

Gáti Balázs

**Tömegközéppont áthelyezéssel
kormányzott légi járművek
repülésmechanikai vizsgálata**

Tézisfüzet

Témavezető: Dr. Gausz Tamás
BME Repülőgépek és Hajók Tsz.

BUDAPEST
2001

Bevezető

A motor nélküli sárkányrepülés a repülősportok egyik igen egyszerűen és könnyen elsajátítható válfaja. A legtöbb szempontból a vitorlázórepülés és a siklóernyőzés között áll. A sportot néhány lelkes ember indította útjára a hetvenes években, akiket az egyszerű szerkezetekkel való repülés megvalósítása ösztönzött. Rátaláltak a Gemini programban Francis M. Rogallo által kifejlesztett ernyő ötletére. Az ernyőt ellátták merevítő csövekkel, ami jelentősen növelte a siklószámát, és testsúlyuk áthelyezésével kormányozták őket. Az ötlet gyorsan terjedt, mivel sok embert foglalkoztattak hasonló gondolatok. Amíg ötlet, kísérletező kedv és kitartás elég volt egy új típus megszületéséhez, addig a magyar gépek és pilótáik is igen jó hírnévre tettek szert a világban.

Napjainkra széles körben elterjedt ez a FAI által is elismert sportrepülési forma, amely sok-sok ezer embert érint – ezért fontos foglalkozni vele.

A kutatás célja

A sárkányrepülők szárnya a mai napig is hajlékony, sőt rugalmas vitorlaanyagból készül. Ez azt jelenti, hogy az aerodinamikai tulajdonságok elméleti úton történő meghatározása igen nehéz, mivel az áramlástani egyenleteket ki kell egészíteni szilárdsági összefüggésekkel, hogy a szárny légerők hatására létrejövő alakja meghatározható legyen.

Kutatásaim célja az volt, hogy módszert dolgozzak ki a sárkányrepülő merevszárnyú gépeknél összetettebb aerodinamikai tulajdonságainak kísérleti úton történő meghatározására olyan eszközökkel, amelyek beszerzése hazai viszonyok között is megvalósítható.

Az elektronika óriási léptékű fejlődése mára lehetővé tette, hogy elfogadható költségek mellett olyan méretű adatgyűjtő és rögzítő rendszert lehessen előállítani, amely elfér egy sárkányrepülőn, és a pilótát sem zavarja repülés közben. Így segítségével a sárkányt a pilótájával együtt repülés közben lehet vizsgálni. A lehetőséget kihasználva a kutatásokat ebben az irányban kezdtem el.

A szélcsatornában vagy mérőautóval végzett mérésekkel ellentétben a repülési mérések alkalmasak még a dinamikus tulajdonságokban szerepet játszó instacioner aerodinamikai jellemzők meghatározására is, melyek a sárkányrepülő stabilitásában nagy szerepet játszanak. A jelen munkában kifejlesztett eljárás célja ezek meghatározása.

Szakirodalmi áttekintés

A legelső elméleti művek (pl.: [8], [9]) a sárkányrepülőt egy testnek írták le, és így vizsgálják stabilitásukat, illetve kormányozhatóságukat. *Kroo* a [10]-ben

mutatott rá először, hogy a repülésben nagy szerepe van az instacioner légerőtényezőknél. *Guido de Matteis* már részletesebb modellt használ, mert már külön tömegpontként írja le a pilótát, és így vezeti le a két test együttes dinamikai jellemzőit a [10]-ben, a kormányozhatóságát a [12]-ban, és légköri zavarásokra adott válaszát a [11]-ben. *M. V. Cook* az [4]-ben egy hasonló modellt ír le, de a konkrét számításokat már a [5]-ben található kísérleti eredményekre támaszkodva végzi el. Ezeket a méréseket egy mérőautó segítségével végezték három különböző sárkánytípuson. A korai sárkányrepülők aerodinamikai jellemzőinek meghatározására a francia *ONERA* intézetben is végeztek szélcsatorna és repülési méréseket, aminek az eredményeit a [3]-ban és [2]-ben hozták nyilvánosságra. *Horst Altmann* az [1]-ben egy átfogó elméleti módszert mutat be, mellyel egy sárkány-szárny stacioner és instacioner aerodinamikai jellemzőit lehet meghatározni. Összeköt egy örvénypanel-elméleten alapuló aerodinamikai számítást egy igen részletes végeselemes szilárdsági modellel, melynek segítségével a szerkezet légerők hatására létrejövő deformációját figyelembe tudja venni. A sárkányrepülőgépek legújabb nemzedéke az ún. „merevszárny”. Egy ilyen gép tervezéséről és gyártásáról számol be *Z. M. Zain* a [14]-ben.

