



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Óbudai Egyetem
Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar

ELEKTROMOS MEGHAJTÁSÚ, KOMPOZIT ALAPÚ MODELL REPÜLŐGÉP MEGTERVEZÉSE

**OE-BGK
2022.**

Hallgató neve:
Hallgató törzskönyvi száma:

**Lőrincz Viktor
T009461/FI12904/B**



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Óbudai Egyetem
Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar
Anyag- és Gyártástudományi Intézet

SZAKDOLGOZAT FELADATLAP

Hallgató neve: Lőrincz Viktor

Szaktervezési szám: SZD22052613397643

Törzskönyvi szám: T009461/FI12904/B

Neptun kódja: XXXXXXXXXX

Szak: gépészmérnöki

Specializáció: gépészmérnöki - CAD-CAM-CNC

A dolgozat címe: Rádió frekvenciás távirányítású, elektromos meghajtású, kompozit alapú modell repülőgép megtervezése

A dolgozat címe angolul: Design of a remote-controlled, electric powered composite model aircraft

A feladat részletezése:

1. Mutassa be a modell repülőgépek megtervezésének alapelveit!
2. Készítse el a modell 3D tervét CAD programban!
3. Fejtse ki a modell megépítésének folyamatát!
4. Írja le a kész modell tesztelését, és hasonlítsa össze az adatokat a számításokkal és a szimulációs eredményekkel!
5. Számítsa össze a gyártás költségeit és tegyen javaslatot a költségek csökkentésére!

Intézményi konzulens neve: Dr. Molnár Ildikó

A kiadott téma elévülési határideje: 2024. 05. 15.

Beadási határidő: 2022. 12. 15.

A szakdolgozat: Nem titkos.

Kiadva: Budapest, 2022. 10. 27.



Intézetigazgató

A dolgozatot beadásra alkalmasnak ítélem.

belső konzulens

külső konzulens



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Óbudai Egyetem
Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar

HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott hallgató kijelentem, hogy a szakdolgozat/diplomamunka saját munkám eredménye, a felhasznált szakirodalmat és eszközöket azonosíthatóan közöltem. Az elkészült szakdolgozatban/diplomamunkában található eredményeket az egyetem és a feladatot kiíró intézmény saját céljára térítés nélkül felhasználhatja, a titkosításra vonatkozó esetleges megkötések mellett.

Budapest, 2022. 12. 14.

.....
hallgató aláírása

TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS	5
1. FELADAT MEGNEVEZÉSE.....	7
2. MODELL REPÜLŐ ÉPÍTÉSHEZ SZÜKSÉGES ALAPISMERETEK	11
2.1. REPÜLÉSTANI ÉS GÉPÉSZETI ISMERETEK	14
2.2. ANYAGTUDOMÁNYI ISMERETEK	22
3. ÉPÍTÉS ELMÉLETI MÓDSZERE	28
4. MODELL REPÜLŐ TERVEZÉSE	31
4.1. SZÁRNY TERVEZÉSE	31
4.2. CSÚRŐLAPÁT TERVEZÉSE	36
4.3. FÉKSZÁRNY TERVEZÉSE.....	37
4.4. MAGASSÁGI ÉS OLDALKORMÁNY TERVEZÉSE.....	39
4.5. TÖRZS TERVEZÉSE.....	41
4.6. MOTOR RÖGZÍTÉSÉNEK ÉS HŰTÉSÉNEK TERVEZÉSE.....	43
5. MEGÉPÍTÉS ÉS KIÉRTÉKELÉS	47
ÖSSZEFOGLALÁS	49
SUMMARY	51
IRODALOMJEGYZÉK	53
1. számú melléklet: A vezérlési rendszer bemutatása	55
2. számú melléklet: Kompozit anyagok tesztelése	60
3. számú melléklet: Szárnyformák kiválasztásának módszere.....	68
4. számú melléklet: Szimulációs adatok.....	72
5. számú melléklet: Költséghatékonyság elemzés.....	78

BEVEZETÉS

Szakdolgozatom témájának egy modell repülőgép tervezését választottam, amely mellett a megépítés folyamatát, illetve az elért eredmények kiértékelését végeztem el. Azért ilyen összetett feladatot valósítok meg, mert egyrészt érdekel az aerodinamika és a repülés, másrészt ezáltal a dolgozatomon keresztül a mérnöki munka teljes tartalmát érinteni tudom, az egyetemi évek alatt megszerzett tudásomról reprezentatív képet adhatok. Témám az egyetem által szervezett Tudományos Diákköri Konferencián előadott kutatásomhoz érintőlegesen kapcsolódik, abban elsősorban a függőleges vezérsík problematikáját jártam körül és esetleges elhagyására kutattam megoldásokat, lehetőségeket. Habár a kutatásomban bemutatott ismereteket jelen dolgozatban is felhasználtam, arra külön csak akkor utalok, ha az relevanciával bír. Tulajdonképpen szakdolgozatom a fejlődési folyamatom egyik soron következő szakasza és állomása, mert már az egyemen kezdetén is az aerodinamika és a repülőgéptervezés tanulása volt a fő motivációm.

Elsősorban az aerodinamika iránti érdeklődésem irányította választásomat, ezért dolgozatom az aerodinamikai tervezést illetően nevezhető teljesnek, a modell megépítéséhez szükséges egyéb információk, számítások, tevékenységek és eredmények akkor kerülnek csak kifejtésre, ha azok jelentőséggel bírnak. A modell repülő aerodinamikai tervezése során az alapszámításokat forráskutatás útján végeztem el, majd SolidWorks programban alakítottam ki a végleges formát és ugyanitt hajtottam végre a várható eredmények szimulációit is. A kapott eredmények alapján folyamatosan változtattam a kialakításon, amíg a számomra optimális formát meg nem találtam, majd a modell építését kompozit anyagból terveztem megvalósítani tekintettel arra, hogy a repülésben különösen fontos a súlycsökkentés melletti magas strukturális szilárdság.

Szakdolgozatom témaválasztását és megvalósítását igyekeztem továbbá egyfajta hiánypótlásként is hasznossá tenni. A hazai kutatásom ritkán tárt fel olyan irodalmat, amely a nemzetközi forrásokhoz hasonló mélységben és részletességgel foglalkozna a kapcsolódó speciális ismeretekkel, így például a kompozit anyagok tulajdonságaival és gyártásával, a vezérsíkok méretezésével, a modell repülő elektronikai kialakításával, vagy akár a felhasznált számítógépes programok célzott használatával. Számos területen külföldi forrásból kellett kiegészítenem a tudásomat, amikre hasznosság szerint

szelektálva hivatkozok, megkönnyítve ezzel azok kutatását, akik később szintén a témával kívánnak foglalkozni.

Kutatásom kezdeti szakaszában kiterjedt a modell repülő elektromos rendszerének és meghajtásának napelemmel való ellátásának lehetőségére is, azonban a források feldolgozása nem nyújtott megfelelő alapot és igazolható hasznot a technológia használatához. A tudomány és a technikai fejlődés fokozatosan halad az elektromos repülőgépek bevezetése felé, ezért több forráson keresztül is vizsgáltam ezek megvalósíthatóságát – különösen részletes leírást az [1.] forrás nyújt ebben a témában. Ugyanakkor a napenergia felhasználását szolgáló eszközök jelenleg olyan kialakítást kívánnak meg, amely nem egyeztethető össze a repülőgépekkel kapcsolatos alapvető elvekkel. A pár kilogrammos modellhez tervezett napelem rendszer hozzávetőleg megduplázza a modell össztömegét és felületét. Ezirányú kutatásomat azzal a megállapítással zártam, hogy a nap energiáját szakdolgozatom keretében nem lett volna hatékony felhasználni.

Pár szót szeretnék még ejteni a SolidWorks program használatáról a tervezés során. Az egyetemi éveim alatt több CAD programot is megismertem, például a SolidEdge (Siemens), Siemens NX, Fusion 360 (Autodesk), azonban ezek kezelőfelületét nehezebbnek, illetve szolgáltatásait kevesebbnek találtam a SolidWorks programhoz képest. A SolidEdge működésében az utólagos módosítások túlzott bonyolultságát nem szerettem például. A Fusion 360-t különösen az egyszerű alakzatok gyors formatervezésére találtam alkalmasnak, részletes tervezéshez hiányoltam a szerkesztési pontok koordináta szerinti megadását. Számomra a legkézenfekvőbb használatú CAD programnak a SolidWorks bizonyult, ezért ezt választottam.

Céлом a szakdolgozatomban kitűzött feladat megoldásával az volt, hogy ne csak elméletben dolgozzak fel egy kiválasztott témát, azt ne csak teoretikusan vizsgáljam, hanem gyakorlati eredményeket is elérjek, valamint ami számomra a legnagyobb kihívást jelentette, hogy értékkel bíró mérnöki terméket állítsak elő – akár jelen szakdolgozatomban, akár később erre alapozva, tovább fejlesztve. Azt gondolom, az egyetemi képzés színvonalát és célját hangsúlyozza, ha a hallgató képes önállóan komplett problémát megoldani és a piacon is értékesíthető terméket kidolgozni. Az írásos dokumentáción keresztül reprodukálhatóvá tettem az elvégzett munkám.

1. FELADAT MEGNEVEZÉSE

Szakdolgozatom témája egy rádió frekvenciás távirányítású, elektromos meghajtású, kompozit alapú modell repülőgép megtervezése, megépítése és tesztelése. A kitűzött komplex feladat végrehajtása azért is nyerte el az érdeklődésemet, mert azt nem lehet lineárisan megoldani. Ez alatt azt értem, hogy a szakdolgozat elkészítéséhez rendelkezésre álló időn kívül minden egyéb paraméter változtatható, vagy kifejezetten változtatásra szorul egy másik paraméter függvényében és ezért állandó újraszámítást, ellenőrzést, vagy próbát igényel a folyamat. Nem lehet egy listát követve eljutni a végeredményig, iteráció útján érhető el egy ideálshoz közelítő megoldás. Nem csak egyenletek eredményeit kell egymáshoz párosítani, hanem a tervezés alterületeinek eredményét is vizsgálni kell a többi tervezés függvényében. A meghajtást az aerodinamikai tervhez és az elektromos rendszerhez kell megválasztani, miközben az aerodinamikát befolyásolja a meghajtás pozíciója, az irányítási felületek elhelyezése és a szárnyprofil alakja, de a konstrukciónak ellen kell állnia a felmerülő összes igénybevételnek, amivel megint csak szemben áll, hogy a lehető legkönnyebbnek kell lennie. A repülő tervezési folyamata tehát több alterület közös egymásra hatásának vizsgálatával és közelítésével valósítható meg. Annak érdekében, hogy a feladatot meg lehessen oldani, mindenekelőtt meg kell határozni a szakdolgozat végeredményének várt alapvető tulajdonságokat és kiinduló adatokat. A következő paramétereket határoztam meg a modell esetében adottnak:

- A modell repülő szárnyfesztsávolsága 1400 mm,
- Meghajtása 2 darab, a szárnyon elhelyezett elektromos motorral történik,
- Kompozit anyagból készül.

Az alapvető paraméterek után meghatároztam azokat az elvárásokat a modellel szemben, amiket teljesítenie kell azért, hogy a feladat megoldását sikeresnek tekintsem. Ezek a feltételek és elvárások azok, amelyek a tervezésem és tesztelésem alapját képezik:

1. A modell legyen képes repülni,
2. A modell képes legyen folyamatosan a levegőben maradni, akadályokat kikerülni megfelelő irányítás által,
3. A modell önerőből képes legyen legalább 300 másodpercig repülni.

Az 1. elvárásom teljesítéséhez az szükséges, hogy a modell a saját súlyánál (F_{modell}) nagyobb felhajtóerőt (F_f) termeljen a szárnyain, azaz:

$$F_f > F_{modell}$$

tovább rendezve az egyenletet:

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot c_L \cdot A_{sz} > m_m \cdot g \quad (1-1)$$

ahol a

ρ – a modellt körülvevő közeg sűrűsége, azaz a levegő sűrűsége,

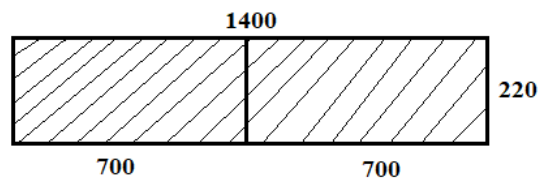
v – a modell és a közeg közötti relatív sebességkülönbség,

c_L – a modell felhajtóerő tényezője (amelynek értéke a tervezéstől függ),

A_{sz} – a felhajtóerőt termelő elemek sík vetületi felülete (szintén a tervezéstől függ),

m_m – modell tömege.

Egyszerűsítéssel élve, a levegő sűrűségén és a gravitációs állandón (g) kívül minden más változó, azonban a repülésre készen álló modell esetében már csak a sebesség változtatható. A számítások elvégzéséhez a modell tömegét 2 kg-nak határoztam meg – amely érték a várhatónál szándékosan nagyobb, így biztonsági tartalékot is hagytam a számításban – illetve a felhajtóerőt termelő szárny felületét $0,3 \text{ m}^2$ -ben határoztam meg az 1. ábra alapján:



1. ábra: Szárnyfelszín vázlata alapszámításhoz

A felhajtóerő tényezőt 0,6 értékűnek határoztam meg, és így a fenti (1-1) egyenletből a lenti eredményre jutottam:

$$\frac{1}{2} \cdot 1,25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot v^2 \cdot 0,6 \cdot 0,3 \text{ m}^2 > 2 \text{ kg} \cdot 9,83 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Az egyenletet átrendezve a v -re meghatározható a felszálláshoz szükséges minimális sebesség (v_{min}):

$$v^2 = \frac{2 \text{ kg} \cdot 9,83 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 2}{1,25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,6 \cdot 0,3 \text{ m}^2}$$

$$v_{min} = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,83 \cdot 2}{1,25 \cdot 0,6 \cdot 0,3}} = 13,2 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 47,6 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

A kapott értéket visszahelyettesítem a felhajtóerő eredeti képletébe ellenőrzés céljából:

$$F_f = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot c_L \cdot A_{sz} = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(14 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 \cdot 0,6 \cdot 0,3 \text{ m}^2 = 19,6 \text{ N}$$

Megállapítottam, hogy a felszálláshoz megcélzott sebesség a $13,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, azaz $48,5 \frac{\text{km}}{\text{h}}$.

Az 1. elvárásom teljesítéséhez ezt a sebességet kell elérnem, erre a sebességre kell minimálisan terveznem a modellt. A sebességet úgy tudom elérni, hogy megfelelő erősségű meghajtást választok hozzá. Ezt ismét számítással határozom meg. A meghajtásnak le kell küzdenie a felhajtóerő termelésre fordított erőt és a légellenállást, amiből kiindulva felírható az [1.] forrás 39. oldalán található (3.4) sorszámú képlet, azaz:

$$P_m > (F_D + F_{fx}) \cdot v$$

$$P_m = \frac{c_D}{c_L^{\frac{3}{2}}} \cdot \sqrt{\frac{(m \cdot g)^3}{A_{sz}}} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \quad (1-2)$$

amely egyenletben

c_D – a modell légellenállási együtthatója (0,2 értékűnek vettem).

Az (1-2) egyenletbe behelyettesítve a már ismert értékeket, ki tudtam számítani azt a minimális motorteljesítményt ($P_{m_{min}}$) és tolóerőt (F_m), amit a két motortól együttesen elvárok.

$$P_{m_{min}} = 86,7 \text{ W}$$

$$F_m > \frac{P_m}{v} \rightarrow F_m > \frac{86,7 \text{ W}}{13,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 6,4 \text{ N} \quad (1-3)$$

A két motornak tehát együttesen 6,4 N tolóerőt kell minimálisan teljesítenie, hogy a modell felszálljon. Ehhez 86,7 W-os együttes teljesítményre van szükség. Ennél nagyobb teljesítményű motor együttest választottam.

A 2. és 3. feltételek teljesítése kevésbé oldható meg egyenletek által. A modell irányításához két alapvető feltételnek kell teljesülnie. Egyrészt megfelelő kialakítású és méretű kormánylapokat kell tervezni (természetesen megfelelően szilárd rögzítés mellett), másrészt ezek mozgatásához megfelelő erősségű szervomotorokat kell beszerezni a piaci választékból, vagy egyedileg tervezni. A kormánylapok kialakítása és helyzetük a fentiek miatt szintén tervezést igényel. A terveimet a [2.] és [3.] forrásokból kiindulva és végül szimulációkkal igyekeztem előzetesen igazolni. Az elért eredményeket

később szintén összehasonlíthatok a modell tényleges viselkedésével. Illetve hatékonynak tartom az egyes kormányfelületekből két különböző méretet is legyártani annak érdekében, ha az előzetes tervekhez képest a modell irányítása igényelné a határozottabb beavatkozást. Kisebbit nem érdemes tervezni, mert finomabbra hangolás a kiválasztott távirányítóval végrehajtható szükség esetén. A 3. feltétel teljesítése az elektronikai rendszer tervezése mellett függ még a tesztkörnyezettől is. Sajnos semmilyen előzetes tapasztalatom nincsen a repülési idő megbecsüléséhez, viszont azt tudom, hogy függ a motorok áramszükségletétől, az irányítási elemek beavatkozásának gyakoriságától, továbbá természetesen az akkumulátor kapacitásától. A modell elektronikai összeállításához az 1. számú mellékletben nevezett internetes kalkulátorokat és egyéb személyes segítséget vettem igénybe. A kiválasztott elektronikai eszközök adataival elvégzett kalkuláció teljesítette a 3. feltételt is, ennek eredményét szintén az 1. számú mellékletben osztom meg. A szakdolgozatom keretében tervezett repülő modell alkalmas lehet az internetes forrás kalkulációjának ellenőrzésére is.

Ahogy a bevezetésben már említettem, a feladat megoldásához kapcsolódóan a napelemcellák szükséges felületét is kiszámoltam. Feltevésem szerint akkor lett volna érdemes kísérletezésbe kezdeni, ha a napelemcellák összteljesítménye megfeleltethető a két motor együttes teljesítményének. Tételezzük fel, hogy 1 cella 3,6 W és 80% hatásfokú, akkor a következő egyenlet írható fel:

$$P_{min} = 3,6 \cdot 0,8 \cdot x \quad (1-4)$$

ahol az x az a cellák darabszáma.

Átrendezve az egyenletet:

$$x = \frac{P_m}{3,6 \cdot 0,8} = 30$$

Tekintettel arra, hogy a példában szereplő cella teljesítménnyel 125x125 mm méretben szerezhető be napelem, az elhelyezésükhöz 0,47 m² hasznos felület lenne szükséges. Ekkora felület egyrészt nem áll rendelkezésre a modellen, másrészt látható, hogy a 0,3 m²-es szárnyfelülethez képest közel 56% növekedést jelentene. A napelem elvetése feltétlenül szükséges volt a szakdolgozatomban vállalt feladat megoldásához, nagyjából a felére tudtam csökkenteni ennek a döntésnek köszönhetően a modell tömegét.

2. MODELL REPÜLŐ ÉPÍTÉSHEZ SZÜKSÉGES ALAPISMERETEK

A kitűzött feladat megoldását azzal kezdtem, hogy összeszedtem, majd sorrendbe állítottam a szükséges kiindulási információk területeit. Az alábbi szakismeretek forráskutatását kellett elvégezni a feladat megoldásához:

- A. Elektronikai ismeretek,
- B. Aerodinamikai ismeretek,
- C. CAD (és szimulációs) program ismeret,
- D. Kompozit és 3D nyomtatás anyag- és gyártástechnológia,
- E. Repülési tesztek kivitelezése és az eredmények mérése.

A. Elektronikai ismeretek: Természetesen a modell tervezése nem követelt meg villamosmérnöki szaktudást azáltal, hogy előre gyártott elektronikai elemeket vásároltam a meghajtáshoz és az irányításhoz, de mivel egyedi tervezésről van szó, mielőtt egy alrendszer fel tudtam építeni, a kapcsolódó elemeket és tulajdonságaikat részletesen meg kellett ismernem. Az elektronikai rendszer optimalizálására a szakdolgozatom keretében nem törekedtem, ahogy írtam, előre gyártott és általában Magyarországon beszerezhető elemeket válogattam össze. Ehhez meg kellett ismernem a modellezésben használt eszközöket, valamint a rendszerek egymáshoz csatlakoztatásának módját és egymásra kifejtett hatását. A már említett [1.] forrás mellett a [4.] forrást találtam kifejezetten hasznos segítségnek a témában. Ugyanakkor a választék és a gyártók száma jóval meghaladja azt a mennyiséget, hogy minden elem kompatibilis lehessen mindennel, ráadásul nem ritkán a beszerezhetőség is korlátot szab és nem lehetett megvásárolni az ideális eszközt Magyarországon. Kutatásom elsősorban arra irányult, hogy a számításaimmal előzetesen meghatározott teljesítményhez megfelelő, összeillő és hatékony rendszert találjak. Eközben részletesen megismertem az elektronikai eszközök szerepét, hatékonyságukat, illetve például azt is, hogyan helyezhetők el a modellen, vagy a motor és az akkumulátor esetében milyen tulajdonságokat, hogyan kell értelmezni továbbá, hogy mi az az ESC és milyen szerepe van. Ezen ismeretekre elsősorban azért volt szükségem, hogy a lehető legkönnyebb konstrukciót építhessem meg. Hiszen, ha a minimálisan szükségesnél több eszközt, vagy feleslegesen nagyobb teljesítményű

alkatrészt választok, azok mind a modell tömegét növelték volna és rontották volna a teljes rendszer hatékonyságát. Emellett meg kellett ismernem a távirányítás és szervomotorok (kormánylapátokat mozgó eszközök) alaptulajdonságait is. Minden elektronikai eszköz és különösen a szervomotorok és kormánylapok rögzítési módja is kutatást kívánt meg, ezeket a kialakításokat a modell tervezése során szintén meg kellett tervezni.

B. Aerodinamikai ismeretek: Az aerodinamikai kialakítás folyamata ugyan több, mások által már kipróbált és működőképes alapkoncepció összepárosításából indult, a tervezés során kiemelt célom volt a lehető leghatékonyabb aerodinamikájú – és különösen szárnyformájú – modell megépítése. Az általam választott konstrukció „klasszikus” repülőgép kialakításnak nevezhető, amit a legtöbb tervezőmérnök követ, megtalálható rajta a csűrőlapát, magasság- és oldalkormány, a vízszintes és függőleges vezérsík, valamint törzse is van. Ezek funkcióját és tervezését külön részletesen kifejtem szakdolgozatomban. Az aerodinamikára vonatkozóan a kitűzött feltételek teljesítéséhez adott értékeket el kellett érnem, például a 0,6-os felhajtóerő tényezőre. Ezt a szárnyprofilok összehasonlításával kellett kikísérleteznem, miközben a légellenállást az elérhető minimumon kellett tartanom. A feladat tehát sok szempontból is összetett tudást követelt meg.

C. CAD (és szimulációs) program ismeret: Az aerodinamikai tervezés mellett elengedhetetlen volt a számítógépes programok használata, ugyanis amellett, hogy a számítógépen végzett szimulációk segítették a tervezést és értékelést, CAD programban történt a gyártási mintaformák kialakítása is. A programok rutinos használatával nem csak külalakra szemléletesebb megoldásokat lehet készíteni, hanem gyorsan és vég nélkül lehet kipróbálni újabb és újabb változatokat, a modellt azután is hatékonyan lehet fejleszteni, hogy elérte a kitűzött kritikus értékeket. Továbbá a számítógépes szimulációk lehetőséget adnak különösen arra, hogy a kormánylapok teljesítményének értékeléshez adjon összehasonlítási alapot. Jelen ismereteim alapján nincsen mód arra, hogy egy bonyolult aerodinamikai rendszert számítógép használata nélkül értékelni lehessen, ezért a CAD program használata a szakdolgozatom elkészítéséhez nélkülözhetetlen.

D. Kompozit és 3D nyomtatás anyag- és gyártástechnológia ismeret: Modellem alapanyaga kompozit, amely jellegzetesen egyedi anyagtulajdonságokkal bír. Más anyagoktól eltérően (például acél, vagy műanyag), a kompozit elemek tulajdonságát jelentősen befolyásolja a gyártás minősége, amit szintén nekem kell elvégezniem, hiszen a kompozitok formájukat a gyártási folyamatban érik el. Ahhoz, hogy megfelelő tulajdonságú és minőségű kompozitot készítssek, részletekbe menően meg kellett ismernem ezt a tudományágat is. Figyelemmel kellett lennem a saját képességeimre és lehetőségeimre, ezért tesztelesek útján igazolnom kellett azt, hogy az általam gyártott kompozitok minősége megfelelő. Kutatómunkám kitért arra, hogyan kell a teszteleseket szabvány szerint elvégezni, de ezeknél egyszerűbb vizsgálatokat folytattam csak le. A modell megépítéséhez meg kellett ismernem továbbá a 3D nyomtatáshoz használt anyagokat és gyártási technológiákat. Az internetes források általánosan mutatták be a 3D nyomtatás előnyét, de nehézségeit leginkább csak tapasztalati úton ismertem meg. Az ABS anyaggal való nyomtatás, amit én is kipróbáltam, például önmagában is érdemelhetett volna külön szakdolgozati témát, olyan sok kérdést vet fel.

E. Repülési tesztek kivitelezése és az eredmények mérése: Szakdolgozatom kapcsán megoldandó feladatként jelentkezett a tesztelés módszerének megismerése is. Nem csak irányítani kellett megtanulnom a modellt, hanem amellet mérhetővé kellett tennem a repülési tulajdonságait. Szerencsére létezik olyan program, amelyet a modell távirányítójával párosítva virtuális környezetben tanulható meg a repülőgép irányítása. A távirányító és a PC között a jelátmenetet külön, speciális összekötőkábel biztosítja és a telepítést követően kipróbálható és elsajátítható a pontos vezérlés, ezáltal az irányítási hibákból eredő balesetek száma minimalizálható. Különösen érdemes először virtuális térben megtanulni az irányítást. A távirányító megvásárlása kapcsán tájékoztattak arról, hogy minden új helyen kezdeményezett repülést megelőzően a jeltávolságot bejárással kell ellenőrizni. Az ellenőrzés lényege, hogy a jelátvitel biztonságos távolságát meghatározzuk. A repülés adatait ún. „logger” eszközök tudják rögzíteni. A logger elhagyható, ha az elektronikai rendszerbe repülés vezérlőt építünk be, ami a repülőgép modellek irányításának legfejlettebb eszköze. A loggerek és repülés vezérlők lehetővé teszik a repülési idő, sebesség, magasság, irány, a felhasznált energia mennyiség, stb. rögzítését, valamint a repülés vezérlés lehetővé teszi automata repülési programok kiválasztását is akár, de költségük jelentős.

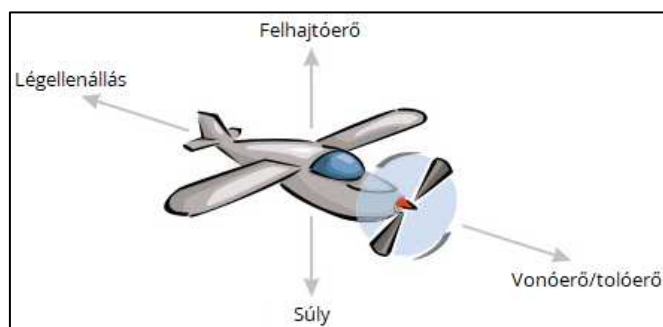
2.1.REPÜLÉSTANI ÉS GÉPÉSZETI ISMERETEK

A repülőgép tervezéssel kapcsolatos alapismereteimet a [2.] és az [5.] források képezték, de ezeket megelőzően a kezdeti koncepció felvázolását csak úgy tudtam elkezdeni, ha a repülés alapvető követelményeivel megismerkedtem. Korábban, TDK dolgozatom keretében feldolgoztam az emberiség motoros repülésének kezdetén született első próbálkozásait, amikor még egymástól jelentősen eltérő kompozíciójú megoldások születtek. A történelmi fejlődés a fenti forrásokból hiányzik, pedig számos ponton segíti a megértést véleményem szerint. A motoros repülés kezdeti szakaszáról a [6.] forrás számol be olvasmányos, könnyen feldolgozható formában. Némelyik kezdeti megoldás sikeresnek bizonyult, a többségük kudarcot vallott. Ha ma szétnézünk az égen és kutatjuk az elmúlt száz év fejlesztési eredményét, azt láthatjuk, hogy még most sincsen „ideális”-nak nevezhető, mindenki által követett formaterv és kialakítás. Az egyes gyártók eltérő elvek szerint tervezik a repülőgépeket, eltérő célokra. Engem személy szerint például lenyűgöznek a csupaszárny gépek, de minden erőfeszitésem ellenére sem tudtam olyan tervvel előállni a szakdolgozatom keretében, amit meg tudtam volna építeni. Talán nem túlzást azt állítani, hogy a csupaszárny konstrukciójú repülőgépek megtervezése jelenti a legnagyobb mérnöki kihívást a repülésben.

