



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
KÖZLEKEDÉSMÉRNÖKI ÉS JÁRMŰMÉRNÖKI KAR
REPÜLŐGÉPEK ÉS HAJÓK TANSZÉK

TRAINER 60 típusú UAV numerikus áramlástani vizsgálata

TDK dolgozat

"A dolgozat bemutatását a TÁMOP - 4.2.2.B-10/1--2010-0009 "Új tehetséggondozó programok és kutatások a Műegyetem tudományos műhelyeiben című program támogatta."

Készítette: Kóti Dávid

Szak: Járműmérnöki MSc

Évfolyam: 1. évfolyam

Témavezető: Dr. Veress Árpád egyetemi docens

Dr. Gáti Balázs egyetemi docens

BUDAPEST

2012

TRAINER 60 típusú UAV numerikus áramlástanai vizsgálata

Kóti Dávid, Járműmérnöki MSc 1. évfolyam

david.koti@hotmail.com

Konzulensek: **Dr. Veress Árpád, Dr. Gáti Balázs**

Összefoglalás

A fő célja a jelen munkának egy komplett numerikus analízis készítése abból a célból, hogy megvizsgáljam egy pilótánélküli repülőgép (UAV) körül kialakuló áramlási viszonyokat. Napjainkban a numerikus analízis a műszaki élet számos területén nagymértékben elterjedt, mivel a modern tervezési folyamatok alapvető összetevője, mely hatékony eszköz lehet a költséges és el nem végezhető kísérletek helyettesítésére, de hangsúlyozandó, hogy a szimuláció sosem válthatja ki a mérést. Eredetileg a nukleáris és a repülőipar számára fejlesztették ki, ennek kapcsán vizsgáltam egy modellrepülőgépet, amivel már korábban elvégeztek repülési méréseket. A munkám során a repülőgép modellt és az ehhez tartozó szimulációkat készítettem el. Kiszámoltam a repülőgép körül kialakuló áramlást széles sebesség és állásszög tartományban, valamint megvizsgáltam a különböző hálótípusok és turbulencia modellek hatását. Legvégül ismertettem azokat a továbblépési lehetőségeket, melyek elsősorban a repülőgép ellenállás tényezőjének pontosítására és további számítására irányulnak.

Kulcsszavak: UAV, numerikus áramlástan, hálótípusok, turbulencia modellek, repülőgép polárisa

CFD analyses of the Trainer 60 type aircraft

Abstract

The main goal of the present study is to complete a CFD (Computational Fluid Dynamics) analyses to determine flow field around an unmanned aerial vehicle (UAV). Nowadays the numerical analysis is becoming more and more important in many fields of the engineering sciences, as an essential contribution to the modern design processes that provide an efficient possibility for substituting expensive and not achievable tests. However, it is important to note that the measurements cannot be replaced by the simulation completely. Originally, the CFD was developed for the nuclear and aircraft industry and it was used also in the present work. Several models and simulations have been created and performed in different angles of attack and compared with the real test results. Different mesh types and turbulence models have been tested in the present work also. Finally, the next steps were to define the next steps of the work, which are the improvements of the aircraft drag coefficient calculation methods and the applications and validations of other theories.

Keywords: UAV, computational fluid dynamics, mesh types, turbulence models, aircraft polar curve

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	10
1.1. A dolgozat célkitűzése	10
1.2. TRAINER 60 típusú UAV	10
2. Numerikus áramlástan elméleti háttere	13
2. 1. Numerikus áramlástan rövid ismertetése	13
2. 2. Alkalmazott áramlástani összefüggések	13
2. 2. 1. Alapegyenletek	13
2. 2. 2. Alapegyenletek megoldása	14
2. 2. 3. Geometria diszkretizálása	15
2. 2. 4. Az alapegyenletek diszkretizálása	15
2. 2. 5. A diszkretizált egyenletek megoldása	16
2. 2. 6. Turbulencia modellek, kiegészítő egyenletek	18
3. Gyakorlati megvalósítás	22
3.1. Mérés és számítás	22
3.2. Geometria kialakítása	23
3.3. Geometriai diszkretizáció	24
3.4. A szimuláció előkészítése	28
3.5. Konvergencia görbék	30
4. Eredmények	34
4.1. Hálóparaméter érzékenységi vizsgálat	34
4.2. Sebességérzékenységi vizsgálat	35
4.3. Turbulencia modellek hatása	36
4.4 Mérés és számítás összehasonlítása	42
5. Tovább lépési lehetőségek	44
6. Összefoglalás	45
7. Felhasznált irodalom	46
8. Mellékletek	47
1. sz. melléklet	47

2. sz. melléklet	47
3. sz. melléklet	48
4. sz. melléklet	48
5. sz. melléklet	48

ÁBRAJEGYZÉK

1. ÁBRA TRAINER 60.....	11
2. ÁBRA A REPÜLŐGÉPEN ALKALMAZOTT MŰSZEREK [2]	11
3. ÁBRA A HEXAÉDER, TETRAÉDER, ÉK ÉS PIRAMIS TÍPUSÚ ELEMÉK [6]	15
4. ÁBRA A KONZISZTENCIA, A STABILITÁS ÉS A KONVERGENCIA SZIMBOLIKUS ÁBRÁZOLÁSA [3]	17
5. ÁBRA MÉRÉSI EREDMÉNYEK.....	22
6. ÁBRA AZ EGYSZERŰSÍTENDŐ RÉSZEK	23
7. ÁBRA AZ ELKÉSZÍTETT MODELL	24
8. ÁBRA REPÜLŐGÉP ORRÉSZ ÉS A SZÁRNY-TÖRZS KAPCSOLAT	24
9. ÁBRA AZ OCTREE ÉS A DELAUNAY MÓDSZEREK.....	25
10. ÁBRA AZ ELKÉSZÍTETT HÁLÓ	26
11. ÁBRA A NUMERIKUS ÁRAMLÁSTANI MODELL AZ ALKALMAZOTT PEREMFELTÉTELEKKEL.....	29
12. ÁBRA KONVERGENCIA GÖRBE A FOLYTONOSSÁG ÉS A MOZGÁSMENNYISÉG-MEGMARADÁSRA.....	31
13. ÁBRA KONVERGENCIA GÖRBE AZ ENERGIA MEGMARADÁSRA	31
14. ÁBRA KONVERGENCIA GÖRBE A TURBULENCIA MODELL PARAMÉTEREIRE.....	32
15. ÁBRA KONVERGENCIA GÖRBE A WALL SCALE EQUATION ÉRTÉKEIRE.....	32
16. ÁBRA KONVERGENCIA GÖRBE A TÖMEGÁRAM EGYENSÚLY ÉS ENERGIA EGYENSÚLY ÉRTÉKEIRE	33
17. ÁBRA AZ ELLENÁLLÁS TÉNYEZŐ ÉS AZ Y+ AZ ELEMSZÁM FÜGGVÉNYÉBEN	35
18. ÁBRA SEBESSÉG ÉRZÉKENYSÉG.....	36
19. ÁBRA SZÁMÍTÁSI EREDMÉNYEK.....	37
20. ÁBRA NYOMÁSELOSZLÁS 0°-OS ÉS 12°-OS ÁLLÁSSZÖG ESETÉBEN.....	38
21. ÁBRA SEBESSÉGELOSZLÁS 0°-OS ÉS 12°-OS ÁLLÁSSZÖG ESETÉBEN	39
22. ÁBRA TURBULENS KINETIKAI ENERGIA	39
23. ÁBRA SZÁRNYVÉG ÖRVÉNYEK "SWIRLING STRENGTH" = 0.02 ESETÉN A= 0° ÁLLÁSSZÖG MELLETT.....	40
24. ÁBRA SZÁRNYVÉG ÖRVÉNYEK "SWIRLING STRENGTH" = 0.02 ESETÉN, A= 12° ÁLLÁSSZÖG MELLETT.....	40
25. ÁBRA SZÁRNYVÉGI NYOMÁSKIEGYENLÍTŐDÉS.....	41
26. ÁBRA MÉRÉS ÉS SZÁMÍTÁS	42
27. ÁBRA NYOMÁSELOSZLÁS -5°-0°-OS ÁLLÁSSZÖG TARTOMÁNYBAN.....	49
28. ÁBRA NYOMÁSELOSZLÁS 4°-12°-OS ÁLLÁSSZÖG TARTOMÁNYBAN.....	50
29. ÁBRA SEBESSÉGELOSZLÁS -5°-0°-OS ÁLLÁSSZÖG TARTOMÁNYBAN	51
30. ÁBRA SEBESSÉGELOSZLÁS 4°-12°-OS ÁLLÁSSZÖG TARTOMÁNYBAN.....	52
31. ÁBRA NYOMÁSELOSZLÁS -5°-0°-OS ÁLLÁSSZÖG TARTOMÁNYBAN	53
32. ÁBRA NYOMÁSELOSZLÁS 4°-12°-OS ÁLLÁSSZÖG TARTOMÁNYBAN.....	54
33. ÁBRA SEBESSÉGELOSZLÁS -5°-0°-OS ÁLLÁSSZÖG TARTOMÁNYBAN	55
34. ÁBRA SEBESSÉGELOSZLÁS 4°-12°-OS ÁLLÁSSZÖG TARTOMÁNYBAN.....	56

Táblázatjegyzék

1. TÁBLÁZAT A K- E MODELL KONSTANS EGYÜTTHATÓI.....	19
2. TÁBLÁZAT A $\Delta Y+$ ÉRTÉKEI.....	28
3. TÁBLÁZAT PEREMFELTÉTELEK.....	29
4. TÁBLÁZAT ELLENÁLLÁS TÉNYEZŐ ÉS AZ Y+ AZ ELEMSZÁM FÜGGVÉNYÉBEN	47
5. TÁBLÁZAT REPÜLÉSI SEBESSÉG ÉS AZ ELLENÁLLÁS TÉNYEZŐ	47
6. TÁBLÁZAT AZ ELLENÁLLÁS ÉS FELHAJTÓERŐ TÉNYEZŐ ÉRTÉKEI	48
7. TÁBLÁZAT A MÉRÉSI EREDMÉNYEK	48

Jelölésjegyzék

Latin betűk, jelölések:

A :	keresztmetszet;
a :	hangsebesség;
C_v :	állandó térfogaton vett fajhő;
c :	sebesség vektor;
D :	deriválttenzor;
E :	egység mátrix
e :	egység vektor
F :	idegen test által kifejtett erő;
g :	gravitációs gyorsulás;
g_{II}	nem potenciális erőter;
k :	hővezetési tényező;
k :	turbulens kinetikai energia;
n :	normálvektor;
p :	nyomás;
q :	forrás;
R :	univerzális gázállandó;
r :	helyvektor;
S :	súrlódó erők;
T :	hőmérséklet;
T :	közeg által kifejtett erő;
t :	idő
U :	potenciális energia;
u :	kerületi sebesség vektor;
u :	belső energia;
V :	térfogat;
∇ :	Nabla operátor

Görög betűk, jelölések:

α :	állásszög;
β :	konstans
ε :	térfogati hőforrás;
ε :	turbulens disszipációs ráta
μ :	dinamikai viszkozitás;
ν :	kinematikai viszkozitás;
Π :	feszültségtenzor;
ρ :	sűrűség;
σ :	normálfeszültség;
$\sigma_{\omega 2}$:	konstans
τ :	csúsztató feszültség;
ω :	turbulens frekvencia

Indexek:

D:	drag (ellenállás)
i:	indukált
L:	lift (felhajtóerő)
ref:	referencia;
rep.	repülő,
sz:	szárny
T:	transzponált;
t:	turbulens

1. Bevezetés

1.1. A dolgozat célkitűzése

A dolgozatomban a Dr. Gáti Balázs által műszerezett TRAINER 60 típusú repülőgép numerikus áramlástechnikai vizsgálatát kívánom elvégezni, figyelembe véve a továbbfejlesztés lehetőségét. A repülőgép a Repülőgépek és Hajók Tanszék tulajdonában áll, különféle mérésekhez és kutatásokhoz használják. A tanszéken elvégzett korábbi számítások, mérések eredményeivel kívánom összehasonlítani a numerikus szimulációt, ami során a repülőgép körüli áramlási teret egy teljes háromdimenziós analízisnek vetek alá. A vizsgálatot egy kereskedelmi forgalomban kapható, ANSYS nevű numerikus áramlástan szoftverrel végeztem.

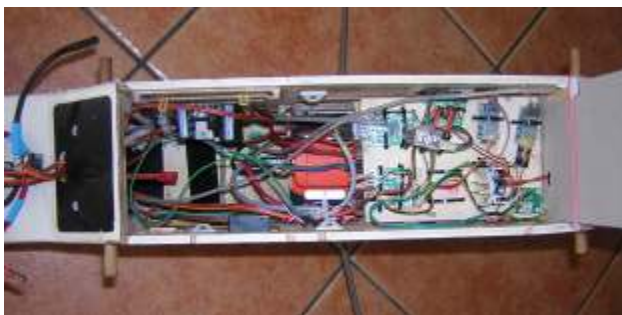
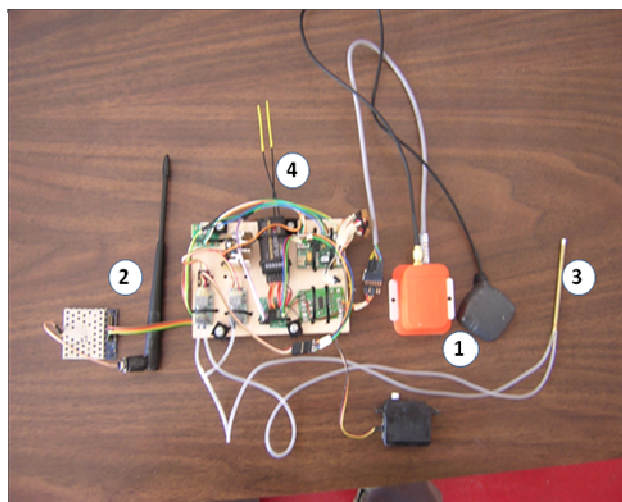
1.2. TRAINER 60 típusú UAV

Az UAV-Unmanned Aerial Vehicle (pilóta nélküli légi jármű) polgári és elsősorban katonai célra alkalmazott repülő eszköz. Elődeik a hidegháború során az irányítható rakétákból kifejlesztett, autonóm navigációra képes cirkáló rakéták voltak. Azóta beszélünk robotrepülőgépekről, mióta ezek az eszközök vissza is tudnak térni, és újra fel lehet őket használni, mint egy hagyományos kisrepülőgépet. Ezt az előrelépést a mikroelektronika és a kompozit technológia tették lehetővé. Ez a két technológia olyan rohamosan fejlődött, hogy az autonóm repülés pár éven belül megvalósítható lett polgári célokra is elérhető árszinten. A kihívás ugyanakkor megmaradt a szabályozástechnika, az érzékelők és a rendszerszintű optimalizálás területén. Ez pedig nagyon csábító lehetőség egyetemek és más kutatás-fejlesztéssel foglalkozó intézmények számára [1]. A következő képen a felműszerezett, repülésre kész repülőgép látható (1. ábra).



1. ábra TRAINER 60

A repülőgép elektromos meghajtású, alkalmas hallgatói mérésekre, szimulációkra, mivel egyszerűbb geometriája miatt, könnyebben elvégezhetőek a kívánt számítások és a szimulációk. A modellt BHE Hungary Kft. bocsájtotta a tanszék rendelkezésére.



2. ábra A repülőgépen alkalmazott műszerek [2]

A repülőgép irányítását a Paparazzi robotpilóta rendszer végzi. A robotpilótához kapcsolódó legfontosabb érzékelő egy XSENS MTi-G típusú egység (2. ábra/1), amely méri a tér mindhárom irányában a gyorsulás, a szögsebesség és a földi mágneses tér nagyságát, illetve egy GPS modult is tartalmaz. Ezeknek az adatoknak az alapján egy kiterjesztett Kálmán-szűrő segítségével kb. 1° pontosan határozza meg a repülőgép szöghelyzetét, illetve ennek megfelelő pontossággal a pozícióját is. A szűrő lehetővé teszi, hogy a különböző elven működő érzékelők egymás hibáit korrigálják. Az egység a GPS számára fenntartott soros vonalon kapcsolódik a robothoz. A rádiómodem (2. ábra/2) egy 16 km hatótávolságú nagysebességű Aerocomm AC4668 típusú egység. A robotpilótához csatlakozik még egy Pitot-cső (2. ábra/3) is a statikus és a dinamikus nyomás mérésére. A robotpilóta ezek alapján az érzékelők alapján dolgozza ki a kormányokat mozgató szervomotorok felé a parancsjeleket. A motor áramfelvételét és az akkumulátor feszültségét mérő áramkör (2. ábra/4) két analóg bemeneten érkezik a robotpilótába. A kézi irányítást egy 2.4 GHz-es, 6 csatornás Jeti vevő biztosítja [2].

2. Numerikus áramlástan elméleti háttere

2. 1. Numerikus áramlástan rövid ismertetése

A numerikus áramlástan az angol CFD (Computational Fluid Dynamics) szóból származik, és az áramlások matematikai-fizikai modellezésére használható számítógépek segítségével. A modern tervezési folyamatok alapvető összetevője, hatékony eszköz lehet el nem végezhető, költséges folyamatok szimulációjára. Olyan esetekben is alkalmazható, ahol nem lehet mérni, illetve a mérőműszer jelentősen megzavarná a mérendő mennyiséggel kapcsolatos folyamatot [3].

