

HELIKOPTER ROTOROK MŰKÖDÉSÉNEK INTEGRÁLT SZIMULÁCIÓJA

Dr. (PhD) Gausz Tamás
egyetemi docens
Budapesti Műszaki Egyetem
Közlekedésmérnöki Kar
Repülőgépek és Hajók Tanszék

A cikkben bemutatott előadás a helikopter rotorlapátok aerodinamikájával és dinamikájával foglalkozik, figyelembe véve az instacionárius viszonyokat és a rotorlapát rugalmasságát is. Az aerodinamikai számítások alapja a lapelem és az impulzus elmélet általános átáramlási irány esetére is érvényes egyesítése, az instacionárius hatásokat az ONERA féle szemi-empirikus modell segítségével vizsgáljuk.

A rotorlapátok csapkodó mozgását leíró differenciál-egyenletet a hajlító lengéseket leíró differenciál-egyenletekkel együtt oldjuk meg. A megoldás egy egyenesvonalú, egyenletes sebességű repülési állapotra érvényes, mivel a kezdeti feltételek nem ismertek, az általánosított egyensúlyi állapotot mint aszimptotikus megoldást kapjuk meg.

Az általánosított egyensúlyi állapothoz tartozóan kiszámítjuk az indukált sebesség eloszlást, a rotorlapátok csapkodó mozgását és a hajlító lengését és meghatározzuk a hajlító lengések okozta dinamikai terheléseket is.

1. BEVEZETÉS

Jelen cikkben a rotor és a rotorlapátok működését a helikopter egyenesvonalú, egyenletes sebességű repülése közben vizsgáljuk. Ennek oka az, hogy a számítási eljárás első felépítése és tesztelése így a legegyszerűbb. Egyébként a repülési állapot változtatása elvileg és gyakorlatilag nem lehetetlen, de ehhez ki kell dolgozni a részletesebb egyenleteket. A rotorerők felhasználása a teljes helikopter mozgásának vizsgálatához egyébként éppen az egyik lehetséges távlati célunk. Ebben a cikkben azonban megmaradunk a rotor és rotorlapátok vizsgálatánál; a cél egy olyan, integrált matematikai-fizikai modell kialakítása, amely alkalmas az általános (instacionárius) aerodinamikai hatások és a rotorlapát merev (csapkodó) valamint rugalmas (hajlító lengés) mozgásának együttes vizsgálatára. Ez azt jelenti, hogy a rotorlapátok merev és rugalmas mozgásával egyidejűleg meghatározzuk a rotoron keletkező légerő - és indukált sebesség eloszlást.

Mivel az erők (megoszló terhelések) meghatározzák a mozgást és másik oldalról a mozgás pedig meghatározó tényezője az erőknek - a merev és rugalmas mozgásokat és a kialakuló erőket együtt kell vizsgálni. A folyamat elemzése - természetesen - a rotorlapát irányításának figyelembe vételét is megköveteli.

A rotorlapátokon a gravitáció, a centrifugális erőtér és a légerők miatt alakulnak ki megoszló terhelések. Az első két terhelés - a merev illetve a rugalmas testek mechanikájának alapján felírt differenciál egyenletek megoldásával határozható meg.

A légerők számítása az impulzus és lapelem elmélet egyesítése alapján lehetséges. Mivel azonban a rotorlapátok működésére jellemző a nagymérvű instacioneritás, a számításba be kell vonni egy, e jelenségcsoport vizsgálatára alkalmas eljárást. Az erre szolgáló eljárások közül az ONERA féle szemempirikus differenciál egyenletet választottuk - mivel ez számos, előnyös sajátossággal bír.

A rotorlapátok csapkodó mozgását a klasszikus, csapkodó mozgást leíró differenciál egyenlet alapján vizsgáljuk. A rugalmas (hajlító lengés) számítására az általános tömegek és általános erők segítségével levezetett differenciál egyenlet rendszert használjuk.

A rotorlapátok mozgásának irányítására a hagyományos, kollektív és ciklikus beállítási szög szabályozó tárcsa szolgál. E szerkezeti elem megfelelő működtetésével biztosítjuk, hogy a példaként vizsgált HUGHES MD 500 E típusú helikopter egyenes vonal mentén, egyenletes sebességgel, vízszintesen repüljön.

