



DEBRECENI EGYETEM
MŰSZAKI KAR
GÉPÉSZMÉRNÖKI TANSZÉK

UNIVERSITY OF DEBRECEN
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF MECHANICAL
ENGINEERING

**HÁLÓZÁS ALAPÚ ÉS HÁLÓZÁS
NÉLKÜLI VÉGESELEMES
TECHNOLÓGIÁK ÖSSZEHAISONLÍTÁSA
SAJÁTFREKVENCIA ÉS LINEÁRIS
STATIKAI ANALÍZISEKEN
KERESZTÜL
SZAKDOLGOZAT**

Szűcs Imre

Gépészeti szimulációs szakmérnök



DEBRECENI EGYETEM
MŰSZAKI KAR
GÉPÉSZMÉRNÖKI TANSZÉK

UNIVERSITY OF DEBRECEN
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF MECHANICAL
ENGINEERING

Debrecen

2026

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék.....	II
Jelölések jegyzéke	V
1 Bevezetés	1
1.1 A végeselemes módszer összefoglalása.....	2
1.2 Numerikus diszkretizációs módszerek	3
1.2.1 Háló alapú módszerek (Mesh-based)	3
1.2.2 Háló nélküli módszerek (Meshless / Meshfree)	3
1.2.3 Hibrid módszerek.....	4
2 Hálózás alapú (Ansys Mechanical) és hálózás nélküli (SimSolid) technológia elméleti háttere	6
2.1 Lineáris statika	6
2.1.1 Ansys megközelítés (hálózás alapú technológia)	6
2.1.2 A SimSolid megközelítés (hálózás nélküli technológia)	8
2.2 Sajátfrekvencia analízis	10
2.2.1 Ansys megközelítés (hálózás alapú technológia)	10
2.2.2 A SimSolid megközelítés (hálózás nélküli technológia)	11
3 Az Ansys Mechanical és a SimSolid főbb jellemzői, funkcionalitása.....	12
3.1 Ansys Mechanical.....	12
3.1.1 Architektúra és felhasználói környezet: Az Ansys Workbench	12
3.1.2 Geometria kezelés és hálózás	13
3.1.3 Analízis típusok	13
3.1.4 Hőtani analízis (Thermal Analysis).....	14
3.1.5 Számítási teljesítmény és HPC (High-Performance Computing).....	14
3.1.6 Validáció és megbízhatóság.....	15
3.1.7 Alkalmazási előnyei a következő területeken	15
3.2 Simcenter SimSolid.....	15

3.2.1	A technológiai háttér	16
3.2.2	Kulcsfontosságú funkciók és képességek.....	16
3.2.3	Ipari alkalmazások és előnyök	17
3.2.4	Pontosság és validáció	17
4	Verifikációs vizsgálatok	18
4.1	A verifikációs lépés általános információi	18
4.2	Elliptikus membrán statikai vizsgálata	19
4.2.1	Ansys Mechanicalban futtatott verifikációs statikai analízis – Elliptikus membrán	20
4.2.2	SimSolidban futtatott verifikációs statikai analízis – Elliptikus membrán	24
4.2.3	Eredmények összegzése – Elliptikus membrán.....	25
4.3	Befogott tartó sajátfrekvencia vizsgálata	26
4.3.1	Ansys Mechanicalban futtatott verifikációs sajátfrekvencia analízis – Befogott tartó.....	27
4.3.2	SimSolidban futtatott verifikációs sajátfrekvencia analízis – Befogott tartó	28
4.3.3	Eredmények összegzése – Befogott tartó.....	29
5	Ipari példák – Valós mérnöki kihívások.....	31
5.1	A végelelemes módszer ipari szerepe	31
5.2	Konzol lineáris statikai vizsgálata	32
5.2.1	Ansys Mechanicalban futtatott konzol lineáris statikai vizsgálata	33
5.2.2	SimSolidban futtatott konzol lineáris statikai vizsgálata	34
5.2.3	Eredmények összegzése – Konzol vizsgálata	36
5.3	Főtengely sajátfrekvencia vizsgálata.....	36
5.3.1	Ansys Mechanicalban futtatott főtengely sajátfrekvencia vizsgálata.	37
5.3.2	SimSolidban futtatott főtengely sajátfrekvencia vizsgálata.....	38
5.3.3	Eredmények összegzése – Főtengely vizsgálata	39
5.4	Lemezkonzol lineáris statikai vizsgálata	40
5.4.1	Ansys Mechanicalban futtatott lemezkonzol lineáris statikai vizsgálata	41
5.4.2	SimSolidban futtatott lemezkonzol lineáris statikai vizsgálata.....	43

5.4.3	Eredmények összegzése – Lemezkonzol vizsgálata	45
5.5	Vonószem (stl) lineáris statikai vizsgálata	45
5.5.1	Ansys Mechanicalban futtatott vonószem (stl) lineáris statikai vizsgálata	46
5.5.2	SimSolidban futtatott vonószem (stl) lineáris statikai vizsgálata	47
5.5.3	Eredmények összegzése – Vonószem vizsgálata	48
5.6	Mellső keresztartó statikai vizsgálata	49
5.6.1	Ansys Mechanicalban futtatott mellső keresztartó lineáris statikai vizsgálata	50
5.6.2	SimSolidban futtatott mellső keresztartó lineáris statikai vizsgálata	53
5.6.3	Eredmények összegzése – Mellső keresztartó vizsgálata	55
6	Eredmények összehasonlító elemzése	56
6.1	Háló alapú és háló nélküli technológiai összevetése	56
6.2	Szoftverek összehasonlítása	57
6.2.1	Felhasználhatóság	57
6.2.2	Teljesítmény	57
6.2.3	Pontosság	58
6.2.4	Modellezési rugalmasság	58
6.2.5	Peremfeltételek és terhelések definiálhatósága	58
6.2.6	Szerelések kezelése	58
6.2.7	Időigény (előkészítés, futtatás, kiértékelés)	59
7	Fő következtetések, ajánlások, javaslatok	60
	Irodalomjegyzék	62
	Köszönetnyilvánítás	64

Jelölések jegyzéke

σ	[MPa]	feszültség
f	[Hz]	sajátfrekvencia
ω	$\left[\frac{rad}{sec}\right]$	körfrekvencia
s	[mm]	elmozdulás
ρ	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	sűrűség
E	[GPa]	rugalmassági modulus
ν	[—]	Poisson-tényező
ε	[1]	alakváltozás

1 Bevezetés

A modern mérnöki gyakorlatban a végeselemes szimuláció az egyik legfontosabb eszköz a szerkezetek, gépészeti alkatrészek, összetett rendszerek viselkedésének vizsgálatára. Az ipari fejlesztési ciklusok rövidülése, valamint a prototípusgyártás költségeinek csökkentése miatt a numerikus modellezési módszerek szerepe folyamatosan növekszik. Ennek következtében a klasszikus, hálózás alapú végeselemes módszerek mellett megjelentek a hálómentes, alternatív közelítések is, amelyek új lehetőségeket kínálnak a mérnöki gyakorlatban. Azonban a hibrid technológiák alkalmazása is egyre jelentősebbé válik.

A szakdolgozat célja, hogy átfogó módon hasonlítsam össze a két legfontosabb technológiai irányt: a hagyományos, háló alapú FEM-et (Finite Element Method) és a háló nélküli (meshless) módszert. A vizsgálat során az iparban széles körben alkalmazott, háló alapú Ansys Mechanical, valamint a hálómentes technológiát képviselő Simcenter SimSolid szoftver kerül alkalmazásra. A dolgozat a technológiák működését és különbségeit két elemzéstípuson keresztül mutatja be, ezek a sajátfrekvencia-analízis és lineáris statikai vizsgálatok. Célom az iránymutatás adás, hogy mely megoldás, mely területen használható hatékonyan.

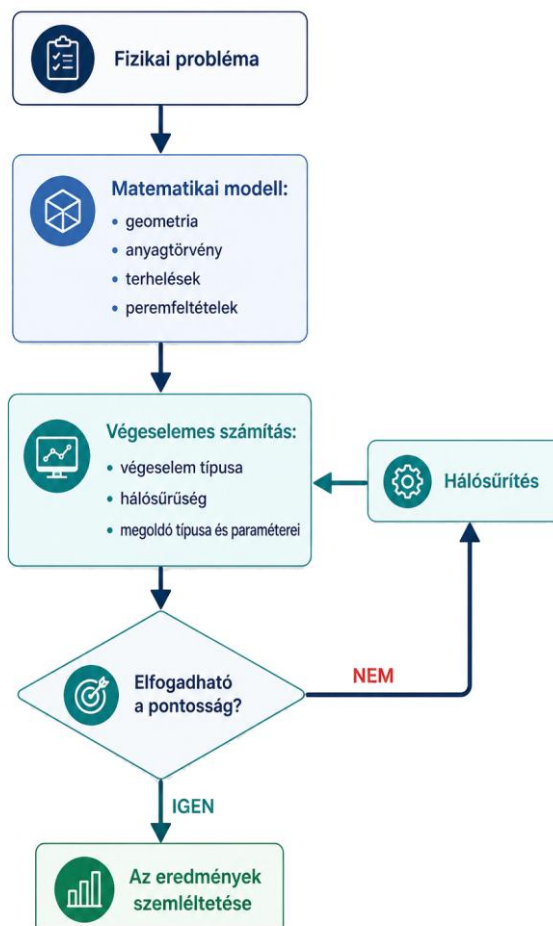
A dolgozat első részében osztályozom a mechanikai feladatokra használható különböző végeselemes technológiákat és ezek közül a háló alapú, valamint a háló nélküli technológiát vizsgálom meg részletesen. Ezt követően a vizsgált szoftverek rövid bemutatása történik, különös tekintettel az alkalmazott technológiákra és az ipari gyakorlatban betöltött szerepükre.

A szakdolgozat második felében verifikációs feladatokon keresztül kerül sor a módszerek objektív összehasonlítására. A verifikáció után valós ipari példák bemutatásával történik a technológiák gyakorlati működésének elemzése a két szoftverben. Az eredmények mind objektív (idő, pontosság, konvergencia), mind szubjektív (használhatóság, előkészítési igény) szempontok szerint kerülnek kiértékelésre.

1.1 A végeselemes módszer összefoglalása

A végeselemes módszert a mérnöki gyakorlatban fizikai problémák megoldására alkalmazzuk. Ezek a problémák jellemzően abból adódnak, hogy egy alkatrészt, gépet, berendezést különböző terhelések érnek. A vizsgálathoz a fizikai jelenséget matematikai modellel írjuk le, amely rendszerint differenciálegyenletekhez vezet.

Ezt a matematikai modellt a végeselem-módszer segítségével oldjuk meg. Mivel numerikus eljárásról van szó, a kívánt pontosság kiemelten fontos szempont. Általánosságban elmondható, hogy a végeselemek számának növelésével – azaz a háló sűrítésével (h-adaptivitás) – nagyobb pontosság érhető el, ha háló alapú technológiáról beszélünk. A végeselemes analízis klasszikus folyamatát az 1.1. ábra szemlélteti [1]. Azonban a hálózás nélküli technológia esetén ez másként van, amit a 2. fejezetben mutatok be.



1.1. ábra. A végeselem-vizsgálat klasszikus folyamata [1]

1.2 Numerikus diszkretizációs módszerek

A végeselemes módszer mára rendkívül sokrétűvé vált. A technológiákat többféle szempont szerint csoportosíthatjuk, attól függően, hogy a numerikus módszer alapjait, a vizsgált fizikai jelenséget vagy a számítási módot vesszük alapul.

1.2.1 Háló alapú módszerek (Mesh-based)

Ez a "klasszikus" út. A 3D tartományt elemekre (tetraéder, hexaéder stb.) bontjuk, és az elemek csomópontjai között lesznek definiálva a kapcsolatok. Ezzel a területtel később részletesebben foglalkozok, így most csak alapszinten említem meg.

FEM (Finite Element Method): A legelterjedtebb, előnye a kiforrottság, hátránya viszont, hogy a feladatok megoldása időigényes és egy szint felett már komoly szakértelmet igényel.

FVM (Finite Volume Method): Főleg áramlástanban (CFD) dominál. Itt a háló a kontrolltérfogatok határolja be.

1.2.2 Háló nélküli módszerek (Meshless / Meshfree)

Itt nincsenek előre definiált elemek, nincs hagyományos értelemben vett geometria alapú diszkretizáció, csak egy ponthalmaz (pontfelhő). A pontok közötti kapcsolatokat a pontok környezete (befolyási tartomány) határozza meg dinamikusan.

Számos különböző algoritmus létezik, de a legelterjedtebbek a következők:

- *SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics)*: Az egyik legrégebbi módszer. Eredetileg asztrofizikára fejlesztették ki, de ma már széles körben használják folyadékok és robbanások modellezésére. A tartományt tömeggel rendelkező részecskék reprezentálják.
- *EFGM (Element-Free Galerkin Method)*: A Galerkin-módszeren alapul, de a közelítő függvényeket nem elemeken, hanem pontfelhőkön (Moving Least Squares - MLS) határozzák meg. Gyakori a szilárdtest-mechanikában.
- *RKPM (Reproducing Kernel Particle Method)*: Az SPH javított változata, amely pontosabb közelítést ad a tartomány szélein (peremfeltételek kezelése).

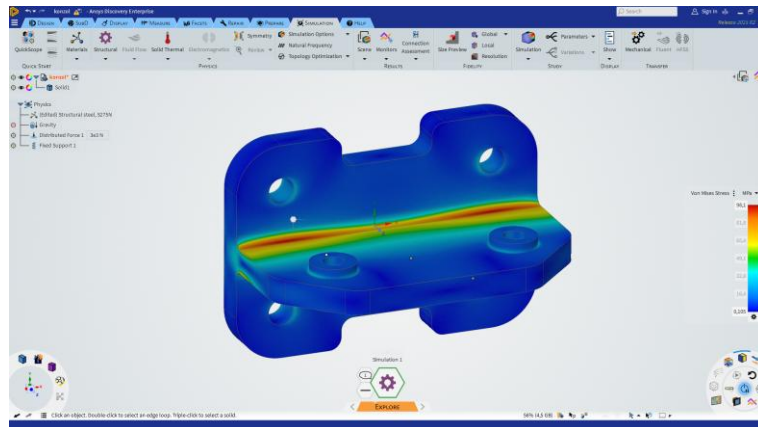
- *MLPG (Meshless Local Petrov-Galerkin)*: Ez a módszer teljesen mentes bármiféle háttérhálótól (még az integráláshoz sem használ hálót), helyi tartományokon végzi el a számításokat.

Ez a terület is a szakdolgozatom témája, így a későbbiekben bemutatom a SimSolidhoz köthető technológiát, amely nem sorolható be egyik fenti kategóriába sem.

1.2.3 Hibrid módszerek

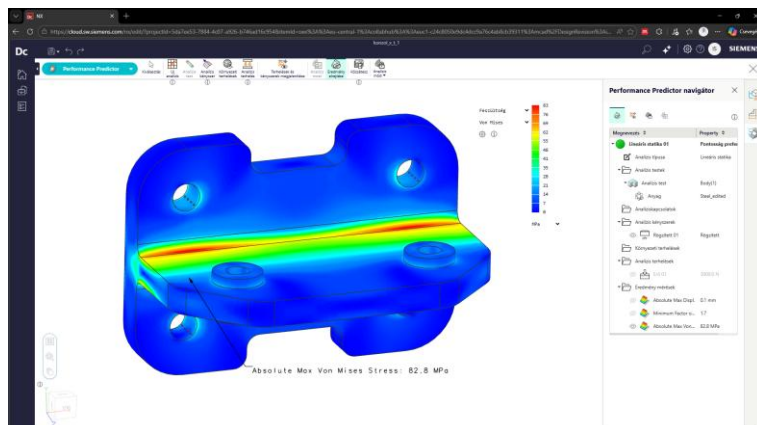
A hibrid módszerek háló nélküli megoldásokat és a háló alapú módszereket ötvöznék. Több technológia is használatban van, de két megoldást bemutatok nagy vonalakban az érdekesség kedvéért.

Voxel alapú technológia, ahol a voxel (volume pixel) lényegében egy szabályos, kocka alakú elem. Ha egy testet voxelekre bontunk, akkor valójában egy rendkívül szabályos, strukturált háló alapú (Grid-based) rendszert hozunk létre. Jó példa erre a technológiára az Ansys Discovery Live [2], ami első megközelítésben úgy tűnik, hogy hálónélküli technológia. Speciális matematikai függvényeket használnak a geometriai határok kezelésére, elsimítására. A technológia sajátossága, hogy gyors eredményeket ad (1.2. ábra), de inkább előjelzésre használható korlátozottsága miatt.



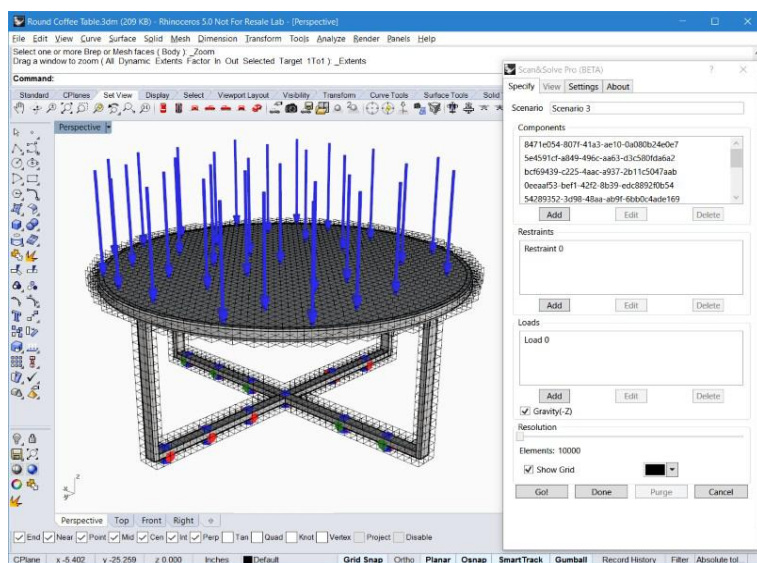
1.2. ábra. Ansys Discovery Live – Voxel alapú FEA technológia

A Siemensnek is van voxel alapú technológiája Performance Predictor (1.3. ábra) néven, ami mechanikai esetek előzetes vizsgálatára használható a Designcenter NX X Essentialsben [3].



1.3. ábra. Performance Predictor – Voxel alapú FEA technológia

Érdekes még megemlíteni a Scan & Solve hibrid megoldást [4]. A "háttérháló" egy rögzített, strukturált rácsot (hasonlóan a voxelekhez) használ a háttérben a matematikai integráláshoz. Ez adja a módszer stabilitását és sebességét. Nem kényszeríti rá a hálót, hogy felvegye a test alakját. Ehelyett a CAD modell (a B-rep geometria) szabadon elhelyezkedik ezen a rácson belül. A szoftver "beszkenneli" (innen a név), hogy hol van anyag és hol nincs. A határokon, ahol a geometria nem illeszkedik a kockák éleihez, speciális vagy implicit függvényeket használ a peremfeltételek kényszerítésére. Ez a megoldás 2009 környékén egy pilot programon keresztül - Dr. Louis Komzsik (konzulensem) vezetésével – megjelent a Solid Edgeben, de csak teszt fázisig jutott. A technológia később sikeresen lett implementálva a Rhino CAD szoftverben (1.4. ábra).



1.4. ábra. Scan & Solve for Rhino – Modell diszkretizáció [4]

2 Hálózás alapú (Ansys Mechanical) és hálózás nélküli (SimSolid) technológia elméleti háttere

A szakdolgozatomban két területet (lineáris statika és sajátfrekvencia) érintek, így azokon keresztül mutatom be a technológiai háttereket.

