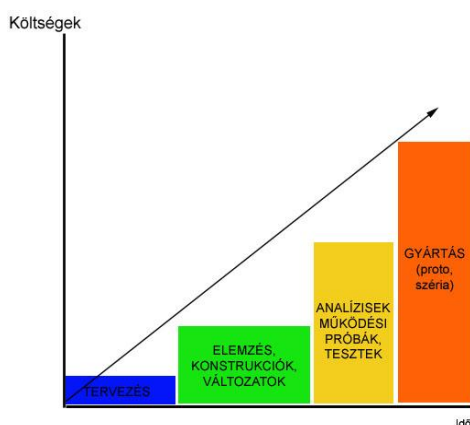


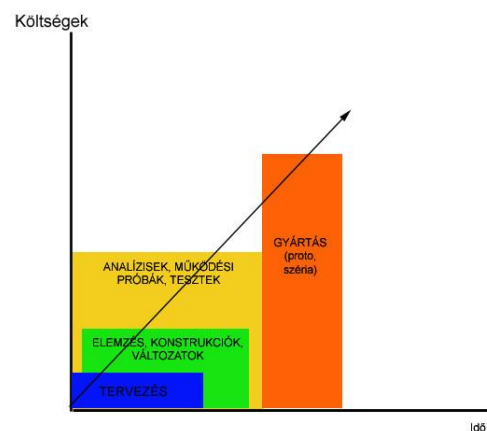
REPÜLŐGÉP KONSTRUKCIÓK PROTOTÍPUSAINAK GYÁRTÁS ELŐTTI SZERKEZET ELEMZÉSÉNEK LEHETŐSÉGEI A XXI. SZÁZAD VIRTUÁLIS FEJLESZTŐTERÉBEN

BEVEZETŐ

Az elmúlt évtizedek során a repülőgép fejlesztőintézetek tervezési, fejlesztési, gyártási és tesztelési filozófiája nagymértékben átalakult. A legnagyobb műszaki átalakítás az elmúlt húsz-huszonöt esztendő során az informatika és a számítógépes rendszerek, hálózatok ipari méretű elterjedését eredményezte. A számítástechnika előnyeit épp úgy kihasználjuk a forgalomirányításban, az oktatásban, a logisztikai ellátásban, mint a mérnöki munka egyes munkafolyamataiban. Repülőgép fejlesztő társaságok munkafolyamatainak lépései hasonlóak, sőt sok esetben ugyanolyanok, mint voltak például a II. Világháború idején. Az alapvető különbség a fejlesztés és a tervezés módszereiben jelentkezik. Napjainkban a legfőbb kiindulási pont a költséghatékonyság, mely abban mutatkozik meg, hogy a prototípusok száma mennyi legyen és a nullaszériás konstrukciókon hány szerkezeti megoldás kivitelezési lehetőségeiből válasszuk ki a legmegfelelebbet. Az információs társadalom előnyeiből a tervező intézetek egy új dimenziót, egy ún. virtuális fejlesztőteret alakítottak ki munkavégzésük megkönnyítésére. Ebben a fizikailag nem létező, de a valósággal nagymértékben azonos hardver-szoftver környezetben egyszerűen elemezhetők a prototípusok különböző tulajdonságai, euró vagy dollár milliókat megspórolva. A XXI. század követelményeit kielégítő projekt filozófiát a következő két ábrán követhetjük nyomon. Az 1. ábra a hagyományos többlépcsős termék fejlesztés logikáját tünteti fel, még a 2. ábrán látható, hogy a tervezés, konstrukció kialakítás, elemzés, tesztelés akár egy időben is folyhat, az egyes munkafolyamatok egymással párhuzamosan is történhetnek.