Általánosságban elmondható, hogy a források többsége a repüléstani ismeretek fejezetét az alapvető fogalmak és erőhatások bevezetésével kezdi, így én ezt választottam bevezető gondolatnak. A repülés képességét úgy lehet megközelíteni, hogy bármilyen test levegőbe juttatásához két lehetőség közül kell valamelyiknek megvalósulnia. Vagy a test sűrűségét kell úgy megválasztani, hogy könnyebb legyen a levegőnél, vagy a test feletti levegő nyomását kell olyan mértékben csökkenteni, hogy az alatta összpontosuló légnyomás felfelé áramlásának hatása a testet felemelje. Elkülöníthető tehát a levegőnél könnyebb testekkel való repülés (például hőlégballon, léggömb, léghajó) és a levegőnél nehezebb szerkezetek repülése. A levegőnél nehezebb repülők tovább csoportosíthatók aszerint, hogy van-e hajtóművük, vagy nincsen. Utóbbiak közé tartozik a vitorlázó repülőgép, a sárkányrepülő és például a sikló- vagy ejtőernyő. A hajtóműves repülők között pedig megkülönböztethető a merev és a forgó szárnyú szerkezetek (helikopterek). Szakdolgozatomban a levegőnél nehezebb, merev szárnyú repülőgépet terveztem, ami légnyomáskülönbséget szárnyai kialakításának köszönhetően hoz létre. Munkám során

alkalmaztam a vitorlázó repülőgépek tervezési elveit is, hiszen ezek sok esetben különleges, aerodinamikai hatékonyságban élen járó megoldásokkal vannak felszerelve.

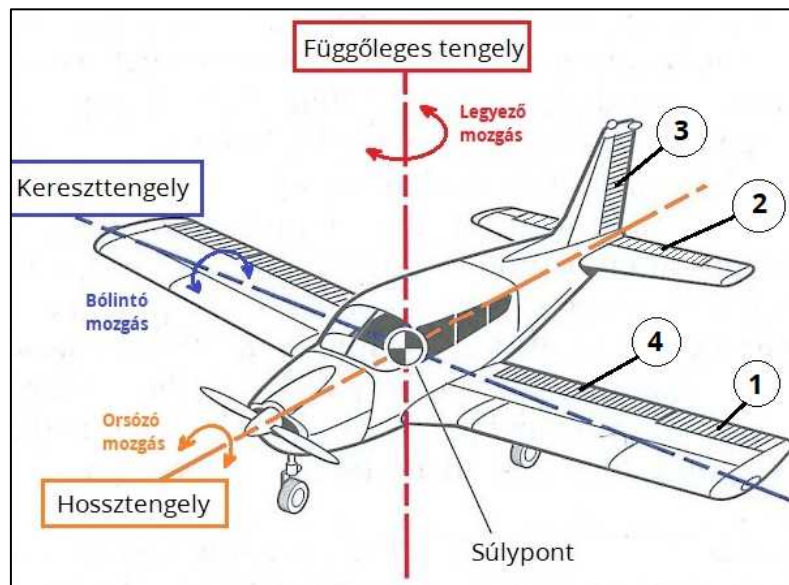
A jó repülő tervezéséhez ismerni kell az alapfogalmakat és a repülés alapvető fizikai sajátosságait. Írtam már arról, hogy a repüléshez felhajtóerő szükséges és a feladat megoldásához számítást is végeztem, de pontos fogalmát nem fejtettem még ki. A felhajtóerő a repülőre ható négy fő erőhatás közül az, amit a testet körülvevő nyomáskülönbség hoz létre és a kisebb nyomás irányába hat. A 2. ábrán látható, hogy általában a menetirányra merőlegesen, felfelé irányuló erőnek szokás ábrázolni.



2.ábra: A repülőgépre ható 4 alapvető erőhatás

Felhajtóerő még pontosabban az [5.] forrásban Kutta-Zsukovszkij tétellel leírt test körüli cirkuláció hatására jön létre. A forrásból idézve: „A Kutta-Zsukovszkij-tétel szerint a párhuzamos síkáramlásba helyezett tetszőleges formájú testen az áramló közeg anyagától (sűrűségétől), sebességétől és a test körül kialakuló cirkulációtól függő felhajtóerő, azaz a nem zavart áramlás irányára merőleges erő keletkezik.” „... csak akkor keletkezik erő, ha a test körül cirkuláció alakul ki, azaz a test körül vett tetszőleges, zárt görbe mentén számított cirkuláció értéke nullától eltér.” „... valós közegben a cirkulációt a test alkalmasan megválasztott formája határozza meg.” „... a cirkuláció hatására a test körül nem forog az áramlás, hanem az egyik oldalán gyorsul, a másik oldalán lassul, attól függően melyik oldal „találkozik” szemben a cirkulációval.” „Ténylegesen, a gyakorlatban csak az a cirkuláció alakulhat ki, amelynek a hatásakor a szárnymetszet feletti és alatti áramlás pontosan a kilépőélnél találkozik.” A felhajtóerő megjelenéséhez tehát cirkuláció létrehozására alkalmas kialakítás (forma) szükséges. Ez a forma a repülőgépek esetében a szárnyfelület. A 2. ábrán látható továbbá, hogy a felhajtóerőnek a repülőgép összsúlyát kell meghaladnia ahhoz, hogy felemelkedjen a levegőbe, a súlyerő hat ellene. A meghajtás (vonóerő) kiszámításához pedig a légellenállás nagyságát kell alapul venni, azt kell leküzdenie az előrehaladáshoz.

Repülőt azonban nem lehet csak a felhajtóerő és súly, valamint a vonóerő és légellenállás egyenlővé tételével a levegőben tartani, a tervezéskor egyéb szempontokat is figyelembe kell venni. Kiemelt fontossága van az irányítás és stabilitás megtervezésének. A 3. ábrán az látható, hogy a repülő 3 fő iránytengelye (kereszt, hossz és függőleges) a súlypontban találkozik és a repülőre ható minden erőhatás a tengelyek mentén nyomatékot képez a súlypontra. Az erőhatások helyének megtervezésével lehet irányítani és stabilan tartani a repülőt a levegőben, ami elengedhetetlen feltétele a repülésnek. Azt is fontosnak tartom prezentálni, hogy a repülőgépre nem lehet máshogy erőt kifejteni, mint a fenti 4 alapvető erőhatás valamelyikével. A súlyt (eltekintve bizonyos körülményektől) állandónak lehet tekinteni, az nem változik repülés közben. Általában tehát a felhajtóerő és légellenállás nagyságának és helyének megváltoztatásával irányítható a repülőgép, amihez mozgatható felületek és kormánylapátok szükségesek. A 3. ábrán a hagyományos kialakítású gépen található irányítási felületeket szerepeltettem.



3.ábra: A repülőgép 3 irányú forgása és kormányfelületei

- 1) Csűrőlapát; oldalanként ellentétes elforgatás miatt a szárny végén növeli (miközben a túloldalon csökkenti) a szárny felhajtóerejét, ezáltal irányítja az orsózó mozgást.
- 2) Magassági kormánylap; elforgatásával a felületén keletkező felhajtóerő nyomatékával (vagy azzal ellentétes irányú erővel) hat a súlypontra, és a bólintó mozgást irányítja.
- 3) Oldalkormány; elforgatása aszimmetrikus áramlást hoz létre a repülő két oldalán. Egyik oldalon a felület és ezért a légellenállás növekszik, amivel párhuzamosan a

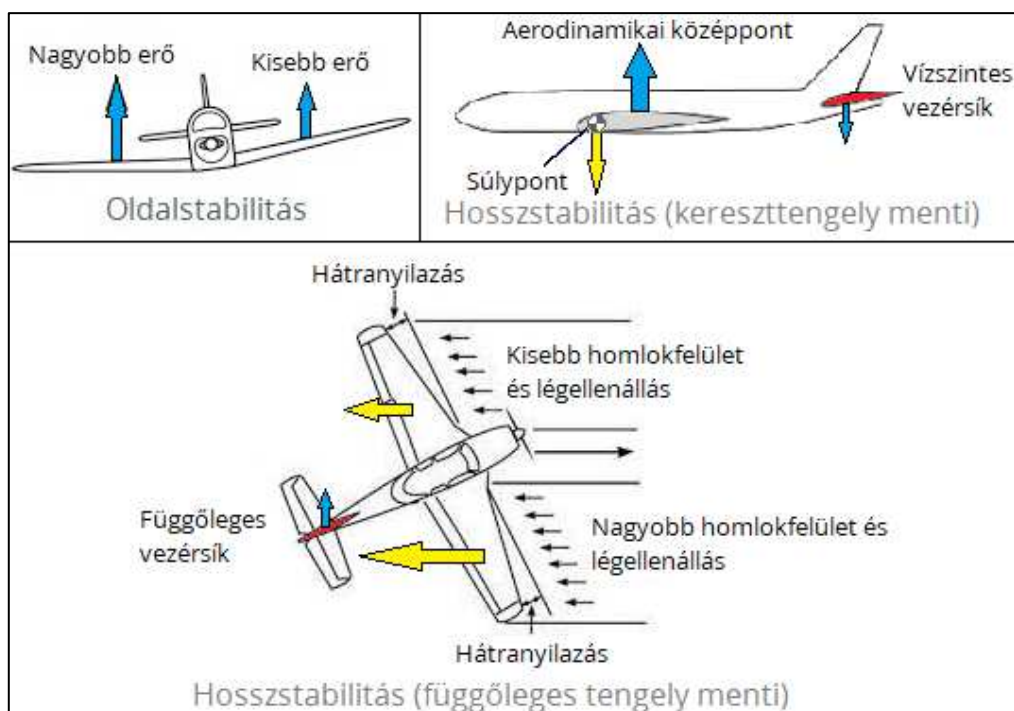
függőleges kormánylapra merőleges, oldalirányú felhajtóerő is keletkezik, amik együttesen a legyező mozgást irányítják.

- 4) Fékszárny (vagy ívelőlap); fel- és leszállásnál (alacsony sebességnél) lefelé döntve a szárnyon keletkező felhajtóerő nagyságát növeli, ami a sebesség biztonságos csökkentését teszi lehetővé.

Természetesen a felsorolt négy irányítási felületen kívül még nagyon sok más kreatív megoldás létezik és a vonóerő oldalankénti változtatásával is módosítható a repülési irány (több motoros gépek esetén), de ezek bemutatását mellőzöm. Több motoros repülőgépek tervezése esetében azt viszont figyelembe kell venni, hogy például az oldalkormánynak irányban kell tudni tartani a repülőt a függőleges tengely körül akkor is, ha az egyik oldalon levő motor meghibásodik. A két oldal vonóerejének megváltozását és az ebből eredő forgatónyomatékokot az oldalkormánynak kell tudnia kompenzálni. A motorokat emiatt sem szokás a súlyponttól távol elhelyezni a kereszt tengelyen. Az irányító felületeket viszont célszerű a súlyponttól távol elhelyezni, hiszen ilyenkor az erőhatáshoz nagyobb erőkar párosul, hatékonyabb lehet a tervezés.

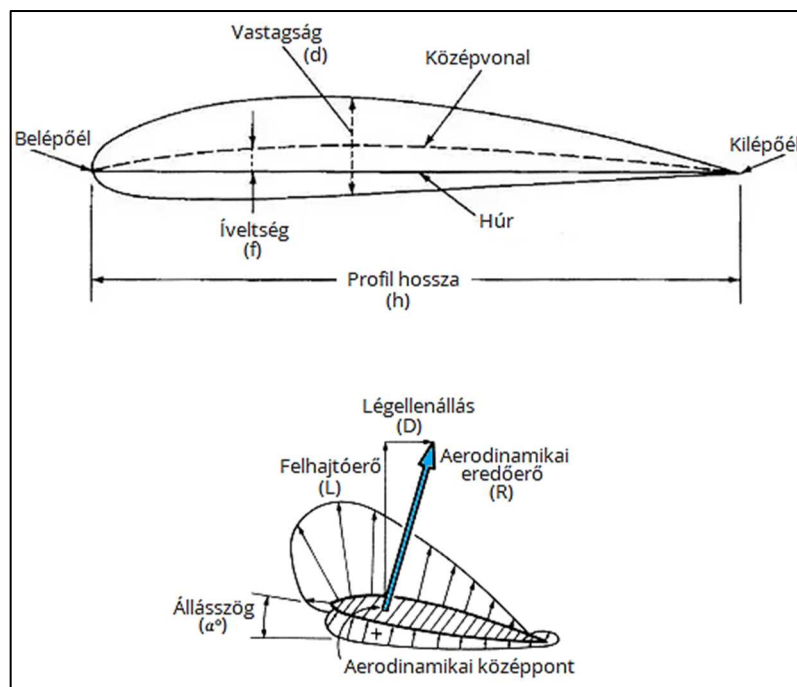
A kormányfelületek kialakítása mellett úgy kell tervezni a repülőt, hogy állandó kormány beavatkozás nélkül is a kijelölt pályán haladjon. Ehhez a repülőt stabilizálni kell, azaz olyan tervezési megoldásokat kell alkalmazni, ami képessé teszi a repülőt arra, hogy valamilyen zavaró körülmény (például szélleökés) után mindhárom tengely mentén visszatérjen az eredeti irányába. A repülőgépek irányításáról és stabilitásáról a [2.], [7.] és [8.] források kimeríthetetlen mennyiségű információt tartalmaznak. Szakdolgozatomban azokat az egyszerű megoldásokat emelem ki, amiket a modell tervezése során alkalmaztam. A hossz tengely menti elcsavarodás az oldalstabilitás növelésével csökkenthető, aminek egyik gyakori megoldása a szárny felfelé ívelése a 4. ábra szerint. Röviden összefoglalva, a felfelé megdőlt szárnyon a nyomáskülönbség is megdőlt és a keletkező eredőerő függőleges komponense, vagyis maga a felhajtóerő kisebb. Ezáltal a felfelé ívelt szárnyakon olyan állandó erőpár keletkezik, amely az elfordulást akadályozza. A 4. ábrán szintén látható a hosszstabilitás fokozása érdekében használt vízszintes vezérsík. A vízszintes vezérsík szerepe, hogy a keresztirányú forgást (bólintást) akadályozza. A súlypont helyzete az aerodinamikai középponthez képest meghatározza, hogy a repülő fej- vagy faroknehéz, azaz melyik irányba bólint. A hosszstabil repüléshez biztosítani kell, hogy az aerodinamikai középpont súlypontra

kifejtett nyomatékát a vízszintes vezérsíkkal kiegyenlítsük. A vezérsík állásszögét úgy kell tervezni, hogy a leggyakoribb sebességnél az áramlás irányával párhuzamosan álljon. Eltérő szögű áramlásban a vezérsíkon függőleges irányú erő keletkezik, ami a bólintást mindig akadályozza. Felfelé bólintás esetén a repülőgép orra felemelkedik, a hátsó rész ledől és a vízszintes vezérsíkon felhajtóerő keletkezik, ami a hátsó részt megemelni igyekszik addig, amíg vízszintesbe nem áll, vagyis a bólintást megszünteti. Ellenkező irányú elforgás esetén ugyanezen elv alapján stabilizálja a repülőt. A hosszstabilizálás további eszköze a szárnyak hátrafelé nyílazása és a függőleges vezérsík. Előbbivel biztosítható, hogy a függőleges tengely menti elforduláskor a szárny egyik oldalán az áramlással találkozó felület növekszik, míg a másik oldalon csökken. Az oldalanként eltérő homlokfelület eltérő légellenállással jár, ami a két oldal légellenállásának eltérését eredményezi és a nagyobb (légellenállású) felület visszaforgatja a repülőt, amíg légellenállása a másik oldaléval kiegyenlítődik. A függőleges vezérsík hosszstabil repülés közben az áramlást nem befolyásolja, elfordulás esetén viszont az oldalkormányhoz hasonlóan növekszik a felülete és légellenállása, továbbá oldalirányú felhajtóerő keletkezik rajta, ami a repülőt a hátranyilazáshoz hasonlóan visszaforgatja egyenesbe.



4.ábra: A repülő stabilitásának hagyományos eszközei (oldal- és hosszstabilitás)

Az előzőkből következik, hogy élni lehet az egyszerűsítéssel és a repülőgép a levegőben egy szabadon mozgó súlypontként értelmezhető, aminek irányítását az erők és erőpárok nagyságának és helyének vagy éppen távolságának pontos tervezésével kell megoldani. Mégis, repülés szempontjából a legfontosabb erő a már sokat emlegetett felhajtóerő, mert ez teszi lehetővé, hogy a szerkezet felemelkedjen. A felhajtóerő keletkezését ezért nagyon fontos pontosan megérteni. A későbbi munkához minimálisan az 5. ábrán látható általános fogalmakat kell bevezetni és értelmezni.



5.ábra: A szárnyprofil fogalmi és áramlásba helyezett profilon keletkező nyomáseloszlás

Az ábra felső képe a szárnyprofil jellegzetes adatainak megnevezéseit tartalmazza. Az alsó kép az áramlásba helyezett profilt körülvevő nyomáskülönbség eloszlását és a nyomáseloszlásból keletkező eredőerőt (R). Az eredőerőnek az áramlással megegyező irányba eső vektora a légellenállás és az áramlásra merőleges vektora a felhajtóerő. Ez magyarázza azt, hogy korábban az oldalkormányról például oldalirányú felhajtóerőről is tudtam beszélni. Olyankor a nyomáskülönbség a kormánylap két oldala között jön létre. Tervezéskor a szárnyprofil ezért úgy kell megválasztani, és a szárnyat körülvevő áramlást úgy kell megtervezni, hogy a kialakuló nyomáskülönbség számunkra kedvező legyen.

A Reynolds szám (Re) ismerete elengedhetetlen a profil kiválasztásához, ezért érdemes kiszámításával kezdeni a szárnyforma tervezését. A Reynolds szám egy arányszám, ami a vizsgált közeg saját belső ellenállását hivatott megadni. Kimerítő ismereteket a [9.] forrás feldolgozásával szereztem róla. Áramlástan szempontból abban áll a jelentősége, hogy a különböző formákat egymással összehasonlítható áramlásba képes helyezni, vagyis az a közeg, ami a másik közeggel megegyező Reynolds számmal rendelkezik, ugyanazokkal az áramlástan tulajdonságokkal fog rendelkezni, ugyanannyi légellenállást és felhajtóerőt lesz képes képezni. Emellett a Reynolds szám egyik mutatójaként szolgál annak, hogy az áramlás lamináris marad-e, turbulenssé válik-e, vagy milyen mértékben válik turbulenssé. A turbulens áramlásban a szárny kisebb felhajtóerőt generál és nagyobb lesz a légellenállása. A Reynolds-szám kiszámításának képlete:

$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu} = \frac{\rho \cdot v \cdot l}{\eta} \quad (2-1)$$

Az Re kiszámításához a 3 adatra van szükség;

1. A sebességre m/s-ban. A modellem az előzetes számítások szerint nagyjából 90 km/h maximális sebességet fog elérni, ezért érdemes nagyjából ezzel az értékkel számolni, ami az egyszerűség kedvéért 25 m/s-nek feleltethető meg.
2. Meg kell határozni a szárnyprofil hosszát méterben, vagyis azt a hosszt, amin a levegő a menetirány szerint keresztüláramlik a szárnyon. A repülőm profilhossza az előzetes tervek szerint 0,2-0,3 m között fog jellemzően változni.
3. A harmadik adat a közeg (repülő körülvéő levegő) jellemzője, a kinematikai viszkozitás. Ennek az adatnak az elméleti háttérét hosszadalmas lenne levezetni, ezért csak annyi magyarázatot fűzök itt hozzá, hogy ez a szám adja meg a közeg sebesség függvényében történő belső feszültségének (azaz súrlódásának és ellenállásának) változását. A levegő kinematikai viszkozitása a hőmérséklettől és a sűrűségtől függően változik. Érdekesség például, hogy ha emelkedik a levegő páratartalma, akkor kisebb lesz a sűrűsége, tehát nagyobb lesz a kinematikai viszkozitása és ezáltal kisebb lesz a Reynolds szám. A számítás elvégzéséhez a kinematikai viszkozitás általam összegyűjtött adatait az 1. táblázat tartalmazza, amelyben szerepel a dinamikai viszkozitás és a sűrűség is azért, mert előbbit elosztva az utóbbival kapható meg a kinematikai viszkozitás pontos értéke.

Levegő általános jellemzői			
Hőmérséklet (T)	Kinematikai viszkozitás (ν)	Dinamikai viszkozitás (η)	Sűrűség (ρ)
0 °C	$1,33 \text{ m}^2/\text{s} \cdot 10^{-5}$	$1,72 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2 \cdot 10^{-5}$	$1,29 \text{ kg}/\text{m}^3$
5 °C	$1,37 \text{ m}^2/\text{s} \cdot 10^{-5}$	$1,74 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2 \cdot 10^{-5}$	$1,27 \text{ kg}/\text{m}^3$
10 °C	$1,41 \text{ m}^2/\text{s} \cdot 10^{-5}$	$1,76 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2 \cdot 10^{-5}$	$1,25 \text{ kg}/\text{m}^3$
15 °C	$1,45 \text{ m}^2/\text{s} \cdot 10^{-5}$	$1,79 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2 \cdot 10^{-5}$	$1,23 \text{ kg}/\text{m}^3$
20 °C	$1,50 \text{ m}^2/\text{s} \cdot 10^{-5}$	$1,81 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2 \cdot 10^{-5}$	$1,21 \text{ kg}/\text{m}^3$
25 °C	$1,54 \text{ m}^2/\text{s} \cdot 10^{-5}$	$1,84 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2 \cdot 10^{-5}$	$1,19 \text{ kg}/\text{m}^3$
30 °C	$1,59 \text{ m}^2/\text{s} \cdot 10^{-5}$	$1,86 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2 \cdot 10^{-5}$	$1,17 \text{ kg}/\text{m}^3$
35 °C	$1,64 \text{ m}^2/\text{s} \cdot 10^{-5}$	$1,88 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2 \cdot 10^{-5}$	$1,15 \text{ kg}/\text{m}^3$
40 °C	$1,69 \text{ m}^2/\text{s} \cdot 10^{-5}$	$1,91 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2 \cdot 10^{-5}$	$1,13 \text{ kg}/\text{m}^3$

1. táblázat: A levegő hőmérsékletéhez és sűrűségéhez párosított viszkozitás értékek

Manapság egyre több amatőrök által készített modellt lehet találni az interneten, amelyek ugyan repülésre és önszórakoztatásra alkalmasak, de a mérnöki tervezést nélkülözik. Formatervük aerodinamikailag fejletlen, véletlenszerű. Gyártásuk megtervezetlen, elnagyolt és pontatlan. Az irányítási eszközök rögzítése egyszerű és oldhatatlan (ragasztással történik). Gyakori szerkezeti alapanyagnak minősül ezekben az esetekben például a kartonpapír, vagy a habszivacs, amelyek elsősorban kis tömegüknek köszönhetően jelentősen egyszerűbb feltételek mellett levegőbe juttathatók és megépítésük sem kíván meg részletes anyagismeretet. Az ebben rejlő előnyök miatt a precíz tervezés és aerodinamika, illetve a gyártás utómunkálatai sem szükségesek, lényegesen egyszerűbb feladatról van szó esetükben. A modellem esetében nem csak kompozittal dolgozok és ezáltal közelítek a valós repülési adottságokhoz, hanem előzetesen megtervezem a kompozit szerkezetét, és rétegszámát az igénybevétel függvényében. Ezáltal azokon a részekben, ahol kisebb igénybevétel éri a szárnyakat, vagy a törzset, ott kevesebb réteget használhatok, a teljes tömeget csökkenthetem és a modell hatékonyságát tovább növelhetem. Az igénybevételt számítógépes szimulációs tesztekkel határozom meg. Megtervezem emellett az egyes alkatrészek oldható rögzítésének módját is, az alkatrészekhez – amennyiben szükséges – tartószerkezetet gyártok. Az elméleti háttér átfogó ismerete tehát különösen fontos volt számomra a feladat elkészítése során. A megszerzett tudás bemutatása a szakdolgozat kereteit bőven meghaladná, ezért azokra csak utalást teszek ott, ahol a tervezés egyes szakaszaiban felhasználtam őket, illetve az Irodalomjegyzékben tüntetem fel azokat az egyéb forrásokat, amelyek az elméleti tudást bővítik.

2.2.ANYAGTUDOMÁNYI ISMERETEK

A repüléstani alapelvek bemutatását követően és arra építve, szükségesnek látom, hogy a szakdolgozatomban ismertessem a modell megépítéséhez használt anyag egyedi tulajdonságait és gyártási sajátosságait. A kompozitot azért választottam, mert repülőgépet – annak érdekében, hogy repülésre alkalmas legyen – csak olyan anyagból érdemes építeni, amely ellenáll a rá ható erőknek, megfelelően szilárd és mindeközben a lehető legkönnyebb is. Csupán elméleti szempontból jegyzem meg, hogy emellett elvárt a környezeti hatásoknak (pl. csapadék, szél) való ellenállás, illetve kellően hosszú élettartam, de ezeket a feltételeket nem vettem figyelembe az anyagválasztáskor tekintettel arra, hogy a modellemet kizárólag ideális körülmények között és rövid időtartamon belül fogom tesztelni. Célom elsősorban a könnyű és megfelelően szilárd anyag kiválasztása volt, a költséghatékonyság figyelembevételével. A kompozitokra vonatkozó alapvető ismeretet a [10.] forrás ad, részletekbe menően pedig a [11.] forrás mutatja be mechanikai tulajdonságukat. A szakdolgozat elkészítéséhez ezt a két forrásanyagot vettem alapul. A 2. számú mellékletben azt mutatom be, hogy az elméleti leírással szemben, az általam elvégzett tesztekkel milyen eredményeket kaptam.

A kompozit anyagok alapgondolatát az adja, hogy ha ötvözzünk egy kedvező anyagot egy másik pozitív tulajdonságokkal bíró anyaggal, akkor a kettő ötvözéseként létrejövő anyag az eredetiek tulajdonságának egyszerű megőrzése helyett, azokat túl is fogja teljesíteni, ezáltal jobb anyag hozható létre. A kompozit anyag egy ún. mátrix anyagból, illetve egy erősítőanyagból áll. A MÁTRIX anyag szerepe az erősítőanyag összetartása (gyakorlatilag összeragasztása) és a felületre ható erők elosztása. Az ERŐSÍTŐANYAG szerepe az erőhatásoknak való ellenállás. A kompozit anyagok belsejében ún. MAGANYAG helyezhető el, amely a kész elem tulajdonságát az „Y” gerenda elvi működésének megfelelően tovább javítja, a két erősítőanyag réteg közötti erőhatást osztja el. A kompozitok gyártása során az alkotórészeket több rétegben helyezik egymásra, így a rétegek számától is függ, hogy milyen erős és ellenálló anyag készíthető.

A kompozit anyagokra jellemző, hogy mielőtt a végső terhelési ellenállását eléri, az erősítőanyag és a mátrix között mikro repedések jönnek létre. Ilyenkor a kompozit még nem megy tönkre, de a két felület szabad szemmel nem látható kis mértékben elválík egymástól és ezeken a pontokon az anyag meggyendül. Az alapanyagok közötti jó

kapcsolat ezért fontos követelmény a kiválasztás során. A mikro repedések megjelenése elsősorban a gyanta minőségétől függ, míg a kompozit anyag végső terhelési ellenállását a szálak minősége befolyásolja.

A mátrix anyagok tulajdonságai

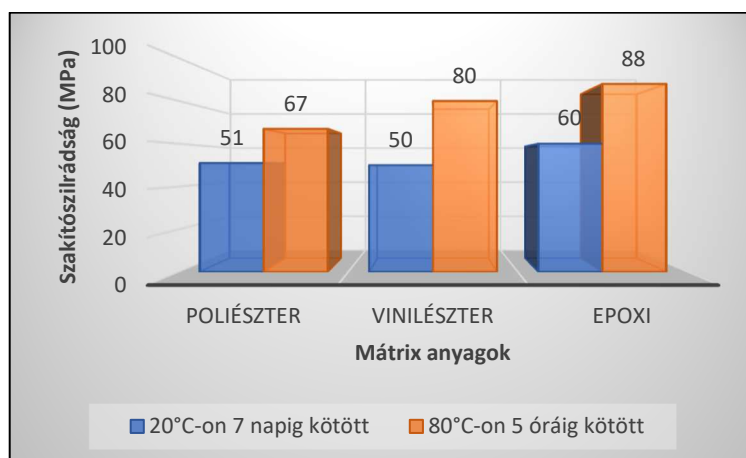
A kompozit anyagok mátrix komponense (a gyanta) a formázhatóságot és a kialakított forma megőrzését teszi lehetővé. Önmagában nem rendelkezik a szükséges mechanikai ellenállással, de fontos szerepe van az erősítőanyag védelmében a környezeti hatásokkal szemben. Az erősítő anyag önmagában könnyen törhető, de mátrix környezetében az erőhatások eloszlása javul, ami a kompozitot az anyagsűrűségéhez és ezáltal súlyához viszonyítva rendkívül ellenállóvá teszi.