2.1 Lineáris statika

2.1.1 Ansys megközelítés (hálózás alapú technológia)

Az Ansys (és a legtöbb klasszikus végelelemes szoftver) a hagyományos hálóalapú végelelem-módszert (h-verziójú FEM) alkalmazza és kis mértékben támaszkodik a foksám (p-verzió) növelésére. Az Ansys a geometria felosztásának finomításával és az elemek típusával operál a (1) megoldása érdekében.

$$K \cdot u = F \quad (1)$$

Ahol:

- K : A merevségi mátrix.
- u : Az elmozdulás vektor.
- F : Az erő mátrix.

Diszkretizáció (hálózás)

Az Ansys az összetett geometriát véges számú, egyszerű alakzatra (elemekre) bontja szét.

- A folytonos u elmozdulásmezőt csak a csomópontokban (nodes) keressük.
- Az elemen belüli elmozdulást **alakfüggvényekkel** N [5] interpoláljuk a csomóponti értékekből:

$$u \approx N \cdot u_e \quad (2)$$

Ezáltal a végtelen szabadságfokú problémából véges számú egyenlet lesz.

1. Elemi merevségi mátrix k_e meghatározása

Minden egyes kis elemre felírjuk a belső energiát [5]. A virtuális munka elve alapján az elem merevsége:

$$k_e = \int_{V_e} B^T \cdot D \cdot B dV_e \quad (3)$$

Ahol:

- B : Az alakváltozás-elmozdulás mátrix (az N alakfüggvények térbeli deriváltjai).
- D : Az anyagtörvény mátrix (a rugalmassági modulus és a Poisson-tényező függvénye).
- V_e : Az adott elem térfogata.

2. Az elemi mátrixok globális összeépítése

Ez az a pont, ahol az Ansys a hálóbéli kapcsolatok alapján „összeszereli” az elem mátrixokat a globális K mátrixszá. A közös csomópontok biztosítják, a globális folytonosságot.

$$K = \sum_{e=1}^n k_e \quad (4)$$

Ugyanígy az elemi erővektorokat is összegezzük a globális F vektorba.

3. Lineáris statikai (1) fizikai megoldása

Az Ansys két fő úton [6] oldja meg az egyenletrendszert:

- Direkt megoldók (pl. Sparse Solver): A merevségi mátrix közvetlen felbontásával (faktORIZÁCIÓVAL) találja meg a megoldást. Nagyon pontos, de több memóriát igényel.
- Iteratív megoldók (pl. PCG - Preconditioned Conjugate Gradient): Közelítő lépésekkel jut el a megoldáshoz, ami hatalmas modelleknél gyorsabb, pontatlanabb.

4. Konvergencia: A h-adaptivitás

Ha az eredmény nem elég pontos, az Ansysban jellemzően nem a függvényeket bonyolítjuk (van mód lineáris és kvadrátikus elemek használatára), hanem sűrítjük a hálót:

- Kisebb elemeket használunk a kritikus helyeken.
- Ezzel a V_e integrálási tartomány csökken, a közelítés pedig egyre jobban simul a valós megoldáshoz.

2.1.2 A SimSolid megközelítés (hálózás nélküli technológia)

A SimSolid szakít a hagyományos végeleemes módszer korlátaival, miközben ugyanúgy a strukturális mechanika alapvető egyensúlyi egyenletéből (1) indul ki. A különbség abban rejlik, ahogyan a K mátrixot felépítjük és ahogyan az elmozdulásmezőt közelítjük.

1. A hagyományos FEA korlátja

A hagyományos végeleemes analízis során a testet apró elemekre (tetraéderek, hexaéderek) bontjuk. Az elmozdulást u alacsonyrendű polinomokkal közelítjük az elemeken belül. A pontosság növeléséhez sűríteni kell a hálót (h-adaptivitás), ami bonyolult geometriáknál (vékony falak, lekerekítések) hatalmas számítási igényt generál.

2. SimSolid: Az "External Approximation" elmélete

A SimSolid az általánosított végelelem-módszeren (Generalized Finite Element Method) [7] alapul. Itt nem daraboljuk fel a geometriát apró hálóelemekre. Ehelyett:

- *Térfogati tartományok:* A geometriai modell térfogatelemekre van bontva és a megoldás folytonossága az érintkező elemek között a geometriából származtatott határfüggvényekből biztosított.
- *Matematikai megoldás:* Az elmozdulás mező (u) approximációja az alábbi formájú:

$$u(x, y, z) \approx \sum_{i=1}^n P_i \cdot a_i(u) + \sum_{k=1}^m P_k \cdot b_k \quad (5)$$

Ahol:

- P_i, P_k : A háromdimenziós (x, y, z) , komplett $(xy, xz, \dots)$, magasrendű (nem csak lineáris vagy kvadratikus) belső és határ bázisfüggvények.

- $a_i(u)$: A térfogatelem belső matematikai (nem fizikai) szabadságfokai (n számú).
- b_k : A térfogatelem m határfelületein lévő szabadságfokok.

3. Lineáris statika (1) fizikai megoldása

A hálós technikához hasonlóan a (1) egyenleten alapul, de itt a globális merevségi mátrix egy komponense:

$$K_{ij} = \int_V B_i^T \cdot D \cdot B_j dV \quad (6)$$

Ahol:

- B_i, B_j : Az i, j térfogatelemek bázisfüggvényeinek deriváltjaiból álló mátrix (alakváltozás-elmozdulás kapcsolat).
- D : Az anyagtörvény mátrix (a rugalmassági modulus és a Poisson-tényező függvénye).

Mivel nincsenek hagyományos hálóelemek, a SimSolid adaptív integrációs sémákat használ, amelyek közvetlenül a geometriai térben futnak le, figyelembe véve a pontos határfelületeket.

4. Kapcsolatok és peremfeltételek

A legnagyobb matematikai kihívás az alkatrészek közötti kapcsolatok (hegesztések, csavarok, érintkezés) kezelése. A SimSolid ezekhez is funkcionálokat és integrálokat használ [8]. Van két alkatrész, ami AB él mentén találkozik.

$$\int_{AB} g \cdot u_0 dG = \int_{AB} g \cdot u_1 dG \quad (7)$$

Ez azt jelenti, hogy az elmozdulásuk az érintkezési felületen bizonyos szinten megegyezik. A g a két alkatrész közötti határfüggvény, amely meghatározza az elmozdulás folytonosságát.

Például, ha $g = 1$, akkor a két felület átlagos elmozdulása lesz azonos (merev testszerű kapcsolat). Minél magasabb fokú a határfüggvény, annál pontosabban fog illeszkedni a két felület elmozdulása.

2.2 Sajátfrekvencia analízis

Sajátfrekvencia analízis esetén az alapvető statikai egyenletünk egy dinamikai sajátérték feladattá alakul. Ebben az esetben a külső F erő helyett a tehetetlenségi erőkkel számolunk, és feltételezzük, hogy nincs külső gerjesztés és csillapítás [5].

A kiindulópont mindkét technológiánál és szoftvernél:

$$M \cdot \ddot{u} + K \cdot u = 0 \quad (8)$$

Ahol:

- M : A globális tömegmátrix.
- K : A globális merevségi mátrix.
- u : A csomóponti elmozdulásvektor.
- $\ddot{u}$: A gyorsulásvektor (az elmozdulás idő szerinti második deriváltja).

Feltételezve a harmonikus rezgőmozgást $u = \phi \cdot \sin(\omega t)$ (9), a megoldandó egyenlet:

$$(K - \omega^2 M) \cdot \phi = 0 \quad (10)$$

Ahol:

- K : Merevségi mátrix.
- M : Tömegmátrix (Inercia).
- ω : Sajátkörfrekvencia ($\omega = 2\pi f$).
- ϕ : Sajátvektor (lengéskép).

2.2.1 Ansys megközelítés (hálózás alapú technológia)

Az Ansys a globális tömegmátrixot M az elemi tömegmátrixok m_e összegzésével állítja elő.

A lépések:

- *Elemi tömegmátrix meghatározása:* Az alakfüggvények N és az anyag sűrűsége ρ alapján:

$$m_e = \int_{V_e} \rho \cdot N^T \cdot N dV_e \quad (11)$$

- *Globális tömegmátrix:* Az Ansys választhat, hogy az elemi tömegeket a csomópontokba sűríti (Lumped - diagonális mátrix) vagy elosztja az alakfüggvények szerint (Consistent – nem diagonális, de ritka mátrix).

- *Megoldó (Eigensolver)*: Olyan algoritmusokat használ, mint a *Block Lanczos* [9] (nem a teljes mátrixot diagonalizálja, hanem csak a szükséges - általában alacsonyabb frekvenciájú - módusokat számolja ki) vagy a *Subspace Iteration* [9] (iteratív sajátérték-megoldó módszer, amely egyszerre több vektorból álló altérben dolgozva fokozatosan közelíti a domináns sajátértékeket és sajátvektorokat). Ezek rendkívül stabilak sok millió szabadságfok esetén is.

2.2.2 A SimSolid megközelítés (hálózás nélküli technológia)

A SimSolid itt is szakít a lokális elemekkel. A tömegeloszlást a teljes test térfogatára integrált magas rendű bázisfüggvényekkel írja le.

A matematikai különbségek:

- *Globális integrálás*: Mivel nincs háló, a globális tömegmátrix elemeit közvetlenül a térfogatelemek bázisfüggvényeiből számolja ki:

$$M_{ij} = \int_V \rho \cdot P_i^T \cdot P_j dV \quad (12)$$

Ahol:

- ρ : Az anyag sűrűsége.
- P_i, P_j : Az i, j térfogatelemek ugyanazon bázisfüggvényei mint, amit a merevségnél használunk.

A megközelítés egyedisége:

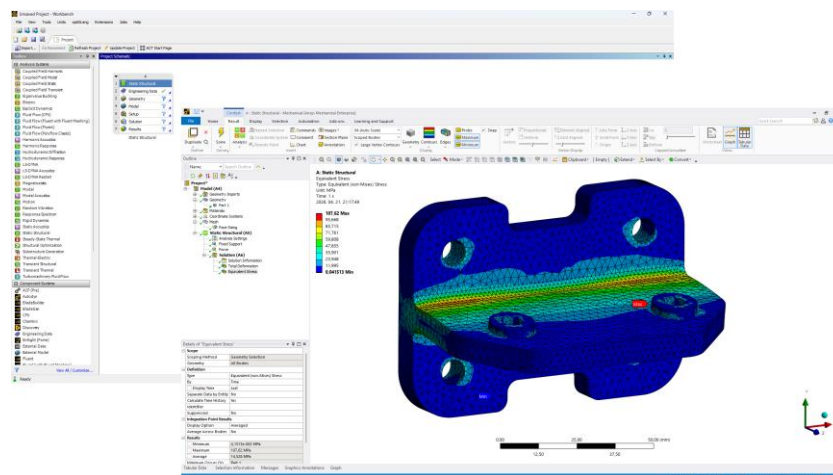
- *Adaptív pontosság*: A SimSolid a modális analízis során is képes p-adaptivitásra. Ha a lengéskép bonyolult (sok a lokális deformáció), automatikusan növeli a függvények rendszámát az adott tartományban.
- *Geometriai hűség*: Mivel az alkatrészek térfogat elemekre való felbontásakor a geometriai tér kontinuitása megőrzött, a tömegmátrixban nem jelentkezik a hálózásból adódó tömegveszteség vagy geometriai pontatlanság (pl. egy vékony íves lemez tömege pontosabb marad).

3 Az Ansys Mechanical és a SimSolid főbb jellemzői, funkcionálitása

Ebben a részben áttekintem a két szoftver főbb funkcionálitását és jellemzőit. A parancsszintű összehasonlításnak egyáltalán nem látom értelmét, mert minden szoftvernek megvan a saját filozófiája, működési metodikája. Egyik szoftver esetében sem törekszem a részletességre, de adok egy minőségi betekintést.

3.1 Ansys Mechanical

Az Ansys (**A**nalysis **s**ystems) Mechanical a világ egyik legelterjedtebb és legsokoldalúbb végelem-analízis (FEA) szoftvere. Az évtizedek (1970-ben jelent meg az első verzió) óta tartó fejlesztés eredményeként ma már nem csupán egy strukturális elemző eszköz, hanem egy olyan integrált környezet, amely képes a legösszetettebb fizikai jelenségek modellezésére, az apró elektronikai alkatrészekről kezdve a hatalmas szélerőművekig.



3.1. ábra. Ansys – Workbench és Mechanical

3.1.1 Architektúra és felhasználói környezet: Az Ansys Workbench

Az Ansys Mechanical ereje az Ansys Workbench platformba való integrációjában rejlik (3.1. ábra). Ez a környezet lehetővé teszi a projektalapú gondolkodást.

- *Parametrikus kapcsolat:* Több CAD modellező szoftver is elérhető, úgymint a DesignXplorer vagy a SpaceClaim/Discovery (direkt modellező). Minden geometria, anyagjellemző és peremfeltétel paraméterezhető. Ez lehetővé teszi az automatizált optimalizációt, ahol a szoftver keresi meg a legkisebb tömegű vagy legnagyobb merevségű modellváltozatot.
- *Kapcsolt munkafolyamatok:* A Workbench "drag-and-drop" rendszere révén a Mechanical könnyedén összekapcsolható áramlástani (Fluent) vagy más szimulációkkal. Például egy csőszakaszt elemezve a Fluent kiszámítja a cső falára ható nyomást, amit a Mechanical közvetlenül felhasznál az alakváltozás és a feszültség számításához.

3.1.2 Geometria kezelés és hálózás

A szimuláció pontossága a hálón áll vagy bukik. Az Ansys ezen a téren az iparág legfejlettebb eszközeit kínálja, igazi specialistának számít.

SpaceClaim és Discovery

A hagyományos CAD modellek gyakran túl részletesek (gyártási jelek, logók), ami lassítja, megnehezíti a szimulációt. Az Ansys beépített direkt modellező eszközei lehetővé teszik a geometria gyors "tisztítását" és az egyszerűsített modellek (középfelületek, tartóelemek) létrehozását.

Intelligens Hálózás

A Mechanical hálózó algoritmus képes felismerni a geometria jellegét:

- Intelligens automatizálás: A szoftver képes a geometria alapján automatikusan kiválasztani a legmegfelelőbb hálózási módszert, miközben globális és lokális finomítási beállításokat is kínál.
- Fejlett hálótípusok: Támogatja a komplex hálózási technológiákat, mint a strukturált hexaháló (sweeping), az automatikus tetraéderes hálózás és a modern, nagy hatékonyságú hexa-core megoldások.
- Adaptív hálófinomítás: A futtatás közbeni adaptív hálózás automatikusan sűríti a felosztást a nagy feszültséggradiensek mentén, így növelve az eredmények numerikus pontosságát.
- Kiváló hálóminőség ellenőrzés: Beépített diagnosztikai eszközökkel vizsgálható a háló minősége (pl. jacobianus, torzítás), ami elengedhetetlen a konvergencia és a stabil futtatás érdekében.

3.1.3 Analízis típusok

A szoftver funkcionalitásának alapját a különféle mechanikai vizsgálatok adják:

Lineáris és nemlineáris statika

Míg a lineáris statika az alapvető teherbírást vizsgálja, az Ansys valódi ereje a nemlinearitások kezelésében van:

1. *Geometriai nemlinearitás:* Nagy elmozdulások vizsgálata.
2. *Anyag-nemlinearitás:* Képlékeny alakváltozás (plaszticitás), hiperelasztikus anyagok (gumik, polimerek) és kúszás modellezése.
3. *Kontakt nemlinearitás:* Alkatrészek közötti érintkezés, súrlódás és kopás pontos szimulációja.

Dinamikai vizsgálatok

A rezgések és ütésszerű terhelések elemzése kritikus a gépiparban:

- *Modális analízis:* Sajátfrekvenciák és azokhoz tartozó deformációk (lengések) meghatározása a rezonancia elkerülése érdekében.
- *Harmonikus válasz:* Bizonyos frekvenciájú, folyamatos rezgések hatása a szerkezetekre.
- *Transient Dynamics:* Időben változó dinamikus terhelések hatásainak vizsgálata.

3.1.4 Hőtani analízis (Thermal Analysis)

A Mechanical teljes körű hőtani képességekkel rendelkezik:

- *Hővezetés, konvekció és sugárzás* modellezése.
- *Fázisváltás:* Olvadás és dermedés folyamatának szimulációja.
- *Hőfeszültség:* A hőmérséklet-különbség okozta tágulásból eredő mechanikai feszültségek számítása, ami kritikus a motoralkatrészeknél vagy elektronikai paneleknél.

3.1.5 Számítási teljesítmény és HPC (High-Performance Computing)

A bonyolult modellek (több tízmillió szabadságfok) megoldása hatalmas számítási kapacitást igényel.

- *Parallel Processing:* A számítás megosztható több processzormag vagy akár több szerver (cluster) között.
- *GPU gyorsítás:* A grafikus kártyák számítási kapacitásának kihasználása a megoldási idő radikális csökkentésére (Discovery Live).

- *Ansys Cloud*: Közvetlen elérés a Microsoft Azure alapú felhőhöz, ha a helyi hardver már nem elegendő.

3.1.6 Validáció és megbízhatóság

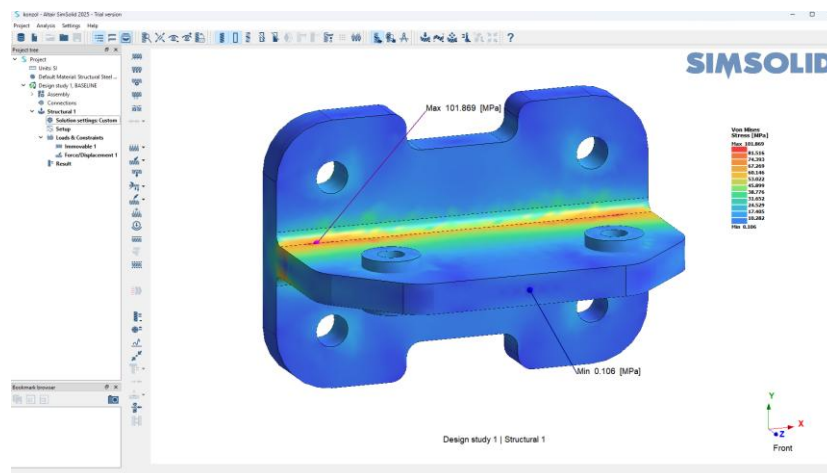
Az Ansys Mechanical egyik legnagyobb értéke a bizalom, megfelel az ASME és más nemzetközi minőségbiztosítási előírásoknak. A szoftvert használó mérnök felelőssége azonban megkerülhetetlen, mert a szoftver fog eredményt adni (ha szoftverhasználati hibát nem vétettünk). A kérdés az, hogy az kapott eredmény elfogadható vagy sem?!

3.1.7 Alkalmazási előnyei a következő területeken

- Globális szerkezet multidisziplináris analízisek
- Repülőgép aeroelasticity (flutter) analízisek
- Szerkezeti elektromechanika megoldások

3.2 Simcenter SimSolid

A gépészeti tervezés és szimuláció területén évtizedek óta a hagyományos végelelemes módszer (FEM/FEA) uralkodik. Van egy kritikus szűk keresztmetszet: a hálózás. A SimSolid (**Simulation Solid**) – ami, 2015-ben alakult - ezt a paradigmát töri meg azzal, hogy teljesen kiiktatja a hálózást a folyamatból, lehetővé téve a komplex összeállítások pillanatok alatt történő elemzését közvetlenül a CAD geometrián.



3.2. ábra. SimSolid – Analízis háló nélkül

3.2.1 A technológiai háttér

A SimSolid egy újszerű, hálómentes (meshless) technológiát használ, amely magasabb rendű matematikai függvényeket illeszt közvetlenül a CAD modellekre. Ezt részletesen bemutattam az előző fejezetben.

