

Farkas Csaba

KORSZERŰ REPÜLŐGÉPTERVEZÉS

A repülőgép tervezésben és fejlesztésben alkalmazott eljárások több évtizedes fejlődésen menetek keresztül. Az elmúlt két évtized során, oly méreteket öltött a mikroelektronika fejlődése, ami olyan kifinomult, precíz nagy teljesítményű számítógépek hardver eszközeit alkotja meg napjainkra a tervezőknek, melyekkel megfelelő szoftveres környezetben tökéletes CAE (Computer Aided Engineering) megoldást biztosítanak.

A mérnökök kezében levő és az ő igényeik szerint fejlesztett CAE csúcsoftverekkel napjainkban egy repülőgép részegység, az egész sárkány szerkezet áramlástani vizsgálata vagy akár a kormányvezérlő rendszer szilárdsági vizsgálata megtervezhető úgy, hogy az elemek használhatóságát a fizikai meglétük nélkül tökéletesen elemezzük a 3D-s virtuális térben.

Jelen cikk igyekszik bemutatni és megismertetni a Tisztelt Érdeklődővel azt, hogy a repülőgép fejlesztők számára mit is kínál egy CAE megoldás, és milyen hatékonysággal használják azt ipari környezetben.

Mit is jelent a CAE és melyek az előnyei?

A fejlett ipari nagyhatalmak repülőgépgyárai körülbelül 30 évvel ezelőtt kezdték el alkalmazni és rendszerükbe integrálni a számítógépes tervezőrendszereket. Voltak olyan kutatóintézetek, melyek külön divíziókat hoztak létre több száz rendszerfejlesztőt foglalkoztatva, hogy a saját maguk igényeinek megfelelően fejlesszék ki tervezőrendszereiket.

A NASA például az 1960-as évek közepétől kezdte el fejlesztését a rajzoló-tervező rendszernek (CAD), majd pár év múltán már az FEM (Finite Element Method) rendszer alapjait fektette le, melynek neve NASTRAN (NASA Structural Analysis) lett.

A számítógéppel támogatott tervezés, avagy CAD (Computer Aided Design) forradalma világviszonylatban a 1990-es évek elején vette kezdetét és napjainkig közel 15 év alatt az ipar robbanásszerű forradalmi változása kísérte végig. Kezdetben a CAD rajzoló rendszerek leghatékonyabb szolgáltatása az „elemeket másol és kioszt” funkció volt, aminek eredménye az lett, hogy a rajztáblán, rajzgépekkel konstruáló mérnökök hirtelen váltottak a virtuális téregerek világába és feledésbe merült a pausz, ceruza, vonalzó, körző és a tus. A régi tervezési módszerek oly annyira elavultak az elmúlt esztendőök folyamán, hogy ma az oktatási intézményekből kikerülő fiatal mérnökök, technikusok nem használtak, sőt egyesek nem is láttak rajzgépet vagy ahhoz hasonló eszközt.

Mindössze 15 év alatt eljutott a technika addig, hogy lehetővé tette egy termék tervezését, elemzését, gyártás helyességének-használhatóságának ellenőrzését és élettartam megbecslését, annak valós fizikai megléte nélkül!

Összefoglaló néven ezt nevezzük CAE-nak (Computer Aided Engineering), melynek magyar megfelelője:

- Számítógéppel támogatott mérnöki tevékenység.

A CAE tehát egy átfogó gyűjtőnév, ami további részegységekre bontható. Az egyes számú táblázat egy tökéletes CAE megoldás egyes szakaszait mutatja be. A táblázat elemeit fentről lefelé tekintve megállapítható egy termék fejlesztésének logikai sorrendje.

PLM = PRODUCT LIFE MANAGEMENT (ÉLETCIKLUS KEZELÉS ÉS KÖVETÉS)	CAE		
	Mérnöki munka fázis	CAE program részegység és megoldás	Magyar megfelelő
	Geometria és alkatrész modellezés	CAD 2D / 3D PART	Számítógéppel támogatott tervezés 2 vagy 3 dimenziós test modellezés
	Alkatrész szerelési környezet modellezés	CAD 2D / 3D ASSEMBLY	Számítógéppel támogatott tervezés 2 vagy 3 dimenziós összeállítási környezet modellezés
	Alkatrész és összeállítási környezet fizikai viselkedésének elemzése	FEA, FEM, DYNAMIC SIMULATION, MOTION SIMULATION, FLOW AND THERMAL SIMULATION, ELECTRIC SIMULATION	Végeselem analízis és vizsgálat, dinamikai, mozgástani, áramlástan, hőtan, elektromos viselkedések szimulációja és elemzése
	Alkatrész gyártás előkészítése, gyártási szimulációja	CAM, CAM-TOOL SIMULATION	Számítógéppel támogatott gyártás és gyártás szimuláció
	Elemzés utáni újra tervezés és újra ellenőrzés	CAD 3D PARAMETRIC SYSTEMS, PDM	Számítógéppel támogatott tervezés 3 dimenziós parametrikus környezet, revíziókövetés
	Kisegítő alkalmazások	CAD PHOTORELASTIC, SHEET METAL DESIGN, MOLD DESIGN, PIPING&CABLE DESIGN	Valóskörnyezet fotórealisztikus megjelenítése, lemez forma, öntőforma, kábelezés
	Gyártási és műhelyrajz automaikus generálás	CAD DRAWINGS	Számítógéppel támogatott gyártás kész műszaki rajzok

A ma mérnöke már más tervezési filozófiával fejleszti az eszközöket, mint elődeik azt tették 30-40 évvel ezelőtt. A XXI. század tervezésének alapvető mozgatója a költséghatékonyság. Mint köztudott a repülés által megkívánt magas biztonság a világ vezető ipari ágazatává emelte azt, mely igen magas költségeket emészt fel a fejlesztés, gyártás és az üzemeltetés szakaszaiban egyaránt.

