



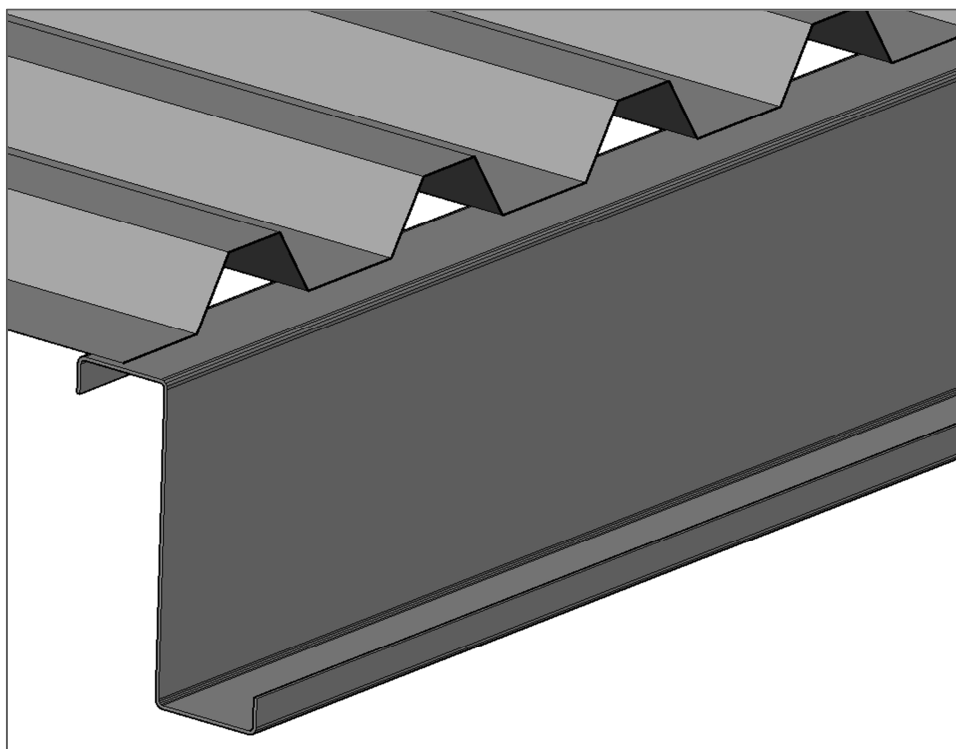
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki kar
Hidak és Szerkezetek Tanszék

XXXI. ORSZÁGOS TUDOMÁNYOS **DIÁKKÖRI KONFERENCIA**

Vékonyfalú Z szelemenek numerikus vizsgálata

KOVÁCS GYULA YR6V3W

Szerkezet-építőmérnök mesterszak
MSC, 3. félév



Konzulens: Dr. Joó Attila László
egyetemi docens

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés

2. Kísérlet ismertetése

2.1. Szerkezeti kialakítások ismertetése

2.2. Mérőeszközök és elhelyezésük

2.3. Kísérlet eredményei

2.4. Deformációs alakok

3. Megoldási stratégia

3.1. Lokális modellszint

3.1.1. Rúdmodell

3.2. Egyszerű globális modellszint

3.3. Részletes globális modellszint

4. Lokális modellek

4.1. Lokális modellek felépítésének ismertetése

4.1.1. 'Szimpla' modell megalkotása

4.1.2. 'Dupla' modell megalkotása

4.1.3. 'Átlapolt' modell megalkotása

4.1.4. Megtámasztások

4.2. Tiszta hajlítás

4.2.1. 'Szimpla' modellek esetén

4.2.1.1. Alkalmazott imperfekciók

4.2.1.2. Vizsgálat eredményei

4.2.1.3. Eredmények verifikálása

4.2.2. 'Dupla' modellek esetén

4.2.2.1. Alkalmazott imperfekciók

4.2.2.2. Vizsgálat eredményei

4.2.2.3. Eredmények verifikálása

4.2.3. 'Átlapolt' modellek esetén

4.2.3.1. Alkalmazott imperfekciók

4.2.3.2. Vizsgálat eredményei

4.2.3.3. Eredmények verifikálása

4.2.4. 'Dupla' és az 'átlapolt' modellek esetén

4.3. Hajlítás és nyírás interakciója

4.3.1. 'Dupla' modellek esetén

4.3.1.1. Alkalmazott imperfekciók

4.3.1.2. Vizsgálat eredményei

4.3.1.3. Eredmények verifikálása

4.3.2. 'Átlapolt' modellek esetén

4.3.2.1. Alkalmazott imperfekciók

4.3.2.2. Vizsgálat eredményei

4.3.2.3. Eredmények verifikálása

4.3.4. 'Dupla' és az 'átlapolt' modellek esetén

4.4. „Átlapolt-kapcsolat” lokális modellezése

4.4.1. Modell jellemzői

4.4.2. Vizsgálat eredményei

4.5. Lokális modellezés összefoglalása

5. Egyszerű globális modell

5.1. Modellek jellemzői

5.2. Alkalmazott imperfekciók

5.3. Vizsgálat eredményei

5.4. Eredmények verifikálása

5.5. Egyszerű globális modellezés összefoglalása

6. Részletes globális modell

6.1. Modellek jellemzői

6.2. Vizsgálat eredményei

6.3. Eredmények verifikálása

6.4. Részletes globális modellezés összefoglalása

7. Tanulmány összefoglalása

1. Bevezetés^{[1] [2] [4]}

Jelen tanulmányban a Lindab cég vékonyfalú Z szelemenjeinek a numerikus vizsgálatával kívánok foglalkozni. A tanulmány igencsak aktuális, hiszen e szelemenek magas minőséggel készülnek és a könnyű szerelhetőségük miatt nagy népszerűségnek örvendenek az ipari épületrendszerekben, de emellett lakossági céloknak is megfelelnek. Az átlapolat kialakítású szelemenek a rajta elhelyezett trapézlemezzel együtt, meglehetősen összetett szerkezetet képviselnek, emiatt a méretezésük is nagy szakértelmet kívánó, nehéz feladat. Például a vékonyfalú szerkezetek méretezését tartalmazó **EN1993-1-3:2006** szabvány jelenleg nem is tartalmazza az átlapolat kapcsolat számítását, ezért ezt csak kísérlettel lehet elvégezni. Ezért a célom, hogy olyan numerikusan elvégezhető modellezési eljárást dolgozzak ki, mellyel a valós kísérletek elvégzése helyett csak a numerikus analízist kell lefuttatni, mely a valós kísérlettel egyenértékű eredményre vezet. Ezenkívül távlati célként megemlítem, hogy a numerikus modellezés alapján, javaslatot szeretnék tenni a szabványos méretezési eljárás pontosítására.

A tanulmány első részében ismertetem a Hidak és Szerkezetek Tanszék által elvégzett legutóbbi kísérletsorozatot, mely a numerikus vizsgálataim kiindulási és összehasonlítási alapját adja. A célkitűzésem, hogy megtaláljam a leghatékonyabb megoldást e szelemenek numerikus analízisére, valamint hogy verifikáljam az egyes szelvények keresztmetszeti ellenállásait a kísérlet eredményeivel.

A tanulmányban ismertetésre kerül a fenti állításoknak eleget tevő megoldási program, mely során az egyszerűbb modellektől haladok az összetettebb modellek felé. Mindegyik esetben a kapott eredményeket összehasonlítom a vizsgálat által adottakkal, ezáltal egy átfogóbb képek tudok kialakítani az egyes megoldások előnyeiről és hátrányairól.

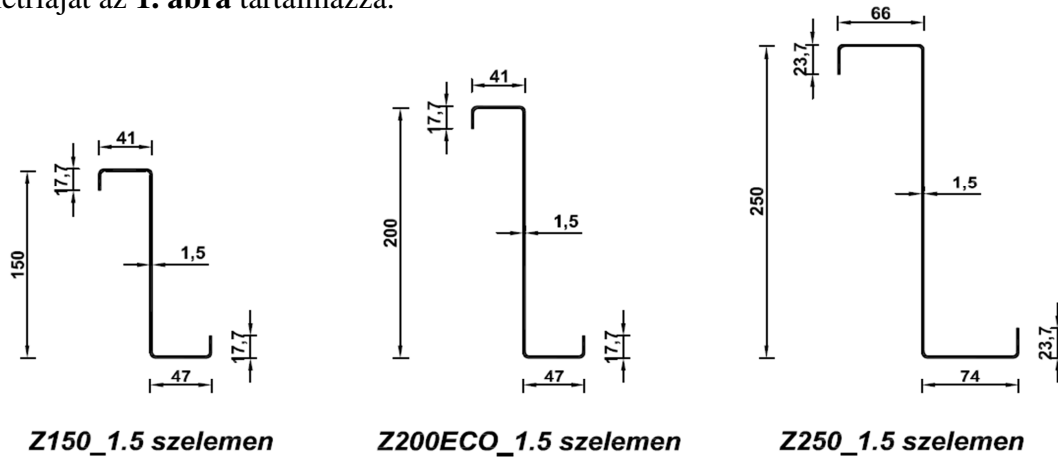
2. Kísérlet ismertetése

A kísérletet a Tanszék 2012 tavaszán végezte el melynek célja, hogy különböző szelvényű, de azonos fesztávolságú szelemenek esetén meghatározzák a tönkremeneteli módokat, valamint az így összeállított rendszer teherbírását.

Teszt	Ország	Szelvény	Folyáshatár	Vastagság	Fesztávolság	Átlapolás hossza		Trapézlemez rögzítése
			MPa	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
1	HUN	Z200ECO	350	1,5	2x5000	500	500	minden hullámvölgyben
2	HUN	Z200ECO	350	1,5	2x5000	500	500	minden hullámvölgyben
3	HUN	Z250	350	1,5	2x5000	500	500	minden hullámvölgyben
4	HUN	Z250	350	1,5	2x5000	500	500	minden 2. hullámvölgyben
5	HUN	Z200ECO	350	1,5	2x5000	1000	1000	minden 2. hullámvölgyben
6	HUN	Z200ECO	350	1,5	2x5000	1000	1000	minden 2. hullámvölgyben
7	HUN	Z150	350	1,5	2x5000	500	500	minden 2. hullámvölgyben
8	HUN	Z150	350	1,5	2x5000	500	500	minden 2. hullámvölgyben
9	SE	Z150	350	1,5	2x5000	500	500	minden 2. hullámvölgyben
10	SE	Z150	350	1,5	2x5000	500	500	minden 2. hullámvölgyben

1. táblázat: *Teszt program*

A vizsgálat során Z150-es, Z200ECO-s és Z250-es 1,5 mm-es falvastagságú szelvényeket alkalmaztak háromtámaszú kialakításban, a közbenső támasznál 10%-os, illetve 20%-os átlapolással. A vizsgálatokat az **1. táblázat** foglalja össze, míg az egyes szelvények geometriáját az **1. ábra** tartalmazza.



1. ábra: Alkalmazott szelvénytípusok

A szelemenek támaszköze 5 m volt, így a szelemenek teljes hossza 10 m lett, ahol is a fentiek értelmében az átlapolás 1 m, illetve 2 m hosszúságú szakaszt tett ki. A szelemenekre minden egyes esetben Lindab LTP20-as trapézlemezt 3 m-es hosszban fektettek, tehát a szelementávolság 1,5 m volt. A kísérleti elrendezés az **1. képen** látható, míg az ennek megfelelő tetőrendszert tartalmazza a **2. ábra**.

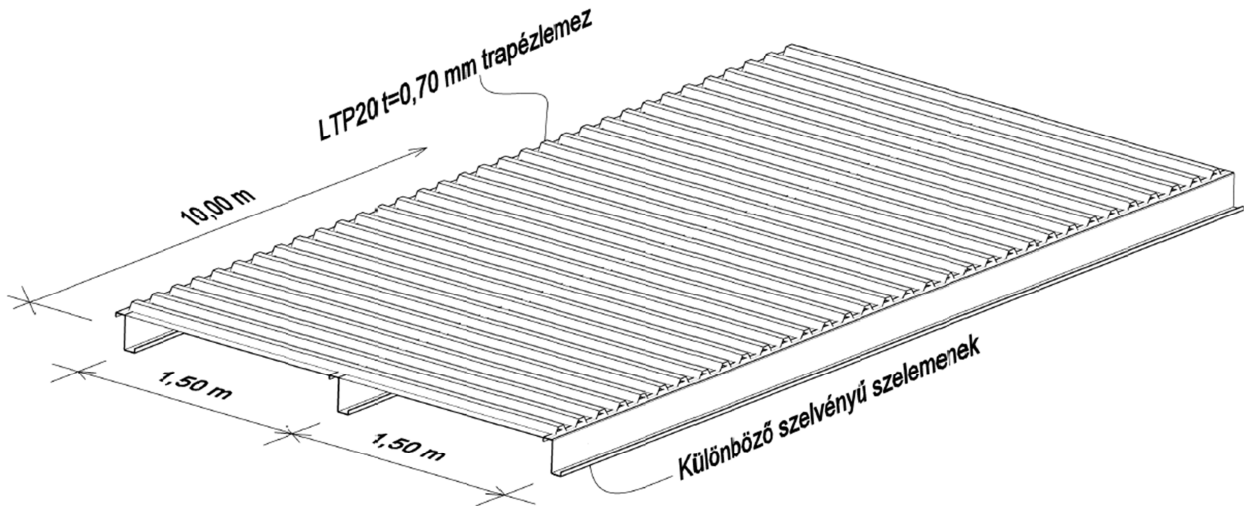


1. kép: Kísérleti elrendezés

Az ábra alapján megállapítható, hogy a kísérletet „fejjel lefelé” hajtották végre - azaz legalul helyezték el a trapézlemezt, mely teherátadó elemként is funkcionál és erre önfűró csavarok

segítségével rögzítették a szelemeneket - hiszen a megtámasztó szerkezetet csak így lehetett elhelyezni és erőteher alkalmazása esetén egyébként is ez a legmegfelelőbb eljárás.

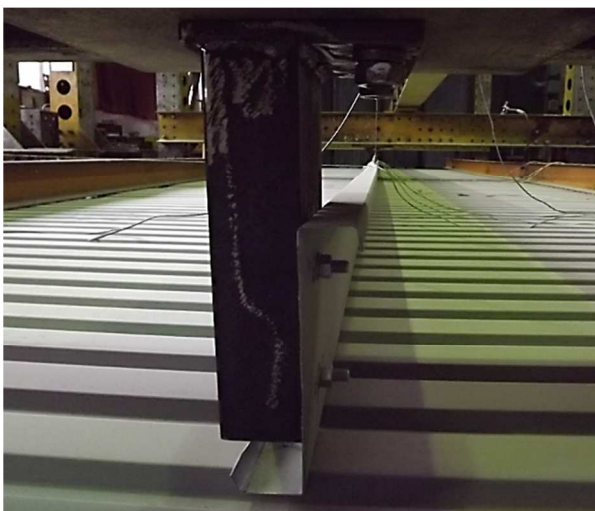
A trapézlemezre az egyenletesen megoszló terhet az alattuk elhelyezett 4 db műanyag zsákokba vezetett levegő segítségével adták rá és a tönkremenetel eléréséig terhelték az így kialakított könnyűszerkezetes tetőrendszereket.



2. ábra: Modellezett tetőrendszer

2.1. Szerkezeti kialakítások ismertetése

A közbenső és a két szélső támaszt, a hossz- illetve keresztirányban elhelyezett „I”, illetve „U” szelvényű tartók biztosították, melyekhez a szelemeneket a **2. a)** illetve **b)** képen látható módon csavarokkal rögzítették. A közbenső támasznál alkalmaztak dupla szelvényeket, hiszen háromtámaszú kialakítás esetén itt alakul ki legnagyobb, a tartóra jellemző mértékadó nyomaték és nyíróerő. A szelemenek eltérő övszélességgel rendelkeznek, mely lehetővé teszi hogy az átlapolásukat az összeforgatásuk segítségével egyszerűen ki lehessen alakítani.



a) Z200ECO szelemen szélső támasza

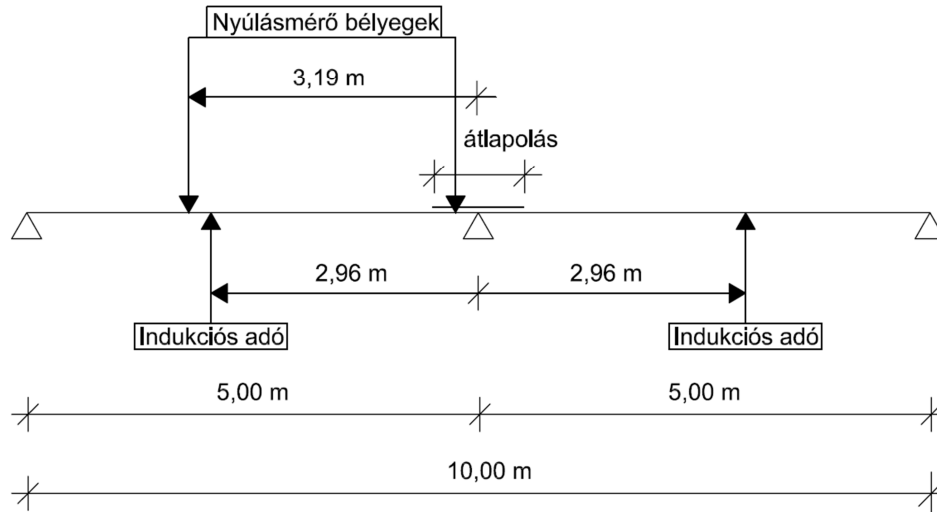


b) Z200ECO szelemen közbenső támasza

2. kép: Támaszoknál alkalmazott szerkezeti kialakítások

2.2. Mérőeszközök és elhelyezésük

A fenti kísérleti elrendezés összeállítását követően, már csak az eredmények rögzítéséhez szükséges mérőeszközök elhelyezését kellett elvégezni. Háromtámaszú tartó igénybevételi ábrájának megfelelően két jellemző helyet vizsgáltak (**3. ábra**).



3. ábra: Mérőeszközök helyzete

Egyrészt a tartó mezőközepén, a bal- és jobboldali szelemen övéhez csatlakozó indukciós adó segítségével mérték a függőleges és a vízszintes elmozdulásokat. Az indukciós adó látható a **3. képen**.



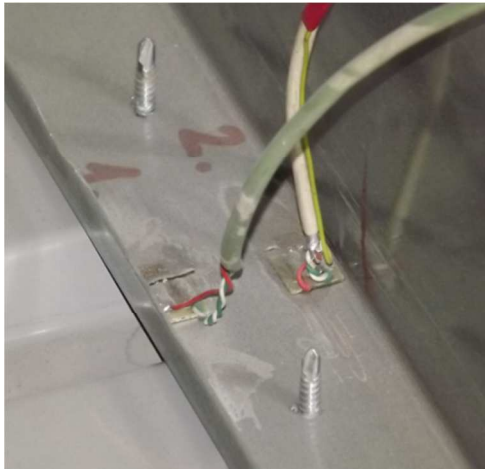
a) Indukciós adó működése közben



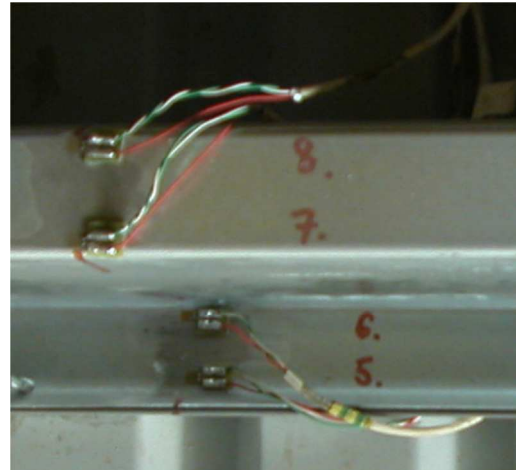
b) Indukciós adó kialakítása

3. kép: Indukciós adó

Másrészt a szelemenekben a terhelés hatására kialakuló feszültségek értékeire is szükség volt, melyet a mezőközepén, illetve az átlapolásnál elhelyezett nyúlásmérő bélyegek szolgáltattak. A bélyegek elhelyezéséről és jelöléseiről, valamint a bélyegek valós méreteiről kapunk egy összefoglalást a **4. kép a) és b)** részében. A jelölések minden szelvény esetében megegyeztek. Ennek értelmében az 1-4. jelű bélyegeket mezőközepén helyezték el, míg az 5-8. jelű bélyegeket az átlapolásnál.



a) 1-2. jelű bélyegek Z200ECO szelemenen

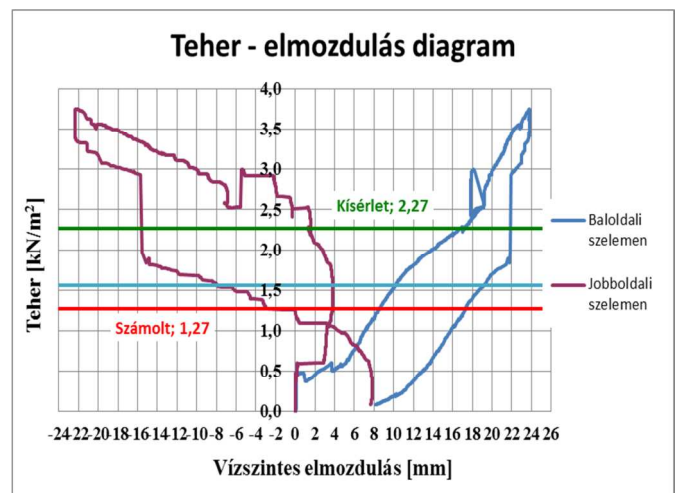
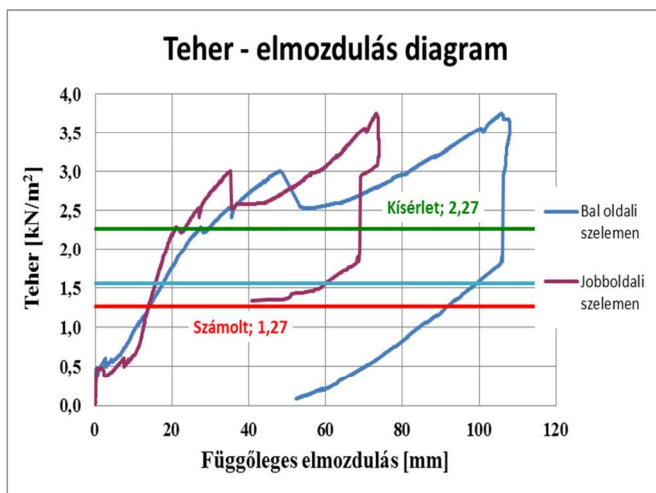


b) 5-8. jelű bélyegek Z150-es szelemenen

4. kép: Nyúlásmérő bélyegek

2.3. Kísérlet eredményei

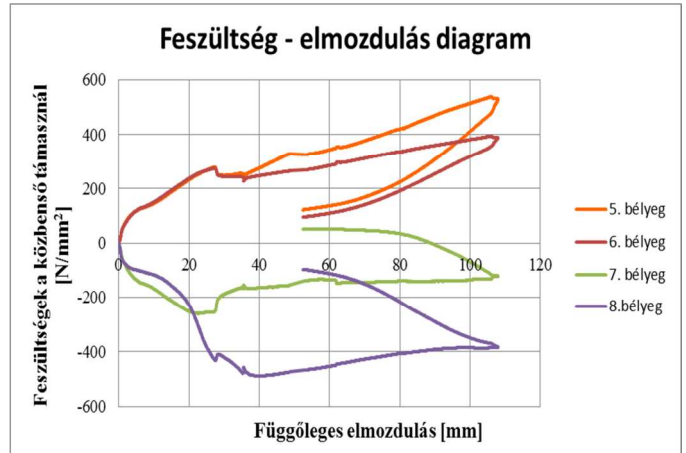
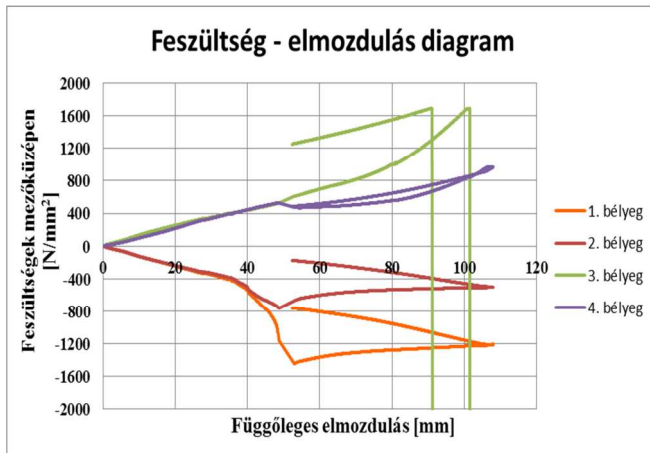
A mért adatok feldolgozását követően az 1-4. diagramokon látható eredmények születtek meg, jelen esetben Z200ECO 10%-os átlapolással ellátott szelemennél.



1-2. diagram: Teher – függőleges illetve vízszintes elmozdulás diagram

A teher-elmozdulás diagramokból megállapítható, hogy még a szabvány által meghatározott teherbírás szerint, a szelemen tönkremenetele 1,27 kN/m²-es egyenletesen megoszló tehernél következne be, valamint a kísérlet alapján történő tervezés értelmében 1,56 kN/m²-es értéknél, addig az elvégzett kísérlet alapján kijelenthető, hogy a szelemen első tönkremenetele (megfolyása) 2,27 kN/m²-es érték elérését követően következik be. Ezek alapján kijelenthető, hogy e tekintetben is érdemes a vékonyfalú Z szelemenek numerikus analízisével foglalkozni, hogy a szabványos méretezés során is még pontosabb eredményeket és többletteherbírást érjünk el.

A mezőközepén és a támasz közelében elhelyezett bélyegek által szolgáltatott feszültségekről ad összefoglalást a **3. és 4. diagram**. A szelemen ugyanazon övéén elhelyezett bélyegek által szolgáltatott feszültségértékekben eltérés figyelhető meg, melyből következtetni lehet arra, hogy a feszültségek eloszlása az öv mentén keresztirányban is változik. Tehát a keresztmetszet asszimetriájából eredő ferde hajlítás végig jelen van a szelemeneken.



3-4. diagram: Feszültség – függőleges elmozdulás diagram

2.4. Deformációs alakok

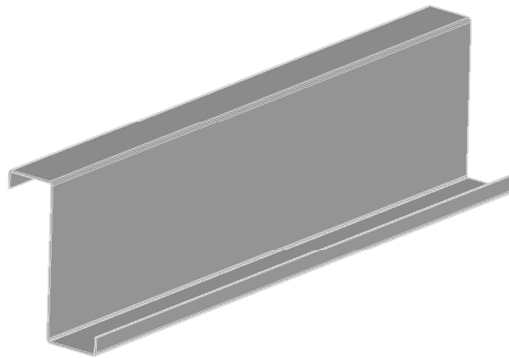
A kísérletben alkalmazott tetőrendszerek terhelése során az első tönkremenetel (1-2. diagramon a zöld vízszintes vonalhoz tartozó teherérték) az átlapolás végén jelentkezett, ez alól kivételt képez a 20%-os átlapolással ellátott Z200ECO típusú szelemen, ahol is a tönkremenetelt a mezőközepén ébredő nyomatók miatt következett be. A közbső támasznál kialakuló képlékeny csukló miatt a szerkezet további terhek felvételére is alkalmas, csak már a képlékeny teherbírási tartalékait használja ki. Az igénybevétel átrendeződés hatására a szelement tovább tudták terhelni és az előzőnél jóval magasabb 3,5 kN/m²-nél is nagyobb teherszintet is el tudtak érni. A jelenségek leírásához hozzátartozik, hogy a terhelés hatására megjelent a szelemen szabad övéének kifordulása (stabilitásvesztése) az ébredő nyomatóki igénybevétel hatására, mely a közbső támasz környezetében nyomást okoz. A vizsgált Z200ECO szelemen deformációs ábrája látható az **5. képen**.



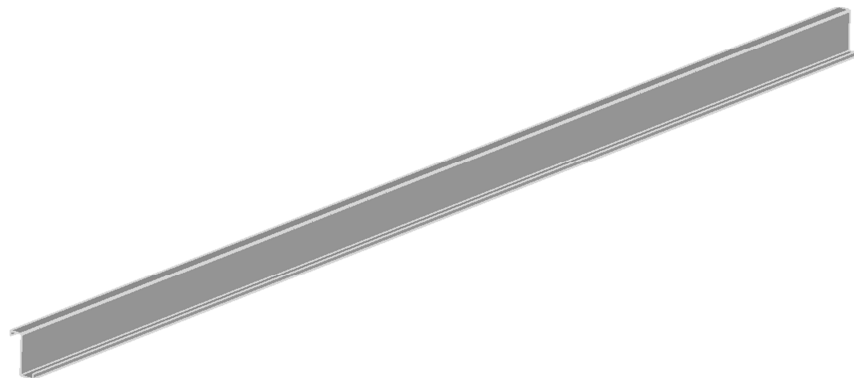
5. kép: Tönkrementel a közbső támasznál és a szabad öv kifordulása

3. Megoldási stratégia

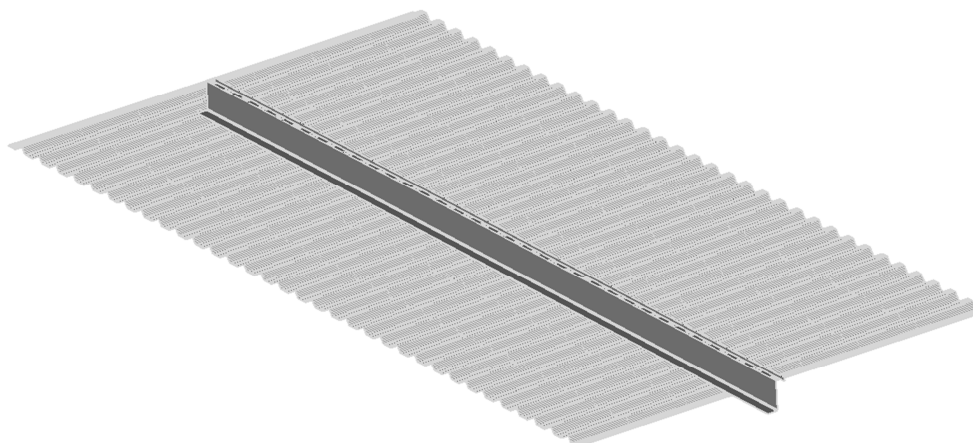
A valós kísérlet – melyek eredményei és a vizsgált szelemenek tönkremeneteleiről készített fényképei, a numerikus modelljeim verifikálására szolgálnak – bemutatását követően rátérek a megoldási program ismertetésére, melynek során röviden összefoglalom azokat a modellezési szinteket, melyek alkalmasak lehetnek a fent ismertetett célok minél nagyobb mértékű teljesítésére. Ezen belül három különböző eljárást alkalmazok, melyek a következők: *lokális modellezés (4. ábra)*, *egyszerű globális modellezés (5. ábra)*, *részletes globális modellezés (6. ábra)*. A lokális modellekkel a szelemen lokális tönkremeneteli módjainak illetve teherszintjeinek meghatározása az elsődleges cél. A lokális hatások mellett a stabilitással kapcsolatos viselkedések vizsgálatait már az egyszerű, illetve a részletes globális modell tartalmazza és ezekkel a lépésekkel egyre közelebb kerülök a valós kísérlet modellezéséhez is.



4. ábra: Lokális modellszint



5. ábra: Egyszerű globális modellszint

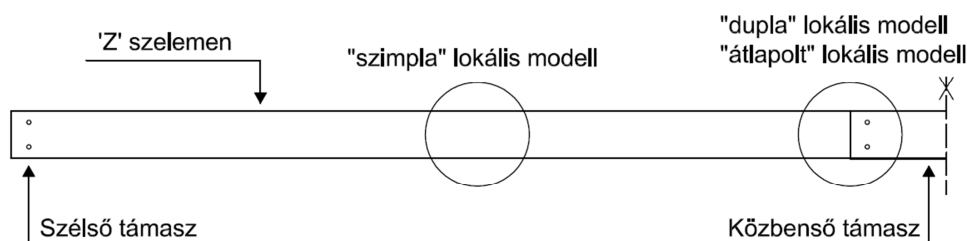


6. ábra: Összetett globális modellszint

3.1. Lokális modellszint

Mivel a vékonyfalú szelemenek tönkremeneteli módjainak verifikálása meglehetősen összetett feladat, ezért első lépésként az általam kiválasztott típusokból lokális modelleket készíték, melyek a trapézlemezes fedéssel ellátott, háromtámaszú szelemen egy-egy meghatározó szakaszán bekövetkező tönkremeneteli módokat hivatottak modellezni (7. ábra). A célom a lokális modellszinttel a keresztmetszeti ellenállások meghatározása. A modelleket tiszta hajlítás, valamint hajlítás és nyírás interakciójának vettem alá, mely során a kívánt igénybevételi szinteket rúdmodell alapján veszem fel, melyet a következő fejezetben részletesen ismertetek.

