



**BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM**

**Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar**

Vasúti Járművek és Járműrendszeranalízis Tanszék

# **Különböző kialakítású szárnyfülek aerodinamikai vizsgálata**

Készítette: **Pálfi Tamás**

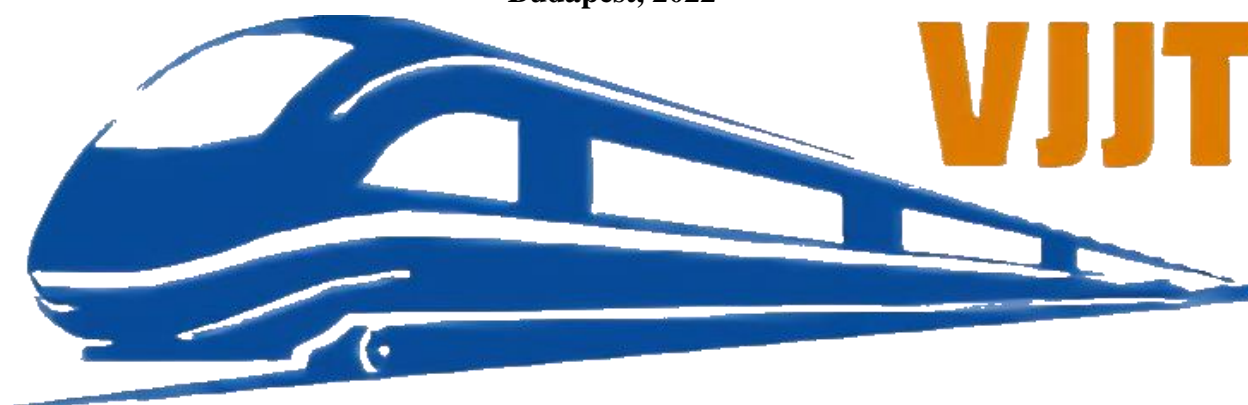
Járműmérnök BSc hallgató

Konzulens: **Dr. Ficzer Péter**

Egyetemi docens

**Tudományos Diákköri Konferencia**

**Budapest, 2022**



## Tartalomjegyzék

Ábrajegyzék.....	3
1. Bevezetés .....	4
2. Szárnyvégi örvénylés meghatározása, kialakulása .....	4
2.1 Felhajtóerő .....	5
2.2. Repülőgépre ható ellenállási erők.....	7
2.2.1 Légnyomásból származó légellenállás .....	7
2.2.2 Súrlódási légellenállás [9].....	7
2.2.4 Teljes légellenállás .....	8
2.2.5 Indukált légellenállás.....	9
2.3 Szárnyfülek .....	10
3. Szélcsatornás vizsgálatok .....	12
3.1 Szélcsatorna felépítése, működése .....	12
3.2 Additív gyártással előállított próbatestek .....	13
3.3 A szélcsatornás vizsgálat eredményei.....	16
4. Számítógépes szimulációk .....	17
4.1 Modell elkészítése .....	17
4.2 FloEFD alkalmazása, beállításának lépései .....	18
4.3 A számítógépes vizsgálat eredményei.....	20
4.4 Eredmények kiértékelése.....	22
5. Különböző szárnyfülek vizsgálata .....	24
5.1 Szárnyvég kialakítás nélküli profil .....	24
5.2 Lekerekített végű profil .....	26
5.3 Winglet/Sharklet.....	27
5.4 Osztott winglet.....	27
5.5 Eredmények összehasonlítása .....	29
6. Összegzés, következtetések, jövőkép .....	29
6.1 Kutatás folyamatának és eredményeinek összegzése .....	29
6.2 Jövőkép.....	30
7. Hivatkozások .....	31

## Ábrajegyzék

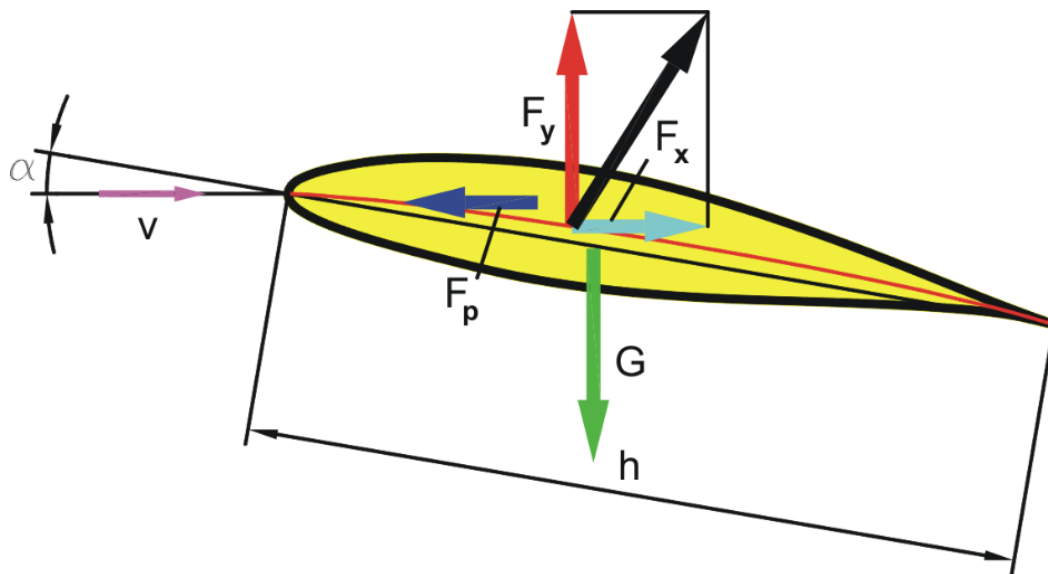
1. ábra: A repülőgép szárnyára ható erők [3].....	4
2. ábra: A szárny körül tapasztalható légnyomás [5].....	5
3. ábra: Nyitott állapotban levő fékszárny [7] .....	7
4. ábra: A parazita légellenállás komponensei [10].....	8
5. ábra: Teljes légellenállás komponensei [11].....	8
6. ábra: Feláramlás kialakulása [13] .....	9
7. ábra: A repülőgép szárnyai mögött kialakuló örvénylés [14].....	10
8. ábra: Különböző szárnyvégeken kialakuló örvénylés [15].....	11
9. ábra: Airbus A350 szárnyfüle [17] .....	11
10. ábra: A szélcsatorna méretei .....	12
11. ábra: Saját fejlesztésű és építésű szélcsatorna .....	13
12. ábra: Szeletelt modell.....	14
13. ábra: A mágnesekkel rögzített tartó .....	15
14. ábra: A vizsgált elemek konzolos illesztése.....	15
15. ábra: A szélcsatornában felszerelt szárnyprofil (3D modell).....	15
16. ábra: 3D modell a szélcsatornában .....	16
17. ábra: Füsttel kimutatott örvénylés.....	17
18. ábra: Számítógépes szimulációra előkészített modell.....	17
19. ábra: Virtuális térrész a szimulációhoz .....	18
20. ábra: Hálósűrítési szintek [32] .....	19
21. ábra: Szélcsatornás szimuláció segítségével láthatóvá tett szárny körüli áramlás.....	20
22. ábra: Szárnyvégi feláramlás kialakulása .....	21
23. ábra: Szárny körül ható légnyomás.....	21
24. ábra: Átesési sebesség elérése után kialakuló turbulens áramlás [34].....	22
25. ábra: Áramvonalak összehasonlítása .....	23
26. ábra: Szárnyvég kialakítás nélküli szárny .....	25
27. ábra: Mérési eredmények a szárnyvég nélküli szárnykialakítás esetében .....	25
28. ábra: Lekerekített szárnyvégű profil .....	26
29. ábra: Mérési eredmények a lekerekített végű profil esetében .....	26
30. ábra: Winglet/Sharklet jellegű szárnyfül .....	27
31. ábra: Osztott winglet modell.....	28
32. ábra: Mérési eredmények az osztott winglet esetében .....	28
1. táblázat: Vizsgálat beállítási paraméter .....	18
2. táblázat: Összehasonlító vizsgálat beállítási paraméterei .....	24
3. táblázat: Mérési eredmények összehasonlítás.....	29

## 1. Bevezetés

„Szállni szabadon, korlátok nélkül, akárcsak a madár” Ez a gondolat foglalkoztatta az emberiséget évezredekken keresztül egészen addig, míg Otto Lilienthal [1] 1892-ben meg nem építette az első repülőgépet [2]. Az elmúlt közel másfél évszázad alatt a repülés rohamosan fejlődött a legelső fából és vászonból készült repülőtől egészen a korszerű, több száz tonnás, kompozit anyagokból készült repülőgépekig. A 21. század gazdasági rendszere olyan technológiai megoldásokat igényel, amelyek gazdaságos utas- és teherszállítást biztosítanak, légi úton is. Ennek érdekében a repülőgépgyártók folyamatosan dolgoznak azon, hogy repülőgépeiket a lehető leggazdaságosabban üzemeltethetővé tegyék. Az utóbbi néhány évtizedben a repülőgép ipar rohamos fejlődésbe kezdett, folyamatosan jelennek meg az innovatívabbnál innovatívabb találmányok, de a fejlődés közel sem ért véget, még mindig rengeteg területen megtalálható a fejlődési lehetőség. Ebben a dolgozatban az egyik ilyen területet és a benne rejlő lehetőségeket vizsgáljuk.

## 2. Szárnyvégi örvénylés meghatározása, kialakulása

Mindenekelőtt szükséges megértenünk, hogy melyek azok az erők, amelyek a repülőgépet a levegőben tartják, és melyek gátolják annak haladását. Ezeket az erőket szemlélteti az 1. ábra, ahol  $F_y$  a felhajtóerő,  $F_x$  a légellenállási erő,  $F_p$  a tolóerő,  $G$  a repülőgép súlya,  $v$  az áramlási sebesség és  $\alpha$  a beesési szög.



1. ábra: A repülőgép szárnyára ható erők [3]

## 2.1 Felhajtóerő

A repülőgépek szárnyainak keresztmetszetét megvizsgálva megfigyelhető, hogy kontúrjuk a felső szakaszon nagyobb ívvel rendelkezik, mint az alsón. Ez azt eredményezi, hogy a levegő a szárny belépő élétől a kilépő éléig nagyobb utat tesz meg a szárny felső részén, mint az alsón, így a közeg áramlási sebessége a szárny felső felületén nagyobb lesz, mint az alsón.

