

DIPLOMADOLGOZAT

Lakatos Róbert

2024



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

Szent István Campus

Műszaki Intézet

mesterképzési szak

**Vasúti keretállás ellenőrzésére alkalmas mechanikai modell
kidolgozása**

Belső konzulens: Dr. Oldal István
egyetemi docens

Belső konzulens
intézete/tanszéke: **Műszaki Intézet/
Gépszerkezettani Tanszék**

Készítette: **Lakatos Róbert**

Gödöllő

2024

1. Tartalom

1.	Tartalom	4
2.	Bevezetés és célkitűzések.....	6
3.	Szakirodalmi áttekintés	8
3.1.	Vasúti felsővezeték rendszer	8
3.2.	Keresztmező rendszer	8
3.3.	Keretállás	9
3.4.	KR, KRC oszlop	11
3.5.	L oszlop.....	12
3.6.	Gerenda típusok	13
3.7.	Gerendák méretválasztéka.....	18
3.7.1.	Gerenda szerkezeti magassága	18
3.7.2.	Gerenda hosszúsága.....	19
3.8.	Gerenda ellenőrzése.....	21
3.9.	Gerenda alátámasztások	23
3.9.1.	Rögzített alátámasztás	23
3.9.2.	Görgős alátámasztás.....	24
3.9.3.	Csuklós alátámasztás.....	25
3.9.4.	Iker alátámasztások.....	25
3.10.	Gerenda felkötés	26
3.11.	KO 300 konzol.....	26
3.12.	Terhelések	28
4.	Alkalmazott módszerek (anyag és módszer)	30
4.1.	Anyagtulajdonságok	30
4.2.	Geometria.....	30
4.2.1.	Geometria Beam elemekből.....	31
4.2.2.	Geometria Solid elemekből	36
4.3.	Végeselem szimuláció	41
4.3.1.	G300-16010 szimulációja Beam elemekből	42
4.3.2.	G450-16010 szimulációja Beam elemekből	44
4.3.3.	G300-16010 szimulációja Solid elemekből.....	46
4.3.4.	G450-16010 szimulációja Solid elemekből.....	47
4.3.5.	Lokális túlfeszültségek.....	48
4.3.6.	A modell optimalizálása.....	53
4.4.	Felkötés modellezése	59

4.4.1.	A KRC 14 Felsővezetési oszlop modelljének elkészítése	59
4.4.2.	A gerenda és az oszlop csatlakozása	60
4.4.3.	A felkötéssel rendelkező gerenda szimulációja.....	62
4.4.4.	A kötélben (sodronyokban) keletkező erő	68
5.	Eredmények és értékelésük (megvitatás)	69
6.	Következtetések és javaslatok.....	71
7.	Összefoglalás	72
8.	Summary.....	73
9.	Irodalom jegyzék	74
10.	Ábra jegyzék	75
11.	Táblázat jegyzék	78

2. Bevezetés és célkitűzések

A hazai vasúti közlekedés jeles dátuma 1846. július 15., mivel ezen a napon nyitották meg az első vasútvonalat Pest és Vác között, gőzvontatásos rendszerben. A Magyar Királyi Államvasutak 1911-ben nyitotta meg az utazóközönség előtt a Rákospalota–Veresegyház–Vác és Veresegyház–Gödöllő vonalat, mely egyfázisú, 10 kV feszültségű, 15 Hz-en üzemelő, váltakozó áramú rendszerű volt.

Kandó Kálmán 1917-ben kidolgozta az 50 Hz-es, 16 kV-os vontatási rendszert, melynek kivitelezése 1932-re valósult meg a Budapest-Keleti pályaudvar-Komárom szakaszon. 1930-ban jelent meg „A Budapest Keleti pu.-Hegyeshalom-i fővonalon építendő villamos felsővezetéki berendezés ismertetése, valamint vasoszlopainak és betonlapjainak méretezése. 46 melléklettel.” címmel az első hazai felsővezetéki rendszerterv, mely összefoglalja a felsővezetéki tartószerkezetek méretezési alapelveit.

1963-ban kezdődött meg a hazai villamos vontatási rendszer átállítása 16 kV feszültségről 25 kV-ra, mely már megfelelt a Nemzetközi Vasútegylet (UIC) előírásainak. A jelenleg is használatos felsővezetéki rendszerterv 1974-ben került kiadásra „MÁV Egyfázisú, 25kV, 50 periódusú villamos felsővezetéki berendezések alapszámításai egyfázisú 25kV, 50 periódusú acéloszlopok és betonlapjainak méretezése 61 melléklettel” címmel. A manapság zajló felsővezeték felújítások, vagy villamosítások projektjeibe még ezt a rendszertervet nevezik meg, mint alkalmazandó előírást.

Magyarország Európai Unióhoz történő csatlakozása a vasúti szabályozásra is kihatott: a hazai felsővezeték rendszernek (is) meg kell felelni az ENE-TSI átjárhatósági követelményeknek, melynek következménye, hogy a rendszertervben használt módszereket és a kiszámított adatokat, több esetben módosítani szükséges. A MÁV Zrt. megkezdte a rendszerterv módosításának kidolgozását.

Kezdetben a csoportos megfogású felsővezeték tartószerkezeteit keresztmezős rendszerrel alakították ki, de a keretállás rendszerek nyújtotta előnyök miatt a 80-as évekre kidolgozták a hazai vasúti keretállás rendszert. Ez a rendszer azóta van használatban. A keretállás gerendáinak megfelelőség igazolására már a 80-as években számítógépet vettek igénybe. A MÁVTI gondozásában elkészült egy szoftver, mely alkalmas volt a gerendák mechanikai ellenőrzésére, az akkori előírásoknak és szabványoknak megfelelően.

Az elmúlt negyven évben sok előírás, szabvány módosult, viszont ezeket a változásokat a gerenda ellenőrzésének módszere nem követte le, aminek következtében nem felel meg a jelenlegi előírásoknak maradéktalanul.

Célom, hogy a keretállások gerendáinak 3D modelljeit elkészítsem, és a gerenda megfelelőségét a mai kornak megfelelő technológiával, végeelem szimulációval ellenőrizem. Reményeim szerint a végeelem módszerrel pontosabban meg lehet határozni a szerkezet jellemzőit, így hasznos információkhoz juthatok a szerkezet optimalizálásához.

3. Szakirodalmi áttekintés

3.1. Vasúti felsővezeték rendszer

A villamos vontatás megjelenésével igény támadt a vezetékek rögzítésére úgy, hogy a szerelvény tetejére rögzített áramszedő folyamatosan érintkezésben legyen a vezetékekkel, így a villamosenergia felhasználásra kerülhessen a vontató járműben. Nagyobb sebességeket villamos vontatással a hosszlánc rendszerek alkalmazásával értek el. A jó minőségű áramszedés akkor valósul meg, ha a vezeték és az áramszedő között folyamatos érintkezés van, ezért a vezeték belógását korlátozni kell, elkerülve az áramszedő nagyobb mértékű fel-le mozgását. Ez a függőleges mozgás a sebesség növelésével ellehetetlenítené a folyamatos érintkezést. A hosszlánc tartósodronyból, munkavezetékből és függesztőkből áll, a két végén után-feszítő eszközzel. A tartósodrony az oszlopokhoz van rögzítve a tartó szerkezeteken keresztül (egyenes pályán 60-75 méterenként), a munkavezeték oszlopközönként 7-9 függesztővel van rögzítve a tartósodronyhoz. Ez a rendszer hazánkban jó minőségben biztosítja az áramszedő-felsővezeték kapcsolatot 160 kilométer/óra vontatójárműsebességig.

Az olyan vasúti pályákon, ahol egy vagy két vágány található, egyedi megfogású felsővezeték alkalmaznak. A vasúti pálya mentén elhelyezett oszlopok egyedi tartószerkezetekkel tartják a hosszláncot. Az olyan helyeken - jellemzően állomásokon - ahol kettőnél több vágány található egymás mellett, csoportos megfogású felsővezeték kialakítást használnak. Ennek főként gazdasági oka van, de sok esetben a vágányok között nincs elegendő hely az oszlop elhelyezésére. A csoportos megfogás általában két darab oszlopból áll és valamilyen keresztartóból. Ezen keresztartóktól függően beszélhetünk keresztmező, illetve keretállás rendszerről.

3.2. Keresztmező rendszer

A vasút villamosítások kezdeti szakaszaiban a keresztmezős rendszerek terjedtek el. Ezek két oszlopból állnak melyek között sodronyokból álló kötélpoligon (keresztartó) tartja a hosszláncokat csomóponti felfüggesztéssel. A hosszláncok, csomópontok és szigetelők súlyából származó erőket a keresztartó veszi fel és továbbítja az oszlopok felé (Szabó, 1974). Ezt a kötélpoligont két függőleges rácsos oszlop tartja pozícióban. Ez a rendszer nagyon sok vágány áthidalását teszi lehetővé, bár a gyakorlatban 40 méternél nagyobb fesztávok esetén

a pályasebességet csökkenteni kell. A Ferencváros rendező pályaudvaron találhatóak 110 méteres fesztávú keresztmezős rendszerek (1. ábra).

1. ábra: 110 méteres keresztmezős rendszer

(Forrás: Saját készítés, Ferencváros rendező pályaudvar)



A nagy feszítési távok meglehetősen magas oszlopokat követelnek meg, ráadásul az oszlopok tetején kialakuló nagy csúcs húzófeszültség miatt az oszlopokat jóval nagyobb méretű beton alaptestbe kell állítani, mint egy keretállásos rendszerben. A tartósodrony és a munkavezeték vízszintes pozícióját a felső és az alsó irány sodrony biztosítja, ezeken keresztül adódnak át a hosszláncok iránytöréséből, kigyózásából, illetve szélterheléséből keletkező erők hatásai az oszlopok felé.

Előnyei: nagy távolságok áthidalása, olcsó, egyszerűbb méretezés

Hátrányok: nagy rugalmasság, az áramszedő elhaladásakor a munkavezeték felemelkedik, így az egész keresztmező elmozdul, lengések alakulhatnak ki a párhuzamosan haladó hosszláncok mozgásából (Csoma, 2018). Hosszadalmas a hibaelhárítás, a rendszer bármelyik elemének meghibásodása esetén az egész keresztmező alatt korlátozni kell a forgalmat (Stanton, 2019).

3.3. Keretállás

Fő szerkezeti eleme a gerenda, ami rácsos szerkezetű és általában két oszlop támasztja alá (2. ábra). A hosszláncok tartósodronyai a merev acélgerendához vannak rögzítve, a munkavezeték vízszintes helyzetében tartását az egy darab irány sodrony végzi (Rónai, 1997).

A gerenda csatlakozása az oszlopokhoz lehet merev, vagy valamilyen, a gerenda hőmérsékletváltozása miatt bekövetkező hosszváltozást lehetővé tevő módon. Ez lehet görgős alátámasztás, illetve a gerendát tartó lengő oszlopba épített csukló alkalmazása. A keretállás rendszeren akár teljesen el lehet hagyni az irány sodrony alkalmazását, ekkor KO 300 konzolokat alkalmazva a hosszláncok egyedi tartószerkezetekkel vannak alátámasztva. Ez a legjobb megoldás, mivel így a hosszláncok mechanikai szempontból teljesen függetlennek válnak egymástól.

Előnyök: ha hosszláncok mechanikailag függetlenek egymástól, a meghibásodás csak egy vágányt érint, a többi továbbra is korlátozás nélkül járható (Baxter, 2015). Nem alakulnak ki lengések a rendszerben. Gyors hibaelhárítás. A gerendán további eszközök, berendezések helyezhetők el.

Hátrányok: maximum 45 méteres feszítési távolság, a konzolok alkalmazása további terhelést visz a rendszerbe, így csökken az áthidalható távolság. A gerenda megfelelőségének ellenőrzése bonyolult számítást igényel. A gerenda beemeléséhez megfelelő emelőgép szükséges.

2. ábra: Keretállás rendszer

(Forrás: Saját készítés, Gödöllő állomás)



Az előnyök és hátrányok összevetéséből egyértelműen következik, hogy az irány a keretállás rendszerek felé mutat, Magyarországon már jó ideje nem is lehet keresztmezős rendszerrel építeni vasúti felsővezetékét. Az irány sodrony elhagyásával a további előnyök

kihasználása érdekében a pályavasút üzemeltetőjének jelenlegi előírása a következő mondatot tartalmazza: üzemeltető igény alapján a vonatforgalom üzembiztonságának növelése érdekében az átmenő fő vágányok hosszláncait csoportos felerősítésen egyedi tartószerkezetekre kell elhelyezni.

3.4. KR, KRC oszlop

A gerendát tartó két oszlop közül az egyik minden esetben egy rácsos szerkezetű „KR” oszlop (3. ábra), melyhez a gerenda rögzített módon csatlakozik. Az oszlop fejmérete minden esetben 500X500 mm, az övvasak lejtése 1,5% és 2,5%. Amennyiben a gerendát felkötéssel szükséges ellátni, a 13-14 méteres változatot kell beépíteni, ha nem, akkor elegendő a 11,1-10,5 méter hosszúságú oszlop alkalmazása. A KRC oszlopok típusválasztékát az 1. táblázat szemlélteti.

1. táblázat: a KR oszlop típusválasztéka

(Forrás: Saját szerkesztés)

KRC oszlopok méretei		
Jele	Öv mérete	Rács méret
150-12 KRC 14,0	L150x12	L60x6
120-12 KRC 14,0	L120x12	L60x6
120-12 KRC 11,1	L120x12	L60x6
100-10 KRC 14,0	L100x10	L50x5
100-10 KRC 11,1	L100x10	L50x5
90-9 KRC 14,0	L90x9	L50x5
90-9 KRC 11,1	L90x9	L50x5
80-8 KRC 13,0	L80x8	L50x5
80-8 KRC 10,5	L80x8	L50x5
70-7 MKRC 10,5	L70x7	L40x4

A KR jelölés a hagyományos betonba állított oszloptípust jelöli, míg a KRC a töcsavaros típust. A töcsavarok alkalmazásával a beton alaptestbe a csavarokat helyezik bele, majd a beton megkötése után az oszlopot ezekhez a csavarokhoz rögzítik. Felkötés esetén a gerenda és az oszlop csatlakozásánál vízszintes rácsrudakat hegesztenek az oszlopba, a vízszintes irányú igénybevételekkel szembeni merevítés céljából. Az oszlop alkalmas a gerenda és a hosszláncoktól érkező vízszintes, illetve a pályával párhuzamos terhelések felvételére.

Amennyiben a keretállás másik oszlopa is ilyen típusú, akkor görgős alátámasztást szerelnek az oszlop és a gerenda csatlakozásához.

3. ábra: A KR oszlop csuklós gerenda alátámasztással és egyedi tartószerkezetekkel

(Forrás: Saját készítés, Kelenföld állomás)



A „KR” oszlop típus sorozaton belül található az úgynevezett mini „KR” oszlop, amely nem téglalap, hanem négyzet keresztmetszetű talppal van kialakítva.

3.5. L oszlop

A keretállások egyszerű tartóoszlopa (4. ábra), amely az oszlopba beépített csuklószerkezete által teszi lehetővé a gerenda hőmérsékletváltozás miatti hosszúság változását, típusjele: L (Rónai, 1997). A lengő oszlop a gerenda által átadott függőleges erők felvételére alkalmas. Két típusa terjedt el a hazai alkalmazásban: a 160 és 200 mm-es gerincmagasságú U acélból és vízszintes szögacél ráccsozattal készített hegesztett szerkezetek.

Hossztengelyükhöz viszonyítva 3-3% lejtéssel vannak kialakítva. A csukló tengely a vágányjárósík felett 200, illetve 330 mm-re a helyezkedik el, a gerenda és az oszlopmérettől függően (Csárádi, 1978). Ez a csukló biztosítja, hogy az „L” oszlop az alaptestjére csak tisztán függőleges erőket továbbít, azt nyomatékkal nem terheli (Szabó,1974). A lengő oszlopra kerülhet hosszlánc vagy fixpont kihorgonyzás, ilyen esetekben az oszlopot le kell horgonyozni úgy, hogy a lehorgonyzás nem az oszlophoz csatlakozik, hanem a hosszlánc vagy fixpont kifutó szálához. Így a kihorgonyzás az oszlopot vízszintes erővel nem terheli, csak a függőleges terheléseket kell figyelembe venni.

4. ábra: Az L oszlop csuklója, a háttérben az L oszlop egészében

(Forrás: Saját készítés, Gödöllő állomás)



3.6. Gerenda típusok

A gerenda a keretállás rendszer vízszintes, szögacélból hegesztett rácsos tartószerkezete, amely a vezetékek koncentrált erőhatásait és a hosszláncok okozta nyomatékokat csomóponti ingák közbeiktatásával veszi át (Rónai, 1997). A gerenda végeit úgy alakították ki, hogy a rá ható terhelő erőket az alátámasztó oszlopoknak át tudja adni. A

gerenda hőmérsékletváltozás okozta hosszirányú méretváltozása miatt sarokmereven csatlakozik a KR és L oszlopokhoz, és görgős alátámasztással, ha az L oszlop helyett KR oszlopot kell alkalmazni. Az L oszlopba épített csukló és a KR oszlopnál a görgős alátámasztás a keretállást statikailag határozottá teszi. A gerenda a tartósodronyok ívbehúzó és szél okozta erőinek felvételére alkalmas.

Alátámasztás és megfogás szerint a következő gerenda típusok léteznek:

- G I. Rögzített – Lengő (5. ábra). A gerenda egyik vége mereven van rögzítve a KR oszlophoz, a másik vége L oszlophoz csatlakozik.

5. ábra: Rögzített – Lengő csatlakozású gerenda

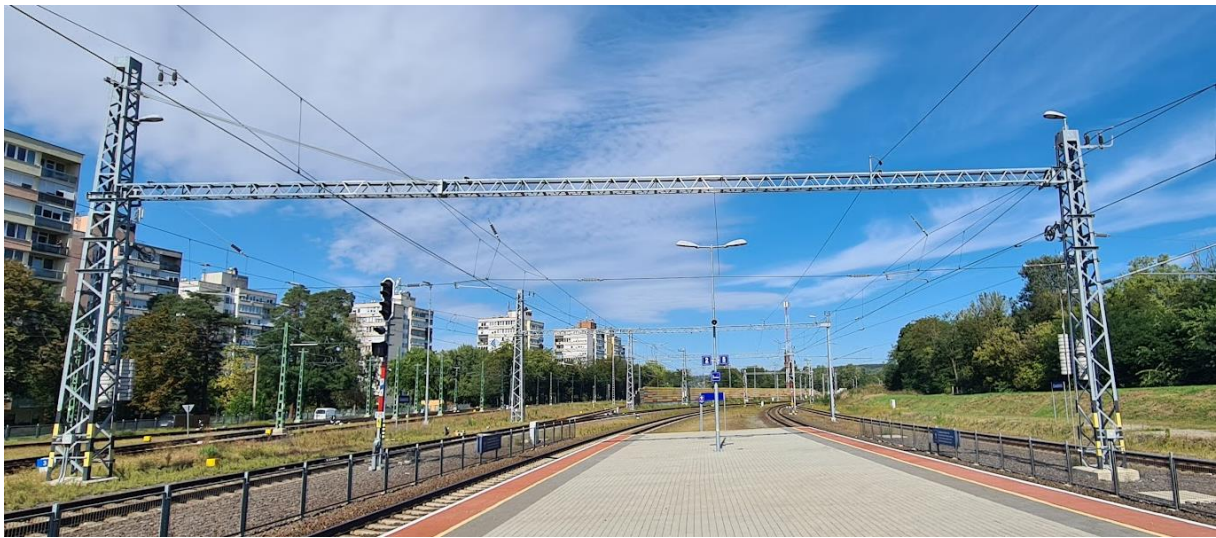
(Forrás: Saját készítés, Mezőtúr állomás)



- G II. Rögzített – Görgős (6. ábra). A gerenda egyik vége mereven van rögzítve a KR oszlophoz, a másik vége szintén KR oszlophoz csatlakozik úgy, hogy a hőmérsékletváltozás miatt bekövetkező hosszúságváltozást egy görgőre támaszkodva szabadon elviseli.

6. ábra: Rögzített – Görgős csatlakozású gerenda

(Forrás: Saját készítés, Gödöllő állomás)



- G III. Rögzített – Lengő, túlnyúló csuklós csatlakozással (7. ábra). A gerenda egyik vége mereven van rögzítve a KR oszlophoz, a másik vége L oszlopon túlnyúlva csuklón keresztül csatlakozik a következő gerendához

7. ábra: Rögzített – Lengő gerenda, túlnyúló csuklós csatlakozással

(Forrás: Saját készítés, Gödöllő állomás)



- G IV. Lengő – Csuklós (8. ábra). A gerenda egyik vége csuklós alátámasztással csatlakozik vagy az oszlophoz, vagy a gerendához, a másik vége az L oszlophoz.

8. ábra: Lengő – Csuklós gerenda csatlakozás

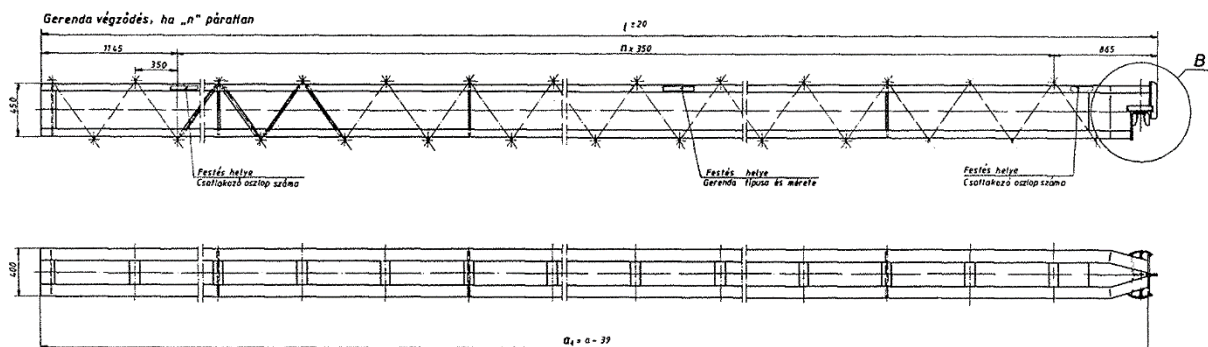
(Forrás: Saját készítés, Kelenföld állomás)



- G V. Görgős – Csuklós (9. ábra). A gerenda egyik vége csuklós alátámasztással csatlakozik vagy az oszlophoz, vagy a gerendához, a másik vége KR oszlophoz.

9. ábra: Gerenda V. jellegrajza

(Forrás: MÁV Tervező Intézet)



- G VI. Csuklós csatlakozású gerenda konzolfelkötéssel (10. ábra). A gerenda egyik vége csuklós alátámasztással csatlakozik a KR oszlophoz, a másik vége ugyan ehhez az oszlophoz csatlakozik a felkötésen keresztül.

10. ábra: Csuklós gerenda csatlakozás konzolfelkötéssel

(Forrás: Saját készítés, Kelenföld állomás)



- G VII. Rögzített – Lengő, túlnyúló konzollal (11. ábra). A gerenda egyik végén rögzített alátámasztással rendelkezik, az L oszlop viszont nem a végén támasztja meg, hanem attól visszább, így a gerenda a lengő oszlopon túlnyúlva egy vagy két hosszláncot tart.