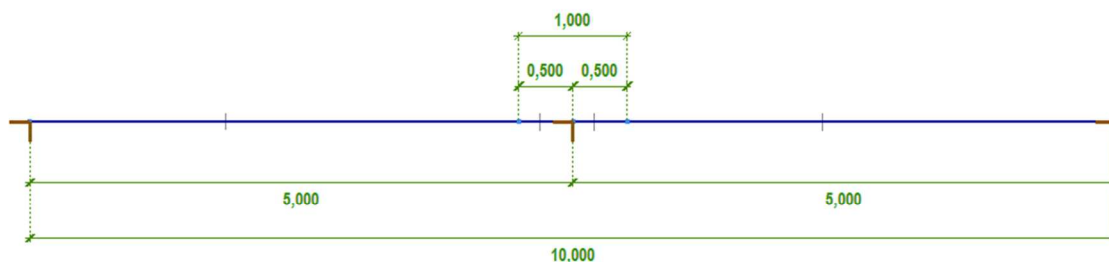
Ezenfelül készíték egy 'átlapolt-kapcsolat' nevezetű lokális modellt, ahol is a szelvényt csak tiszta nyomatóéki igénybevétel terheli. Ennek segítségével végzem el az igénybevétel-eloszlás vizsgálatát a két szelemen között.



7. ábra: Lokális modellek típusai és helyzete

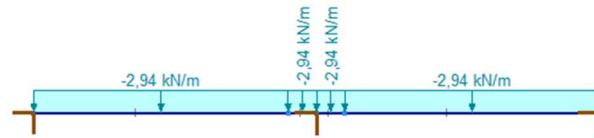
3.1.1. Rúdmodell

A rúdmodellt *AxisVM 10. 1b.* kiadású végeleemes programban készíttem el. A modell célja, hogy közelítően meghatározzam az átlapolás szélénél, illetve a mezőközépen ébredő hajlítás és nyírás interakciós arányokat – mely megmutatja, hogy mekkora a nyírás miatti redukció a nyomatóéki teherbíráshoz – a vizsgált szelvények esetén és ezenkívül, a különböző terhelés hatására kialakuló igénybevételi szinteket. A rúdmodell geometriai adatai tartalmazza a 8. ábra. A vizsgálatokat Z150, Z200ECO és Z250 típusú szelvényekre végzem el. A támaszok között minden esetben 5,00 m volt és 10%-os átlapolást alkalmazok a közbenső támasz környezetében.

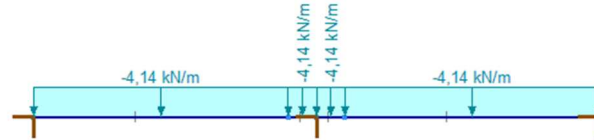


8. ábra: Átlapolt szelvényű rúdmodell

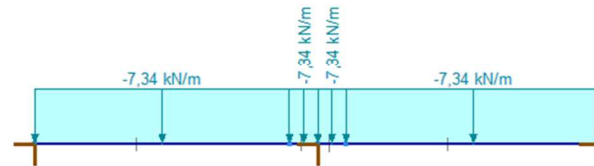
Mivel a szelemenek egymástól 1,5 m távolságra voltak, ezért a vizsgált szelemen terhelőmezeje is közelítően ekkora lenne. Azonban a kísérlet során mérték a terhelőmező szélességének pontos értékeit, melyek 1118 mm-től egészen 1229 mm-ig terjedtek. Így ezek alapján határoztam meg az egyenletesen megoszló teher értékeiből a vonalmenti terhelés értékeit (9. ábra). A terhek értékei az 1. tönkremenetelhez tartoznak, mely a szelemen globális stabilitásvesztésével együtt bekövetkező megfolyáshoz tartozik.



a) Z150_1.5



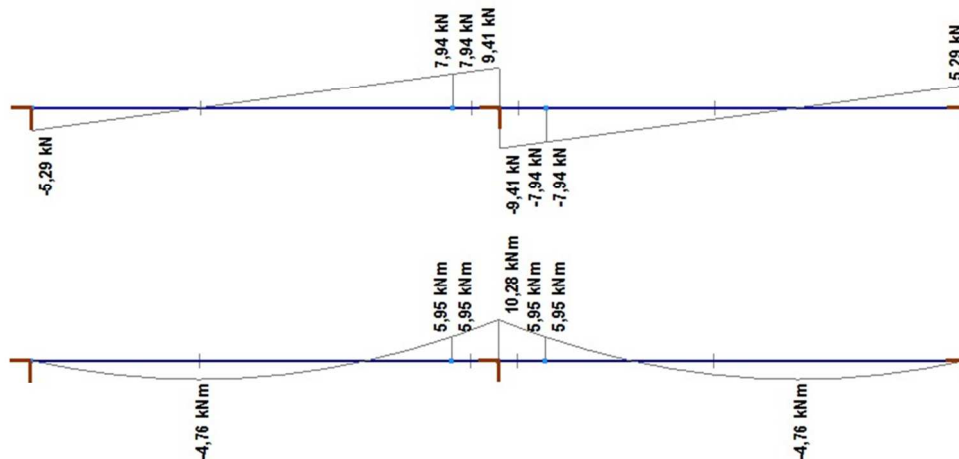
b) Z200ECO 1.5



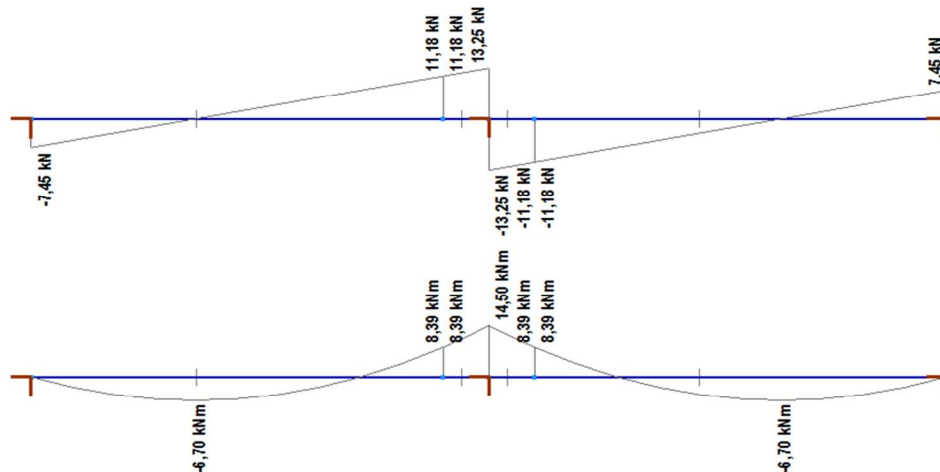
c) Z250 1.5

9. ábra: Rúdmodell terhelési adatai

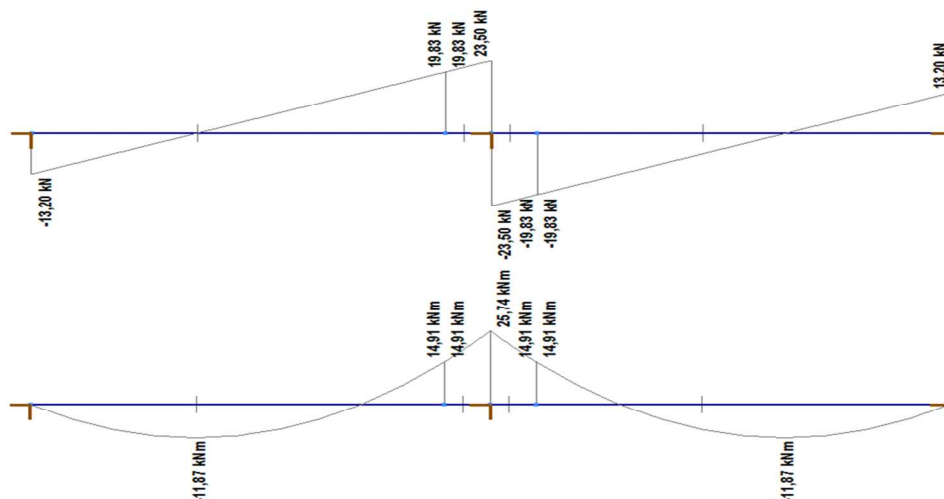
A terhelés hatására kapott igénybevételi ábrákat a **10-12. ábrák** tartalmazzák és a modell eredményeit, valamint az interakciós arányokat a **2. táblázat** foglalja össze.



10. ábra: Z150_1.5 szelemen nyíróerő és nyomatéki igénybevételi ábrája



11. ábra: Z200ECO_1.5 szelemen nyíróerő és nyomatéki igénybevételi ábrája



12. ábra: Z250_1.5 szelemen nyíróerő és nyomatéki igénybevételi ábrája

A 2. táblázat alapján egyértelműen kijelenthető, hogy az egyes szelvények esetén a nyomaték és nyíróerő interakciós arány közel azonos. A mezőközépen bekövetkező tönkremenetel vizsgálatánál elegendő a tiszta hajlításra vizsgálni az adott szelvényt, míg az átlapolás közvetlen környezetében a táblázatban meghatározott interakciós arányok szem előtt tartásával kell megadni a kívánt terhelési adatokat.

Szelvények	Hely	Nyomaték	Nyíróerő	V/M arány
		[kNm]	[kN]	[-]
Z150_1.5	mezőközép	4,76	0,00	-
	átlapolás széle	5,95	7,94	1,334
Z200ECO_1.5	mezőközép	6,70	0,00	-
	átlapolás széle	8,39	11,18	1,333
Z250_1.5	mezőközép	11,87	0,00	-
	átlapolás széle	14,91	19,83	1,330

2. táblázat: Igénybevételek összefoglalása

A rúdmodell meghatározását követően rendelkezésre állnak a lokális modellszint minden egyes modelljénél alkalmazandó igénybevételek, de mielőtt e modellek ismertetésére rátérnék, röviden összefoglalom a másik két modellezési szintet is.

3.2. Egyszerű globális modellszint

A fenti lokális modelleken felül célszerű megvizsgálni, hogy a háromtámaszú szelemen a kísérlet során felvett támaszközökkel hogyan viselkedik és vissza lehet-e kapni a kísérlet során mért teherszintet. Ennél a modellnél is GMNI analízist hajtok végre, mely tartalmazza a geometriai imperfekciókat és az anyagi nemlinearitást. Mivel a geometriai tökéletlenség egy meghatározott szinten modellezésre kerül, ezért kérdéses hogy melyek azok az alakok, amelyek biztosítani tudják a kísérlet során tapasztalt aszimmetrikus viselkedést és egyébként ez a modell elegendő lesz-e kísérleti eredmények verifikálására.

Összességében elmondható, hogy ez modell a feni ismertetett rúdmodellnek egy továbbfejlesztett változata, mely már jobban közelíti a kísérleti modellt, hiszen egyszerű rúdmodell helyett, a lokális modellekben is használt héjelemek segítségével építem fel. Azonban ez a modell is bizonyos fokú egyszerűsítésekkel rendelkezik, így csak a szelement tartalmazza. A trapézlemezt a nyomott övön elhelyezett oldalirányú megtámasztásokkal helyettesítem, ezenkívül az egyenletesen megoszló teher helyett csak a gerinc és a felső öv találkozásánál elhelyezett vonalmenti terhet alkalmazom.

Ennél a modellnél 3 fajta szerkezeti kialakítást vizsgállok. Egy végig azonos falvastagsággal rendelkező háromtámaszú szelement, ezenkívül az átlapolásnak megfelelő szakaszon dupla falvastagsággal rendelkezőt, illetve az átlapolt szakaszon kontaktelemekekkel ellátottat.

A célom ezzel a modellel Z-szelemen globális viselkedésének meghatározása, illetve hogy az alkalmazott egyszerűsítésekkel mennyire közelítem meg a kísérlet eredményeit. Elegendő-e ez a szint, vagy esetleg tovább kell lépni egy részletesebb globális modell alkalmazásához, mely esetlegesen a fenti követelményeknek sokkal inkább eleget tesz.

3.3. Részletes globális modellszint

A részletes globális modell már a valós kísérlet kialakításokat még jobban közelíti, ennek megfelelően sokkal összetettebb és részletesebben kidolgozottabb is. Továbbra is héjmodellről beszélünk és az átlapolt szakaszon kontaktelemek biztosítják a két szelemen együttműködését. Tartalmazza a trapézlemezt melyre egyenletesen megoszló teher hat, - valós szerkezetnél is gyakorta fellépő tehereset - mely az önfűrő csavaroknak megfelelő helyeken a szelemen nyomott övével is kapcsolatban áll. Emellett a kísérleti elrendezésnek megfelelő helyeken elhelyezett, a megtámasztást biztosító csavarok is a modell részét képezik.

Itt rendelkezésemre áll a Tanszéken Dr. Jakab Gábor által készített 4 fajta modell^[3]: Z150, Z200ECO 10%-os átlapolással, Z200ECO 20%-os átlapolással, illetve a Z250-es melyek csak a szelvényeikben különböznek egymástól. A modelleknél MN analízist futtatok, mely csak az anyagi nemlinearitást tartalmazza, a geometriai imperfekciókat nem. Célom, hogy a modell lineáris viselkedését összehasonlítsam a valós szerkezetével, különös figyelmet fordítva a merevségi viszonyok és teherszintek, illetve az elmozdulások összehasonlítására.

Ezenfelül célszerű lenne megállapítani, hogy ilyen fokú komplexitás - mely ezeket a modelleket jellemzi - valóban szükséges-e ahhoz, hogy a kísérleti tönkremeneteleket visszakapjuk, valamint a bonyolultságuk milyen viszonyban áll a hatékonyságukkal.

A fentiekben röviden összefoglaltam a megoldási programot, melyek segítségével a fentebb ismertetett célok elérésére törekszem. Mindegyik modellnél a kapott eredményeket összehasonlítom a kísérlet eredményeivel és értékelem az egyes eljárásokat. A következőkben a különböző modellezési szinteket részletesen is ismertetem, és emellett közlöm a vizsgálatok eredményeit. Tehát a tanulmányt a lokális modellek bemutatásával folytatom, melyek a globális hatások kizárásával csak a keresztmetszetek lokális szintű analízisével foglalkozik.

4. Lokális modellek

A fentiek alapján a **3. táblázatban** összefoglalom az elkészített lokális modelleket és az alkalmazott igénybevételek típusait.

Szelemenek hosszai az egyes igénybevételek esetén			
Szelvénytípusok		tiszta hajlítás	hajlítás és nyírás interakciója
Z150_1.5	szimpla	750 mm	-
	átlapolt - dupla	750 mm	500 mm
	átlapolt - kontakt	300 mm	500 mm
Z200ECO_1.5	szimpla	1000 mm	-
	átlapolt - dupla	1000 mm	500 mm
	átlapolt - kontakt	400 mm	500 mm
Z250_1.5	szimpla	1250 mm	-
	átlapolt - dupla	1250 mm	500 mm
	átlapolt - kontakt	500 mm	500 mm

3. táblázat: Lokális modellek összefoglalása

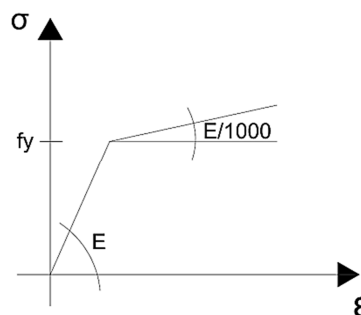
4.1. Lokális modellek felépítésének ismertetése

A numerikus modelleket az általános célú, de professzionális modellezést lehetővé tevő **ANSYS v14.0** szoftver segítségével készítettem el, mely lehetőséget biztosít a vékonyfalú szerkezetek analízisére is. A lokális modelleknél GMNI – anyagi és geometriai nemlinearitás imperfekt – analízist alkalmazok.

A szelemenek anyagjellemzőinek megadásánál a kísérleti mintavétel során meghatározott valós folyáshatárokat veszem alapul, melyeket az AGMI Anyagvizsgáló és Minőségellenőrző Zrt. laboratóriumában határoztak meg a szelemenekből kivágott 20 mm széles mintadarabokon. Természetesen az eredményeknél némi szórás figyelhető meg, így ezen értékek átlagát használom a modellalkotás során (**2. táblázat**). Az anyagi nemlinearitás biztosítása érdekében a modellnél a BISO anyagmodellt, azaz lineárisan rugalmas, képlékeny – lineárisan felkeményedő anyagmodellt alkalmazom (**5. diagram**). Ezenkívül elegendő az acél $E=210.000 \text{ N/mm}^2$ -es rugalmassági modulusának és 0,3 nagyságú harántkontrakciós (Poisson) tényezőjének a megadása, hogy az anyag további szükséges tulajdonságai is definiálásra kerüljenek.

Szelvények	Folyáshatár
Z150	461 MPa
Z200ECO	458 MPa
Z250	460 MPa

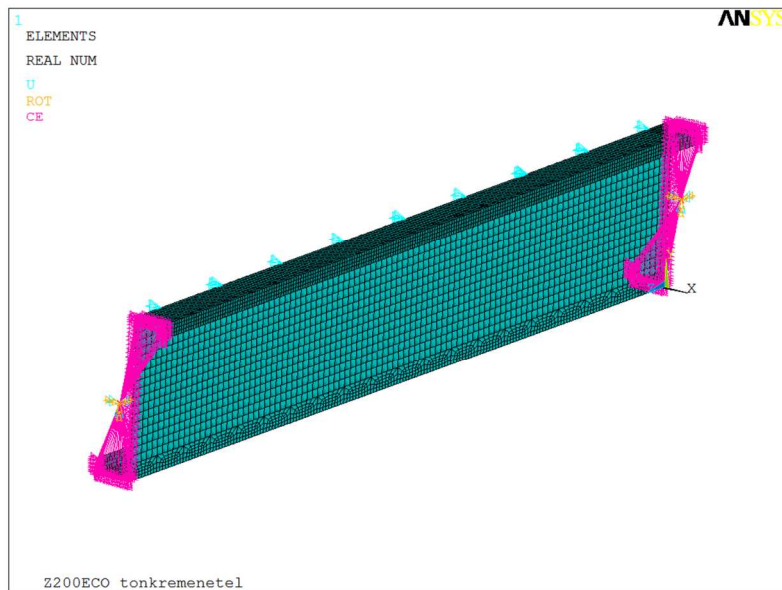
2. táblázat: Folyáshatárok



5. diagram: Alkalmazott anyagmodell

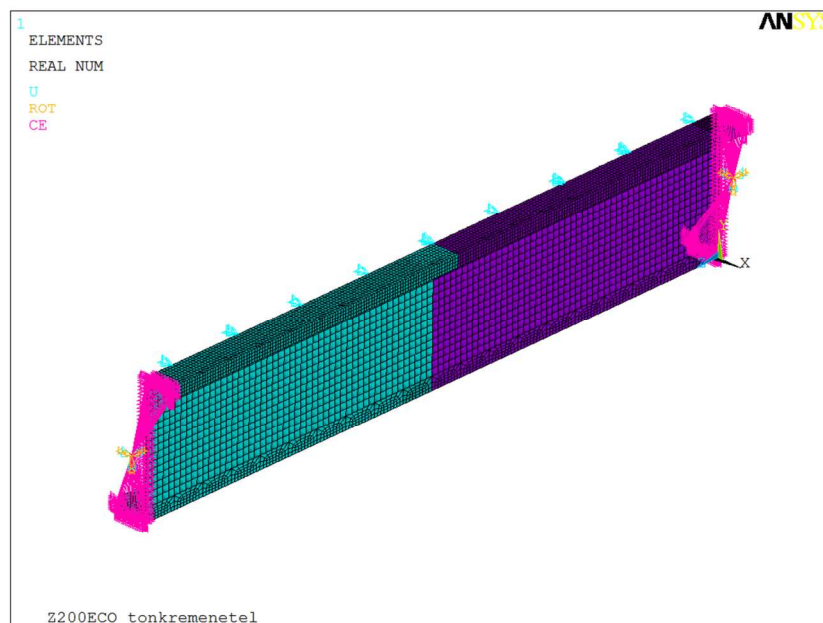
4.1.1. 'Szimpla' modell megalkotása

A mezőközépen lévő szelemen modellezésére egy „szimpla” szelvényt készíték, mely végig „t” vastagsággal rendelkezik. Mivel most csak a szelemt vizsgálok, ezért a modell a trapézlemez fedést nem tartalmazza. Ehelyett a szelemen felső, nyomott övén oldalirányú megtámasztást alkalmazok a hullámhegyeken elhelyezett rögzítéseknek megfelelő szakaszonként. A geometriát paraméteresen adom meg, így ez más modellek esetén is használható lesz. Héjmodellt készítek, melyhez a **SHELL281** jelű, 8 csomópontú héjelemet választottam, melyen a végeselemes háló legnagyobb oldalhossza nem haladja meg a 10 mm-es értéket. A felépített modell látható az **13. ábrán**.



13. ábra: 'Szimpla' lokális modell Z200ECO szelvény esetén

4.1.2. 'Dupla' modell megalkotása:

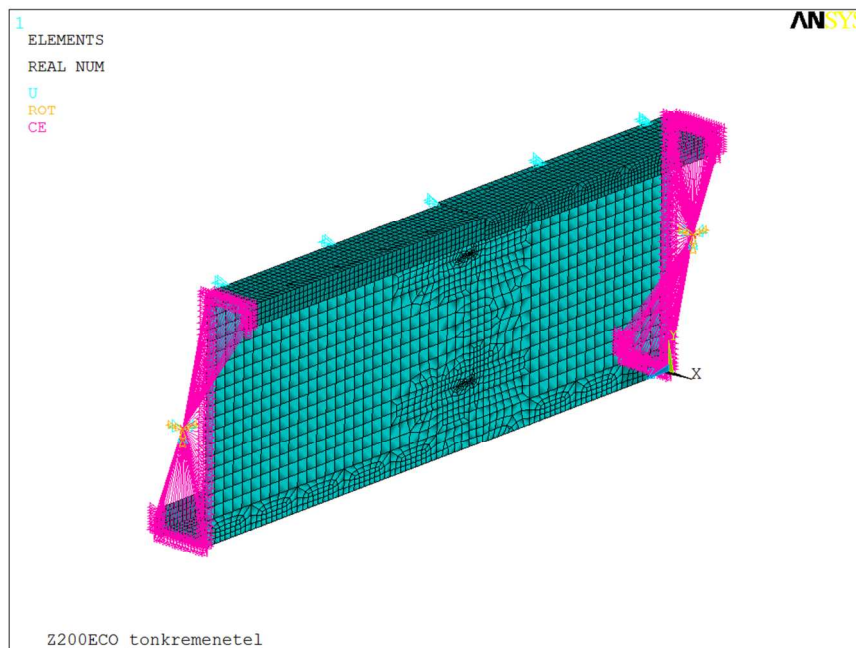


14. ábra: 'Dupla' lokális modell Z200ECO szelvény esetén

Az átlapolt szelemen vizsgálatára kétféle modellt készítek, melyek közül az egyik az ún. 'dupla' modell. A modell a 'szimpla' modellhez hasonlóan épül fel, azonban a modell egyik fele 't' vastagsággal rendelkezik, addig a másik $2 \times 't'$ vastagságú. Ezzel a közelítéssel az átlapolást közelítően modellezem, míg a modell megtámasztásait a fentiekhez hasonlóan adom meg. (14. ábra)

4.1.3. 'Átlapolt' modell megalkotása

Az 'átlapolt' nevű modellel (15. ábra) az átlapolást még pontosabban kívánom modellezni, emiatt a modell felépítésében a korábban meghatározottakhoz képest is változásokat kell alkalmaznom. Először is két szelement határozok meg keypontok segítségével, melyeket összeforgatok és így állítottam elő a szelemen modelljét az átlapolt szakaszon, ahol a szelemenek középvonalai között függőleges és vízszintes értelemben is 1,5 mm-es távolságot adok meg. Továbbra is **SHELL281** jelű héjelemet alkalmazok, azonban a szelemenek közötti kapcsolat megadására további elemek definiálására lesz szükség. Egyrészt a csavarkapcsolat modellezéséhez négy újabb keypontot adok meg, melyeket vonalakkal kötök össze és így a két csavar geometria értelemben már adott is lesz. A csavar modellezésére a **BEAM188** jelű gerendaelemet választom, ahol is elegendő lett volt egy **BEAM4** jelű elem alkalmazása, de ennek a támogatása az **ANSYS 14**-es verziójában megszűnt, legalább is a grafikus felületen már nem lehet ilyen elemet választani. A szelemen felületének definiálása során figyelembe kell vennem csavar keypontjait, hogy később a végeleemes háló felépítése már eszerint történjen.



15. ábra: 'Átlapolt' lokális modell Z200ECO szelvény esetén

Ezenfelül a szelemenek közötti – csak nyomásra és nyírásra (súrlódás révén) dolgozó – kapcsolat biztosítása érdekében **CONTA174** (kontaktelem) és **TARGE170**-es (célelem) típusú elemeket kell megadnom, melyek támogatják a 8 csomópontú felületelemeket. Ehhez az egyik szelement teljes egészében kijelölöm és megadom a kontaktelemeket, majd a másikon definiálom a célelemeket. Ezt követően a kijelölést megfordítom és a korábbi felületen alkalmazott célelem mellett a kontaktelemeket is megadom, ezután a másikon is

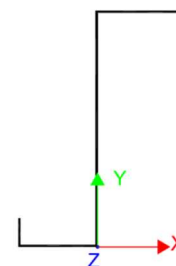
ehhez hasonlóan járok el (ezt hívják szimmetrikus kontakt kialakításnak). Ezen kapcsolati elemek alkalmazásánál szem előtt kell tartani, hogy a felületek normálisa egymással szemben mutasson, különben nem jön létre a kapcsolat. **CONTA174**-es elem számos beállítással (keyopt) rendelkezik, melyek a minél pontosabb modellezést hivatottak biztosítani. Itt fontos megadni, hogy az átlapolt szelemenek a terhelés során (pl. hajlítási igénybevétel) ne metsződjenek egymásba, azaz tartsák a közöttük lévő távolságot és ne zárják a szelemenek közötti hézagokat.

Végezetül megjegyezném, hogy a gyorsabb megoldás elérése érdekében rövidebb szelemenhosszokat alkalmazok, de a végeelemes hálót is jobban sűríttem, mely így 3 mm oldalhosszúságú lesz.

4.1.4. Megtámasztások

A szelemen két végének megtámasztását minden egyes esetben a terheknek megfelelően adom meg, melyekről a **4. táblázat** ad összefoglalást. A táblázatban szereplő ROT jelölés az adott tengely elfordulás elleni megfogását, míg az U jelölés az adott irányban az eltolódás elleni megtámasztást jelenti. Természetesen ehhez hozzátartozik a szelemen felső, nyomott övének oldalirányú ('x' tengely) megtámasztása a trapézlemez rögzítésének megfelelő helyeken.

Megtámasztások		
Igénybevétel típusa:	1. vég	2. vég
tiszta hajlítás	UX, UY, UZ, ROTY, ROTZ	UX, UY, UZ, ROTY, ROTZ
hajlítás és nyírás interakciója	ROTX, ROTZ	ROTX



4. táblázat: *Megtámasztási viszonyok*

4.2. Tiszta hajlítás

A lokális modelleket először tiszta hajlítás esetére vizsgálom meg. Az egyes igénybevételek bemutatásánál azonos felépítést követek. Ismertetem a geometriai nemlinearizációt biztosító imperfekciókat, melyeket az egyes szelvényeknél alkalmazok. Ezt követően a vizsgálat eredményeit diagramok formájában foglalom össze és összevetem a valós kísérlet során mért adatokkal.

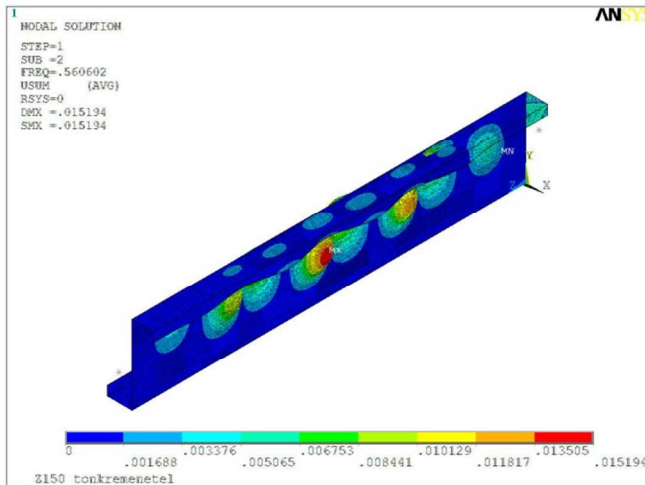
4.2.1. 'Szimpla' modellek esetén

A következőkben mindhárom szelvényt együtt mutatom meg, így az egyes szelvények közötti különbségek jobban kivehetők. Továbbiakban a modell típusok ismertetésénél a 'szimpla', a 'dupla' és az 'átlapolt' sorrendet követem.

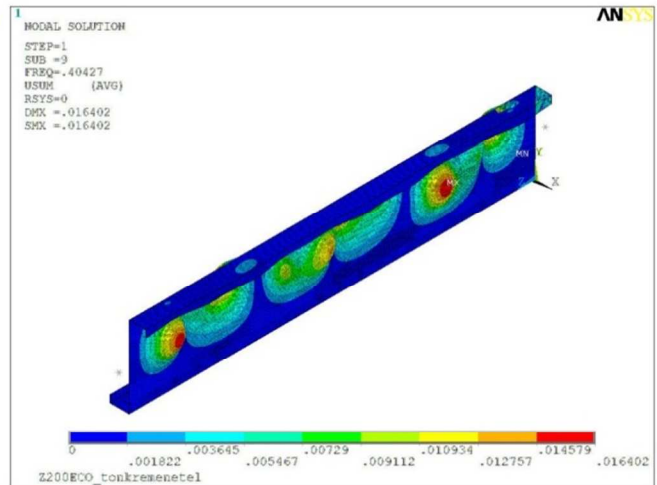
4.2.1.1. Alkalmazott imperfekciók

Ezek alapján ismertetem az egyes szelvények tiszta hajlítása során alkalmazott imperfekciókat (**16-18. ábra**). Az egyes szelvényeknél az adott teher esetén mindig stabilitási analízist futattam, melynek célja az első 100 db kihajlási alak meghatározása volt. Ezekből választottam ki azokat az alakokat, melyeket geometriai imperfekcióként

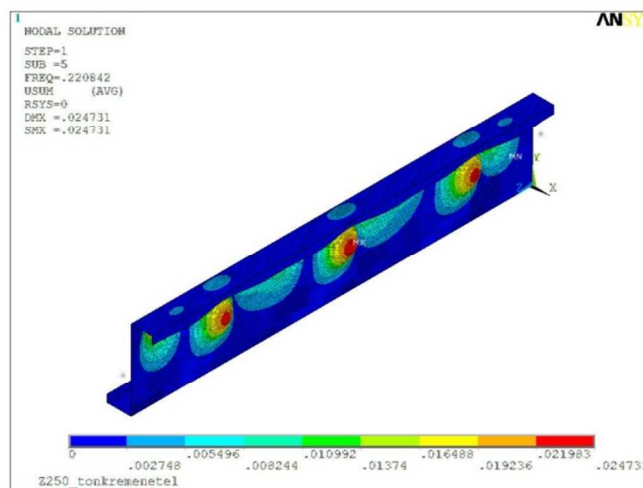
alkalmaztam az ezt követő analízis során. Ezen alakokat egy általam meghatározott szorzóval helyeztem el az eredeti szelvényen, melynél szem előtt tartottam, hogy az így kialakuló maximális amplitúdók (képaláírásoknál ismertetem őket) ne haladják meg jelentősen a szabvány által előírt maximális értéket, amely az adott lemez szélességének 200-ad része. Az egyes szelvények imperfekcióként használt kihajlási alakjaiban számos hasonlóság figyelhető meg. Egyrészt mindegyiknél megjelenik a gerinc szinusz hullámot követő horpadási alakja, másrészt az övekben is ehhez hasonló jelenség tapasztalható, igaz nem annyira domináns mértékben.



