságainak instacionárius áramlás, okozta megváltozása szintén ezen a helyen vehető figyelembe az ONERA modell összefüggéseivel [2] és [8] alapján. A sebességértékek ismeretében a profiljellemzők és azok időszerinti első deriváltjai meghatározhatók [3].

### A lapát csapkodó és csavaró mozgása

A lapátmozgások vizsgálata a merev lapát koordináta rendszerében a legcélszerűbb. A matató mozgást figyelmen kívül hagyásával, csak a csapkodó és csavaró mozgásokat vettem figyelembe azok szakirodalomból [3] ismert egyszerűsített mozgásegyenleteinek felhasználásával [8]. A számítás során a lapátcsuklókra vonatkozó, eredő aerodinamikai nyomatékot minden esetben zérusnak vettem.

### A lapát hajlító deformációja

A számítás során csak a csapkodó értelmű hajlító deformációt vettem figyelembe. Az (1) differenciálegyenlet megoldásához [9] alapján felhasználtam a lapát első 4 saját lengésképét  $\Phi_i(x)$  ( $i=1,2,3,4$ ). Ez az egyenlet a Lagrange egyenletből vezethető le és segítségével meghatározható a 2. 3. és 4. saját lengéskép-függvény és a hozzájuk tartozó sajátfrekvencia:

$$q_i'' + \lambda_i^2 q_i = \frac{F_i}{\Omega^2 R^2 m_i}; \quad i=2,3,4 \quad (1)$$

- $i$ -edik általánosított koordináta ( $q_i$ );
- $i$ -edik sajátfrekvencia ( $\lambda_i \Omega$ );
- $i$ -edik általánosított tömeg ( $m_i$ ).

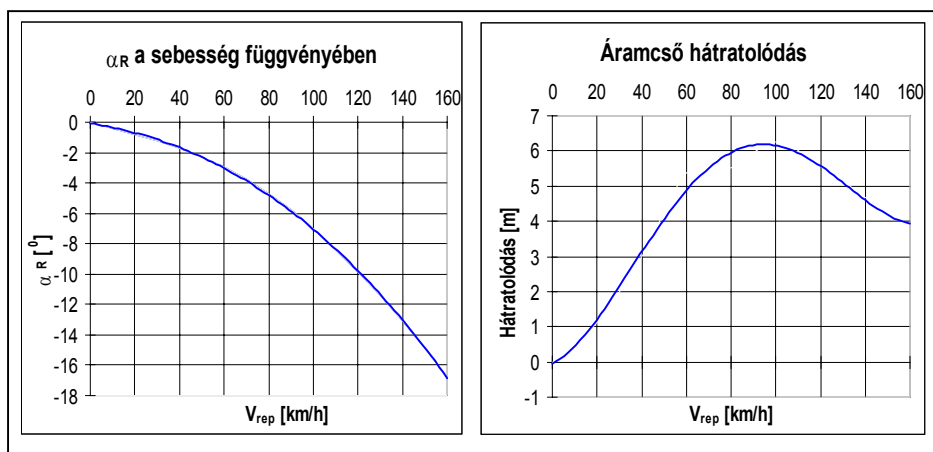
A sajátlengésképek, és a hozzájuk tartozó általánosított tömegek valamint sajátfrekvenciák meghatározásakor alapvetően a minden peremfeltételt kielégítő formafüggvényeket alkalmaztam.

## A felső rotor hatása

A felső rotor hatását alapvetően két módon vettem figyelembe. Az elsőszámú hatásnak a felső rotor által az impulzus-lapelem elmélet segítségével meghatározott indukált sebességmezőt a második számú hatásként a felső rotor lapátvég-örvényei által az alsó rotorsíkokban indukált sebességet tekintettem.

