

Farkas Csaba

## SZÁLERŐSÍTÉSES KOMPOZIT, ALUMÍNIUM ÉS SPECIÁLIS ACÉL ÖTVÖZETEK ALKALMAZÁSA LÉGIJÁRMŰVEK KORMÁNYVEZÉRLŐ RENDSZEREIBEN

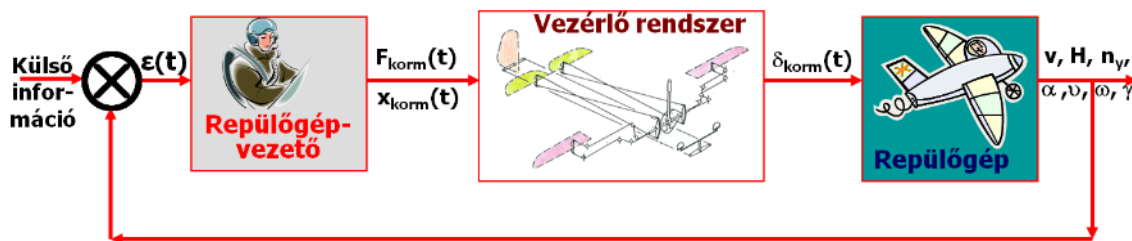
Légi járművek kormányvezérlő rendszeriben alkalmazott anyagszerkezetek és gyártási módszerek az elmúlt 30-40 év során jelentős változáson mentek keresztül. Ugyanez mondható el a tervezési eljárásokról is, amik elválaszthatatlan részei ma már a gyártás teljes folyamatának a rendelkezésre álló számítógépes mérnöki háttértámogatás integrációjával. A tudományos cikk áttekintést ad a kormányvezérlő rendszerekkel szemben támasztott követelményekről, korszerű szilárdsági méretezéseket mutat be, továbbá összegzi a kompozitból készült szerkezeti részek konstrukciós kialakításának és gyártásának legfontosabb paramétereit.

**Kulcsszavak:** szálerősítéses kompozit, alumínium, acél, kormányvezérlő rendszer, FEM módszer

### 1. BEVEZETŐ

Merev és forgószárnyas légi járművek (továbbiakban együttesen repülőgép vagy repülőeszköz) kormányzásában, napjainkban is elterjedt megoldás mechanikus elvű kormányvezérlő rendszer alkalmazása. Azt, hogy az ember-gép szabályozási körben a repülés biztonságos végrehajtásához kizárólag mechanikai áttételeken keresztül közvetlenül a pilóta fizikai erejével történik a kormányzás, vagy a rendszerben valahol ráségítési módszert is kell alkalmazni, leginkább a repülőeszköz sebességének tartományától és geometriai méreteitől függ.

Általánosságban elmondható, hogy a repülőgépek kormányzása típustól és kategóriától függetlenül azonos módszerrel történik, a pilótát ért környezeti ingerből, majd az így létrejövő információs rendszerből a belső vezérlő hálózaton keresztül jut el a vezérlő jel, illetve a végrehajtott parancs a külső kormánysszervekhez, 1. ábra [1].



1. ábra Repülőgép kormányzása, mint szabályozási körben az információs mechanizmus folyamata [1]

Attól függetlenül, hogy a vezérlő rendszer mechanikusan vagy elektronikusan működik a következő kritériumok teljesülése alapvető, mely meghatározza a mechanizációk kialakítását és anyagszerkezetét. Ennek megfelelően a kormányvezérlést úgy kell kialakítani, hogy:

- ergonómiailag a repülőgépvezetői munkakörnyezet mozgástere akadálymentes legyen;
- minden lehetséges repülési helyzetben biztosítani kell a repülőgépvezető anatómiai és fiziológiai lehetőségeinek maximális kibontakoztatását elsősorban a fiziológiai terhelhetőségi kritériumok alapján;

- a kormánylapok mozgathatósága és kitérítetősége irány és nagyság szerint feleljen meg a kategóriára előírt konstrukciós követelményekkel;
- a kormánylapok véghelyezetei kitéréskor a pilóta által egyértelműen észlelhetők és feldolgozhatók legyenek;
- biztosítsa, hogy a repülési sebesség és/vagy a külső kormányoszlopok kitérésének növekedésekor a kormánylapokon arányosan növekedő, ellentétes irányú kormányerő alakuljon ki;
- mozgatott kormányfelület kiegyensúlyozottsága feleljen meg a repülőgép sebesség-terhelés görbéjén belül minden repülési helyzetben a rezonancia elkerülés kritériumainak és ne jöhesse létre nemkívánatos aeroelasztikus jelenségek (flutter, divergencia, reverzálás stb.).

A mechanikus áttételezett, rásegítés nélküli vezérléssel kapcsolatban a következő pontok teljesülése is elvárt:

- az irányváltási és közvetítő pontokon lehetőleg csapágyazással biztosítsák a tökéletes forgástengelyt, szabad elfordíthatóságot és a konstrukciósan előírt értékű holtjátékot;
- az irányváltási és közvetítő csomópontok számát minimálisra kell csökkenteni, mert a kapcsolatokban fellépő illesztési hézagok, ráhagyások, hozzáadódnak a holtjátékhoz és könnyen a kormánylap kotyogását, lógását idézhetik elő;
- a rendszer tömege, ebből adódóan tehetetlensége a lehető legkevesebb legyen, természetesen úgy, hogy az előírt könnyűépítési, szilárdsági kritériumoknak (limit, ultimate<sup>1</sup>) mindenkor feleljen meg;
- megfelelő számú és kialakítású támasz akadályozza meg a rendszer parancsközlő elemeinek (rudazatok, huzalok) rugalmas kihajlását, megnyúlását ezáltal a vezérlő jel torzulását és/vagy rezonancia létrejöttét;
- lényeges követelmény viszont, hogy az elhelyezett támaszhimbák és görgők nem növelhetik meg lényegesen a súrlódó erőt, nehezítve ezzel a belső kormányoszlop finommotoros mozgatásának pontosságát.

## 2. MECHANIKUS KORMÁNYVEZÉRLŐ RENDSZEREK ELEMEI, KIALAKÍTÁSUK, JELLEMZŐIK, ANYAGSZERKEZETÜK

Mechanikus kormányvezérlés kialakítását meghatározza egyfelől a repülőeszköz rendeltetése, másfelől magát a gépet vezető személyzet elhelyezésének, vagyis munkaterének kialakítása, melynek lehetséges változatait a 2. ábra szemlélteti.

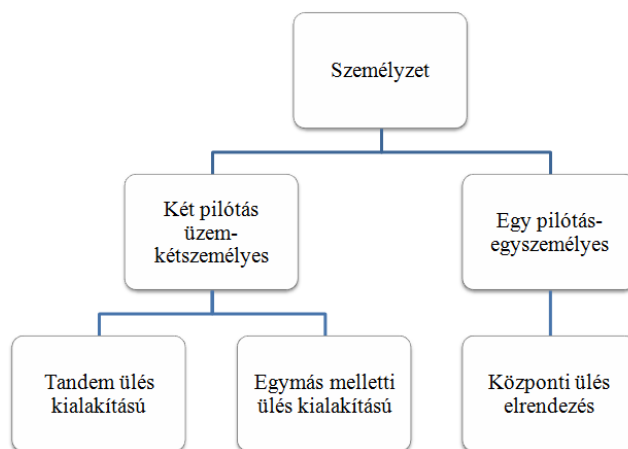
### 2.1. A kormányközpont

A belső kormányoszlopok első rendszereleme a kormányközpont (vagy központi vezérlő kormány), melynek kialakítása egyszerűbb, kisebb teljesítményű repülőgépek esetén hegesztett szerkezetű, még nagyobb sebességű, hangsebesség feletti repülőgépek, nagyobb utasszállító repülőgépek esetén acélöntvényből készülnek. A 3. ábra egy könnyű szerkezetű, együléses ver-

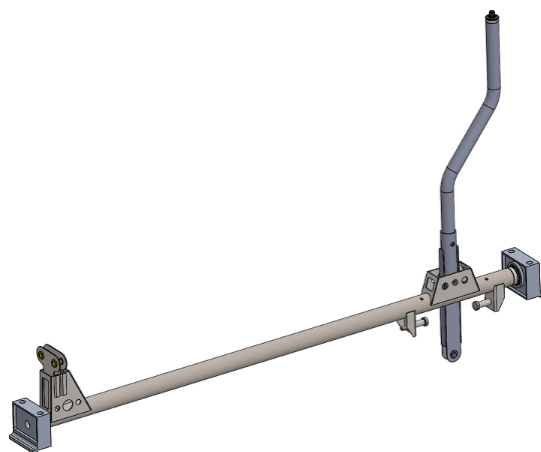
---

<sup>1</sup> Limit, ultimate: repülőeszközök szilárdsági méretezése két állapotra történik, az ún. limit vagyis üzemi pontokra, ebben az esetben a megengedett repülési sebesség-terhelés hatásait deformáció nélkül el kell viselnie a szerkezeti részeknek, az ultimate vagyis törő állapot egy határterhelés ahol a konstruktőrnek úgy kell biztosítani az adott szerkezet szilárdságát, hogy az már deformálódhat (maradó alakváltozást szenvedhet), de még nem törhet el.

senyrepülőgép kormányközpontját mutatja, mely nagyszilárdságú 1.7734.5 (15CDV6) acél-  
 ötvözetből készül hegesztési technológiával. A 15CDV6 egy speciális repülőipari króm-molib-  
 dén- vanádium acél ötvözet, melynek kémiai összetétele az 1. táblázatban, főbb mechanikai  
 tulajdonságai pedig a 2. táblázatban láthatók.



2. ábra Repülőgép személyzetek elhelyezésének, munkatér kialakítás ergonomiai rendszere (saját forrás)



3. ábra Együléses versenyrepülőgép hegesztett kormányközpont szerkezeti kialakítása (saját tervezés)

Összetevő	C %	Mn %	Si %	S %	P %	Cr %	Mo %	V %	Cu %	Ni %
Min	0,16	1,00	0,16	0,002	0,011	1,46	0,96	0,24	0,08	0,09

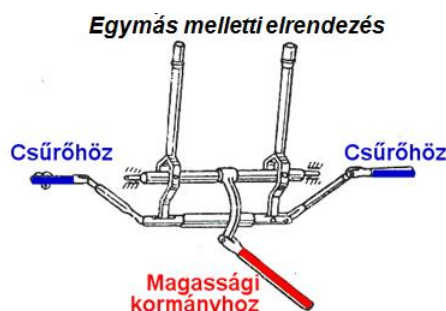
1. táblázat 15CDV6 (1.7734.5) Cr-Mo-V acél ötvözet vegyi összetétele

Cső átmérő és falvastagság/mechanikai értékek	12×2	16×1,5	18×1,5	20×1,5	22×1,5	22×2
Folyáshatár $R_{eH}$ N/mm <sup>2</sup>	694	970	939	1006	967	958
Szakítószilárdság $R_m$ N/mm <sup>2</sup>	850	1108	1133	1121	1088	1101
Brinell keménység HB	320	320	320	320	320	320
Vickers keménység HV	339	339	339	339	339	339
Egyezményes szakadási nyúlás A5 %	22,5	16	16	16	15	17

2. táblázat 15CDV6 (1.7734.5) Cr-Mo-V acél ötvözet cső szerkezetek mechanikai jellemzői

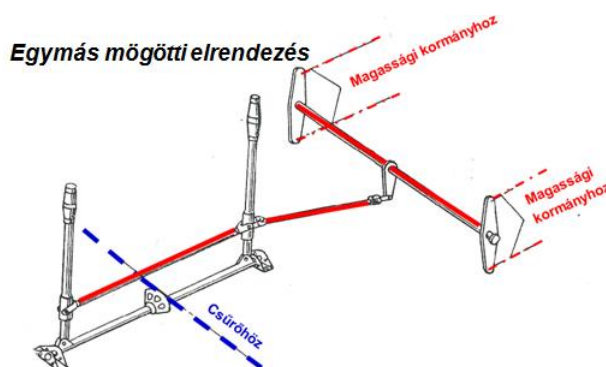
Az alapanyag rendkívül jól hegeszthető, kis karbon tartalma miatt edződésre nem hajlamos, az alkalmazott ötvözetek következtében magas folyáshatárú, szívós anyag. Mechanikai összetételének köszönhetően vékony falvastagságú ( $s < 3$  mm) lemezek, csövek hegesztésekor, egy-két so-

ros varratok készítése során előmelegítést és utólagos hőkezelést nem igényel a hegesztés technológiája. A 4. ábra [2] kétszemélyes egymás melletti ülés elrendezésű kormányközpont kialakítását szemlélteti, melynek csapágyazása a repülőgép keresztengelyével párhuzamosan kerül kivitelezésre, még az 5. ábra [3] szintén egy kétszemélyes, de egymás mögötti ülés elrendezésű kormányközpont elvi, konstrukciós rajzát szemlélteti, melynek csapágyazása a repülőgép hosszengelyével párhuzamosan kerül kialakításra.



4. ábra Egymás melletti ülés elrendezésű kormányközpont elvi kialakítása [2]

Napjainkban, a 3. ábrán látható 15CDV6 anyagú kormányközpontot olyan TIG (AWI) hegesztés technológiai eljárással gyártják, mely a II. világháborút követően, leginkább az 1970-es években terjedt el széles ipari környezetben. Ezt megelőzően hegesztett kormányközpontok elemei ötvöztelen szénacélból készültek leginkább lánghegesztéssel. A 15CDV6 anyag hátránya magas ára, így kisebb repülőgépek esetén e helyett a 25CrMo4 (1.7218) alapanyagot célszerűbb alkalmazni, melynek karbon tartalma eléri az edzhetőség határát,  $c = 0,25-0,28\%$ , ebből adódóan hegesztése szigorúbb eljárást igényel, mint a 15CDV6 anyagé. Szintén alternatíva lehet még a jóval kisebb szilárdságú, de olcsóbb árfekvésű S355 vagy 1.4305 ausztrálszerű szövetszerkezetű korrózióálló acél alkalmazása is.