A kompozitok készítéséhez leggyakrabban 3 fajta gyanta használatos; a poliészter, a vinilészter, vagy az epoxi alapú gyanta. A POLIÉSZTER alapú gyanta előnye, hogy felvitelt követően a megkötéshez nincsen szükség magas nyomásra vagy hőmérsékletre, önmagában megköt és ezáltal a forma elkészítése jelentősen költség kímélőbb. Emellett azonban számos elméleti hátrányát ismertem meg a többi gyantához képest, így például csak korlátozott ideig tárolható felhasználást megelőzően, a megkötéséhez szükséges katalizátor és egyéb adalékanyagok a költségeket megnövelik és tovább gyengítik a készterméket, ha nem megfelelő előkészítés miatt levegőbuborékok maradnak az anyagban. Utóbbi különösen azért kiemelendő a poliészter esetében, mert megkötéséhez nincsen szükség magas nyomásra, ami a levegőbuborékokat kiszorítaná a rétegek közül.

A VINILÉSZTER alapú gyanta előnye a poliészter gyantához képest főképp a molekuláris felépítésük közötti különbségben rejlik. A poliészter molekulák reakcióképes atomjai a láncon belül találhatók, míg a vinilészter molekulák esetében a reakcióképes atomok a lánc végein találhatók. Ez azt eredményezi, hogy a vinilészter molekulalánc teljes hosszában képes ellenállni a külső hatásoknak és vinilészter használatával sokkal erősebb kötések hozhatunk létre, továbbá a kémiai anyagoknak, illetve a víznek is ellenállóbb anyag készíthető vele. A gyanta megkötéséhez azonban általában már magasabb hőmérséklet szükséges.

Az EPOXI alapú gyanta molekuláiban *egy oxigén atom két szén atomhoz kapcsolódik úgy, hogy a szénatomok is egymáshoz valamilyen módon (általában hidrogén atomokon keresztül) csatlakoznak.* Ezáltal nagyon stabil és az előző két vizsgált gyantához képest még erősebb mátrix anyag, kiemelkedő kötési tulajdonságokkal, jó mechanikai és kémiai

ellenállóképességgel, illetve jó elektromos szigetelő tulajdonsággal. További előnye az epoxinak, hogy viszonylag egyszerűen és gyorsan megköt a hozzáadott keményítőtől függően bármilyen 5 és 150 fok közötti hőmérsékleten. A keményítő arányát azonban nagyon fontos pontosan kimérni, mert az epoxi molekulák csak egy meghatározott számú keményítő molekulához tudnak kötni. Rossz arány esetén az epoxi egy része nem köt meg, vagy felesleges keményítő marad az anyagban. A helyes keverési arányt szerencsére a gyártó meg szokta adni. A leírtak mellett további előnye az epoxinak hogy megkötött állapotában minimális a zsugorodása, míg a többi gyanta 8%-ot is zsugorodhat, az epoxi esetében csupán 2 %-ra lehet számítani. Az epoxi egyetlen ismert hátránya a többi gyantához képest a magasabb ára. A 6. ábrán szakítószilárdság összehasonlítása látható.



6.ábra: Mátrixanyagok szakítószilárdságának összehasonlítása [10]

A lehetséges mátrixanyagok közül említhető továbbá a fenol, a cianid, a szilícium, a poliuretán és a poliamid alapanyagú gyanták. Ezek tulajdonságait azonban külön nem fejtem ki, általában speciális célokra szokták alkalmazni őket és beszerzésük is körülményesebb.

Az erősítő anyagok tulajdonságai:

Ahogy a gyantánál is írtam, a kompozitok mechanikai ellenállásának meghatározó hányadát az erősítőanyag biztosítja. Ellentétben azonban azzal, ahogy általában elképzelünk egy erős anyagot, a kompozitok alapanyaga nem egy merev, hajlíthatatlan testet jelent, hanem szálakat. A hagyományos értelemben vett erős, homogén anyag a felületén megtalálható véletlenszerű hibáknak köszönhetően erő hatására megreped, majd a repedés mentén az anyag eltörik, még jóval az elméleti töréspontja alatt. Szál formájában a felületi hibák ugyanúgy megmaradnak és néhány szál elszakad erő hatására,

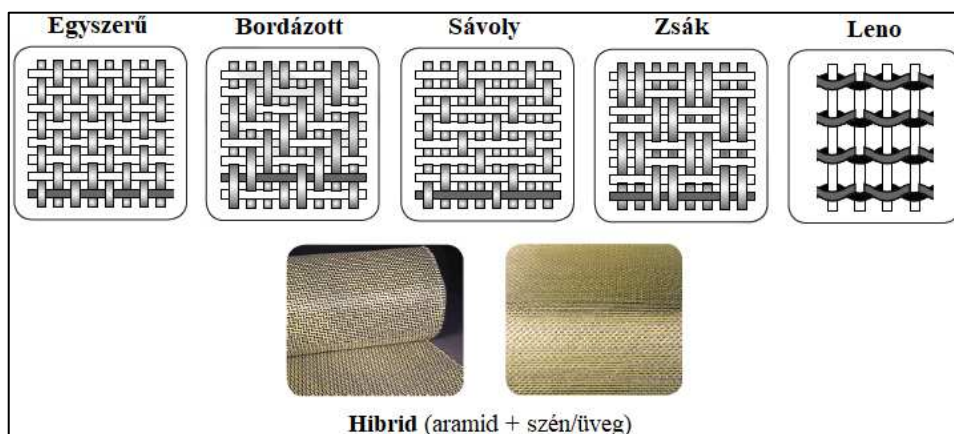
viszont sok egyformán erős szálát egymás mellé helyezve, marad még ép szál, együtt még erősebbek lesznek és így az erősítőanyag elméleti töréspontjához közelebb törik csak el a kompozit. Az erősítőanyagra jellemző, hogy a kötélhez hasonló. Ugyan sok szálát egymás mellé helyeznek, az a nyújtásnak áll ellen leginkább, a legjobb mechanikai tulajdonságokkal a hosszanti irányában rendelkezik, és az ettől eltérő irányokban jelentősen rosszabb tulajdonságokkal bír. Mechanikai tulajdonságai tehát *irányfüggő*. Az erősítőanyagot gyártók változatos előállítási és szövési megoldásokat fejlesztettek ki az irányfüggő tulajdonságok minél hatékonyabb kiaknázása érdekében, ezért az anyagválasztást megelőzően érdemes vizsgálni ezek közötti különbségeket.

A kompozitok fogalomtárában a **szövési mód** azt a gyártási megoldást jelenti, ahogy a szálakat egymáshoz illesztik és kialakítják az erősítőanyag rétegét. A szövés lehetővé teszi azt is, hogy különböző anyagú szálakat tartalmazó erősítőanyagot hozzanak létre, ezeket nevezik hibrideknek. A szövet kiválasztásakor fontos szempont a szálvastagság és az egyes szálak sűrűsége (angolul: tex), amik az erősítőanyag végleges tulajdonságait befolyásolják. A szálvastagság azért fontos tulajdonság, mert a szálak általában kör keresztmetszetűek és az már logikusan következik ebből, hogy minél nagyobb az átmérője a szálaknak, annál kisebb lesz a szálak közötti felületi kapcsolat adott területen és az üres részek kitöltéséhez több - gyenge mechanikai tulajdonságú - gyanta szükséges, ezáltal a kompozit gyengébbé válik. A szálsűrűség azt jelenti, hogy adott területen hány darab szál fut keresztül. A sűrűbb szövésű anyag erősebb, de nehezebb is. Emellett a szövési módokat általában aszerint csoportosítják, hogy milyen irányban állnak a szálak, illetve hogy milyen technikával tartják össze a szálakat. Eszerint négy nagyobb csoportosítás létezik, az *egyirányú (unidirectional-UD) szövés*, a *0/90 fokú szövés*, a *többirányú szövet* és az *egyéb, speciális szövési technikák*.

Az **EGYIRÁNYÚ SZÖVÉS** esetében nem arra kell gondolni, hogy abban csak egy irányba álló szálak vannak, hanem ezekben a legtöbb szál az anyag teljes hosszában végigfut szakadás nélkül és **azonos irányba mutat**. Ebbe a csoportba tartoznak azok a szövetek, amiben a szálak 75-99 %-a feltekercselés hosszában helyezkedik el. Elméletileg léteznek 100 %-osan UD szálak is, amit a prepreg gyártástechnológia tesz lehetővé. Ilyenkor csak a gyanta tartsa össze a szálakat. Ennek eredménye, hogy az UD erősítőanyagok a legerősebbek. Ugyanakkor azt is figyelembe kell venni használatuk esetén, hogy a hossziránytól eltérő irányba ezek az anyagok gyengék és instabilak, ezért

valamilyen másodlagos (fátyol) anyag használata szükséges a megfelelő szilárdság eléréséhez, ami értelemszerűen lerontja az adott térfogatra eső tulajdonságokat. Azt is ki kell emelni, hogy ilyen szövetet nehéz és hosszú idő előállítani, ezért általában költségesebb megoldás.

A **0/90 FOKOS SZÖVÉS** a hagyományos szövésneként értelmezhető, amikor az anyagban nagyjából azonos számú szál fut egyik és az arra merőleges irányba is. Megkülönböztetésük alapja, hogy az egymást keresztező szálakat különböző rendszer szerint fűzik egymásba. Megtalálható egyszerű, bordázott, sávoly, zsák, Leno és hibrid szövés, illetve ezek altípusai. *Egyszerű szövés* esetén a keresztirányú és hosszirányú szálak váltakozva kerülnek alulra és felülre, emiatt az anyag a lehető legszimmetrikusabb tulajdonságokkal bír. Nehéz elkészíteni, ezért általában drága, továbbá nagy sűrűségű szálak esetén meglehetősen hullámossá válik a felület és a többi szövési technikához képest gyengébb alapanyag állítható elő így. A *bordázott szövés* minden szempontból előnyösebb az egyszerű szövésnél, egységesebb a felülete, ezért kevésbé hullámos és jobban felvihető rá a gyanta. A *sávoly szövés* tulajdonképpen a bordázott szövés egyik altípusa is lehetne, ami attól csupán abban különbözik, hogy még több szál fut egyszerre alul, vagy felül. A bordázott szövethez képest még pozitívabb tulajdonságokkal rendelkezik, annál is simább a felülete, erősebb és a gyanta még jobban felvihető rá. Cserébe viszont számolni kell az aszimmetriából adódó változó mechanikai tulajdonsággal. A *zsákszövés* az egyszerű szövéstől abban különbözik, hogy nem csak egy kereszt- és hosszirányú szál váltakozik, hanem egyszerre több is (pl: 2x2, 8x2, 5x4, stb). Az egyszerű szövéshez képest erősebb, vékonyabb, és kevésbé hullámos, de kevésbé szilárd. A nagy szálsűrűségű szöveteket általában inkább ezzel a módszerrel készítik, hogy a hullámosodás minimalizálható legyen. A *Leno szövés* azt a technikát jelenti, hogy a hosszanti irányba futó szálakat mindig két keresztirányú szállal kötnek meg, így gyakorlatilag a hosszanti szálak rögzítve vannak egymáshoz képest. Ezt a módszert csak kiegészítésként lehet használni az erősítőanyagok elkészítése során, mert önmagában lukacsos szerkezetet eredményezne. A *hibrid szövés* során több anyagból készült szálakat szőnek egymásba azzal a céllal, hogy azok pozitív tulajdonságok megtartása közben a negatívumokat csökkentsék. A szálak ilyenkor általában üvegből, szénből és aramidból készülnek, ezeket fűzik egymásba. Az üveg a költséget csökkenti, az aramid pedig az ellenállóképességet növeli. A 7. ábrán láthatók az egyes kiemelt szövési formák.



7.ábra: Kompozit szövetanyagának gyakori szövémódjai

A **TÖBBIRÁNYÚ SZÖVET** lényege az, hogy az eddig ismertetett szövési technikával készített rétegeket általában poliészter szálak segítségével szorosan összevarrják és így képeznek egységes erősítőanyagot. Előnye, hogy ezáltal még erősebb anyagok készíthetők, a szálak mindig egyenesen futnak a rétegeken belül és nem lesz hullámos a felület, továbbá a kompozit anyag elkészítését is gyorsítja, ha eleve több réteget tudunk lefektetni a kívánt formára. Hátránya viszont a poliészter kötőszálak jelenléte, ami nem mindegyik gyantával tapad megfelelően, illetve előfordulhatnak pontatlanságok a varrás során, ami sok gyanta felvételével járhat és nehezítheti az erősítőanyagot. Az **EGYÉB, SPECIÁLIS SZÖVET** csoportba általában olyan elkészítési technikákat sorolnak, ahol valódi szövés nem történik. Az erősítőanyag kínálatban megtalálható az *apróra vágott üvegszálak* véletlenszerű elrendezéséből készített *paplan*, amit elsősorban vízi környezetben alkalmaznak a jó gyanta felvevő képessége miatt, de egyre kevesebbszer használják, mert súlyához képest nem elég erős. A szintén ide tartozó *fátyol anyag* megerősítésre nem alkalmas, csupán a többi erősítőanyag védelmére és felületük egyenletesebbé tételére szolgál. A fátyol hosszú és egyenletes szálakból készül, amelyek véletlenszerűen vannak elrendezve. Egyben tartásukat kémiai kötőanyagokkal biztosítják. Végezetül ide tartozik még a *cső alakú fonat* is, ami szintén polimer szálak egymásba fűzése útján kerül kialakításra. A csavarodásnak jól ellenáll, de kizárólag cső formájú alkatrészek készítésére használható. Kiegészítésül megjegyzem, hogy a modellemhez használt kompozit rúd nem ilyen technológiával készült, abban UD szálak haladnak végig a rúd teljes hosszában, ezért a hajlításnak rendkívül jól áll ellen, de például a felületét érő nyomásra érzékeny, könnyen összeroppantható.

3. ÉPÍTÉS ELMÉLETI MÓDSZERE

A modell repülő megépítéséhez a fent ismertetett elméleti tudást a gyakorlatba kellett átültetni. Meg kellett találni és ki kellett választani a rendelkezésre álló lehetőségek közül azokat, amik egymással párosíthatók és alkalmazhatók. Önmagában nem lehet „legjobb” repülőről beszélni, a tervezés során a megoldási módszereket össze kellett hasonlítani és lépésről lépésre haladva vált megalkothatóvá a megfelelő forma. A modell építését ezért egy vázlatos ábrázolás és több lépésből felépülő tervezés előzte meg.

A repülő vázlatát elsősorban a [2.] forrás 12. oldalán található ábra, illetve egyéb forrásokban megjelenő általános elvek alapján készítettem el. A vázlaton a szárny két oldalán egy-egy motort helyeztem el, az elektronikai egységek helyét a törzsben alakítottam ki.

Habár az építéshez felhasznált anyagot már előfeltételként meghatároztam, figyelembe vettem, hogy a modell repülőgépeket legtöbb esetben könnyű habszivacsból, vagy fa alapszerkezetből, a kisebbeket esetleg műanyagból gyártják. Ezeket a megközelítéseket a tervezés legelső szakaszában elvettem, mert az említett anyagok a későbbi fejlesztést nem teszik lehetővé. Úgy gondoltam, hogy amennyiben a modell a teszteken megfelelően teljesít, az adatokat kiindulásnak lehet tekinteni egy, a modellre épülő valós méretű repülőgép megtervezéséhez. A habszivacsból és műanyagból készült modell anyagtulajdonságai az emberi repülés feltételeinek nem felelnek meg, felnagyítva nem elég erősek. Míg egy fából készült repülőgép gyártási ideje és költsége nagyságrendekkel meghaladná a kompozit technológia alkalmazását. Ezekben a megoldásokban tehát nem gondolkoztam és a modellt kompozitból terveztem megépíteni.

A tervezést az alapvető feltételek meghatározásával kezdtem. A repüléshez szükséges felhajtóerőt a szárny fogja létrehozni, ez tehát alapvető eleme a modellemnek. A meghajtáshoz motor kell, amit elektromossággal kell ellátni és vezérelni kell. Az elektronikai eszközöket a törzsben szokás elhelyezni, tehát a repülő törzsét is meg kell tervezni. Irányításhoz kormányfelületekre van szükség, amiket lehetőség szerint a végpontokban kell elhelyezni, hogy a változó erőhatás távol legyen a tömegközépponttól, nagyobb erőkarral hasson rá. A kormánylapokat mozgatni kell tudni, ehhez egyrészt a rögzítést, másrészt az elforgatást kell megtervezni. Modell repülőgépeken a kormánylapokat szervomotorokkal szokás mozgatni. Emellett, a repülő stabilizálása

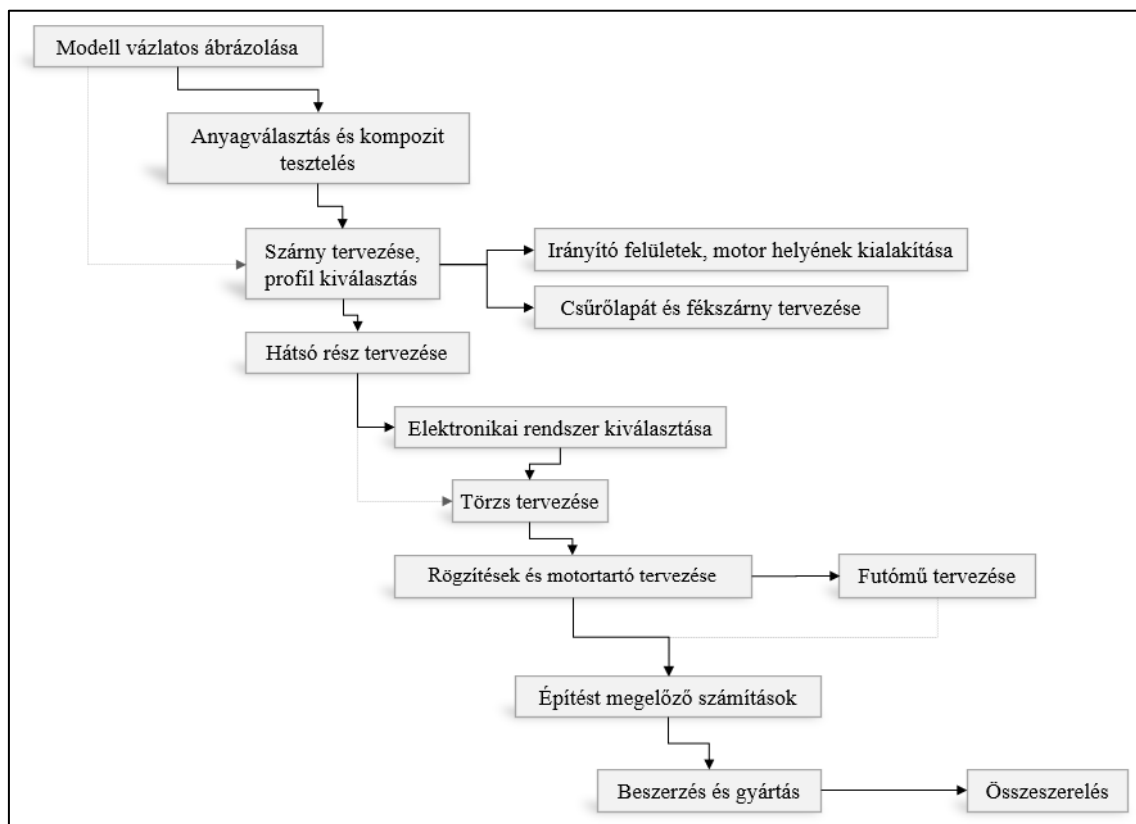
érdekében vezérsíkokat is ki kell alakítani. Természetesen azt is meg kell tervezni, hogyan rögzítem a motorokat és hogyan irányítom távolról a teljes elektronikai rendszert.

Első lépésben azt gondoltam át hogyan lehet súlyt csökkenteni. A lehető legkönnyebb konstrukció érdekében megvizsgáltam, hogy az egyes elemeket milyen kompozitból tudom megépíteni. A modell részeinek tervezését ezért a kompozit anyagok tesztelése előzte meg. A tesztelés eredménye rámutatott a minél kisebb szárny előnyére, vagyis jelentős tömeggel csökkenthető a modell, ha felületét csökkentem. A kis szárnyfelület következményeképpen ugyanakkor felszálláskor, vagyis alacsony sebességnél nem alakul ki a felemelkedéshez szükséges minimális felhajtóerő, ezért tudtam, hogy fékszárnyat is párosítanom kell a végső kialakításhoz.

A tervezési folyamat következő lépése a szárnyforma pontos meghatározása és a profil kiválasztása, amit szimulációkkal támasztok alá. A szárnyformán ezután kialakítom a motor, a csűrőlapát és fékszárny helyét. Az irányító felületeket külön elemként tervezem meg, a szárnyhoz hasonló módszerrel, szimmetrikus profilt használva. A csűrőlapátot követően a fékszárnyat tervezem meg, mert ez is a szárnyhoz kapcsolódik. A hátsó rész tervezése magában foglalta a magassági- és oldalkormány megtervezését is. Ezt egyetlen, közös elemként érdemes tervezni, hogy az elhelyezést és kialakítást egymáshoz képest folyamatosan figyelni lehessen. A függőleges és vízszintes vezérsík méretezését a [3.] forrásban meghatározott elvek alapján végzem. A következő lépés a törzs kialakításának véglegesítése. Elsősorban áramvonalasnak kell lennie, de az elektronikai egységeket is magába kell foglalnia. Szemből a lehető legkisebb felületűre kell tervezni, viszont az akkumulátor is helyet kap benne és mivel ez képezi a modell legnagyobb szét nem bontható egységét és tömegét, ezért ehhez kell méretezni a törzset. A törzs tervezését tehát meg kellett előznie a teljes elektronikai rendszer tervezésének is. Továbbá a törzssel szemben további elvárás, hogy abban az akkumulátort a lehető legjobban elől lehessen elhelyezni, ezzel ugyanis a repülő súlypontját a szárny vonala elé lehet tolni, ami a repülési adottságokat javítja. A rögzítések kialakítása a következő feladat, amely már az építés folyamatába sorolható, de szintén tervezést igényel. Szerepe az, hogy a virtuális térben létrehozott testet a valóságban, a rendelkezésre álló eszközökkel meg lehessen építeni. Ebben a körben a motor rögzítését tartom a legnagyobb megoldandó feladatnak. Egyfelől a rögzítésnek ellen kell állnia a motor vonóerejének, másrészt biztosítania kell a motor megfelelő hűtését és a hőelvezetést is. A motor melegevése miatt olyan anyagot

kell választani, aminek mechanikai tulajdonságai 100° -on sem romlanak számottevően. A rögzítéshez hasonló csoportba tartozik a kerekek és a futómű tervezése is. A virtuális tértől eltérően a modellnek kerekre is szüksége van ahhoz, hogy még a földön gurulva elérje a felszállási sebességet. Előzetes számításaim szerint 45 km/h -ig kell gyorsítani a repülőt felszállás előtt, ezért a futóművet úgy kell méretezni, hogy a keletkező igénybevételnek ellenálljon mind felszálláskor, mind leszállás közben. Leszálláskor emellett azt is a futómű helyes megtervezésével kell elérni, hogy a modell olyan része ne érjen földet, aminek az nem funkciója, például a szárnyvég, vagy a propeller.

A modell megépítéséhez a 8. ábrán látható folyamatot vázoltam, amely a szükséges lépéseket tartalmazza. Meg kell jegyezni, hogy az egyes lépések általában hatással voltak a korábbi tervezésre és nem ritkán módosítani kellett a korábbi terven, hogy az új elem beépíthető legyen a modellbe. Ahogy a szakdolgozatom elején is írtam a modell megalkotása nem lineáris folyamat volt, hanem az egyes lépések egymáshoz képest végrehajtott iterációján keresztül volt megvalósítható.



8.ábra: A modell megépítéséhez szükséges folyamat

4. MODELL REPÜLŐ TERVEZÉSE

Visszaulva a forrásokban megismert, tervezéssel kapcsolatos alapelvekre és a repülővel szembeni alapvető elvárásokra, megítélésem szerintem a mindenki által követendő közös célt a [2.] forrás alapjaiban foglalja össze: *„A repülőgéptervező feladata, hogy olyan repülőgépet tervezzen, amely semmilyen repülési mozzanatban vagy fel- és leszállás közben ne kerülhessen kormányozhatatlan helyzetbe, az átlagos tudású repülőgépvezető különleges ügyesség vagy képzettség nélkül is mindig ura tudjon maradni gépének. Emellett azonban arra is kell törekedni, hogy a könnyen vezethető repülőgép kormányai kitérítésükkor egymással kellemes összhangban legyenek.”* „A repülőgép legfontosabb részei: a szárny, a törzs és az irányfelületek.” A tervezés során ezt az elvet tartottam végig szemem előtt és a tervezés folyamatának bemutatására a legalkalmasabb és legáttekinthetőbb módszernek azt találtam, ha az egyes részterületekre vonatkozó munkámat külön-külön foglalom össze a [12.] forrásra is támaszkodva. Fő területként beszámolok a szárny - és a motor elhelyezésének -, a kormányfelületek és a fékszárny, majd a törzs tervezéséről.

4.1. SZÁRNY TERVEZÉSE

A szárny tervezését a szárnyprofil kiválasztásával kezdtem. Annak érdekében, hogy a lehetséges legkisebb sebesség mellett fel tudjak emelkedni a levegőbe és a levegőben repülve a legkisebb energia befektetéssel tudjak repülni, kompromisszumot kellett kötnöm a szárnyválasztásban. A [7.] forrásban olvasottak alapján, abban biztos voltam, hogy hátranyilazott és felfelé ívelt szárnyat fogok használni. A kérdés a méret és a szárnyprofil alakja volt. A következő paraméterekkel rendelkező szárnyat teszteltem:

- | | |
|----------------------------------|-------------------|
| - Szárnyszélesség (oldalanként): | 500 mm |
| - Szárprofil belső hossza: | 220 mm |
| - Szárnyprofil külső hossza: | 175 mm |
| - Belépőél hátranyilazottsága: | 24,5° |
| - Kilépőél hátranyilazottsága: | 20° (közelítőleg) |
| - Felfelé íveltség: | 3° |

A különböző szárnyprofilok adatait az airfoiltools.com és az amerikai [Illinoisi \(UIUC\) Egyetem weboldaláról](http://uiuc.edu) szereztem be a szimulációs tesztek végrehajtásához. A két weboldal eltérő szempontból hasznos, míg az airfoiltools oldal rendelkezik tényleges és kalkulált szárnyprofil adatokkal, addig az egyetemi adatbázis elsősorban a szárnyprofilok összegyűjtésében és rendezésében, kategorizálásában nyújt segítséget. Például a szimulációhoz kifejezetten a siklórepülésben használt szárnyformákat kerestem, amit ezen utóbbi oldalon találtam meg könnyebben. Az airfoiltools oldalán lehetőség adódik viszont arra, hogy bizonyos Reynolds-szám mellett hasonlítsam össze a profilok hatékonyságát, így erről az oldalról a 200.000 és 500.000 Reynolds-számnál legjobb teljesítményt elérő profilokat gyűjtöttem össze, mert előzetes számításaim alapján a modellem is ebben a tartományban fog üzemelni.

$$\text{Felszállásnál } Re = \frac{v \cdot l}{\nu} = \frac{13,5 \text{ m/s} \cdot 0,25 \text{ m}}{1,45 \text{ m}^2/\text{s} \cdot 10^{-5}} = 232788$$

$$\text{és maximális sebességnél } Re = \frac{25 \text{ m/s} \cdot 0,25 \text{ m}}{1,45 \text{ m}^2/\text{s} \cdot 10^{-5}} = 431035.$$

A Reynolds szám kiszámítása után az airfoiltools oldalon a Profil kereső menüpontban kikerestem az elvárásaimnak legjobban megfelelő szárnyat a 3. számú mellékletben leírtak szerint.

A modell tervezése kapcsán összesen 31 szárnyprofil szimulációs adatát hasonlítottam össze a fenti szárnykonfigurációban, 150 különféle állásszög mellett. A profilok a [2.] forrásban elemzett tulajdonságok kategóriái szerint kerültek kiválasztásra, így a következő alapfeltételeknek feleltek meg többnyire:

- Vagy vitorlázó repüléshez használatos profilok, vagy alacsony Re számnál hatékonyak,
- Vastagságuk (néhány kivételtől eltekintve) 14-17 % közé esik,
- Íveltségük 2-6 % közé esik.

Szimulációimat azonos körülmények mellett végeztem, 80 km/h (22,2 m/s) sebességgel és 1,19 kg/m³ légsűrűség beállításával. A sebesség megválasztása annak tudatában történt, hogy a leválás jelensége a legnagyobb sebességnél jelentkezik a legnagyobb mértékben. Ha nagy sebességnél jól teljesít a profil, kisebb sebességnél is biztosan megfelelően fog működni. A szárnyprofilok különböző állásszögnél kapott értékeit a 4. számú mellékletben osztom meg. Első lépésben kiválasztottam az egyes profilok pont koordinátáit (dat file), azt Excel programban konvertáltam, majd

SolidWorksbe importáltam és kialakítottam a virtuális szárnyat (a szimuláció gyorsítása érdekében csak egy oldalát). A szárnyat a következő eljárással alakítottam ki:

1. Egyenlet, azaz „Equations” parancsot használva változót vezettem be a szárny állásszögének változtatására;
2. Konstrukciós vonalakat rajzoltam „Sketch” paranccsal a rendszer origójából;
 - a. Vízszintes síkon a szárny belépőélének $24,5^\circ$ -os hátranyilazása a teljes szárnyfeszávolságon és a profil hosszának, valamint a kilépőél 20° -os hátranyilazásának kirajzolása,
 - b. Függőleges, keresztirányú síkon a szárny 3° -os felefelé íveltségét ábrázoltam,
3. Beolvastam a profil pontjait a „Curve Through XYZ Points” paranccsal;
4. Függőleges, hosszirányú síkon a beolvasott profilt átmásoltam a „Convert Entities” paranccsal, majd a kapcsolat megszüntetése után egy formázható profilt kaptam. Ezt méreteztem és a segédvonalakat használva pozícióba állítottam, végül egy rögzített vízszintes vonalhoz képest felvettem a szárny állásszögeként meghatározott változót;
5. A szárnyvégen elhelyezett függőleges, hosszirányú síkon megismételtem a 4. pontot, amivel megkaptam a szárny két végpontjának profilját;
6. A két végpontot „Boundary Base” paranccsal és 0,5 mm-es vastagsággal létrehoztam a szárny testét. A Boundary Base tette egyedül lehetővé, hogy a forma oldalirányban egyenletesen változzon, egyenletes átmenet jöjjön létre a két végpont között, ami követi a konstrukciós vonalak területét.