Bernoulli törvénye [4]:

$$p + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = \text{állandó} \quad (1)$$

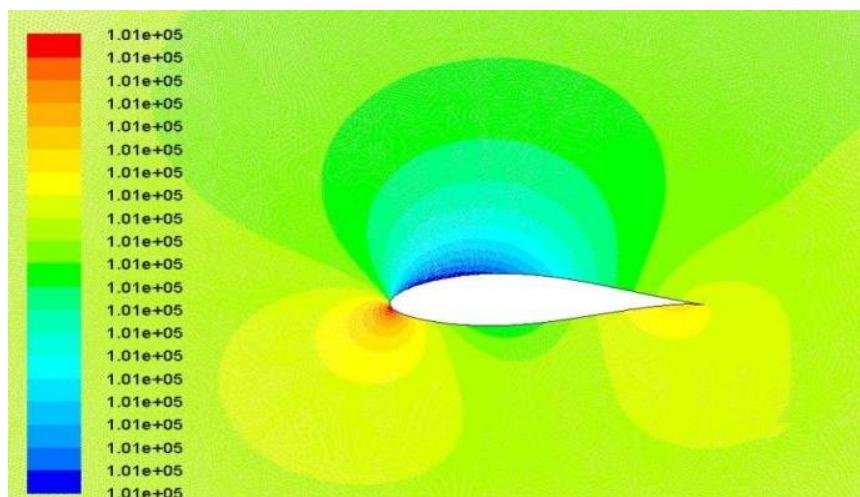
ahol:

$p$  – a közeg nyomása

$\rho$  – a közeg sűrűsége

$v$  – a közeg áramlási sebessége

Mivel adott  $t$  időpillanatban a közeg sűrűsége állandónak tekinthető, így Bernoulli törvényét felhasználva megállapítható, hogy a repülőgép szárnya alsó és felső felülete közötti sebességkülönbség légnyomáskülönbséget eredményez, mivel az áramlási sebesség növekedésével négyzetesen arányosan csökken az adott térfogat légnyomása (2. ábra).



2. ábra: A szárny körül tapasztalható légnyomás [5]

Ez a nyomáskülönbség Bernoulli törvényéből matematikailag is levezethető. Felírható ugyanis a szárny bármely tetszőleges pontjában a nyomáskülönbség:

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} = \frac{v_0^2}{2} + \frac{p_0}{\rho} \quad (2)$$

$$p - p_0 = \frac{\rho}{2} \cdot v_0^2 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{v}{v_0} \right)^2 \right] = \frac{\rho}{2} \cdot v_0^2 \cdot c_y \quad (3)$$

ahol:  $c_y$  – felhajtóerő tényező,

$$c_y = 1 - \left( \frac{v}{v_0} \right)^2 \quad (4)$$

$v_0$  – a közeg áramlásának sebessége egy, a szárnytól független pontban

$p_0$  – a közeg nyomása egy, a szárnytól független pontban

Ha a nyomáskülönbséget felírjuk a teljes szárnyfelületre:

$$(p - p_0) \cdot A = \left( \frac{\rho}{2} \cdot v_0^2 \cdot c_y \right) \cdot A \quad (5)$$

$$F_y = \frac{\rho}{2} \cdot v_0^2 \cdot c_y \cdot A \quad (6)$$

ahol:

$F_y$  – a repülőgép szárnyára ható felhajtóerő

A felhajtóerő tehát az a közeg áramlási irányára merőleges erő, melynek mértéke a közeg sűrűségének, a sebesség négyzetének, a szárny felületének és a felhajtóerő tényezőnek a szorzatával számolható.

A kapott képletből továbbá kiolvasható, hogy a felhajtóerő képződésének elengedhetetlen feltétele a kellő nagyságú áramlási sebesség, de a szárny felülete is fontos szerepet játszik benne. A repülőgépek haladási sebessége nem konstans a repülés teljes időtartama alatt, ugyanis az utazósebesség elérheti a le- és felszálló sebesség sokszorosát. Ezekben az esetekben a kisebb sebesség miatt csökkenő felhajtóerőt a szárnyfelület növelésével lehet kompenzálni, ezt a tervezők nyitható és csukható fékszárnyak [6] (3. ábra) segítségével oldották meg. Így tehát a repülőgépek viszonylag széles sebességtartományban képesek a repülésre.



3. ábra: Nyitott állapotban levő fékszárny [7]

## 2.2. Repülőgépre ható ellenállási erők

Az áramlásba helyezett testeken ébredő - az áramlási sebességgel párhuzamos - erőt közegellenállásnak nevezzük. A repülőgépre ható eredő légellenállás három fő komponensből tevődik össze.

### 2.2.1 Légnyomásból származó légellenállás

A 2.1 fejezetben igazolt légnyomáskülönbőségből levezethető egy áramlási iránnyal párhuzamos közegellenállási erő is. Ehhez vegyük alapul a már levezetett erő képletét:

$$F = \frac{\rho}{2} \cdot v_0^2 \cdot c \cdot A \quad (7)$$

De ezúttal  $c_y$  felhajtóerő tényező helyett helyettesítsünk be egy  $c_x$  légellenállási tényezőt, mely több más tényező mellett függ a repülőgép alakjától, felületétől és a légnyomástól. Így felírható:

$$F_x = \frac{\rho}{2} \cdot v_0^2 \cdot c_x \cdot A \quad (8)$$




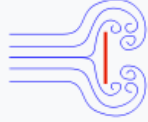
ahol  $F_x$  – légnyomásból származó közegellenállás [8]

### 2.2.2 Súrlódási légellenállás [9]

A repülőgépek külső burkolata körül áramló közeg a repülőgép testével súrlódási kölcsönhatásba lép, mely ellenállási erőt képez.

### 2.2.3 Formából származó légellenállás

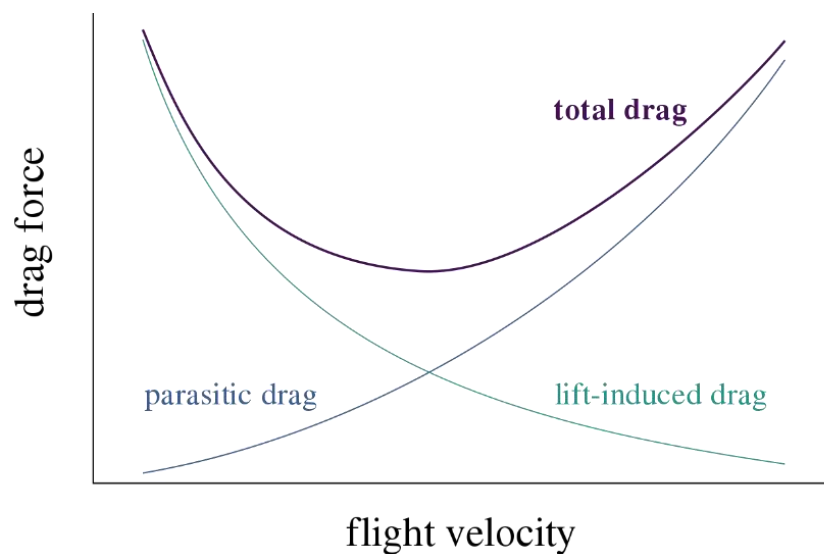
Az áramlási közegbe helyezett test formájából származó ellenállási erő és a súrlódási légellenállás viszonyát legjobban a 4. ábra szemlélteti. Ez a két erő összege a parazita ellenállás.

Shape and flow	Form Drag	Skin friction
	≈0%	≈100%
	≈10%	≈90%
	≈90%	≈10%
	≈100%	≈0%

4. ábra: A parazita légellenállás komponensei [10]

### 2.2.4 Teljes légellenállás

A repülőgépekre ható teljes légellenállás tehát a légnyomási légellenállás és a parazita légellenállás összegeként származtatható (5. ábra).



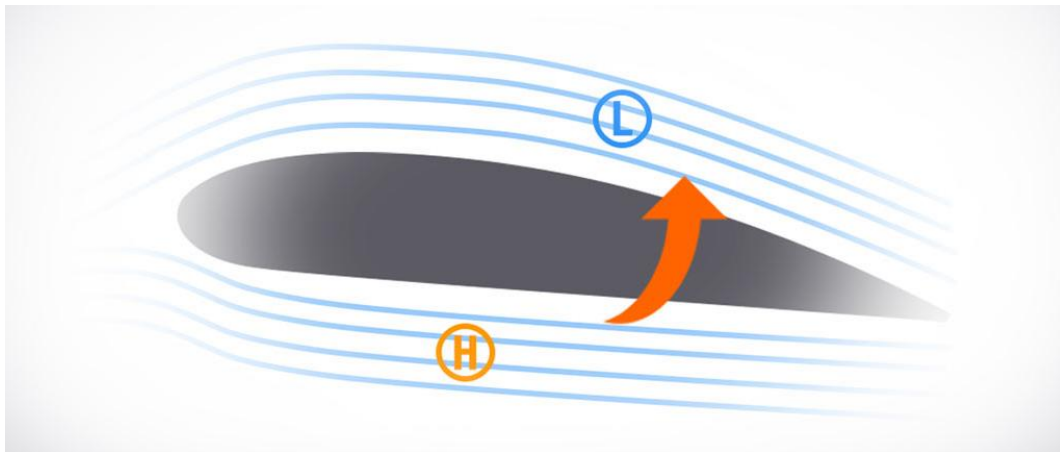
5. ábra: Teljes légellenállás komponensei [11]



Az 5. ábráról olvasható le továbbá az a sebesség, melyen a repülőgépek a leggazdaságosabban üzemeltethetőek, ugyanis ahol a teljes légellenállás görbéjének minimum pontja van, ott kell a legkevesebb tolóerőt alkalmazni a sebesség állandó értéken tartása érdekében.

### 2.2.5 Indukált légellenállás

A 2. ábrán szemléltetett légnyomáskülönbségnek a felhajtóerő képzésén kívül negatív hatása is van. A szárny felső részén áramló közeg befelé próbál áramlani a területen található alacsony nyomás miatt, míg a szárny alatt található magasabb légnyomású közeg kifelé áramlást eredményez [12]. Ezek a folyamatok a szárnyvégeken okoznak látványos jelenséget (6. ábra), ugyanis a szárny alsó részéről kifelé áramló közeg a szárnyvégen elhagyja a szárny alsó részét, miközben annak felső részén befelé kezd áramlani.



6. ábra: Feláramlás kialakulása [13]

A szárnyvégen történő feláramlás a szárny mögött örvénylássé – ezt a 7. ábra szemlélteti – alakul, mely egyrészt ellenállási erőt eredményez a repülőgépen, másrészt veszélyt jelenthet a többi repülőgépre, melyek az örvénylésbe kerülnek.



7. ábra: A repülőgép szárnyai mögött kialakuló örvénylés [14]

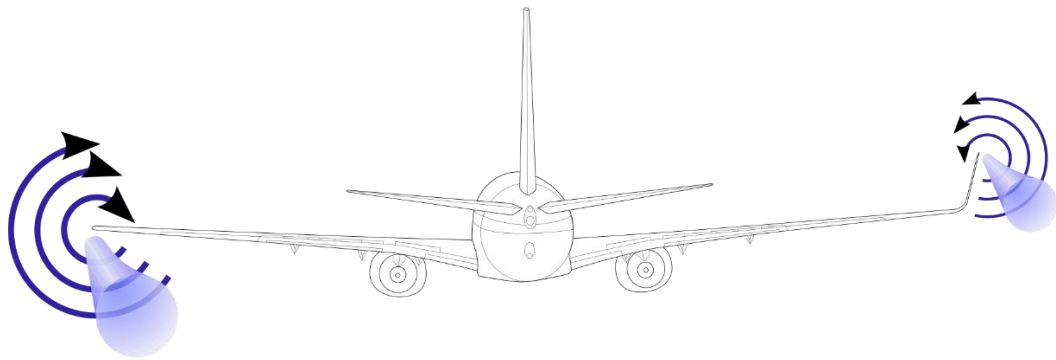
Ezek alapján kijelenthető, hogy az indukált légellenállás légnyomáskülönbségből származó légellenállásból származtatható, és egyenesen arányos vele. Így tehát az indukált légellenállás csökkentésével a teljes légellenállás csökkenthető, ami hozzájárul a repülőgépek gazdaságosabb üzemeltetéséhez.

