

Miskolci Egyetem



GÉPÉSZMÉRNÖKI- ÉS INFORMATIKAI KAR
ENERGETIKAI ÉS VEGYIPARI GÉPÉSZETI INTÉZET

TDK DOLGOZAT

Repülőgépszárnyak aerodinamikai jellemzői: A geometriai változások hatása

KÉSZÍTETTE:

Kovács Máté Gábor

gépészmérnök szakos hallgató

KONZULENS:

Dr. Bolló Betti

egyetemi docens

Miskolc, 2023.

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS	3
2. IRODALOMKUTATÁS	4
2.1. REPÜLÉS MÖGÖTTI TUDOMÁNY	4
2.1.1. <i>Hogyan áramlik a levegő egy test körül.....</i>	4
2.1.2. <i>Hogyan emeli meg a felhajtóerő a repülőgépet</i>	6
2.1.3. <i>Sebesség és hatékonyság.....</i>	8
2.2. SZÁRNYAK KIALAKÍTÁSA.....	9
2.3. CFD MODELLEZÉS.....	11
2.3.1. <i>CFD módszerek és technikák</i>	12
2.3.2. <i>CFD szoftverek és eszközök</i>	13
2.3.3. <i>CFD validálás és ellenőrzés.....</i>	14
3. SZÁMÍTÁSI METODIKA	15
3.1. GEOMETRIA ÉS HÁLÓZÁS	15
3.2. TURBULENCIAMODELL	18
3.3. PEREMFELTÉTELEK	19
4. EREDMÉNYEK ÉS KIÉRTÉKELÉS	21
4.1. EREDMÉNYEK HITELESÍTÉSE	21
4.2. SZÁMÍTÁSI ÉRTÉKEK BEMUTATÁSA.....	22
4.2.1. <i>Felhajtóerő.....</i>	22
4.2.2. <i>Légellenállás.....</i>	23
4.2.3. <i>Hatékonyság</i>	24
4.3. EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE A GEOMETRIAI VÁLTOZTATÁSOK ALAPJÁN	25
4.3.1. <i>Vastagság változásának eredményei.....</i>	25
4.3.2. <i>Görbület változásának eredményei</i>	26
5. ÖSSZEGZÉS.....	28
FELHASZNÁLT IRODALOM	30

1. BEVEZETÉS

A történelem folyamán számos legenda, mítosz, leírás, dokumentum és felvétel bizonyítja, hogy a repülés az idők kezdetétől fogva megmozgatta az emberek fantáziáját. Ennek elsajátítása már az időszámításunk előtti időkre is visszanyúlik, de tökéletesítése hosszú időszakot foglalt magába. Napjainkban is ugyanúgy egy rendkívüli összetett folyamat ennek tervezése és megvalósítása, amelyet számos tényező, paraméter, körülmény befolyásol. A repülőgépek egyik elengedhetetlen eleme a megfelelő szárny kialakítása.

A szárnygeometria döntő szerepet játszik a repülőgép általános aerodinamikai teljesítményében. A szárnyak mérete, alakja és iránya befolyásolhatja a legfontosabb teljesítménymutatókat, például a felhajtóerőt, a légellenállást és a stabilitást. Az optimális szárnygeometria számos tényezőtől függ, többek között a légijármű tervezett felhasználásától, a kívánt teljesítményjellemzőktől és az üzemeltetési korlátoktól.

A kereskedelmi repülőgépek szárnyai például jellemzően a maximális felhajtóerő és üzemanyag-hatékonyság szempontjából optimalizáltak, ezzel szemben a katonai repülőgépeknél sokszor a manőverezőképesség és a sebesség lehet a legfontosabb. Ezek mellett még a szárnygeometriát külső tényezők is befolyásolhatják, mint a környezeti feltételek és légiforgalmi irányítás követelményei.

Kutatásom arra a problémára összpontosít, hogy a szárnygeometria változásai hogyan befolyásolják a repülőgép aerodinamikai teljesítményét. Pontosabban a tanulmány célja, hogy elemezze a szárnygeometriai paraméterek, többek között a szárny állásszögének, hosszának és szélességének hatását az aerodinamikai felhajtóerőre, légellenállásra és stabilitásra.

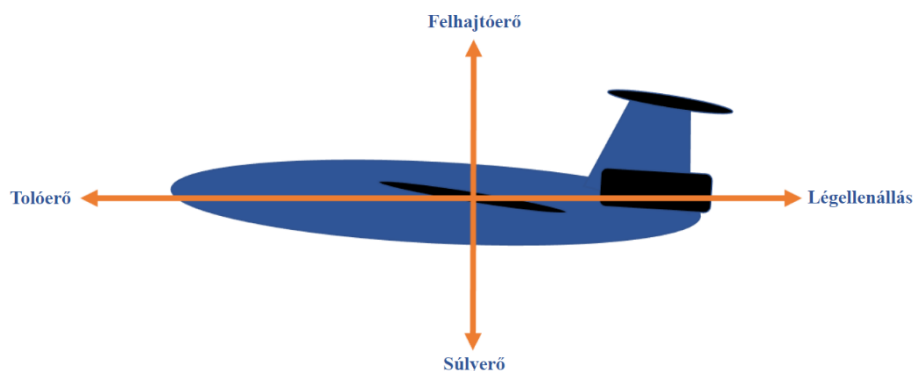
Ennek a célnak elérése érdekében áramlástani számítási szimulációkat (CFD) alkalmazok a szárny körüli légáramlás modellezésére és az ebből eredő aerodinamikai erők kiszámítására, a különböző geometriájú modelleken. A szimulációk eredményeit összehasonlítom, hogy meghatározzam a kívánt teljesítménycélokhoz leghatékonyabb szárnygeometriát.

Összességében a legfőbb célkitűzésem, hogy értékes betekintést nyújtsak a szárnygeometria változásainak a légijármű teljesítményére gyakorolt hatásába és kapcsolatába, keretet kínálva az optimalizált szárnyak tervezéséhez a különböző alkalmazási területeken.

2. IRODALOMKUTATÁS

2.1. Repülés mögötti tudomány

Egy repülőgépre a repülése közben négy erő hat: a felhajtóerő, a súly, a tolóerő és a légellenállás (2-1. ábra). Ezek az erők vektormennyiségek, melyeknek meghatározó a nagyságuk és irányuk, a repülőgép mozgása a levegőben a különböző erők relatív nagyságától és irányától függ. A repülőgép súlyát a mérete és a konstrukciójához használt anyagok, valamint a szállított teher és üzemanyag határozza meg, mindig a Föld középpontja felé irányul. A tolóerőt a repülőgépen használt meghajtórendszer mérete és típusa dönti el, valamint a pilóta által megválasztott gázpedál beállítása. Általában a tolóerő a repülőgép középvonala mentén előre irányul. A felhajtóerő és a légellenállás aerodinamikai erők, amelyek a repülőgép alakjától, méretétől, a légköri viszonyoktól és a repülési sebességtől függenek. A felhajtóerő a repülési útvonalra merőlegesen, a légellenállás pedig a repülési útvonal mentén hat. [1]

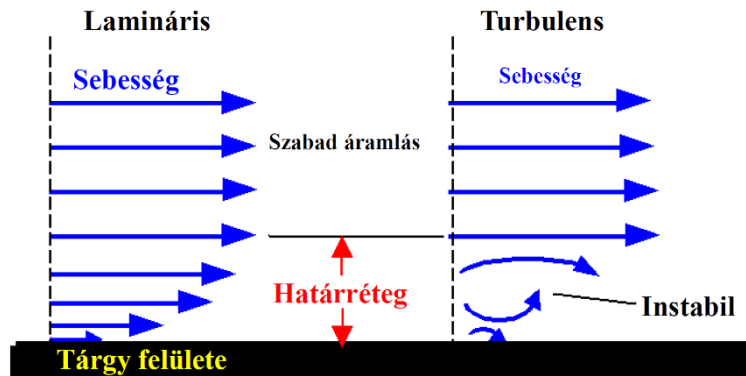


2-1. ábra Repülőre ható erőrendszer [2]

2.1.1. Hogyan áramlik a levegő egy test körül

A repülőgép szárnyait egyszerű tárgyként értelmezhetjük a jelenségek megértéséhez. Az aerodinamika alapjai a folyadékdinamikában rejlenek. Amikor a fluidum egy tárgy körül áramlik, számos hatást tapasztalhatunk a tárgy jelenléte miatt. Az áramlás két területre osztható egy tárgy körül: a határrétegre és a szabad áramlásra. A határréteg egy vékony folyadékréteg, amely a tárgy felülete mentén áramlik, míg a szabad áramlás a tárgy körül a felülettől távolodva áramló folyadék. Ahogy a folyadék a tárgy felszíne mentén áramlik, a felület érdessége miatt súrlódás éri, ezáltal lassul, és egy vékony, stagnáló folyadékréteget, határréteget képez. Ez a

határréteg lehet lamináris vagy turbulens (2-2. ábra), az áramlás Reynolds-számától függően, amelyet a későbbiekben fogok tárgyalni. [3]



2-2. ábra: Felület mentén a lamináris és turbulens áramlás [4]

Alacsony sebességeknél a fluidum áramlása általában lamináris, ami azt jelenti, hogy a folyadék párhuzamos rétegekben áramlik, rétegek közötti jelentős keveredés nélkül. Ebben az esetben az áramlást párhuzamos áramlási mintázat és viszonylag alacsony légellenállás jellemzi. Ahogyan növekedik a közeg sebessége, az áramlás turbulenssé alakulhat, ami azt eredményezi, hogy a folyadék szabálytalan, kaotikus mintázatokban fog terjedni, és ezzel együtt jár a rétegek közti keveredés is. Nagyobb légellenállás a sajátossága ennek az állapotnak, amely jelentősen befolyásolhatja a tárgy teljesítményét. [3]

Osborne Reynolds csőáramlások vizsgálatával foglalkozott, és megállapította, hogy az áramlás laminárisból turbulensbe való megváltozása főként az áramlási sebességtől v függ. Később a róla elnevezett Reynolds-szám a tehetetlenségi erők és a viszkozus erők közötti viszonyt adja meg:

$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu} = \frac{v \cdot \rho \cdot l}{\mu}$$

ahol

- v közeg sebessége [m/s]
- l jellemző geometria [m]
- ν kinematikai viszkozitás [m^2/s]
- μ dinamikai viszkozitás [$Pa \cdot s$]
- ρ közeg sűrűség [kg/m^3]

Tapasztalatok azt mutatják, hogy a lamináris áramlás $Re < 2300$ tartományban alakul ki, $Re > 2300$ esetén pedig turbulens eset valósul meg. Kellően zavarmentes áramlás mellett

ennél lényegesen nagyobb tartományokban is elérhető a lamináris áramlás, de ezeknél az eseteknél kis zavarásokra is robbanásszerűen végbemegy a lamináris-turbulens átalakulás.