Az egyes állásszögek változtatására érdemes egyenletet (változókat) bevezetni, a különféle szárnyprofilokra pedig ún. „Configurations” azaz konfigurációkat létrehozni a CAD programban, ez a későbbi módosításokat és vizsgálatot jelentősen gyorsítja.

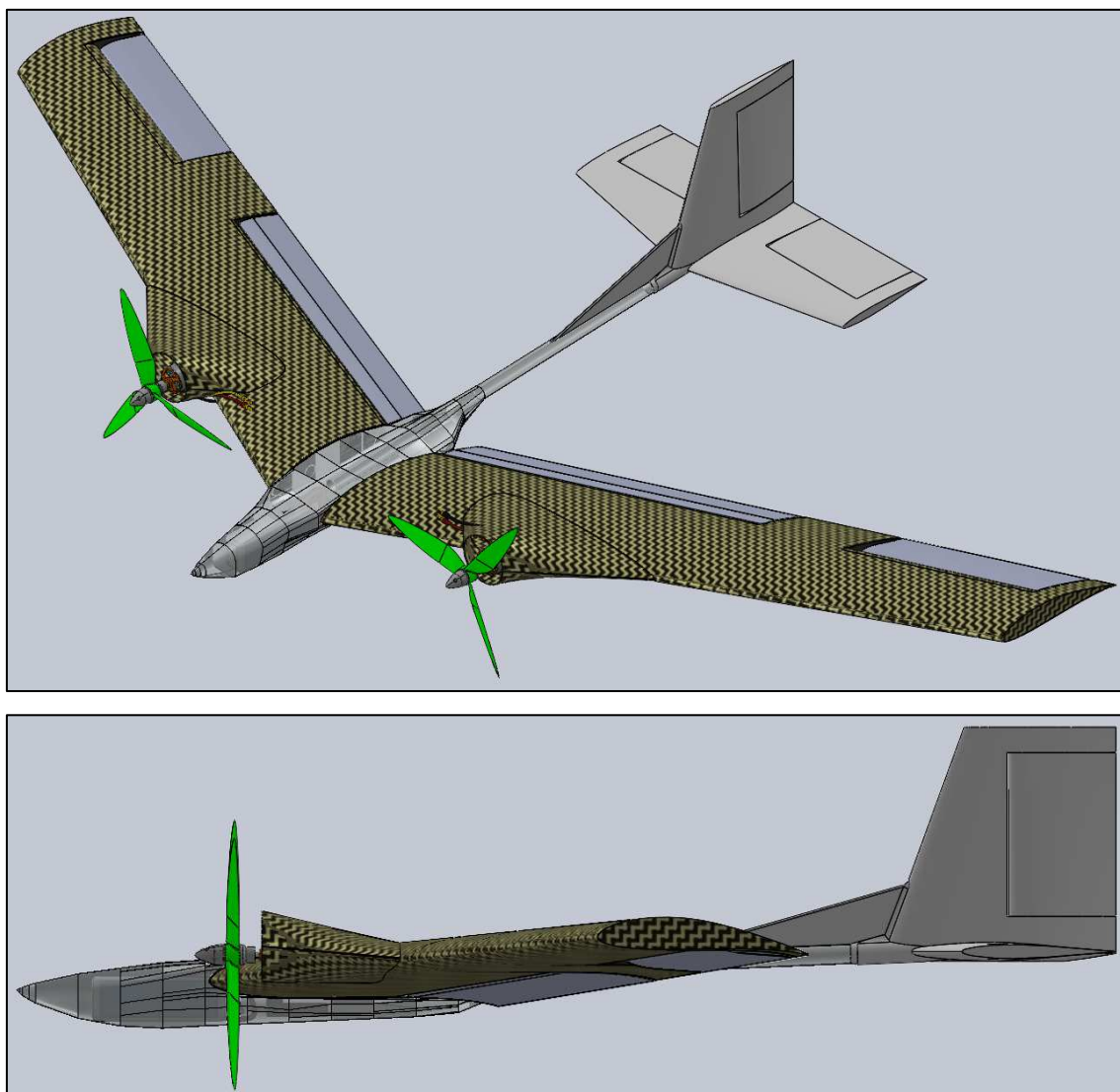
A szimulációk kiterjedtek a felhajtóerő és légellenállás összehasonlítására az állásszögek fél fokenkénti változtatásával, mind a szimulált és elméleti értékek ismeretében. Elsődleges szempontom az volt, hogy megkeressem a saját konstrukciómban az egyes profilok legnagyobb c_L/c_D arányához tartozó állásszögét olyan tartományban, amikor még elhanyagolható turbulens levegő képződik. További fontos szempontom volt, hogy a modell megépíthető legyen, ezért főleg olyan profilokat választottam ki, amelyek kellően vastagok voltak a motor szárnyba építéséhez,

hozzávetőlegesen 30 mm vastagságot értek a legvastagabb ponton. A szárny vastagsága nem jelentett hátrányt számomra, mert a koncepcióm az [5.] forrás 28. oldalán szereplő francia Bréquet 941-es repülőgéphez hasonlóan egyébként is vastagabb szárnykialakítást kívánt meg.

A szimulációs eredményeket elemezve kompromisszumos megoldást kellett találnom. A c_L/c_D arányokat diagrammban ábrázolva megállapítottam, hogy azok között nincsen számottevő körülmény, nagyjából 5-8°-ban tértek el az eredő erők a függőleges tengelytől, ami a modell viszonylatában nem tűnt jelentős különbségnek. Az eredményeket szűrővel csökkentettem. A túl vastag, a túl nagy szögben hatékony, a túl nagy turbulenciát generáló, a túl kis felhajtóerőt termelő vagy túl nagy légellenállású profilokat leválogattam. Emellett kiszűrtem azokat a beállításokat is, amiknél az airfoiltols oldalon számított elméleti adatok alapján a c_L/c_D arány nem érte el a 90-es minimum értéket. Végül a megmaradt profilok közül a [2.] forrást figyelembe véve azt választottam ki, amelyiknek a c_L/c_D grafikonja a lehető leglineárisabb volt. A szimulációs adatok kiértékelése alapján az Eppler E399-es számú szárnyprofil használata mellett döntöttem. A döntést azzal indokoltam, hogy ez a profil megfelelően vastag, nagy felhajtóerőt termel, miközben kicsi a légellenállása és nagyobb beesési szögnél is kevésbé válik turbulenssé a levegő körülötte, tehát minden elvárásomnak megfelelt. Az Eppler E399 profil 5°-os állásszögnél érte el a legjobb eredményeket, ennek adatait az 4. számú mellékletben külön is megosztom. Mivel tudtam, hogy a csűrőlap és fékszárny miatt le fogok vágni a szárnyból, bátran használtam az 5°-os beesési szöget annak ellenére is, hogy a gyakorlatban pár foknál nem döntik meg jobban a szárnyakat. Figyelemmel voltam továbbá a szakdolgozatom céljaként meghatározott 1. pontra, hogy a modellem legyen képes repülni. A szárny egy oldalán tehát legalább 10 N felhajtóerőnek kellett keletkeznie. A felszálláshoz szükséges többlet felhajtóerő-szükségletet kis sebességnél fékszárnyval oldottam meg. Az általam megtervezett szárny végső paraméterei:

- Szárnyszélesség (oldalanként): 665 mm
- Szárprofil belső hossza: 225 mm
- Szárnyprofil külső hossza: 165 mm
- Belépőél hátranyilazottsága: 24,5°
- Kilépőél hátranyilazottsága: 20° (közelítőleg)
- Felfelé íveltség: 3°

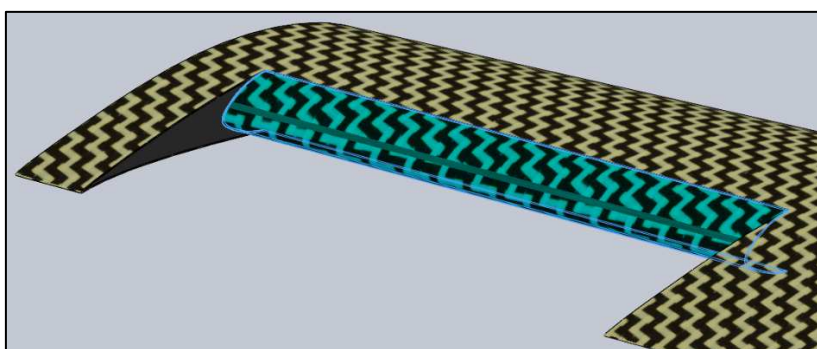
A tervezés későbbi szakaszában kialakítottam a szárnyon a motor beömlőnyílásait és kivágtam a csűrőlapátoknak, fékszárnyaknak szükséges helyet. A szárny rögzítését is megterveztem, 5 darab profil alakú borda tartja meg a formát, amiket egy keresztirányú kompozit rúd tart szilárdan. A kompozit rúd a törzs belsejében közvetlenül a másik oldali szárnyat és a hátsó vezérsíkot tartó rúddal van összekötve. A 2. számú mellékletben levezetett kompozit tesztelésem alapján a szárny alsó ívét 3 rétegű, a felső ívét 2 rétegű kompozit anyagból gyártom le. A szárny a gyártást követően várhatóan 260-300 g közötti tömegű lesz oldalanként (az elektronikai eszközök és rögzítések beépítése nélkül). A szárny végleges kialakítását a teljes modell viszonylatában mutatja be a 9. ábra perspektivikusan és oldalnézetben.



9. ábra: A modell összeállított terve

4.2.CSÚRÓLAPÁT TERVEZÉSE

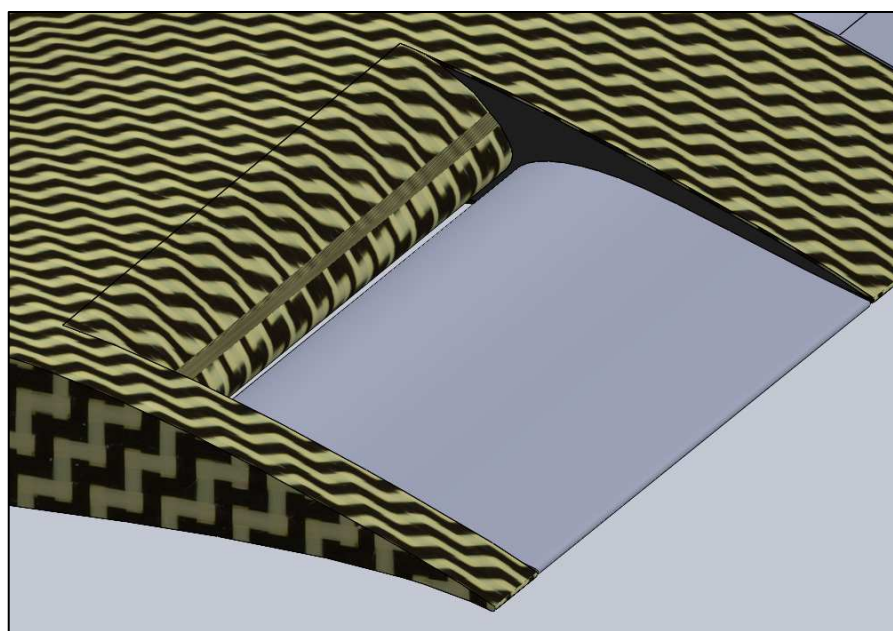
A szárny megtervezését követően a csűrőlapokat terveztem meg, aminek bizonyos paramétereit a szárny kialakítása adta meg, másfelől a [2.] forrás adott. A csűrőlapokat a szárny két szélső pontján helyeztem el annak érdekében, hogy a tömegközéppontra a legnagyobb forgatónyomatékot fejtsse ki és helyét a már megtervezett szárnyból kivágással alakítottam ki. A kivágást ezután a 10. ábrán látható szabadkezű pótlással kerekítettem le, hogy aerodinamikai szempontból kedvezőbb áramlást alakítsak ki.



10.ábra: A csűrőlap kivágásának aerodinamikai javítása

A csűrőlap vastagsági arányát a szárnyból levágott rész vastagsága határozta meg. Kormányfelületeket szimmetrikus kialakítású profilokból készítenek, ezért az airfoiltools.com weboldalon a maximálisan 0 % íveltségű szárnyak közül válogattam. Az Eppler E169-es profilt végül azért választottam, mert egyrészt a belépőélhez kellően közel helyezkedett el a legnagyobb vastagsága, másrészt a beesési szög függvényében ábrázolt felhajtóerő grafikonja a többi hasonló profilhoz képest lineárisabb volt, végül az elméleti felhajtóerő/légellenállás aránya a legmagasabb volt. A szimulációhoz 200 mm széles és 65 mm húrhosszú csűrőlapátot készítettem. Két szimulációt végeztem el, szilárdságtani méretezés céljából, (a szárnykialakítást követő kiindulóhelyzethez képest) 40°-os lefelé döntés állapotában és 30°-os felfelé döntött állapotban, mindkettőt 25 m/s sebesség mellett. Ezek eredményét a 4. mellékletben szintén szerepeltettem. A sebesség választását az indokolja, hogy a szilárdsági méretezést a legnagyobb igénybevételre kell tervezni, így kisebb sebességű szimulációnak nem lett volna haszna. Az első szimuláció 5 N eredő erőt és 3 N felhajtóerőt, a második szimuláció 3 N eredő erőt és 2,7 N leszorítóerőt adott eredményül. A két felhajtóerő közötti különbség megadta a csűrőlapok által kifejtett és a súlypontra átszámítható forgatónyomatékot. Emellett támpontot adott

az oldalkormánylap méretezéséhez is, hiszen legalább akkora oldalkormányra van szükség, ami a teljesen kitérített csűrőlapok légellenállás különbségét kompenzálni tudja. A szimuláció alapján ez a különbség 2,6 és 3 N körül volt. A [2.] forrás alapján a szimmetrikus profilok aerodinamikai középpontja a húrhossz első harmadában van nagyjából, ezért a rögzítés számítása során a felületen ilyen arányban megoszló erővel számoltam. A 11. ábrán a csűrőlap végleges kialakítását és elhelyezkedését mutatom be.

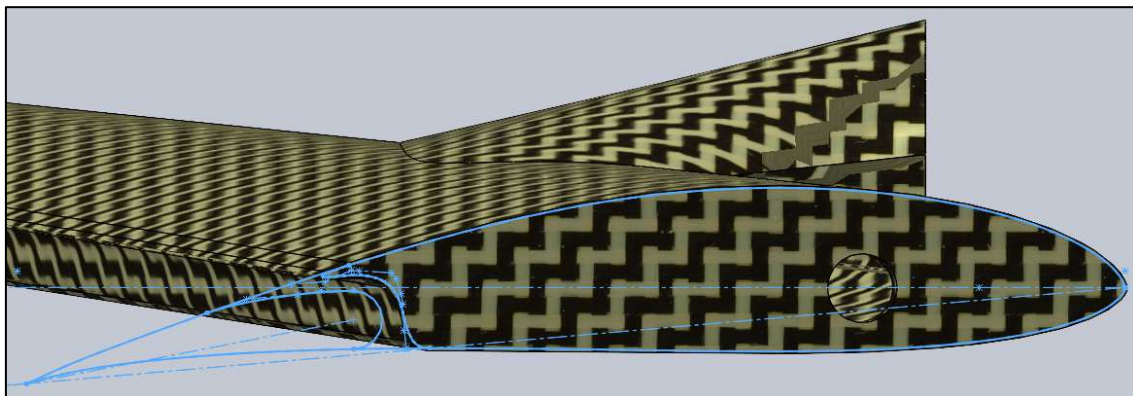


11.ábra: A csűrőlap alaphelyzetben

4.3.FÉKSZÁRNY TERVEZÉSE

A fékszárnny megtervezését a gyakorlatban a csűrőlapátok tervezésével párhuzamosan végeztem, mert mindkettő hasonlóképpen befolyásolta a szárny kialakítását. Az első terv szerint ráadásul a csűrőlapnál használt profilt akartam alkalmazni a fékszárnny esetében is. Azonban később, több forrásban is összehasonlító táblázatot és leírást találtam a fékszárnyak hatékonyságának növelésére. A modern repülőgépeken alkalmazott fékszárnny kitolást modellemhez túl bonyolultnak véltem, ezért átmenetet választottam és az angol nevén „Slotted flap”, vagyis a réselt fékszárnny kialakítást alkalmaztam. A kialakítás lényege, hogy a szárny és a fékszárnny között minimális rést képeznek ki, amin keresztül a kinyitott fékszárnny esetében át tud áramolni a levegő és a kisebb nyomású oldalt, ahol a leválás nagyobb eséllyel következne be, felfrissíti további lamináris

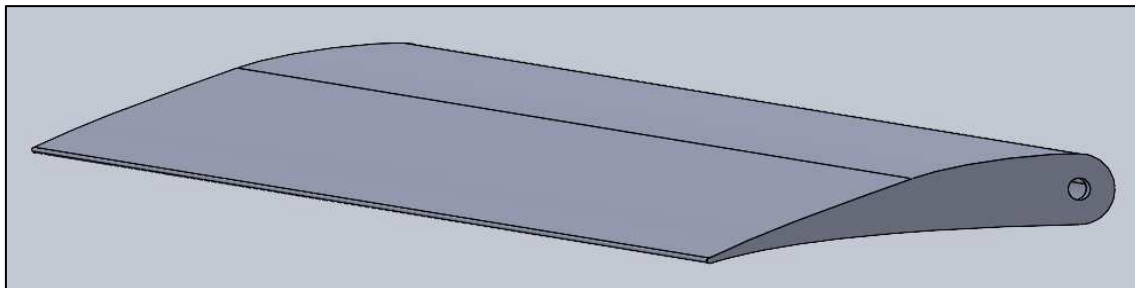
áramlású levegővel, ezáltal a fékszárny jobban megdönthető (nagyobb dőlésszögnél következik be leválás) és nagyobb felhajtóerő érhető el. Formáját a szárny profiljából levágott rész adta meg. A felhasznált profil körvonalát a 12. ábrán mutatom be.



12.árba: A fékszárny formájának és pozicionálásának megoldása

Olyan ívet igyekeztem kialakítani, amely a fékszárny alapállásában illeszkedik a szárny formájához és szinte egyenletes áramlást biztosít, ezáltal minimalizálja a légellenállást. További módosítás volt a húr hossz növelése. 340 mm széles fékszárnyat terveztem, eredetileg a csűrőlapáttal megegyező 65 mm húr hosszal, azonban ennek 75 mm-re emelése mellett döntöttem végül. Elsősorban azzal indokolható a változtatásom, hogy a 45°-ban lefelé döntött fékszárny felületét kevésnek találtam a szemléltető mintának készített változaton. Vizuális értékelés alapján nem volt elég nagy felülete, ami a levegő útját módosította volna. A módosítás előnye a nagyobb felhajtóerő és a vastagabb profil volt, amit a rögzítés tervezésekor ki tudtam használni. A fékszárnyat felfelé nem forgatom el, ezért ehhez nem helyet biztosítani a szárnyban, de beillesztéséhez nagyobb részt kellett kivágnom a szárnyból. A fékszárnyon egy szimulációt hajtottam végre 15 m/s (55 km/h) sebesség és az alaphelyzethez képest 45°-os lefelé döntés mellett. Eredményét a 4. mellékletben szerepeltettem. Nagyobb sebesség mellett a fékszárnyat nem akarom használni, így nagyobb erőhatás elméletileg nem fogja érni. A szimuláció alapján oldalanként 4,3 N eredő erő keletkezik ilyen beállítás mellett a fékszárnyon, összesen 5 N felhajtóerőt ad hozzá a szárny által generált felhajtóerőhöz. A végleges konstrukciót, amelyben a propeller forog a szárny előtt és úgy áramlik át a szárnyon, majd a ledöntött fékszárnyon a levegő, nem tudtam szimulálni a rendelkezésemre álló eszközökkel, az túl összetett beállításnak bizonyult. Elméletileg, a forrásokból kiindulva a végleges konstrukció semmiképpen sem rendelkezik a

szimulálnál kedvezőtlenebb tulajdonságokkal. A 13. ábrán bemutatom a fékszárny általam tervezett kialakítását.



13.ábra: A fékszárny szárnyívet követő végleges kialakítása

4.4.MAGASSÁGI ÉS OLDALKORMÁNY TERVEZÉSE

A folyamat következő lépése a modell hátsó részének megtervezése volt, ami magában foglalja a vízszintes és függőleges vezérsíkot, illetve a magassági- és oldalkormányt. A hátsó rész kialakítása egyszerűnek tekinthető, két oldalon azonos vízszintes és egy függőleges, szimmetrikus profilból kialakított, hátrafelé nyílazott alakzat, ami egyrészt a repülőgép stabilizálását, másrészt kormányzását hivatott szolgálni. Hatékony tervezése ugyanakkor különösen fontos. A stabilitás céljából érdemes minél nagyobbra tervezni a felületeket, viszont rendkívül kedvezőtlen hatással van a repülőgép tömegközéppontjára a súlya, ezért a lehető legkönnyebbnek kell lennie. A tervezéséhez a [3.] forrást vettem alapul, ami bemutatja a méretezés általános módszerét. A forrás 155. oldalán szereplő táblázatban a vitorlázó repülők vízszintes vezérsíkjának méret együtthatója (c_H) 0,5 körüli értéket, míg a házi készítésű és általános rendeltetésű gépek esetében 0,48 és 0,6 közötti értéket vesz fel. A függőleges vezérsík méret együtthatója (c_V) a vitorlázó repülők esetében 0,019, míg az előbbi két másik kategóriánál 0,038 és 0,06 között változik. Az együtthatókat a következő egyenletekkel számolja a forrás:

$$c_H = \frac{S_H \cdot l_H}{S_w \cdot c_{MAC}} \quad \text{és} \quad c_V = \frac{S_V \cdot l_V}{S_w \cdot b_w} \quad (4-1)$$

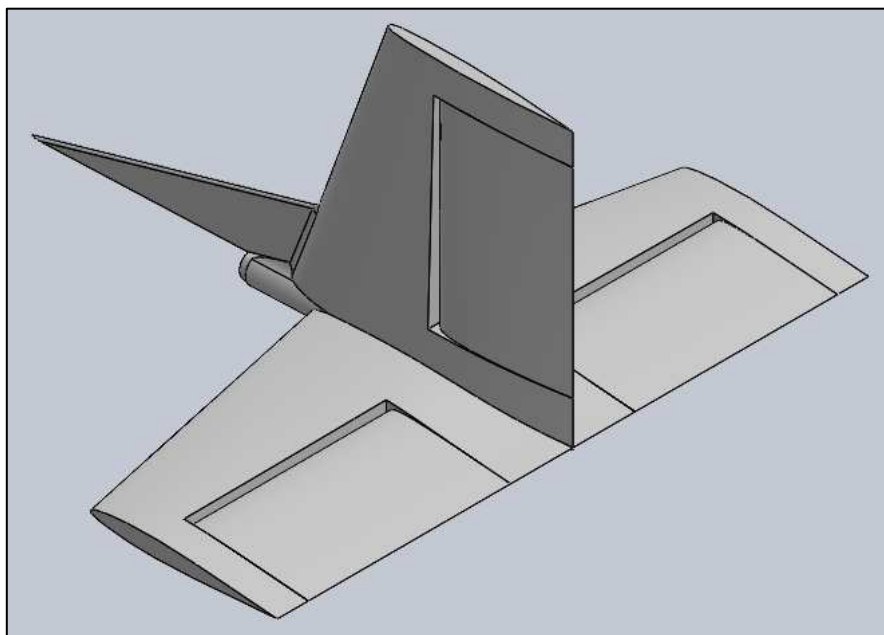
amely egyenletekben:

- S_H a vízszintes vezérsík felülete,
- l_H a vízszintes vezérsík aerodinamikai középpontjának távolsága a szárny aerodinamikai középpontjától,

- S_W a szárny teljes felülete,
- c_{MAC} a szárny közepes aerodinamikai húr(hossza)¹,
- S_V a függőleges vezérsík felülete,
- l_V a függőleges vezérsík aerodinamikai középpontjának távolsága a szárny aerodinamikai középpontjától,
- b_W a szárny fesztávolsága.

Az egyenleteket a vezérsíkok felületére rendezve a méret együtthatókat kellett meghatároznom és a hátsó rész távolságát ahhoz, hogy megkapjam az elvárt méreteket. A hátsó rész távolsága kapcsán a nevezett forrás 156. oldala határoz meg átlagos értéket, a törzs méretéhez viszonyítva a vízszintes vezérsík 45-47 %-os, míg a függőleges vezérsík 40-44 %-os távolságra van elhelyezve. Kiindulásképpen 600 mm körüli értéket határoztam meg, a szárnyhoz viszonyítva ez tűnt látványra „szokásos” távolságnak. A c_H értékét 0,5-nek vettem és a c_V értéket 0,045-nek. A számítás alapján a vízszintes vezérsíknak hozzávetőlegesen 0,047 m²-nek, a függőleges síknak 0,027 m²-nek kellett lennie. A feldolgozott források mellett még 2 tényezőt emelnek ki a hátsó vezérsíkokkal kapcsolatban. Egyfelől a függőleges vezérsík esetében egyre gyakrabban használt hátúszóra hasonlító kisebb szögű belépőív („dorsal fin” megoldás) hasznosságát, másfelől a vízszintes vezérsík szögbeállításának fontosságát. A vízszintes síkot nem vízszintesen állítják be ugyanis, hanem olyan szögben, hogy a repülőgép leggyakoribb sebességénél a szárny döntéséből eredő szögtorzulást kiegyenlítsse és ennél a sebességnél valósuljon meg a 0°-nak megfelelő állapot, azaz ilyenkor ne keletkezzen felhajtóerő a síkon, csak akkor, ha ebből az állapotból kitér a repülő. A belépőív megtervezése szintén a [3.] forrás alapján történt. Meghatároztam a belépő rész felületének nagyságát (12 %-a a függőleges vezérsíknak), kiválasztottam a 74°-os szöget, kiszámítottam a csatlakozási pont magasságát (45 mm), ami alapján meg tudtam rajzolni a belépőívet. A kormányfelületek mozgatását a törzsben elhelyezett szervó motorokkal valósítom meg, amihez a törzset és a hátsó részt összekötő kompozit tartórúdban vezetem keresztül a mozgó drótokat. A 14. ábrán a végleges konstrukciót szemléltetem.

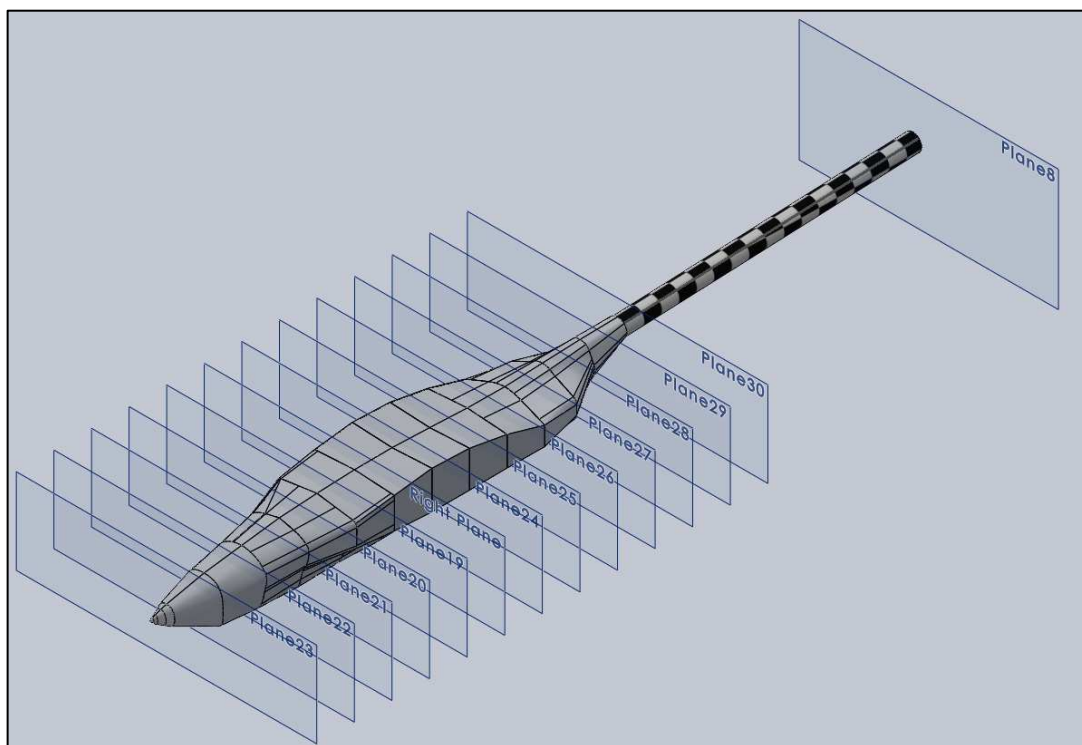
¹ A közepes aerodinamikai húr a szárny olyan fiktív mérete, amit derékszögű négyszög alaprajzú, fesztávolsága mentén állandó profilméretű és szemből teljesen egyenes állapotában mérnénk.