Amennyiben a szárnyvégi örvénylés mértéke csökkenthető, úgy a teljes légellenállás is csökkeni fog, ezzel gazdaságosabb üzemelés érhető el, illetve a CO<sub>2</sub> kibocsátás is csökken. Jelen tanulmányban az indukált légellenállás csökkentésének lehetőségeit vizsgáljuk.

Egy lehetséges megoldás az indukált légellenállás csökkentésére a végtelen szárnyfeszítávolságú repülőgép tervezése lenne, hiszen, ha az örvénylés a végtelenben alakul ki, akkor az nem befolyásolja a repülőgép haladását. Ez a valóságban azonban kivitelezhetetlen, ezért más, megvalósítható megoldások alkalmazása szükséges.

### **2.3 Szárnyfülek**

A 2.2.5 fejezetben bemutatott negatív hatású légellenállás csökkentése érdekében a repülőgép gyártók ún. szárnyfüleket építenek a szárnyvégekre, melyek az indukált áramlás útjában gátat képezve csökkentik az örvénylés mértékét, illetve az indukált légellenállás során elvesztett energia egy részét hasznosítják újra. A 8. ábra segítségével könnyedén összehasonlítható a szárnyfülrel felszerelt és a szárnyfülrel nem rendelkező szárnyvégeken létrejövő örvénylés nagysága.



8. ábra: Különböző szárnyvégeken kialakuló örvénylés [15]

A szárnyfülek méretükben és alakjukban nagyon sokfélék lehetnek, azonban mindnek elsődleges célja a repülőgép légellenállásának csökkentése.

Az első szárnyfűl az 1973-as olajár-növekedés hatására lett bevezetve a polgári légiközlekedésben [16]. Azóta a repülőgép fejlesztők folyamatosan azon dolgoznak, hogy jobbnál-jobb szárnyfüleket tervezzenek, ezzel téve gazdaságosabbá repülőgépeiket. Napjainkra a legjobb szárnyfülek (9. ábra) alkalmazásával akár 5-7% üzemanyagot lehet megtakarítani, ez azonban még tovább javítható, így a lehetőség továbbra is fennáll, hogy a fejlesztők egy ennél is jobb szárnyfület tervezzenek.



9. ábra: Airbus A350 szárnyfűle [17]

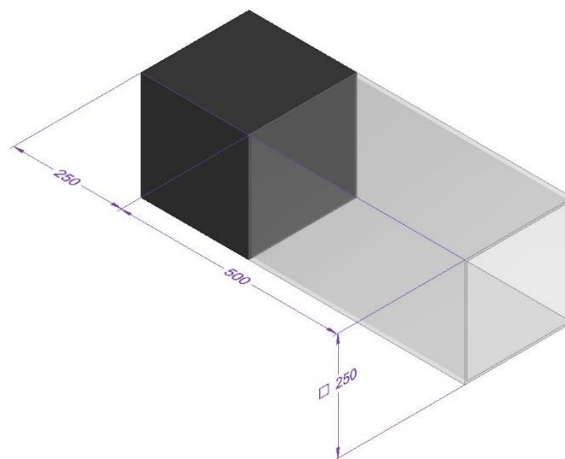
### 3. Szélcsatornás vizsgálatok

Kutatásom során különböző kialakítású szárnyvégek viselkedését, hatékonyságát szeretném megvizsgálni. Ennek érdekében az áramlástan vizsgálatokhoz szélcsatornás tesztek végzek, melyek során a szárnyvégeken létrejövő feláramlást és az ebből kialakuló örvénylest tanulmányozom.

#### 3.1 Szélcsatorna felépítése, működése

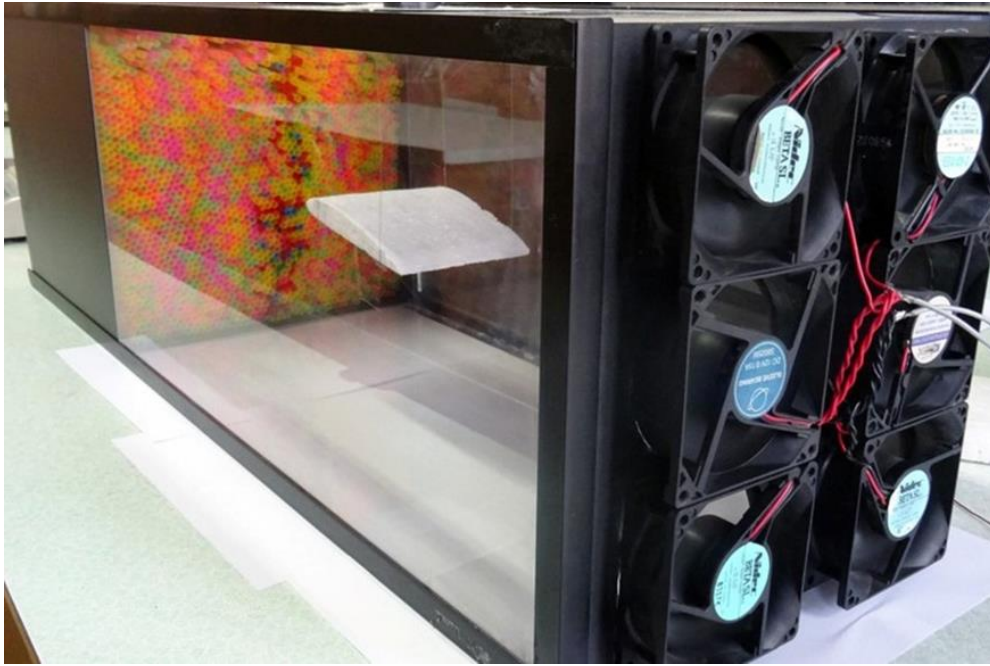
A szélcsatorna [18] egy adott közeg (például levegő) szabályozott áramoltatására alkalmas berendezés, mely rendelkezik egy áramlástan vizsgálatok és szimulációk elvégzésére alkalmas térrésszel.

Vizsgálataimhoz egy saját építésű szélcsatornát használok, melynek befoglaló méretei a 10. ábrán láthatóak.



10. ábra: A szélcsatorna méretei

Az említett szélcsatorna (11. ábra) egy nyílt közeg-visszatérésű, beszívó típusú [19] szélcsatorna, mivel a közeg nincs közvetlenül visszavezetve a bejárathoz, valamint az áramlást biztosító ventilátorok a kilépő oldalon helyezkednek el. A belépő oldalon a párhuzamos áramlást 2500 műanyag szívószál biztosítja, a levegő ezeken keresztül áramolhat csak be a szélcsatornába. A vizsgálatok a szívószálak és a ventilátorok közötti térrészben végezhetők, melyben az áttetsző plexiből készült oldalának köszönhetően jól megfigyelhetők a látványos áramlási jelenségek.



11. ábra: Saját fejlesztésű és építésű szélcsatorna

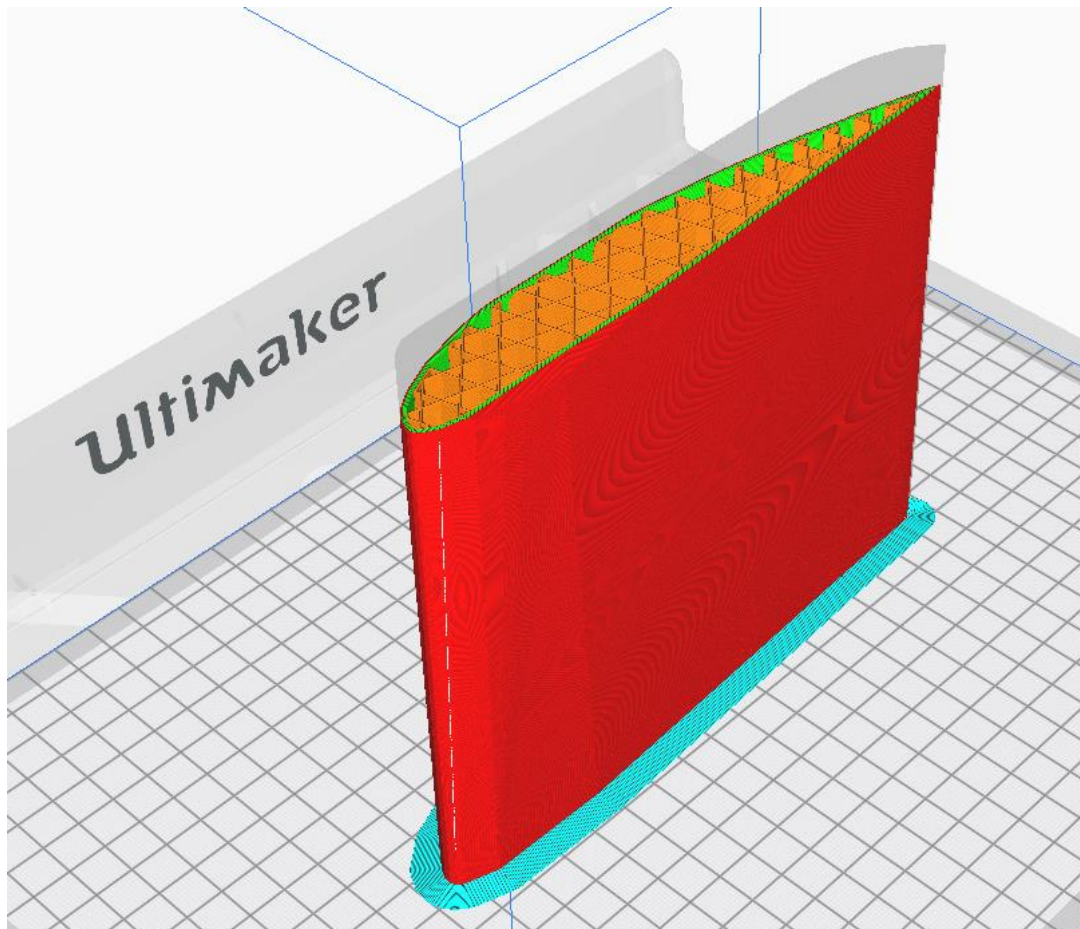
### 3.2 Additív gyártással előállított próbatetek

A szélcsatornás vizsgálatokhoz a próbateteket a bonyolult geometria miatt a leghatékonyabban additív gyártás segítségével lehet előállítani, ugyanis így a CAD modell birtokában gyakorlatilag bármilyen modell viszonylag gyorsan és alacsony költségvetésből előállítható.

Annak érdekében, hogy a modell jól vizsgálható legyen a szélcsatornában, a geometriai jellemzőit, méretét a Solid Edge [20] nevű tervező program segítségével készítettük el, majd a Zortrax M200 [21] típusú 3D nyomtató (mely ABS [22] anyagot használ nyomtatáshoz [23]) segítségével gyártottuk le.

