

Aeroelasztikus szárnymodell numerikus vizsgálata

Numerical analysis of aeroelastic wing model

LENDVAI Bálint, LELKES János

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
Gépészmérnöki Kar, Áramlástan Tanszék, Budapest 1111, Bertalan Lajos u. 4–6.,
e-mail: lendvai@ara.bme.hu, lelkes@ara.bme.hu

Abstract

Aeroelastic investigation of airfoil profiles requires the knowledge of forces acting on the airfoil. The analytical methods for describing the aerodynamic forces cannot be applied generally. For this reason, a computational fluid dynamics based, fast, and reliable simulation method was developed to model the high-amplitude dynamic stall flutter phenomenon.

Keywords: aeroelasticity, computational fluid dynamics, Theodorsen model, airfoil aerodynamics

Kivonat

Aeroelasztikus szárnymodellek dinamikai vizsgálata során a szárnyra ható erők ismerete szükséges. Az aerodinamikai erőket leíró analitikus modellek csak szűk keretek között alkalmazhatóak. Ezért egy numerikus áramlástan szimuláción alapuló, gyors és megbízható szimulációs eljárást alkottunk a nagy amplitúdójú dinamikus átesés flatter jelenség leírására.

Kulcsszavak: aeroelasztika, numerikus áramlástan szimuláció, Theodorsen-modell, szárny aerodinamika,

1. BEVEZETÉS

Aeroelasztikus rendszerek vizsgálatokor gyakran megfigyelhető jelenség a dinamikus stabilitásvesztés, mely egyik jellemző megjelenési formája az úgynevezett flatter vagy belebegés, amely a rugalmas, tehetetlenségi és aerodinamikai erők kölcsönhatásából ered [1]. A flatter során az áramlásba helyezett karcsú rugalmas szerkezet adott kritikus szélesség felett a sebességgel arányosan egyre intenzívebb lengésbe jön [2]. A flatter jelenség vizsgálatához az aerodinamikai erők pontos ismeretére van szükség. Analitikus modellek kis amplitúdós lengések esetén megfelelően leírják az áramlásból származó erőket. A szárny körüli áramlás összetettségéből eredően azonban az analitikus megoldás csak jelentős egyszerűsítésekkel kivitelezhető, és szűk keretek között alkalmazható megfelelő pontossággal. További megoldás a szélcsatornás flatter vizsgálat, amely viszont eszköz- és időigényes [3].

Ezért jelen tanulmányban bemutatott kutatás célja egy olyan kapcsolt aeroelasztikus-áramlástan numerikus szimuláció megalkotása, amely egyszerű és gyors, azonban az jelenlegi analitikus modelleken túlmutató áramlási jelenségek kezelésére is képes. A kapcsolódó vizsgálatok alapján létrehozott kétszabadságfokú (hajlító-csavaró), állandó keresztmetszetű, síkáramlásba helyezett lapátprofil modellt kényszermozgásra validáltuk. Továbbá a szárnyprofil dinamikus átesés flatter instabilitását vizsgáltuk.

2. ANALITIKUS ÉS NUMERIKUS MODELLEK

A vizsgálatot egy kétdimenziós, két szabadsági fokú síklap szárnymodellel végeztük. A modell szerkezeti vázlata látható a 1. ábrán. A síklap szimmetriájából adódóan a tömegközéppont a húrhossz felénél helyezkedik el. A vizsgálat során az elasztikus tengelyt is a húrhossz felénél rögzítettük. A rendszer mozgásegyenletét az (1) egyenlet írja le. A szerkezeti paraméterek értékeit [4] alapján állítottuk be. A rendszert az aerodinamikai felhajtóerő és annak nyomatéka gerjesztik. A mozgásegyenlet mátrix alakban a következő:

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & I_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{h} \\ \ddot{\alpha} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_h & 0 \\ 0 & c_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{h} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_h & 0 \\ 0 & k_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L \\ M \end{bmatrix}, \quad (1)$$