11. ábra: Rögzített – Lengő, túlnyúló konzollal

(Forrás: Saját készítés, Kelenföld állomás)



Az olyan állomásokon, ahol a vágányok áthidalása egy keretállással nem kivitelezhető, ott a vágányok közé egy újabb L oszlopot állítanak, így a keretállás egy közbenső alátámasztást kap, illetve a KR oszloptól az ellentétes irányba is elhelyezhetők L oszlopok. A KR oszlopokat csak akkor lehet ilyen módon alkalmazni, ha a felállításukhoz szükséges hely rendelkezésre áll a vágányok között.

3.7. Gerendák méretválasztéka

3.7.1. Gerenda szerkezeti magassága

A rácsos gerendák kétféle szerkezeti magassággal találhatók meg a MÁV Zrt. rendszertervében: 300 mm és 450 mm.

A G 300 típus (12. ábra) méretei: 300 x 340 mm. Az övvasak mérete: 60 x 60 x 6 mm, a ferde rácsokat és a vízszintes hevedereket laposacélból készítik.

12. ábra: G 300 gerenda, 300 mm szerkezeti magasság

(Forrás: Saját készítés, Gödöllő állomás)



A G 450 típus (13. ábra) méretei: 400 x 450 mm. Az övvasak mérete: 60 x 60 x 6 mm, vagy 65 x 100 x 7 mm, a ferde rácsokat szögvasból, a vízszintes hevedereket laposacélból készítik.

13. ábra: G 450 gerenda, 450 mm szerkezeti magasság

(Forrás: Saját készítés, Gödöllő állomás)



Mindkét gerenda típusba merevítőlemez (14. ábra) van behegesztve minden harmadik egyirányú rácsnál azért, hogy a gerendát csavaró nyomatékok által okozott igénybevételnek jobban ellenálljon.

14. ábra: Gerenda merevítőlemez G300 méret

(Forrás: Saját készítés, Gödöllő állomás)



3.7.2. Gerenda hosszúsága

A gerendák a teljes hosszuk szerint 9 métertől - 35 centiméteres növekedéssel - 45 méterig terjedő tartományban találhatóak meg típustól függően. Amennyiben a gerenda hosszúsága nem elegendő, akkor több nyílású keretállást szükséges tervezni. Ilyen esetben azonban figyelemmel kell lenni arra, hogy a vágányok között kell elhelyezni az oszlopot. A

lengő oszlopnál ez kisebb probléma, mivel a szélessége jóval kisebb, mint a KR oszlopnak. Utóbbinak meglehetősen nagy hely lehet szükséges. Amennyiben nincs elegendő hely, akkor ez visszahat a pálya tervezésére és ott kell beavatkozni. A következő táblázat mutatja be, hogy az egyes gerendatípusok hány darab különböző hosszúságban kerülhetnek felhasználásra. A táblázat végén van összefoglalva, hogy összesen 1146 darab különböző típusú és méretű gerenda van a rendszerben (2. táblázat), és ebben a G VII.-es sorozat nincs benne, mert ott nagyon nagy a variációk száma. Ez ugyan soknak tűnhet, de a gerenda tervezésekor a hosszúsága adott, általában azt csak növelni lehet, viszont a kihasználtsága nem feltétlenül jól alakul, hiszen csak a felkötéssel és a szerkezeti magasság növelésével tudjuk csökkenteni a feszültség értékét a gerendában, és ezek meglehetősen nagy ugrásokkal járhatnak.

2. táblázat: Gerenda típusok és hosszúsági választékjaik.

(Forrás: Saját szerkesztés)

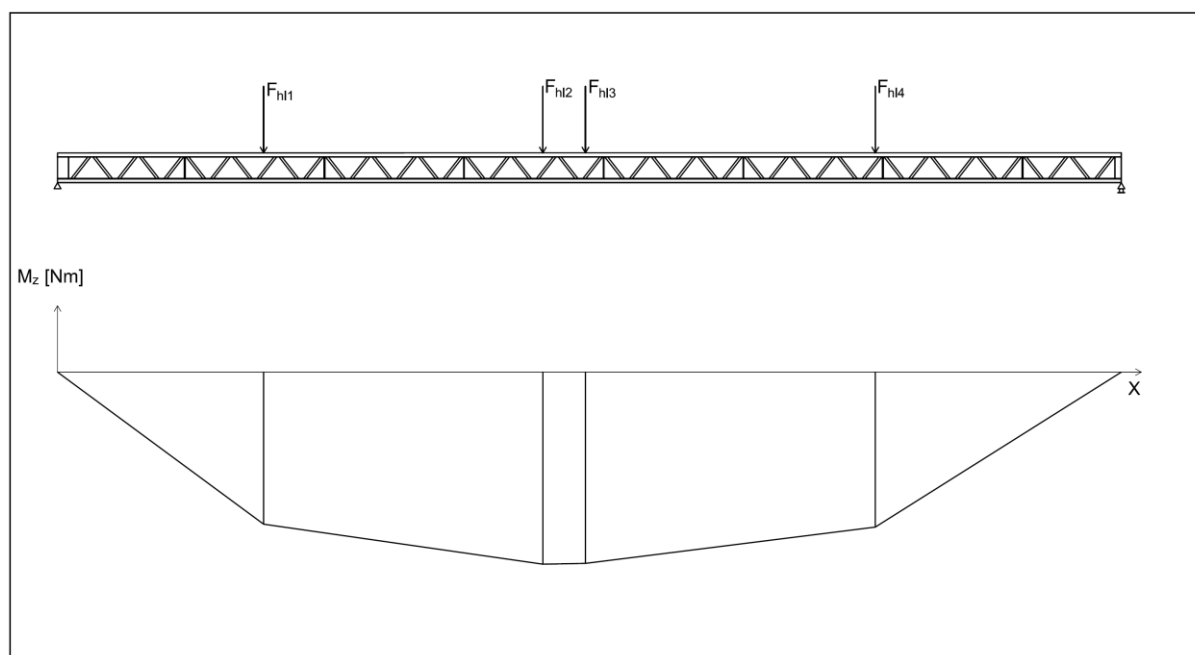
Jel	Min.	Max.	db
60x60/6 G300 Gerenda I.	9010	38760	85
60x60/6 G300 Gerenda II.	9010	38760	85
60x60/6 G300 Gerenda III.	9230	38980	85
60x60/6 G300 Gerenda IV.	9010	25110	46
60x60/6 G300 Gerenda V.	9010	25110	46
60x60/6 G300 Gerenda VI.	2360	25110	65
60x60/6 G450 Gerenda I.	9010	38760	85
60x60/6 G450 Gerenda II.	9010	38760	85
60x60/6 G450 Gerenda III.	9230	38980	85
60x60/6 G450 Gerenda IV.	9010	25110	46
60x60/6 G450 Gerenda V.	9010	25110	46
65x100/7 G450 Gerenda I.	16010	45760	85
65x100/7 G450 Gerenda II.	16010	45760	85
65x100/7 G450 Gerenda III.	16230	45980	85
65x100/7 G450 Gerenda IV.	9010	32110	66
65x100/7 G450 Gerenda V.	9010	32110	66
Összesen:			1146

3.8. Gerenda ellenőrzése

A gerendát statikailag határozott, kéttámaszú tartóként modellezve megrajzolható az igénybevételi ábrája, mely megmutatja, hol lesz a legnagyobb igénybevétel a gerendán. A 80-as években kifejlesztett gerendát ellenőrző szoftver (a szoftver „Első Program” néven került kiadásra) a felkötés nélküli és a felkötéssel rendelkező gerendák ellenőrzésének számításait a következő igénybevételi ábrák (15. ábra) szerint végzi el.

15. ábra: Gerenda igénybevételi ábrája felkötés nélkül

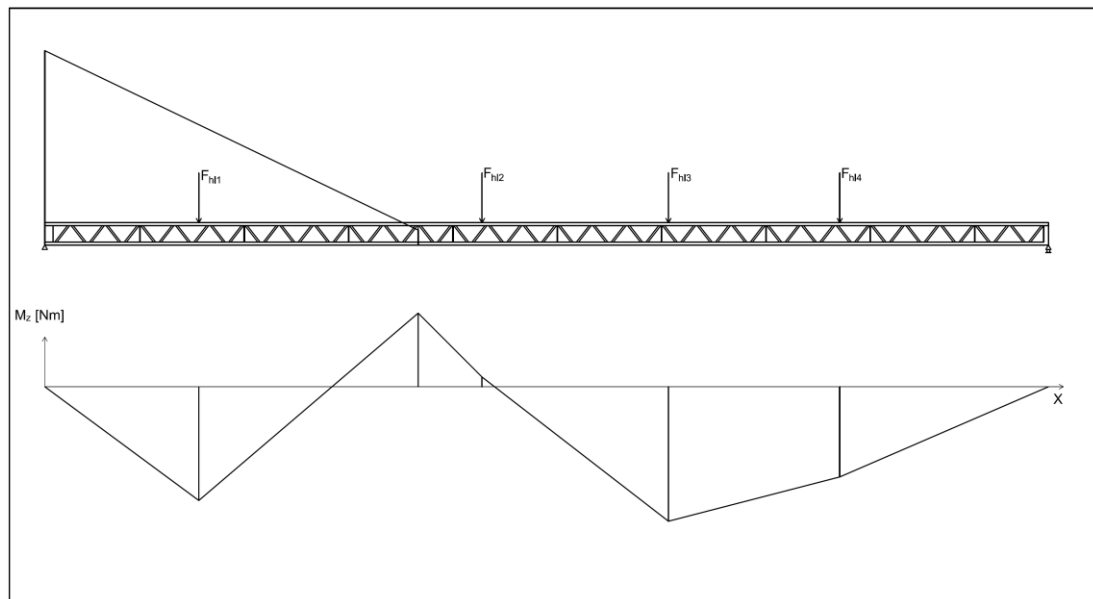
(Forrás: Saját szerkesztés)



Amennyiben a gerendára számított igénybevétel meghaladja a gerenda által elviselhető tartományt, első lépésben gerenda felkötést terveznek (16. ábra), amellyel a keretállást három támaszú tartóként veszi figyelembe (Szabó, 1974) a terhelést számító szoftver. Abban az esetben, ha a gerenda ekkor sem viseli el a terhelést károsodás nélkül, változtatni kell a szerkezeti magasságán, illetve az alkalmazott szögvas típusán.

16. ábra: Gerenda igénybevételi ábrája felkötéssel

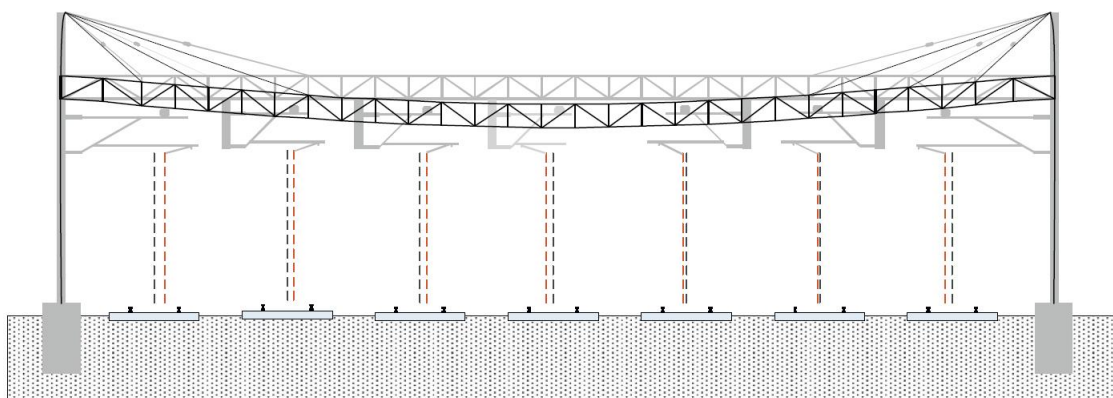
(Forrás: Saját szerkesztés)



A keretállás rendszerekben a gerendák ellenőrzésére többféle módszert fejlesztettek ki nemzetközi összehasonlításban. Mivel minden egyes országnak megvan a saját maga által kifejlesztett keretállás rendszere, ezért a gerendák megfelelőségének számítását is ezekre a konkrét rendszerekre dolgozták ki. A számítástechnika fejlődésének köszönhetően egyre gyakoribb a végelem módszer alkalmazása az egyes vasúti szerkezeti egységek mechanikai szempontú megfelelőségének számításaihoz.

17. ábra: A SIRTE szoftver által kiszámított gerenda elmozdulás (nagyítva)

(forrás: Garcia, Gómez, Saa, Garcia-Carballeira, 2013)



Példaként említhető a Spanyolországban kifejlesztett integrált felsővezeték tervező szoftver (SIRTE), amely lehetőséget nyújt a keretállások számításainak elvégzésére is. A szoftver

alkalmas az előre definiált alkatrész könyvtárból összeállítani a fellépő igénybevételeknek megfelelő és költség szempontjából optimális szerkezetet (17. ábra).

A szoftver elvégzi a számításokat és megjeleníti a szerkezetre ható igénybevételeket, illetve az elmozdulásokat. A szerkezeti számításokat a szoftverbe integrált közvetlen merevségi módszer (DSM) modul hajtja végre, amely a végelem-módszer (FEM) leggyakoribb megvalósítása.

3.9. Gerenda alátámasztások

A keretállás rendszerekben a gerendák terheléseit az oszlopnak adják át, melyhez megfelelő csatlakozást kell alkalmazni. Ezek az oszlopra szerelt alátámasztások és a felkötések. A gerendát biztosan kell rögzíteni az oszlophoz úgy, hogy a csatlakozásnak a hőmérsékletváltozás okozta dilatáció hatásait el kell viselnie üzemszerű körülmények között.

3.9.1. Rögzített alátámasztás

A rögzített alátámasztást tartó KR oszloppal szemben a legtöbb esetben lengő oszlop áll (Rónai, 1997). A rögzített alátámasztást (18. ábra) mindig KR oszlopon helyezik el, de a lengő oszlop és a gerenda csatlakozása is rögzítettnek tekinthető.

18. ábra: Rögzített alátámasztás

(Forrás: Saját készítés, Bp. Márvány utca felüljáró)



A lengő oszlop csúcsa alatt lévő támléc magassága határozza meg a rögzített alátámasztás (19. ábra) magasságát.

19. ábra: Az L oszlopra hegesztett támléc tartja a gerendát

(Forrás: Saját készítés, Gödöllő állomás)



3.9.2. Görgős alátámasztás

Amennyiben a rögzített alátámasztást tartó KR oszloppal szemben szintén KR oszlopot kell elhelyezni, akkor a gerendát a hőmérsékletváltozás okozta dilatációja miatt az egyik oldalon görgős alátámasztás tartja (20. ábra). A konzol kialakítása 350 mm elmozdulást tesz lehetővé.

20. ábra: Görgős alátámasztás

(Forrás: Saját készítés, Gödöllő állomás)



3.9.3. Csuklós alátámasztás

Amennyiben elháríthatatlan akadály miatt a KR oszloppal nem lehet felállítani pontosan szemben a keretállás másik tartó oszlopát - vagyis a gerenda nem helyezhető el a KR oszlopra és a vágánytengelyre merőlegesen - akkor csuklós alátámasztás (21. ábra) alkalmazható. A csuklós alátámasztással maximum 15°-s iránytöréssel áthidalhatók a vágányok (Rónai,1997). A G IV típusú, csak az egyik oldalán alátámasztott és felkötött konzolos gerendához is a csuklós alátámasztást kell alkalmazni.

21. ábra: Csuklós alátámasztás

(Forrás: Saját készítés, Gödöllő állomás)



3.9.4. Iker alátámasztások

Nagyobb állomásokon, ahol több nyílású keretállásokat kell alkalmazni, a vágányok közé állított KR oszlop mindkét oldalára szerelnek gerendát iker alátámasztásokkal. Az iker alátámasztások típusai a következők:

- Rögzített – rögzített
- Rögzített – görgős
- Rögzített – csuklós
- Görgős – görgős
- Csuklós – csuklós

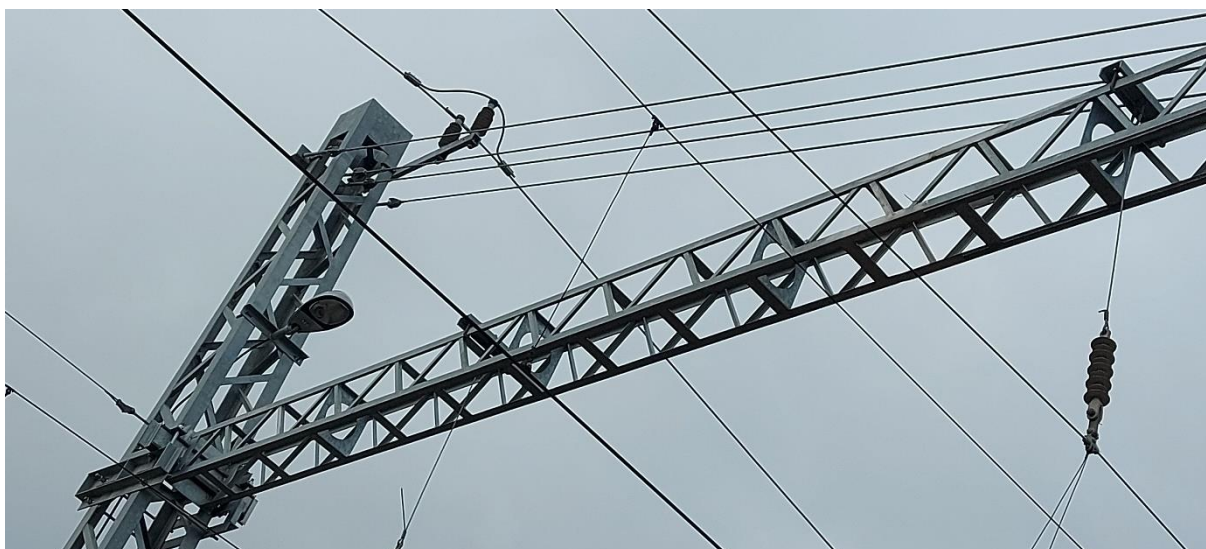
3.10. Gerenda felkötés

A 17 méternél hosszabb gerendák önsúlyukból adódó behajlás megakadályozására felkötést alkalmaznak, amely a KR oszlopra kerül. A gerenda és az oszlop ilyen esetben mindig rögzített alátámasztással csatlakoznak egymáshoz. A gerenda vízszintes tengelye és a felkötés között általában 3460 mm távolságot állítanak be.

A gerenda felkötés (22. ábra) az oszlopra felszerelt szögvasból, a vonórúdon keresztül csatlakozó sodronyokból és a gerendán kialakított csatlakozó keretből áll. A felkötés kettő vagy négy sodronyból áll a terheléstől függően.

22. ábra: Gerenda felkötés

(Forrás: Saját készítés, Gödöllő állomás)



Amennyiben a KR oszloptól mindkét irányba gerenda van, amit fel kell kötni, kettős felkötést kell alkalmazni. Ez két különálló, egymásól szerkezetileg független kihorgonyzás. A támvasak készítésekor figyelemmel kell lenni arra, hogy a vonórúdak számára kialakított furatok távolsága a két támvasnál ne legyenek egyformák, az egymással szemben kihorgonyzott, egymást térben keresztező vonórúdak és az oszlop részeivel ne érintkezzenek.

A gerenda felkötés a gerendán az erre célra kiképzett merevítőhöz csatlakozik, a felkötő acélsodrony másik vége a 15 KR oszlophoz.

3.11. KO 300 konzol

A G VI. és a G VII. típusú gerendák végeire a tartószerkezetek, vagy irány sodrony kihorgonyzásra alkalmas konzolt (23. ábra) szerelnek. Továbbá a MÁV előírásai szerint -

üzemeltetői igény alapján - a vonatforgalom üzembiztonságának növelése érdekében az átmenő fővágányok hosszláncait csoportos felerősítésen egyedi tartószerkezetekre kell elhelyezni. Ennek a konzolnak a használatával a hosszláncokat egyedi tartószerkezettel lehet rögzíteni, és az irány sodrony teljesen elhagyható, ami sokkal előnyösebb üzemeltetést tesz lehetővé.

23. ábra: KO 300 konzol

(Forrás: Saját készítés, Gödöllő állomás)



A nemzetközi példákkal (24. ábra) összehasonlítva ez a szerkezeti elem nem mondható a legkedvezőbb kialakításnak. A geometria bonyolult, nagyon sok munkaórát kell az elkészítésére fordítani, valamint a szerkezet súlya sem a legkedvezőbb, igen nagy terhelést jelent a gerendára nézve. Ennek a szerkezeti elemnek a külföldi megvalósításai közt

megtalálhatók az egyszerű kör, négyzet vagy téglalap alapú zártszelvényből kialakított megoldások, illetve a hazaihoz hasonlóan bonyolult szerkezetek is.

24. ábra: Félkeretállásra szerelt egyedi tartószerkezet

(forrás: saját készítés London, Ealing Broadway)



3.12. Terhelések

Általánosságban a vasúti felsővezetési berendezések megfelelőségi számításait három terhelési esetre végzik el:

- az önsúly + pótteher,
- az önsúly + x irányú szél (hosszlánckokra ható szélterhelés),
- az önsúly + y irányú szél (a gerendára ható szélterhelés).

A gerendára ható függőleges irányú terhelések a következők:

- a gerenda súlyából adódó terhelés,

- a hosszláncok, a csomópontok, a válaszszigetelők, szakaszszigetelők, az irány sodrony súlya,
- a gerenda, a hosszláncok stb. pótterhes önsúlyának összessége.

A gerendára ható vízszintes irányú erők:

- a hosszláncok hőtágulása miatt a gerendára átvitt erők,
- a gerendára ható y irányú szélteher.

Az önsúly + X irányú szél terhelési eset számításait általában nem végzik el.

4. Alkalmazott módszerek (anyag és módszer)

4.1. Anyagtulajdonságok

A modellben az általános szerkezeti acélt használom az alapértelmezett anyagbeállításokkal (25. ábra).

25. ábra: A szerkezeti acél tulajdonságai

(forrás: saját készítés, Ansys)

The screenshot shows the 'Outline of Structural AZ: Engineering Data' window. The 'Contents of Engineering Data' table lists 'Material' and 'Structural Steel'. The 'Properties of Outline Row 3: Structural Steel' window is open, displaying a table of material properties.

Property	Value	Unit
Material Field Variables	Table	
Density	7850	kg m ⁻³
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
Isotropic Elasticity		
Strain-Life Parameters		
S-N Curve	Tabular	
Tensile Yield Strength	2,5E+08	Pa
Compressive Yield Strength	2,5E+08	Pa
Tensile Ultimate Strength	4,6E+08	Pa

4.2. Geometria

A gerendák igen változatos kialakításúak, a vasúti rendszerterv szerint több, mint ezer különböző méretben lehetséges az elkészítésük, ezért az összes lehetséges kialakítást elkészíteni egyrészt nagyon sok munka, másrészt lehetséges, hogy a modellek jórésze nem kerül felhasználásra talán soha. Az említett okok miatt a gerendák modelljeit úgy próbálom meg elkészíteni, hogy az egyes alkotó részeket foglalom egységbe, így azokat egyszerű műveletekkel, aránylag kis időn belül össze lehessen állítani. A gerendák nagyrészt ismétlődő geometriából állnak, ezért elegendő az ismétlődő részeket modellezni és tárolni, illetve azokat a részeket, melyek egyediek magában a gerendában, de minden egyes gerendában megtalálhatók. Az ismétlődő részek hossza 700 mm, melyek két tagból állnak. Az első 350 mm-es tagban a ferde rácsrúd balról jobbra nézve emelkedik, a következőben pedig süllyed. A gerenda görgős alátámasztással rendelkező végét érdemes páros és páratlan „n” taggal elkészíteni.