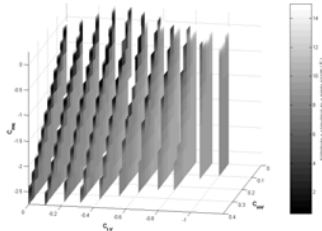
Magyar nyelven, tudományos megközelítéssel dolgozta fel a sárkányrepülőgépet érő terheléseket az a kutatócsoport, amelyet *dr. Fáy Péter*, *dr. Gausz Tamás*, *Seregély László*, *Takáts Zsanna* és *dr. Varga László* alkotott. A munkájukról készült jelentésben [6] foglalkoznak a szárny körüli felhajtóerő és nyomásoszlás számításával, illetve ez alapján a fő szerkezeti elemek igénybevitelével. Ehhez kapcsolódva Gausz Tamás a [7]-ben ír le egy eljárást, amivel a szárnyon ébredő légerők megoszlását lehet számolni a szárny-kilépőél alakjának ismeretében. Seregély László és Gausz Tamás másik közös munkájukban [13] egy további mérési módszerről és számítási eljárásról lehet olvasni.

A kutatás eszközei és az alkalmazott eljárások

A dolgozat alap gondolata, hogy általánosan használt érzékelőkkel és műszerekkel mért adatokat szimulációk segítségével feldolgozva következtetni lehet összetettebb aerodinamikai jellemzőkre, és így ezek kellő pontosságú megállapításához nem szükséges új berendezéseket kifejleszteni.

A cél elérése érdekében két párhuzamos vonalon kellett elkezdni kutatásokat. Az egyik egy megfelelően pontos repülésmechanikai és aerodinamikai modell felállítása, a másik pedig egy mérőrendszer kifejlesztése volt. A sárkányrepülő modelljének felállításánál a merevszárnyú gépek repülésmechanikájában ritkán felmerülő kéttest-probléma megoldásáról volt szó. Két egymással összekapcsolt test mozgását meghatározó egyenleteket kellett felírni, és olyan alakra hozni, amely alkalmas szimulációk végzésére. Az így felírt közönséges nemlineáris differenciálegyenlet-rendszer a Runge-Kutta módszer segítségével megoldva már alkalmassá vált a sárkányrepülő repülésének szimulálására.

A sárkány rugalmas és hajlékony szárnyának aerodinamikai tulajdonságainak leírására egy igen részletes, a szakirodalomban általánosan használt módszer került felállításra, majd vizsgálatra. Ebben a tényezők állásszög- és sebességfüggését kétváltozós polinomok írják le. A modellen végzett érzékenységvizsgálat kimutatta a kiinduló aerodinamikai modellben szereplő tényezők súlyát a szimulációkban, ami az alapját képezte az aerodinamikai modell sárkányrepülőre történő átalakításának. Az átalakított modellhez olyan függvényleíró algoritmusok kerültek kidolgozásra, melyek lehetővé tették a mérésrel meghatározott repülési jellemzők egyszerű bevitelét a modellbe.



1. ábra: Paramétertér

Az így felállított aerodinamikai modellben már különváltak a sárkányrepülő rugalmasságától függő (C_{LV} , C_{mV}) és a dinamikus viselkedésben szerepet játszó (C_{mq}) légerőtényezők a statikus paraméterektől. E tényezők kvantitatív meghatározására, azaz a paraméter azonosítására egy olyan eljárás került összeállításra, amely a szimulációk és a mért eredmények összevetését a Nelder-Mead szimplex-módszerre alapozva végzi. Az eljárásnak az ábrán látható paramétertérben kellett megtalálnia az eredményt.

A kutatás másik irányvonalának célját jelentő mérőrendszer egy adatgyűjtő és -rögzítő egységből állt össze, amelyhez különböző érzékelők csatlakoznak. A kormányerő mérésére speciális nyúlásmérőbélyeges érzékelő készült. Egy kézi távirányító alkalmassá teszi a berendezést arra, hogy a pilóta saját maga kezelhesse repülés közben. E berendezés segítségével mért adatok felhasználásával sor került egy valós sárkányrepülő fent említett paramétereinek meghatározására repülési mérések alapján. Az eljárás által szolgáltatott eredmények pontosságának becslése is megtörtént.

A berendezés megvalósításában a Prof. Dr.-Ing. Otto Wagner a TUM Flugmechanik und Flugregelung tanszék professzora segített. A kapcsolatot a TÉT alapítvány támogatta.