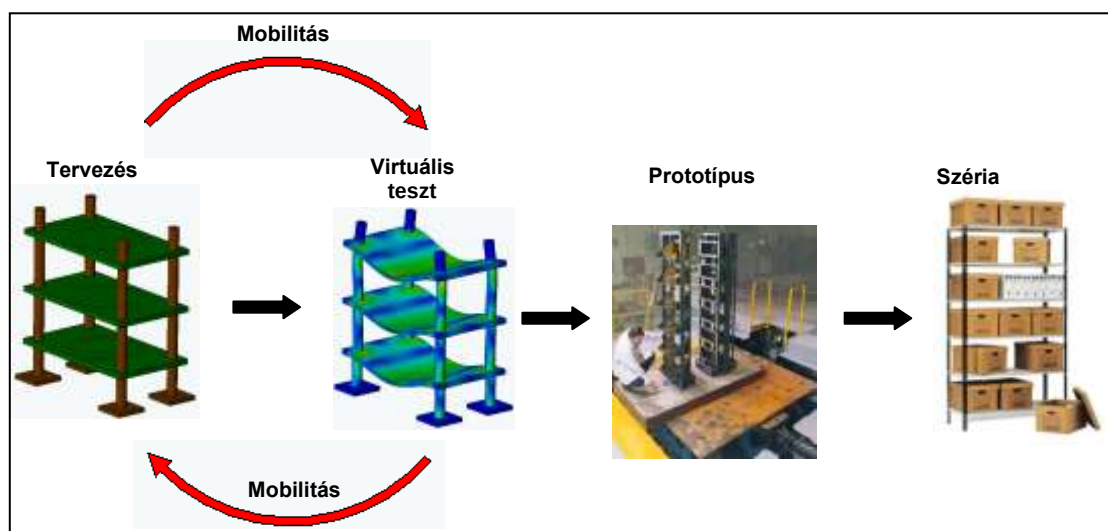
A CAE alkalmazások nagy részét is a repülőipar és a hadiipar fejlesztette önmagának, természetesen ma már egyéb ipari szegmenseket is átfog.

Repülőipari alkalmazását tekintve a CAE egyik előnye, hogy a prototípus legyártását megelőzően a szerkezeti darabokon vagy akár az egész repülőgépen elvégezhetjük a valóság

modellezését a virtuális térben. Ezzel pénzt, időt és újabb módosított prototípusok legyártását csökkentjük le. A virtuális szélsatorna és szilárdsági vizsgálatokat követően igen jó közelítéssel kaphatjuk azon eredményeket, melyeket a valós életben várunk. A virtuális vizsgálatok újrakezdése nem emészt fel plusz járulékos többletköltségeket. Legfőbb előnye, hogy parametrikus rendszerekkel integrált szimulációs alkalmazások könnyen és gyorsan képesek elemezni különböző modifikációjú virtuális prototípusokat, melyek még azt is megjósolják, hogy a szerkezeti elem mikor és melyik keresztmetszetében fog eltörni, tönkremenni.

Ha egy integrált CAE rendszer céltudatosan kerül alkalmazásra egy repülőgép fejlesztő üzemben, akkor a prototípus legyártása, földi- és légi tesztjeit megelőzően a múltbéli tapasztalatok alapján, közel 90% pontossággal megjósolhatók olyan aerodinamikai viselkedések és jellemzők, melyek évekkel ezelőtt csak a valós tesztek alkalmával voltak mérhetők. Ilyen például az emelkedőképesség, a fordulósugár, az ívelőlap hatásosság, a terhelés hatására jelentkező lehajlások, lengésképek vagy például a maximális élettartamra kalkulált túlélési rátája a kritikus daraboknak stb. A technika fejlődése nem áll meg és a jövőbeli kutatások célja, hogy az imént említett számot még tovább emeljék.

Kétségtelenül a CAE rendszerek leglényegesebb elemei az alkatrészek fizikai viselkedésének modellezésére szolgáló úgynevezett analízis eszközök, melyek egy részét az előző táblázat harmadik sora foglalja össze. Ha az 1-es számú ábrára tekintünk, akkor világosan realizálhatjuk ennek a lépésmozzanatnak a kizárólagos előnyét.



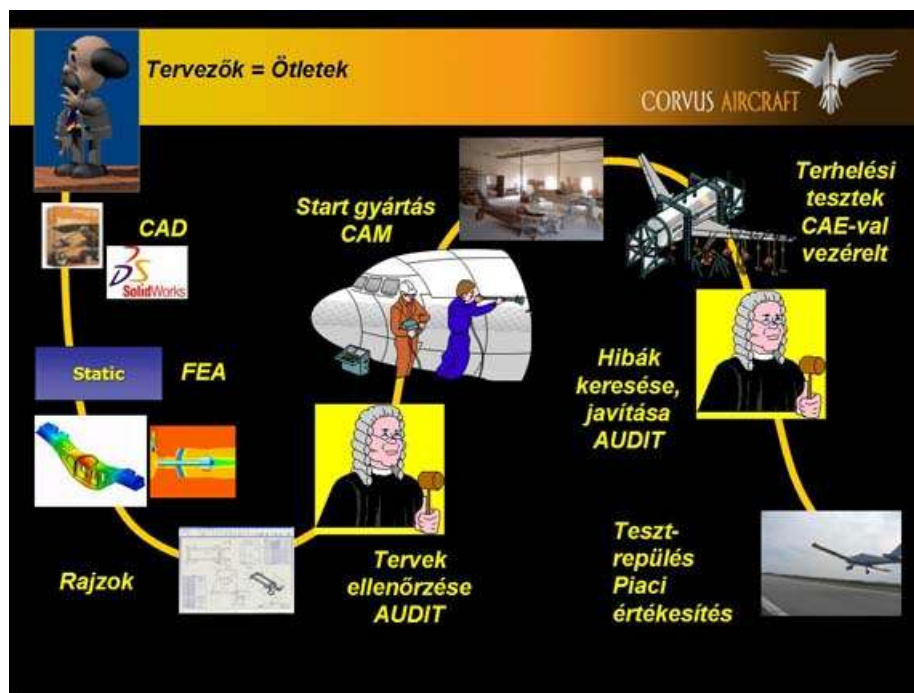
1. ábra – CAE alkalmazás legfőbb előnye

CAE alkalmazása repülőipari környezetben Magyarországon

Néhány évvel ezelőtt alakult hazánkban egy társaság, ahol 2005-től cégszerkezetben működve ultrakönnyű, túra-és kiképző repülőgépeket fejlesztenek, gyártanak és a megfelelő HgCAA engedélyek birtokában folyamatos légi karbantartást végeznek az értékesített típusokon.