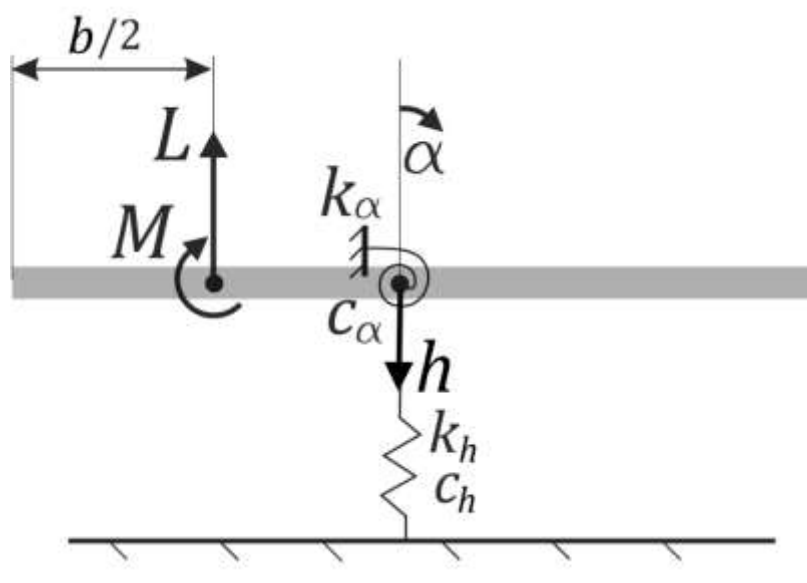
ahol h a síklap transzverzális elmozdulás, α a síklap szögkitérése, m a tömeg, I_α az elasztikus tengely körüli tehetetlenségi nyomaték, c_h és c_α a transzverzális és torziós csillapítás, k_h és k_α a transzverzális és torziós rugómerevség, L a felhajtóerő és M az elasztikus tengelyre ható nyomaték.

Aeroelasztikus rendszerek dinamikáját a dimenziótlan redukált frekvencia (k) írja le. A redukált frekvenciával jellemezhetjük, hogy mennyire összetett analitikus modell szükséges az aerodinamikai erők leírásához. Ez a mennyiség a jellemző geometriai méret (b), a megfúvási sebesség (U) és a periodikus mozgás körfrekvenciájából (ω) számolható. Síklap aeroelasztikus modellezése során elfogadott a jellemző geometriai méretnek a fél húr hosszát tekinteni. Lassú mozgáshoz alacsony, gyors mozgáshoz magasabb redukált frekvencia tartozik.

$$k = \frac{\omega b}{U} \quad (2)$$

Az analitikus aeroelasztikus modellezés során a fellépő aerodinamikai erőket analitikus modellekkel írjuk le a kitérések és a kitérés sebességének segítségével. Ezek a modellek azonban nem alkalmazhatók általánosan, számos áramlási jelenség leírására alkalmatlanok. Ezek közül kiemelendő fontosságú a dinamikus átesés jelensége. Nagy amplitúdós megfúvás esetén a síklap szívtott oldalán leválik az áramlás, a szárnyprofil átesik. Amennyiben a szárnyprofil periodikus, nagy frekvenciájú mozgást végez, akkor megfigyelhető a késleltetett átesés, a belépő éli örvényleválás, valamint a határréteg visszacsatolás. Ezt a három jelenséget nevezzük dinamikus átesésnek, amely lineáris szerkezeti paraméterek esetében létrehozza a stabil határciklusos flattert a kritikus megfúvási sebesség fölött.

A fellépő aerodinamikai erők modellezésének másik lehetősége a numerikus áramlástani szimuláció. Ebben az esetben az áramlási térből nyert erőt és nyomatékot felhasználva a mozgásegyenlet numerikus integrálásával számolható a síklap pozíciója a következő időlépésben. A kapott sebességállapottal szükséges frissíteni a numerikus szimulációban alkalmazott geometriát. A szögelforduláshoz mozgó hálót, a transzverzális kitéréshez mozgó referenciarendszert alkalmaztunk a sűrű közel térrel rendelkező numerikus hálón.