### A felső rotor indukált sebességmezőjének hatása

A felső rotor impulzus lapelem-elmélet segítségével meghatározott indukált sebességmezője az üzemállapot függvényében változó mértékben gyakorol hatást az alsó rotorra. Ennek három oka van [5]. Az első és leglényegesebb oka az, hogy a felső rotor áramcsöve a helikopter haladó mozgása következtében a megfúvási sebesség miatt csak részben éri az alsó rotor felületét. A jelentőségében következő hatás a felső rotor áramcsövének szűkülése, mely alapvetően függ a rotor által indukált sebességtől és amely hatása így függőleges emelkedéskor a legnagyobb. A harmadik hatás a felső rotor áramcsövének áthelyeződése az alsó rotoron, a rotorok oldalra és hátradőlése miatt. Ez a hatás legjobban a nagy sebességű üzemmódokon jelentkezik és tengelyirányú átáramlási üzemmódon nem jelentkezik. Nevezett hatásokat az alábbi módon vettem figyelembe. Az [5] szakirodalom segítségével repülésmechanikai számítás alapján meghatározható volt a rotor állásszöge és a felső rotor áramcsövének hátratólódása (2. ábra) a repülési sebesség függvényében 2800 kg súly esetére a súlyponthelyzettől függetlenül. Ennek segítségével könnyen meghatározható a felső rotor áramcsövének hátracsúszása.



2. ábra. A rotorállásszög és az áramcső eltolódás

Az áramcső szűkülését a felső rotor átlagos indukált sebessége ( $v_{i0}=1,78$  m/s) és a két rotor ismert távolsága ( $h=1,17$  m) alapján 0,95 értékűnek vettem. A rotorok oldalra és hátradőlése a [7] szakirodalom alapján végzett számítások szerint  $3,6^\circ$  és  $5,8^\circ$  egymáshoz viszonyított dőlésszög értékekre adódik, amelyek által okozott leáramlási zóna vándorlás figyelembe vételétől, csekély mértékük miatt eltekintettem. Ezzel meghatározhatóvá vált az a terület, amelyet nem ér a felső rotor áramcsöve.

*A felső rotor lapátvégörvényeinek hatása*

A felső rotor hatásai közül a második legjelentősebbnek a lapátvég-örvények fonalai által az alsó rotor síkjában indukált sebességet tekintetem. Ezeknek az örvényeknek a hatását minden repülési üzemmódon külön esetileg kell megvizsgálni. Ez elsősorban a  $\lambda$  átáramlási tényező és a  $\mu$  előrehaladási fok függvénye. A felső rotor örvényeinek hatását a saját rotoron nem vettem számításba, mivel a felső rotorlapátoktól a leúszó örvények viszonylag távol haladnak, az általános hatásukat pedig az effektív állásszög meghatározásánál figyelembe vett teljes saját indukált sebességmező reprezentálja. Továbbá ugyanezen módon reprezentálja a leúszó örvények általános hatását — mindkét rotorét — az alsó lapát esetében a teljes felső a saját indukált sebességmező figyelembe vételével (2. ábra) a kombinált impulzus-lapelem elmélet. Ugyanakkor a lapátvégörvények lokális, közeli, nulla eredőjű hatását a impulzus-lapelem elmélet nem tudja számításba venni. Ezért szükséges meghatározni azokat a zónákat, amelyekben a felső rotor lapátvégörvény-fonalai hatást gyakorolnak az alsó rotorra. Tengelyirányú átáramlási üzemmódon 6 lapát-örvényfonal találkozási pont van, melyek a  $\lambda$  és  $\mu$  függvényében vándorolnak — illetve egy részük le is marad — az alsó rotoron. Ezek helyzetét úgy határoztam meg, hogy a felső rotor átlagos merőleges indukált sebesség értékével kiszámítottam egyrészt a függőleges út ( $h=1,17$  m) megtételéhez szükséges időt, másrészt az átlagos kerületi indukált sebesség és a rotor szögsebessége segítségével az átlagos lemaradási azimutszög értéket ( $\Delta\Psi=214^\circ$ ). Ezzel az értékkel lemaradva az örvényfonalak dőfspontjai „folyamatosan követik” az őket létrehozó lapátvéget. Ezután már könnyen meghatározható a 6 találkozási pont azimutja az alábbi:

$$\Delta\Psi_i = \frac{214^\circ - 120^\circ}{2} + i \cdot 60^\circ \quad \text{ahol } i=0, \dots, 5 \quad (2)$$