- *Adaptív eljárás:* A szoftver nem egyszer futtatja le a számítást. Több menetben (pass) dolgozik, és minden körben ott finomítja a matematikai közelítést, ahol a legnagyobbak a feszültségek vagy a gradiens változások.
- *Geometriai tolerancia:* Míg a hagyományos FEM érzékeny a "piszkos" geometriára (apró hézagok, átfedések), a SimSolid rendkívül toleráns. Képes kezelni a pontatlanul illesztett alkatrészeket anélkül, hogy napokat kellene tölteni a geometria "tisztításával", előkészítésével.

3.2.2 Kulcsfontosságú funkciók és képességek

A SimSolid nem csupán egy egyszerű statikai elemző eszköz, hanem egy teljes körű csomag, amelyet komplex összeállításokhoz terveztek. A SimSolid nem rendelkezik CAD funkcionalitással, talán azért sem, mert nem kell a geometriát előkészíteni.

Összeállítások kezelése

A legtöbb FEA szoftvernél probléma, ha több száz vagy ezer alkatrészből álló modellt kell elemezni. A SimSolidnak pont ez az erőssége:

- *Automatikus kapcsolatfelismerés:* Felismeri a csavarokat, hegesztéseket, szegecseket és „ragasztott” kötéseket.
- *Hegesztési varratok modellezése:* Képes a vonal- és ponthegeztések gyors definiálására, ami a járműiparban és az acélszerkezeteknél kritikus.

Analízis típusok

A szoftver a mérnöki feladatok széles skáláját lefedi:

1. *Lineáris statika:* Alapvető teherbírási esetek vizsgálata.
2. *Modális analízis:* Sajátfrekvenciák és lengésképek meghatározása.
3. *Hőtani vizsgálatok:* Hőmérséklet-eloszlás és hőfeszültség elemzése.
4. *Nemlineáris elemzések:* Geometriai nemlinearitás és anyag-nemlinearitás kezelése.
5. *Dinamikai vizsgálatok:* Időfüggő terhelések és frekvencia-válasz (FRF) elemzése.

Kapcsolat a CAD rendszerekkel

A SimSolid felhőalapú és asztali CAD rendszerekkel is közvetlen kapcsolatban áll (Onshape, SOLIDWORKS, Autodesk Fusion 360, Creo, NX). Ha a CAD modell módosul, a szimuláció pillanatok alatt frissíthető, így támogatva a valódi iteratív tervezést.

3.2.3 Ipari alkalmazások és előnyök

A SimSolid bizonyos iparágakban népszerű a gyorsasága miatt:

- *Gépgyártás és nehézipar:* Óriási vázszerkezetek, daruk és alvázak elemzése, ahol a hálózás korábban lehetetlen volt a túl sok apró alkatrész miatt.
- *Autóipar:* Gyors prototípus-ellenőrzés a tervezés korai fázisában.
- *Hajóépítés:* Hatalmas acélszerkezetek hegesztési varratainak ellenőrzése.

3.2.4 Pontosság és validáció

A szoftver adaptív módon növeli a matematikai függvények rendszámát, gyakran pontosabb eredményt ad egy komplex összeállításnál, mint egy gyenge minőségű, elkapkodott tetraéder háló a hagyományos szoftverekben. A szakdolgozatomban ezt a területet is vizsgálom és következtetéseket vonok le.

4 Verifikációs vizsgálatok

A szimulációs szoftverek összehasonlítása előtt elvégzett NAFEMS (National Agency for Finite Element Methods and Standards) [10] verifikációs tesztek megalapozzák a kutatásom hitelességét és szakmai komolyságát, szükségszerűségét.

A verifikáció során bizonyítható, hogy a szoftverek matematikai algoritmusai - SimSolid rendhagyó, hálómentes technológiája - pontosan oldja-e meg az elméleti egyenleteket. Mivel a SimSolid nem a hagyományos véges elemes módszert (FEM) használja, egy kontrollált, analitikus megoldással rendelkező teszt rávilágít a numerikus közelítésének megbízhatóságára. A lineáris statikai teszttel ellenőrizhető a merevségi mátrix és a feszültség számítás pontossága, míg a sajátfrekvencia-vizsgálat a tömegeloszlás kezelését validálja. A NAFEMS példák iparági szabványnak számítanak, így az eredmények objektívek és bárki számára reprodukálhatóak maradnak. Ezzel a módszerrel kiszűrhetőek a felhasználói beállításokból eredő hibák, mielőtt komplex, valós geometriákon végeznék összehasonlítást. A tesztek segítenek meghatározni azt a hibahatárt, amelyen belül a két szoftver eredményei konzisztensnek tekinthetők. Segítségükkel pontosabb képet kapok a SimSolid sebesség-pontosság kompromisszumáról, de az Ansys Mechanical robusztus technológiájára is rálátásom lesz.

Ez a folyamat adja meg azt a mérnöki bizalmat, amely szükséges az új technológiák ipari alkalmazásához. Ezért is tartottam nagyon fontosnak, hogy a szakdolgozatom fő témakörének számító ipari példákon való összehasonlító analíziseket megelőzze ez a lépés. Egy ilyen megalapozott verifikáció nélkül a későbbi szimulációs eredmények csupán színes ábrák maradnának, valódi bizonyító erő nélkül.

4.1 A verifikációs lépés általános információi

A számításokhoz a 4.1. táblázatban található paraméterekkel rendelkező számítógépet használtam, ami egy 4 éves mobil munkaállomás.

4.1. táblázat. Számítógép paraméterei

Jellemző	Paraméter
Típus	HP Zbook G8
Processzor	11th Gen Intel(R) Core(TM) i7-11850H @ 2.50GHz (2.50 GHz)
Memória	32.0 GB
Adattárolás	Toshiba KIOXIA XG6 1TB M.2 PCIe
Grafikus kártya	NVIDIA RTX A4000 8.0 GB
Kijelző	17.3 inch
Operációs rendszer	Windows 11 Pro 25H2

A számításokhoz a következő két végeselemes szoftvert használtam:

- Simcenter SimSolid 2025
- Ansys Mechanical 2025 R2

A verifikációs modellek létrehozása Designcenter Solid Edge 2026-ban történt és parasolid (x_t) fájlformátumba lettek elmentve, hogy felhasználhatóak legyenek a tesztekhez.

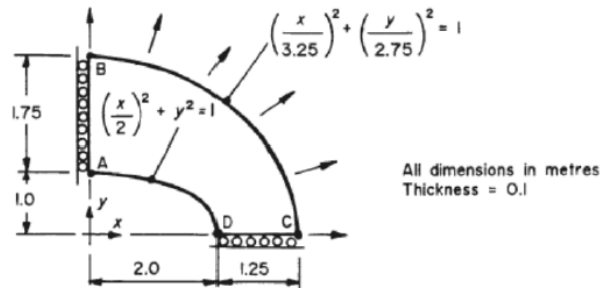
4.2 Elliptikus membrán statikai vizsgálata

Ehhez a verifikációs teszthez a Tech Soft 3D által összegyűjtött NAFEMS alapú elliptikus membrán [11] (*elliptic_membrane.x_t*) vizsgálatát végeztem el. Első lépésként a SimSolid és az Ansys Mechanical alapbeállításait használtam a statikai vizsgálat lefuttatásához. Ezt azért tartom fontosnak, mert a felhasználó először így találkozik a szoftverrel, nem igazán tudja, hogy mi van a szoftver mögött. A második körös futtatáshoz azonban kisebb beállításmódosításokat is elvégeztem. A vizsgálat részleteit a 4.1. ábra mutatja be.

Elliptic Membrane

Problem Description:

Find the tangential edge stress at D (refer below figure) of elliptical membrane which is uniformly loaded with outward pressure



Reference:

Test LE1 from NAFEMS Publication NNB, Rev. 3, NAFEMS Linear Benchmarks, 5 Oct 1990

Modeling Techniques Used:

Elliptical membrane is modeled using plane stress elements quadrilaterals.
Linear Static Analysis

Loading:

Uniform outward pressure of 10 MPa at outer edge BC, Inner curved edge AD unloaded.

Boundary Condition:

Edge AB, symmetry about Y axis, e.g. zero x displacement
Edge CD, symmetry about X axis, e.g. zero y displacement.

Material Properties:

Isotropic, $E = 210 \times 10^9$ Mpa and $\nu = 0.3$

4.1. ábra. Elliptikus membrán – statikai verifikációs vizsgálat [11]

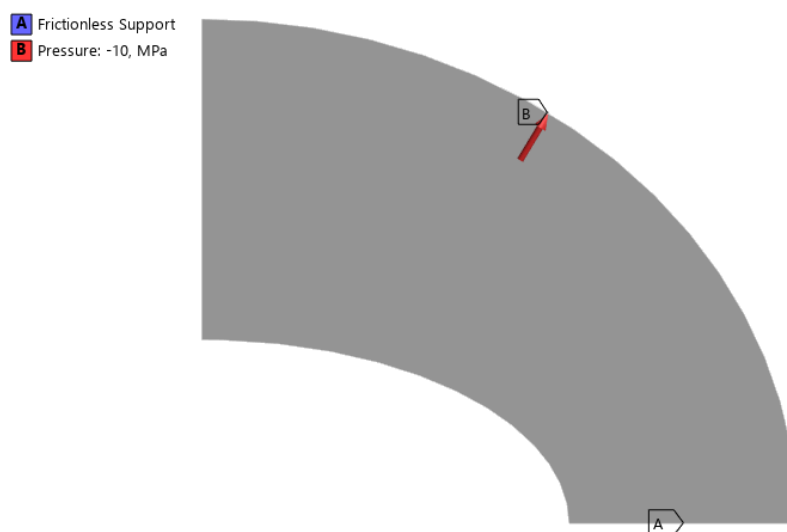
4.2.1 Ansys Mechanicalban futtatott verifikációs statikai analízis – Elliptikus membrán

Ahogy korábban már említettem az első futtatást alapbeállításokkal végeztem el. A peremfeltételeket, a terhelést és az anyagmodellét a 4.1. ábra alapján állítottam be. Az Ansys Workbenchben létrehoztam egy külön anyagmodellét ehhez a vizsgálathoz, amelyet az 4.2. táblázat ismertet.

4.2. táblázat. Anyagmodell főbb paraméterei

Jellemző	Paraméter
Megnevezés	Structural Steel EM
Sűrűség	$7850 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$
Young-modulus	210 GPa
Poisson-tényező	0,3
Folyáshatár	250 MPa
Szakítószilárdság	460 MPa

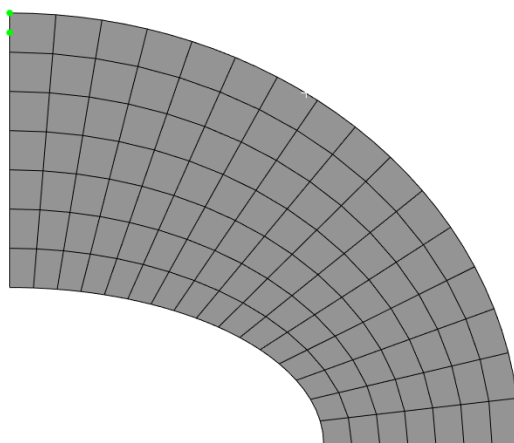
A Workbench indítása után egy Static Structural analízist hoztam létre, ahol a vizsgálathoz hozzárendeltem a 4.2.-es táblázatban szereplő anyagmodellt. Ezután beimportáltam az *elliptic_membrane.x_t* fájlt. Az ismereteimnek megfelelően megadtam a BC felület mentén a 10 MPa nyomást a felület normálisa mentén. Peremfeltételekként definiáltam azokat a felületeket, amelyekre merőlegesen nem mozdulhat el a membrán, ehhez Frictionless Supportot alkalmaztam, amely megfelel a feladatnak (4.2. ábra).



4.2. ábra. Elliptikus membrán – terheléssel, peremfeltételekkel

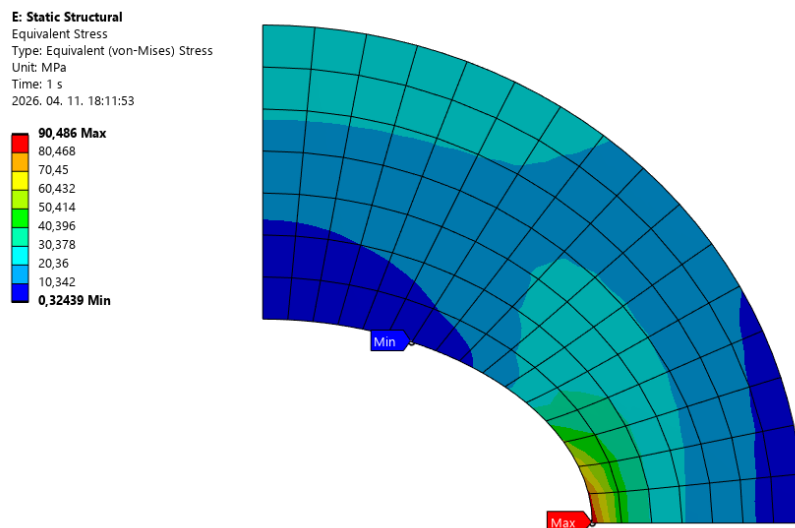
Kértem egy automatikus hálózást, ahol a szoftver alapértelmezett (Program controlled) beállításait használtam mind típusra, mind méretben. Ennek

megfelelően egy rendezett, legyező alakú, hexaéder hálót kaptam kvadratikus elemekkel, ez látható a 4.3. ábrán.



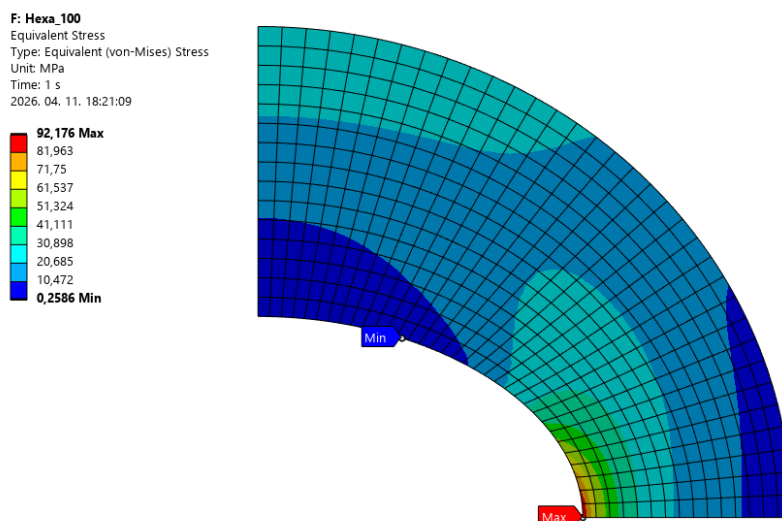
4.3. ábra. Elliptikus membrán – alapértelmezett hálózással

Az analízis lefuttatása rendben megtörtént és ezek után elvégeztem a kiértékelést a von-Mises egyenértékű feszültségre, amit a 4.4. ábra mutat.



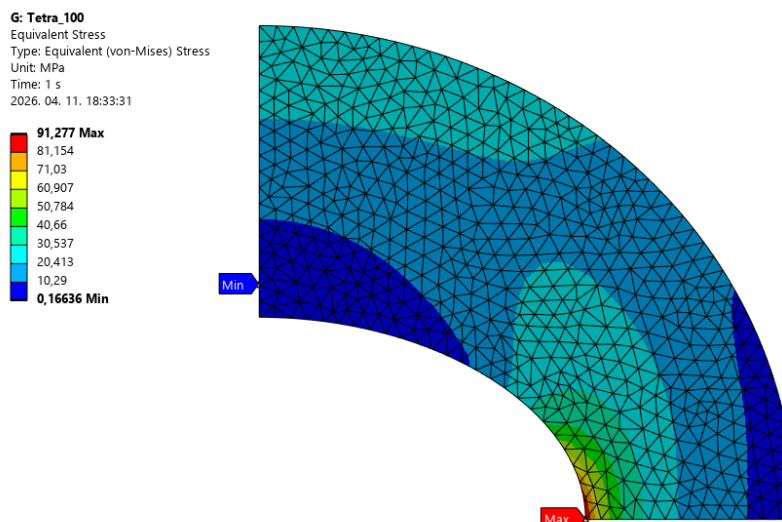
4.4. ábra. Elliptikus membrán feszültség – alapértelmezett hexaéder hálózással

Végeztem egy hálófinomítást, ahol az alapértelmezett beállítás helyett 100 mm-es hálót alkalmaztam. A módosított vizsgálat lefuttatása után a 4.5. ábra szerinti eredményt kaptam.



4.5. ábra. Elliptikus membrán feszültség – módosított hexaéder hálózással

Szakmai érdeklődés miatt futtattam egy vizsgálatot tetraéder elemekkel is, ahol az elemméret szintén 100 mm volt. Ennek a vizsgálatnak az eredménye a 4.6. ábrán látható.

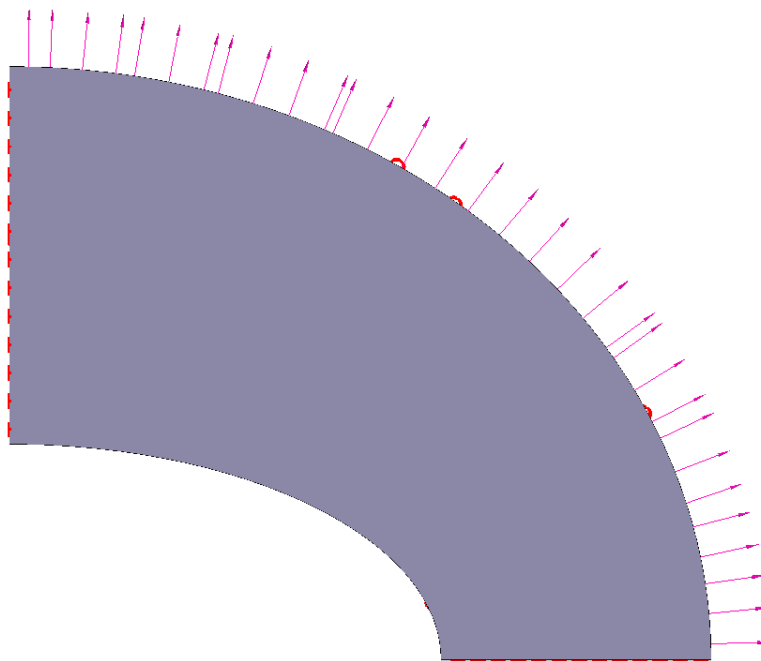


4.6. ábra. Elliptikus membrán feszültség – tetraéder hálózással

4.2.2 SimSolidban futtatott verifikációs statikai analízis – Elliptikus membrán

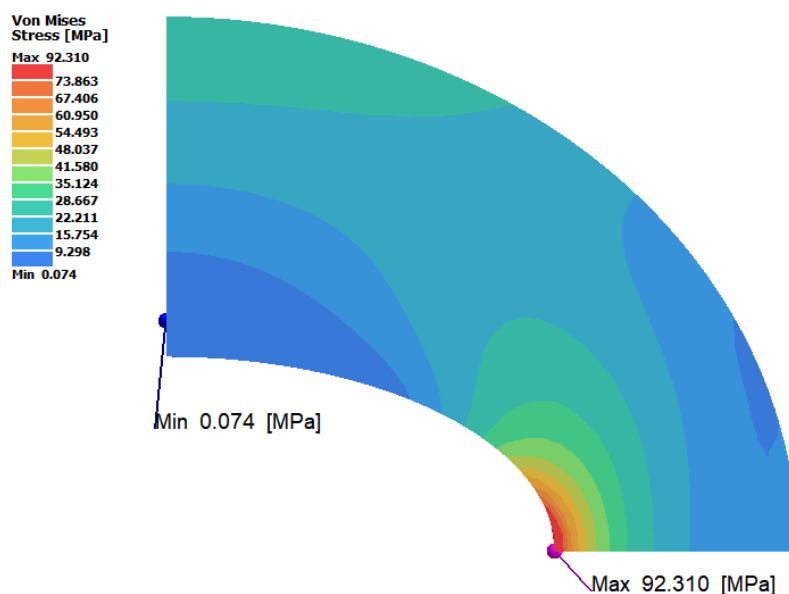
A SimSolidban is létrehoztam ugyanazt az anyagmodell, mint amit a 4.2. táblázat mutat, így teljesen objektív vizsgálatot lehetett elvégezni a 4.1. ábra alapján. Ebben az esetben is az első vizsgálatot alapértelmezett beállításokkal végeztem.