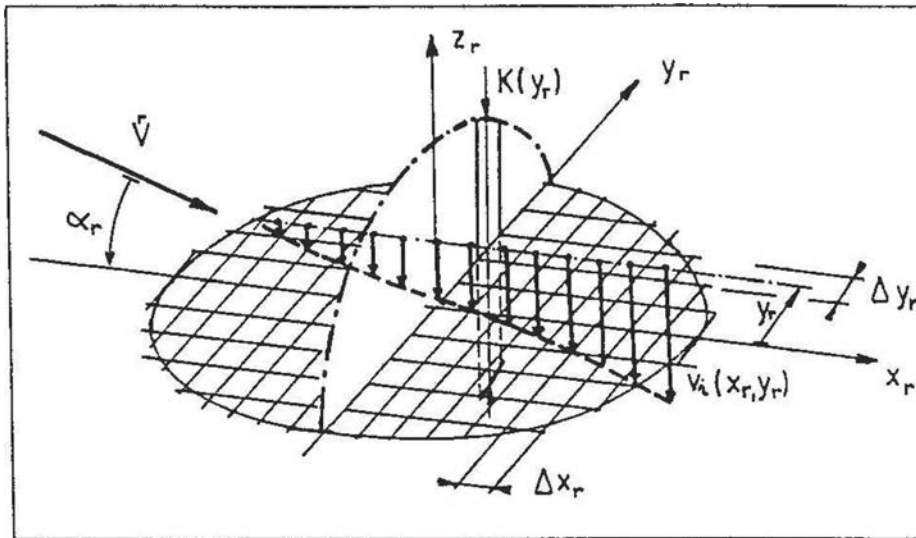
A fentiekben vázolt eljárást azért nevezzük integrált szimulációnak, mert az aerodinamikai, szerkezet-dinamikai és a vezérlő rendszer vizsgálata összevontan, azaz integráltan történik.

2. AZ IMPULZUS ELMÉLET

Az impulzus tételt helikopter rotorok működésének vizsgálatára Glauert alkalmazta először. Eszerint a helikopter rotor egy áramcsőben áramló levegő pályáját módosítja; az áramcső keresztmetszete éppen az áramlással szembe fordított rotor felület. E feltételezést egyébként más esetekben is alkalmazták - pl. kétfedelű repülőgépek esetén az alsó és a felső szárny működését is ilyen módon lehet közelíteni.

Az eredeti feltételezést a [8]-ban leírt, alkalmazott örvény elmélet segítségével pontosítottuk: meghatároztunk egy olyan függvényt {a függvény görbéjét a $K(y, r)$ egyenlet adja meg}, amely függvény által meghatározott keresztmetszeten keresztülhaladó tömegáram azonos az eredeti tömegárammal,

függvény az 1. ábrán látható. A rotor körül kialakuló légáramlást szeletekre bontjuk, és e szeletkeben vizsgáljuk az indukált sebesség alakulását.



1. ábra
Légáramlás a rotor felett

Az 1. ábrán is látható, hogy a rotor folyamatosan módosítja az áramlás irányát, azaz az indukált sebesség a "belépő él"-től folytonosan változik. A "belépő él" azért került idéző jelek közé, mert ez a rotor mint körszámny belépő élét jelenti (nem pedig a rotorlapátokét). Az ábra jelöléseivel írható, hogy az indukált sebesség a körszámny egyes szeletei mentén a következő módon változik:

$$v_i(x_r, y_r) = \int_{x''}^{x_r} \frac{P(x_r, y_r)}{2 \rho V_r K(y_r)} dx_r; \quad (1)$$

ahol, (a HUGHES MD500 E helikopter esetében):

$$K(y_r) = 3.3053 \left[1 - \left(\frac{y_r}{R} \right)^2 \right]^{\frac{1}{12}}.$$