A nyomtatás megkezdése előtt szükséges a nyomtatási paramétereket úgy megválasztani, hogy a kinyomtatott alkatrész a célnak megfeleljen, tehát jól alkalmazható legyen szélcsatornás, aerodinamikai tesztek és szimulációk elvégzéséhez [24]. Így tehát a nyomtatási rétegvastagságot érdemes a lehető legvékonyabbra állítani. Ez ugyan nagyban megnöveli a gyártási időt, de lényegesen jobb felületi érdességet kapunk, ezzel javítva a szimuláció pontosságát. A modell szeletelt, illetve támasztékokkal [25] ellátott vázlata az 12. ábrán látható.

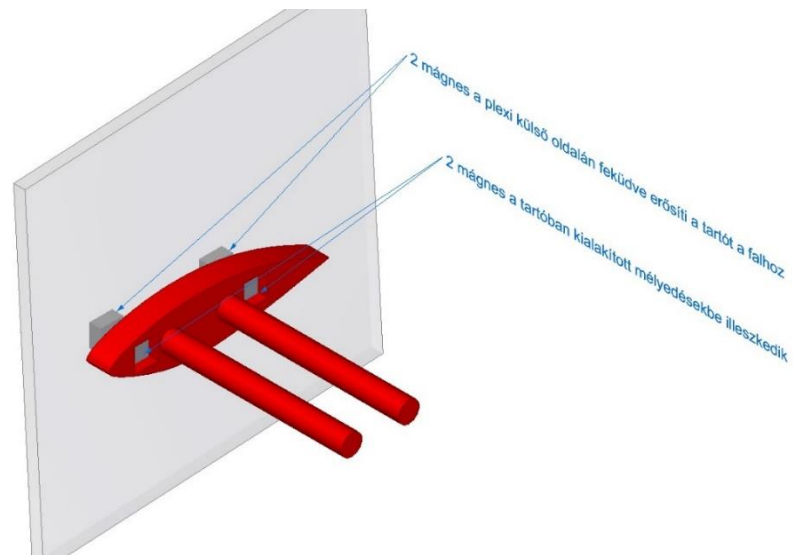




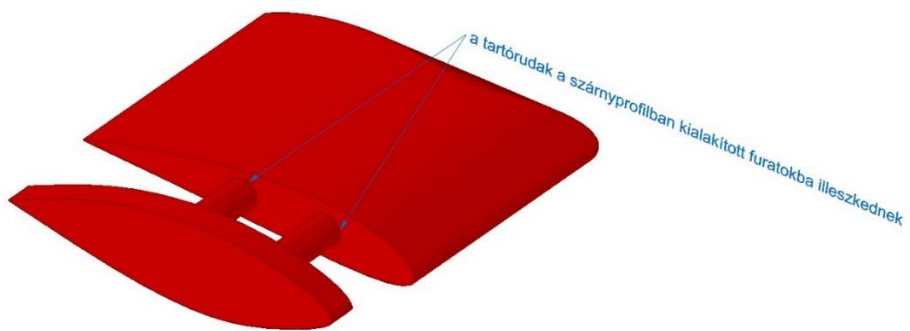
12. ábra: Szeletelt modell

A különböző topológiájú modelleket a szélcsatornában egy univerzális, szintén additív gyártással előállított tartó segítségével lehet rögzíteni és a kívánt pozícióba beállítani. A tartót 4 mágnes rögzíti a szélcsatorna falához, ezekből 2 a tartóban elhelyezett mélyedésbe, míg 2 a plexi külső oldalához illeszkedik (13. ábra), míg a rajta található konzolos rudaknak (14. ábra) köszönhetően könnyedén lehet a tesztelendő modelleket fel- és leszerelni (15. ábra). A modell a nyomtatás után már vizsgálható is a szélcsatornában (16. ábra).

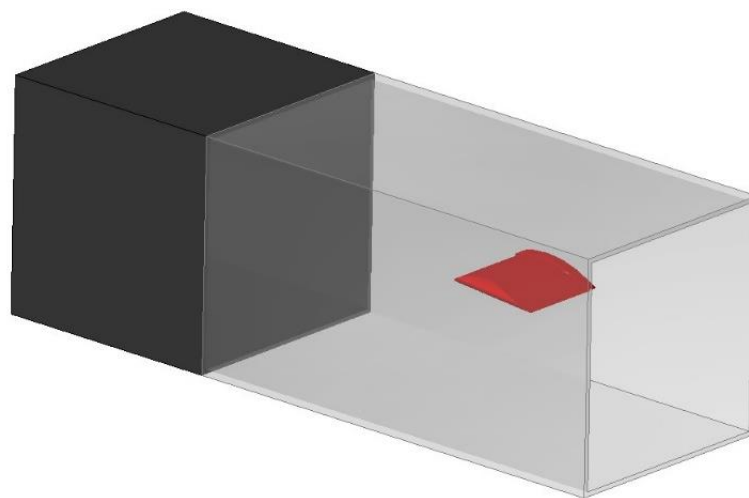
A külső mágnesek mozgásával a szárnyprofil könnyen tetszőleges helyzetbe állítható, ugyanis a rögzítési technológiának hála a szélcsatornában található modell követni fogja a külső mágnesek mozgását. Így a tesztelendő modell szabadon eltolható függőleges és vízszintes irányban, valamint saját tengelye körül is elfordítható, ezzel beállítva bármilyen tetszőleges beesési szöget.



13. ábra: A mágnesekkel rögzített tartó



14. ábra: A vizsgált elemek konzolos illesztése



15. ábra: A szélcsatornában felszerelt szárnyprofil (3D modell)



16. ábra: 3D modell a szélcsatornában

### 3.3 A szélcsatornás vizsgálat eredményei

A vizsgálatokat először egy Clark Y [26] profilú, szárnyfűl nélküli szárnykialakítással végzem. A profil a nyomtatása után az univerzális tartó segítségével elhelyezhető a szélcsatorna kísérleti terében. A szárny körüli áramlás glicerines füstgép [27] által előállított füst segítségével lehetséges, mint az a 16. ábrán is látható. Az áramlási sebesség mérésére digitális anemométer [28] használható, melyről könnyedén leolvasható, hogy a szélcsatornában a maximális teljesítményen működtetett ventilátorok esetében 2 m/s áramlási sebesség érhető el. Ez ugyan jóval elmarad a repülőgépek utazósebességétől, de a füsttel végzett vizsgálatok során beigazolódott, hogy még ilyen körülmények között is kialakul örvénylés a szárnyvégek mögött. Ez látható a 17. ábrán. Az örvény kontúrja nem határozható meg egyértelműen, mivel ez egy lokális légnyomásváltozás egy végtelennek tekinthető térben, emiatt az örvénylés mértéke [29] számolással nem igazolható, csupán vizuálisan lehet vizsgálni.





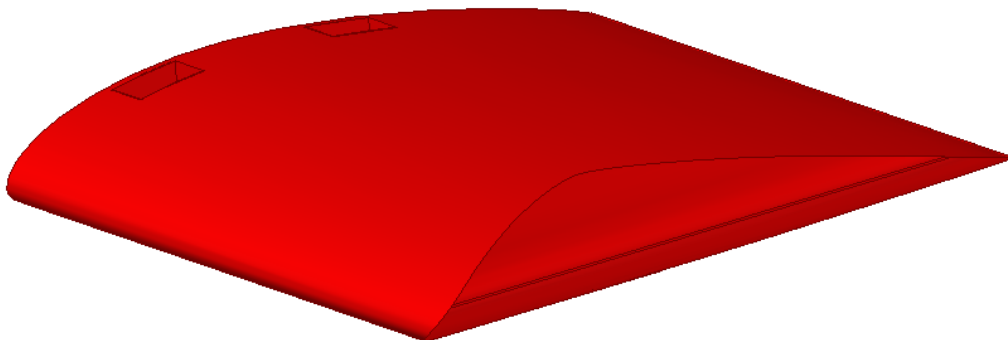
17. ábra: Füsttel kimutatott örvénylés

#### 4. Számítógépes szimulációk

A 3. fejezetben említettek alapján, additív gyártás segítségével könnyedén előállíthatunk próbatesteket szélcsatornás vizsgálatokhoz, azonban ezen vizsgálatok hátránya, hogy az elérhető sebességtartomány nagyon kicsi, a szélcsatornában nehézkes a mérés, illetve a mérési hibák előfordulása magas. Ezen hibák elkerülése érdekében a további vizsgálatokat számítógépes szimuláció segítségével érdemes elvégezni, azonban ezek elkezdése előtt érdemes leellenőrizni a számítógépes szimuláció pontosságát, valósághűségét.

##### 4.1 Modell elkészítése

A vizsgált Clark Y profilú szárny online modelltárból tölthető le (18. ábra), majd célszerű beállítani rajta azt a felületi érdességet, mely az FDM technológiájú nyomtatás után jellemző a darabra, mely  $R_a12$  körüli érték [30]



18. ábra: Számítógépes szimulációra előkészített modell

## 4.2 FloEFD alkalmazása, beállításának lépései

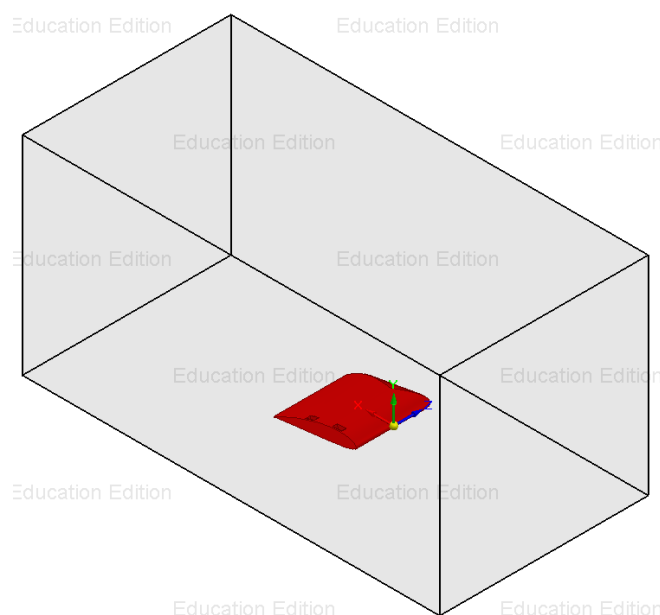
A Solid Edge programban a megfelelő paraméterekre beállított modell áramlástani vizsgálatait a FloEFD [31] nevű bővítménnyel végezhetőek.