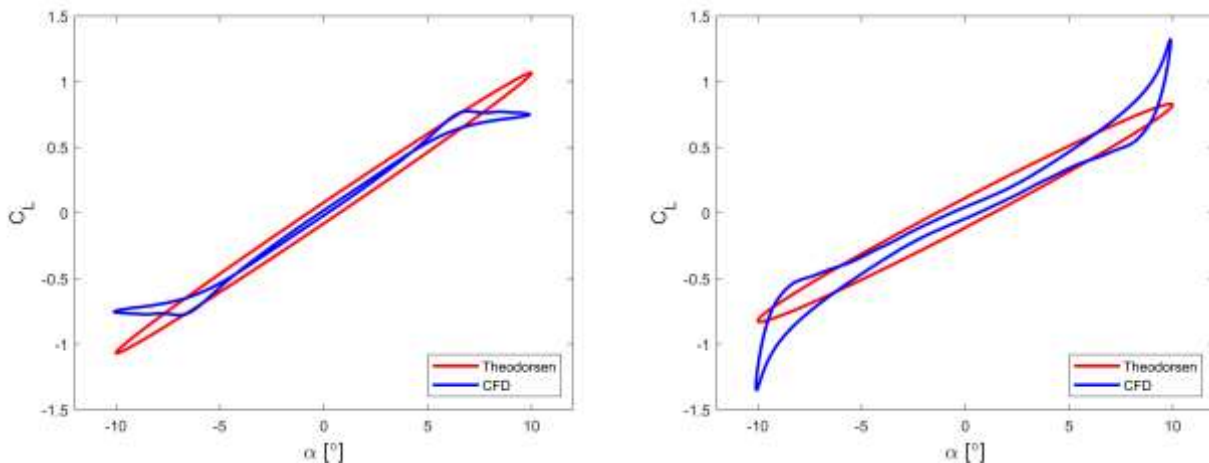


1. ábra. Rendszer szerkezeti ábrája

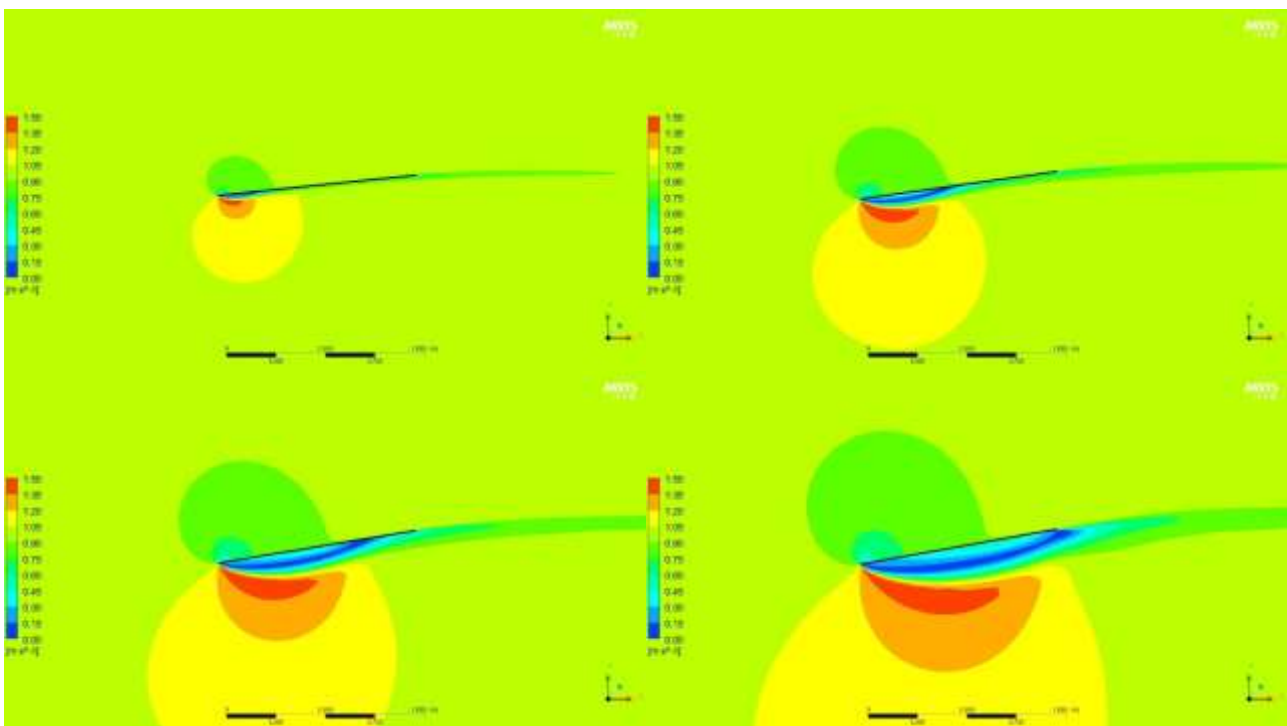
3. EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