2. 2. Alkalmazott áramlástani összefüggések

2. 2. 1. Alapegyenletek

Az áramlásokat leíró legfontosabb alapegyenletek az anyag-, a mozgásmennyiség-, és az energia-megmaradás egyenletei, ezeket együttesen megmaradási egyenleteknek nevezzük. Ezek az egyenlőségek olyan nemlineáris parciális differenciál egyenletrendszert képeznek, amelynek napjainkig nincs zárt alakú általános megoldása, azonban numerikus módszerek segítségével megoldhatók. Az alapegyenletek egy formája a következőképpen írható fel [4]:

Az állapot egyenlet:

$$p = \rho R T \quad (2.1)$$

A tömegmegmaradás:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} (\rho \mathbf{c}) = 0 \quad (2.2)$$

ahol a sűrűség idő szerinti parciális deriváltja:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial \rho}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2.3)$$

Az állapot egyenletet átalakítva látható, hogy a sűrűség változása a nyomásváltozásból és a hőmérsékletből meghatározható [5].

$$\rho = \frac{p}{R T} \rightarrow \frac{\partial \rho}{\partial p} = \frac{1}{R T} \quad (2.4)$$

A mozgásmennyiség megmaradása (Navier-Stokes egyenletek):

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho c_x)}{\partial t} + \text{div}(\rho c_x \mathbf{c}) &= \rho g_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \\ \frac{\partial(\rho c_y)}{\partial t} + \text{div}(\rho c_y \mathbf{c}) &= \rho g_y + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \\ \frac{\partial(\rho c_z)}{\partial t} + \text{div}(\rho c_z \mathbf{c}) &= \rho g_z + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Az energia megmaradás:

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla^T(\rho e \mathbf{c}) = \text{div}(\mathbf{\Pi} \mathbf{c}) + \rho \mathbf{g}^T \mathbf{c} + \text{div}(\mathbf{k} \text{ grad } T) + \varepsilon \quad (2.6)$$

Ezeket a konzervatív formájú egyenleteket alkalmazza a numerikus áramlástan szoftver.

2. 2. 2. Alapegyenletek megoldása

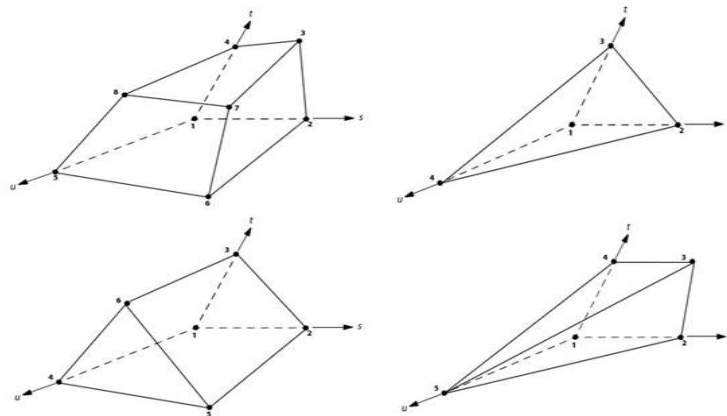
A numerikus áramlástan a legtöbb esetben diszkretizáló módszereket alkalmaz.

Fő lépései:

- Geometria diszkretizáció
- Alapegyenletek diszkretizálása
- A diszkretizált egyenletek megoldása

2. 2. 3. Geometria diszkretizálása

Az áramlási teret véges sok elemre osztjuk fel. Az elemek általában három-, vagy négyszög elemek, valamint ezeknek a térbeli megfelelői (3. ábra), de alkalmazhatunk tetszőleges alakú elemet is. A felosztás eredményeként kapjuk meg a numerikus hálót. A háló lehet strukturált, jól definiálható irányokkal, illetve nem strukturált, azaz orientáció nélküli [3].



3. ábra A hexaéder, tetraéder, ék és piramis típusú elemek [6]

2. 2. 4. Az alapegyenletek diszkretizálása

A zárt alakban meg nem oldható differenciál-egyenleteket folytonosról diszkrét alakra kell hozni. Erre több módszer van, ezek közül a három legelterjedtebb diszkretizációs módszer:

- véges differenciák
- véges elemek
- véges térfogat módszer.

A numerikus áramlástan szoftverek általában a véges térfogatok módszerét alkalmazzák, mely egyesíti a véges elemek flexibilitását és a véges differenciák egyszerű programozhatóságát [7]. Ennél a módszernél az áramlási teret felbontjuk véges számú térfogatelemre, ezután a megmaradási egyenleteket integráljuk minden térfogatra. Legtöbb esetben a konvektív és disszipatív mennyiségek térfogati integrálját

felületi integrállá alakítjuk át. Ezeknek az integrál-közelítő összegeknek az értéke minden felületre egy skalár, ami az adott felületen egységnyi idő alatt átáramló mennyiséget fejezi ki.

2. 2. 5. A diszkretizált egyenletek megoldása

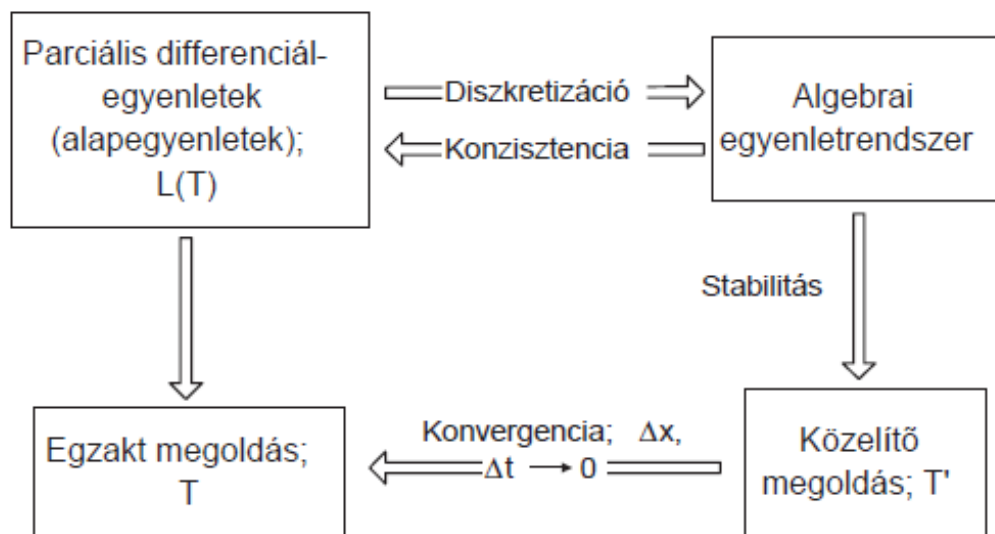
Az ANSYS CFX véges térfogat elven működő numerikus áramlástani szoftver. A diszkretizált egyenletek megoldása egyenletesen összefüggő, nem átlapolt numerikus háló segítségével történik, amelyben a változók ugyan azon a helyen tárolódnak (kollokált háló = co-located mesh, nincs háló eltolás = staggered grid)). Ennek következtében az ellenőrző (véges) térfogatok azonosak az összes transzport-egyenletben. Patankar szerint azonban, a kollokált háló alkalmazása a nyomás és sebességmező szétválasztódásához vezethet a megoldásban. A nem fizikai megoldás sakktábla szerű mintázat formájában jelenik meg. Rhine és Chow kidolgozott egy olyan alternatív diszkretizációs módszert a tömegáramra, amelynél a szétválasztódás problémája nem jelentkezik. Ezt a diszkretizációs módszert módosította Majumdar, hogy kiküszöbölje az állandósult állapot megoldásának időfüggését. Egy ehhez hasonló módszert implementáltak az ANSYS CFX-ben is. Az impulzus-megmaradás egyenletére emlékeztető kifejezést vezettek be minden diszkretizációs pont integráljának kiszámításakor az áramlás-domináns (advektív, tömegszállítással kapcsolatos) sebességre [6].

A numerikus módszerek kidolgozásakor nélkülözhetetlen, illetve használatukkor is érdemes tisztában lenni a diszkretizációs és a numerikus módszerek alapvető matematikai tulajdonságaival, melyek a következők: konzisztencia, stabilitás és konvergencia (4. ábra).

- Konzisztencia: az a viszony, amely a differenciál egyenlet és a diszkretizált algebrai egyenlet között áll fenn. Egy séma akkor konzisztens, ha a diszkretizált algebrai egyenletrendszer alakja megfelel a kiindulási parciális differenciálegyenletnek. A konzisztenciáról úgy győződhetünk meg például, hogy a diszkretizált egyenletünk tagjait Taylor-sorba fejtjük és az előálló

differentiál egyenletet összehasonlítjuk a kiindulási egyenlettel.

- Stabilitás: a stabilitás a diszkretizációs módszer és a numerikus eljárás tulajdonsága. A rendszert akkor nevezzük stabilnak, ha a diszkretizált egyenletre v. egyenletrendszerre megoldást ad, az értékek egy adott paraméterhez konvergálnak és nem divergálnak.
- Konvergencia: A konvergencia szintén a diszkretizációs módszer és a numerikus eljárás tulajdonsága és megmutatja, hogy hogyan viszonyulnak a valós és a közelítő eredmények egymáshoz. Egy módszer által elvégzett számítást akkor nevezzük konvergensnek, ha az egzakt és a numerikus eredmények közötti eltérés tart a nullához, miközben a térbeli és az időbeli felbontás értéke tart a zérushoz.



4. ábra A konzisztencia, a stabilitás és a konvergencia szimbolikus ábrázolása [3]

A numerikus megoldás részét képezik a peremfeltételek és a kezdeti értékek, ezeket kiegészítve a konzisztenciára, numerikus stabilitásra és konvergenciára vonatkozó feltételrendszerrel, a valóságos áramlásra mérnöki szempontból jó közelítést kapunk [3].

2. 2. 6. Turbulencia modellek, kiegészítő egyenletek

A turbulens áramlásnak az olyan áramlást nevezzük, amelyben a rendezetlen hőmozgás mellett, további, a hőmozgáshoz hasonló rendezetlen mozgás is létezik, azonban ez a turbulenciának nevezett, rendezetlen mozgás a hőmozgáshoz képest legalább egy (esetleg több) nagyságrenddel intenzívebb [4].

A turbulens áramlás leírására a Navier-Stokes egyenlet alkalmas. A Navier-Stokes egyenlet helyett a RANS (Reynolds átlagolt Navier-Stokes) egyenletet használjuk, amely a valóságos közegek turbulens áramlásait, az átlagolt turbulens feszültségek bevezetésével írja le [4]. A RANS-t az átlagolt mennyiségek alkalmazása miatt, a bonyolultabb áramlások számítására alkalmazzák. A RANS egyenlet alkalmazása megköveteli valamely turbulencia modell alkalmazását is. A dolgozatomban a k- ε, k-ω és a Shear Stress Transport (SST) modelleket használom. A k-ε modell a turbulens viszkozitást a turbulens kinetikai energia (k) és a turbulens disszipációs ráta (ε) függvényeként számítja ki, amíg a k-ω és az SST a turbulens kinetikai energia és a specifikus disszipációs ráta (ω) függvényében határozza meg.

A turbulens viszkozitás [6]:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.7)$$

ahol C_μ konstans.

A k- ω és az SST modelleknél a turbulens viszkozitás [6]:

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (2.8)$$

$$\omega = \frac{\varepsilon}{C_\mu k} \quad (2.9)$$

Ahol az ω a turbulens disszipációs ráta.

A „standard” k- ε modell a következő matematikai formában írható fel:

A turbulens kinetikai energia egyenlet [5]:

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x k)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y k)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z k)}{\partial z} \\
&= \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right] + \mu_t \phi \\
& - \rho \varepsilon + \frac{C_4 \beta \eta_t}{\sigma_t} \left[g_x \frac{\partial T}{\partial x} + g_y \frac{\partial T}{\partial y} + g_z \frac{\partial T}{\partial z} \right]
\end{aligned} \tag{2.10}$$

A disszipációs ráta [5]:

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x \varepsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y \varepsilon)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z \varepsilon)}{\partial z} \\
&= \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] + \mu_t \phi \\
& - \rho \varepsilon + C_{1\varepsilon} \mu_t \frac{\varepsilon}{k} \Phi - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{C_\mu (1 - C_3) \beta \rho k}{\sigma_t} \left[g_x \frac{\partial T}{\partial x} + g_y \frac{\partial T}{\partial y} + g_z \frac{\partial T}{\partial z} \right]
\end{aligned} \tag{2.11}$$

A következő táblázat a konstans értékeket tartalmazza.

1. táblázat A k-ε modell konstans együtthatói

Konstans	Érték
$C_1, C_{1\varepsilon}$	1,44
C_2	1,92
C_μ	0,09
σ_k	1
σ_ε	1,3
σ_t	0,85
C_3	1
C_4	0
β	0

A „standard” k-ω modell matematikai formája a következő:

A turbulens kinetikai energia egyenlet [5]:

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho V_x k}{\partial x} + \frac{\partial \rho V_y k}{\partial y} + \frac{\partial \rho V_z k}{\partial z} \\
&= \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right] + \mu_t \phi \\
& - C_\mu \rho k \omega + \frac{C_4 \beta \eta_t}{\sigma_k} \left[g_x \frac{\partial T}{\partial x} + g_y \frac{\partial T}{\partial y} + g_z \frac{\partial T}{\partial z} \right]
\end{aligned} \tag{2.12}$$

A specifikus disszipációs ráta [5]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial \rho V_x \omega}{\partial x} + \frac{\partial \rho V_y \omega}{\partial y} + \frac{\partial \rho V_z \omega}{\partial z} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial z} \right] \\ &+ \gamma \rho \phi - \beta' \rho \omega^2 + \frac{(1 - C_3) \beta \rho}{\sigma_t} \left[g_x \frac{\partial T}{\partial x} + g_y \frac{\partial T}{\partial y} + g_z \frac{\partial T}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (2.13)$$

Az egyenletekben szereplő konstansok értékei Wilcox alapján lettek felírva [8].

Az SST szintén egy két egyenletes turbulencia modell, ami a k- ϵ és k- ω turbulencia modellek kombinációja. Az SST lényege az, hogy a fal közelében a k- ω modellel számol, mivel ez a falhoz közeli, alacsony Reynolds-számú áramlás turbulenciáját jobban közelíti, míg a faltól távol a k- ϵ egyenletekkel számol. A k- ϵ és a k- ω egyenletek közötti átváltást a Wall Scale Equation végzi, a faltól való távolság függvényében, az egymást követő iterációk során.

Az SST a k- ω turbulencia modelltől turbulencia keletkezésének kifejezésben tér el [5]:

$$P_t = \mu_t \quad (2.14)$$

$$\text{ahol} \quad P_t = \min(\mu_t \phi, C_{lmt} \epsilon) \quad (2.15)$$

Alapesetben C_{lmt} értéke 10^{15} .

Az SST turbulencia modell még egy új taggal bővíti a specifikus disszipációs ráta egyenletét [5]:

$$\frac{(1 - F_1) 2 \rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \left[\frac{\partial k}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial k}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial y} + \frac{\partial k}{\partial z} \frac{\partial \omega}{\partial z} \right] \quad (2.16)$$

Az F_1 egy egyesítő függvény, mely a fal közelében 1, a faltól távol 0 értéket vesz fel. Ennek a segítségével a modell automatikusan vált a k- ω modellre a fal közelében és a k- ϵ modellre a faltól távol. A konstansok az F_1 változó függvényeként írhatók fel [5]:

$$\phi = F_1 \phi_1 + (1 - F_1) \phi_2 \quad (2.17)$$

ahol, ϕ a konstansokat (σ_k , σ_ω , β' , γ) jelenti, ϕ_1 és ϕ_2 pedig a k- ω és k- ϵ modellek együtthatói ebben a sorrendben. A konstansok értékét Menter [9] határozta meg.

Kinematikus örvény viszkozitás egyenlet [6]:

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, S F_2)} \quad (2.18)$$

ahol
$$\nu_t = \frac{\mu_t}{\rho} \quad (2.19)$$

F_2 részfüggvénye F_1 -nek, valamint S az alakváltozási sebesség állandó értéke [6].

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad (2.20)$$

$$\arg_2 = \max\left(\frac{\sqrt{k}}{\beta' \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega}\right) \quad (2.21)$$

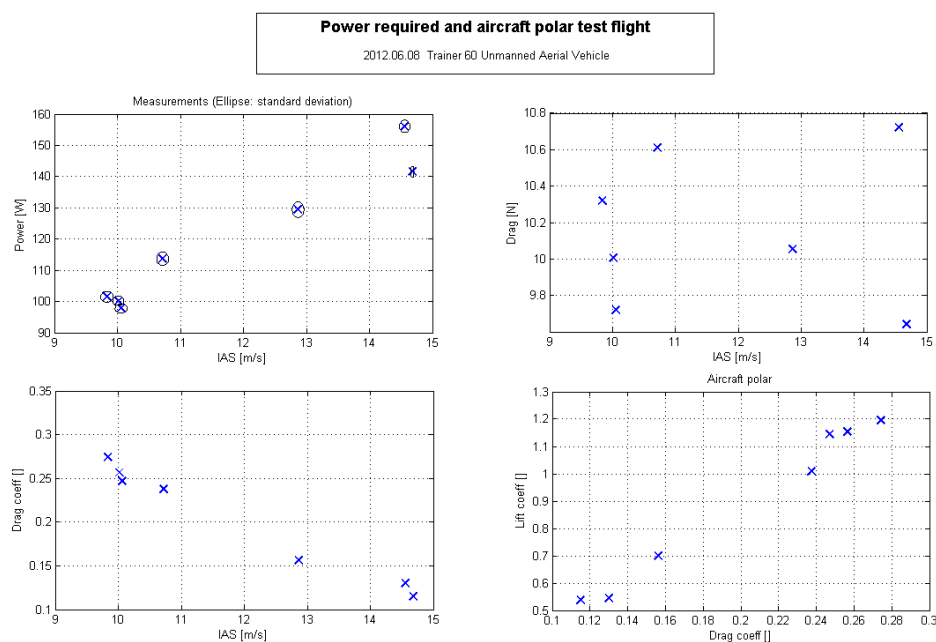
Így az alapegyenletek mellé még a két egyenletes turbulencia modell is megjelenik, így ezzel az áramlástanai probléma megoldható.

