

Gábor Armand Dávid, Veress Árpád

## Airbus A380-as repülőgépszárny numerikus áramlástanai vizsgálata és az eredmények validációja szárnyvéglap-konfigurációk későbbi analízisének érdekében

A Nemzetközi Légiközlekedési Szövetség közel 7,8 milliárd utasra számít 2036-ban a légiközlekedésben, amely közel a kétszerese a 2017-ben elvárt közel 4 milliárd utasnak [1]. Ez az előrejelzés további fejlesztéseket igényel a légi járművek esetében a hatékonyság-, és teljesítménynövelés, valamint a károsanyag-kibocsátás csökkentése érdekében. Az egyik legígéretesebb aerodinamikai eszköz az indukált ellenállás (ami a teljes légellenállás 30–40%-a is lehet [2]) és így a tüzelőanyag-fogyasztás csökkentésére a szárnyvéglap. A jelen munka célja egy CFD-analízis elkészítése Airbus A380-as szárnyvéglap konstrukció nélküli repülőgépszárnyra validálási célból rendelkezésre álló adatok felhasználásával. A következő lépésben különböző szárnykonfigurációk hatásának elemzését követően következtetések vonhatók le a tervezés jóságára vonatkozóan, mivel a simulációs eredmények függetlenek a szoftverbeállításoktól, fizikailag plauzibilisek és pontosak.

**Kulcsszavak:** A380-as repülőgép, szárny, numerikus áramlástanai vizsgálat, validáció, szárnyvéglap

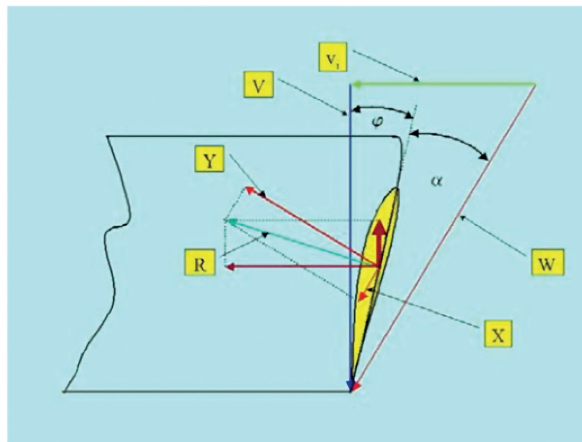
### Bevezetés

A jelen kutatás célja, egy olyan számítási folyamat kidolgozása és az eredmények validációja, amelynek segítségével megbízható pontossággal határozhatók meg a szárny által generált légerők. A bevezetés első részében a jelen munka folytatásaként tervezett szárnyvéglapok vizsgálatához szükséges elméleti és gyakorlati aspektusok bemutatására helyeződik a hangsúly.

### Szárnyvéglapok

A szárnyvéglapok [3] kis mértékben növelik az ellenállás értékét, de ugyanakkor csökkentik az indukált ellenállás értékét. A szárny végén elhelyezkedő eszközök legfőbb feladata, hogy egy úgynevezett „akadályt” képezzenek a szárnyvégi áramlásnak. Nagyobb repülési sebességek esetén ez a hatás jelentősen csökken, a zárólapon keletkező profillellenállás már nagyobb, mint az elérhető indukált ellenállás-csökkenés. A szárnyvégi profil körüli sebességeket az 1. ábra mutatja.

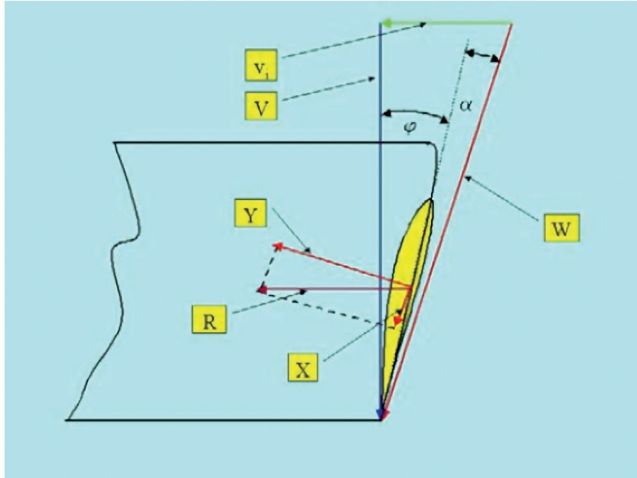
A szerkezeti elem a következőképpen fejt ki a hatását. A kiválasztott szárnyvég metsetet a repülési sebességből ( $V$ ) és a szárnyvégi örvényekből származó kerületi sebesség ( $v_i$ ) összegzése után kapott eredő megfúvás ( $W$ ) éri. Így a szárnyvéglaapon keletkező eredő erőnek ( $R$ ) optimális esetben lesz egy haladási irányba eső komponense, amelyet tekinthetünk úgy, mint egy járulékos vonóerő. Ezenkívül természetesen a véglapprofil is eltéríti az áramlást, ami azt jelenti, hogy az eredő megfúvás ( $W$ ) iránya a szárnyvégkonstrukció után közel párhuzamossá válik a repülési irányval, csökkentve ezzel a szárnyon a terjedtségi menti áramlást.



1. ábra

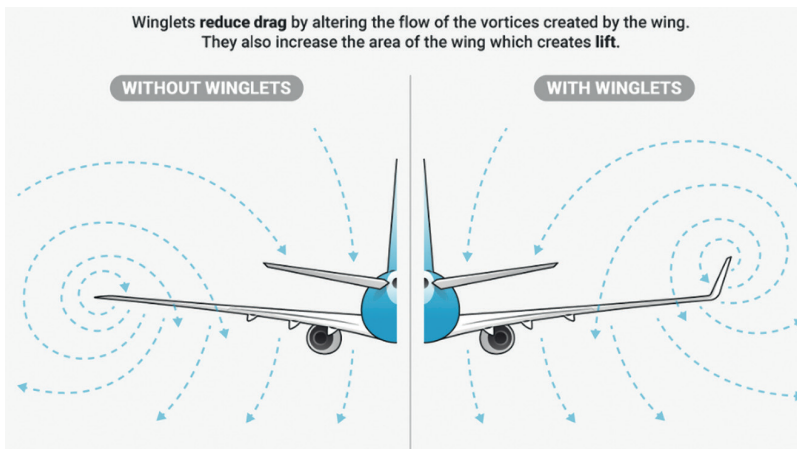
*A szárnyvégi profil körüli sebességek ideális esetben [3]*

Kis repülési sebességnél ( $V$ ) a szárnyvégi örvényben az adott metsethez tartozó kerületi sebesség ( $v_i$ ) nagy, ami azt jelenti, hogy az állásszög közelít a kritikus állásszöghöz. A szárnyvégprofil beállítási szöge többé-kevésbé akkor tekinthető optimálisnak, ha a szárnyon és a végkonstrukción nagyjából egyszerre következik be az átesés. Növekvő repülési sebesség ( $V$ ) esetén az állásszög csökken, az eredő erő ( $R$ ) lassan hátrahajlik és a repülési irányba eső komponense már hátrafelé fog mutatni. Valahol ennél az állásszögnél, illetve a hozzá tartozó sebességnél a szárnyzáró profil már ellenállás-növekedést fog okozni (az indukált ellenállás csökkenése már minimális lesz, az eredő erő ( $R$ ) további elfordulása pedig már ellenállást növel). A 2. ábra éppen a határesetet ábrázolja.



2. ábra  
A szárnyvégi profil körüli sebességek határhelyzetben [3]

Általános esetben, az indukált ellenállás kialakulásáról és meghatározásáról bővebb információ a [4] számmal jelzett irodalomban található. A szárnyvéglap-konstrukció hatását a 3. ábra szemlélteti.



3. ábra  
Szárnyvégi örvények szárnyvéglap-kialakítás nélkül, ill. szárnyvéglap-kialakítással [23]

A 20. századtól kezdve egyre több, a repülés hatékonyságát növelő kutatási eredmény jelent meg, különös tekintettel az olyan eszközökre, amelyek alkalmazásával csökkenthető az ellenállás és növelhető a felhajtóerő. A legtöbb kutató a szárnyvégi eszközök hatását vizsgálta ebben a témakörben.

Whitcomb [5] szerint a szárnyvéglapok 9%-kal növelik a szárny hatékonyságát (felhajtóerő–ellenállás-erő viszony) úgy, hogy ezek a szárnyvégi örvényeket kisebb intenzitású örvényrészekre osztják fel, amelyek főleg az utazórepülés során töltenek be fontos szerepet. Így a szárnyvéglapok 20%-kal csökkentik az indukált ellenállás értékét. Whitcomb többféle szárnyvégi eszközt is vizsgált.

Kravchenko [6] különféle szárnyvégi eszközöket analizált repülőgépek esetén a felhajtóerő és az ellenállás-erő szempontjából szubszonikus és transzszonikus sebességtartományokban. Az elvégzett tesztek arra az eredményre vezettek, hogy  $M < 9$  esetén a felhajtóerő–ellenállás-erő viszony relatív növekménye a Mach-szám függvényében kicsi.  $M = 0,6–1,25$  sebességtartományban a szárnyvéglapok hatására kismértékben növekszik a felhajtóerő-tényező és a  $c_l$ - $\alpha$  görbe meredeksége a kiindulási szárnykonfigurációhoz képest. A szárnyvéglapok esetén kitért továbbá azok beállítási szögének, irányítottóságának (alsó vagy felső) és a stabilitásra gyakorolt hatására is a létrehozott hajlító igénybevételek mellett.

Kroo [7] olyan aerodinamikai eszközökkel kapcsolatban végzett részletes irodalomkutatást, amelyek csökkentik az indukált ellenállást. Munkájában ismertette például a „gyűrűs” kialakítású szárnyvég, a „doboz” kialakítású szárnyvég és a nem egy síkban elhelyezkedő szárnyak hatásait is. Munkájában kifejtette, hogy a szárnyvéglapok esetén minden alkalmazást külön kell vizsgálni és a jellemző működési feltételeknek megfelelően, olyan többparaméteres célfüggvényt kell optimalizálni, amelyek figyelembe veszik többek között a légerőből adódó terheléseket, az aeroelasztikus jelenségek hatását, a flattert, a repülőgép stabilitását és irányíthatóságát.