16. ábra: Z150 – imperfekció
max. amplitúdó: 0,214 mm



17. ábra: Z200ECO – imperfekció
max. amplitúdó: 0,213 mm



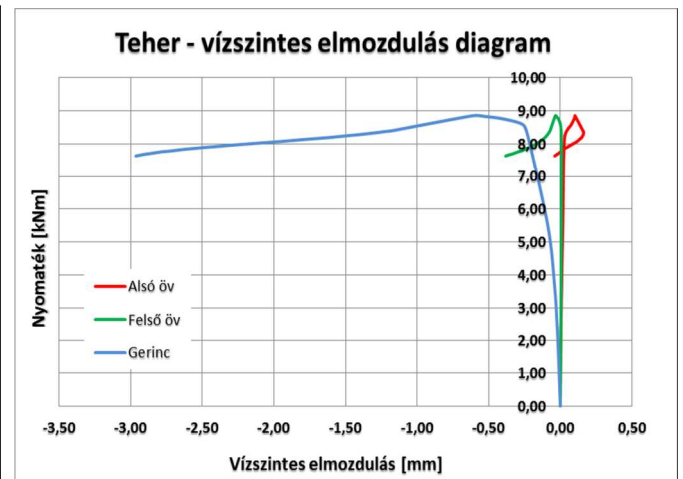
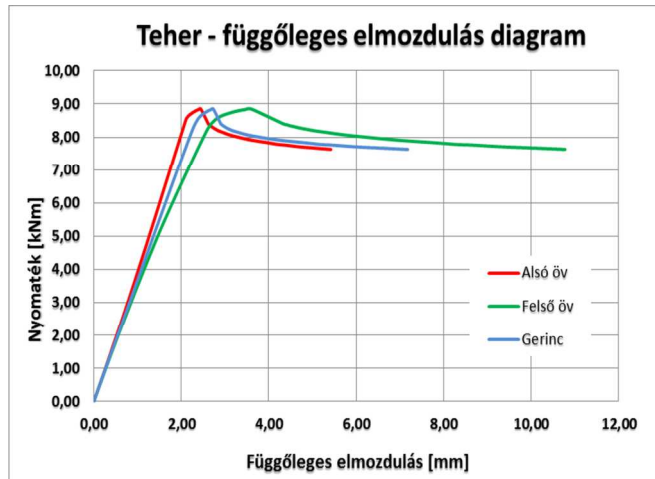
18. ábra: Z250 – imperfekció
max amplitúdó: 0,322 mm

4.2.1.2. Vizsgálat eredményei

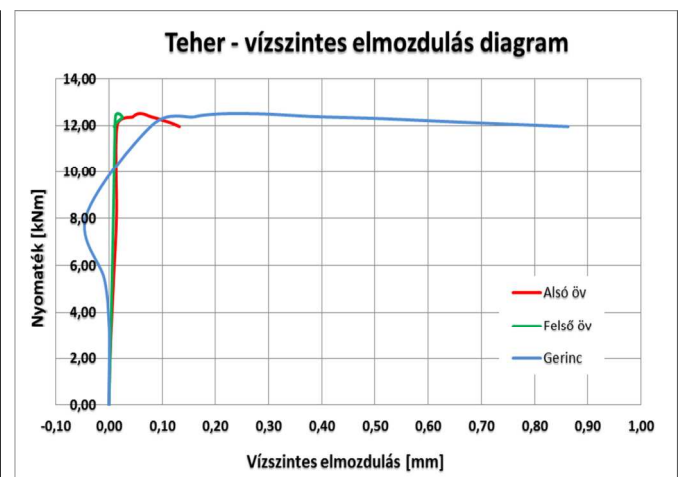
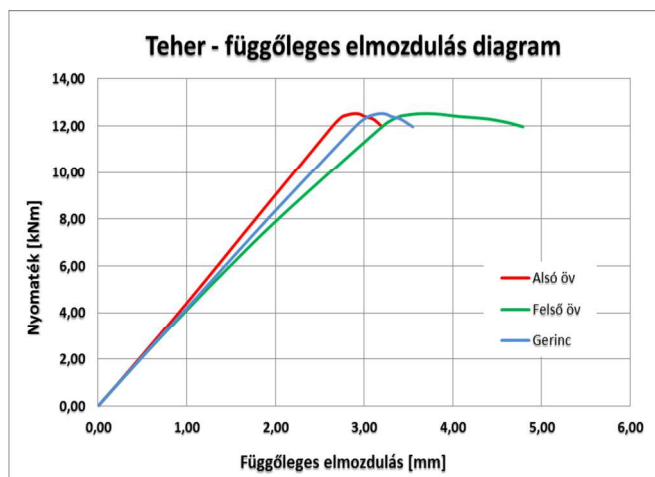
Az egyes szelvények tiszta hajlítása során kapott teher - elmozdulás diagramokat tartalmazza 6-11. diagramok.

Az analízis során a terhet nem erőteherként, hanem elmozdulás teherként adom meg. Ennek értelmében a tiszta hajlításnál a szelemen két végén egymással ellentétesen forgató hajlítónyomaték helyett, ennek megfelelő elfordulásokat alkalmazok. Erre azért volt szükség, mivel ilyen vizsgálatnál a megoldó módszer - mely jelen esetben a Newton-

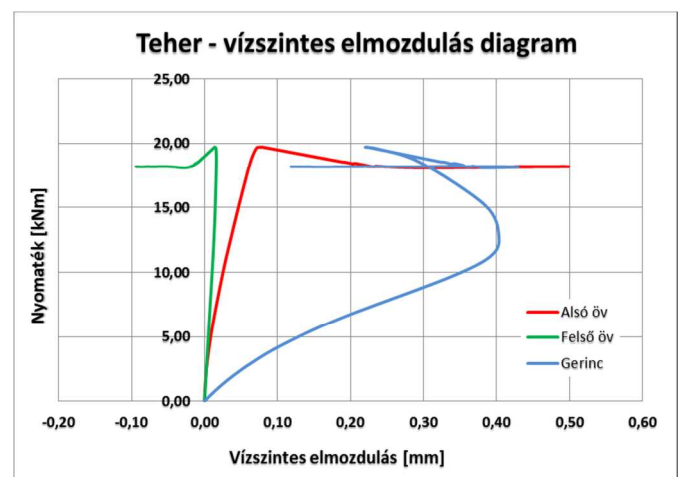
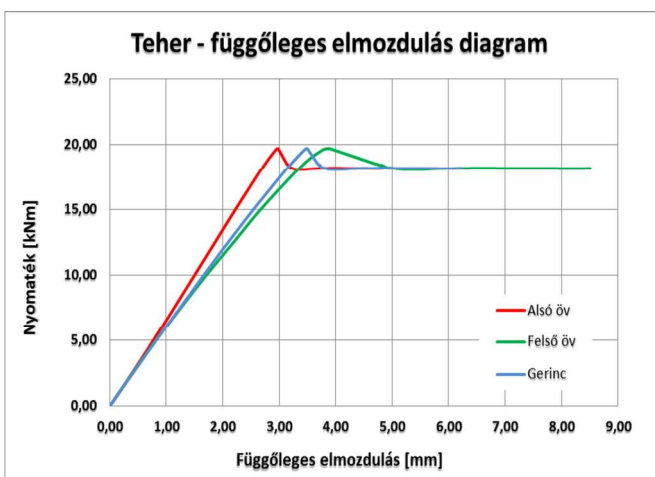
Raphson volt - kevesebb iterációt követően konvergál, tehát a megoldás ezáltal is hatékonyabb és a tönkremenetel utáni leszálló ág is visszakapható. Itt röviden megjegyezném, hogy a teher típusában történő változás, ilyen egyszerű esetekben nem jelent különbséget. A szelemenek végei megfelelő távolságokra vannak egymástól, így kizárható, hogy az alkalmazott teher egyben kényszerként meg is akadályozza bizonyos tönkremeneteli módok kialakulását.



6-7. diagramok: Z150 – teher - elmozdulás diagramok



8-9. diagramok: Z00ECO – teher - elmozdulás diagramok



10-11. diagramok: Z250 – teher-elmozdulás diagramok

A nyomatékok és az elmozdulások értékeit minden esetben a szelvény középső keresztmetszeténél határoztam meg. A felső öv, az alsó öv és a gerinc elmozdulását a felezőpontjukban elhelyezett csomópontokból határozom meg. Vizsgáltam a többi pont elmozdulását is, de jelentős eltérést egyikénél sem tapasztaltam, ezért a jobb áttekinthetőség érdekében csak a fent ismertetett pontokról készült adatokat mutatom be.

A teher és a függőleges elmozdulás kapcsolatát bemutató diagramokból kitűnik, hogy a szelvény keresztmetszetének megfolyása mely teherszinteken következik be, emellett a leszálló ágak is megjelennek. Látható, hogy az analízis során mért vízszintes elmozdulások közül a gerinc szenved el a legnagyobb értékeket.

4.2.1.3. Eredmények verifikálása

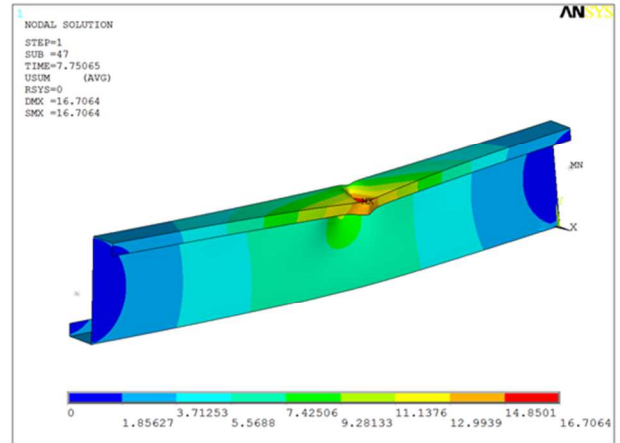
Az **5. táblázatban** összefoglalom a numerikus és a valós kísérlet során kapott eredményeket. Ez alapján megállapítható, hogy a numerikus kísérletben csak lokális hatások érvényesülnek, emiatt a szelvény teherbírás is magasabb, hiszen a háromtámaszú kialakításnál globális hatások is megjelennek. Gondolok itt a tartó nyomaték hatására bekövetkező kifordulására, mely globális stabilitásvesztést eredményez, emiatt a teherbírási értékek is alacsonyabbak lesznek. A számított eltérés a Z200ECO szelvény esetében a legtöbb, több mint 31%. Ez többek között annak is betudható, hogy a szelvény csak keresztmetszeti magasságban különbözik a Z150-s szelemtől, viszont az élborda magassága és az övek szélessége ugyanakkor, ellentétben a Z200-as ECO jelzés nélküli szelemennel. A táblázatból arra is következtethetünk, hogy a szelvény méretének növekedésével párhuzamosan, a globális stabilitásvesztés jelensége is egyre jelentősebb hatással van a keresztmetszeti ellenállás alakulására, hiszen egy zömökebb szelvénynél nagyobb teherszintnél érjük el a stabilitásvesztés határállapotát, mint egy hozzá hasonló, de karcsúbb kialakításúnál.

Eredmények verifikálása			
Szelvénytípusok:	Nyomatéki teherbírás [kNm]		Eltérés
	Numerikus kísérlet	Valós kísérlet	
Z150_1.5	8,85	6,69	-24,5%
Z200ECO_1.5	12,52	8,62	-31,2%
Z250	19,72	14,28	-27,6%

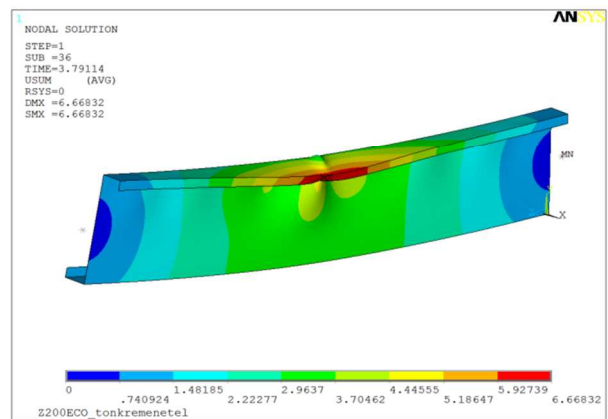
5. táblázat: *Eredmények verifikálása*

A numerikus modellezés során kapott értékek verifikálásán kívül, még célul tűztam ki, hogy a szelvény tönkremeneteli mechanizmusát is visszakapjam a vizsgálatok során, ezért a numerikus és a valós kísérlet során kapott deformációs ábrákat is ismertetem (**6-8.kép** illetve **19-21. ábra**).

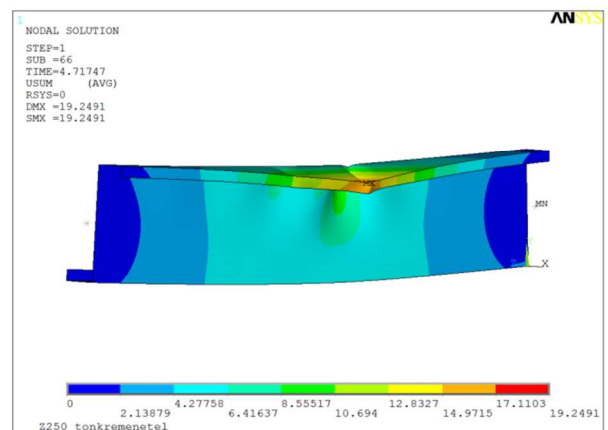
A lent bemutatott ábrák alapján összességében kijelenthető, hogy a mezőközépen jelentkező tönkremeneteli mechanizmus alakjait is sikerült visszakapni. Már a rúdmodellnél is igazoltuk, hogy ezen a tartószakaszon nyomaték az, ami dominánsan megjelenik, melyet a tiszta hajlításra igénybevett lokális modelleken kapott deformációs ábrák is igazolnak. A mellékelt képeken és az ábrákon is jól kivehető, az a fajta képlékeny tönkremeneteli mechanizmus, amely során a szelemenek az övek mentén begyűrődnek és ezzel együtt a gerinc horpadása is bekövetkezik.



6. kép és 19. ábra: Z150 szelemen valós illetve numerikus tönkremenetele mezőközépen



7. kép és 20. ábra: Z200ECO szelemen valós illetve numerikus tönkremenetele, mezőközépen



8. kép és 21. ábra: Z250 szelemen valós illetve numerikus tönkremenetele, mezőközépen

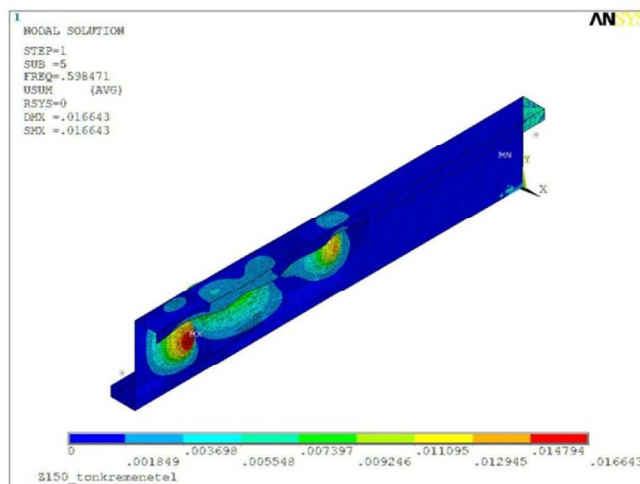
Így már kijelenthető, hogy az alkalmazott imperfekciók megfelelő eredményre vezettek, hiszen ezáltal visszakaptuk a kísérlet során is tapasztalt deformációs alakokat.

4.2.2. 'Dupla' modellek esetén

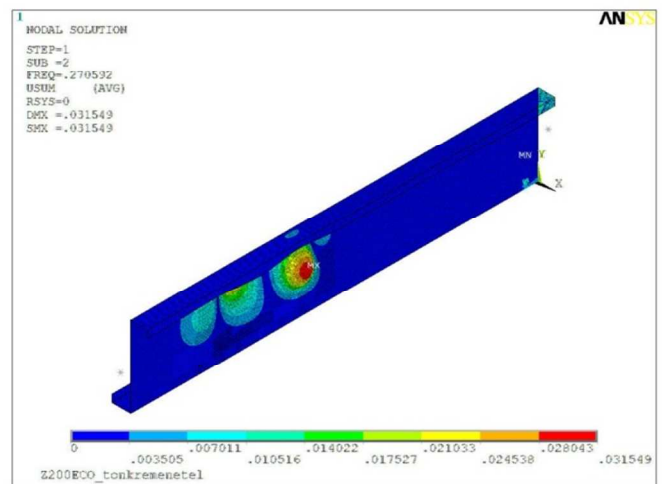
Most rátérek az átlapolt szakasz vizsgálatára készített modellek eredményeinek az ismertetésére. Először az egyszerűbb, 't' és $2*t$ falvastagsággal rendelkezőnek az adatait közlöm. Habár a rúdmodell vizsgálatánál is igazolásra került az az állítás, mely szerint az átlapolt szakaszon a hajlítás mellett jelentős nyíróerő is hat a szerkezetre, azonban a teljesség kedvéért, ezeket a modelleket első körben tiszta hajlításra is megvizsgálom. Így későbbiek során azt is meg tudom állapítani, hogy a nyíróerő megjelenése mennyiben befolyásolja a szelvény teherbírási képességét.

4.2.2.1. Alkalmazott imperfekciók

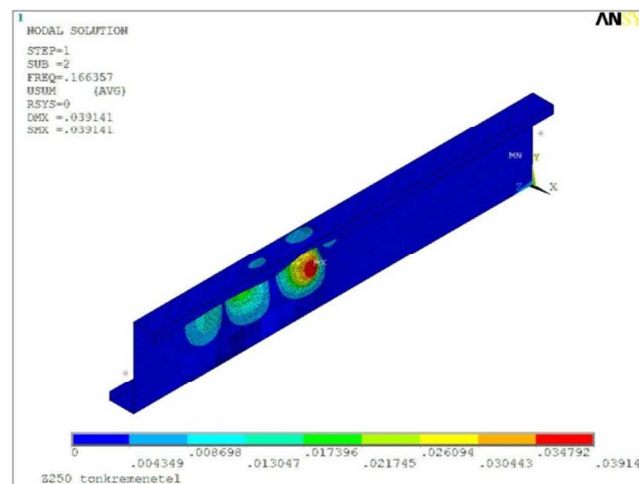
Ismertetem a 'dupla' modellek tiszta hajlítása során alkalmazott imperfekciókat (**22-24. ábra**). A kihajlási alakok több hasonlóságot is mutatnak a fenti, szimpla modelleknél használtakkal. Itt is megjelenik a gerinc szinusz hullámot követő horpadási alakja, de csak a 't' vastagságú szakaszon, viszont a $2*t$ vastagságú szakaszon nem. Itt célom volt hasonló alakok választása, mivel ezekkel a kívánt tönkremeneteli mechanizmus befűződése is könnyebben elérhető. Az maximális amplitúdó meghatározása során igyekeztem a kisebb övszélesség/200-as értéket közelítően beállítani, mely a Z150 és Z200ECO szelemen esetén 0,205 mm, míg a Z250-esnél ez az érték 0,330 mm lesz.



22. ábra: Z150 – imperfekció
max. amplitúdó: 0,211 mm



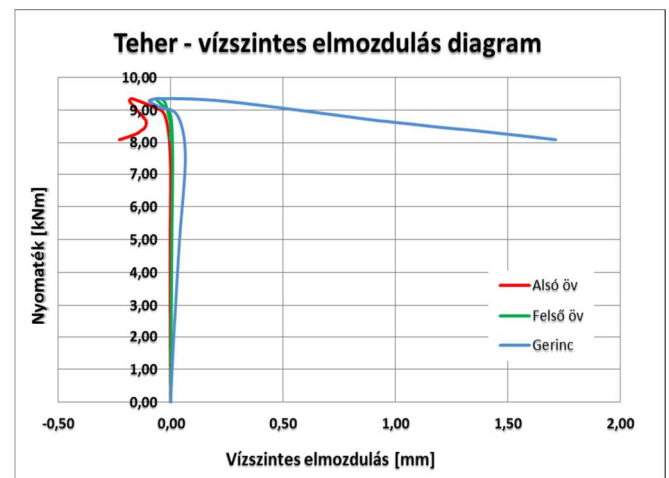
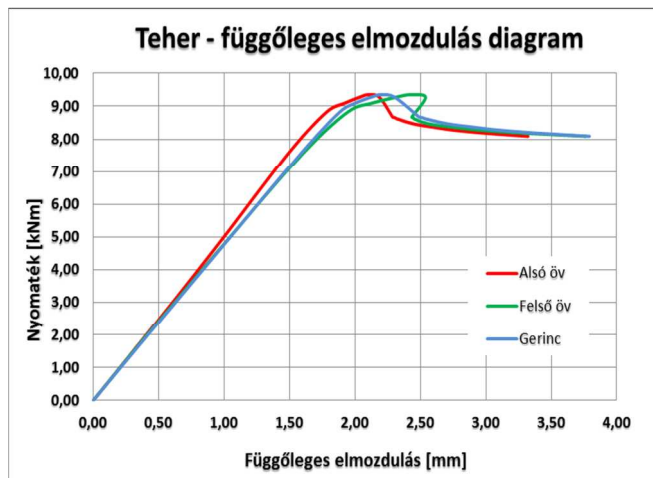
23. ábra: Z200ECO – imperfekció
max. amplitúdó: 0,221 mm



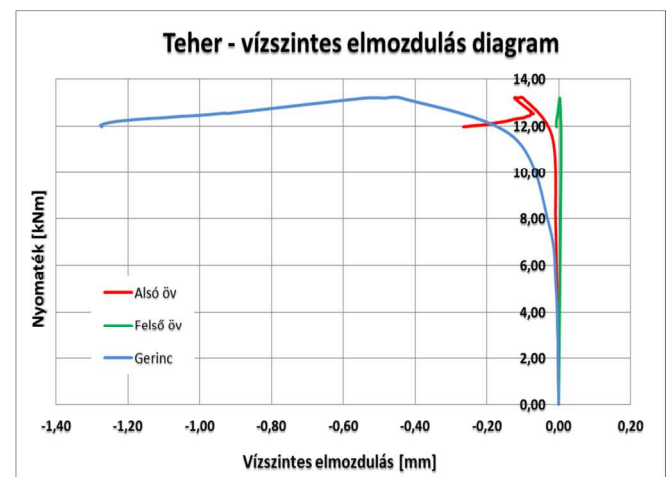
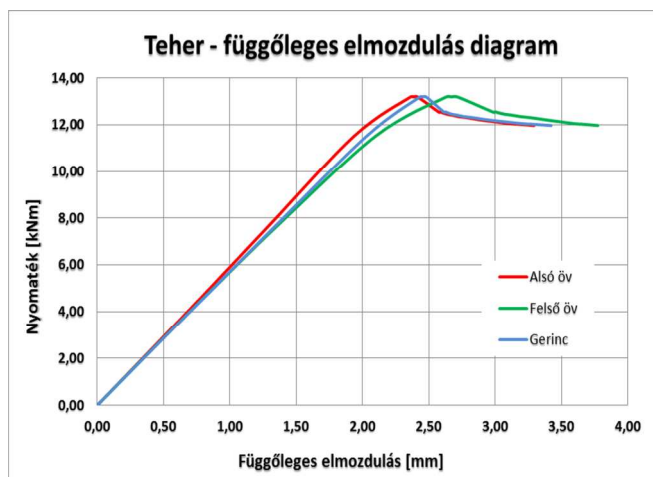
24. ábra: Z250 – imperfekció
max amplitúdó: 0,313 mm

4.2.2.2. Vizsgálat eredményei

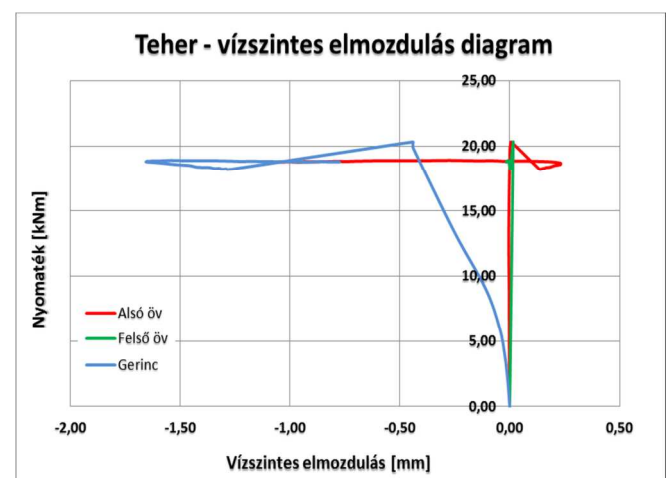
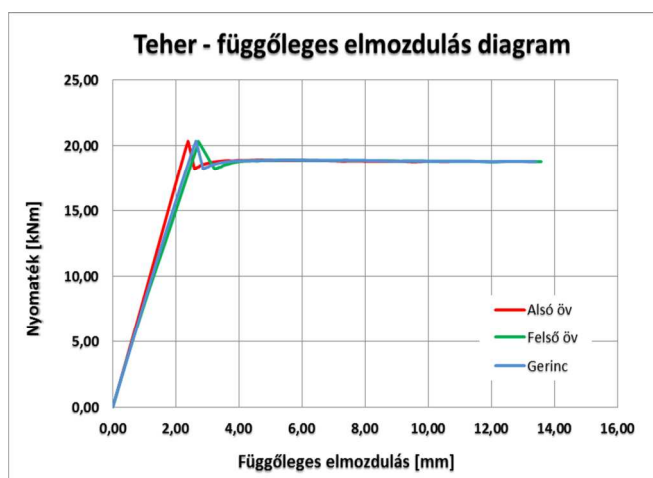
Most közlöm a 'dupla' modellek egyes szelvénytípusainál a tiszta hajlítása során kapott teher - elmozdulás diagramokat. (12-17. diagram)



12-13. diagramok: Z150 – teher - elmozdulás diagramok



14-15. diagramok: Z00ECO – teher - elmozdulás diagramok



16-17. diagramok: Z250 – teher-elmozdulás diagramok

Az előző oldalon szereplő diagramokból megállapítható, hogy függőleges elmozdulásra a teljes szelvény azonosan viselkedik, nincsenek kiugró értékek. Ellentétben a vízszintes elmozdulásnál ahol a felső és alsó öv közel azonosan mozdul el, viszont a gerinc ezektől függetlenül mozog. Tehát a fentiekből következtethetünk arra is, hogy a gerinc jelentős horpadásokat fog elszenvedni.

4.2.2.3. Eredmények verifikálása

A **6. táblázatban** összefoglalom a numerikus és a valós kísérlet során kapott eredményeket.

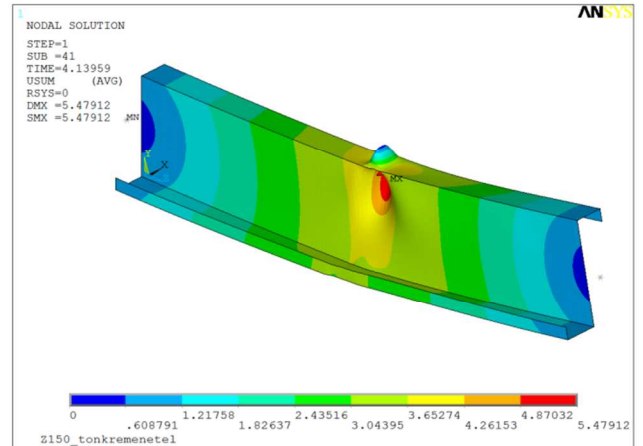
Eredmények verifikálása			
Szelvénytípusok:	Nyomatéki teherbírás [kNm]		Eltérés
	Numerikus kísérlet	Valós kísérlet	
Z150_1.5	9,35	5,71	-38,9%
Z200ECO_1.5	13,19	16,43	24,5%
Z250_1.5	20,34	13,77	-32,3%

6. táblázat: Eredmények verifikálása

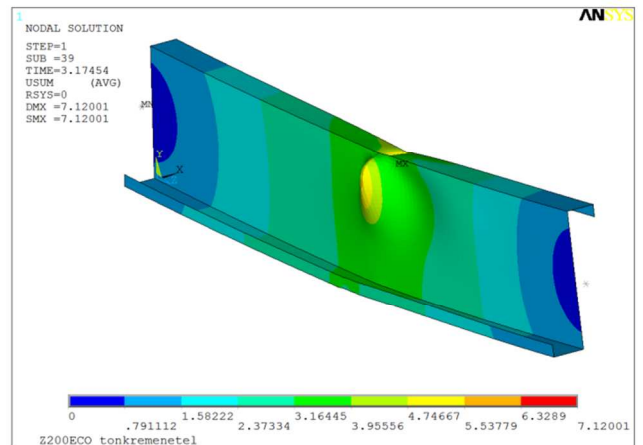
A táblázatból kitűnik, hogy most sokkal jelentősebb eltérések adódtak a numerikus és a valós kísérlet eredményei között. Még a szimpla modellnél 31%-nál nem adódott magasabb eltérés, addig az itt mért eltérések közel 40%-osak. A tendencia a Z250 és Z200ECO szelvélynél ugyanaz maradt, azaz a valós kísérleti modellnél kisebb a teherbírási szint, mint a numerikus esetében. Ez egyrészt magyarázható a 'szimpla' modellnél is ismertett okokkal, azaz a szelemennél a numerikus modellben csak a lokális hatások érvényesülnek és nem jelentkeznek a globális viselkedésből eredő stabilitásvesztések. Másrészt a rúdmodellel igazolt módon, ezen a szakaszon a hajlítás mellett jelentős nyíróerő is megjelenik, melyek jelentős hatással bírnak a teherbírási szintekre. A fenti állítás igazolása majd csak a 4.3. fejezet után történik meg, ahol a hajlítás és nyírás interakciójára veszem igénybe ugyanezen modelleket.

A fentiekől eltérő eredményt mutatnak a Z200ECO szelvélynél mért adatok, hiszen a valós kísérletről származó teherbírás több mint 24%-kal meghaladja a numerikus modell által meghatározott adatot, ellentétben a másik két szelvénnel. Ugyanakkor a Z200ECO szelvény valós kísérleténél a bélyegek által mért feszültségekből meghatározott nyomatéki ellenállás a Z250-esnél is nagyobb. Ezen adatokat célszerű ismételt megvizsgálni a globális modelleknél is.

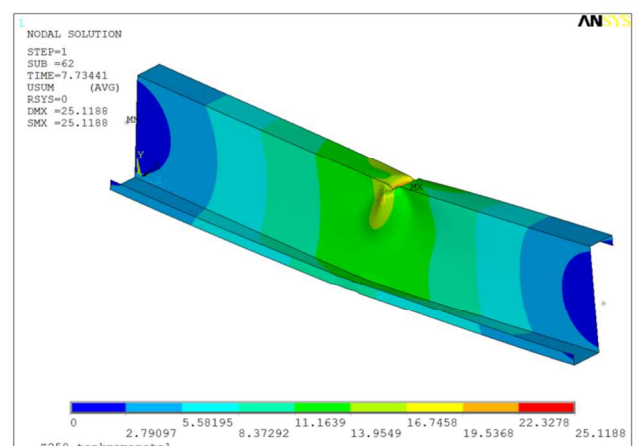
Az előzőhöz hasonlóan itt is ismertetem a numerikus és a valós kísérlet során kapott deformációs ábrákat (**9-11. kép, illetve 25-27. ábra**). A kísérlet során készített fényképek alapján elmondható, hogy a tönkremenetel mindegyek szelvélynél az átlapolt szakasz végén következett be. Míg a Z150-es és a Z250-es szelvényeknél megjelent a gerinc behorpadása és az öv begyűrődése, addig a Z200ECO-nál inkább egy nyírási horpadás jellegű tönkremenetel következett be, kissé eltolódva az átlapolás szélétől. A lokális modellekkel közelítően sikerült visszakapni a deformációs alakokat, így a tönkremeneteli képlékeny mechanizmust is. Érdekes megfigyelni, hogy amíg a horpadások a kísérlet esetén inkább a húzott öv felől indultak a nyomott öv felé, addig a numerikus modellek estén ez inkább fordítva következett be. Ugyanakkor ez a jelenség nem befolyásolja a vizsgálat eredményeit, inkább csak az imperfekciós alakokra vezethető vissza.



9. kép és 25. ábra: Z150 szelemen valós illetve numerikus tönkremenetele, átlapolásnál



10. kép és 26. ábra: Z200ECO szelemen valós illetve numerikus tönkremenetele, átlapolásnál



11. kép és 27. ábra: Z250 szelemen valós illetve numerikus tönkremenetele, átlapolásnál

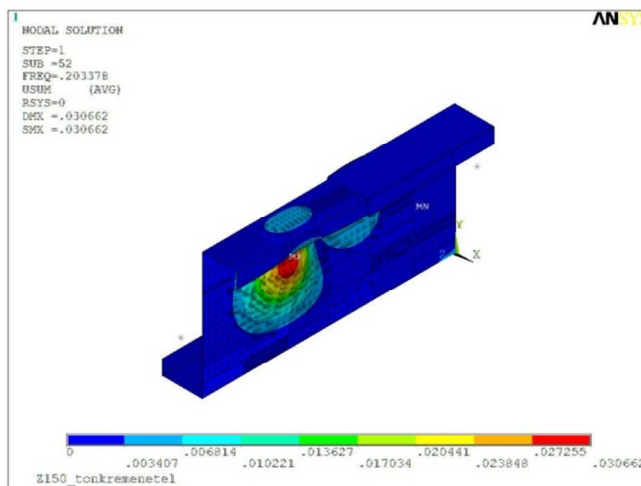
Tiszta hajlításra igénybevett 'dupla' modellek ismertetését követően, a következő fejezetben áttérek ugyanezen tartószakasz modellezésére készített, de eltérő módon felépített modell által szolgáltatott adatok bemutatására.