Az áramlástani vizsgálathoz szükséges a programban a megfelelő paraméterek beállítása, melyek esetünkben azonosak a szélcsatornában alkalmazottakkal. Ezeket a feltételeket az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat: Vizsgálat beállítási paraméterei

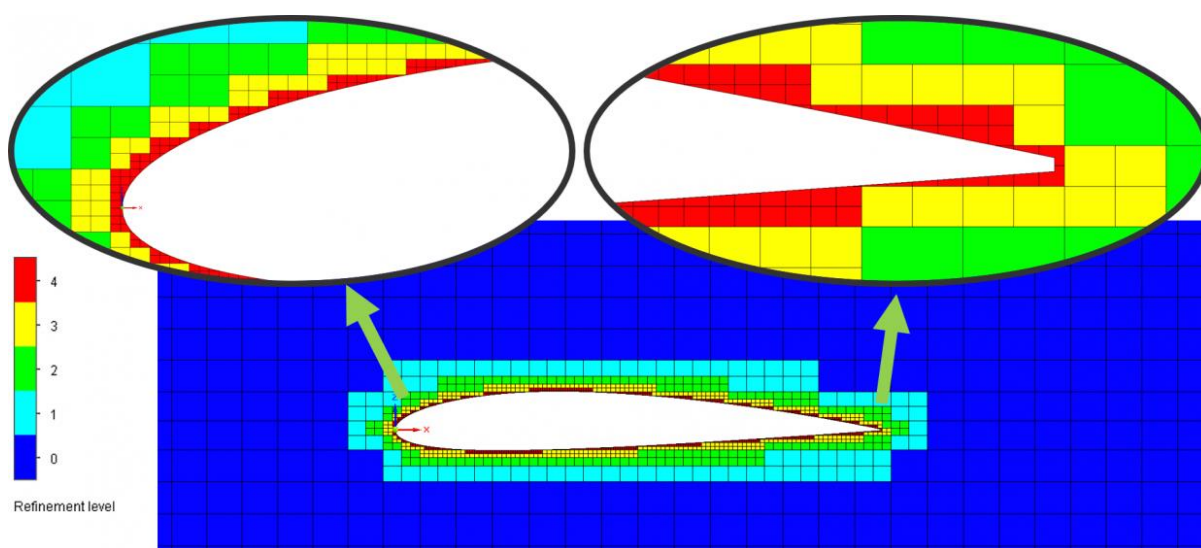
Feltétel	Érték	Mértékegység
Áramlási sebesség	2	m/s
Környezeti nyomás	101325	Pa
Környezeti hőmérséklet	293,2	K
Beesési szög	10	°

Az előzetes beállítások elvégzése után a program egy virtuális, véges térrészbe helyezi a modellt. A szimuláció ebben a térrészben fog lezajlani, valamint a program itt fogja leképezni a virtuális hálót, ezért az áramlás vizsgálata is itt végezhető, így célszerű ezt a szélcsatorna vizsgálati terével azonos méretűre állítani (hossz: 500 mm, keresztmetszet: 250×250 mm). Ez látható a 19. ábrán.



19. ábra: Virtuális térrész a szimulációhoz

A FloEFD derékszögű háló segítségével képezi le a vizsgálandó test körüli közegáramlást, ezért a jó eredmények elérése érdekében szükséges a háló beállításait megfelelően kezelni. A hálózás során a hálósűrítést az elempárosítással, azaz a *cell mating* technikával hozza létre. A kiindulási alaphálót (ez a 20. ábrán kékkel van jelölve) oldalfelezéssel további elemekre bontja, létrehozva az 1-es frissítési szintet (türkíz). Amennyiben szükséges, további oldalfelezéssel a háló tovább sűríthető egészen a 7-es frissítési szintig. Egy hálósűrítés során az elemdarabolás az elem X, Y és Z tengelye mentén is megtörténik, azaz 1 db elemből mindig 8 új elem lesz.



20. ábra: Hálósűrítési szintek [32]

A Solid Edge kétféle háló sűrítési módszert kínál. Az egyik a lokális, a másik a globális sűrítés. Lokális sűrítés során kiválasztható egy adott felület, amelyen a vizsgálatot szeretnénk végezni, míg a globális sűrítés az előzőleg beállított vizsgálati térrész teljes térfogatában létrehozza a hálót. Vizsgálatom során első sorban a szárnyvégen létrejövő feláramlást, illetve a mögötte keletkező örvénylést szeretném vizsgálni, így célszerű a globális hálót választanom. A “Global Mesh” parancsot kiválasztva beállítható a hálósűrítés mértéke. Vizsgálatomhoz közepes mértékű hálósűrítést alkalmazok, mely már elég sűrű a viszonylag kis sebességű áramlás megfelelő lemodellezéséhez, azonban lényegesen gyorsabb idő alatt lefuttatható, mint egy nagyobb sűrítés, így akár több szimuláció is elvégezhető rövid idő alatt.

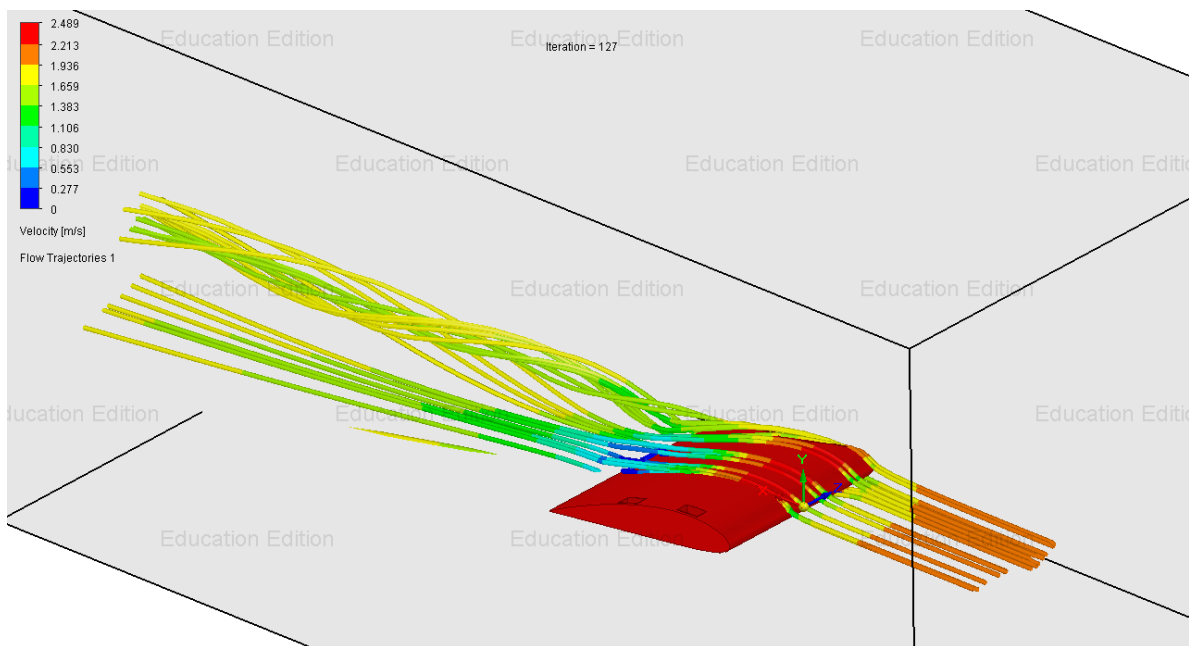
Az összes szükséges beállítás elvégzése után a “Run” parancs segítségével futtatható a szimuláció, mely elkészülte után lesz lehetőségünk különböző vizsgálatok elvégzésére.

Esetünkben a szimuláció 251 615 cellára bontja a vizsgálati térrészt, és ezekre képezi le az áramlást.

### 4.3 A számítógépes vizsgálat eredményei

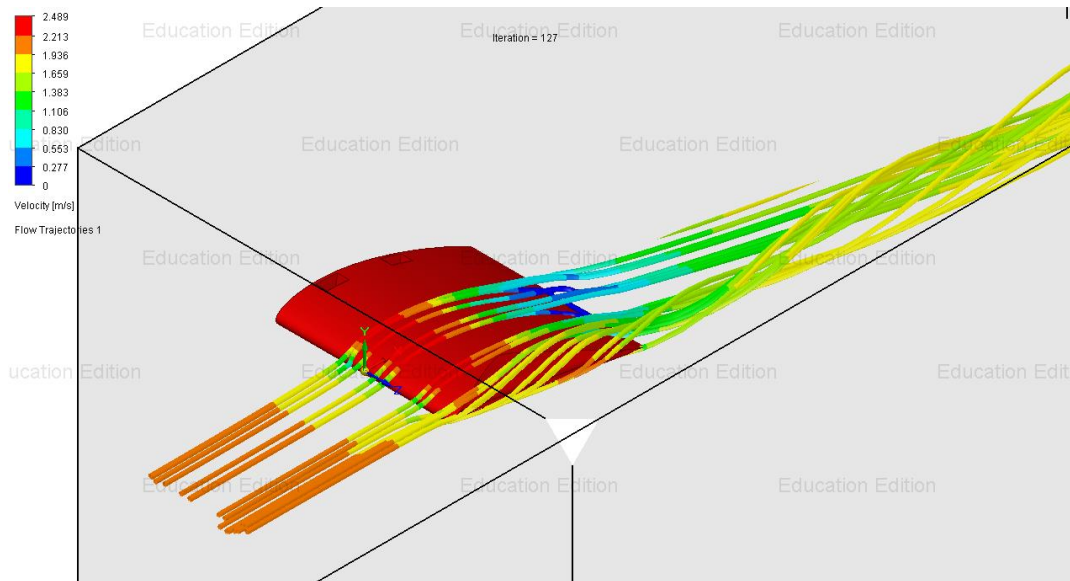
A szimuláció futtatása után az „áramlás nyomvonalai” parancs segítségével tehetjük láthatóvá a közeg áramlását.

A 21. ábrán a szimuláció eredménye látható. Jól megfigyelhető a szárny mögött kialakuló örvénylés, hasonlóan a szélcsatornás vizsgálatok során tapasztaltakhoz.



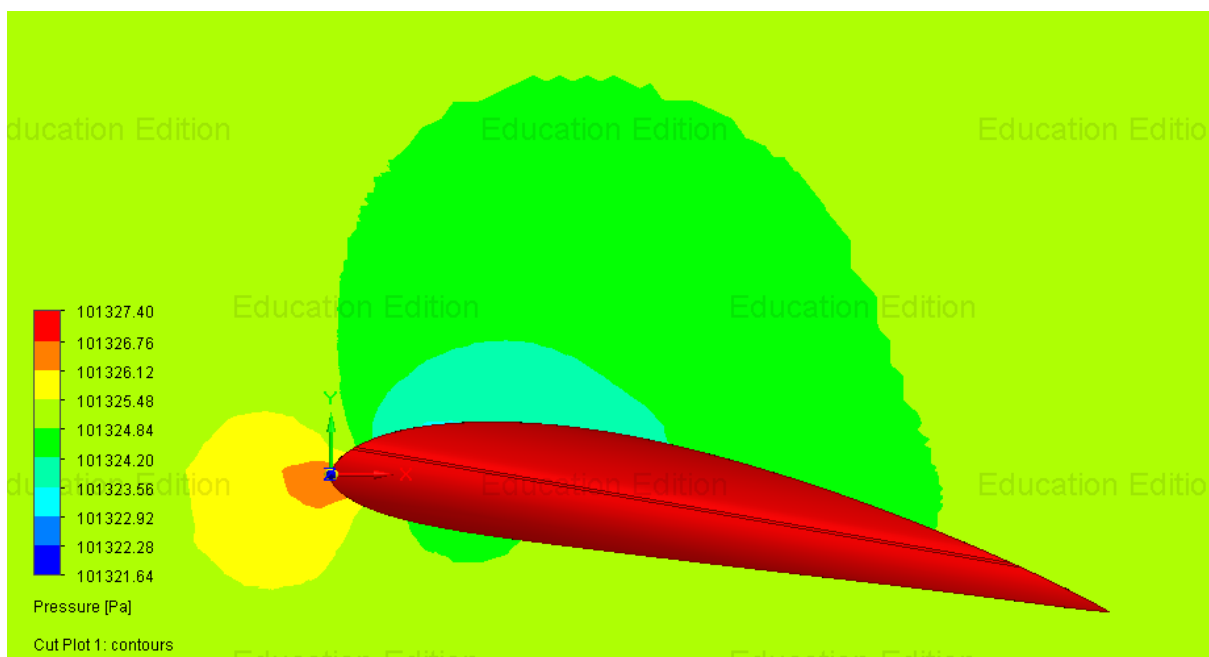
21. ábra: Szélcsatornás szimuláció segítségével láthatóvá tett szárny körüli áramlás

Ha az áramlást a másik irányból is megvizsgáljuk (22. ábra), megfigyelhető a szárnyvégen létrejövő feláramlás, melyet a 2.2.5 fejezetben ismerttettem.