és a [9] - nek megfelelően:

$$\dot{\Theta} = \frac{\dot{P}}{f} + \dot{\beta}_1 \left[\frac{r_0 - e}{f} \right] - \text{ a rotorlapát profil}$$

szögsebessége;

$$\ddot{\Theta} = \frac{\ddot{P}}{f} + \ddot{\beta}_1 \left[\frac{r_0 - e}{f} \right] - \text{ a rotorlapát profil szöggyorsulása;}$$

továbbá:

c_L - felhajtóerő tényező;

$\lambda = 0.25 - 0.15M^2$ (ONERA empirikus tényező);

M - Mach szám;

c - a profil húrhossza;

$s = \frac{180}{\pi^2} \left[0.08 (1 - M^2) \right]$ (ONERA empirikus tényező);

Θ - a rotorlapát metszet beállítási szöge;

$\sigma = \frac{180}{\pi^2} (0.105 + 0.1 \Delta c_L - 0.08M) - \lambda s$ (ONERA empirikus tényező);

$\Delta c_L = 0.12 \alpha - c_{L,stat}$ (az adott profilra érvényes ONERA tényező);

x_1 - rotorlapát hossza menti koordináta;

β_1 - a merev rotorlapát csapkodási szöge;

r_0, e, f - a rotorlapát vezérlő rendszerének geometriai méretei.

A rotorlapát beállítási szög vezérlésének törvénye:

$$P = P_0 + P_1 \cos(\psi_r) + P_2 \sin(\psi_r);$$

$$\dot{P} = \Omega (-P_1 \sin(\psi_r) + P_2 \cos(\psi_r));$$

$$\ddot{P} = \Omega^2 (-P_1 \cos(\psi_r) - P_2 \sin(\psi_r));$$

ahol:

P_0 - a kollektív beállítási szöget jellemző paraméter;

P_1 és P_2 - a ciklikus beállítási szöget jellemző paraméterek.

Megjegyzendő, hogy az ONERA modell tényezői a NACA 0012 profilra érvényesek, mivel azonban a különbség a 0012 és a 0015 profil között kicsi, használhatók a vizsgált rotorlapát esetén is.

A profil sebességeinek ismeretében az állásszög és így a felhajtóerő és az ellenállás tényező is számítható. Ebből pedig, a fent részletezett elsőrendű differenciál egyenlet segítségével a felhajtóerő tényező időfüggő értéke is meghatározható. A számításban a stacionárius érték és az idő szerinti változás összege adja a teljes felhajtóerő tényezőt. Ez a differenciál egyenlet szemi empirikus, mivel az egyes tagjai fizikai alapon nyugszanak, de a tagok együtthatói mérések eredményeként adódnak. Más modellekkel - különösen a frekvencia tartományban működőkkel - összehasonlítva ez a modell jól kezelhető és nem okoz problémát az eseteleges komplex számok fizikai értelmezése sem.

A klasszikus elméletek szerint célszerű vonóerő- és forgatással szembeni ellenállás tényezőt bevezetni:

$$c_T = c_L \cos(\beta_s) - c_D \sin(\beta_s); \quad (4)$$

$$c_Q = -c_L \sin(\beta_s) - c_D \cos(\beta_s). \quad (5)$$

E tényezők felhasználásával számítható a rotorlapát metszeten keletkező tangenciális és normális irányú erő összetevő.

4. A MEGOSZLÓ TERHELÉS ÉS A CSAPKODÓ MOZGÁS

A megoszló terhelés eloszlása a rotor felett a következő:

$$\Delta T = \left(\frac{\rho}{2}\right) W^2 c_T c \Delta r; \quad (6)$$

ahol:

$$W = \sqrt{U_p^2 + U_t^2} - \text{a lapátmetszet eredő sebessége};$$

Az indukált sebesség eloszlásának számításában használt megoszló terhelés, a fenti erő ismeretében, a $2\pi r \Delta r$ felületet véve figyelembe:

$$p(x_r, y_r) = \frac{\Delta T}{\Delta A} = \frac{\rho}{2} W^2 c_T \frac{z c}{2\pi r}; \quad (7)$$