A Corvus Aircraft Kft a kezdeti nehézségeken túljutva, ma már három telephelyen közel 50 főt foglalkoztat. A repülőgépeket használó magánszemélyek és oktatási-kiképző szervezetek számára legfontosabb természetesen a biztonság. Ezért a cégnél a legfejlettebb műszaki technológiákat alkalmazzák, hogy a kis szerkezeti tömeg mellett is elegendő biztonságot tudjanak garantálni. A fejlett gyártás és szerelés technológia természetesen egy integrált CAE rendszerre épül, melyek megkönnyítik a mindennapi munkát; a tervezéseket, dokumentálásokat, teszteléseket stb.

A 2. ábra összefoglalva mutatja a fejlesztés, gyártás és tesztelés szakaszait, melyben látható, hogy az integrált CAE alkalmazásokat többszörösen összetetten alkalmazzák a munkafolyamatokban.



2. ábra – CAE rendszer alkalmazása a Corvus Aircraft Kft-nél

A társaság közel két esztendő alatt komoly hazai és nemzetközi sikereket ért el, melynek eredménye, hogy partnercéget és kereskedő hálózatot épített ki Németországban, Spanyolországban, az Egyesült Arab Emírátsokban, a Dél-Afrikai Köztársaságban és az Amerikai Egyesült Államokban is. Az említett országok egén repülnek már Corvus repülőgépek mind magyar, mind pedig az adott térség felségjelének égisze alatt.

Példa bemutatás – alumínium fél-héjszerkezetű törzs analízise

A jövő kétségkívül abba az irányba mutat, hogy a hagyományos alumínium fél-héj szerkezeti elemeket kiváltják a kompozit anyagokból épülő héjszerkezetek. A Corvus Aircraft Kft-nél készülő repülőgépek fő teherviselő szerkezete is kompozit.

Jelen bemutató példában mégis a klasszikus törzs szerkezetei megoldást kívánom virtuális módon terhelés analízálni, mert ennek vizsgálata egyszerűbb és felépítése, kialakítása mindenki előtt jól ismert.

A vizsgálathoz a SolidWorks CAE alkalmazást és az abba integrált COSMOS rendszer terhelés analízis szoftver csomagját használok.

A tervezés és az analízis elkezdését megelőzően ismerkedjünk meg a SolidWorks-COSMOS CAE integrált tervező rendszerrel.

A SolidWorks CAE alkalmazásról dióhéjban...

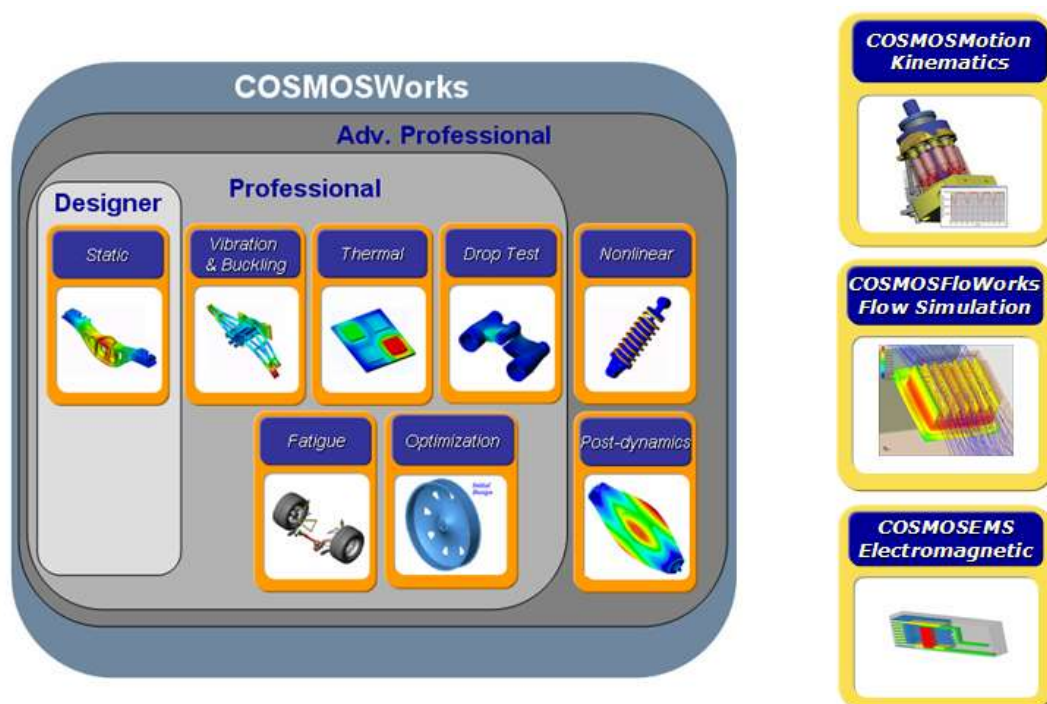
Napjainkra már tökéletes CAE megoldást kínáló SolidWorks története 1993-ig nyúlik vissza, mikor a társaságot megalapították az Amerikai Egyesült Államokban. Mindössze (!) 12 évvel ezelőtt, az első verzió piaci megjelenésekor csak egy egyszerű 3D CAD alkalmazást kínált a SolidWorks.

Alig több mint egy évtized alatt oly sok változáson ment keresztül, hogy mára már tökéletes partner mind a test- és összeállítás modellezésben, a gyártási- és rendszerrajzok generálásában, a gyártás előkészítésben, a szerkezeti analízisekben, revíziókezelésben,

látványtervezésben és animáció készítésben is. Egyéb modulokkal kiegészítve hatékony segítője a lemezalakító szerszámok, öntő- és fröccsszerszámok tervezőinek is.

A piac egyik vezető tervező szoftverévé vált, köszönhetően annak, hogy 1997-től a Dassault System fejleszti, amely társaság főprofiljába tartozik a repülőgép tervezés- és gyártás szoftveres infrastrukturális háttérparának megteremtése világszerte. A Dassault System rendszereire épül az AIRBUS INDUSTRY működése is.

A 3. ábra a SolidWorks kezelőfelülete alatt magába a rendszerbe integrált COSMOS APPLICATIONS (COSMOS alkalmazások) analízis megoldások színes palettáját mutatja be, mely eszközök a CAE legfontosabb alkalmazásai.