Spillman [8] kutatásai során különböző úgynevezett „tip-sail” szárnyvégi eszközöket vizsgált. Ismertette, hogy ezen eszközök hatására csökkenthető a felhajtóerővel együttesen jelentkező ellenállás-erő, amelynek következtében jelentős üzemanyag-megtakarítás érhető el.

Neal J. Pfeiffer [9] munkájának célja egy módszer kidolgozása volt, amelynek segítségével optimalizálni lehet a szárnyvéglap helyzetét a szárnyon a profilellenállás figyelembevételével, az indukált ellenállás mellett. Az eljárás a potenciális áramlásszámítás eredményeit használta fel a Trefftz-síkban megfelelő távolságban a felhajtóerő-képzésben részt vett felületek mögött. Az eredmények a vizsgált esetekben kismértékű eltérést mutattak a kizárólag indukált ellenállást figyelembe vett és az indukált ellenállás mellett a profilellenállást is figyelembe vevő módszerek eredményei között.

Hesham S. M. Helal és mások [10] speciális, nagyobb nyílazással rendelkező, úgynevezett „raked wingtip” szárnyvégek hatását vizsgálták numerikus áramlástani szimulációk segítségével. A számításokhoz NACA 65(3)-218 szárnyprofil geometriai koordinátáit használták fel. A validáció érdekében egy 3D-s téglalap alakú szárnyat alkalmaztak. A numerikus megoldás során a tömeg-, az impulzus és az energia-megmaradás egyenletei mellett a Spalart-Allmaras turbulenciamodellt állították be a következő peremfeltételekkel: a sebesség  $M = 0,2$ ,  $T = 288,2$  K és  $p = 101\,325$  Pa. A validációt tekintve a mérési és a számítási eredmények jó egyezőséget mutattak. További CFD-számítások eredményeiből következtetéseket vontak le arra vonatkozóan, hogy hogyan alakulnak az örvények a szárnyak körül és hogyan befolyásolhatók különböző nyílazási szögek, illetve különböző szárnyvégi és a szárny tövében érvényes húr-hosszarányok esetén. A speciális szárnyvég-kialakítással rendelkező verziók hatására 5–10%-kal növekedtek az  $L/D$  viszonyok a véglap nélküli kialakításhoz képest. Az optimális eset  $\theta = 45^\circ$ -os nyílazási szög, 4 fokos állásszög és 0,2-es TR esetén adódott (ahol a TR [Taper Ratio] a szárnyvégi és a szárnytőben érvényes húr-hosszak aránya). Konklúzióként megállapítható,

hogy a szárnyvéglapal kialakított szárny a nagyobb L/D viszony miatt előnyösebb, mint a szárnyvéglap nélküli konstrukció.

Alekhya N. és mások [11] CATIA-program segítségével modelleztek úgynevezett illesztett (blended) szárnyvégeket. A szárny profilja NACA 4412-es típusú volt. A koordináták importálása után az illesztett szárnyvéglapot 30°- és 90°-on építették be a szárnyhoz képest. A kutatók több állásszögön is vizsgálták az egyes konfigurációk által létrehozott ellenállás- és felhajtóerőt. Megállapították, hogy 90°-os beépítés esetén érhető el a legnagyobb teljesítménynövekedés.

J. F. Marchmann III és mások különböző „Whitcomb”-féle szárnyvéglapokkal felszerelt, kis sebességű üzemiállapotban működő repülőgépek esetén végeztek vizsgálatokat [12], amelynek eredményként ismertették, hogy akár 15%-os L/D viszony-növekedés is elérhető. A kutatás során megállapították, hogy a szárnyelvékonyodás növekedése negatív hatással van a szárnyvéglap hatásosságára, mivel csökken a szárny külső felének terhelése. Optimális szárnyvéglap-hatékonyság elérése érdekében célszerű nem elvékonyodó szárnyat használni. Teszteredmények segítségével kimutatták, hogy alacsony sebesség esetén a szimmetrikus kialakítású szárnyvég legalább olyan hatékony, mint a szuperkritikus szárnyvég, ezért nincs értelme a nagyobb komplexitással rendelkező és emiatt költségesebb szuperkritikus profilkat alkalmazni az általános célú repülésben.

Bento S. de Mattos és mások [2] a szárnyvéglapok működésével és tulajdonságaik bemutatásával kapcsolatban tették közzé összefoglaló munkájukat. Publikációjukban először ismertették a szárnyvégi örvények kialakulását és hatását. Ezt követően különböző szárnyvéglapmegoldásokat mutattak be és elemezték a repülésre gyakorolt pozitív, illetve negatív tulajdonságaikat. Megállapították, hogy a szárnyvéglapok egyre jelentősebb szerepet töltenek be a repülésben, a segítségükkel megvalósított teljesítménynövekedés hozzátartozik a repülőgépek piacán kialakult versenyképesség megtartásához, illetve növeléséhez.

Vinay Kumar Bada és mások kutatásukban [13] spiroid kialakítású, illetve úgynevezett kéttollas (dual feather) szárnyvéglapokat vizsgáltak. Munkájuk során NACA 2412-es profilt alkalmazva tanulmányozták a szárnyvégek áramlásra gyakorolt hatását. Az aerodinamikai elemeket egy 28 350 mm hosszúságú és 7320 mm szárnytőben, valamint 1600 mm szárnyvégen értelmezett húrhosszúságú szárnyhoz illesztették. A vizsgálat célja a szárny aerodinamikai jellemzőinek meghatározása volt az említett szárnyvég-konfigurációkkal numerikus áramlástan szimulációk segítségével. Konklúzióként megállapították, hogy a spiroid kialakítás nagy L/D viszonyal rendelkezik és jobb a kéttollas konfigurációnál.

## Az Airbusnál alkalmazott szárnyvégek áttekintése [14]

Az Airbus úttörőnek számít a szárnyvégi eszközök kereskedelmi repülésben történő alkalmazásában. A repülőgépgyártó-vállalat esetében az A300-as, illetve az A310-es repülőgépeken jelentek meg először. Az előzetes tapasztalatokat felhasználva „Sharklet™”-eket alkalmaztak az A320-as család járművein is. A „Sharklet™”-eket később módosították, hogy alkalmazhatók legyenek az A340, az A380, illetve az A350 XWB típusú repülőgépekre. Az első „Airbus 330neo jet”-eken megjelent „Sharklet™”-ek kecses, elnyúló és enyhén felfelé ívelő szárnyvégek voltak, amelyek csökkentették az üzemanyag-fogyasztást és a zajkibocsátást, valamint növelték a felszálló-teljesítményt.

Az Airbusokon alkalmazott szárnyvéglapok következő generációja 2,4 méter magas volt, és az A320-as családra fejlesztették ki. Az új konstrukció már maximum 4%-kal tudja csökkenteni a tüzelőanyag-fogyasztást, illetve évenként 900 tonnával a CO<sub>2</sub> kibocsátást repülőgépenként. Ezt az eszközt implementálták az új A320neo, illetve az A320ceo típusú repülőgépekre is. Az A330neo típus esetén a „Sharklet™”-ek 60,3-ról 64 méteresre növelték a szárny fesztávolságát.

## A Boeington alkalmazott szárnyvégek áttekintése [15]

A Boeing esetén a valaha volt leghatékonyabb szárnykonstrukció a 737MAX esetén született meg. Ez egy leleményes aerodinamikai megoldásnak köszönhető. Szárnyvéglap-konstrukció nélkül a közeg a szárny alól, a nagyobb nyomású hely felől a szárny fölé, a kisebb nyomású hely felé áramlik. Nagy sebességnél a szárnyvégek körül kialakuló felfelé történő áramlás egy, a repülési iránnyal ellentétes húzóerőt fejt ki. A felfelé, illetve hátrafelé áramló közegek együttesen alacsony nyomású örvényeket hoznak létre. Ezen örvények okozzák a felhajtóerő által indukált ellenállást, illetve igyekeznek a szárny hatékonyságát csökkenteni. Az illesztett szárnyvéglap („blended wingtip”) konstrukció esetében a szárnyvégi áramlás felfelé, illetve a törzs irányába mutató erőt hoz létre. Ennek az erőnek van előre felé mutató komponense is, ami hozzájárul a felhajtóerő által indukált ellenálláserő csökkentéséhez. A Boeing nemrégiben mutatta be a legújabb szárnykonstrukcióját a 737MAX szárnyvéglap-szerkezetet. A felső szárnyvéglap befelé, felfelé és egy kissé előre felé létrehozott erővektora mellett, megjelent egy új, az alsó szárnyvéglap által létrehozott, a törzstől elfelé mutató, és szintén kissé előre felé mutató erő. A két szárnyvéglap együtt biztosítja a szárny hatékony működését. Ezenkívül, a szárnyvéglapok működésének további növelése céljából, a Boeing által kifejlesztett lamináris áramlás kialakulásának kedvező felületkezelési eljárásnak vetették alá a vizsgált szerkezeti elemeket borító burkolatokat. A módszer alkalmazása hatékony megoldás az áramlás súrlódási erejének csökkentésére. A Boeing megfelelő tervezési módszerek, felületkezelési eljárások és bevonatok alkalmazásával éri el azt, hogy közel lamináris áramlás alakuljon ki az áramlás által súrolt felületeken. Ez a technológia tovább csökkenti az indukált ellenállást okozta negatív hatást, illetve növeli az üzemanyag-felhasználás hatékonyságát.

## Numerikus áramlásmodellezés alapjai [19]

A CFD (Computational Fluid Dynamics), azaz a számítógépes áramlásmodellezés azoknak a módszereknek a gyűjtőneve, amelyek képesek kiszámolni az áramlás valós térben elosztott paramétereit. A rendszer elosztott paramétereinek nevezzük azokat a jellemzőket, amelyek a vizsgált tartomány nem egy-egy pontján, hanem egészében, például diszkrét pontok sokaságában, állnak elő. Jelen esetben a valós közeg áramlását olyan nem-lineáris parciális differenciálegyenletekkel írjuk le, amelyeknek általános esetben nincs zárt alakú megoldása. Ezért a diszkrétizálást követően numerikus módszerekkel számíthatók az áramlási paraméterek számítógép segítségével. Mint a legtöbb esetben, az eredményeket validálni kell és további vizsgálatok szükségesek annak érdekében, hogy minél pontosabb eredményeket kapjunk.

