

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Többszörösen merevített lemezes szerkezetek ellenállása és duktilitása

Készítette:

Balogh Ádám

Konzulens:

Dr. Vigh László Gergely

Dunakeszi, 2013

Tartalomjegyzék

| | |
|---|------------|
| 1. Bevezetés | 3. |
| 1.1. Probléma bemutatása | 3. |
| 1.2. Célküszések | 3. |
| 1.3. Megoldási stratégia | 4. |
| 2. Duktilitás, disszipatív szerkezetek, nemlineáris analízis | 4. |
| 2.1. Duktilis szerkezetek, viselkedési tényező | 4. |
| 2.2. Kapacitástervezés | 6. |
| 2.3. Nemlineáris végeelemes analízis | 7. |
| 2.3.1. Bevezetés | 7. |
| 2.3.2. Imperfekciók | 7. |
| 2.3.3. Anyagjellemzők | 8. |
| 2.4. Dr. Vigh László Gergely kísérletei | 9. |
| 2.4.1. Eredmények | 10. |
| 2.5. Hosszbordával merevített lemezek numerikus modellezése | 11. |
| 2.5.1. Dr. Vigh László Gergely modelljei | 11. |
| 2.5.2. Khosrow Ghavami és Mohammed Reza Khedmati cikke | 12. |
| 3. Verifikált modellek | 13. |
| 3.1. Numerikus modellek | 13. |
| 3.1.1. Imperfekciók, anyagmodell | 14. |
| 3.2. Az S8-as és S12-es modellek | 15. |
| 3.3. A valós és a virtuális kísérletek összehasonlítása | 17. |
| 4. Virtuális kísérletek | 19. |
| 4.1. Numerikus modellek a paraméteres kísérletekhez | 19. |
| 4.2. Kísérletek | 19. |
| 4.3. Előzetes vizsgálatok | 21. |
| 4.3.1. Felső öv kifordulása | 21. |

| | |
|-----------------------------------|-------------------|
| 4.3.2. Gerinc beroppanása | 22. |
| 4.3.2. Következtetések | 22. |
| 4.4. A 3 méteres gerendák | 22. |
| 4.4.1. Eredmények bemutatása | 23. |
| 4.5. A 6 méteres gerendák | 25. |
| 4.5.1. Eredmények bemutatása | 25. |
| 4.6. Kísérleti gerendák | 25. |
| 4.7. Eredmények értékelése | 33. |
| <u>5. Összefoglalás</u> | <u>34.</u> |
| <u>A függelék</u> | <u>36.</u> |
| <u>B függelék</u> | <u>41.</u> |
| <u>Irodalomjegyzék</u> | <u>45.</u> |

1. Bevezetés

1.1. Probléma bemutatása

TDK dolgozatom a hosszbordákkal többszörösen merevített lemezes szerkezetek ellenállását és duktilitását vizsgálja. A magasépítésben néhány kivételtől eltekintve nem terjedt el az ilyen típusú kialakítás alkalmazása. Az Eurocode bevezetésével azonban hazánkban is kötelezővé vált a földrengésteherre történő méretezés, amely terhekre a merevített lemezek a jelenleg alkalmazott megoldásoknál kedvezőbben viselkedhetnek.

A magas gerincű tartók elsősorban a hídépítésben terjedtek el, azonban hidak felszerkezetében a szabvány nem engedi meg képlékeny csukló kialakulását, magasépítési szerkezetek esetén viszont kihasználhatjuk a tartók képlékeny tartalékát. A képlékeny alakváltozási képesség még inkább előtérbe kerül szeizmikus terhek esetén, amikor is a magas duktilitás révén nagy energiaelnyelő képességű disszipatív zónák alakíthatók ki, amelyek jelentősen javítják a földrengésekkel szembeni teljesítményt.

Magas gerincű tartók esetén a merevítetlen, karcsú- vagy egy-két erős hosszbordával merevített gerinc horpadása jelentősen ronthatja az elem duktilitását. Ebben az esetben a duktilitás növelésére hatékony módszer lehet a viszonylag kicsi, hajlékony hosszbordák alkalmazása. Ezeknek a hosszbordával merevített szerkezeti elemeknek tisztázatlan a képlékeny alakváltozási képessége. Ezzel a kialakítással elérhető lehető legnagyobb duktilitáshoz meg kell határozni a bordák ideális számát és méretét. Ezen kívül az övlemez méreteinek változtatásával az öv és a gerinc közti feszültségeloszlás arányát is változtatni lehet, befolyásolva ezzel, hogy a gerincben a hajlító vagy a nyíró feszültségek dominánsak. Ez alapvetően befolyásolja a gerinc viselkedését, ugyanis az első esetben a nyomott gerinczóna horpadása, míg a másodikban a nyírási horpadás lesz a jellemző.