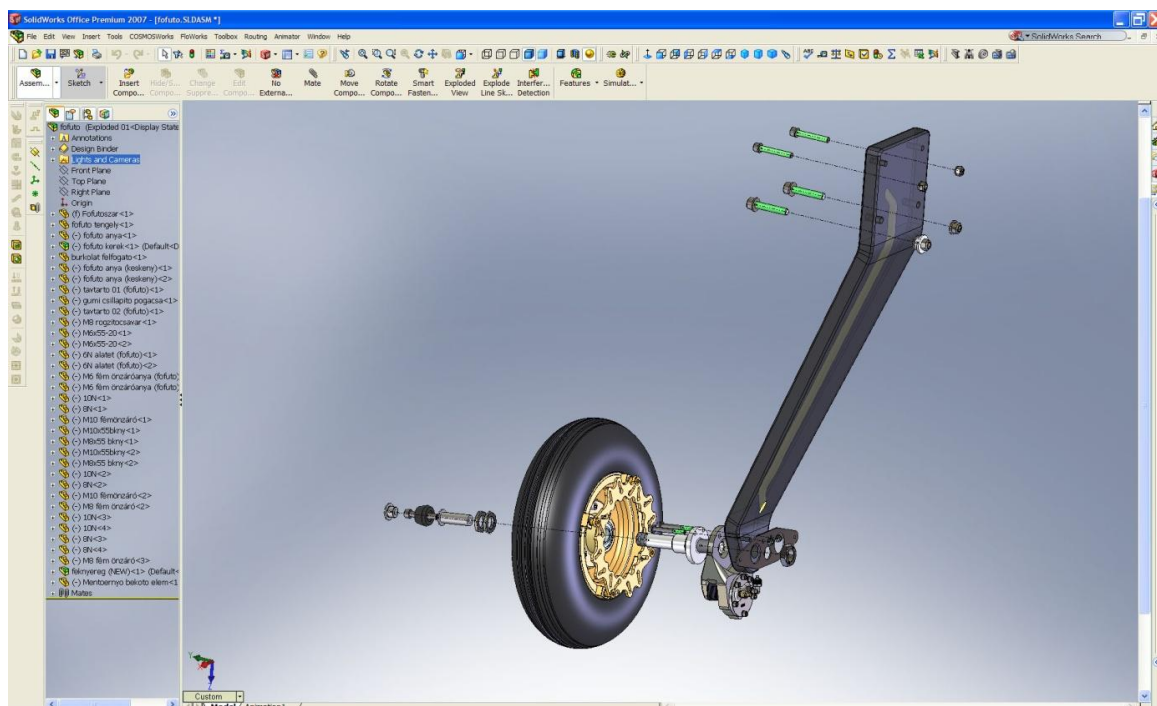


1. ábra. Több lépcsős fejlesztés elve



2. ábra. Párhuzamos fejlesztés elve

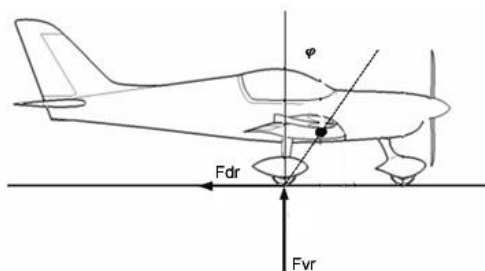
A párhuzamos fejlesztés elve azt a virtuális munkateret veszi alapjául, ahol a konstrukciók valós fizikai meglétük nélkül elemezhetők számos változati formájukban. A tervezést követő elemzések a valós működési igényeknek megfelelő üzemállapotok szimulációs teszteléseivel történnek. A költséghatékonyság egyfelől abban mutatkozik meg, hogy nem szükséges az elemek, összeállítások valós legyártása a vizsgálatokhoz, másfelől pedig a prototípus gyártásának elkezdéséhez szükséges idő 30-40%-al is rövidülhet. Természetesen a valós életszerű próbákat, melyeket a prototípusokon kell elvégezni, nem válthatja ki ez a fejlesztési filozófia egyetlen virtuális eszköze sem. Ilyen vizsgálatok például a szilárdsági terhelési tesztek, a kritikus üzemi határérték elemzések, törő próbák stb.



3. ábra. Könnyű szerkezetű repülőgép főfutó virtuális modell

A MECHANIKAI ERŐ MODELL ISMERTETÉSE

Az egyezményes EASA CS-23 (régebben FAR-23) előírásainak értelmében a repülőgép fő futóművét két domináns erő értékre kell méretezni. A 4. ábrán láthatjuk a két erőkomponenst és az 1. táblázatban összegezve a terhelési eseteket.



4. ábra. Méretezés szempontjából meghatározó erő komponensek

Orrfutós repülőgép			
Feltételek	Leszállás nagy állásszöggel, terheletlen orrfutó	Főfutó gördül, az orrfutó még terheletlen	Főfutó és orrfutó is gördülő állapotban csatlakozva a talajjal
Vertikális összetevő súlypontban	$n \cdot G$	$n \cdot G$	$n \cdot G$
Horizontális összetevő súlypontban	0	$K \cdot n \cdot G$	$K \cdot n \cdot G$
Rugózási karakterisztika	Pillanatnyi statikus vagy dinamikus, ami időfüggő	Pillanatnyi statikus vagy dinamikus, ami időfüggő	Pillanatnyi statikus vagy dinamikus, ami időfüggő
Főfutó keréken ébredő erők	$\sum F_{vr} = (n - L) \cdot G$	$\sum F_{vr} = (n - L) \cdot G$ $\sum F_{dr} = K \cdot n \cdot G$	$\sum F_{vr} = (n - L) \cdot G \cdot \frac{a^*}{d^*}$ $\sum F_{dr} = K \cdot n \cdot G \cdot \frac{a^*}{d^*}$

1. táblázat – Méretezés szempontjából meghatározó terhelési esetek [1]

Méretezés szempontjából a mértékadó állapot a táblázat kettes oszlopa, mikor a főfutó gördülve érintkezik a talajjal és az orrfutó még terheletlen. A méretezéshez tekintsünk egy 472,5 kg maximális felszálló tömegű könnyű szerkezetű kiképző repülőgépet.