4.2.3. 'Átlapolt' modellek esetén

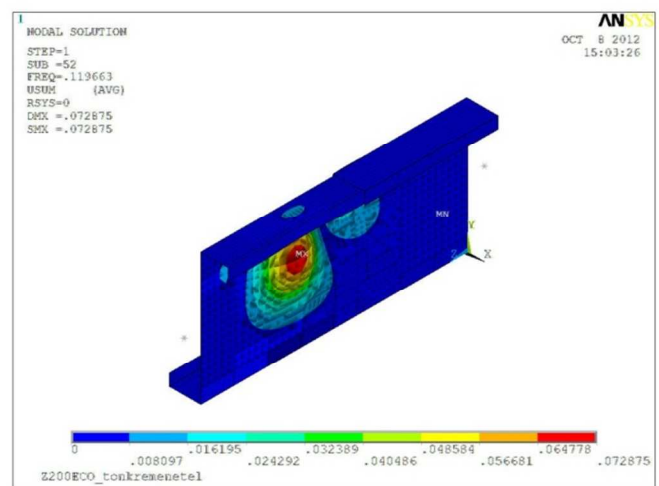
Jelen fejezetben az átlapolt szakasz pontosabb modellezésére készített változat eredményeit ismertetem. Eltérés az előző modellhez képest, hogy a dupla falvastagságú szelemen helyett mindkét szelement geometriailag is megadtam és a közöttük elhelyezett kontakt- és célelemek biztosítják a két szelvény együttlengését.

4.2.3.1. Alkalmazott imperfekciók

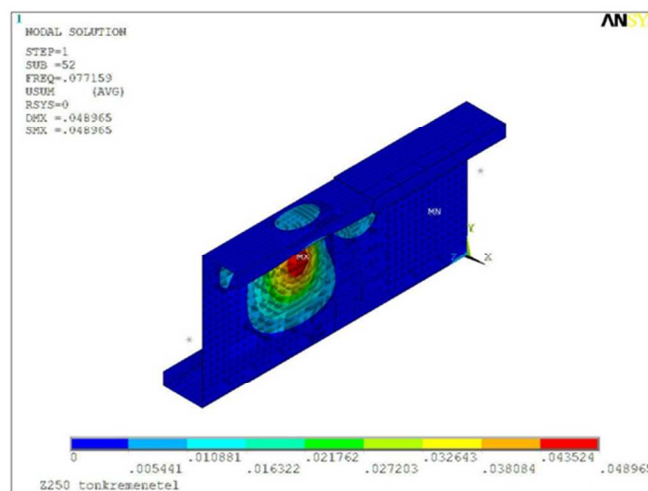
A 28-29. ábrán mutatom meg az átlapolt szelvény tiszta hajlításánál használt geometriai imperfekciókat melyeken látható, hogy a dominánsabb horpadási alak itt is a szimpla szelvény esetén jelenik meg. Az egyes szelvényeknél alkalmazott imperfekcióknál a maximális amplitúdó értéke a következő: Z150-nél 0,215 mm, míg Z200ECO-nál 0,218 mm és Z250-nél 0,294 mm. Itt is megfigyelhető, hogy az egyes vizsgálatoknál megpróbáltam tartani az imperfekcióknál alkalmazott amplitúdókat.



28. ábra: Z150 – imperfekció
max. amplitúdó: 0,215 mm



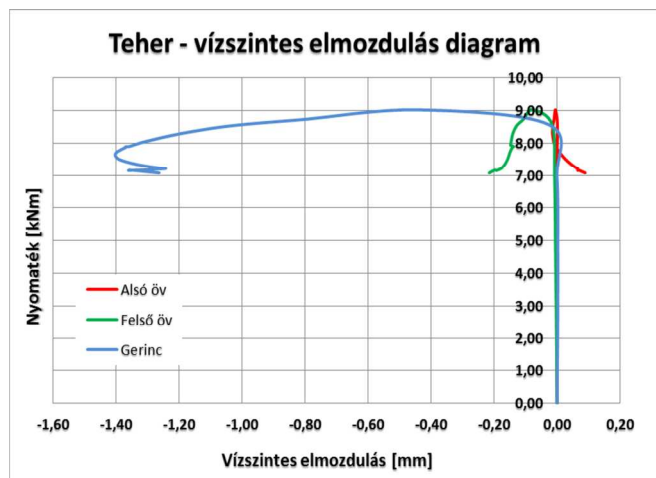
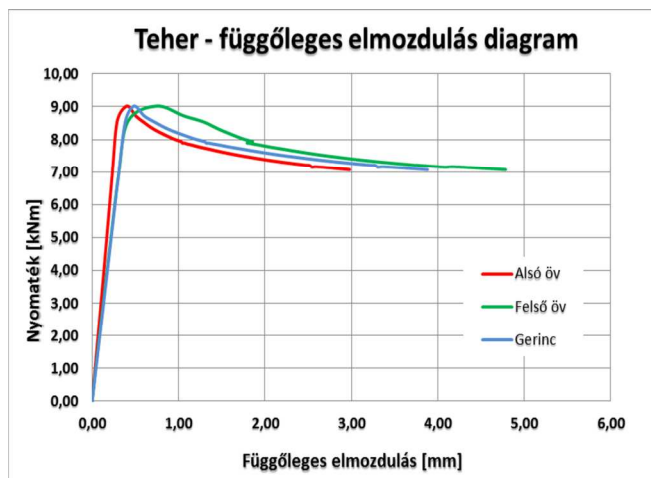
29. ábra: Z200ECO – imperfekció
max. amplitúdó: 0,218 mm



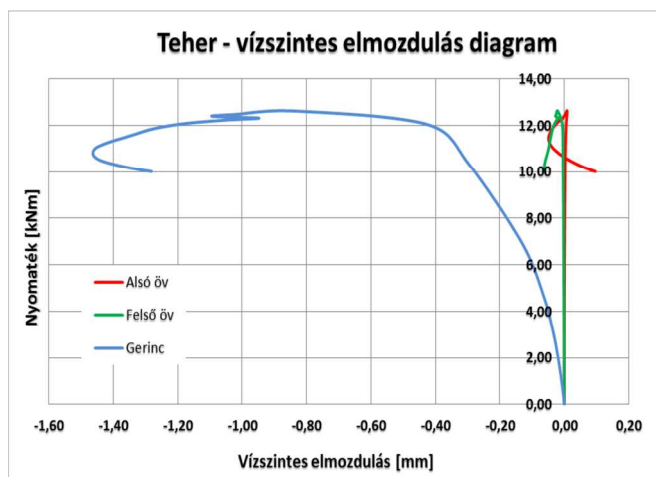
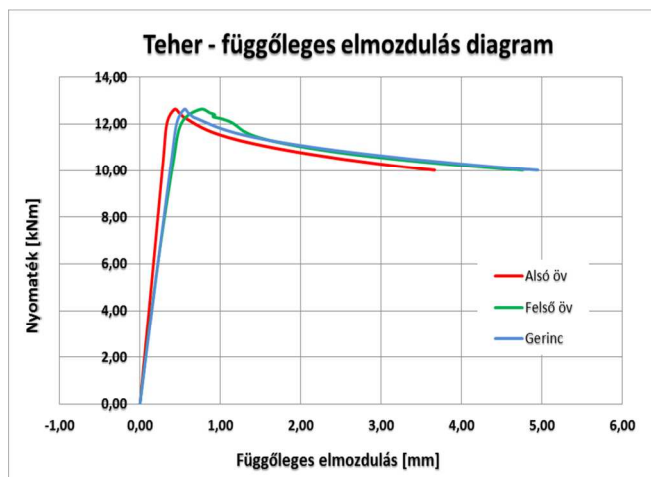
30. ábra: Z250 – imperfekció
max amplitúdó: 0,294 mm

4.2.3.2. Vizsgálat eredményei

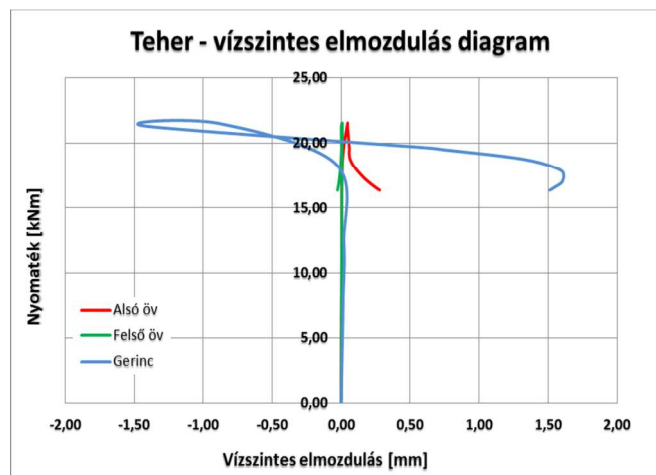
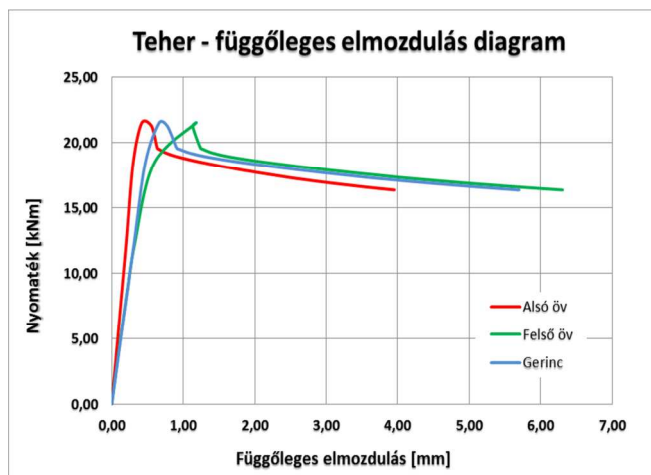
A 18-23. diagramok mutatják a vizsgálat eredményeit.



18-19. diagramok: Z150 – teher - elmozdulás diagramok



20-21. diagramok: Z00ECO – teher - elmozdulás diagramok



22-23. diagramok: Z250 – teher-elmozdulás diagramok

A diagramokból kitűnik, hogy itt is a korábban már megtapasztalt jelenség következik be. Függőleges elmozdulásra a szelvény pontjai azonosan viselkednek, de a vízszintes elmozdulásra a szelvény gerince eléri az 1,40 mm körüli értékeket, amíg a szelvény öveiben alig mérhető oldalirányú elmozdulás.

4.2.3.3. Eredmények verifikálása

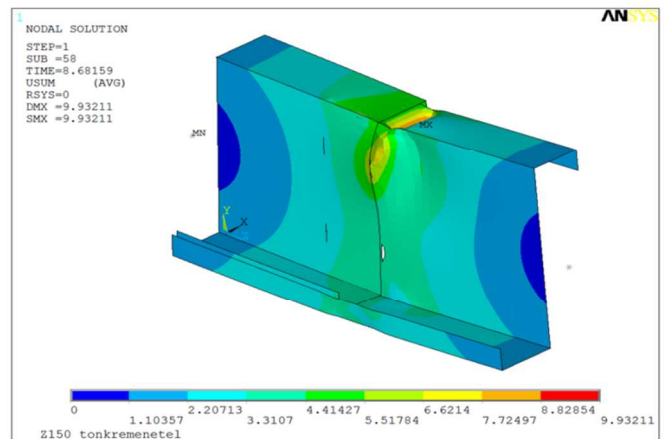
A **7. táblázatban** foglaltam össze a vizsgálat eredményeit. Itt is kijelenthető, hogy a teherbírások között még mindig több mint 30%-os eltérés figyelhető meg.

Eredmények verifikálása			
Szelvénytípusok:	Nyomatéki teherbírás [kNm]		Eltérés
	Numerikus kísérlet	Valós kísérlet	
Z150_1.5	9,02	5,71	-36,7%
Z200ECO_1.5	12,62	16,43	30,2%
Z250	21,58	13,77	-36,2%

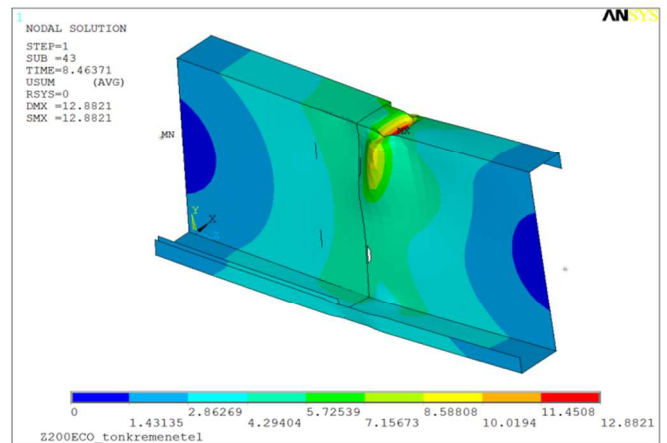
7. táblázat: Eredmények verifikálása

A táblázatban is megjelenik a 'dupla' modellnél már megtapasztalt jelenség, mely szerint a Z200ECO szelvénynél a másik két szelvénnel ellentétben, az átlapolt szakaszon számolt nyomatéki teherbírási értéke nagyobb lesz a mezőközépen számolt értéknél. Ebből az eltérésből származik, hogy még a Z150-as és Z250-es szelvénynél a numerikus modellnél kapunk magasabb értéket, addig a Z200ECO-nál a valós kísérlet szolgáltatja ugyanezt. Ezt a jelenséget érdemes lenne jobban megvizsgálni és meghatározni, hogy mely tényezők miatt következik be. Elképzelhető, hogy a szelemen geometriájával van szoros összefüggésben, hiszen már a tanulmány korábbi részében (**1. ábra**) is ismertetésre került, hogy a Z200ECO szelvénynél a Z150-nel összehasonlítva ugyanakkora öv és élborda hosszakkal rendelkezik és csak a szelemen magasságában van eltérés. Ezért ennél a szelvénynél elvégzett globális analízis végrehajtását követően, már több következtetést tudok levonni, melyen már a terhelés hatására kialakuló stabilitásvesztés is bekövetkezik.

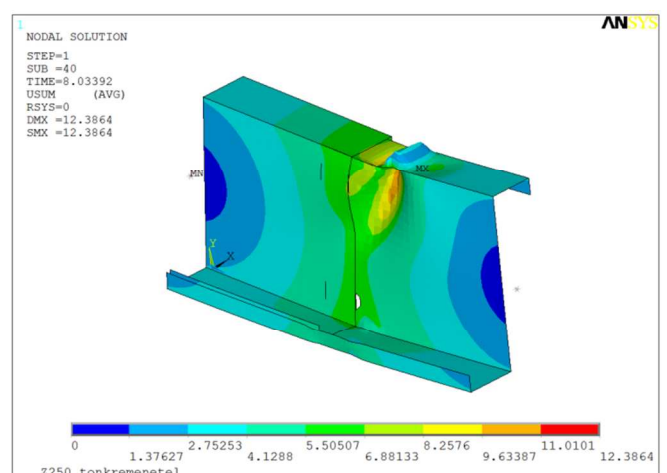
Végezetül, az előzőekhez hasonlóan itt is a **9-11. kép** és **31-33. ábra** segítségével mutatom be a kísérlet és a numerikus modellezés során kapott deformációkat. A Z150-es és a Z250-es szelemen numerikus kísérletében megjelent a kívánt képlékeny tönkremeneteli mechanizmus, azaz az övnél bekövetkező begyűrődés állapota. Ezzel ellentétben a Z200ECO-nál a numerikus modell nem adta vissza pontosan a kísérlet során tapasztalt alakot, inkább a többi modellhez hasonló begyűrődés jelensége lépett fel.



9. kép és 31. ábra: Z150 szelemen valós illetve numerikus tönkremenetele, átlapolásnál



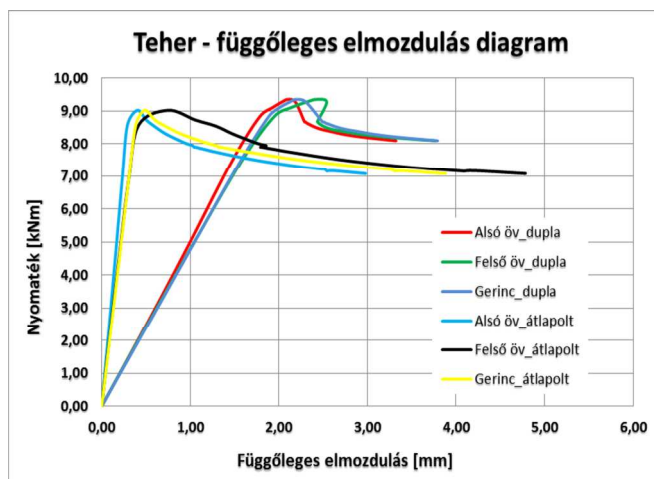
10. kép és 32. ábra: Z200ECO szelemen valós illetve numerikus tönkremenetele, átlapolásnál



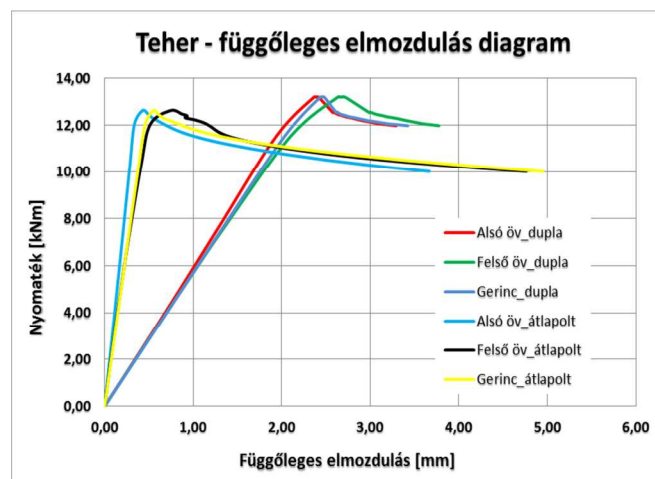
11. kép és 33. ábra: Z250 szelemen valós illetve numerikus tönkremenetele, átlapolásnál

4.2.4. 'Dupla' és az 'átlapolt' modellek összehasonlítása

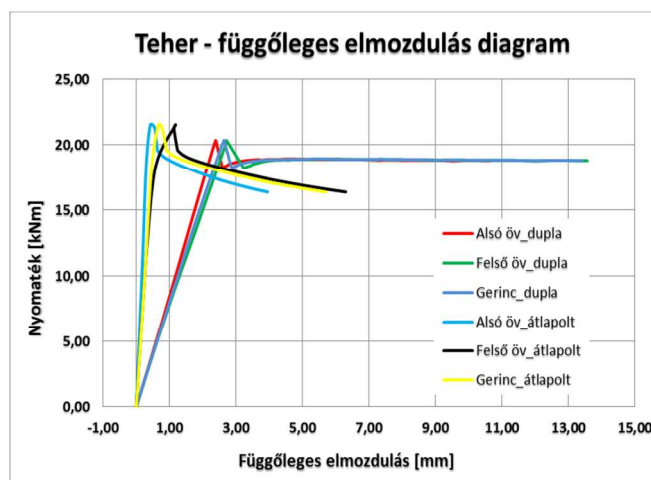
A lokális modellek tiszta hajlításra történő vizsgálatára szánt fejezet zárásaként összehasonlítom az átlapolt szakasz modellezésére megalkotott két modell típust. A következőkben, hogy a 'dupla' és az 'átlapolt' modell közötti hasonlóságokat és különbségeket is szemléltetni tudjam, a **24-26. diagramon** együtt ábrázolom a két modell terhelés hatására kialakult függőleges elmozdulásait.



24. diagram: Z150 – közös diagram



25. diagram: Z200ECO – közös diagram



26. diagram: Z250 – közös diagram

Amint azt a fenti diagramok is jól mutatják, az átlapolás pontosabb modellezésére készített 'átlapolt' nevű modellek nagyobb merevséggel rendelkeznek, azaz tiszta hajlítás esetén ugyanakkora nyomatékhoz kisebb elmozdulás tartozik, mint a 'dupla' modellek esetében. Ez azzal magyarázható, hogy az 'átlapolt' modellnél két szelvény került megadásra, melyek szimmetria tengelye egymástól, függőleges értelemben 1,5 mm-re eltolva helyezkedik el. Vízszintes irányba is ugyanez a kialakítás jelenik meg. Ennek értelmében inerciatöbblet jelenik meg az 'átlapolt' modellnél a 'dupla' modellhez képest, mely a merevségek befolyásolásának egyik fő paramétere.

A **8. táblázatban** számszerűsítem a két különböző modell teherbírásait és a közöttük lévő eltéréseket is.

Eredmények összehasonlítása			
Szelvénytípusok:	Nyomatéki teherbírás [kNm]		Eltérés
	'dupla' modell	'átlapolt' modell	
Z150_1.5	9,35	9,02	-3,5%
Z200ECO_1.5	13,19	12,62	-4,4%
Z250	20,34	21,58	6,1%

8. táblázat: Numerikus modellek eredményeinek összehasonlítása

A fentiek alapján elmondható, hogy az egyszerűbb 'dupla' és az összetettebb 'átlapolt' modellek során - melyeket tiszta hajlításra vettem igénybe - jelentősebb különbségeket csak a merevségi viszonyaikban tapasztaltam.

A két numerikus modell teherszintjei közötti eltérések mindhárom szelvénynél 7,0%-on belül voltak. Ennek következtében a valós kísérlettel összehasonlítva még mindig jelentősek, 35%-ot meghaladó különbségek adódtak. Ennek okai részben megegyeznek a 4.2.2.3. pontban, a 'dupla' modellnél bemutatottakkal.

Mivel a teherszintnél nincsenek szignifikáns különbségek, ezért a modellek megítélésben a merevségeik fognak döntő szerepet játszani. Vélhetően az átlapolt modellnél tapasztalt nagyobb merevség közelebb lesz a valós kísérlethez, azonban ennek igazolásához az egyszerűsített globális modellel elvégzett vizsgálatok is szükségesek lesznek.

4.3. Hajlítás és nyírás interakciója

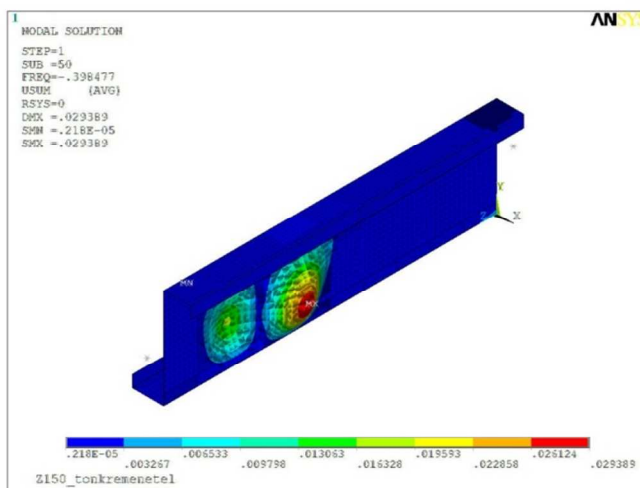
Tiszta hajlítás ismertetését követően rátérek az interakciós igénybevétel alkalmazására. Az előzőekkel ellentétben most már csak a 'dupla' és az 'átlapolt' modelleket vizsgálom ezen igénybevétel típusra, mivel mezőközépen a hajlítás mellett ébredő nyíróerő hatása elhanyagolható mértékű. Először a 'dupla' modelleknél mutatom be a vizsgálat eredményeit, majd ezt követően az 'átlapolt' modellnél kapottakat ismertetem.

4.3.1. 'Dupla' modellek esetén

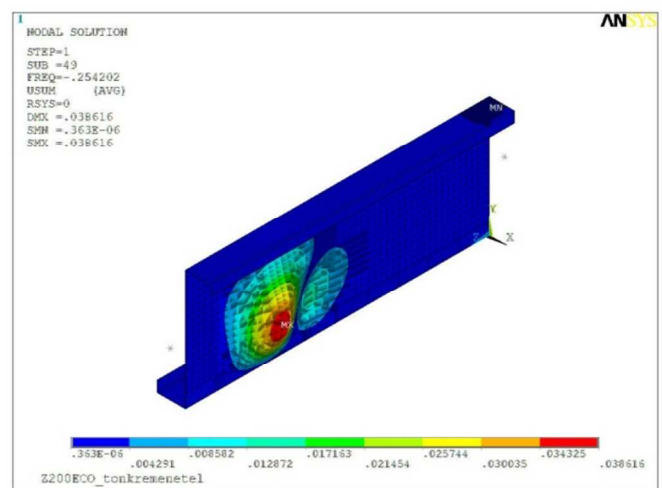
Célom az interakciós igénybevételre elvégzett vizsgálatokkal, hogy most az előzőekben számított eltérések jelentős mértékben csökkenjenek.

4.3.1.1. Alkalmazott imperfekciók:

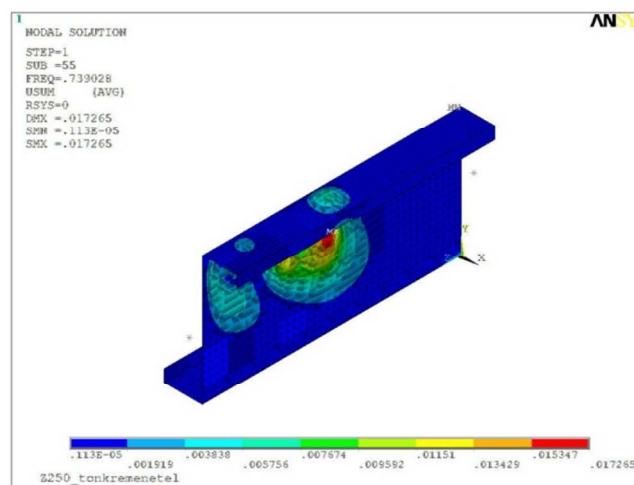
A mellékelt **34-36. ábrák**on mutatom be az egyes szelvények, hajlítása és nyírás interakciója során használt imperfekciókat (**13-15. ábra**).



16. ábra: Z150 – imperfekció
max. amplitúdó: 0,206 mm



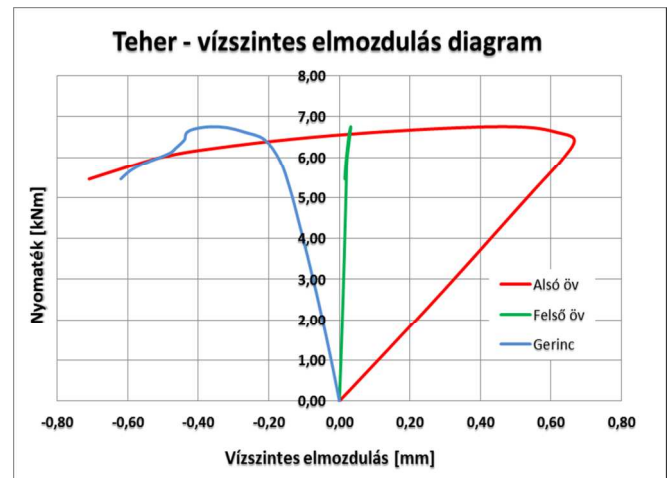
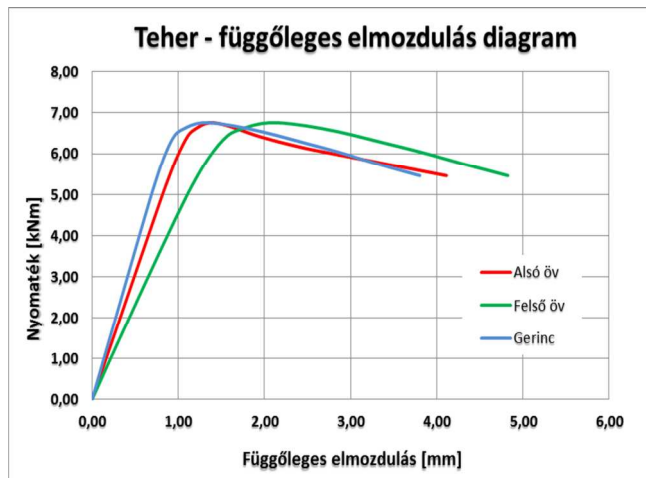
17. ábra: Z200ECO – imperfekció
max. amplitúdó: 0,193 mm



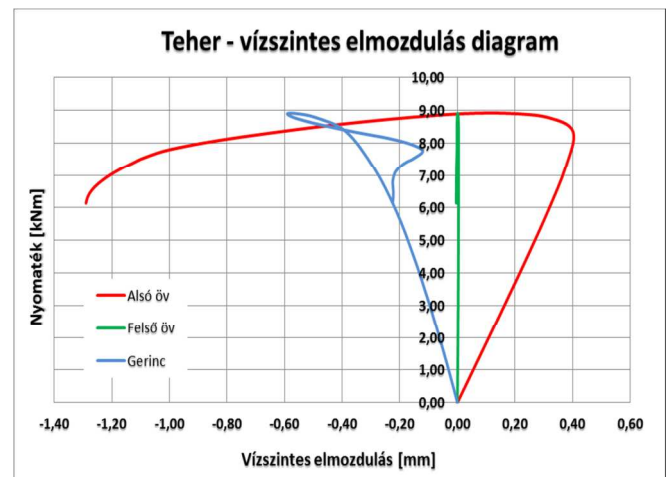
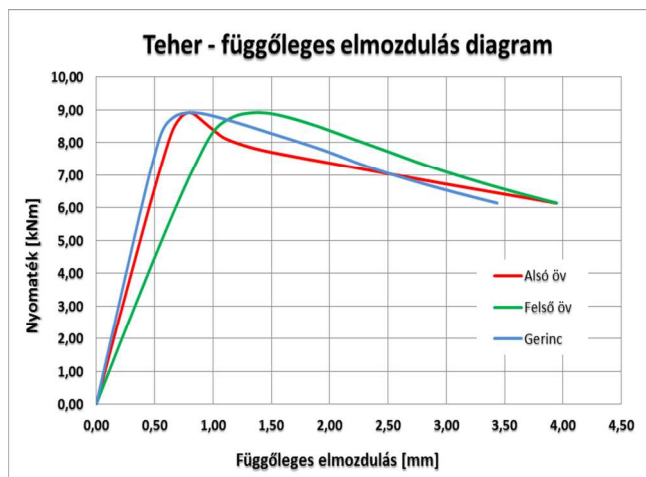
18. ábra: Z250 – imperfekció
max amplitúdó: 0,328 mm

4.3.1.2. Vizsgálat eredményei

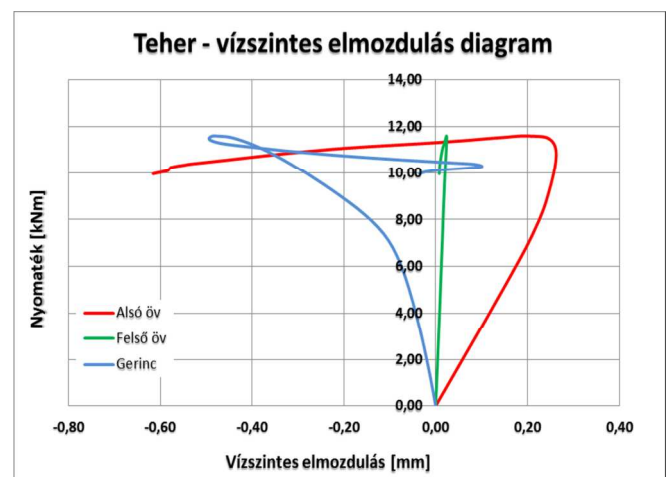
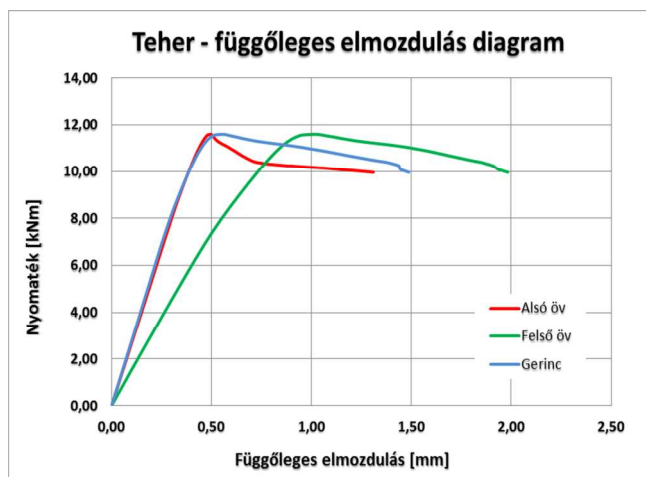
Ezek alapján ismertetem az egyes szelvények hajlítása és nyírása során kapott teher elmozdulás diagramokat. (27-32. diagram)



27-28. diagramok: Z150 – teher - elmozdulás diagramok



29-30. diagramok: Z00ECO – teher - elmozdulás diagramok



31-32. diagramok: Z250 – teher-elmozdulás diagramok

Az előzőekben ismertetett diagramokhoz csak annyit fűznék hozzá, hogy hasonló viselkedést mutatnak, azonban a megfolyás környezetében mért eredményeknél már nem jelenik meg a hirtelen törés - a teher-függőleges elmozdulás diagramokban - hanem sokkal tisztább az átmenet is. Amíg a tiszta hajlítás esetén a két öv közel azonos mértékben mozdult el, addig most ezek viselkedése is eltérő jelleget mutat, mely a szerkezetben megjelenő nyíróerőre vezethető vissza.