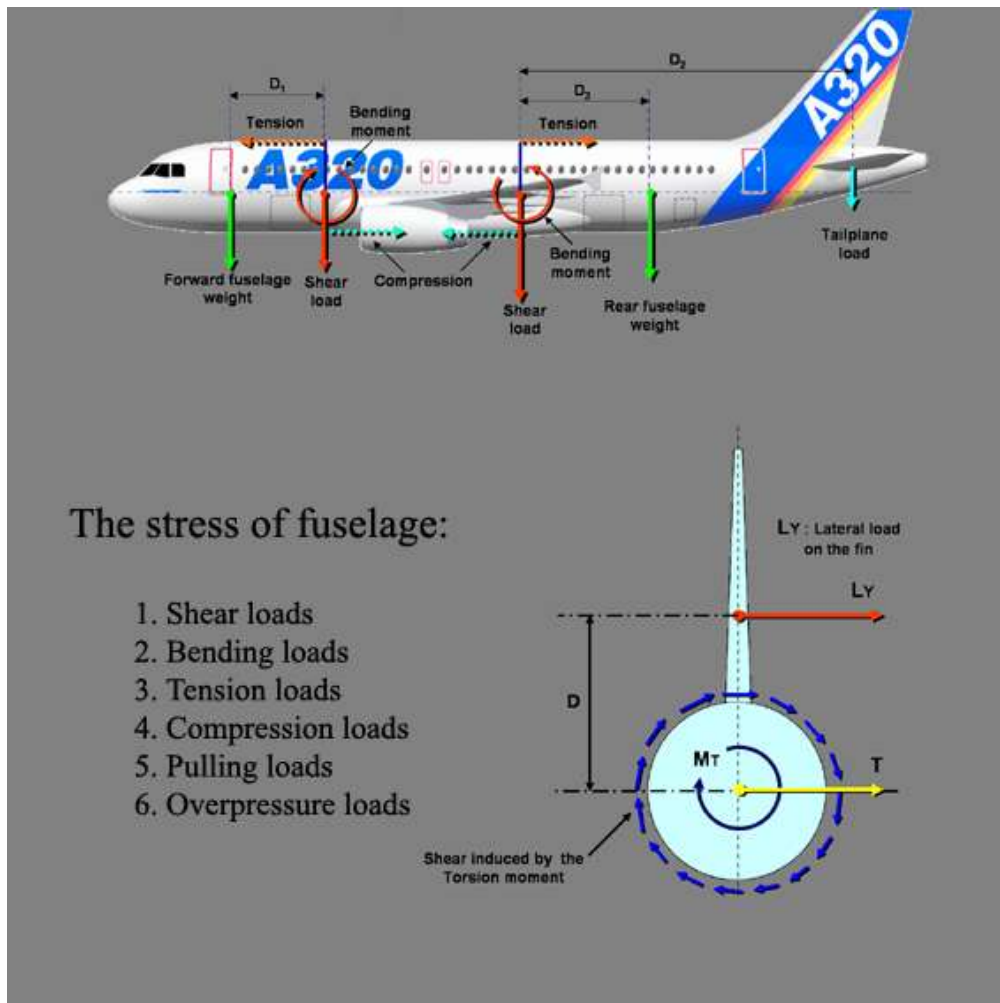


3. ábra – COSMOS analízis eszközök

Analízis, elemzés

Az analízis megkezdése előtt foglaljuk össze a törzs terheléseit. A 4. ábrán, látható módon ezek a súlyerő okozta terhelések különböző keresztmetszetekben, a nyíróerő, húzóerő, hajlító nyomaték, a vízszintes vezérsíkon ébredő erő és a függőleges irányfelület-oldalkormány együttesből fellépő csavaró nyomaték. Ezekhez hozzájárul még a kabinnyomás okozta hatás, mely a legveszélyesebb a kifáradást tekintve.

Ezek az eredők összetetten terhelik a szerkezetet és az egyes elemekben különböző nagyságú és értelmű belső feszültségeket keltenek.



4. ábra – A törzs összetett terhelése; a megnevezések: shear load-nyíróerő, bending load-hajlítóerő, tension load-húzóerő, compression load-nyomóerő, pulling load-tépőerő, overpressure-kabin túlnyomás

A legkritikusabb terhelés a kabinban levő túlnyomásból ébred, erre kell a törzset méretezni szilárdságilag. A túlnyomásból adódóan három feszültségi hatás alakul ki, melyet az elemeknek egyenletesen kell felosztaniuk és elnyelniük.

A gyűrűfeszültség (hoop stress) a legnagyobb, aminek értéke a túlnyomástól (Δp), a középtátmérőtől (D) és a falvastagságtól (t) függ a következőképpen:

$$\sigma_1(\text{hoopstress}) = \frac{D \cdot \Delta p}{2t}$$

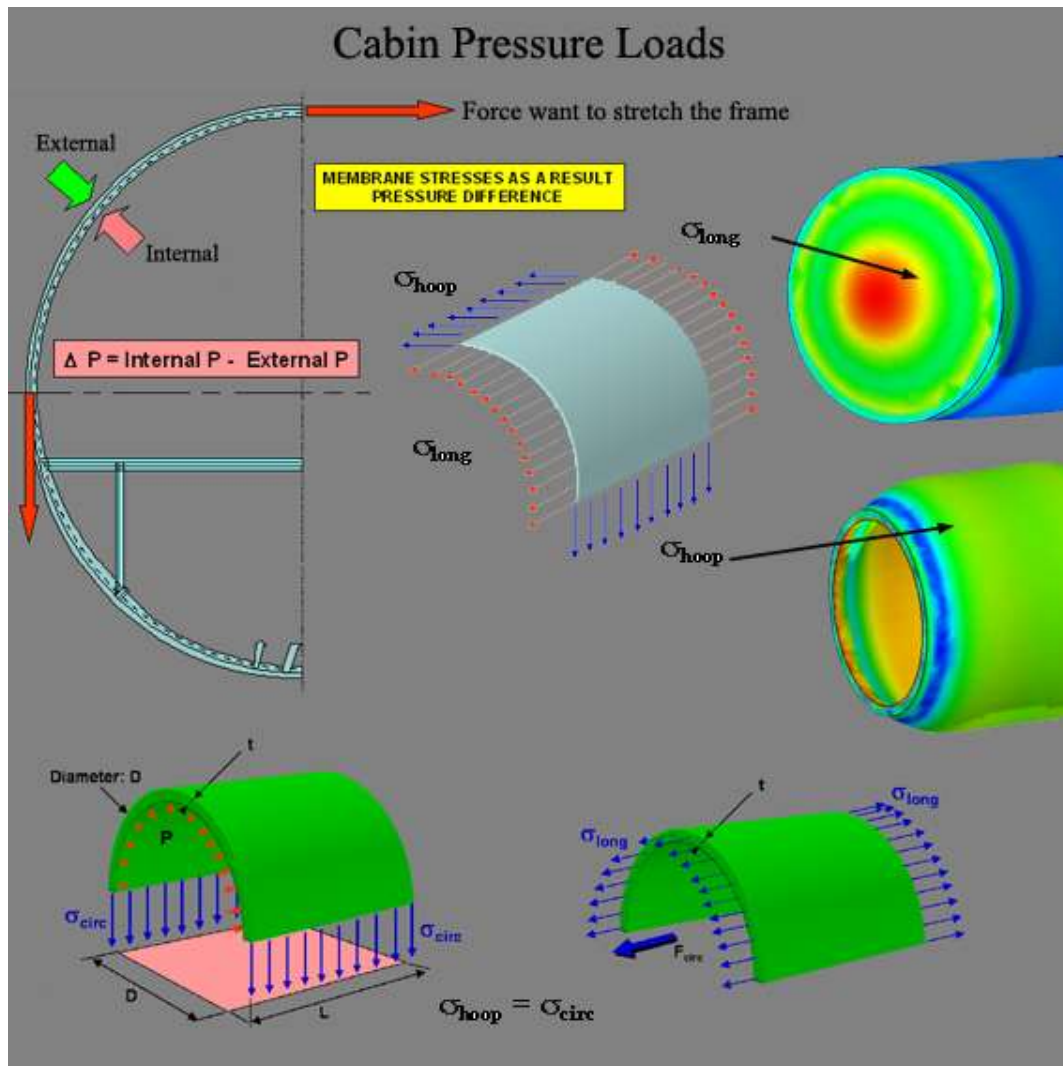
A szálfeszültség (longitudinal stress) minden esetben a gyűrűfeszültség értékének fele és a következő alakban írható le:

$$\sigma_2(\text{longitudinalstress}) = \frac{D \cdot \Delta p}{4t}$$

A harmadik a belső nyomás létezéséből ered, hogy hatást kelt a lezárt kabinra a repülőgép hát és előoldalán:

$$\sigma_3 = -p_b$$

Összefoglalva az 5. ábra mutatja az előbb leírtakat, melyben az egyes feszültségek ébredésének irányait is láthatjuk.

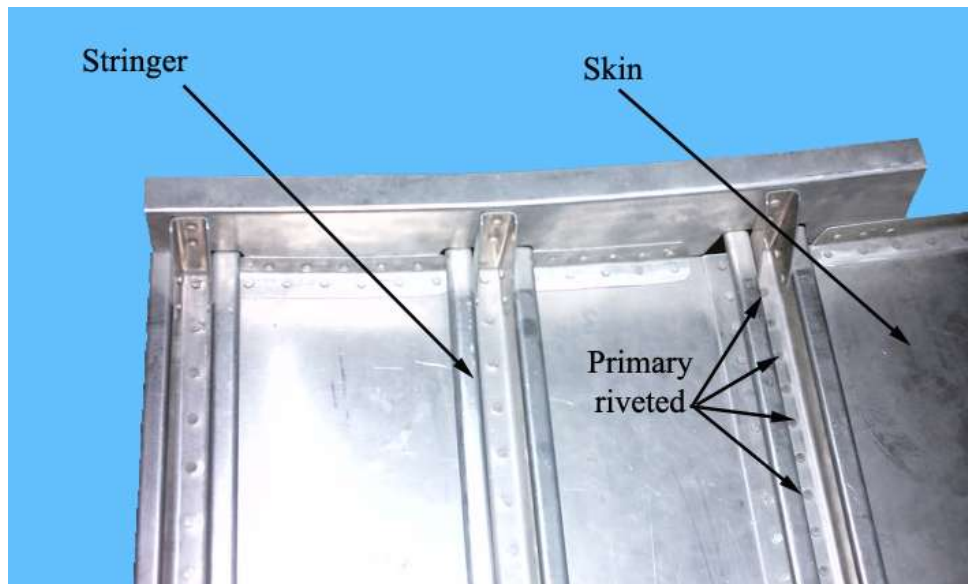


5. ábra – A túlnyomás okozta feszültségi hatások a törzsben

A túlnyomásos fél-héjszerkezetű repülőgép törzsben szintén ez az úgynevezett membrán teória jelentkezik és fűszertja legjobban az elemeket. A konstrukció elemeit úgy építik össze, hogy nem látható kis-és vagy közepes károsodás esetén is kellő biztonság maradjon, ne következzen be katasztrófa az üzemeltetés során a két kötelező periodikus szerkezeti átvizsgálás között még a károsodott elváltozás nem diagnosztizálható. Ezt az eljárást nevezik „fail-safe” metodikának.