5. ábra Egymás mögötti ülés elrendezésű kormányközpont elvi kialakítása [3]

## 2.2. Csatoló elemek

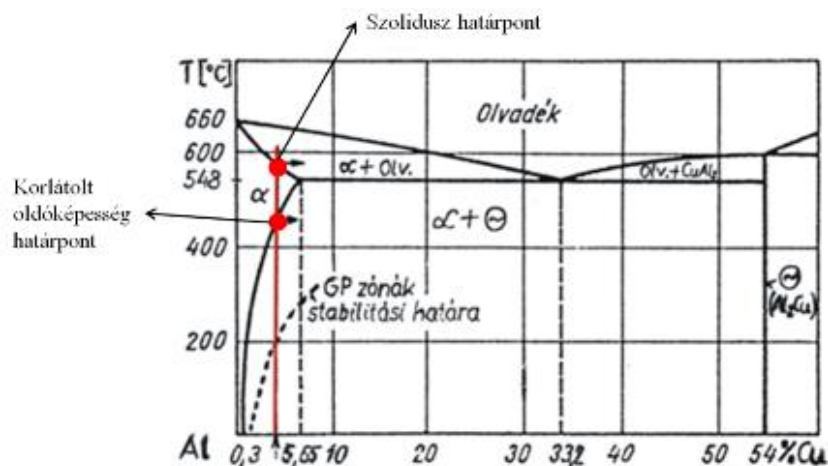
A kormányközpont és a mozgatni kívánt kormánylap közötti kapcsolatot csatoló elemekkel biztosítjuk, vezérléstechnikai szempontból megkülönböztetünk rudazatos és sodronyköteles kialakításokat. Ezek elemei a rudak, csapágyazott rúdvégek, szögemelő- szögváltó himbák, melyek lehetnek görgők vagy tám himbák, továbbá köteles megoldás esetén a csigák, hornyolt kerekek, drótkötelek, kötélfeszítők és kötélvégek. Utóbbiak többsége az elmúlt 50 esztendő során jelentős fejlődésen ment keresztül. Kezdetben acélból kovácsolt darabok terjedtek el, majd a lemez alakítás fejlődésével és az alumínium repülőipari térhódításával szegecselt szerkezetek, illetve ezt követően a 90-es évek végén tapasztalt gyorsütemű számítógépes technológiai

CAD/CAM háttér mára már biztosítja az ultra precíziós felületi megmunkálással készült alak és tömeg optimalizált CNC mart elemek rendelkezésre állását.

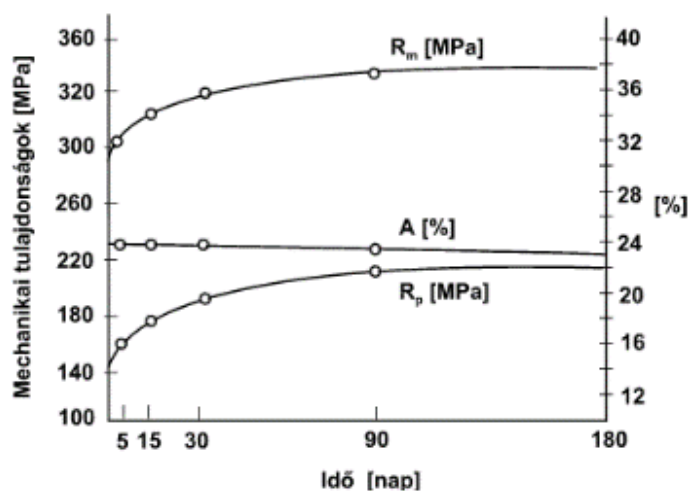
Csatoló elemek közül a legfontosabb a tolórúd, melyek legtöbbször még ma is alumínium ötvözetből, duralumíniumból készül, de elterjedt a magnézium ötvözetek használata is, és bizonyos esetekben acél csöveket is alkalmaznak. Utóbbit elsősorban akkor választják, ha magasabb a hőterhelés, vagy helyigény miatt szerkezeti szempontok szem előtt tartása végett a külső átmérőt kisebbre kell választani, így csökkentve az inerciát amihez az alumínium szilárdsága már kevés lenne. A tömeg ideális értéken tartására az alumínium tolórudak vékonyfalú csövekből, maximum 1000–1200 mm hosszú darabokból készülnek és tám-himbák közbeiktatásával vagy görgős támasszal merevítik azokat. Az alumínium csövekhez a két végen azonos anyagú, esztergált betét csatlakozik, ami szorosan illesztett és szegecseléssel biztosítja közöttük a mechanikai kapcsolatot (pl. 6. ábra). A durál az alakítható és hőkezelhető alumínium ötvözetek csoportjába tartozik, fő ötvözője a réz és a magnézium, specializált repülőipari alkalmazása a 2024-es alumínium ötvözet, ami a 2000-es ötvözet csoport tagja. A durál ötvözetek szakítószilárdsága általánosan 300–400 N/mm<sup>2</sup>-ig növelhető, bizonyos esetekben elérhetők >450 N/mm<sup>2</sup>-es értékek is megfelelő célzott nemesítési (hőkezelési) eljárással. Az alumínium nemesítése során az ötvözet szilárdságának növekedését rendkívül finom eloszlású kiválásokkal érik el, ezt a folyamatot hívják kiválások keményítésnek. A szilárdságnövelés lehetőségét az biztosítja, hogy az alapanyagban, az alumíniumban hozzájuk létre a kiválásokat, amik korlátozzák a diszlokációk mozgását. Ez a rácsszerkezetet tekintve akkor megfelelő, ha az alumínium és a kiválás rácsparaméterei közel azonosak lesznek, vagyis egymással koherensek. A kiválások keményítés két lépcsős folyamat, melyben elsőként  $\alpha$ -homogén szilárd oldatot hozzanak létre izzítással, mely során a kiválások teljes feloldását érik el. Ez egy diffúziós folyamat, mikor a létező vegyület fázisokat teljes oldatba viszik. Az  $\alpha$ -homogén szilárd oldatot úgy érik el, hogy a korlátolt oldóképességet határoló hőmérséklet fölé hevítik az ötvözetet és ott hőntartják, lásd a 7. ábrát, ahol az Al-Cu ötvözet állapotgörbéje látható. Az ábrán látható  $\alpha$  szilárd oldat maximális oldhatósága 5,65% Cu -nál (réznél) van  $T = 548 \text{ }^\circ\text{C}$  hőmérséklet értéken. A piros vonallal jelölt ötvözet 4% Cu (réz) esetében a hevítés hőmérséklete a jelölt két piros pont, vagyis a szolidusz és a korlátolt oldhatóság vonala közé kell eszen, mert csak így biztosítható, hogy az  $\alpha$  szilárd oldat tartománya elérhető legyen. Az izzítást követően következik az ötvözet gyors-hűtése mikor is túltelített  $\alpha$ -szilárd oldatot hoznak létre, majd ezt követően a harmadik fázis folyamata a megeresztés, amit öregítésnek is neveznek. Az öregítés lehet természetes (hevertetés) vagy mesterséges folyamat, különbség közöttük az ötvözet elérhető szilárdsága. Tulajdonképpen ez a folyamat maga a kiválások keményítés. A hevertetés hátránya, hogy rendkívül hosszú, bizonyos esetekben akár több hónap is lehet, (lásd a 8. ábrát). A nemesíthető és alakítható alumínium ötvözetek (3. táblázat) legismertebb típusa a már előzőekben is bemutatott durál, ami háromalkotós. Hátránya, hogy érzékeny a korrózióra ezért a felületi kezelése szükséges.



6. ábra Szegecselt alumínium tolórúd



7. ábra Al-Cu kétalkotós ötvözet egyensúlyi diagramja [4]



8. ábra Hevertetés természetes lefolyása, mechanikai jellemzők ( $R_m$  szakítószilárdság,  $R_p$  folyáshatár, A nyúlás) változása az idő függvényében [5]

Ötvözet típus	Szakítószilárdság N/mm <sup>2</sup>	Öregítés folyamata	Korrózióállóság	Képlékeny alakíthatóság	Hegeszthetőség	Egyéb	Sorozat
Al-Cu-Mg	~ 450	mesterséges/természetes	1	3	1	durál	2000
Al-Mg-Si	~ 300–325	mesterséges/természetes	3	4	3	természetesen öregített folyáshatára kevesebb	6000
Al-Zn-Mg	~ 350	mesterséges	1	1	1		7000
Al-Zn-Mg-Cu	~ 500	mesterséges/természetes	1	1	1		7000

3. táblázat Nemesíthető alumínium ötvözetek jellemzői (jellemzők 1 és 5 között, 1 legrosszabb, 5 legjobb)

Tolórudak esetén elterjedt még az AlMgSi0,5 és AlMgSi1-es ötvözet típus is, ezek jóval kisebb szilárdságúak, mint a durál. Mind a kettő a 6000-es ötvözet csoport tagja, főötvözőjük a magnézium és a szilícium. Az alumínium ötvözetekből készült tolórudak alkalmazásának legnagyobb problémája, hogy a kialakítható hosszuk korlátozott, tömeg szempontokat figyelembe véve vékony falvastagságúak ebből eredően kihajlással szembeni ellenállásuk limitált. Az ilyen

tolórúd rendszerbe több helyen szükséges közvetítő támhimbák vagy görgős támaszok beépítése, ami növeli a rendszer tehetlenségét és súrlódásból adódóan a megvezetés pontossága is csökken. A 9. ábra egy ilyen „kényszerűségből” beépítési megoldást mutat be, aminek célja a vezérlőrúd kihajlásának meggátlása a tolórudakban.



9. ábra Közvetítő himba alkalmazása, alumínium tolórudas kivitelezésben

A rúdvégek betétjébe a csatlakozások biztosításához a legtöbb esetben gömbcsapágyat építenek be, ami lehet külső vagy belső menettel ellátott szárú. Tapasztalatom alapján a kenésmentes kialakítású tolórúdvég gömbcsapágyak, (lásd 10. ábra, maintenance-free rod ends<sup>2</sup>) rövid élettartamúak, akár 50 repült óra után szükséges cseréjük, repülőgépekbe történő beépítését nem javaslom. Ezeket olyan helyeken célszerű alkalmazni, ahol egy viszonylagos állandó erőhatás ébred és a súrlódás fajlagosan kisebb értékű, a folyamatosan váltakozó dinamikus erőhatást hosszú távon nem viselik el, aminek eredménye, hogy a gömb, idővel megszorul.



10. ábra „Maintenance-free rod end” típusú tolórúd vég gömbcsapágy [6]

Kenést igénylő rúdvég gömbcsapágyak (maintenance required rod end<sup>3</sup>, lásd 11. ábra), beépíthetősége már részben biztosított hosszabb távon, folyamatosan váltakozó dinamikus erőhatások ellenállásával szemben. Egyetlen hátrányuk, hogy a folyamatos üzemeltetésük során a megfelelő kenési állapotról nagyon alaposan gondoskodni szükséges. Leginkább két típusuk ismert, az acél gömb – acél fészek és acél gömb – bronz fészek kivitelek. Ha folyamatos kenési állapot nem áll fenn a gömb és fészek közötti alternáló erőhatás a mechanikai kapcsolatot meglazítja és a csapágy gömb lógni fog, ami a repülőgép teljes kormányrendszerének növekedő holtjátékához fog vezetni.

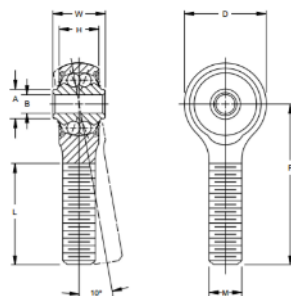


11. ábra „Maintenance required rod end” típusú tolórúd vég gömbcsapágy [7]

<sup>2</sup> Maintenance-free rod ends: kenésmentes kialakítás az üzemeltetés során, kenés hiányát a csatlakozó felületek biztosítják [6]

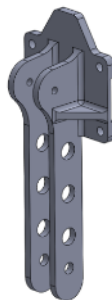
<sup>3</sup> Maintenance required rod ends. kenést igénylő kialakítás az üzemeltetés során [7]

Több csatolásos rendszerben ahol három, négy vagy akár ettől több szakaszt kell vezérlő-rudakkal összekötni ajánlott a gömbcsapágyak helyett a 12. ábrán látható tolórúdvég golyóscsapágy rendszert alkalmazni. A csapágy önbeálló típusú, előnye a gömbcsapággal szemben, hogy nem teljes felületen történik az erőátadás, hanem golyósoron így kisebb a súrlódás és az illesztés játéka maximálisan 0,010 mm-es, a kapcsolat precíziósan vezérelt, az egymással érintkező részek kadmiu-mozottak, a felületeknek sokkal jobb a kopásállósága. Az érintkező golyók és a gyűrű felülete speciálisan védhető tömítéssel így elzárható a csatlakozás a környezeti hatásoktól.