A tárgyakat, testeket két csoportra lehet osztani, tompa és áramvonalas testekre. Tompa testek esetén a felületük nagy részére kiterjed a határréteg-leválás és az ennek köszönhetően létrejövő leválási örvények, amely az az áramlási térrész, amelyben jellegzetesen a zavartalan áramlással ellentétes visszaáramlás történik, és megváltoztatja az áramvonalak útját. Áramvonalas testek körüli áramlásban is van határréteg leválás, de csak a test felületének korlátozott részén figyelhető meg. Az ellenálláserő a tompa testeknél a nyomáseloszlásból származik, viszont az áramvonalas testeknél a forrás a csúsztatófeszültség. [3]

2.1.2. Hogyan emeli meg a felhajtóerő a repülőgépet

A felhajtóerő az az erő, amely a repülőgépet a levegőben tartja, és amelyet a szárnyak a levegőben történő mozgás során állítanak elő. Legelterjedtebb magyarázata a Bernoulli-elvre épül, miszerint amikor egy fluidum az egyik helyről a másikra áramlik, energiáját megőrzi, ugyanannyi lesz a végén, mint az elején. Ezt a fizika alapvető törvényéből, az úgynevezett energiamegmaradásból ismerjük, amely megmagyarázza, hogy energiát nem lehet létrehozni vagy megsemmisíteni, csak egyik formából a másikba átalakítani. A repülőgépet körülvevő levegő háromféle energiával rendelkezik: helyzeti (potenciális) energia, mozgási energia és a nyomásból származó energia. [4]

Így az **összenyomhatatlan közeg** áramlására alkalmazható egyenlet a következő lesz:

$$\frac{v^2}{2} + g \cdot h + \frac{p}{\rho} = \text{állandó}$$

ahol

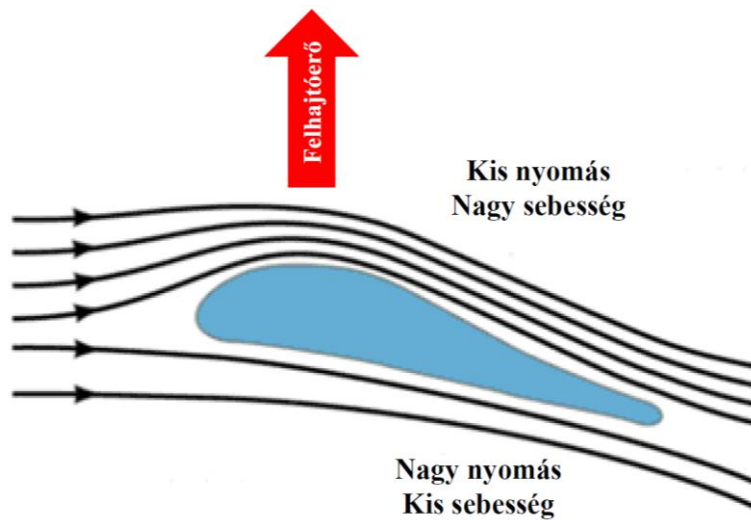
g	földi nehézségi gyorsulás $[m/s^2]$
h	magasság $[m]$
p	nyomás az áramvonal mentén $[Pa]$

Az előző egyenlet általános alakja **összenyomható közegekre**:

$$g \cdot z + \frac{v^2}{2} + \int_{p_0}^p \frac{dp}{\rho} = \text{állandó}$$

A Bernoulli egyenlet alapján tisztán érthető, hogy a levegő sebességének növekedésével csökken a nyomása. Amikor egy repülőgép szárnya a levegőben mozog, a szárny teteje felett

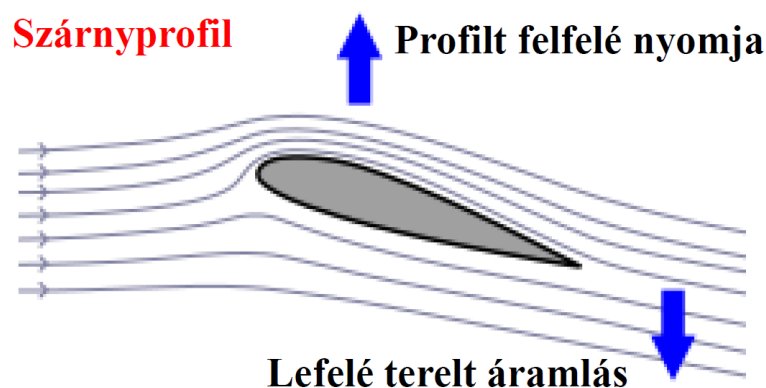
áramló levegő sebessége nagyobb, mint a szárny alja alatt áramlóé, aminek következtében a szárny tetején kisebb lesz a nyomás. Ez a nyomáskülönbség a levegő áramlására merőleges erőt, azaz felhajtóerőt fog teremteni (2-3. ábra). [5]



2-3. ábra: Bernoulli-elv magyarázat [6]

Egyesek azonban azzal érvelnek, hogy a Bernoulli-elv önmagában nem képes teljes mértékben megmagyarázni a felhajtóerő keletkezését. Egy alternatív magyarázat a cirkulációs elmélet, amely szerint a felhajtóerőt a szárny körül keringő levegő hozza létre a szárny ívelt alakja miatt. Ahogy a szárny a levegőben mozog, a körülötte keringő levegőből örvényt hoz létre, amely felhajtóerőt generál. [7]

A szárnyprofilok felhajtóerejének valódi magyarázata a nyomáskülönbségek, a cirkulációs elmélet és Newton harmadik mozgástörvényének kombinációja. Egy szárny azért hoz létre felhajtóerőt, mert egyszerre ívelt és hátrafelé dől, így az érkező levegő felgyorsul a felső felületen, majd lefelé kényszerül. Ez közvetlenül a szárny felett alacsony nyomású területet hoz létre, ami felhajtóerőt generál. A szárny dőlésszöge lefelé kényszeríti a levegőt, ami a gépet is felfelé nyomja, a hatás-ellenhatás értelmében (2-4. ábra).



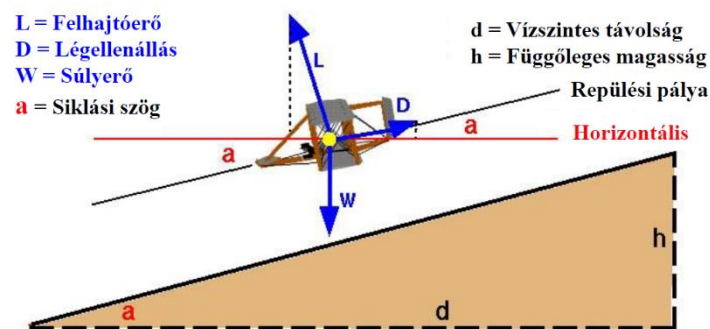
2-4. ábra: Newton harmadik törvényének alkalmazása [8]

Bár folyamatos vita folyik az egyes tényezők relatív fontosságáról, általánosan elfogadott, hogy az emelés összetett jelenség, amelyet számos különböző változó befolyásolhat.