3. Gyakorlati megvalósítás

3.1. Mérés és számítás

A mérés során különböző sebességű vízszintes repülést hajtottak végre, a mért mennyiségek a motor áramfelvétele és a repülőgépbe épített akkumulátor feszültsége.

A villanymotor és a légszárpropulziós hatásfokára szakirodalom és katalógus alapján kellően jó becslést adva, számítható a gép repülés közbeni ellenállására fordított teljesítmény. A kapott teljesítményértékből már számítható a repülőgép ellenállása és a felhajtóerő, valamint a repülőgép polárisa. A következő ábrán a mérési eredmények láthatóak (5. ábra)



5. ábra Mérési eredmények

A számítás a megfelelő modell kialakításával kezdődött, amit a Solid Edge V20 segítségével készítettem el. A következő lépés a háló elkészítése, amit az anyagtulajdonságok valamint a peremfeltételek megadása követett. A program ezek után megoldotta a megfelelő egyenletrendszereket, majd a számítás végén az eredmények megjelenítés után az adatok kiértékelését végeztem el. A megfelelő

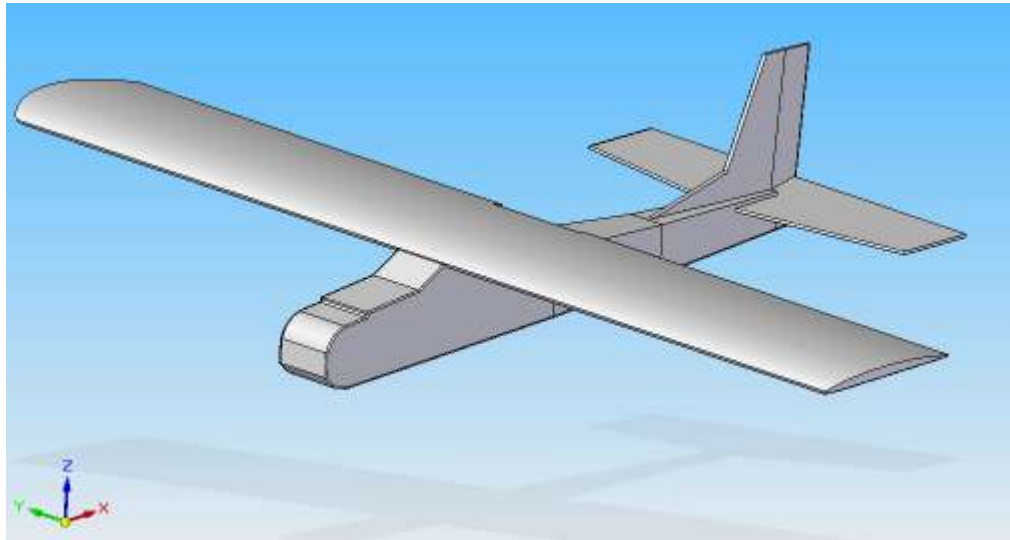
következtetések levonása után ismerttettem a továbblépési lehetőségeket.

3.2. Geometria kialakítása

A numerikus vizsgálat során az első és az egyik legfontosabb lépés a megfelelő geometria kialakítása, ebben az esetben a valós repülőgép geometriájának minél pontosabb elkészítése. Rendelkezésre álló képek, és a repülőgép méreteinek felvétele után a Solid Edge V20 CAD program segítségével készítettem el a 3D-s modellt (7. ábra). A szimulációhoz elengedhetetlen a pontos geometria, de szükség volt néhány részt egyszerűsíteni vagy elhagyni. A következő képen látható motortartó bak és a repülőgép orrának környezete, valamint a futóművek (6. ábra). Az előbbi rész helyett egy egyszerűsített orr részt készítettem. A futóműveket kihagytam a modellből. Ezekre az egyszerűsítésekre a geometriai diszkretizáció miatt volt szükség, mivel a kis méretek miatt az elkészítendő hálón nagymértékű sűrítésre lett volna szükség, ami a szimuláció idejét jelentősen megnöveli.

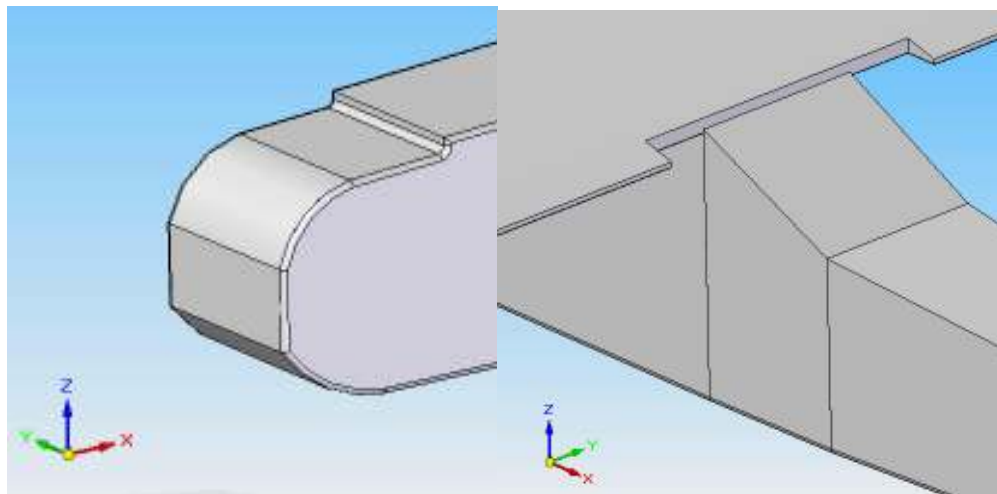


6. ábra Az egyszerűsítendő részek



7. ábra Az elkészített modell

Az előzetes várakozás szerint a repülőgép orr részének, és a szárny törzs kapcsolat kialakítása nagymértékben befolyásolja a repülőgép körül kialakuló áramlási képet, így a testre ható ellenállást is (8. ábra).



8. ábra Repülőgép orr rész és a szárny-törzs kapcsolat

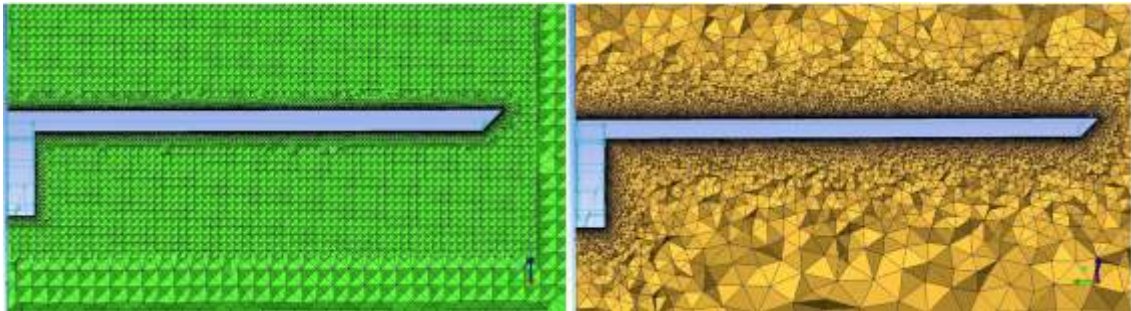
3.3. Geometriai diszkretizáció

A modell elkészítése után a hálót készítettem el, am azt jelenti, hogy az adott geometriát véges sok elemre bontja a szoftver. A háló elkészítésének lépései:

- A háló készítése előtt a geometria vizsgálata, minőségének ellenőrzése.
- A peremfeltételekként szolgáló felületek (belépés, kilépés, fal stb.) definiálása.
- A globális háló paraméterek megadása (maximális elemméret és növekedési faktor)
- A lokális paraméterek megadása a fentebb definiált felületeken.
- További lokális hálósűrítés alkalmazása az áramlási tér bármely területén ún. "Density"

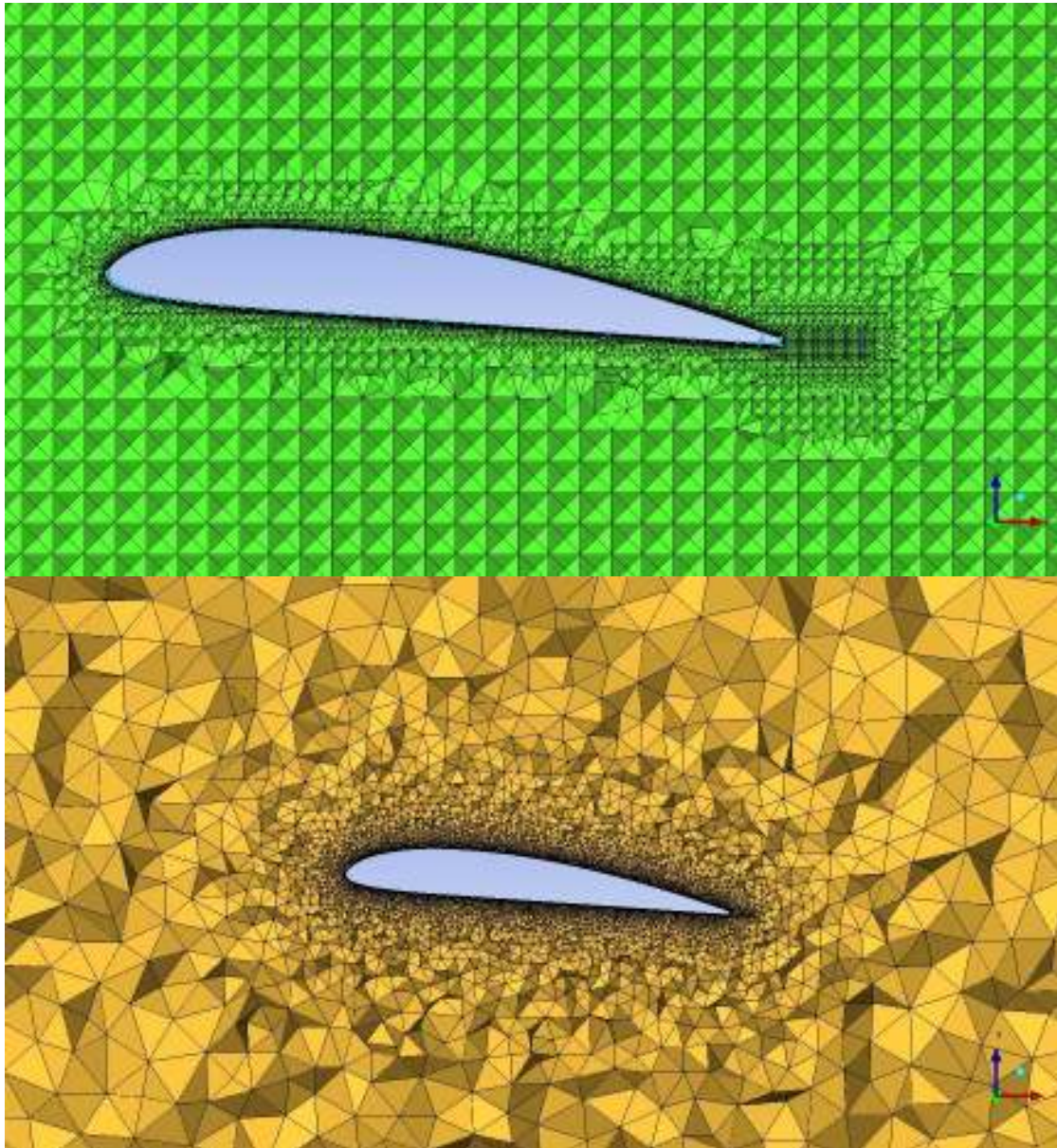
Az utolsó lépés a háló elkészítése, mely szintén több részből áll. Először mindig egy megfelelő minőségű felületi hálót kell generálni, mivel ennek az elkészítési ideje rövid és a modell esetleges további felületi hibái láthatóvá válnak. Ezeket a hibákat a hosszú ideig tartó térfogati háló elkészítése előtt ki lehet javítani. Az elkészített megfelelő minőségű felületi hálóra térfogati hálót generálunk, általában tetraéder elemekkel ("Tetra/Mixed"). A határfelületek mentén határréteg hálót kell alkalmazni amit a térfogatra kell ráépíteni. Az így elkészült háló minőségi ellenőrzése után alkalmas a szimulációra, azonban további finomítást lehet alkalmazni.

A tetra háló elkészítését alapesetben "Robust/Octree" módszerrel készítettem, utána finomítottam "Quick/Delauney" módszerrel (9. ábra).



9. ábra Az Octree és a Delaunay módszerek

Jól látható, hogy az Octree háló strukturáltabb, mint a másik módszer, viszont az egymást követő elemeknek duplázódik a mérete. A Delaunay módszer finomabb, mivel kisebb a növekedési faktor, így ezzel pontosabb hálót lehet készíteni. Végül az elkészített hálót importáltam a megoldó programba (10. ábra).



10. ábra Az elkészített háló

A hálózás, illetve a határréteg-felbontás megfelelő pontosságát az ún. y^+ értéke, az első cella középpontjának faltól mért dimenziómentes nagysága jellemzi, melynek értéke (a fizika közelítésétől és a gyakorlati relevanciától függően) célszerűen 20 és 100 közötti. Ezt a háló készítés előtt kiszámoltam. A mérésből rendelkezésre álló környezeti nyomás és hőmérséklet alapján, $20 \leq \Delta y^+ \leq 100$ faltörvény esetén:

Az állapotegyenlet:

$$p_{ref} = \rho R T \quad (3.1)$$

A Sutherland formula alapján a dinamikus viszkozitás az ideális gázban a hőmérséklet függvénye[10]:

$$\mu = \mu_0 \frac{T_0 + 198,6}{T + 198,6} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \quad (3.2)$$

ahol T_0, μ_0 referencia hőmérséklet és viszkozitás

A kinematikai viszkozitás:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (3.3)$$

A Reynolds-szám:

$$\text{Re}_L = \frac{\rho U_\infty L}{\mu} \quad (3.4)$$

Karakterisztikus sebesség: U_∞ , a síklap hossza: L , a belépő éltől való távolság: x

$$\Delta y = L \Delta y^+ \sqrt{74} \text{Re}_x^{1/14} \frac{1}{\text{Re}_L}. \quad (3.5)$$

Felhasználva: $\text{Re}_x = C^t \text{Re}_L$ és $(C^t)^{1/14} \approx 1$

A Δy meghatározható:

$$\Delta y = L \Delta y^+ \sqrt{74} \text{Re}_L^{-13/14} \quad (3.6)$$

Az első réteg vastagságát így a következő tartományban változtattam a különböző futtatásoknál (2. táblázat).

2. táblázat A Δy^+ értékei

Δy^+	Δy
1	0,031 mm
20	0,626 mm

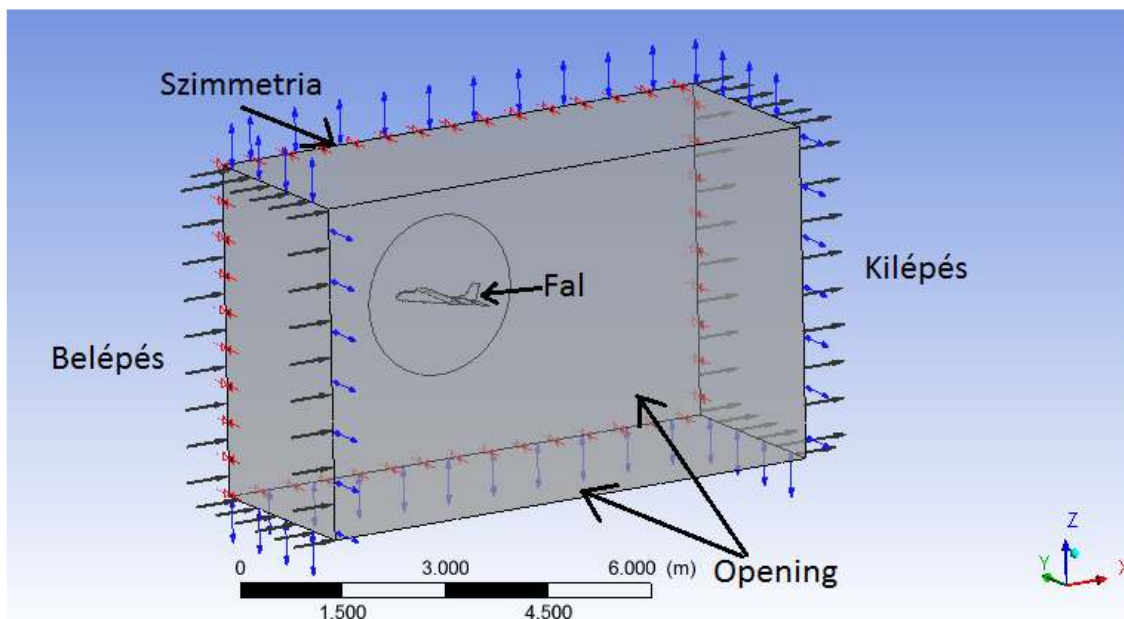
3.4. A szimuláció előkészítése

A futtatási idő csökkentésének érdekében a repülőgépnek csak a felére készítettem szimulációt kihasználva az áramlási és a geometriai szimmetriát. A következő lépésben a peremfeltételeket adtam meg.

A számítási tartomány határain ismernünk kell az áramlástan paramétereit. Leggyakrabban háromféle peremfeltétel adható meg egy szimulációban:

- Elsőfajú peremfeltétel: a peremen adott a mezőváltozó értéke;
- Másodfajú: a peremen adott a mezőváltozó peremre merőleges irányú deriváltjának értéke;
- Vegyes: adott a mezőváltozó és annak peremre merőleges irányú deriváltja.

Az egyes transzportegyenletekre nem teljesen függetlenül választhatók meg a peremfeltételek típusa. Ebben az esetben több határoló felületet különböztetünk meg: be- és kilépés, "opening", szimmetria valamint a szilárd fal (11. ábra).