A részegységek a következők:

- a gerenda rögzített vége,
- a gerenda ismétlődő tagja,
- a páros tagból álló gerenda görgős alátámasztással rendelkező vége,
- a páratlan tagból álló gerenda görgős alátámasztással rendelkező vége,
- a merevítő lemezek,
- a felkötés.

A részegységeket több kialakításban kell elkészíteni, egyrészt a szerkezeti magasságnak (G300, G450) megfelelően, másrészt a különböző övvasak méreteinek (L60x60x6, L100x65x7) megfelelően, harmadrészt pedig a modellben alkalmazott különböző elemeknek (Beam, Solid) megfelelően.

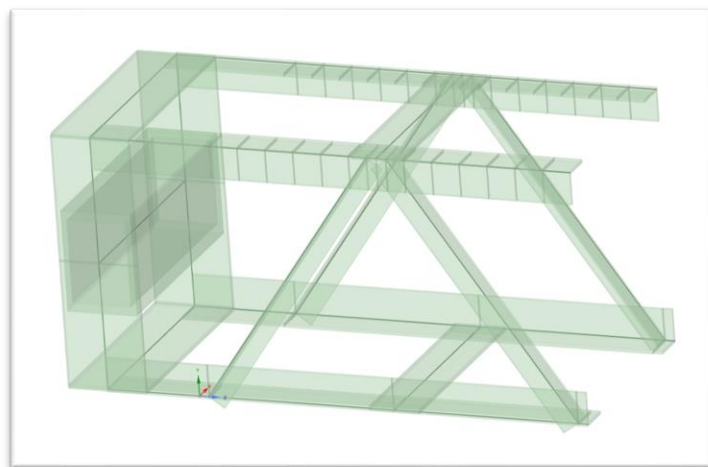
4.2.1. Geometria Beam elemekből

4.2.1.1. A gerenda rögzített vége

A gerenda rögzített vége (26. ábra) csatlakozik az alátámasztási ponttal a KR oszlopnál. A szerkezet elhelyezkedése az ismétlődő taghoz képest nem változik, így könnyebben lehet számolni a gerenda összeállításánál. A végén található vízszintes négyszög idom a gerenda oszlophoz csatlakozó része, felkötés nélkül ez kap kényszert.

26. ábra: G450 gerenda rögzített vég modellje

(forrás: saját készítés, SpaceClaim)

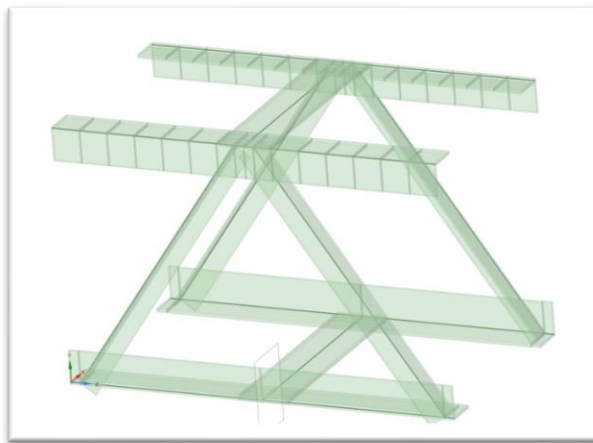


4.2.1.2. A gerenda ismétlődő tagja

Az ismétlődő tagot (27. ábra) lehet a gerenda összeszerelésénél lineáris mintával többszörözni. A felső övvasak azért állnak 50 mm-es darabokból, hogy a terheléseket egyszerűen fel lehessen helyezni a gerenda csomópontjaira.

27. ábra: A gerenda ismétlődő n tagja

(forrás: saját készítés, SpaceClaim)

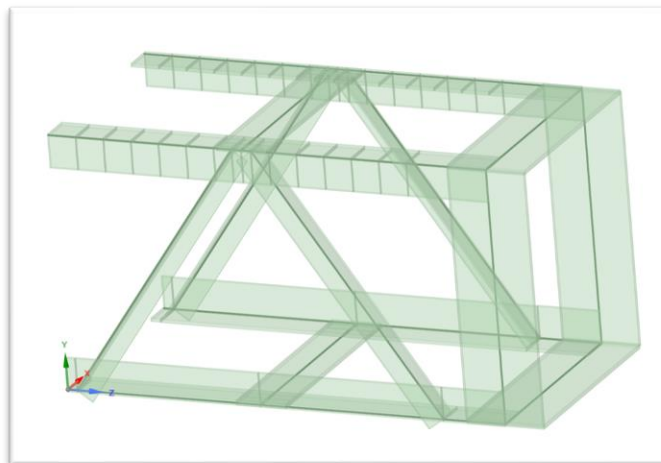


4.2.1.3. A páros n tagból álló gerenda görgős alátámasztással rendelkező vége

A vasúti rendszertervben a gerendák táblázatában az egyes gerenda hosszúságok mellé fel van tüntetve a gerenda n -tag száma. Ebben az értékben nincsenek benne a gerenda végén található n tagok. Ehhez az értékhez hozzáadva 4-et megkapjuk az összes n tag számát.

28. ábra: A páros n tagból álló gerenda vége

(forrás: saját készítés, SpaceClaim)

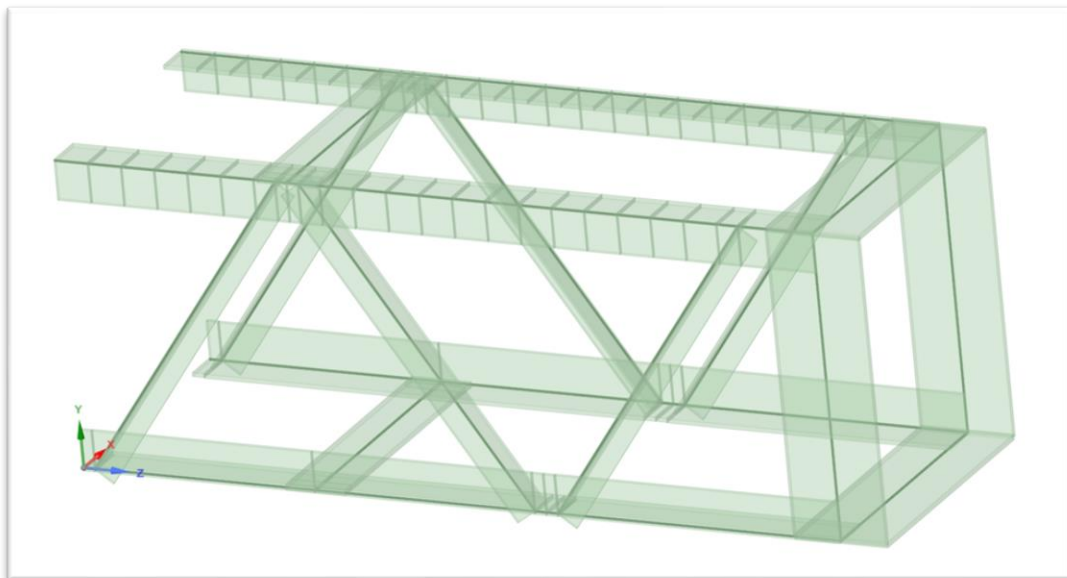


4.2.1.4. A páratlan n tagból álló gerenda görgős alátámasztással rendelkező vége

A gerendavég hasonló az előző szerkezethez, azzal a különbséggel, hogy van még egy n tag, melyben a rácsrúd balról jobbra nézve emelkedik. A későbbi számítások megkönnyítésére a szerkezet három tagból áll (29. ábra).

29. ábra: A páratlan n tagból álló gerenda vége

(forrás: saját készítés, SpaceClaim)

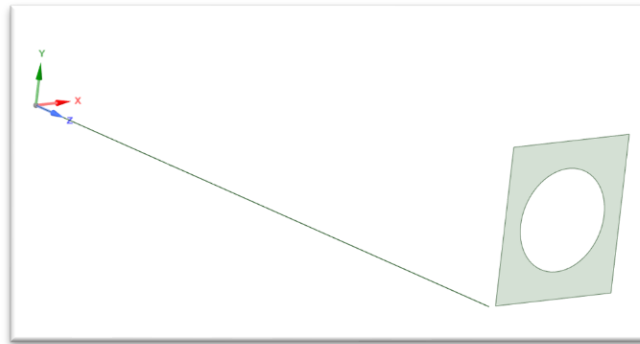


4.2.1.5. A merevítő lemezek

A merevítő lemezek (30. ábra) az 5. n tagtól kezdve 2100 mm-enként ismétlődnek. A merevítőlemez vastagsága 6 mm, de ha „FaceBody”-ként készítjük el, a vastagságot elég lesz a modell térben definiálnunk. Érdekes az alkatrészt 1750 mm-rel eltolni az X tengely mentén, mivel így a gerenda összeállításakor rögtön a helyére kerül az első lemez, amit majd lineáris mintával tudunk többszörözni.

30. ábra: Merevítő lemez és annak elhelyezése

(forrás: saját készítés, SpaceClaim)

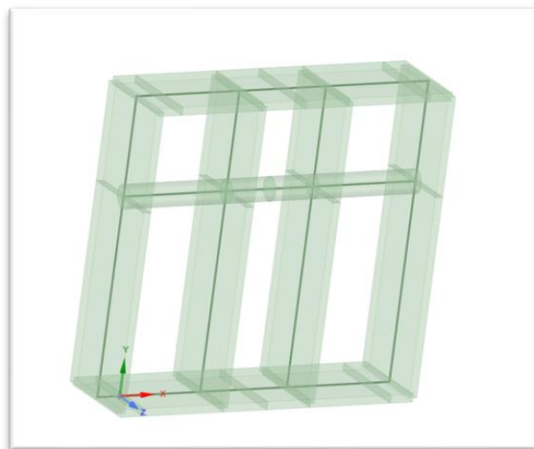


4.2.1.6. A felkötés

A felkötés figyelembevétele a Beam elemekkel elkészített modellben az övvasak keresztmetszetének növelésével érhető el. A 60x60x6-os övvasméretű gerendáknál alul és felül végighúzódik egy merevítő laposvas (előrré-hátra 1500-1500 mm), mely rá van hegesztve az övvasakra. A laposvasak keresztmetszetének területét hozzá kell adni az övvasak keresztmetszetéhez, így elérhető az egyenszilárdság. A felkötés alsó élének a középvonaltól 200 mm-re lévő pontját a koordináta rendszer origójába célszerű elhelyezni (31. ábra), így egy egyszerű mozgatás művelettel a helyére mozgatható. A felkötés helye a gerendán nem tetszőleges, előre meghatározott távolságokra helyezhető el.

31. ábra: A felkötés Beam elemekből

(forrás: saját készítés, SpaceClaim)



4.2.1.7. Terhelések elhelyezése

A hosszláncok hatásait a gerendán, koncentrált erőként vehetjük figyelembe. Ahhoz, hogy az erőket fel tudjuk venni, érdemes hosszláncokként egy alkatrészt elhelyezni a gerenda felső övvasán, ami egy U-idom acél, keresztben a gerendán. A terhelések távolságát az előzetes tervekből (feszítési terv) ismerhetjük meg. Tisztázni kell, hogy ezek a távolságok honnan vannak értelmezve (oszlopközép, oszlopél), és ennek ismeretében meghatározni az origótól való távolágukat. A középső tagok felső övvasai azért kerültek felosztásra 50 mm távolságban, hogy a terheléseket be lehessen rajzolni a modellbe. Nem egzakt a megoldás, de a hiba maximum 25 mm. A modellt meg lehet pontosra is csinálni, de akkor mindegyik terhelésnél az aktuális övvasakat ki kell törölni és felosztva visszaépíteni.

4.2.1.8. A gerenda összeállítása

Az összeállítás előtt táblázatból meg kell nézni a gerenda n tagjainak számát. Ehhez hozzá kell adni négyet és megkapjuk a gerenda összes n tagjainak számát. A modell összeállítását célszerű a görgős vég elhelyezésével kezdeni. Amennyiben az n tagok száma páros, akkor a páros n tag számú véget helyezzük el, ha páratlan, akkor az ennek megfelelőt. Beillesztés után az x tengely mentén mozgatni kell az végleges helyére. A távolság az n tagok száma mínusz a görgős vég n tag száma. Például: Az 16010 mm-es gerenda n tag száma 45. A görgős véget így

$$(45 - 3) \cdot 350 = 14700 \text{ mm} \quad (1)$$

távolságra szükséges eltolni az origótól. A következő lépésben az ismétlődő tag beillesztése történik, melyet rögtön eltolunk 700 mm-rel, meghagyva a helyet a rögzített végnek. Kijelölve az ismétlődő tagokat a lineáris mintával 20 ($n/2$) darabot kiosztunk 700 mm-es távolságban. A művelettel a gerenda pontosan csatlakozik a görgős véghez. A fő alkotóelemek közül már csak a rögzített vég hiányzik. Ezt csak be kell illeszteni és rögtön a helyére kerül. Hátra van még a merevítő lemezek elhelyezése, azt beillesztve szintén azonnal a helyére kerül. A merevítőt kijelölve újra a lineáris mintát használva 2100 mm távolságra egymástól (jelen esetben 7 darabot) kiosztunk a modellbe. A fenti példában nincs felkötés, de ha szükséges, akkor a felkötés geometriáját bemásolva az előre kiszámolt távolsággal lehet mozgatni az X tengely mentén. Nem szabad elfeledkezni az övvasak keresztmetszet növeléséről, a felkötés hosszában. Legvégül a terheléseket kell elhelyezni. A Beam modellben (32. ábra) ezt a felső

övvason felvett vázlaton az origótól egyenesekkel felmérve az egyes távolságokat készítettem el. Visszatérve 3D vázlatba, a gerendára merőleges terhelések az egyenesek végeinek közelében vehetők fel, majd a keresztmetszetük beállítható. Az összeállított gerendát már át lehet vinni a modell térbe, de még előtte a fa struktúrában ki kell választani az egész szerkezetet, majd a topológia sorban be kell állítani a „merge” lehetőséget, így az egész gerenda egy szerkezeti elemként fog viselkedni.

32. ábra: Az összeállított gerenda a terhelések felvételére alkalmasan geometriával

(forrás: saját készítés, SpaceClaim)



4.2.2. Geometria Solid elemekből

A részegységeket kétféleképpen készítettem el, az elsőben az idomacélok keresztmetszetei nem tartalmaztak lekerekítéseket, a másodikban igen. A lekerekítések alkalmazása jó gondolatnak tűnhet, hiszen a geometriánk sokkal pontosabb így, de az eredményekre nincs nagy hatással, ellenben a számítási kapacitása sokkal nagyobb. Már a hálózásnál szembesülünk ezzel, hiszen az elemszámok megötszöröződnek. A továbbiakban a lekerekítés nélküli modellt fogom használni. A Solid elemekkel készített alkatrészek úgynevezett kihúzások alkalmazásával állíthatók elő, tehát ahol az egyes elemek érintkeznek egymással, ott a szoftver úgy értelmezi ezt, mintha az érintkezés helyén az anyag folytonos lenne.

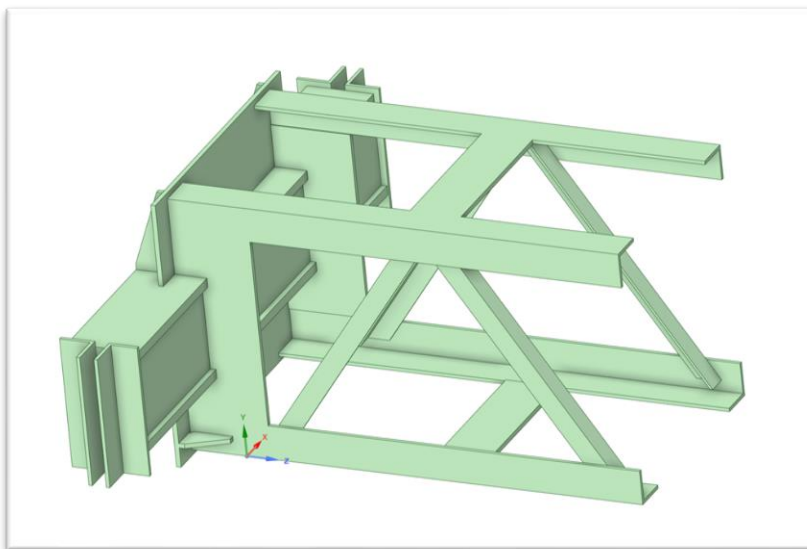
4.2.2.1. A gerenda rögzített vége

A Solid modellben szinte a gerenda eredeti geometriája jelenik meg, a lekerekítések elhagyásával. A gerenda rögzített végének (33. ábra) ilyen szintű kidolgozására nincs szükség, az összes alkatrész megjelenítése csak feleslegesen köti le az erőforrásokat, de az eredményekben ezek a részletes kidolgozások nem jelennek meg számottevően. Mivel csak egy ilyen alkatrész kerül a gerendába egyelőre nem vizsgáltam meg az egyszerűsítési

lehetőségeket, de később célszerű ezt is elvégezni. Hasonlóan a Beam elemekből felépülő rögzített véghez ez is 2 n tagból áll.

33. ábra: A gerenda rögzített vége Solid elemből elkészítve

(forrás: saját készítés, SpaceClaim)

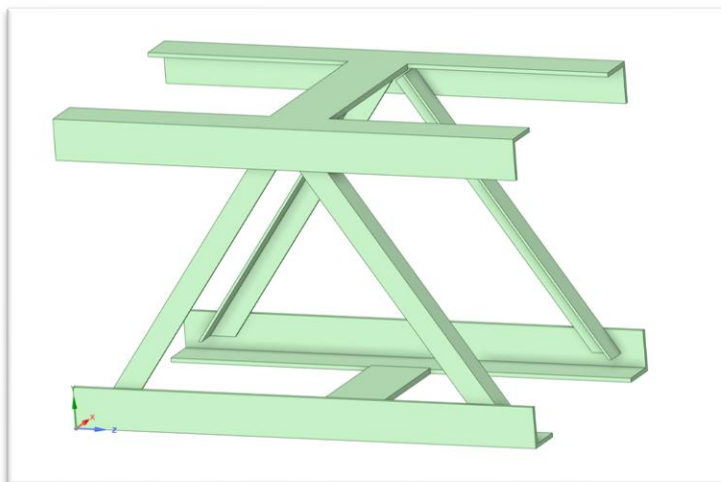


4.2.2.2. A gerenda középső, ismétlődő tagja

A gerenda fő építő eleme (34. ábra), 700 mm hosszúságú. Az ismétlődő tagot lineáris mintával lehet a szükséges darabszámban sokszorozni.

34. ábra: A gerenda középső, ismétlődő tagja

(forrás: saját készítés, SpaceClaim)

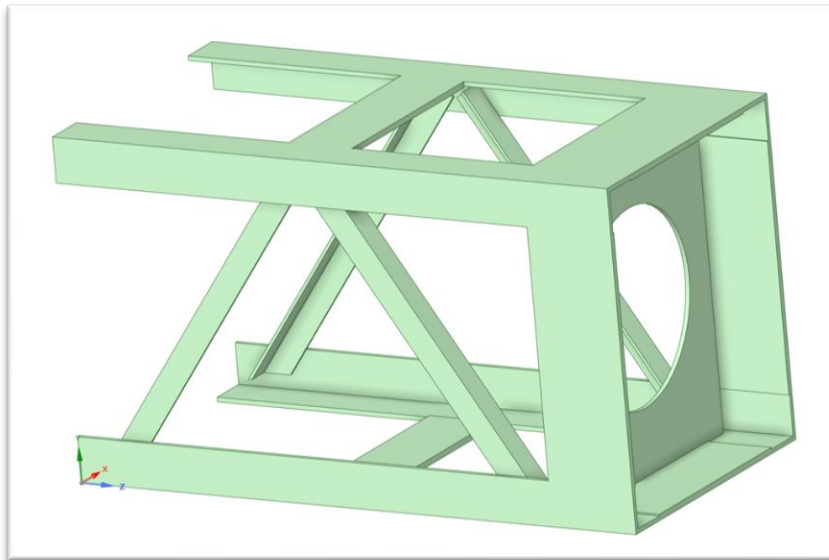


4.2.2.3. A gerenda görgős alátámasztással szerelt vége

A görgős végek itt is páros (35. ábra) és páratlan (36. ábra) kivitelben készültek el. A gerenda végek tartalmaznak egy merevítő lemezt. Ez a merevítő lemez nem mindig a 2100 mm-es távolság többszörösére adódik, így már itt beépítésre került.

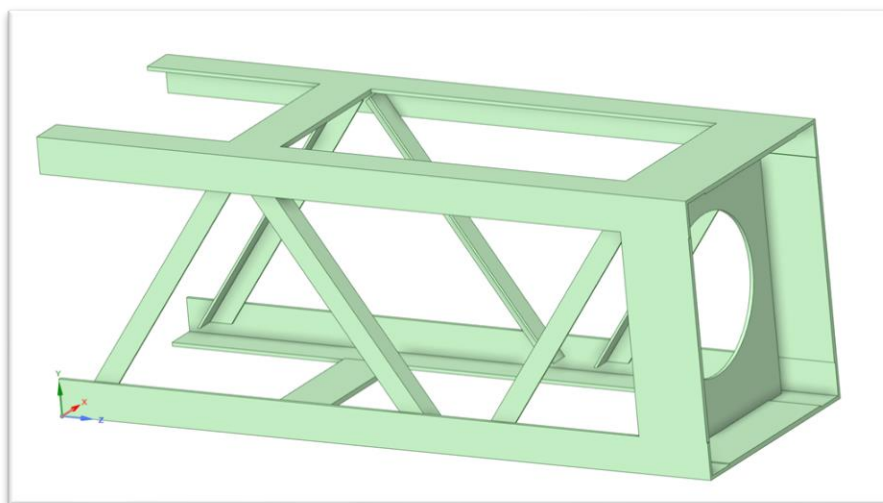
35. ábra: A páros n tagból álló gerenda vége (Solid típusú modell)

(forrás: saját készítés, SpaceClaim)



36. ábra: A páratlan n tagból álló gerenda vége (Solid típusú modell)

(forrás: saját készítés, SpaceClaim)

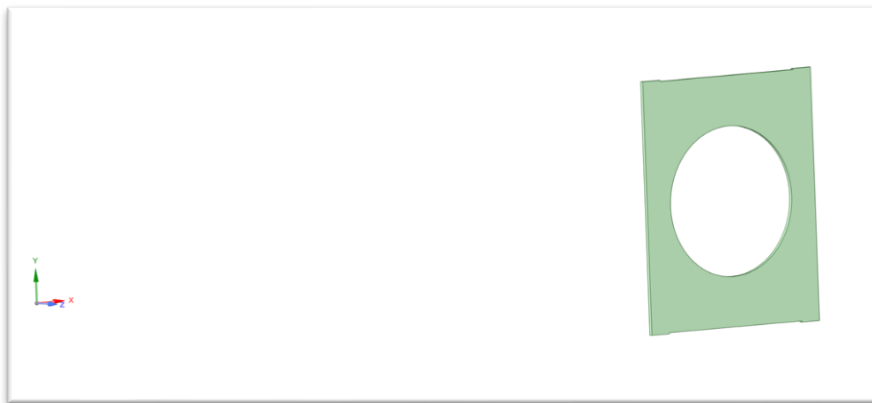


4.2.2.4. A merevítőlemez

A merevítőlemez (37. ábra) különbözik a Beam elemekkel felépített modellben alkalmazottól, a geometria miatt az alsó és felső élein bevágás található. Az elhelyezkedését érdemes az origótól 1750 mm-re beállítani, így beillesztéskor azonnal a helyére kerül.