22. ábra: Szárnyvégi feláramlás kialakulása

Az ábrán jól megfigyelhető a felhajtóerő kialakulásához szükséges nyomáskülönbséget előidéző, megnövekedett sebességű áramlás a szárny felső és első részén. A skálából leolvassva ezen a területen 2.5 m/s körüli áramlás alakul ki, azaz 0.5 m/s-mal felgyorsul a közegetáramlási sebességhez képest. Az ezáltal a szárny felső részén létrejött nyomásesés a 23. ábrán figyelhető meg.



23. ábra: Szárny körül ható légnyomás

A 22. ábrán továbbá megfigyelhető egy terület a szárny felső felén, a kilépő él közelében, ahol az áramlási sebesség nagyon, közel nullára lassul. Ez azért következik be, mert az alacsony áramlási sebesség miatt az áramvonalak nem képesek már tovább követni a szárny görbületét, és egy adott ponton elválnak a szárnytól.

Repülés közben a szárny körül lamináris áramlás tapasztalható, azonban a sebesség csökkenésével elérhető egy olyan sebesség, amely során bekövetkezik a fent említett jelenség, és a szárny mögött turbulens áramlás alakul ki, mely a 24. ábrán figyelhető meg. Ez az átési sebesség [33], melynél kisebb sebességgel a repülőgép nem képes a levegőben maradni.



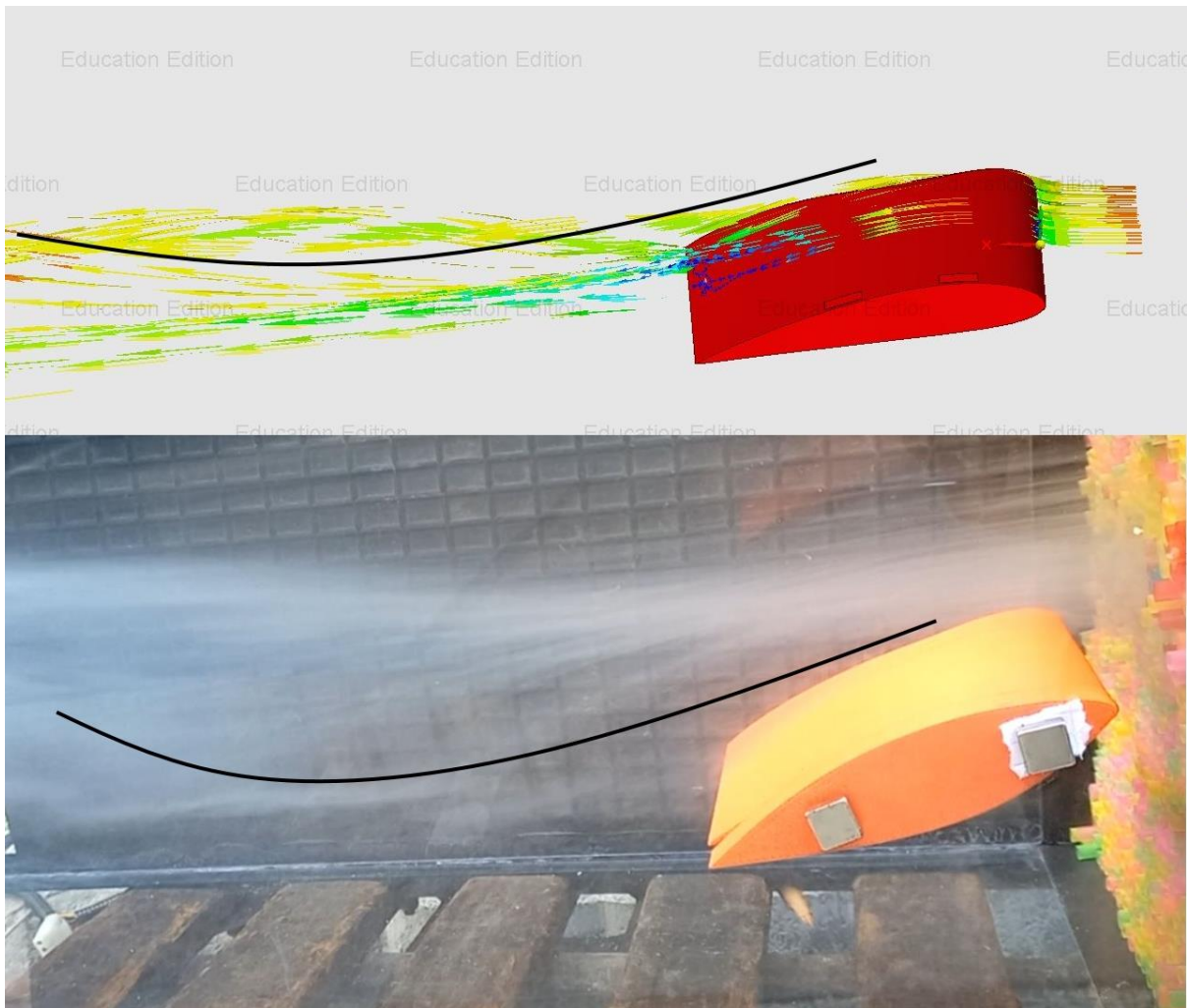
24. ábra: Átési sebesség elérése után kialakuló turbulens áramlás [34]

#### 4.4 Eredmények kiértékelése

A fent tárgyaltak alapján megállapítható, hogy a FloEFD programmal végzett szimulációk hasonló eredményeket produkálnak, mint amelyek a valóságban is megtörténnek, azonban a pontosabb következtetés levonása érdekében szükséges a kapott eredményeket összehasonlítani a valós, szélcsatornás szimuláció során tapasztaltakkal. Az összehasonlíthatóság érdekében szükséges a számítógépes szimuláció során a szélcsatornás szimulációval azonos körülmények és feltételek beállítása. Így mindkét esetben a beesési szög 10 fok, a közeg áramlási sebessége 2 m/s, a környezeti nyomás és hőmérséklet pedig a standard léköri állapot, azaz 101325 Pa és



20°C. A füsttel láthatóvá tett szélcsatornás áramlásról készült képet, illetve a számítógépes szimulációról készített képet egymás alá helyezve könnyedén összehasonlítható a két eredmény (25. ábra). Mivel az örvénylés kontúrjait nem lehet egyértelműen meghatározni, ezért az eredmény számolással nem igazolható, csak vizuális módszerekkel. Így ha mindkét esetben sikerül megtalálnunk ugyanazt az áramvonalat, ezeket összehasonlítva megállapíthatjuk az azonosságot.



25. ábra: Áramvonalak összehasonlítása

Mivel a két áramvonal közel azonosnak tekinthető, így megállapítható, hogy a FloEFD képes valós eredményeket megteremteni. Ugyanakkor, a szélcsatorna a benne elérhető alacsony sebesség, illetve a mérési nehézségek miatt nem alkalmas a kísérletek hatékony elvégzésére, ezért a továbbiakban a számítógépes szimuláció használata az indokolt a legmegfelelőbb szárnyfűl megtalálása érdekében. Számítógépes szimuláció segítségével könnyen és gyorsan

vizsgálható tetszőleges számú szárnyvég kialakítás. Amelyik kialakítás a szimulációk alapján a legjobbnak tűnik, azt természetesen le kell gyártani és szélcsatornában végzett kísérletekkel is igazolni kell annak megfelelőségét.

Fontos megjegyezni, hogy a numerikus áramlási szimulációknak nagyon sok buktatója, kényes pontja van. Ezért a szimulációk során kapott eredményeket validálni szükséges [35].

## 5. Különböző szárnyfülek vizsgálata

A vizsgálati nehézségek kiküszöbölése után érdemes különböző kialakítású szárnyvégeket vizsgálni annak érdekében, hogy bebizonyosodjon, melyik működik a leghatékonyabban, melyikkel lehet a legnagyobb légellenállás-csökkentést elérni. Ez a FloEFD-ben számszerűleg is mérhető.

A fentebb említett átesési sebesség kiküszöbölése végett a vizsgálatokat ezúttal 20 m/s-os áramlási sebességgel végzem (2. táblázat). Mivel a valóságban alkalmazott szárnyfülek nem, vagy csak igen nehezen hozzáférhetőek, illetve 3D CAD modell sem áll rendelkezésre hozzájuk, így az ún. reverse engineering módszerrel megpróbálok bemodellezni néhányat a leggyakrabban előforduló szárnyvégkialakítások közül, és ezekkel végzem további vizsgálataimat.

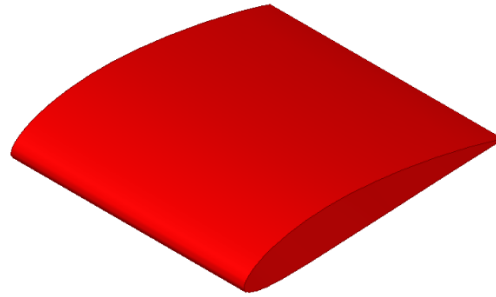
2. táblázat: Összehasonlító vizsgálat beállítási paraméterei

Feltétel	Érték	Mértékegység
Áramlási sebesség	20	m/s
Környezeti nyomás	101325	Pa
Környezeti hőmérséklet	293,2	K
Beesési szög	0	°

### 5.1 Szárnyvég kialakítás nélküli profil

A valóságban ugyan egyetlen repülőgép szárny sem rendelkezik a 26. ábrán látható kialakítással, az összehasonlítás végett mégis szükséges ezt is vizsgálnunk.