11. ábra A numerikus áramlási modell az alkalmazott peremfeltételekkel

A numerikus analízis során a levegőt ideális gázként kezeltem. Referencia nyomásként a mérés során kapott értéket állítottam be. Ez a nyomás érték az egész áramlási térre vonatkozik, ezért az ettől esetlegesen eltérő értékeket, a megfelelő felületeken állítottam be. A szimulációt stacionáriusnak "Stationary" modelleztem. A háló deformációját "Mesh Deformation" nem vettem figyelembe. A hőtranszport "Heat Transfer" beállításaként a „Total Energy”-t alkalmaztam. Turbulencia modellként a „Shear Stress Transport (SST)”, a k-epszilon és a k-omega modelleket állítottam be a szimulációtól függően, amit az elméleti bevezetőben már ismertettem. Az „Opening” peremfeltétel esetében „Opening Pressure” és „Temperature”, „Entrainment” beállítást alkalmaztam, mivel ez a két eset a robosztusabb.

A 3. táblázatban a peremfeltételek típusai és a beállított értékek találhatók.

3. táblázat Peremfeltételek

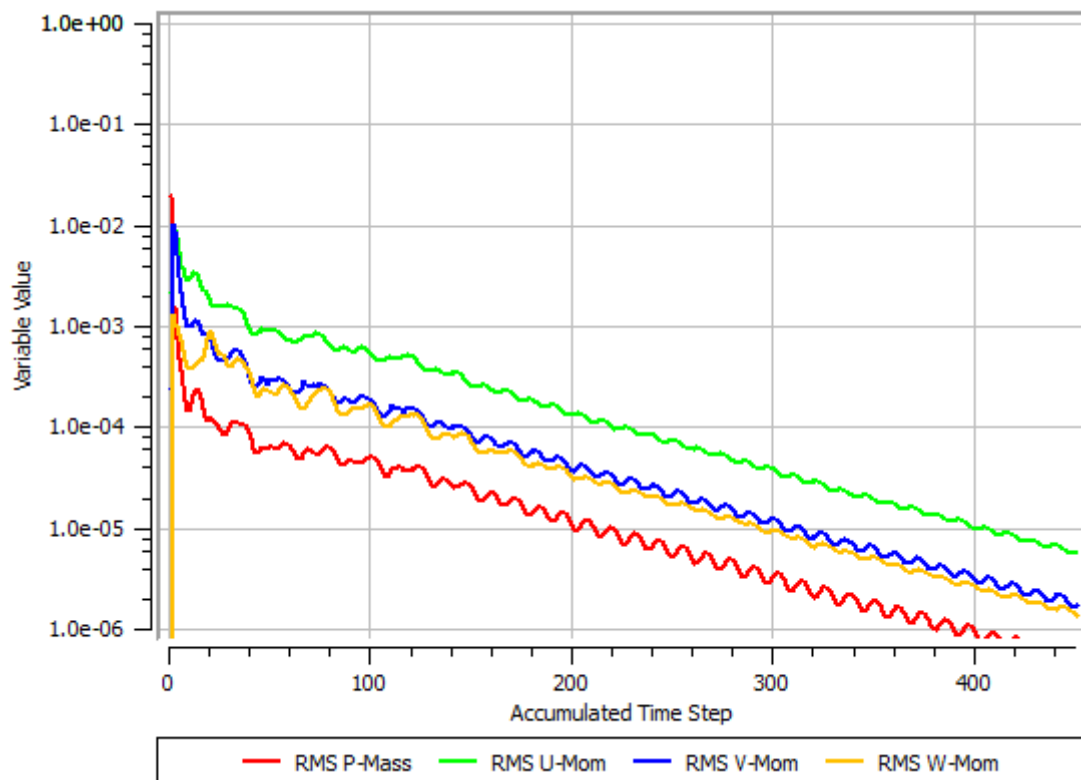
„Domain/Boundary”	Nyomás [Pa]	Hőmérséklet [K]	Sebesség [m/s]
Default	$p=1,1 \cdot 10^5$	-	-
Belépés	-	$T=291,15$	10
Kilépés	$p_{rel}=0$	-	-
Opening	$p_{rel}=0$	$T=291,15$	-
Szimmetria	-	-	-
Fal	-	-	-

A következő lépésként a megoldó program "Solver" tulajdonságait állítottam be. Meg kellett adni a maximális és a minimális iterációk számát, valamint azt, hogy milyen pontosságot várunk el. Az iterációk száma attól függ, hogy hány lépés után tudja elérni a program a kívánt pontosságot. A dolgozatomban a pontosságot tartottam szem előtt, ezért mindig úgy alkalmaztam a beállításokat, hogy egy adott pontosságot érjen el a számítás, ezért az iterációk száma mindig változott a különböző futtatások során. Az iterációk számát 300 és 1000 között állítottam be a hálóméret függvényében, de volt olyan futtatás, ahol ezt az értéket meg kellett növelni a kívánt pontosság eléréséhez. Konvergencia kritériumnak "Convergence Criteria" az RMS (Root Mean Square) adott értékét állítottam be. A pontosságot "Residual Target" $1 \cdot 10^{-6}$ –és $1 \cdot 10^{-8}$ értékek között változtattam.

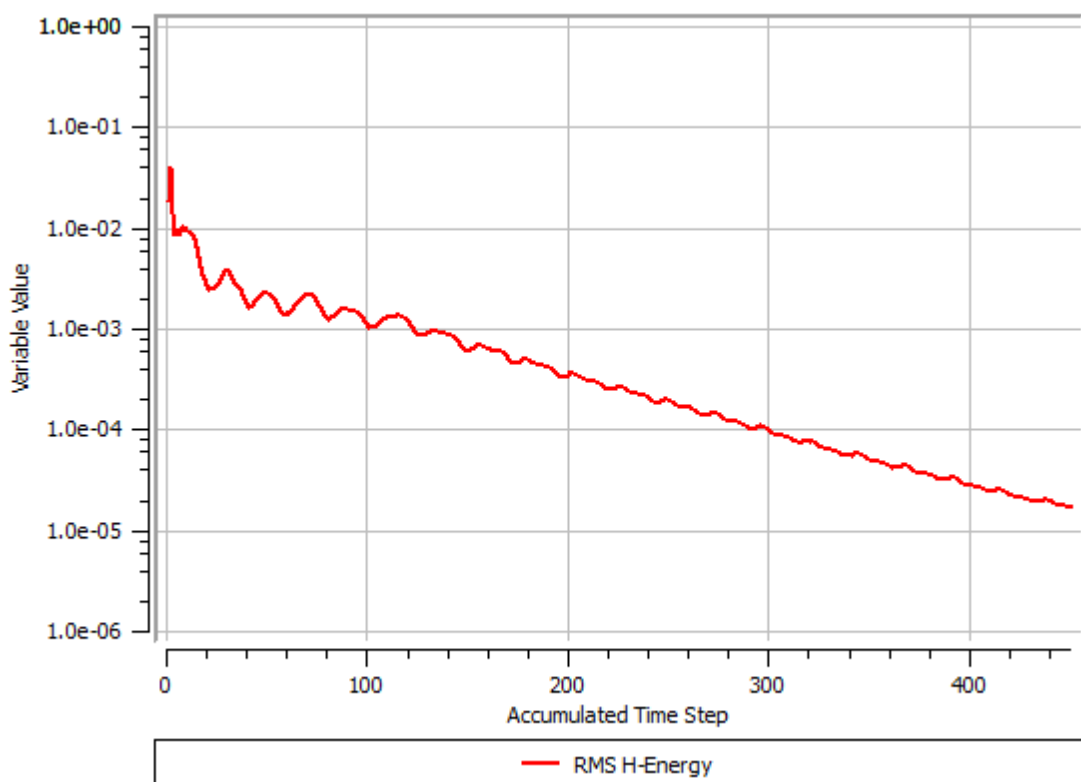
3.5. Konvergencia görbék

A szimuláció előkészítése után a program egyenletmegoldó alkalmazása (CFX-Solver), a megadott beállításokat figyelembe véve elvégzi a szimulációt. A szimuláció addig tart, amíg eléri a maximális iterációk számát vagy a konvergencia kritériumát. A program a számolás során elvégezte az iterációs lépéseket, miközben folyamatosan jelenítette meg a megmaradási egyenletek konvergencia görbéit, melyek a következők voltak:

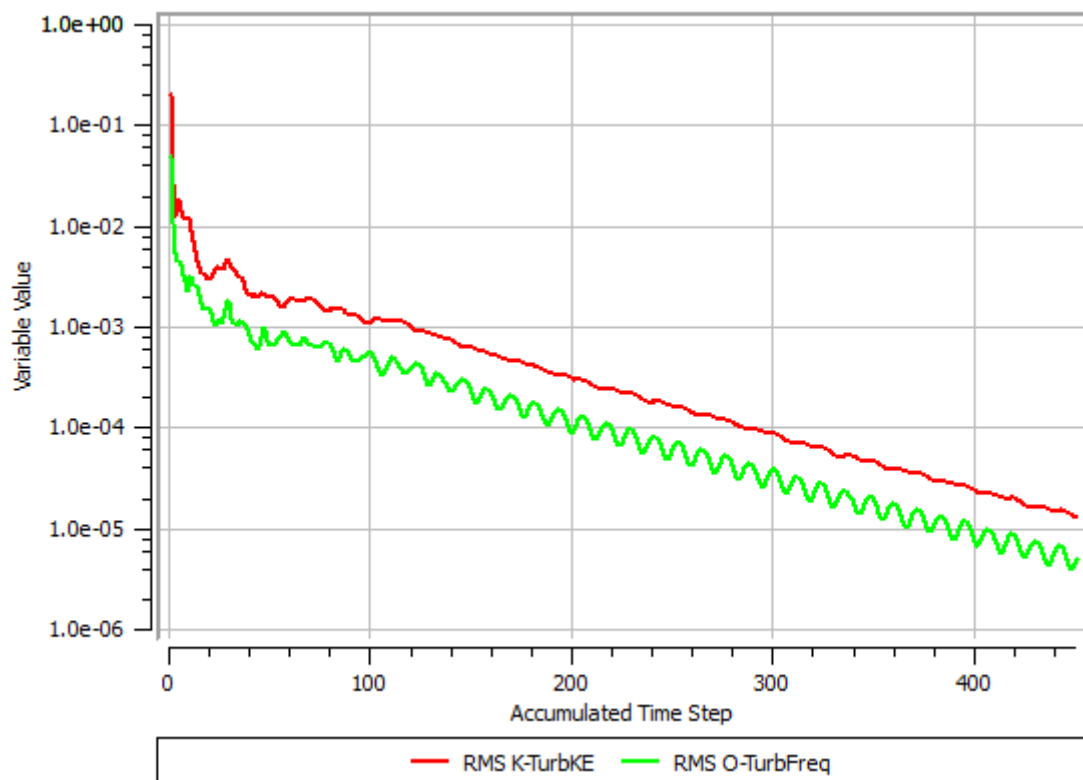
- Folytonosság és mozgásmennyiség megmaradás (12. ábra),
- Energia megmaradás (13. ábra),
- Aktuális turbulencia modellek (14. ábra),
- Wall Scale Equation (15. ábra),
- A tömegáram egyensúly és energia egyensúly (16. ábra).



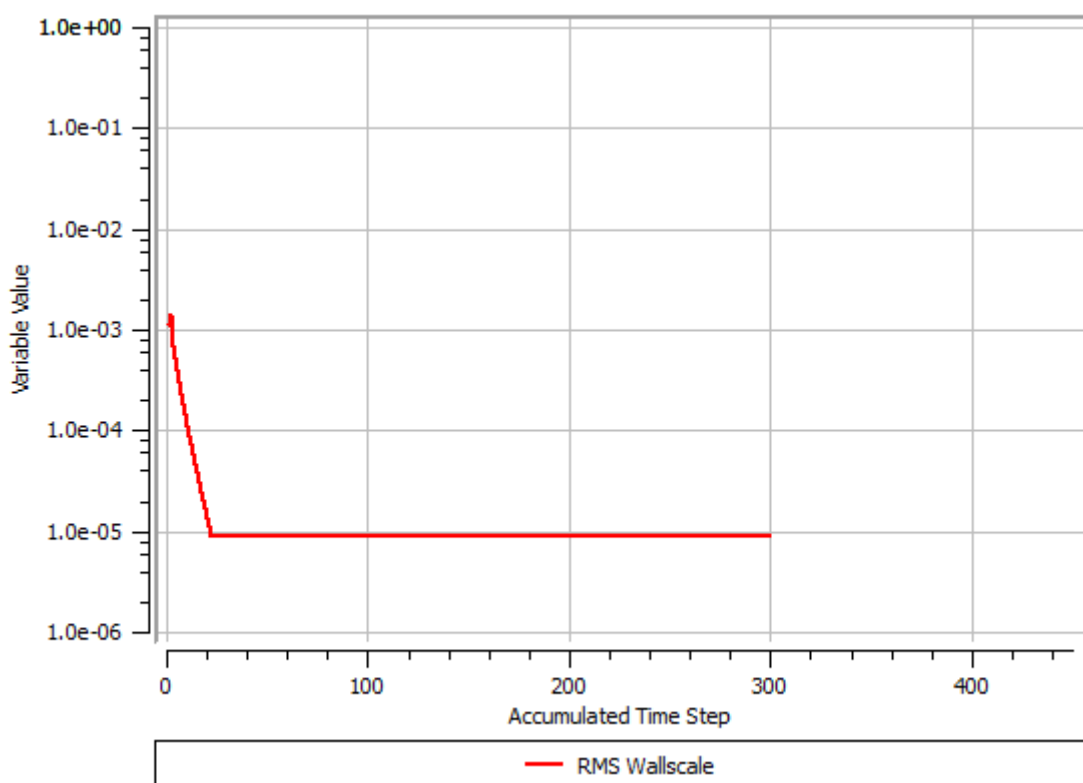
12. ábra Konvergencia görbe a folytonosság és a mozgásmennyiség-megmaradásra



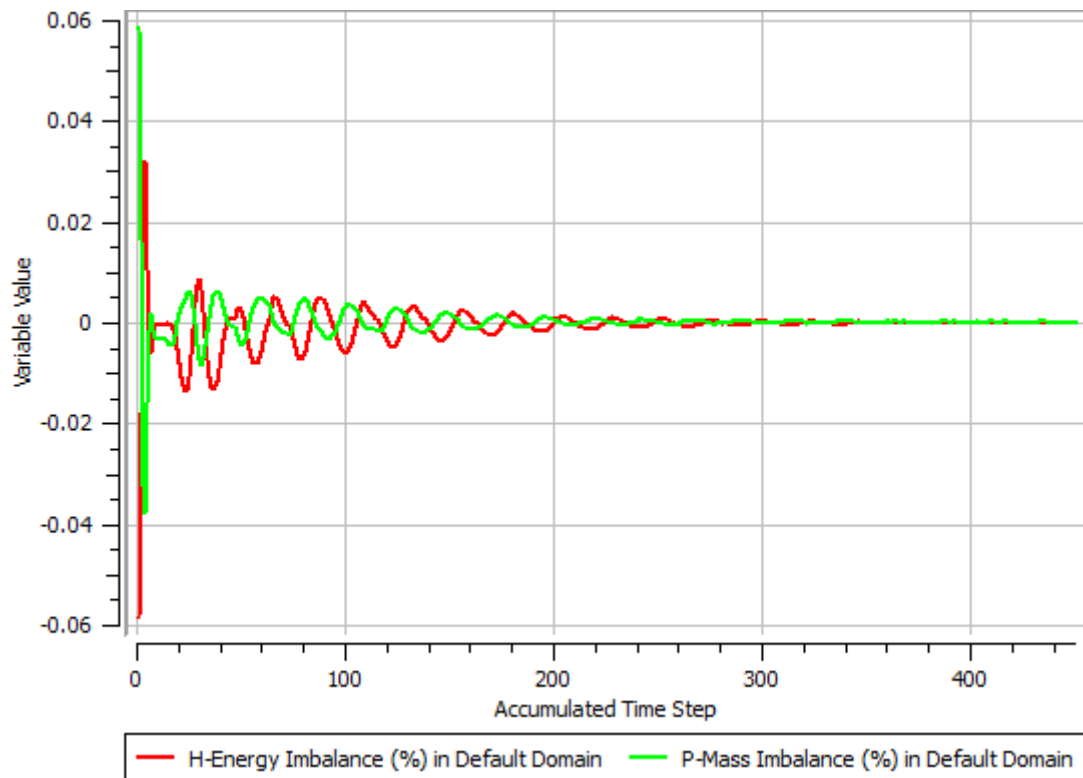
13. ábra Konvergencia görbe az energia megmaradásra



14. ábra Konvergencia görbe a turbulencia modell paramétereire



15. ábra Konvergencia görbe a Wall Scale Equation értékeire



16. ábra Konvergencia görbe a tömegáram egyensúly és energia egyensúly értékeire

A tömegáram egyensúly és energia egyensúly a megmaradási egyenletekre vonatkozik, amelyek ki nem elégítése esetén ún. maradék tagok jelennek meg az egyenletekben. Ezeknek az értékeknek kell 0-hoz tartani a konvergencia során.

4. Eredmények

A következő lépés az eredmények megjelenítése és kiértékelése. A számítás során első lépésben egy hálóparaméter érzékenységi vizsgálatot végeztem, tekintettel a számítógép rendelkezésre álló kapacitásra. A dolgozatomban a mérés során kimért polárist kívánom összehasonlítani a számítással, így elsősorban ennek kiszámítását helyeztem előtérbe. A repülőgép polárisáról akkor beszélünk, amikor a felhajtóerő tényezőt ábrázoljuk az ellenállás tényező függvényében. Az így kapott diagram kellő információt ad az aktuális repülőgép típus aerodinamikai tulajdonságairól, jóságáról, valamint ezt fel lehet használni további számítások elvégzéséhez, mint pl. a repülőgép repülésmechanikai számítása.