14.ábra: A modell hátsó része a magassági- és oldalkormány lapátokkal

4.5.TÖRZS TERVEZÉSE

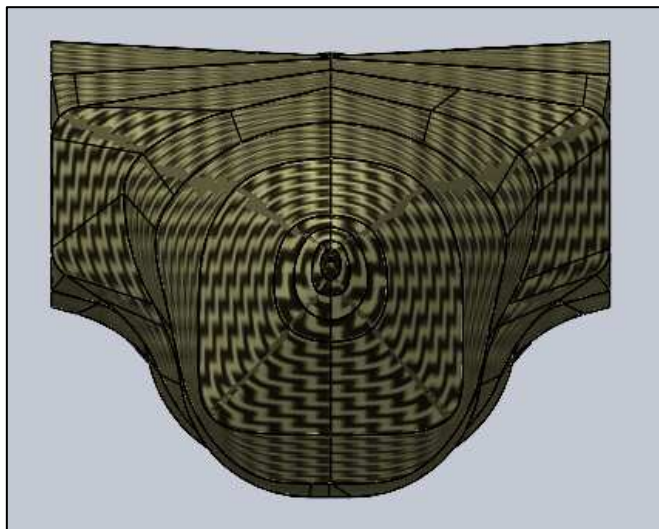
A törzs tervezésekor elsősorban funkcióját vettem figyelembe, és igyekeztem minden elektronikai eszközt elhelyezni benne. Lehetőség szerint minél inkább a repülő elejében akartam elhelyezni az elektronikát és egyébként a törzs méretét minimalizálni. A legnagyobb kihívást az jelentette, hogy az akkumulátor tömege a modell össztömegének jelentős részét adja (nagyjából 10 %-át), ezért ezt szerettem volna a szárnytól jelentősen előre helyezni. Méretei miatt a tervezés kompromisszumokat követelt meg és az akkumulátor súlypontját a törzsben hozzávetőleg 140 mm-el a szárny feltételezett aerodinamikai középpontja előtt helyeztem el végül. Fentiek mellett különös figyelmet fordítottam arra, hogy olyan törzset tervezek, amihez a szárny egyenletes felületen, aerodinamikailag törésmentesen csatlakozhat. A törzs legnagyobb szélessége 70 mm, hossza 410 mm (670 mm a hátsó részt tartó kompozit rúddal együtt) és legnagyobb magassága 55 mm. A törzs hozzávetőleges alakját a függőleges hosszirányú síkon rajzoltam meg először vázlatosan, majd a 15. ábrán látható, összesen 13 darab, egymástól 33 mm-re felvett keresztmetszetben rajzoltam meg az egyes hosszúsági pontokhoz tartozó törzskialakítást.



15.ábra: A törzs kialakításához felvett síkok

A keresztmetszeteket a „Boundary Base” paranccsal kötöttem egymáshoz 0,5 mm-es belső vastagsággal. A modell legelejét további 3 darab keresztmetszettel alakítottam ki, hogy arányosan kövesse a törzs alakját. A megrajzolt vázlat összeállításnak nehézségét az adta, hogy az egyes keresztmetszetek túl sok referencia pontot adtak, amit csatlakoztatni próbált a program és végül a formát nem tudta értelmezni, szükségtelenül hullámos lett. A problémát úgy oldottam meg, hogy az egyes keresztmetszeteket egyesével csatlakoztattam a mellettük levővel, kézzel felvitt csatlakozási pontokkal szabályozva az átmenetet. A forma így nem lett precíz és törésmentes, de a kisebb hibákat a kompozit gyártásához készítendő mintaforma kialakításával fogom javítani. A SolidWorks programban erre egyszerű megoldást nem találtam. A törzset 2 rétegű kompozitból tervezem megépíteni, egy alsó és egy felső rész összeállításával, amiket a hajótörzshöz hasonló 5 darab keresztborda tart közös síkban. A bordákból hármat a szárnyak között tervezek. A törzsön belül kerül elhelyezésre a szárnyakat és a hátsó tartórudat összekötő és rögzítő csatlakozási háromszög. A háromszög a három kompozit rudat egymáshoz képest stabilan rögzíti, ezáltal a törzsre a fellépő erők nem hatnak és készülhet minimális anyaghasználattal. A tervezéstől azt várom továbbá, hogy a szárny

és az irányító felületek egymáshoz viszonyított elmozdulása és elcsavarodása minimalizálható, ha a fő rögzítési pont egybe esik. A 16. ábrán szemből is bemutatom a törzs kialakítását.



16. ábra: A törzs kialakítás szemből

4.6.MOTOR RÖGZÍTÉSÉNEK ÉS HŰTÉSÉNEK TERVEZÉSE

A rögzítések tervezése általában megköveteli a kreatív gondolkozást és habár nagyon nehéznek és időigényes feladatnak találtam, talán ebben a folyamatban találtam a legnagyobb örömet is. A motor rögzítésének megoldása gépészmérnöki szemmel éppen olyan fontos, mint az összes előzőekben ismertetett tevékenységem. A modellem ugyanis nem tud felszállni, ha motorját nem a megfelelő módon építem be. A rögzítési pontok tervezése jelentette a virtuális térben megrajzolt formák valóságba ültetését. Az üzletekben ugyan kapható motor tartó tok, én magam akartam megtervezni a számomra ideális rögzítést. A 17. ábrán látható verziót terveztem meg először, és elemeztem ki. Az első verziót szerelhetőségi szempontból nem találtam előnyösnek, illetve kinyomtatást követően szembesültem azzal, hogy mennyire zárt a konstrukció, ezért hűtési szempontból előnytelen. Abban se voltam biztos, hogy a motor vonóerejét meg tudja tartani. Továbbá összeszereléskor szembesültem azzal a tervezési hibával, hogy a csavarhelyeket felcseréltem.



17.ábra: Motor rögzítésének első terve, 3D nyomtatva PLA-val

A második, 18. és 19. ábrán látható verzióban igyekeztem a felismert hibákat orvosolni. A motort körülvevő burkolat beleillik a tervek alapján gyártott szárnyba, így a tok ragasztással véglegesen beépíthető a szárny alsó és felső oldalába külön-külön és a későbbiekben a motor könnyen eltávolítható szereléshez. Kijavítottam és megerősítettem a csavarozási pontot is, a csavarhelyek közelében található kivágások csökkentésével és az anyagvastagság növelésével. Látható, hogy a motornak nagyobb szabad helyet terveztem, illetve a kivágások által is igyekeztem a meleg levegő kijutását segíteni a motor közeléből. A két oldal egymáshoz rögzítését úgy terveztem meg, hogy a motor beömlőjének szűkülése összeszorítsa és önmagát zárja a vonóerő irányába.



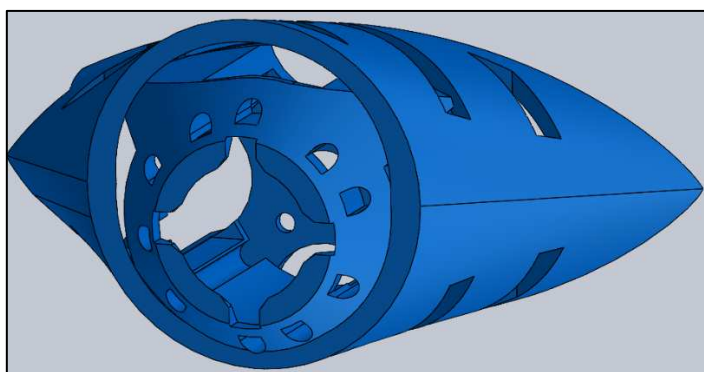
18.ábra: Motortartó szerkezet második verziója, 3D nyomtatva PLA-val



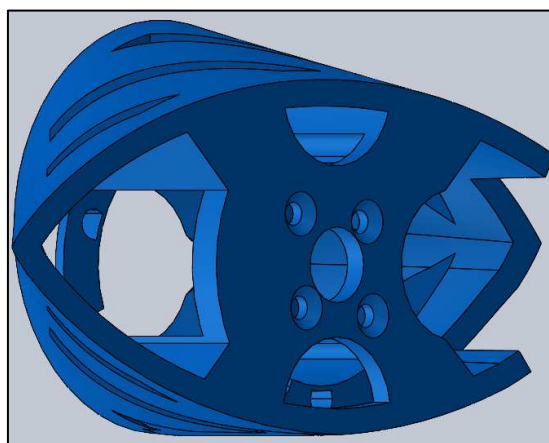
19.ábra: Motortartó szerkezet második verziója, 3D nyomtatva PLA-val

A kinyomtatott darabon vizsgáltam a darab ellenállóképességét és a teherbírás teszten 1500 g-ot törés nélkül elbírta a rögzítés, ami azt jelenti, hogy a kiválasztott motor által kifejtett vonóerőnek biztonságosan ellenáll. A második verzió hűtését továbbra is kevésnek találtam, illetve kockázatosnak találtam a borítás és a forgórész közelségét a kivezető ponton. Lehetséges hibaokat abban láttam, hogy a motor túlmelegedése miatt a műanyag megolvadhat és veszíthet szilárdságából. A furatok és rések a motor hűtését hivatottak javítani átáramló levegővel, de a PLA filament 55°C felett lágyulni kezd. Megoldási lehetőségként ABS filamentet próbáltam ki és teszteltem, aminek magasabb az olvadási hőmérséklete (85°C), elbírja a motor melegedését. Az ABS filament nyomtatása nem várt nehézségekkel járt. Megfigyeltem, hogy a lehűlést követően 3 %-ot elérő zsugorodást szenved, illetve az asztaltól elválzik a filament, ha túl gyorsan hűl le a fúvókát elhagyva. A zsugorodás önmagában nem okoz tervezési nehézséget, a nyomtató grafikus konvertáló programjában be lehet állítani, hogy a tervhez képest 3 %-al nagyobb alakot nyomtasson, de ehhez vizsgálni kell előzetesen, hogy a zsugorodás egységes-e és befolyásolja-e számottevően a nyomtatási paraméterek (hőmérsékletek) változtatása. Az elválás rontja az első rétegek minőségét, vagy adott esetben a teljes nyomtatás sikertelen a rétegek közötti elválások miatt a lehűlési „dermedés” következtében.

A 20. és 21. ábrákon látható harmadik verzió koncepcióban megegyezik az előzővel, azon minimális, de hasznos változtatásokat hajtottam végre. Megfigyelhető, hogy a tartó elején levő kivágás méretét és szellőzők számát megnőveltem, ezáltal még több levegőt juttatok a motorhoz hűtés céljából. Emellett különösen az első verzióhoz képest figyelhető meg a változás a csavarozási pontok környékén. Az ABS filament valamivel kisebb szakítószilárdsággal bír, mint a PLA, ezért ezt a részt tovább erősítettem és vastagítottam a kivágások csökkentésével. Kiemelhető továbbá a tokozást körülvevő ív, amit a kinyomtatott korábbi verziókon feleslegesen vastagnak és erősnek találtam, ezért ezt a vastagságot csökkentettem a nyomtatási idő és a tömeg csökkentése érdekében. A hátsó nézetben megfigyelhető az is, hogy a motorból kijövő kábelek helyét szintén megnőveltem.



20.ábra: A motortartó harmadik verziója szemből



21.ábra: A motortartó harmadik verziója hátsó nézetben

5. MEGÉPÍTÉS ÉS KIÉRTÉKELÉS

Szakdolgozatom keretében a szárny megépítéséig jutottam el, ennek kiértékelését végeztem el és a levont megfigyeléseket foglalom össze ebben a fejezetben. A szárnyat két nagy darabban gyártom le, a profil alsó és felső ívének egymáshoz illeszthető részének megfelelően. Egyben, egy-egy mintaformában készítem el a félíveket, de a felső rész esetében a szükséges helyeken kivágásokkal teszem lehetővé a szerelhetőséget. Szerelési kivágás kerül a csűrőlapát külső és belső pontjához, a motor kábelezéséhez annak érdekében, hogy le lehessen kötni a motort az áramellátásról, továbbá a fékszárny külső rögzítési pontjához. A szárnyban hat darab 3 rétegű kompozitból készült bordaszerű profilt helyeztem el az ív megtartása érdekében, így a legnagyobb alátámasztás nélkül maradó rész 200 mm a szárny külső részén, a csűrőlapát előtt. A kompozit tesztadarabokon végzett kísérlet alapján ez megfelelő alátámasztás, ezen a távolságon a szárny íve nem deformálódik számottevően. A szárny statikai stabilitását a szárnyon keresztül ívelő kompozit rúd biztosítja, ami mellett a legbelső profilt 4 darab csavarral is rögzítem a törzshöz azért, hogy az elcsavarodást és a keresztirányú elmozdulást megakadályozzam. A szárny két felének egymáshoz rögzítéséhez nyomtatott PLA betéteket terveztem, amibe süllyesztve helyeztem el csavarozási foglaltot, ezáltal a szárny felülete a szerelési borítások felhelyezését követően aerodinamikailag zavartalan maradt.

A megépítéshez kiszámítottam a szükséges anyagmennyiséget is. Erre egyrészt anyagbeszerzési és költséghatékonysági célból, másrészt önellenőrzés céljából volt szükség. Habár a szárny egy oldali felülete csupán $0,11 \text{ m}^2$, annak megépítéséhez számottevően több szövetanyagra van szükség. Ahogy már írtam, az alsó felet 3 rétegű kompozitból, a felső felet 2 rétegű kompozitból terveztem megépíteni. A valós, beszerzendő mennyiséghez ugyanakkor hozzá kellett számolnom a kötési szélességet is, amit szélenként 40 mm-ben határoztam meg. A gyártáshoz $2,5 \text{ m}^2$ szén-aramid szövetet vásároltam, ez biztosan elég a gyártáshoz. Az ősminta előállítás 3D nyomtatással történik, amire építhető rá a tényleges mintaforma 4 rétegű szén kompozitból. Az ősmintára azért van szükség, mert a szárny tervezett formáját pontosan követő mintára volt szükségem. Gyakori megoldás a kompozit gyártás során, hogy a mintát kemény hab formában alakítják ki felforrósított fém huzallal, kvázi belevágják a habba a szárnyprofilt, de ez pontatlan megoldást eredményez. A modell kisebb mérete miatt néhány milliméteres

eltérés aerodinamikai szempontból jelentőssé válhat, illetve különösen fontos, hogy a két oldal a lehető legszimmetrikusabb legyen egymással.

Összefoglalva, a következő gyártási terv szerint készül a szárny:

- Ősminták készítése 3D nyomtatással, majd felületük előkezelése,
- Az ősmintákat lekövető minta készítés kompozitból,
- A mintaformában előállíthatók a szárny kompozit elemei,
- Legyártott komponensek lecsiszolása és újra gyantázása (felületkezelés),
- Gyártás minőségének ellenőrzése,
- Keresztbordák beragasztása az alsó ívbe,
- Rögzítési pontok beragasztása a kompozit elemekbe,
- Motor és az egyéb elektronikai rendszer telepítése,
- Csűrőlapok két kompozit oldalának összeállítása,
- Fékszárnyak két kompozit oldalának összeállítása,
- Csűrőlap és fékszárny helyre illesztése és rögzítése az illesztési pontokon,
- Elforgatásuk és rögzítésük biztonsági tesztelése,
- Szárny felső és alsó ívének összeállítása, rögzítése,
- Szerelési helyeken a rögzítések ellenőrzése, majd a szerelési zónák lezárása,
- Tömeg ellenőrzése,
- Propeller felhelyezése a motorra.

A megépítés kapcsán több olyan tapasztalatot szereztem, amik a jövőben segítik a modell megépítését. Elsődlegesen a gyártási technológiában való fejlődést szeretném kiemelni. A 5. mellékletben található költségelemzésem rámutatott arra, hogy gyártási technológiám nagyon költséges és időigényes. Nagyon sok anyagra és gépre van szükségem, amiket túl sok helyről tudtam csak beszerezni. A mintaformák hatékonyabb elkészítése különösen fontos kutatási irány lehet a jövőben, a 3D nyomtatás valójában felesleges lépés és költség. A habformába vágott ősminta alkalmazása útján idő is megspórolható lenne. Tervezési szempontból a törzs kapcsán hanyagoltam el alaposabb átgondolást. A modell aerodinamikai tulajdonságait a törzs pontosabb megtervezése nagyban javítaná. Hasonlóképpen szükséges lenne a véglegesnek szánt modell összeállított és a működési állapotnak megfelelő szimulációja. Végezetül, a modell kipróbálásához feltétlenül szükséges a futómű megtervezése is, amire nem jutott időm.

ÖSSZEFOGLALÁS

Szakdolgozatomban az általam megtervezett repülő modellen keresztül szemléltetve kerülnek bemutatásra modell tervezéséhez és építéséhez hasznos ismeretek. Témaválasztásomat a repülés iránti érdeklődésem motiválta, én magam is igyekeztem minél többet megtanulni a repülőkről, működésükről, tervezésükről és megépítésükről. Munkám elsősorban azok számára hasznos, akik hozzám hasonlóan érdeklődnek a repülés iránt, de gyakorlati tapasztalatot még nem szereztek a modellépítés területén. Fejlődésem következő lépcsőfokaként, azt a célt tűztem ki magam elé, hogy részletesen leírom egy rádió frekvenciás távirányítású, elektromos meghajtású, kompozit alapú modell repülőgép virtuális tervezését, illetve megépítésének és tesztelésének módját. Mindezt az általam összegyűjtött tudás alapján, ezért szakdolgozatom a folyamatos tanuláson alapult. Amikor elkezdtem dolgozni a feladattal, egyetlen egy fő célom volt, hogy repüljön. Ezt később kiegészítettem és további céljaimként megfogalmaztam, hogy a modell megfelelően irányítható legyen, valamint legalább 300 másodpercig a levegőben tudjon maradni. Szakdolgozatom 3 fő részre tagolható, először a megértéshez szükséges elméleti alapokat ismertetem, ezt követően a CAD programban végzett tervezés folyamatát részletezem, végül leírom a gyakorlati megépítés módszerét és kiértékelem a munkámat.

A feladatra való felkészülésemet külföldi és hazai forrásanyagok feldolgozásával kezdtem. Kiválasztottam és részletesen leírtam azokat az ismereteket, amiket a tervezés és modell működése szempontjából különösen fontosnak tartottam, de az összegyűjtés nem teljes. A könnyen elsajátítható, egyszerű és közérthető pontokat nem érintem, de nem vezetek le olyan bonyolult elméleteket sem, aminek a témám szempontjából csak marginális szerepe van. A repülés és a repülőgépek elméleti működése rendkívül széleskörű tudást ölel fel. Az egyes témák leírásában a szükséges tömörség ellenére igyekeztem több szempontból bemutatni tudásomat. A modell tervezésének kifejtése közben gyakran visszautaltam munkám elméleti háttérére, így döntéseimet a legtöbb esetben indokolni tudtam. A tervezést követően bemutattam azt is, hogyan lehet a CAD programban létrehozott formát a gyakorlatban is létrehozni. Leírtam a megépítés eljárását, majd a tényleges építést megelőzően kiértékelés keretében meghatároztam

fontos fejlesztési pontokat, lehetőségeket. A szakdolgozatomban kitűzött cél érdekében megszerzett speciális ismereteket külön mellékletben szerepeltetem.

Szakdolgozatom elkészítése közben ismertem meg a vállalt kihívás valódi nehézségét. Például a [6.] és [7.] forrásokat olvasva úgy éreztem, legalább egy évtizeddel hozta közelebbre a saját repülőm megtervezését, annyi hasznos ismeretet adott át. De hasonlóan éreztem az első forrástól az utolsóig, amivel megismerkedtem a témában. Meglátásom szerint a Horten-testvérek minden nehézség ellenére nagyon közel álltak ahhoz, hogy megépítsék koruk legtökéletesebb repülőgépét, de munkájuk sosem teljesült ki. 50-60 évvel később viszont az általuk is lerakott alapokra építve készült el a világ egyik legtökéletesebb repülőgépének nevezhető B-2 Spirit. És napjainkban, 30-40 évvel még később készül a B-21 jelű repülőgép, ami véleményem szerint a maga nemében szintén páratlan lesz. Úgy gondolom, minden nehézsége ellenére azért választottam jó és fontos témát, mert a repülőgépek nem tökéletesek ma sem. Rengeteg kihasználatlan lehetőség van még bennük. A repüléssel nagyon sokan foglalkoztak már a világon és még fognak is, mégis fontosnak tartottam, hogy én is ezt a témát dolgozzam fel. Biztos vagyok benne, hogy érdemes folytatni a megkezdett munkám, mert minél több ismeretet szerzek a témában, annál közelebb kerülök ahhoz, hogy én is építem a jövőt.

SUMMARY

In this thesis, useful knowledge for model airplane design and construction is presented through the process of my own design work. The choice of topic was motivated by the interest in aviation, I myself tried to learn as much as possible about airplanes, their operation, design and construction. This work is primarily helpful for those who, like me, are interested in aviation, albeit not yet gained practical experience in the field of building model planes. As the next step in my everlasting development, I set myself the goal to describe in detail the virtual design, construction and testing methods of a remote-controlled, electric-powered, composite model airplane. The knowledge I have gathered during the past year is the basis of my thesis, hence it is based on continuous learning. When I started working on the project, I had only one main goal, to make the model plane fly. Later I stated my additional goals, like the model must be properly controlled and also that it must stay in the air for at least 300 seconds. The thesis is divided into three main parts. First, I explain the necessary foundations of common understanding, then I present the design process in the CAD program, and finally I describe the method of construction and evaluate my work.

From the immense literature and other sources I found, I collected and described in detail the knowledge I considered particularly important on the design and making a functioning model. The collection is not complete, in my opinion I will not touch on easy-to-learn, simple and understandable topics, but I will not derive such complicated theories that have only a marginal role from the point of view of my topic.

The preparation started by processing foreign and domestic literatures and other sources. In the thesis I have selected and described in detail the knowledge that I considered particularly important on the design and making a functioning model, but the presentation is not complete. I do not write about terms that are easy-to-learn or easily understandable, nor I derive complicated theories that have a marginal role in the topic. Aviation and the theoretical operation of airplanes encompasses an extremely wide range of knowledge. Despite the short description of main topics, I tried to present my knowledge from several perspectives. While explaining the design of the model, I often referred back to the theoretical background of my work, so in most cases I was able to justify my decisions. After the design, I also presented how a design that is created in the

CAD program can be created in real life. I described the construction procedure, and then defined important development points and opportunities on my work before the actual construction. The special knowledge acquired for the purpose of my thesis is included in appendixes.

While preparing my thesis, I learned the true difficulty of the challenge I had undertaken. For example, reading sources [6.] and [7.], I felt that they brought me at least a decade closer to designing my own plane, they gave me so much useful knowledge. But I felt the same way from the first to the last source I came across on this subject. In my opinion, despite all their difficulties, the Horten brothers came very close to building the most perfect airplane of their time, but their work was never finished. 50-60 years later, the B-2 Spirit - which can be called one of the most perfect aircraft in the world - was built on the foundations laid by the Horten brothers. And today, 30-40 more years later, the B-21 aircraft is in late development state - which in my opinion, will also be truly unique. I think, despite all its difficulties, I chose a good and important topic because airplanes are still not perfect, even not today. They still have left a lot of potential in them. Many people in the world have already dealt with aviation and will continue to do so, yet I thought it is very important that I also work on this topic. I am sure that continuing the work I've started is valuable, because the more knowledge I gain in aviation, the closer I get to build the future myself.

IRODALOMJEGYZÉK

[1] André Noth: Design of Solar Powered Airplanes for Continuous Flight <i>egyetemi disszertáció, ETH Zürich, 2008</i> https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mavt/robotics-n-intelligent-systems/asl-dam/documents/phd_thesis/Andre_Noth_Design_of_Solar_Powered_Airplanes_for_Continuous_Flight.pdf
[2] Jereb Gábor: Vitorlázó repülőgépek <i>Műszaki könyvkiadó, 1977</i>
[3] Dieter Scholz: Empennage sizing with the tail volume complemented with a method for dorsal fin layout <i>nyílt hozzáférésű cikk, Hamburg University of Applied Science, 2021</i> https://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/Aero/AERO_PUB_INCAS_TailVolume_Vol13No3_2021.pdf
[4] Marvin Exalto, Athul Perumpillichira: Modeling and implementing power electronics systems for solar powered RC planes <i>egyetemi szakdolgozat, Delft University of Technology, 2019</i> https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:794f3994-e42b-4496-bf8e-5d42da748786/datastream/OBJ/download
[5] Rohács József, Gausz Zsana, Gausz Tamás: Aerodinamika, <i>egyetemi tananyag, 2012</i> http://www.vrht.bme.hu/letoltes/Tanszeki_letoltheto_anyagok/Oktatok_anyagai/Jankovics_Istvan_anyagai/Aerodinamika/Rohacs_Gausz_Aerodinamika.pdf
[6] David McCullough: The Wright Brothers: The Dramatic Story behind the Legend, <i>Simon & Schuster Ltd, 2016</i>
[7] Russell E. Lee: Only the Wing - Reimar Horten's Epic Quest to Stabilize and Control the All-Wing Aircraft <i>Smithsonian Institution Scholarly Press, 2020</i>
[8] David G. Hull: Fundamentals of Airplane Flight Mechanics <i>Springer-Verlag Berlin and Heidelberg, 2010</i>

[9] Ludwig Prandtl, O. G. Tietjens: Fundamentals of Hydro- and Aeromechanics, <i>Dover Publications Inc, 2011</i>
[10] Gurit: Guide to Composites <i>internetes kompozit útmutató</i> https://www.gurit.com/-/media/Gurit/Datasheets/guide-to-composites.pdf
[11] Ronald F. Gibson: Principles of Composite Material Mechanics (4. kiadás) <i>CRC Press - Taylor & Francis Group, 2016</i>
[12] David Boman: Implementation of UAV design into CAD <i>egyetemi szakdolgozat, Mälardalen University Sweden, 2011</i> http://mdh.diva-portal.org/smash/get/diva2:419506/FULLTEXT01.pdf

Kifejezetten nem hivatkozott, de a témában további hasznos segítséget nyújtottak a következő irodalmak is:

[13] Dr. Szlivka Ferenc: Hő- és Áramlástechnika, <i>egyetemi jegyzet, 2014</i>
[14] Ludwig Prandtl, O. G. Tietjens: Applied Hydro- and Aeromechanics, <i>Dover Publications Inc, 2012</i>
[15] Albion H. Bowers, Oscar J. Murillo: On Wings of the Minimum Induced Drag: Spanload Implications for Aircraft and Birds <i>technikai beszámoló, 2016</i> https://ntrs.nasa.gov/citations/20160003578
[16] Holt Ashley, Marten Landahl: Aerodynamics of Wings and Bodies <i>Dover Publications Inc, 2020</i>

1. számú melléklet: A vezérlési rendszer bemutatása

A modell teljesítményének értékeléséhez szükségesnek tartom, hogy a teljes elektronikus rendszert ismertessem. Mivel azonban szakdolgozatom gépészmérnöki szempontból vizsgálja a kitűzött feladatot, a bemutatást röviden teszem meg. A felhasznált eszközöket elsősorban a [Jako Modell-Makett Webáruház](#) segítségével és közreműködésével szereztem be. A konfiguráció előzetes vázlatát az [rcplanes.online](#) weboldal alapján készítettem el, de figyelembe vettem a Jako Modell-Makett szakértőinek ajánlásait, és egyéb internetes forrásokat, bemutatókat és teszteléseket is. A modell elektronikai egységeinek kiválasztása kapcsán külön köszönöm Katona János részletes és pontos segítségét!

A meghajtás egységei:

A modell meghajtásához Surpass Hobby C2836 1120KV típusú motorból két darabot használtam. Ebben az esetben az rcplanes.online útmutatójából indultam ki, amely a motor szükséges teljesítményének kiválasztásához ad támpontokat. Egyik ilyen támpont a teljesítmény-tömeg arány, így például nyugodt, kiegyensúlyozott repüléshez a modellem minden 1 kg tömegére 80-100 W teljesítményt ajánl az útmutató. Továbbá a motor teljesíti a 3 W/g elvárást is a maga 5 W/g arányával. A két motor használata mellett azért döntöttem, mert egyrészt feltételeztem, hogy a kisebb motor kedvezőbb áron szerezhető be, másrészt a hajtóerő megosztásától azt reméltem, hogy az energiafelhasználás kedvezőbb lehet folyamatos, zavartalan repülés közben.