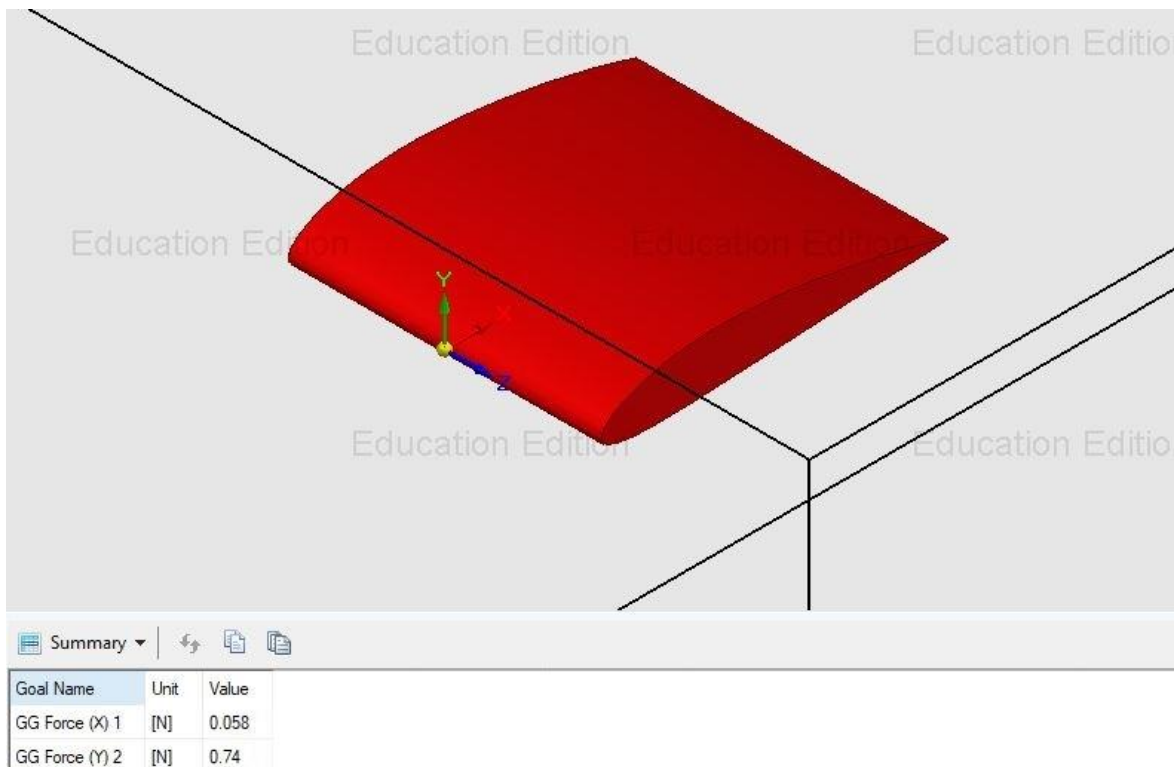




26. ábra: Szárnyvég kialakítás nélküli szárny

A 27. ábra a mérési eredményeket szemlélteti. A vizsgált modell méretéhez és tömegéhez képest reális  $F_x = 0,058$  N és  $F_y = 0,74$  N értékeket kaptam eredményként. Ezek segítségével egyszerűen kiszámítható a siklószám [36], mely a repülőgép gazdaságosságának a mutatójaként is értelmezhető.

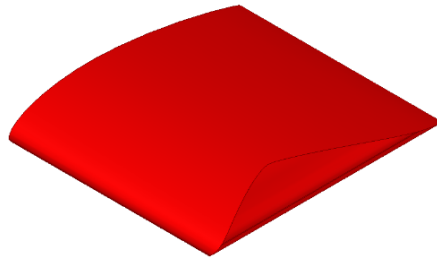
$$\frac{F_y}{F_x} = \frac{0,74}{0,058} = 12,75:1 \quad (9)$$



27. ábra: Mérési eredmények a szárnyvég nélküli szárnykialakítás esetében

## 5.2 Lekerekített végű profil

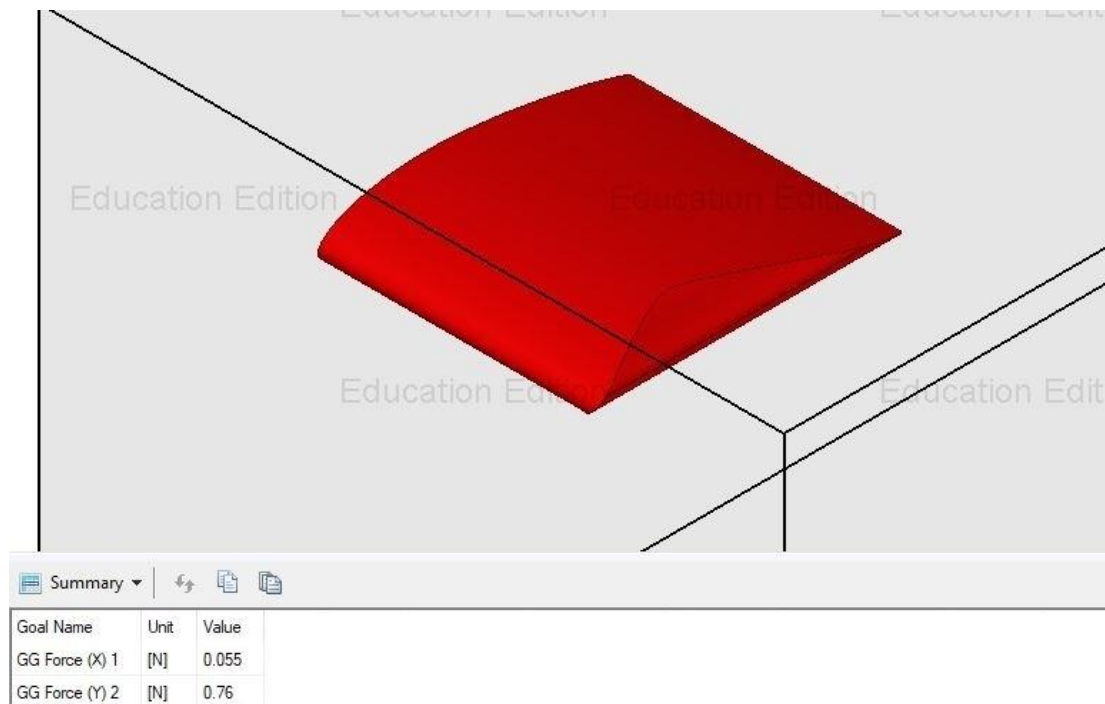
Napjainkban a 28. ábrán látható kialakítás már nem annyira jellemző, mivel hatékonyságát tekintve nem túl kedvező, azonban régebbi repülőkön még találkozhatunk hasonlóval, például az Antonov An-2-es típuson.



28. ábra: Lekerekített szárnyvégű profil

A 29. ábrán ezzel a szárnyvég kialakítással végzett vizsgálatok mérési eredményei láthatóak.  $F_x = 0,055$  N és  $F_y = 0,76$  N. Megfigyelhető, hogy az előzőleg vizsgált szárnyhoz képest a felhajtóerő minimálisan nő, míg a légellenállás minimálisan csökken, így a siklósám:

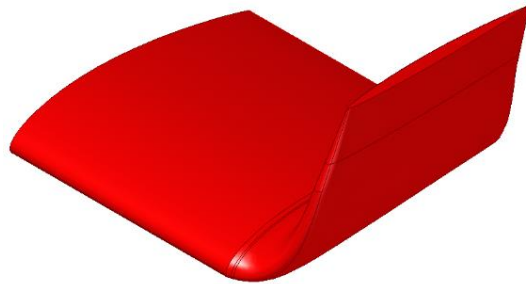
$$\frac{F_y}{F_x} = \frac{0,76}{0,055} = 13,81:1 \quad (10)$$



29 ábra: Mérési eredmények a lekerekített végű profil esetében

### 5.3 Winglet/Sharklet

Napjaink legelterjedtebb szárnyvég kialakítása, mely CAD modellje a 30. ábrán látható. A Sharklet bevezetése az 1980-as években kezdődött az Airbus A320-as típuscsaládon, majd a hasonló geometriai jellemzőkkel rendelkező Winglet a B737NG típuscsaládon is megjelent.



30. ábra: Winglet/Sharklet jellegű szárnyfűl

$F_x = 0,05 \text{ N}$  és  $F_y = 0,76 \text{ N}$ . Ebben az esetben a felhajtóerőben nem keletkezett érdemi változás a lekerekített végű modellhez képest, a légellenállás azonban csökkent.

$$\frac{F_y}{F_x} = \frac{0,76}{0,05} = 15,2:1 \quad (11)$$

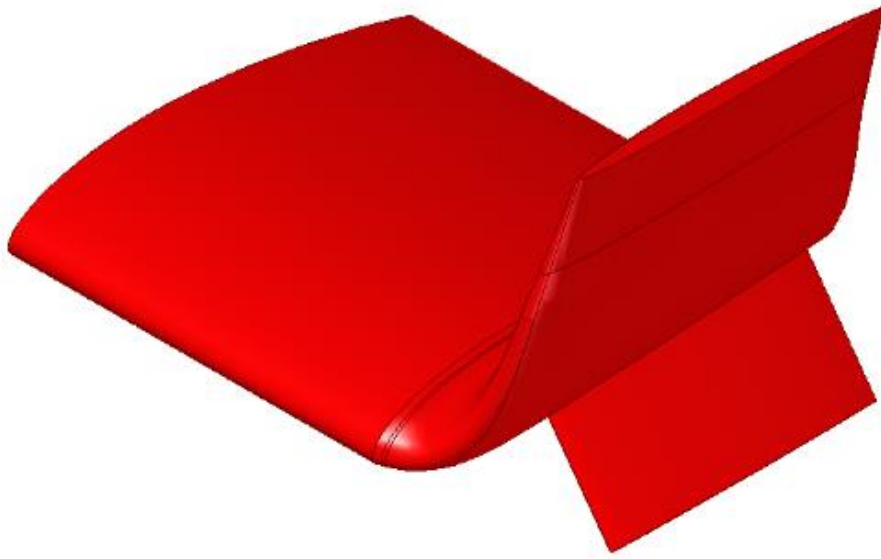
A szárnyfűl nélküli és a szárnyfűlrel rendelkező szárnyak esetében kapott siklószámot összehasonlítva megállapítható, hogy melyik kialakítás bizonyult hatékonyabbnak:

$$\frac{15,2}{13,81} \cdot 100 = 110\% \quad (12)$$

Azaz a vizsgált profilkok esetében a szárnyfűles szárnyvég 10%-kal rendelkezik jobb siklószámmal, mint a szárnyfűl nélküli, lekerekített szárnyvég. Mivel a siklószám egyenesen arányos az üzemanyagfogyasztással, így kijelenthető, hogy a szélcsatornában igazoltak alapján a szárnyfűl valóban hatékonyan hozzájárul az üzemanyagfogyasztás csökkenéséhez.

### 5.4 Osztott winglet

A fent megjelenített vizsgálatokból láthattuk a szárnyfűlek pozitív hatásait. Azonban érdemes megvizsgálni, hogy a szárnyfűlek közül melyik rendelkezik jobb hatásfokkal. A Boeing állítása szerint [37] a B737MAX típuscsaládon alkalmazott osztott winglet minden idők leghatékonyabb szárnyfűle, melyet polgári repülőgép típusra szereltek. A 31. ábra az általam bemodellezett mását szemlélteti az osztott wingletnek.