37. ábra: A merevítőlemez Solid modellje

(forrás: saját készítés, SpaceClaim)

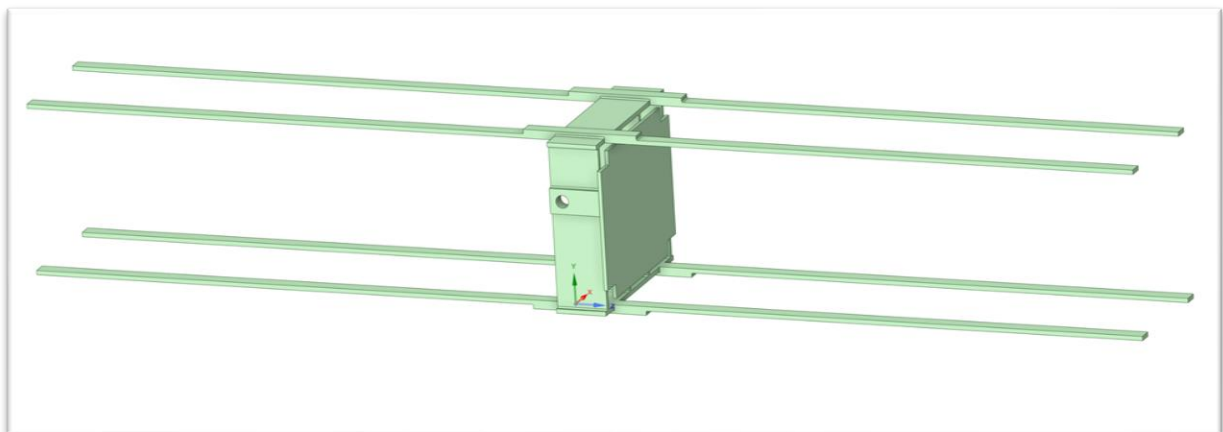


4.2.2.5. A felkötés

A felkötés (38. ábra) elhelyezése egyszerűbb, mint a Beam alapú modellben, mivel nem kell az övvasak keresztmetszetét átállítani, hiszen a geometria tartalmazza a valós keresztmetszeteket.

38. ábra: A felkötés Solid elemből elkészítve

(forrás: saját készítés, SpaceClaim)

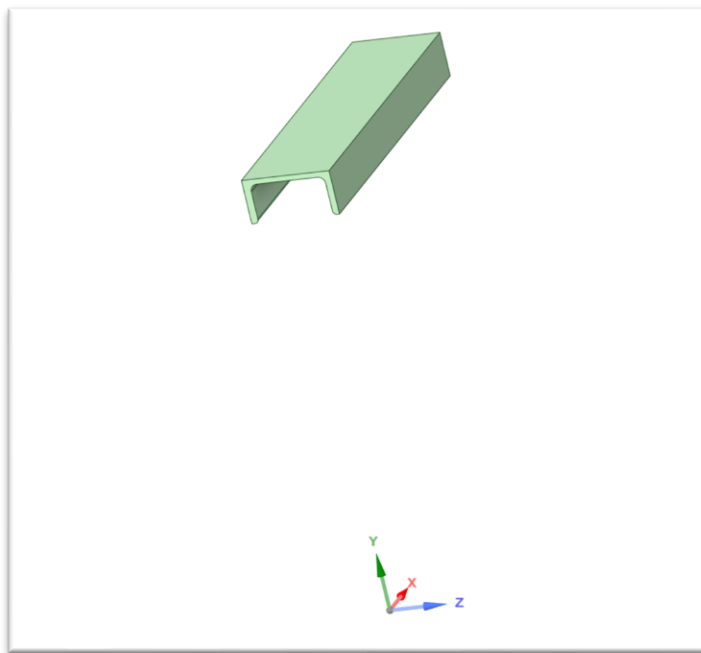


4.2.2.6. A terhelések

A terhelést felvevő alkatrész (39. ábra) némileg hasonló a Beam elemekből készített modellben alkalmazotthoz. Az alkatrész alja 300, illetve 450 mm-re került elhelyezésre az ZX síktól, így bemásolás után azonnal a gerenda tetejére kerül. A mozgatás paranccsal könnyedén a pontos helyére tehető az alkatrészt.

39. ábra: A terhelést felvevő alkatrész Solid elemből

(forrás: saját készítés, SpaceClaim)

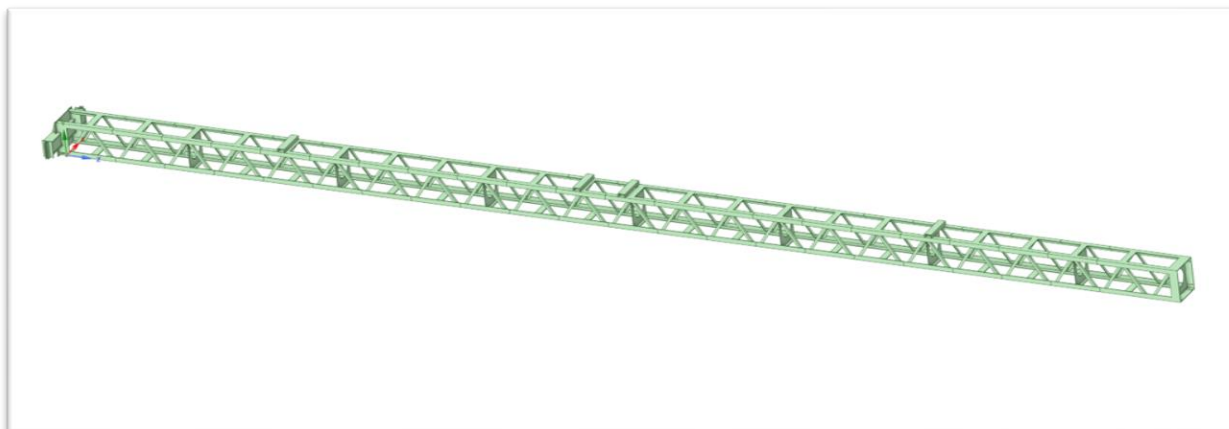


4.2.2.7. A gerenda összeállítása

A gerenda összeállítása (40. ábra) egyszerűbb, mit az előzőekben bemutatott Beam elemekből felépülőé. Amennyiben hasonló sorrendet követünk, akkor könnyedén össze lehet rakni a modellt. A végén a terhelések elhelyezése is könnyedén végrehajtható az alkatrész x tengely mentén történő eltolásával.

40. ábra: A Solid elemekből összeállított gerenda

(forrás: saját készítés, SpaceClaim)



4.3. Végelem szimuláció

Kiinduló adatok: a 3. táblázatban egy gerenda ellenőrzésének adatai láthatóak, melyet a 80-as években kifejlesztett módszerrel számítottak ki. Mivel abban az időben más mértékegységet használtak általánosan, a terhelések és az igénybevételek sorok kétszer találhatóak meg a táblázatokban. Felül a régi mértékegységben kifejezett értékek (kilopond és kilopond/cm²), alul pedig az általam átszámolt értékek newton és megapascal mértékegységekben.

3. táblázat: A felkötés nélküli gerenda terhelés számítása az Első program szoftverrel

(forrás: saját szerkesztés)

G300-60x60x6-1688			Pótteher	
Terhelési pontok	1	2	3	4
Távolságok [cm]	360	780	844	1280
Terhelések [kp]	322	357	150	307
Terhelések [N]	3157,725	3500,956	1470,99	3010,626
Igénybevétel [kp/cm ²]	1144	1445	1439	1168
Igénybevétel [MPa]	112,1881	141,7061	141,1177	114,5417

G450-60x60x6-1688			Pótteher	
Terhelési pontok	1	2	3	4
Távolságok [cm]	360	780	844	1280
Terhelések [kp]	322	357	150	307
Terhelések [N]	3157,725	3500,956	1470,99	3010,626
Igénybevétel [kp/cm ²]	802	973	969	815
Igénybevétel [MPa]	78,64933	95,41871	95,02644	79,9242

A táblázatban két-két terhelési eset került feltüntetésre, a pótterhes állapot, amelyben a vezetékekre hó, jég rakódik le, így megnövelve annak súlyát. A második eset az y irányú szél esete, melyben a gerendára merőlegesen szélterhelés hat.

A számítási módszer szerint az L1 távolság 1688 cm, ami a két oszlop közepének távolsága. Az oszlopok 500 mm fejszélességgel készülnek, amihez még hozzáadódik az övek széttartásából adódó lejtés, a kedvezőtlenebb esettel számolva 1,5%. Amennyiben az oszlop tetejétől 1 méteres távolságban rögzítjük a gerendát az 2x15 mm, azaz 30 mm-rel kell csökkentenünk a távolságot. Így a gerenda hossza:

$$16880 - 1000 - 30 = 15850 \text{ mm} \quad (2)$$

A kapott gerenda mérethez legközelebb álló legyártható gerenda méret 16010 mm, 41+4 tagból áll, 8 darab merevítő lemez van benne és 575 kg súlyú.

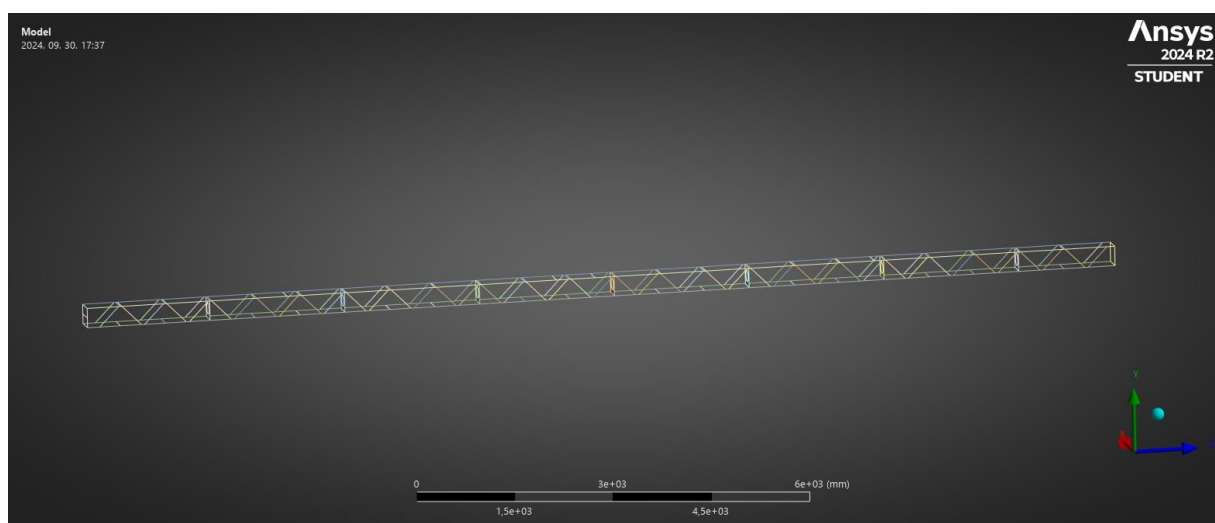
A szimulációt az ANSYS Static Structural – Mechanical szoftverrel végzem el.

4.3.1. G300-16010 szimulációja Beam elemekből

Elsőként a G300-as, 16010 mm hosszúságú, Beam elemekből felépített gerenda modellel (41. ábra) végzem el a szimulációt. Mivel a merevítő lemezeket Face Body-ként definiáltam, meg kell adni ezek vastagságát a fa struktúrában.

41. ábra: A beolvasott Beam modell a végeselem szoftverben

(forrás: saját készítés, ANSYS Mechanical)



Mivel csak a gerendát vizsgáljuk, az oszloppal való kapcsolatát nem, a bal oldali megtámasztást „Remote Displacement”-tel veszem figyelembe, azaz nem szabad elmozdulnia a szerkezet

kijelölt részének, csak elfordulnia, azt is csak egy tengely körül, a jelen orientációt figyelembe véve a X tengely körül. A másik lehetőség a befogás lenne, de mivel a gerenda egy rugalmas szerkezethez kapcsolódik ez a kevésbé jó megoldás.

A gerenda másik végét a „Displacement” paranccsal rögzítjük Y és Z irányokba, tehát X irányba a szerkezet kijelölt része elmozdulhat.

A gerenda saját súlyát a nehézségi gyorsulás beállításával veszem figyelembe (Standard Earth Gravity $9806,6 \text{ mm/s}^2$).

A hosszláncokból származó koncentrált erők a gerenda felső övvasaira helyezett U-idomacélokra fognak hatni. Ezeknek két összetevője van: nagyrészt a hosszláncok pótterhes súlyai alkotják, de mindegyiknek van vízszintes összetevője is, a hosszláncok táulásából adódóan egységesen $30 \text{ kp} \approx 294 \text{ N}$. A 42. ábrán láthatók a kényszerek és a terhelések.

42. ábra: A G300 gerenda Beam modell kényszerei és terhelései

(forrás: saját készítés, ANSYS Mechanical)

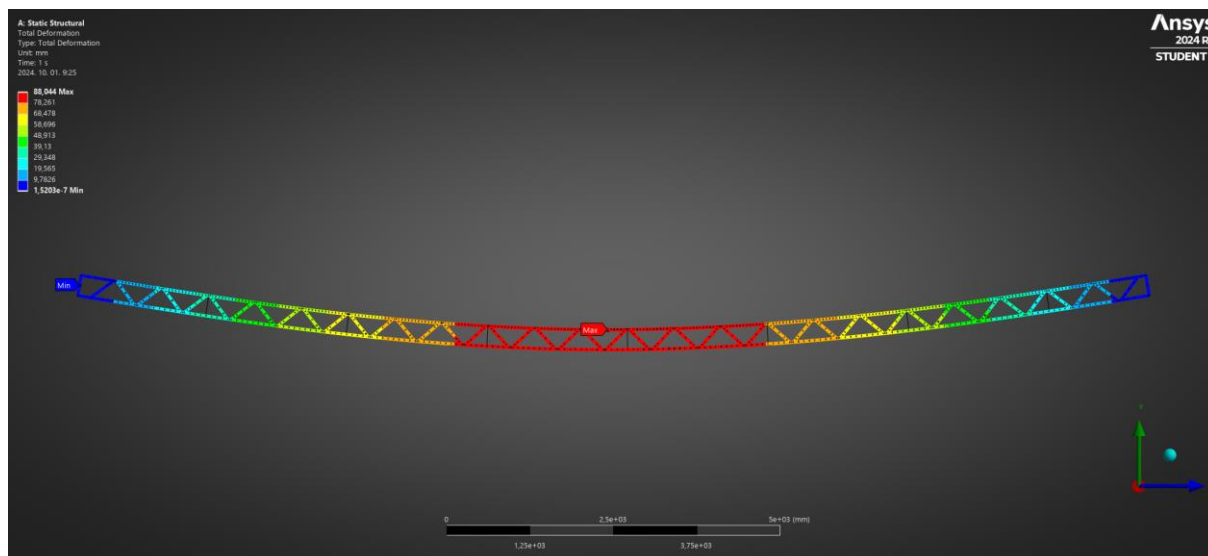


A szimuláció lefuttatása előtt még be kell állítani a hálózás paramétereit, jelen esetben csak a 30 mm-es elemméretet.

A maximális elmozdulás 88,04 mm, ami a gerenda középső részén keletkezett (43. ábra).

43. ábra: G300-16010 gerenda elmozdulása

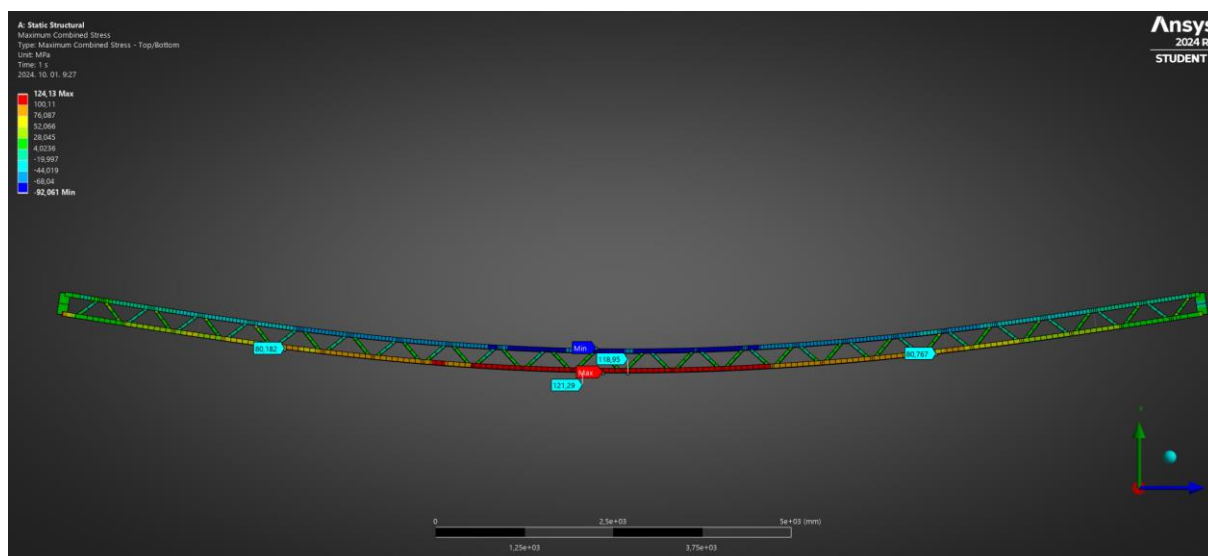
(forrás: saját készítés, ANSYS Mechanical)



A szerkezetben fellépő legnagyobb húzófeszültség 124,13 MPa (44. ábra).

44. ábra: G300 16010 Gerendában fellépő feszültségek

(forrás: saját készítés, ANSYS Mechanical)

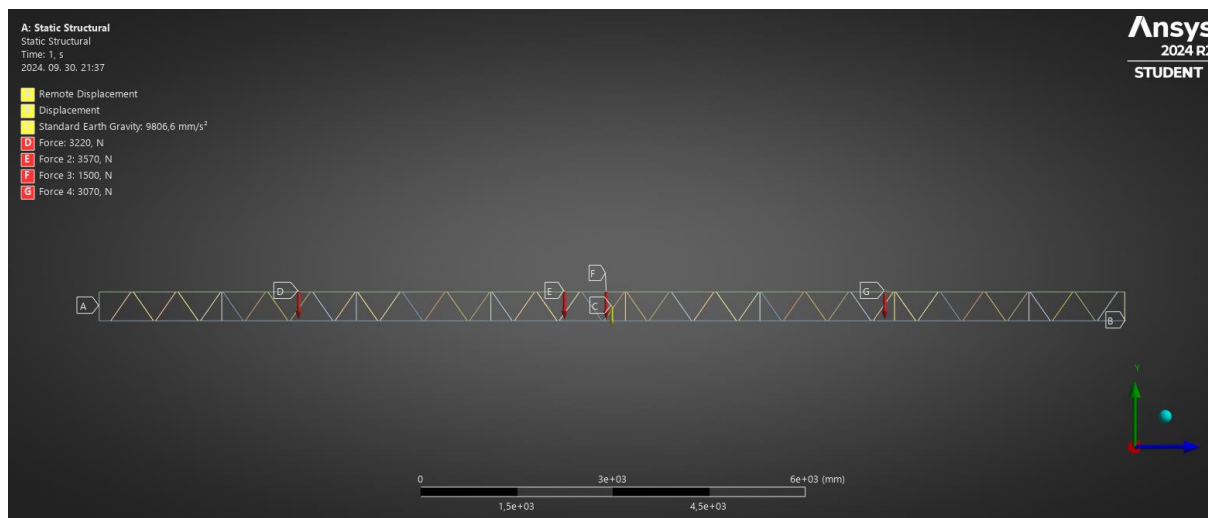


4.3.2. G450-16010 szimulációja Beam elemekből

Hasonlóan az előző szimulációhoz először a Face Body-k vastagságának a beállítását kell elvégezni. A kényszerek és a terhelések azonosak a már elvégzett G 300-as gerendáéval (45. ábra).

45. ábra: A G450-16010 gerenda Beam elemekből, kényszerek és terhelések

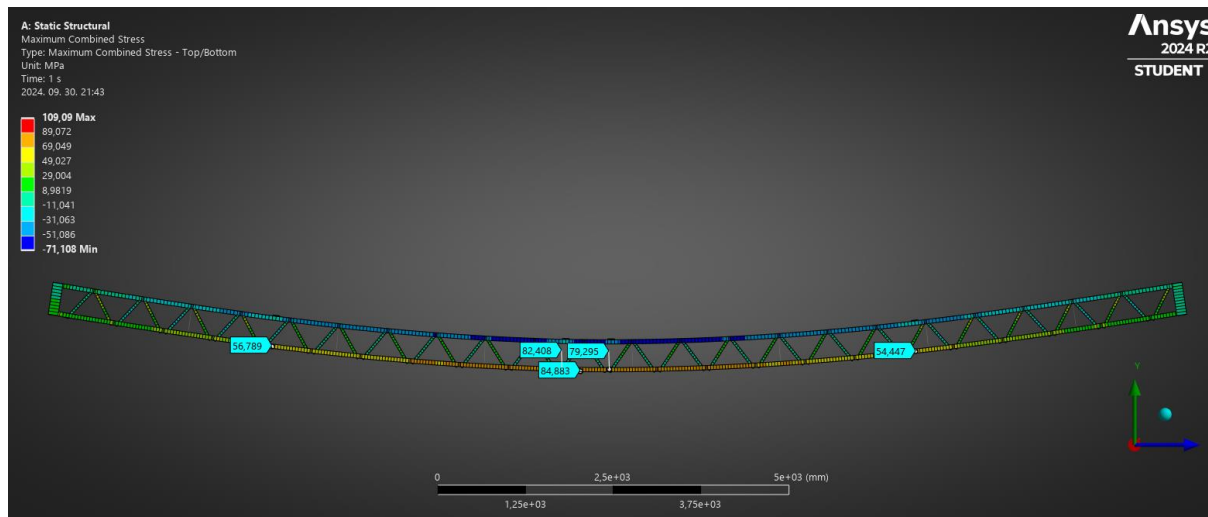
(forrás: saját készítés, ANSYS Mechanical)



Az maximális elmozdulás mértéke 46,056 mm, mely a Beam elemekből épített modellhez hasonlóan a gerenda középső részén keletkezett (46. ábra).

46. ábra: G450 Beam Maximum Combined Stress

(forrás: saját készítés, ANSYS Mechanical)



Az alsó övvasban keletkező maximális feszültség 84,88 MPa. A modellben megtalálható egy ennél nagyobb feszültség is a gerenda rögzített végénél ott, ahol az övacél csatlakozik a függőleges gerendavég kerettel. Ez a feszültség a különböző keresztmetszetek miatt alakul ki. Az ábrán feltüntetésre kerültek az egyes terhelések alatt létrejövő feszültségek.