A rotorlapátok csapkodó mozgását egyrészt a rotorlapátokon keletkező, megoszló légerő csapkodó csuklóra vett nyomatéka, másrészt a rotorlapátok beállítási szögét vezérlő szerkezet határozza meg. E vezérlő szerkezet - a kollektív és ciklikus beállítási szög vezérlő berendezés - működését leíró egyenletet ($P = P(\psi_r)$) korábban már ismertettük. A csapkodó mozgás hatását a rotorlapát beállítási szögére a következő egyenlet írja le:

$$\Theta = \frac{P}{f} + \left(\frac{r_0 - e}{f} \right) \beta_l;$$

ahol is a jobboldal első tagja a tényleges vezérlés, a második tag pedig a csapkodás csillapítás. A rotorlapát csapkodási szöge a következő, másodrendű differenciál egyenletből számítható:

$$\beta_l'' + (1 + \varepsilon) \beta_l = \frac{M_{Ay} + x_s g m}{\Theta_y \Omega^2}; \quad (8)$$

ahol:

- M_{Ay} - a légerők nyomatéka a csapkodó csuklóra;
- x_s - a rotorlapát súlypontjának helye;
- m - a rotorlapát tömege;
- Θ_y - a rotorlapát csapkodó csuklóra vonatkozó tehetetlenségi nyomatéka;
- $\varepsilon = \frac{x_s m e}{\Theta_y}$ - a rotorlapát un. Lock száma.

Az eddig ismertettek alapján az indukált sebesség eloszlása és a rotorlapát csapkodó mozgása és rugalmas deformációja - figyelembe véve a vezérlést is - számítható.

5. A ROTORLAPÁT RUGALMASSÁGÁNAK VIZSGÁLATA

A helikopter rotorok lapátjainak, működés közben igen jelentős rugalmas deformációi vannak. Alapvetően hajlító és csavaró deformáció jön létre - jelen munkában csak a hajlító deformációt vesszük figyelembe. Ennek oka a számítás viszonylagos egyszerűségén túl az, hogy a csavaró deformációra nincsenek

mérési adataink, így annak tulajdonságai (lengésképek és sajátkörfrekvenciák) csak viszonylag pontatlanul lennének megállapíthatók.

Egy hajlított tartó rugalmas deformációit az Euler-Bernoulli egyenlet alapján számíthatjuk:

$$\frac{\partial^2}{\partial x_1^2} \left(IE \frac{\partial^2 z_1}{\partial x_1^2} - \frac{\partial}{\partial x_1} \left(C \frac{\partial z_1}{\partial x_1} \right) \right) + \tilde{m} \frac{\partial^2 z_1}{\partial t^2} = p(x_1, t); \quad (9)$$

ahol:

IE - a hajlító merevség - jelenleg a minimális hajlító merevség;

C - az x_1 lapát menti koordinátánál ható centrifugális erő;

\tilde{m} - a rotorlapát tömegeloszlása;

p - a rotorlapátra ható, megoszló légerő és súlyerő terhelés.

Ez egy negyedrendű, parciális differenciál egyenlet, melyet a sajátlengésképek alkalmazásával két, jóval egyszerűbb, közönséges differenciál egyenlet rendszerre választhatunk szét. A hajlító sajátkörfrekvenciákat és sajátlengésképeket a pont és szakasz-mátrixok módszerének segítségével számítottuk, illetve a centrifugális erő nélküli esetre rázóasztalon végzett mérés segítségével mértük is. A számításban az első és a második sajátlengésképet vesszük figyelembe. A sajátlengésképek (η_i) és a hozzájuk tartozó sajátkörfrekvenciák (ω_i) felhasználásával írható:

$$M_i \ddot{\xi}_i + M_i \omega_i^2 \xi_i = Q_i; \quad (10)$$

ahol:

$$M_i = \int_0^R \tilde{m} \eta_i^2 dx_1; \quad \text{az } i\text{-edik általánosított tömeg;}$$

$$Q_i = \int_0^R p \eta_i dx_1; \quad \text{az } i\text{-edik általánosított erő.}$$