1.2. Célkitűzések

A fentiek alapján céлом virtuális kísérletekkel meghatározni a magas gerincű, többszörösen merevített szerkezetek megfelelő duktilitásához szükséges kialakítást, a hosszbordák számát és méretét, és az ideális megtámasztási viszonyokat, majd az előnyök és hátrányok összevetésével megállapítani a kialakítás létjogosultságát disszipatív acélszerkezetekben.

1.3. Megoldási stratégia

A virtuális kísérletek alapja egy vagy több valós kísérletek alapján verifikált vagy kalibrált numerikus modell. Ha rendelkezésre áll ilyen numerikus modell, ezáltal pontos szimulációkat végezhetünk, melyek megfelelnek a laborkísérleteknek. Ennek megfelelően először valós kísérlet alapján saját numerikus modelleket készítünk, melyeket verifikálunk a kísérleti eredmények alapján. Ezután a verifikált numerikus modellen paraméteres vizsgálatokat végzünk, melyek segítségével megállapíthatom az ideális kialakításokat és geometriai méreteket.

2. Duktilitás, disszipatív szerkezetek, nemlineáris analízis

Ebben a fejezetben a földrengésterhekre kedvezően viselkedő disszipatív acélszerkezetekkel kapcsolatos kutatásaimat foglalom össze.

2.1. Duktilis szerkezetek, viselkedési tényező

Az Eurocode hazai bevezetésével kötelezővé vált a szeizmikus terhekre történő méretezés. A földrengésterhekkkel az Eurocode 8. fejezete, az EN 1998 foglalkozik.

A szeizmikus tervezés egyik fontos alapelve, hogy nem próbáljuk meg a szerkezetre az altalajról átadódó teljes erőt felvenni, inkább biztosítunk egy meghatározott alakváltozási képességet, duktilitást melynek köszönhetően a szerkezet elnyelheti a földrengéstéher nagy részét.

A duktilitás, azaz a szerkezetek képlékeny alakváltozási képességének hatását az Eurocode 8 szerint a q viselkedési tényezőn keresztül vehetjük figyelembe. A viselkedési tényező figyelembe vétele a gyakorlati számítás szempontjából a terhek csökkentését jelenti. Ezért alapvető fontosságú ennek helyes felvétele a tervezés kezdetén. A viselkedési tényező értéke tág határok között mozoghat, attól függően, hogy disszipatív vagy nem disszipatív szerkezetet tervezünk. [1]

Az Eurocode 8 a magaspépítési szerkezeteket három kategóriába sorolja a duktilitásuk alapján (a hidak kategóriáinak felsorolásától eltekintve). A viselkedési tényező jellemző értékei acélszerkezetekre vonatkoznak.

- DCL: Ductility Class Low, alacsony duktilitási osztály, $1,5 < q < 2$
- DCM: Ductility Class Medium, közepes duktilitási osztály, $2 < q < 4$
- DCH: Ductility Class High, magas duktilitási osztály, $4 < q < 8$

A viselkedési tényező $q = 1,5$ értékre minden magasépítési acélszerkezet esetén felvehető. Az alacsony duktilitási osztályba tartozó szerkezetek nem disszipatívák, ezeket kvázi rugalmas elven kell méretezni. A közepes és a magas duktilitási osztályba tartozó szerkezeteket szabad disszipatív szerkezetként kezelni.