A szoftver indítása után beolvastam az *elliptic_membrane.x_t* és hozzárendeltem a Structural Steel EM anyagmodell. Beállítottam a Structural linear analízis típust. Az elliptikus BC felületre elhelyeztem 10 MPa terhelést és a megadtam az előírt peremfeltételeket, amit a SimSolid terminológiájában Slider Supportnak tartunk számon. Ezt mutatja a 4.7. ábra.



4.7. ábra. Elliptikus membrán – terheléssel, peremfeltételekkel

Mivel a SimSolid hálózás nélküli technológiát használ, így már csak a vizsgálatot kellett lefuttatnom. A futtatás nagyon gyorsan végbement az alapértelmezett három menetes megoldás mentén. Az eredmények a von-Mises egyenértékű feszültségre kiértékelve a 4.8. ábrán láthatóak.



4.8. ábra. Elliptikus membrán feszültség – hálózás nélkül

Itt is futtattam olyan vizsgálatot, ahol módosítottam a beállításokon, azonban itt nincs hálózás, így az adaptív megoldó ismétléseinek a számát növeltem alapértelmezett háromról ötre. Az eredmény nem változott, ami azt jelenti, hogy a SimSolid algoritmus szerint konvergált feszültségértéket kaptam.

4.2.3 Eredmények összegzése – Elliptikus membrán

Megállapítható, hogy mindkét szoftverben egyszerűen és problémamentesen lefuttatható az elliptikus membrán statikai vizsgálatához tartozó verifikációs teszt, melynek kritériumait a 4.1. ábra mutatja be. A 4.3. táblázat összefoglalja a verifikációs teszt eredményeit. Ez alapján kijelenthető már most, hogy a háló minőségének, típusának kulcsszerepe van a megfelelő eredmény elérésében. Kellő tapasztalattal, rövid idő alatt az elfogadható érték közelébe tudunk érni az Ansysban úgy, hogy speciális konvergenciaeszközök nem kerültek használatba.

A SimSolid - meglepetésemre - az alapértelmezett beállításokkal 0,42 %-os eltérést produkált a hivatalos referenciaértékhez képest, ami kedvező pontosságot mutat. Persze egy ilyen verifikációból nem érdemes messzemenő következtetéseket levonni, de az eredmény biztató.

4.3. táblázat. Elliptikus membrán verifikációs teszteredmények

Szoftver / háló	Eredmény [MPa]	Ref. érték [MPa]	Eltérés [%]
Ansys - alapértelmezett	90,486	92,7	- 2,38
Ansys – hexaéder 100mm	92,176		- 0,56
Ansys – tetraéder 100mm	91,277		- 1,53
SimSolid	92,310		- 0,42

4.3 Befogott tartó sajátfrekvencia vizsgálata

Ehhez a verifikációs teszthez a SimSolid által összegyűjtött NAFEMS alapú befogott tartó [12] (*cantilever_beam.x_t*) vizsgálatát végeztem el. A SimSolid és az Ansys Mechanical alapbeállításait használtam a sajátfrekvencia vizsgálat lefuttatásához. Ezt azért tartom fontosnak, mert a felhasználó először így találkozik a szoftverrel. A vizsgálat részletei a 4.9. ábra mutatja be.

TEST VM08: CANTILEVERED BEAM

PROBLEM DEFINITION

Normal mode dynamic analysis of a cantilevered beam (shown below). Left end fully constrained, back face has slider constraint to remove 3rd dimension.



Units are SI.

Material properties: Modulus of elasticity $E=2e^{11}$ N/m², Poisson's ratio $\nu=0.3$, mass density $\rho = 8000$ kg/m³.

REFERENCE

NAFEMS Finite Element Methods & Standards, Abbassian, F., Dawswell, D. J., and Knowles, N. C. Selected Benchmarks for Natural Frequency Analysis Test No. 71. Glasgow: NAFEMS, Nov., 1987.

4.9 ábra. Befogott tartó – sajátfrekvencia verifikációs vizsgálat [12]

4.3.1 Ansys Mechanicalban futtatott verifikációs sajátfrekvencia analízis – Befogott tartó

A peremfeltételeket és az anyagmodellt a 4.9. ábra alapján állítottam be, és alapértelmezett beállításokat használtam az első hat sajátfrekvencia kinyeréséhez. Az Ansys Workbenchben létrehoztam egy külön anyagmodellt ehhez a vizsgálathoz, amelyet az 4.4. táblázat ismertet.

4.4. táblázat. Anyagmodell főbb paraméterei

Jellemző	Paraméter
Megnevezés	Structural Steel CB
Sűrűség	$8000 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$
Young-modulus	200 GPa
Poisson-tényező	0,3

A Workbench indítása után egy Modal analízist hoztam létre, ahol a vizsgálathoz hozzárendeltem a 4.4. táblázatban szereplő anyagmodellt. Ezután beimportáltam az *cantilever_beam.x_t* fájlt. Peremfeltételekként definiáltam a tartó bal oldalának befogását Fixed Supporttal, valamint a hátsó felületet Frictionless Supporttal, ami csak a síkban mozgást enged. A feladatnak megfelelően beállítottam az első hat sajátfrekvencia kiszámítását. Ezek a beállítások láthatóak a 4.10. ábrán.



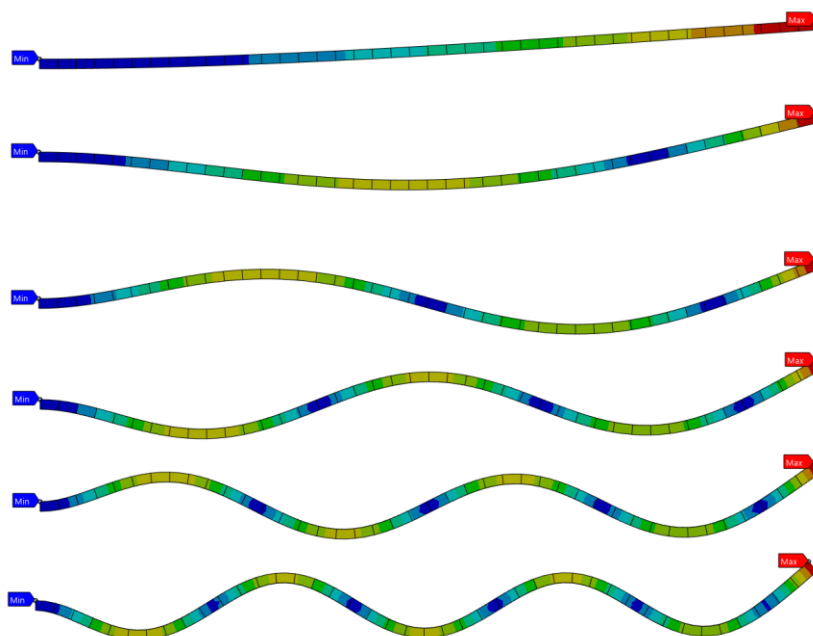
4.10. ábra. Befogott tartó – peremfeltételekkel

Kértem egy automatikus hálózást, ahol a szoftver alapértelmezett (Program controlled) beállításait használtam mind típusra, mind méretben. Ennek megfelelően egy jól strukturált, hexaéder hálót kaptam kvadratikus elemekkel, ez látható a 4.11. ábrán.



4.11. ábra. Befogott tartó – alapértelmezett hálózással

Az analízis lefuttatása rendben megtörtént és ezek után elvégeztem a kiértékelést a lengésképekre fókuszálva, amit a 4.12. ábra mutat.



4.12. ábra. Befogott tartó – Első hat lengéskép

4.3.2 SimSolidban futtatott verifikációs sajátfrekvencia analízis – Befogott tartó

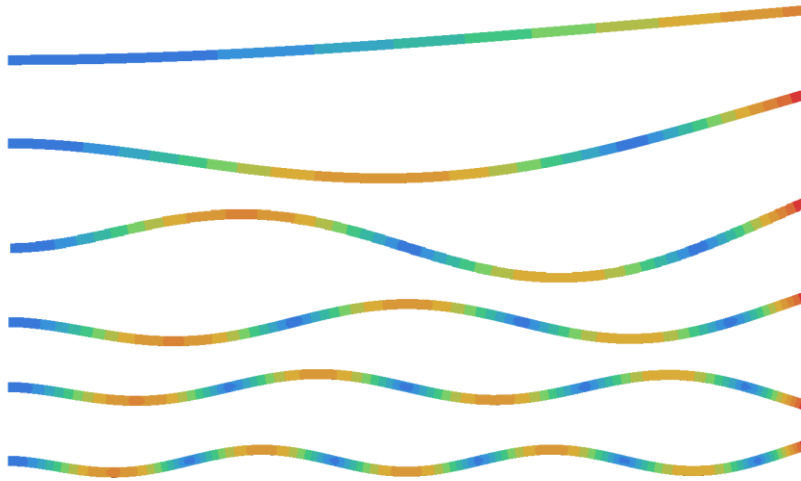
A SimSolidban is létrehoztam ugyanazt az anyagmodellt mint, amit a 4.4. táblázat mutat, így teljesen objektív vizsgálatot lehetett elvégezni a 4.9. ábra alapján. A vizsgálatot alapértelmezett beállításokkal végeztem.

A szoftver indítása után beolvastam az *cantilever_beam.x_t* fájlt és hozzárendeltem a Structural Steel CB anyagmodellt. Beállítottam a Modal analízis típust. Peremfeltételekként definiáltam a tartó bal oldalának befogását Immovable Supporttal, valamint a hátsó felületet Slider Supporttal, ami csak a síkban mozgást enged. A feladatnak megfelelően beállítottam az első hat sajátfrekvencia kiszámítását. Ezek a beállítások láthatóak a 4.13. ábrán.



4.13. ábra. Befogott tartó – peremfeltételekkel

Ahogy már tudjuk a SimSolidban nincs hálózás, így az analízis lefuttatását végeztem el, majd a kiértékeltem az egyes lengésképeket, amelyeket a **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.** mutat.



4.14. ábra. Befogott tartó – Első hat lengéskép

4.3.3 Eredmények összegzése – Befogott tartó

Ezen verifikációs teszten keresztül is megállapítható, hogy egyszerűen és problémamentesen lefutott a teszt, melynek kritériumait a 4.9. ábra mutat be. A 4.5. táblázat összefoglalja a verifikációs teszt eredményeit.

Az Ansysban végeztem egy hálózfinomítást, az alapértelmezett hálóméretet 0,05 m-re módosítottam, azonban ebben ez esetben jól érzékelhető változás nem történt az eredményekben. Ez azt jelenti, hogy század vagy ezred szintű növekmények jelentek meg az alapértelmezett futtatáshoz képest, így nem tartottam ebben az esetben (egyszerű geometria) fontosnak ezt az állapotot rögzíteni a vizsgálati eredmények között. A referenciaértékekhez viszonyítva 1 % körüli vagy az alatti az Ansys Mechanical által szolgáltatott eredmény. Annyi érdekesség van ugyan,

hogy az első három módus pozitívan tér el, míg a második három módus negatív eltérést mutat.

A SimSolid által kiszámolt eredmények is 1 %-on belül vannak a referenciaértékekhez képest. Az érdekesség itt, hogy csupán az első módus van pozitív eltérési tartományban, a többi negatív irányba tér el. Amennyiben összevetem az eltéréseket, akkor 0,3-0,4 % mindig van az Ansys és a SimSolid eredményei között hol ide, hol oda.

4.5. táblázat. Befogott tartó verifikációs teszteredmények

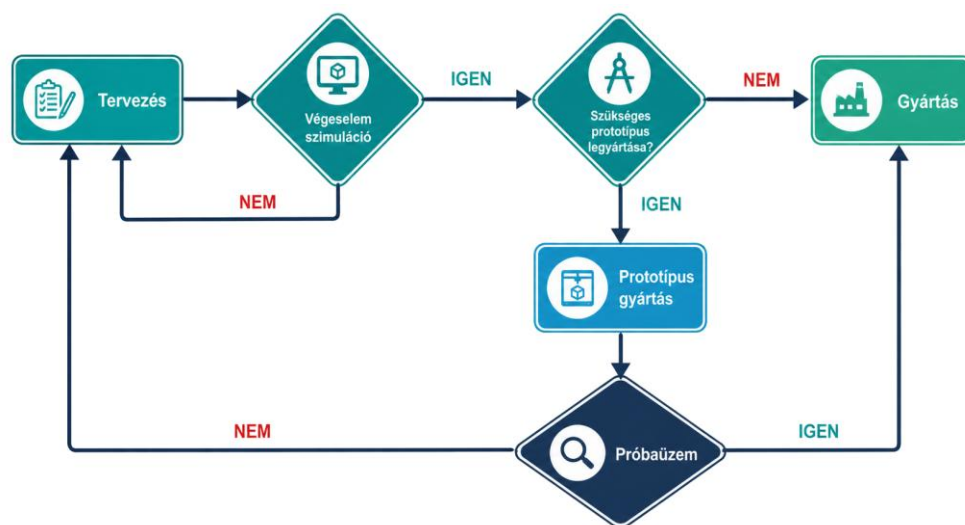
Szoftver / háló	Módus 1 [Hz]	Módus 2 [Hz]	Módus 3 [Hz]	Módus 4 [Hz]	Módus 5 [Hz]	Módus 6 [Hz]
Referencia	1,001	6,327	17,720	34,720	57,390	85,730
Ansys	1,0125	6,3414	17,738	34,708	57,268	85,352
Ansys eltérés [%]	1,14	0,23	0,10	-0,03	-0,21	-0,44
SimSolid	1,009	6,322	17,681	34,589	57,057	85,012
SimSolid eltérés [%]	0,79	-0,08	-0,22	-0,38	-0,58	-0,84

5 Ipari példák – Valós mérnöki kihívások

A dolgozat ezen fejezetében kerül sor a háló alapú és a hálómentes technológiák gyakorlati összehasonlítására, majd ez alapján fogok következtetéseket levonni.

5.1 A végeselemes módszer ipari szerepe

A XXI. században a végeselemes módszer rohamosan népszerűsödik, a körülöttünk lévő tárgyak, berendezések nagy valószínűséggel átestek végeselemes analízisen. Ennek eredményeként a számítógéppel támogatott mérnöki tevékenység (CAE) szorosan kapcsolódik a számítógéppel támogatott tervezéshez (CAD). A tervezőmérnökök modelljeiből dolgoznak az analízissel foglalkozó mérnökök, kisebb vállalkozásoknál sokszor egy személy tölti be ezt a szerepkört. Amennyiben a fejlesztés alatt álló termék átment a tervezés közbeni vizsgálatokon, akkor a gyártáshoz kerül, majd további lépésekben a piacra. Ennek a folyamatnak látjuk az egyszerűsített modelljét a 5.1. ábrán [1]



5.1. ábra. A végeselem-szimulációt tartalmazó tervezési-gyártási folyamat egyszerűsített modellje [1]

Minden egyes, általam elvégzett vizsgálat a következő közös jellemzőkkel rendelkezik annak érdekében, hogy az eredmények összehasonlíthatóak legyenek:

- Mivel ez egy szakdolgozat és nem egy oktatóanyag, így nem lépről-lépésre írtam le a folyamatot, de fontosabb beállításokra kitértem.

- Mindkét szoftverben azonos típusú és mértékű terheléseket valamint peremfeltételeket alkalmaztam.
- A célom minden esetben az volt, hogy megfelelően pontos (konvergált) eredményt kapjak.
- Ugyanazt az anyagmodellt (Structural Steel FEA) alkalmaztam minden esetben, minden alkatrészre, ez látható a 5.1. táblázatban.

5.1. táblázat. Structural Steel FEA anyagmodell főbb paraméterei

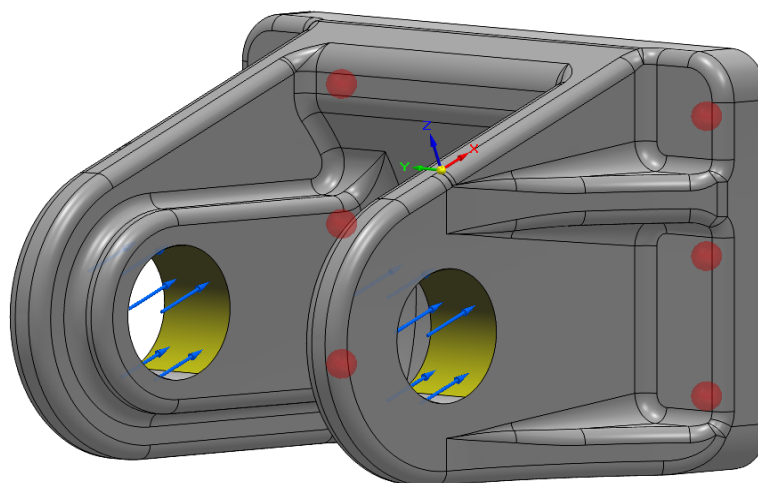
Jellemző	Paraméter
Megnevezés	Structural Steel FEA
Sűrűség	$7850 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$
Young-modulus	210 GPa
Poisson-tényező	0,3
Folyáshatár	250 MPa
Szakítószilárdság	460 MPa

5.2 Konzol lineáris statikai vizsgálata

Ennek a vizsgálatnak az volt célja, hogy megnézzem miként használható mindkét megoldás (háló alapú és hálómentes) egy valós alkatrész lineáris statikai vizsgálatára. Ez a végeselemes analízis legelső állomása, amivel talán minden géptervező mérnök találkozik. Fontosnak tartottam, hogy a szakmérnöki képzésen tanultakat alkalmazzam.

Alkalmazott terhelések és peremfeltételek 5.2. ábra szerint

- *Terhelés:* 100 kN nyomóerő (kék nyilak) mindkét szem (eredő terhelés) sárga felületére a látható koordinátarendszer X tengelye mentén
- *Peremfeltétel:* Hátlap teljes megfogása (piros gömbök)



5.2. ábra. Konzol terhelése és peremfeltétele

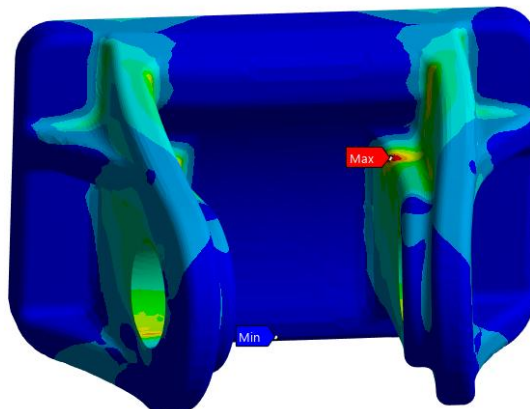
5.2.1 Ansys Mechanicalban futtatott konzol lineáris statikai vizsgálata

Az Ansys Workbenchben egy Static Structural vizsgálatot indítottam, beállítottam a korábban említett Structural Steel FEA anyagmodellt. Beolvastam a *konzol.x_t* modellt és megvizsgáltam a geometriát. A hátlapon lévő besüllyesztést a Discoveryben levettem a modelltől, hogy egyszerűbb legyen a végelelemes modell. Ezek után a Mechanicalban megadtam a 100 kN terhelést az előírt felületekre és irányba, majd a hátlapra definiáltam a megfogást Fixed Support paranccsal.