egyenlettel. A pontos azimut pozíció meghatározásán túlmenően meg kellett határozni a radiális elhelyezkedést is. Ezt egyrészt az áramcső-szűkülés mértékével kisebb sugáron, másrészt az üzemiállapot ( $\mu$ ) eltolódás mértékével eltolva kapható meg. A találkozási helyek meghatározása utáni következő feladat az örvények intenzitásának meghatározása. Ehhez először a találkozási pontoktól  $\Delta\Psi=214^\circ$  értékkel kisebb azimut helyzetben meg kell határozni a lapátokon keletkező felhajtóerő nagyságát. Ez tekintve az impulzus-lapelem alapmodellt nem okozott nehézséget. Ezek segítségével a Zsukovszkij törvény alapján meghatározható a kezdeti cirkuláció nagysága az  $Y=\rho W \Gamma_0$  összefüggéssel. A kezdeti cirkuláció meghatározása után figyelembe vettem az örvény öregedést [4] alapján az alábbi egyenlettel:

$$v(r) = \frac{\Gamma_0}{2\pi r} \left[ 1 - e^{\left( \frac{-r^2}{4\nu t} \right)} \right] \quad (3)$$

A fenti egyenlet segítségével meghatározható a  $\Gamma_0$  kezdeti cirkulációjú örvény által  $t$  idő múlva  $v$  viszkozitású közegben az örvénytől  $r$  távolságra indukált sebesség nagysága. A következő feladat annak a területnek a meghatározása amelyben az örvényfonal által indukált sebességértékekkel módosítani kellett a felső rotor által indukált sebesség értékeket. Az örvények magjának átmérője is növekszik az idő folyamán, ezért először meg kell határozni mindegyik találkozási ponthoz az örvénymagok átmérőjét a [4]-ben található  $rc = \sqrt{4\alpha\delta\nu t}$  összefüggéssel: ahol  $\alpha=1,2564312$ ;  $\delta=1+Re_\Gamma$  – örvény viszkozitási együttható;  $Re_\Gamma=\Gamma/\nu$  – örvény Reynolds szám;  $a=0,2\dots0,0002$  – empirikus szám, melyet én 0,002 értékre választottam. A [4] szakiro

dalom alapján elegendő az örvényfonal által indukált sebességet az örvényfonal  $2,35r_c$  sugarú környezetében vizsgálni. Az így kapott eredményeket  $\mu=0,15$  esetre adódó három dőféspontra mutatja az 1. táblázat. A táblázatból látható, hogy a hatáskörzet méretei mindhárom esetben a Descartes koordináta rendszerben a dőfés pontokkal szomszédos négy négyzetben érezteti hatását.

Az örvényfonalak adatai  $\mu=0,15$ 

1. táblázat

|                     |          | Az örvénymag adatai |           |               | Az örvények által indukált sebességek (m/s) |       |       |       |       |
|---------------------|----------|---------------------|-----------|---------------|---------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| $\Psi$<br>$\square$ | $\Gamma$ | $\delta$            | $r_c$ (m) | $2,35r_c$ (m) | 0,525                                       | 0,375 | 0,225 | 0,075 | r (m) |
| 253                 | 40,92    | 5684,81             | 0,23      | 0,54          | 3,1                                         | 4,34  | 7,23  | 21,71 | M     |
| 313                 | 45,81    | 6363,90             | 0,24      | 0,57          | 3,47                                        | 4,86  | 8,10  | 24,30 | A     |
| 13                  | 41,78    | 5804,02             | 0,23      | 0,54          | 3,16                                        | 4,43  | 7,38  | 22,16 | G     |

A táblázat a négy négyzet középvonalára számított indukált sebesség értékeket is mutatja, melyek a fonalhoz legközelebb eső négyzetekben eléggé jelentősen módosítják az impulzus-lapelem elmélettel meghatározott indukált sebesség értékeket. Ezután az indukált sebesség értékeket ( $v_i$  és  $v_{ir}$ ) rotor koordináta rendszerben előjelhelyesen összegezni kell, a lapelem elmélet alkalmazásához (1. ábra).