A hozzájuk tartozó sajátkörfrekvenciák, a rotor szögsebességével meghatározott formában:

$$\omega_1 = 3.04 \Omega; \quad \omega_2 = 7.11 \Omega.$$

A (10) egy közönséges differenciál egyenlet rendszer - a mi esetünkben ez éppen két differenciál egyenletet jelent - ezek megoldásaként adódik a $(\xi_i(t))$ függvény, mely segítségével a rugalmas deformáció és annak sebessége is meghatározható:

$$z_e(t, x_i) = \sum_{i=1}^2 \xi_i(t) \eta_i(x_i);$$

$$\dot{z}_e(t, x_i) = \sum_{i=1}^2 \dot{\xi}_i(t) \eta_i(x_i).$$

Megjegyzendő, hogy a fentiek mellett a rotorlapát görbülete is meghatározható, ha a képletbe a sajátlengéskép második deriváltját helyettesítjük:

$$z_e''(t, x_i) = \sum_{i=1}^2 \xi_i(t) \eta_i''(x_i)$$

E görbület pedig - amely a hely és az idő függvénye - alkalmas a dinamikai terhelés számítására:

$$\sigma_{dn} = E z_e'' e$$

ahol:

σ_{dn} - a dinamikai terhelésből származó hajlító feszültség;

E - a rugalmassági modulusz;

z_e'' - a rotorlapát görbülete;

e - a szélső szál távolsága.

Ez az egyenlet a Hooke törvény szerint azt mondja ki, hogy a feszültség a deformáció és a rugalmassági modulusz szorzataként számítható - lineáris esetben. A dinamikai terhelés számítása és vizsgálata egy viszonylag új szemléletmódot jelent: a hagyományos számításokban a feszültséget pl. a fenti esetben a nyomaték és a keresztmetszeti tényező hányadosa adná; a dinamikai terhelés ezzel szemben a tényleges deformációból származó feszültséget adja meg.

A dinamikai terhelés természetesen jóval közelebb van a valóságos igénybevételekhez és ráadásul a dinamikus tényezők miatti esetleges biztonsági tényező rész is csökkenthető vagy elhagyható.

6. A PÉLDASZÁMÍTÁS ÁTTEKINTŐ LEÍRÁSA

A numerikus példát a HUGHES MD 500E helikopter fő rotorjára dolgoztuk ki, mivel e típusra rendelkezünk egy teljesnek tekinthető adat-rendszerrel ([7]). A számítás konkrét elvégzése érdekében számítógépi programot dolgoztunk ki.

A program először a geometriai, aerodinamikai és egyéb adatokat olvassa be. A második lépésben Glauert elméletét felhasználva a közepes indukált sebességet számítjuk ki.

Ezután a program egy körülfordulásra numerikusan integrálja a csapkodó mozgás és a rugalmas mozgások differenciál egyenleteit. A számításban a légerőket az ONERA modell segítségével határozzuk meg. Ez a számolás a lapátokkal kapcsolatos, polár koordináta rendszerben történik. A számolásból a rotor feletti megoszló terhelés is következik.

A megoszló terhelés ismeretében számítható az indukált sebesség eloszlás, Descartes féle derékszögű koordináta rendszerben. E számolás eredményeként a teljes rotorra vonatkozó vízszintes, az oldal és a vonóerő továbbá az orsózó nyomaték is kiadódik. A rotor vezérlő rendszerét úgy kell működtetni (P_0, P_1, P_2 választása), hogy az aszimptotikus megoldásként kapott rotorjellemzők megfeleljenek az egyenesvonalú, egyenletes sebességű, vízszintes repülés feltételének.

Az aszimptotikus megoldást a rotorlapátok mintegy 10-15 fordulat után érik el. Ezután már elvileg tovább vezethető a helikopter, mivel a megoldástól indulva már fizikailag megfelelő esetek következnek.

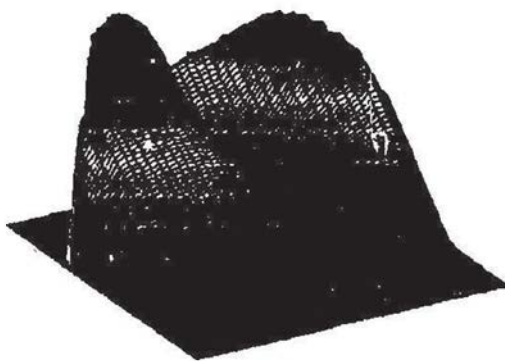
A számítás eredménye - jelenleg - az indukált sebesség eloszlás, a rotorlapátok csapkodó és rugalmas mozgása és a dinamikai terhelés.