2.1.3. Sebesség és hatékonyság

A repülőgépek tervezésénél a nagy sebességek elérése és a hatékonyság maximalizálása kiemelkedő fontosságú. A sebesség kritikus jelentőségű az utazási idő csökkentése szempontjából, míg a hatékonyság elengedhetetlen az üzemanyag-fogyasztás és az üzemeltetési költségek csökkentése szempontjából. A sebességet számos tényező befolyásolja, például a hajtóművek teljesítménye, a repülőgép súlya és az aerodinamikai kialakítása. Ugyanezen faktorok gyakorolnak hatást a hatékonyságra, de más összetevők is kellő figyelmet kapnak, mint például a fejlett, összetett anyagok és technológiák használata, valamint a tervezés utáni üzemeltetési eljárások optimalizálása. [4]

A repülőgépek aerodinamikai hatékonyságát a felhajtóerő (L) és a légellenállás (D) aránya jelzi, amelyet L/D -arányoknak neveznek (Lift/Drag). Egy repülőgép akkor rendelkezik nagy hatékonysággal, magas L/D -aránnyal, ha nagy felhajtóerőt vagy kis légellenállást produkál. [4]



2-5. ábra: Repülőgép pályájának bemutatása [4]

Utazási körülmények között a felhajtóerő egyenlő a súllyal. A nagy felhajtóerővel rendelkező gép nagy hasznos terhet tud szállítani, mint például üzemanyag, utas, fegyver. Utazási viszonyoknál a tolóerő egyenlő a légellenállással. Egy kis légellenállású repülő kis tolóerőt igényel, amely az üzemanyag elégetésével jön létre, így a kis tolóerejű gép csekély üzemanyag felhasználást követel. Az alacsony fogyasztás azt eredményezi, hogy hosszú ideig képes a levegőben maradni a légi jármű, így nagy hatótávolságú utakat repülhet. Tehát egy nagy hatékonysággal bíró gép nagy hasznos terhet képes hordozni, hosszadalmas időn keresztül, hosszú utakon. [4]

A hatékonyság mérését különböző egyenletek segítik, mint az **emelkedési egyenlet**:

$$L = \frac{C_L \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A}{2}$$

ahol

L	felhajtóerő [N]
C_L	felhajtóerő együttható [–]
ρ	levegő sűrűsége [kg/m ³]
v	repülő sebessége [m/s]
A	szárnyfelület [m ²]

Emellett fennáll továbbá a **légellenállási egyenlet**:

$$D = \frac{C_D \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A}{2}$$

ahol

D	légellenállás [N]
C_D	légellenállás együttható [–]

Az utóbbi két egyenletet összevonva megkapjuk a következő arányt, amely megadja, hogy mekkora felhajtóerőt eredményez, milyen mértékű légellenállás mellett.

$$\frac{L}{D} = \frac{C_L}{C_D}$$

2.2. Szárnyak kialakítása

A szárnyak aerodinamikai jellemzői és a szárnyra ható erők definiálásához szükséges a geometriai méretek és a szárnyprofilok alakjával kapcsolatos fogalmak és jelölések meghatározása. Fontosságuk nem csak a repülőgépek szárnyára érvényes, hiszen döntő szerepet töltenek be akár a légcsavarok, helikopterek forgószárnyai és áramlástechnikai munkagépek működésében is. [5]

- **Szárnyprofil** (Airfoil): a szárny keresztmetszete, melynek alakja alapvetően meghatározza a repülési tulajdonságokat.
- **Szárnymélység** vagy **húr** (Chord Line): a szelvény két legtávolabbi pontját összekötő egyenes (a belépőél és a kilépőél közé húzott vonal).
- **Belépőél**: a húr megfűväs felőli végpontja.

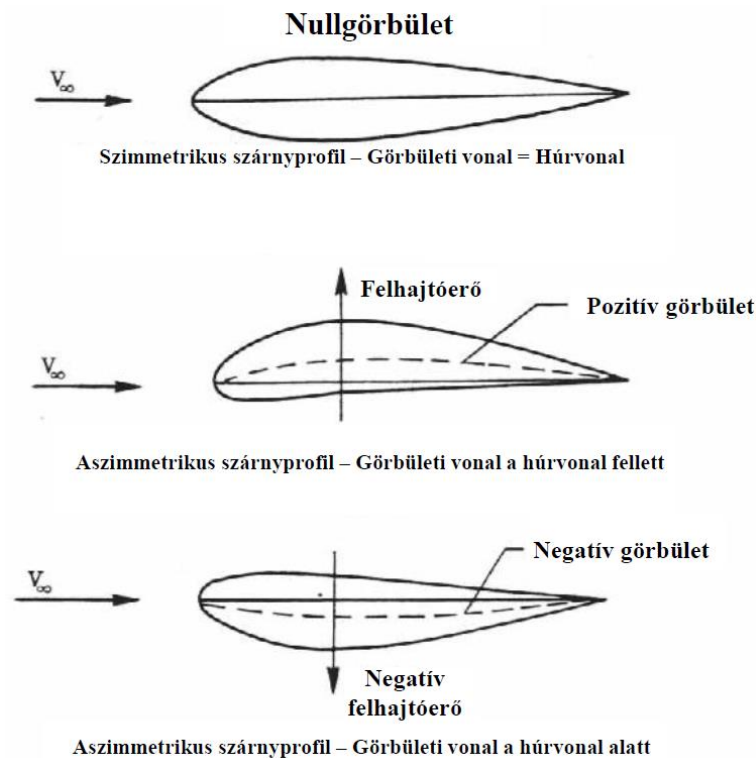
- **Kilépőél:** a húr másik végpontja.
- **Repülési irány:** a szárny relatív iránya az álló levegőhöz képest.
- **Állásszög** (Angle of Attack): a szárny húrja (szárnymélysége) és a relatív repülési irány között mért szög.

Az előbb említetteket az alábbi (6. ábra) mutatja be.



2-6. ábra: Szárnyprofil fontosabb elnevezései [5]

Ezek mellett fontos kiemelni még a szárnyak görbületét is, hiszen ez a tervezés során rendkívül meghatározó. Mértéke a tervezett sebességtől és az adott céltól függően változik. A szárny felső felülete mindig pozitív domborodással rendelkezik, míg az alsó felület a tervezett felhasználásnak megfelelően lehet pozitív (domború), nulla (lapos), de akár negatív (homorú) domborodással is rendelkezhet. Pozitív esetén felfelé irányuló a felhajtóerő, míg a negatív esetben lefelé ható erő fogja érni a szárnyakat, ilyen kialakítást használnak a versenyautók karosszériájában. Szimmetrikusnak nevezzük azt a szárnyat, amelynél a felső és alsó felület domborodása megegyezik, ezek leggyakrabban fordított repülésre szánt gépeknél találhatók meg, mint például a műrepülők. A domborodást és a különböző fajtáit az alábbi (2-7. ábra) illusztrálja. [2]



2-7. ábra: Szárnyprofil görbületei [5]

Az adott célnak megfelelő szárnyprofil kialakítása az aerodinamika egyik alapvető feladata. Sorozatos próbálkozásokkal keresik, számításokat végeznek és szélcsatornai-kísérletekkel határozzák meg a pontos tulajdonságokat.

2.3. CFD modellezés

A gépészeti gyakorlat megannyi területén elfogadott és gyakran használt módszer lett napjainkban az áramlások numerikus modellezése, röviden CFD szimulációk (Computational Fluid Dynamics). Dióhéjban megfogalmazva, numerikus megoldás útján számítják ki az áramlás állapotát meghatározó térbeli és időbeli eloszlásainak alapegyenleteit, adatstruktúrákat alkalmazva az áramlást érintő problémák vizsgálatára és megoldására [9] [10].

Alkalmazható tervezésben, ellenőrzésként, optimalizáláshoz, üzemeltetési problémák megoldására, környezeti hatások feltárására az ipar szinte minden területén, például járműipar, űrhajózási iparágak, energetika, épületgépészet, vegyipar. Átfogó, szemléletes képet tud adni az adott szerkezetekről, folyamatokról, melynek elképzelése, leírása összetett. [10] [11]

A CFD-szimuláció felhasználható a repülőgépek, űrhajók és egyéb járművek aerodinamikai jellemzőinek elemzésére. A CFD segítségével szimulálni lehet a jármű körüli légáramlást, lehetővé téve a mérnökök számára a konstrukció optimalizálását a maximális

hatékonyság és legkedvezőbb repülési tulajdonságok elérése érdekében. Vizsgálni lehet a turbulencia, nyomás és hőmérséklet által gyakorolt hatásokat, valamint a jármű teljesítményének előrejelzésére is használható a különböző repülési körülményekre vonatkozóan. [10]

2.3.1. CFD módszerek és technikák

Először is a módszercsaládokat szükséges ismertetni, amelyből a három legelterjedtebb a következő:

- Véges differenciák módszere (FDM),
- Véges térfogatok módszere (FVM)
- Végeselem módszer (FEM).

A véges differenciák esetén a folyamatot leíró differenciálegyenletekben szereplő differenciálhányadosokat néhány konkrét pontban differencia sémákkal közelítjük meg. A végeselemmódszert a mechanikai problémák megoldására használják, hiszen nagyon nagy pontosság érhető el, kis elemszámmal is. A véges térfogatok módszerében a számítási tartományt kisebb térfogati egységekre, elemekre osztjuk fel. Célja a megmaradási egyenletek közelítő módszerekkel történő megoldása. [9]

A turbulenciamodellek a numerikus áramlástanban (CFD) olyan módszerek, amelyek a turbulencia hatását a folyadékáramlások szimulációjába foglalják. A szimulációk többségéhez turbulenciamodelldre van szükség, mivel az áramlások jelentős része turbulens a természetben és az ipari gyakorlatban. A helytálló modellezése kulcsfontosságú a helyes és megbízható CFD eredmények eléréshez. A megoldási módszerek közül részletezek párat az alábbiakban. [9] [12]

- **Reynolds-átlagolt Navier-Stokes-modellek (RANS):** a CFD-szimulációkban a leggyakrabban használt turbulenciamodellek, legáltalánosabban alkalmazottnak tekinthetők, amelyek időátlagolt egyenletek megoldásával működnek. Számítási szempontból hatékonyak, de nehezen tudják pontosan megragadni az instacionárius áramlási jelenségeket. Ezen modellek a mozgásegyenlet Reynolds-féle átlagolással nyert alakját alkalmazzák az áramlás meghatározására. A $k-\varepsilon$ és $k-\omega$ modellek izotróp turbulenciát feltételeznek, de számos áramlási struktúrát nem írnak le helyesen.
- **Nagy örvény szimulációs (LES) modellek:** ezek a modellek az áramlás nagyobb örvényeit feloldják, miközben a kisebbeket modellezik. Számítási szempontból költségesebbek, mint a RANS-modellek, de pontosabb eredményeket adhatnak

instacionárius áramlások esetén. Nagy Reynolds-számú áramlások esetén erőteljesen sűrített felbontást igényel, túlságosan nagy elemszámú hálót eredményez.