A számítási eljárás egyes lépései: [2]

$$\sum F_{vr} = (n - L) \cdot G$$

$$\sum F_{dr} = K \cdot n \cdot G$$

Az egyenletekben használt jelölések jelentései:

G – össztömeg

K – empirikus faktor, értéke $K = 0,25$ ha $G < 1350$ kg [3]

L – felhajtóerő relációs tényező $L = 0,67$ ha $G < 1350$ kg [4]

n – normál terhelési többes faktor a futóművekre $n = 2,67$ [5]

$$\sum F_{vr} = (1 - L) \cdot G = (1 - 0,67) \cdot 4725 = 9450 \text{ N} - \text{két főfutóra vonatkoztatva}$$

Egy oldali fő futószáron ébredő erő nagysága:

$F_{vr} = 4730 \text{ N}$; abban az esetben ha $n = 2,67$ kritikus méretezési terhelési érték, mely hajlító igénybevételt ébreszt a futószárban.

$$\sum F_{dr} = K \cdot n \cdot G = 0,25 \cdot 2,67 \cdot 4725 = 3150 \text{ N} - \text{két főfutóra vonatkoztatva}$$

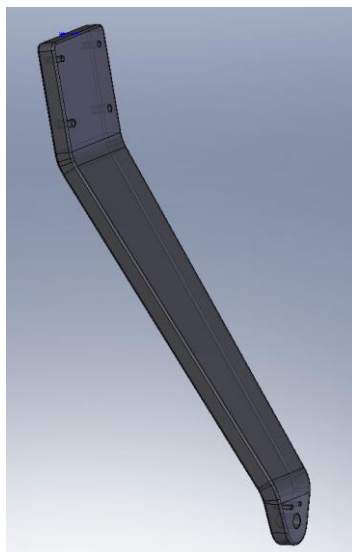
Egy oldali fő futószáron ébredő erő nagysága:

$F_{dr} = 1580 \text{ N}$; abban az esetben ha $n = 2,67$ kritikus méretezési terhelési érték, mely csavaró igénybevételt ébreszt a futószárban.

Ezek azok az erő értékek, melyekre a főfutó szárát kell méretezni szilárdságilag. A méretezés során a főfutó szárnak, mint prototípusnak a vizsgálatát a virtuális modellterben végezzük el. Ebben a fizikailag nem létező, de a valósággal nagymértékben azonos térben különböző futószár alakok és konstrukció kialakítások egyszerűen vizsgálhatók. Az elemzések során, egyrészt meg kell vizsgálni, hogy melyik geometriai kialakítás képes a leghatékonyabban elviselni a számított hajlító- és csavaró terhelés által előidéző feszültségi állapotokat. Másrészt fontos ismerni a bekötések és a futómű szárát megtámasztó bordák feszültségi állapotait is.

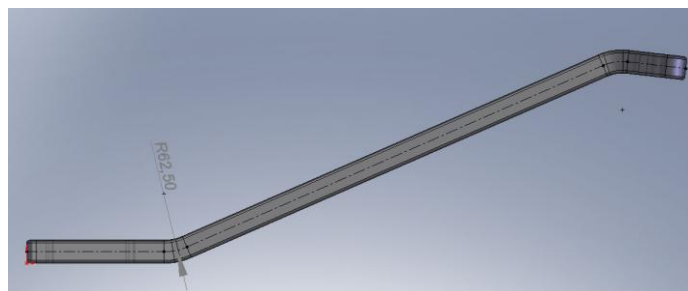
A LEHETSÉGES FUTÓMŰ SZÁRAK GEOMETRIAI KIALAKÍTÁSAI

A futószár geometriája gyorsan, egyszerűen modellezhető valamely 3D CAD rendszerben, az általam használt alkalmazás a SolidWorks 2007 volt. A következő ábrán látható a virtuális futószár prototípus alak.

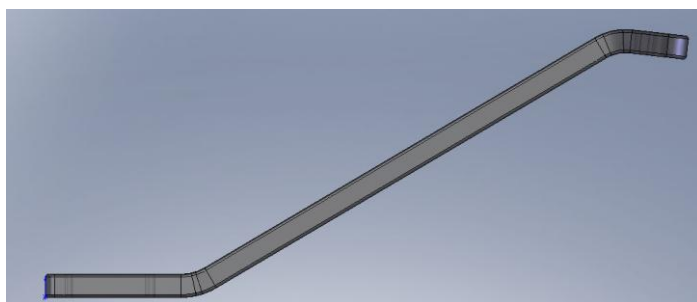


5. ábra. Prototípus fő futószár alak

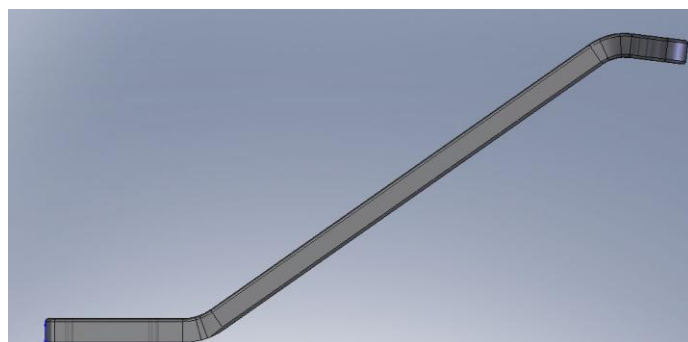
A mechanikai erő modell számítása során látható volt, hogy a hajlító igénybevétel többszöröse a csavarónak. Ebből adódóan a futószár kialakítását a hajlításból eredő feszültség csökkentésére kell optimálissá tenni. Erre a legkézenfekvőbb lehetőség a futószár hajlítási rádiuszának és a szár rugózási úthosszának különböző mérettartományon belüli elemzése. A következő ábrákon összefoglalom azokat a geometriai kialakításokat, melyeket elemezni fogok.