A legelterjedtebb, széles körben alkalmazott áramlástanai alapegyenletek, a Navier-Stokes egyenletek, amelyek jelen kontextusban magukba foglalják a tömegmegmaradás, jelen esetben a Descartes-féle koordináta rendszer szerinti  $x$ ,  $y$  és  $z$  irányú impulzus-megmaradás, illetve az energia-megmaradás egyenleteit. Fontos, hogy a Navier-Stokes egyenletek alapja a kontinuummechanika, ami azt is jelenti, hogy a Kundszen-számnak meg kell felelnie az alábbi feltételnek:

$$Kn = \frac{\lambda}{L} < 0,01 \quad (1)$$

A Navier-Stokes egyenletek az alábbi konzervatív formában írhatók fel:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial(F(U) - F_v(U))}{\partial x} + \frac{\partial(G(U) - G_v(U))}{\partial y} + \frac{\partial(K(U) - K_v(U))}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

amelyben a keresett paraméterek és a konzervatív változók vektorai a következők:

$$U = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \end{pmatrix} \quad F(U) = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ \rho uw \\ \rho u h^{10} \end{pmatrix} \quad G(U) = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho vu \\ \rho v^2 + p \\ \rho vw \\ \rho v h^{10} \end{pmatrix} \quad K(U) = \begin{pmatrix} \rho w \\ \rho wu \\ \rho wv \\ \rho w^2 + p \\ \rho w h^{10} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Az  $F_v(U)$ ,  $G_v(U)$  és  $K_v(U)$  diffúz vagy a viszkózus fluxusok a (4) egyenletekben találhatóak.

$$F_v(U) = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{xz} - q_x \end{pmatrix} \quad G_v(U) = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{yx} \\ \tau_{yy} \\ \tau_{yz} \\ u\tau_{yx} + v\tau_{yy} + w\tau_{yz} - q_y \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$K_v(U) = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{zx} \\ \tau_{zy} \\ \tau_{zz} \\ u\tau_{zx} + v\tau_{zy} + w\tau_{zz} - q_z \end{pmatrix}$$

Az előzőekben említett Navier-Stokes egyenletek a következő tulajdonságokkal rendelkeznek:

- összenyomható ideális gáz áramlását írják le relatíve nyugvó rendszerben,
- az anyag folytonos, lehet lamináris vagy turbulens az áramlás,
- homogén, izotróp anyagtulajdonságokkal rendelkező munkaközegre érvényes,
- tranzien folyamatok figyelembevétele lehetséges,
- súrlódásos (valóságos) folyamatok leírására alkalmas,
- erőtermes jelenségekre érvényesek,

- forrás- és nyelőmentes az áramlás,
- az egyenlet formája konzervatív (diszkontinuitások (például: lökeshullámok, örvényvonalak is számíthatók velük).

Az alapegyenleteket véges térfogat elvének megfelelően diszkrétizálták, alakították át algebrai egyenletrendszerre, amelyet iterációk segítségével oldott meg a program.

## Turbulencia [16]

A Turbulencia olyan kaotikus folyamat, amely a közegáramlásokban fordul elő, ahol az áramlási paraméterek térben és időben oszcillálnak. A turbulencia természete még mindig nem teljesen ismert és a klasszikus fizika megoldatlan problémái közé tartozik. A jelenléte szorosan kapcsolódik a Reynolds-számhoz, amely az áramlást jellemzi, segítségével döntjük el, hogy az áramlás lamináris vagy turbulens:

$$Re = \frac{vL}{\nu} = \frac{\rho vL}{\mu} \quad (5)$$

## A turbulencia modellezésének folyamata [16]

A turbulens áramlás kiszámítására számos közelítés létezik, attól függően, hogy a turbulens energiaspektrum mely részét modellezzük vagy oldjuk meg közvetlenül. A legpontosabb módszer a „Direkt Numerikus Szimuláció” (DNS), ahol térben és időben az egész spektrum megoldása megvalósul. Ehhez rendkívül finom numerikus hálóra van szükség és kicsi időlépésre, hogy a legkisebb méretű és időtartamú örvény, turbulens fluktuáció is kiszámítható legyen. Ezért a DNS-nek még a legegyszerűbb áramlások esetén is nagy a számítógépi kapacitásigénye. Jelenleg csak korlátozott mértékben használják elsősorban kutatásokban, illetve ipari problémák esetén nem használható az elvárt hatékonysággal [17].

Mint ahogy az előzőekben már volt róla szó, a turbulencia pontos kiszámítása jelentős erőforrásigényekkel jár, és gyakran nem befolyásolja jelentősen a kapott eredményeket. Ezért a legtöbb alkalmazásban a turbulenciára jellemző paramétereket időben átlagoljuk. Ezt a megközelítést Reynolds- és/vagy Favre-féle átlagolásnak nevezzük, és az ebből származó egyenletrendszer a Reynolds- és/vagy Favre-átlagolt Navier-Stokes egyenletek. Ez a közelítés ugyanakkor számos új tag (például Reynolds-feszültségek) megjelenését eredményezi az alapegyenletekben, amelynek hatására nem tudjuk megoldani őket. Több lehetőség is létezik arra vonatkozóan, hogy ismét megoldhatóvá tegyük az egyenleteinket. Az egyik például az örvényviszkózitás- vagy turbulenciamodellek, amelyek Boussinesq hipotézisén alapulnak [18].

Napjainkban, a legelterjedtebb turbulenciamodell az SST-turbulenciamodell, amely a turbulens kinetikus energia és így a turbulens nyírófeszültség realizisztikusabb meghatározása érdekében korlátozó feltételeket használ. Továbbá, egy súlyozó függvény segítségével együttesen alkalmazza a  $k-\epsilon$  és  $k-\omega$  turbulenciamodelleket. A  $k-\omega$  modellt inkább fal közelében használja, míg faltól távolodva a  $k-\epsilon$  modellt, ezáltal kihasználva mindkét módszer előnyös tulajdonságait. Ez a modell nyújtja az egyik leghatékonyabb közelítést a turbulens áramlás



modellezésére általános esetben [19], ezért ebben a munkában is az SST-turbulenciamodellt fogjuk használni.

## A probléma leírása és a jelenlegi kutatás célja

A kutatási projekt hosszú távú célja numerikus áramlástani szimulációk segítségével megvizsgálni, hogy milyen hatást gyakorol a szárnyvéglap egy meglévő, Airbus A380-as repülőgéptípus szárnya által létrehozott légerőkre. Mivel a törzs hatása csekély a szárnyra nézve, különösen a szárnyvégen kialakult folyamatokra, ezért a szimulációban csak a szárnyat vettük figyelembe.

A szárnyat egy áramlási térben helyeztük (utazómagassághoz tartozó repülési paraméterek figyelembevételével), majd a szimuláció során kapott eredményekből meghatároztuk a szárny felhajtóerő-tényezőjét, illetve a konstrukció (L/D) viszonyát.

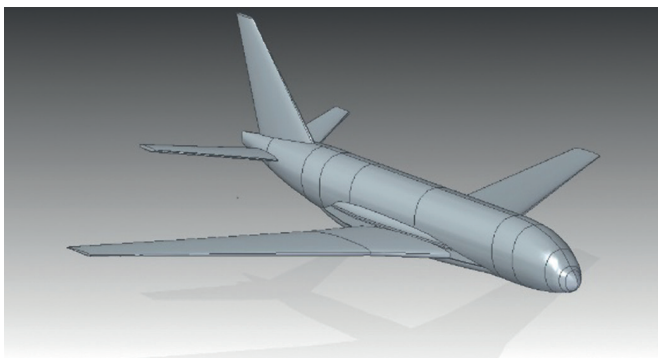
A szimulációs eredmények helyességéről validációval, vagyis a mérési (jelen esetben a szakirodalomban található) és a számítási eredmények összehasonlításával és a közöttük lévő eltérés vizsgálatával győződünk meg, amely nem haladhatja meg az 5–10%-ot.

A CFD-szimuláció ismertetése, a számítási eredmények bemutatása és értékelése a validációval a következő fejezetekben található.

## A CFD-számítás előkészítésének ismertetése

Ebben a részben a szimuláció elkészítésének menetét fogjuk bemutatni, kezdve a geometria (áramlási tér) létrehozásával. Ezt követően ismertetjük a numerikus háló elkészítését, illetve az áramlási tér, a peremfeltételek valamint a megoldó beállításait. A munkát az ANSYS akadémiai szoftvercsomagjával készítettük el „Workbench” környezet „CFX” moduljában.

## Geometria

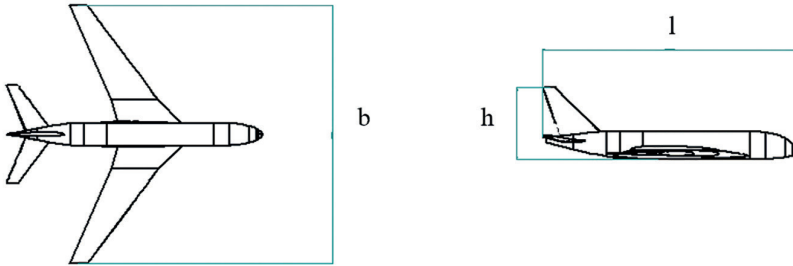


4. ábra

*Airbus A380-as repülőgéptípus CAD-modellje [saját szerkesztés]*

Az áramlási tér elkészítése érdekében első lépésben létrehoztuk az Airbus A380-as 1:1-es méretarányú modelljét Solid Edge ST8™ szoftver segítségével, amely a 4. ábrán látható.