Lefuttattam az analízist és kiértékeltem az első vizsgálat eredményeit, amely 0,0269 mm teljes elmozdulást és 59,321 MPa Von-Mises egyenértékű feszültséget mutatott 13284 csomópont mellett, alapértelmezett hálóval. Az első futtatás arra jó, hogy megnézzük, hogy nincs-e elvi hiba a vizsgálatban, lefut-e az analízis és adhat egy jó becslést. Egy vizsgálat nem vizsgálat, így szüksége van további vizsgálatokra a konvergált eredmény elérése érdekében. Ez történhet manuális módon hálófüggetlenségi vizsgálattal [13]. A másik megoldás a feszültséghez kötött konvergenciavizsgálat, amit ebben az esetben is alkalmaztam. Megengedő módon 5%-os konvergenciakritériumot állítottam be, majd ismét lefuttattam a vizsgálatot, ami bekongvergált a 68,005 MPa von-Mises egyenértékű feszültséggel (5.3. ábra) és 0,027 mm-es teljes elmozdulással (5.4 ábra), 150990 csomópont mellett. A jobb láthatóság miatt a képeken elrejtettem a hálóhoz tartozó éleket.

A: Static Structural
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1 s
2026. 04. 12. 19:49:07

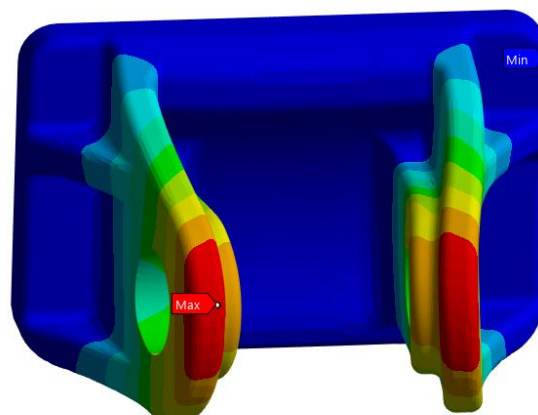
68,005 Max
60,452
52,899
45,346
37,793
30,24
22,686
15,133
7,5804
0,027342 Min



5.3. ábra. Konzol - Egyenértékű feszültségkép

A: Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s
2026. 04. 12. 19:49:22

0,027078 Max
0,024069
0,02106
0,018052
0,015043
0,012034
0,0090259
0,0060172
0,0030086
0 Min

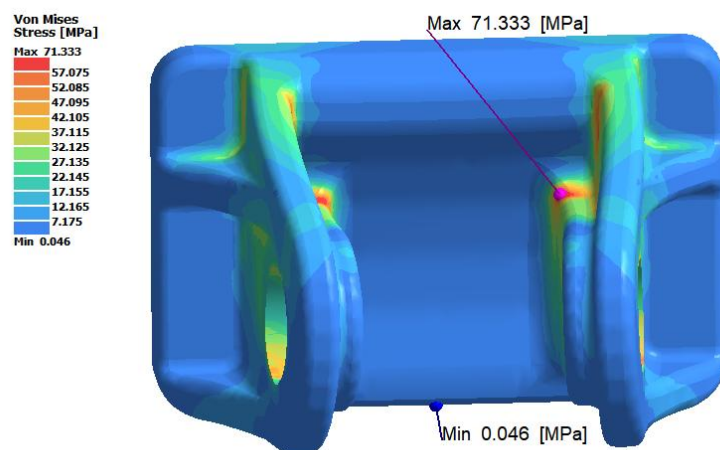


5.4. ábra. Konzol – Teljes elmozdulás kép

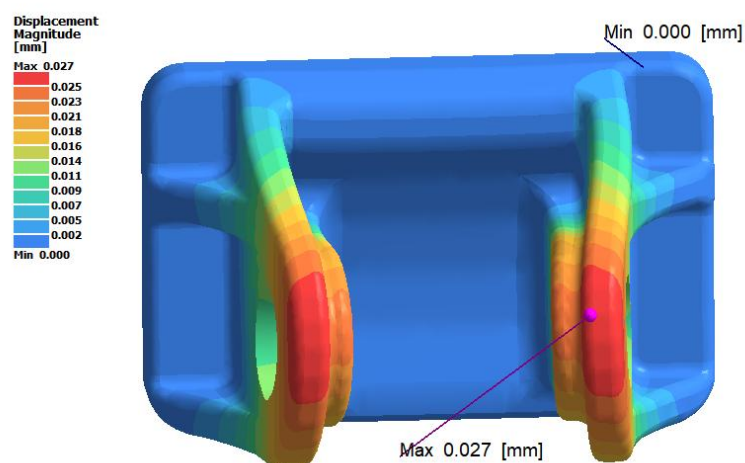
5.2.2 SimSolidban futtatott konzol lineáris statikai vizsgálata

A SimSolidba beolvastam a *konzol.x_t* modellt és hozzárendeltem a Structural Steel FEA anyagmodell. Ezután kiválasztottam a Structural analízis típust. Nincs szükség a geometria egyszerűsítésére, mert a SimSolid egyik ereje a részletes geometria kezelésében van. A terhelés megadása előtt létre kellett hoznom egy koordinátarendszert, ami alapján megadható a 100 kN nyomóerő. Ezután Immovable Support segítségével a hátoldalt rögzítettem minden irányba.

Alapértelmezett - három lépéses - adaptivitással lefuttattam az első vizsgálatot. A von-Mises egyenértékű feszültség 47,398 MPa-t, míg az elmozdulás 0,027 mm-t mutatott. Ugyan itt nincs hálózás, de a globális beállításokat érdemes finomítani, hogy meggyőződjünk a helyes értékekről. Az Adaptiv megoldási lépéseket ötre állítva és a Adapt to features (kisebb méretű alkatrészek hirtelen geometriai változásának figyelembevétele) opciót bekapcsolva újabb futtatást végeztem. Ennek a futtatásnak 71,333 MPa von-Mises egyenértékű feszültség (5.5. ábra) és 0,027 mm teljes elmozdulás (5.6. ábra) lett az eredménye. Látszik, hogy az elmozdulásban változás nincs, de a bekapcsolt opciónak köszönhetően az Ansyshez hasonló eredményt kaptam.



5.5. ábra. Konzol - Egyenértékű feszültségkép



5.6. ábra. Konzol – Teljes elmozdulás kép

5.2.3 Eredmények összegzése – Konzol vizsgálata

Megállapítható, hogy egyik szoftverben sem okozott problémát a konzol vizsgálata. Minkét szoftver megmutatta a maga erősségeit egy ilyen általános gépalkatrész vizsgálatában. Az Ansys lehetőségeit kihasználva az analízis előtt volt mód a geometria egyszerűsítésére, hogy a lényegtelen részek ne vegyenek részt a vizsgálatban egyszerűsítve a hálózást. A konvergencia eszközt használva minimális beavatkozás mellett egy megbízható eredményt kaptam. Igaz, hogy ez időbe telt, de mindennek megvan az ára. A SimSolid nagy szerelésekre optimalizált megoldója és alapbeállításai is jól vizsgáztak. A finomhangolást követően kapott feszültség némileg magasabb, mint az Ansysban kiszámolt, de ez nem probléma, sőt talán közelebb áll a valósághoz. Ennek az oka az lehet, hogy a SimSolid a pontos geometrián végzi a számításokat és nincs a hálózáshoz kötődő egyszerűsítés. Az 5.2. táblázat tartalmazza az összesített eredményeket. Végül érdekességként jegyzem meg, hogy több, mint tízszeres csomópontszám tartozik a konvergált feszültségértékhez, ami komoly háttérszámítást igényelt.

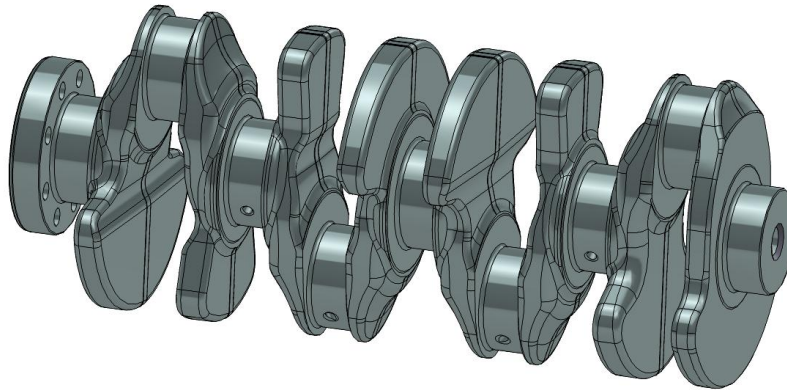
5.2. táblázat. Konzol lineáris statikai vizsgálatának eredményei

Szoftver / háló	Feszültség [MPa]	Elmozdulás [mm]	Csomópont [db]
Ansys – 1. futtatás	59,321	0,0269	13284
Ansys – Konvergált	68,005	0,027	150990
SimSolid – 1. futtatás	47,398	0,027	-
SimSolid – Konvergált	71,333	0,027	-

5.3 Főtengely sajátfrekvencia vizsgálata

Ezzel a vizsgálattal és összehasonlítással az volt a célom, hogy bemutassam egy valós alkatrészen (5.7. ábra), hogy miként viselkedik a két különböző alapokon nyugvó megközelítés. Minden tárgynak vannak sajátfrekvenciái, amivel kalkulálni kell a gépészeti tervezésben elkerülendő a meghibásodást. Ennek a legelső lépése a sajátfrekvenciák meghatározása és az azokhoz tartozó lengésképek kinyerése.

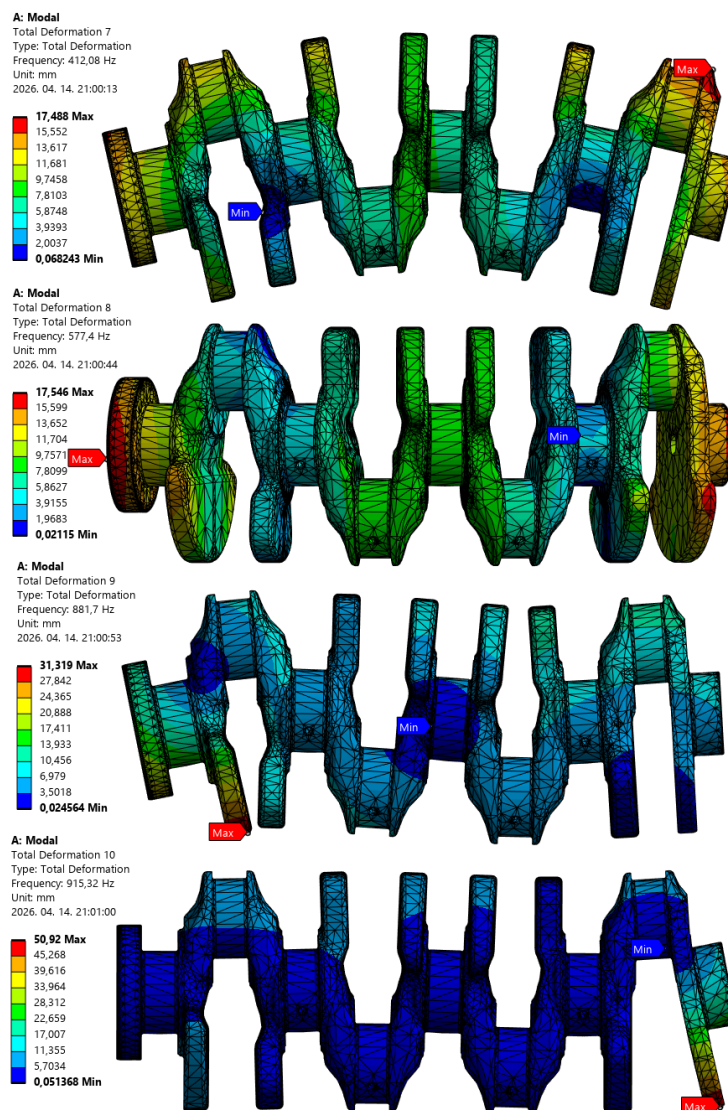
A vizsgálat során peremfeltételt nem használtam, az első tíz sajátfrekvenciát kerestem. Ebben az esetben az első hat módus közel nulla értéket ad, amelyek a test mozgásának három translációs és a három rotációs szabadságfokát reprezentálják. Az ezeket követő négy sajátfrekvencia értékkel a deformációs alakokat (hajlítás, csavarás) kaptam meg és hasonlítottam össze a két szoftver alapján.



5.7. ábra. Főtengely

5.3.1 Ansys Mechanicalban futtatott főtengely sajátfrekvencia vizsgálata

Az Ansys Workbenchben egy Modal analízist indítottam és beállítottam az itt is használatos Structural Steel FEA anyagmodell. Beolvastam a *fotengely.x_t* 3D-s modellt. Ezek után a Mechanicalban tízre módosítottam a módusok számát az analízis beállításaiiban. Az alapértelmezett, a program által ajánlott hálómérettel lefuttattam a vizsgálatot. A már korábban tárgyaltaknak megfelelően az első hat sajátfrekvencia nulla vagy nagyon kicsi érték. A héttől – tízig tartó sajátfrekvenciákhoz tartozó lengésképek az 5.8. ábrán láthatók. Tesztképpen futtattam egy olyan vizsgálatot, amely egy finomított, 3 mm-es átlagos elemméretű hálón alapult. Az eredmények összegzése részben mutatom be a kiszámított értékeket.

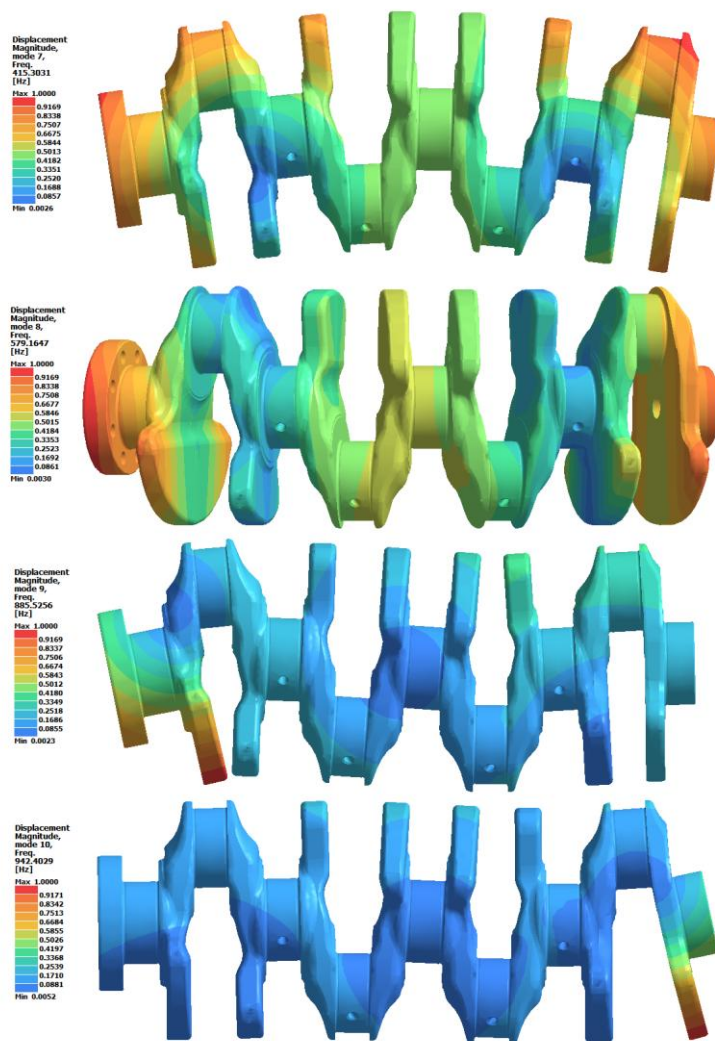


5.8. ábra. Főtengely sajátfrekvenciái, lengésképei (7-10)

5.3.2 SimSolidban futtatott főtengely sajátfrekvencia vizsgálata

A már megszokott folyamatnak megfelelően beolvastam a *főtengely.x_t* fájlt, majd anyagmodellként hozzárendeltem a Structural Steel FEA anyagot. Definiáltam a Modal analízist és megadtam a tízet, mint a módusok számát, majd lefuttattam az analízist. A várt eredményeket kaptam, ami az első hat sajátfrekvencia esetében a nulla értéket jelenti. A következő négy sajátfrekvenciához tartozó lengéskép már jól mutatja a főtengely lehetséges

alakváltozásait (5.9. ábra). Itt is futtattam egy újabb analízist a Refinement level standardról highra való módosításával, ennek az eredményei is megtalálhatóak az összesítő táblázatban.



5.9. ábra. Főtengely sajátfrekvenciái, lengésképei (7-10)

5.3.3 Eredmények összegzése – Főtengely vizsgálata

Egy érdekességgel kezdem, mégpedig azzal, hogy a sajátfrekvencia megközelítése felülről történik mindkét technológia esetén. A végelemek nagyobb száma (az elemek méretének csökkentése) vagy a bázisfüggvények rendszámának növekedése hasonlóan alacsonyabb sajátfrekvenciákhoz vezet, ami modell nagyobb rugalmasságát jelenti. Ez a SimSolid esetében úgy jelenik meg - háló hiányában -, hogy Refinement levelt kell növelni, ami a polinomok

fokszámának növelésével is jár. Megnézve a kapott értékeket (5.3. táblázat) az egyes sajátfrekvenciák azonos tartományban mozognak, nagy ugrálás nincs és hasonló viselkedést mutatnak. A SimSolid által produkált számokat az Ansyshez viszonyítva is megbízhatónak tartom, és ehhez nagyon gyors számítás tartozik. Ansys esetében a pontosabb eredmények nagyobb felbontású hálót, - így több csomópontot - ebből adódóan hosszabb számítási időt vonnak maga után.

5.3. táblázat. Főtengely sajátfrekvencia vizsgálatának eredményei

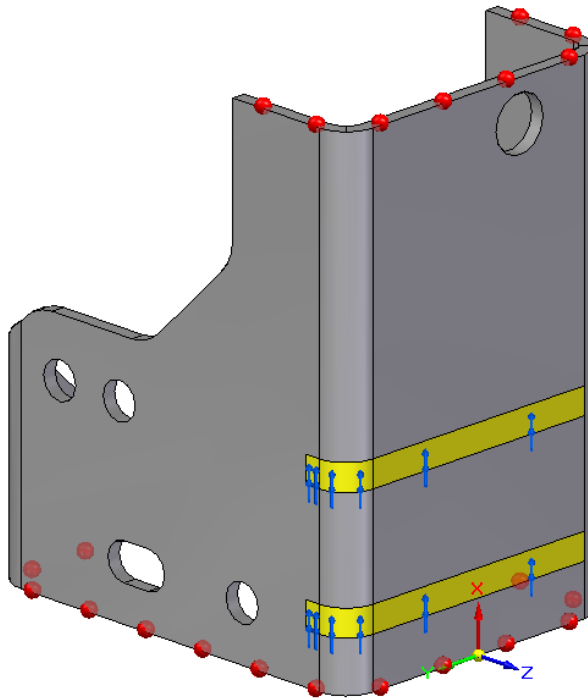
Szoftver / háló	Módus 7 [Hz]	Módus 8 [Hz]	Módus 9 [Hz]	Módus 10 [Hz]	Csomópont [db]
Ansys - tetraéder alapértelmezett	412,08	577,4	881,7	915,32	100040
Ansys - tetraéder 3mm	406,65	571,49	868,8	901,92	277787
SimSolid	415,3	579,16	885,52	942,4	-
SimSolid - high refinement level	409,78	574,14	873,11	915,25	-

5.4 Lemezkonzol lineáris statikai vizsgálata

A lemezalkatrészek vizsgálata mindig külön figyelmet igényel. A megfelelő eredmények érdekében érdemes figyelembe venni a geometriai arányokat. Amennyiben az anyagvastagság és a legnagyobb kiterjedés hányados kisebb, mint 1:10, akkor már középfelülettel célszerű, de 1:20 arány mentén kötelező héjmodellként vizsgálni az alkatrészt. Ez az összehasonlítás megvilágítja, hogy mi a SimSolid viszonya ehhez a helyzethez, mert ott nincs mód középfelületet használni.