4.3.3. G300-16010 szimulációja Solid elemekből

Az elemméretet 80 mm-re tudtam beállítani, mivel a tanulói verzió nem tud több elemszámot kezelni, így 47718 elem és 121669 csomópont keletkezett a modellben. A terhelés hatására kialakuló maximális elmozdulás 100,77 mm (47. ábra).

47. ábra: G300-16010 Solid elemekből – elmozdulás.

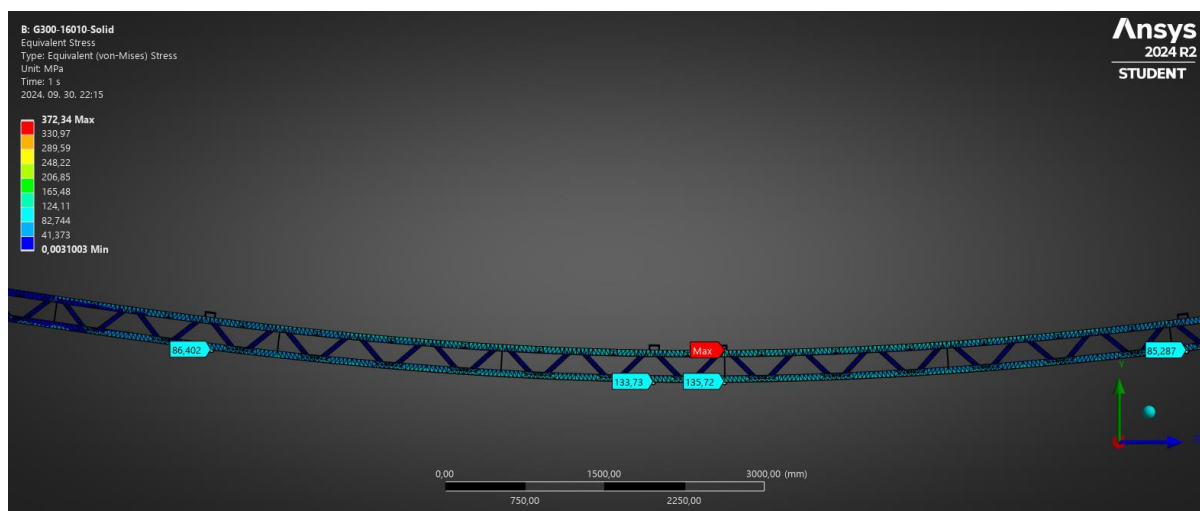
(forrás: saját készítés, ANSYS Mechanical)



A szerkezetben kialakuló feszültségek egyes helyeken kiugróan magas értékeket vettek fel. Az övvasban kialakuló feszültségek a terhelések alatt az ábrán látható. A legnagyobb 135,72 MPa, de lokálisan a vízszintes heveder és az övvas csatlakozásánál 372,34 MPa feszültség keletkezett (48. ábra).

48. ábra: G300-16010 Solid elemekből – Feszültség [MPa]

(forrás: saját készítés, ANSYS Mechanical)

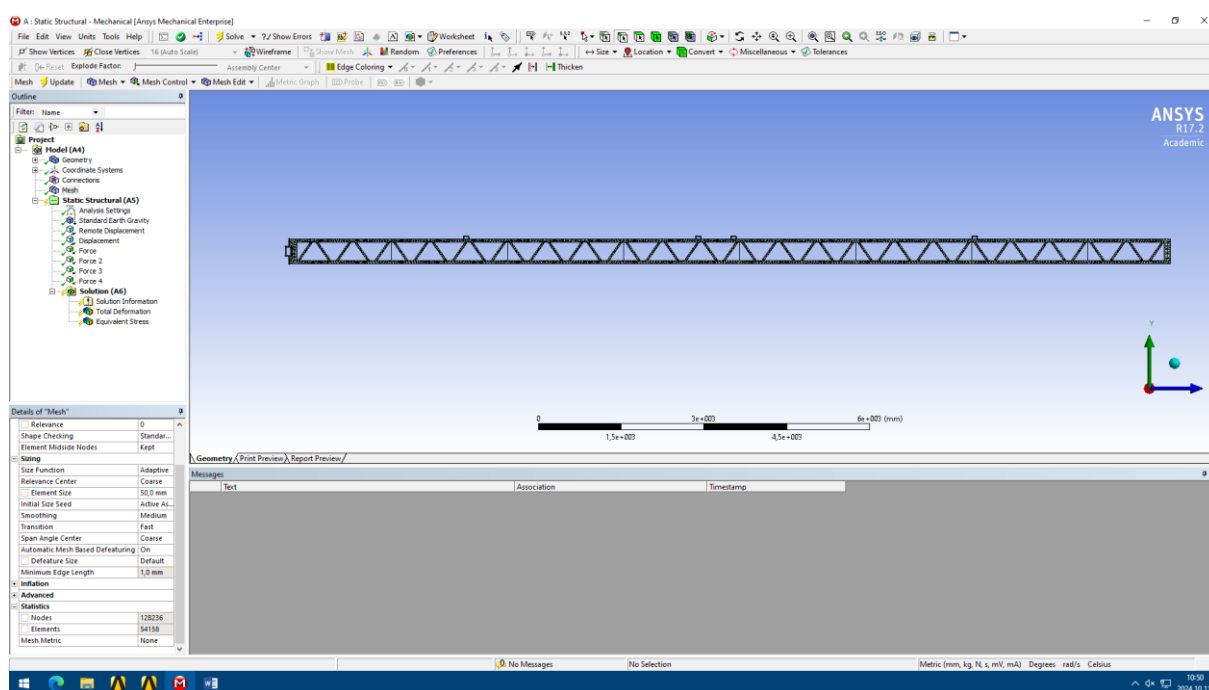


4.3.4. G450-16010 szimulációja Solid elemekből

A túl nagy elemszám miatt a G-450 gerenda szimulációját (49. ábra) az egyetem számítógépén végeztem el, Ansys R17.2 Academic verzió futtatásával. A geometriából a lekerekítéseket teljesen elhagytam. A modellek hálózását 50 és 80 mm-es elemmérettel készítettem el.

49. ábra: A behálózott gerenda

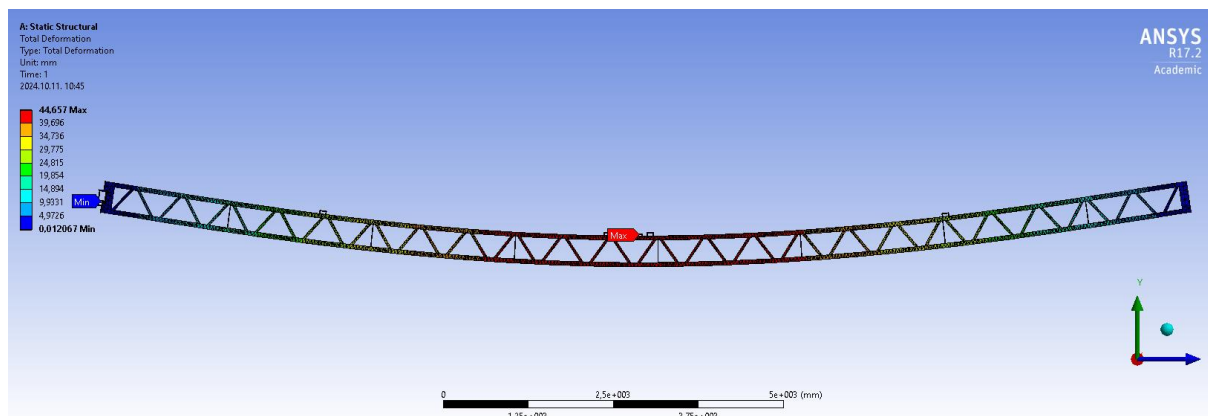
(forrás: saját készítés, ANSYS Mechanical)



A terhelés hatására a szerkezet legnagyobb elmozdulása 50 mm-es elem mérettet alkalmazva 44,657 mm, ami közelítőleg a szerkezet közepén jelentkezik a várakozásoknak megfelelően (50.ábra). A 80 mm-es elemméret használatával elkészített hálóval futtatott szimulációval ez az eredmény 44,005 mm.

50. ábra: A G-450 gerenda elmozdulása

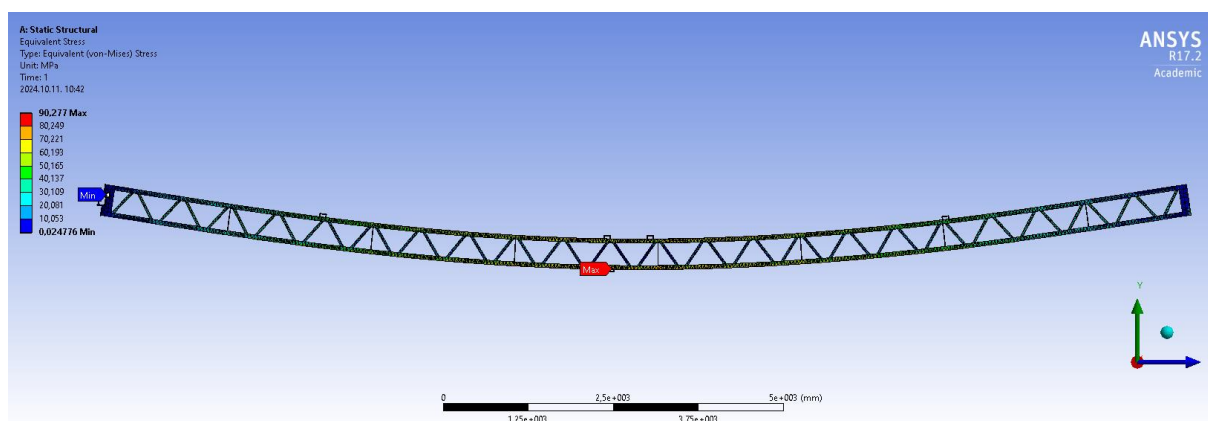
(forrás: saját készítés, ANSYS Mechanical)



A gerendában kialakuló maximális feszültség 90,27 MPa (a 80 mm-es elem méretű hálózásnál 90,04 MPa), ami szintén a szerkezet középső részén jelenik meg (51.ábra).

51. ábra: A G-450 gerenda feszültségei

(forrás: saját készítés, ANSYS Mechanical)



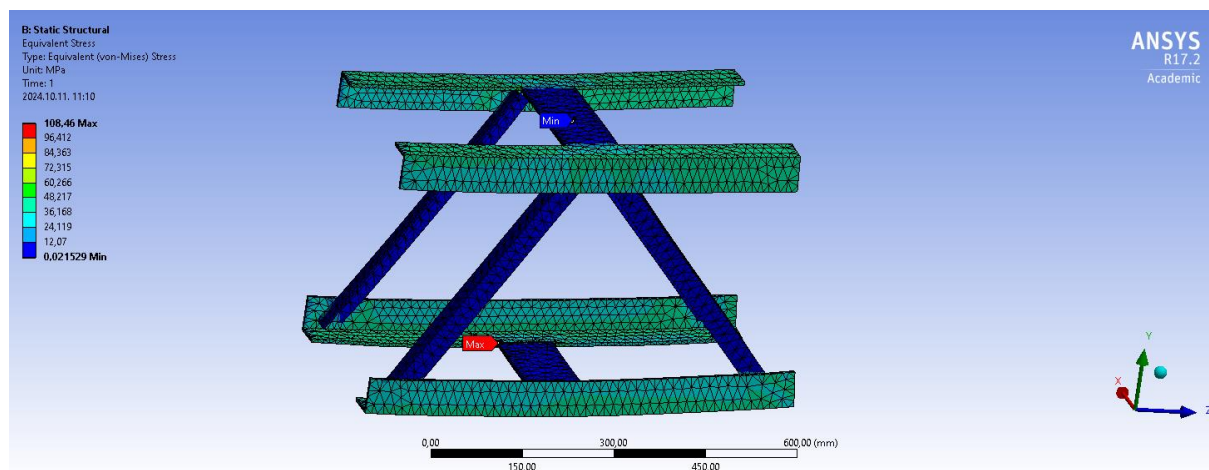
4.3.5. Lokális túlfeszültségek

A maximális feszültség nem az övvasak teljes keresztmetszetében alakul ki, hanem lokálisan, a vízszintes összekötő heveder és az övvas kapcsolódási pontjánál ott, ahol a legnagyobb hajlító igénybevétel keletkezik a szerkezeten. Ez a hajlító igénybevétel az övvasokban úgy nyilvánul meg, hogy a felső övvas nyomásra, az alsó övvas húzásra van igénybe véve. Ennek a lokális túlfeszültségnek a kialakulását megpróbáltam a modell egyszerűsítésével elemezni. Elsőként a gerenda ismétlődő tagját modelleztem (52.ábra). A szerkezet egyik oldalára, mind a négy övvas keresztmetszeti felületére befogást alkalmaztam,

a másik oldalra pedig erőket helyeztem el. A felső két övvas felületére a szerkezetet nyomó erőt, az alsó két övvasra pedig a szerkezetet húzó erőt.

52. ábra: A gerenda ismétlődő tagjának vizsgálata.

(forrás: saját készítés, ANSYS Mechanical)

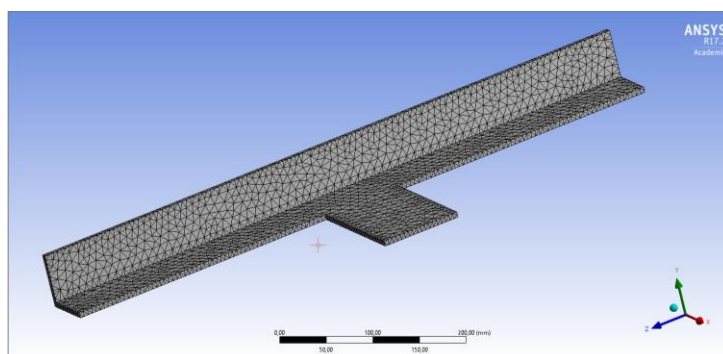


Ezek a lokális feszültség csúcsok ismételten megjelentek a szerkezeten, ugyanúgy, ahogy eddig, a vízszintes összekötő heveder és az övvas csatlakozásánál. Az látható, hogy az övvasak keresztmetszetében a feszültség egy aránylag kisebb tartományban változik, ami csak a csatlakozási pontban lesz kiugróan magas. A vízszintes összekötő heveder szinte alig van kihasználva, feszültség csak minimális értéken jelenik meg rajta.

Mivel csak a csatlakozási él környékén emelkedik meg a feszültség, a modellt tovább próbáltam egyszerűsíteni úgy, hogy csak az említett két alkatrészt tartalmazza. A modellben egy 700 mm hosszúságú L idomacélt és az ehhez középen csatlakozó 90x8 mm-es hevedert alkalmaztam (53.ábra).

53. ábra: Az egyszerűsített modell vizsgálata

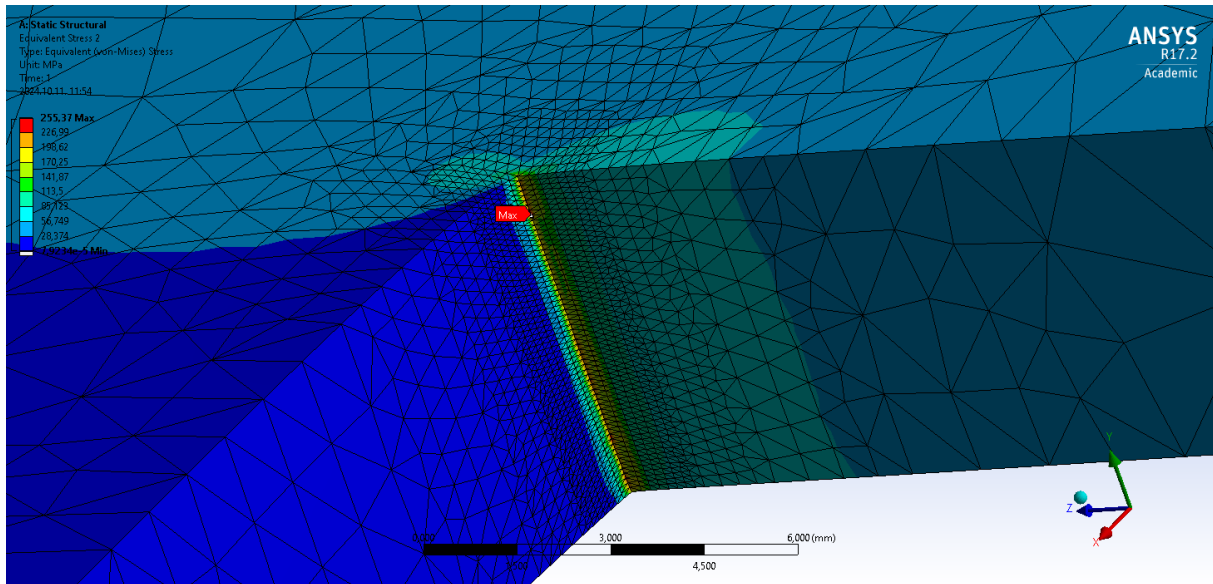
(forrás: saját készítés, ANSYS Mechanical)



Hasonlóan az előző modellhez az L idomacél egyik végén befogást alkalmaztam, a másik végére elhelyeztem egy 30 kN-os húzóerőt. Az eredmények szinte teljesen egybeesnek az eddigiekben tapasztaltakkal. A két alkatrész csatlakozási pontján lokális feszültség csúcs jelent meg (54.ábra).

54. ábra: Az egyszerűsített modell feszültségei

(forrás: saját készítés, ANSYS Mechanical)



Az L idomacélt, ha megterheljük a fent említett módon, akkor a keresztmetszetében egyenletesen oszlik el a feszültség. Az alkatrész a terhelő erő hatására megnyúlik. Amennyiben a terhelt L-idomacélt képzeletben felosztjuk egyenlő részekre a hossza mentén, minden egyes rész azonos mértékben nyúlik meg. Azonban, ha ez egyik részhez csatlakoztatunk egy meg nem terhelt elemet, esetünkben az összekötő hevedert, ez a rész nem tud megnyúlni a többi elemmel azonos módon, mivel a csatlakoztatott hevedert is meg kell nyújtania, hiszen a csatlakozási pontjaik nem tudnak külön válni. A heveder a csatlakozási ponton egy az L idomacél húzási erőjének irányára ellentétes erővel hat. A csatlakozási ponttól távolodva ez az erő csökken, eloszlik a keresztmetszetben.

A következőkben megvizsgáltam, hogy hogyan változik a lokális csúcsheszültség, az összekötő heveder szélességének, azaz a csatlakozó felületek csökkentésével (4. táblázat).

4. táblázat: Az összekötő heveder szélesség változásának hatása a feszültségcsúcsra

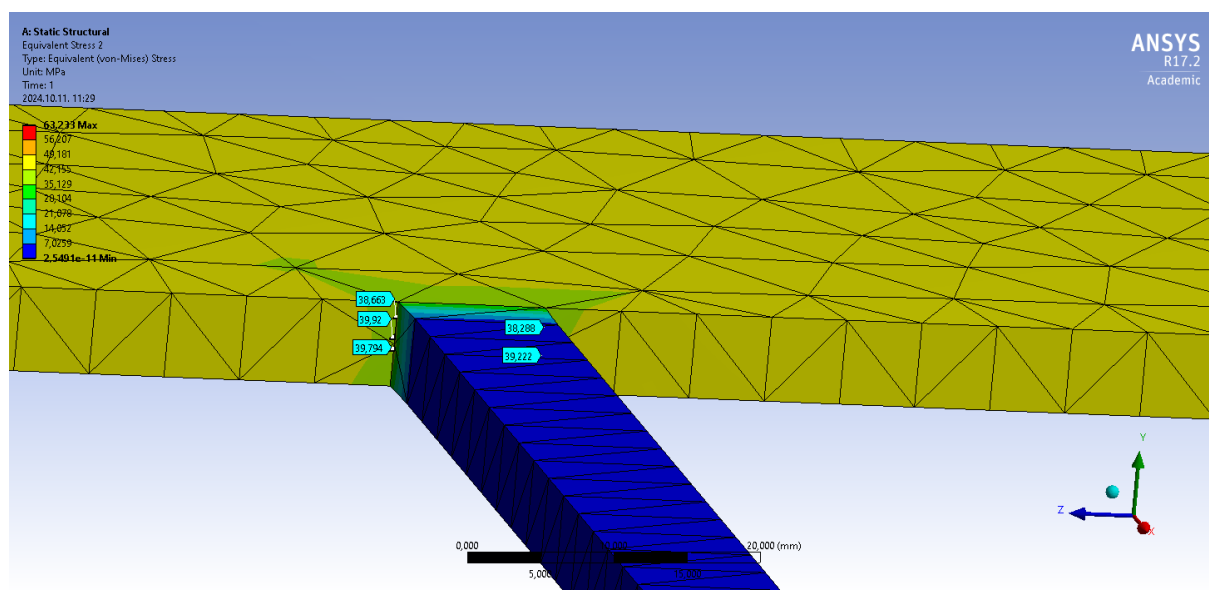
(forrás: saját készítés)

Összekötő lemez szélessége [mm]	Feszültség
90	66,148
70	59,267
50	57,197
30	55,164
10	39,92

A 10 mm széles heveder csatlakoztatásával végzett kísérlet érdekes, mert ha kiszámítjuk az L idomacélban a feszültséget (43,86 MPa), akkor nagyobb eredményt kapunk, tehát ebben az esetben nem növeli a feszültséget a heveder, hanem csökkenti, ami a 55. ábrán is megfigyelhető.

55. ábra: A 10 mm széles heveder hatása az övvas feszültségeire

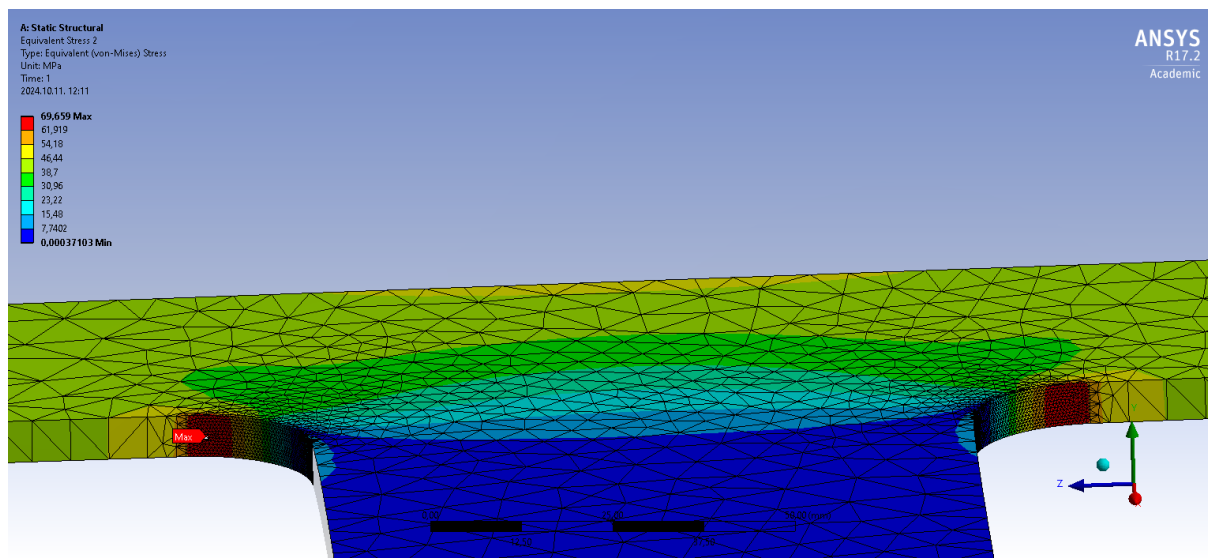
(forrás: saját készítés, ANSYS Mechanical)



A következő szimulációban a lekerekítések hatásait vizsgáltam meg. A lekerekítési sugár növelésével egyre jobban megfigyelhető, hogy a feszültség csúcs a lekerekítés felületén keletkezik és mindig az L idomacél felé van eltolódva (56.ábra).