A repülőgép főbb műszaki paraméterei a következők (a geometriai méretek miatt lásd: 5. ábra) [20]:

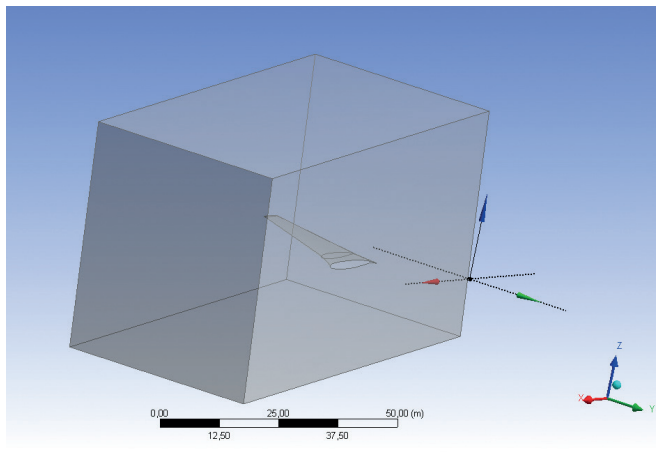


$b = 79,79664 \text{ m}$ ,  $l = 72,99960 \text{ m}$ ,  $h = 24,10968 \text{ m}$ ,  $S = 845,417664 \text{ m}^2$ ,  $AR$  (Aspect Ratio) = 7,53,  $TR$  (Taper Ratio) = 0,26,  $\Lambda$  (Wing Sweep) = 33,5°,  $t/c = 0,08$ ,  $c_{D0} = 0,01523$ ,  $\alpha_{MAX} = 18^\circ$ ,  $\alpha_{CRUISING} = 8^\circ$

5. ábra  
Airbus A380-as repülőgéptípus jellemző méretei és egyéb adatai [20]

Az alkalmazott modell esetén a szárny 2 szárnyprofilból épül fel: NASA SC(2)0610 és NASA SC(2)0606.

Mivel a törzs hatása elhanyagolhatóan kicsiny a szárnyon ébredő felhajtóerő-eloszlásra, illetve az ellenállásra, valamint a szárnyvéglap hatása is csak jellemzően a szárny külső felén jelentkezik, így a vizsgálatot elegendő a szárnyra elvégezni. Ezáltal a szimuláció lefuttatása és az eredmények kiértékelése is gyorsabbá válik, az eredmények pontosabbak lesznek a kisebb elemméretek miatt.



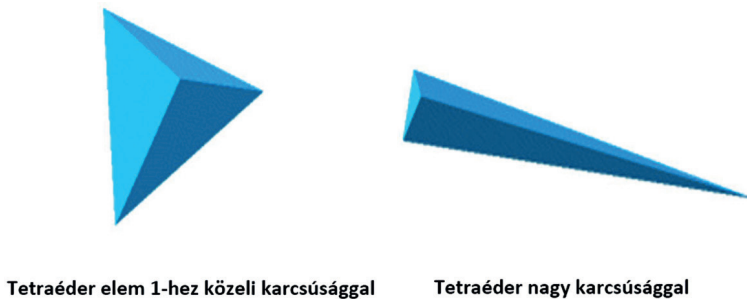
6. ábra  
Áramlási tér a szárny körül [saját szerkesztés]

A geometria beolvasását követően definiáltunk egy  $45 \times 50 \times 80$  [m] hasáb alakú áramlási teret a szárny körül, amelyben a vizsgálatot végeztük. A szárnyat  $\alpha_{\text{cruising}} = 8^\circ$ -os állásszögre állítottuk be. A befoglaló áramlási tér méreteit úgy választottuk ki, hogy az abba való belépéskor, illetve abból történő kilépéskor is zavartalan legyen az áramlás. A szimulációhoz szükséges áramlási teret úgy állítottuk elő, hogy a hasábból kivontuk a szárny geometriáját (lásd 6. ábra).

## Numerikus háló [19]

Többféle típusú elem létezik, amikor egy numerikus hálót hozunk létre. Mindegyiknek megvannak a maga előnyei és hátrányai. A numerikus hálók általában strukturált, strukturálatlan és hibrid típusokba sorolhatók. A strukturált hálók jól definiált irányítottsággal rendelkeznek és általában hexaéder elemekből állnak (három dimenzióban). Ez a típus jobb konvergenciatulajdonságokkal és nagyobb pontossággal rendelkezik (az áramlásra merőleges és vele párhuzamos cellahatároló elemek esetén) a nem strukturált hálóhoz képest. Ha azonban a geometria bonyolult, nem készíthető strukturált háló, akkor a strukturálatlan hálót kell alkalmazni, amely általában tetraéder alakú elemekből áll. A hibrid hálók mind strukturált, mind strukturálatlan régiókból állnak. Ezt a típusú hálót gyakran használják, ha a geometria egyes részeinek összetettsége miatt csak strukturálatlan háló létrehozása valósítható meg, de egyébként strukturált rács alkalmazható a tartomány többi részére.

Az adott típusú hálón belül kiemelt jelentőséggel bír a véges térfogatelem minősége, ami jelentősen befolyásolhatja a megoldás pontosságát és a konvergencia viselkedését is. A cellák minőségére több mérőszám is rendelkezésre áll. Az egyik például a karcsúság, ami a leghosszabb és legrövidebb élek aránya egy cellán belül. A háló jó minőségű ebben a tekintetben, ha a legtöbb elem esetén egyhez közeli értéket kapunk. 3D-s elemtípusokat és karcsúságuk összehasonlítását a 7. ábra szemlélteti.



7. ábra  
Háromdimenziós elemek és karcsúságuk [24]

A munkánk során használt háló nem strukturált és háromdimenziós, amely a 8. ábrán látható. A hálókészítés során lehetőségünk volt arra, hogy az elemek szélességét szabályozzuk. A szárnytól távol, az áramlásban kialakult kismértékű változások miatt nagyobb méretű elemeket használtunk, ellenben a szárny felületéhez közeledve kisebb méretűeket, a geometria hatásának minél pontosabb fgyelembevétele miatt.

A hálózás során a szárny közelében 450 mm-es élhosszúságú hálót alkalmaztunk, és ahogy minél messzebb haladunk a vizsgált elemtől, úgy arányosan növeltük a hálóméretet 600 mm-es élhosszig. A szárny körül kulcsfontosságú a sűrű határrétegháló kialakítása, hogy minél pontosabban leírhatóvá váljon a profil körüli áramlás. A faltól mért első cella vastagságát úgy kell meghatározni, hogy az  $y^+$  dimenzió nélküli fali távolság  $30 < y^+ < 300$  tartományba essen a logaritmusos faltörvény alkalmazása miatt. A dimenzió nélküli faltávolság a következő [19]:

$$y^+ = \frac{u_\tau y}{\nu}, \quad (6)$$

amelyben a fal-közeli csúsztatósebességet az alábbi formula segítségével határoztuk meg:

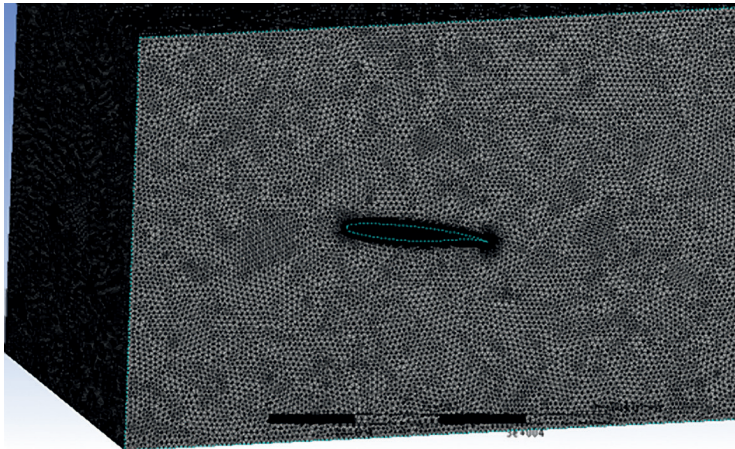
$$u_\tau = v_e \sqrt{\frac{c_f}{2}} \quad (7)$$

Az áramlási térben a közeg Reynolds-száma [19]:

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu} = \frac{0,261 \cdot 260 \cdot 10,3}{1,4283 \cdot 10^{-5}} = 187 \text{ E}10^6 \quad (8)$$

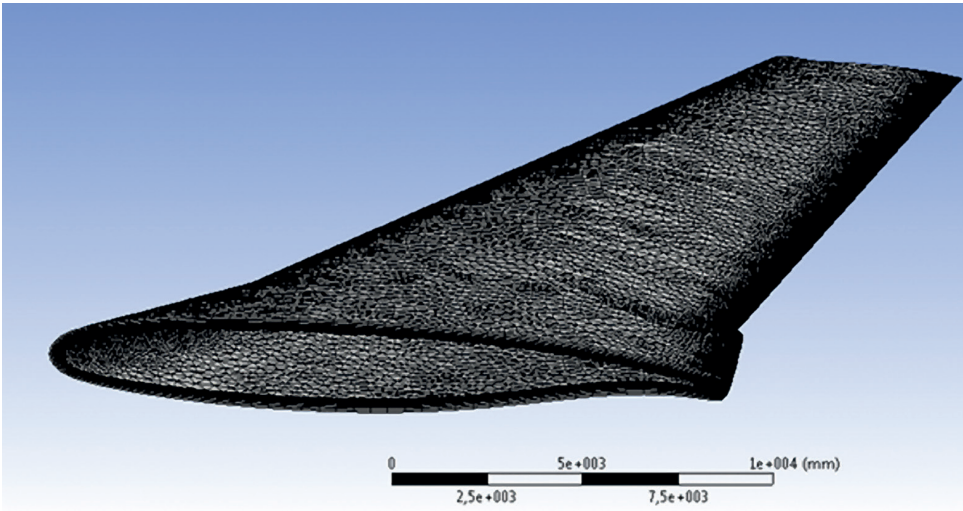
Ha az előzőekben használt képletek segítségével (6-8)  $y^+ = 180$  esetén meghatároztuk az első réteg cellavastagságát [19]:

$$y = \frac{y^+ \nu}{u_\tau} = 1,18 \text{ mm} \sim 1,2 \text{ mm} \quad (9)$$



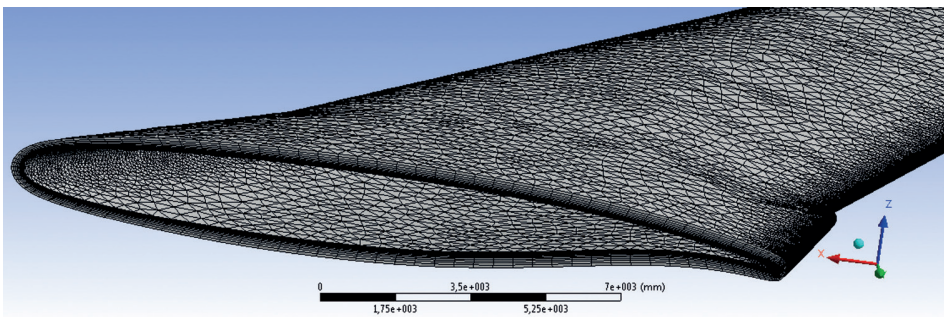
8. ábra  
Numerikus háló az áramlási térben [saját szerkesztés]

A határréteget a szimuláció során 25 részre bontottuk fel, a faltól mért első réteg vastagságát 1,2 mm-re a növekedési rátáját pedig 2-re állítottuk be. A határrétegháló a szárny körül, illetve a szárny teljes felületén a 9., illetve a 10. ábrán látható.