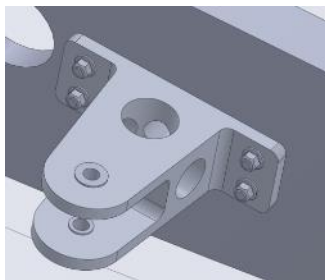


12. ábra Önbeálló golyóscsapágyssal felépített tolórúd vég [8]

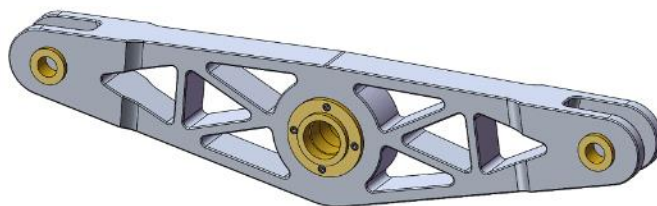
Az előzőekben bemutatott alumínium ötvözetek mellett elterjedt típus még, - elsősorban a CNC megmunkálással készülő alkatrészek során – a 7075 jelzésű alumínium ötvözet is, melyet könnyű tömege mellett kiváló mechanikai tulajdonságai jellemeznek. Utóbbi speciálisan a repülőipar részére került kifejlesztésre az Alcoa cég által több mint 50 évvel ezelőtt. Nemesített állapotban a folyáshatára elérheti a  $480 \text{ N/mm}^2$  értéket, szakítószilárdsága pedig  $540 \text{ N/mm}^2$  is lehet, emellett kifáradási határa és törési szívóssága is megfelelő. Tipikus példái az ötvözet alkalmazására a 13. ábrán látható magassági kormány mozgását vezérlő himba, a 14. ábra szerinti váltó himbabak tartó és a 15. ábrán bemutatott irányváltó himba.



13. ábra Magassági kormány, vezérlőhimba és bekötés CNC mart alkatrész (saját tervezés)

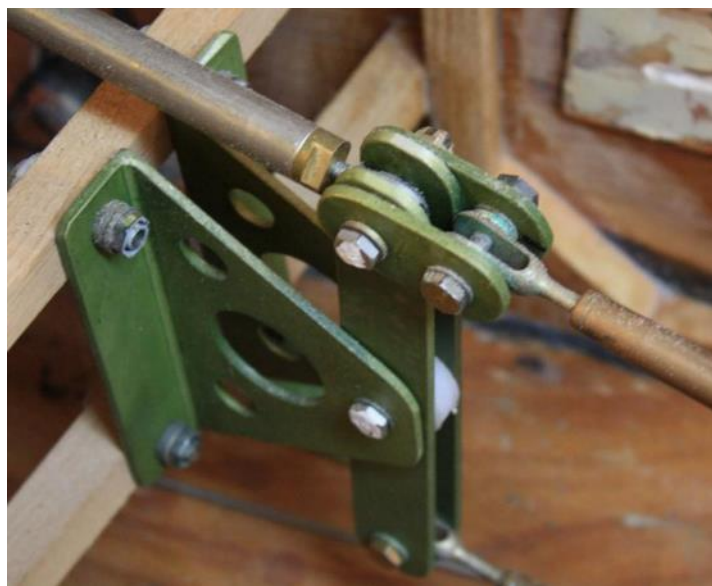


14. ábra Váltó himbabak tartó CNC mart alkatrész (saját tervezés)



15. ábra Irányváltó himba CNC mart alkatrész (saját tervezés)

Himbák, és egyéb tartó elemek esetén nem csak mart tömb elemek készülnek nemesíthető alumínium ötvözetekből, hanem különféle lemez alkatrészek is, hiszen azok többsége jól alakítható és tetszőleges alakú darabok készíthetők lemezmegmunkálással. Erre mutat példát a 16. ábrán látható egyszerű mechanizmus.



16. ábra Alumínium ötvözetű lemez alkatrészek, egyszerű himba mechanizmus

### 3. KORMÁNYVEZÉRLŐ RENDSZEREK ELEMEINEK TEREVZÉSI ÉS SZILÁRDSÁGI KÖVETELMÉNYEIK

Kormányvezérlő rendszerek szilárdsági méretezésének követelményeit egyezményes légügyi előírások határozzák meg, melyet az adott repülőgép típus tervezése és megfelelőségi igazolása (certifikálása) során igazolni szükséges. A tervezés célja, a fellépő biztos terhelések és a tervező által alkalmazott szerkezeti anyagok ismeretében, a kapcsolódó elemek szükséges minimális keresztmetszetének megválasztása, úgy, hogy a repülő üzem során a megengedett sebesség-terhelés határgörbe pontjain belül a fellépő maximális terhelések mellett sem ébrednek olyan feszültségek, amik tönkremenetelhez vezethetnek. A legismertebb CS<sup>4</sup>-23 tervezői előírás értelmében a kormányrendszert két állapotra kell méretezni:

- meg kell határozni a kormánylap felületeken fellépő aerodinamikai erőket; amik aerodinamikai jellegűek;

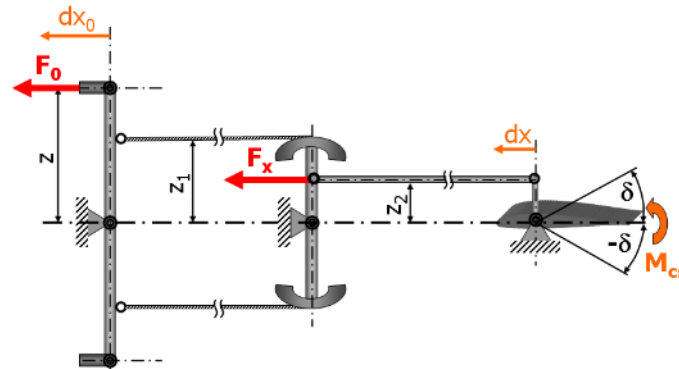
<sup>4</sup> Európai Repülés-biztonsági Ügynökség - European Aviation Safety Agency (EASA) által kiadott Certification Specification-ok (CS)

- a pilóta maximális fizikai ereje izomerje által a kormányközponton keresztül bevezetett erők hatásait kell végigszámolni a belső kormányrendszeri elemeken.

Természetesen a két vizsgálati módszer egymás komplementerei, hiszen a külső kormányfelületekről a rendszerbe inputként bejutó erők a végigfutó hatásláncon, a botkormányon jelentkező outputként nem lehet nagyobb, mint amit az előírás a pilóta maximális izomerjének szélső értékére megad. Tekintsük példaként a 17. ábrán látható mechanizmust, ahol az  $M_{cs}$  csuklónyomaték a CS-23 előírás A23.11-es pontja értelmében meghatározható a következők szerint:

- meg kell határozni a kormánylap felületén ébredő egységnyi  $m^2$  felületre vonatkoztatott eloszlást, ennek értéke  $N/m^2$ -ben adódik;
- ezt követően át kell számolni a tényleges kormányfelületre érvényes terhelés eloszlást, ami már erőként Newton értékben adódik;
- a kapott erő a lap forgási pontjához viszonyítva adja a csuklónyomaték nagyságát.

Az  $M_{cs}$  csuklónyomaték ismeretében a hatásláncon található tolórudakon fellépő erőhatások már meghatározhatók a kararányok vagy munkák ismeretében.



17. ábra Példa kormányrendszer mechanizmus erő mechanikai számítására [9]

Erő meghatározás a munkák egyensúlyi feltételeiből:

$$\int F_x \cdot dx - \int M_{cs} \cdot d\delta = 0 \quad (1)$$

$$\int F_x \cdot dx - \int F_{x0} \cdot dx_0 = 0 \quad (2)$$

ahol:

- $M_{cs}$  – csuklónyomaték,
- $dx_0$  és  $dx$  – lineáris elmozdulások
- $d\delta$  – szögkitérés
- $F_x$  – belső erő
- $F_{x0}$  – külső terhelő erő

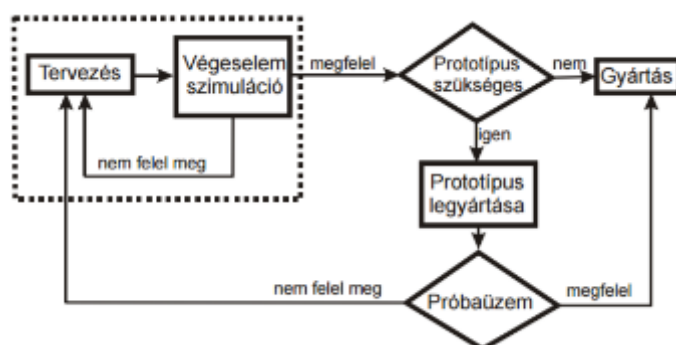
Az (1) és a (2) egyenletekben megadott munkák egyenlet rendszere azonosan eredményezi azt, amit a nyomatéki egyensúlyból is meghatározhatunk a központi forgáspontra:

$$F_0 \cdot z = F_x \cdot z_2 \rightarrow \quad (3)$$

$$F_x = F_0 \cdot \frac{z}{z_2} \quad (4)$$

### 3.1. FEM<sup>5</sup> módszer a gyakorlatban, hibák vizsgálata

Kormányvezérlő rendszerekbe épített elemek, összeállítások, napjaink mérnöki gyakorlatában gyorsan és rugalmasan ellenőrizhetők különféle szilárdsági szempontok megfeleltetésének FEM eljárásokkal. E módszer egy virtuális testben (például CAD<sup>6</sup> modellen) kialakuló elmozdulás mezőt közelíti úgy, hogy a test elemei közötti kapcsolat folytonos, az elemeket csomópontok kötik össze, amik elmozdulását vizsgáljuk, amit egy külső hatás (lehet erő, hőáramlás stb.) vált ki. A csomópontok elmozdulását a helyzeti energia minimumból kalkuláljuk differenciál egyenletrendszer megoldásán keresztül. Az FEM módszer mára már teljesen beépült a mérnöki gyakorlatba és a termékfejlesztés, a gyártás szimuláció és a gyártási folyamatok modellezésének az eszköze, melyet a 18. ábra is jól mutat.



18. ábra FEM szimuláció helye a termékfejlesztésben és a gyártásban [10]

A véges elem modellezés területei megjelennek termékek szilárdsági, áramlási, hőtani, elektromos, mágneses, kinetikai vizsgálataiban, üzemeltetési körülmények elemzésében, gyártás szimulációban és komplett élettartam vizsgálatokban is.

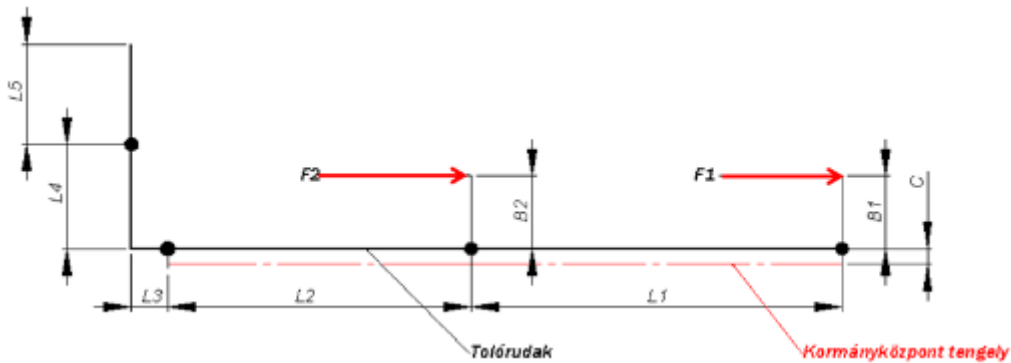
Mechanikus működési elvű kormányrendszerekben a szilárdsági méretezéseket a következő gondolatmenet szerint szükséges mechanikai szempontból vizsgálni:

- ➔ meg kell határozni a kinematikai blokkvázlatot (példaként lásd a 19. ábrát, ami a 20. ábrán látható Halley Kft által gyártott Apollo Gyro kormányközpontját szemlélteti), hogy a hatáslánc teljes egészében az erő bevezetések, elmozdulások és szögkitérések tekintve a függelmi kapcsolatok vizsgálhatóak legyenek;
- ➔ a csatoló elemek mindegyikére el kell végezni a statikai erőszámításokat, hogy ismertté váljon, az egyes elemeken és egységeken mekkora erők keletkeznek;
- ➔ utóbbiak függvényében egyszerűbb geometriai alakzatok, elemi szilárdsági módszerekkel is méretezhetőek, ellenőrizhetőek, bonyolultabb geometriai alakzatok esetében javasolt a FEM módszert használni. A következő alkatrész csoportok célszerűen vizsgálhatóak a már említett FEM eljárással:
  - tolórudakat kihajlás és rezonancia szempontjából kell vizsgálni;
  - himbákat, karokat és fordító egységeket húzás-nyomás eseteire;
  - tolórudba integrált betétek rögzítő elemeit, nyírásra és felületi palástnyomásra, ha a betét ragasztott, akkor a nyírás mellett lefejtés esetét is ellenőrizni szükséges, esetenként különféle hőmérsékleteken;

<sup>5</sup> FEM (finite element method): véges elem modellezés

<sup>6</sup> CAD (Computer-aided design): számítógéppel támogatott mérnöki tervezés

- csigákat és közvetítő kerekeket radiális irányú nyomásra kell méretezni.