Az összeállított RANS modellt kényszermozgással validáltuk. A szimulációs eljárás eredményeit a széles körben alkalmazott, analitikus Theodorsen modellel [5] vetettük össze. A kilépő élről leúszó örvényeket a komplex Theodorsen átviteli függvényt írja le, azonban elfogadott ennek a függvénynek a Laplace operátortérben polinomokkal való közelítése. Ehhez a Jones-féle [6] becslő függvényt alkalmaztuk. A kényszermozgás során az áramlásba helyezett síklap harmonikus mozgása elő volt írva és a szárnyra ható aerodinamikai erőket monitoroztuk. Alacsony rezgésamplitúdók és lassú mozgás esetében a numerikus és az analitikus modellek megegyeznek, a fellépő aerodinamikai erők lineárisan változnak a szögkitéréssel. Amennyiben a kényszermozgás szögkitérése kisebb volt mint 5° , illetve a redukált frekvencia nem haladta meg a 0.1-es értéket, az analitikus modellel és CFD-szimulációval számolt felhajtóerők közötti eltérés kevesebb mint 1%. Növelve a redukált frekvenciát a felhajtóerő-tényező görbén megnő a hiszterézis.

Nagyobb, a statikus áteséshez tartozó szöget meghaladó amplitúdós mozgás esetén a felhajtóerő görbe megváltozik. Alacsony redukált frekvencián a numerikus szimuláció jelentősen eltér a Theodorsen-modelltől, amely az átesés megjelenésére vezethető vissza: átesés után a felhajtóerő lecsökken. Ezzel szemben, gyors mozgás esetében a felhajtóerő görbe maximális kitérésnél nem lecsökken, hanem progresszíven nő tovább, meghaladva a lineáris egyenes értékét. Ez a dinamikus átesés miatt következik be: a késleltetett átesés miatt nem válik le a szívott oldali határreteg, nem áll be átesés. Továbbá a belépő éli örvényleválás okozta lamináris leválási buborék kialakul és a szívott oldalon haladva jelentősen megnöveli a felhajtóerőt. A belépő éli örvényleválás látható a 3. ábrán a szárny körüli sebesség amplitúdó diagramokon $\alpha_0 = 10^\circ$ előírt szögkitérés amplitúdó esetében. Az elkészült numerikus modellt ezen felül szabad lengésre validáltuk, hogy belássuk, hogy a szilárd-folyadék kölcsönhatás megfelelően lett kezelve.



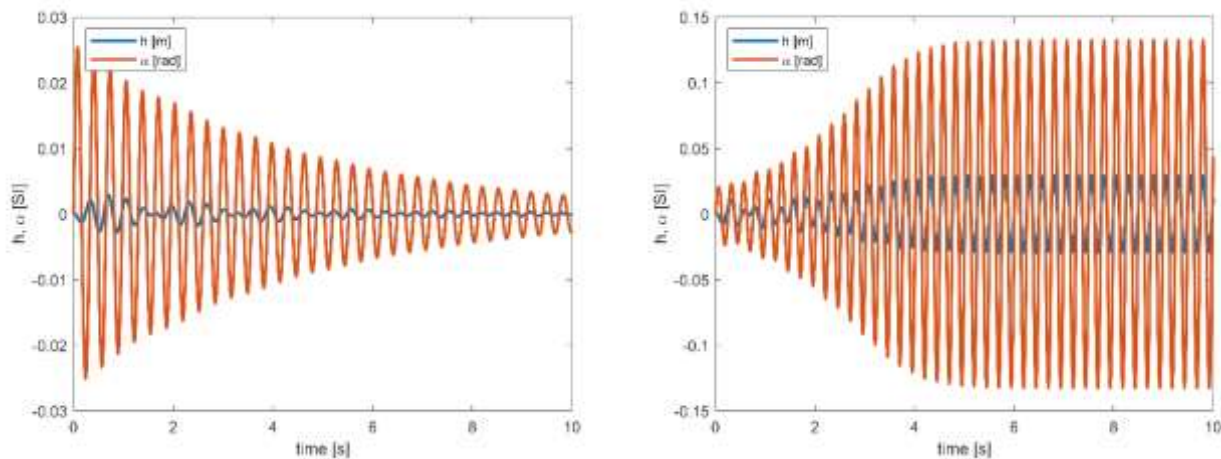
2. ábra. Felhajtóerő-tényező harmonikus bólintás kényszermozgásra, $U = 1 \text{ m/s}$, $Re = 10^6$
bal: $k=0.01$, jobb: $k=0.1$