6. ábra. Hajlítási szög (sugár) $R = 23,50$ mm 01-es alak vizsgálat



7. ábra. Hajlítási szög (sugár) $R = 30$ mm 02-es alak vizsgálat



8. ábra. Hajlítási szög (sugár) $R = 35$ mm 03-as alak vizsgálat

Látható, hogy három különböző hajlítási sugarú futószár került összegzésre. A kérdés, melyet a virtuális munkatérben kell megválaszolni, hogy miként függ a szerkezet teherbíró képessége a hajlítási sugártól. Az alkalmazásra kerülő terhelő erők nagysága azonos; a felhajlító értéke 4730 N , még a hátrahajlító erő értéke 1580 N . A végeelem vizsgálat eredményeitől azt várom, hogy eldönthetővé válik a terhelés és a geometriai kialakítás milyen kapcsolatban vannak egymással, elsősorban a hajlítási rádiusz és a rugózási úthossz.

AZ ELEMZÉSRE KERÜLŐ ÖSSZEÁLLÍTÁS ÉS AZ ANYAGMINŐSÉGEK

A repülőgép fő futóműve kompozit szerkezet, mely a 2. táblázatban feltüntetett rétegekből épül fel, ennek metszetét a 9. ábra tünteti fel. A futómű tengely anyaga krómacél.

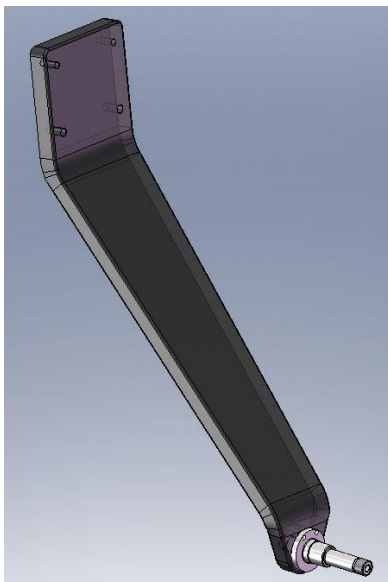
Réteg pozíciója	Réteg megnevezése	Szálirány	Mgj.
1	EE 106	+45°	üveg
2	EBX 300	0-90°	biax
3	EBX 300	0-90°	biax
4	EBX 300	0-90°	biax
5	HS 300	UD 0°	szén
6	HS 300	UD 0°	szén
7	HS 300	UD 0°	szén
8	HS 300	UD 0°	szén
9	EBX 300	+45°	biax
10	EBX 300	+45°	biax
11	EBX 300	+45°	biax
12	EBX 300	+45°	biax
13	EBX 300	+45°	biax
14	EBX 300	+45°	biax
15	HS 300	UD 0°	szén
16	HS 300	UD 0°	szén
17	EBX 300	+45°	biax
18	HS 300	UD 0°	szén
19	HS 300	UD 0°	szén
20	EBX 300	+45°	biax
21	HS 300	UD 0°	szén
22	EE 106	+45°	üveg
23	Köztes tér méhsejttel kitöltve		

2. táblázat. Corvus Phantom főfutó szár kompozit rétegrendje



9. ábra. Főfutó szár metszete

A 10. ábrán az összeállított főfutó szár és a tengely együttest láthatjuk az alkalmazásra került SolidWorks 2007 CAD rendszerben. A futószár anyagát nem külön-külön rétegrend szerint adom meg, hanem egyenértékű anyag vastagsággal helyettesítem és ebből adódóan átlagos anyagszilárdsági értékeket használok. Az átlagos szilárdsági érték bevizsgált szakítópróba eredménye, melyet a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Polimertechnika Tanszék Laboratóriumában határoztak meg.



10. ábra. Virtuális modell összeállítás

Az alkalmazott bevizsgált anyag minőségeket a következő táblázatokban összegzem:

	Maximális erő F_M (N)	Keresztmetszet A₀ (mm²)	Szakító szilárdság σ_M (MPa)	Nyúlás a szakító szilárdság esetén ε_M (%)	Young modulus E [MPa]
1	28226	23,23	1215	2,70	50866
2	22264	21,94	1015	2,27	48945
3	24936	21,64	1153	2,33	53393
4	26565	23,74	1119	2,63	51070
Közepes			1125	2,48	51069
Eltérés			84	0,21	1821
Relatív eltérés (%)			7,4	8,6	3,6

3. táblázat. – UD karbon kompozit szakítási eredmények [6]