Alkalmazott terhelések és peremfeltételek 5.10. ábra szerint

- *Terhelés:* -10 kN nyomóerő Y irányú és -10 kN nyomóerő Z irányú komponensekkel megadva (kék nyilak) a sárgával jelölt felületekre összesített terhelésként
- *Peremfeltétel:* Lemezkonzol felső és alsó pereme teljesen rögzítve (piros gömbök)



5.10. ábra. Lemezkonzol terhelése és peremfeltétele

5.4.1 Ansys Mechanicalban futtatott lemezkonzol lineáris statikai vizsgálata

Az Ansys Workbenchben egy Static Structuralt vizsgálatot használtam, majd beállítottam a Structural Steel FEA anyagmodell, amit minden ipari vizsgálathoz alkalmaztam. Beolvastam a *lemezkonzol.x_t* modellt és megállapítottam, hogy középfelület alapján érdemes vizsgálni a geometriai arányok miatt. Ebből az analízisből azonban készítettem egy másolatot, mert tanulságképpen térfogati hálózattal is megvizsgáltam. A középfelület kinyeréséhez a Discovery kiváló és gyors funkcióit alkalmaztam. A hémmodell esetén négyszög hálót alkalmaztam, megfogásokat a Fixed Support kényszerrel helyeztem el a leírásnak megfelelően, míg a terhelést a Force paranccsal komponensek alapján raktam a modellre. Ezután már csak a futtatás volt hátra. Végeztem konvergenciavizsgálatot, 5 %-os kritériumot állítottam be, ennek az eredményei (125,74 MPa feszültség és a 0,138 mm) a 5.11. ábrán és 5.12. ábrán láthatóak és az összehasonlító táblázatban találhatóak.

A: Static Structural

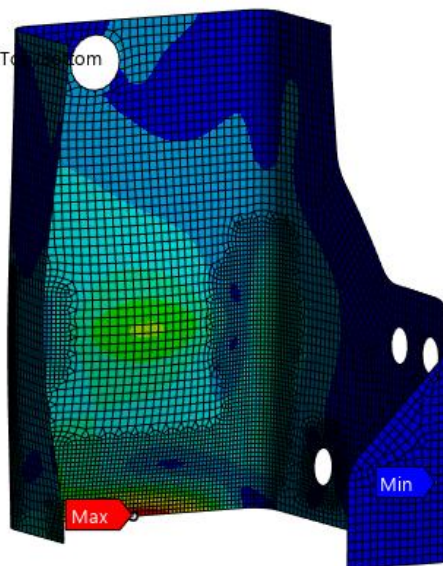
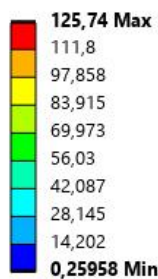
Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Total

Unit: MPa

Time: 1 s

2026. 04. 15. 11:28:35



5.11. ábra. Lemezkonzol - Egyenértékű feszültségkép

A: Static Structural

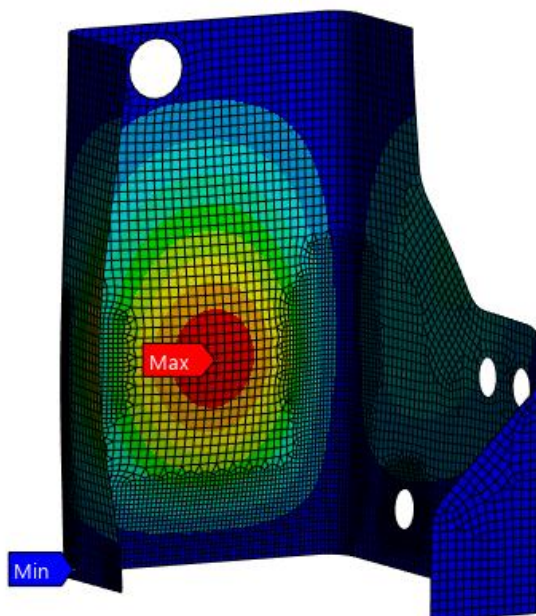
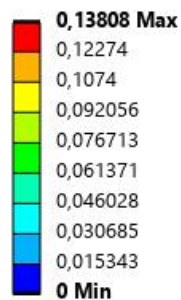
Total Deformation

Type: Total Deformation

Unit: mm

Time: 1 s

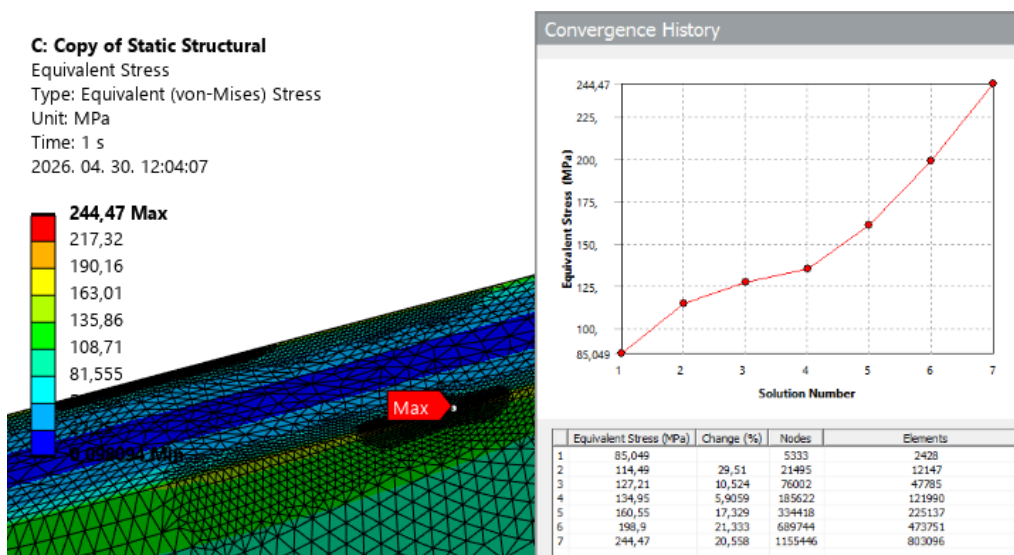
2026. 04. 15. 11:29:08



5.12. ábra. Lemezkonzol – Teljes elmozdulás kép

Térfogati modellként is megvizsgáltam egy próbafuttatás keretében. A feszültség eloszlás kinézete és az elmozdulás kép is hasonló, de számszerűleg eltérő, amit a táblázat is mutat. Konvergenciavizsgálatot is végeztem, de nem konvergált be, hanem feszültség-singularitás lépett fel az alsó megfogás helyén

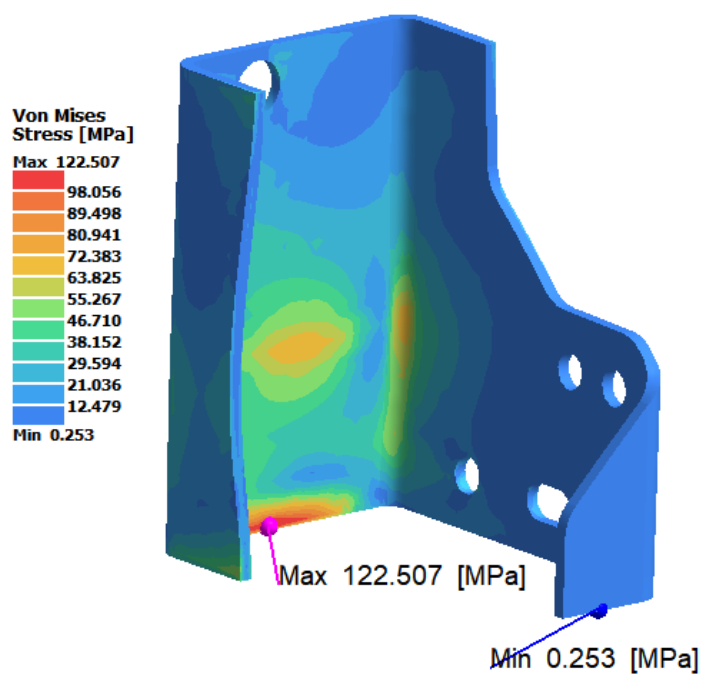
(5.13. ábra). A gyakorlatban ez azt jelentette, hogy az algoritmus hiába sűrítette a hálót a kérdéses résznél, a feszültség értéke minden lépésben jelentősen nőtt és tartott a végtelenbe. A környező értékekből jelenítettem meg egyet a táblázatban.



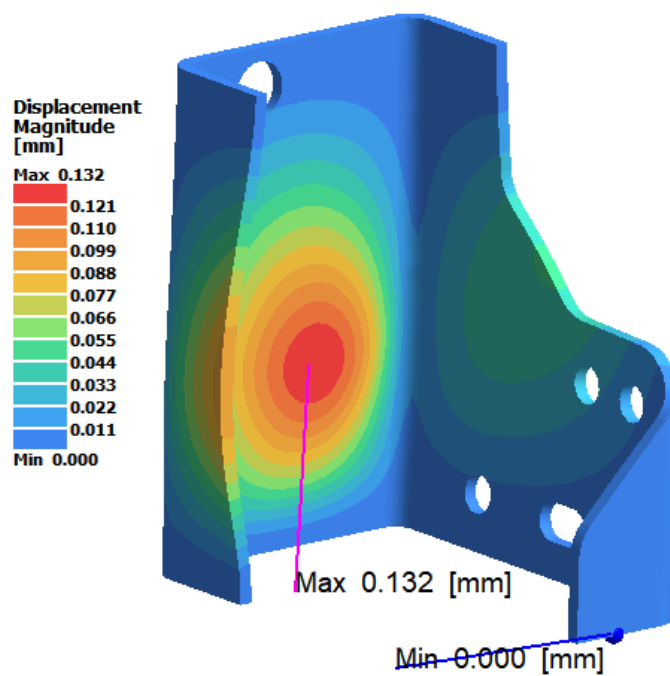
5.13. ábra. Lemezkonzol – Feszültség-szingularitás a megfogásnál

5.4.2 SimSolidban futtatott lemezkonzol lineáris statikai vizsgálata

A SimSolidba beolvastam a *lemezkonzol.x_t* alkatrészt és hozzárendeltem a Structural Steel FEA anyagmodell. Ezután kiválasztottam a Structural analízis típust. Itt nincs lehetőség és egyben szükség sem a középfelület létrehozására, mert a SimSolid a valós, 3D-s testtel dolgozik. A megoldó beállításainál automatikusan használatban van az Adapt to thin solid opciót. Az előírt terhelést egyszerűen definiáltam, majd a peremfeltételként a felső és az alsó peremet megadtam az Immovable Support paranccsal. Alapértelmezett adaptivitással lefuttattam az első vizsgálatot, majd a Refinement levelt highra állítva és az Adapt to features opciót alkalmazva ismét elvégeztem az analízist. Az itt megkapott 122,5 MPa feszültség és a 0,132 mm elmozdulás látható az 5.14. ábrán és 5.15. ábrán.



5.14. ábra. Lemezkonzol - Egyenértékű feszültségkép



5.15. ábra. Lemezkonzol - Teljes elmozdulás kép

5.4.3 Eredmények összegzése – Lemezkonzol vizsgálata

Azt gondolom, hogy ez vizsgálat nagyon hasznos volt és tényleg rámutatott arra, hogy vékony alkatrészeket hagyományos technológiában középfelülettel kell vizsgálni, különben könnyen félreérthető eredményekhez juthatunk. Ugyanakkor ez a vizsgálat rávilágít arra is, hogy a SimSolid hálózás nélküli technológiája képes megbirkózni azzal a kihívással, amit az Ansys is szépen megold 2D-s héj elemekkel. Ez a megoldás a hagyományos technológia szempontjából egyértelműen számítási erőforráskímélő, de a vizsgálandó geometriát elő kell készíteni, ami viszont mérnöki időt igényel. A SimSolid itt is jól teljesít az eredmények tekintetében, a konvergált értékek között ~2,5 % különbség van.

5.4. táblázat. Konzol lineáris statikai vizsgálatának eredményei

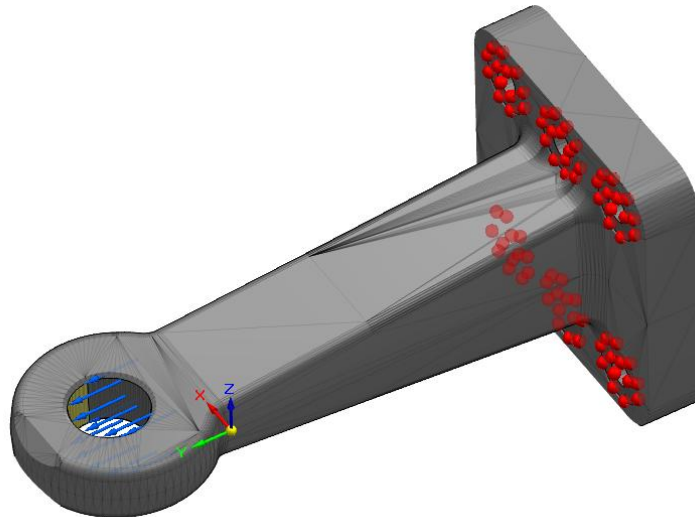
Szoftver / háló	Feszültség [MPa]	Elmozdulás [mm]	Csomópont [db]
Ansys – 1. futtatás középfelülettel	108,87	0,137	1291
Ansys – Konvergált középfelülettel	125,74	0,138	7996
Ansys – Térfogati, konvergált*	140,7	0,132	*Feszültség-szingularitás lépett fel
SimSolid – 1. futtatás	97,93	0,129	-
SimSolid – Konvergált	122,5	0,132	-

5.5 Vonószem (stl) lineáris statikai vizsgálata

Ez a teszt nem a geometria miatt érdekes, hanem azért, mert egy hálómodellel kellett elvégezni az analízist. Az a tapasztalat, hogy egyre többet fordul elő az, hogy a mérnökök nem B-rep geometriával, hanem hálómodellekkel dolgoznak. Ezek forrása lehet az internet vagy akár valamilyen képalkotó megoldás, mint a CT vagy a 3D tárgyszkenelés. Ezekkel a hálókkal nem könnyű dolgozni és a végeleges szoftverek is különféleképpen kezelik.

Alkalmazott terhelések és peremfeltételek 5.16. ábra szerint

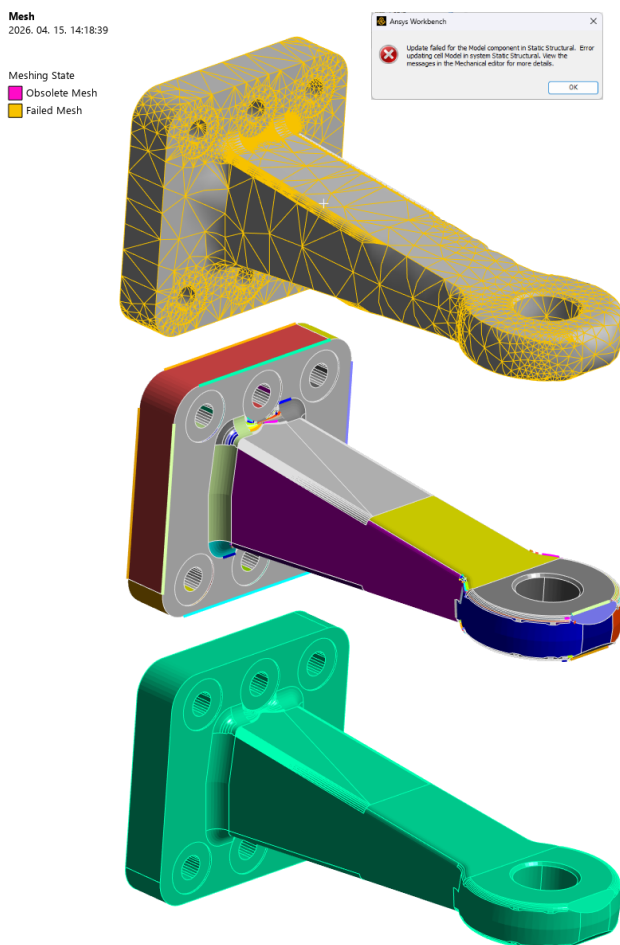
- *Terhelés:* 60 kN húzóerő csapágyterhelés formájában (kék nyilak) a sárga felületre a látható koordináta-rendszer Y tengelye mentén
- *Peremfeltétel:* A hat darab furat süllyesztett sík felülete teljesen rögzítve (piros gömbök)



5.16. ábra. Vonószem terhelése és peremfeltétele

5.5.1 Ansys Mechanicalban futtatott vonószem (stl) lineáris statikai vizsgálata

Az Ansys Workbenchben egy Static Structuralt vizsgálatot indítottam, beállítottam a korábban említett Structural Steel FEA anyagmodellt. Elindítottam a Discoveryt, hogy oda beolvassam a *vonoszem.stl* fájlt. A beolvasás után átkonvertáltam a lehetséges mértékben B-rep geometriává a vonószemet, és azt nyitottam meg a Workbenchben. Tájékozódásom szerint közvetlenül nem lehet az stl fájlt felhasználni a Mechanicalban analízishez, ez volt az oka a konvertálásnak. Ezek után kértem rá egy hálózást, de hibára futott. Próbáltam a Virtual Topologyt használni, ezzel ugyan egyszerűbb lett a geometria, de a hálózás továbbra sem futott le (5.17. ábra). Jelenlegi tudásommal úgy tűnik, hogy nem oldható meg egyszerűen ez a feladat. Az stl fájl alapján történő visszamodellézéstől most eltekintek, mert a szakdolgozatomnak nem témája a Reverse Engineering. Az, hogy az Ansys nem tudta az stl fájlt kezelni, az nem a hálózásos technika hibája, hanem egyszerűen az Ansys sajátossága.