## A számítás menete

A számítási eljárás két részből áll: Az első részben meghatározásra kerül az indukált sebesség eloszlás, a vonó, a horizontális, és az oldalerők a felső rotorra. A lépések:

1. A kezdeti indukált sebességértékek, és erők számítása a Glauert-féle közelítés alapján;
2. A csapkodó és hajlító mozgások differenciál egyenleteinek numerikus integrálása polárkoordináta rendszerben, figyelembe véve az áramlás instacionárius voltát, a csapkodó és a csavaró mozgás közötti kapcsolatot;
3. A rotor felülete mentén a légerő eloszlás ismeretében, új indukált sebességeloszlás számítása Descartes koordináta rendszerben. Eredő erők számítása az új helyzetnek megfelelően;
4. Az új erőknek megfelelően a csapkodómozgás újraszámítása, majd a 3. lépés, egészen az egyensúlyi helyzet eléréséig, mely gyakorlatilag 10 teljes fordulat után bekövetkezik. Ha nem, akkor a kezdeti kormány-beállítási értékek  $P_0$ ;  $P_1$ ;  $P_2$  nem feleltek meg ennek a repülési helyzetnek, és ezért új értékeket adva előről kell kezdeni a számítást;
5. Az egyensúlyi helyzet sebesség és erőértékeinek tárolása.

A második rész nagyban hasonlít az elsőhöz, csak ott a már figyelembe vesszük a felső rotor előbbieken kiszámított és megfelelően pozicionált indukált sebességértékeit és kiegészítjük a felső sor lapátvég-örvényei által indukált sebesség értékekkel (1. ábra).

## A modell hitelesítése

Ahhoz, hogy elfogadhatjuk a modellel kapott eredményeket feltétlenül szükség van valamilyen ellenőrzésre. Korábbi munkáimban [9]; [10]; [11] foglalkoztam a [6]-ban publikált mérési eredmények feldolgozásával, mely e módszer hitelesítése szempontjából jó szolgálatot tesz.

### A mérés rövid leírása

A mérés lényege, hogy az általam e dolgozatban is vizsgált repülési üzemmódot (IAS: 100 km/h, TOW=2800 kg) is vizsgálták egy telemetria rendszerrel. A rendszer lehetővé tette, hogy repülés közben szerkezeti reakciókat mérjenek a Ka-26 helikopter alsó rotorlapátján. Az ismert hajlítómerevség- és tömeg-eloszlású mérő-rotorlapátokra egységnyi hajlítónyomaték értékére kalibrált nyúlásmérő-bélyeg párokat ragasztottak [6].

A mérési adatok.

2. táblázat

| No1   | No2    | No3    | No4    | No6    | No7    | No8   |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| -7.02 | -11.80 | -45.37 | 43.99  | -46.96 | -40.52 | 33.52 |
| -7.18 | -9.779 | -44.52 | -47.48 | -46.47 | -39.92 | 35.35 |
| -8.05 | -10.68 | -43.37 | -28.71 | -44.10 | -41.18 | 39.12 |

Az általuk szolgáltatott jelek (2. táblázat) képezik az előzőekben vázolt számítási modell hitelesítésének alapját. Mivel a mérőrendszer eléggé összetett és ezért sok hibalehetőséget tartalmaz, a jeleket a további felhasználás előtt célszerű megvizsgálni.

### A mérési eredmények szűrése

A fentebb említett vizsgálatra feltétlenül szükség van egy nyúlásmérő-bélyegeket, mérő-átalakítókat, rádió adókat és vevőket, A/D átalakítókat tartalmazó rendszer esetén [11]. Az elemzések arra engedtek következtetni, hogy a rotorlapátokon repülés közben, a fenti metodika szerint felépített mérőrendszerekkel végrehajtott mérések eredményei, kvantálási hibák kivételével fehérzaj-jellegű hibák, amelyek megfelelő karakterisztikájú szűrőkkel való eltávolítása után azok a további felhasználásra alkalmasak [11]. Ezért én a mérési eredményeket egy 20 dB csillapítású kétpólusú Csebisev-szűrővel megsűrve kaptam egy olyan adathalmazt, melyet hiteles alapnak tekintettem a modellem ellenőrzéséhez [11].