7. A SZÁMÍTÁS EREDMÉNYEI

A példaszámításban a repülési sebesség 70 csomó (~130 km/h) volt, mivel ez az egyik leggyakrabban használt utazó sebesség. A számított indukált sebesség eloszlás a 3. ábrán látható.

Ez az eloszlás valamelyes hasonlóságot mutat a Glauert féle "háromszög" indukált sebesség eloszláshoz, de létezik számos különbség is. Az előrehaladó oldalon, a laposabb, egyenletesebb - a hátrahaladó oldalon viszont csúcsosabb az indukált sebesség eloszlás. Ez következik a két oldal működési viszonyainak különbözőségéből, miközben a jobb és bal oldalon keletkező orsózó nyomaték megfelelően kicsit különbözik csak egymástól. Jól megfigyelhető a rotoragy környékén az indukált sebesség növekedésének szünetelése és a megfelelő régióban a csökkenése is.

A 3. ábrán az instacionárius hatásokat figyelembe vevő, rugalmas rotorlapát feltételezésével számított indukált sebesség eloszlás látható. Az indukált sebesség ugyan lefele irányul, de a jobb láthatóság kedvéért felfele irányítottan ábrázoltuk.



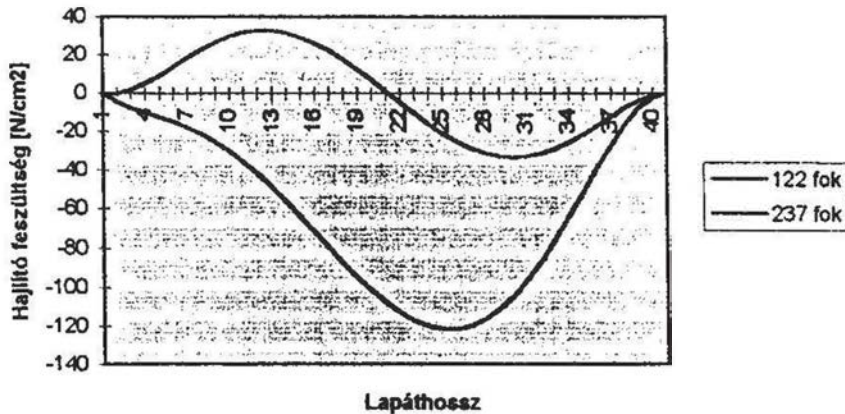
3. ábra
Indukált sebesség eloszlás

Kiszámítottuk ugyan a merev rotorlapát és a stacionárius légerőtenyezők alapján is az indukált sebességmezőt - ez azonban a fentitől olyan mértékben különbözik csak, ami az ilyen típusú ábrákon nem látható - lényegében a rugalmasság és az instacioneritás hatása helyileg nem nagy, jelentős viszont az egész rotorra nézve.

Az egész rotoron keletkező erőkről megállapítható, hogy a "T" vonóerő alig változik, az instacioneritás és a rugalmasság is csak viszonylag kis részt képvisel benne. Ezzel szemben a vízszintes erő ("H") értéke viszonylag nagy mértékben változik az instacioneritással és kevésbé a rugalmasság miatt.

Az indukált sebességek eloszlásánál már említettük, hogy a különbség az alapeset és az instacionárius valamint a rugalmas eset között helyileg nem túl jelentős. Ez látható a lapát menti terhelés-eloszlások vizsgálatából is, összehasonlítva a merev és stacionárius esetben számított megoszló terhelést az instacioner és a rugalmas eset terheléseivel, megállapítható, hogy az instacioneritás hatása általában a rotorlapát mentén végig megjelenik, a rugalmasság azonban csak a külső lapátrészeken jelent eltérő terhelést, ezek az eltérések azonban általában 10%-on belül maradnak.