56. ábra: A 15 mm sugarú lekerekítés hatása

(forrás: saját készítés, ANSYS Mechanical)



A lekerekítési sugár növelésével a szerkezetben kialakuló lokális feszültségek csökkennek az alábbi 5. táblázatban látható módon.

5. táblázat: A lekerekítési sugarak hatása a feszültségekre

(forrás: saját készítés)

Lekerekítési sugár [mm]	Feszültség [MPa]
1	154,56
2	121,51
3	108,72
5	93,199
10	77,184
15	69,659
20	65,083
30	59,734
40	56,565
50	54,474
80	50,971

Az alsó övvasak húzással, a felső övvasak nyomással vannak terhelve. A vízszintes hevederek lekerekítés nélkül hirtelen megnövelik az övvasak keresztmetszetét, ami feszültséggyűjtő helyeket hoznak létre a két féle szerkezeti elem csatlakozásainál. Az itt ébredő feszültség csúcsok nem befolyásolják a szerkezet teherbírását jelentős mértékben.

4.3.6. A modell optimalizálása

A gerenda Solid elemekkel történő modellezése a szimulációban meglehetősen nagy erőforrásigényű. Már a 16 méter hosszúságú G-450-es gerenda elem, illetve csomópont darab száma a 10^5 nagyságrendbe kerül, és aránylag ez egy rövid gerenda. Ennek a gerendának a szimulációját nem is tudtam lefuttatni az Ansys Student változatával, mivel nem alkalmas ekkora elemszámú modell futtatására. Amennyiben csökkenteni szeretném az elemszámot, azt csak úgy tudom megtenni, hogy ha a hálóméretet növelem. Az elemméret növelésével a szoftver egy határon túl jelzi, hogy az hálózást nem lehet végrehajtani a modell geometriai sajátosságai miatt.

6. táblázat: A középső tagok elem, illetve csomópontjainak száma

(forrás: saját készítés)

G300 60x60x6	Beam		Solid	
	Nodes	Elements	Nodes	Elements
Element size: 30 mm	426	188	11820	5011
Element size: 50 mm	282	116	7948	3240
Element size: 80 mm	234	92	4687	1832
G450 60x60x6	Beam		Solid	
	Nodes	Elements	Nodes	Elements
Element size: 30 mm	482	216	15753	6722
Element size: 50 mm	306	128	8859	3621
Element size: 80 mm	246	98	6238	2515
G450 100x65x7	Beam		Solid	
	Nodes	Elements	Nodes	Elements
Element size: 30 mm	482	216	15568	6662
Element size: 50 mm	306	128	10902	4614
Element size: 80 mm	246	98	5945	2393

A mai számítógépek már igen nagy számítási kapacitással rendelkeznek. A processzorok több, akár 10-20 szálon képesek párhuzamosan végrehajtani a feladatokat, így a futtatási idők nagymértékben csökkennek. Mégis lehet olyan modellt készíteni, amivel az újabb számítógépek is órákig futtatnak egy szimulációt. A 6. táblázatban összefoglaltam a három alaptípus középső, ismétlődő tag elemeinek és csomópontjainak darabszámát, különböző hálózási elem

méretekkel. A táblázatban jól látható, hogy a Beam és a Solid típusok elemszámai között ugyanazzal a hálózási mérettel a különbség 200-300 szoros. A G-450 gerenda 60x60x6 keresztmetszettel és 30 mm-es hálózási elem mérettel a legnagyobb hosszúságra számítva 739420 elemszámot eredményez. Ugyanez az elemszám a 100x65x7 keresztmetszettel 866060 darab. Ezért érdemes megvizsgálnunk a modell egyszerűsítési lehetőségeit.

Az eddig vizsgált modelleknél a legnagyobb igénybevétel a gerenda középső részén keletkezett. Érdemes ezt a középső részt vizsgálni részletesebben, a többi része a gerendának, ahol kisebb igénybevétel keletkezik, nem annyira érdekes számunkra. Már a Beam elemekből elkészített modellnél megállapítható, hogy melyik tagoknál jelentkezik a legnagyobb igénybevétel. Amennyiben ezeket a tagokat kicseréljük Solid elemekre, akkor pontosabb eredményeket kapunk, de a modell számítási erőforrás igénye nem növekszik olyan mértékben, mintha az egész modell Solid elemekből lenne felépítve (57. ábra). Az eddig elkészített modelleket egyszerűen át lehet alakítani erre a „vegyes” modellre. A Beam elemekből elkészített modell azon tagjait, melyeket ki szeretnénk cserélni, kitöröljük majd a Solid tagokat bemásoljuk és a helyére mozgatjuk. A modellt még egy szerkezetté kell alakítanunk.

57. ábra: A vegyes modell kialakítása

(forrás: saját készítés, SpaceClaim)

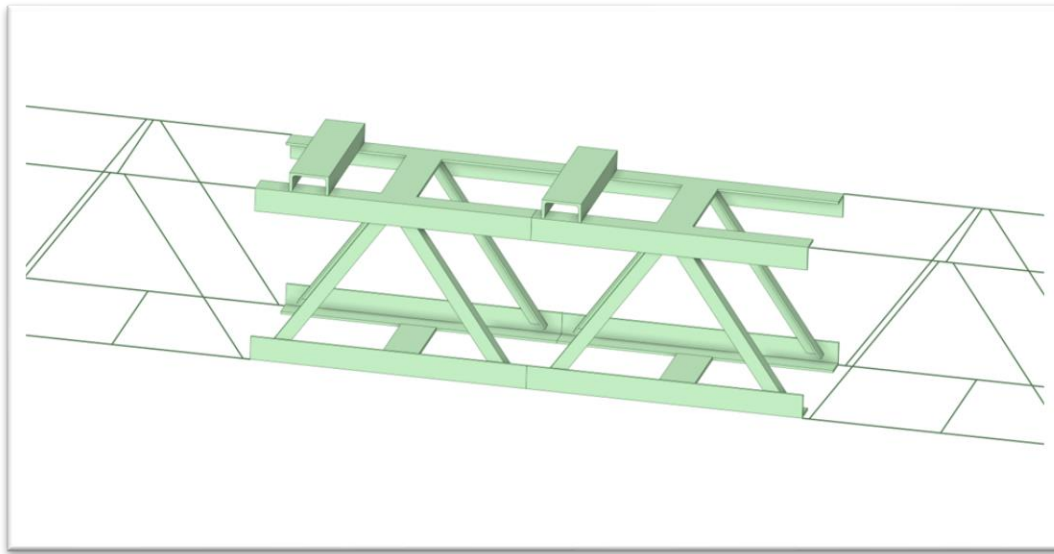


A terheléseket felvevő szerkezeti részeket ugyanúgy kell elhelyezni, mint az előzőleg bemutatott Beam és a Solid alapú modelleken (58. ábra).

Mivel a modell két féle típusú elemből épül fel, az eredmények lekérését is ennek a két típusnak megfelelően kell kiválasztani. A szerkezetben kialakuló feszültségeket a Beam Tools illetve az Equivalent Stress parancsok alkalmazásával fogom megkapni.

58. ábra: A vegyes modell a terheléseket felvevő elemekkel

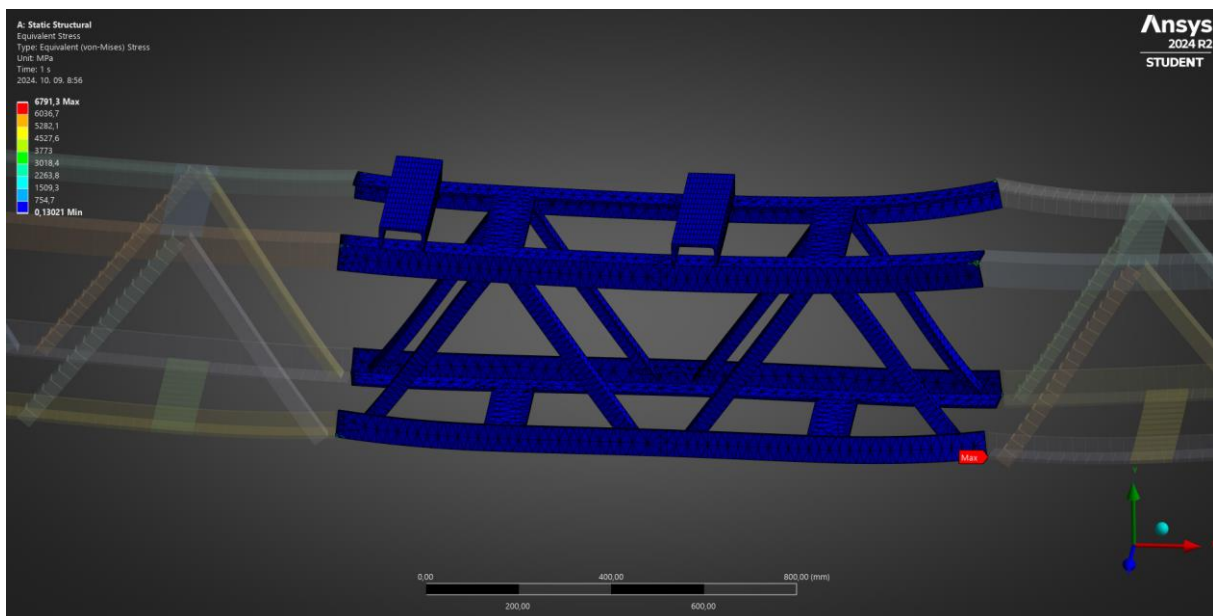
(forrás: saját készítés, SpaceClaim)



A szimuláció lefuttatása nem várt eredményt hozott (59. ábra). Egyrészt nagyon nagy feszültségértékek keletkeztek, másrészt az alkatrész színezése egységes maradt, ami annak a jele, hogy a kiugróan magas feszültségértékek nagyon kis területen helyezkedik el.

59. ábra: A vegyes modell kiugróan magas feszültség eredményei

(forrás: saját készítés, ANSYS Mechanical)

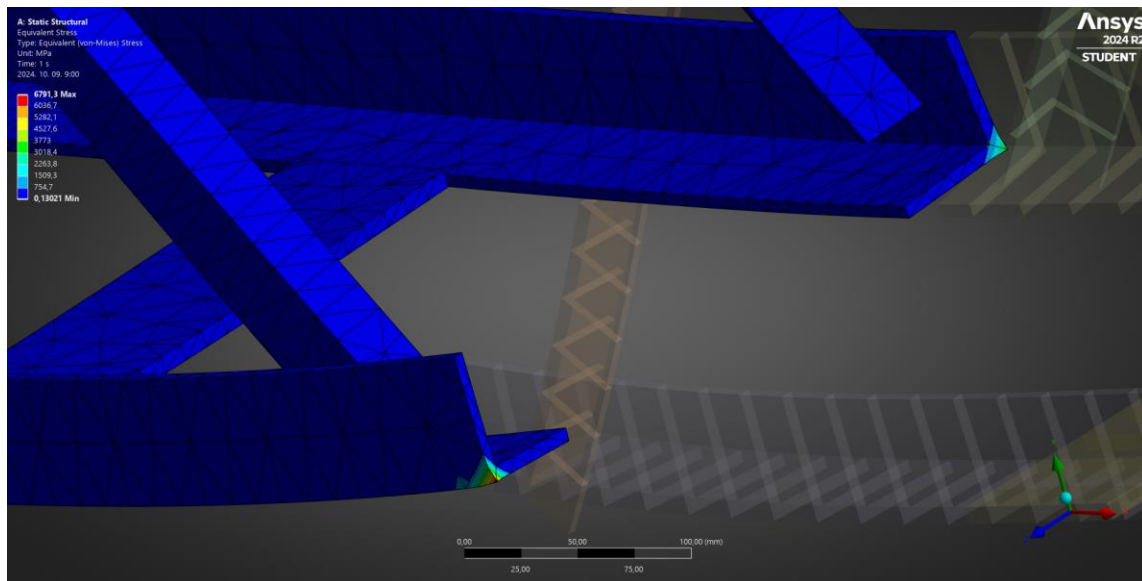


A következő ábrán jól látható, hogy a magas feszültség értékek a szerkezetnek egy kis részére terjednek ki. Ezek a részek a Beam és a Solid elemek csatlakozási pontjai. A nagy feszültség

értékek pedig azért alakultak ki, mert a Beam elem csak egy ponton kapcsolódik a Solid elem felületével és a belső erők ezen az egy ponton keresztül adódnak át a Solid elem felé (60. ábra). Ez az L idomacél külső sarka, így egy valóságban nem létező szinguláris pont keletkezik, ezért van kiugró feszültség számítva ott, ahol a valóságban nincs.

60. ábra: A kis területre koncentrálódó erők nagy feszültségeket hoznak létre

(forrás: saját készítés, ANSYS Mechanical)



Ezek a kiugróan magas értékek a modell hibájából származnak, de nem kell feltétlenül elvetnünk ezt a modellt. A probléma az, hogy a Beam elem egy ponton adja át a terheléseket a Solid elem kiválasztott felületének egy pontjára. Amennyiben egy alkatrészt a két elem közé tudnánk iktatni úgy, hogy ezt az erőt el tudja oszlatni a Solid elem felületére, a vizsgálandó Solid elemen már csak a szerkezeti terhelésből adódó feszültségek jelennének meg. Tulajdonképpen van is ilyen alkatrészünk, mégpedig felhasználhatunk még két Solid tagot erre a feladatra. Így összesen négy Solid elem tagot építünk be a modellbe (61. ábra), de csak a középső két tagban ébredő feszültségeket fogom megjeleníteni.

61. ábra: A módosított vegyes modell

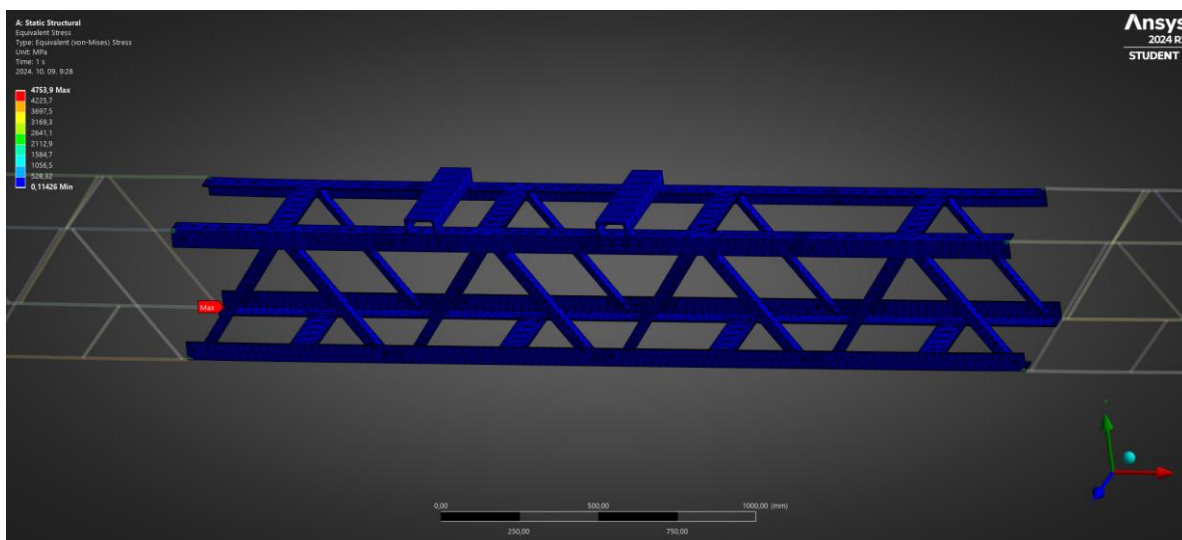
(forrás: saját készítés, ANSYS Mechanical)



Az eredmény (62. ábra) a Solid elemek teljes geometriájára hasonló az előző szimulációban kapott eredményhez.

62. ábra: A módosított vegyes modell feszültsége

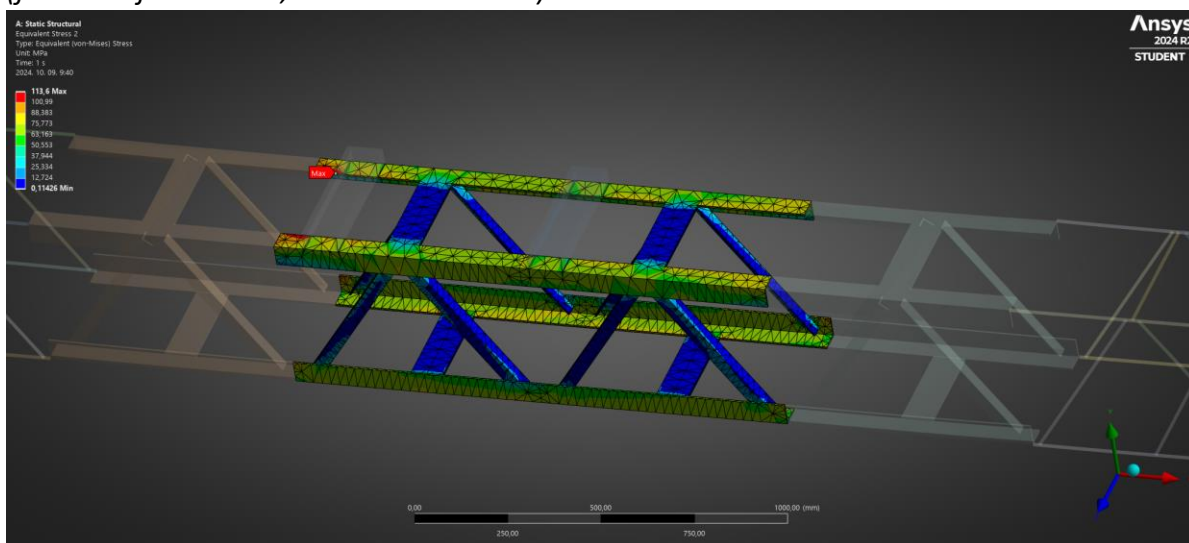
(forrás: saját készítés, ANSYS Mechanical)



A szimuláció lefuttatása előtt, az Equivalent Stress parancs kiadásával lehetőség van a vizsgálni kívánt szerkezeti elem kiválasztására a Scope/Geometry sorban. Ez alaphelyzetben All Body értékre van állítva, de ha itt kiválasztjuk a középső két Solid elemet, akkor csak az ezekben fellépő feszültséget fogja megjeleníteni a szoftver (63. ábra).

63. ábra: A középső tagok feszültsége

(forrás: saját készítés, ANSYS Mechanical)



Ezzel a modellezési eljárással olyan feladatot tudunk megoldani, amit az Ansys Student verziójával nem lehetséges, illetve a számítások elvégzéséhez szükséges erőforrásokat, és a feladat végrehajtásához szükséges időt tudjuk nagymértékben csökkenteni. Ennek a modellnek az elemszáma 17317, a csomópontok száma 44449 úgy, hogy a hálózásnál használt elemek mérete 50 mm. A teljesen Solid elemekből felépülő modell, ugyanezzel a hálózási elemmérettel 89707 elemet és 221215 csomópontot tartalmaz.

4.4. Felkötés modellezése

A felkötés modellezéséhez szükség van a gerenda modelljére, és mivel a felkötés másik vége az oszlophoz csatlakozik, az oszlop modelljére is. A gerenda modelljének elkészítését az előző fejezetekben bemutattam, most az oszlop modelljének elkészítését, az oszlop és a gerenda csatlakozásának módját és a felkötés modelljét részletezem. Az oszlop modelljét Beam elemekből készítem el. A Solid elemekkel való modell elkészítésekor olyan problémával szembesülünk, hogy az övek széttartása miatt a rácsrudak nem ugyanabba a síkba esnek, mint a két öv, mivel ezeknek nincs közös síkjuk. Így meglehetősen nehézkes a szerkezet megrajzolása.

4.4.1. A KRC 14 Felsővezetéki oszlop modelljének elkészítése

Az oszlop geometriája (64. ábra) sajnos nem engedi meg a lineáris minták alkalmazását, mivel a csomópontjok közötti távolság folyamatosan változik az övvasak mentén végig haladva. A legkönnyebben kivitelezhető megoldás az oszlop geometriájának elkészítéséhez a csomópontok koordinátáinak beimportálása, majd a pontok összekötése a geometriának megfelelően. Az oszlop fejmérete 500x500 mm. Az övvasak széttartása az egyik irányba 1,5%, a másik irányba 2,5 %. A csomópontok az övvason végig haladva fentről kezdve egyre nagyobb távolságra vannak egymástól. A szélesebb oldalon a rácsrudak egymással bezárt szöge 80°. Az oszlop koordinátáit Excel program segítségével számoltam ki.

64. ábra: KRC 14 oszlop modellje

(forrás: saját készítés, SpaceClaim)



Érdemes minden olyan pontnak a koordinátáját kiszámolni, melyet meg szeretnénk jeleníteni a geometriában, mert később vagy ki kell számítanunk, vagy síkokkal elvágni az oszlopot a kívánt helyen a pontok előállításáért, majd utána még meg kell rajzolni az alkatrészt,

keresztmetszetet adni neki és beforgatni. A későbbi módosítás sok utómunkával jár (felkötés helye, kereszt merevítők). Amennyiben a pontok beimportálása sikerült, érdemes mindig csak két övvas láthatóságát beállítani a rácsrudak megrajzolásához, mivel könnyen el lehet tévedni az egyre több vonal között. Az oszlop és a gerenda koordináta rendszerét egymáshoz kell igazítani.

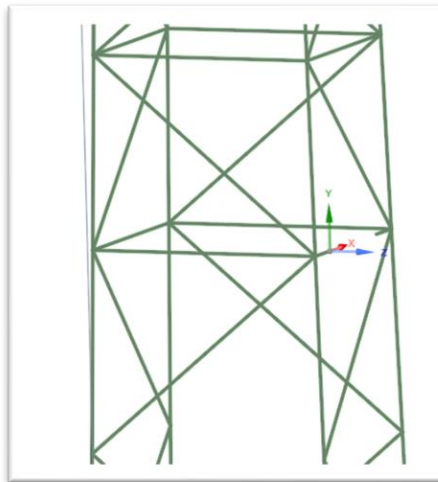
A fa struktúrában létrehozható komponensek, illetve az ezeket aktívra tevő parancs használata gyorsabbá teszi a munkát. Mindegyik övrudat külön komponensbe tettem, majd az egy oldalon lévő rácsrudakat is külön mentettem el. Érdemes a legnagyobb, 16 méteres oszlopot megrajzolni elsőnek, hiszen a kisebb oszlopok csak abban különböznek, hogy hány szekciót hagyunk el a szerkezet aljáról. A keresztmetszeteket beállítani és forgatni sokkal egyszerűbb, ha az egyforma és azonos orientációval rendelkező szerkezeti részek egy komponensben vannak.