Surpass Hobby C2836 1120KV szénkefe nélküli motor tulajdonsága					
Tömeg (g)	Max. teljesítmény (W)	Fordulatszám (ford./vont)	Névleges üzemi feszültség (V)	Üresjárat áramfelvétel (A)	Megengedett legnagyobb áram (A)
75,12	380	1120	7,2-15	1,2	26

Ehhez a típusú motorhoz 30 A-s ESC javasolt, amiből szintén két darabot terveztem használni, motoronként egyet-egyet, de a beszerzések idején nem volt kapható. Helyette 40 A-s ESC-t vásároltam. Az ESC folyamatba építése elengedhetetlen, szerepe hogy a távirányítótól érkező jelet feldolgozza és az áramfelvétel beállításán keresztül a motor fordulatszámát szabályozza a jelnek megfelelően. A 40 A jelölés csupán azt jelenti, hogy

maximálisan 40 amper erősségű áramot ad át a motornak. Illetve fontos kiválasztási szempont volt a forgásirány beállíthatósága az ESC-nél, mivel a két motor egymással ellentétes irányban forog a stabilitás megőrzése céljából. Ezt a pólusok megfordításával biztosítottam. A két ESC-t egyszerre speciális úton kellett az akkumulátorra és a jellevőre kötni, ennek megoldásában szintén segítséget kaptam. Ezután a meghajtás szempontjából nagyon fontos szerepe van a megfelelő propeller kiválasztásának. Megint csak az útmutatóra támaszkodva, a felszálláshoz legalább fele akkora tolóerő szükséges, mint a modell súlya. A két motorhoz 9x6-ös propellert választottam, amely a kalkuláció alapján megfelelő tolóerőt termel, valamint a motor kézikönyvében is ajánlott a motorhoz.

Skywalker 40 A ESC (motor fordulatszám szabályozó) tulajdonsága					
Tömeg (g)	Forgásirány	BEC ² feszültség (V)	BEC áram (A)	Folyamatos áram (A)	Max. csúcs áram (A)
41	Állítható	5	3	40	55

Az energiaellátás egysége:

Az energiaellátás problémája tekinthető a teljes elektronikai rendszer legnehezebb feladatának. Egyszerre kell több kritériumnak megfelelnie. Habár a rendszer legnagyobb tömegű egysége az akkumulátor, célszerű minél nagyobb kapacitásút választani, hogy minél tovább lehessen meghajtani a modellt. A két fizikai tulajdonság egymással ellentétben áll, a kapacitás nem növelhető a tömeg növekedésével. Célszerű ezért olyan akkumulátort választani, amelynek a lehető legmagasabb a kapacitás-tömeg (mAh/g) aránya. Ugyanakkor a motor is meghatározza az akkumulátor fajtáját. Én 3 cellás akkumulátort választottam, ez képes 11,1 V feszültséggel ellátni a motort, amely a teljes 380 W teljesítmény eléréséhez szükséges (2 cellás akkumulátor 7,4 V feszültséget ad csak, amivel a motor teljesítménye jelentősen csökkenne). Emellett figyelemmel voltam a csatlakozók típusára is, ebből a szempontból a leggyakoribb kialakítást választottam. Fentiek alapján a Gens ace Soaring 2700 mAh lítium-polimer akkumulátort választottam.

Gens ace Soaring LiPo akkumulátor tulajdonsága							
Tömeg (g)	Kapacitás (mAh)	Cellák száma	Feszültség (V)	Folyamatos terhelhetőség (C)	Rövid idejű terhelhetőség (C)	Töltő csatlakozó típusa	Külső csatlakozó típusa
195,6	2700	3	11,1	30	100	JST-XHR	XT60

² BEC (Battery Eliminator Circuit) – Automatikus meghajtás leválasztó: Alacsony akkumulátor töltés esetén a meghajtást lekapcsolja annak érdekében, hogy tovább lehessen irányítani (kormányozni) a modellt és le lehessen vele szállni.

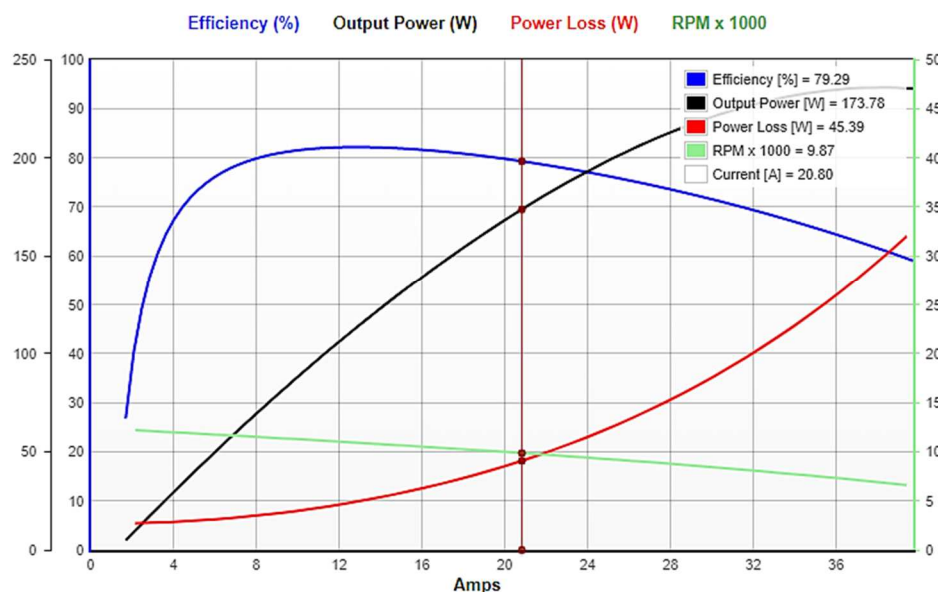
A modell irányító egységei:

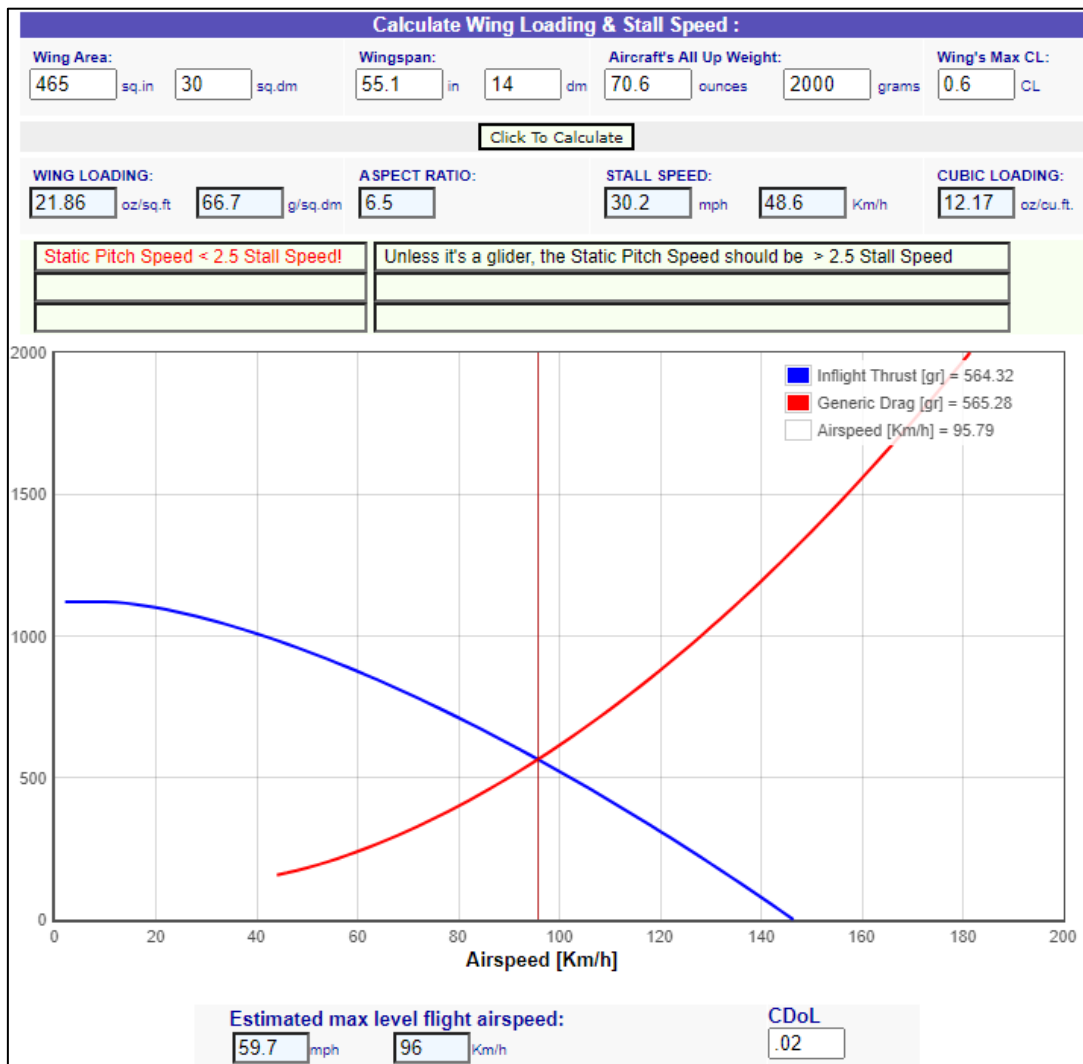
A modell irányításához először két fontos alapkérdést kellett tisztáznom. Az egyik kérdés az irányítási felületek száma, ami meghatározta a jelátvitel (távírányító és jelvevő) csatornáinak szükséges minimális számát. A másik az elvárt hatótávolság, ami a jelátvitel frekvenciáját szabta meg. Irányító felületemből négy darab van, a csűrőlapok, a fékszárny, az oldal és a magassági kormány, illetve irányító felületnek minősül a jelátvitel csatornái tekintetében a motor meghajtás (ESC) is. Ezért a kiválasztáskor 6 csatornás jelátvivő rendszer mellett döntöttem. A csűrőlapátokat oldalanként külön csatornára kötöm, mert elfordulásuk ellentétes és nem azonos mértékű kormányzás közben. Ugyanakkor a motorok ESC-jét egy közös csatornára kötöm, hogy a fordulatszámuk oldalanként biztosan azonos legyen. A hatótávolság szempontjából a 2,4 GHz-en működő egységek tűntek megfelelőnek, a hobbiszerű modellezésben kapható jelátvivők közül ez a legmagasabb. Fentiek alapján esett a választásom a **FlySky FS-i6 távírányítóra** és a vele kompatibilis **FS-IA6B vevőre**, mint jelátvivő rendszerre, amit a Jako Modell egy csomagban forgalmaz. A vevő tömege 14,9 g, a saját mérésem alapján, antennával együtt 15,12 g. A vezérlés elméleti hatótávolsága 300 méter körüli, de a távírányító folyamatos visszajelzést ad a jel romlásáról, így nyomon követhető a biztonságos működtetés távolsága.

A kiválasztott konfigurációt az rcplanes.online weboldalon található kalkulátorral ellenőriztem. A kalkulációban sajnos csak 1 motort és ESC-t lehet beállítani, így nem teljesen pontos, de kiindulásképpen használhatónak találtam. A következő oldalakon látható kalkulált adatok alapján a meghajtási rendszer 15°C-os hőmérsékleten, 200 méter magasan nagyjából 7 percig lenne képes 1 motorral repülni. Az is következtethető az adatokból, hogy 2 motor esetén a rendszer hatékonysága javul. Továbbá az biztosan tudható, hogy ennél nagyobb teljesítményre nem lesz szükségem, hiszen egy motor 1120 g-os vonóerőre képes. Két motorra vonatkoztatva ez azt jelentené, hogy adott energiateljesítmény mellett függőlegesen is fel tudna emelkedni a 2000 g-os modell. Az energiateljesítmény csak emiatt is jelentős mértékben, nagyjából 30 %-al csökkenthető.

BATTERY : - Select an Item from the Dropdown-List or select "Custom" to enter your own data -			
Custom	3	Series	1
Cell Capacity	2700 mAh	Max Current	81 A
Cell Resistance	0.007 ohms	Volt per cell	3.7 V
Cell Weight	2.29 oz	Pack Voltage	11.1 V
	65 g	Pack Weight	6.9 oz
			195 g
Electronic Speed Controller ESC :			
Custom			
ESC Resistance	0.006 ohms	Max Current	55 A
		ESC Weight	1.45 oz
			41 g
MOTOR : (check out our DATABASE to sort by Power and Brand)			
Custom			
Kv	1120 rpm/V	I ₀	1.2 A @ 11 V
R _m	0.068 ohms	Max Current	26 A
K _t	1.207 InOz/A	Max Power	380 W
		Motor Weight	2.65 oz
			75.12 g
PROPELLER :			
APC E 9x6	2	No of Blades	1.0 :1 Gear Ratio
Constants	0.98 Tk	0.75 Pk	
		Diameter	9 in 22.9 cm
		Pitch	6 in 15.2 cm
Enter the Ambient Temperature and Altitude (or the Barometric Pressure) :			
Temperature	59 F	15 C	
Altitude	656 ft	200 m	
Barometric Pressure	29.2 inHg	989 mbar	
MOTOR Results :			
Input Power	219.2 W	Volts to Motor	10.54 V
Output Power	173.8 W	Static Current Draw	20.8 A
Max Output Power	235.7 W	Motor Static RPM	9865 rpm
		Static Efficiency	79.3 %
		Max Efficiency	82.2 %
PROP Results :			
Prop Static RPM	9865 rpm	Static Pitch Speed	56 mph 90 Km/h
Prop Static Tip Speed	0.347 MACH (max rec 0.92)		
		Static Thrust	39.5 oz 1120 g
Approx Full-Throttle duration	7 minutes	Power System Weight +10%	12.1 oz 343 g

Plot Efficiency - Output Power - Power Loss and RPM vs Current based on setup above :





A kalkulált adatokból a repülési tulajdonságra vonatkozóan hozzávetőlegesen arra lehet számítani, hogy a modell 48,6 km/h sebességnél emelkedhet a levegőbe. Én ennél kisebb sebességet várok a fékszárnynak és a szárnyon elhelyezett motoroknak köszönhetően. Az ideális repülési sebesség megtalálása mellett a modell és az elektronikai rendszer hatékonysága jelentősen fokozható. Megállapítom fentiek alapján, hogy a szakdolgozatom 1. és 3. elvárásaként meghatározott célokat a tervezésem teljesíteni tudja.

2. számú melléklet: Kompozit anyagok tesztelése

Habár a kompozit anyagok tesztelése a szakdolgozaton belül is önálló helyet kaphatott volna, azt több okból is csak mellékletben szerepeltetem. Ennek egyik oka, hogy az elvégzett mérések nem az előírt szabványok alapján történtek, ezért a kapott eredményeim nem tekinthetők pontosnak, vagy más adatokkal összehasonlíthatónak. Az elkülönítés másik oka, hogy habár igyekeztem pontosan dokumentálni a tesztek, a kapott adatok és mérések a kompozitok tulajdonságai miatt nem tekinthetők általános eredménynek. A tesztelés valószínűleg más eredményre jutott volna más gyártó által kínált alapanyagokkal, gyakorlottabb tesztelővel, más technológiai környezetben, vagy akár több teszt elvégzésével. Bizonyos teszteléseket a költségek korlátozása miatt csak egyféle konstrukcióban végeztem el, a módosítások egymásra hatását nem vizsgáltam. A kompozit elemek gyártása kapcsán ki szeretném emelni azt is, hogy ezek voltak az első általam előállított elemek, ezért rengeteg tapasztalatot szereztem folyamatosan a tesztelés alatt a gyártás megfelelő kivitelezését illetően. Egyre jobb technikával készítettem a mintadarabokat. Az elkészített darabok kapcsán tett megállapításaimat ezért külön szerepeltetem, mert egy kezdő számára hasznos leírásnak bizonyulhat a fejlődést végigkövetni. Végezetül úgy tekintek a tesztelésre, mint kiegészítő információszerzés, magát a modell tervezését, megépítését és tulajdonságait nem befolyásolta alapvetően. A tesztadarabok semmilyen szempontból sem tekinthetők tökéletesnek, de a megfelelő következtetések levonására alkalmasnak találtam. A végeredményre természetesen hatással vannak a kapott adatok, ezért azokról e mellékletben számolok be.

A tesztelés keretében összesen 12 tesztadarabot gyártottam le.

- 1 darab 1 rétegű,
- 1 darab speciális (megerősített) 1 rétegű,
- 9 darab 2 rétegű és
- 1 darab 3 rétegű kompozitot.

A mintadarabok egyformán 500x300 mm méretű lapos mintaformán készültek, a széleken 20 mm-es „kötési szélességgel”. A formai kialakítás teszteléséhez a mintaformát kézzel alakítottam (véstem) ki a habtáblában.

Annak függvényében, hogy a kompozit anyagok mechanikai tulajdonságait milyen tényezők befolyásolják, a tesztek három csoportra bontva végeztem el:

1. Szövetanyag teszt,
2. Gyanta arány teszt,
3. Formakialakítás tesztelése.

Az első elem 1 rétegű, 163 g/m^2 sűrűségű, sávoly szövésű üvegszálak szövetből készült, elméletileg 1:1 g/g gyantaarányú. Mindegyik általam gyártott kompozitot kézi laminálással készítettem, ami azt jelenti, hogy a mintaformába fektetett szövetrétegre kézzel, ecsettel vittem fel a gyantát. A felvitelt követően 12 órát hagytam kötni a gyantát. A kötési szélesség levágása után, a ténylegesen vizsgált mintadarab 7 %-kal több gyantát tartalmazott, mint terveztem. A következő napon, önellenőrzés keretében rájöttem arra, hogy az eltérést egyrészt rossz számítási mód magyarázza. A szövet tömegével a gyanta mennyiséget párosítottam, majd ehhez adtam hozzá az edzőt is. Helyes számítás szerint a szövet tömegével egyenlő a gyanta és az edző együttes tömege, majd ezt az egymáshoz viszonyított keverési arányban (esetemben 100:35 arányban) kell felosztani. A jövőben odafigyeltem a pontos számításra. Ugyanakkor az aránybeli eltérést az is magyarázta, hogy akármennyire próbáltam egységesen elosztani a gyantát a felületen, az a kézi laminálással nem lehetséges. Létezik gyanta infúziós megoldás, amikor vákuum által szívják be a gyantát a felületre, ez elméletileg teljesen egyenletes eloszlást biztosít, azonban ennek technikai feltételei nem voltak adottak számomra, nem alkalmaztam ezt a gyártási eljárást. Az első mintadarab alapján úgy véltem, hogy az üvegszálak kompozit alkalmatlan a modell alapanyagának, mert egyetlen rétege nagyjából csak annyira lett szilárd, mint egy vastagabb papírlap. Tesztelni sem tudtam, a legkisebb erőhatásra is teljesen elhajlott.

A következő napon, felhasználva az első nap tapasztalatait üvegszövetből, szén-aramid hibrid szövetből és szénszövetből gyártottam 2 rétegű kompozit elemeket. Üvegszövetnek a fenti szövetet használtam és 150 %-os gyantaarányt terveztem kipróbálni. Szén-aramid szövetből 215 g/m^2 -es változatot használtam, amihez 125 %-ban kevertem gyantát. A szén szövet volt a legnagyobb sűrűségű 245 g/m^2 -ével, ezért ehhez 110 %-os gyantaarányt párosítottam súlymegtakarítás céljából. A szén-aramid, illetve a szén szövet esetében használtam először ún. letépőszövetet, vagyis gyantafelszívót,

aminek az az elméleti funkciója, hogy egyrészt vákuumcsomagolás esetén segíti a kompozit leválasztását a vákuumfóliáról, másrészt a gyantafelesleget magába szívja, ezáltal a készterméket megszabadítja anyagtöbblettől, könnyebbé teszi, továbbá a felületet is egységesebbé (gyantában dúsabbá) teszi. A későbbi kompozitok gyártása során elengedhetetlen eszköznek találtam. A gyanta megkötésére ebben az esetben is 12 órát hagytam. A kötési szélességet levágva, az üvegszálak kompozit tényleges gyanta arányát 141 %-nak, a szén-aramidnál 120 %-nak és a szén esetében 111%-nak mértem a súlyadatok alapján. Itt ki kell emelnem szintén egy nagyon fontos tapasztalatot. Az 1-2 rétegű üvegszálak kompozit vágása könnyű volt ollóval, azonban a szén-aramid és a szén elvágása sokkal körülményesebb volt. Az aramid szál jellemzője, hogy nagyon erős és az olló élet gyorsan kicsorbítja. Kézzel fűrészelni, sniccerrel vagy más kézi szerszámmal vágni nem lehetett, az erőhatások a tesztarabokat meghajlították, szerkezetüket roncsolták. Megfelelő vágószerszámnak az oszcillációs multigép bizonyult. Különösen a szénszálak kompozitot vágta jól, az aramidon ez a gép is megakadt alkalmanként. Sarokcsiszoló használatát a két rétegű kompozit nem követelte meg, illetve az esetleges túlzott hőhatást is kerülni szerettem volna. Meg kell még említenem, hogy a kezeletlen szénszálak elemek mozgatását és vágását saját tapasztalat alapján is csak kesztyűben ajánlott végezni, a megkötött szénszálak különösen apró és éles darabokra tudnak törni, ami könnyen felsérti a csupasz bőrfelületet.

A tapasztalatok alapján a következő szén-aramid gyantaarányát csökkentettem, a következő szénszálak darab gyantaarányát növeltem, valamint készítettem egy vegyes szövetű kompozitot is annak vizsgálására, hogyan párosítható össze a két eltérő szövet tulajdonsága. Utóbbi 1 szénszövet réteg és 1 szén-aramid szövet rétegből állt össze 110 %-os gyantaaránnal. Az elkövetkező napokban másik vegyes szövetű kompozitot is készítettem, jelentősen kevesebb gyantával, illetve megfordítva a rétegek sorrendjét. Az egyszerű formák közül utolsóként az 1 rétegű, de erősített szénszál alapú tesztarabot készítettem el. A megerősítés azt jelentette, hogy az 1 rétegben lefektetett szénszövetre 5 cm vastag csíkokat lamináltam a fő terhelés várható irányába, vagyis a tesztarab esetében hosszanti irányban egymástól 10 cm-re, továbbá ezeket a keresztirányú merevség megtartása érdekében átlósan futó csíkokkal is megerősítettem. A konstrukciótól azt vártam, hogy a terhelés irányában erősebb lesz, mintha csak 1 rétegben készült volna, de a 2 rétegű változathoz képest könnyebb lesz. A kézi laminálás miatt

azonban a szövet sokkal több gyantát vett fel, mint amennyit terveztem volna, így nem lett számottevően könnyebb. Az előre tervezett 130 %-os gyantaarány helyett, végül 219 %-os arányt számoltam. Továbbá ugyan-emiatt a megerősítetlen és egymással fedett területre nem mindig jutott megfelelő gyanta, aminek a következményeként a várt szilárdságot sem mutatta. A tesztdarabokkal kapcsolatos gyártási paramétereket a 2. táblázatban foglaltam össze.

Sorszám	Teszt darab	Felhasznált elméleti anyagtömeg (gramm)	Felhasznált gyanta és edző mennyiség (gramm)	Tervezett szövet/gyanta arány
1	Üvegszál 1 réteg	24,8	35	100 %
2	Üvegszál 2 réteg	49,5	101	150 %
3	Szén-aramid 2 réteg "első konstrukció"	64,5	109	125 %
4	Szén 2 réteg "első konstrukció"	60,0	67	110 %
5	Szén-aramid 2 réteg "második konstrukció"	64,5	58	90 %
6	Szén 2 réteg "második konstrukció"	60,0	72	120 %
7	Szén/hibrid 2 réteg "első konstrukció"	62,3	69	110 %
8	Hibrid/szén 2 réteg "második konstrukció"	62,3	50	80 %
9	Szén 1 réteg [erősített]	37,5	53	130 %
10	Szén-aramid 2 réteg (szárnyprofil 1)	56,8	41	70 %
11	Hibrid/szén 2 réteg (szárnyprofil 2)	54,8	72	130 %
12	Szén-aramid 3 réteg "L" borda	112,9	88	80 %

2.táblázat: Tesztdarabok gyártásának összehasonlítása

A tesztelésem kiterjedt a szárnyprofil kialakítású formák hajlításpróbájára is, ehhez 2 tesztdarabot készítettem. Emellett készítettem 1 darab „L” borda alakú kompozitot is 3 hibrid szövetből. A szárnyprofil kialakítással azt kívántam ellenőrizni, hogy a 2 rétegű elemek megfelelően erősek lesznek-e a szárnyforma megépítéséhez. Az „L” bordát a szárnyon keresztülívelő elsődleges merevítőelemként képzeltem el, és azt ellenőriztem a tesztdarabon, hogy 3 réteg megfelelő szilárdságot nyújt-e. Ezeknek az elemeknek a leggyártásához vákuumtechnológiát is használtam. A vákuumtechnológia előnye, hogy a szövetrétegeket egymáshoz préseli, a gyanta a réseket légmentesen kitölti, ezáltal elméletileg sokkal erősebb kötés hozható létre az alkotóelemek között. A vákuumot pór szívóval hoztam létre vákuumszivattyú hiányában. A folyamat kapcsán ki szeretném emelni, hogy a vákuumfóliák összeragasztása légmentesen külön gyakorlatot igényel,

elsőre nagyon sok időbe telik a teljesen légmentes lezárás. Ajánlott az oldalak középpontjának összeragasztásával kezdeni és onnan haladni az oldalak közös csúcspontjáig. Fordított irányú ragasztásnál az oldalak középpontjában találkozó ragasztóanyagok között mindig marad rés, amit plusz ragasztóanyaggal kell kipótolni. Ezt én sokkal nehezebb feladatnak találtam, nehezen tudtam a levegő szivárgását megszüntetni így. A légmentes zárás után a vákuum létrehozása közben javasolt a keletkező redők nagyságát és számát minimalizálni – ideális esetben teljesen megszüntetni a redőzöttséget – ezért ajánlatos ezt a folyamatot kisebb lépésekben, vagy nem egyedül elvégezni. A kész darabokkal kapcsolatos első észrevételeimet és méréseimet a 3. táblázat tartalmazza.

Sorszám	Első vélemény	Kész mintadarab tömege (gramm)	Kész tesztadarab szövetének elméleti tömege (gramm)	Tényleges szövet/gyanta arány	Számolt anyagsűrűség (kg/m ²)
1	Nagyon hajlékony, felhasználásra alkalmatlan	40,8	19,7	107 %	0,341
2	Megfelelő gyantaeloszlás, de továbbra is nagyon hajlékony	95,0	39,5	141 %	0,794
3	Gyantafelszívóval készült, megfelelő gyantaeloszlás látható, de nehéznek tűnik	113,2	51,4	120 %	0,946
4	Gyantafelszívóval készült, foltok láthatók, ahol gyantahiány van , ugyanakkor gyengének tűnik, de túl merev is	101,0	47,8	111 %	0,844
5	Gyantafelszívóval készült, nagy hiányfoltok láthatók a felületen	102,8	51,4	100 %	0,860
6	Gyantafelszívóval készült és minimális gyantahiány figyelhető meg, rugalmasabb, mint a 4. sorszámú első konstrukció	107,4	47,8	124 %	0,898
7	Gyantafelszívóval készült, minimális gyantahiány látható a felületen, nagyon erősnek érződik	108,4	49,6	118 %	0,906
8	Gyantafelszívóval készült, szemmel nem látható hiba a felületen	86,4	49,6	74 %	0,722
9	Gyantafelszívóval készült, kisebb gyantahiány állapítható meg, nagyon merev	98,4	30,8	219 %	0,823
10	Gyantafelszívóval és vákuumtechnológiával készült , általánosan látható a gyantahiány, de nem foltokban jelentkezett, nagyon hajlékony	69,3	40,7	70 %	0,731

Sorszám	Első vélemény	Kész mintadarab tömege (gramm)	Kész tesztadarab szövetének elméleti tömege (gramm)	Tényleges szövet/gyanta arány	Számolt anyagsűrűség (kg/m ²)
11	Gyantafelszívóval és vákuumtechnológiával készült , a profil forma nem befolyásolja az anyag szilárdságát	81	39,3	124 %	0,855
12	Gyantafelszívóval és vákuumtechnológiával készült , a gyantafelszívódás egyenetlen , a bordák pontos formáját nem követte a megszilárdult tesztadarab	154,9	86	-	1,173

3.táblázat: Tesztadarabok gyártásának eredménye

A 3. táblázatban látható, hogy a 3. sorszámú szén-aramid kompozitnak volt a legnagyobb az anyagsűrűsége (946 g/m²), de a legkisebbnek számító 8. tesztadarab anyagsűrűsége is megközelítőleg hasonló nagyságrendű volt (722 g/m²). A legkisebb anyagsűrűségű, 2 szövetrétegű konstrukcióval készítve a 0,3 m²-es szárnyat, saját tömege 433 g lenne. 3 rétegű konstrukcióban a szárny saját tömege hozzávetőlegesen 1 kg lenne. Az eredményt átszámolva a modellemre megállapítottam, hogy 3 rétegű kompozitot nem használhatok fel mindenhol a modell megépítéséhez, csak korlátozott mértékben, a legnagyobb terhelésnek kitett részekben. Illetve még egyszer visszautalva a napelemrendszerre és a csupaszárny kialakítás elvetésére, amelyekkel szemben az is döntő jelentőségű volt, hogy a szakdolgozatomban elején számított 0,47 m²-es hasznos felület 3 rétegű kialakítása – ami feltétlenül szükséges lett volna a nagyobb tömeg, motorteljesítmény és a napelemrendszer megtartásához – minimálisan 1,5 kg tömeg, plusz a vezérlés tömege mellett lett volna megoldható, ha egyáltalán megoldható lett volna úgy a feladat. Feltételezhetően nem tudtam volna a modellt 2 kg tömeg alatt elkészíteni.