3. ábra. Belépő éli örvény a síklap körüli sebességkontúron: 0.15, 0.2, 0.25, 0.3 periódusidő pillanatokban,
 $U = 1 \text{ m/s}$, $Re = 10^6$, $k=0.1$, $\alpha_0 = 10^\circ$

A flutter szimulációk során az (1) egyenlet lett megoldva a szimulációkból kapott erővel és nyomatékkal. A flutter vizsgálat eredményeit a 4. ábra mutatja. Megfigyelhető, hogy a kritikus megfűvási sebesség alatt a rendszer stabil, exponenciálisan csökkennek a szabadságfokok kitérései. Ezzel szemben a kritikus szélesség fölött a rendszer stabilitást veszít és egy stabil határciklusra áll be. A határciklus amplitúdója meghaladja a

síklap statikus esetben mért átesési szögét, ezért kijelenthető, hogy a dinamikus átesés flutter miatt késleltetett átesés is megjelent.



4. ábra. Síklap rezgése a kritikus megfúvási sebesség alatt és fölött
bal: $U = 10 \text{ m/s}$, jobb: $U = 30 \text{ m/s}$

Mivel a valós mérnöki feladatok során kialakuló flutter gyakran gyors mozgásnak tekinthető, ezért belátható, hogy a kapcsolt, numerikus szimuláció a dinamikus átesés flutter mechanikai és áramlástani viszonyait megfelelő minőségben közelíti, míg az analitikus modellezés nem elégséges a jelenség teljes leírásához, megértéséhez.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Tanulmányunkban egy megbízható, numerikus, kapcsolt aeroelasztikus-áramlástani szimuláción alapuló eljárást alkottunk meg a nagy amplitúdójú dinamikus átesés flutter modellezésére. A modellt kényszermozgásra ellenőriztük és megmutattuk, hogy alkalmas a dinamikus átesés flutter helyes leírására. Az elkészült modell egyszerűen bővíthető és alkalmazható különböző területeken, mint például összetettebb szárnyprofil vizsgálata vagy flutter rezgéscsillapítók alkalmazhatóságának ellenőrzése.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal K-18 129023 projektjének és az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-20-3 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült. A jelen publikációban megjelenő kutatások az ITM NKFIA által nyújtott TKP2020 IKA támogatásokról, az NKFIH által kibocsátott támogatói okirat alapján valósultak meg (projekt azonosítók: TKP2020 BME-IKA-VÍZ, TKP2020 BME-NKA).

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Dowell, E. H. A Modern Course in Aeroelasticity. Vol. 217. Springer, 2014.
- [2] Dowell, E. H., Edwards, J., Strganac, T., Nonlinear Aeroelasticity. Journal of Aircraft, 40(5), 857–874, 2003.
- [3] Tropea, C., Yarin, A. L., Springer handbook of experimental fluid mechanics. Springer Science & Business Media., 2007
- [4] Szabó, Zs., Stépán, G., Zelei, A., Experimental and analytical investigation of a fluttering bridge section model. 3. 2663-2670., 2014
- [5] T. Theodorsen. General theory of aerodynamic instability and the mechanism of flutter. Technical Report 496, National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), DC, USA, 1935.
- [6] Jones, R. T., Operational treatment of the non-uniform lift theory in airplane dynamics. Technical Note 667, NASA, 1938