2. ábra: Műszerek a sárkányrepülőn

Tézisgyűjtemény

Munkám során a következő új eredményekre jutottam:

1. Szimulációs modell paraméter-érzékenység vizsgálata

Előzmény: a szakirodalom alapján felállítottam egy általános aerodinamikai modellt:

$$c_L = c_{L0}(\alpha, V) + c_{L\alpha'} \cdot \frac{\alpha'}{V/l_\mu} + c_{Lq} \cdot \frac{q}{V/l_\mu} + c_{Lq'} \cdot \frac{q'}{V^2/l_\mu^2}$$

$$c_D = c_{D0}(\alpha, V) + c_{D\alpha'}(\alpha, V) \cdot \frac{\alpha'}{V/l_\mu} + c_{Dq}(\alpha, V) \cdot \frac{q}{V/l_\mu} + c_{Dq'}(\alpha, V) \cdot \frac{q'}{V^2/l_\mu^2}$$

$$c_m = c_{m0}(\alpha, V) + c_{m\alpha'} \cdot \frac{\alpha'}{V/l_\mu} + c_{mq} \cdot \frac{q}{V/l_\mu} + c_{mq'} \cdot \frac{q'}{V^2/l_\mu^2}$$

- 1.1 A fenti modell érzékenység vizsgálatával kimutattam, hogy a C_{mq} tényezőnek kiemelkedő szerepe van a sárkány dinamikus viselkedésében.
- 1.2 Az általános modellen végzett érzékenység vizsgálat alapján célszerűen kialakítottam egy alkalmazott aerodinamikai modellt, amelyben a C_{L0} helyett a lenti C_{Lst} és C_{LV} paramétereket, a C_{m0} helyett pedig C_{mst} és C_{mV} paramétereket alkalmaztam, illetve a kis súlyú tényezőket elhagytam:

$$C_L = C_{Lst}(\alpha) + C_{LV} \cdot \frac{V - V_{st}(\alpha)}{V(\alpha)}$$

$$C_m = C_{mst}(\alpha) + C_{mV} \cdot \frac{V - V_{st}(\alpha)}{V(\alpha)} + C_{mq} \cdot \frac{q}{V/l_\mu}$$

$$C_D = C_{Dst}(\alpha)$$

2. A sárkány deformációjának számítása

Alapfeltevés: definiáltam a „flexibilis vonalat”, amellyel a sárkány szárnyának flexibilis viselkedése egyszerűen modellezhető.

- 2.1 A flexibilis vonal segítségével felépített becslési eljárással kimutattam, hogy a szárny deformációja miatt állandó állásszög mellett növekvő sebesség esetén a negatív elcsavarás mértéke nő, ezzel csökken a teljes szárny felhajtóerő tényezője, és növekszik a szárnynyomatéki tényező. A C_{mq} értéke független ettől.
- 2.2 A felhajtóerő- és szárnynyomatéki-tényező 2.1 pontban leírt változásának mértéke mindkét esetben nő az állásszög növekedésével.

3. Paramétertér

Előzmény: Nagy számú szimuláció végzésével felmértem a C_{LV} , C_{mV} és C_{mq} különböző értékei mellett a sárkányrepülő viselkedését.

- 3.1 A szimulációk eredményeképpen kimutattam volt, hogy a C_{LV} , C_{mV} és C_{mq} tényezők mely érték kombinációja mellett jelentkezik a sárkányrepülő „orrabukfenc”-re való hajlama, amely fogalom veszélyes repülési jelenséget takar.
- 3.2 A paramétertér felépítése és a deformációs modell alapján arra lehet következtetni, hogy a sárkány orrszöge növelhető a szárnytartó rugalmasságának fokozása mellett az orrabukfencre való hajlam növekedése nélkül.

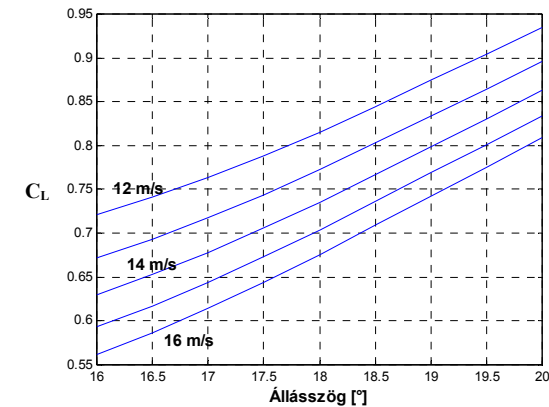
4. Légerő-tényezők értékeinek megállapítása

Előzmény: sor került a kormányerő mérésére instacioner repülésben az állásszög, a csúszásszög, a sebesség és a statikus nyomás mérése mellett. A mérés kiértékelésére azonosítási eljárást építettem föl az

$$E = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\alpha_{szim,i} - \alpha_{mért,i}}{\alpha_{mért,i}} \right)^2 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{V_{szim,i} - V_{mért,i}}{V_{mért,i}} \right)^2$$

hibafüggvény és a Nelder-Mead minimumkereső módszer alkalmazásával.