Szeizmikus teherre történő tervezés esetén tehát komoly előnye van a disszipatív szerkezeteknek a hagyományos, rugalmas szerkezetekhez képest, mivel a földrengésből átadódó erő jelentősen csökkenthető. Ezt azonban csak különös körültekintéssel végzett tervezéssel lehet megvalósítani, többek között ellenőrizni kell a szerkezet folyási mechanizmusának kialakulását. Úgy kell terveznünk, hogy a szerkezetben képlékeny csuklók alakulhassanak ki, melyek biztosítják a kellő alakváltozási képességet. Fontos tehát ismernünk az egyes szerkezeti elemeink duktilitását, annak érdekében, hogy előre meg tudjuk határozni ezeknek a képlékeny csuklóknak a kialakulási helyeit. [1]

Megfelelő duktilitású disszipatív szerkezetek esetén tehát a $q = 1,5$ -t jelentősen meghaladó értéket vehetünk figyelembe. Ez az érték függ a szerkezet típusától, ezek a 2.1. táblázatban láthatóak.

| Szerkezettípus | Duktilitási osztály | |
|---|---------------------|----------------------|
| | DCM | DCH |
| Nyomatékbíró keret | 4,0 | $5\alpha_u/\alpha_1$ |
| Központosan merevített acélszerkezet | 4,0 | 4,0 |
| Átlós merevítés | 2,0 | 2,5 |
| V merevítés | | |
| Külpontosan merevített acélszerkezet | 4,0 | $5\alpha_u/\alpha_1$ |
| Fordított inga szerkezet | 2,0 | $2\alpha_u/\alpha_1$ |
| Nyomatékbíró keret központos merevítéssel | 4,0 | $4\alpha_u/\alpha_1$ |

2.1. táblázat- acél tartószerkezetek q viselkedési tényezői [2]

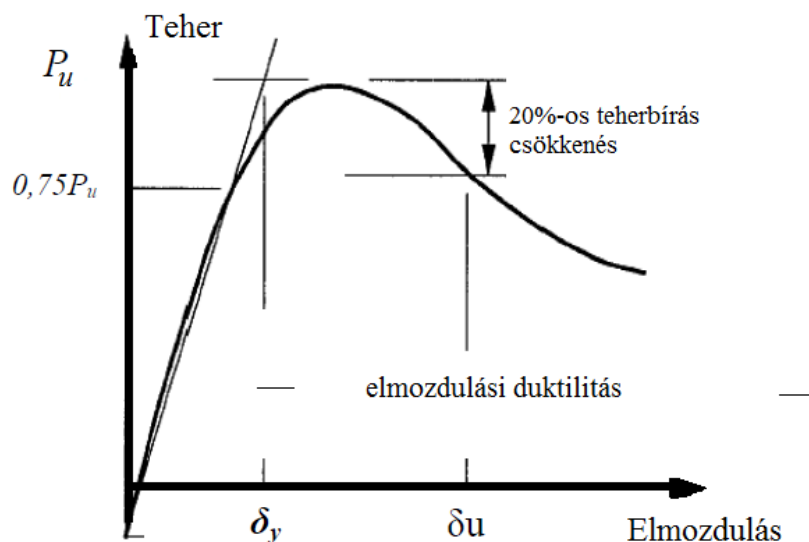
- α_1 a rugalmas állapot felső határához tartozó teherszorzó, azaz ennyivel kell megszorozni a vízszintes szeizmikus terhet, ahhoz, hogy a szerkezetben kialakuljon az első képlékeny csukló.
- α_u mozgási mechanizmus kialakulásához tartozó teherszorzó, azaz ennyivel kell megszorozni a vízszintes szeizmikus terhet ahhoz, hogy annyi keresztmetszetben alakuljon ki képlékeny csukló, hogy az már a teljes szerkezet stabilitásvesztését okozza. [2]

2.2. Kapacitástervezés

Amennyiben a szeizmikus teherre történő méretezés során nem vesszük figyelembe a szerkezet duktilitását, a földrengésből származó teljes terhet figyelembe kell venni és az elemek méretezése hagyományos módon történhet. Ha viszont figyelembe vesszük, azaz csökkentjük a terhet a viselkedési tényezővel, akkor az ún. kapacitástervezést kell végrehajtani.

Azt, hogy a teljes szerkezet mennyire képes képlékenyen viselkedni, a létrejövő képlékeny csuklók határozzák meg. A kapacitástervezés szerint a szerkezetet tehát oly módon kell megtervezni, hogy a kívánt és csakis a kívánt elemekben jöhessenek létre képlékeny csuklók. Ez biztosítja, hogy a többi, rugalmasan méretezett elem túlzottan nagy alakváltozásait elkerüljük, mely rideg törést eredményezne. Ehhez pontosan meg kell határoznunk a képlékeny csuklók helyét. Ezeket a zónákat gondosan megtervezzük, hogy a képlékeny deformációkat el tudják viselni. Ahhoz, hogy ezt a lépést elvégezhessük fontos ismernünk az egyes szerkezeti elemeink duktilitását. [1]

Egy szerkezeti elem duktilitására több definíció létezik. Az egyik értelmezés szerint egy szerkezeti elem duktilitása az erő – elmozdulás diagram alapján definiálható. Eszerint a duktilitási tényező: $\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y}$, ahol δ_u a leszálló ágon a teljes teherbírás 80% - hoz tartozó eltolódás, míg δ_y a rugalmas szakaszon a teljes teherbírás 75%-ához tartozó elfordulás. Az elmozdulási duktilitás értelmezése a 2.1. ábrán látható.