A felhajtóerőt és az ellenálláserőt, a nyomás és a nyírófeszültség a repülőgép felületén vett integráljával számoltam ki a megfelelő felületi normálisokkal figyelembe véve. Ezt a program „Post-Processing” alkalmazásának kalkulátorával végeztem el.

Majd az ellenállás- és felhajtóerő tényezőt:

$$C_D = \frac{D}{\frac{\rho}{2} * v^2 * S_{sz}} \quad (4.1)$$

$$C_L = \frac{L}{\frac{\rho}{2} * v^2 * S_{sz}} \quad (4.2)$$

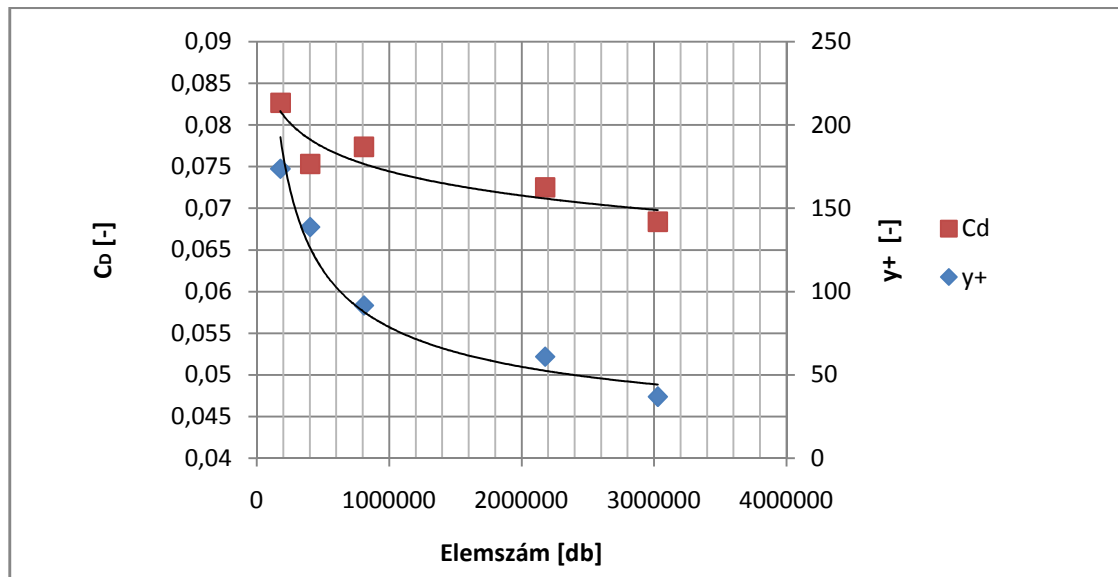
$$S_{sz} = b * c \quad (4.3)$$

Ahol S_{sz} a szárnyvetület, b a szárnyfeszítávolság és c a húrhossz.

4.1. Hálóparaméter érzékenységi vizsgálat

A következő lépésben megvizsgáltam a különböző hálóméret hatását a számított eredményekre. A különböző futtatásoknál kapott adatokat diagramban ábrázoltam, ezek

a repülőgép ellenállás tényezője és a felületén kapott y^+ értékek (17. ábra). Mindkét görbén jól látszik, hogy az elemszám növelésével egyre kisebb értékeket kaptam, amik az elemek számának növekedésével a vizsgált paraméterek egy adott értékhez tartanak.

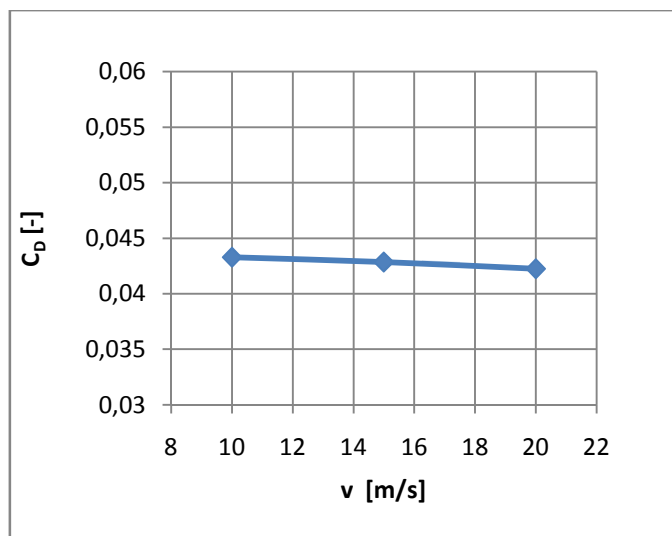


17. ábra Az ellenállás tényező és az y^+ az elemszám függvényében

Az utolsó futtatásnál kapott y^+ értékek a kívánt tartományba esnek így elmondható, hogy a szimuláció a hálózás szempontjából elfogadható. A további számításokat a legfinomabb hálóval rendelkező modellel végeztem. Az eredmények táblázatos formában az 1. sz. mellékletben találhatóak.

4.2. Sebességérzékenységi vizsgálat

A következő lépésben megvizsgáltam a repülési sebesség, az ellenállás tényezőre és a felhajtóerő tényezőre gyakorolt hatását. A különböző futtatásoknál kapott eredményeket diagramban ábrázoltam (18. ábra).

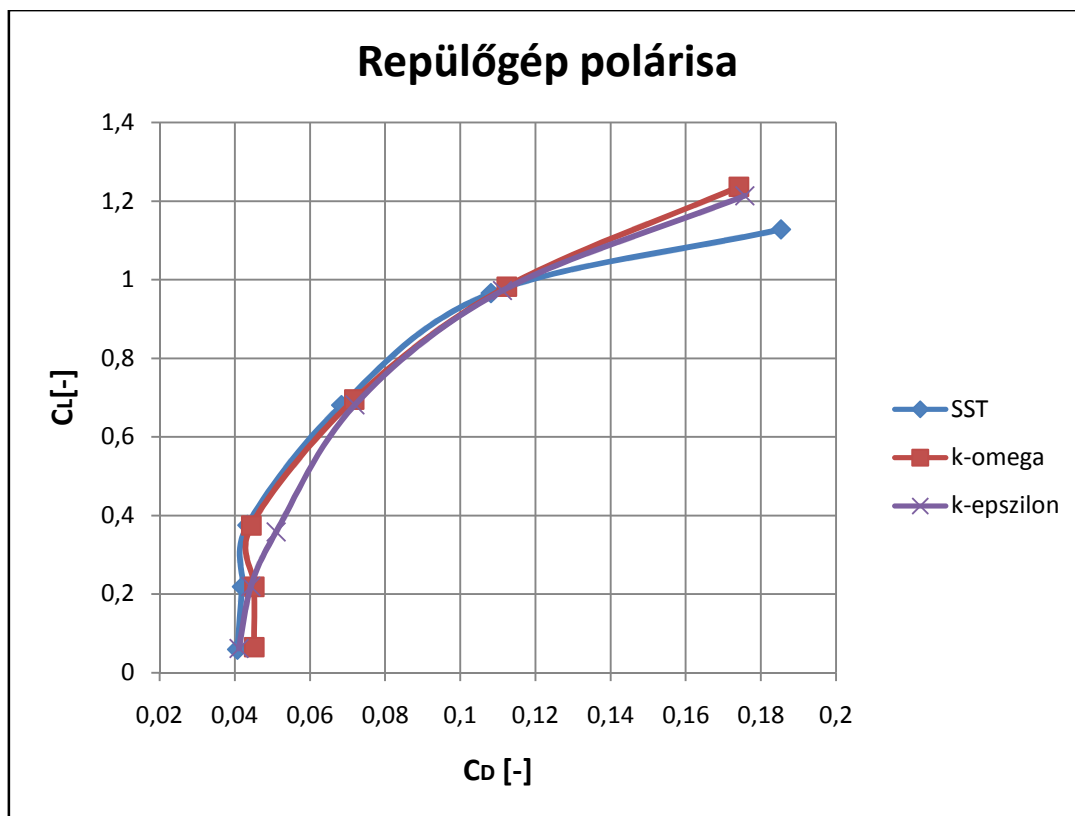


18. ábra Sebesség érzékenység

Az ábrán jól látszik, hogy a repülési sebesség változásának hatása az ellenállás tényezőre kismértékű, elenyésző, ami megfelel a valóságnak. A továbbiakban a futtatásokat 10 m/s-os repülési sebesség mellett végeztem el, mivel az UAV szempontjából ez áll a legközelebb a valósághoz. Így a kapott eredményeket jobban össze lehet hasonlítani a mérési eredményekkel. Az eredmények táblázatos formában az 2. sz. mellékletben találhatóak.

4.3. Turbulencia modellek hatása

A következő lépésben széles állásszög (α) tartományban készítettem futtatásokat. Az előzetes bevezetőben ismertetett turbulencia modelleknek (SST, k-omega, k-epszilon) a repülőgép polárisára gyakorolt hatását vizsgáltam meg. Azért ezeket választottam, mert ezek az általánosan alkalmazott modellek a numerikus áramlástani feladatok megoldásánál. Az állásszög tartományt -5° és 12° között állapítottam meg. Az eltérő modelleknél kapott futtatási eredményeket a következő diagramban ábrázoltam (19. ábra).

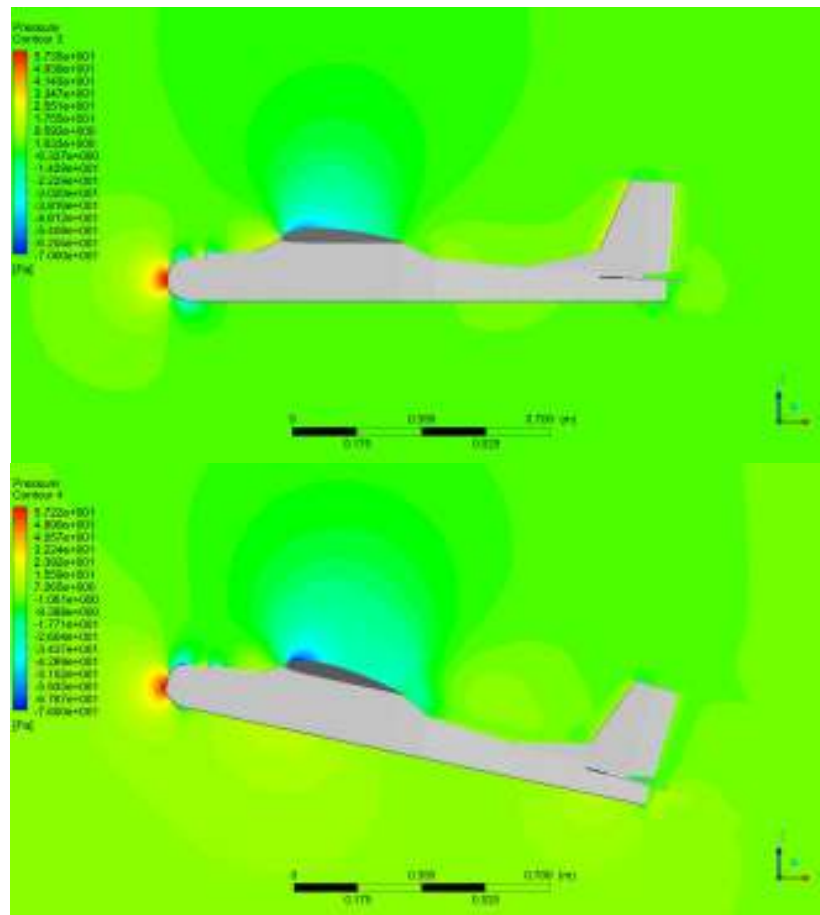


19. ábra Számítási eredmények

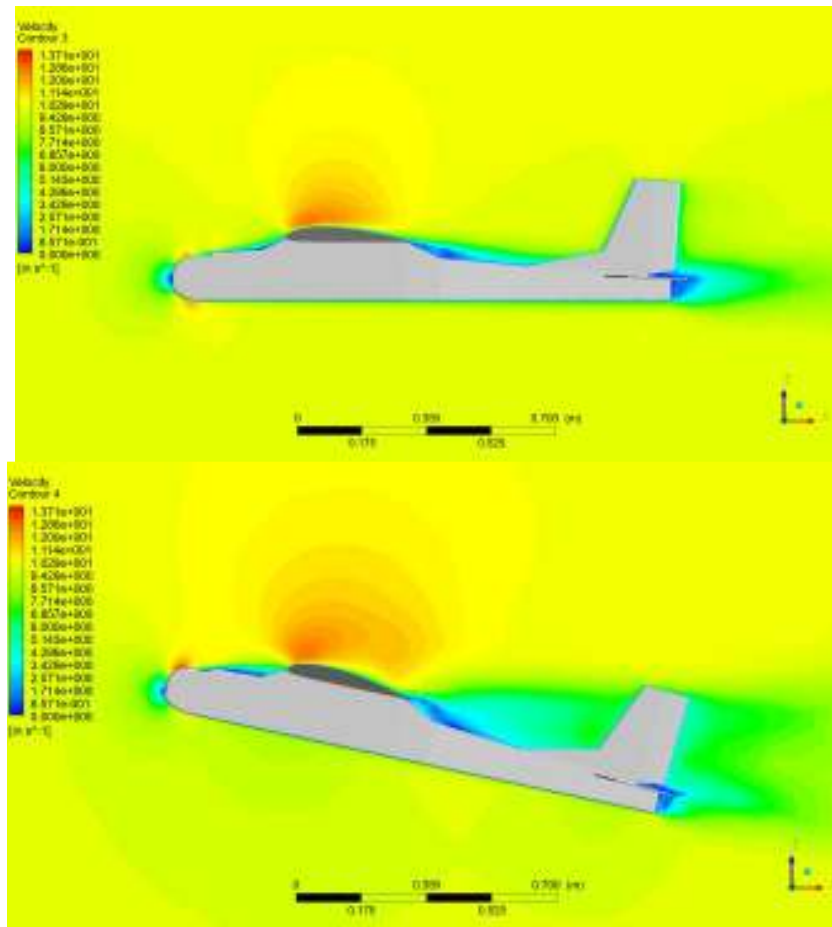
Az ábrán látható, hogy az alkalmazott turbulencia modellek számítási eredményekre gyakorolt hatása kismértékű. Jól látható, hogy az utolsó pontban az SST-vel kapott eredmény eltér a többitől. Az SST a határoló fal közelében a k- ω modellel számol, mivel ez a falhoz közeli, alacsony Reynolds-számú áramlás turbulenciáját jobban közelíti, míg a faltól távol a k- ϵ egyenletekkel számol. Így a később megvalósítandó szimulációk szempontjából az SST modell alkalmazása mellett döntöttem, mivel a repülés területén ez a modell széles körben alkalmazott. Az eredmények táblázatos formában a 3. sz. mellékletben találhatóak.

A következőkben (20. ábra, 21. ábra), a repülőgép körül kialakuló nyomás és sebesség eloszlás látható 0° -os és 12° -os állásszög esetében. Észrevehető, hogy a repülőgép orránál nagymértékben lefékeződik az áramlás, a sebesség csökken és a nyomás nő. Jól látható, hogy az orr mögötti területen az állásszögtől függően a nagy geometriai lekerekítés, valamint az utána következő ugrás miatt felgyorsul az áramlás, ami kismértékű leválást okoz közvetlenül a szárny előtti területen (21. ábra), így a közeg nem zavartalanul érkezik meg a szárnyra. A szárny felső és alsó része között kialakult

nyomáskülönbség felhajtóerőt hoz létre. Az állásszög változásával a belépő él környezetében nagymértékben megnő a sebesség, ami a nyomáscsökkenésnek köszönhetően leválást okoz, nem csak a szárnyon, hanem a törzs középrészén is. Ezt nagymértékben befolyásolja a szárny törzs feletti része, valamint a törzs keresztmetszet változása. Az állásszög növekedésével ez jelentős felhajtóerő csökkenést eredményez, ami a repülőgép polárisán az érintő irántangensének csökkenéséhez vezet, a görbe ellaposodik. Hasonló a repülőgép törzs mögött kialakult áramlási kép. A farok rész szögletes geometriai kialakítása miatt a törzs mögött leválási zóna alakul ki, de ez kisebb mértékű.