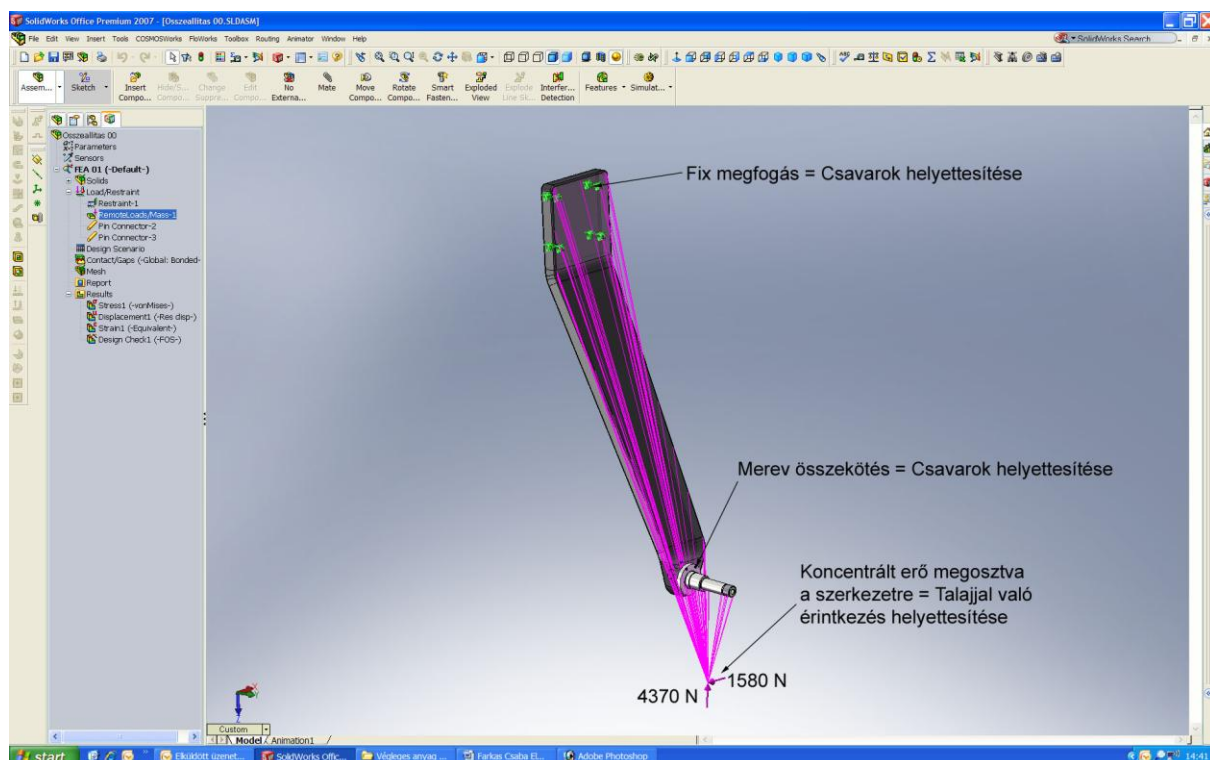
	Maximális erő F_M (N)	Keresztmetszet A₀ (mm²)	Szakító szilárdság σ_M (MPa)	Nyúlás a szakító szilárdság esetén ε_M (%)	Young modulus E [MPa]
1	3421	10,34	331	2,43	14577
2	3768	10,83	348	2,76	14196
3	4047	10,80	375	2,94	14182
Közepes			351	2,71	14318
Eltérés			22	0,26	224
Relatív eltérés (%)			6,3	9,5	1,6

4. táblázat. Kevlár-üveg kompozit szakítási eredmények [7]

	Maximális erő F_M (N)	Keresztmetszet A_0 (mm ²)	Szakító szilárdság σ_M (MPa)	Nyúlás a szakító szilárdság esetén ε_M (%)	Young modulus E [MPa]
1	11153	11,69	954	2,76	35749
2	11585	11,58	1000	2,81	37690
3	10562	12,10	873	2,63	33795
	Közepes		943	2,73	35745
	Eltérés		64	0,09	1948
	Relatív eltérés (%)		6,8	3,3	5,4

5. táblázat. Kevlár-carbon kompozit szakítási eredmények [8]

Számított egyenértékű anyag feszültség érték a főfutóra a 6. táblázatban található.



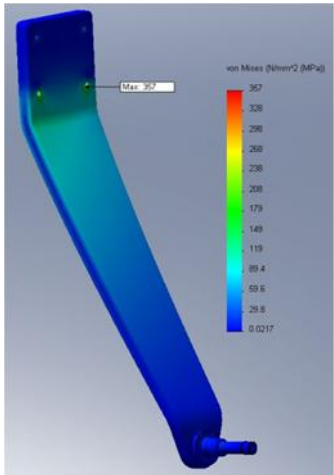
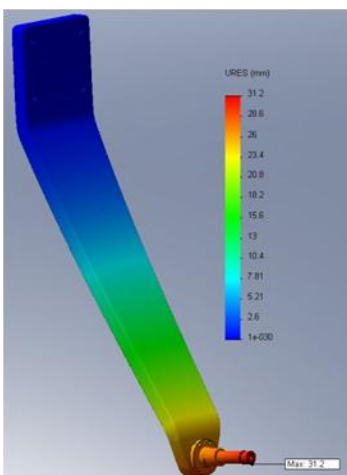
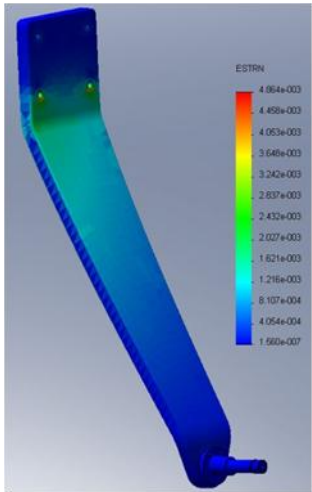
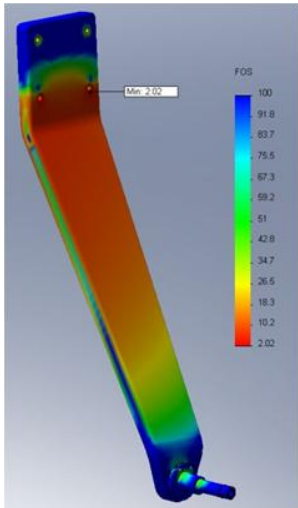
11. ábra. – FEA mechanikai erő modell vázlata