- **Hibrid modellek:** ahol ötvözik a RANS- és a LES-modellek elemeit, és jó egyensúlyt biztosíthatnak a pontosság és a számítási költségek között.

Minden turbulencia-modelleknek megvannak az erősségei és korlátjai, amelyek a modellezési feltevések természetéből adódnak, ebből következik, hogy egyetlen olyan modell sem létezik, amely minden turbulens áramlásra könnyen alkalmazható lenne. [12]

2.3.2. CFD szoftverek és eszközök

A piacon számos különböző CFD-szoftver és eszköz áll rendelkezésre, mindegyiknek megvannak a maga erősségei és gyengeségei. A repülőgépek tervezésénél használt legnépszerűbb CFD szoftvercsomagok közé tartozik az ANSYS Fluent, a STAR-CCM+ és az OpenFOAM. Ezek a szoftvercsomagok komplex algoritmusokat és numerikus módszereket használnak a folyadékáramlást szabályozó Navier-Stokes-egyenletek megoldására.

A CFD-szoftver kiválasztásakor fontos szempont a modellezendő fizika típusa. A különböző szoftvercsomagok jobban megfelelnek a különböző típusú fizika, például a lamináris vagy turbulens áramlás, az összenyomható vagy összenyomhatatlan áramlás és a hőátadás számára. Egyes szoftvercsomagok speciálisabbak bizonyos típusú szimulációkhoz, például a folyadék-szerkezet kölcsönhatásokhoz vagy az égéshez.

A CFD-szoftver kiválasztásakor a felhasználók szakértelme is fontos tényező. Egyes szoftvercsomagok felhasználóbarátabbak, és kevesebb programozási vagy kódolási ismeretet igényelnek, míg más szoftverek teljes körű használatához fejlettebb programozási ismeretekre lehet szükség. Emellett egyes szoftverek jobb dokumentációval vagy támogatással rendelkezhetnek, mint mások, ami fontos lehet a hibaelhárítás vagy a szoftver használatának megtanulása szempontjából.

A szoftvercsomag után fontos a megfelelő eszközök kiválasztása a szimuláció beállításához és utófeldolgozáshoz. Sok szoftvercsomag rendelkezik beépített eszközökkel a hálózashoz, a peremfeltételek beállításához és az eredmények megjelenítéséhez, de számos olyan, harmadik féltől származó eszköz is rendelkezésre áll, amelyekkel bővíthetők a szoftver képességei.

Összességében a megfelelő szoftver és eszközök kiválasztása egy adott CFD-alkalmazáshoz számos tényező gondos mérlegelését igényli. A megfelelő szoftver és eszközök kiválasztásával a mérnökök pontos és hatékony szimulációkat biztosíthatnak.

2.3.3. CFD validálás és ellenőrzés

A validálás és az ellenőrzés alapvető lépések a szimulációs eredmények pontosságának és megbízhatóságának biztosításában.

A validálás magában foglalja a szimuláció eredményeinek összehasonlítását a szélcsatorna- vagy repülési tesztekben származó kísérleti adatokkal. Ez annak biztosítására szolgál, hogy a szimuláció pontosan megjósolja a repülőgépet körülvevő áramlási mező viselkedését.

Az ellenőrzés magában foglalja annak biztosítását, hogy a szimulációban használt numerikus módszerek helyesnek bizonyulnak. Ez jellemzően a szimuláció eredményeinek összehasonlításával történik, különböző numerikus módszerekkel, például különböző diszkretizációs sémákkal vagy turbulenciamodellekkel.

Kritikus részét képezi a modellezésnek a pontosság és megbízhatóság kérdése. Ezen lépések nélkül a szimulációs eredmények nem lehetnek hitelesek, és helytelen tervezési döntésekhez vezethetnek.

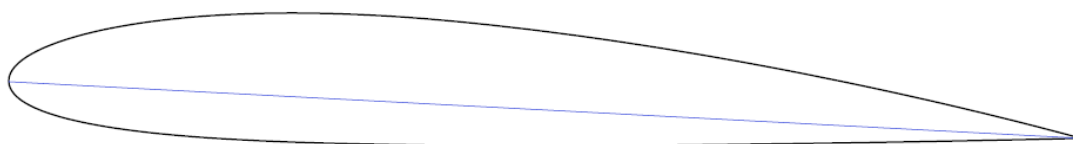
3. SZÁMÍTÁSI METODIKA

A szimulációs számításaimhoz az Ansys Fluent nevű szoftvert alkalmazom, mely magában foglalja a geometria létrehozását, hálózását, peremfeltételeinek megadását és magát a szimulációt is.

3.1. Geometria és hálózás

Számításaim és vizsgálataim során három különböző geometriájú profilt fogok elemezni, és az említettek szerint ezek összehasonlítása a fő célom. Tervem a különbségek szemléltetése, avagy a geometriai változás és az emiatt bekövetkező aerodinamikai paraméterek alakulásának a demonstrációja, ezek közül is a C_L felhajtóerő együttható és a C_D légellenállás együttható értékeinek datálása, legvégén pedig az arányainak feltüntetése a legmagasabb hatékonyság meghatározása végett.

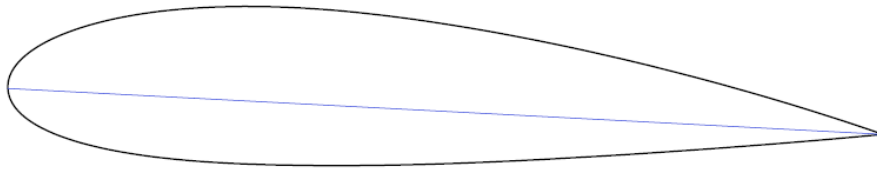
Az analízist a Cessna 172 Skyhawk szárnyprofilja és ennek a gépnek az utazási feltételei képezik a szimuláció körülményeit. Ebből következik, hogy a geometriák alapköve lesz a gépen alkalmazott szabványos NACA 2412-es szárnyprofil, amelynek húrhossza 1472 mm és állásszöge 3° , ez lesz a legelső vizsgált geometria (3-1. ábra), ezt fogom jelölni I-es geometriának.



3-1. ábra: I. geometria

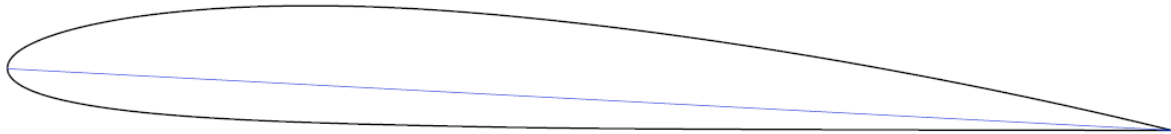
Fontos megemlítenem, hogy olyan profilok geometriáját elemzem, melyek területe nagyjából ugyanakkora nagyságú, hiszen nem az a szándékom, hogy nagyobb vagy kisebb szárnyakat alkalmazzak.

Kutatásom során a legelső geometria jellemző, aminek a hatásait számítom, a szárnyak vastagsága lesz, így következik, hogy a II.-es geometria (3-2. ábra) vastagságát az elsőhöz képest növelem, de húrhosszát csökkentettem az egyenlő területek elérése végett.



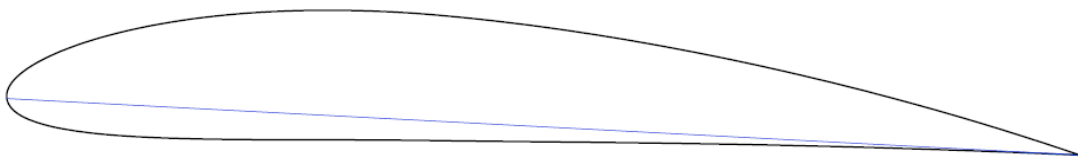
3-2. ábra: II. geometria

Az előző növeléshez képest a III. geometriájú profilnak (3-3. ábra) a vastagsága csökkentett lesz az bázisgeometriához képest, de húrhossza egy kis mértékkel nagyobb.



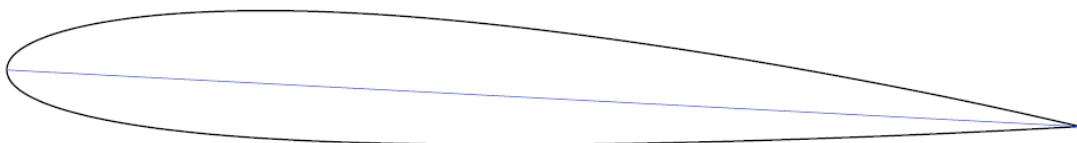
3-3. ábra: III. geometria

A másik paraméter, amelyet változtattam a következő kettő geometria kialakításánál pedig a görbület mértéke lesz, erről a 2.2 fejezetben tárgyaltam, hogy pontosan mi is a görbület a repülőgépek szárnyában. Az I. példához képest egy sokkal nagyobb mértékben görbült geometriát hoztam létre, amely nem más, mint a IV. geometria (3-4. ábra), amely láthatóan sokkal aszimmetrikusabb, mint az alapul szolgáló modellünk.