2.1. ábra – elmozdulási duktilitás [3]

2.3. Nemlineáris végelelemes analízis

Ebben a fejezetben a merevített lemezek nemlineáris, nagy elmozdulások figyelembevételével végzett analízisét mutatom be.

2.3.1. Bevezetés

A bordákkal merevített lemezek rendkívül elterjedtek az építőiparban, köszönhetően az egyszerű gyárthatóságuknak és annak, hogy magas a teherbírás-súly arányuk. Az egyik legfontosabb terhelési eset a nyírás, valamint a tartó síkjában ébredő tengelyirányú nyomás, amely általában hajlításból származik. [4]

A tönkremeneteli mechanizmusa ezeknek az elemeknek egy rendkívül összetett mérnöki probléma, mivel sokféle tönkremeneteli mód lehetséges a lemez és borda geometriájától, anyagoktól, megtámasztási viszonyoktól és terheléstől függően. Ahhoz, hogy ezt a sok tényezőt a lehető legpontosabban figyelembe vehessük numerikus számításoknál, a geometriai és anyagi imperfekciók és nagy elmozdulások figyelembevételével végzett nemlineáris analízist kell végezni.

2.3.2. Imperfekciók

A nemlineáris analízis esetén figyelembe kell venni a szerkezeti elem kezdeti, gyártásból adódó valamint a bordák ráhegesztéséből adódó geometriai imperfekcióit és sajátfeszültségeit.

Ennek egyik módja az Eurocode szerinti helyettesítő geometriai imperfekció alkalmazása. Ez helyettesíti mind a geometriai imperfekciókat, mind a kezdeti feszültségeket. Az alkalmazandó értékek a 2.2. táblázatban láthatók és a hozzá tartozó kihajlási alakokat az 2.2. ábra mutatja.

| imperfekció típusa | elem | alak | amplitúdó |
|--------------------|--|--------------------|-----------------------|
| globális | teljes, l hosszúságú elem | fél szinusz hullám | 2.3. táblázat alapján |
| globális | a hosszúságú hosszborde | fél szinusz hullám | $\min(a/400, b/400)$ |
| lokális | a és b oldalhosszúlemez vagy lemezelem | horpadási alak | $\min(a/200, b/200)$ |
| lokális | merevítő borda vagy öv kihajlása | fél szinusz hullám | $1/50$ |

2.2. táblázat – EC3-1-5 szerinti helyettesítő geometriai imperfekciók [5]

| kihajlási görbe | imperfekció |
|-----------------|-------------|
| a | $L/300$ |
| b | $L/250$ |
| c | $L/200$ |
| d | $L/150$ |

2.3. táblázat – kezdeti imperfekciók a kihajlási görbe függvényében [5]

| Imperfekció típusa | Elem |
|--|------|
| globális, l hosszúságú elem | |
| globális, a hosszúságú hosszborða | |
| a és b oldal-hosszúságú lemez vagy lemezelem | |
| merevítő-borða vagy öv kihajlása | |

2.2. ábra – a helyettesítő geometriai imperfekciók modellezése [5]

Másik alternatíva, hogy valós kísérlet próbatestén végzünk méréseket, melyek alapján megtudhatjuk a jellemző geometriai imperfekciókat és sajátfeszültségeket.