4.4.2. A gerenda és az oszlop csatlakozása

Az oszlop és a gerenda csatlakozása az oszlop több pontján lehetséges. Az oszlop fentről lefele számolva a hatodik, hetedik és nyolcadik rácsrúd alsó végéhez vízszintes rácsrudak kerültek beépítésre azért, hogy a felkötésből származó igencsak nagy vízszintes erőkomponensnek a szerkezet ellenálljon. Ezeket a vízszintes rácsrudakat kell felosztani úgy, hogy a gerenda beillesztési pontja pontosan a megfelelő helyre kerüljön. Ezt vázlatokkal és a vonalak végére helyezett síkokkal elérhető. Az egész oszlopot ezután úgy kell mozgatnunk, hogy a koordináta-rendszere a gerenda csatlakozási pontjához kerüljön. A Mozgatás parancsot elindítva megjelenik többek közt a Horgony parancs. Az egész oszlopot kijelöljük, majd a Horgony paranccsal megkeressük a gerenda kívánt beillesztési pontját. Rákattintva ez lesz a megfogási pontja az oszlopnak (eddig a geometria középpontja volt a megfogási pont). A Mozgatás parancs elindításakor megjelent a Felfelé határig ikon, amire kattintva megkereshetjük azt a geometriai elemet, ahová szeretnénk, hogy a megfogási pont kerüljön. Amennyiben az origót választjuk a megfogási pont az origóba kerül (65. ábra). Ezután még ne lépünk ki a Mozgatás parancsból, ha nem jó az orientáció, beforgathatjuk az oszlopot a gerenda orientációjának megfelelően. Az alábbi ábrán látható a gerenda csatlakozási helye, ami egyben a koordináta-rendszer origója is egyben.

65. ábra: Az oszlop csatlakozási pontja a koordináta rendszer origójára állítva

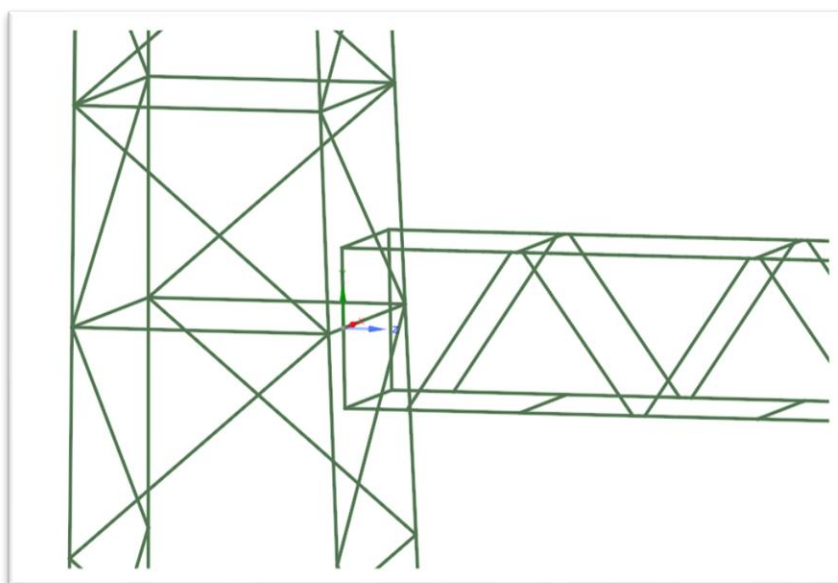
(forrás: saját készítés, SpaceClaim)



Ezután a gerendán is be kell állítani a koordinátarendszert. Mivel a gerenda rögzített vége nem az origóra esik, a gerendát el kell mozdítani vízszintesen 165 mm-t, illetve függőlegesen 225 mm-t. Ugyanezt meg kell ismételni a merevítőlemezekkel is, mert egyszerre nem lehet mozgatni a különböző típusú elemeket. A gerenda másolásával és az oszlop rajzába beillesztésével a gerenda a megfelelő helyre kerül (66. ábra). A műveletet el kell végeznünk a merevítő lemezekkel is.

66. ábra: A KRC oszlop és a G450 gerenda csatlakozása

(forrás: saját készítés, SpaceClaim)



4.4.3. A felkötéssel rendelkező gerenda szimulációja

A kiindulási adatokat (7. táblázat) a „Keretállás mintaszámítás” című dokumentum alapján vettem fel. A gerenda 4 darab hosszlánc pótterhes terhelését veszi fel. A mintaszámításban nincs benne a gerenda közepére helyezett szerelő súlya, amit 150 kg-mal szükséges figyelembe venni.

7. táblázat: A gerenda terhelésének adatai

(forrás: saját készítés)

KRC 14 + G450-60x60x6-26160				Pótteher	
Terhelési pontok	1	Felkötés helye	2	3	4
Távolságok [cm]	500	900	1200	1700	2200
Terhelések [kp]	350		350	330	320
Terhelések [N]	3432,31		3432,31	3236,178	3138,112

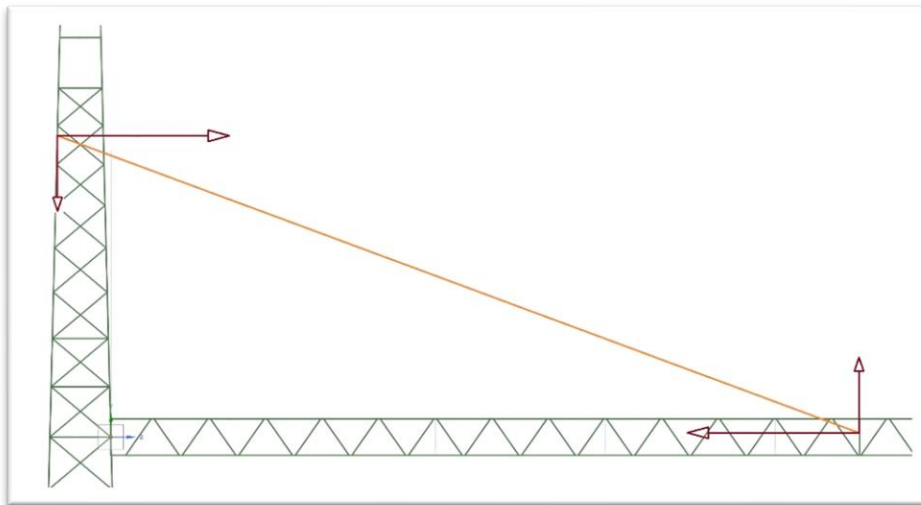
A szimuláció elvégzéséhez rendelkezésre áll a geometria és a terhelések. A szerkezeten alkalmazott kényszerek a következők:

- befogás: az oszlop alsó éleire,
- görgős alátámasztás (Displacement) a gerenda szabad végén lévő alsó élre.

A szimulációból már csak a felkötés figyelembevétele hiányzik. A felkötés helyén a gerendának azonos síkban kell lennie a gerenda végeivel. A felkötés a gyakorlatban előfeszített acélsodronyok használatával valósul meg. A gerenda beemelésakor a két végét rögzítik, majd a sodronyokat állítják be. Csak ezek után engedi el a daru a gerendát, aminek a 3 pontja egy síkba esik. Amennyiben a szimulációban acélsodronyokat állítunk be a felkötés figyelembevételéhez, akkor az a nagy húzóerő miatt megnyúlik, így a felkötés helye lejjebb kerül. Végül arra jutottam, hogy a felkötést ellentétes irányú erőpárokkal helyettesítem (67. ábra). A gerendát a felkötés helyén rögzítem függőleges irányba egy megtámasztással, így ott a reakció erő nagyságát a szoftver ki tudja számítani. Ez megadja a kötél erő függőleges összetevőjét. A távolságok ismeretében a vízszintes összetevő már számítható.

67. ábra: A felkötés helyettesítése erőpárokkal.

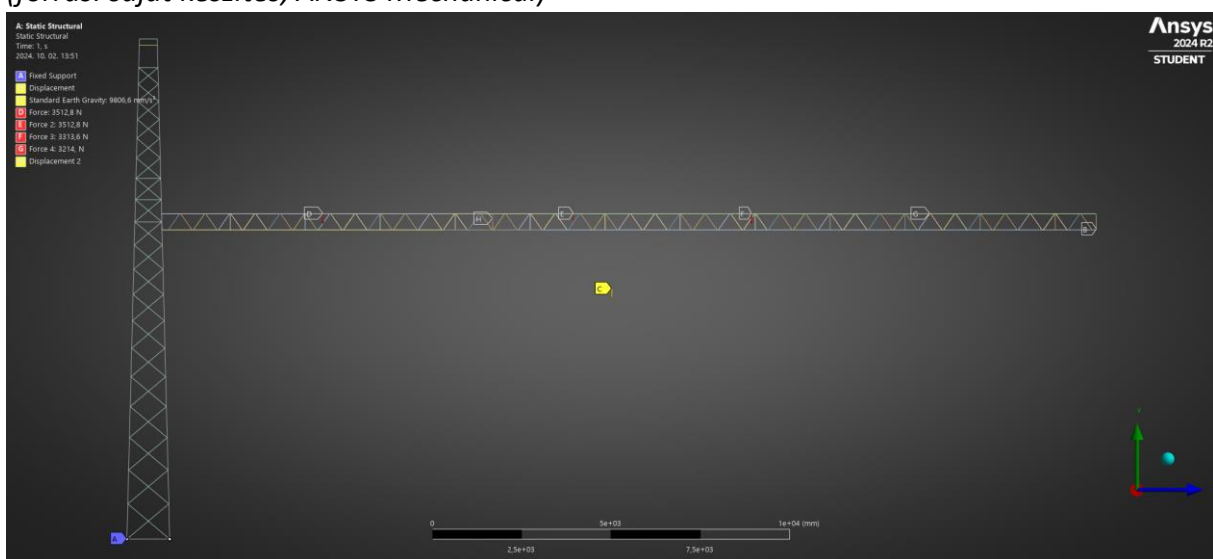
(forrás: saját készítés)



Első lépésben a következő konfigurációval végzem el a szimulációt: az oszlop alja befogva, a gerenda szabad vége és a felkötés csak X irányba tud elmozdulni, a gravitációs erőter, és a hosszláncok terhelőerői $-Y$ irányúak. A fa struktúrába még fel kell venni a Solution/Probe/Force Reaction-t, és kiválasztani, hogy melyik reakcióerő kerüljön megjelenítésre, jelen esetben a Displacement 2 (68. ábra).

68. ábra: A futtatásra előkészített modell

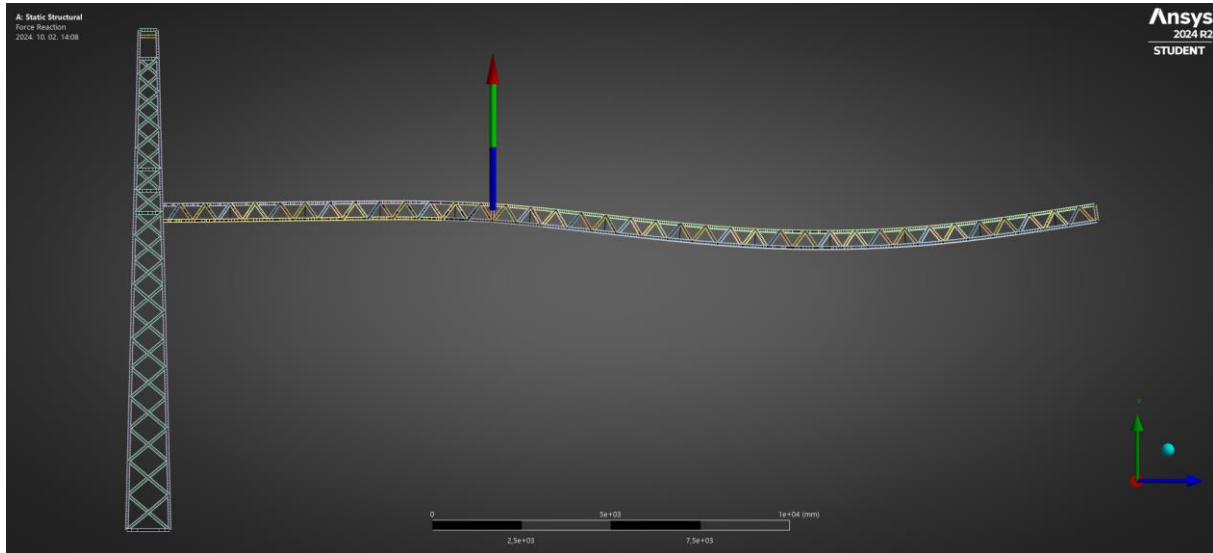
(forrás: saját készítés, ANSYS Mechanical)



A szimuláció eredményként megkapjuk, hogy a gerenda felkötési pontjában 18670 N erő tart egyensúlyt a szerkezet terhelésével (69. ábra).

69. ábra: A felkötés helyén létrejövő reakcióerő

(forrás: saját készítés, ANSYS Mechanical)



A felkötés vízszintes távolsága 9932,28 mm, a függőleges 3460 mm.

$$\frac{9932,28}{3460} = \frac{F_{kx}}{18670} \quad (3)$$

$$F_{kx} = \frac{9932,28}{3460} \cdot 18670 = 53594,124 \text{ N} \quad (4)$$

A gerendán létrejövő erőkomponensek:

$$F_{Gy} = 18670 \text{ N} \quad (5)$$

$$F_{Gz} = -53594,124 \text{ N} \quad (6)$$

Az oszlopon létrejövő erőkomponensek:

$$F_{Oy} = -18670 \text{ N} \quad (7)$$

$$F_{Oz} = 53594,124 \text{ N} \quad (8)$$

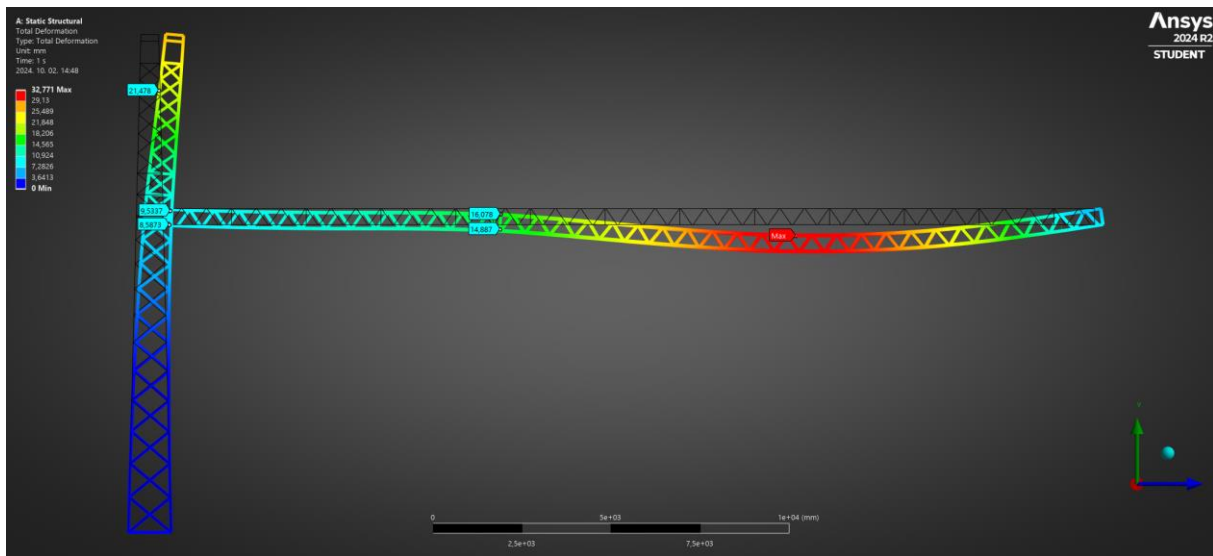
A kötélirányú erőt a szoftver azonnal számolja: 56753 N

A szimulációt lefuttatva az elmozdulások mértékei láthatóvá válnak. A felkötés helye az oszlopon 21,478 mm-t mozdult el, a felkötés a gerendán 16,078 mm-t (70. ábra). Az oszlop

és a gerenda csatlakozási pontja szintén elmozdult 9,5337 mm-t. A gerendán lévő felkötési hely Y irányú elmozdulását a „Directional Deformation” y-tengelyre állításával kaphatjuk meg. Az értéke: 6 mm, tehát az erőkomponenseken növelni kellene, ahhoz, hogy a gerenda eleje, vége és a felkötési pont egy síkba kerüljön.

70. ábra: A terhelések hatására kialakuló elmozdulások

(forrás: saját készítés, ANSYS Mechanical)



Az $F_{Gy} = 20000 \text{ N}$ próbálkozás után az $F_{Gy} = 19500 \text{ N}$ már elfogadható eredmény adott.

$$F_{kx} = \frac{9932,28}{3460} \cdot 19500 = 55976,722 \text{ N} \quad (9)$$

A gerendán létrejövő végleges erőkomponensek:

$$F_{Gy} = 19500 \text{ N} \quad (10)$$

$$F_{Gz} = -55976,722 \text{ N} \quad (11)$$

Az oszlopon létrejövő végleges erőkomponensek (71. ábra):

$$F_{Oy} = -19500 \text{ N} \quad (12)$$

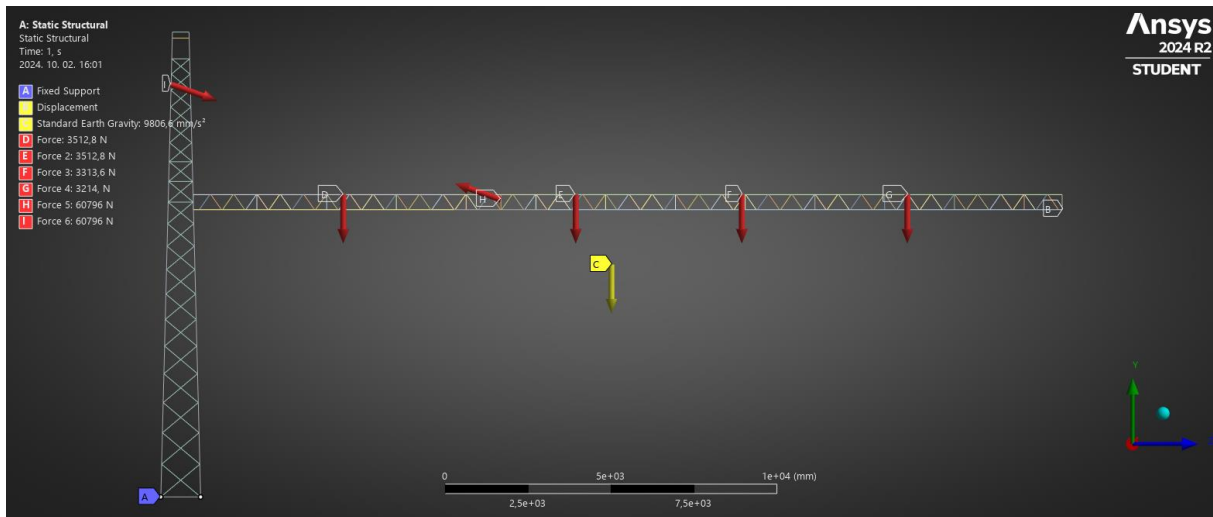
$$F_{Oz} = 55976,722 \text{ N} \quad (13)$$

A kötélirányú erő: 59276 N.

A felkötési pont elmozdulása a gerendán Y irányban: -0,34822 mm, az oszlop-gerenda csatlakozásánál -1,1566 mm. A gerenda legnagyobb elmozdulása a felkötés és a gerenda görgős alátámasztása között található: 28,223 mm.

71. ábra: A végleges kötélérő és a terhelések

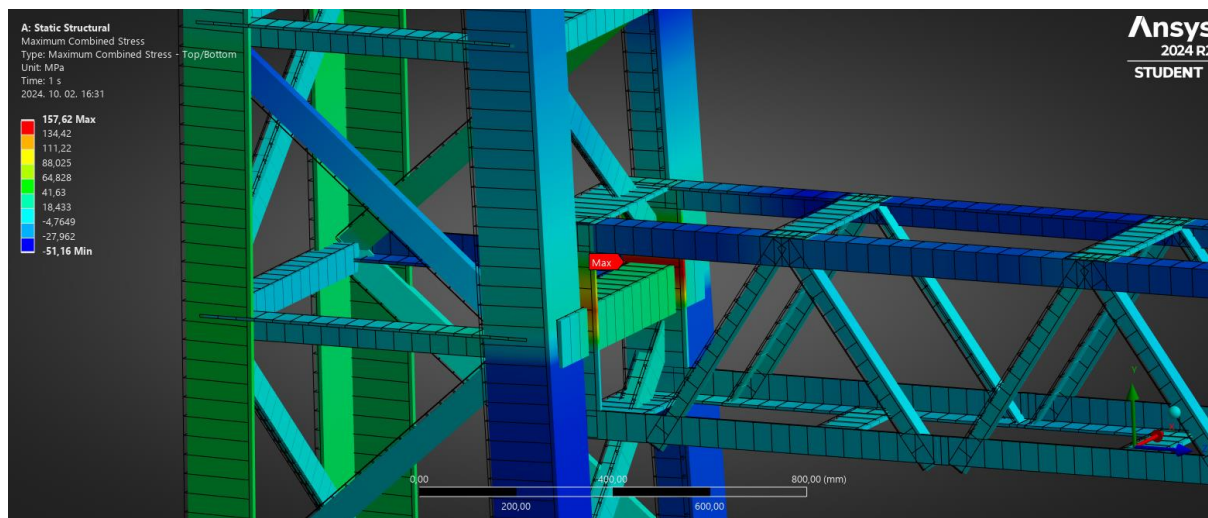
(forrás: saját készítés, ANSYS Mechanical)



A szerkezetben keletkező feszültségek: Maximum Combined Stress 157,62 MPa. Ez az érték a modell hibájából származik, ugyanis a gerenda és az oszlop csatlakozási helyén lép fel a gerenda lezárására kialakított kereten (72. ábra). Ennek az az oka, hogy a geometria ezen a helyen nem hasonlít az eredetire, illetve a gerenda és az oszlop a modellben csomópontokban csatlakoznak egymással, ami olyan mintha egy hegesztett szerkezet lenne. A valóságban az oszlopra csavarozott szerkezetre emelik rá a gerendát, amit felülről még csavarkötéssel biztosítanak. Ez a kapcsolat kis elmozdulásoknál inkább viselkedik csuklóként, mint merev kapcsolatként, de a csavarkötés szorító ereje ad a szerkezetnek merevséget. A magas feszültség mértékéhez még az is hozzájárul, hogy a gerenda vége a modellben a csomóponthoz kapcsolódik, a valóságban az övvas felületére fejt ki erőhatást.