A tesztadarabokon két módon végeztem el a hajlítóvizsgálatot. Először a tesztadarabokat csak az egyik rövidebb oldaluk mentén rögzítettem és úgy terheltem azonos tömeggel, fokozatosan kisebb távolságokra a rögzítéstől. A második teszt alkalmával a tesztadarabokat mindkét rövidebb oldaluknál alátámasztottam és a középre helyezett tömeget növeltem fokozatosan. A tesztek során megmértem külön az egyik irányba történő lehajlást és átfordítást követően a másik irányú lehajlást is. Ezzel a technikával a tesztadarabok szimmetrikus viselkedését vizsgáltam. A szárnyprofil és „L” borda kialakítású elemeken hajlítási tesztet nem végeztem el, mert azok látszólag a sima

formákkal megegyező módon hajlottak. Pontos mérésükhöz azonban nem rendelkezem megfelelő eszközökkel. Azzal a feltételezéssel éltem, hogy azok közel hasonlóan viselkednek a lapos alakzatokhoz képest. A szárnyprofil kialakítású tesztadarabok hajlékonysága miatt úgy döntöttem, hogy a szárnyat keresztbordákból fogom kialakítani és azt fedem be 2 rétegű kompozittal, illetve a szárnyszerkezetet a keresztbordákon átvezetett kompozit csővel stabilizálom. A kereskedelmi forgalomban megvásárolható kompozit cső használata mellett azért döntöttem, mert az „L” bordával végzett kísérletem – és tulajdonképpen az általam készített összes tesztadarab pontatlansága – rámutatott arra, hogy gyártási technológiámmal nem tudok két teljesen egyforma darabot készíteni. Ez pedig a szárnyak rögzítése és megtartása területén különösen fontos szempont. A két szárnynak a két oldalon azonos formájúnak és azonos szilárdságúnak kell lennie ahhoz, hogy az eltérés ne indukáljon forgatónyomatékokat a repülőmodell súlypontjára. A 4. táblázatban a tesztadarabokon elvégzett hajlítási tesztek eredményét foglaltam össze, ahol késsel szerepeltetem a legjobb és pirossal szerepeltetem a legrosszabb, vagy kritikusan rossz eredményeket. Az összesített táblázatból leolvasható, hogy - az üveg szövetet leszámítva - a szövet anyagának és a gyanta arányának csekély jelentősége volt a kompozitok hajlására, inkább általános következtetéseket lehetett levonni a tesztelésből. Ilyen módon megállapítottam, hogy az aramid szövetből rugalmasabb kompozit készíthető, mint szénszálas szövetből.

A szálirány és rétegszám különböző változatainak összehasonlítására azért nem került külön sor a tesztelés során, mert a modell megépítése kapcsán számottevő változtatásra nem mutatkozott lehetőség. Az 1 rétegű üvegszálas szövetből gyártott kompozit tesztadarab nem mutatkozott sokkal szilárdabbnak egy papírlapnál. Az 1 rétegű, megerősített szénszálas kompozit pedig kézi laminálás mellett rendkívül nehézkes és pontatlannak minősült. A 3 rétegű kompozitok tesztelését azért nem folytattam, mert az „L” borda alapján megfelelően erősnek bizonyult ahhoz, hogy keresztbordákkal együtt használva bármilyen összeállításban ellenálljon a repülőre ható igénybevételeknek. A tömeg csökkentése érdekében viszont kizárólag korlátozott mennyiségben használható.

Sorszám	Egy szélű megfogással, 25 g súllyal végzett hajlítóvizsgálat (mm)				Két szélső megtámasztással végzett hajlítóvizsgálat (mm)					Értékelés
	Terheletlen lehajlás	Lehajlás a megfogástól 40mm-re helyezett súlynál	Lehajlás a megfogástól 30mm-re helyezett súlynál	Lehajlás a megfogástól 20mm-re helyezett súlynál	Terheletlen lehajlás	Lehajlás középre helyezett 25 g súlynál	Lehajlás középre helyezett 50 g súlynál	Lehajlás középre helyezett 100 g súlynál	Deformációs teszt utáni lehajlás*	
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Magától elhajlik, nem mérhető lehajlás
2	-	-	-	-	27	38,5	57	-	-	Magától elhajlik, nem tartós
3	62	115	89	78	5	7,75	10	13,75	3,5 / 1	Papíron a legerősebb, de látszólag aszimmetrikusan deformálódott (adatokban nem mérhető)
4	74	135	115	100	2,5	5,5	7	13	5 / 2	Merev, de törésre hajlamosnak mutatkozik
5	79	121	107	82	3	6	7,5	12,5	3,625	Látszólag sokkal hajlékonyabb, mint a 3. sorszámú "első konstrukció", a mért eredmények ezt támasztják alá
6	80	130	115	100	5,25	8,5	10,5	11,25	5	Nincs vizuális eltérés a 4. sorszámú "első konstrukció"-hoz képest, a mért adatok minimális gyengülést mutatnak
7	79 / 98	120 / 141	108 / 126	93 / 113	0,5 / 5	3,25 / 7,5	5,25 / 9,5	10,5 / 14,5	1,75 / 5,75	Csekély aszimmetria mérhető a két oldal között
8	65 / 80	120 / 132	100 / 113	80 / 98	1 / 8	3,75 / 12	5,75 / 13,5	12,25 / 20,25	1 / 11	Nincs vizuális eltérés a 7. "első konstrukció"-hoz képest, de jelentős aszimmetria és deformálódás mérhető
9	48 / 101	110 / 147	90 / 132	74 / 120	2 / 4,5	5,25 / 7,5	7,25 / 10	12,5 / 15,75	3/5	Az erősített konstrukció az egyik irányba a legerősebb, másik irányba a leggyengébb, nem deformálódott
10										A szárnyprofil kialakítás nem javította számottevően a szilárdságot, könnyen elhajlott terhelés hatására
11										A rétegek sorrendje a szilárdságot és a gyanta felvételét nem befolyásolta vizsgálható módon, terhelés hatására elhajlott
12										A hozzáadott réteg nem növelte az anyag szilárdságát észlelhető módon

4.táblázat: A tesztdarabok hajlítóvizsgálatának eredménye

Ahol a táblázatban az értékeket „/” jel választja el, ott a kompozit elem mérhetően aszimmetrikus lehajlást produkált és a két oldalon mért különböző értékek kerültek feltüntetésre az elválasztás két oldalán.

* A deformációs tesztet 40 mm-es kétoldali alátámasztás mellett végeztem úgy, hogy 400 g súlyt középre helyeztem 2 percig. A súly levételét követően mértem meg a maradandó lehajlást.

3. számú melléklet: Szárnyformák kiválasztásának módszere

Ebben a mellékletben elsősorban az airfoiltools.com weboldal hasznosságát mutatom be a modell szárnyának és kormányfelületeinek megtervezése kapcsán. Maga az airfoiltools.com weboldal rengeteg szárnyprofilot tartalmaz. A Profil kereső menüpontban a következő feltételekkel választható ki a szárnyprofil.

Airfoil database search

Search the 1636 airfoils available in the databases filtering by name, thickness and camber. Click on an airfoil image to display a larger preview picture. There are links to the original airfoil source and dat file and the details page with polar diagrams for a range of Reynolds numbers.

Text search		Optional
Maximum thickness(%)		Optional
Minimum thickness(%)		Optional
Maximum camber(%)		Optional. Symmetrical airfoils = 0
Minimum camber(%)		Optional
Group	All ▼	
Sort	Key (a to z) ▼	
Search		

A keresőben megadható:

- Az első sorban (Text search) a szárnyprofil neve.
- A második és harmadik sorban a szárny maximális és minimális vastagságának hosszúságához viszonyított százaléka.
- A negyedik és ötödik sorban a profil íveltsége, ismét a hosszúságához viszonyított százalékaiban. Nulla értéknél két oldalán szimmetrikus profilok között lehet válogatni, és minél nagyobb ez az arányszám, annál íveltebb lesz a profil.
- A hatodik sorban a szárnytípusok csoportjai közül lehet választani.
- A hetedik sorban a kereső rangsor elvét, hogy az eredményeket milyen szempont szerint rangsorolja. Lenyitva a képen látható beállítási lehetőségek vannak. Javasolt a keresést ennek beállításával kezdeni, itt ugyanis kiválasztható az is, hogy a profilok közül egy meghatározott Reynolds-szám esetén a legideálisabb légellenállási/felhajtóerő együtthatóval rendelkező kerüljön a lista tetejére.

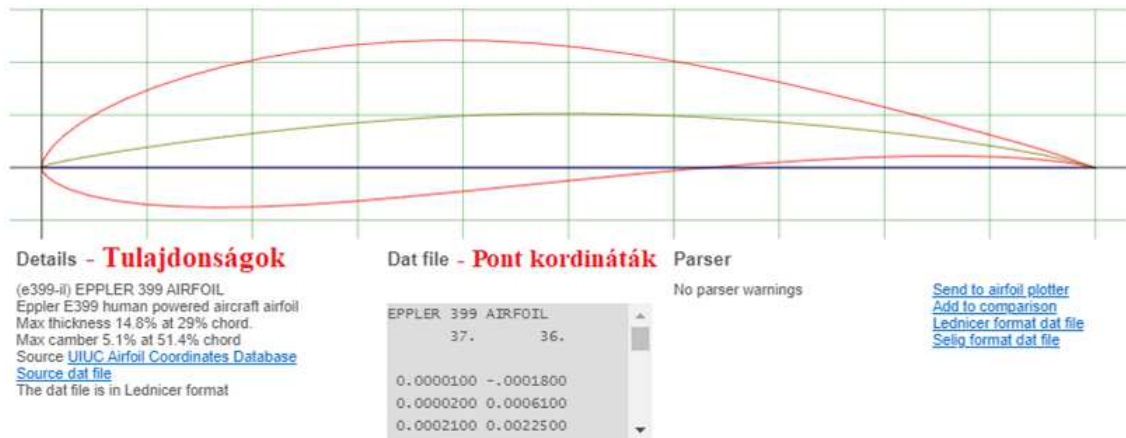
Key (a to z) ▼
Key (a to z)
Key (z to a)
Name (a to z)
Name (z to a)
Thickness (thin to thick)
Thickness (thick to thin)
Camber (small to large)
Camber (large to small)
Max Cl/Cd @ RE=50,000
Max Cl/Cd @ RE=100,000
Max Cl/Cd @ RE=200,000
Max Cl/Cd @ RE=500,000
Max Cl/Cd @ RE=1,000,000
Max Cl/Cd @ RE=2,000,000
Max Cl/Cd @ RE=5,000,000

A keresés gombra kattintva a weboldal feldobja a feltételeknek megfelelő szárnyprofilok képét és a legfontosabb adatokat, köztük a profil maximális vastagságát (és helyét), az íveltségét és ha kiválasztjuk a megfelelő Reynolds számot, akkor a felhajtóerő/légellenállási együttható maximális értékét is. A kiválasztott profilra kattintva a főoldalára navigál az oldal, ahol lementhetjük a számítógépes tervezéshez szükséges koordináta pontok adatait (dat file), válogathatunk a hasonló profilok között, vagy böngészhetünk a profil részletes adatai között.

Az adatlap megjelenését a következő ábrán szemléltetem (már beállított Reynolds-számokkal) az általam választott Eppler E399-es szárny esetében:

EPPLER 399 AIRFOIL (e399-il) - Profil elnevezése

EPPLER 399 AIRFOIL - Eppler E399 human powered aircraft airfoil



Similar airfoils - Hasonló profilok listája

GOE 567 AIRFOIL	Preview	Details
GOE 612 AIRFOIL	Preview	Details
GOE 621 AIRFOIL	Preview	Details
EPPLER 398 AIRFOIL	Preview	Details
Omithopter airfoil	Preview	Details
EPPLER 562 AIRFOIL	Preview	Details
GOE 498 AIRFOIL	Preview	Details
GOE 654 AIRFOIL	Preview	Details
GOE 387 AIRFOIL	Preview	Details
GOE 476 AIRFOIL	Preview	Details

Polars for EPPLER 399 AIRFOIL (e399-il) - Profil részletes adatai (grafikon választó)

Plot	Airfoil	Reynolds #	Ncrit	Max Cl/Cd	Description	Source
☐	e399-il	50,000	9	6.3 at $\alpha=8.5^\circ$	Mach=0 Ncrit=9	Xfoil prediction Details
☐	e399-il	50,000	5	16.9 at $\alpha=5.5^\circ$	Mach=0 Ncrit=5	Xfoil prediction Details
☐	e399-il	100,000	9	46.6 at $\alpha=10.75^\circ$	Mach=0 Ncrit=9	Xfoil prediction Details
☒	e399-il	100,000	5	54 at $\alpha=7.5^\circ$	Mach=0 Ncrit=5	Xfoil prediction Details
☐	e399-il	200,000	9	83.6 at $\alpha=8.5^\circ$	Mach=0 Ncrit=9	Xfoil prediction Details
☒	e399-il	200,000	5	85.6 at $\alpha=7^\circ$	Mach=0 Ncrit=5	Xfoil prediction Details
☐	e399-il	500,000	9	127.7 at $\alpha=6.75^\circ$	Mach=0 Ncrit=9	Xfoil prediction Details
☒	e399-il	500,000	5	123.3 at $\alpha=6^\circ$	Mach=0 Ncrit=5	Xfoil prediction Details
☐	e399-il	1,000,000	9	161.5 at $\alpha=5.75^\circ$	Mach=0 Ncrit=9	Xfoil prediction Details
☐	e399-il	1,000,000	5	142.4 at $\alpha=5.25^\circ$	Mach=0 Ncrit=5	Xfoil prediction Details

[Update plots](#)
[Reynolds number calculator](#)

Set Reynolds number and Ncrit range

Reynolds Number

Ncrit

Low

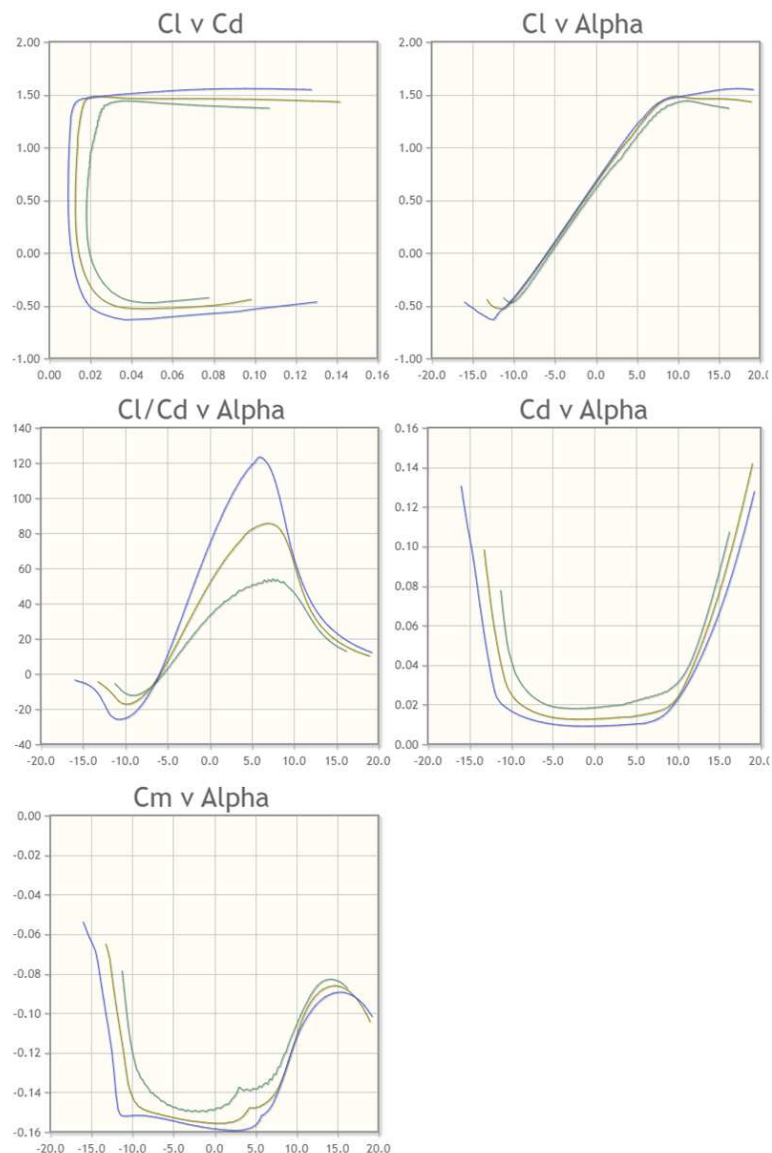
High

100,000

500,000

4

7



Számomra a Profil részletes teljesítmény adatainak (különösen az ábrán látható táblázat pirossal bekeretezett oszlopai) és grafikonjainak vizsgálata volt az elsődleges szempont. A Reynolds # sorban rendezhető a szóba jövő Reynolds számoknak megfelelő grafikon, így a nem releváns grafikonok eltüntethetők. Fontos kiemelni, hogy az oldalon szereplő adatok nem valós mérések eredményei, hanem számítógéppel kalkulált értékek. A kalkuláció lefuttatásához a rendszerbe be kell építeni többek között egy kritikus Reynolds számot is ($NCrit$), amely meghatározza, hogy a közeg milyen Reynolds számnál válik turbulenssé. Az oldalon kiválasztható 1-12 tartó $NCrit$ skála azt jelenti, hogy az e (Euler számot) hányadik hatványára emelik. Mint ismeretes, klasszikusan $Re=1000$ értéknél szokás meghatározni az átmeneti tartományt a lamináris és a turbulens áramlás között, ami a fenti módszer alapján $NCrit=7$ értéknek felel meg. Ugyanakkor a kritikus Reynolds szám több körülménytől is függ, például a felület kialakításától is, így már az 1920-as években is sikerült lamináris áramlást elérni $Re=10000$ értéknél, ami az $NCrit=9$ értéknek feleltethető meg. Ez az érték tehát a gyártó „ügyességétől” is függ, de fontos figyelembe venni a profil tervezése során. Ha a szárnyprofil egyenletlen lesz, inkább az $NCrit=5$ értékhez áll közelebb, mint a $NCrit=9$ értékhez. A fenti ábra táblázatának következő oszlopában a maximális c_L/c_D arány olvasható ki. A c_L a felhajtóerő együttható jelölésére, a c_D pedig a légellenállás együttható jelölésére szolgál. Az arányszám a profil hatékonyságát adja meg, és nem a tényleges értékeket. Az ábrán pirossal keretezett maximális arány a sorhoz tartozó Reynolds számnál, $NCrit$ értéknél, és a megjelölt beesési szögnél valósul meg. Különösen fontos figyelembe venni, hogy a megadott c_L/c_D arányt a profil a megadott beesési szögnél éri el, tehát ennél jobban nem érdemes megdönteni, de kisebb szög esetén is veszít hatékonyságából.

4. számú melléklet: Szimulációs adatok

A következő táblázatokban a különböző szárnyprofilok eltérő állásszögnél szimulált adatait lehet látni a c_L/c_D arány szerint csökkenő sorrendben. Sárgával kiemelttem az általam választott profilt, konfigurációját, valamint szimulált és számított aerodinamikai adatait. Pirossal jelöltem azokat az értékeket, amiket kedvezőtlennek tekintettem a modell tervezése szempontjából.

NÉV	Vastagság	Vastagság helye	Belső vastagság	Külső vastagság	Tényleges felhajtóerő	Állásszög	Légellenállás	Turbulencia intenzitás	Max állásszög	c_L/c_D	Ideális állásszög	Íveltség	Íveltség helye	Teoretikus c_L	Teoretikus c_D	Teoretikus c_L/c_D
WE3.55-9.3	9,3%	30,4%	20,46	16,28	8,88	4°	0,98	0,140		9,045						n/a
Selig S4022	11,3%	34,1%	24,86	19,78	9,99	4°	1,16	0,146	6,5°	8,642	3,5°	4,3%	57,8%	1,15	0,011	105
Quabeck HQ 3.0/14	14,0%	35,0%	30,8	24,50	7,86	4°	0,94	0,134	13°	8,388	4,25°	3,0%	50,0%	0,8	0,011	73
EPPLER E434	13,3%	38,6%	29,26	23,28	8,35	4,5°	1,01	0,130	7,5°	8,261	5,25°	4,3%	38,6%	0,95	0,009	106
Quabeck HQ 3.0/14	14,0%	35,0%	30,8	24,50	8,32	4,5°	1,01	0,135	13°	8,222	4,25°	3,0%	50,0%	0,85	0,012	71
Quabeck HQ 3.0/14	14,0%	35,0%	30,8	24,50	7,15	3,5°	0,87	0,127	13°	8,215	4,25°	3,0%	50,0%	0,72	0,01	72
EPPLER E434	13,3%	38,6%	29,26	23,28	7,80	4°	0,96	0,126	7,5°	8,156	5,25°	4,3%	38,6%	0,9	0,009	100
EPPLER E434	13,3%	38,6%	29,26	23,28	8,83	5°	1,09	0,127	7,5°	8,097	5,25°	4,3%	38,6%	1	0,01	100
EPPLER E585	14,6%	37,6%	32,12	25,55	8,76	4,5°	1,08	0,129	9°	8,088	5,25°	4,2%	42,8%	1,05	0,011	95
EPPLER E585	14,6%	37,6%	32,12	25,55	9,38	5°	1,16	0,132	9°	8,068	5,25°	4,2%	42,8%	1,1	0,011	100
EPPLER E585	14,6%	37,6%	32,12	25,55	8,38	4°	1,04	0,128	9°	8,046	5,25°	4,2%	42,8%	1	0,01	100
Quabeck HQ 3.0/15	15,0%	35,0%	33	26,25	8,50	5°	1,06	0,132	13°	7,986	4,25°	3,0%	50,0%	0,9	0,013	69
EPPLER E399	14,8%	29,0%	32,56	25,90	11,36	5°	1,42	0,145	7,5°	7,974	6°	5,1%	51,4%	1,24	0,012	103
WORTMANN FX 62-K-131	13,1%	40,2%	28,82	22,93	7,82	4°	0,98	0,139	5°	7,964	3,5°	3,9%	53,3%	1,15	0,012	96
EPPLER E398	14,2%	29,6%	31,24	24,85	11,99	5°	1,51	0,148	7,5°	7,959	5,75°	5,3%	50,9%	1,25	0,011	114
EPPLER E431	15,1%	37,4%	33,22	26,43	8,60	4,5°	1,08	0,133	7°	7,954	5°	4,2%	42,6%	1,07	0,011	97
EPPLER E432	16,0%	37,4%	35,2	28,00	9,77	5°	1,23	0,132	10°	7,932	6,75°	4,5%	37,4%	1,09	0,013	84
EPPLER E434	13,3%	38,6%	29,26	23,28	9,48	5,5°	1,20	0,130	7,5°	7,890	5,25°	4,3%	38,6%	1,08	0,011	98
EPPLER E585	14,6%	37,6%	32,12	25,55	10,02	5,5°	1,27	0,133	9°	7,886	5,25°	4,2%	42,8%	1,15	0,012	96
EPPLER E434	13,3%	38,6%	29,26	23,28	9,79	6°	1,25	0,137	7,5°	7,863	5,25°	4,3%	38,6%	1,09	0,012	91
EPPLER E431	15,1%	37,4%	33,22	26,43	9,27	5°	1,18	0,136	7°	7,851	5°	4,2%	42,6%	1,1	0,011	100
EPPLER E433	14,2%	42,6%	31,24	24,85	7,98	4,5°	1,02	0,138	14°	7,851	4°	3,9%	42,6%	1,05	0,011	95
NASA/LANGLEY NLF(1)-0215F	15,0%	37,7%	33	26,25	8,82	4,5°	1,12	0,152	6°	7,849	5,75°	4,0%	42,3%	1,1	0,012	92
EPPLER E398	14,2%	29,6%	31,24	24,85	11,02	4,5°	1,40	0,148	7,5°	7,848	5,75°	5,3%	50,9%	1,2	0,011	109
EPPLER E431	15,1%	37,4%	33,22	26,43	8,21	4°	1,05	0,134	7°	7,842	5°	4,2%	42,6%	1	0,01	100
EPPLER E432	16,0%	37,4%	35,2	28,00	9,31	4,5°	1,19	0,134	10°	7,832	6,75°	4,5%	37,4%	1,03	0,012	86
EPPLER E433	14,2%	42,6%	31,24	24,85	8,59	5°	1,10	0,134	14°	7,808	4°	3,9%	42,6%	1,07	0,012	89
EPPLER E432	16,0%	37,4%	35,2	28,00	10,17	5,5°	1,30	0,132	10°	7,801	6,75°	4,5%	37,4%	1,14	0,013	88
EPPLER E399	14,8%	29,0%	32,56	25,90	10,38	4,5°	1,33	0,147	7,5°	7,794	6°	5,1%	51,4%	1,2	0,012	100
EPPLER E582	14,7%	37,8%	32,34	25,73	8,16	4,5°	1,05	0,135	12°	7,789	5,25°	4,2%	43,1%	1,04	0,01	104