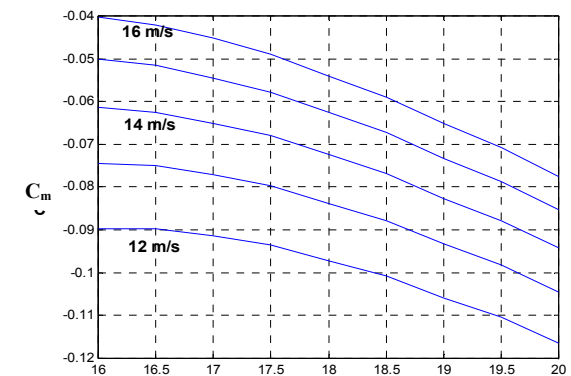
- 4.1 Az azonosítási eljárás eredményeképpen a mérésekben résztvevő sárkány felhajtóerő tényezőjének értékét az α - V sík mért tartományán a következő görbékkel reprezentált felület írja le:



3. ábra: Felhajtóerő tényező

- 4.2 Az azonosítási eljárás eredményeképpen a mérésekben résztvevő sárkány szárny-nyomatéki tényezőjének értékét az α - V mért tartományán a következő görbékkel reprezentált felület írja le:

- 4.3 A mérésekben résztvevő sárkány C_{mq} tényezője a mért állásszög és



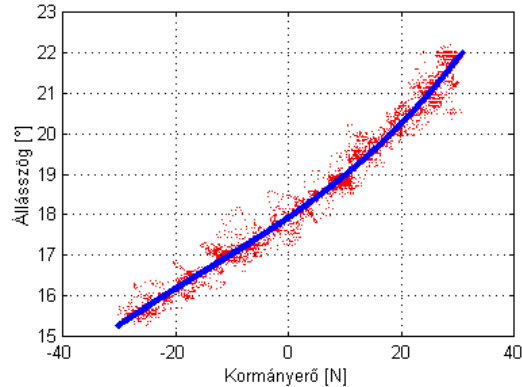
4. ábra: Szárny-nyomatéki tényező

sebesség tartományban: $C_{mq} = 1.14$ (állandó)

5. A mérések közvetlen kiértékeléséből levonható következtetések:

5.1 A stationer repülésben mért adatokból készített kormányerő-sebesség és kormányerő-állásszög diagram alapján megállapítottam, hogy a kormányerő görbében nem található - bizonyos tartományok stabilitási problémáira utaló - hirtelen változás se az állásszög, se a sebesség függvényében.

5.2 Növekvő állásszögek mellett azonban csökken a $\frac{\partial K}{\partial \alpha}$ derivatív értéke, ami csökkenő stabilitásra utal, de segíti a kormányrúd leszálláskor szükséges intenzív „kinyomás”-át.



5. ábra: Egyenletes repülésben mért jellemzők

Szakirodalmi tevékenység

A tézisek témakörében a következő publikációim születtek:

Külföldön megjelent idegen nyelvű folyóiratcikk:

1. Balázs Gáti, „Investigation of Flight Dynamic of Hang-glider”

Acta Polytechnica, Journal of Advanced Engineering Design (Csehország) ISSN 1210-2709, Vol.40 No.1/2000 pp.3-6, 2000. január, Editors: P. Fiala, L. Smrček L. (L)

Továbbá:

- *Angol nyelvű előadás és konferencia-kiadvány* a First International Conference of Advanced Engineering Design konferencián 1999. május 31.-június 2. között Prágában

- *Magyar nyelvű előadás és angol nyelvű konferencia-kiadvány* a 12. Magyar Repüléstudományi Napok-on 1999. június 2-4. között Nyíregyházán.

Magyarországon megjelent idegen nyelvű folyóiratcikk:

2. Balázs Gáti, „Specification of Aerodynamic Characteristic of a Hang-glider Based on Flight Tests”

Acta Technika (L E) (Elfogadó levél mellékelve)

Továbbá:

Elektronikus publikáció:
<http://pro2.gjt.bme.hu/TANSZEK/GATIBALAZS/ActaTechAng-v2.html>

Magyar nyelvű folyóiratcikk

3. Gáti Balázs, „Adatgyűjtő berendezés és érzékelők sárkányrepülők vizsgálatához”

Járművek (L) HU ISSN 1585-0676 No. 2000/10, pp. 15-18.