9. ábra  
*Határrétegháló a szárny körül [saját szerkesztés]*

A szimuláció során az általunk használt szárny határréteg-hálószáma 119 685 darab. A hálós- és modellérzékenységi vizsgálatokban alkalmazott elemszámok ettől eltérők lehetnek. Az érzékenységi vizsgálat során az elemszám változása a hálósűrítés során a határrétegen kevesebb, mint 5% volt.



10. ábra  
*Határrétegháló a teljes szárny környezetében [saját szerkesztés]*

## Megoldó beállításai

Az adott peremfeltételek alapján az utazómagasságon és az utazósebéségen értelmezett mennyiségek szolgáltak. Ezen körülményekhez tartozó adatok a következők [21]:

$$V_{\text{CRUISING}} = 260 \text{ m/s}$$

$$H_{\text{CRUISING}} = 13\,107 \text{ m}$$

$$T_{\text{STATIKUS}} = 216,65 \text{ K}$$

$$P_{\text{STATIKUS}} = 16\,240 \text{ Pa}$$

$$P_{\text{RELATÍV}} = 0 \text{ Pa}$$

$$C_{D0(\text{CRUISING})} = 0,01537$$

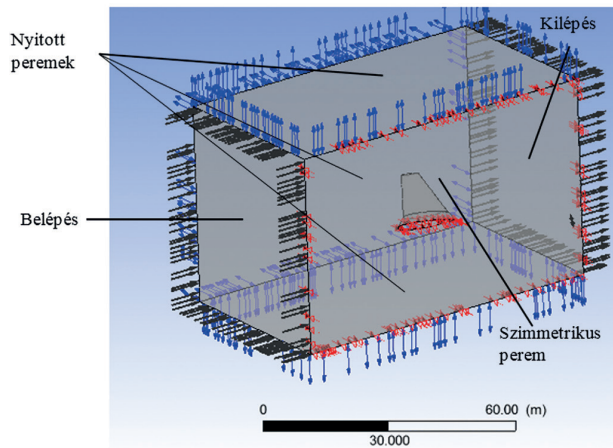
$$\rho_{\text{STATIKUS}} = 0,261 \text{ kg/m}^3$$

$$S = 366,27 \text{ m}^2$$

$$\nu (T = 216,65\text{K}) = 8,7514 \text{ E}10^{-6}$$

$$\epsilon (T = 216,65\text{K}) = 1,4283 \text{ E}10^{-5}$$

Az áramlási térben definiáltunk egy belépési, egy kilépési felületet, egy szimmetrikus felületet (amelyen keresztül nincs áramlás), illetve a szabad áramlások miatt úgynevezett nyitott felületeket (lásd 11. ábra).



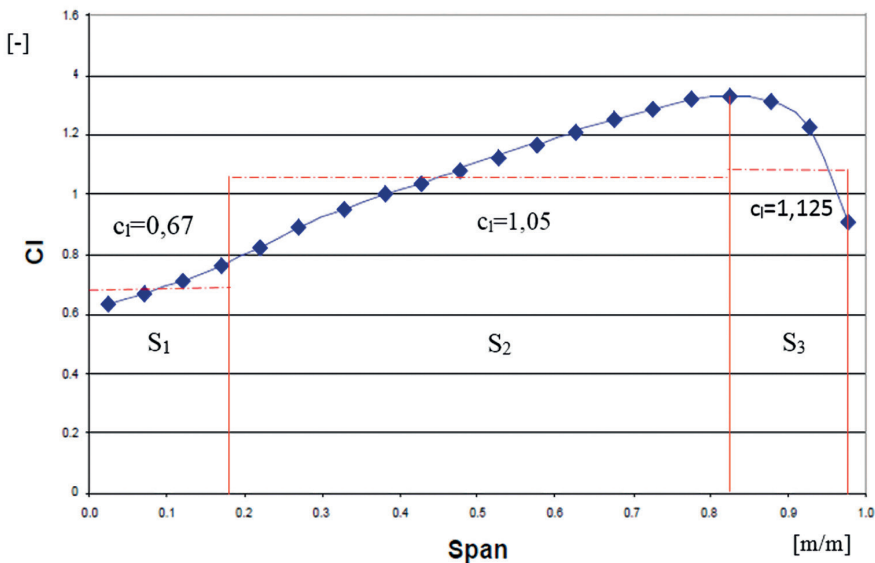
11. ábra  
Peremfeltételek [saját szerkesztés]

A szimuláció során SST-turbulenciamodellt alkalmaztunk. Az áramlási tér munkaközege 1 fázisú ideális gáz, levegő. A hőmérsékleteket és a nyomásértékeket az adott utazómagasságon érvényes feltételeknek megfelelően definiáltuk. A szimuláció során 100 iteráción keresztül

számolja a szoftver a Reynolds-átlagolt Navier-Stokes differenciálegyenletek diszkrétizált alakjának segítségével a keresett áramlástanai paramétereket.

## Hálófüggetlenségi vizsgálat és validáció

Az áramlástanai szimulációk során, a jelenségek komplexitása miatt, különösen fontos a validáció. A validációt el kell végezni külön a felhajtóerőre, amelyhez segítséget nyújt a  $c_l$  eloszlásfüggvénye a szárny mentén a 12. ábra szerint, illetve az ellenálláserőre, amelyhez a  $c_D$ - $\alpha$  függvényt alkalmaztuk (lásd 13. ábra). A felhajtóerő validációja során a szárnyat felbontottuk 3 szegmensre. Elsőként a törzshöz közelebbi szegmens  $c_l$  eloszlását integráltuk a felület mentén (NASA SC (2)-0610 profil). A szárnyvéget további 2 felületrésze bontottuk fel az eloszlásfüggvénynek megfelelően.



12. ábra  
 $c_l$  eloszlás-függvény [21]

A kapott  $c_l$  eloszlásokat integráltuk NASA SC (2)-0606-os és a NASA SC(2)-0610 típusú profilok felett. Az integrál-részösszegeket összegeztük a teljes szárnyfelületre (lásd 12. ábra). Felhajtóerő a rendelkezésre álló adatok alapján [21]:

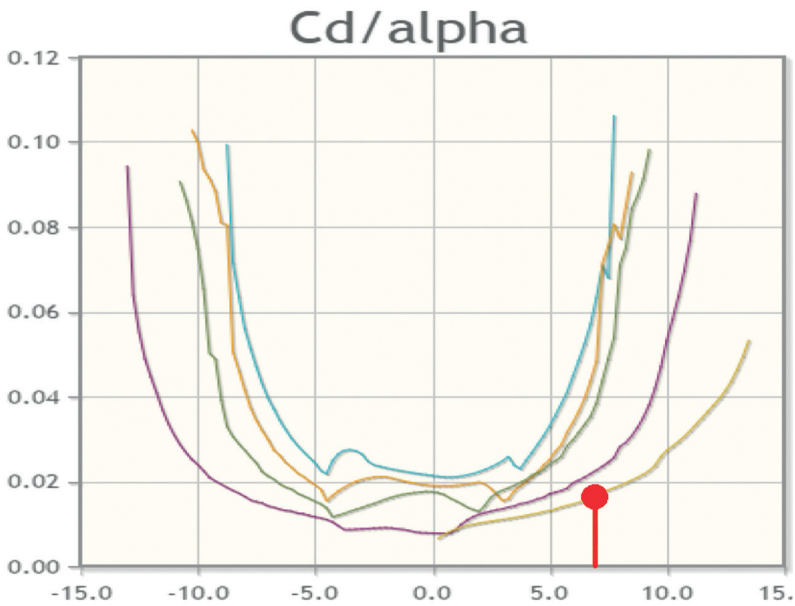
$$L = \frac{\rho}{2} V^2 S_i c_{l(i)} = \frac{0,261}{2} 260^2 (101,9 \cdot 0,67 + 231,4 \cdot 1,05 + 32,8 \cdot 1,125) = 3,077 \text{ E } 10^6 \text{ N} \quad (10)$$

Az ellenálláserő validációjához az Airbus A380-as repülőgéptípus szárnyprofiljának  $c_D$ - $\alpha$  görbéjét használtuk. A vizsgált állásszöghöz ( $8^\circ$ ) megkerestük a megfelelő értéket [22] (lásd 14. ábra).

Ezt követően az ellenálláserő értéke a rendelkezésre álló adatok alapján a következő:

$$D = \frac{\rho}{2} V^2 S C_{D(i)} = \frac{0,261}{2} 260^2 366,27 0,0175 = -56545 \text{ N} \quad (11)$$

A (10) és (11) egyenletek segítségével kiszámított erőket hasonlítottuk össze a CFD-számítás eredményeivel. Emellett hálózérkenységi vizsgálatokat is végeztünk; melyik az a szükséges elemszám, amelynek alkalmazásával már nem változnak jelentősen a keresett paraméterek. Abban az esetben, ha a szimuláció során a határrétegháló sűrűségét csökkentettük, de globálisan növeltük az elemszámot úgy, hogy a távolabbi elemek méretét csökkentettük, akkor az érték elkezdett távolodni a konvergenciahatártól. Ezért a szárnytól távol igyekeztünk állandó értéken tartani a hálóméretet, és csak a modell körül besűríteni azt. A számítás eredményeit a következő alfejezetben ismertetjük.