A 11. ábrán látható helyettesítő modell került alkalmazásra a végelem vizsgálatban. A vázlaton látható, hogy az alkalmazott koncentrált erő értékeinél azok kerültek megadásra, mely értékeket a mechanikai erő modell ismertetésekor számítottunk. A repülőgép fő futómű kerekének átmérője $D=350$ mm, ennek alsó talaj érintkezési pontján ébred a koncentrált erő (angolul remote load) ami direkt transzformációként jelentkezik a száron és a tengelyen.

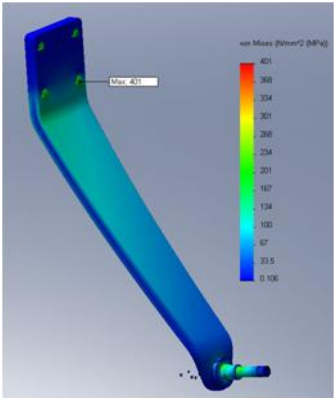
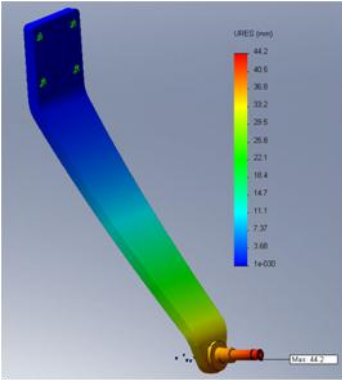
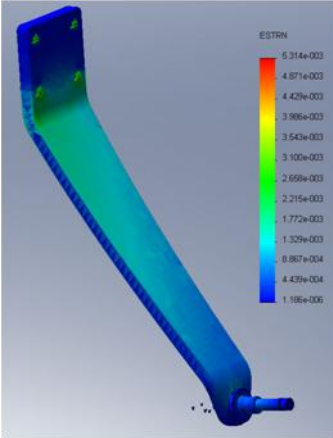
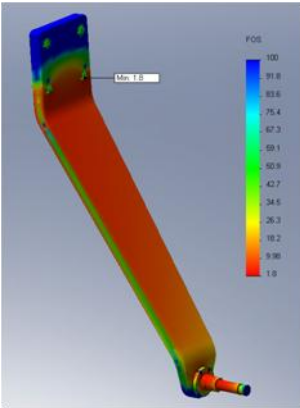
A program a szerkezetben ébredő feszültséget, elmozdulást, nyúlást és biztonsági tényező értékeit számítja, melyekből egyértelműen eldönthető, hogy melyik geometriai kialakítás a legalkalmasabb. Az eredmények összesítve táblázatokban találhatók.

Réteg szám	Anyag neve	Írány	Vastagság (mm)	(%)	Sűrűség (g/cm ³)	E(0) (N/mm ²)	E(90) (N/mm ²)	G (N/mm ²)	v (contr. coef)	sig xt (Mpa)	sig xc (Mpa)	sig yt (Mpa)	sig yc (Mpa)	tau xy (Mpa)
1	EE 106	45°	0,08	2,09	0,069	478	478	29	0,000	5,59791	-5,59791	5,59791	-5,59791	1
2	EBX 300	45°	0,30	7,83	0,137	2 115	2 115	110	0,000	27,41514	-27,41514	27,41514	-27,41514	6
3	EBX 300	0-90°	0,30	7,83	0,137	2 115	2 115	110	0,000	27,41514	-27,41514	27,41514	-27,41514	6
4	EBX 300	0-90°	0,30	7,83	0,137	2 115	2 115	110	0,000	27,41514	-27,41514	27,41514	-27,41514	6
5	HS 300	UD 0°	0,21	5,48	0,076	3 838	0	0	0,027	93,75979	-93,75979	0,05483	-0,05483	0
6	HS 300	UD 0°	0,21	5,48	0,076	3 838	0	0	0,027	93,75979	-93,75979	0,05483	-0,05483	0
7	HS 300	UD 0°	0,21	5,48	0,076	3 838	0	0	0,027	93,75979	-93,75979	0,05483	-0,05483	0
8	HS 300	UD 0°	0,21	5,48	0,076	3 838	0	0	0,027	93,75979	-93,75979	0,05483	-0,05483	0
9	EBX 300	45°	0,30	7,83	0,137	2 115	2 115	110	0,000	27,41514	-27,41514	27,41514	-27,41514	6
10	EBX 300	45°	0,30	7,83	0,137	2 115	2 115	110	0,000	27,41514	-27,41514	27,41514	-27,41514	6
11	EBX 300	45°	0,30	7,83	0,137	2 115	2 115	110	0,000	27,41514	-27,41514	27,41514	-27,41514	6
12	EBX 300	45°	0,30	7,83	0,137	2 115	2 115	110	0,000	27,41514	-27,41514	27,41514	-27,41514	6
13	EBX 300	45°	0,30	7,83	0,137	2 115	2 115	110	0,000	27,41514	-27,41514	27,41514	-27,41514	6
14	EBX 300	45°	0,30	7,83	0,137	2 115	2 115	110	0,000	27,41514	-27,41514	27,41514	-27,41514	6
15	HS 300	UD 0°	0,21	5,48	0,076	3 838	0	0	0,027	93,75979	-93,75979	0,05483	-0,05483	0
16	HS 300	UD 0°	0,21	5,48	0,076	3 838	0	0	0,027	93,75979	-93,75979	0,05483	-0,05483	0
17	EBX 300	45°	0,30	7,83	0,137	2 115	2 115	110	0,000	27,41514	-27,41514	27,41514	-27,41514	6
18	HS 300	UD 0°	0,21	5,48	0,076	3 838	0	0	0,027	93,75979	-93,75979	0,05483	-0,05483	0
19	HS 300	UD 0°	0,21	5,48	0,076	3 838	0	0	0,027	93,75979	-93,75979	0,05483	-0,05483	0
20	EBX 300	45°	0,30	7,83	0,137	2 115	2 115	110	0,000	27,41514	-27,41514	27,41514	-27,41514	6
21	HS 300	UD 0°	0,21	5,48	0,076	3 838	0	0	0,027	93,75979	-93,75979	0,05483	-0,05483	0
22	EE 106	45°	0,08	2,09	0,069	478	478	29	0,000	5,59791	-5,59791	5,59791	-5,59791	1
	(g/m ²)	6 451	3,83	100,00	1,684	38 703	19 513	1 016	0,137	721	-721	253	-253	54