31. ábra: Osztott winglet modell

A 32. ábrán szemléltetett eredményekből ezúttal is kiszámolható a siklószám:

$$\frac{F_y}{F_x} = \frac{0,762}{0,05} = 15,24:1 \quad (13)$$

Goal Name	Unit	Value
GG Force (X) 1	[N]	0.050
GG Force (Y) 2	[N]	0.762

32. ábra: Mérési eredmények az osztott winglet esetében

A wingletet az osztott winglettel összehasonlítva:

$$\frac{15,24}{15,2} \cdot 100 = 100,26\% \quad (14)$$

## 5.5 Eredmények összehasonlítása

A négy vizsgált profil esetében kapott mérési eredmények a 3. táblázat segítségével hasonlítható össze.

3. táblázat: Mérési eredmények összehasonlítása

	$F_y$	$F_x$	siklószám	hatásfok
Mértékegység	N	N	-	%
Szárnyvég kialakítás nélkül	0,74	0,058	12,75: 1	100
Lekerekített szárnyvég	0,76	0,055	13,81: 1	108,3
Winglet/Sharklet	0,76	0,05	15,2: 1	119,2
Osztott Winglet	0,762	0,05	15,24: 1	119,5

Megjegyzés: a táblázatban szereplő hatásfok a szárnyvégkialakítással rendelkező profilok szárnyvégkialakítás nélküli profilhoz való hasonlítását szemlélteti.

A 3. táblázatból könnyen megállapítható, hogy a különböző szárnyvég kialakítások nagyban befolyásolják a siklószám mértékét, már az egyszerű, lekerekített szárnyvég is jobb értéket ért el, mint a szárnyvégkialakítás nélküli profil. Szárnyfülek alkalmazásával azonban ugrásszerű javulást lehet elérni a felhajtóerő/légellenállás viszonyzámban, ezáltal az üzemanyagfogyasztásban is. Továbbá megfigyelhető, hogy a különböző winglet és sharklet kialakítások között minimális az eltérés, azonban a geometriai jellemzők kalibrálásával akár még jobb eredmény is elérhető.

## 6. Összegzés, következtetések, jövőkép

### 6.1 Kutatás folyamatának és eredményeinek összegzése

Kutatásom során célként tűztem ki, hogy különböző kialakítású szárnyfüleket vizsgálok meg annak érdekében, hogy a kapott mérési eredmények kiértékelésével megállapíthassam, valóban pozitív hatással van-e a repülőgépek üzemanyagfogyasztására a szárnyfülek alkalmazása.

Vizsgálatom elkezdése előtt azonban szükséges volt definiálnom a felhajtóerő és a légellenállás viszonyát, illetve azt, hogy milyen negatív jelenség megy végbe a repülőgépek szárnyvégein. Az indukált légellenállás meghatározása után szükségessé vált kiválasztani a vizsgálatokhoz alkalmazandó módszert is, mely először valós, szélcsatornában előállított körülmények között

tesztelni kívánt, additív gyártástechnológiával előállított próbatestekkel zajlott volna, azonban a szélcsatorna alacsony teljesítménye és a mérési nehézségek miatt ajánlott lett más megoldás keresése. Így esett a választás a számítógépes szimulációra, mely Solid Edge-ben a FloEFD beépülő modul segítségével végezhető. Ennek a hatékonysága azonban megkérdőjelezendő, így a mérési eredményeket validálni szükséges. Mivel a szárnyvégi örvénylés mértéke számszerűleg nem határozható meg, ezért vizuális módszerekkel vizsgáltam a számítógépes szimuláció hatékonyságát, mely megfelelőnek bizonyult.

Ezek után megkezdhettem a különböző szárnyvég kialakításokkal végzett vizsgálatokat, melyek eredményeként elmondható, hogy a szárnyfüllel ellátott szárnyak siklószáma sokkal jobb, ezáltal a repülőgép üzemanyagfogyasztása és CO<sub>2</sub> kibocsátása is alacsonyabb lesz.

## **6.2 Jövőkép**

A légitársasági iparág folyamatos, dinamikus fejlődése miatt az újabb, gazdaságosabb technológiák bevezetésére mindig szükség lesz. A szárnyfűl kialakítások viszonylag új eszköznek számítanak a repülőgépek gazdaságosabbá tételében, a gyártók folyamatosan dolgoznak a fejlesztésükön, azonban napjainkra ez az ágazat még messze nem érte el a lehető legjobb hatásfokot.

Kutatásom folytatásaként szeretnék egy ennél is átfogóbb tanulmányt végezni a jelenlegi szárnyvégek hatékonyságát illetően, megvizsgálni a legjobb kialakítások paramétereinek – mint például különböző dőlésszögek és lekerekítések – hatásait, illetve azt, hogy ezek esetleges változtatása milyen következményekhez vezet. Továbbá szeretném a szárnyfüleket különböző repülési helyzetekben – mint például eltérő sebesség, állásszög – megvizsgálni. Az eredmények kiértékelése után szeretnék belekezdeni egy olyan innovatív kialakítású szárnyfűl fejlesztésébe, mely akár a napjaink legjobb hatékonyságú szárnyfűlénél is jobb eredményekkel rendelkezik majd.

## 7. Hivatkozások

---

- [1] Crouch, Tom D.. "Otto Lilienthal". Encyclopedia Britannica, 19 May. 2022, <https://www.britannica.com/biography/Otto-Lilienthal>
- [2] Crouch, Tom D.. "Lilienthal standard glider". Encyclopedia Britannica, 23 Oct. 2007, <https://www.britannica.com/topic/Lilienthal-standard-glider>
- [3] Restás Á.: Az UAV közszolgálati alkalmazásai. Pilóta nélküli repülés profiknak és amatőröknek. Szerk. Palik Mátyás. Nemzeti Közszolgálati Egyetem, 2013. 241-280. ISBN 978-615-5057-64-9.
- [4] <http://www.vilaglex.hu/Lexikon/Html/BernTorv.htm>
- [5] Malik, Abdul & Uddin, Naseem & Haq, Syed & Khan, M. & Hayat, Sikandar. (2017). Modeling and Simulation of a Three-Dimensional Adjustable Horizontal Axis Wind Turbine Blade, Using a Commercial Computational Fluid Dynamics (CFD) Code. V007T09A077. 10.1115/IMECE2017-70096.
- [6] <https://www.skybrary.aero/articles/flaps>
- [7] <https://www.tmas.es/blog/mecanica-de-aviones/flaps-que-son-y-para-que-sirven/>
- [8] <https://physics.info/drag/>
- [9] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/friction-drag-coefficient>
- [10] Peadeep Kumar, Unit I TYPES OF DRAGS, 2021
- [11] <https://www.toppr.com/guides/physics-formulas/drag-force-formula/>
- [12] <https://www.skybrary.aero/articles/induced-drag#:~:text=Induced%20Drag%20is%20an%20inevitable,pressure%20outside%20the%20wing%20tip.>
- [13] Nicolas Shelton, How Induced Drag Works, 2021
- [14] Omar Kardoudi, Planes causing beautiful atmospheric effects, 2015
- [15] Sy, M.S.; Abuan, B.E.; Danao, L.A.M. Aerodynamic Investigation of a Horizontal Axis Wind Turbine with Split Winglet Using Computational Fluid Dynamics. *Energies* **2020**, *13*, 4983. <https://doi.org/10.3390/en13184983>
- [16] <https://rahmanfahd.medium.com/evolution-of-winglets-8d5b3ba5a929>
- [17] GKN AEROSPACE MANUFACTURES FIRST WING COMPONENTS FOR AIRBUS' "WING OF TOMORROW" PROGRAMME <http://www.avimeter.com/technology%20/gkn-aerospace-manufactures-first-wing-components-for-airbus-wing-of-tomorrow-programme>

- 
- [18] Britannica, The Editors of Encyclopaedia. "wind tunnel". Encyclopedia Britannica, 7 Jun. 2018, <https://www.britannica.com/technology/wind-tunnel>. Accessed 29 October 2022.
- [19] <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tunoret.html>
- [20] <https://solidedge.siemens.com/en/>
- [21] <https://zortrax.com/3d-printers/m200-plus/>
- [22] <https://www.creativemechanisms.com/blog/everything-you-need-to-know-about-abs-plastic>
- [23] Britannica, The Editors of Encyclopaedia. "acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer". *Encyclopedia Britannica*, 20 Mar. 2019, <https://www.britannica.com/science/acrylonitrile-butadiene-styrene-copolymer>
- [24] Sithiprumnea Dul, Brenda J. Alonso Gutierrez, Alessandro Pegoretti, Jaime Alvarez-Quintana, Luca Fambri, 3D printing of ABS Nanocomposites. Comparison of processing and effects of multi-wall and single-wall carbon nanotubes on thermal, mechanical and electrical properties, *Journal of Materials Science & Technology*, Volume 121, 2022
- [25] <https://all3dp.com/2/cura-support-settings-optimize-your-supports/>
- [26] <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=clarky-il>
- [27] <https://www.jennychem.com/blogs/news/guide-on-fogging-machine#:~:text=A%20fluid%2Dbased%20fogger%20machine,of%20fog%20lingers%20around%20longer>.
- [28] <https://www.omega.com/en-us/resources/anemometers>
- [29] E.L. Houghton, P.W. Carpenter, Steven H. Collicott, Daniel T. Valentine, Chapter 7 - Wing Theory, Editor(s): E.L. Houghton, P.W. Carpenter, Steven H. Collicott, Daniel T. Valentine, *Aerodynamics for Engineering Students (Seventh Edition)*, Butterworth-Heinemann, 2017, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081001943000079>
- [30] Surface Quality Enhancement of Fused Deposition Modeling (FDM) Printed Samples Based on the Selection of Critical Printing Parameters - Mercedes Pérez , Gustavo Medina-Sánchez, Alberto García-Collado, Munish Gupta and Diego Carou, 2018
- [31] <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/simcenter/floefd.html>
- [32] Heteyi Csaba, KELLŐEN SŰRŰ A HÁLÓM? IV. – LOKÁLIS HÁLÓSŰRÍTÉS FLOEFD-N BELŰL, 2021
- [33] CHAPTER 18 - FIFTY-TWO ADDITIONAL APPLICATIONS, Editor(s): Thomas Szirtes, Pál Rózsa, *Applied Dimensional Analysis and Modeling (Second Edition)*, Butterworth-Heinemann, 2007, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123706201500241>



---

[34] Podolan Koss, Mariana & Andrade, João Pedro & Alves, Luiz & Lima, Luiz. (2020). Numerical analysis of the flow's stability resulting from the propeller's motion on an AeroDesign aircraft. *Mathematics in Engineering, Science and Aerospace MESA*. 11. 513-522.

[35] Heteyi, C., Molnár, I., & Szlivka, F. (2020). Comparing different CFD software with NACA 2412 airfoil, *Progress in Agricultural Engineering Sciences*, 16(1), 25-40. Retrieved Aug 9, 2022, from <https://akjournals.com/view/journals/446/16/1/article-p25.xml> , <https://doi.org/10.1556/446.2020.00004>

[36] Craig MacEachern, İlhami Yıldız, 1.16 Wind Energy, Editor(s): Ibrahim Dincer, *Comprehensive Energy Systems*, Elsevier, 2018, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128095973001188>

[37] <https://www.boeing.com/commercial/737max/737-max-winglets/>