4.3.1.3. Eredmények verifikálása

A **9. táblázatban** összefoglalom a numerikus és a valós kísérlet során kapott eredményeket.

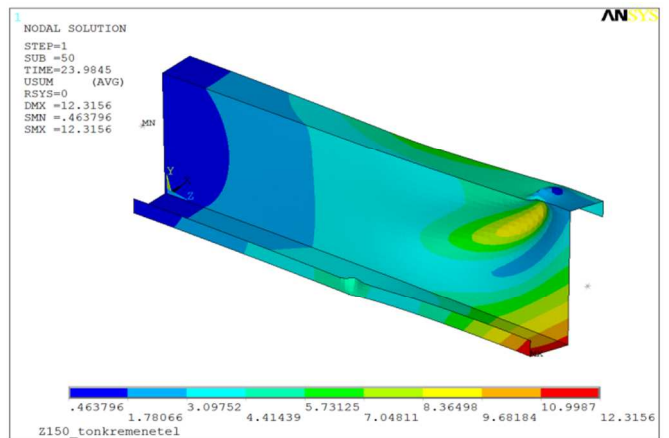
Eredmények verifikálása			
Szelvénytípusok:	Nyomatéki teherbírás [kNm]		Eltérés
	Numerikus kísérlet	Valós kísérlet	
Z150_1.5	6,76	5,71	-15,5%
Z200ECO_1.5	8,91	16,43	84,4%
Z250	11,60	13,77	18,7%

9. táblázat: Eredmények verifikálása

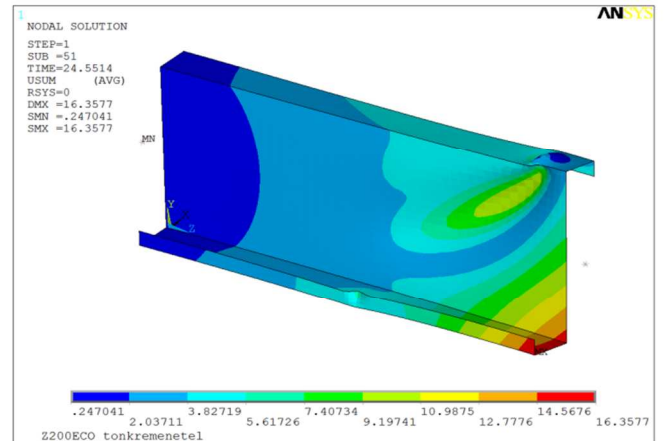
Megállapítható, hogy nyíróerő megjelenése miatt ugyanazon a modellen mért eltérések több mint 15%-kal csökkentek, ettől csak a Z200ECO típusú szelvény tér el. Ez részben igazolja a fenti állítást, hogy az igénybevétel típusában lévő különbségek is jelentős eltéréshez vezetnek, azaz a nyírás miatt kialakuló feszültségek is jelentős mértékben befolyásolják a szerkezet teherbírási képességét.

Érdemes megemlíteni, hogy Z150-nél a valós kísérletben kapott teherbírás alatta marad a numerikus kísérletben meghatározottakhoz képest, míg a Z200ECO és a Z250 típusú szelemen ettől eltérő tendenciát mutat. Z200ECO-nál tapasztalt eltérés már a 80%-ot is meghaladja de ez érthető, hiszen tiszta hajlításnál kb. 30% volt a különbség, azonban a numerikus modellben a nyíróerő megjelenésével a teherbírás tovább csökkent.

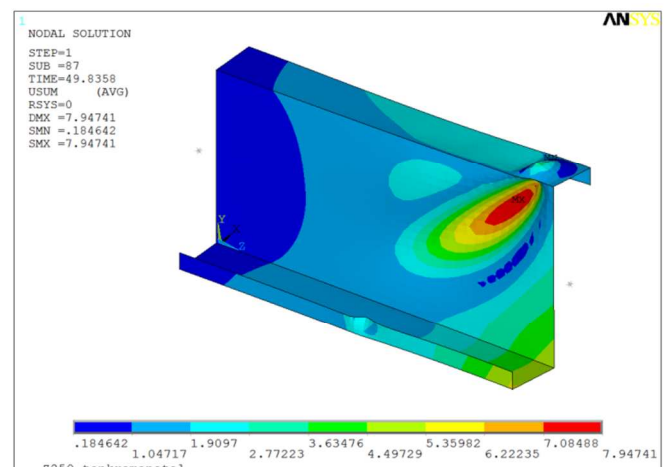
A következő oldalon közölt és a kísérlet során készített **9-11. kép**, illetve a numerikus modell analízise során készült **37-39. ábra** alapján megállapítható, hogy az interakciós igénybevétel megjelenésével a korábban eredményül kapott deformációs alakokhoz képest változások következtek be. Azaz a numerikus modellnél fellépő tönkremeneteli mechanizmusban a nyírás dominanciájára következtethetünk, mely a Z200ECO szelvénynél készített kísérleti fényképen is jól kivehető. Tehát ennél a szelvénynél visszakaptuk a képlékeny folyási mechanizmust, azonban a Z150-es és Z250-es szelvénynél a gerinc horpadása eltolódott az átlapolás szélétől. Ezeknél a típusoknál a tiszta hajlítás során visszakapott deformációs alakok jobban közelítenek a valós viselkedéshez.



9. kép és 37. ábra: Z150 szelemen valós illetve numerikus tönkremenetele, átlapolásnál



10. kép és 38. ábra: Z200ECO szelemen valós illetve numerikus tönkremenetele, átlapolásnál



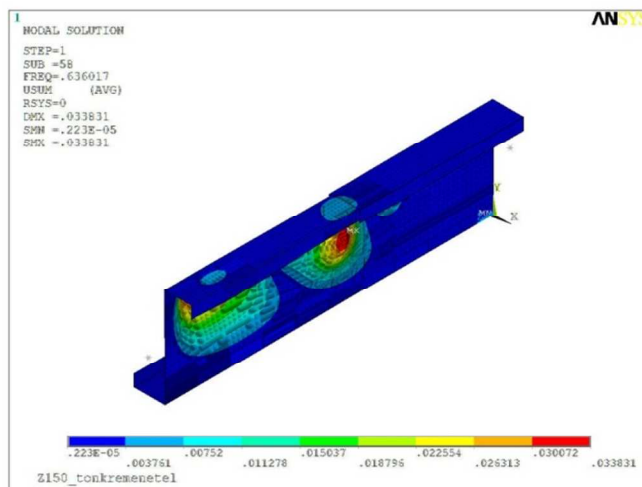
11. kép és 39. ábra: Z250 szelemen valós illetve numerikus tönkremenetele, átlapolásnál

4.3.2. 'Átlapolt' modellek esetén

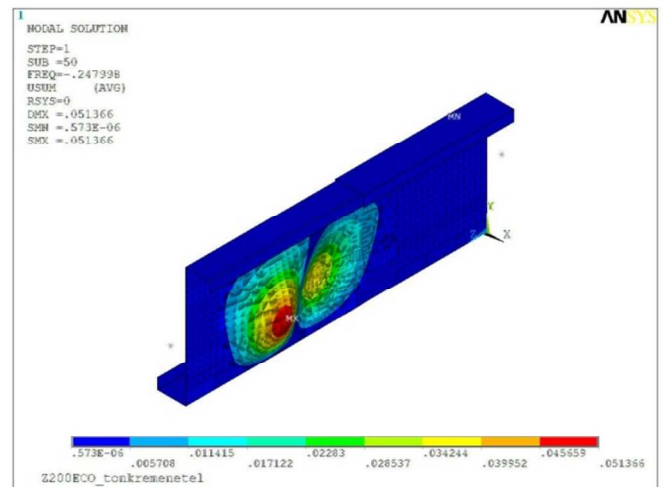
A 'dupla' modellt követően már csak az 'átlapolt' modell ismertetése van hátra, mellyel egyúttal zárom is a lokális modellek vizsgálatát.

4.3.2.1. Alkalmazott imperfekciók

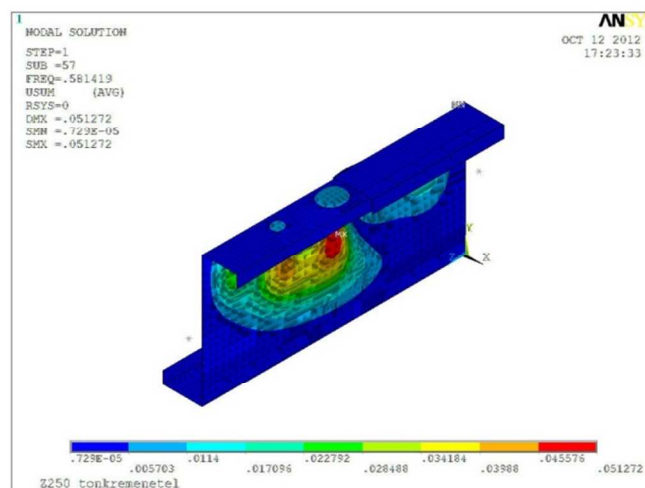
Ebben az esetben minden szelvénynél 500 mm hosszú modellt hoztam létre, melyen alkalmazott imperfekciókat mutatja a **40-42. ábra**. Az imperfekcióknál továbbra is a szinusz hullámot követő gerinchorpadási alakokat választottam ki, melyekkel kapcsolatban megjegyezném, hogy érdemes lenne megvizsgálni, hogy a választott alakok mennyiben befolyásolják a teherbírás szintet, illetve a kialakult tönkremeneteli mechanizmust.



40. ábra: Z150 – imperfekció
max. amplitúdó: 0,203 mm



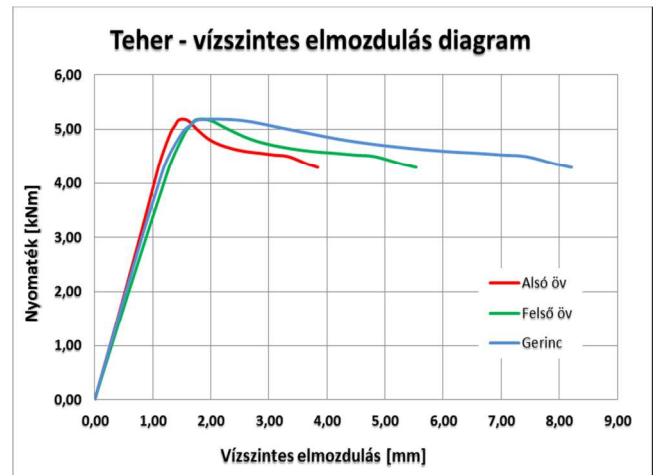
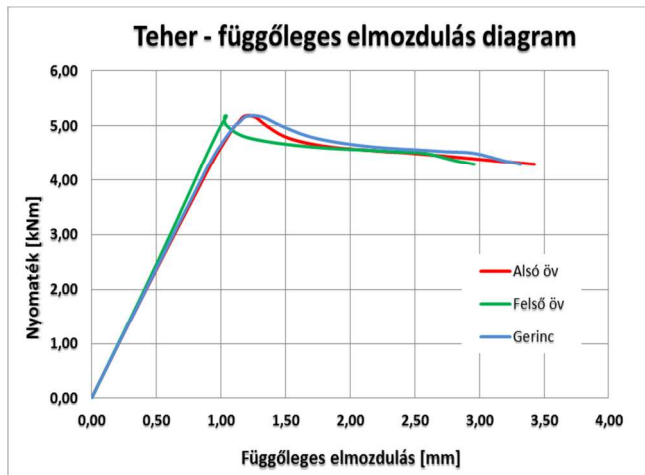
41. ábra: Z200ECO – imperfekció
max. amplitúdó: 0,193 mm



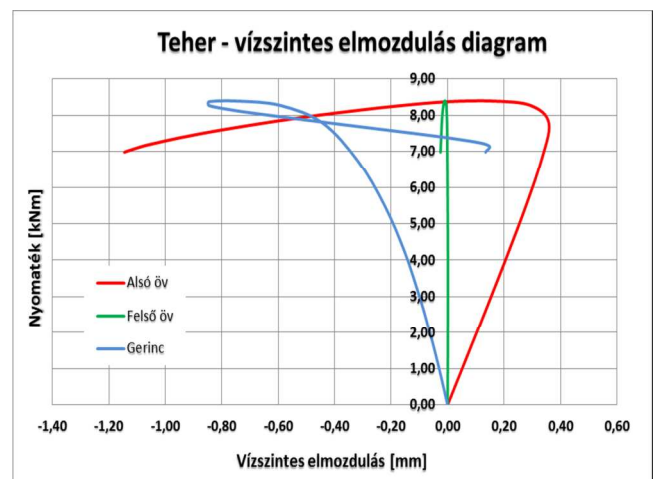
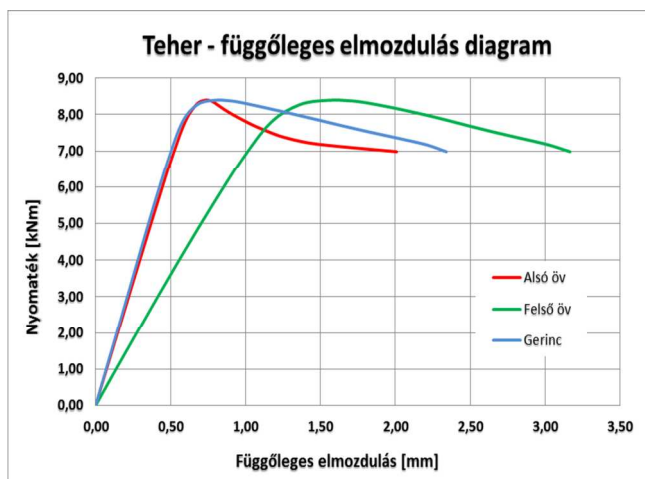
42. ábra: Z250 – imperfekció
max amplitúdó: 0,328 mm

4.3.2.2. Vizsgálat eredményei

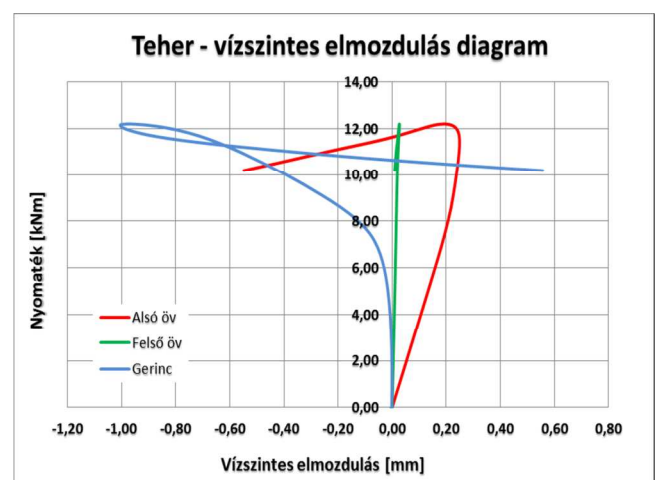
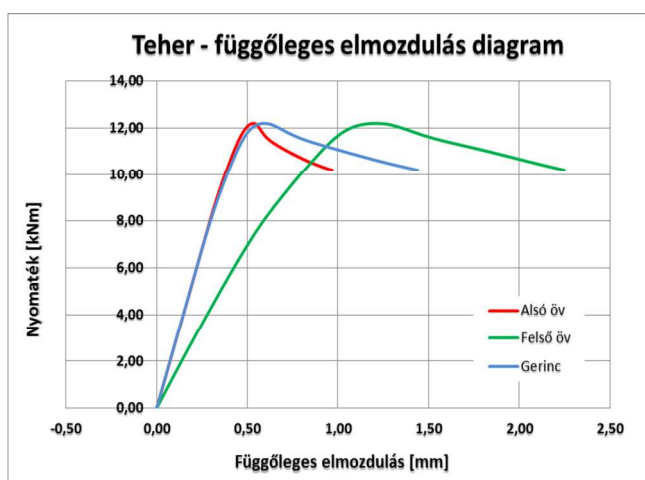
Ezek alapján ismertetem az egyes szelvények tiszta hajlítása során kapott teher elmozdulás diagramokat. (6-11. diagram)



33-34. diagramok: Z150 – teher - elmozdulás diagramok



35-36. diagramok: Z00ECO – teher - elmozdulás diagramok



37-38. diagramok: Z250 – teher-elmozdulás diagramok

A diagramok tekintetében a 'dupla' modellhez hasonló viselkedést tapasztalhatunk. Megállapítható, hogy a teher hatására a felső öv szenved el a legnagyobb függőleges elmozdulásokat, míg a vízszintes elmozdulásoknál inkább az alsó öv és a gerinc a dominánsabb.

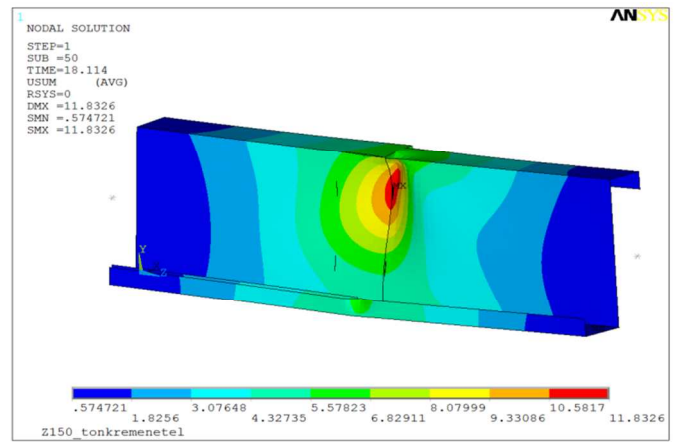
4.3.2.3. Eredmények verifikálása

A **10. táblázattal** kapcsolatban mindenképpen kijelenthető, hogy a modellek és az igénybevételek pontosításával az eltérés is kisebb lesz, hiszen 15%-nál nagyobb különbség - a Z200ECO szelvény kivételével - egyik esetben sem alakult ki. Érdeemes megfigyelni, hogy mindhárom szelvénynél a numerikus kísérlet során kapott nyomatóki teherbírás alatta marad a valós kísérletben kapottaknál. A Z200ECO szelvény tendenciája továbbra is eltér a Z150 és Z250 által szolgáltatott eredményektől.

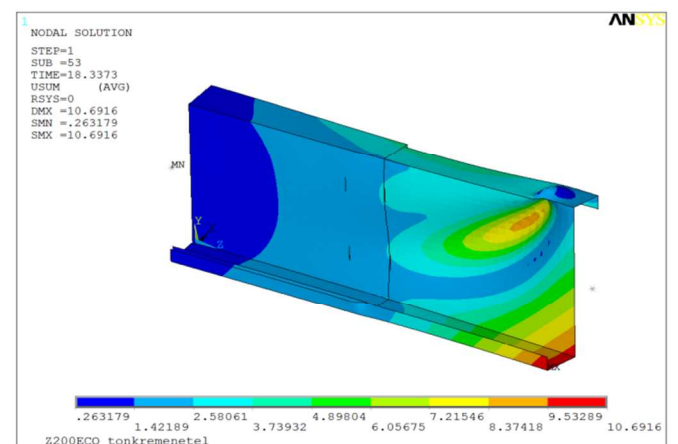
Eredmények verifikálása			
Szelvénytípusok:	Nyomatóki teherbírás [kNm]		Eltérés
	Numerikus kísérlet	Valós kísérlet	
Z150_1.5	5,18	5,71	10,3%
Z200ECO_1.5	8,39	16,43	95,8%
Z250	12,19	13,77	12,9%

10. táblázat: Eredmények verifikálása

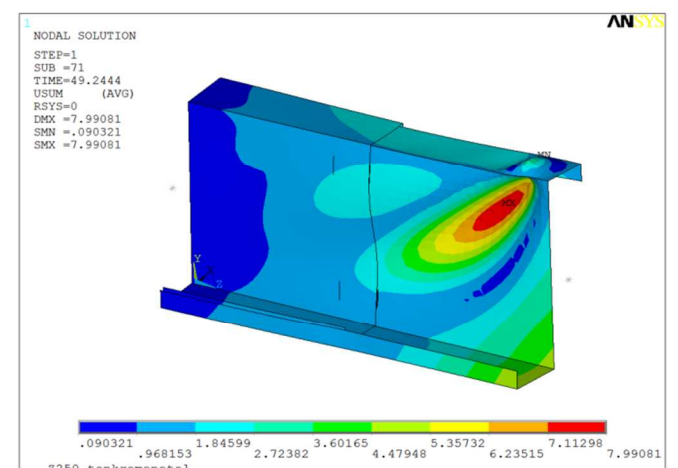
A lokális modellek zárásaként még mellékelem a deformációs képeket (**9-11. kép**) és ábrákat (**43-45. ábra**). Összességében az átlapolt szakasz modellezése során itt adódtak a valós kísérletet legjobban megközelítő tönkremenetek. Egyrészt a Z150-nél is megjelenő begyűrődés az átlapolás végén jelentkezett akárcsak a valós kísérletnél és ezenkívül a Z200ECO szelvénynél dominánsabban megjelenő nyírási tönkremenetel is az átlapolás után következett be. Viszont a Z250 szelemennél nem sikerült pontosan visszakapni a képlékeny folyási mechanizmust, ott is inkább a Z200ECO szelvényű numerikus modellnél tapasztalt deformáció jött létre.



9. kép és 43. ábra: Z150 szelemen valós illetve numerikus tönkremenetele, átlapolásnál



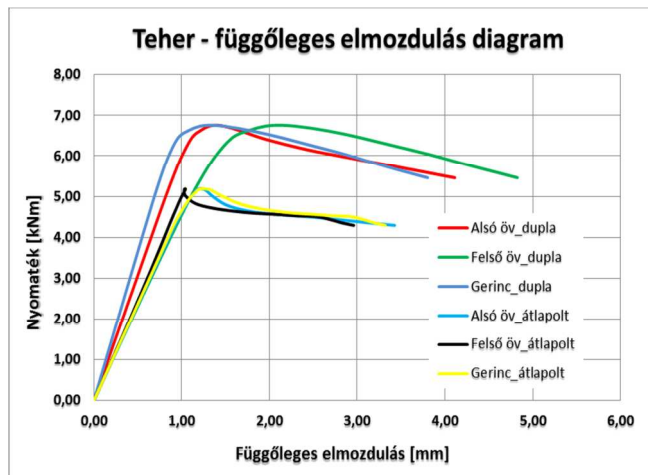
10. kép és 44. ábra: Z200ECO szelemen valós illetve numerikus tönkremenetele, átlapolásnál



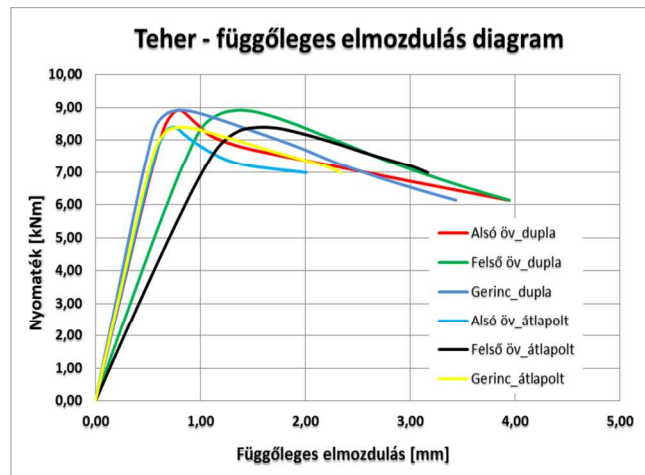
11. kép és 45. ábra: Z250 szelemen valós illetve numerikus tönkremenetele, átlapolásnál

4.3.4. 'Dupla' és az 'átlapolt' modellek összehasonlítása

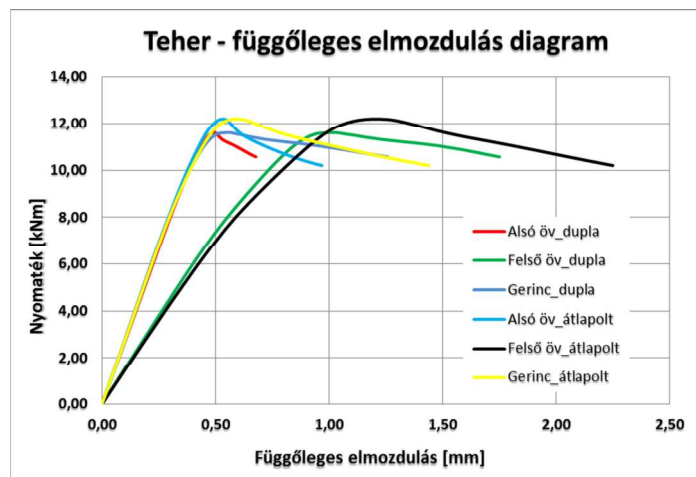
Az előzőhöz hasonlóan itt is elvégzem a hajlítás-nyírás interakciójára igénybevett 'dupla' illetve 'átlapolt' modell összehasonlítását. Első körben együtt mutatom meg a **39-41. diagramon** a két modell terhelés hatására kialakult függőleges elmozdulásait.



39. diagram: Z150 – közös diagram



40. diagram: Z200ECO – közös diagram



41. diagram: Z250 – közös diagram

A diagramok vizsgálata alapján itt is szembetűnő a már korábban ismertetett merevségek közötti különbségek. Viszont hajlítás és nyírás interakciója során már ezek a különbségek is kisebbek.

A **11. táblázatban** ismételten összefoglalom a numerikus vizsgálatok eredményeit.

Eredmények összehasonlítása			
Szelvénytípusok:	Nyomatéki teherbírás [kNm]		Eltérés
	'dupla' modell	'átlapolt' modell	
Z150_1.5	6,76	5,18	-23,4%
Z200ECO_1.5	8,91	8,39	-5,8%
Z250	11,60	12,19	5,1%

11. táblázat: Numerikus modellek eredményeinek összehasonlítása

A táblázatból egyértelműen kitűnik, hogy 'átlapolt' modell habár összetettebb és emiatt az analízis lefutásának az ideje is hosszabb, viszont a kapott eredmények jobban közelítik a valós kísérlet során mért, illetve meghatározott eredményeket. A két modell között a legjelentősebb különbség, több mint 20% a Z150-es szelvénynél alakult ki, viszont itt is az 'átlapolt' modell szolgáltatja a kísérlethez képest a pontosabb eredményt.

A fent megállapítottak alapján és az analízisek elvégzését követően kijelenthető, hogy a 'dupla' modell helyett célszerűbb az 'átlapolt' modellt választani, habár a számítási idő nagyobb, ugyanakkor a kapott eredmények és merevségek pontosabbak lesznek, ezáltal a modellezési eljárás is hatékonyabb.

4.4. „Átlapolt-kapcsolat” lokális modellezése

A tanulmány e fejezetében az átlapolt kapcsolat közötti igénybevétel-eloszlás vizsgálatára készített modelleket és eredményeiket ismertetem.

4.4.1. Modell jellemzői

Ezeket a vizsgálatokat a Z200ECO szelvényt felhasználva végzem el, emellett a különböző falvastagságoknak az igénybevétel-eloszlásra gyakorolt hatásait is vizsgálni kívánom (**12. táblázat**).

Esetek	Falvastagság	
	t ₁	t ₂
1	1,5 mm	1,5 mm
2	2,0 mm	2,0 mm
3	2,5 mm	2,5 mm
4	1,5 mm	2,0 mm
5	1,5 mm	2,5 mm

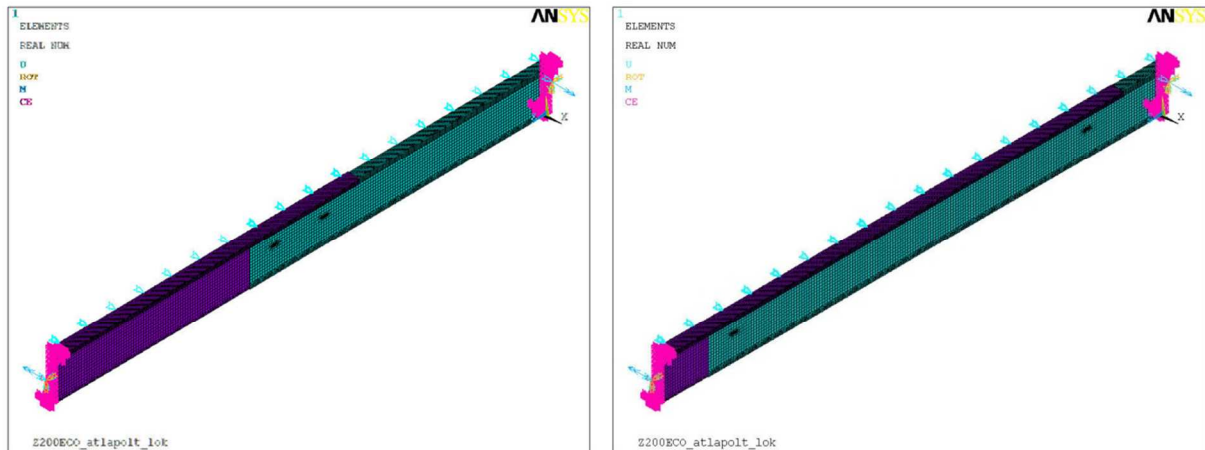
12. táblázat: Vizsgálatok összefoglalása

A modell felépítésében nagymértékben megegyezik a korábban már ismertetésre került „átlapolt” nevű lokális modellel. Eltérés, hogy a szelemeneket csak tiszta hajlításra veszem igénybe, melyet a szelemen két végén elhelyezett nyomaték biztosít. Tehát most erőterhet alkalmazok, mellyel jelen esetben könnyebben lehet biztosítani, hogy a nyomaték értéke minden egyes futtatás során állandó nagyságú és végig konstans értékű maradjon. Most csak lineáris vizsgálatot futtatok, tehát a paramétereket is ezek szerint adom meg. A kapcsolatot kontakt- és célelemek segítségével biztosítom, valamint az átlapolás szélétől 100 mm-es távolságra elhelyezett 2-2 db csavar (**BEAM188** jelű gerendaelemek) biztosítja.

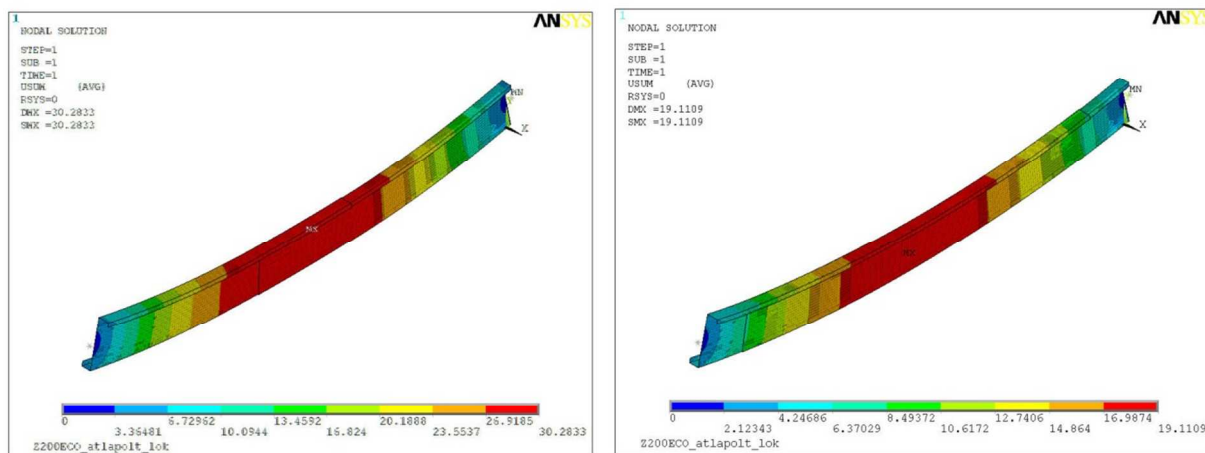
A vizsgálat során a **12. táblázatban** lévő esetek mindegyikében 2000 mm hosszúságú szelement használtam. Az egyes esetekben 19 db vizsgálatot végeztem el oly módon, hogy az átlapolás teljes hosszát 100 mm-től 1900 mm-ig növeltem, 100 mm-es lépcsőkben. Könnyebb áttekinthetőség érdekében a következőkben csak 2-2 vizsgálat eredményeit mutatom meg és a fejezet végén, egy közös diagramon ábrázolom az egyes esetek összes vizsgálatának eredményeit.