NÉV	Vastagság	Vastagság helye	Belső vastagság	Külső vastagság	Tényleges felhajtóerő	Állásszög	Légellenállás	Turbulencia intenzitás	Max állásszög	cl/cd	Ideális állásszög	Íveltség	Íveltség helye	Teoretikus cl	Teoretikus cd	Teoretikus cl/cd
EPPLER E399	14,8%	29,0%	32,56	25,90	11,94	5,5°	1,54	0,150	7,5°	7,772	6°	5,1%	51,4%	1,26	0,012	105
NASA/LANGLEY NLF(1)-0215F	15,0%	37,7%	33	26,25	8,41	4°	1,08	0,153	6°	7,770	5,75°	4,0%	42,3%	1,02	0,011	93
EPPLER E582	14,7%	37,8%	32,34	25,73	8,94	5°	1,15	0,137	12°	7,760	5,25°	4,2%	43,1%	1,09	0,011	99
Quabeck HQ 3.0/15	15,0%	35,0%	33	26,25	7,64	4,5°	0,99	0,127	13°	7,747	4,25°	3,0%	50,0%	0,8	0,012	67
EPPLER E398	14,2%	29,6%	31,24	24,85	12,59	5,5°	1,63	0,147	7,5°	7,737	5,75°	5,3%	50,9%	1,3	0,012	108
EPPLER E431	15,1%	37,4%	33,22	26,43	9,78	5,5°	1,27	0,135	7°	7,723	5°	4,2%	42,6%	1,14	0,012	95
EPPLER E582	14,7%	37,8%	32,34	25,73	10,12	6°	1,31	0,139	12°	7,722	5,25°	4,2%	43,1%	1,13	0,012	94
EPPLER E582	14,7%	37,8%	32,34	25,73	7,81	4°	1,01	0,135	12°	7,721	5,25°	4,2%	43,1%	1	0,01	100
Quabeck HQ 3.0/15	15,0%	35,0%	33	26,25	7,10	4°	0,92	0,131	13°	7,701	4,25°	3,0%	50,0%	0,75	0,012	63
NASA/LANGLEY NLF(1)-0215F	15,0%	37,7%	33	26,25	9,21	5°	1,20	0,149	6°	7,683	5,75°	4,0%	42,3%	1,17	0,012	98
EPPLER E582	14,7%	37,8%	32,34	25,73	9,68	5,5°	1,26	0,136	12°	7,660	5,25°	4,2%	43,1%	1,11	0,012	93
EPPLER E431	15,1%	37,4%	33,22	26,43	10,22	6°	1,34	0,141	7°	7,642	5°	4,2%	42,6%	1,18	0,013	91
EPPLER E585	14,6%	37,6%	32,12	25,55	11,14	6,5°	1,46	0,135	9°	7,622	5,25°	4,2%	42,8%	1,19	0,013	92
NASA/LANGLEY NLF(1)-0215F	15,0%	37,7%	33	26,25	7,75	3,5°	1,02	0,161	6°	7,616	5,75°	4,0%	42,3%	0,97	0,011	88
EPPLER E398	14,2%	29,6%	31,24	24,85	13,51	6°	1,78	0,148	7,5°	7,594	5,75°	5,3%	50,9%	1,3	0,012	108
EPPLER E433	14,2%	42,6%	31,24	24,85	7,38	4°	0,97	0,139	14°	7,572	4°	3,9%	42,6%	1	0,011	91
EPPLER E399	14,8%	29,0%	32,56	25,90	12,93	6°	1,71	0,148	7,5°	7,559	6°	5,1%	51,4%	1,31	0,013	101
Woody Blanchard WB135/35	13,6%	25,0%	29,92	23,80	8,47	5°	1,13	0,125	9°	7,505	5°	3,8%	50,0%	0,9	0,012	75
EPPLER E432	16,0%	37,4%	35,2	28,00	10,86	6°	1,45	0,133	10°	7,494	6,75°	4,5%	37,4%	1,19	0,013	92
Quabeck HQ 3.0/14	14,0%	35,0%	30,8	24,50	8,54	5°	1,14	0,134	13°	7,491	4,25°	3,0%	50,0%	0,9	0,014	64
NASA/LANGLEY NLF(1)-0215F	15,0%	37,7%	33	26,25	11,00	6,5°	1,47	0,150	6°	7,473	5,75°	4,0%	42,3%	1,27	0,013	98
EPPLER E435	16,2%	40,9%	35,64	28,35	8,92	4,5°	1,19	0,151	11°	7,468	4,75°	4,4%	56,2%	1,16	0,011	105
NASA/LANGLEY NLF(1)-0215F	15,0%	37,7%	33	26,25	9,86	5,5°	1,32	0,151	6°	7,468	5,75°	4,0%	42,3%	1,22	0,012	102
Quabeck HQ 3.0/14	14,0%	35,0%	30,8	24,50	9,19	5,5°	1,23	0,140	13°	7,447	4,25°	3,0%	50,0%	0,97	0,015	65
EPPLER E582	14,7%	37,8%	32,34	25,73	10,97	6,5°	1,47	0,137	12°	7,440	5,25°	4,2%	43,1%	1,17	0,013	90
EPPLER E435	16,2%	40,9%	35,64	28,35	9,74	5°	1,31	0,147	11°	7,430	4,75°	4,4%	56,2%	1,19	0,012	99
EPPLER E435	16,2%	40,9%	35,64	28,35	11,07	6°	1,50	0,141	11°	7,377	4,75°	4,4%	56,2%	1,24	0,013	95
EPPLER E432	16,0%	37,4%	35,2	28,00	11,73	7°	1,59	0,142	10°	7,374	6,75°	4,5%	37,4%	1,22	0,014	87
EPPLER E435	16,2%	40,9%	35,64	28,35	10,20	5,5°	1,39	0,151	11°	7,329	4,75°	4,4%	56,2%	1,22	0,013	94
EPPLER E435	16,2%	40,9%	35,64	28,35	12,04	6,5°	1,64	0,145	11°	7,325	4,75°	4,4%	56,2%	1,26	0,013	97
WORTMANN FX 79-K-144/17	14,4%	43,5%	31,68	25,20	8,30	6,5°	1,13	0,141	14°	7,312	4,5°	2,8%	40,2%			n/a
Quabeck HQ 3.5/14	14,0%	35,0%	30,8	24,50	9,86	5,5°	1,36	0,149	12,5°	7,272	4,25°	3,5%	50,0%	1,05	0,013	81
EPPLER E435	16,2%	40,9%	35,64	28,35	8,28	4°	1,14	0,154	11°	7,256	4,75°	4,4%	56,2%	1,12	0,011	102
WORTMANN FX 79-K-144/17	14,4%	43,5%	31,68	25,20	7,68	6°	1,06	0,131	14°	7,252	4,5°	2,8%	40,2%			n/a
Woody Blanchard WB135/35	13,6%	25,0%	29,92	23,80	8,90	5,5°	1,23	0,132	9°	7,245	5°	3,8%	50,0%	1	0,013	77
Woody Blanchard WB135/35	13,6%	25,0%	29,92	23,80	9,54	6°	1,32	0,130	9°	7,241	5°	3,8%	50,0%	1,1	0,014	79
Quabeck HQ 3.0/15	15,0%	35,0%	33	26,25	8,85	5,5°	1,22	0,140	13°	7,236	4,25°	3,0%	50,0%	1	0,013	77
EPPLER E407	14,4%	36,6%	31,68	25,20	8,08	5,5°	1,12	0,145	10°	7,236	2,75°	3,5%	71,7%			n/a
NASA/Langley/Somers-Maughmer NLF(1)-10	15,0%	39,8%	33	26,25	8,71	5°	1,21	0,145	5°	7,220	5°	4,3%	62,8%	1,24	0,01	124
EPPLER E668	13,9%	37,3%	30,58	24,33	7,83	5°	1,09	0,145	14°	7,194	3,75°	4,0%	47,8%	1,05	0,012	88
EPPLER E407	14,4%	36,6%	31,68	25,20	7,20	5°	1,00	0,149	10°	7,194	2,75°	3,5%	71,7%			n/a
EPPLER E407	14,4%	36,6%	31,68	25,20	8,64	6°	1,20	0,145	10°	7,193	2,75°	3,5%	71,7%			n/a
EPPLER E407	14,4%	36,6%	31,68	25,20	9,21	6,5°	1,28	0,145	10°	7,189	2,75°	3,5%	71,7%			n/a
Quabeck HQ 3.5/14	14,0%	35,0%	30,8	24,50	8,09	4,5°	1,13	0,136	12,5°	7,187	4,25°	3,5%	50,0%	0,92	0,012	77
Woody Blanchard WB135/35	13,6%	25,0%	29,92	23,80	7,54	4,5°	1,05	0,141	9°	7,174	5°	3,8%	50,0%	0,84	0,011	76

NÉV	Vastagság	Vastagság helye	Belső vastagság	Külső vastagság	Tényleges felhajtóerő	Állásszög	Légellenállás	Turbulencia intenzitás	Max állásszög	cl/cd	Ideális állásszög	Íveltség	Íveltség helye	Teoretikus cl	Teoretikus cd	Teoretikus cl/cd
Althaus AH 93-W-145	14,5%	33,9%	31,9	25,38	10,37	7°	1,45	0,141	8°	7,165	7,25°	3,9%	37,1%	1,23	0,012	103
NASA/Langley/Somers-Maughmer NLF(1)-10	15,0%	39,8%	33	26,25	7,90	4,5°	1,11	0,149	5°	7,133	5°	4,3%	62,8%	1,2	0,01	120
EPPLER E435	16,2%	40,9%	35,64	28,35	12,55	7°	1,76	0,144	11°	7,110	4,75°	4,4%	56,2%	1,28	0,014	91
WORTMANN FX 62-K-153/20	15,3%	40,2%	33,66	26,78	9,65	6°	1,36	0,163	6,5°	7,067	4°	4,1%	62,9%	1,3	0,015	87
EPPLER E748	19,7%	27,4%	43,34	34,48	10,99	6°	1,56	0,167	12°	7,065	7,75°	4,6%	54,9%	1,28	0,016	80
EPPLER E407	14,4%	36,6%	31,68	25,20	6,23	4°	0,88	0,146	10°	7,058	2,75°	3,5%	71,7%			n/a
WORTMANN FX 79-K-144/17	14,4%	43,5%	31,68	25,20	9,69	8°	1,37	0,140	14°	7,052	4,5°	2,8%	40,2%			n/a
EPPLER E668	13,9%	37,3%	30,58	24,33	9,22	6°	1,31	0,144	14°	7,052	3,75°	4,0%	47,8%	1,09	0,013	84
WORTMANN FX 62-K-153/20	15,3%	40,2%	33,66	26,78	11,20	7°	1,59	0,162	6,5°	7,050	4°	4,1%	62,9%	1,3	0,018	72
NASA/Langley/Somers-Maughmer NLF(1)-10	15,0%	39,8%	33	26,25	9,56	5,5°	1,36	0,154	5°	7,045	5°	4,3%	62,8%	1,25	0,011	114
Woody Blanchard WB135/35	13,6%	25,0%	29,92	23,80	6,90	4°	0,98	0,148	9°	7,038	5°	3,8%	50,0%	0,8	0,011	73
EPPLER E668	13,9%	37,3%	30,58	24,33	8,52	5,5°	1,21	0,142	14°	7,029	3,75°	4,0%	47,8%	1,07	0,013	82
Althaus AH 93-W-145	14,5%	33,9%	31,9	25,38	8,50	5,5°	1,22	0,152	8°	6,993	7,25°	3,9%	37,1%	1,02	0,011	93
EPPLER E407	14,4%	36,6%	31,68	25,20	5,36	3°	0,77	0,147	10°	6,975	2,75°	3,5%	71,7%			n/a
EPPLER E678	15,1%	39,8%	33,22	26,43	10,35	5,5°	1,48	0,154	7°	6,973	5,5°	5,1%	53,7%			n/a
EPPLER E668	13,9%	37,3%	30,58	24,33	6,73	4°	0,97	0,151	14°	6,962	3,75°	4,0%	47,8%	0,99	0,01	99
WORTMANN FX 79-K-144/17	14,4%	43,5%	31,68	25,20	8,67	7°	1,25	0,138	14°	6,948	4,5°	2,8%	40,2%			n/a
Quabeck HQ 3.5/14	14,0%	35,0%	30,8	24,50	8,87	5°	1,28	0,143	12,5°	6,930	4,25°	3,5%	50,0%	0,98	0,013	75
EPPLER E678	15,1%	39,8%	33,22	26,43	8,91	4,5°	1,29	0,151	7°	6,918	5,5°	5,1%	53,7%			n/a
EPPLER E678	15,1%	39,8%	33,22	26,43	8,03	3,5°	1,16	0,145	7°	6,908	5,5°	5,1%	53,7%			n/a
Althaus AH 93-W-145	14,5%	33,9%	31,9	25,38	8,92	6°	1,29	0,162	8°	6,900	7,25°	3,9%	37,1%	1,1	0,011	100
WORTMANN FX 79-K-144/17	14,4%	43,5%	31,68	25,20	6,50	5°	0,94	0,142	14°	6,898	4,5°	2,8%	40,2%			n/a
NASA/Langley/Somers-Maughmer NLF(1)-10	15,0%	39,8%	33	26,25	7,08	4°	1,03	0,157	5°	6,876	5°	4,3%	62,8%	1,17	0,01	117
Quabeck HQ 3.0/15	15,0%	35,0%	33	26,25	9,70	6°	1,41	0,139	13°	6,875	4,25°	3,0%	50,0%	1,03	0,014	74
WORTMANN FX 62-K-153/20	15,3%	40,2%	33,66	26,78	6,82	4°	0,99	0,164	6,5°	6,867	4°	4,1%	62,9%	1,2	0,01	120
EPPLER E662	15,0%	42,8%	33	26,25	8,88	6°	1,29	0,153	13°	6,862	4°	4,1%	47,5%	1,11	0,013	85
EPPLER E662	15,0%	42,8%	33	26,25	7,51	5°	1,10	0,156	13°	6,855	4°	4,1%	47,5%	1,07	0,012	89
Althaus AH 93-W-145	14,5%	33,9%	31,9	25,38	10,80	7,5°	1,58	0,147	8°	6,848	7,25°	3,9%	37,1%	1,25	0,012	104
EPPLER E662	15,0%	42,8%	33	26,25	9,76	6,5°	1,43	0,151	13°	6,842	4°	4,1%	47,5%	1,13	0,014	81
Althaus AH 81-K-144/17	14,5%	40,2%	31,9	25,38	8,98	6°	1,31	0,150	7°	6,839	6,25°	4,2%	46,7%	1,02	0,009	113
WORTMANN FX 62-K-153/20	15,3%	40,2%	33,66	26,78	7,89	5°	1,16	0,176	6,5°	6,827	4°	4,1%	62,9%	1,25	0,012	104
Althaus AH 81-K-144/17	14,5%	40,2%	31,9	25,38	10,42	7°	1,53	0,146	7°	6,797	6,25°	4,2%	46,7%	1,08	0,012	90
WORTMANN FX 62-K-153/20	15,3%	40,2%	33,66	26,78	11,80	7,5°	1,74	0,156	6,5°	6,782	4°	4,1%	62,9%	1,3	0,02	65
Althaus AH 93-W-145	14,5%	33,9%	31,9	25,38	11,53	8°	1,70	0,146	8°	6,763	7,25°	3,9%	37,1%	1,27	0,015	85
Quabeck HQ 3.5/14	14,0%	35,0%	30,8	24,50	10,04	6°	1,49	0,167	12,5°	6,760	4,25°	3,5%	50,0%	1,1	0,014	79
Woody Blanchard WB140/35/FB	13,9%	30,0%	30,58	24,33	8,44	6°	1,25	0,142	7,5°	6,756	6,5°	3,7%	45,0%			n/a
EPPLER E678	15,1%	39,8%	33,22	26,43	8,41	4°	1,25	0,149	7°	6,746	5,5°	5,1%	53,7%			n/a
EPPLER E748	19,7%	27,4%	43,34	34,48	11,65	6,5°	1,73	0,164	12°	6,745	7,75°	4,6%	54,9%	1,33	0,016	83
EPPLER E662	15,0%	42,8%	33	26,25	6,93	4,5°	1,03	0,163	13°	6,742	4°	4,1%	47,5%	1,05	0,011	95
Althaus AH 93-W-145	14,5%	33,9%	31,9	25,38	12,01	8,5°	1,78	0,140	8°	6,740	7,25°	3,9%	37,1%	1,31	0,016	82
EPPLER E662	15,0%	42,8%	33	26,25	8,19	5,5°	1,22	0,148	13°	6,731	4°	4,1%	47,5%	1,09	0,013	84
WORTMANN FX 62-K-153/20	15,3%	40,2%	33,66	26,78	12,42	8°	1,85	0,158	6,5°	6,712	4°	4,1%	62,9%	1,35	0,025	54
Althaus AH 93-W-145	14,5%	33,9%	31,9	25,38	9,45	6,5°	1,41	0,139	8°	6,711	7,25°	3,9%	37,1%	1,12	0,011	102
EPPLER E748	19,7%	27,4%	43,34	34,48	12,51	7°	1,87	0,158	12°	6,706	7,75°	4,6%	54,9%	1,37	0,017	81
EPPLER E657	15,6%	37,0%	34,32	27,30	9,55	6°	1,42	0,152	7°	6,705	5,25°	4,6%	47,6%	1,18	0,011	107

NÉV	Vastagság	Vastagság helye	Belső vastagság	Külső vastagság	Tényleges felhajtóerő	Állásszög	Légellenállás	Turbulencia intenzitás	Max állásszög	cl/cd	Ideális állásszög	íveltség	íveltség helye	Teoretikus cl	Teoretikus cd	Teoretikus cl/cd
Woody Blanchard WB140/35/FB	13,9%	30,0%	30,58	24,33	9,16	6,5°	1,37	0,145	7,5°	6,697	6,5°	3,7%	45,0%			n/a
EPPLER E748	19,7%	27,4%	43,34	34,48	9,31	5°	1,39	0,184	12°	6,683	7,75°	4,6%	54,9%	1,2	0,015	80
EPPLER E657	15,6%	37,0%	34,32	27,30	10,31	6,5°	1,55	0,154	7°	6,673	5,25°	4,6%	47,6%	1,2	0,012	100
Woody Blanchard WB140/35/FB	13,9%	30,0%	30,58	24,33	9,76	7°	1,46	0,151	7,5°	6,665	6,5°	3,7%	45,0%			n/a
Althaus AH 81-K-144/17	14,5%	40,2%	31,9	25,38	6,82	4,5°	1,03	0,160	7°	6,655	6,25°	4,2%	46,7%	0,9	0,009	100
EPPLER E657	15,6%	37,0%	34,32	27,30	11,49	7,5°	1,73	0,159	7°	6,633	5,25°	4,6%	47,6%	1,22	0,015	81
Althaus AH 81-K-144/17	14,5%	40,2%	31,9	25,38	10,88	7,5°	1,64	0,154	7°	6,620	6,25°	4,2%	46,7%	1,11	0,015	74
Althaus AH 81-K-144/17	14,5%	40,2%	31,9	25,38	9,65	6,5°	1,47	0,144	7°	6,561	6,25°	4,2%	46,7%	1,05	0,009	117
EPPLER E657	15,6%	37,0%	34,32	27,30	10,78	7°	1,65	0,151	7°	6,547	5,25°	4,6%	47,6%	1,21	0,013	93
Althaus AH 93-W-145	14,5%	33,9%	31,9	25,38	12,41	9°	1,90	0,149	8°	6,546	7,25°	3,9%	37,1%	1,33	0,017	78
Woody Blanchard WB140/35/FB	13,9%	30,0%	30,58	24,33	7,56	5,5°	1,16	0,143	7,5°	6,535	6,5°	3,7%	45,0%			n/a
Althaus AH 81-K-144/17	14,5%	40,2%	31,9	25,38	8,25	5,5°	1,27	0,153	7°	6,510	6,25°	4,2%	46,7%	0,98	0,009	109
Woody Blanchard WB140/35/FB	13,9%	30,0%	30,58	24,33	7,20	5°	1,11	0,152	7,5°	6,507	6,5°	3,7%	45,0%			n/a
Quabeck HQ 3.5/14	14,0%	35,0%	30,8	24,50	6,25	3,5°	0,96	0,150	12,5°	6,474	4,25°	3,5%	50,0%	0,77	0,011	70
EPPLER E657	15,6%	37,0%	34,32	27,30	8,54	5,5°	1,33	0,169	7°	6,401	5,25°	4,6%	47,6%	1,15	0,011	105
NASA LRN 1015	15,2%	40,0%	33,44	26,60	9,49	6°	1,49	0,162	5,5°	6,383	4,75°	4,9%	44,0%	1,1	0,012	92
EPPLER E748	19,7%	27,4%	43,34	34,48	13,22	7,5°	2,07	0,151	12°	6,376	7,75°	4,6%	54,9%	1,41	0,017	83
EPPLER E657	15,6%	37,0%	34,32	27,30	7,91	5°	1,25	0,163	7°	6,348	5,25°	4,6%	47,6%	1,1	0,01	110
EPPLER E662	15,0%	42,8%	33	26,25	6,19	4°	0,98	0,171	13°	6,342	4°	4,1%	47,5%	1	0,011	91
EPPLER E748	19,7%	27,4%	43,34	34,48	14,22	8°	2,24	0,154	12°	6,342	7,75°	4,6%	54,9%	1,45	0,018	81
WORTMANN FX 62-K-153/20	15,3%	40,2%	33,66	26,78	13,66	9°	2,17	0,159	6,5°	6,306	4°	4,1%	62,9%	1,4	0,029	48
NASA LRN 1015	15,2%	40,0%	33,44	26,60	10,07	6,5°	1,60	0,171	5,5°	6,285	4,75°	4,9%	44,0%	1,11	0,013	85
NASA LRN 1015	15,2%	40,0%	33,44	26,60	10,68	7°	1,72	0,175	5,5°	6,214	4,75°	4,9%	44,0%	1,12	0,015	75
NASA LRN 1015	15,2%	40,0%	33,44	26,60	8,58	5,5°	1,41	0,173	5,5°	6,070	4,75°	4,9%	44,0%	1,1	0,011	100
EPPLER E657	15,6%	37,0%	34,32	27,30	6,47	4°	1,08	0,172	7°	6,002	5,25°	4,6%	47,6%	1,02	0,01	102
UNIVERSITY OF ALBERTA UA 79-SF-187	18,8%	42,8%	41,36	32,90	9,06	7,5°	1,51	0,159	13°	5,987	3,5°	3,7%	63,4%			n/a
NASA LRN 1015	15,2%	40,0%	33,44	26,60	7,23	5°	1,21	0,181	5,5°	5,969	4,75°	4,9%	44,0%	1,08	0,01	108
NASA LRN 1015	15,2%	40,0%	33,44	26,60	6,03	4°	1,10	0,220	5,5°	5,485	4,75°	4,9%	44,0%	1	0,01	100
UNIVERSITY OF ALBERTA UA 79-SF-187	18,8%	42,8%	41,36	32,90	5,39	4°	1,07	0,202	13°	5,023	3,5°	3,7%	63,4%			n/a
UNIVERSITY OF ALBERTA UA 79-SF-187	18,8%	42,8%	41,36	32,90	4,94	3,5°	1,01	0,197	13°	4,883	3,5°	3,7%	63,4%			n/a

Az általam választott Eppler E399 profil aerodinamikai tulajdonságait kisebb számítási zónákat (mesh) kialakítva és ezáltal pontosabb eredményt remélve külön újra szimuláltam. Ezek eredményét is szerepeltetem szakdolgozatomban az 5° és $4,5^\circ$ állásszög esetében. Látható, hogy a szárny hatékonysága elméletileg kis mértékben javult a kisebb állásszögnél, de a nagyobb állásszöggel közel 1 N-al nagyobb felhajtóerőt termel a profil, amit a modell levegőbe emelése szempontjából fontosabbnak tartottam, ezért az 5° -os állásszöget választottam.

Célérték	Mértékegység	Reális érték	Átlagos érték	Minimum érték	Maximum érték	Célpontosság [%]
Turbulencia	[%]	0,122907529	0,122586031	0,121112576	0,123683586	100
Eredőerő	[N]	11,57915536	11,61713561	11,56564794	11,67679798	100
Légellenállás	[N]	1,353737976	1,354990687	1,345749289	1,363105609	100
Felhajtóerő	[N]	11,44931497	11,48728732	11,43608638	11,54665845	100
Keresztengelyre mért forgatónyomaték	[N*m]	2,385724383	2,394114148	2,381426086	2,406126489	100
Iterációk száma []: 339						
Állásszög: 5°		c_l/c_D arány:	8,477761086			

Célérték	Mértékegység	Reális érték	Átlagos érték	Minimum érték	Maximum érték	Célpontosság [%]
Turbulencia	[%]	0,123746893	0,123327079	0,123062094	0,123810806	100
Eredőerő	[N]	10,88611036	10,87011601	10,82175506	10,91297225	100
Légellenállás	[N]	1,254194582	1,24962032	1,240032745	1,256647296	100
Felhajtóerő	[N]	10,76795083	10,75256377	10,70389603	10,79529204	100
Keresztengelyre mért forgatónyomaték	[N*m]	2,286334639	2,280817186	2,26969292	2,290535776	100
Iterációk száma []: 330						
Állásszög: $4,5^\circ$		c_l/c_D arány:	8,604664634			

A csűrőlapon mért értékek:

Célérték	Mértékegység	Reális érték	Átlagos érték	Minimum érték	Maximum érték	Célpontosság [%]
Eredőerő	[N]	4,922139172	4,973393513	4,773384272	5,361285476	100
Légellenállás	[N]	3,645779433	3,684229829	3,547842499	3,941209162	100
Felhajtóerő	[N]	2,961480665	2,995293341	2,860814558	3,281386736	100
Kereszttengetyre mért forgatónyomaték	[N*m]	1,002265834	1,014433035	0,966806261	1,114306207	100
Hossztengetyre mért forgatónyomaték	[N*m]	-1,391159971	-1,408320831	-1,552373619	-1,340421413	100
Függőleges tengelyre mért forgatónyomaték	[N*m]	2,207758853	2,231077819	2,141555394	2,400871968	100
Iterációk száma []: 169						
Állásszög: 40°						

Célérték	Mértékegység	Reális érték	Átlagos érték	Minimum érték	Maximum érték	Célpontosság [%]
Eredőerő	[N]	2,966580402	2,946845839	2,87709457	2,975143094	100
Légellenállás	[N]	1,011249841	1,009103198	1,00300572	1,013255822	100
Felhajtóerő	[N]	-2,78035226	-2,760069326	-2,788986072	-2,687672424	100
Kereszttengetyre mért forgatónyomaték	[N*m]	-0,972406963	-0,965873717	-0,975580473	-0,941648972	100
Hossztengetyre mért forgatónyomaték	[N*m]	1,276159142	1,267887202	1,235523466	1,282075229	100
Függőleges tengelyre mért forgatónyomaték	[N*m]	0,542609261	0,541821316	0,539138269	0,544702325	100
Iterációk száma []: 200						
Állásszög: -30°						

A fékszárnynon mért értékek:

Célérték	Mértékegység	Reális érték	Átlagos érték	Minimum érték	Maximum érték	Célpontosság [%]
Eredő erő	[N]	4,251776792	4,292603168	4,200983156	4,40591325	100
Légellenállás	[N]	3,077895194	3,106921772	3,048638472	3,180333808	100
Felhajtóerő	[N]	2,643471825	2,66785813	2,584738454	2,750651691	100
Kereszttengetyre mért forgatónyomaték	[N*m]	0,598569686	0,604049079	0,587119101	0,624271858	100
Hossztengetyre mért forgatónyomaték	[N*m]	-0,214202835	-0,215342956	-0,237407884	-0,199051035	100
Függőleges tengelyre mért forgatónyomaték	[N*m]	0,535256405	0,540855638	0,521318415	0,569476668	100
Iterációk száma []: 170		Sebesség	15 m/s			
Állásszög: 15°			55 k/h			

5. számú melléklet: Költséghatékonyság elemzés

A modell megépítéséhez beszerzésre került eszközöket két kategóriára bontottam fel, egy részüket többször is fel tudom használni, azaz gyártási, vagy tesztelési eszköznek minősülnek, míg a másik kategóriába azok tartoznak, amelyek a végleges modellbe ténylegesen beépítésre kerültek.

Megvásárolt gyártási eszközök és tesztelési költségek:

Termék megnevezés	Termék kategória, leírása	Mennyiség	ÁR
Creality Ender 3 Pro	3D nyomtató	1 db	106 380 Ft
Gembird PLA Plus	3D nyomtatáshoz PLA szál	1 tekercs (1 kg)	
M-8008	Digitális ékszerszám	1 db	19 200 Ft
Mannesmann Mini 135W	Fúró, köszörű, gravírozó, csiszoló	1 db	
Szénszövet	245 g/m ² sávoly 120 cm	1,7 fm	8 498 Ft
Szén-aramid szövet	215 g/m ² sávoly 120 cm	3 fm	3 918 Ft
Üvegszövet	163 g/m ² sávoly 100 cm	6 fm	617 Ft
UD szövet	230 g/m ² 60 cm	1 fm	1 457 Ft
MGS LR 235	Gyanta	0,5 kg	3 887 Ft
MGS LH 235	Edző	0,2 kg	2 009 Ft
Fém edény	0,6 literes	2 db	1 035 Ft
Oskars M-700	Formaleválasztó anyag	1 db (425 g)	3 611 Ft
Fecskendő	20 ml	5 db	240 Ft
Műanyag mérőedény	550 ml	2 db	301 Ft
Keverő spatula	Fa keverőspatula	10 db	1 354 Ft
Ecset	Műanyag nyelvű, 2" méretű ecset	4 db	1 888 Ft
Légtelenítő henger	Hosszbordás 18x75 mm, fém	1 db	2 286 Ft
Letépfőzőszövet	85g/m ² 1,8 m	1 m ²	537 Ft
Vákuumfólia	70 mikron 300 cm	3 m ²	1 143 Ft
SLT150	Vákuumfólia ragasztószalag	15 m	1 203 Ft
Vákuum cső	10x 12mm	3 m	331 Ft
Vákuum infúziós talp	12 mm-es csőhöz	3 db	702 Ft
Formabontó ék	150x55 mm	1 db	762 Ft
Aceton	Oldószer	5 l	2 903 Ft
Chimilux szemüveg	Védőszemüveg	1 db	1 086 Ft
Moldex 7002 M-es	Félálarc	1 db	6 299 Ft
A2 szűrőbetét	Moldex típusú félálarcához szűrőbetét	1 db	3 908 Ft
Mirka M14 125mm	Csiszoló felfogó tányér	1 db	3 677 Ft
Mirka ABRANET tépőzáras P120	Csiszolókorong	2 db	311 Ft
Mirka ABRANET tépőzáras P240	Csiszolókorong	2 db	311 Ft
Mirka ABRANET tépőzáras P320	Csiszolókorong	2 db	321 Ft
PUR kemény hab tábla	Mintaforma keményhab tábla	1,2 m ²	5 000 Ft
Rhodiesolv RPDE	Oldószer	1 kg	2 362 Ft
PR Clean R	Kéztisztító	1 l	2 235 Ft

Nettó gyártás költsége:

Termék név	Termék kategória, leírása	Mennyiség	ÁR	Súly
FLYSKY FS-I6	RC távirányító	1 db	28 990 Ft	
FS-iA6B	RC jelvevő	1 db		15,12
Gens ace Soaring 2700 mAh	LiPo akkumulátor	1 db	14 990 Ft	195,6
GT POWER B3	Akkumulátor töltő	1 db	5 900 Ft	
Surpass Hobby C2836 1120KV	Motor	2 db	14 400 Ft	150,24
KARBON CSŐ 14.0 X 12.0 X 1000MM	Építőanyag	2 db	9 780 Ft	77,11
Skywalker 50A ESC (6 UBEC)	Motor fordulatszám szabályozó	2 db	16 998 Ft	83,5
XT60 CSATLAKOZÓ APA	Áramellátás csatlakozó	1 db	290 Ft	3,3
XT60 CSATLAKOZÓ ANYA	Áramellátás csatlakozó	2 db	580 Ft	6,4
SZILIKONKÁBEL FEKETE 3,3MM	13 AWG áramvezeték	1 m	1 000 Ft	5,3
SZILIKONKÁBEL PIROS 3,3MM	13 AWG áramvezeték	1 m	1 000 Ft	5,3
FUTABA/JR 6CM	SZERVOKÁBEL-ELOSZTÓ	1 db	550 Ft	4,5
Groupner Salpit	4-es átmérőjű zsugorcső 25 mm	1 db	350 Ft	3,25
Groupner Salpit	5-ös átmérőjű zsugorcső 25 mm	1 db	350 Ft	2,88

Az eszközök beszerzésében külön köszönettel tartozok a Novia Kft-nek és a Jako Modell-Makett Webáruháznak.