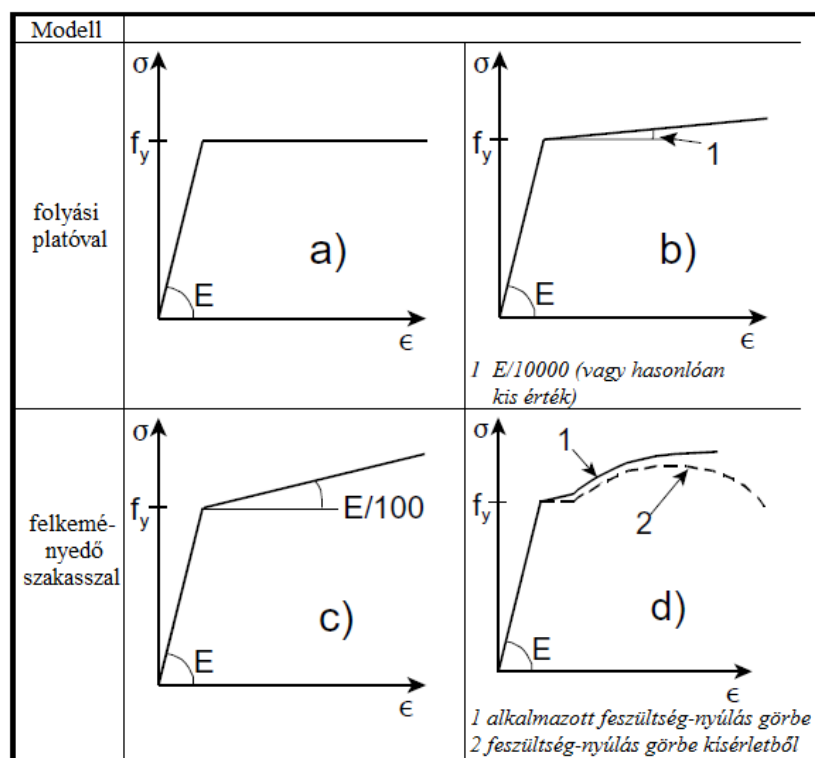
2.3.3. Anyagjellemzők

A nemlineáris analízis során fontos az acél anyag felkeményedése. A hatása több változótól függ, ilyen a lemez és a bordák karcsúsága. Végeselemes modellezés esetén két választásunk

van az anyagmodellről illetően. Vagy valós, mért adatokat használunk fel, vagy szabvány szerint járunk el. Az EC3-1-5 szerint a kívánt pontosságtól függően négyféle anyagmodell lehet felhasználni, lásd 2.3. ábra:

- rugalmas–képlékeny anyagmodell, felkeményedés nélkül
- rugalmas – képlékeny anyagmodell, látszólagos felkeményedéssel (numerikus okokból)
- rugalmas – képlékeny anyagmodell, lineáris felkeményedéssel
- valós feszültség – nyúlás görbe alapján, a következő módon:

$$\sigma_{alk} = \sigma(1 + \epsilon) \text{ és } \epsilon_{alk} = \ln(1 + \epsilon)$$

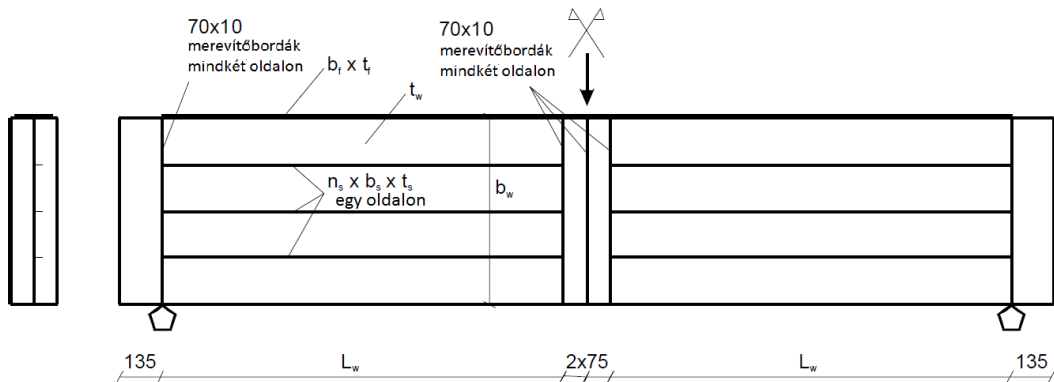


2.3. ábra – anyagjellemzők modellezése EC3-1-5 szerint [5]

2.4. Dr. Vigh László Gergely kísérletei

A virtuális kísérletekhez szükséges verifikált modelleket Dr. Vigh László Gergely által a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Hidak és Szerkezetek Tanszékén végzett kísérletei alapján készíttem el. [6]

Öt próbatesten végzett kísérleteket, melyeket S0 és S8 - S12-ig nevezett el. Ezek geometriai méretei, valamint a terhelés és a megtámasztási viszonyok a 2.4. ábrán láthatóak. Az S0-s próbatest gerince merevítetlen, a másik négy mindegyikén 3-3 hosszborda szolgáltatja a merevítést.