13. ábra  
 $C_d$ - $\alpha$  eloszlás Airbus A380-as szárnytípusra [22]

## Eredmények

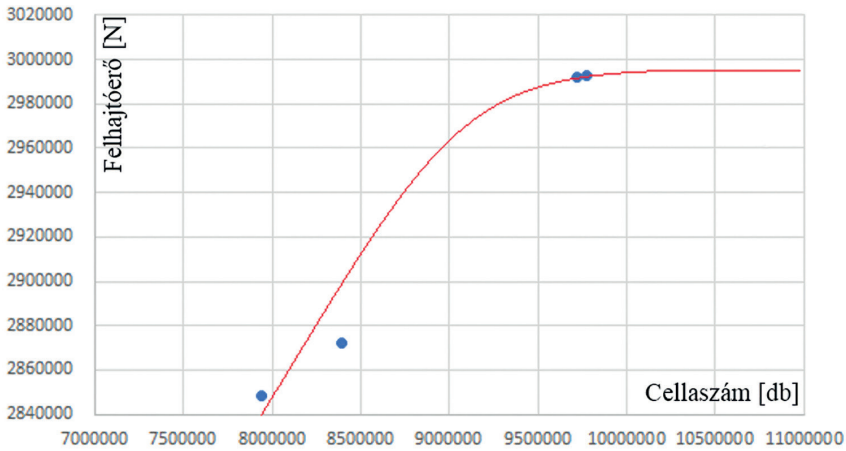
A szimuláció lefuttatása előtt beállítottuk a vizsgált áramlás peremfeltételeit, amelyeket az 1. táblázatban összegeztünk. A táblázat a peremfeltételeket, illetve a paraméterek értékeit tartalmazza.



1. táblázat  
Peremfeltételek [21]

Peremfeltételek	Paraméter-értékek
Belépés ("in")	$V_{\text{BELÉPŐ}} = 260 \text{ m/s}$ (merőleges a belépő felületre), $T_{\text{STATIKUS}} = 216,65 \text{ K}$
Kilépés ("out")	$P_{\text{ABSZOLÚT}} = 16\,240 \text{ Pa}$
Nyitott felület	$P_{\text{RELATÍV}} = 0 \text{ Pa}$ ; $T_{\text{OPENING(STATIKUS)}} = 216,65 \text{ K}$
Szimmetrikus	Nincs keresztáramlás

A számítások eredményeként különböző hálózasi paraméterek (azaz különböző él-hosszúság és így különböző darabszám) esetén lekérdeztük a szárnyon ébredő felhajtóerő és az ellenálláserő nagyságát. Ezt mutatja a 14. és a 15. ábra. Az adatok számszerű formában a 2. táblázatban találhatóak.



14. ábra  
Konvergenciagörbe felhajtóerőre az elemszám függvényében [szimulációk eredménye]

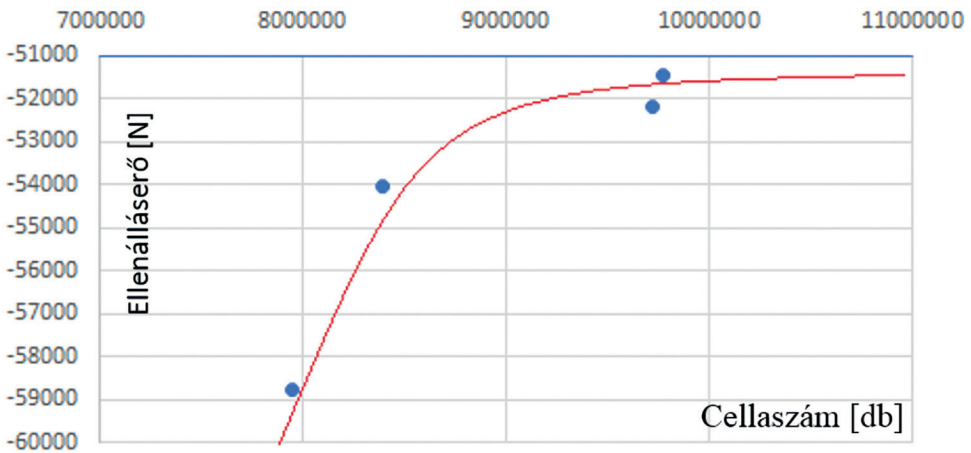
2. táblázat  
Felhajtóerő és az ellenállás [szimulációk eredménye]

Elemiszámok [db]	Felhajtóerő [N]	Ellenálláserő [N]
7 944 291	2 848 300	-58 748
8 395 352	2 852 120	-54 062
9 724 631	2 992 110	-52 183
9 775 458	2 993 160	-51 476

Az első szimuláció során egy egyszerű hálózással közelítettük az áramlási teret. Minden futtatás előtt a hálózat méretén finomításokat hajtottunk végre. A szimuláció során kapott értékek a határrétegháló, illetve a szárny körüli háló sűrítésével egy adott felhajtóerő és ellenálláserő-értékhez konvergáltak:

$$L_{\text{Szimulált}} = 2\,993\,160 \text{ N} \quad (12)$$

$$D_{\text{Szimulált}} = -51\,476 \text{ N} \quad (13)$$



15. ábra

Konvergenciagörbe ellenállásra az elemszámok függvényében [szimulációk eredménye]

A szimuláció során kapott eredményeket összehasonlítottuk a rendelkezésre álló adatokból számolt értékekkel és meghatároztuk a hibaeltérést százalékosan:

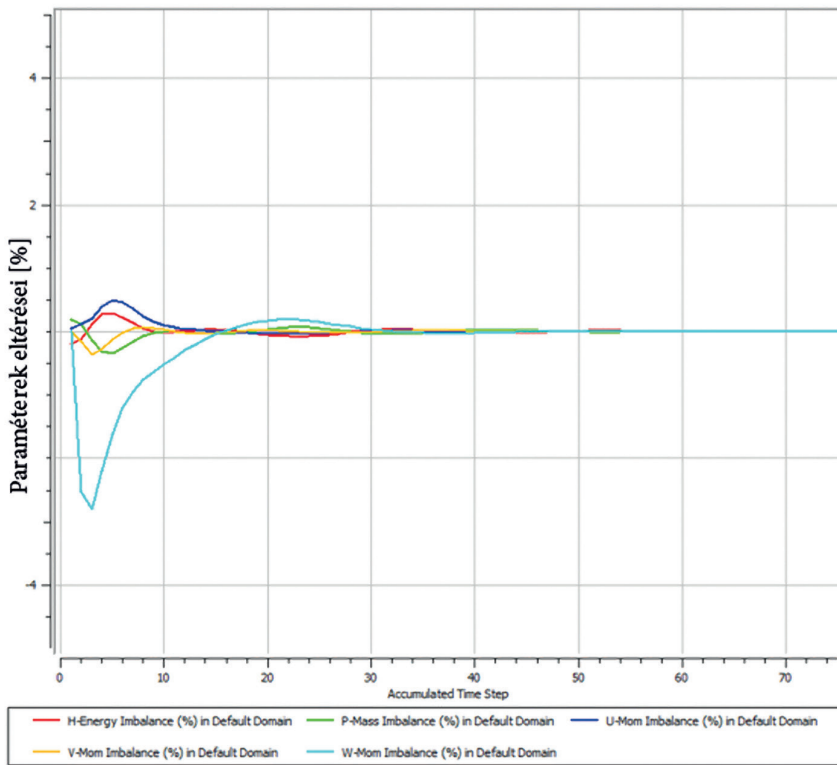
$$L\% = \left(1 - \frac{L_{\text{szimulált}}}{L}\right) * 100 = \left(1 - \frac{2993160}{3077000}\right) * 100 = 2,72\% \quad (14)$$

$$D\% = \left(1 - \frac{D_{\text{szimulált}}}{D}\right) * 100 = \left(1 - \frac{-51476}{-56545}\right) * 100 = 8,96\% \quad (15)$$

A felhajtóerő értéke esetén kevesebb, mint 3%, az ellenállás esetén pedig kevesebb, mint 9% az eltérés a rendelkezésre álló adatokhoz képest. Ennek alapján a szimuláció során kapott eredményeket elfogadhatónak tekintettük. Az eltérés legvalószínűbb oka a rendelkezésre álló adatokban lévő bizonytalanság, valamint a diagramok leolvasása során fellépő pontatlanság. A munkánk során kapott felhajtóerő és ellenállás segítségével ki tudtuk számolni a szárny L/D viszonyának abszolútértékét:

$$|(L/D)| = |2\,993\,160 \text{ N} / (-51\,476) \text{ N}| = 58,15 \quad (16)$$

A szárny egy fontos mérőszáma az  $|(L/D)|$  viszony, amely megmutatja egy adott konstrukció felhajtóerő-ellenállás arányát, azaz azt, hogy a felhajtóerő hányszorosa az ellenállásnak.