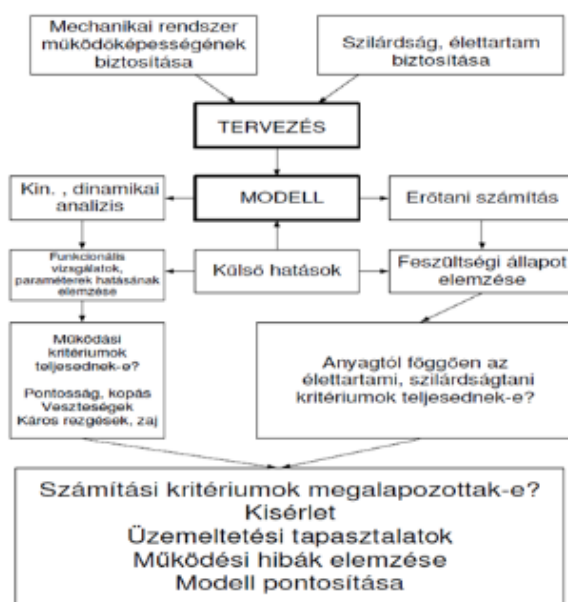


19. ábra Példa kinematikai blokkvázlatra a 3D tervezett modell felépítés alapján, referenciaként lásd a 20. ábrát (saját tervezés)



20. ábra Apollo Gyro 3D CAD modellje a térbeli kormányközponttal integrálva (saját forrás)

Nagyon lényeges, hogy az FEM módszer eredményességét több tényező együttesen befolyásolja és tudni kell, hogy az eljárás a mérnök kezében csak egy eszköz és nem pótolja a mélyebb matematikai, mechanikai ismeretek hiányát. Egy jól felállított végeselem modell megalkotásához stabil mechanikai háttérismeretek szükségesek. Ahhoz, hogy megbízható eredményeket kapjunk, és el is tudjuk hinni a számított értékek a valósághoz a lehető legközelebb áll, alapos előkészítés és a legtöbb esetben nagy gyakorlati rutin szükséges. Az FEM eljárásokra önmagukban nem szabad támaszkodni, minden esetben empirikus tesztek elvégzésére is szükség van. Ezt követően valós körülmények között tapasztalt értékekkel folyamatosan össze kell vetni a végeselem analízisek eredményeit és ennek megfelelően, - ha szükséges - a bemeneti modelleket újra és újra paraméterezni. A 21. ábrán látható folyamatábra [11] pontosan az előbb leírtakat mutatja be, ami a repülőgépek kormányvezérlő rendszereinek mechanikai méretezésében is alkalmazásra kerül.



21. ábra Tervezés és modellezés folyamata, az FEM módszer alkalmazásának szerepe [11]

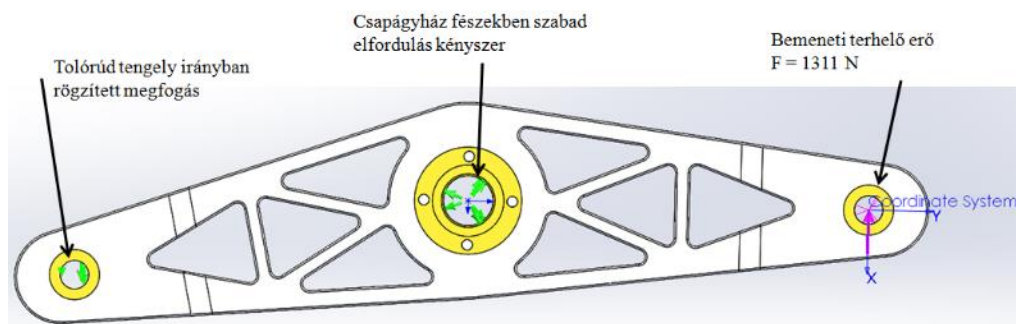
### 3.1.1. Irányváltó himba FEM vizsgálata

A 15. ábrán látható himba egy repülőgép magassági kormányrendszerének része, irányváltás fordítására kerül beépítésre, anyaga Al-7075-T6, gyártástechnológiailag CNC<sup>7</sup> megmunkálásal készül. A következőkben a himba CS-23 tervezői előírás szerinti megfelelőségét vezetem le, amit az A23.11-es pont alapján végzek. A magassági kormánylapról a himbát érő, a tolórúdtól származó erő nagysága (itt nem részletezett számítás alapján)  $F = 760 \text{ N}$ , amit  $1,5 \times 1,15$ -szörös biztonsági tényezővel megnövelve a méretezési erő  $F_{\text{méretezési}} = 1311 \text{ N}$ .

A végeelem vizsgálat első lépése, hogy meg kell adni a peremfeltételeket, amik a jelenlegi példában a következők:

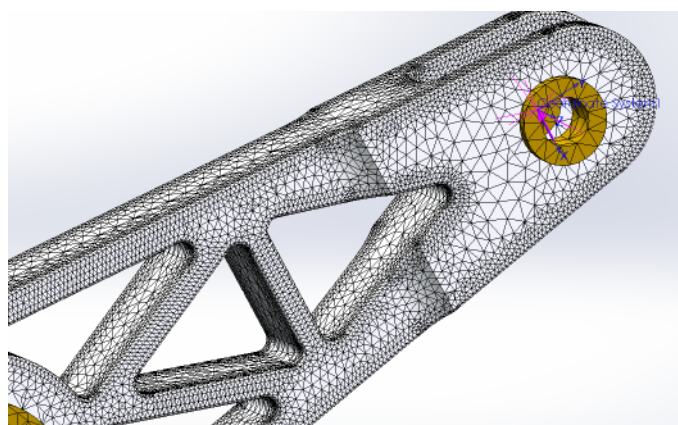
- a himba középtengelyében oldalról csatlakozó bronzperselyek találhatóak, amik hernyócsavarokkal kerülnek rögzítésre a mart himbában, ezekbe kerül beépítésre oldalanként egy-egy mélyhornyú golyóscsapágy, amik helyén a szimulációban a felületet olyan megfogási kényszerrel látjuk el, hogy a csapágyazás tengely vonalán, a himba szabadon elfordulhat, minden más irányban annak mozgása kötött;
- a himba két végéhez a villákba csatlakoznak a tolórudak, azok közül az alsónak a furatát egy pillanatnyi statikus állapotba vizsgálva a rendszert a tolórúd erőhatás vonalának axiális irányába rögzítjük;
- a mart himba és a bronz perselyek csatlakozási felületei között illesztési, ún. kontaktfeltételeket kell megadni, aminek értelmében azok felület a felülettel érintkeznek, egyszerűsítés miatt, mivel az eredményt nem befolyásolja a csatlakozó felületek között súrlódási együtthatót nem adunk meg;
- a himba felső villás részén a tolórúdvég csatlakozási pontjában egy lokális koordináta rendszer kerül definiálásra, amibe egy virtuális erőt redukálunk és a két bronz persely belső furat palástjára működtetjük a már meghatározott  $F_{\text{méretezési}} = 1311 \text{ N}$  erőt,
- az előbbieken leírtak a 22. ábrán láthatóak.

<sup>7</sup> CNC – Computer Numerical Control (CNC) olyan szerszámgép, amely programozható mikroszámítógépet is tartalmaz, ami a vezérlését végzi.

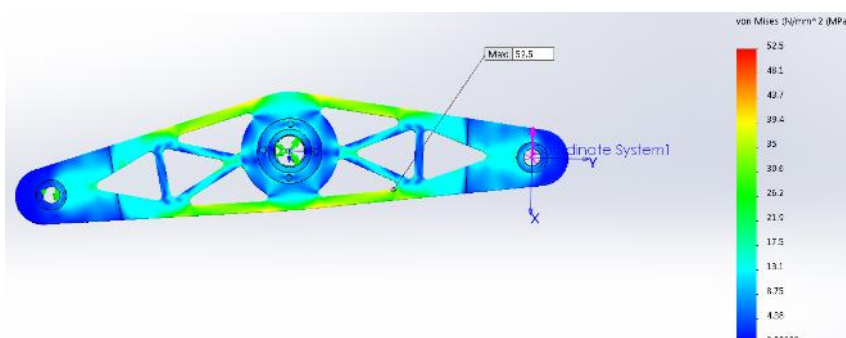


22. ábra Himba peremfeltételeinek megadása (saját tervezés)

Az FEM eljárás második lépéseként létrehozuk a végelem hálót (23. ábra), ami az analízis talán legfontosabb szakasza. Ezt a folyamatot területi korlátok következtében nem részletezem, az alkalmazott háló típusa szilárd térfogati háló, ami több mint 300 000 darab elemből és közel 470 000 darab csomópontból tevődik össze. E lépés során meg kell adni az egyes geometriai alakzatok anyagminőségét, a mart himba Al-7075 T6-os, még a bronz perselyek CuSn12 ötvözet típusok.



23. ábra Himba végelem hálója (saját tervezés)



24. ábra Himba HMH szerinti feszültség eloszlási mező (saját tervezés)

A harmadik lépésben az analízist a megadott paraméterekkel kell megoldani, majd az eredményeket grafikusán megjeleníteni, amiket kiértékelni és elemezni szükséges (lásd a 24. ábrát). Az eredmények azt mutatják, hogy a maximális feszültség a HMH<sup>8</sup> elmélet alapján

<sup>8</sup> HMH elmélet: Huber-Mises-Hencky szerinti szilárdsági méretezés, egy egyenértékű, redukált feszültséget ad meg az összetett igénybevételek számításánál, a vizsgált feszültségállapottal azonosan veszélyes feszültségállapot a test minden pontjában.

$\sigma_{\text{HMH}} = 52 \text{ N/mm}^2$ , ami a himba folyáshatárához viszonyítva több mint, 8-soros a számított feszültségnek, így számítás alapján az megfelel.

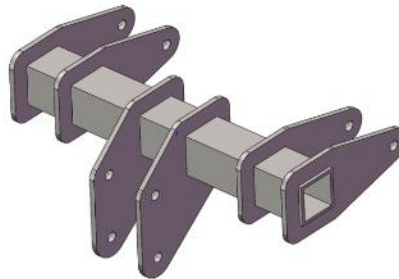
### 3.1.2. Autogyro kormányrendszer vizsgálata

A 20. ábrán látható az autogyro kormányrendszerében az egyik legfontosabb alkatrész, a 25. ábrán látható központi alsó vezérlő himba. Anyaga 1.4305-ös ausztenites korrózióálló acél, aminek  $25 \times 25 \times 2$ -es zártszelvényére, az előre lézerezelt kivágott lemezeket hegesztéssel rögzítik. A lemezek mindegyike 3 mm vastag, egy oldalról, egysoros varrat készül AWI hegesztéssel. A himba bonyolult több tengely irányú összetett igénybevételre kell, elviseljen, így azt FEM módszerrel célszerű elemezni. Az első lépés, hogy a méretezéshez szükséges bemeneti adatokat meghatározzuk. A 19. ábrán látható kinematikai blokkvázlat alapján az  $L_1$  számú tolórudon ébredő erő nagysága a következő:

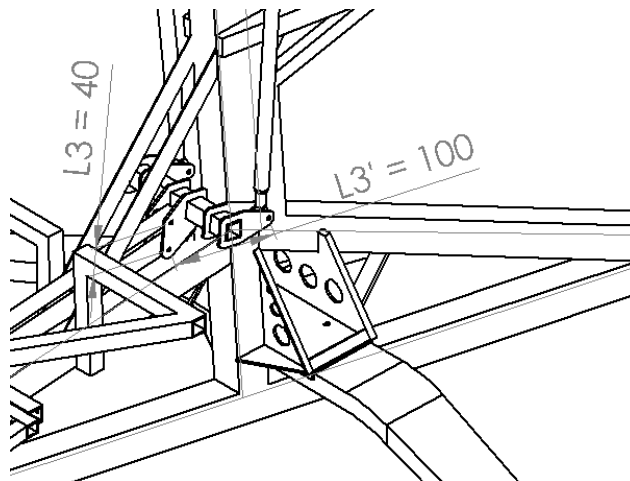
$$F_1 \cdot B_1 = F_{L1} \cdot C \rightarrow F_{L1} = \frac{F_1 \cdot B_1}{C} = \frac{445 \text{ N} \cdot 410 \text{ mm}}{38 \text{ mm}} = 4801 \text{ N} \quad (5)$$

Ugyanez az erő jelentkezik az  $L_2$  számú tolórudon, amit a 25. ábrán látható himba továbbít a felső, 26. ábrán látható tolórudakba a következő képen:

$$F_{L2} \cdot L_3 = F_{L4} \cdot L'_3 \rightarrow F_{L4} = \frac{F_{L2} \cdot L_3}{L'_3} = \frac{4801 \text{ N} \cdot 40 \text{ mm}}{100 \text{ mm}} = 1921 \text{ N} \quad (6)$$



25. ábra Központi alsó vezérlő himba Halley Apollo Autogyro (saját tervezés)

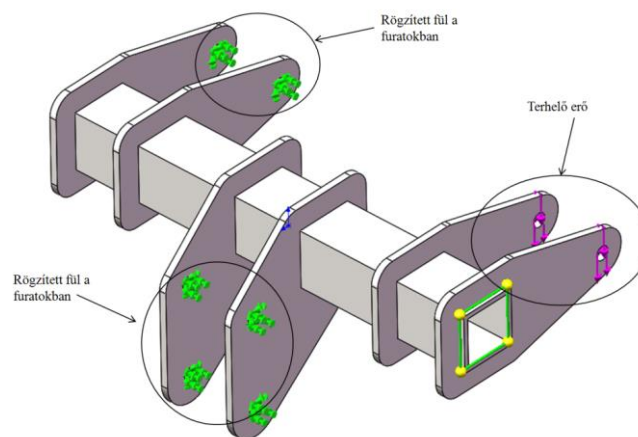


26. ábra Központi alsó vezérlő himba tolórud erőhatás továbbítás (saját tervezés)

A himba esetében a legfontosabb kérdés, hogy mekkora varrat keresztmetszet szükséges ahhoz, hogy az (5) és (6) egyenletekben kapott erő értékeket a szerkezet 1,5-szörös biztonsággal nö-

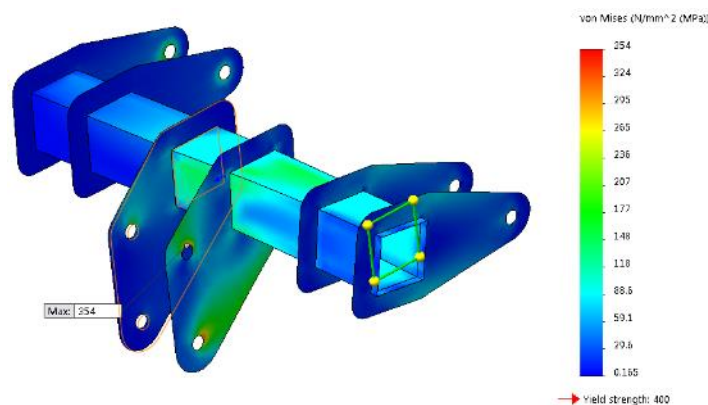
velve képes legyen elviselni statikusan. Első esetben vizsgáljuk meg a himba hegesztési varrait a függőleges irányú erőhatásra ami  $F_{L4-bízt} = 1,5 \times 1921 = 2882 \text{ N}$ , ebben az esetben a peremfeltételek a következők:

- a 27. ábrán látható módon a himba egy adott pillanatnyi állapotában a 19. ábra blokkvázlata alapján a kormányközponti tengely (piros szaggatott vonallal jelölt) és az  $L_2$  tolórúd és az  $L_4$  tolórúd bal oldali csatlakozási csomópontjában rögzített, a jobb oldali fűlnél működtetjük az  $F_{L4-bízt} = 1,5 \times 1921 = 2882 \text{ N}$  erőt;
- a szerkezet minden elemére a kapcsolat hegesztett, a zártszelvény és a lemezfülek között egyoldali sarokvarratot definiálunk, mely esetén megadjuk a varrat geometriai méreteit és mechanikai paramétereit.