3-4. ábra: IV. geometria

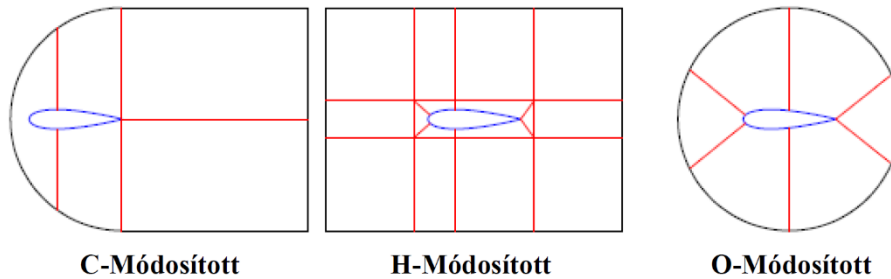
És az utolsónak vizsgált kialakításnál pedig a görbület mértékének csökkentésével készítettem az V. geometriát (3-5. ábra), amely a teljes szimmetriához már nagyon közeli állapotot ér el.



3-5. ábra: V. geometria

Az előbb említett és ábrázolt profilkialakításokat helyezem be pontosan megegyező körülmények közé, vagyis a repülőgépen alkalmazott szárnyat „cserélem le” a módosított profilokra. Az öt eset miatt az adott aerodinamikai eredményeket táblázatos formában fogom rögzíteni és összehasonlítani, így még egyszerűbbé téve a különbségek ismertetését.

A modellezés következő lépése a hálózás megteremtése lesz, amelyhez ugyanúgy körültekintő választás szükséges, mivel a hálózás típusa befolyásolja leginkább az eredmények pontosságát, valamint a számításához szükséges időt. Ehhez segítségül vettem a [13] forrásban tárgyalt hálómodelleket (3-6. ábra).

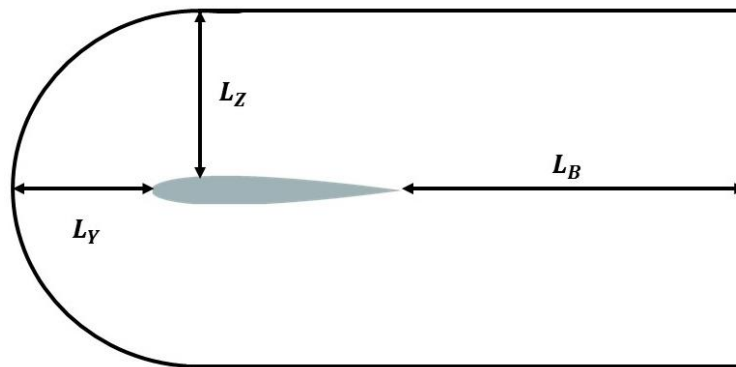


3-6. ábra: Szárnyprofilokhoz alkalmazott hálómodellek [10]

A [13] forrásban leírt elemzések alapján választom a C modellt a háló kialakításához, mivel a vizsgálatok alapján ennek alkalmazásával lehetséges a legkevesebb elemszámmal meghatározni a precíz eredményeket a szárnyprofiloknál.

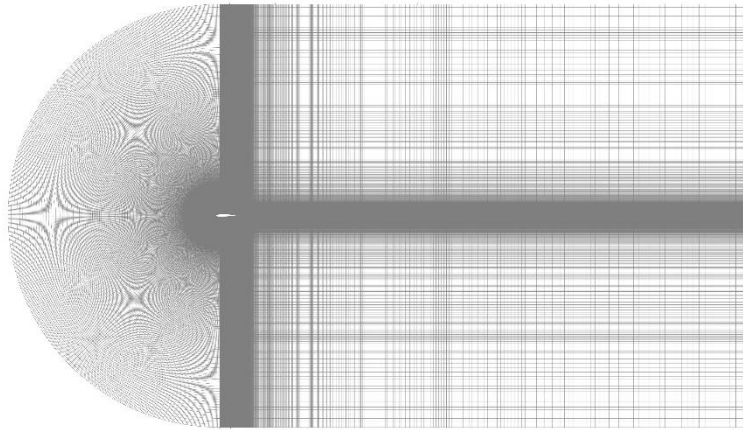
A C típusú tartomány méretét a (3-7. ábra) és a további összefüggések alapján készítettem [14]:

- L_Z és L_Y -nak a mérete a húrhossz 20-szorosa,
- L_B pedig a húrhossz 25-szöröse.

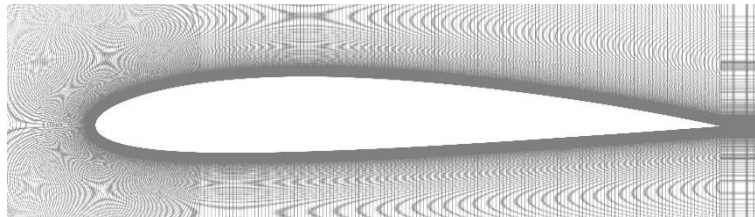


3-7. ábra: Háló mérete [14]

A háló sűrítéséhez segítségül vettem számtalan videóanyagot, melyben tapasztalatok alapján alkották meg a megfelelő sűrűséget az adott pontokban, a kívánt pontosság elérése érdekében. Nagyjából azonos hálórendszert teremtek meg minden esetemhez, így az I. geometriának a hálófelpépítését ábrázolom az alábbiakban (3-8. ábra, 3-9. ábra, 3-10. ábra).



3-8. ábra: Teljes hálója az I. geometriának



3-9. ábra: Szárnyprofil közelében a hálófelosztás az I. geometrián



3-10. ábra: Szárnyprofil belépőélénél a hálófelosztás az I. geometrián

A szárnyhoz közelebbi övezet nagy rács sűrűségű, amit egy nagyon finom hálós réteg alkot, míg a szárnyfelülettől kifelé haladva egyre durvábbá válik. A vizsgált tartomány összesen 428373 cellából áll az első geometriához tartozó hálóban, de ez minden geometriánál eltérő.

A fal Y^+ értékét kiszámítottam és a becsült távolságot $Y^+ \leq 1$ rögzítettem. A leválasztó buborékok megörökítéséhez szükséges erre az értékre ügyelni.

3.2. Turbulenciamodell

A szimuláció megkezdése előtt döntő a helyes modell megválasztása, ehhez rengeteg korábbi kutatás kapcsolódik, amik a modellek számítási és a kísérleti eredményeinek

összehasonlításával foglalkoznak. Megannyi tudományos dokumentum és cikk mutatja, hogy az általam vizsgált problémához [15] [13], a 2D szárnyprofilok mentén történő áramlásokhoz, az SST $k-\omega$ turbulenciamodell egy optimális döntés, hiszen a gyakorlatban egy nagyszerű egyensúlyt kínál a pontosság és számítási költségek között.

Az SST $k-\omega$ egy két egyenletből álló örvény-viszkozitás modell, amelyet gyakorta aerodinamikai alkalmazásban használnak. Egy hibrid modell, amely a Wilcox-féle $k-\omega$ és $k-\epsilon$ modelleket ötvözi. A belső rétegekben az ún. szubviszkózus réteghatásokat a Wilcox-féle modell végzi, de a külsőbb rétegekben az egyszerűbb $k-\omega$ modell fogja a számításokat teljesíteni. Ez lehetővé teszi a pontos meghatározását a szárnyfelület közelében lévő áramlási jellemzőknek, mint például a határrétegét és a leválását, melyek kritikusak az aerodinamikai jellemzők kiszámításához. [16] [17]

Ezenfelül az SST $k-\omega$ modellt széleskörben hitelesítették kísérleti adatokkal, egybevetve számos áramlási körülménnyel, így megbízható választás a szárnyprofil körüli összetett áramlási mező szimulálására.

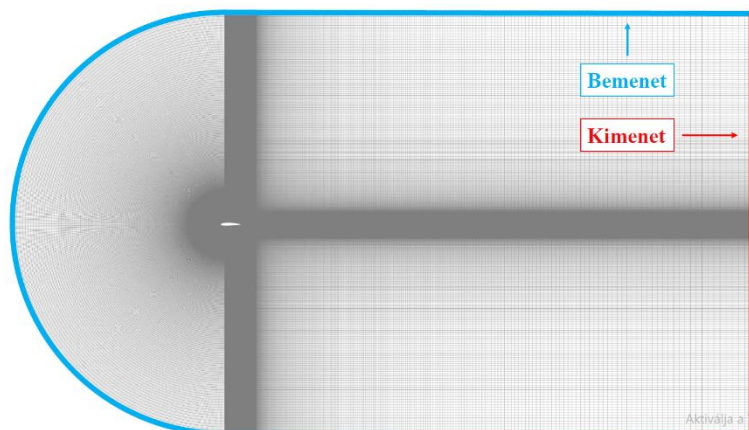
3.3. Peremfeltételek

A vizsgálatom a Cessna 172 Skyhawk három különböző utazási körülményére összpontosít, amelyen belül mind az öt geometriát elemezni fogom:

- a. normál, avagy ajánlott utazási körülményei a vizsgált gépnek,
- b. a megengedett legnagyobb sebesség esetén,
- c. és egy olyan sebességnél, amely esetén már fennáll a zuhanás veszélye.

Ugyanazon körülmények között vizsgálom az öt geometriát, I.-V.-ig jelölve a kialakításokat és „a”, „b” és „c”-vel a sebességi körülményeket.