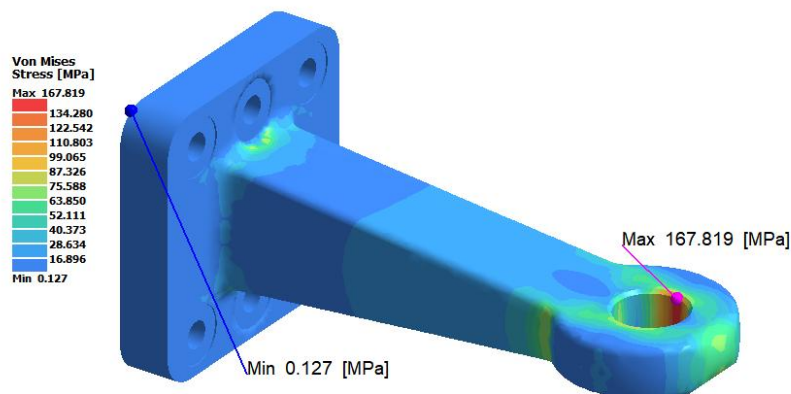


5.17. ábra. Vonószem – Hálózási hiba

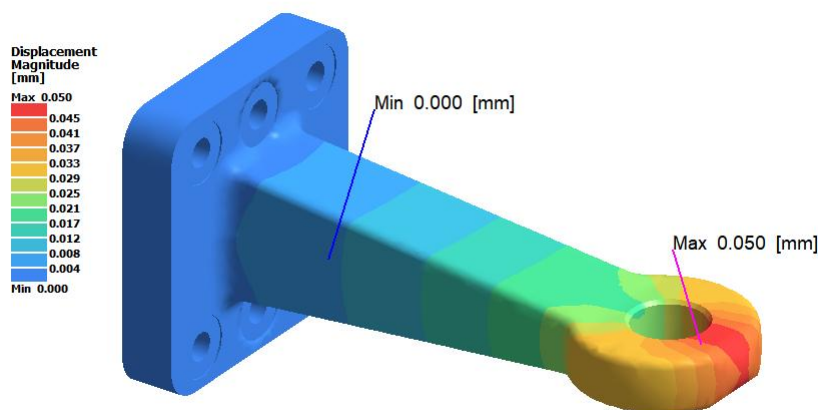
5.5.2 SimSolidban futtatott vonószem (stl) lineáris statikai vizsgálata

A SimSolidba beolvastam a *vonoszem.stl* fájlt, a mentést követően hozzárendeltem a Structural Steel FEA anyagmodellt az alkatrészhez. Ezután kiválasztottam a Structural analízis típust. Az előírásnak megfelelően definiáltam a peremfeltételt a hat süllyesztett furatnál és végül megadtam a terhelést. A SimSolid esetében semmilyen akadályba nem ütköztem az stl fájl kapcsán. A SimSolid ezt az stl "héjat" használja fel arra, hogy meghatározza az alkatrész térfogatát, tömegközéppontját és a kapcsolódási felületeket. Az stl modell pontfelhője és háromszögei adják meg a határokat, amiken belül az egyenleteket meg kell oldani. Amikor a feszültséget megjeleníttem, a SimSolid ezeket az eredményeket rávetíti

(interpolálja) az stl fájl pontjaira és háromszögeire. Az első futtatást alapbeállításokkal végeztem, majd második vizsgálathoz a Refinement levelt highra állítottam, és a számítási lépéseket (adaptive solution) ötre módosítottam. Ezek után 167.81 MPa egyenértékű feszültség (5.18. ábra) és 0,05 mm (5.19. ábra) teljes elmozdulás lett a számítás eredménye.



5.18. ábra. Vonószem - Egyenértékű feszültségkép



5.19. ábra. Vonószem - Teljes elmozdulás kép

5.5.3 Eredmények összegzése – Vonószem vizsgálata

Az a tapasztalatom, hogy a hagyományos, hálóalapú technológiát képviselő szoftvereknek többé-kevésbé problémát okoz egy stl modellen való analízis. A probléma onnan fakad, hogy a hálóra egy újabb a végelelemes hálót kell ráhúzni.

Vannak lehetőségek, mint a B-rep geometria visszaépítése Reverse Engineering eszközökkel vagy nagyon speciális hálózó algoritmus használata. A SimSolid esetében ez nem okoz gondot, mert technológiai alapjai kapcsolódnak stl fájl hálójához, ahogy azt az előző bekezdésben meg is említettem.

5.5. táblázat. Vonószem lineáris statikai vizsgálatának eredményei

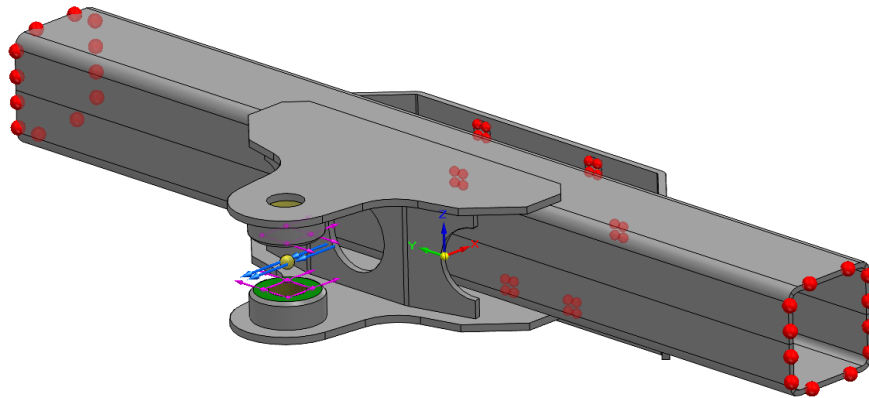
Szoftver / háló	Feszültség [MPa]	Elmozdulás [mm]	Csomópont [db]
Ansys – 1. futtatás*	-	-	*Hálózási hiba
SimSolid – 1. futtatás	163,84	0,047	-
SimSolid – Konvergált	167,8	0,05	-

5.6 Mellső kereszttartó statikai vizsgálata

Az előző ipari példák minden esetben egy alkatrészből álltak, de a valóság sokszor sokkal bonyolultabb. Nagyon fontos, hogy szerkezeteket is meg tudjak vizsgálni, - a technológiákat össze tudjam hasonlítani, - ezért az utolsó esetre egy szerelést választottam, ami egy mezőgazdasági gép vázának részegysége. Az érdekessége ennek az, hogy hidegen hajlított U profilt, lemez- és forgácsolt alkatrészeket is tartalmaz. Méretét tekintve ez a modell - a szakdolgozat szempontjából - jól kezelhetőnek tekinthető, és alkalmazható rajta több megközelítési mód is.

Alkalmazott terhelések és peremfeltételek 5.20. ábra szerint

- *Terhelés:* -40 kN külpontos húzóerő (kék nyilak) a sárga felületekre alkalmazva a látható koordinátarendszer X tengelye mentén
- *Peremfeltételek:*
 - Az U profilok mindkét vége teljesen rögzítve (piros gömbök)
 - A hátsó lemez hat furatának - csavarkötésekkel lefogatott – a felső, megosztott felületei teljesen rögzítve (piros gömbök)
 - A szemek egymással szemben lévő zöld felületei sík irányban elmozdulhatnak (pink nyilak és gömbök)
- *Kapcsolódások:* az alkatrészek egymáshoz ragasztott (bounded) kötessel kapcsolódnak



5.20. ábra. Mellső kereszttartó terhelése és peremfeltételei

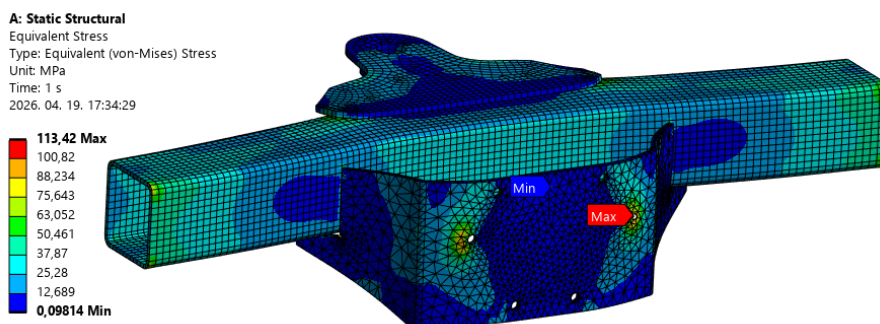
5.6.1 Ansys Mechanicalban futtatott mellső kereszttartó lineáris statikai vizsgálata

Ezt a modellt két megközelítés szerint is megvizsgáltam az Ansysban. Az első elképzelésem az volt, hogy a kereszttartót térfogati elemekkel analizálom. Ennek az az előnye, hogy nem kell annyit foglalkozni a geometria előkészítésével, szinte a valós CAD geometrián végezhető el az analízis. Azonban ebben az esetben is előjön az örök kérdés, - amit már vizsgáltam az 5.4-es pontban a lemezkonzolnál - hogy héjszerű modellekre mennyire megbízható, konvergált eredményt kapok.

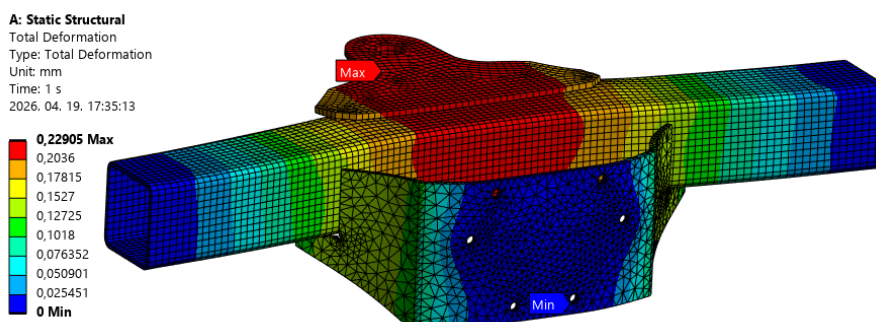
Az Ansys Workbenchben egy Static Structural vizsgálatot használtam, beállítottam a Structural Steel FEA anyagmodellt, amit minden ipari elemzéshez használok. Beolvastam a *kereszt tarto.x_t* modellt és megvizsgáltam a beolvasás eredményét. Örömmel tapasztaltam, hogy az Ansys Mechanical automatikusan létrehozta a testek között a ragasztott (bounded) kötéseket. Egyedül a szög alatt lévő hátsó lemez és az U profil kapcsolatát kellett manuálisan definiálni. Futtattam egy elemzést a kapcsolatokra és a megfelelő eredményt kaptam. Az előírásoknak megfelelően megadtam a megfogásokat a Fixed Support paranccsal, definiáltam a sík menti elmozdulás lehetőségét a Frictionless Support paranccsal keresztül. A Remote force parancs segítségével nagyon egyszerűen megadtam a két hengeres felülethez kapcsolódó külpontos terhelést. Kértem egy hálózást, amely nagyon durva felbontást adott az automatikus hálóval. Végeztem egy vizsgálatot, de csak azért, hogy nincs-e elvi hiba a végeselemes modellem felépítésében. Lefutott a vizsgálat és kaptam eredményt, ezt a táblázatba betettem.

A hálót egységesen 10 mm-re módosítottam (befoglaló méret: 1100 x 450 x 250), az U profilokon és a szemeken megmaradt a hexaéder háló, míg a többi

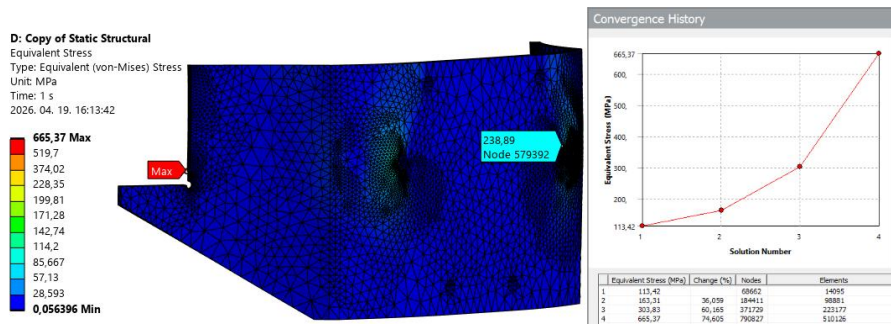
lemezalkatrészen tetraéder háló állt a rendelkezésemre, anyagvastagság mentén egy darab kvadratikus elemmel. Ennek az eredménye már sokkal hihetőbb volt és a „virtuális” csavarfejnél jelentkezett (5.21. ábra és 5.22. ábra) Ezen felbátorodva futtatam egy hálófüggetlenségi vizsgálatot, ami nem konvergált be, hanem feszültség-singularitás jelent (5.23. ábra) meg a hátsó lemez és az U profil között. Erről a jelenségről már írtam az 5.4.1-es pont végén. Ezt tudomásul véve kézi mintavételezéssel megnéztem, hogy a „virtuális” csavarfejnél milyen értékek vannak és ezek közül a legnagyobbat vettem figyelembe a táblázatban. Ilyen esetekben különböző módszertanok szerint lehet megfelelő következtetést levonni, de itt - a későbbi középfelület alapú vizsgálat miatt - nem tartottam fontosnak, hogy ezzel mélyebben foglalkozzak.



5.21. ábra. Mellső keresztartó - Egyenértékű feszültségkép

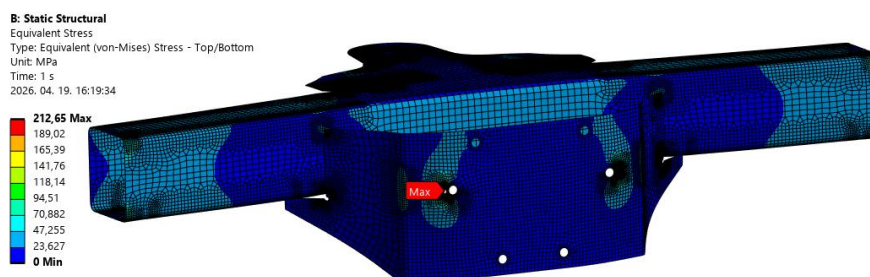


5.22. ábra. Mellső keresztartó - Teljes elmozdulás kép

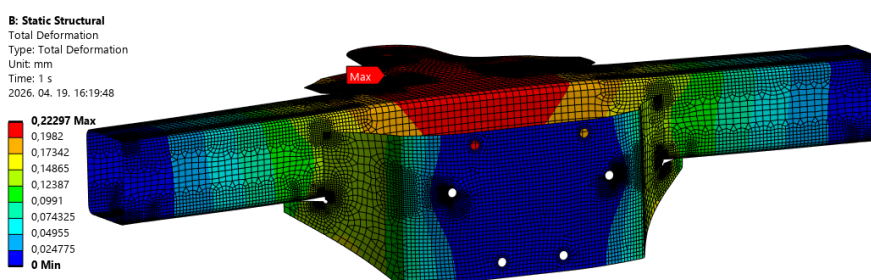


5.23. ábra. Mellső keresztartó – Feszültség-szingularitás a hátsó lemez kapcsolódásánál

A Workbenchben a meglévő Static Structural Engineering Datajára ráhúztam egy új Static Structural vizsgálatot, hogy a lemez jellegű alkatrészeket középfelületükkel vizsgáljam. Ehhez a modellt a Discoveryben készítettem elő, - Midsurface és a Project parancsok használatával - ami ugyan időben többletmunkát igényelt, de a jó eszközöknek köszönhetően gyorsan elvégeztem. Ezután megnyitottam a Mechanicalt, ahol definiáltam a terheléseket és a peremfeltételeket megegyező módon, mint azt az előbb leírtam. Egyetlen egy fontos különbség volt, itt nem jöttek létre automatikusan a kapcsolódások a geometriák között. De ezt nagyon egyszerűen orvosoltam az Ansys Mechanical Connection group eszközével. Itt fontos volt az Edge to Surface és az Edge to Edge opciók engedélyezése is, majd a felesleges kapcsolatok kitörlése. A biztonság kedvéért lefuttattam a Contact toolt, ami megfelelő eredményt adott. A háló méretét egységesen 10 mm-re állítottam és lefuttattam ez első vizsgálatot, ami rendben meg is történt. Ehhez a vizsgálatához tartozó elmozdulás hasonló értéket adott, mint a térfogati elemek használatakor és a maximális feszültség is a „virtuális” csavarfejnél jelentkezett. A hátsó lemez a megfogásokkal egy síkba eső részére előírtam egy lokális 5mm-es hálóméretet és így is futtattam vizsgálatot, hogy meggyőződjek merre indulnak el az eredmények. A táblázatban megtalálható értéket kaptam, ami alapján készítettem egy 5%-os eltérésfigyelés mellett konvergencia vizsgálatot, amely 212,65 MPa-ra (5.24. ábra) be is konvergált, 0,222 mm (5.25. ábra) maximális elmozdulás mellett.



5.24. ábra. Mellső keresztartó - Egyenértékű feszültségkép

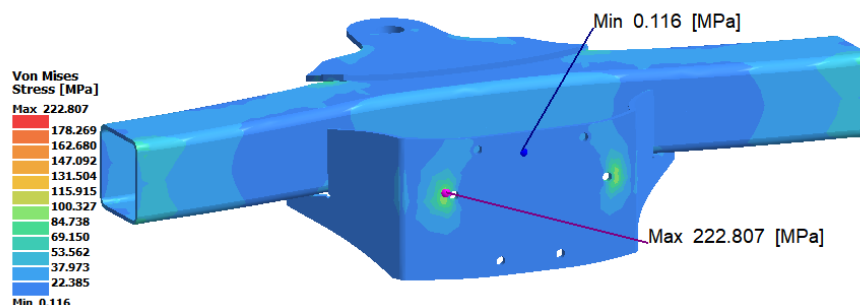


5.25. ábra. Mellső keresztartó - Teljes elmozdulás kép

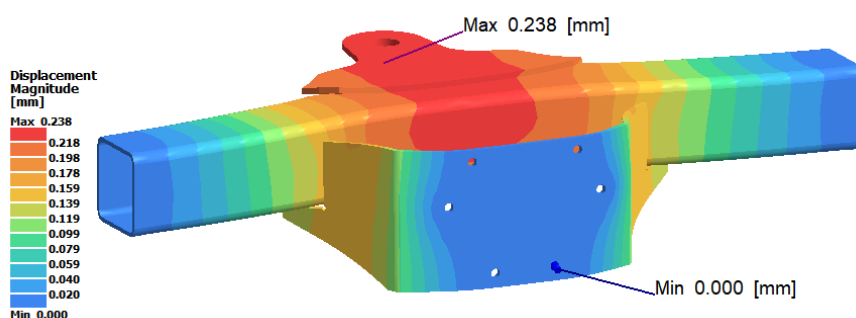
5.6.2 SimSolidban futtatott mellső keresztartó lineáris statikai vizsgálata

A SimSolidba beolvastam a *keresztartó.x_t* fájlt, mentést követően hozzárendeltem a Structural Steel FEA anyagmodellt az alkatrészhez. A SimSolid is automatikusan létrehozta a ragasztott kapcsolódások nagy részét, de manuálisan kellett létrehozni itt is a hátsó lemez és az U profil közötti ferde kapcsolódást. Ezután kiválasztottam a Structural analízis típust. Az előírásnak megfelelően definiáltam a peremfeltételeket a „virtuális” csavarfejeknél, az U profilok végeinél Immovable Support parancsnak köszönhetően. A szemek felületeinek sík menti elmozdulását Slider Support parancson keresztül definiáltam. Megadtam a külpontos húzóerőt a Remote load parancs alkalmazásával. Az első futtatást alapértelmezett beállításokkal végeztem, ami három lépéses megoldást jelentett. A célom ezzel az volt, hogy a szerkezet úgy viselkedik-e ahogy várom, nem az

eredményre koncentráltam. Ennek az eredményei is benne vannak az összehasonlító táblázatban. Az alapértelmezett beállításokat módosítva négy lépéses adaptív megoldást állítottam be és használtam az Adapt to features opciót, ami nagyobb figyelmet biztosít a feszültséggyűjtő helyeknek, ahogy azt korábban már bemutatam. Az így kapott feszültség szignifikánsan eltér az alapfuttatáshoz képest a furatok környékén, ami 222,80 MPa (5.26. ábra) és ehhez 0,238 mm (5.27. ábra) elmozdulás tartozik. Az ajánlások alapján ezzel a beállítással futtatott vizsgálat eredménye konvergálnak tekinthető.