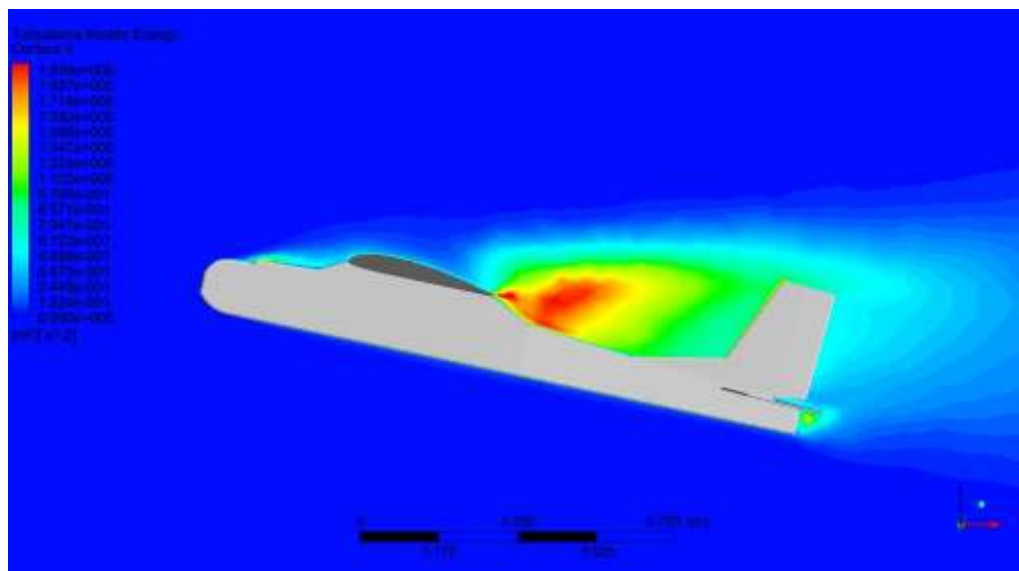


20. ábra Nyomáseloszlás 0°-os és 12°-os állásszög esetében



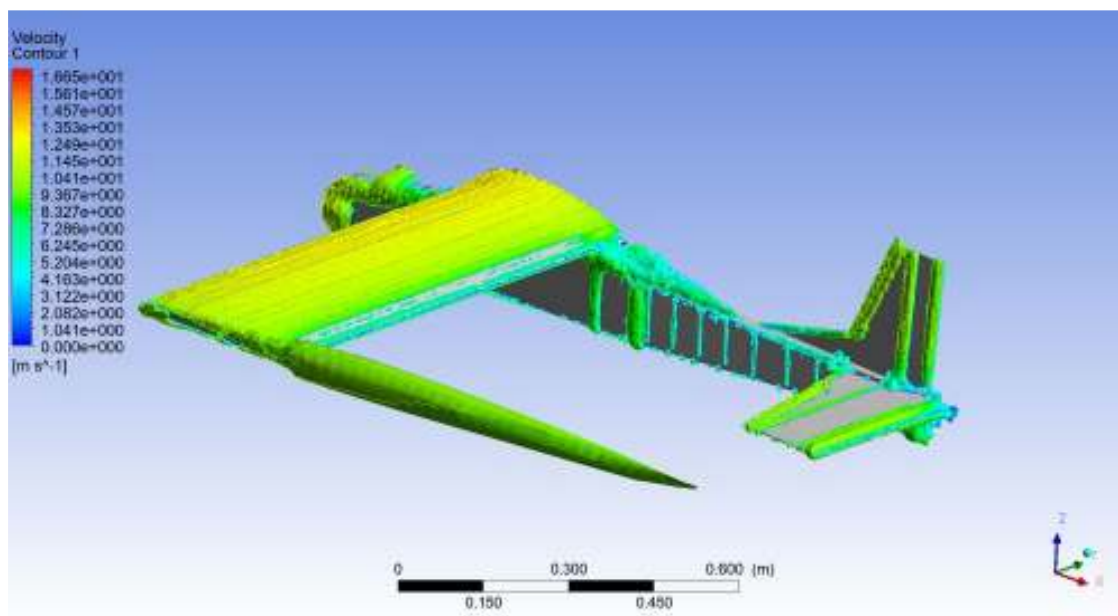
21. ábra Sebességeloszlás 0°-os és 12°-os állásszög esetében

A repülőgép körül kialakult turbulens zónákat jól szemlélteti a turbulens kinetikai energia változása (22. ábra). Jól látható, hogy az előzőekben ismertetett zónák közül, a szárny mögötti területen van a legintenzívebb turbulens zóna, a környezethez képest.

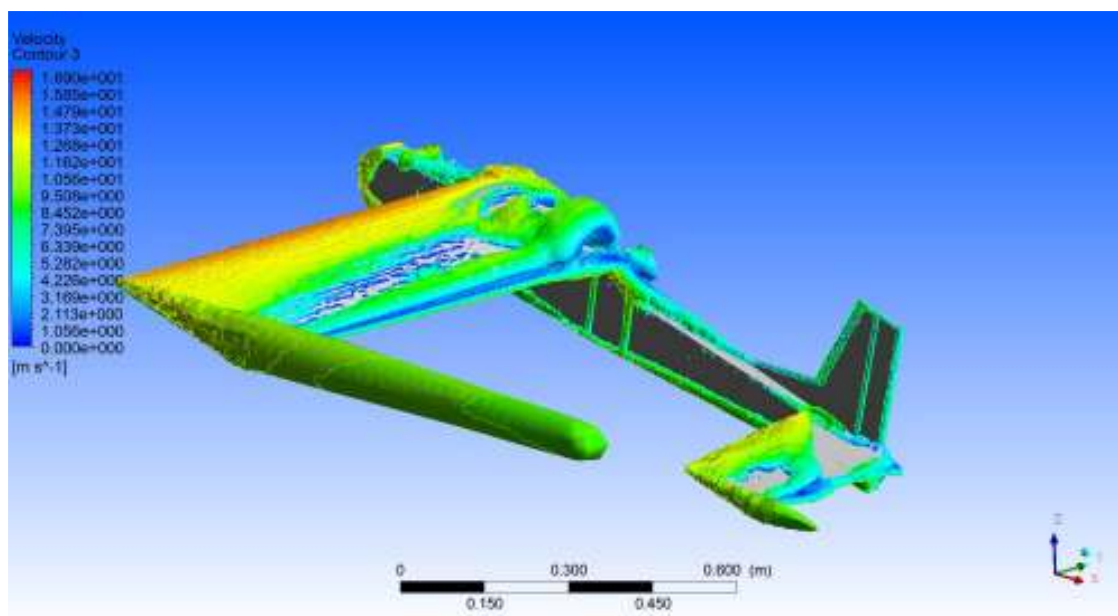


22. ábra Turbulens kinetikai energia

A következő két ábrán (23. ábra és 24. ábra) a 0° -os és 12° -os állásszög esetében láthatóak az örvényléses zónák. Észrevehető, hogy a fentebb említett zónák (orr, törzsközép, farok rész) mellett a szárny és a vízszintes vezérsík szárnyvég örvényei is intenzívebbek az állásszög megváltozásával.



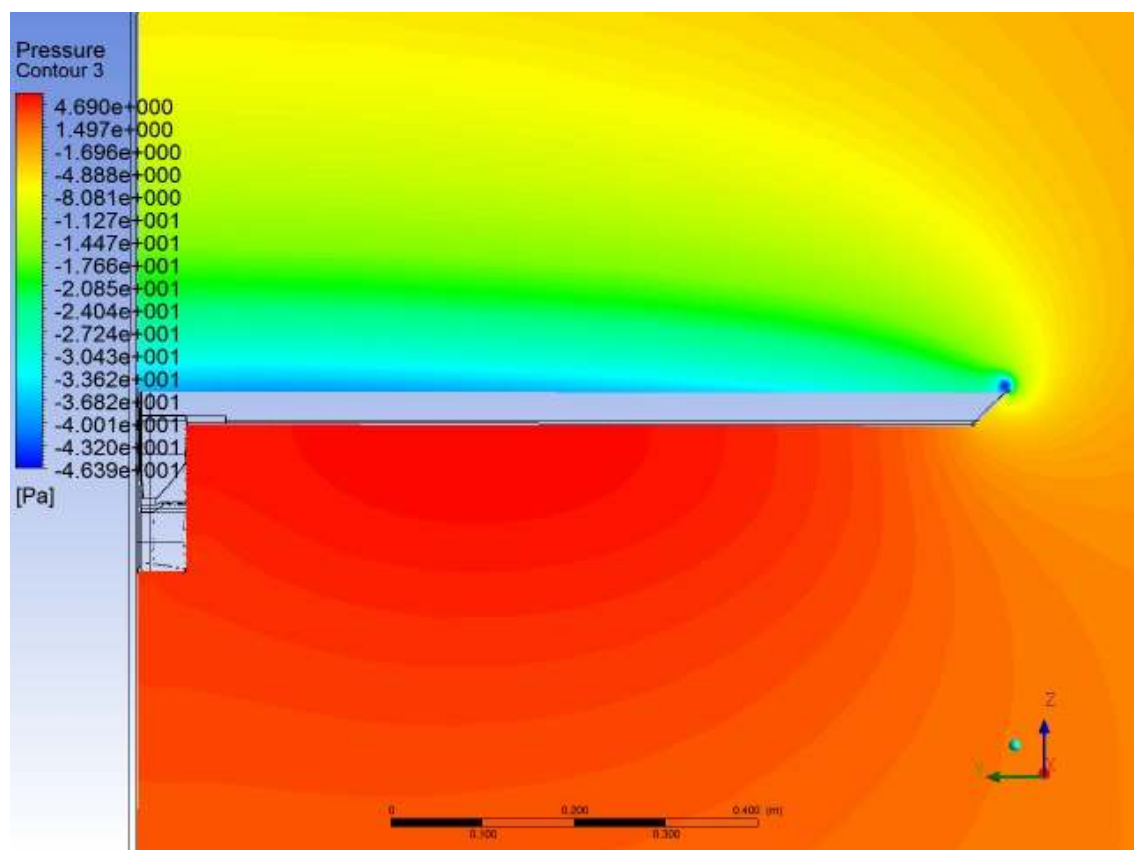
23. ábra Szárnyvég örvények "Swirling strenght" = 0.02 esetén $\alpha = 0^\circ$ állásszög mellett



24. ábra Szárnyvég örvények "Swirling strenght" = 0.02 esetén, $\alpha = 12^\circ$ állásszög mellett

A következő képen jól látható a szárnyvég körüli örvényrendszer kialakulása (25. ábra). A véges szárnyak esetében nem csak profil ellenállás keletkezik, hanem egy olyan ellenállás is, amely kifejezetten a felhajtóerő keletkezéséhez kapcsolódik [11]. Ez az

ellenállás a 3D-s áramlás miatt jön létre. A szárny alsó és felső felületei közötti nyomáskülönbség hatására megindul a szárnyvég körül a nyomás kiegyenlítődése. Ez egy olyan patkó örvényrendszer kialakulásához vezet, amely a forgáshoz szükséges energiát a repülőgép mozgásából nyeri, és ezzel közvetlenül felelős ennek az ellenállásnak, az indukált ellenállásnak a kialakulásáért. A szárnyvég Hoerner típusú, aminek kialakítása kedvező hatással van a szárny aerodinamikai jellemzőire. Az éles oldalél esetében a keletkezett örvénymag kisebb méretű lesz, és távolabb helyezkedik el a szimmetria síktól, mint egy lekerekített szárnyvég esetében [12].

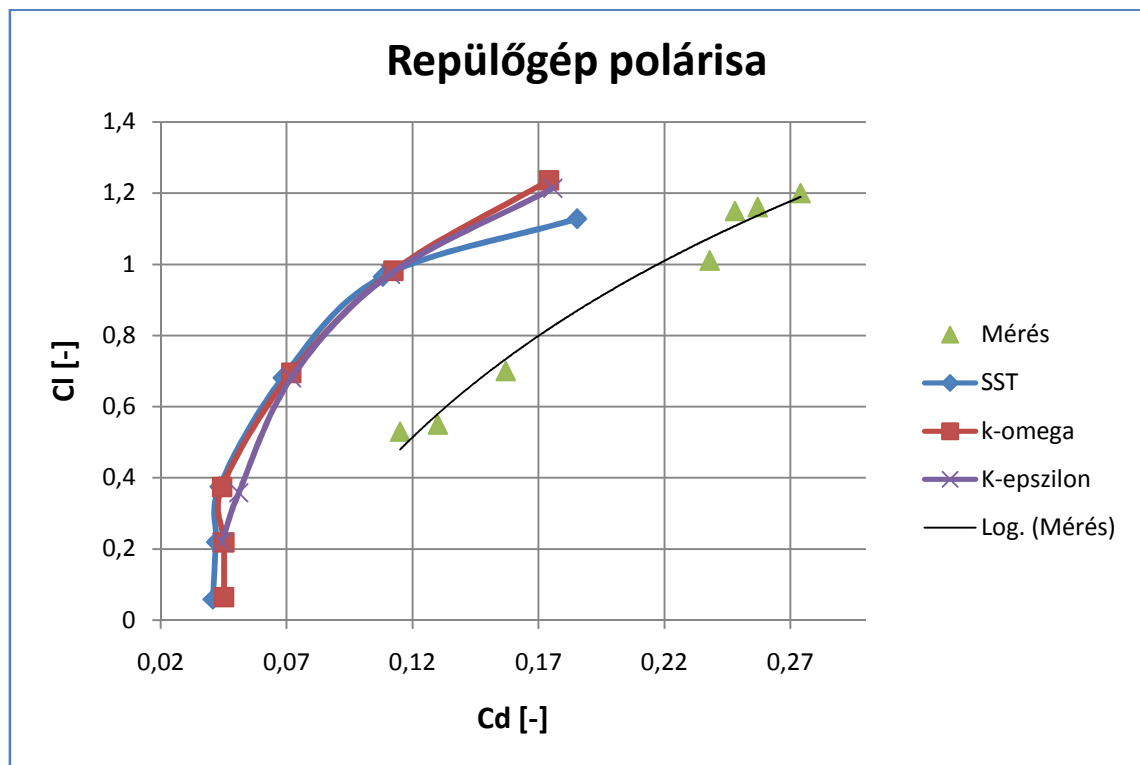


25. ábra Szárnyvégi nyomáskiegyenlítődések

A 5. sz. mellékletben az összes állásszögre vonatkozóan megtalálhatóak a nyomás- és sebességeloszlások.

4.4 Mérés és számítás összehasonlítása

A következő lépés a mérési és számítás összevetése. A mérési és a kapott számítási eredményeket a következő diagramban ábrázoltam (26. ábra).



26. ábra Mérés és számítás

Az eredmények táblázatos formában a 4. sz. mellékletben találhatóak. Látható, hogy a felhajtóerő tényező mért és számított értékei közötti differencia nem számottevő, az ellenállás tényezők nagyobb eltérést mutatnak. Ez a felhajtóerő és az ellenállás nagyságrendbeli különbsége miatt lehetséges. Az eltérés nagy értékű, melynek több oka is lehet:

- Az alkalmazott geometriai egyszerűsítések jelentősen befolyásolták a repülőgép ellenállását
- A mérés valós (esetleg kismértékben eltérő) környezeti viszonyok mellett történt
- Az elkészített háló minősége nem megfelelő
- A számításnál a légcsavart nem vettem figyelembe

Az első esetben a korábban már említett főbb geometriai egyszerűsítések (motortartó

bak, futómű) közül a futómű nagyobb mértékben befolyásolja az áramlást. A motortartó bak is kis mértékben befolyásolja a repülőgépre ható ellenállásért, de mivel bonyolult kialakítású a hálóméret ésszerű növelése mellett nem vehető figyelembe.

A futómű alkalmazásával is pontosíthatóak a számítási eredmények, de ennek a figyelembevétele is jelentősen növeli a szimulációk idejét. Mivel a futómű hengeres kialakítású és nem forog a tengelye körül, nem termel felhajtóerőt, így csak az ellenállás számításánál kell figyelembe venni.

Figyelembe kell venni azt is, hogy a mérés során a repülőgép valós közegben repült. A repülőgép kis mérete miatt, a környezeti hatások (pl. szélökés) nagyobb mértékben befolyásolják a mozgását, mint egy nagy testű repülőgép esetében.

A harmadik esetben a legújabb ipari kutatások kimutatták, ha az y^+ értékét lecsökkentik 1 alá akkor a felületen keletkező kisméretű leválások jól modellezhetőek. Így pontosabb eredményt lehet elérni az ellenállás számításánál. Ennek a módszernek jelentős hátránya az, hogy a határréteg háló első elem középpontjának faltól mért távolsága lecsökken, ezáltal a többi elem méretét is csökkenteni kell. Ez azt jelenti, hogy az elemszám és a szimuláció ideje drasztikusan megnő.

Az eredő ellenállás-tényező:

$$C_D = C_{D0} + C_{Di} + \Delta C_D \quad (4.4)$$

Ahol C_{D0} az alak ellenállás tényező C_{Di} az indukált ellenállás tényező a ΔC_D a repülőgép és részeinek további ellenállásából származó (alapellenállás, hullámenellenállás, interferencia ellenállás) tényező.

Mivel a kapott számítási eredményekből látszik, hogy az ellenállás az állásszög függvényében megfelelően változik így az állásszögtől függő indukált ellenállásra kapott érték megfelelő mértékű. Tehát az alak ellenállás értékének finomítására kell törekedni a továbblépési lehetőségeknél.

5. Továbblépési lehetőségek

Az elvégzett munkát szeretném folytatni, különös tekintettel a számítási eredmények pontosításának az előző fejezetben ismertetett módszerek segítségével. A Repülőgépek és Hajók Tanszéken rendelkezésre bocsájtottak egy nagy teljesítményű számítógépet. Ezzel a számítási kapacitással el lehet készíteni a pontosabb modellt (futómű beépítése), a módosított geometriára finomabb hálót lehet készíteni, amivel el lehet érni a repülőgép felületén az $y^+ < 1$ értéket. Mindezt persze ésszerű határon belül, mivel a mérés is hibával terhelt, így nem biztos, hogy van értelme egy nagyon nagy elemszámú hálóval elvégezni a szimulációt.

A légcsvár alkalmazásának lehetősége. A forgó légcsvartól távozó közeg hatással van a repülőgép körül kialakuló áramlásra. Mindenképpen érdemes foglalkozni ezzel a témával. Megvizsgálni, hogy ezzel a kialakítással milyen áramlási kép alakulna ki, hogyan befolyásolja a légcsvár a repülőgépre ható légerőket.

A harmadik lehetőség a más típusú ellenállás számítás. A szoftver az ún. Near Field Method-ot alkalmazza az áramlási térben lévő testre ható erők kiszámítására. Ez a módszer a testre ható erőt, a nyomás és a nyírófeszültség a test felületén vett integráljával számolja ki a megfelelő felületi normálisokkal. A gyakorlatban más módszerek is vannak ennek kiszámítására, a legismertebb az ún. Far Field Method.

Melynek alapja az impulzus tétel [13]. A számítás lényege, hogy egy S felületen, amely körülzárja vizsgálandó testet tartalmazó térfogatot, meg lehet határozni a testre ható erőket az impulzus egyensúlyból. Mindenképpen érdemes foglalkozni a témával, összehasonlítani a korábbi számítási és mérési eredményekkel.