2.4. ábra – az S0 - S12-es próbatetek geometriája [6]

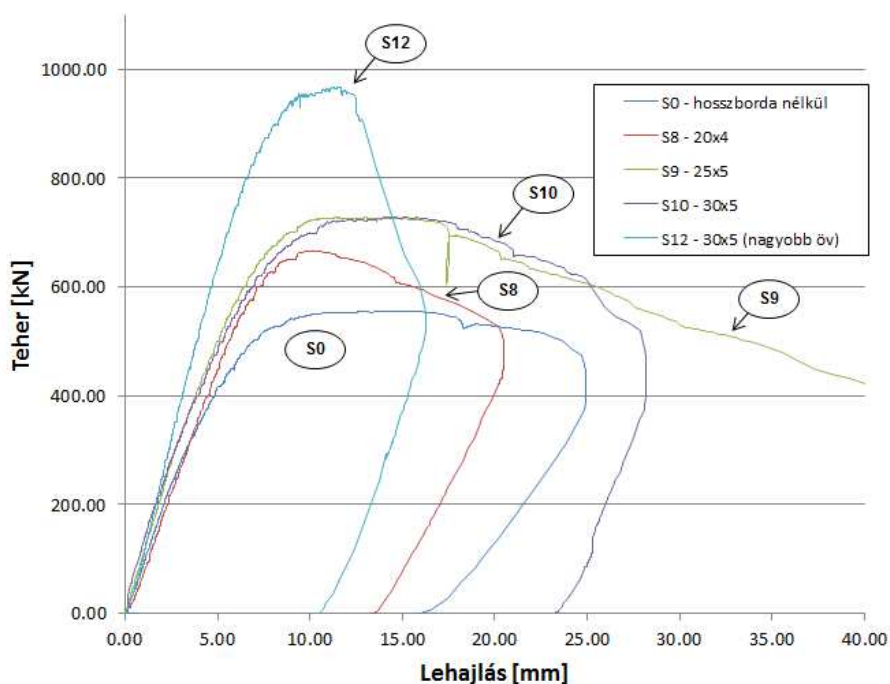
A 2.4. táblázat a geometriai adatokat valamint a legnagyobb geometriai imperfekeciókat tartalmazza.

| Próbatest | L_w [mm] | b_w [mm] | t_w [mm] | b_f [mm] | t_f [mm] | n_s [-] | b_s [mm] | t_s [mm] | legnagyobb imperfekeció [mm] |
|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------------------------|
| S0 | 1275 | 600 | 4 | 150 | 6+6 | - | - | - | 12,7 |
| S8 | | | | | | 3 | 20 | 4 | 11,2 |
| S9 | | | | | | 3 | 25 | 5 | 7,2 |
| S10 | | | | | | 3 | 30 | 5 | 3,6 |
| S12 | | | | | | 3 | 30 | 5 | 2,1 |

2.4. táblázat – a próbatetek méretei és legnagyobb geometria imperfekeciói [6]