Az első esetben (a) a bemeneti paramétereket, mint a nyomás, a sűrűség és a viszkozitás, a tengerszint feletti 3 km-es magasságban lévő állapot határoz meg, amely az ideális utazási magasság tartományba esik bele. A bemeneti sebességet ugyancsak a repülőnek egy kedvező utazási sebessége szabja meg, amely 226 km/h. Az előbbieken említett, létrehozott hálótartomány (3-8. ábra) elülső, felső és alsó falát jelölöm ki bemeneti nyílásnak, míg a kimeneti pedig a szárny hátulsó éle mögött helyezkedik el (3-11. ábra), ugyanez vonatkozik a második (b) és harmadik esetre (c) is.



3-11. ábra: Peremfeltételek bemutatása: bemeneti és kimeneti paraméterek

Második (b) és harmadik (c) esetben az utazási magasságok megegyeznek az elsővel, így a nyomások, sűrűségek és viszkozitások is egyenlőek lesznek, de a bemeneti sebesség változik, a második sebesség 302 km/h-ra és a harmadik sebesség pedig 90 km/h-ra módosul.

A hosszskála minden esetben az adott geometria húrhosszával lesz egyenlő, amely változik az egyes kialakítások között.

Az egyértelműség és átláthatóság miatt az alábbiakban feltüntettem a különböző sebességeket és a hozzá tartozó Reynolds-számokat.

3-1. táblázat: Különböző üzemi sebességek és a hozzá tartozó Reynolds-szám

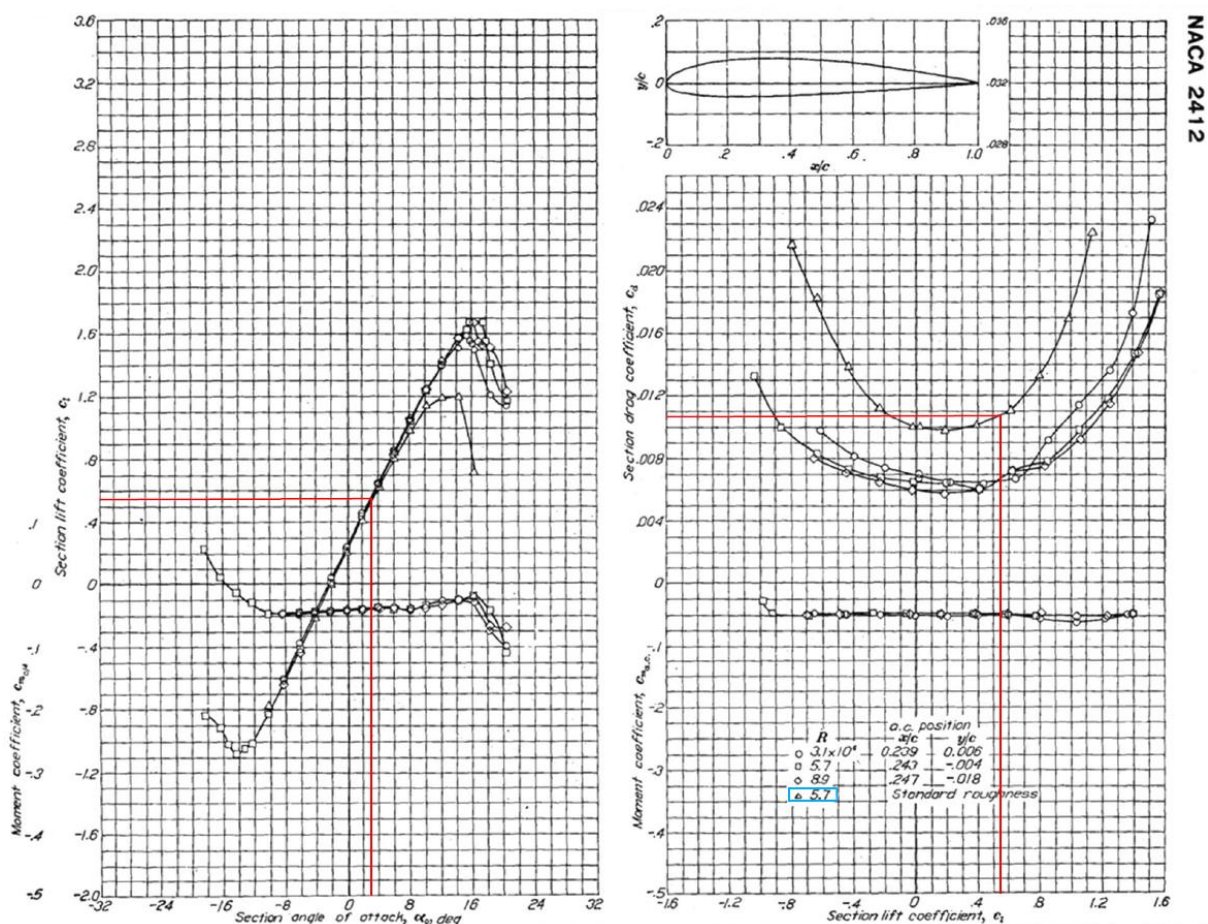
	Sebesség [km/h]	Re [-]
(a)	226	$5,39 \cdot 10^6$
(b)	302	$7,20 \cdot 10^6$
(c)	90	$2,15 \cdot 10^6$

4. EREDMÉNYEK ÉS KIÉRTÉKELÉS

4.1. Eredmények hitelesítése

Ahogy említettem, a szimulálás megannyi feltételezésen és egyszerűsítésen alapszik, ezért szükséges legelőször a kapott eredmények helyességét ellenőrizni. Ehhez segítségül fogom venni egy kísérleti vizsgálat eredményeit a szabványos NACA 2412-es szárnyprofilnál. Miután egyeztettem a kísérleti és a szimulációból kapott értékeket, utána tudok csak teljesen meggyőződni, hogy a kialakított háló és az alkalmazott turbulenciamodellel megfelelő a számításaim során.

A NACA 2412-es profil kísérleti adatait a [18] forrásból kerestem ki, melyet (4-1. ábra) jelöltem a meghatározás céljából. A felhajtóerő és a légellenállás együttható fontos változója a Reynolds-szám, amely az I. geometria „a” eseténél $Re = 5,582 \cdot 10^6$, míg a forrásban az összehasonlításához legideálisabb vizsgálat $Re = 5,7 \cdot 10^6$ esetén adódott.



4-1. ábra: NACA 2412 szárnyprofil aerodinamikai jellemzői kísérleti mérések alapján [18]

Miután adottak a kísérleti és a szimulációs adataim az alábbiakban táblázatos formában (4-1. táblázat) mutatom a különbségi értékeket és a hiba mértékét, amely az adatok különbségét jelenti.

4-1. táblázat: Szimulációs adatok hitelesítése

Aerodinamikai tényező	Kísérlet	Szimuláció	Különbség
Felhajtóerő együttható - C_L	0,55	0,54486	1 %
Légellenállás együttható - C_D	0,0107	0,009304	13 %

Ahogy a különbségek százalékos alakban szemléltetik, a felvett turbulenciamodell, peremfeltételek és a hálózás a különböző geometria változások hatásának demonstrációjára teljesen alkalmas. A matematikai modellek és a szimulációs programok számos egyszerűsítést tartalmaznak, amelynek következtében teljesen tökéletes eredményeket nem lehetséges elérni.

4.2. Számítási értékek bemutatása

Ebben a részében ugyanúgy táblázatos formában mutatom be a különböző geometriák eltérő utazási sebességeinél számított aerodinamikai jellemzőket, a felhajtóerő és a légellenállás együtthatót. Majd a 4.3. fejezetben térek a szimulációban alkotott képekre és az eredményekkel történő magyarázatra.

4.2.1. Felhajtóerő

Az alábbi (4-2. táblázat) a felhajtóerő együtthatókat tartalmazza a különféle esetekben, ezenkívül külön (4-3. táblázatban) jelölöm alatta a különbségek értékét és a százalékos eltérést.

4-2. táblázat: Felhajtóerő együttható a geometria és sebesség választása esetén

FELHAJTÓERŐ EGYÜTTHATÓ (C_L)			
Geometria száma	Sebesség		
	a	b	c
I.	0,5449	0,5482	0,5327
II.	0,5026	0,5087	0,4805
III.	0,5536	0,5557	0,5435
IV.	0,7007	0,70625	0,6795
V.	0,4364	0,4381	0,4283

4-3. táblázat: Felhajtóerő együttható változásának értékei a geometria és sebesség választása esetén

FELHAJTÓERŐ VÁLTOZÁSA (ΔC_L)						
Geometria száma	a		b		c	
	ΔC_L	[%]	ΔC_L	[%]	ΔC_L	[%]
<i>I.</i>	-	-	-	-	-	-
<i>II.</i>	-0,0423	-7,75	-0,0395	-7,20	-0,0523	-9,81
<i>III.</i>	0,0087	1,60	0,0075	1,36	0,0108	2,03
<i>IV.</i>	0,1558	28,60	0,1581	28,83	0,1468	27,55
<i>V.</i>	-0,1084	-19,90	-0,1101	-20,08	-0,1045	-19,61

A számítások eredményeinek értékelését a 4.3. bekezdésben fogom részletezni.