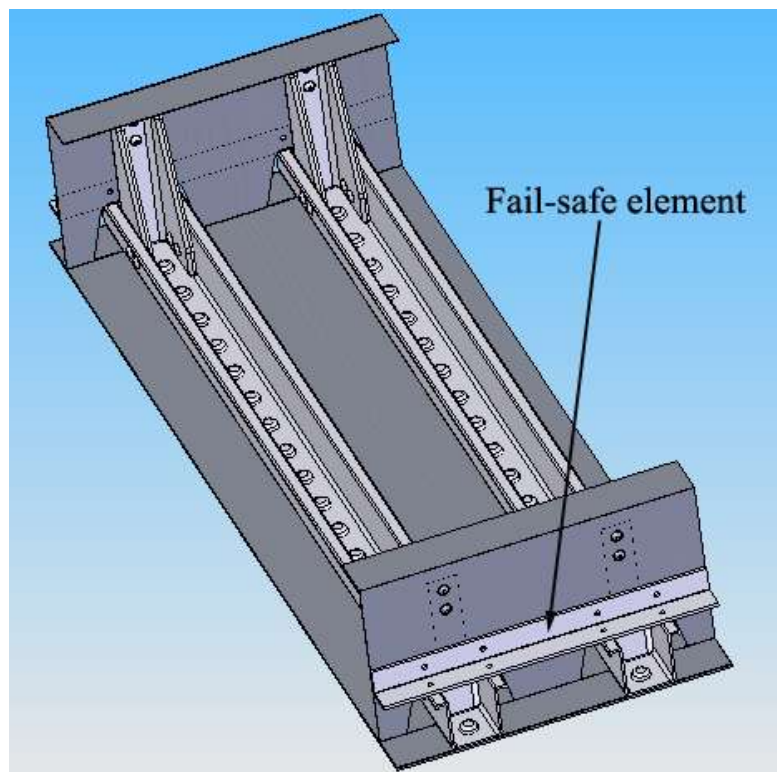
A tervezés szakaszában integrált CAE analízis eszközök segítségével könnyen és egyszerűen modellezhetjük a normáltól eltérő leromlott állapotot, mikor bizonyos elemek közötti kapcsolat gyengült. Kiválóan szemléltethetjük a „károsodott virtuális modellen”, hogy mi is történhet a valóságban akkor, és számítást végezhetünk arra is, hogy a repülőgép törzse a következő szervizig ahol a teljes szerkezeti és NDT (non destructive testing) vizsgálat megtörténik, kibírja e folyamatos üzem során a normál és túlméretezési terheléseket vagy sem.

A 6. ábra a Boeing 737 típusú repülőgép alumínium fél-héj törzs szerkezet felépítésének egy részletét, szemlélteti. Az elemek a skin (burkoló úgynevezett héjlemez), stringer (hossztartó), primary riveted (elsődleges teherhordó szegecseles), emellett látható még az ábrán nem megnevezett törzskeret (frame) és az összekapcsoló pántok (tie-clip).



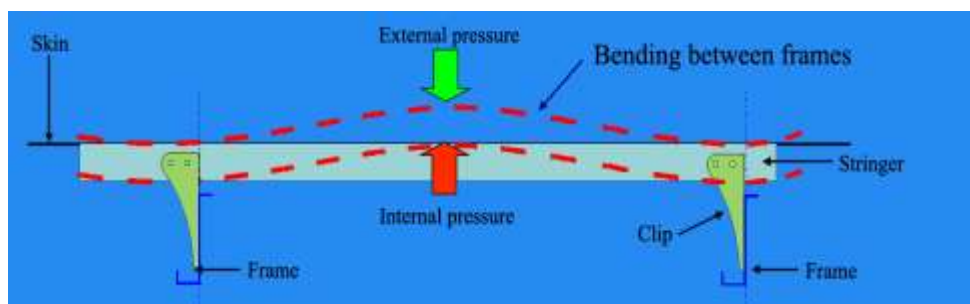
6. ábra – Alumínium fél-héj szerkezeti elem darabok (Boeing 737)

A 7. ábra már ezen elemeknek a 3D SolidWorks-el készült modellje, ahol a beforgatott nézetnek megfelelően látható az úgynevezett „fail-safe” elem, aminek lényege, hogy az elemek közötti kapcsolatot tovább biztosítják, másodlagos terheléshordó szegecscseléssel.



7. ábra – Alumínium fél-héj szerkezeti elem 3D SolidWorks-el modellezve

A konstrukcióban a legfontosabb elem a hossztartó (stringer) melynek feladata elsősorban a külső-belső nyomások különbségéből fellépő hajlító igénybevétel felvétele (8. ábra), másrészt az axiális irányú erők kihajlási instabilitást okozó effektusának csillapítása. Ezt megfelelően kialakított inerciával érjük el.



8. ábra – A hossztartó egyik igénybevétele a külső (external) és a belső (internal) nyomás különbség miatt fellépő hajlítás

A következőkben röviden összefoglalok különböző alakú gyakori hossztartó geometriát, ami használatos a fél-héj szerkezetek építésében. Minden geometria kihajlási tűrőképessége FEA vizsgálattal lett megállapítva.

Alkalmazható hossztartók

2. táblázat

Nr.	Profilok	A [mm ²]	I _x [mm ⁴]	e _y [mm]	K _x [mm ³]	I _y [mm ⁴]	e _x [mm]	K _y [mm ³]	K _x /K _y
1	U-1.001	167	24645	14.8	1665	15867	19	835	1.994
2	U-2.002	167	22614	14.5	1561	15451	17.5	883	1.77
3	U-3.003	167	25390	15	1693	15557	19	819	2.05
4	Z-1.004	167	58528	22	2660	4815	22.5	214	12.43
5	Z-2.005	167	56600	24	2358	5005	22.5	222	10.63
6	Z-3.006	167	59222	22.5	2632	4662	21.5	217	12.13
7	BOEING 737.007	167	22531	18.1	1245	15193	15.5	980	1.27
8	OPTIMIZED U.008	167	23506	18.1	1299	15791	15	1053	1.2
9	I-OPTIMIZED.009	167	23563	16.4	1437	1157	12.75	91	15.8

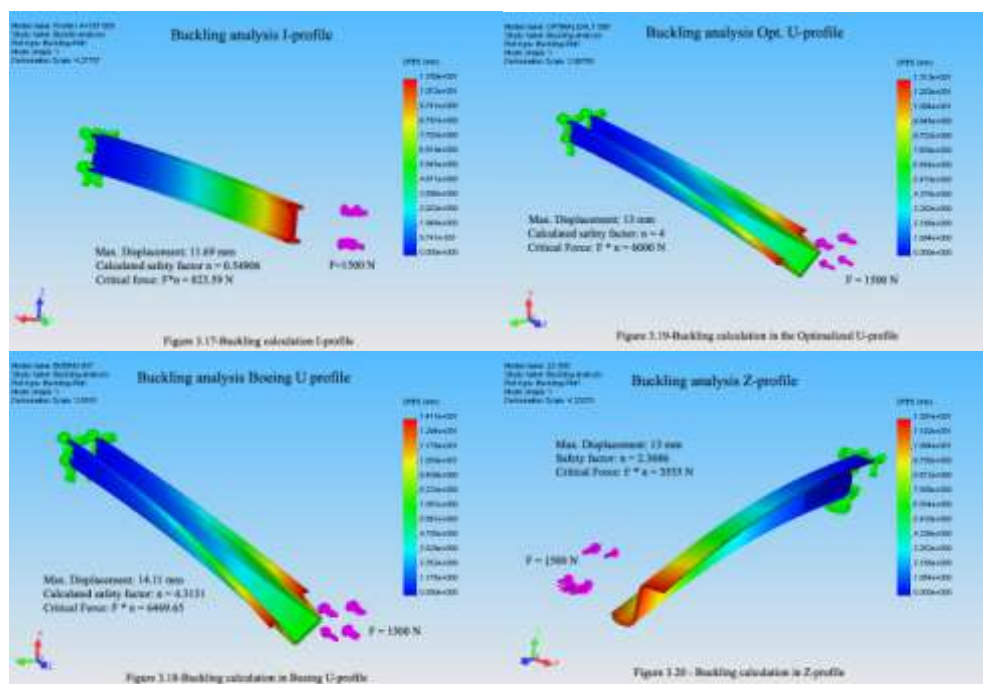
A végeelem vizsgálatban egységesen minden profilra $F = 1500 \text{ N}$ az axiális terhelés, $l = 1000 \text{ mm}$ profil hosszon.