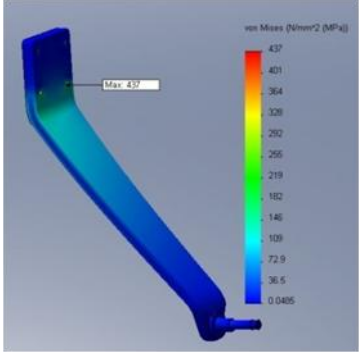
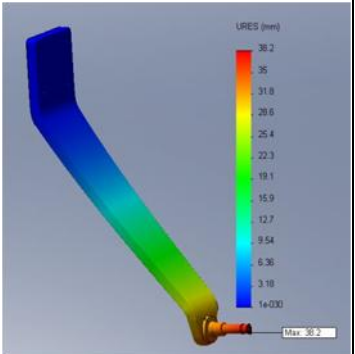
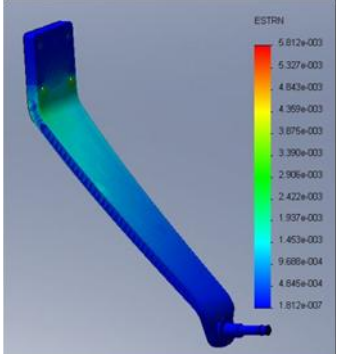
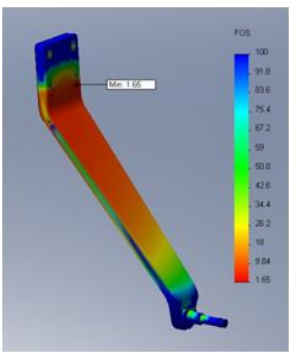
6. táblázat. Számított egyenértékű feszültség a főfutó szárra

Futószár alak megnevezése:	Futószár, hajlítási szög = 23,50° 01-es alak			
	Egyenértékű HMH feszültség	Elmozdulás	Egyenértékű nyúlás	Biztonsági tényező, töréssel szemben
Ábra				
Érték	357 MPa	31,2 mm	$4,8 \cdot 10^{-3} \%$	2,02

7. táblázat. 01-es alak vizsgálat (Hajlítási szög = 23,50°) eredményei

Futószár alak megnevezése:	Futószár, hajlítási szög = 30° 02-es alak			
	Egyenértékű HMH feszültség	Elmozdulás	Egyenértékű nyúlás	Biztonsági tényező, töréssel szemben
Ábra				
Érték	401 MPa	44,2 mm	$5,314 \cdot 10^{-3} \%$	1,8