72. ábra: A csatlakozásnál megjelenő feszültségek

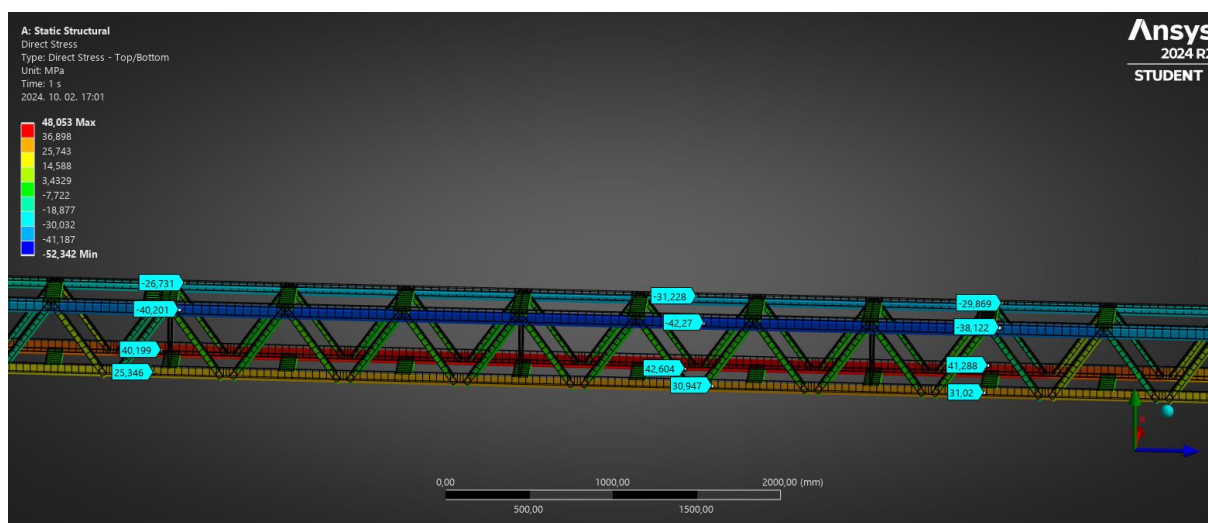
(forrás: saját készítés, ANSYS Mechanical)



A MÁV Zrt.-nél kidolgozott gerenda ellenőrzés a terhelési csomópontokra és a felkötés helyére számította ki a szerkezetben létrejövő feszültségeket. A szimulációból azonban ez nem annyira egyértelmű, mivel a terhelések alatt elhelyezkedő négy darab övvasban különböző feszültségek alakulnak ki a terhelések hatására. Példaként a felkötés utáni második hosszlánc terhelésnél a felső övvasokban 47,872 MPa és 33,694 MPa; az alsó övvasokban 1,2616 MPa és -18,148 MPa alakul ki (73. ábra).

73. ábra: A terhelések alatt a gerendában kialakuló feszültségek

(forrás: saját készítés, ANSYS Mechanical)



A gerendán a legnagyobb húzó- és nyomó feszültség a második és a harmadik hosszláncterhelés között alakul ki. Az X irányú, aránylag kis erőkomponens ezekre a feszültségekre jelentős hatást gyakorol. Az ábrán látszik az is, hogy a második és a harmadik hosszláncterhelés között nagyobb feszültségek alakulnak ki, mint közvetlenül a terheléseknél, miközben az eredeti módszer csak a csomópontokban számolt feszültségeket.

4.4.4. A kötélben (sodronyokban) keletkező erő

A Keretállás mintaszámításban a kötélerő eredménye 4420 kp, az ebből keletkező nyomóerő 4130 kp, ezek 43345,393 N és 432767,4645 N. A szimuláció eredményei ennél jóval magasabb értékeket mutatnak, a kötélerő 59276 N, a gerendára ható nyomóerő 55977 N.

A szimuláció eredményeit összehasonlítva a 80-as években kidolgozott módszer eredményeivel megállapítható, hogy a szerkezetben keletkező feszültségek tekintetében a régi módszerrel jóval magmagasabb értékeket kaptunk, mint a végeelem szimulációval. Ez köszönhető a módszerben alkalmazott biztonsági tényezőknek, melyekből többet is használnak a számítás során. A felkötés sodronyaiban kialakuló kötéli irányú erők ezzel szemben a végeelem szimulációban jóval nagyobbra adódtak. A sodronyokra a biztonsági tényező 4, tehát a kapott feszültséget megszorozták négygel, és így választották ki a szükséges darabszámot és a sodrony keresztmetszetét. A kapott 1,367-szeres különbség nem okoz problémát a szerkezet üzemeltetése során.

5. Eredmények és értékelésük (megvitatás)

A felkötés nélküli gerendák a két féle szerkezeti magassággal kerültek modellezésre, illetve a különböző keresztmetszetekkel elkészültek a gerendák szerkezeti egységekre bontott építő elemei. Ezekből az elemekből aránylag gyorsan összeállítható a gerendák különböző típusainak nagyobbik része. A túlnyúló gerenda és a KO300-as konzol ebben a munkában nem került kidolgozásra. A gerendák különböző típusú elemek felhasználásával összeállíthatók: tisztán Beam, Solid, illetve ezek kombinációiból. A Solid elemekből előállított gerendák modellje meglehetősen nagy elemszámmal rendelkezhet, ezért ebben az esetben egyszerűsíthetjük a modellt úgy, hogy a Solid elemeket csak ott alkalmazzuk, ahol a legnagyobb igénybevétel keletkezik a Beam elemekből épített modellben. A legnagyobb igénybevétel helyén kicseréljük a modell építőelemeit Solid típusúra, így csak ezen a helyen használjuk fel a nagy elemszámú szerkezeti egységet, a többi rész Beam elemekből áll. A különböző típusú elemek kapcsolódásáról gondoskodni kell az 5. fejezetben kidolgozott módon.

8. táblázat: A felkötés nélküli gerenda modellek eredményei

(forrás: saját szerkesztés)

G300-II-16010				
A modell típusa	Beam	Solid	VEGYES	Epr.
Total Deformation [mm]	88,04	100,77	159,86	
Equivalent Stress [MPa]		135,72	160,75	141,706
Maximum Combined Stress max [MPa]	124,13			

G450-II-16010				
A modell típusa	Beam	Solid	VEGYES	Epr.
Total Deformation [mm]	46,056	44,657	68,403	
Equivalent Stress [MPa]		90,27	113,6	95,419
Maximum Combined Stress max [MPa]	84,88			

A 8. táblázatban kerültek összefoglalásra a különböző modellek eredményei. A Beam elemekből készített modell a legkisebb eredményeket adta mind elmozdulásra, mind feszültségre, mivel ez az elemtípus nem tudja modellezni a feszültségcsúcsokat a szerkezeti részek csatlakozásainál. A Solid elemekből épített modell a legpontosabb, viszont nagy az erőforrás igénye. Az előző típusok vegyes alkalmazása jóval magasabb értékeket eredményezett elmozdulásra mindkét szerkezeti magasság esetében, feszültség esetében a

G300-as gerenda eredményei majdnem 60 % különbséget mutatnak a Solid elemekből alkotott modellhez képest. A G450 gerenda esetében ez a különbség 25 % körül alakul. Ennek oka az, hogy a két féle elemtípus átmeneténél keletkező feszültséggyűjtő pont hatását nem sikerült teljesen megszüntetni. Az „Epr” oszlopban pedig a 80-as évek környékén, a MÁV Rt. által fejlesztett „Első Program” szoftverrel elkészített gerenda ellenőrzés eredményei láthatók megapascal mértékegységre átszámítva.

A felkötéssel rendelkező gerenda esetében a felkötés sodronyában keletkező erők magasabbra adódtak a számításaim során, mint a régi módszerrel számítva. Ezt a különbséget ellensúlyozza a felkötés sodronyain alkalmazott 4-szeres biztonsági tényező.

6. Következtetések és javaslatok

A felkötés nélküli gerendák mindkét modellezési alaptípusa jó összhangban van a 80-as években kifejlesztett módszerrel, de a végeelem szimulációval pontosabb értékeket kaphatunk. A vegyes módszer még további kutatásokat igényel a két különböző elemtípus csatlakozása miatt kialakuló, az alapmodellektől való eltérések csökkentésének érdekében. A vegyes modellt különösen a felkötéssel rendelkező gerendáknál lehetne hatásosan alkalmazni, hiszen annak modellje Solid elemekkel igen nagy erőforrás igényű.

A túlnyúló gerenda modellezése. Ez a gerenda típus nagyszámú kialakítási variációval rendelkezik, így előre elkészíteni minden esetet nem célszerű. A gerenda csatlakozó részének modellezése rúdelemekből nem kivitelezhető kellő pontossággal, mivel ez a szerkezeti elem szélességének és hosszúságának mérete meghatározó, csak a vastagsága kisebb nagyságrendekkel ezeknél. A szerkezeti elem modelljét Solid elemekből célszerű elkészíteni.

A KO300 konzol elkészíthető Beam és Solid elemekből egyaránt, a típusok alkalmazhatósága további kutatást igényel, mivel a konzolhoz egyedi tartószerkezetek csatlakoznak. A tartószerkezetről átadódó erők a két modell típusban különböző módon és pontossággal vehetők figyelembe. Ki kell dolgozni a konzol és a gerenda kapcsolatát, illetve a konzol helyének beállíthatóságát a gerendán. Ezen kívül érdemes a konzol egyszerűsítési lehetőségeit megvizsgálni, a külföldi megvalósítások figyelembevételével.

A gerenda ellenőrzés munkafolyamatának gyorsítása érdekében érdemes lenne az Ansys szoftverben rejlő lehetőségeket felkutatni, megismerni. A szoftver rendelkezik Python szkriptek futtatására alkalmas környezettel. Ezek alkalmasak lehetnek a szimuláció bemeneti adatainak gyors és automatikus feldolgozására. A bemeneti adatok a gerendát terhelő erők, azok helye és iránya a gerendán. Ezek az adatok a felsővezeték tervezés során a feszítési tervből határozhatók meg, melyeket egy fájlba írva az Ansys a megírt szkriptet futtatva be tudna olvasni, majd feldolgozni. Amennyiben ezeket az erőket nem kézzel kell bevinni az adott szimulációba, hanem egy kattintással a szoftver beolvassa ezeket, az nagymértékben gyorsítja a munkát, illetve az ember által okozott elírást, tévesztést kizárja.

7. Összefoglalás

A felsővezeteki keretállások fő szerkezeti tartó elemének, a gerendának modelljének elkészítéséhez a gerendát alkotó részekre bontottam. Ezeknek a részegységeknek a felhasználásával a gerenda modellje egyszerűen elkészíthető. A részegységek a következők: gerenda rögzített vége, a gerenda görgős vége páros és páratlan n számmal, a gerenda középső, többszörözhető tagja, a merevítő lemez, a felkötés, és a terhelés. A részegységeket elkészítettem Beam és Solid elemként, így a modell elkészíthető tisztán Beam elemek felhasználásával, illetve tisztán Solid elemek felhasználásával. A Solid típusú elemekből készített nagyméretű gerendák esetében a hálózaskor meglehetősen nagy lehet a véges elemek száma. Ennek csökkentése érdekében a Solid és Beam típusú elemeket alkalmazhatjuk vegyesen, melynek módszerét a 5. fejezetben kidolgoztam. A Solid típusú elemekből készített modelleknél nagymértékű lokális feszültségek alakulhatnak ki, melyeknek hatásait a modellre nézve megvizsgáltam. Az 16010 mm hosszúságú gerenda szimulációját elvégeztem az előre meghatározott terhelési esetre. A szimulációkat a különböző típusú elemekből felépített, és különböző szerkezeti magasságú gerendákon lefuttattam, majd az eredményeket kiértékeltem.

A felkötés modellezéséhez elkészítettem a gerenda tartó oszlop (KR) modelljét. Az oszlop Beam elemekből álló modelljének elkészítéséhez a szerkezeti elemek csatlakozási pontjainak koordinátáit szükséges kiszámítani. A koordinátákat importálni lehet az ANSYS rajzoló programjába. A beimportált koordinátákkal kapott pontokat megfelelően összekötve megrajoltam az oszlop modelljét. Az oszlopot úgy mozgattam, hogy a csatlakozási helye az origóba került, így a gerenda beillesztésekor a gerenda azonnal a megfelelő helyre kerül. A felkötés modellezésére kidolgoztam egy módszert, mellyel meghatározható a gerendára ható vízszintes erőkomponens a felkötés helyén. Ebből az erőkomponensből meghatározható a kötélirányú erő, illetve a gerenda vízszintes irányú, a felkötésből származó terhelése. A függőleges erő változtatásával a gerenda pozíciója a felkötési pontban változik, így néhány próbálkozás után beállítható, hogy a gerenda felkötési pontja közel egy síkba kerüljön a gerenda végeivel. A szimuláció lefuttatásával kapott eredményeket összehasonlítottam a 80-as években kifejlesztett számítási módszer eredményeivel.

8. Summary

To model the Beam, the main structural support element of the overhead contact line frame posts, I have divided the Beam into its constituent parts. Using these sub-assemblies, the model of the Beam can be easily constructed. The sub-assemblies are: fixed end of the Beam, the roller end of the Beam with even and odd n numbers, the middle multi-member of the Beam, the stiffener plate, the hanging, and the load. I created the components as Beam and Solid elements, so the model can be created using only Beam elements or only Solid elements. For large Beams made from Solid type elements, the number of finite elements can be quite large when meshing. In order to reduce this, a mixture of Solid and Beam elements can be used, the method for which is developed in Chapter 5. Models made with Solid elements can develop large local stresses, the effects of which on the model have been investigated. The simulation of the 16010 mm long Beam was carried out for the predefined load case. The simulations were run on Beams constructed from different types of elements and with different structural heights, and the results were evaluated.

To model the hanging, I created a model of the Beam support column (KR). To create a Beam model of the column, the coordinates of the connection points of the structural elements need to be calculated. The coordinates can be imported into the ANSYS drawing program. By connecting the points obtained with the imported coordinates properly, I drew the model of the column. I moved the column so that the connection point was placed at the origin, so that when the Beam is inserted, the Beam is immediately placed in the correct position. To model the connection, I developed a method to determine the horizontal force component acting on the Beam at the point of connection. From this force component, it is possible to determine the force in the direction of the connection and the horizontal load on the Beam from the connection. By varying the vertical force, the position of the Beam at the anchorage point is varied, so that after a few trials the anchorage point of the Beam can be adjusted to be nearly flush with the ends of the Beam. The results obtained by running the simulation were compared with the results of the calculation method developed in the 1980s.

9. Irodalom jegyzék

Csárádi J. (1978) Vasúti felsővezetékes berendezés építése és fenntartása, Budapest, Közlekedési Dokumentációs Vállalat, 316 o.

Kovács K., Kökényesi M. (2013) Vasúti villamos felsővezeték I. Budapest, 175 o.

Csoma A. (2018) Nagyvasúti villamos vontatás felsővezetékberendezései I., Vasúti Erősáramú Alapítvány, 360 o.

Rónai E. (1997) Villamos Felsővezeték, Budapest, MÁV Rt., 192 o.

MÁV Tervező Intézet Vasúti Villamos Felsővezetékrendszer I-V, Budapest.

Szabó I. (1976) Vasúti Villamos Felsővezeték, Budapest, Közlekedési Dokumentációs Vállalat, 151 o.

P. Stanton (2019) Back to the portals RailEngineer, October 2019.

A. Baxter (2015) A Guide to Overhead Electrification, Network Rail, 56 o.

F. Kiessling, R. Puschmann, A. Schmieder, E. Schneider (2018) Contact Lines for Electric Railways, Germany, Publicis Publishing, 1104 o.

A. Garcia, C. Gómez, R.Saa, F. Garcia-Carballeira (2013) Optimizing the process of designing and calculating railway catenary support infrastructure using a high-productivity computational tool, Madrid, 14 o.

10. Ábra jegyzék

1. ábra: 110 méteres keresztmező rendszer.....	9
2. ábra: Keretállás rendszer	10
3. ábra: A KR oszlop csuklós gerenda alátámasztással és egyedi tartószerkezetekkel	12
4. ábra: Az L oszlop csuklója, a háttérben az L oszlop egészében.....	13
5. ábra: Rögzített – Lengő csatlakozású gerenda.....	14
6. ábra: Rögzített – Görgős csatlakozású gerenda	15
7. ábra: Rögzített – Lengő gerenda, túlnyúló csuklós csatlakozással.....	15
8. ábra: Lengő – Csuklós gerenda csatlakozás	16
9. ábra: Gerenda V. jellegrajza	16
10. ábra: Csuklós gerenda csatlakozás konzolfelkötéssel	17
11. ábra: Rögzített – Lengő, túlnyúló konzollal.....	17
12. ábra: G 300 gerenda, 300 mm szerkezeti magasság	18
13. ábra: G 450 gerenda, 450 mm szerkezeti magasság	19
14. ábra: Gerenda merevítőlemez G300 méret	19
15. ábra: Gerenda igénybevételi ábrája felkötés nélkül	21
16. ábra: Gerenda igénybevételi ábrája felkötéssel	22
17. ábra: A SIRTE szoftver által kiszámított gerenda elmozdulás (nagyítva)	22
18. ábra: Rögzített alátámasztás	23
19. ábra: Az L oszlopra hegesztett támléc tartja a gerendát	24
20. ábra: Görgős alátámasztás	24
21. ábra: Csuklós alátámasztás	25
22. ábra: Gerenda felkötés.....	26
23. ábra: KO 300 konzol	27
24. ábra: Félkeretállásra szerelt egyedi tartószerkezet	28
25. ábra: A szerkezeti acél tulajdonságai	30
26. ábra: G450 gerenda rögzített vég modellje	31
27. ábra: A gerenda ismétlődő n tagja	32
28. ábra: A páros n tagból álló gerenda vége	32
29. ábra: A páratlan n tagból álló gerenda vége	33
30. ábra: Merevítő lemez és annak elhelyezése	34
31. ábra: A felkötés Beam elemekből	34
32. ábra: Az összeállított gerenda a terhelések felvételére alkalmasan geometriával	36
33. ábra: A gerenda rögzített vége Solid elemből elkészítve	37

34. ábra: A gerenda középső, ismétlődő tagja.....	37
35. ábra: A páros n tagból álló gerenda vége (Solid típusú modell)	38
36. ábra: A páratlan n tagból álló gerenda vége (Solid típusú modell).....	38
37. ábra: A merevítőlemez Solid modellje	39
38. ábra: A felkötés Solid elemből elkészítve.....	39
39. ábra: A terhelést felvevő alkatrész Solid elemből.....	40
40. ábra: A Solid elemekből összeállított gerenda.....	41
41. ábra: A beolvasott Beam modell a végeelem szoftverben	42
42. ábra: A G300 gerenda Beam modell kényszerei és terhelései.....	43
43. ábra: G300-16010 gerenda elmozdulása	44
44. ábra: G300 16010 Gerendában fellépő feszültségek	44
45. ábra: A G450-16010 gerenda Beam elemekből, kényszerek és terhelések.....	45
46. ábra: G450 Beam Maximum Combined Stress	45
47. ábra: G300-16010 Solid elemekből – elmozdulás.....	46
48. ábra: G300-16010 Solid elemekből – Feszültség [MPa].....	46
49. ábra: A behálózott gerenda.....	47
50. ábra: A G-450 gerenda elmozdulása	48
51. ábra: A G-450 gerenda feszültségei	48
52. ábra: A gerenda ismétlődő tagjának vizsgálata.	49
53. ábra: Az egyszerűsített modell vizsgálata	49
54. ábra: Az egyszerűsített modell feszültségei	50
55. ábra: A 10 mm széles heveder hatása az övvas feszültségeire	51
56. ábra: A 15 mm sugarú lekerekítés hatása.....	52
57. ábra: A vegyes modell kialakítása	54
58. ábra: A vegyes modell a terheléseket felvevő elemekkel.....	55
59. ábra: A vegyes modell kiugróan magas feszültség eredményei	55
60. ábra: A kis területre koncentrálódó erők nagy feszültségeket hoznak létre	56
61. ábra: A módosított vegyes modell	56
62. ábra: A módosított vegyes modell feszültsége	57
63. ábra: A középső tagok feszültsége	57
64. ábra: KRC 14 oszlop modellje	59
65. ábra: Az oszlop csatlakozási pontja a koordináta rendszer origójára állítva	61
66. ábra: A KRC oszlop és a G450 gerenda csatlakozása.....	61
67. ábra: A felkötés helyettesítése erőpárokkal.	63
68. ábra: A futtatásra előkészített modell	63

69. ábra: A felkötés helyén létrejövő reakcióerő.....	64
70. ábra: A terhelések hatására kialakuló elmozdulások.....	65
71. ábra: A végleges kötelerő és a terhelések	66
72. ábra: A csatlakozásnál megjelenő feszültségek	67
73. ábra: A terhelések alatt a gerendában kialakuló feszültségek.....	67

11. Táblázat jegyzék

1. táblázat: a KR oszlop típusválasztéka.....	11
2. táblázat: Gerenda típusok és hosszúsági választékjaik.....	20
3. táblázat: A felkötés nélküli gerenda terhelés számítása az Első program szoftverrel.....	41
4. táblázat: Az összekötő heveder szélesség változásának hatása a feszültségcsúcsra	51
5. táblázat: A lekerekítési sugarak hatása a feszültségekre.....	52
6. táblázat: A középső tagok elem, illetve csomópontjainak száma.....	53
7. táblázat: A gerenda terhelésének adatai	62
8. táblázat: A felkötés nélküli gerenda modellek eredményei	69

NYILATKOZAT

Lakatos Róbert DTXWVN konzulenseként nyilatkozom arról, hogy a diplomadolgozatot áttekintettem, a hallgatót az irodalmi források korrekt kezelésének követelményeiről, jogi és etikai szabályairól tájékoztattam.

A diplomadolgozatot a záróvizsgán történő védeésre javaslom / **nem javaslom**¹.

A dolgozat állam- vagy szolgálati titkot tartalmaz: igen nem^{*2}

Kelt: 2024. év november hó 5. nap



belső konzulens

¹ A megfelelő aláhúzendó.

² A megfelelő aláhúzendó.

NYILATKOZAT

a diplomadolgozat nyilvános hozzáféréséről és eredetiségéről

A hallgató neve: Lakatos Róbert
A Hallgató Neptun kódja: DTXWVN
A dolgozat címe: Vasúti keretállás ellenőrzésére alkalmas mechanikai modell kidolgozása
A megjelenés éve: 2024
A konzulens intézetének neve: Műszaki Intézet
A konzulens tanszékének a neve: Gépszerkezettani Tanszék

Kijelentem, hogy az általam benyújtott diplomadolgozat egyéni, eredeti jellegű, saját szellemi alkotásom. Azon részeket, melyeket más szerzők munkájából vettem át, egyértelműen megjelöltem, és az irodalomjegyzékben szerepeltettem.

Ha a fenti nyilatkozattal valótlan állítottam, tudomásul veszem, hogy a záróvizsga-bizottság a záróvizsgából kizár és a záróvizsgát csak új dolgozat készítése után tehetek.

A leadott dolgozat, mely PDF dokumentum, szerkesztését nem, megtekintését és nyomtatását engedélyezem.

Tudomásul veszem, hogy az általam készített dolgozatra, mint szellemi alkotás felhasználására, hasznosítására a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem mindenkori szellemitulajdon-kezelési szabályzatában megfogalmazottak érvényesek.

Tudomásul veszem, hogy dolgozatom elektronikus változata feltöltésre kerül a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem MATER Hallgatói Dolgozatok repozitóriumába. Tudomásul veszem, hogy a megvédett és

- nem titkosított dolgozat a védést követően
- titkosításra engedélyezett dolgozat a benyújtásától számított 5 év eltelte után

nyilvánosan elérhető és kereshető lesz az Egyetem MATER Hallgatói Dolgozatok repozitóriumában.

Kelt: 2024 év 11. hó 05. nap



Hallgató aláírása