6. Összefoglalás

A jelen munkában megvizsgáltam a Trainer 60-as UAV körüli áramlást, különös tekintettel a testre ható ellenállásra és felhajtóerőre, valamint a repülőgép polárisára. Elsőként elkészítettem a CAD modellt, amit egy CFD szoftverbe importáltam. A következő lépésben véges térfogat-elemekre bontottam az áramlási teret. A megfelelő peremfeltételek beállítása után, különböző turbulencia modellek és állásszögek esetén elvégeztem a numerikus áramlástani szimulációkat. A kapott eredményeket részletesen ábrázoltam, külön figyelmet fordítva a repülőgép körül kialakult örvényes zónákra, a törzs és a szárny körül kialakult leválásokra és ezek változására a különböző állásszögek esetén. A kapott eredményeket összehasonlítottam a mérési eredményekkel, valamint kitértem a mért és számított eredmények közötti különbségekre és ezek lehetséges okaira. Végül ismertettem a továbblépési lehetőségeket, ahol a geometriai diszkretizáció finomításának lehetőségét, a légeszavarnak a numerikus számításban való alkalmazását és az ellenállás számításának további lehetőségét tárgyaltam.

7. Felhasznált irodalom

- [1] Repülőgépek és Hajók Tanszék: Repülős füzetek 1. évfolyam 1. szám, 2011.
- [2] Repülőgépek és Hajók Tanszék: Repülős füzetek 1. évfolyam 2. szám, 2012.
- [3] Veress Árpád: Bevezetés az áramlástan numerikus módszereibe, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, egyetemi jegyzet, Budapest, 2002
- [4] Dr. Gausz Tamás: ÁRAMLÁSTAN Budapest, 2010
- [5] ANSYS CFX 11.0 Theory Reference, Chapter 7 Fluid Flow, 7.1 Fluid Flow Fundamentals, www.kxcad.net/ansys/ANSYS/ansyshelp/thy_heat5.html
- [6] ANSYS CFX-Solver Theory Guide, 2006.
- [7] Veress, Á. – Rohács, J. és mások.: Axiális kompresszor állólapát-futólapát szegregált numerikus áramlástani modellezése, Új évszázad, új technológia, Grippenek a Magyar légtérben Konferencia 2006. április 21.
- [8] Wilcox, David C., "Reassessment of the Scale-Determining Equation for Advanced Turbulence Models", AIAA Journal, Vol. 26, pp. 1299–1310 (1988).
- [9] Menter, F. R., "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications", AIAA Journal, Vol. 32, pp. 1598–1605 (1994).
- [10] NACA Report 1135: Equations, Tables and Charts for Compressible Flow by Ames Research Staff, Ames Aeronautical Laboratory, California, 1953.
- [11] Varga Béla: A wingletek aerodinamikája és térhódításuk a repülés különböző területein, http://www.szrfk.hu/rtk/kulonszamok/2004_cikkek/varga_bela.pdf, 2004
- [12] Dr. Rohács József, Dr. Gausz Zsanna, Dr. Gausz Tamás: Aerodinamika Egyetemi Tananyag, 2012.
- [13] Ashley, H., and Landahl, M., Aerodynamics of Wings and Bodies, Addison-Wesley, Reading, 1965.

8. Mellékletek

1. sz. melléklet

4. táblázat ellenállás tényező és az y^+ az elemszám függvényében

Elemszám [db]	178983	402673	807959	2176367	3027548
Ellenállástényező C_D [-]	0,082668	0,075325	0,077384	0,072511	0,068385
y^+ [-]	173,788	138,734	91,641	60,953	36,81

2. sz. melléklet

5. táblázat Repülési sebesség és az ellenállás tényező

Repülési sebesség v [m/s]	10	15	20
Ellenállás tényező C_D [-]	0,043287	0,042852	0,042247

3. sz. melléklet

6. táblázat Az ellenállás és felhajtóerő tényező értékei

Állásszög α [°]		-5	-2	0	4	8	12
SST	C_D [-]	0,0407	0,0420	0,0433	0,0684	0,1082	0,1853
	C_L [-]	0,0589	0,2192	0,3748	0,6808	0,9655	1,1277
k-omega	C_D [-]	0,0451	0,0451	0,0444	0,0718	0,1123	0,1741
	C_L [-]	0,0648	0,2186	0,3748	0,6951	0,9821	1,2359
k-epszilon	C_D [-]	0,0411	0,0442	0,0510	0,0719	0,1112	0,1757
	C_L [-]	0,0616	0,2194	0,3582	0,6816	0,9722	1,2134

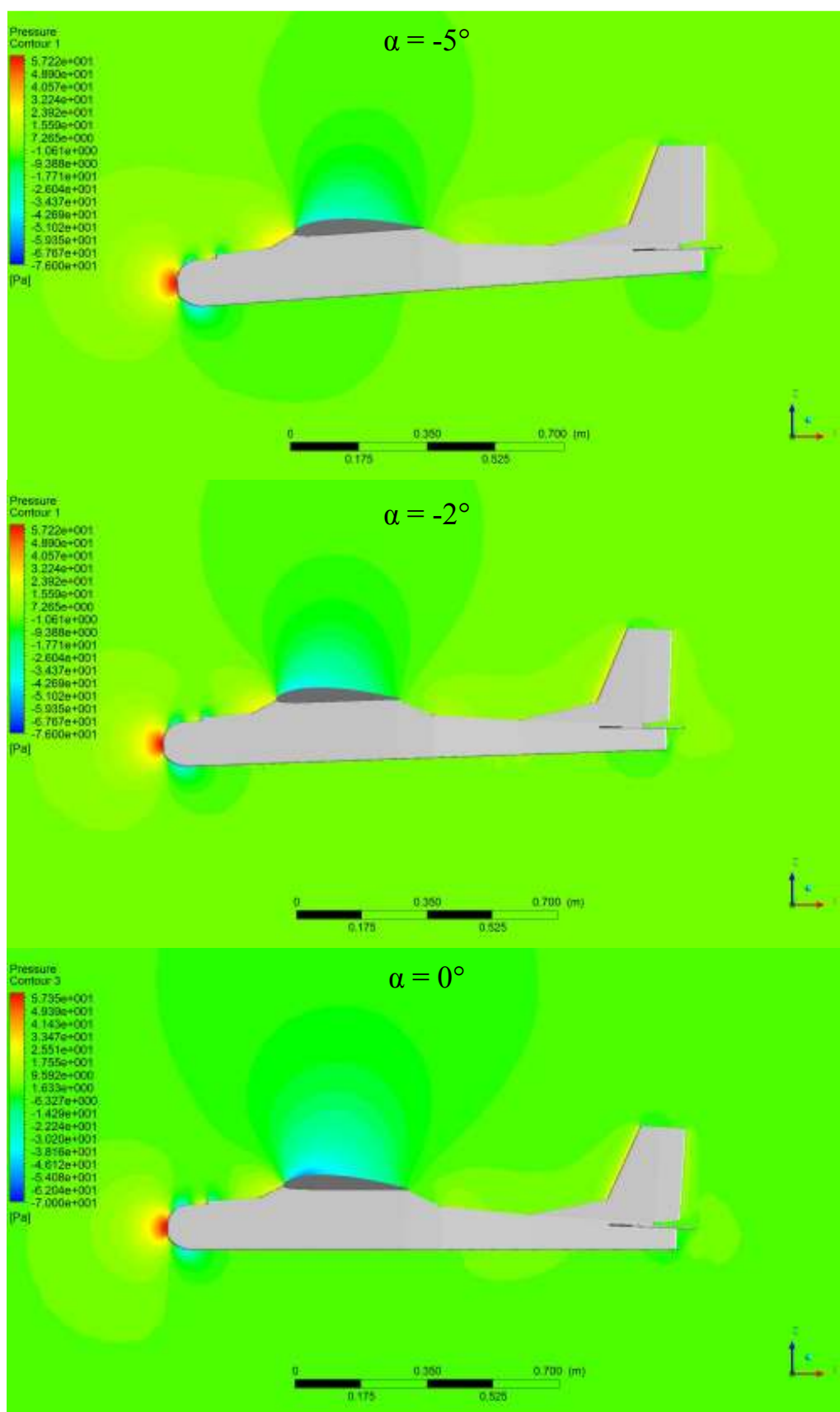
4. sz. melléklet

7. táblázat A mérési eredmények

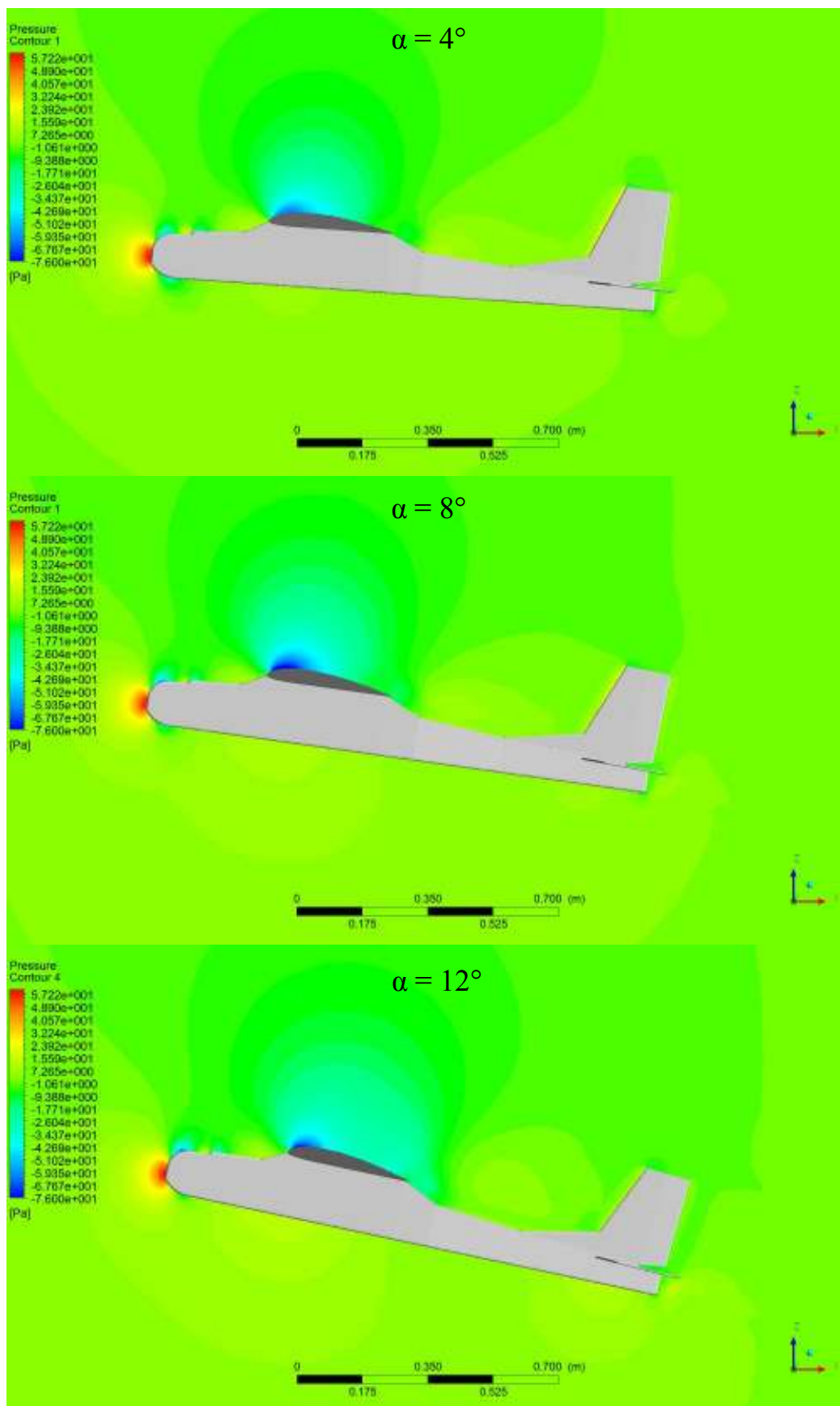
Mérés	C_D [-]	0,115	0,13	0,157	0,238	0,248	0,257	0,274
	C_L [-]	0,53	0,55	0,7	1,01	1,15	1,16	1,2

5. sz. melléklet

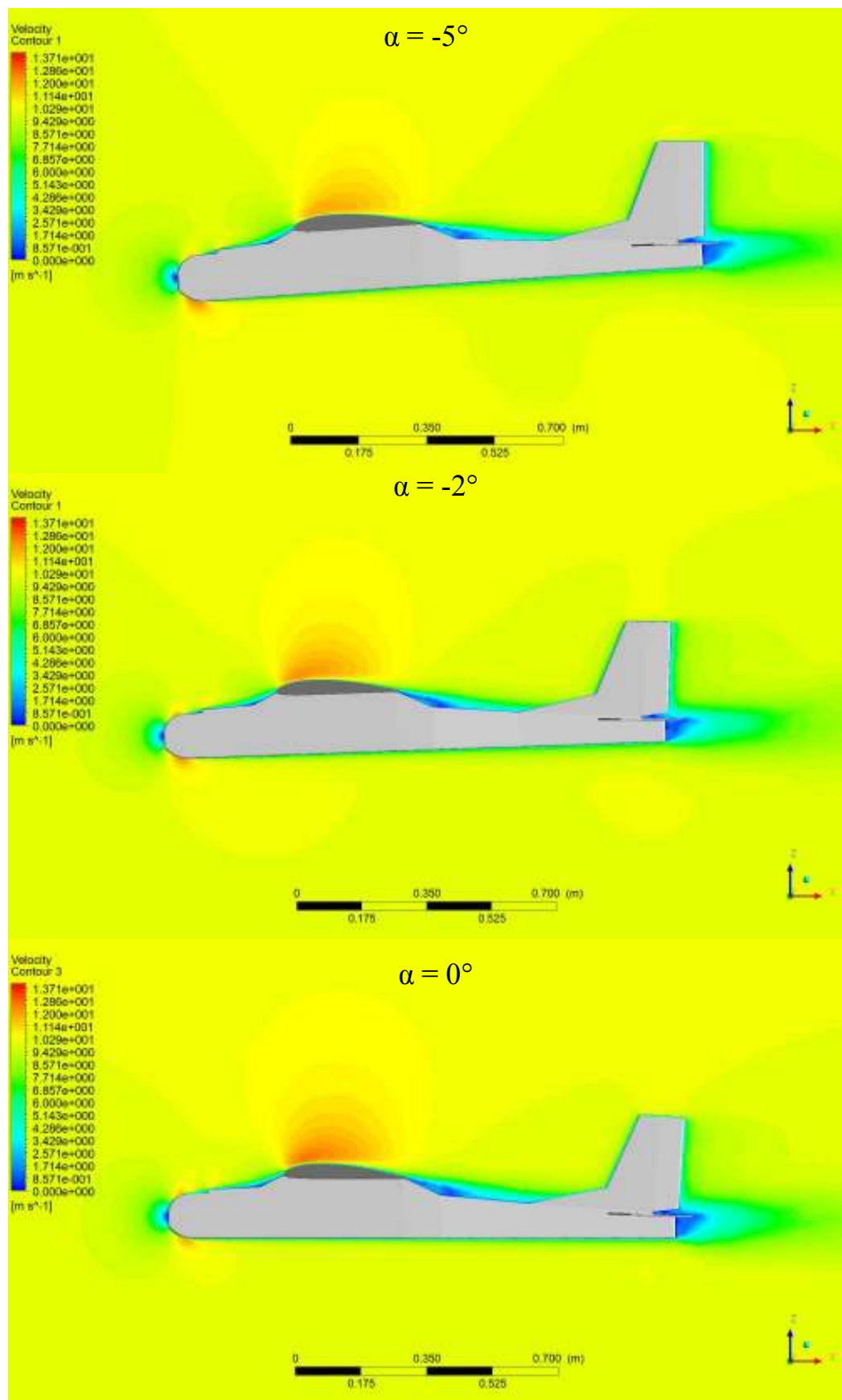
A repülőgép és a szárny körül kialakuló nyomás és sebesség eloszlások a szimmetria síkban, valamint a fesztávolság mentén.