8. táblázat. 02-es alak vizsgálat (Hajlítási szög = 30,00°) eredményei

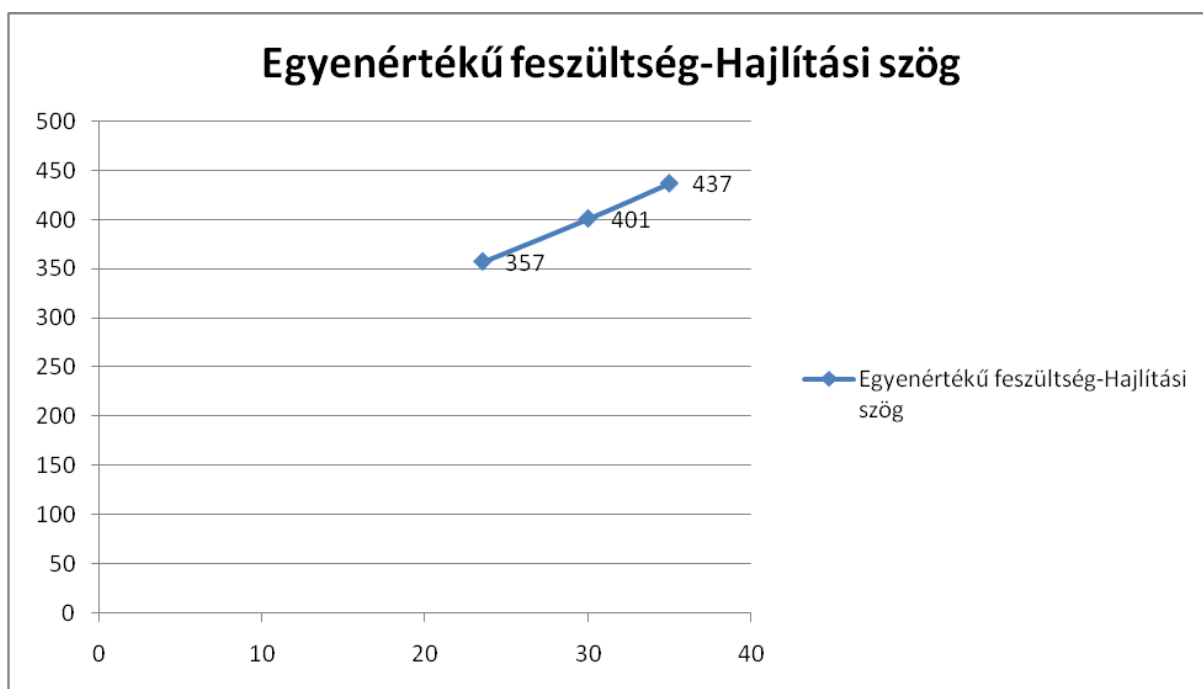
Futószár alak megnevezése:	Futószár, hajlítási szög = 35° 03-as alak			
	Egyenértékű HMH feszültség	Elmozdulás	Egyenértékű nyúlás	Biztonsági tényező, töréssel szemben
Ábra				
Érték	437 MPa	38,2 mm	$5,814 \cdot 10^{-3} \%$	1,65

9. táblázat. 03-as alak vizsgálat (Hajlítás szög = 35,00°) eredményei

AZ EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE, KONKLÚZIÓK

A vizsgálatok után egyértelműen tapasztalható, hogy a futómű hajlítási szög növelésével a geometriában fellépő egyenértékű feszültség nőtt. A $7,5^\circ$ -os hajlítási szög növekedés 44 MPa értékkel növelte a szárban fellépő egyenértékű feszültség értékét, még ezt követően 5° -os hajlítási szögnövekedés 36 MPa-os feszültség emelkedést eredményezett. Az első esetben 1° -os változásra jutott 5,66 MPa eltérés, még a másodikban 1° -os változás 7,2 MPa feszültség eltérést eredményezett.

A 12. ábrán látható a kapcsolat az egyenértékű feszültség és a hajlítási szög eredményei között.



12. ábra. – Egyenértékű feszültség és a hajlítási szög közötti kapcsolat

Ha a biztonsági tényezőket vizsgáljuk, akkor látható, hogy azok is a feszültségekkel arányosan csökkennek. Érdekes, de nem ilyen egyértelműek a rugózási karakterisztika, avagy az elmozdulás egyes értékei. Abban az esetben, ha a hajlítási szög $23,5^\circ$ akkor az elmozdulás 31,2 mm, 30° esetén 44,2 mm, még 35° -os szög értéknél 38,2 mm. Látható, hogy itt ellentmondás van, első esetben a hajlítási szög növekedésével együtt növekszik az elmozdulás, majd további szög növekedés az elmozdulás csökkenését idézi elő. Ahhoz, hogy erre egzakt matematikai választ kapjunk, további vizsgálatok elvégzésére lenne szükség.

Konklúzióként azt vonom le, hogy a szárat vagy feszültség és biztonsági tényező értékeire kell, optimalizálni vagy a rugózási úthossz optimális beállítása lehet a cél, attól függően, hogy mik az elvárások, előírások.

Konkrétabban azt értem, ha például a repülőgéppel puha talajon végeznek kiképzési repüléseket, akkor a rugózási karakterisztikát kell optimálisan megválasztani, megtervezni. Ha egy repülőgépet,

melyet kiképzési célokra használnak és a magas kifáradási élettartam elérése a cél a futóműveknél akkor a tervezés során a biztonsági tényezők legjobb értékeit célszerű megtalálni.

Értekezésem célja az volt, hogy bemutassam, a repülőgép konstrukciók prototípusainak gyártás előtti szerkezet elemzésének lehetőségei a virtuális fejlesztés munkaterében miket kínálnak ma a fejlesztő mérnökök számára.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1], [2], [3], [4], [5] PADISLAO Pazmany Landing Gear Design For Light Aircraft Volume 1 USA 1986, ISBN 0-9616777-0-8 Page 118 Table 9-II FAR 23 – Appendix C – Basic Landing Conditions
- European Aviation Safety Agency Certification Specifications for Normal, Utility, Aerobatic and Commuter Category Aeroplanes CS-23
- RICHARD D. Hiscocks Design of Light Aircraft ISBN 0-9699809-0-6
- Corvus Aircraft Kft belső műszaki dokumentációk