27. ábra Központi alsó vezérlő himba függőleges irányú erőhatás peremfeltételek vizsgálata (saját tervezés)

A himba elemi geometrián ébredő maximális feszültség a 28. ábrán látható,  $\sigma_{HMH} = 354 \text{ N/mm}^2$ , tehát az 1.4305-ös anyag szakítószilárdságához viszonyítva megfelel.

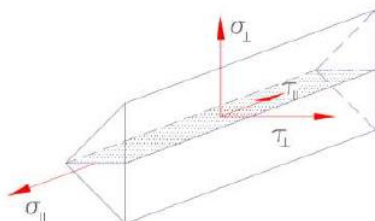


28. ábra Központi alsó vezérlő himba függőleges irányú erőhatás vizsgálata HMH szerinti feszültség eloszlás (saját tervezés)

A kritikus fül a közvetlen erőhatás alatt levő, így annak a hegesztési varrat keresztmetszetét kell ellenőrizni. A fület 4 darab 25 mm hosszú, egy oldali sarokvarrat rögzíti a zártszelvényhez, melyből két varrat merőleges lemezbekötés, még a másik két varrat, hosszanti irányú. Sarok varrat esetén, általánosságban négy varratfeszültséggel kell számolni, a 29. ábra alapján, amik a következők:

- $\sigma_{\perp}$  – varrat hossz tengelyére merőleges normál feszültség;
- $\sigma_{\parallel}$  – varrat hossz tengelyével párhuzamos normál feszültség;

- $\tau_{\perp}$  – varrat hossztengetyére merőleges nyírófeszültség;
- $\tau_{\parallel}$  – varrat hossztengetyével párhuzamos nyírófeszültség.



29. ábra Sarokvarrat varratfeszültségei

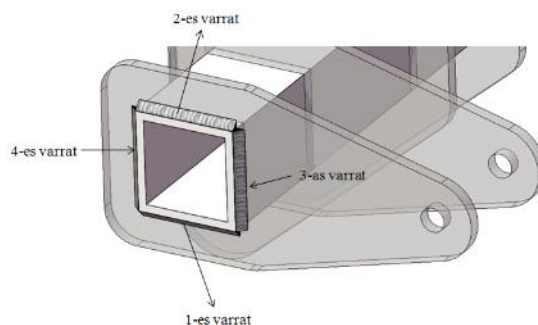
A himba merőleges és hosszirányú varratai esetén a varratfeszültségek értékei és értelmei változnak így ezek kézi számítása hosszadalmas, a 30. ábrán látható varrat sorok egyes feszültségei a 4. táblázatban kerültek összegzésre, amik végén minden esetben látható az egyenértékű, redukált varrat feszültség is, ami a (7) összefüggés alapján került meghatározásra.

Redukált varratfeszültség számítása:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + \lambda \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \tag{7}$$

ahol:

- $\sigma_{\perp}$  – varrat hossztengetyére merőleges normál feszültség,
- $\tau_{\perp}$  – varrat hossztengetyére merőleges nyírófeszültség,
- $\tau_{\parallel}$  – varrat hossztengetyével párhuzamos nyírófeszültség,
- $\lambda$  – biztonsági tényező 1,5–3.



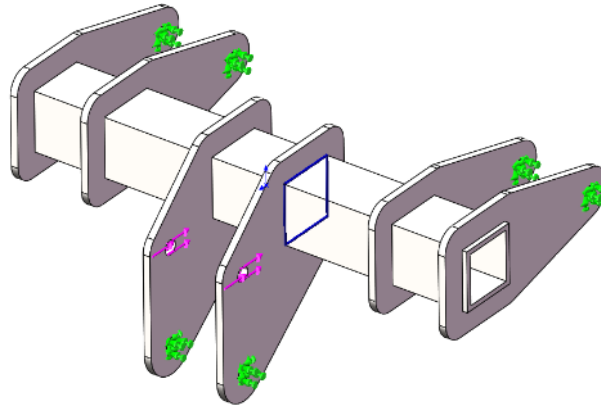
30. ábra Himba varratainak számozási jelölése (saját tervezés)

Varrat		1-es	2-es	3-as	4-es
$\sigma_{\perp}$	N/mm <sup>2</sup>	239	-231	236	239
$\sigma_{\parallel}$	N/mm <sup>2</sup>	0	0	0	0
$\tau_{\perp}$	N/mm <sup>2</sup>	-239	231	-236	-239
$\tau_{\parallel}$	N/mm <sup>2</sup>	-17	71	49	-96
$\sigma_{red}$	N/mm <sup>2</sup>	401	398	400	420

4. táblázat Himba varratainak varrat feszültségei és redukált feszültség

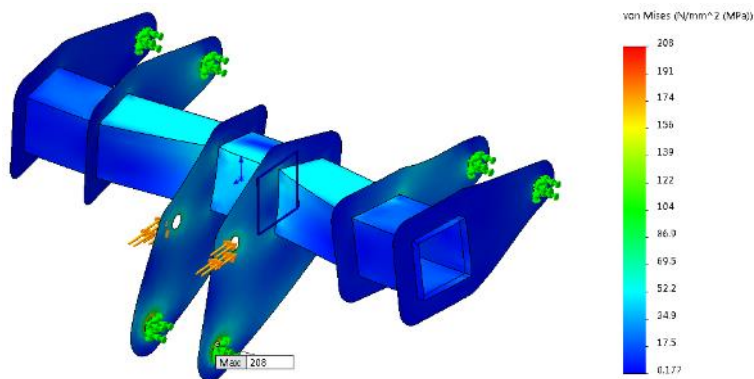
Az eredmények alapján kijelenthető, hogy a himba az  $F_{L4-bizt} = 1,5 \times 1921 = 2882$  N terhelés tekintetében elemi és varrat geometria tekintetében is megfelelő. Második esetben vizsgáljuk meg a himba hegesztési varratait a vízszintes irányú erőhatásra ami  $F_{L1-bizt} = 1,5 \times 4801 = 7201$  N, ebben az esetben a peremfeltételek a következők:

- a 31. ábrán látható módon a himba egy adott pillanatnyi állapotában a 19. ábra blokkvázlata alapján a kormányközponti tengely (piros szaggatott vonallal jelölt) és az L<sub>4</sub> tolórúd bal és jobb oldali csatlakozási csomópontjában rögzített, a középső fülnél működtetjük az  $F_{L1-bízt} = 1,5 \times 4801 = 7201$  N erőt;
- a szerkezet minden elemére a kapcsolat hegesztett és a zártszelvény és a lemezfülek között egyoldali sarokvarratot definiálunk, mely esetén megadjuk annak geometriai méreteit és mechanikai paramétereit.



31. ábra Központi alsó vezérlő himba horizontális irányú erőhatás peremfeltételek vizsgálata (saját tervezés)

A himbán ébredő maximális feszültség a 32. ábrán látható,  $\sigma_{HMH} = 208$  N/mm<sup>2</sup>, tehát az 1.4305-ös anyag szakítószilárdságához viszonyítva megfelel. A varratsorokban a feszültségek jelen esetben is vizsgálhatók, amit a középső két fülre kell elvégezni.



32. ábra Központi alsó vezérlő himba horizontális irányú erőhatás vizsgálata HMH szerinti feszültség eloszlás (saját tervezés)

### 3.2. Tolórudak méretezése és annak matematikai háttere

A kormányrendszerekbe épített tolórudak legtöbb esetben, axiális irányban külpontosan nyomottak amiknek kihajlás (33. ábra) okozta alakváltozása a tengelyre merőlegesen a teljes nyomoték növekedése mellett következhet be, ami természetesen megengedhetetlen.

A nyomott tolórúd viselkedése, annak geometriai és anyagszerkezeti paramétereitől függ. A nyomóerő hatására egy öngerjesztett folyamat indul be, ami matematikailag egy végtelen sorba fejthető, ennek egy határán a külső és belső erők minden keresztmetszetben egyenlők, egyensúlyban vannak. Matematikailag megállapítható, hogy a nyomott tolórúdban kialakuló nyomoték-alakváltozások sora konvergens, aminek határa egy véges szám, szélsőérték, ami maga

az egyensúly. Ezt a küszöbszámot átlépve a nyomaték-alakváltozások sora már divergens, határértéke végtelen, ami azt jelenti, hogy a tolórúd valahol a külső erőhatás hatására elveszíti stabilitását és tönkremegy, ami lehet részleges vagy teljes.



33. ábra Tolórúd kihajlása

A központosan, axiális irányban nyomott rúd viselkedése, terhelhetősége szempontjából a legfontosabb a szélső határérték, amit alkalmazva a nyomaték és a deformációk folyamatos növekedését meghatározó matematikai sor még éppen nem válik divergensé, figyelembe véve geometriai és anyagjellemzőt is, ami magát a deformációt határozza meg. A központosan nyomott tolórúd állapota stabilitási viszonytól és nem a nyomóerő okozta axiális nyomófeszültségtől függ, kijelenthető, hogy szilárdsági megfeleléstől független. A stabilitás esetei a következők:

- a tolórúd belső keresztmetszetének az erői a külső terhelőerőtől keletkező igénybevételeknél nagyobbak, így a deformáló hatás megszüntetését követően a tolórúd teljes egészben visszaáll eredeti alakjába, vagyis a rendszer tökéletesen rugalmasan stabil;
- a keresztmetszet belső erői a külső terhelőerőtől keletkező igénybevételeknél kisebbek és a tolórúd nem tudja azt ellensúlyozni, a deformáció minden határon túl csak növekszik, instabil képlékeny, maradó deformációt, tönkremenetelt jelentő állapot;
- az instabil és stabil tartomány állapotának határa az indifferens állapot, aminek határa az a kritikus erő, ami fölött az instabilitás bekövetkezik, a kritikus állapotban a külső és belső erők még éppen egyenlők egymással.

Stabilitás vizsgálatban fontos kritérium, hogy a tolórúdat csak axiális irányban éri külső erőhatás, a tolórúd hosszirányú keresztmetszetei azonosak maradnak, tehát a rúd deformációja egy síkban következik csak be, a tolórúd nem öblösödik. Az ilyen típusú stabilitásvesztés a repülőgépbe épített tolórúdak legveszélyesebb jelensége, a kihajlás, mely a következőktől függ (és az alábbi módon jelentkezik):

- a geometriai viszonyaitól – (keresztmetszet inerciájában);
- az alkalmazott anyagától – (rugalmassági modulusként);
- a megtámasztási viszonyaitól – (a deformálandó szabad hosszban).

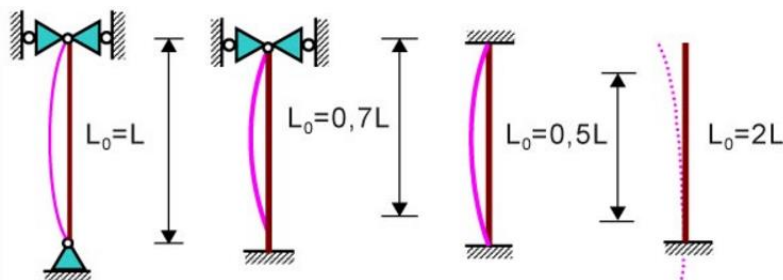
A rugalmas rúdkihajlás a mechanikából ismert Euler formulával (8) számítható, aminek feltétele az ideálisan rugalmas anyagi viselkedés:

$$F_{kritikus} = \left(\frac{\pi}{L_0}\right)^2 \cdot I_y \cdot E \quad (8)$$

ahol:

- $F_{kritikus}$  – rugalmas kritikus kihajlító erő;
- $L_0$  – megtámasztási viszony és a kihajlás hossza a tolórúdnak  $L_0 = \mu \cdot L$ ;
- $I_y$  – tolórúd másodrendű nyomatéka;
- $E$  – anyagjellemző, rugalmassági modulus.

A (8) összefüggésben az  $L_0$  függ a megtámasztási viszonyoktól, vagyis, hogy a tolórúd vagy egyéb rúd végei miként vannak rögzítve. Kormányrendszerben, a legtöbb esetben a 34. ábrán látható megfogási esetekből az első  $L_0 = L$  esettel találkozunk ( $\mu=1$ ), amik a tolórúdek végei csuklósan vannak bekötve a csatoló elemekhez.