4.4.2. Vizsgálat eredményei

Először ismertetem a két választott modellt, melynek nyomatóki ábráját részletesen is be fogom mutatni. A 400 mm-es, illetve az 1600 mm-es átlapolással ellátott 2 m hosszúságú szelemen numerikus modellje látható a **46. és 47. ábrán**. Konstans nyomatók - melynek értéke minden esetben 40 kNm nagyságú volt – hatására létrejövő deformációik a **48. és 49. ábrán** láthatók.



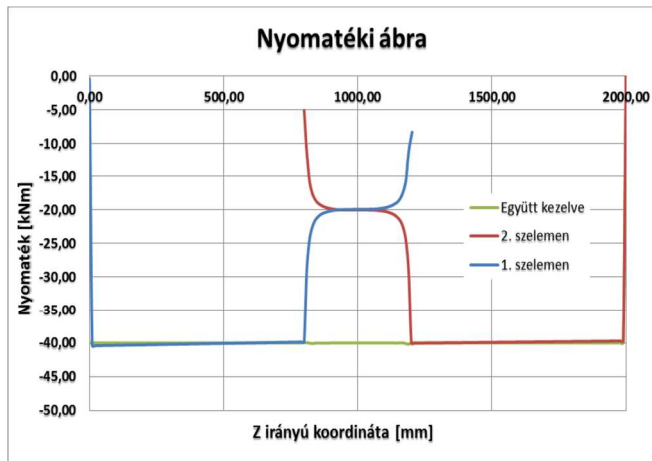
46. ábra és 47. ábra: Z200ECO 400 mm-es és 1600 mm-es átlapolási hosszal



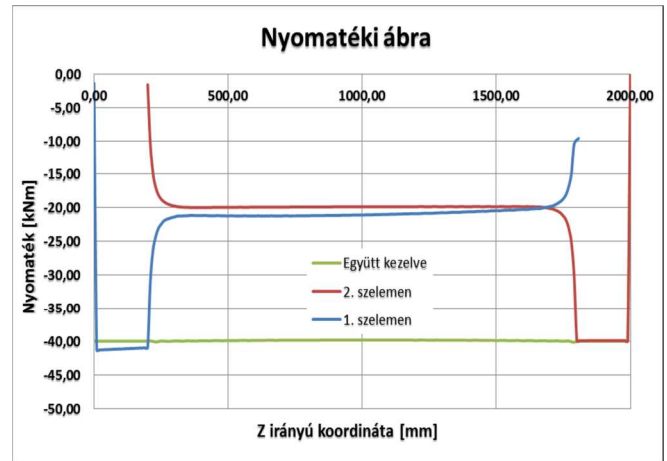
48. ábra és 49. ábra: Z200ECO deformáció konstans nyomaték hatására

A fenti ábrák alapján megállapítható, hogy az eltérő átlapolás hosszal megadott numerikus modellek megfelelő módon épültek fel, ezt bizonyítja, hogy az 1600 mm-es átlapolással rendelkező modell közel 40%-kal kisebb lehajlást szenved el ugyanazon nyomatéki teher hatására, mint a vele megegyező falvastagságú, de csak negyed akkora hosszúságú átlapolással ellátott modell. Többi azonos falvastagságú szelvényénél is hasonló tendencia figyelhető meg, így ezt a továbbiakban nem részletezem.

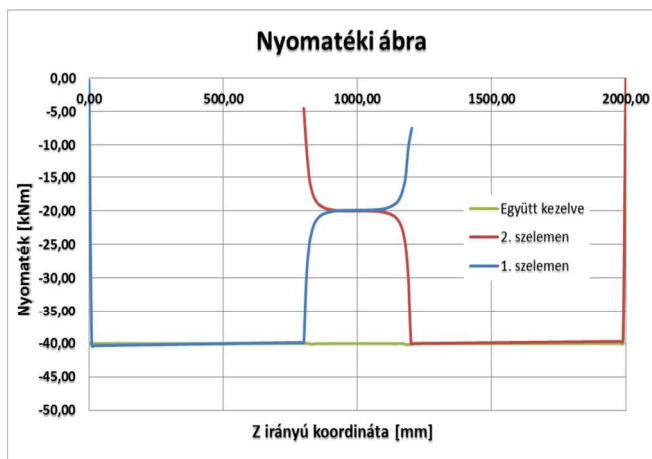
Első körben ismertetem azokat az eredményeket, ahol a szelemenek végig azonos falvastagságúak voltak. A szelemen hosszának a függvényében megadott nyomatéki értékeket a **42-47. diagramok** tartalmazzák.



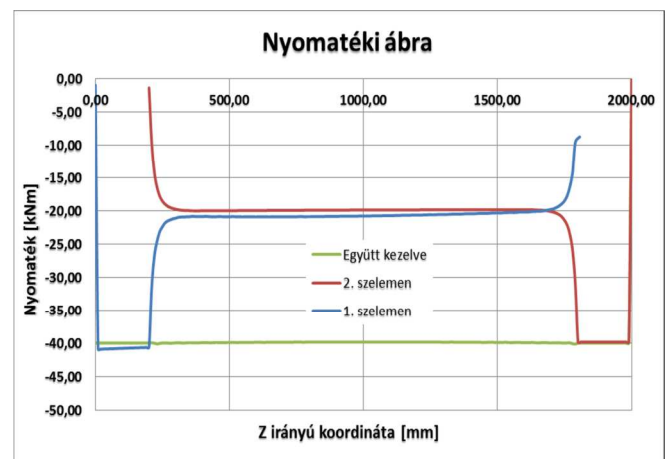
42. diagram: Z200ECO_1.5-1.5_400mm



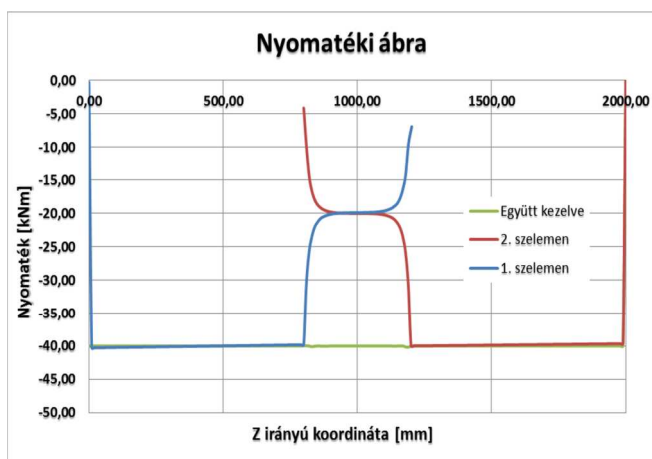
43. diagram: Z200ECO_1.5-1.5_1600mm



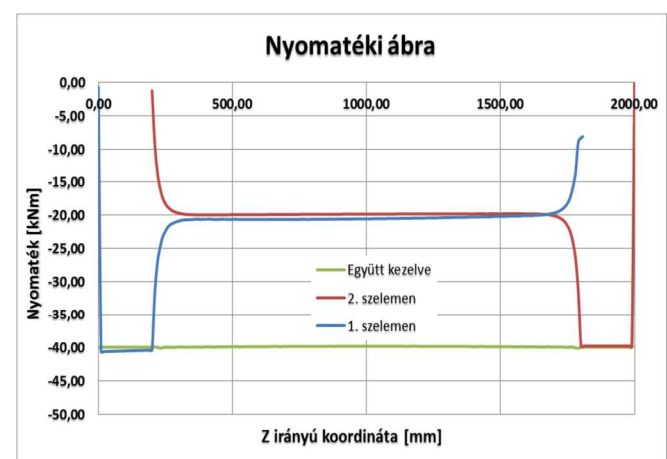
44. diagram: Z200ECO_2.0-2.0_400mm



45. diagram: Z200ECO_2.0-2.0_1600mm



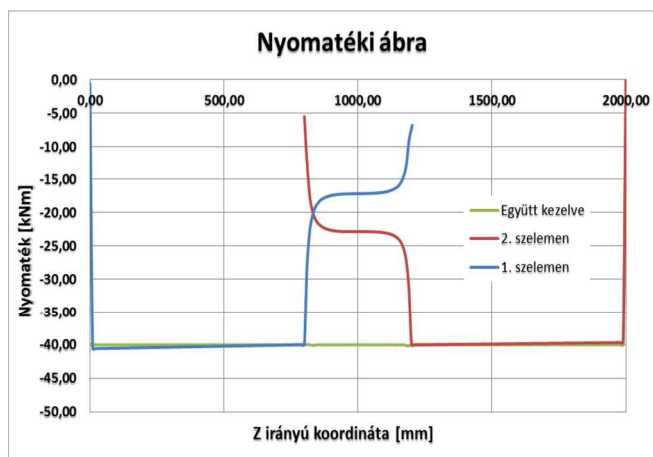
46. diagram: Z200ECO_2.5-2.5_400mm



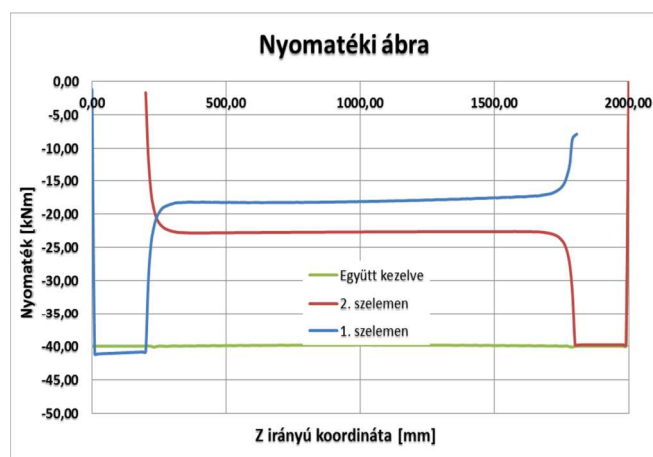
47. diagram: Z200ECO_2.5-2.5_1600mm

A fenti diagramok alapján megállapítható, hogy ha mind a két szelemen azonos falvastagságú, akkor a nyomatékokat 50-50%-ban viselik az átlapolt szakaszon, függetlenül a szelvény vastagságától. Emellett látható az is, hogy a nyomatéki ábrában bekövetkező ugrás is ugyanazon a 100 mm-es szakaszon következett be, függetlenül az átlapolás hosszától. Ezt a távolságot vélhetően a csavar helyzete határozza meg.

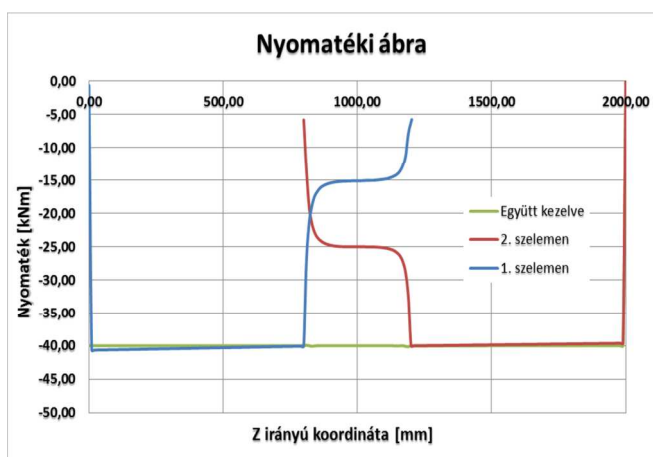
A **48-51. diagramok** tartalmazzák az eltérő falvastagságú szelvénnel kialakított átlapolt kapcsolat során keletkező nyomatéki ábrákat.



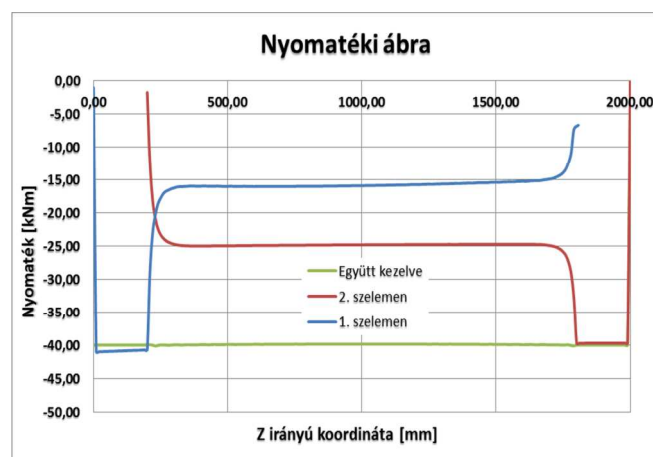
48. diagram: Z200ECO_1.5-2.0_400mm



49. diagram: Z200ECO_1.5-2.0_1600mm



50. diagram: Z200ECO_1.5-2.5_400mm



51. diagram: Z200ECO_1.5-2.5_1600mm

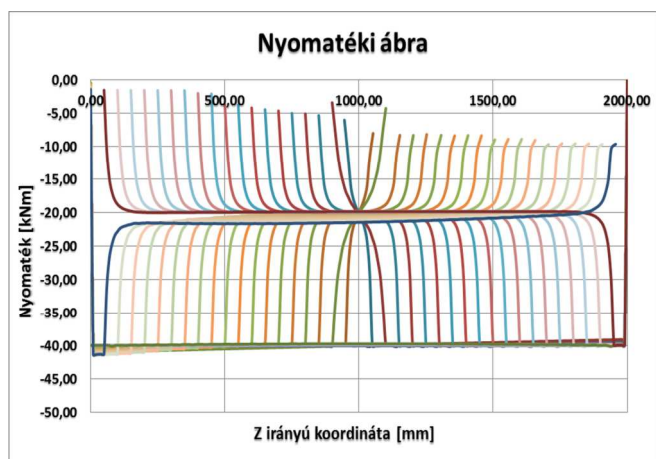
A diagramok eredményeinek könnyebb megértése miatt készítettem el a **13. táblázatot**, melyben a nyomaték értékeit a szelemen hosszának felében vettem ki.

Esetek	Átlapolás hossza	Falvastagság	Nyomaték [kNm]	Arány [%]		Eltérés [%]
				t_1 / t_2	M_1 / M_2	
4.	400 mm	$t_1 = 1,5 \text{ mm}$	17,18	75,0%	75,1%	0,1%
		$t_2 = 2,0 \text{ mm}$	22,88			
	1600 mm	$t_1 = 1,5 \text{ mm}$	18,13	75,0%	79,9%	4,9%
		$t_2 = 2,0 \text{ mm}$	22,69			
5.	400 mm	$t_1 = 1,5 \text{ mm}$	15,10	60,0%	60,3%	0,3%
		$t_2 = 2,5 \text{ mm}$	25,02			
	1600 mm	$t_1 = 1,5 \text{ mm}$	15,90	60,0%	64,1%	4,1%
		$t_2 = 2,5 \text{ mm}$	24,80			

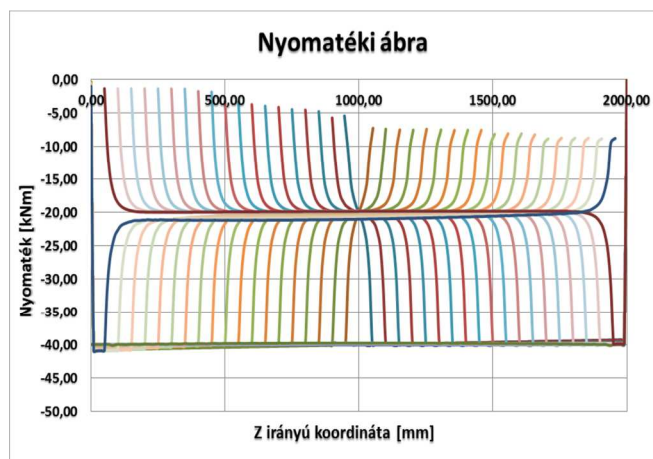
13. táblázat: Eredmények összefoglalása

A fent közölt táblázat alapján megállapítható, hogy a vizsgálatok során az átlapolás kapcsolatnál fellépő igénybevétel eloszlást a szelemen falvastagsága jelentős mértékben befolyásolja. Látható, hogy a 400 mm-es átlapolás esetén a falvastagságok és a nyomatékok arányai közötti eltérések nem haladják meg 0,5%-os értéket. Az 1600 mm-es átlapolási hossz esetén ez az érték már az 5%-ot is alulról közelíti. Viszont kijelenthető az is, hogy ilyen nagymértékű átlapolást a valós szerkezetek esetén nem igen készítenek, így ez az eltérés minimálisnak mondható.

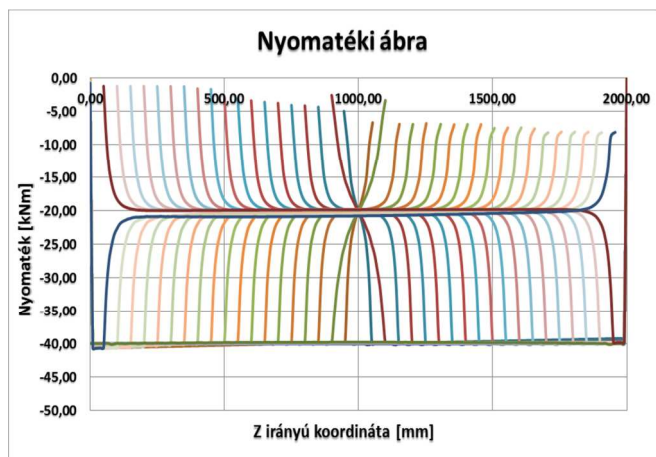
Végezetül az esetenkénti 19 db vizsgálatot mutatom be az **52-56. diagramokon**.



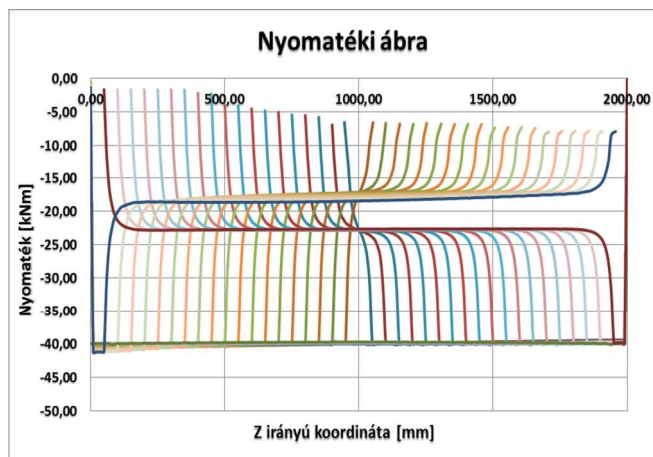
52. diagram: Z200ECO_1.5-1.5



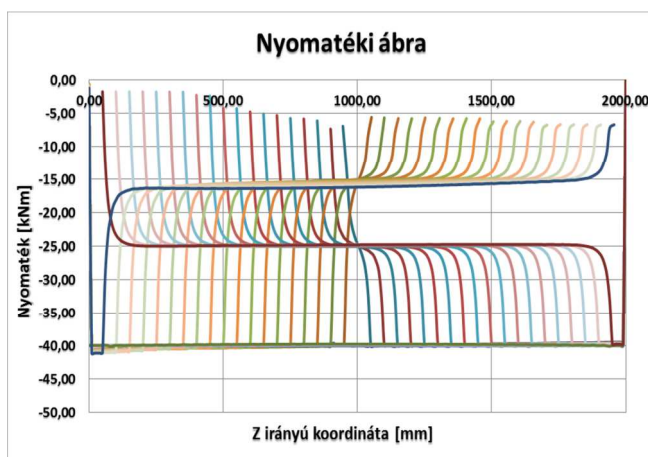
53. diagram: Z200ECO_2.0-2.0



54. diagram: Z200ECO_2.5-2.5



55. diagram: Z200ECO_1.5-2.0



56. diagram: Z200ECO_1.5-2.5

A fent ismertetett diagramokról elmondható, hogy az igénybevételi ábra megfelelően követi az átlapolás hosszában bekövetkező változást, melynek eredményeképpen szignifikáns változás egyik esetben sem következett be.

Az „átlapolt-kapcsolat” vizsgálatára készített numerikus modellekkel kapcsolatban megállapításra került, hogy lineáris vizsgálat és konstans nyomatóki teher esetén az igénybevétel-eloszlás befolyásolásának főbb paramétere a szelvények falvastagsága. Későbbiekben érdemes lenne megvizsgálni, hogy nem-lineáris vizsgálat során esetlegesen hogyan módosul a fenti állítás, illetve hosszabb átlapolások esetére kidolgozni egy összefüggést, mely a szelemen hossz/átlapolás hossz arányt is figyelembe veszi.

4.5. Lokális modellezés összefoglalása

A fejezet összefoglalásaként kijelenthető, hogy a keresztmetszet lokális szintű tönkremeneteli mechanizmusainak, illetve teherszintjeinek vizsgálatára kiválóan alkalmasak a fent készített numerikus modellek. Ez alól kivételt képez a Z200ECO szelvény, mely a valós kísérletnél is a többi szelvénytől eltérően viselkedett, mivel az átlapolás környezetében nem csökkentek a teherbírási értékek, hanem szignifikánsan nagyobbak lettek. Ezzel ellentétben a másik két szelvénytípus átlapolásánál mért teherbírási értékek leginkább alulról közelítették a mezőközépen meghatározott nyomatóki teherbírást.

A lokális modelleknél alkalmazott, a tiszta hajlítást és a hajlítás és nyírás interakciójának igénybevételét előidéző elmozdulás-terhek, valamint a Newton-Raphson megoldó módszer hatékony kombinációnak bizonyult, mely minden esetben néhány iterációt követően, relatíve rövid idő alatt megoldáshoz vezetett.

’Dupla’ és az ’átlapolt’ modell összefoglalásaként elmondható, hogy mind a kapott teherszint és mind a kapott merevségek mérlegelésekor inkább az ’átlapolt’ modell váltotta be jobban a hozzá fűzött reményeket. Hiszen a teherbírási értéket és deformációs alakokat ezzel a változattal sikerült leginkább elérni.

Fontos megemlíteni, hogy a lokális modellekkel az itt kitűzött célokat sikerült elérni, viszont mindenképpen tovább kell lépni egy globális modell felé, mellyel az esetlegesen fellépő stabilitásvesztéssel járó globális viselkedést illetve tönkremeneteket is jobban modellezni lehet.

5. Egyszerű globális modellek

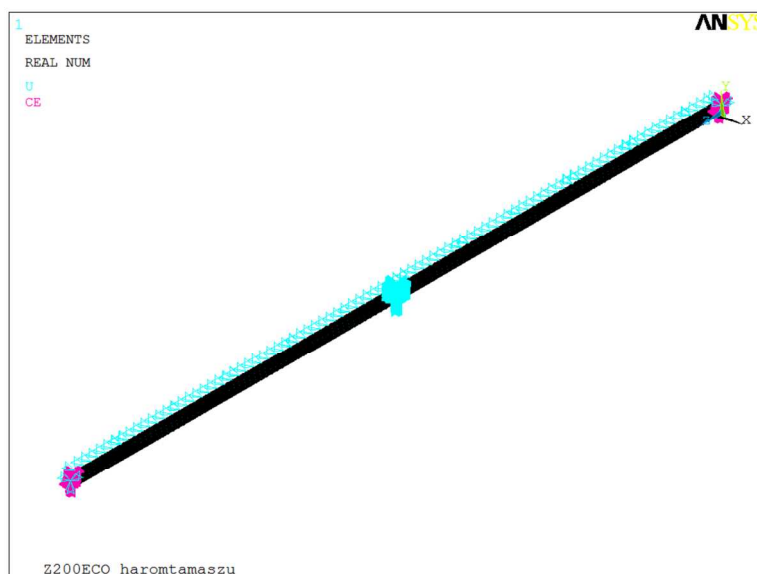
A tanulmány e fejezetében már a háromtámaszú szelemenek vizsgálatával foglalkozok, melyben a valós kísérlet esetén fellépő globális hatások is megjelennek. A fenti elvet követve itt két különböző módon felépített modellt vizsgálok, viszont az egyszerűség kedvéért csak a Z200ECO szelvényen. Ebben a részben a célkitűzésem, hogy a teherbírási szinteket tovább pontosítsam, illetve hogy a tönkremeneteli módokat ismételten visszakapjam a valós kísérletnek megfelelően, valamint hogy az itt eredményül kapott teherelmozdulás diagramokat összehasonlítsam a valós kísérlettel.

5.1. Modellek jellemzői

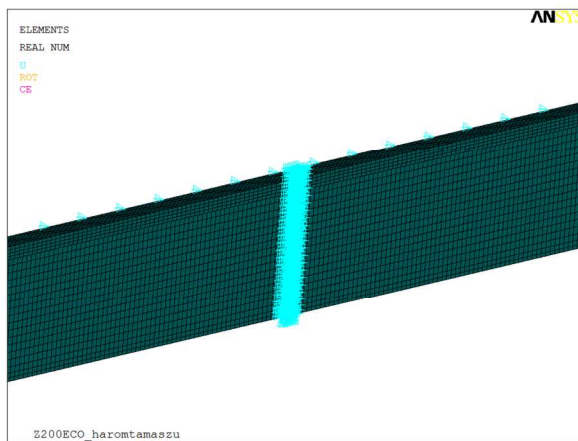
Az itt használt modelleket geometriailag az előzőekhez hasonló módon építem fel, csak a teher típusában és a megoldó módszerben lesznek változások. Mint már említettem két modell kerül felépítésre, melyek a következők: 'szimpla' és egy 'dupla'. A 'szimpla' modellnél a tartó 10 m-es hossza mentén végig konstans 't' falvastagságú lesz, tehát a közbenső támasznál sem lesz szelvényváltás (**50. ábra**). A 'dupla' modellnél ezzel ellentétben az átlapolt szakasz modellezésére egy $2 \cdot t$ falvastagságú szakasz is kialakításra kerül, a közbenső támasztól mindkét irányban 50 cm-es hosszban. A két modell közötti különbséget szemlélteti az **51. ábra**. A valós kísérlet során a szelemenen elhelyezett trapézlemez itt is oldalirányú támaszokkal helyettesítem.

A lokális modellek ellentétben itt is erőterhet alkalmazok, melyet vonalmentén és egyenletes megoszlásban adok meg a felső öv és a gerinc találkozásánál. A teher típusában bekövetkező váltásra azért volt szükség, mivel többtámaszú tartó esetén az elmozdulás terhek alkalmazása jóval összetettebb feladatot igényelt volna, hogy a kívánt igénybevételek visszakapjam. Továbbra is használom azt a program beállítást, mely a nagy elmozdulásokat lehetővé teszi. Ennek értelmében a szoftver az egyes teherlépcsőknél a már elmozdult alakra helyezi el a terhet. Mivel erőterhet alkalmazok, ezért az ívhossz-módszert alkalmazom a Newton-Raphson helyett, mert ebben az esetben kevesebb iteráció után érem el a kívánt megoldást és követhetővé válik a leszálló ág is.

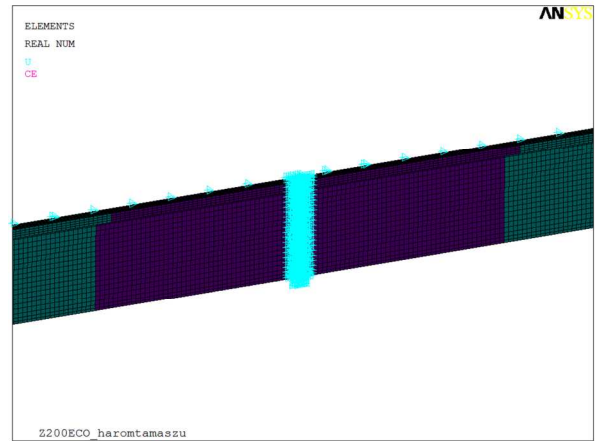
Az egyszerű globális modelleknél is a GMNI analízist alkalmazom, így természetesen a továbbiakban ismertetésre kerülnek az alkalmazott imperfekciók is. Az anyagi nemlinearitást a korábban ismertetett **5. diagram** és **2. táblázat** alapján adom meg.



50. ábra: Z200ECO háromtámaszú szelemen numerikus modellje



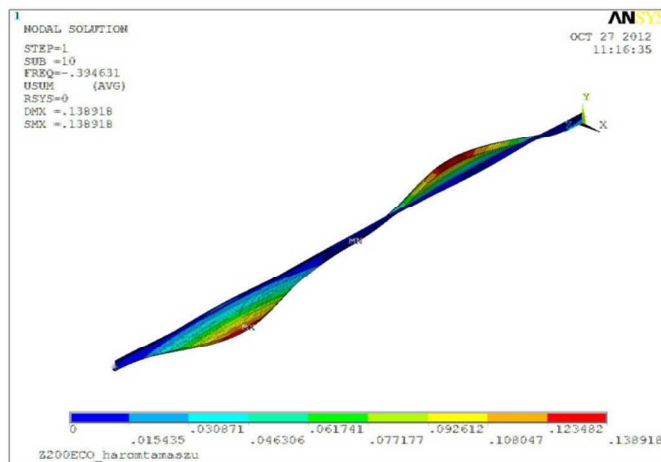
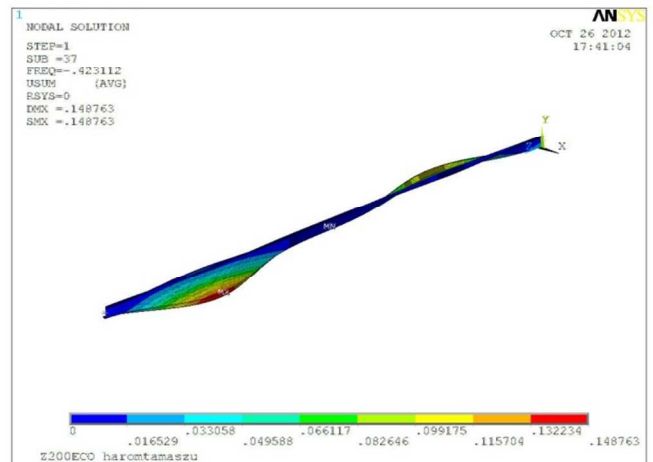
a) Z200ECO – 'szimpla' modell



b) Z200ECO – 'dupla' modell

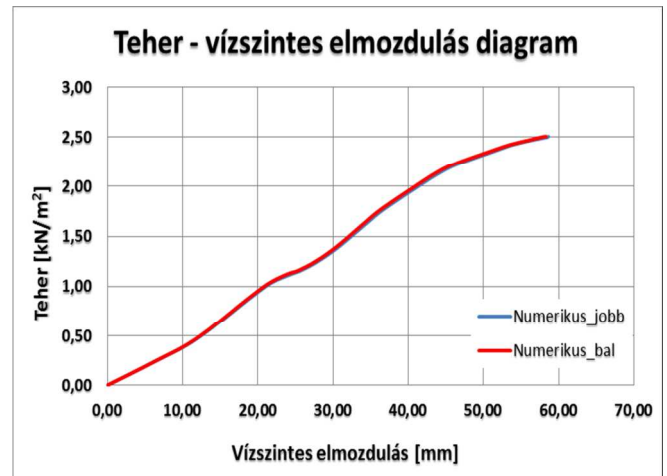
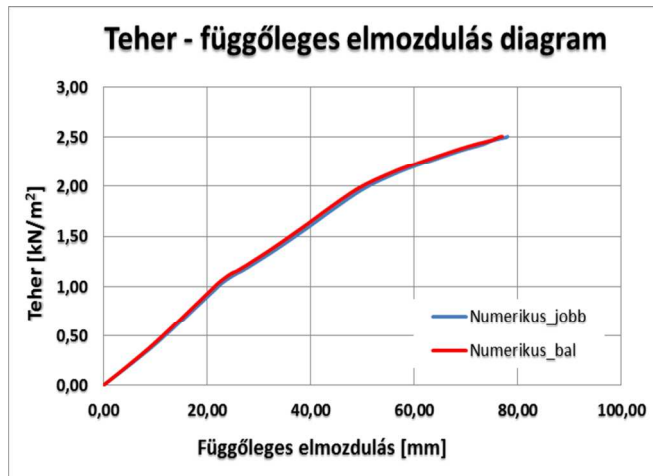
51. ábra: Z200ECO numerikus modelljei közötti különbségek**5.2. Alkalmazott imperfekciók**

A 'szimpla' és a 'dupla' modellnél alkalmazott imperfekciókat az **52-53. ábra** mutatja be, melyeken jól láthatóan megjelenik a szelemen alsó övének szinuszos hullámot közelítő kifordulása. Bizonyos asszimetriát lehet megfigyelni az egyes tartószakaszok között, hiszen a közbenső támasztól balra eső tartószakasz nagyobb elmozdulásokat szenved el, mint a másik oldalon lévő. Ez a különbség a 'dupla' modellnél még szembetűnőbb.