16. ábra

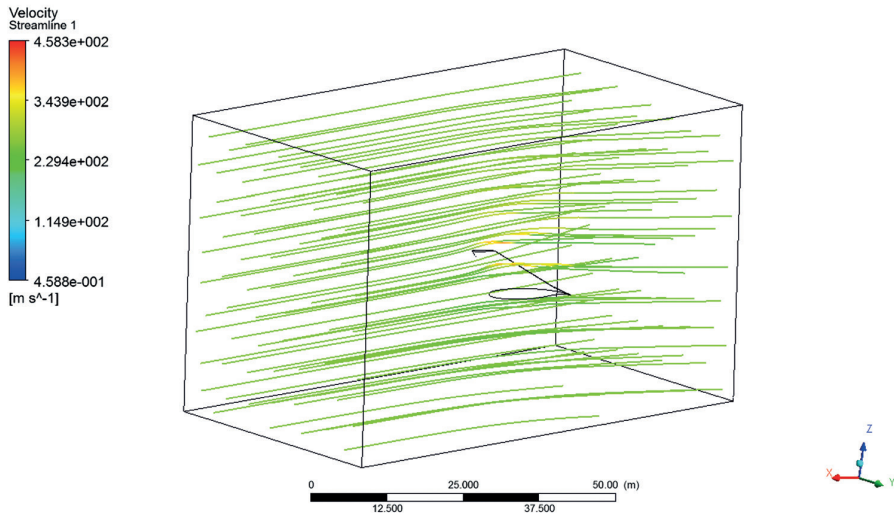
*Kiegyenlítetlenségek ingadozása a szimuláció során az iterációk függvényében [saját szimulációk eredménye]*

A szimuláció többszöri lefuttatását követően levontuk a következtetést, hogy 10 783 228 darab elemszámot követően a szimuláció cellafüggetlen lesz, azaz a vizsgált értékek konvergálni fognak egy adott értékhez.

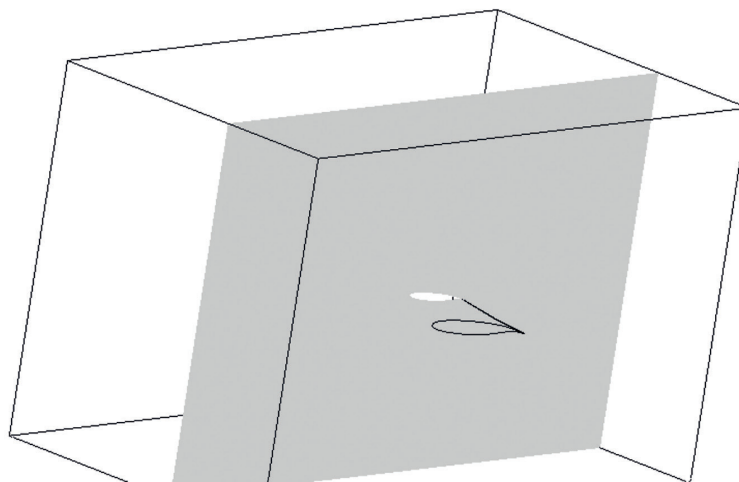
A szimuláció futtatása során nemcsak az adott paraméterek változását figyeltük meg, hanem konvergens szimulációra érvényes feltételek kielégítését is, vagyis a kiegyenlítetlenségek lefutását. A szimulációt 100 iteráció lefutására állítottuk be, amely során a szoftver kiértékeli a kiegyenlítetlenségeket (lásd 16. ábra). Az eredményekből látszik, hogy kezdetben a 2–3%-os ingadozást követően az értékek a 20. iterációt követően elérték az 1%-os elvárt határt.

A 17. ábra mutatja az áramlási térben kialakuló áramvonalakat. Az áramvonalak balról jobbra haladnak (a belépéstől a kilépés felé). Az áramvonalakból látszik, hogy a szárny eltéríti az áramlást, felhajtóerőt hoz létre.

A nyomáeloszlást és a hőmérséklet-eloszlást egy kiragadott keresztmetszetben, a szárny középsíkjában vizsgáltuk, a törzstől 25 m távolságra, amely a 18. ábrán látható. A szimuláció eredményei alapján megfigyelhető, hogy a szárny alatt a nyomás nagyobb, mint a szárny feletti zónában (lásd 19. ábra). Emiatt keletkezik a szárnyon a felhajtóerő.

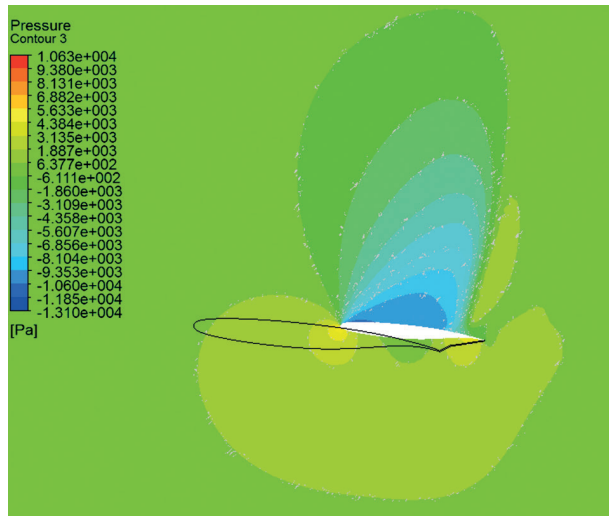


17. ábra  
Áramlási térben kialakuló áramvonalak [saját szerkesztés]

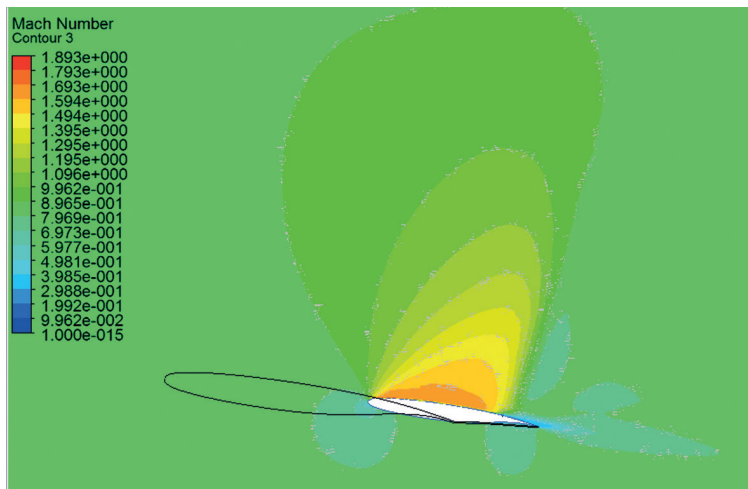


18. ábra  
A szárny középsíkjának metszete [saját szerkesztés]

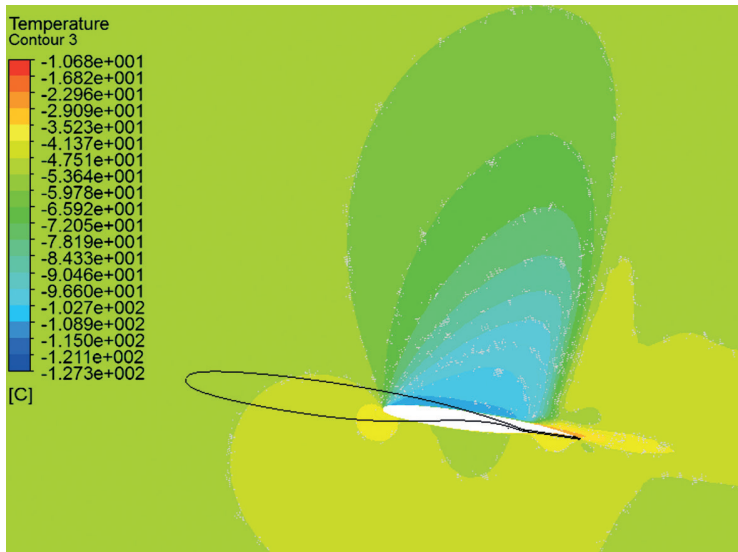
Mivel a nyomás arányos a hőmérséklettel, ezért a hőmérséklet-eloszlás is hasonló képet mutat, amely a 21. ábrán látható. A szimuláció során az áramlásból adódó Mach-szám eloszlás a vizsgált keresztmetszetben a 20. ábrán látható.



19. ábra  
Nyomáseloszlás a szárny középsíkjában [saját szerkesztés]



20. ábra  
Mach-szám eloszlás a szárny középsíkjában [saját szerkesztés]



21. ábra  
Hőmérséklet-eloszlás a középsíkban [saját szerkesztés]

## Összefoglalás és értékelés

Munkánk során olyan eszközök kutatása felé indultunk el, amelyeknek legfőbb feladata az ellenálláserő csökkentése, illetve a felhajtóerő növelése repülőgépek esetén. Előzetes vizsgálatok alapján a szárnyvéglapok tűnnek a legígéretesebb megoldásnak ezen a területen, ezért ezekkel kezdtünk el behatóbban foglalkozni. A vizsgálatokat numerikus áramlástani szimulációkkal tervezzük elvégezni. Ezek az eszközök azonban csak akkor használhatók a kutatás-fejlesztésben, ha megfelelően pontos eredményeket szolgáltatnak. Ezért, a kutatás jelenlegi fázisában egy Airbus A380-as repülőgépszárny numerikus áramlástani szimulációját készítettük el az ANSYS CFX környezetben, validáció céljából. A szimuláció során az áramlási tér létrehozása érdekében elkészítettük a repülőgépszárny CAD-modelljét, majd az áramlási teret behálóztuk olyan méretű elemekkel, hogy a további hálósűrítés ne legyen hatással a számítás eredményeire. Ezt követően beállítottuk a használandó modelleket, anyagtulajdonságokat, referenciaértékeket, peremfeltételeket és a megoldó tulajdonságait. A szimuláció során kapott eredményeket (felhajtóerőt és ellenálláserőt) összehasonlítottuk a rendelkezésre álló adatokkal. Az eltérés mind a felhajtóerőre, mind az ellenálláserőre 10% alatti lett. A szimuláció során kapott értékeket felhasználva meghatároztuk a szárny (L/D) viszonyát, amely a későbbi szárnyvéglapos konstrukciójú szárnyak esetén kiindulási alapértékként fog szolgálni. A kapott eredményeket elfogadottnak tekintettük, az eltérések a forrásadatok bizonytalanságából, illetve az adatok leolvasási pontatlanságból adódhatnak. E munka folytatásaként célunk, hogy megtaláljuk az optimális szárnyvéglap-kialakítást az Airbus A380-as repülőgépszárny esetén az (L/D) viszony tekintetében.