A kritikus kihajlási instabilitást okozó erő nagyságát a program az Euler-féle elv szerint kalkulálja:

$$F_{cr} = \left(\frac{\pi}{l_0} \right)^2 \cdot I_{\min} \cdot E \quad \text{ahol:}$$

l_0 – megfogástól függő hossz, $I_{\min}$ – minimális inercia, E – rugalmassági modulus

A következő ábrák a 2. táblázatban látható 9-es, 8-as, 7-es, 5-ös sorszámú profilok analízis eredményeit szemléltetik.



9. ábra együttes – Profilok kihajlási analízisei

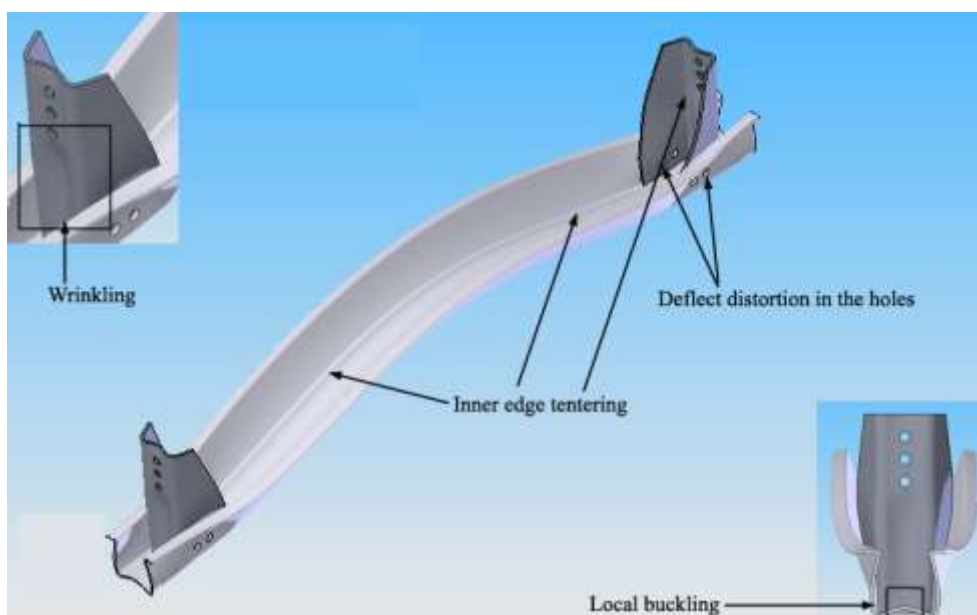
Az analízisek eredményei tükrében megállapítható, hogy a kihajlási stabilitás vesztes szempontjából az I profil a legérzékenyebb, még a legellenállóbb az U profil. A 3. számú táblázatban összegezve találjuk az eredményeket.

Kihajlási vizsgálat eredmények		3. táblázat
Vizsgált profil megnevezése	Biztonsági tényező az alkalmazott erő $F = 1500 \text{ N}$ hatására	A profil maximális elmozdulása, stabilitás vesztese az alkalmazott erő $F = 1500 \text{ N}$ hatására [mm]
Boeing 737 U Nr.007	4.3131	14.11
Optimized U Nr.008	4	13
Optimized I Nr.009	0.54906	11.69
Profile Z Nr.005	2.3686	13

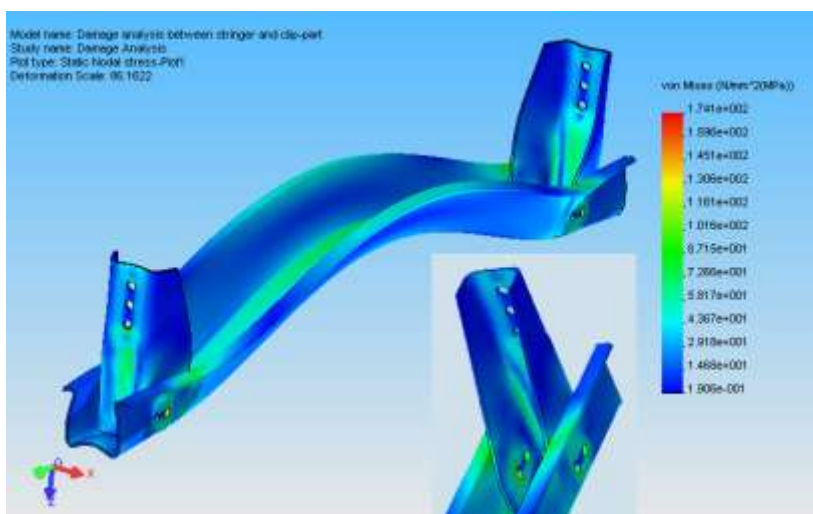
Hasonlóan vizsgáltam ugyanazzal az erővel, ugyanolyan hosszon az egyes profilok hajlítással szembeni ellenálló képességét is, melynél már az I tartó volt a legjobb, a Z és az U profilok kis százalékos eltéréssel azonosan viselkedtek, azonban a Z profil deformációja nagyságrendekkel magasabb. Az eredmények a 4. számú táblázatban láthatók meg.