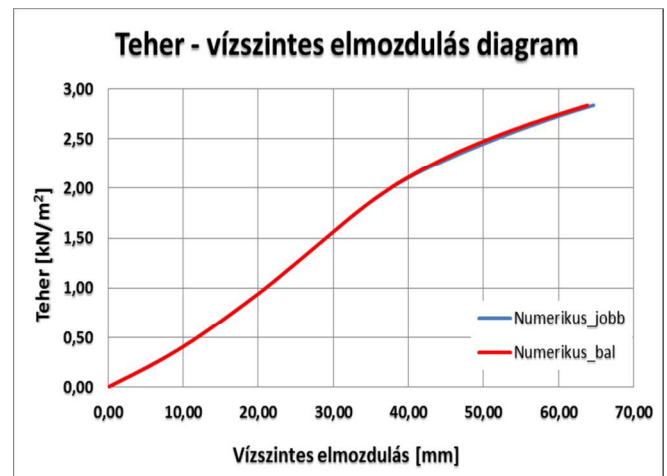
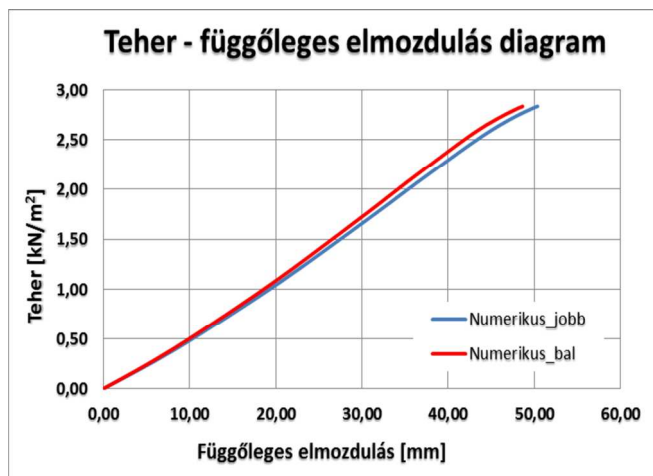
**52. ábra: Z200ECO – 'szimpla' modell
max. amplitúdó: 0,208 mm****53. ábra: Z200ECO – 'dupla' modell
max. amplitúdó: 0,208 mm**

5.3. Vizsgálat eredményei

A két modellnél a terhelés hatására kapott elmozdulások láthatóak az **57-58.** illetve **59-60.** diagramon.



57-58. diagramok: Z200ECO – 'szimpla' – teher - elmozdulás diagramok



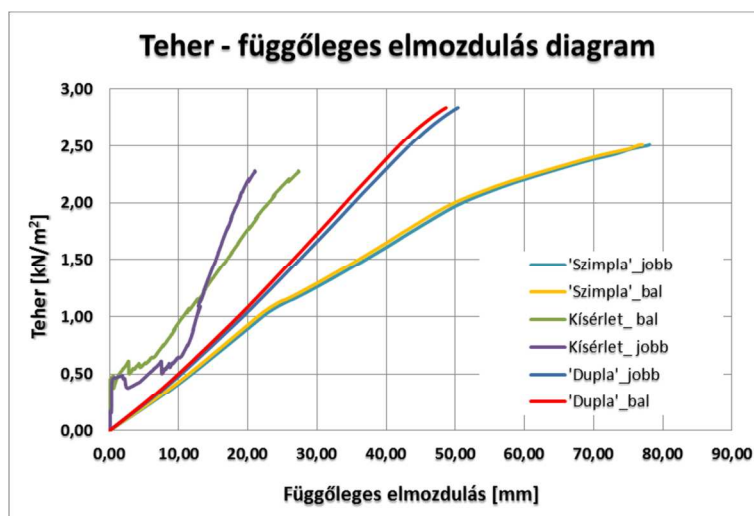
59-60. diagramok: Z200ECO – 'dupla' – teher - elmozdulás diagramok

A diagramok alapján megállapítható, hogy az imperfekciónál tapasztalt aszimmetrikus viselkedés a terhelés során már nem jelentkezik. Tehát a bal- és a jobboldali szelemen mind vízszintes, mind függőleges irányban közel azonos mértékű elmozdulásokat szenved el. Ezenkívül az is megállapítható, hogy a folyáshatár elérését követően a program nem folytatta tovább a fenti szelemenek terhelését, hiszen sem a plató, sem a leszálló ág nem jelent meg.

Érdemes megemlíteni, hogy célszerű lenne egy későbbi vizsgálat folyamán a 'dupla' modellen elvégezni a kívánt beállításokat és finomításokat is, melyek segítségével nem csak a plató, hanem a valós kísérletnél mért és az igénybevételi átrendeződés miatt kialakuló képlékeny többletterhekről is megjelenik.

5.4. Eredmények verifikálása

Az eredmények ismertetését követően, most a **61. diagramon** egyben ábrázolom a 'szimpla' és a 'dupla' modellt, valamint a valós kísérlet idevonatkozó eredményeit.



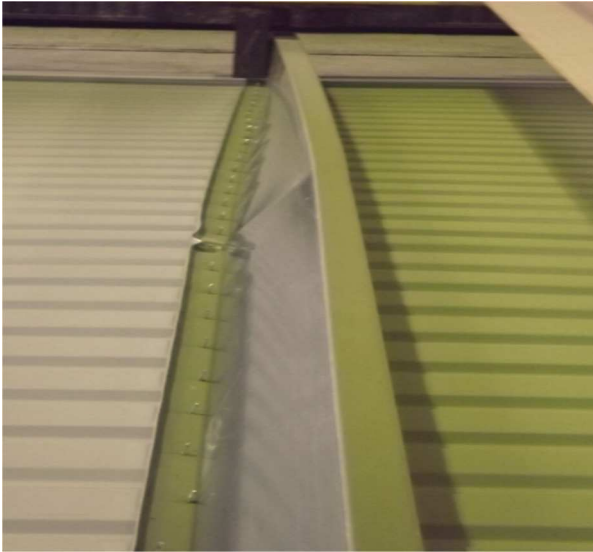
61. diagram: Z200ECO – teher - elmozdulás diagram

A diagram kapcsán érdemes megemlíteni, hogy a valós kísérletnél megjelenő aszimmetrikus viselkedés a numerikus modellek egyikénél sem volt olyan jelentős mértékű. Ezenfelül a 'dupla' modell nagyobb merevséggel rendelkezik, - ezt a jelenséget az 1 m hosszúságú „átlapolt” szakaszon alkalmazott kétszeres falvastagság okozza - mint a 'szimpla' modell, de még így sem éri a valós kísérletnél tapasztalt merevséget.

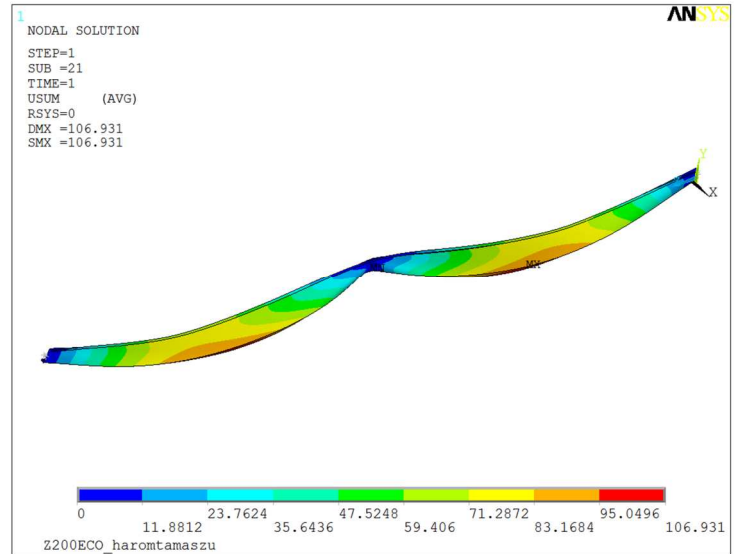
Érdemes lenne megvizsgálni, hogy a lokális modelleknél használt 'átlapolt' modell, ebben az esetben milyen eredményeket szolgáltatna. Az eddigi tapasztalatok alapján arra következtettek, hogy az 'átlapolt' modell nagyobb merevséggel rendelkezik, ezért pontosabban visszaadná a valós kísérlet során alkalmazott szelemen merevségét.

A továbbiakban bemutatom és értékelem a 'szimpla' és 'dupla' modellnél kapott deformációs ábrákat, valamint összehasonlítom a valós kísérlet során kapott tönkrementetekkel. Itt ismételten bemutatom a szelemen átlapolás melletti, illetve a mezőközepén megjelenő deformációt tartalmazó **10. illetve 7. képet**.

Az **54. ábra** alapján megállapítható, hogy megjelent a globális stabilitásvesztés jelensége is, melyek vizsgálatát a lokális modellek nem tették lehetővé. Összehasonlítva a **12. képpel** megállapítható, hogy a modell paraméterei ezen a szinten helyesen lettek megadva, hiszen a numerikus modellben is a szabad, húzott öv kifordulása következett be. Az **55. és az 56. ábra** a szelemen közbenső támaszánál, illetve a mezőközepén bekövetkező képlékeny nyúlásait tartalmazzák. Ezek alapján megállapítható, hogy a végig konstanst vastagsággal rendelkező modell tönkremenetele a legnagyobb nyomatóki helyen, a közbenső támasznál következik be. Az **55. ábrán** látható, hogy a gerinc jelentősen horpadásokat szenved el a valós kísérlethez hasonlóan. Ezzel szemben mezőközepén lokális tönkremenetel már nem következik be. Ez többek között annak tudható be, hogy az analízist a szoftver az első folyás megjelenését követően leállítja.



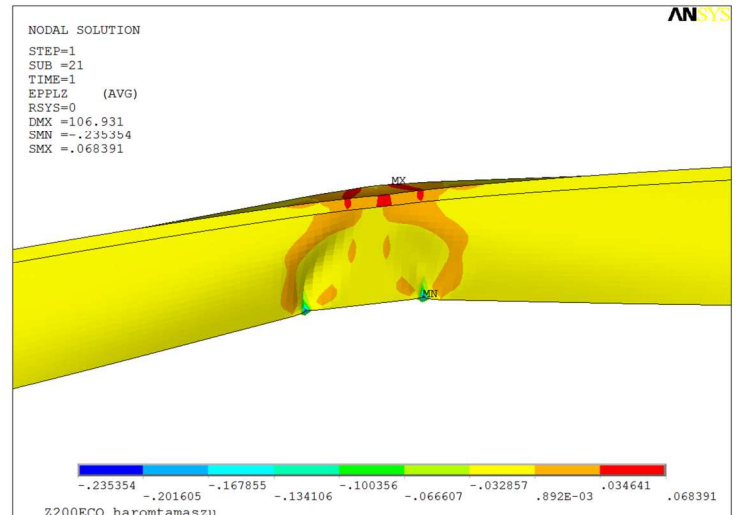
12. kép: Z200ECO – szabad öv kifordulása



54. ábra: Z200ECO – teljes 'szimpla' modell



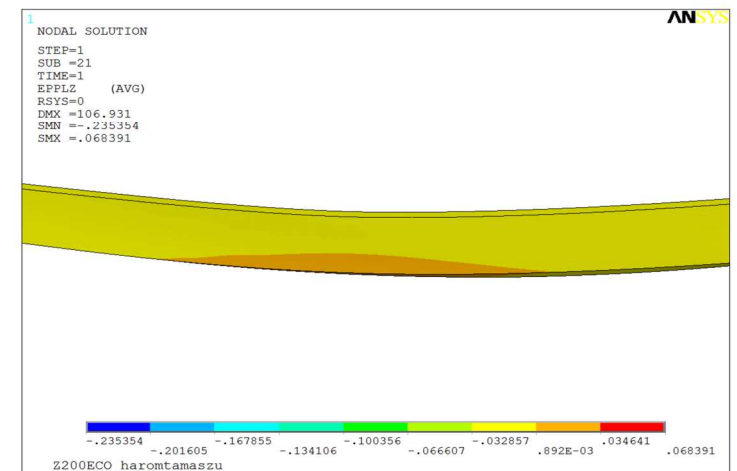
10. kép: Z200ECO – közbenső támasznál



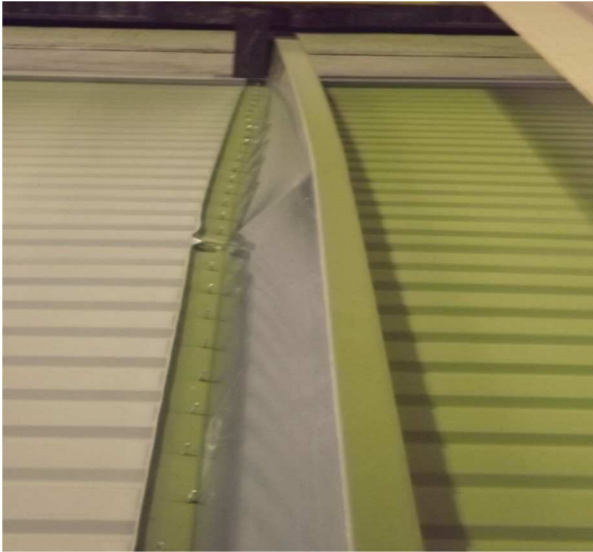
55. ábra: Z200ECO – 'szimpla' modell – közbenső támasz



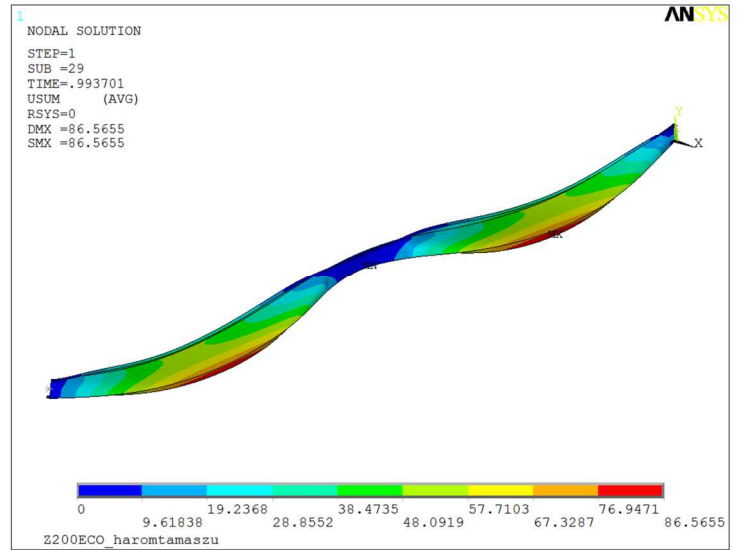
7. kép: Z200ECO – mezőközép



56. ábra: Z200ECO – 'szimpla' modell – mezőközép



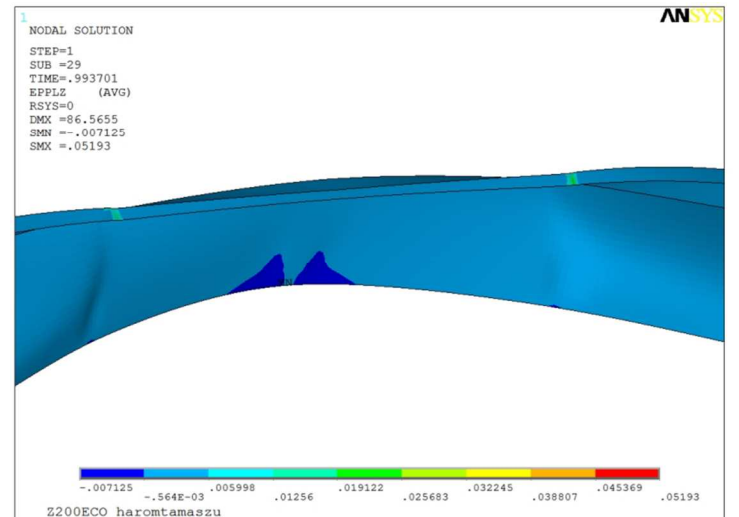
12. kép: Z200ECO – szabad öv kifordulása



57. ábra: Z200ECO – teljes 'dupla' modell



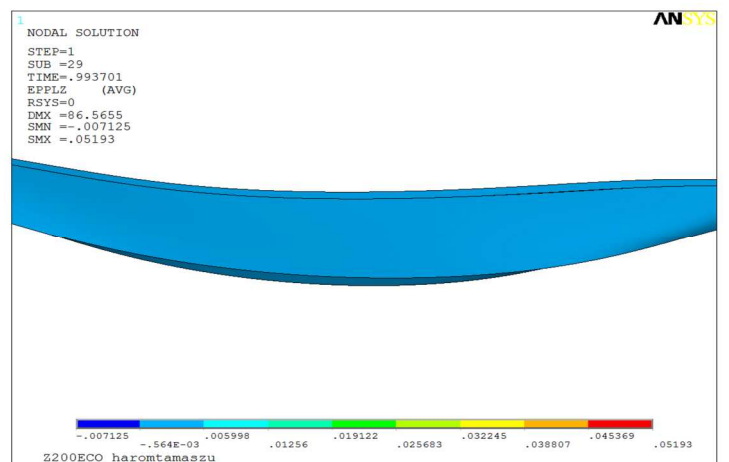
10. kép: Z200ECO – közébső támasznál



58. ábra: Z200ECO – 'dupla' modell – közébső támasz



7. kép: Z200ECO – mezőközép



59. ábra: Z200ECO – 'dupla' modell – mezőközép

Az **57-59. ábrák** már a 'dupla' modell során kapott deformációs alakokat tartalmazzák. Itt is megjelenik a tartó stabilitásvesztése kifordulás formájában. Az is belátható, hogy az átlapolás két végén, tehát a szelvényváltásnál már a megindult tönkremenetel kialakulása. Csak sajnos ebben az esetben is az első folyás elérését követően megállt a számítás. Ezt egy későbbi vizsgálat során mindenképpen pontosítani kell, azaz sűrűbb hálót és kisebb teherlépcsőt kell alkalmazni, hogy a plató megjelenését követően a tartó teljes teherbírása meghatározható legyen.

5.4. Egyszerű globális modellezés összefoglalása

Összefoglalásként elmondható, hogy részben sikerült elérni a kitűzött célokat. Hiszen elkezdődött a lokális modellek esetén is tapasztalt tönkremeneteli módok kialakulása, tehát ezek alapján kijelenthető, hogy a készített modellek numerikusan stabilak a folyáshatár eléréséig. A szelemenek numerikus modellje a valós kísérlethez hasonlóan viselkedett, hiszen kifordulás mellett először az átlapolásnál következett be a lokális tönkremenetel.

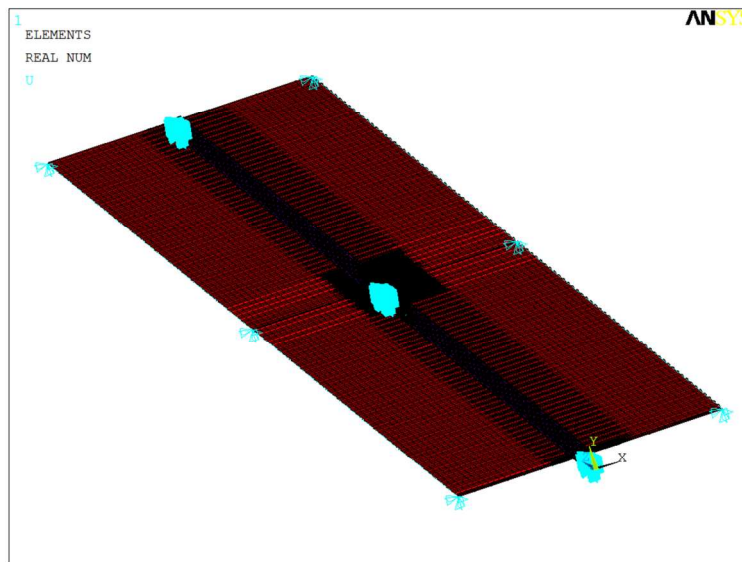
Másrésről az itt alkalmazott modellek további pontosításra, finomításra szorulnak, hogy a szelemen képlékeny többletteherbírása is kimutatható legyen. A lokális modelleknél megalkotott 'átlapolt' modellt is fontos lenne továbbvinni és a fentiekhez hasonlóan elvégezni a vizsgálatokat. Ezenfelül érdemes lenne megvizsgálni, hogy a többi szelvénytípus a fentiekhez hasonlóan viselkedik-e.

6. Részletes globális modellek

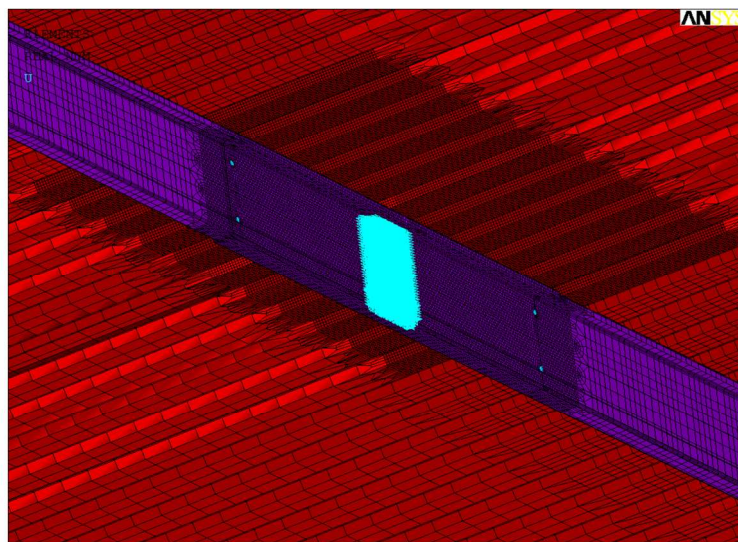
A tanulmány utolsó modellezést tartalmazó fejezetében áttekerek, a Dr. Jakab Gábor által készített paraméteres, részletes globális modellek analízisére. A célom, hogy a szerkezet lineáris viselkedését összehasonlítsam a valós kísérlettel, egyúttal választ adjak arra a kérdésre is, hogy a „valós” átlapolással ellátott modell, a globális hatások érvényesülése estén is merevebb szerkezetet eredményez-e. Ezenfelül megvizsgálom, hogy a numerikus modellben mért feszültségekből számított nyomatékok, milyen viszonyban állnak a valós modell alapján számítottakkal.

6.1. Modellek jellemzői

Az itt ismertetésre kerülő részletes globális modellek (60. ábra), egyik fő különbsége az eddigiekhez képest, hogy a trapézlemez, illetve a szelemen és a trapézlemez közötti kapcsolóelemek is modellezésre kerültek.



60. ábra: Z200ECO_10p – részletes globális modell (alulnézetben)



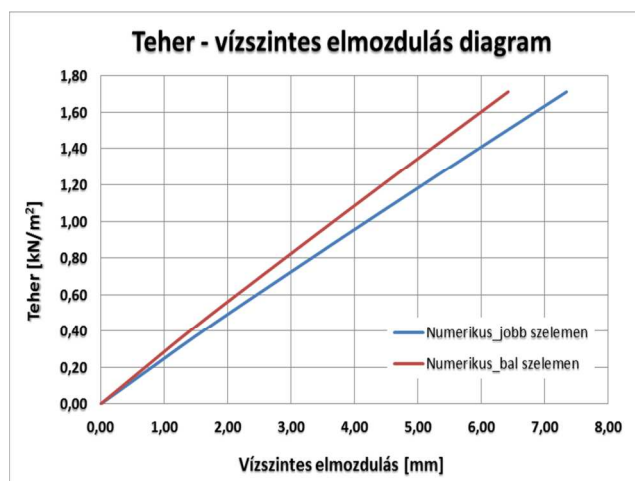
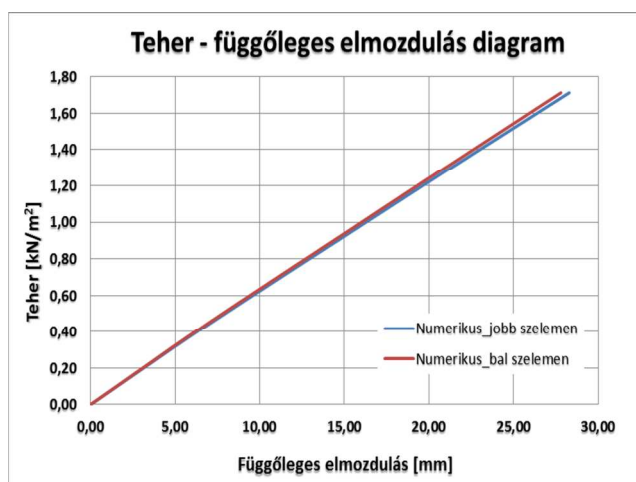
61. ábra: Z200ECO_10p – részletes globális modell, közbeső támasznál

A modell itt is héjelemek alkalmazásával épül fel és az átlapolt szakaszon (61. ábra) létesített kapcsolóelemek biztosítják a két szerkezet együttműködését. Az átlapolt szakasz környezetében a szelemenen és a trapézlemezen alkalmazott végeelemes háló is sűrítve kerül kialakításra, mely ezáltal pontosabb vizsgálatot tesz lehetővé.

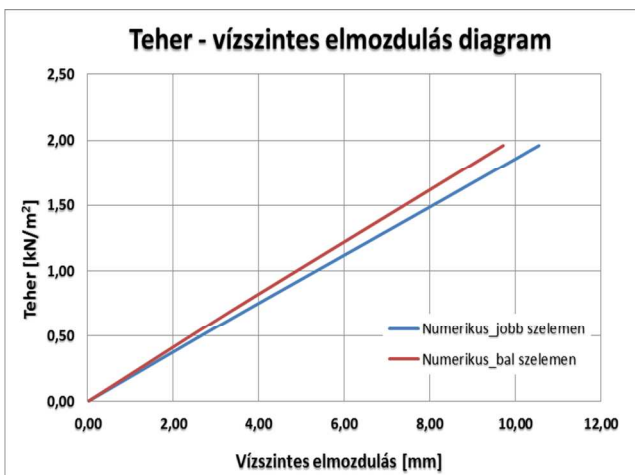
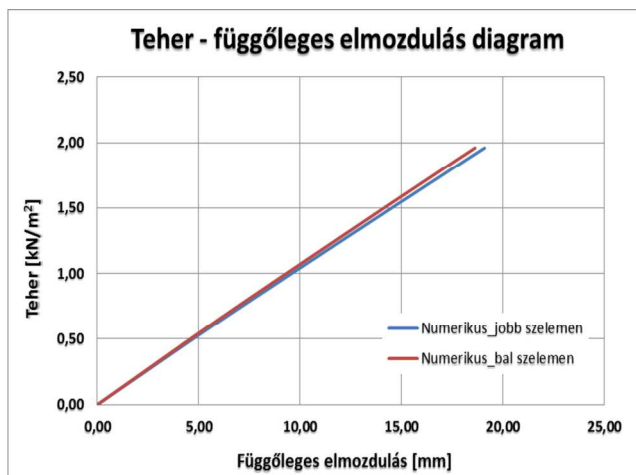
Amint azt a tanulmány 3.3. pontjában is ismertettem, itt csak MN analízist hajtok végre, mely szerint nem alkalmazok geometriai imperfekciókat, csak az anyagi nemlinearitást biztosítom az előzőek alapján (5. diagram). A trapézlemezeire elhelyezett egyenletesen megoszló terhelést a Newton-Raphson módszer segítségével kis teherlépcsőkben adom rá a szerkezetre. Ezzel biztosítom, hogy a számítás viszonylag rövid idő alatt kevés iteráció elérését követően konvergáljon. A vizsgálat célja, hogy még a tönkremenetel bekövetkezése előtt, lineáris állapotban verifikáljam a modellt.

6.2. Vizsgálat eredményei

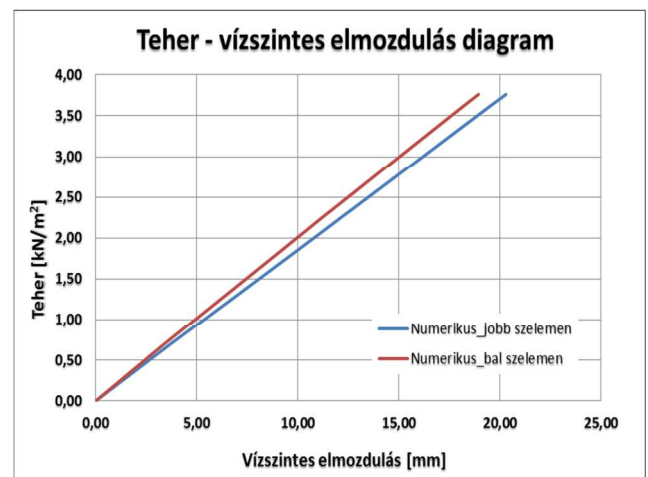
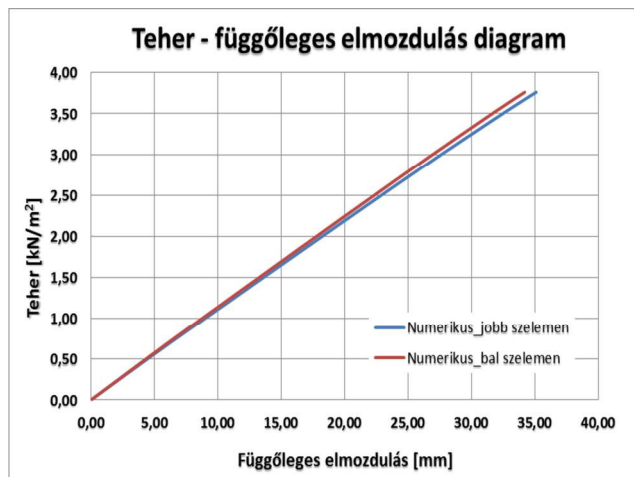
A következőkben ismertetem a különböző szelemennel ellátott könnyűszerkezetes tetőrendszer terhelés hatására bekövetkező függőleges és vízszintes elmozdulásait (62-69. diagram).