34. ábra Tolórúdek megtámasztása [12]

Az előzőekben leírtak alapján a 19. ábrán látható Halley Apollo Autogyro kormányrendszerében található tolórúdek szilárdsági és stabilitás vizsgálata a következő képen alakul.

Alkalmazott tolórúdek méretei, lásd  $L_1, L_2, L_4$  és  $L_5$  jelűek:

$D_1 = 22 \text{ mm}$	$D_2 = 22 \text{ mm}$	$D_4 = 20 \text{ mm}$	$D_5 = 20 \text{ mm}$
$d_1 = 19 \text{ mm}$	$d_2 = 19 \text{ mm}$	$d_4 = 17 \text{ mm}$	$d_5 = 17 \text{ mm}$
$A_1 = 96,555 \text{ mm}^2$	$A_2 = 96,555 \text{ mm}^2$	$A_4 = 87,135 \text{ mm}^2$	$A_5 = 87,135 \text{ mm}^2$

5. táblázat Tolórúdek geometriai jellemzői,  $D$  – külső átmérő,  $d$  – belső átmérő,  $A$  – keresztmetszet

Alkalmazott tolórúdek mechanikai anyag jellemzői:

$R_{EH1} = 295 \text{ N/mm}^2$	$R_{EH2} = 295 \text{ N/mm}^2$	$R_{EH4} = 295 \text{ N/mm}^2$	$R_{EH5} = 295 \text{ N/mm}^2$
$R_{M1} = 320 \text{ N/mm}^2$	$R_{M2} = 320 \text{ N/mm}^2$	$R_{M4} = 320 \text{ N/mm}^2$	$R_{M5} = 320 \text{ N/mm}^2$

6. táblázat Tolórúdek mechanikai jellemzői,  $R_{EH}$  – folyáshatár,  $R_M$  – szakítószilárdság

Szilárdsági szempontból meghegedhető maximális nyomóerő a tolórúdekben a folyáshatárhoz és a szakítószilárdsághoz viszonyítva:

$F_{EH1} = 28484 \text{ N}$	$F_{EH2} = 28484$	$F_{EH4} = 25705 \text{ N}$	$F_{EH5} = 25705 \text{ N}$
$F_{R1} = 30898 \text{ N}$	$F_{R2} = 30898 \text{ N}$	$F_{R4} = 27883 \text{ N}$	$F_{R5} = 27883 \text{ N}$

7. táblázat Tolórúdek maximális megengedhető nyomóerő értékei a folyáshatárhoz és a szakítószilárdsághoz számítva

Stabilitásvesztést előidéző, Euler-féle kritikus erő meghatározása a (8) összefüggéssel:

$E_1 = 70000 \text{ N/mm}^2$	$E_2 = 70000 \text{ N/mm}^2$	$E_4 = 70000 \text{ N/mm}^2$	$E_5 = 70000 \text{ N/mm}^2$
$I_1 = 5099 \text{ mm}^4$	$I_2 = 5099 \text{ mm}^4$	$I_4 = 3752 \text{ mm}^4$	$I_5 = 3752 \text{ mm}^4$
$L_1 = 555 \text{ mm}$	$L_2 = 800 \text{ mm}$	$L_4 = 710 \text{ mm}$	$L_5 = 1095 \text{ mm}$
$\mu_1 = 1 \text{ N/A}$	$\mu_2 = 1 \text{ N/A}$	$\mu_4 = 1 \text{ N/A}$	$\mu_5 = 1 \text{ N/A}$
$L_{R1} = 555 \text{ mm}$	$L_{R2} = 800 \text{ mm}$	$L_{R4} = 710 \text{ mm}$	$L_{R5} = 1095 \text{ mm}$
$F_{krEuler1} = 11426 \text{ N}$	$F_{krEuler2} = 5499 \text{ N}$	$F_{krEuler4} = 5137 \text{ N}$	$F_{krEuler5} = 2160 \text{ N}$

8. táblázat Tolórúdek kritikus kihajlás erő meghatározása

A maximális számított tolórúd erők az üzemeltetési határok szélső esetihez nézve és ezek viszonya a maximális nyomóerő szélső határértékéhez a szakítószilárdsághoz, illetve az Euler-féle kritikus stabilitásvesztés szélső értékéhez a 9. táblázatban kerültek összesítésre.

$F_1 = 4801 \text{ N}$	$F_2 = 4801 \text{ N}$	$F_4 = 1921 \text{ N}$	$F_5 = 1921 \text{ N}$
$j_{FOS1} = 6,44 \text{ N/A}$	$j_{FOS2} = 6,44 \text{ N/A}$	$j_{FOS4} = 14,52 \text{ N/A}$	$j_{FOS5} = 14,52 \text{ N/A}$
$BLF_1 = 2,38 \text{ N/A}$	$BLF_2 = 1,15 \text{ N/A}$	$BLF_4 = 2,67 \text{ N/A}$	$BLF_5 = 1,12 \text{ N/A}$

9. táblázat Számított tolórúderők és a biztonsági tényezők a teljes tönkremenetelhez  $j_{FOS}^9$  és  $BLF^{10}$

A 9. táblázat is alátámasztja azt, ami már a bevezetőben leírásra került, vagyis, hogy „a központosan nyomott tolórúd állapota stabilitási viszonytól és nem a nyomóerő okozta axiális nyomófeszültségtől függ, kijelenthető, hogy szilárdsági megfeleléstől független.” Látható, hogy a tönkremenetelt jelentő biztonsági jelzőszámok a BLF és a  $j_{FOS}$  értékei mindig a BLF vagyis a kihajlás esetén az alacsonyabbak. (Ez csak akkor igaz, ha a hosszirányú méret lényegesen nagyobb, mint a keresztirányúnál, vagyis hosszú karcsú rúd esetén).

Tolórudakat a kihajlási stabilitásvesztés mellett még rezonancia kritériumok szerint is ellenőrizni szükséges. A repülőgép motorjának és légszárnyjának, rezgései, lengései átadódhatnak a vezérlőrendszer rudazataira, azokban különböző gerjesztett lengéseket előidézve. A rezonancia elkerülésére a tolórúdrúd sajátlengésszámának a motor, légszárny üzemi fordulatszámától, legalább  $\Delta n = \pm 300\text{--}400$  fordulat/perc értékkel kell, hogy különbözzön. A tolórúd hosszának csökkentésével a sajátlengésszám jól elhangolható, ennek hátránya, hogy a beépített csuklószámok növelését vonhatja maga után, az optimális állapot meghatározása ebből eredően is lényeges. Tolórúd sajátlengésszámai gyorsan és pontosan számolhatók FEM rezonancia vizsgálatokkal.

#### 4. SZÁLERŐSÍTÉSEK KOMPOZIT ELEMÉK KORMÁNYVEZÉRLŐ RENDSZEREKBE

Az 1990-es évek közepétől ugrásszerűen megnőtt a szálerősítéssel kompozitok alkalmazási köre a repülőiparban, napjainkban ezekkel elterjedten dolgoznak a repülőgépgyártók, számos innovatív gyártástechnológiai eljárások bevezetésével, tökéletesítésével. A kompozitok alkalmazásának előnye az anyag anizotrop, heterogén szerkezeti megjelenésében rejlik, ami azt eredményezi, hogy adott célra, speciális terhelési irányokra megerősítve az alkatrészt lehet réteges szerkezetként azt felépíteni. Ezzel jelentős tömeg csökkenés érhető el a darabnál, attól függően, hogy melyik terhelési irányba kívánjuk az inerciáját megnövelni.

A szálerősítéssel kompozitok olyan szerkezeti anyagok, amik egy beágyazó anyag (mátrix) és egy szerkezeti erősítő anyag (szál) kombinációból épülnek fel. Gyakorlatban alapvetően három megjelenési formájuk terjedt el:

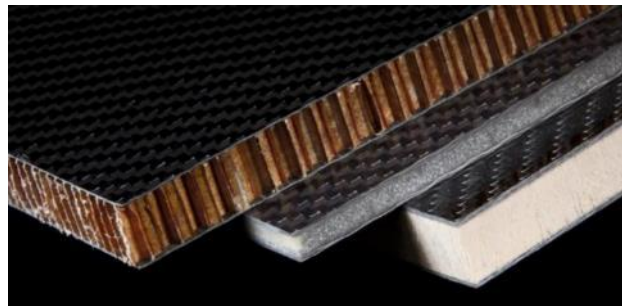
<sup>9</sup>  $j_{FOS}$ : j biztonsági szám, vagy biztonsági tényező, FOS angolul a factor of safety rövidítése aminek jelentése a biztonság tényezője, szilárdsági értelemben a szakítószilárdságot előidéző nyomóerő és a maximális fellépő nyomóerő hányadosa, megmutatja, hogy adott fellépő erő esetén hány szoros biztonság van még a törés bekövetkeztéig.

<sup>10</sup> BLF : buckling load factor, kihajlás biztonsági tényezője, megmutatja, hogy mekkora biztonsági tartalék áll még rendelkezésre, adott fellépő erő esetén, hogy a kihajlás ne következzen be.

- szálerősítéssel laminátumok, ebben az esetben egymásra építenek szöveteket (ami maga a mátrix-szál rendszer) és így biztosítják a szerkezeti darabok felépítését, rétegről-rétegre, ha szükséges különféle orientációba történő beépítését azoknak, példaként lásd a 35. ábrát;
- szendvics laminátumok, ahol az elv azonos az előzővel, csak bizonyos rétegeket maganyaggal választanak el egymástól, aminek a célja, hogy a laminátum rendszer, azaz maga a termék vastagságirányú méretét megnöveljék, összefoglaló néven ezeket hívjuk szendvics szerkezeteknek, erre mutat példát a 36. ábra;
- kerámia-kompozitok, hibrid rendszerek, amelyeknél többféle anyag társítása is lehetséges, például a 37. ábrán látható módon.



35. ábra Példa kompozit laminátum felépítésére



36. ábra Példa kompozit szendvics szerkezetekre



37. ábra Kerámia-kompozit hibrid anyagtársulás

Kompozit alkatrészgyártás általános jellemzői függetlenül az előállításának technikai módjától összefoglalva a következők:

1. a legtöbb esetben az alkatrészgyártás egy negatív formasablonban történik;
2. a munkadarab rétegről-rétegre építik fel;

3. az egyes rétegek a tér minden irányába (orientációjába) beépíthetők, így adott jellemző terhelési irányra optimalizálni lehet a szerkezeti darabot;
4. beépíthetők összefüggő, a teljes szerszámot kitöltő, vagy csak szakaszokat határoló rétegek úgynevezett helyi erősítések, merevítések;
5. szendvicsszerkezetek, maganyagok rétegek közé iktatásával történik ami lehet méhsejt, fém, hab stb.;
6. nagyobb vastagságú darabok esetén bizonyos számú réteg felépítését követően a szerkezetet vákuumozással tömöríteni kell;
7. egy szerkezeten belül létrehozhatók monolit és szendvics típusú kevert anyagtársítások;
8. az alkatrészek legtöbbje hőkezelést és ezzel párhuzamosan vákuumtömörítést igényel;
9. geometriailag szabad formák, bonyolultabb, időnként még alámetszett darabok is elkészíthetők osztott sablonok alkalmazásával.

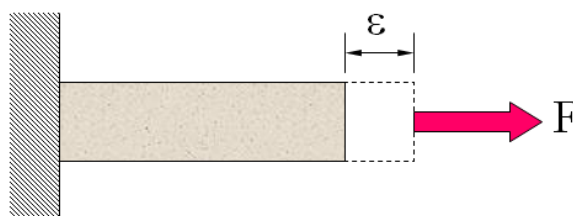
#### 4.1. Szálerősítéssel kompozitok szilárdsági méretezésének alapjai

Szálerősítéssel kompozitok szilárdsági méretezése az anyag inhomogén, anizotrop felépítése következtében eltér a homogén anyagok mechanikai vizsgálatától. A mechanikai modellezés kiindulási elve azonban azonos, egy tengely irányú  $F$  terhelés hatására az anyag  $\varepsilon$  nyúlás változása meghatározott szabály szerint történik, (38. ábra) a mechanikából jól ismert Hooke-törvényből kell kiindulni, miszerint:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (9)$$

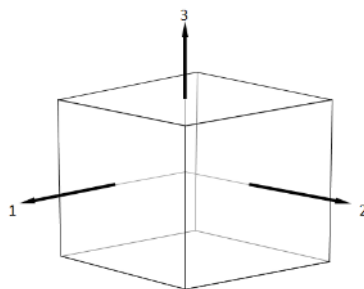
ahol:

- $\sigma$  – tengelyirányú normál feszültség;
- $\varepsilon$  – nyúlás;
- $E$  – anyagra jellemző rugalmassági modulus.

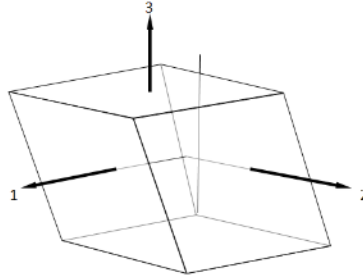


38. ábra Test tengely irányú terhelés hatására bekövetkező  $\varepsilon$  megnyúlása (saját forrás)

Ha a 38. ábrán látható testből egy elemi darabot (kiskockát) tekintünk, akkor a tér három tengelye mentén (39. ábra 1–2–3 (x–y–z) irányok) és három sík mentén (39. ábra 1–2 (x–y), 2–3 (y–z) és 1–3 (x–z)) képes deformálódni (40. ábra az 1–3 torzulást mutatja).