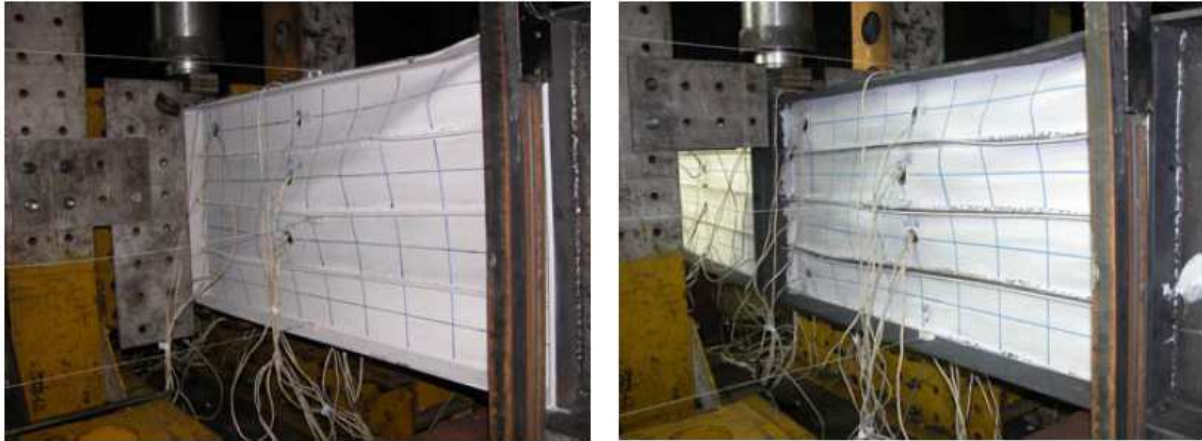
2.4.1. Eredmények

Az elmozdulás vezérelt kísérletek során mérték az erőt, valamint a tartó közepének lehajlását. A kapott erő – elmozdulás diagramok a 2.5. ábrán láthatóak.



2.5. ábra – a laboratóriumi kísérletekből kapott erő-elmozdulás diagramok [6]

A későbbiekben fontos S8 és S12-es próbatetek tönkremeneteléről készült képek a 2.6. ábrán láthatóak:



2.6. ábra – S8-as és S12-es próbatetek tönkremenetele [6]

2.5. Hosszbordával merevített lemezek numerikus modellezése

Ebben a fejezetben a hosszbordával merevített lemezek végeselemes modellezésének szakirodalmi példáit tekintem át, abból a célból, hogy bemutassam a szokásos modellezési sajátosságokat.

2.5.1. Dr. Vigh László Gergely modelljei

A 2.4. pontban bemutatott kísérletek mindegyikéhez modellek is készültek ANSYS környezetben. [6] A numerikus modellben 4 csomópontú héjelemeket használt, melyek típusa SHELL181.

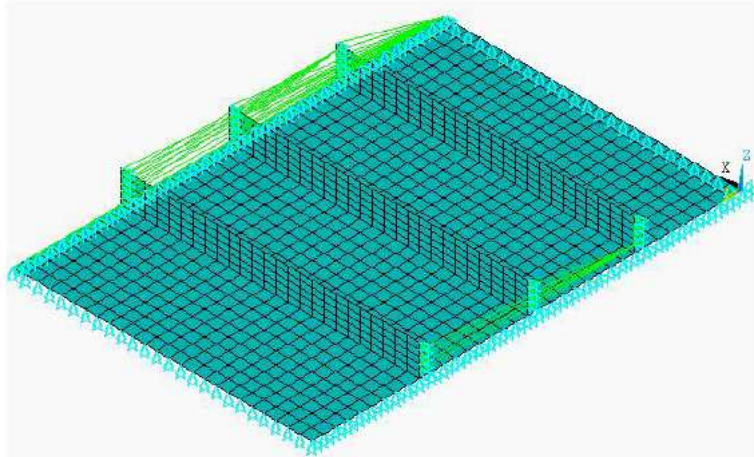
A cél a kísérletek lehető legpontosabb modellezése volt. A hálóméretet legfőképp a geometriai viszonyok és az imperfekciók, illetve azon belül leginkább a kezdeti feszültségek eloszlása határozta meg. Az 50 mm-es elemméret már kellő pontosságot ad minden esetben, melyet konvergencia vizsgálattal is alátámasztott.

Az acél anyag valós feszültség-nyúlás diagramjait állította be a nemlineáris anyagi viselkedéshez. A hegesztés okozta kezdeti feszültségeket is figyelembe vette, a folyáshatár 60%-ával húzófeszültségként a bordák mentén, illetve 30%-ával nyomófeszültségként a mezőkben.

Az analízis a nagy elmozdulások figyelembevételével történt. Elmozdulás-vezérelt volt a virtuális kísérlet is, azaz a terhet egyre növekvő elmozdulások képviselték az erők helyett.

2.5.2. Khosrow Ghavami és Mohammed Reza Khedmati cikke

Ez a cikk a merevített lemezek nemlineáris analízisével foglalkozik. [4] Mivel a próbatesteken végzett méréseik során minden esetben nagy lehajlásokat és képlékeny deformációkat tapasztaltak, olyan végeleemes programot kellett használniuk, amely képes kezelni a geometriai és anyagi nemlinearitásokat. Az ő választásuk is az ANSYS programra esett. A 2.7 ábrán látható az egyik kísérleti kialakításuk.