Hajlítási vizsgálat eredmények		4. táblázat
Vizsgált profil megnevezése	Max. von Mises feszültség a profilban [Mpa]	Max. elmozdulása a profilnak [mm]
Boeing 737 U Nr.007	75.92 (~76)	0.3842 (~0.4)
Optimized U Nr.008	72.83 (~73)	0.5197 (~0.5)
Optimized I Nr.009	21.86 (~22)	0.1844 (~0.2)
Profile Z Nr.005	68.32 (~69)	0.8082 (~0.8)

A következő ábrák a profilok összetett analízisének eredményeit mutatják be, a deformációkkal és az elsődleges károsodásra hajlamos zónákkal együtt.

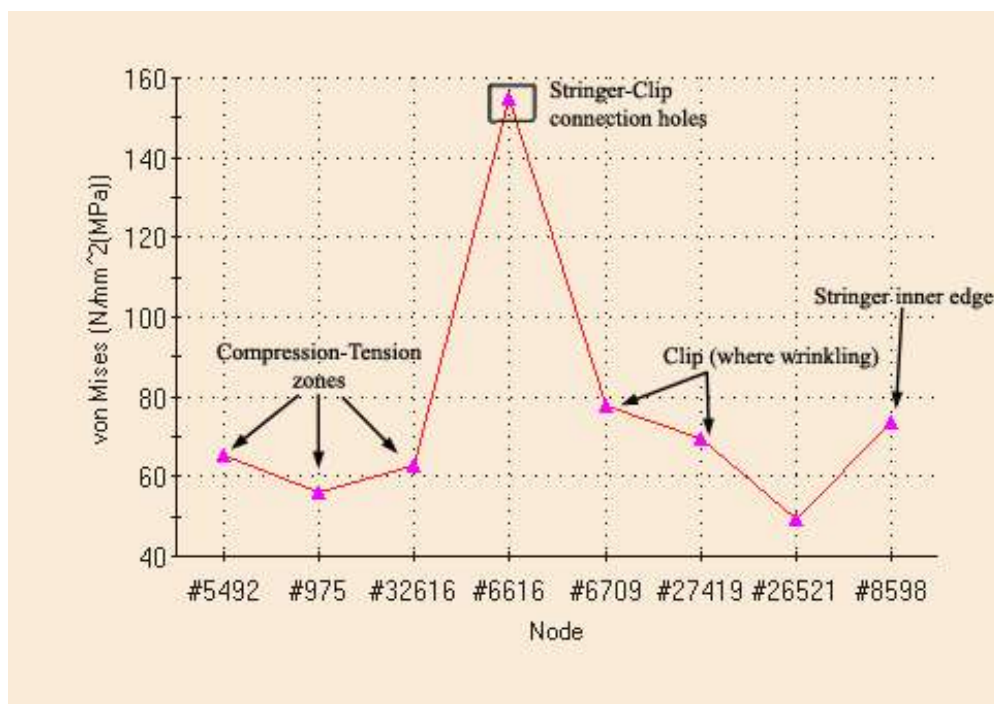


10. ábra – U profil helyenkénti deformációi, károsodási zónái; az angol megnevezések magyar megfelelői: wrinkling – gyűrődés, tenting – feszítő nyúlás, local buckling – helyi kihajlás, deflect distortion in the holes – szeges furat eltorzulása



11. ábra – Feszültség eloszlási térkép

A vizsgálatok során a feszültség eloszlási képből könnyen és egyszerűen meghatározhatjuk az elemekben ébredő lokális feszültség értékeket is, melynek grafikus elemzését is elvégzi a program.



12. ábra – Feszültségek lokális értékei, az angol megnevezések magyar megfelelője: Compression-tension zones – nyomási-húzási zónák, stringer-clip connection holes – hossztartó-pánt kapcsolatok furatai, clip (where wrinkling) – pánt ahol a gyűrődés ébred, stringer inner edge – hossztartó belső éle

Az eredmények tükrében a következő táblázat összefoglalja a deformáció miatt kialakuló anyag és elemkárosodásokat, illetve azok következményét.

Összegzés		5. táblázat
Deformáció	Anyag károsodás	Eredmény
Gyűrődés	Hajszál repedések kialakulása	Telherbíróképesség csökken
Helyi kihajlás	Helyi anyag folyás	Keresztmetszet vékonyulás
Furatok eltorzulása	Alakmódusulás, feszültség torlódás	Szegecs kilazulása, relaxációja
Él feszítő nyúlása	Hajszál repedések kialakulása	Kifáradási feszültség csökkenése

Összegzés

A számítógéppel támogatott tervező rendszerek hasznosan használhatók a tervezés és a szilárdsági kalkuláció szakaszaiban, illetőleg a virtuális szerkezeti károsodás és ellenőrzés folyamataiban, mert a bemutatott módszerekkel elemezhetők a várható lehetséges helyi és kiterjedt károsodási zónák, mindemellett a programok kiegészíthetők gyártás ellenőrző részprogramokkal.

Ennek ellenére a valós idejű szerkezet ellenőrzés, anyagvizsgálat nagyon lényeges folyamata a repülőgép fejlesztésnek és karbantartásnak. Helyes károsodás elemzés csak valós idejű kísérletekkel végezhető, melyek után a tapasztalati eredmények, tények segítenek a tervezés lépéseiben, mint például a helyes falvastagság és geometria megválasztása,

feszültségi és kífáradási határok meghatározása, üzemeltetési hőmérsékletek alsó és felső értékei, károsodás felmérése; avagy hogyan képes a szerkezet a behatásoknak ellenállni, anyagi jellemzők meghatározása stb.

IRODALOM

- [1] Nicholas J. Hoff*: Monocoque, Sandwich and Composite Aerospace Structures, Technomic Publishing Company Inc. Lancaster, Pennsylvania U.S.A. 1986. ISBN No. 87762-454-2 (**As Hungarian name is Miklós Hoffmann*)
- [2] Wieslaw Staszewski – Christian Boller – Geof Tomlinson: Health Monitoring of Aerospace Structures, Wiley Ltd and EADS 2005. ISBN 0-470-84340-3
- [3] Steiger István: Repülőgépek, Műegyetemi Kiadó Budapest, 1999. 70878
- [4] Vörös Gábor: Repülőgép Szerkezetek és Rendszerek I. Légiforgalmi és Repülőtéri Igazgatóság Budapest, 1995.