39. ábra Elemi kocka lineáris elmozdulási irányok (saját forrás)



40. ábra Elemi kocka deformációja 1–3 sík (saját forrás)

Kompozitok esetén a Hooke törvény úgynevezett generalizált alakját (mátrix egyenlet) kell alkalmazni, ami egy összetett tenzorba írható fel. Anizotrop anyag esetén, amikor már a laminátumot, mint térbeli szerkezeti elemet vizsgáljuk, tehát figyelembe vesszük annak vastagságát is, a levezetést mellőzve a mátrix egyenlet alakja:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & Q_{14} & Q_{15} & Q_{16} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} & Q_{24} & Q_{25} & Q_{26} \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} & Q_{34} & Q_{35} & Q_{36} \\ Q_{41} & Q_{42} & Q_{43} & Q_{44} & Q_{45} & Q_{46} \\ Q_{51} & Q_{52} & Q_{53} & Q_{54} & Q_{55} & Q_{56} \\ Q_{61} & Q_{62} & Q_{63} & Q_{64} & Q_{65} & Q_{66} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \lambda_{12} \end{Bmatrix} \quad (10)$$

A (10) alapján általánosságban írható a következő:

$$\{\sigma_m\} = \{Q_{mn}\}\{\varepsilon_n\} \quad (11)$$

ahol:

- $\sigma_m$  – feszültség tenzor;
- $Q_{mn}$  – merevségi tenzor (merevségi mátrix);
- $\varepsilon_n$  – nyúlás tenzor.

A (11) összefüggés nyúlás tenzorra kifejezett alakja a kompozit technikában a következő képen írható:

$$\{\varepsilon_n\} = \{S_{mn}\}\{\sigma_m\} \quad (12)$$

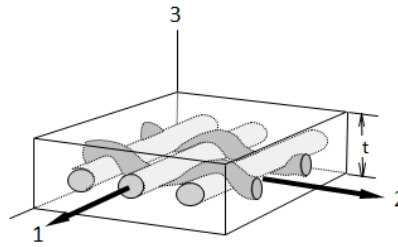
ahol:

$$\rightarrow \{S_{mn}\} = \{Q_{mn}\}^{-1}$$

A merevségi mátrix elemeiben tulajdonképpen az anyag, húzó rugalmassági és nyíró (csúsztató) rugalmassági modulusai jelennek meg a 10. táblázatban látható módon, ahol a merevségi mátrix inverzei kerültek feltüntetésre a már jellemző x–y–z koordináta rendszerben. Az x–y–z indexek a (10) mátrix egyenlet 1–2–3 indexeinek felelnek meg.

A laminátumot több réteg laminát építi fel, amik önmagukban nem anizotrop, hanem csak ortotrop szerkezetek (41. ábra), ezekre vonatkozóan a (10)-es számú mátrix egyenlet egyszerűsödik, mert a 39. ábra 3-as irányát elhanyagoljuk, ennek megfelelően az összefüggés a következő:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{Bmatrix} \quad (13)$$

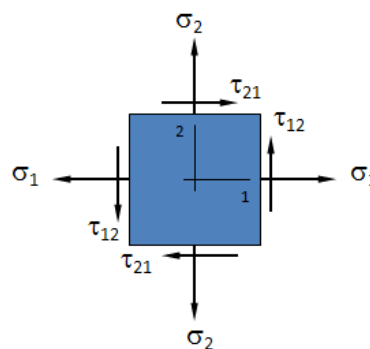


41. ábra Laminátum építő eleme a réteg vagy lamina (t - vastagság irány nem számottevő) (saját forrás)

Orientáció	A merevségi mátrix elemei				
	$S_{11} =$	$\epsilon_x / \sigma_x$		$S_{41} =$	$\gamma_{yz} / \sigma_x$
	$S_{21} =$	$\epsilon_y / \sigma_x$		$S_{51} =$	$\gamma_{xz} / \sigma_x$
	$S_{31} =$	$\epsilon_z / \sigma_x$		$S_{61} =$	$\gamma_{xy} / \sigma_x$
	$S_{12} =$	$\epsilon_x / \sigma_y$		$S_{42} =$	$\gamma_{yz} / \sigma_y$
	$S_{22} =$	$\epsilon_y / \sigma_y$		$S_{52} =$	$\gamma_{xz} / \sigma_y$
	$S_{32} =$	$\epsilon_z / \sigma_y$		$S_{62} =$	$\gamma_{xy} / \sigma_y$
	$S_{13} =$	$\epsilon_x / \sigma_z$		$S_{43} =$	$\gamma_{yz} / \sigma_z$
	$S_{23} =$	$\epsilon_y / \sigma_z$		$S_{53} =$	$\gamma_{xz} / \sigma_z$
	$S_{33} =$	$\epsilon_z / \sigma_z$		$S_{63} =$	$\gamma_{xy} / \sigma_z$
	$S_{14} =$	$\epsilon_x / \tau_{yz}$		$S_{44} =$	$\gamma_{yz} / \tau_{yz}$
	$S_{24} =$	$\epsilon_y / \tau_{yz}$		$S_{54} =$	$\gamma_{xz} / \tau_{yz}$
	$S_{34} =$	$\epsilon_z / \tau_{yz}$		$S_{64} =$	$\gamma_{xy} / \tau_{yz}$
	$S_{15} =$	$\epsilon_x / \tau_{xz}$		$S_{45} =$	$\gamma_{yz} / \tau_{xz}$
	$S_{25} =$	$\epsilon_y / \tau_{xz}$		$S_{55} =$	$\gamma_{xz} / \tau_{xz}$
	$S_{35} =$	$\epsilon_z / \tau_{xz}$		$S_{65} =$	$\gamma_{xy} / \tau_{xz}$
	$S_{16} =$	$\epsilon_x / \tau_{xy}$		$S_{46} =$	$\gamma_{yz} / \tau_{xy}$
	$S_{26} =$	$\epsilon_y / \tau_{xy}$		$S_{56} =$	$\gamma_{xz} / \tau_{xy}$
	$S_{36} =$	$\epsilon_z / \tau_{xy}$		$S_{66} =$	$\gamma_{xy} / \tau_{xy}$

10. táblázat Merevségi mátrix értelmezése anizotrop anyag esetén (saját forrás)

A (13) egyenletnek megfelelően csak síkbeli feszültségi állapot ébred (42. ábra), amiben a merevségi mátrix elemei szintén az anyag, húzó rugalmassági és nyíró (csúsztató) rugalmassági modulusai.



42. ábra A réteg vagy lamina síkbeli feszültség állapota (saját forrás)

Matematikai levezetés nélkül a (13) egyenletben a merevségi mátrix elemeinek értéke a következő:

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} \quad (14)$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{21} \cdot E_1}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} \quad (15)$$

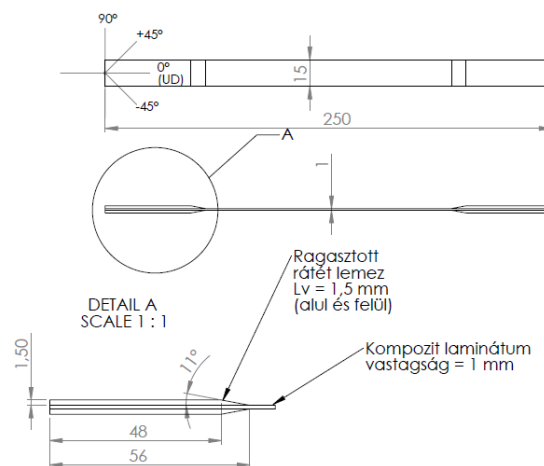
$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} \quad (16)$$

$$Q_{66} = G_{12} \quad (17)$$

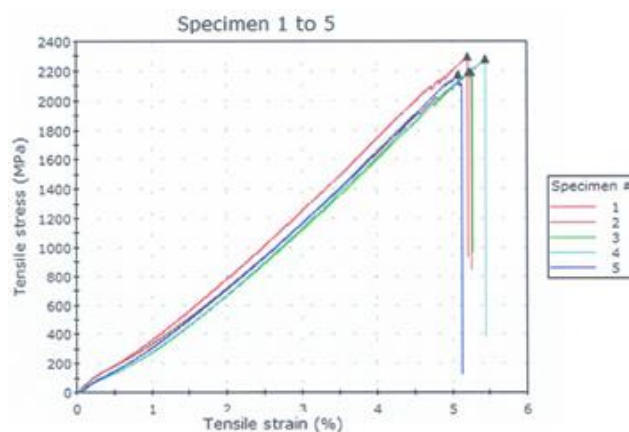
ahol:

- $E_1$  – lamina (réteg) x iránybeli húzó rugalmassági modulusa;
- $E_2$  – lamina (réteg) y iránybeli húzó rugalmassági modulusa;
- $G_{12}$  – lamina (réteg) xy síkon működő csúsztató rugalmassági modulusa;
- $\nu_{12}$  és  $\nu_{21}$  – poisson számok x–y irányok között értelmezve.

Napi szintű mérnöki gyakorlatban kompozit szerkezetek tervezése és azokkal kapcsolatos szilárdsági méretezések alapeszközévé váltak az ilyen célra alkalmas, különféle FEM eljárások. Emellett nagyon fontos, hogy a mérnök kezében a legbiztosabb módszer a laminátumok, szendvics szerkezetek mechanikai tulajdonságainak megállapítására, ha azokból a szerkezeti elemekkel azonosan próbatesteket készít, és folyamatosan laborvizsgálatokkal igazolja az adott orientációban azok viselkedését. Megfelelően elvégzett kisminta kísérletek, szakító-, nyomó-, hajlító, nyíróvizsgálatok végrehajtását nem helyettesítheti egyetlen FEM alkalmazás eredménye sem. A 43. ábra egy 5 laminából (rétegből) álló karbon laminátumot mutat, ami UD vagyis egy a húzó erővel terhelt irányban erősített szálakból épül fel. Ilyen vizsgálat során kimérhető a szakítószilárdság, a húzóirányú rugalmassági modulusus, a nyúlás és a tönkremenetel szempontjából lényeges szálszakadás pontja.



43. ábra Szakító próbatest laminátum, öt rétegből (saját forrás)



44. ábra Karbon UD prepreg szakító próbatestek vizsgálati diagramja (saját mérés)

#### 4.2. Kompozit alkatrészek a kormányvezérlő rendszerekben

Kormányvezérlő rendszerekben a leggyakrabban csatoló elemként, vagy tám elemként építenek be kompozitból készült egységeket, alkatrészeket. Alapjában kézi laminálással, prepreg eljárással, pultruzióval és bonyolultabb formák esetén RTM technológiával készülnek a darabok.

Egyre több ultrakönnyű és sportrepülőgépben alkalmaznak karbon laminátumból készült himbákat, amik szerepe közvetítés vagy irányfordítás. Az ilyen kialakítású himbáknál a laminátum forgáspontjába legtöbb esetben alumíniumból, korrózióálló acélból vagy bronz perselyből készült csapágycsok fogadására alkalmas fészkeket ragasztanak be. Karbon laminátumból készült himbára mutat példát a 45. ábra.



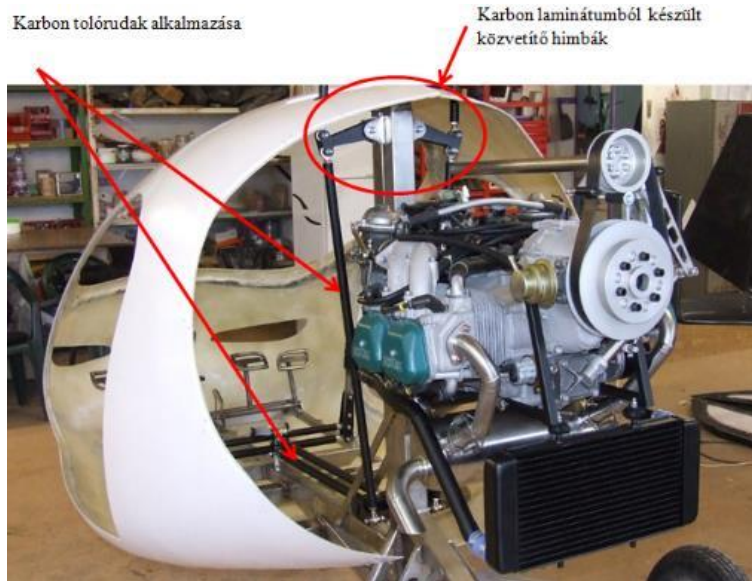
45. ábra Karbon prepregből készült himba laminátum egység

Előnyös a kormányrendszerek csatolóelemeinek felfüggesztését biztosító különféle karbon lapok vagy szendvics szerkezetből gyártott panelek gyártása, könnyű szerkezeti tömegük és esztétikus megjelenésük miatt, erre mutat példát a 46. ábra.