5.26. ábra. Mellső keresztartó - Egyenértékű feszültségkép



5.27. ábra. Mellső keresztartó - Teljes elmozdulás kép

5.6.3 Eredmények összegzése – Mellső kereszttartó vizsgálata

Szakedolgozatomban tárgyalt utolsó vizsgálati eset nagyon tanulságos több szempontból is. Egy szerelés, szerkezet vizsgálatánál sokkal több szempontot kell figyelembe venni és jól visszaadja azt az analízismérnöki gondolkozásmódot, hogy a tetraéder háló kritikátlan alkalmazása nagyon félrevezető, megtévesztő eredményeket tud adni vékonyfalú modellek esetén. Szakmailag korrekt eredményt a térfogati és felületi háló vegyes alkalmazásával kaptam az Ansys esetében. A SimSolid teljesen más szemlélete itt is tetten érhető, ami azt jelenti, hogy az első futtatást követő finomított beállításokkal végzett analízis nagyon közeli feszültségértéket produkált az Ansys konvergált eredményéhez. Ezek az értékek találhatóak a 5.6. táblázatban. Az Ansys - Térfogati konvergált vizsgálat végeredménye feszültségszingularitási jelenség lett, ahol a háló automatikus finomítása esetén a feszültségértékek a végtelenbe kezdtek tartani a ragasztott kapcsolódásnál.

5.6. táblázat. Mellső kereszttartó lineáris statikai vizsgálatának eredményei

Szoftver / háló	Feszültség [MPa]	Elmozdulás [mm]	Csomópont [db]
Ansys – Térfogati, alapértelmezett háló	103,04	0,225	13681
Ansys – Térfogati, 10mm háló	113,42	0,229	68662
Ansys – Térfogati, konvergált*	238,89	0,233	*Feszültség-szingularitás lépett fel
Ansys – Térfogati és felületi, 10mm háló	117,62	0,222	10733
Ansys – Térf. és fel., 5mm háló a hátsó lemezen	169,71	0,222	12844
Ansys – Térf. és felületi, konvergált	212,65	0,222	250696
SimSolid – 1. futtatás	152,72	0,23	-
SimSolid – Konvergált	222,80	0,238	-

6 Eredmények összehasonlító elemzése

Szaktervezésem egyik legérdekesebb része az összehasonlító elemzés olvasható ebben a részben. Ahogy korábban ígértem is nem kívánok pálcát törni egyik megoldás felett sem, de fontosnak tartom az erősségek kihangsúlyozását.

6.1 Háló alapú és háló nélküli technológiai összevetése

Amit az elején leszögeztem az az, hogy mindkét technológia bizonyított. Az Ansys bizonyította, hogy 1970-től kezdve nem véletlenül meghatározó szereplője a piacnak. A SimSolid arról adott bizonyosságot, hogy a gyorsaság nem megy a minőség, a pontosság rovására.

Felmerülhet a kérdés, hogy melyik területen pontosabb a klasszikus FEA és minek az árán? Erre egyértelmű választ nem lehet adni. Amennyiben abból indulok ki, hogy ha a verifikációs példákat tekintjük a bázisnak akkor a SimSolid a membrán vizsgálata esetén azonnal jó eredményt adott, míg az Ansys Mechanical alapbeállításokkal futtatva távol volt a referenciaértéktől. Fontos, hogy megfelelő szakmai tapasztalat mentén az Ansysből is elő lehetett hozni a referenciaértékhez közeli eredményt, de ehhez már nagyobb szakmai rálátásra van szükség. A sajátfrekvenciás verifikációs teszten az Ansys közelebb állt a referenciaeredményekhez, de a SimSolid legnagyobb eltérése is kevesebb, mint 1 %.

Az ipari példák esetében is azt kell kijelenteni, hogy érezhető különbség nincs a két megközelítés között. Ha azt nézzük, hogy a hagyományos, hálózás alapú technológia alulról közelíti (kivéve a sajátfrekvencia vizsgálat) a valós feszültségértéket a diszkretizációból fakadó természetes egyszerűsítés miatt, akkor a SimSolid is nagyon jól megállja a helyét még az Ansyshez mérve is.

Egy másik fontos kérdés, hogy mely területeken hatékonyabb a háló nélküli technológia? A SimSolid egyértelműen, minden területen sokkal gyorsabban szolgáltatott eredményt, így az megállapítható, hogy a hagyományos megközelítés egyértelműen nagyobb erőforrásigénnyel bír és lassabb a lineáris statika és sajátfrekvencia vizsgálatok területén. Egyetlen terület volt, amivel a hálóalapú technológiát képviselő Ansys nem birkózott meg az pedig az stl fájlformátumú modell vizsgálata. Ez az egyre jobban terjedő, háromszögelt felületekből álló hálómódell vizsgálata nem okozott problémát a SimSolidnak. Az Ansysban nem

lehetett behálózni a Discoveryben átkonvertált hálómódel alapú B-rep geometriát, így az analízis elmaradt.

6.2 Szoftverek összehasonlítása

6.2.1 Felhasználhatóság

Ansys Mechanical: Mind lineáris statika, mind sajátfrekvencia vizsgálat területén jól teljesített az Ansys. Mivel hálózás alapú technológiáról van szó, így kulcsszerepe van a háló típusának, minőségének. Tapasztalataim alapján nagyon fontos, hogy a vékonyfalú modellek (közép)felületi hálóval legyenek vizsgálva olyan esetekben, ha az anyagvastagság szignifikánsan kisebb a másik két dimenzióánál. A hálózás területén azonban olyan széles eszköztára van az Ansysnak, hogy azok alkalmazása támogatja az analízist végző mérnökök munkafolyamatait a pontos eredmények elérése érdekében.

SimSolid: A vizsgált területeken nagyon jól szerepelt a SimSolid. Ennek a hálómentes technológiának a sajátossága, hogy a valós, CAD-es geometrián lehet vizsgálatokat futtatni. Amit az Ansys tud középfelülettel azt tudja a SimSolid a natív CAD geometrián pontosság szempontjából is.

6.2.2 Teljesítmény

Ansys Mechanical: Amennyiben a teljesítmény alatt azt értjük, hogy egységnyi idő alatt melyik technológiával lehet több vizsgálatot elvégezni, akkor itt bizony az Ansys a második helyre szorul. A vizsgált területeken inkább hátrány, mint előny a háló alapú diszkretizáció. Ezeknél az egyszerűbb alkatrészeknél akár több százezer csomópontot is tartalmazhat a végelelemes modell, ami lassítja a megoldás folyamatát igénybe véve a rendelkezésre álló erőforrásokat.

SimSolid: Mivel nincs háló, így nincs hozzá kötődő modellelőkészítés. Sokkal kevesebb szabadságfokkal, így hozzájuk kapcsolódó egyenletekkel kell számolni a számítógépnek, ami miatt nagyon gyors a megoldás. A SimSolid igazi előnye a nagy szerkezetek statikai vizsgálata, ami alatt a komplex alkatrészeket és szerkezeteket értjük. A geometriai pontatlanságokat, hibákat is sokkal jobban kezeli ez a hálómentes megközelítés.

6.2.3 Pontosság

Mind az Ansys Mechanical, mind a SimSolid nagyon jól teljesített pontosság szempontjából, ez látható az egyes vizsgált esetekhez tartozó összesítő táblázatokban számszerűsítve. Hibahatáron belüli különbségek vannak, ami azt erősíti, hogy a SimSolid technológiája egyenrangú a hagyományos, hálós alapú végelemmel.

6.2.4 Modellezési rugalmasság

Ansys Mechanical: Ezen a területen kimagaslik az Ansys. Több lehetőség is rendelkezésre áll modellezésre, előkészítésre. Itt kiemelem a Discovery (SpaceClaim) direktmodellezési képességeit, amely használatával nagyon gyorsan lehet a modelleket egyszerűsíteni, módosítani a vizsgálatokhoz. A szakdolgozatomban ugyan nem használtam, de megemlítettem, hogy paraméterekkel összekapcsolható a végeleemes modell és a CAD-es geometria, ami optimalizálást tesz lehetővé.

SimSolid: Klasszikus modellezési képessége nincs a SimSolidnak, mert a megadott CAD-es geometriát kell használni a vizsgálatához. Ugyanakkor vannak olyan lehetőségek, mint hegesztési varratok modellezése, ami a hegesztett szerkezet vizsgálatát támogatja. Ha mégis kell módosítani a modellt, akkor azt valamely CAD szoftverben kell elvégezni, amiből akár asszociatívan is a SimSolidba küldhető a geometria.

6.2.5 Peremfeltételek és terhelések definiálhatósága

Ansys Mechanical: Ez a terület is nagy erőssége az Ansysnak. Nagyon sok parancon keresztül lehet definiálni a peremfeltételeket, terheléseket, hogy kielégítse az analízist végző mérnök igényeit. Ebben a szakdolgozatban olyan alap peremfeltételeket és terheléseket használtam mint, Fixed Support, Frictionless Support, Force, Remote force.

SimSolid: Meglepően nagy eszköztárral rendelkezik a peremfeltételek és terhelések terén a SimSolid. A vizsgált modellekre tökéletesen használhatóak voltak a következő eszközök úgymint, az Immovable Support, Slider Support, Force, Remote force, Bearing load. Derékszögű- és henger koordinátarendszerben is definiálhatóak a terhelések.

6.2.6 Szerelések kezelése

Ansys Mechanical: Jól kezeli a szereléseket a kiválasztási eszközöktől kezdve a kapcsolódások létrehozásán át a kiértékelési esetekig. Szerelések esetében nagyon

fontos a gyors és hatékony kapcsolódás létrehozás, amely térfogati háló esetén már a beolvasás folyamán létrejön. Van lehetőség manuális és félautomatizált kapcsolódás létrehozására és azok diagnosztizálására is.

SimSolid: Ebben is erős a saját területén a hálómentes technológiát képviselő szoftver. Számos fájlformátumot be lehet olvasni és ennek folyamatában, adott féltelek mentén automatikusan létrehozza a kapcsolódásokat, akár egymásba érés esetén is. A nagy méretű szereléseket is jól kezeli, habár nem volt témája a dolgozatomnak.

6.2.7 Időigény (előkészítés, futtatás, kiértékelés)

Ezen a területen a SimSolid verhetetlen ebben az összehasonlításban. Az előkészítés nem kérdés, mert a SimSolid a megadott CAD-es modellen végzi a vizsgálatot, kifejezetten tilos egyszerűsíteni a geometriát. Futtatásban is a SimSolid nyer, hisz sokkal kevesebb szabadságfokkal kell dolgoznia és nem a véges elemek számát növeli a pontosság érdekében, hanem a polinomok fokszámát emeli. Kiértékelés esetében kevesebb lehetőség van a SimSolidban, cserébe viszont nagyon gyors. A 6.1. táblázat mutatja, hogy az egyes vizsgálatok mennyi időt vettek igénybe a modellek beolvasásától a teljes folyamatot leképezve. Megjegyzem, hogy az Ansys Mechanicalt nyolc hónapja használok, míg a SimSolidot tíz hónapja.

6.1. táblázat. Vizsgálatok teljes ideje

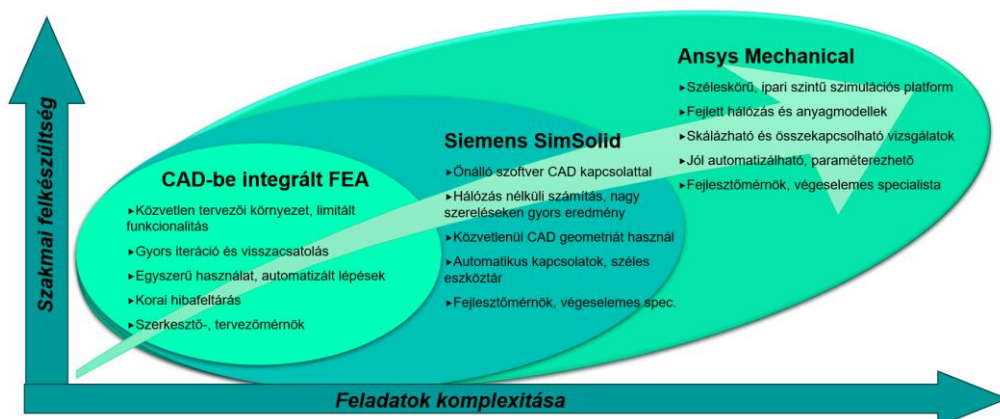
Modell	Ansys Mechanical [min:sec]	SimSolid [min:sec]
Membrán	08:50	06:27
Befogott tartó	04:42	02:13
Konzol	14:06	06:54
Főtengely	08:05	03:40
Lemezkonzol	08:19 (th) 15:05 (fh)	03:35
Vonószem	-	07:34
Mellső kereszttartó	28:22 (th) 19:56 (tfh)	08:04

th: térfogati háló, fh: felületi háló, tfh: térfogati és felületi háló

7 Fő következtetések, ajánlások, javaslatok

A XX. század vége és a XXI. század eleje a 3D-s CAD rendszerek rohamos terjedését hozták. Minden gyakorlatban sikeres vállalkozás beruházott valamilyen tervezőszoftverbe, hogy gyorsabb és hatékonyabb legyen a fejlesztésük. Ehhez hozzájárultak a személyi számítógépek, majd a laptopok teljesítményének növekedése és ezzel szemben az áruk fajlagos csökkenése. A 2000-es évek közepétől a végeselemes analízis is egyre népszerűbb lett, a nagy rendszerek mellett megjelentek a CAD szoftverbe integrált megoldások. A tervezőmérnökök olyan eszközöket kaptak, amivel nemcsak, hogy gyorsabban, hanem jobb és megbízhatóbb terméket is lehetett alkotni. Az analízissel foglalkozó specialisták továbbra is a nagy rendszerek (Ansys, Nastran, stb) mellett tették le a voksukat a feladatok összetettsége miatt. Gyakorlatilag megfogalmazhatjuk úgy, hogy voltak a profik és a szakmailag kevésbé képzett szárnypróbálgatók a végeselemes vizsgálatok területén és a kettő között volt egy nagy űr.

Ezt a rést tudja, tudta kitölteni az olyan speciális technológia, mint a SimSolid. Kitolja a határait minden irányba a végeselemes technológia használhatóságának és olyan paradigmákat dönt le, mint a pontos eredmény lehetetlensége percek alatt (7.1. ábra). Heti rendszerességgel találkozok olyan tervezőmérnökökkel, akik a szárnypróbálgatás fázisában vannak és hálózati alapú technológia útvesztőjéből keresik a kiutat, miközben a SimSolid és a GFEM már egy sokkal kézenfekvőbb megoldás lenne a számukra. Az nagyon fontos, hogy az alapvető végeselemes szimulációs fogalmakkal, háttérrel tisztában kell lenni bármely technológiát használjuk is, különben katasztrófa lehet a végeredmény.



7.1. ábra. Szimulációs érettség diagram

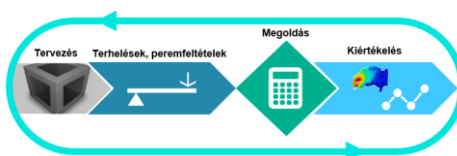
A nagy rendszerek - mint az Ansys, a Simcenter 3D vagy a COMSOL - használata egyértelműen megkívánja az analízissel foglalkozó szakemberek, szakmérnökök, specialisták elméleti tudását, mivel ezekben a szoftverekben a számítási pontosság és a konvergencia biztosítása már nem csak az automatizmusokban, hanem a tudatos hálógenerálásban és a peremfeltételek precíz definiálásában rejlik. A szimulációs érettségi diagram első és második szegmense sokkal könnyebben elérhető mindenki számára.

A hagyományos végelelemes eszközök használatának folyamata látható az 7.2. ábrán. Ez egy lineáris, iterációs folyamat, ahol a geometria előkészítése és a hálózás nagy szakértelmet kíván és sok időt vehet igénybe.



7.2. ábra. Hagyományos végelelemes szimuláció folyamata

Ezzel szemben a SimSolid hálómentes technológiája radikálisan lecsökkenti az egész folyamatot a két legidőigényesebb lépés kiiktatásával és a FEA demokratizálásával (7.3. ábra).



7.3. ábra. Hálómentes végelelemes szimulációs folyamat

Bármely technológiát használjuk is a megfelelő szakmai tudás, háttér nélkül nagyon veszélyes az eredményekbe vetett vakhit. A szoftver minden bemenő adatra kidob egy színes ábrát, - ha nem vétettünk elvi hibát - de csak a felkészült mérnök látja, hogy az "nem csak szép, hanem fizikailag lehetséges is".

A Mesterséges Intelligencia a FEA területét, a felhasználói szokásokat is meg fogja változtatni, de ez már egy másik dolgozat témaköre lehet.

Irodalomjegyzék

- [1] Dr. Mankovits Tamás és Dr. Huri Dávid, *MODELLEZÉS ÉS SZIMULÁCIÓ*, köt. 183. Debrecen: Debreceni Egyetem, 2015.
- [2] „What simulation technology does Ansys Discovery use in Explore mode? | Ansys Knowledge”. Elérés: 2026. március 30. [Online]. Elérhető: <https://innovationspace.ansys.com/knowledge/forums/topic/what-simulation-technology-does-ansys-discovery-use-in-explore-mode/>
- [3] „Designcenter X NX Essentials: Product Validation - NX Design”. Elérés: 2026. április 22. [Online]. Elérhető: <https://blogs.sw.siemens.com/nx-design/nx-x-essentials-product-validation/>
- [4] „Scan&Solve – Intact Solutions, Inc.” Elérés: 2026. április 21. [Online]. Elérhető: <https://intact-solutions.com/scan-solve/>
- [5] Komzsik Louis, *What every engineer should know about computational techniques of finite elements analysis*, Third edition. 380. Boca Raton: CRC Press, 2025.
- [6] „Ansys - 5.2. Types of Solvers”. Elérés: 2026. április 22. [Online]. Elérhető: https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v251/en/ans_bas/Hlp_G_BAS3_4.html
- [7] V. Apanovitch -Simsolid, „USING ALTAIR SIMSOLID™ TECHNOLOGY OVERVIEW”.
- [8] „Theoretical Background of SimSolid by Victor Apanovitch - Altair Community”. Elérés: 2026. április 22. [Online]. Elérhető: <https://community.altair.com/discussion/33817/theoretical-background-of-simsolid-by-victor-apanovitch>
- [9] „Ansys - 3.8. Comparing Mode-Extraction Methods”. Elérés: 2026. április 22. [Online]. Elérhető: https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v251/en/ans_str/Hlp_G_STR3_15.html
- [10] „NAFEMS Engineering Modelling, Analysis, Simulation Community”. Elérés: 2026. április 22. [Online]. Elérhető: <https://www.nafems.org/>
- [11] „The Standard NAFEMS Benchmark Tests for CEETRON Solve”.
- [12] Simsolid Corporation, „Validation Manual Release 2.0”, köt. 100, 2015, Elérés: 2026. április 6. [Online]. Elérhető:

<https://www.inneo.ch/files/content/Produktentwicklung/Berechnung-Simulation/SIMSOLID-validation-manual-release-2-0.pdf>

- [13] „Kellően sűrű a hálóm? III. - Feszültség gyűjtőpontokkal és hálófüggetlenségi vizsgálat - EPLM”. Elérés: 2026. április 12. [Online]. Elérhető: <https://blog.eplm.hu/kelloen-suru-a-halom-iii-feszultseg-gyujtopontokkal-es-halofuggetlensegi-vizsgalat/>

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném köszönetemet kifejezni a szimulációs szakmérnöki képzés oktatóinak, akiknek munkája révén hasznos, a mindennapi műszaki gyakorlatban is jól alkalmazható tudást sajátíthattam el.

Köszönet illeti témavezetőmet, Dr. Huri Dávidot, aki szakmai meglátásaival és a dolgozat formai kialakítására is kiterjedő figyelmességével nagyban hozzájárult a szakdolgozat elkészültéhez.

Külön köszönettel tartozom konzulensemnek, Dr. Louis Komzsiknak a szakmai támogatásáért és az elmúlt 15 év során nyújtott ösztönzéséért. Szakmai pályafutása és a végeselemes modellezés területén végzett munkája a jövőben is iránymutatásként szolgál számomra.

Köszönettel tartozom családomnak a támogatásukért és türelmükért.