A lapátmenti dinamikai terhelés eloszlás - két azimut szögnél - látható az 5. ábrán (a felső görbe a 122 fokos, az alsó a 237 fokos azimut szöghöz tartozik):



5. ábra
Rotorlapát dinamikai terhelése

A rotorlapát rugalmassága viszonylag jelentősen befolyásolja a rotorlapátvégek pályáját: az általunk vizsgált repülési esetben a merev lapátvégehez képest mintegy 100 mm-rel lejjebb illetve feljebb fut rugalmas lapát vége. Igen érdekes az a tény is (ezt pl. a [7]-ben foglalt mérések is megmutatják), hogy a rotorlapátok görbületi sugara általában a rotorlapátok alatt helyezkedik el - a rotorlapátokra ható centrifugális erő jóval nagyobb, mint a felhajtó erő - így a lapátok felülről domború alakot mutatnak. Ez mindig igaz a külső lapátrégióra és csak korlátozottan nem igaz a belső részekre.

8. KÖVETKEZTETÉSEK

A számítást elvégeztük mind dupla, mind kiterjesztett pontosságú számokkal. A számítási eredmények között a különbség nem volt jelentős, mindössze 4-6%. Mindazonáltal, tekintve, hogy egyes hatások (pl. a vízszintes erő-összetevő) kis változásokra is érzékenyek, javasolható a lehető legpontosabb számolás. Mindezzel együtt a dolgozat eredményei és a [7]-ben közölt eredmények közötti különbség elegendően kicsinek mondhatók.

Mind a rugalmasság, mind az instacioneritás helyileg viszonylag kis hatásokat ad, jelentőssé ezen hatások összegzett (integrált) eredője válik. Érdekes 30 rotorlapátvég pálya viszonylag erős módosulása.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] **Dat, R.:** Development of Basic Methods needed to Predict Helicopter Aeroelastic Behaviour; *Vertica*, Vol. 8. No. 2. pp. 209-228, 1984
- [2] **Bramwell, A. R. S.:** *Helicopter Dynamics*; Edward Arnold Ltd. London
- [3] **Bergh, H.-Wekken, A.J.P.:** Comparaison between Measured and Calculated Stall-Flutter Behaviour of a One-Bladed Model Rotor *Verica*, Vol. 11. No. 3. pp. 447-456, 1987
- [4] **Stepniewsky, W.Z.:** *Rotary-Wing Aerodynamics* Dover Publications, New York, 1979
- [5] **Etkin, B.:** *Flugmechanik und Flugregelung*; Berliner Union, Stuttgart
- [6] **Dommasch, D.O.:** *Elements of Propeller and Helicopter Aerodynamics* Pittman and Sons, London, 1960
- [7] **Öry, H.-Lindert, H.W.:** Calculation of Rotor Blade Air Loads from Measured Structural Response Data *Zeitschrift für Flugwissenschaften*, Vol. 17. No. 4. pp 225-234
- [8] **Gausz, T.:** Szármetszet, szárny és légsavár vizsgálata *Repülőgépek és Hajók Tanszék Közleményei*, Budapest, 1995
- [9] **Gausz, T.:** *Helikopterek*; BME Mémöktovábbképző Intézet, Budapest
- [10] **Gausz, T.:** Helikopter rotorok aerodinamikája és dinamikája XI. Magyar Repüléstudományi Napok, 1996 pp. 73-81
- [11] **Gausz, T.:** Helicopter Rotor Aerodynamics and Dynamics 5th Mini Conf. on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies, Budapest, Nov. 11-13. 1996
- [12] **Gausz, T.:** The Effect of Rotor Blade Elasticity on the Rotor Dynamics First Int. Conference on Unconventional Flight Budapest, Oct. 13-15. 1997.

ABSTRACT

The present method deals with rotor dynamics and aerodynamics including the bending deformation of the rotor blades. The combined blade element and momentum theory and the ONERA semi empirical model were applied in the aerodynamic calculations. The unsteady aerodynamic effects can be calculated by using of the ONERA model. The equation of the flapping motion was solved together with the equations of the bending motion. The generalised equilibrium path of the rotor blades was approximated with an asymptotic solution.