46. ábra Karbon prepregből készült lamainátum felfogató

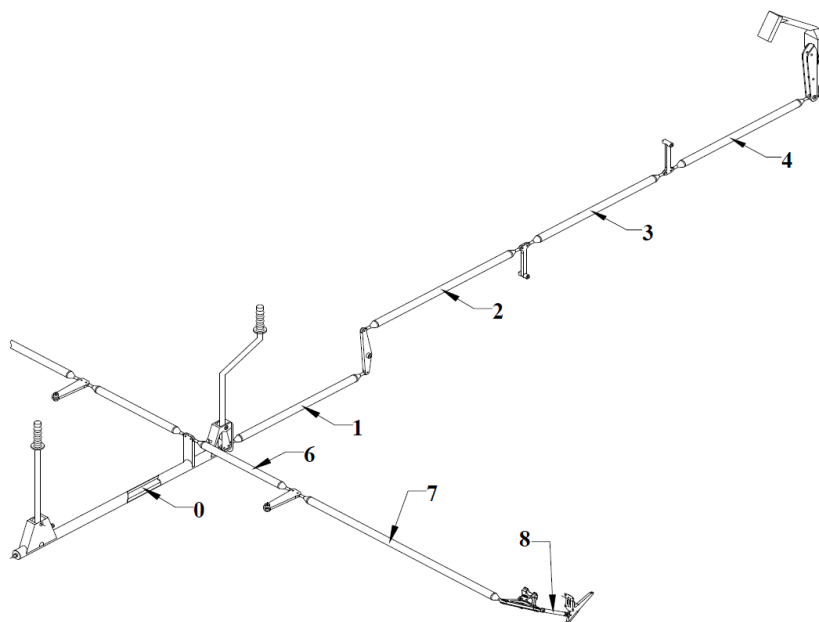
Kormányvezérlő rendszerek legkritikusabb elemei a mozgató rudak, amik szintén készülhetnek karbonból. A 47. és 48. ábrákon látható Halley Apollo Autogyro, 19. és 20. ábrákon látható kormányvezérlő rendszerében a tolórudakat lecserélték az eredeti alumínium és korrózióálló acél kivitelről karbonból előállítottakra. Utóbbiak alkalmazásának legfőbb előnye a tömegcsökkentés mellett a kihajlási stabilitás biztonságának növelése, ami által bizonyos esetekben a közvetítő, támasztó himbák (példa erre a 9. ábrán látható) a rendszerekből elhagyhatók, ezáltal csökken annak súrlódása és a meghibásodás lehetősége is. A 49. ábra egy versenyrepülőgép kormányrendszerét mutatja melyben, ha alumínium tolórudakat alkalmaznak, szükség van a 2–3 és 3–4 tolórudak közé beiktatni közvetítő himbákat a kihajlás meggátolására. Ezzel szemben az 50. ábrán egy olyan megoldás látható, ahol a kormányvezérlő-rendszerben a fordítóhimbát követően magassági kormány egy karbon tolórúddal összeköthető.



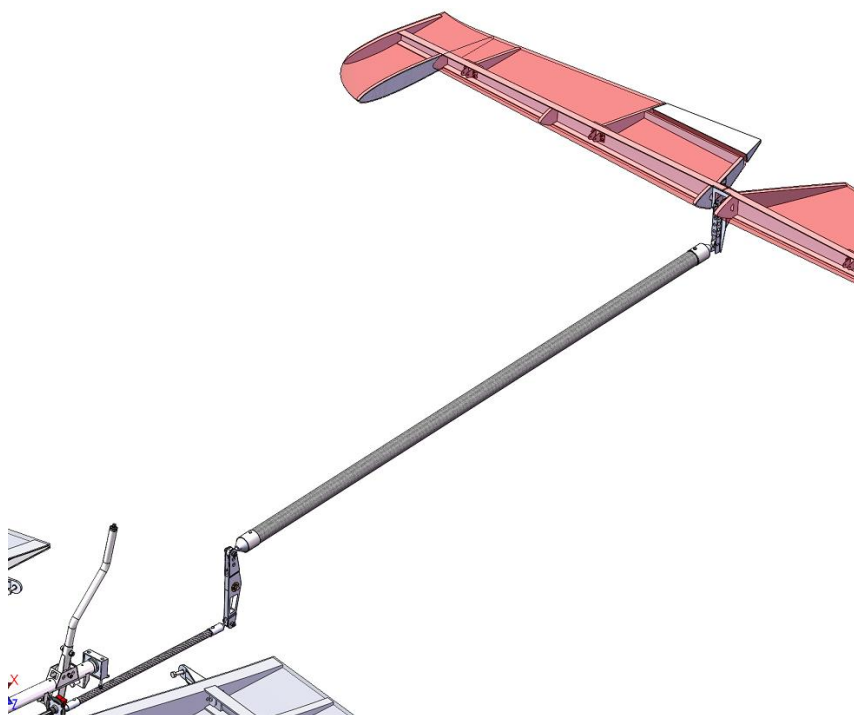
47. ábra Halley Apollo Autogyro karbonból kialakított kormányrendszere (saját forrás)



48. ábra Halley Apollo Autogyro felső himbát vezérlő karbon tolórúd (saját forrás)



49. ábra Extra 300 LT versenyrepülőgép kormányrendszere közvetítő himbákkal [13]



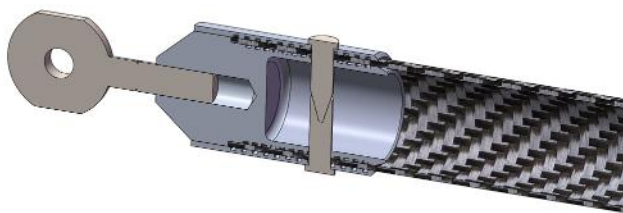
50. ábra Egy hosszú karbon tolórúddal mozgató magassági kormánylap (saját tervezés)

A 11. táblázatban azonos geometriájú, három különböző anyagból készült  $L = 1000$  mm hosszú tolórúd szilárdsági és stabilitási vizsgálata látható. Az eredmények alapján kijelenthető, hogy a 170 gramm karbon tolórúd a legkisebb tömege ellenére is vetekszik mechanikai jellemzői tekintetében a tőle több mint négyszer nehezebb acéllal szemben az alumíniumtól pedig messze jobb értékekkel bír.

Vizsgált tolórudak						
Adat	AlMgSi	Adat	1.4301	Adat	CC22-19	
$D_1 =$	22	$D_2 =$	22	$D_4 =$	22	mm
$d_1 =$	19	$d_2 =$	19	$d_4 =$	19	mm
$A_1 =$	96,555	$A_2 =$	96,555	$A_4 =$	96,555	mm <sup>2</sup>
$m =$	0,3		0,75		0,17	kg
<b>Alaklam közötti tolórudak mechanikai paraméterei:</b>						
$R_{B1} =$	320	$R_{B2} =$	500	$R_{B4} =$	820	N/mm <sup>2</sup>
<b>Maximum megengedhető fellépő erő a tolórudakban:</b>						
$F_{R1} =$	30898	$F_{R2} =$	48278	$F_{R4} =$	79175	N
<b>Euler-féle kihajlási erő kalkulációja:</b>						
$E_1 =$	70000	$E_2 =$	210000	$E_4 =$	130000	N/mm <sup>2</sup>
$I_1 =$	5099	$I_2 =$	5099	$I_4 =$	5099	mm <sup>4</sup>
$L_1 =$	1000	$L_2 =$	1000	$L_4 =$	1000	mm
$\mu_1 =$	1	$\mu_2 =$	1	$\mu_4 =$	1	N/A
$L_{R1} =$	1000	$L_{R2} =$	1000	$L_{R4} =$	1000	mm
$F_{krEuler1} =$	3519	$F_{krEuler2} =$	10558	$F_{krEuler4} =$	6536	N

11. táblázat Azonos geometriájú, különböző anyagú tolórudak vizsgálata

Karbon tolórudak integrációjára mutat példát az 51. ábra ahol a karboncsőbe ragasztással kerül rögzítésre a belső menetes és külső vállas biztosító alumínium betét, biztonsági biztosítás a tengelyre merőlegesen illesztett-ragasztott kúpos záró tüskék. Ennek egy ténylegesen kivitelezett változata látható az 52. ábrán.



51. ábra Karbon tolórúd konstrukció (saját tervezés)



52. ábra Karbon tolórúd mart villa véggel kialakítva (saját forrás)

## 5. ÖSSZEGLÉS

Légijárművek kormányvezérlő rendszereinek tervezésében, gyártástechnológiai és üzemeltetési kérdéseiben több évtizedes tapasztalati eredmények állnak rendelkezésünkre. Az információs társadalomban képzett műszaki szakemberek számára is elengedhetetlenül fontosak azon műszaki ismeretek, amik ma már egyre ritkábban jelennek meg a napi gyakorlatban, még annak ellenére is, hogy a legtöbb esetben a digitális technika fejlett eszközökkel gyorsan, hatékonyan támogatja a mérnöki alkotó munkát. A számítástechnika CAD/CAM/FEM eszközeit alapos matematikai és mechanikai ismeretek tudásának hiányában nem lehet biztonságosan kezelni, és ugyanez igaz az anyagismeret és a gyártástechnológiák esetében is, ismerni kell azon módszereket, amiket elődeink alkalmaztak 30–40 évvel ezelőtt.

A szakcikkben légijárművek mechanikus vezérlésű kormányvezérlő rendszereinek főbb egységeit és azok tervezési, gyártási módszereit mutattam be, amik globális gyakorlati alkalmazása, átfogó műszaki ismeretek meglétét követelik meg az alkalmazótól.

### FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Dr. Óvári Gyula: Korszerű Repülőgépek Kormányvezérlése, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem BJKMK Repülőműszaki Intézet, Egyetemi Jegyzet - elektronikus oktatási segédlet, aerodinamikai kormányzás lehetősége rész, hetedik számú dia, első kép, 2007.
- [2] Dr. Óvári Gyula: Korszerű Repülőgépek Kormányvezérlése, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem BJKMK Repülőműszaki Intézet, Egyetemi Jegyzet - elektronikus oktatási segédlet, belső kormányzervek rész, hatodik számú dia, első kép, 2007.
- [3] Dr. Óvári Gyula: Korszerű Repülőgépek Kormányvezérlése, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem BJKMK Repülőműszaki Intézet, Egyetemi Jegyzet - elektronikus oktatási segédlet, belső kormányzervek rész, hatodik számú dia, második kép, 2007.
- [4] Fémötvözetek hőkezelése (Al ötvözetek hőkezelése és vizsgálata) (online doc) url: [www.matsci.uni-miskolc.hu/femotvok/letoltes/femotvhok/Al%20otv%20hok.doc](http://www.matsci.uni-miskolc.hu/femotvok/letoltes/femotvhok/Al%20otv%20hok.doc) 13. ábra
- [5] Felületkezelő eljárások (online doc.) url: [www.banki.hu/~aat/oktatas/gepesz/anyagtudomany2/hokezeles\\_3.doc](http://www.banki.hu/~aat/oktatas/gepesz/anyagtudomany2/hokezeles_3.doc) 4. ábra
- [6] SKF: Spherical plain bearings and rod ends, (e-dok.), url: <http://www.skf.com/group/products/bearings-units-housings/plain-bearings/general/index.html> leírást lásd: Maintenance-free rod ends (2016.01.25.)
- [7] SKF: Spherical plain bearings and rod ends, (e-dok.), url: <http://www.skf.com/group/products/bearings-units-housings/plain-bearings/general/index.html> leírást lásd: Maintenance required rod ends (2016.01.25.)
- [8] RBC Aerospace Bearings: Ball Bearing Rod Ends – REP Series External Thread (e-dok.) url: [http://www.rbcbearings.com/aero-pdfs/rolling/055\\_063/bbre\\_ms21151.pdf](http://www.rbcbearings.com/aero-pdfs/rolling/055_063/bbre_ms21151.pdf) (2016.01.25.)
- [9] Dr. Óvári Gyula: Korszerű Repülőgépek Kormányvezérlése, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem BJKMK Repülőműszaki Intézet, Egyetemi Jegyzet - elektronikus oktatási segédlet, rudazatok illesztése rész, harmadik számú dián található kép, 2007.
- [10] Kovács Ádám, Moharos István, Oldal István, Szekrényes András: Végeselem-Módszer, Egyetemi tananyag, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Óbudai Egyetem - Bánki Donát Gépész- és Biztonságttechnikai Mérnöki Kar, Szent István Egyetem Gépészmérnöki Kar, Typotex Kiadó ISBN 978-963-279-539-3 2011. 1.7. számú ábrája
- [11] Dr. Páczelt István: Végeselem - módszer alapja VEM alapjai, Előadás Jegyzet, 1. Előadás Pdf dokumentum Miskolci Egyetem, 16. oldal ábrája
- [12] Dr. Vigh Sándor - Mihálffy Attila: Hegesztett szerkezetek törése, fáradása 2013. Elektronikus oktatási segédlet, 6-06 ábra
- [13] EA-0D702 Maintenance Manual Extra 300 LT Extra Flugzeugproduktions und Vertriebs GmbH

---

### APPLICATION OF FIBRE REINFORCED, ALUMINIUM AND SPECIALIZED STEEL ALLOYS IN AIRCRAFT FLIGHT CONTROL SYSTEMS

*The applied materials and production methods of flight control systems of air vehicles (aircrafts, helicopters) significant changed and advanced in last 30-40 years in the aviation industry. We can write similarly this one about the design technique procedures. Design and manufacturing methods are inseparable because the base of product development is the integrated computer aided engineering process from sketch to final assembly. This scientific article presents the main requirement of flight control systems, up-to-date structural load calculations, furthermore summarizes the construction techniques and manufacturing parameters of composite parts in the flight control mechanisms.*

**Keywords:** *fibre reinforced composite, aluminium, steel, flight control system, FEM method*

---

---

Dr. FARKAS Csaba, PhD  
Gépészmérnök  
Repülőgép kompozit szerkezeti mérnök  
IWE/EWE hegesztő szakmérnök  
Genevation Aircraft Kft ([www.genevation.hu](http://www.genevation.hu))  
[csaba.farkas@genevation.hu](mailto:csaba.farkas@genevation.hu)  
[orcid.org/0000-0001-9564-8026](http://orcid.org/0000-0001-9564-8026)

---

Dr.FARKAS Csaba, PhD  
Mechanical Engineer  
Aircraft composite structural engineer  
IWE/EWE welding engineer  
Genevation Aircraft Kft ([www.genevation.hu](http://www.genevation.hu))  
[csaba.farkas@genevation.hu](mailto:csaba.farkas@genevation.hu)  
[orcid.org/0000-0001-9564-8026](http://orcid.org/0000-0001-9564-8026)

---



[http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017\\_1/2017-1-02-0362\\_Farkas\\_Csaba.pdf](http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_1/2017-1-02-0362_Farkas_Csaba.pdf)