4.2.2. Légellenállás

Az alábbi (4-4. táblázat) a légellenállás együtthatókat tartalmazza a különféle esetekben, majd alatta (4-5. táblázat) jelölöm a különbségek értékét és a százalékos eltérést

4-4. táblázat: Légellenállás együttható a geometria és sebesség választása esetén

LÉGELLENÁLLÁS EGYÜTTHATÓ (C_D)			
Geometria száma	Sebesség		
	a	b	c
<i>I.</i>	0,0093	0,0089	0,0108
<i>II.</i>	0,0108	0,0103	0,0126
<i>III.</i>	0,0087	0,0846	0,0100
<i>IV.</i>	0,0093	0,0090	0,0108
<i>V.</i>	0,00889	0,0086	0,0103

4-5. táblázat: Légellenállás együttható változásának értékei a geometria és sebesség választása esetén

LÉGELLENÁLLÁS VÁLTOZÁSA (ΔC_D)						
Geometria száma	<i>a</i>		<i>b</i>		<i>c</i>	
	ΔC_D	[%]	ΔC_D	[%]	ΔC_D	[%]
I.	-	-	-	-	-	-
II.	0,0015	16,40	0,0014	16,03	-0,0523	17,48
III.	-0,0006	-6,07	-0,0005	-5,16	0,0108	-6,85
IV.	0,00002	0,20	0,00006	0,62	0,00003	0,26
V.	-0,0004	-4,35	-0,0003	-3,46	-0,0005	-4,57

4.2.3. Hatékonyság

A felhajtóerő és légellenállás együttható meghatározása után egyszerűen számolható a (2.1.3. bekezdésben) a két aerodinamikai tényező aránya, amely az alábbi összefüggés alapján fejezhető ki:

$$\frac{L}{D} = \frac{C_L}{C_D}$$

Ez az arány az aerodinamikai hatékonyságot írja le adott repülési körülmények között. Az L/D arány fordítottan arányos az adott repülési útvonalhoz szükséges energiával, így az L/D arány megduplázása csak feleannyi energiát igényel ugyanahhoz a megtett távolsághoz. Ez közvetlenül jobb üzemanyag-takarékosságot eredményez, ezért megvizsgáltam az L/D arány alakulását különböző geometria esetén, amelyet a (4-6. táblázat és 4-7. táblázat) foglal össze.

4-6. táblázat: Hatékonyság a geometria és sebesség választása esetén

HATÉKONYSÁG			
Geometria száma	Sebesség		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
I.	58,5632	61,4926	49,5369
II.	46,4091	49,1802	38,0299
III.	63,3400	65,7228	54,2618
IV.	75,16224	78,73467	63,0217
V.	49,0431	50,9098	41,7295

4-7. táblázat: Hatékonyság változásának értékei a geometria és sebesség választása esetén

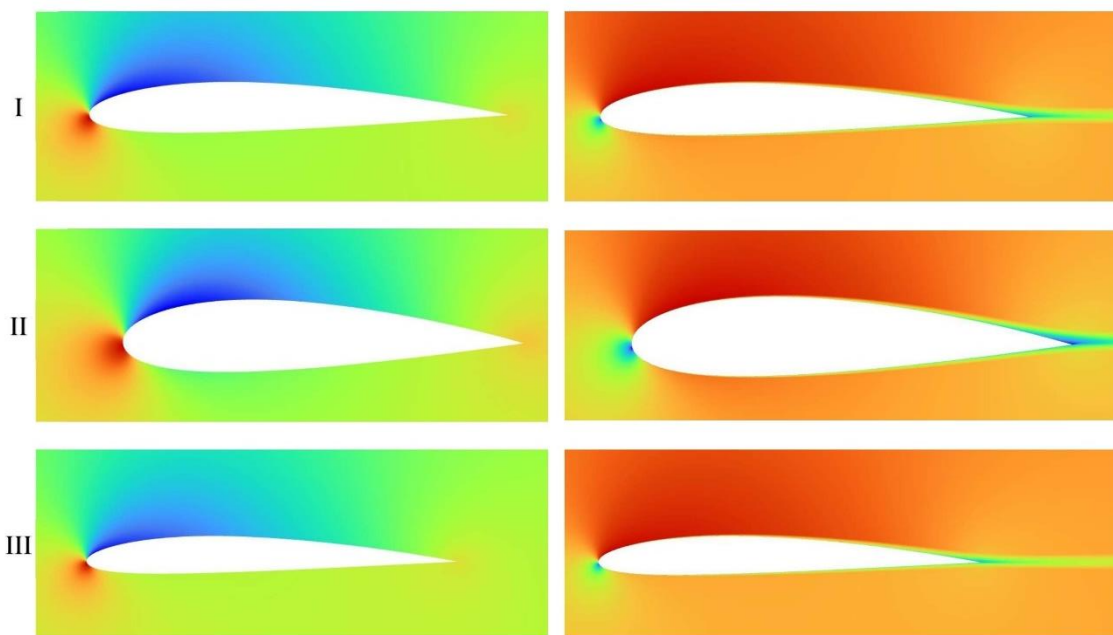
HATÉKONYSÁG VÁLTOZÁSA (L/D)						
Geometria száma	a		b		c	
	$\Delta L/D$	[%]	$\Delta L/D$	[%]	$\Delta L/D$	[%]
I.	-	-	-	-	-	-
II.	-12,15	-20,75	-12,31	-20,02	-11,51	-23,23
III.	4,78	8,16	4,23	6,88	4,72	9,54
IV.	16,60	28,34	17,24	28,04	13,48	27,22
V.	-9,52	-16,26	-10,58	-17,21	-7,81	-15,76

4.3. Eredmények kiértékelése a geometriai változtatások alapján

Először a vastagság módosításának eredményeit elemzem a szimuláció során alkotott képek segítségével, majd ugyanazon elv és metodika szerint fogok görbülettel foglalkozni.

4.3.1. Vastagság változásának eredményei

A következmények tárgyalásánál mindig az alapesethez viszonyítok, így szemléltetve, mit eredményeztek a módosítások. Segítségként alkalmazom a kontúrképeket a nyomás- és a sebességeloszlást a profil körül (4-2. ábra), ezek könnyítenek a megértésében és elképzelésben.



4-2. ábra: Nyomás- és sebességeloszlás az I., II., III. profil körül

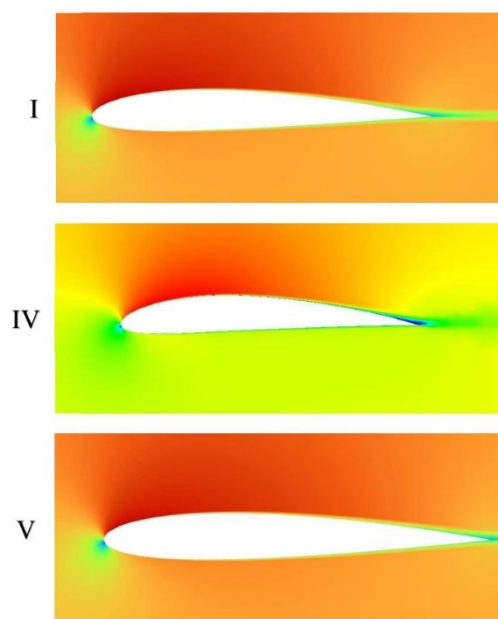
Mutatják mind az eredmények, mind az eloszlásdiagramok (4-2. ábra), hogy a felhajtóerő tekintetében, a profil vastagságának növekedése közel 8% csökkenést eredményezett, de a keskenyedése viszont 2%-kal növelte a felhajtóerő együtthatót. A fenti ábrán (4-2. ábra) látható, hogy a III. geometrián majdnem az egész felső hosszon fennáll a lényeges negatív nyomás a felhajtóerő tekintetében, valamint a hosszúság növelése lehetővé teszi, hogy a profil nagyobb felületen kényszeríti az érkező levegőt maga alá. A II. geometria esetén viszont látható, hogy koncentráltabb helyeken mutatkozik a negatív nyomás, nagyobb kiterjedéssel y irányban. Ezek mellett látható, hogy a profil alsó részén nagyobb mértékű a III. geometrián a pozitív nyomás a II.-kal ellentétben. Kitűnik még a nagyfokú csökkenése a felhajtóerőnek az alacsony sebességnél a vastagabb geometrián, amely 10%-os különbséget mutat az eredetihez képest.

A légellenállás tekintetében az első szempont, amit kiemelnék, hogy nagyobb változásokat lehet észrevenni a II. geometriában, élesebb színátmeneteket, amelyek hirtelen sebesség- valamint nyomásváltozásokat jelentenek, amely egyértelművé teszi, hogy ezek nagy súrlódásai a rendszernek, energiaveszteségeket okoznak. Világosan kivehető, hogy a belépőélnél, valamint a kilépőélnél nagyobb sebességkülönbségek lépnek fel kiterjedt területeken a szárnyprofil körül. Ezzel szemben a keskenyebb profilnál kisebb a belépőélnél megjelenő változás, és jóval csekélyebb területet érint, továbbá a szárnyprofil mentén a környező, áramló levegőben is kisebb területet érint. A légellenállási tényező a felhajtóerőhöz képest sokkal nagyobb mértékben módosult, hiszen a II. geometria esetén 16%-kal nőtt az „a” esetben, vagyis jelentősen romlott, míg a keskenyebbnél 6%-os csökkenést eredményezett.

A kereskedelmi repülőgépek, mint a vizsgált Cessna esetében azonban a hatékonyság az egyik legfontosabb tervezési paraméter, nem külön-külön a terhelő erők, légellenállás és felhajtóerő. A vastagabb profil esetében 21%-ot romlott az alapeometriához képest a gép szárny hatékonysága, de a „c” sebesség esetén 23%-ot csökkent az értéke, amely már egy nagyon súlyos következménye a cserének, ezzel ellentétben pedig a keskeny, III. geometria 8% növekedést mutatott az utazósebesség hatékonyságánál, ez is jelentős mértékű pozitív irányban.