Elektronikus publikációk:

4. Gáti Balázs, „Adatgyűjtő berendezés kisrepülőgépek vizsgálatához”
<http://pro2.gjt.bme.hu/TANSZEK/GATIBALAZS/kutyudoksi.html>
5. Gáti Balázs, „Érzékelők sárkányrepülőgépek repülésmechanikai vizsgálatához”
<http://pro2.gjt.bme.hu/TANSZEK/GATIBALAZS/erzekelodoksi.html>

Az elektronikus publikációk megtalálhatók a www.origo.hu címen található nagy hazai keresőszervert katalógusában a

- Tudomány

- Természettudomány

- Műszaki tudomány

elérési útvonalon.

Nem publikációértékű munkák:

Csak kivonatban megjelent konferencia-előadás:

6. Gáti Balázs, „*Sárkányrepülő repülés-mechanikai modellje és a modell identifikációja mérések alapján*”
VIII. Magyar Mechanikai Konferencia, Miskolc, 1999. augusztus 30. – szeptember 1.
7. Balázs Gáti, „*Experimental investigation of Hang-gliders*”
Conference of Unconventional Flight, Balatonfüred, 2000. június 14-16.

Csak szóban elhangzott előadás

8. Gáti Balázs, „*Sárkányrepülés-mechanika*”
90 perces önálló beszámoló a BME Repülőgépek és Hajók Tanszék és a GTE Repülőgépek Központi Szakosztály szervezésében
Budapest, 1999. február 16.
9. Balázs Gáti, „*Simulation und Identifikation in der Drachenfliegerei*”
IIWB TU Budapest-TU München Frühlingsakademie'99,
Balatonfüred, 1999. április 26-28. német nyelven

A tézisfüzetben hivatkozott irodalmak

- [1] H. ALTMANN: Aeroelastoflexible Eigenschaften, Stabilität und Dynamic von Hängegleiter
Herbert Utz Verlag Wissenschaft, München 1997
- [2] LA BURTHE, C. Experimental Study of the Flight Envelope and Research of Safety Requirements of Hang-Glider,
ONERA T.P. No.: 1979-23
- [3] LA BURTHE, C., WALDON, S.: Flight Safety of a Rogallo Hang Gliders.
ESA-TF 634, 1981
- [4] COOK, M. V.: The theory of the longitudinal static stability of the hang-glider
Aeronautical Journal October 1994 p. 292 Paper No.:2002
- [5] COOK, M. V. – E.A. KILKENNY: An Experimental Investigation of The Hang-Glider
NASA IAA Conference Paper 88A11200
- [6] dr. FÁY P. - dr. GAUSZ T. – SEREGÉLY L. - TAKÁTS ZS. - dr. VARGA L.: Siklórepülőgépek terheléseinek elméleti és statisztikai vizsgálata
LRI RTK Bp. 1989
- [7] GAUSZ Tamás: Aerodynamic Parameter Estimation of the CG Controlled Airplanes
Paper on the 4th Mini Conference on Vehicle Dynamics, Identification and Anomalies 1994
- [8] KLIMKOWSKI, J., LUCJANEK, W.: Theoretical Analysis of the Dynamic Lateral stability of a Paraglider
XV. OSTIV-Kongress, Räyskälä, Finland, 1976
- [9] KROO, I.: Aerodynamics, Aeroelasticity and Stability of Hang Gliders.
Department of Aeronautics of Stanford University, 1983
- [10] DE MATTEIS, Guido: Dynamics of Hang-Gliders
Journal of Guidance Vol. 14, No.6, 1991 p.1145
- [11] DE MATTEIS, Guido: Hang-Glider Response to Atmospheric Inputs
Journal of Guidance, Vol. 15, No 4, 1992 p. 1048
- [12] DE MATTEIS, Guido: Response of Hang-Glider to control
Aeronautical Journal Vol. 94, No.938 1990 p.289
- [13] SEREGÉLY L. - GAUSZ T.: Siklórepülőgépek repülésmechanikai és szilárdsági vizsgálata
X. Magyar Repüléstudományi Napok, Szolnok, 1993
- [14] Z. M. Zain: The Design and Fabrication of TOP SECRET
ICAS 2000 Congress Paper

.....
Gáti Balázs

Budapest, 2001. július 18.