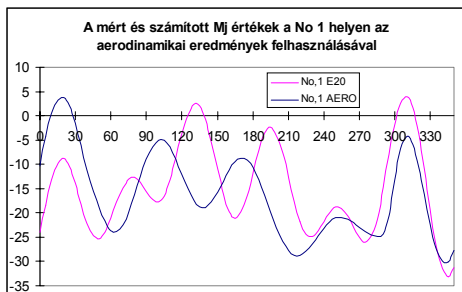
### A hitelesítéshez szükséges adatok előállítása a modell segítségével

A hitelesítéshez szükséges adatok előállításához alapvetően a lapát hajlító deformációit leíró adatokat kellett előállítanom a modell segítségével, mivel a viszonyítási alapul szolgáló adathalmaz hajlítónyomaték metszékeket tartalmaz. Erre a legkézenfekvőbb a modell leírását tartalmazó „A lapát hajlító deformációja” fejezetben leírt sajátlengésképek időfüggvény-értékeinek meghatározása kínálkozott. Ez természetesen az iteráció végén, a lapát egyensúlyi helyzetében meghatározott légerő-terhelésre adott szerkezeti válaszreakcióból számítható ki. Itt nem kell mást csinálni, mint a hajlító deformációt reprezentáló 2.; 3.; és 4. sajátlengésképfüggvény lefutását biztosító időértékeket kell meghatározni. Ezek meghatározása viszont az egész modell működése szempontjából amúgy is szükséges, tehát semmiféle külön erőfeszítést nem igényel. Miután ezek az együtthatók rendelkezésre álltak a három sajátlengésképfüggvény együtthatóival vett lineáris kombinációjának lapáthossz szerinti második parciális deriváltját, és az adott mérőhelyeken ismert hajlítómerevség értékeket behelyettesítettem a rugalmas szál differenciál egyenletébe, melyet a nyomatéokra rendezve megkaptam az alábbi egyenletet.

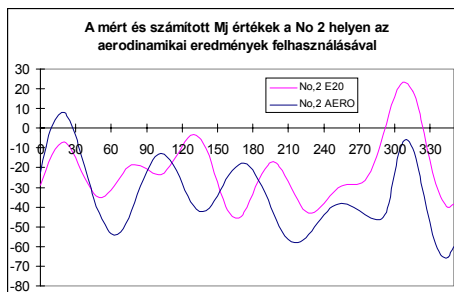
$$M_j = IE_j \frac{\partial^2}{\partial x^2} \sum_{i=2}^4 \Phi_i(x) T_i(\Psi) \quad \text{ahol } j=1, \dots, \quad (6)$$

Az egyenletet  $\Delta\Psi=5^\circ$  azimut lépésként megoldottam minden mérőhelyen, és így megkaptam azt az adatbázist, melyet a szűrt mérési eredményekkel kell összehasonlítani ahhoz, hogy a modell hitelességéről képet kapjak.

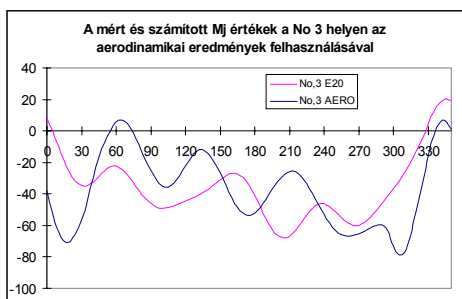
### Az adatok összehasonlítása



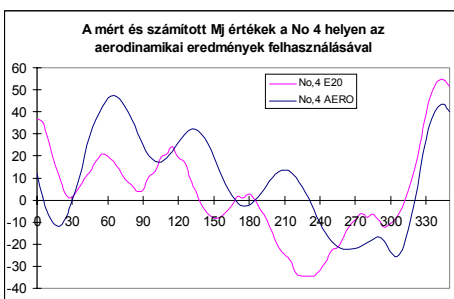
9a. ábra



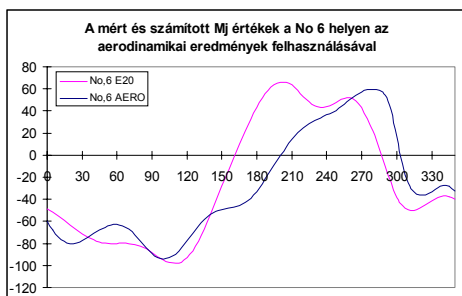
9b. ábra



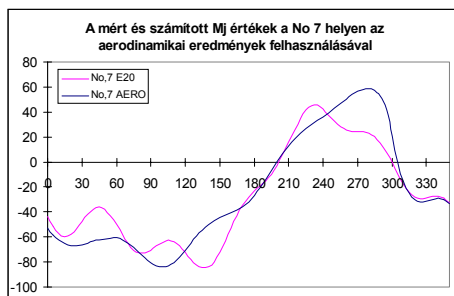
9c. ábra.