4.3.2. Görbület változásának eredményei

Ugyancsak az alábbiakban mutatom be a (4-3. ábra) kontúrképekkel a különböző geometriákat.



4-3. ábra: Sebességeloszlás az I., II., III. profil körül

Legelőször a légellenállással fogom kezdeni a változások analizálását. A IV. geometria esetén valósult meg a legnagyobb különbség elérése, a majdnem 30% felhajtóerő együttható növekedése „b” sebességen, de hasonlóan nagy fejlődéseket ért el a másik két sebességen, így következtethető, hogy ez sebességtől, Reynolds-számtól függetlenül előnyös a felhajtóerőre. Míg a szimmetrikus V. profil 20% romlást mutatott mindegyik esetben. Ezek megfigyelhetők a képeken is, hiszen a I. és V. geometria sebességeloszlásán jóval kisebb különbségek jelennek meg az alsó és felső felület között, ellenben a IV. kialakítás esetén, ahol már nagy ellentétek mutatkoznak meg.

Légellenállás értékeit figyelve arra a feltételezésre jutottam, hogy a szimmetria vagy görbület mértéke minimális szerepet jelent ilyen körülmények között. A IV. geometria, amely már előbb tárgyaltan szuper felhajtóerővel rendelkezik, még 1%-os romlást, növekedést se mutatott a légellenállás terén. A szimmetria az V. profilon viszont 4,35% csökkenést adott normál sebességen, viszont jobb értéket adott az alacsony „c” sebességen, 4,57% mérséklődés, mint a magas „a” esetben, ahol mindössze 3,46% redukálódást.

Az előbb említettek azt eredményezték, hogy nagyjából sebességtől független javulást vagy romlást eredményez a görbület mértéke a kialakítás terén a vizsgált gép esetén, nem különböznek nagyban a hatékonyság értékei. A IV. geometria a leghatékonyabb, 28,34%-kal növelte az alaphoz képest az L/D arányt, így ez lett a legideálisabb formájú szárnykialakítás a kutatás során. Az V. geometria végzett az utolsó előtti helyen 16,26%-os hanyatlással, de a legrosszabb így is a vastag, II. geometria a 21% -os visszaeséssel a normál sebességen.

5. ÖSSZEGZÉS

Mindent egybevetve azokra a következtetésekre jutottam, hogy egy-egy repülőgép optimalizálásához tömérdek tényezőt figyelembe kell vennünk és pontosan meg kell határoznunk a kívánt repülési paramétereket, mind a sebességek, magasságok és manőverezési képességek pontos adatait, hiszen ezek adják meg, hogyan kell tökéletesíteni a gépet.

Természetesen ez a tanulmány néhány következtetést eredményezett. Legelőször is a Cessna 172 Skyhawk szárnykialakítására keskenyebb, kisebb vastagságú, áramvonalasabb, valamint a nagyobb görbületű, aszimmetrikusabb profilok kedvezőbb repülési tulajdonságokat eredményeznének a jobb hatékonyság révén, míg a vastagabb profil jelentős romlást mutatott a tulajdonságok minden területén. Az ilyen típusú személyi repülőgépek valószínűleg sok modelljére, típusára ezek a módosítások hasonlóan kedvező aerodinamikai tulajdonságokat eredményeznének. Jobb üzemanyagfogyasztás, kedvezőbb szállítóképacitás, nagyobb hatótáv lenne elérhető az adott géppel. Ugyancsak látványos eredmény a szimmetria pozitív hatása nagyobb sebességek esetén, hiszen jelentős csökkenést mutatott légellenállásban a vizsgált légijármű nagy sebességein. Azonban a kutatásom nem az olyan típusú gépeket érintette, melyek ilyen tartományokban működnek, de ugyanúgy egy nagyszerű témát jelenthetnének újabb tanulmány írása kapcsán, nagy valószínűséggel nagyobb különbségeket, eltéréseket lehetne elérni a szuperszonikus zónákban. Hasonlóképp hasznos lehet, ha az adott gép átalakításában gondolkoznak különböző célok elérése érdekében és ezáltal megváltozik a tervezés és működtetés dinamikája. Meg kell említeni, hogy a gondos tervezés esetén mindig előrelátóan gondolkodnak a gyártás kapcsán is, hiszen ezeket a technológiáknak ugyanúgy megvannak a gyártási korlátjai, valamint a szárnyra ható feszültségek, ébredő erők, nyomatókók ugyanolyan meghatározó szerepet játszanak, így nem lehet tényként kijelenteni az aerodinamikai elemzések alapján meghatározott következtetéseket a tervezés és gyártás további területeinek vizsgálata nélkül.

Ezen kutatási témaköröm rengeteg további tanulmányozási lehetőséget biztosíthat többféle területen, akár a más gépek, más áramlási közegek, 3D modellezés, vagy megannyi kapcsolatos tematika alapján. Eredményeim nagyon limitált modell szülöttjei, mely ideális az adott probléma elemzésére, valamint testhezálló volt a CFD modellezés kezdeti megismeréséhez, tanulásához és a kapcsolódó problémák bevezető lépcsőjeként. Továbbá nem szabad elfelejteni, hogy az elméleti számításokat minden valós probléma esetén szükséges kísérletekkel vegyíteni a mérnöki gyakorlatban.

Számomra egy kiváló lehetőséget biztosított a lenyűgöző repülőgépek szárnyainak pontos megismerésére, valamint CFD szimulációk gyakorlására, hiszen számtalan területén alkalmazhatóak.

Úgy gondolom, hogy a dolgozatom alapot nyújthat a szárnytervezés kapcsán, megadhatja a kellő eszközöket. Kutatásom megismertetett, hogy mennyi tényező, szempont és feltétel szükséges a repülőgépek tervezésének egy töredékéhez, a szárnyak aerodinamikai elemzéséhez.

A légtér meghódítása megannyi akadállyal szabdalta és számtalan, gondos tervezői megfontolás szükséges a kívánatos repülőgépek formatervezéséhez, melynek elsajátítása akár egy egész életen át is tarthat.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] M. O'Connor, „Wing Design,” 2018.10.15..
- [2] „SKYbrary,” [Online]. Available: <https://www.skybrary.aero/articles/camber>. [Hozzáférés dátuma: 22. 04. 2023.].
- [3] L. Tamás, „Az áramlástan alapjai előadási jegyzet,” Budapesti Műszaki Egyetem, Budapest, 1992.
- [4] NASA, „NASA Glenn Research Center,” 21. 07. 2022.. [Online]. Available: <https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/lift-to-drag-ratio/>. [Hozzáférés dátuma: 15. 03. 2023.].
- [5] W. Bohl, Műszaki áramlástan, Budapest: Műszaki könyvkiadó, 1985.
- [6] „ResearchGate,” [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Bernoullis-Conservation-of-Energy-law-7_fig4_329487755. [Hozzáférés dátuma: 25. 03. 2023.].
- [7] D. E. Neunenschwander, „How Airplanes Fly: Lift and Circulation,” Southern Nazarene University, Bethany, 2015.
- [8] Wikipedia, „Wikipedia,” [Online]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:AirfoilDeflectionLift_W3C.svg. [Hozzáférés dátuma: 25. 03. 2023.].
- [9] d. K. Gergely, „Áramlások numerikus modellezése,” BME Áramlástan Tanszék, 2018.
- [10] „Main Resource of Computational Fluid Dynamics,” [Online]. Available: <https://www.mr-cfd.com/industries/aerodynamic-and-aerospace-engineering/>. [Hozzáférés dátuma: 02. 04. 2023.].
- [11] P. S. Gustav Tschirschnitz, „Dive-Solutions,” November 2020. [Online]. Available: <https://www.dive-solutions.de/blog/cfd-methods>. [Hozzáférés dátuma: 02. 04. 2023.].
- [12] „idealsimulations,” [Online]. Available: <https://www.idealsimulations.com/resources/turbulence-models-in-cfd/>. [Hozzáférés dátuma: 02. 04. 2023.].
- [13] J. L. R. H. Suli Lu, „Mesh Properties for RANS Simulations of Airfoil-Shaped Profiles: A Case Study of Rubber Hydrodynamics,” 2021..
- [14] „SimScale,” [Online]. Available: <https://www.simscale.com/forum/t/2d-mesh-generation-for-cfd-analysis-of-a-wing-profile/61702>. [Hozzáférés dátuma: 25. 04. 2023.].
- [15] J. Han, „Effect of Reynolds Number on Aerodynamics of Airfoil with Gurney Flap,” Hindawi Publishing Corporation, Chandigarh, 2015..

- [16] „Autodesk CFD,” [Online]. Available: <https://www.deepl.com/translator#en/hu/The%20SST%20k-omega%20turbulence%20model%20is%20a%20two-equation%20eddy-viscosity%20model%20that%20is%20used%20for%20many%20aerodynamic%20applications.%20It%20is%20a%20hybrid%20model%20combining%20the%20Wilcox%20k-om>. [Hozzáférés dátuma: 24. 04. 2023.].
- [17] „CFD Online,” [Online]. Available: https://www.cfd-online.com/Wiki/SST_k-omega_model. [Hozzáférés dátuma: 24. 04. 2023.].
- [18] A. E. v. D. L. S. S. J. Ira H. Abbott, Summary of Airfoil Data, Washington: National Advisory Commiteee for Aeronautics, 1945.
- [19] Wikipédia, „Wikipédia,” [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Computational_fluid_dynamics. [Hozzáférés dátuma: 02. 04. 2023.].