## Köszönetnyilvánítás

A bemutatott számítás kidolgozását az EFOP-3.6.1-16-2016-00014 számú és a „Diszruptív technológiák kutatás-fejlesztése az e-mobility területén és integrálásuk a mérnökképzésbe” című nemzeti kutatási projekt támogatta. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

## Felhasznált irodalom

- [1] International Air Transport Association, "2036 Forecast Reveals Air Passengers Will Nearly Double to 7,8 billion," *International Air Transport Association*, 24 October, 2017. [Online]. Elérhető: [www.iata.org/pressroom/pr/Pages/2017-10-24-01.aspx](http://www.iata.org/pressroom/pr/Pages/2017-10-24-01.aspx); "Number of scheduled passengers boarded by the global airline industry from 2004 to 2018," *statista.com*, [Online]. Elérhető: [www.statista.com/statistics/564717/airline-industry-passenger-traffic-globally/](http://www.statista.com/statistics/564717/airline-industry-passenger-traffic-globally/) (Letöltve: 2018. 09. 26.)
- [2] B. S. de Mattos, A. P. Macedo, and D. H. da Silva Filho, "Considerations about Winglet Design," In Proc. 21st AIAA Applied Aerodynamics Conference, AIAA 2003-3502, 2003. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2003-3502>
- [3] B. Varga, „A „wingletek” aerodinamikája és térhódításuk a repülés különböző területein,” *Repüléstudományi Közlemények*, 16. évf. Különszám – Repüléstudományi konferencia 2004. április 23. [Online]. Elérhető: [http://epa.oszk.hu/02600/02694/00038/pdf/EPA02694\\_rtk\\_2004\\_02\\_varga\\_bela.pdf](http://epa.oszk.hu/02600/02694/00038/pdf/EPA02694_rtk_2004_02_varga_bela.pdf) (Letöltve: 2019. 03. 30.)
- [4] "3D Prandtl lifting line theory," *aerodynamics4students.com*, [Online]. Elérhető: [www.aerodynamics4students.com/subsonic-aerofoil-and-wing-theory/3d-prandtl-lifting-line-theory.php](http://www.aerodynamics4students.com/subsonic-aerofoil-and-wing-theory/3d-prandtl-lifting-line-theory.php) (Letöltve: 2018. 09. 26.)
- [5] R. T. Whitcomb, "A design approach and selected wind tunnel results at high subsonic speeds for wing-tip mounted winglets," NASA Technical note D-8260, 1976, p. 30.
- [6] S. A. Kravchenko, "The Application of the Wingtip Lifting Surfaces for Practical Aerodynamics," In Proc. ICAS-96-4.6.4., 1996, pp. 1338–1349.
- [7] I. Kroo, "Drag Due to Lift: Concepts for Prediction and Reduction," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 33, January, pp. 587–617, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.33.1.587>
- [8] J. J. Spillman, "Wing tip sails; progress to date and future developments," *The Aeronautical Journal*, vol. 91, no. 910, 445–453, 1987. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0001924000050624>
- [9] N. J. Pfeiffer, "Numerical Winglet Optimization," presented at 42<sup>nd</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Aerospace Sciences Meetings, 3147/2018.
- [10] H. S. M. Helal, E. E. Khalil, O. E. Abdellatif, and G. M. ElHarriri, "Effect of Raked Winglet on Aircraft Performance," presented at 55<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA SciTech Forum, AIAA-2017-1841, 3161/2018. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2017-1841>
- [11] N. Alekhyia, N. P. Kishore, S. Ravi, "Performance of Winglet at Different Angle of Attack," *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 3, no. 9, 2016.
- [12] J. F. III Marchman, H. F. Faery Jr., and D. Manor, "78-1478 Whitcomb Winglet Applications to General Aviation Aircraft," presented at AIAA Aircraft Systems and Technology Conference, Los Angeles, California, August 21–23, 1978. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.1978-1478>

- [13] V. K. Bada, K. Monika, A. Md. Hussain, and P. Chikoti, "CFD Analysis and Comparison of Spiroid and Dual Feather Winglets," *International Journal of Engineering Research*, vol. 5, no. 8, pp. 657–661, 2016.
- [14] Airbus, "Winglets: tip-top solution for more efficient aircraft," *Airbus*, [Online]. Elérhető: [www.airbus.com/newsroom/news/en/2017/02/winglets-a-tip-top-solution-for-more-efficient-aircraft.html](http://www.airbus.com/newsroom/news/en/2017/02/winglets-a-tip-top-solution-for-more-efficient-aircraft.html) (Letöltve: 2018. 07. 29.)
- [15] Boeing, "737 MAX at winglet," *Boeing*, [Online]. Elérhető: [www.boeing.com/commercial/737max/737-max-winglets/](http://www.boeing.com/commercial/737max/737-max-winglets/) (Letöltve: 2018. 08. 29.)
- [16] H. K. Versteeg, M. Weeratunge, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: the Finite Volume Method*, Edinburgh Gate: Pearson Education, 2007.
- [17] J. H. Ferziger, M. Perić, *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Berlin: Springer, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-56026-2>
- [18] Á. Veress, J. Rohács, Application of Finite Volume Method in Fluid Dynamics and Inverse Design Based Optimization, INTECH Open Access Publisher, 2012. DOI: [www.doi.org/10.5772/38786](http://www.doi.org/10.5772/38786)
- [19] Á. Veress, Hő és áramlástanai számítások, [Online]. Elérhető: [www.vrht.bme.hu/vasut/targyak/Tant-akt.php?Kepzes=BSc.-MSc.-Nev-Suk&Kod=BMEKOVVM606&Dir=../letoltes/Tanszeki\\_letoltheto\\_anyagok/Oktatok\\_anyagai/Dr.Veress\\_Arpad\\_anyagai/Oktatott\\_targyak/Ho-\\_es\\_aramlastani\\_szamitasok&File=CFD-VA\\_v5-English.pdf](http://www.vrht.bme.hu/vasut/targyak/Tant-akt.php?Kepzes=BSc.-MSc.-Nev-Suk&Kod=BMEKOVVM606&Dir=../letoltes/Tanszeki_letoltheto_anyagok/Oktatok_anyagai/Dr.Veress_Arpad_anyagai/Oktatott_targyak/Ho-_es_aramlastani_szamitasok&File=CFD-VA_v5-English.pdf) (Letöltve: 2018. 10. 15.)
- [20] R. Roedts, R. Somero, and C. Waskiewicz, "Airbus A380 Analysis," [Online]. Elérhető: [www.dept.aoe.vt.edu/~mason/Mason\\_f/A380Roedts.pdf](http://www.dept.aoe.vt.edu/~mason/Mason_f/A380Roedts.pdf) (Letöltve: 2018. 10. 15.)
- [21] J. Ramba, K. Dean, and T. McCall, "Airbus A380 Analysis," [Online]. Elérhető: [www.dept.aoe.vt.edu/~mason/Mason\\_f/A380Dean.pdf](http://www.dept.aoe.vt.edu/~mason/Mason_f/A380Dean.pdf) (Letöltve: 2018. 10. 15.)
- [22] R. L. Saiz, "Final Approach and Landing Trajectory Generation for Civil Airplane in Total Loss of Thrust," Laurea Magistrale Degree in Aerospace Engineering, Università di Pisa, Pisa, 2016. [Online]. Elérhető: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/78342/LOZANO%20-%20APROXIMACI%C3%93N%20FINAL%20Y%20TRAYECTORIA%20DE%20ATERRIZAJE%20PARA%20UN%20AVI%C3%93N%20CIVIL%20EN%20P%C3%89RDIDA%20TOTAL%20DE%20E....pdf?sequence=1> (Letöltve: 2019. 06. 22.)
- [23] B. Zhang, M. Nudelman, "Here's the simple reason why planes have winglets," *Business Insider Australia*, 2017. [Online]. Elérhető: [www.businessinsider.com.au/boeing-airplanes-winglets-explain-nasa-2017-7](http://www.businessinsider.com.au/boeing-airplanes-winglets-explain-nasa-2017-7) (Letöltve: 2018. 10. 15.)
- [24] "Skewness," [Online]. Elérhető: [www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/en-us/help/wb\\_msh/msh\\_skewness.html](http://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/en-us/help/wb_msh/msh_skewness.html) (Letöltve: 2018. 10. 15.)

## NUMERICAL SIMULATION OF AIRBUS A380 AIRCRAFT WING AND VALIDATION OF RESULTS FOR LATER ANALYSIS OF WINGLET CONFIGURATIONS

*The International Air Transport Association expects 7.8 billion passengers to travel in 2036, a near doubling of the 4 billion air travellers in 2017 [1]. This also requires further improvements on aircraft to increase performance, efficiency and decrease in emission. One of the most*



*promising aerodynamic tools for induced drag, (which can be 30–40% of the overall drag of an aircraft) and so the fuel consumption reduction, is the winglet [2]. The goal of the present work is to complete CFD analysis with validation by available data about A380 aircraft wing without winglet. The effect of different winglet configurations can then be analysed, and conclusions can be drawn about the improved design in the next steps of the present work as the simulation results are independent from the simulation settings, they are physically correct and accurate.*

**Keywords:** A380 aircraft, wing, CFD, validation, winglet

---

Gábor Armand Dávid (MSc)  
hallgató  
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Jármű és Közlekedésmérnöki Kar  
Légijárművek Szakirány  
Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék  
[armandgabor@yahoo.com](mailto:armandgabor@yahoo.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-3015-3564>

Armand Dávid Gábor, MSc  
student  
Budapest University of Technology and Economics  
Faculty of Vehicles and Transportation  
Aeronautics Specialization  
Department of Aeronautics Naval Architecture and  
Railway Vehicles  
[armandgabor@yahoo.com](mailto:armandgabor@yahoo.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-3015-3564>

---

Dr. Veress Árpád, PhD  
egyetemi docens  
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Vasúti Járművek Repülőgépek és Hajók Tanszék  
[averess@vrht.bme.hu](mailto:averess@vrht.bme.hu)  
<https://orcid.org/0000-0002-1983-2494>

Árpád Veress, PhD  
Associate Professor  
Budapest University of Technology and Economics  
Department of Aeronautics Naval Architecture and  
Railway Vehicles  
[averess@vrht.bme.hu](mailto:averess@vrht.bme.hu)  
<https://orcid.org/0000-0002-1983-2494>

---



<http://journals.uni-nke.hu/index.php/reptudkoz/article/view/273/163>