9d. ábra.



9e. ábra.



9f. ábra.

Miután a szükséges adatok rendelkezésre álltak, azok mérőhelyenkénti grafikus összehasonlítását határoztam el. A mért és 20 dB csillapítású Csebisev szűrővel szűrt, illetve a modell segítségével visszaszámított nyomaték metszékeket az egyes mérőhelyeken a 9.a-f. ábrák mutatják. A No 5 mérőhelyen történő összehasonlítás azért hiányzik, mert ez a csatorna nem működött a mérés folyamán. Az eredmények grafikus összehasonlításán túl szükség van az eltérések számszerűsítésére is. Ehhez a négyzetesen integrálható függvények terén értelmezett, a függvényekre vonatkozó skalár szorzat felhasználásával számított hibát (7) használtam fel, mely alkalmas az egyenletesen jó közelítések megítélésére [1].

$$hiba = \frac{\int_0^{360} \sqrt{[E20(\psi) - AERO(\psi)]^2} d\psi}{\int_0^{360} \sqrt{[AERO(\psi)]^2} d\psi} \cdot 100 \% \quad (7)$$

A fenti összefüggés segítségével az egyes mérőhelyeken meghatározott relatív hiba értékeket mutatja a 3. táblázat.

Eltérés a mért és visszaszámított értékek között

3. táblázat

| Mérőhelyek | No1  | No2  | No3  | No4  | No6  | No7  | No8  |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| hiba [%]   | 4,83 | 5,55 | 5,83 | 8,98 | 3,03 | 5,15 | 6,25 |

A fent leírt műszaki matematikai modell ezáltal hitelesnek tekinthető és a továbbiakban különböző — aerodinamikai; dinamikai; aeroelasztikus; rotorlapát-terhelés; kormányrendszer terhelés; kormánykiterítés hatására a rotoron bekövetkező erő- és nyomaték változás — vizsgálatokra használható fel.

#### FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Bornstein, I. N., Szemengyajev, K. A.: Matematikai Zsebkönyv Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1987.
- [2] Gausz, T.: Helicopter Rotors Aerodynamics and Dynamics. 5<sup>th</sup> Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Budapest, 1996.
- [3] Gausz, T.: Helikopterek. BME Mérnöktovábbképző Intézet Budapest, 1982.
- [4] Gausz, T.: Vortex-wake Model for Helicopter Rotors 8<sup>th</sup> Mini Conference on System Dynamics Identification and Anomalies Budapest, 2002.
- [5] К. Н. Лалетин: А Ka-26 Helikopter Gyakorlati Aerodinamikája. Repülőgépes Szolgálat, Budapest, 1978.
- [6] H.W. Lindert: Flugmessungen mit dem Hubschrauber Ka-26 im Oktober 1990. Institut für Lichtbau RWTH-Aachen 1992.
- [7] М. Л. Миль: Вертолеты расчет и проектирование 1 Аэродинамика Машиностроение Москва 1966.
- [8] Szilágyi Dénes Koaxiális rotorok aerodinamikai vizsgálata. Repüléstudományi konferencia Szolnok 2001.04.21.
- [9] Szilágyi D.: Rotor Blade Air Load Determination on the Base of Structural Deformation. 2<sup>nd</sup> Avionics Conference, Bieszczady '98, Jawor, Poland 1998.
- [10] Szilágyi, D.: Rotorlapátok Légerőterheléseinek Dinamikai Vizsgálata poszter MTA AMB 1999. évi Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás Gödöllő GATE 1999. 01. 25.
- [11] Szilágyi, D.: Rotorlapátok légerőterhelésének meghatározásához szükséges adatok méréssel történő meghatározása. XVII. Repüléstudományi Konferencia Szolnok, 2000.