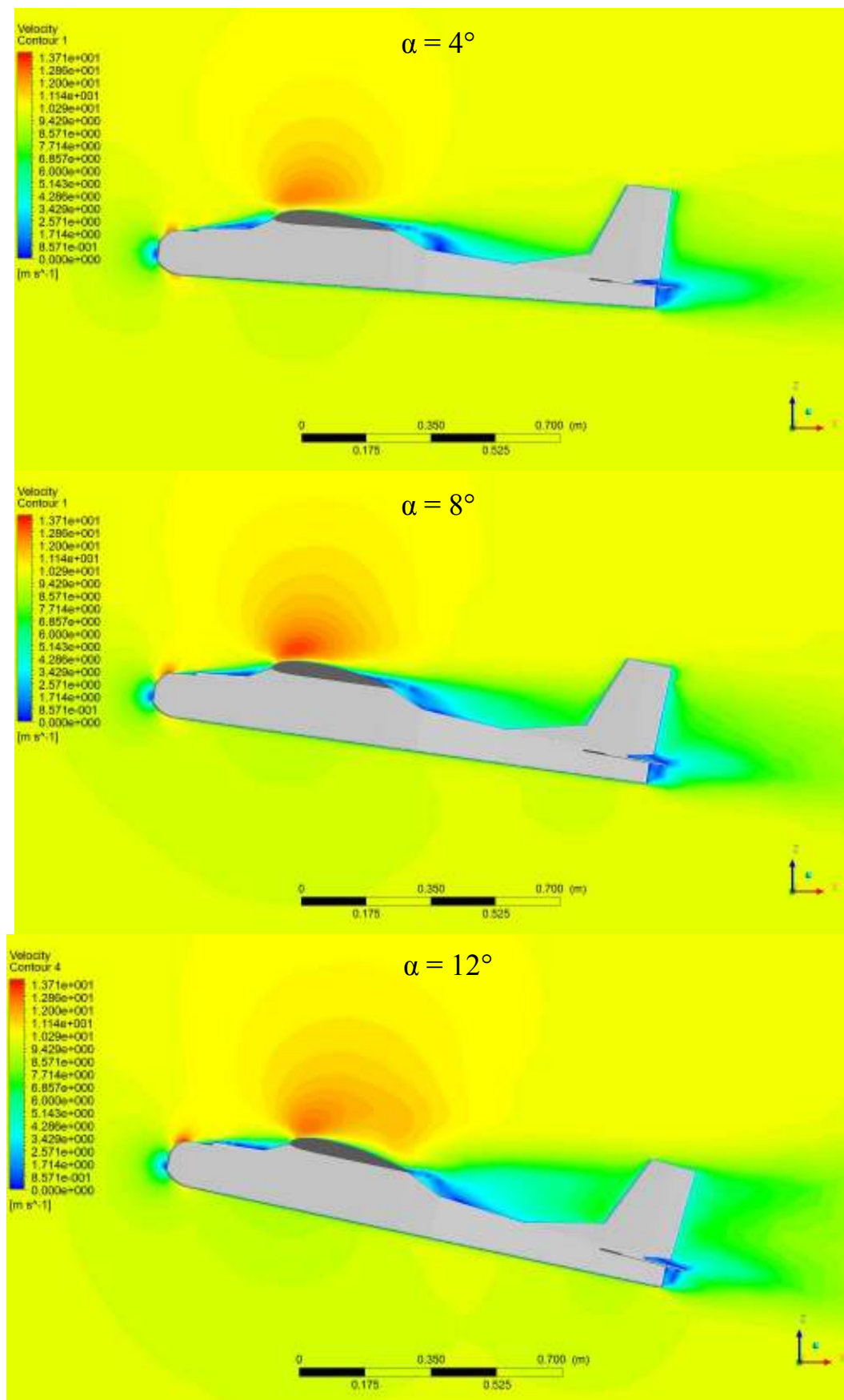
27. ábra Nyomáseloszlás -5° - 0° -os állásszög tartományban



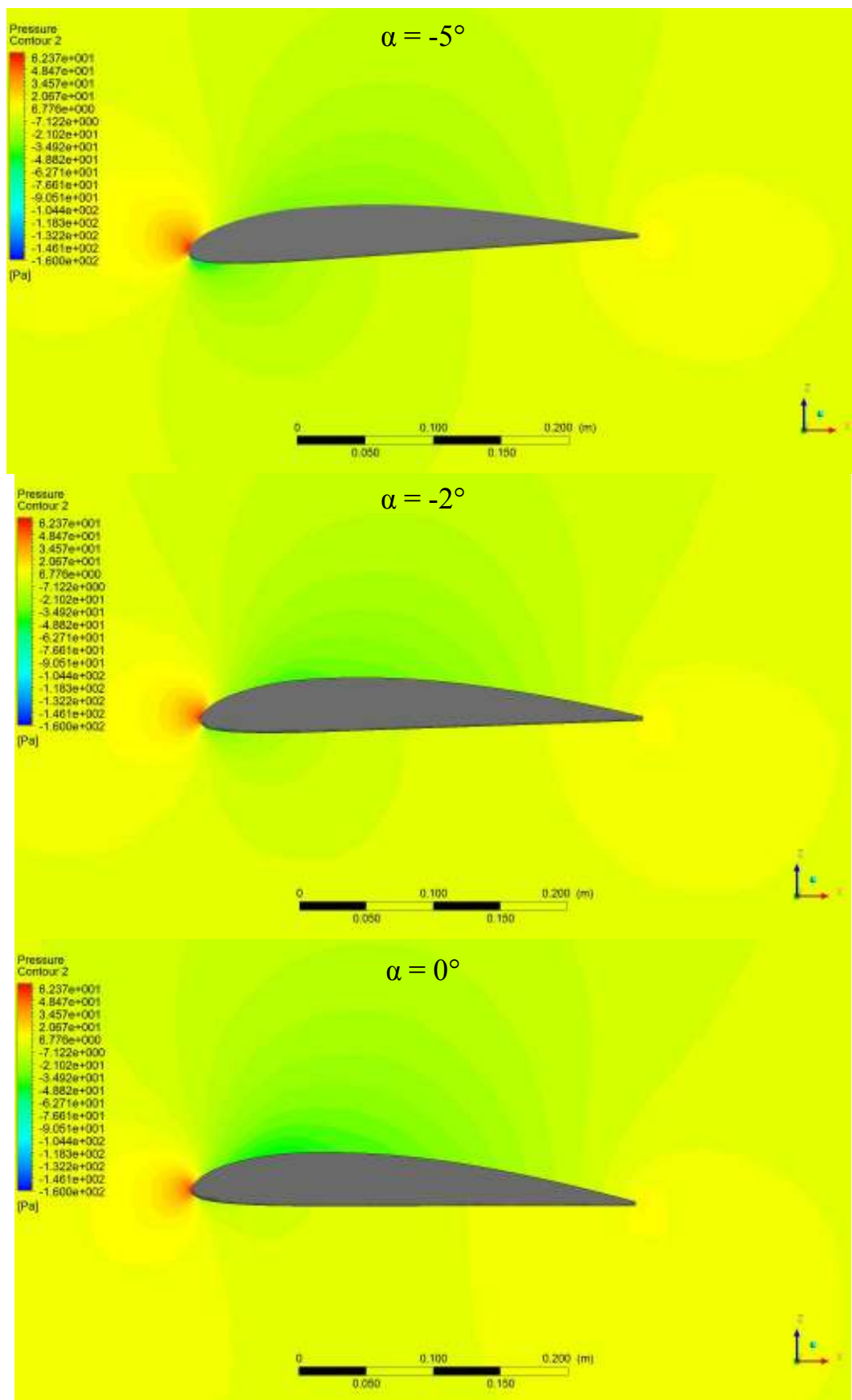
28. ábra Nyomáseloszlás 4° - 12° -os állásszög tartományban



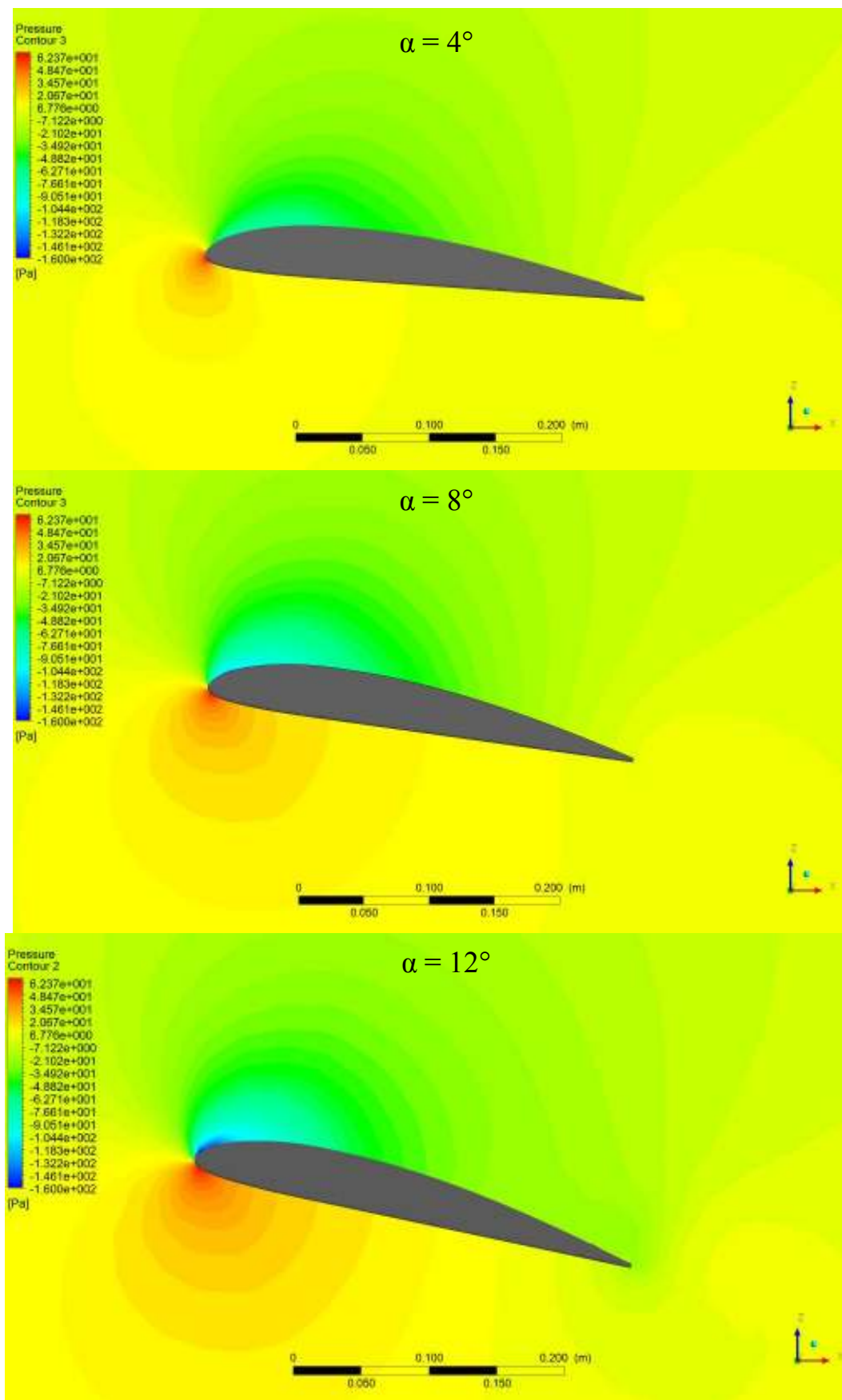
29. ábra Sebességeloszlás -5° - 0° -os állásszög tartományban



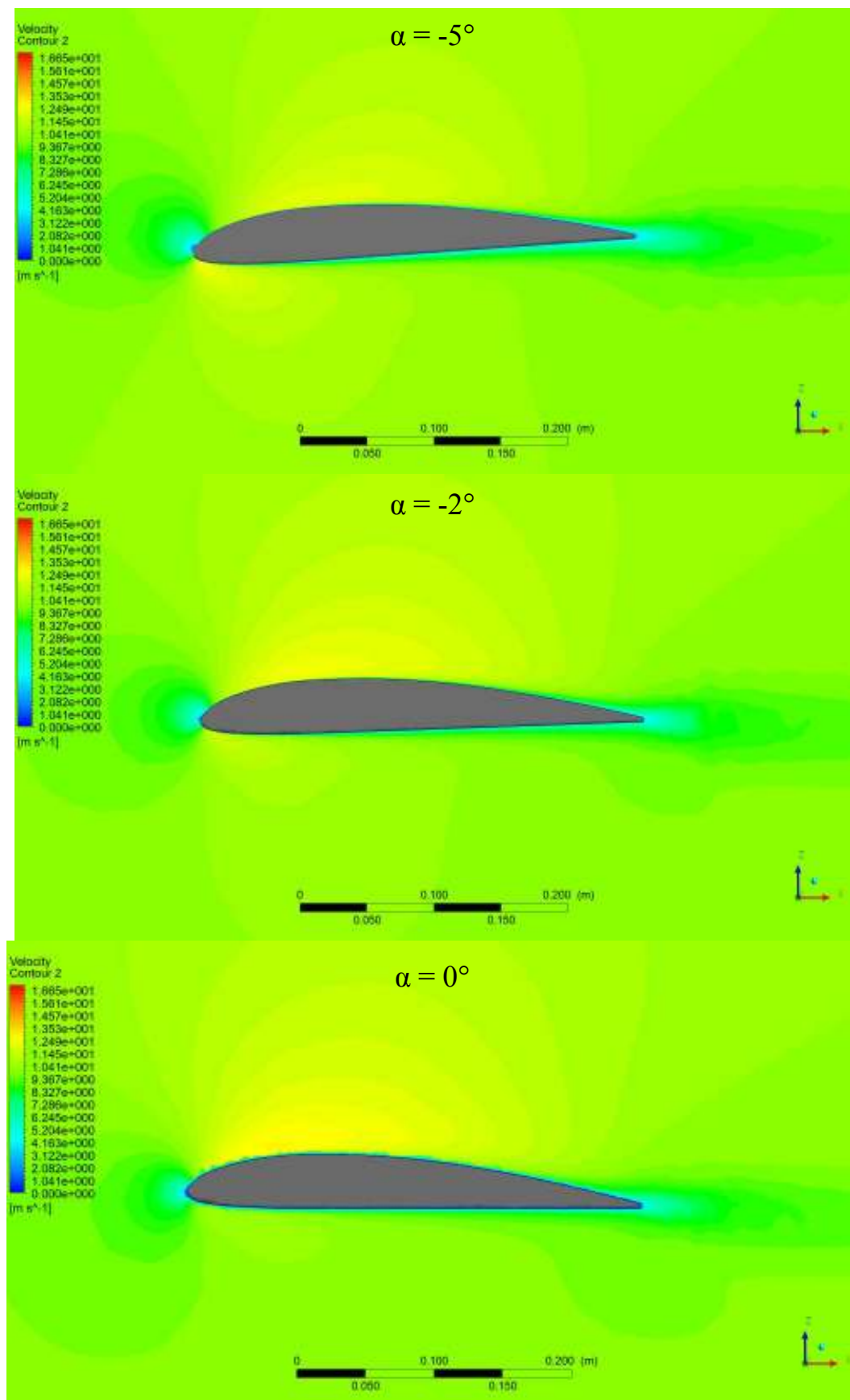
30. ábra Sebességeloszlás 4° - 12° -os állásszög tartományban



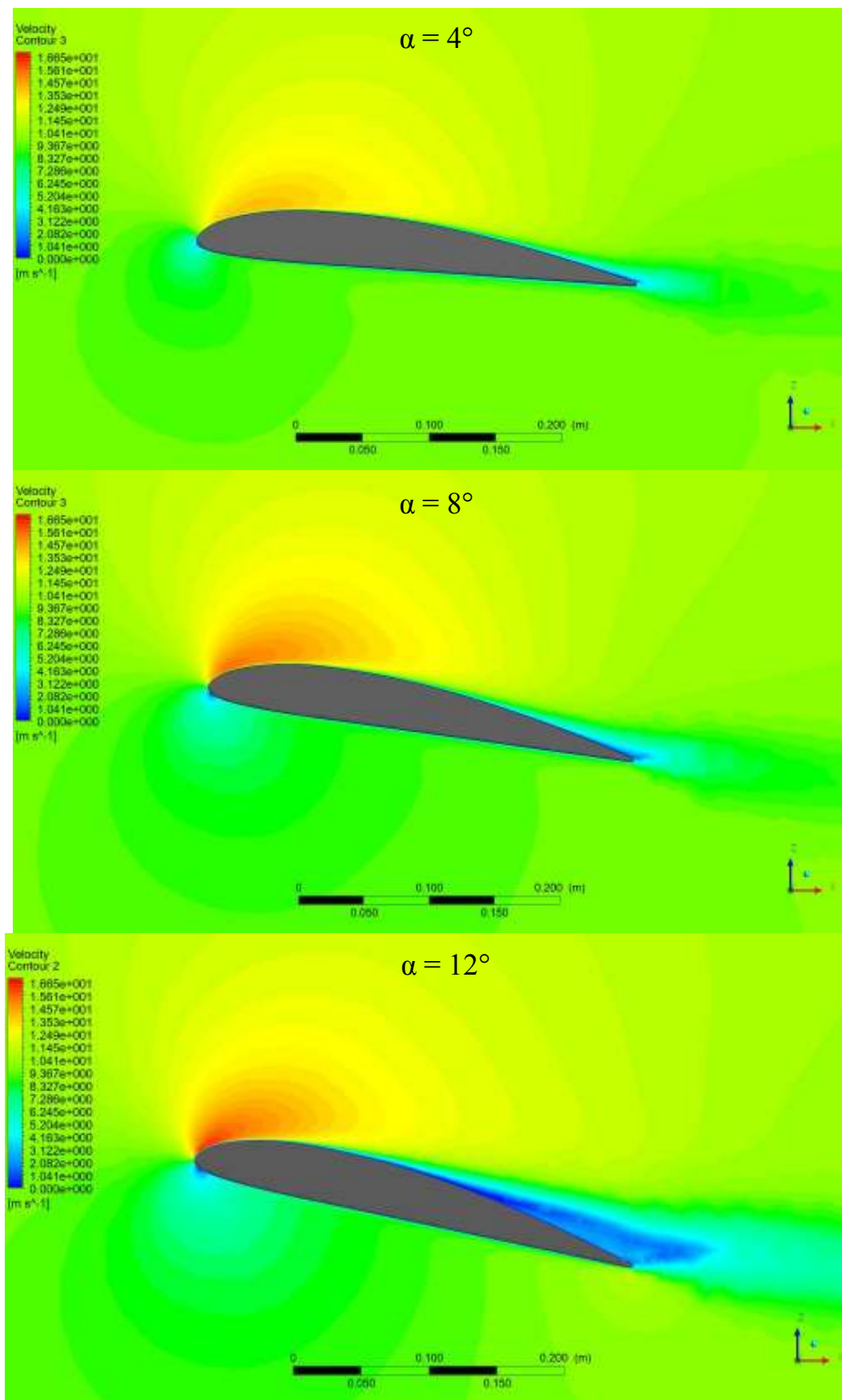
31. ábra Nyomáseloszlás -5° - 0° -os állásszög tartományban



32. ábra Nyomáseloszlás 4°-12°-os állásszög tartományban



33. ábra Sebességeloszlás -5° - 0° -os állásszög tartományban



34. ábra Sebességeloszlás 4° - 12° -os állásszög tartományban