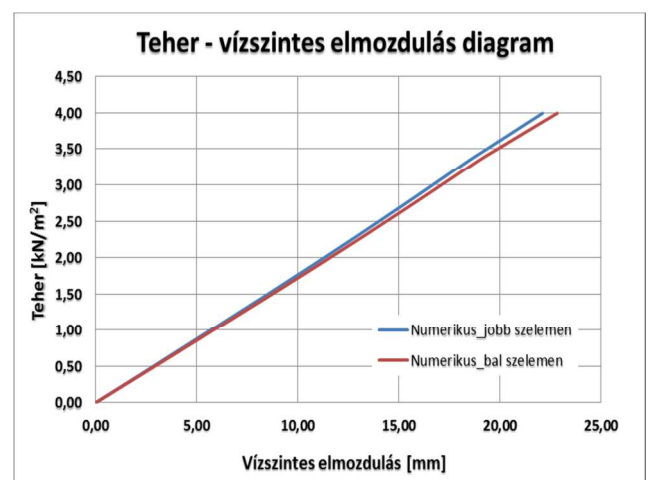
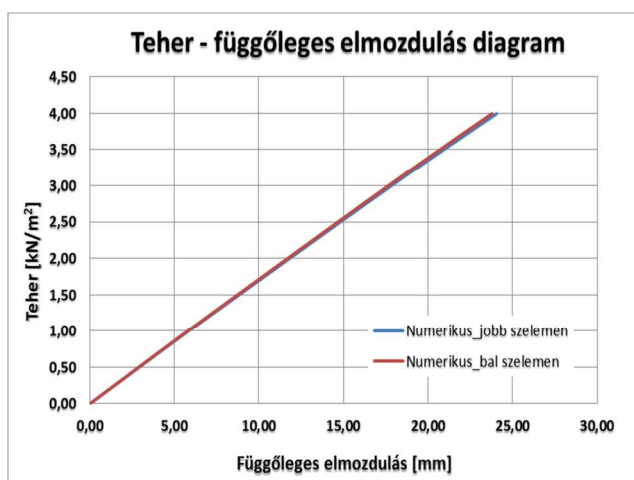
62-63. diagramok: Z150 – teher - elmozdulás diagramok



64-65. diagramok: Z200ECO_10p – teher - elmozdulás diagramok



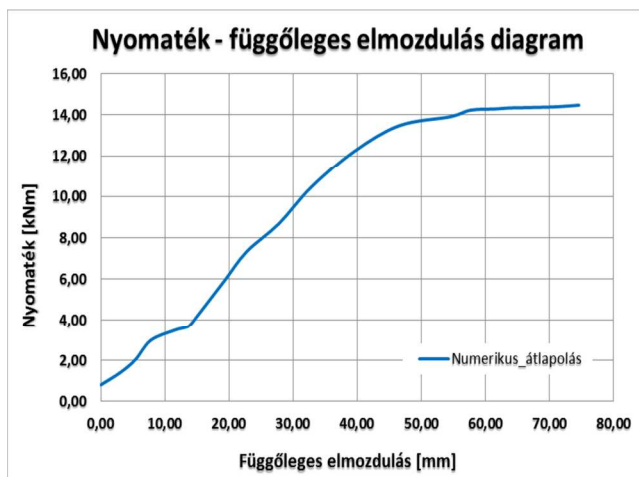
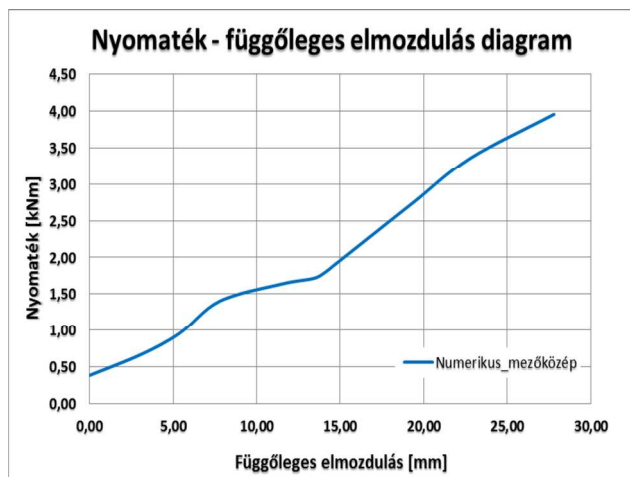
66-67. diagramok: Z200ECO_20p – teher - elmozdulás diagramok



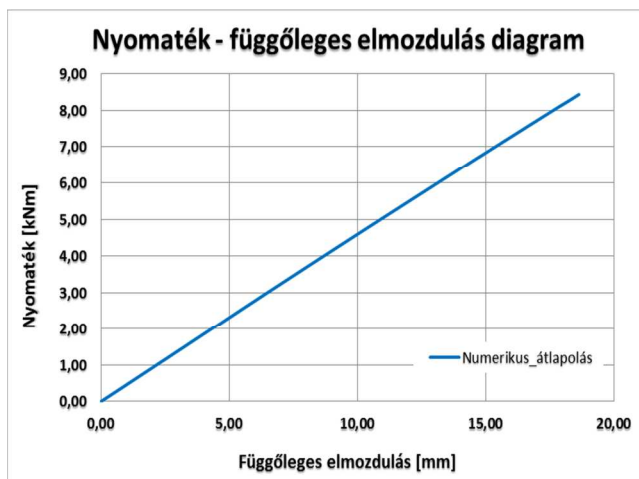
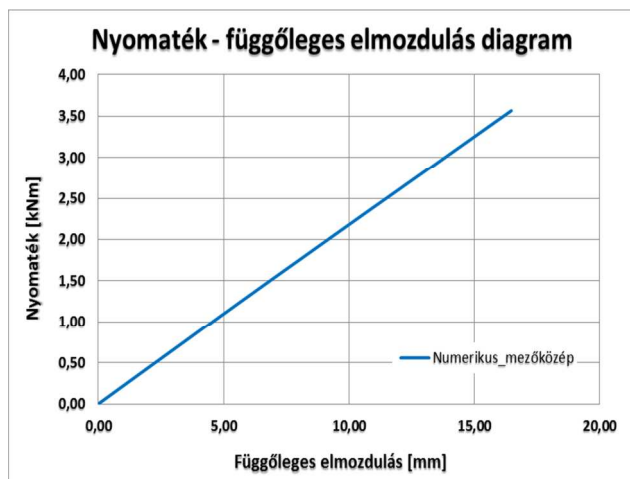
68-69. diagramok: Z250 – teher - elmozdulás diagramok

A diagramoknál az egyszerű globális modellnél tapasztaltak itt is megerősítésre kerültek, értem ez alatt azt, hogy a közbenső támasz két oldalán lévő tehát a bal, illetve a jobb szelemen közel azonos viselkedik a függőleges elmozdulás hatására. Azonban az előző fejezetben ismertetett modellhez képest, a vízszintes elmozdulás esetén már adódik némi szemmel látható eltérés, de ez inkább a Z150-es szelemenekre, illetve a Z200-as szelvényekre igaz. Tehát kijelenthető, hogy a szelemenek a lineáris szakaszon szimmetrikusan viselkednek. Megjegyzésként ismét felhívnom arra a figyelmet arra, hogy a szelemenen imperfekciót nem alkalmaztam.

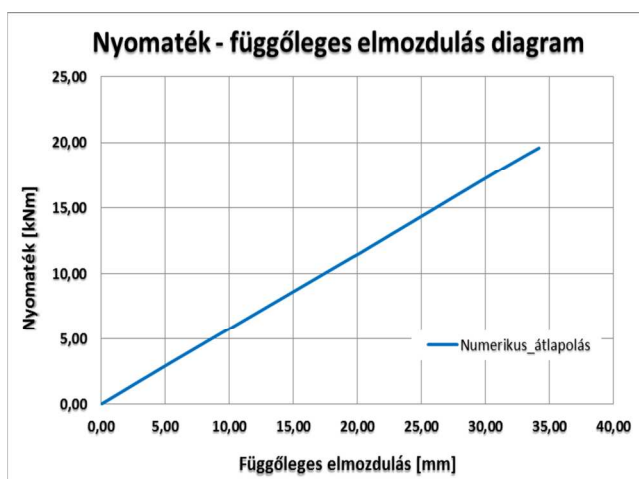
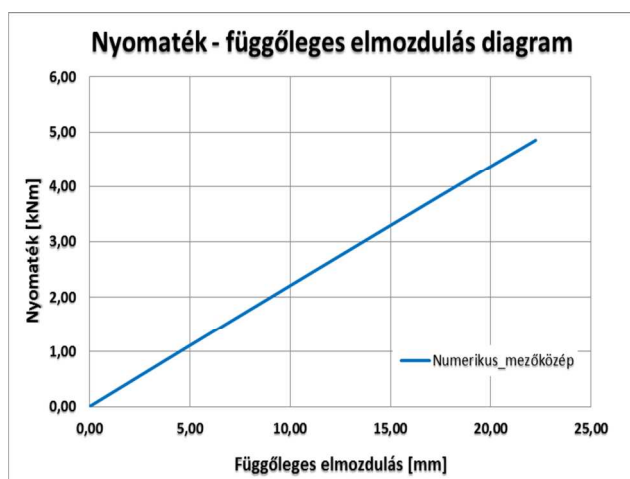
Ezt követően bemutatom a valós kísérlet nyúlásmérő bélyegeinek megfelelő helyeken mért feszültségekből számított nyomatékokat és a bal szelemen függőleges elmozdulását. Ezeket tartalmazzák a **70-77. diagramok**. A mezőközépen és az átlapolásnál helyezték el a bélyegeket (**3. ábra**), tehát az egyes szelvénytípusoknál én is két különböző nyomaték-elmozdulás diagramot ismertetek.



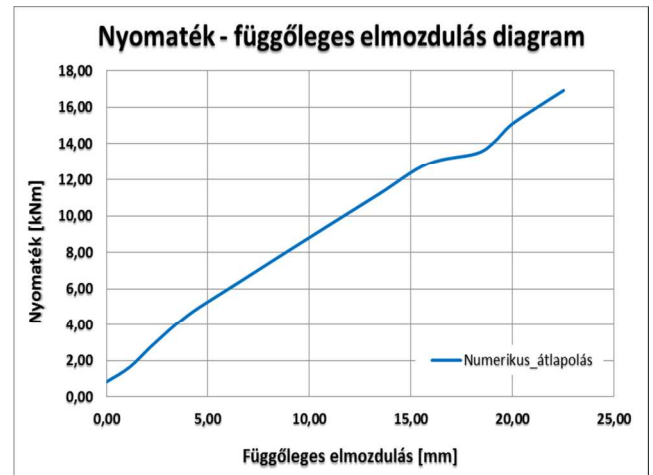
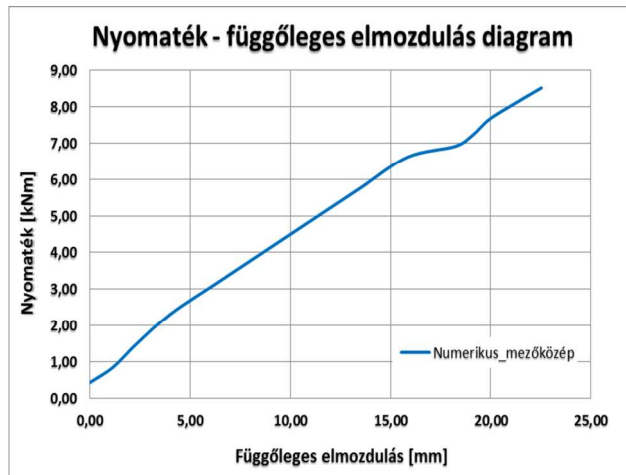
70-71. diagramok: Z150 – nyomaték - elmozdulás diagramok



72-73. diagramok: Z200ECO_10p – nyomaték - elmozdulás diagramok



74-75. diagramok: Z200ECO_20p – nyomaték - elmozdulás diagramok

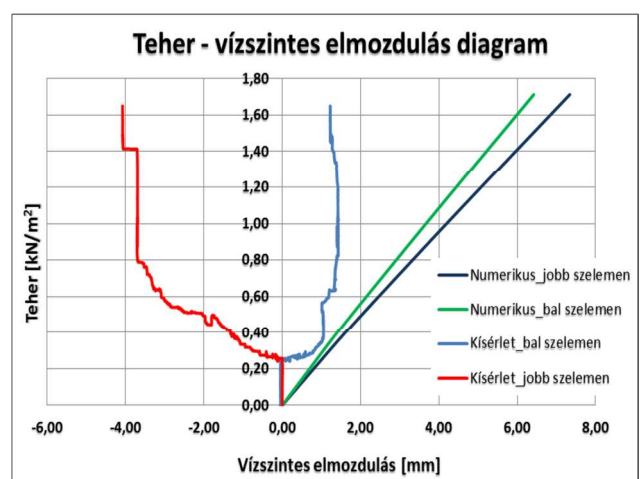
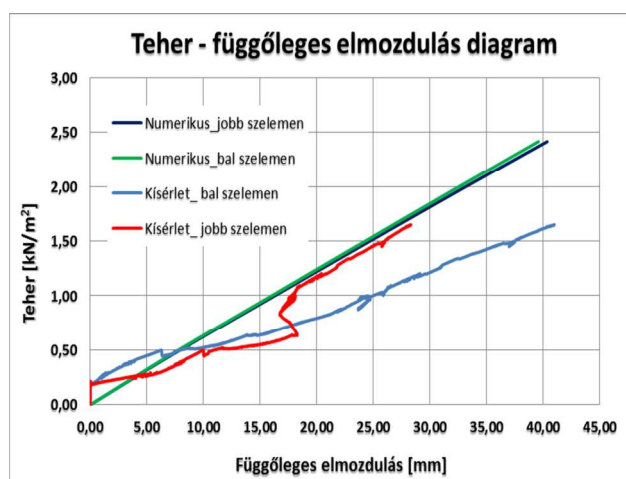


76-77. diagramok: Z250 – nyomaték - elmozdulás diagramok

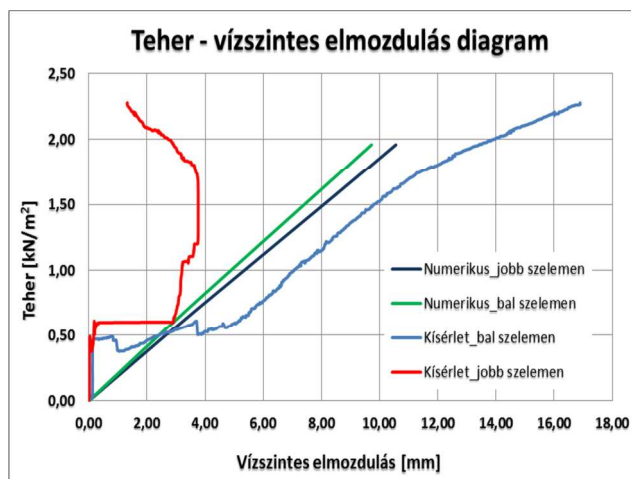
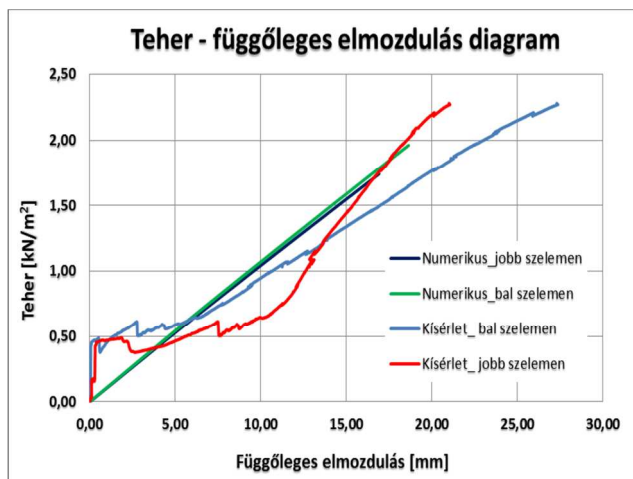
A fent ismertetett diagramokból megállapítható, hogy az átlapolásnál számított nyomatékok értékei szignifikánsan meghaladják a mezőközépen számított értékeket. Hasonló jelenséggel találkoztam a lokális modellek vizsgálatánál, amikor az eredményeket a valós kísérletből számított nyomatékokkal hasonlítottam össze. A valós modelleknél csak a Z200ECO szelvénynél tapasztaltam ugyanezt a tendenciát, de a Z150-es és Z250-es szelemen ettől eltérő módon viselkedett.

6.3. Eredmények verifikálása

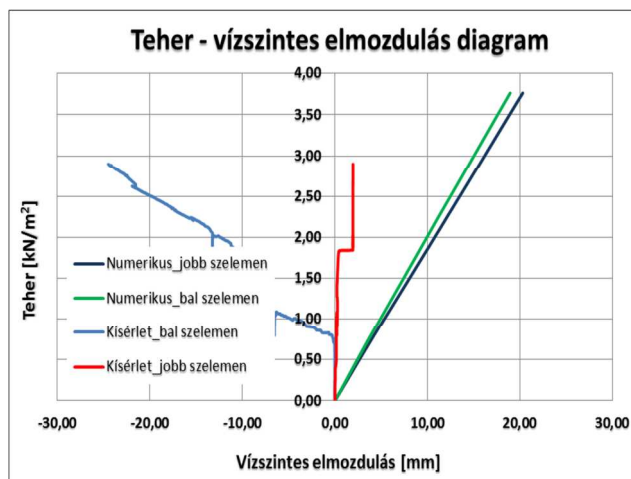
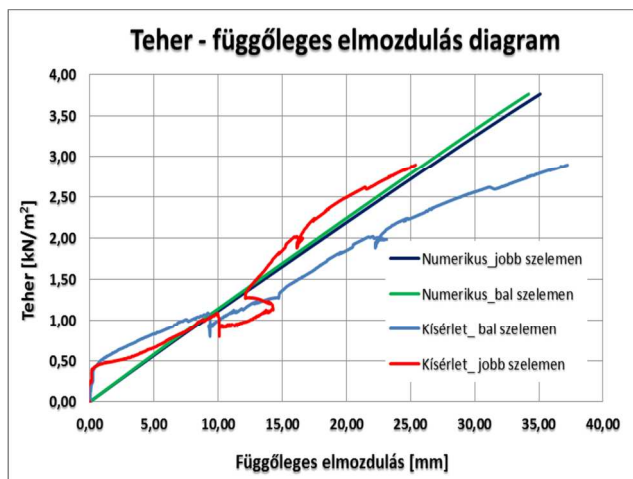
Végezetül a tanulmány előző pontjában ismertetett eredmények verifikálását végzem el. Következőkben is azonos felépítést követek, először a teher-elmozdulás diagramokat (**78-85. diagram**) hasonlítom össze, majd ezután a nyomaték-elmozdulások (**86-93. diagram**) következnek.



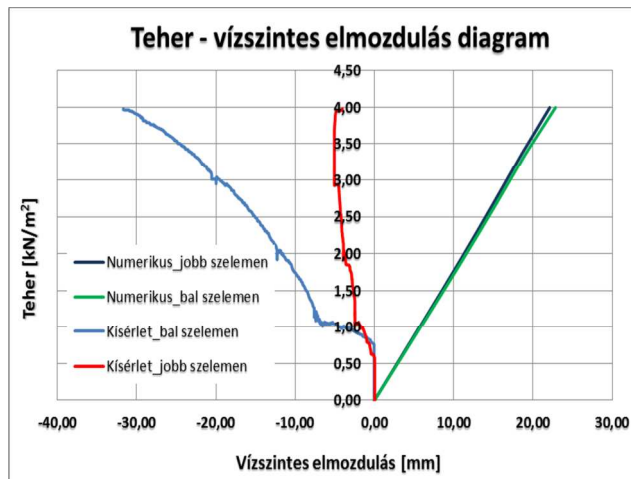
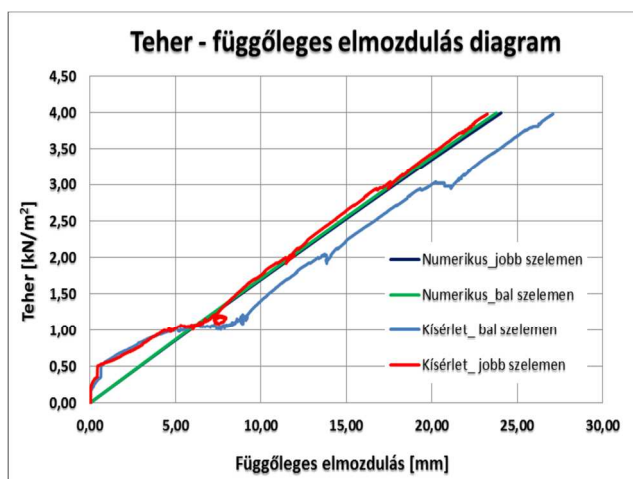
78-79. diagramok: Z150 – teher - elmozdulás diagramok



80-81. diagramok: Z200ECO_10p – teher - elmozdulás diagramok



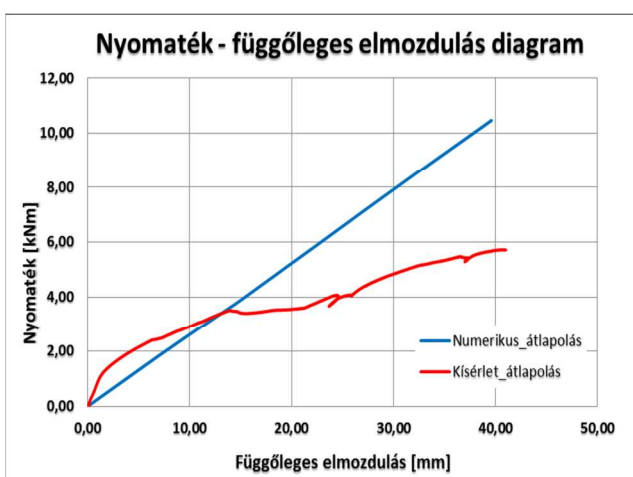
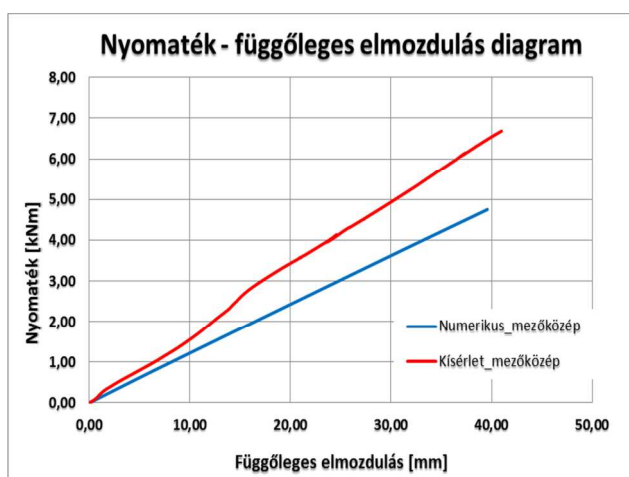
82-83. diagramok: Z200ECO_20p – teher - elmozdulás diagramok



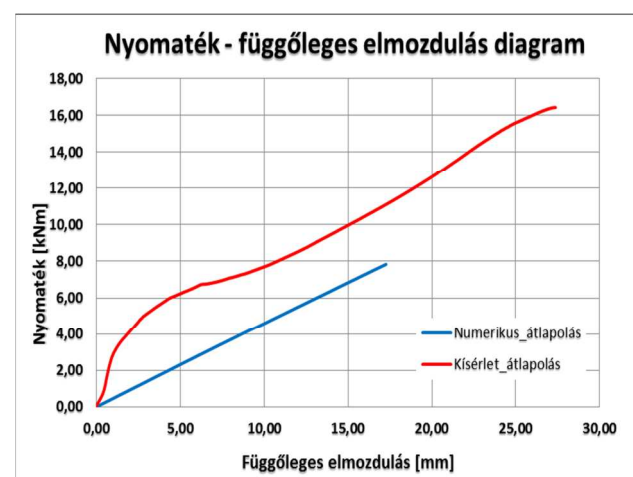
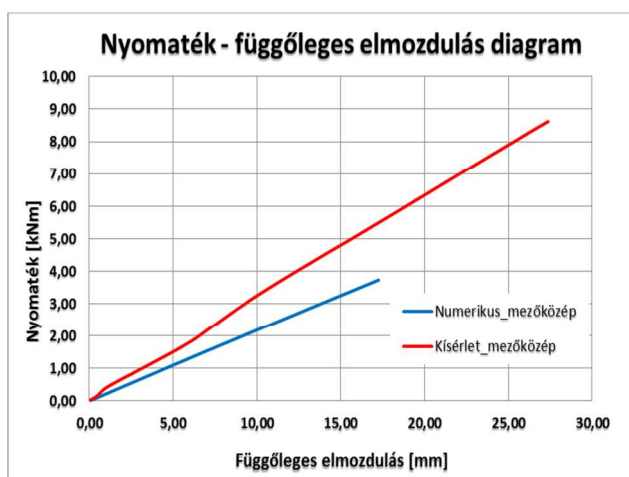
84-85. diagramok: Z250 – teher - elmozdulás diagramok

A diagramok alapján egyértelműen igazolható a fenti állítás, mely szerint az 'átlapoló' modell – melyekben a szelemenek közötti kapcsolat kontaktelemelek segítségével biztosított – jelentősen merevebb, mint a 'dupla' modell, emiatt a valós kísérlet eredményeit is jobban közelíti. A teher-függőleges elmozdulás diagramokkal kapcsolatban kijelenthető, hogy numerikus modellek merevségi viszonyai elegendő pontossággal megközelíti a valós kísérletét. Ugyanakkor szembetűnő itt is, hogy a numerikus modellben inkább szimmetrikus a viselkedés, mintsem aszimmetrikus.

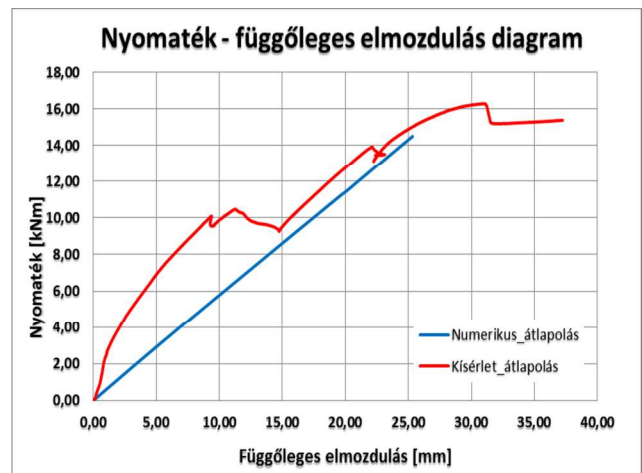
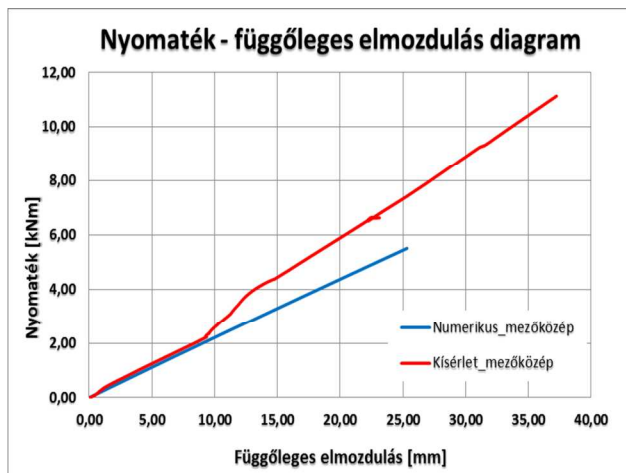
A fentieknek megfelelően most a nyomaték-elmozdulás diagramokat ismertetem. Ezek alapján kijelenthető, hogy a Z150-es szelemen esetén egyfajta merevség különbség jelenik meg, hiszen a mezőközepén a numerikus modell alatta marad a valós kísérletből meghatározott értéknél. Ezzel szemben az átlapolásnál - a kezdeti szakaszt leszámítva - ez a jelenség fordítva jelenik meg. A többi szelemennél inkább a diagramok kereszteződése a jellemző, mely a valós kísérlet során kialakuló lokális problémára vezethető vissza. Azonban a modell lineáris vizsgálatára elvégzett MN analízis ezt a jelenséget nem képes kezelni.



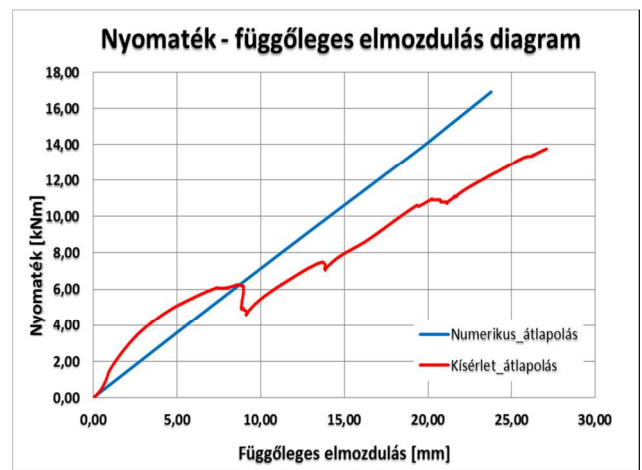
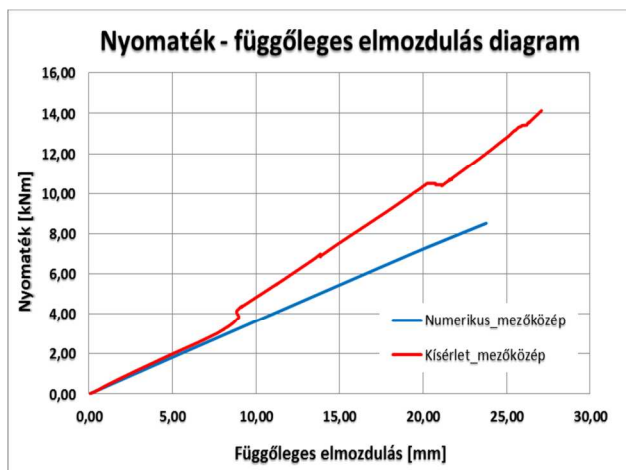
86-87. diagramok: Z150 – nyomaték - elmozdulás diagramok



88-89. diagramok: Z200ECO_10p – nyomaték - elmozdulás diagramok



90-91. diagramok: Z200ECO_20p – nyomaték - elmozdulás diagramok



92-93. diagramok: Z250 – nyomaték - elmozdulás diagramok

6.4. Részletes globális modellezés összefoglalása

Itt egyértelműen kijelenthető, hogy a fejezet elején ismertetett céloknak sikerült eleget tenni. A részletes modell a lineáris vizsgálat során megfelelő mértékben visszaadta a valós kísérlet merevségi viszonyait. Ugyanakkor az aszimmetrikus viselkedés nem jelent meg, emiatt a későbbiek folyamán további módosításokra lesz szükség. Ennél a szintnél mindenképpen tovább kell lépni, hogy egyértelműen meg tudjam határozni a modell erősségeit és gyengeségeit, valamint előnyeit, illetve hátrányait is.

Végezetül kijelenthető, hogy az itt elvégzett vizsgálatok bebizonyították, illetve igazolták, hogy a kontaktelemelekkel ellátott átlapolt szelemenek merevségi viszonyai jobban megfelelnek a valóságos kísérlet által szolgáltatott eredményeknek.

7. Tanulmány összefoglalása

Napjainkban a vékonyfalú Z szelemeneket egyre szélesebb körben alkalmazzák és véleményem szerint még nem aknázták ki teljesen a benne rejlő lehetőségeket. Ez részben érthető is, hiszen a tanszék által vizsgált trapézlemezzel ellátott, háromtámaszú szelemenek tetőrendszer viselkedése meglehetősen összetett. Többek között ezért is választottam az OTDK dolgozatom témájaként. Ezenkívül az irodalomkutatásom során megismert, a vékonyfalú szerkezetek méretezésére megalkotott szabvány is tartalmaz bizonytalanságokat.

Így a tanulmány összefoglalásánál kijelenthető, hogy a szerkezet numerikus modellezése jelentős kihívásokat rejt magában. Ezért is állítottam fel a tanulmány elején egy megoldási programot, melyben fokozatosan haladtam az egyszerű modellektől egészen az összetettig.

Először a lokális modelleket vizsgáltam, melyeket a keresztmetszeti szintű képlékeny tönkremeneteli módok és teher szintek verifikálására hoztam létre. Ezeknél a modelleknél alkalmazott elmozdulás-terhek és a Newton-Raphson megoldó módszer rövid idő alatt meghozta a kívánt eredményt. Itt már szembevető volt, de teljes bizonyossággal csak a két globális modell analízisét követően jelenthettem ki, hogy az átlapolt szelemen szakasz modellezését minél pontosabban adom meg, annál inkább visszakapom a valós kísérletnél is tapasztalt merevségi viszonyokat.

A szelemen globális modellezésére két fajta megoldást is megvizsgáltam. Az egyik a trapézlemez nélküli kialakításban létrehozott egyszerű globális modell, a másik a pontosabban kidolgozott globális modell. Az egyszerű globális modellnél csak a szelemen megfolyásáig jutottam, hiszen ezt követően az analízis megoldása számos iterációt követően sem hozott eredményt. Így ezeknél a modelleknél a megfelelő módosítások, illetve pontosítások elvégzését követően további vizsgálatok elvégzését javaslom, hiszen a tönkremeneteli módok már megjelentek, de a szelemen teljes képlékeny teherbírását nem sikerült feltérképezni. Megvizsgáltam továbbá az átlapoltszakaszon belüli igénybevétel eloszlást a két szelemen között és bemutattam, hogy rövid átlapolások esetén az igénybevétel arány megegyezik a falvastagságok arányával.

Végezetül a részletes globális modellekkel kapcsolatos vizsgálatokat is tovább kellene folytatni, hogy a tanulmány elején feltett kérdésekre megfelelő válaszokkal tudjak szolgálni, azaz hogy ilyen fokú részletes, numerikus kidolgozás tényleg szükséges-e ahhoz, hogy a teherbírási értékeket és a tönkremeneteli módokat visszakapjam.

A tanulmány zárásaként megjegyzem, hogy az itt leírtak megfelelő alapot szolgáltatnak ahhoz, hogy megtaláljam a leghatékonyabb numerikus modellezést, mellyel a valós kísérletek kiválthatók. Tehát a vizsgálatokat érdemes tovább folytatni, melyet diplomamunkám során meg is teszek.

Irodalomjegyzék

- ^[1] A. L. Joó, L. Dunai: Geometric imperfections of Z-profiles for numerical models, Róma, Olaszország, 2004
- ^[2] A. L. Joó: Analysis and design of cold-formed thin walled roof systems, Budapest, 2009
- ^[3] Sándor Ádány, László Dunai, Gábor Jakab, Attila Joó: „Parametric study on the effect of advanced modelling of Lindab Z-Purlin system”, Research report, BME Department of Structural Engineering, Budapest, 2011.
- ^[4] Li, Z., Joó, A.L., Ádány, S., Schafer, B.W.: Model identification in nonlinear collapse analysis of thin-walled members, Pittsburgh, Amerikai Egyesült Államok, 2011

Felhasznált szabványok

- MSZ EN 1993-1-1:2005: Acélszerkezetek tervezése
- BS-EN1993-1-3:2006: General rules – Supplementary rules for cold –formed members and sheeting

Felhasznált szoftverek

- AxisVm 10. 1b.
- ANSYS v14.0
- Editplus v3.30
- Microsoft Excel 2010
- Microsoft Word 2010