2.7. ábra – Tanaka és Endo próbatestének végeleemes modellje [4]

A lemezhez és a bordákat is a SHELL43-as elemet választották az ANSYS elemtípus könyvtárából. Ez az elem a SHELL181-eshez hasonlóan 4 csomópontú és képes kezelni a nagy elmozdulásokat. Minden csomópontnak három elmozdulási és három elfordulási szabadságfoka van.

A hegesztés okozta kezdeti feszültségeket az előbb bemutatott kísérlettől eltérően nem modellezték külön, ezért ennek figyelembe vételére speciális eljárást végeztek. Kezdeti nyomással terhelték a lemezt, még lineárisan rugalmas analízis során. A kezdeti nyomás értékét úgy vették fel, hogy a legnagyobb elmozdulás megegyezzen a kísérletek során a próbatestenen mért legnagyobb elmozdulással. Feltételezték, hogy ez a módszer helyettesíti mind a geometriai imperfekciókat mind a kezdeti feszültségeket. Ennek megfelelően a kapott elmozdult alakot alkalmazták a végleges, nemlineáris modellen, mint kezdeti geometria.

3. Verifikált modellek

A 2.4. pontban részletezett kísérletekből rendelkezésemre álló adatok (geometria, imperfekciók és anyagmodellek) és a 2.3. pontban bemutatott ismeretek alapján saját végeselemes modelleket fejlesztettem, melyek nem azonosak a 2.5.1. pontban ismertettekkel. Ezt követően a kapott eredményeket összehasonlítom a kísérleti eredményekkel.

3.1. Numerikus modellek

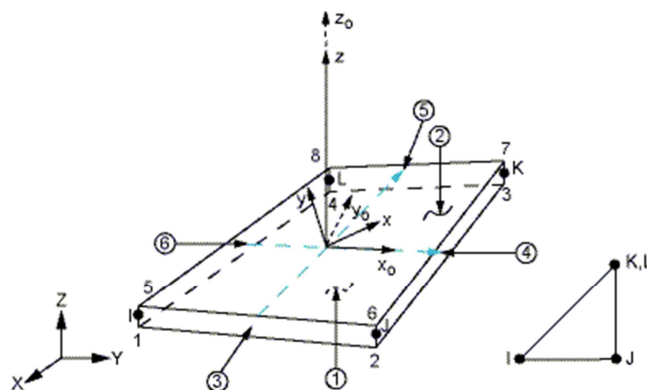
Az öt kísérlet alapján két numerikus modellt készítettem, az S8 és S12-es számú próbatestekről. Mivel ezek geometriája tér el leginkább egymástól, így ezzel a kettővel tudom a leginkább különböző modelleket létrehozni. Ezeknél az volt a cél, hogy a lehető legréálisabb módon készítsem el, ehhez a valós imperfekciókat és anyagmodelleket használtam fel.

A végeselemes modelleket ANSYS végeselemes programmal készítettem el [7]. Mindkét modell héjelemekből épül fel.

A héjmodellhez SHELL181-es elemtípust használtam. Ez az elem vékony és közepesen vékony héjszerkezetek vizsgálatára alkalmas. Választhatóan három vagy négy csomópontú végeselem, amelyben minden csomópontnak 6 szabadságfoka van: x, y és z irányú eltolódás, és x, y és z tengely körüli elfordulás. A modellezés során a négy csomópontú változatot használtam. Fontos, hogy ez az elem jól alkalmazható lineáris és nemlineáris feladatok, valamint nagy elfordulások és elmozdulások esetén.

A SHELL181-es elem alkalmazható rétegelt esetben is, öszvér illetve szendvics szerkezetek esetén is. Az elem a Midlin- Reissner elméletet veszi figyelembe.

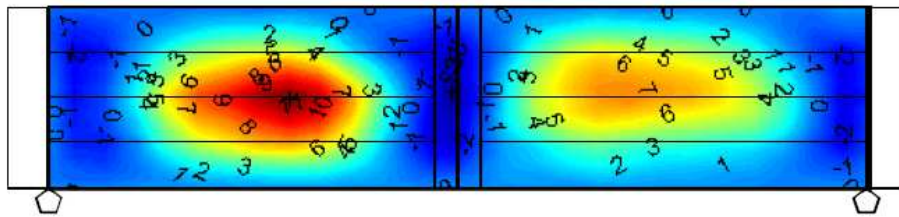
A 3.1. ábrán a SHELL181-es elem geometriája látható, baloldalon a négy, jobboldalon pedig a három csomópontú változat:



3.1. ábra- SHELL181-es elem geometriája [8]

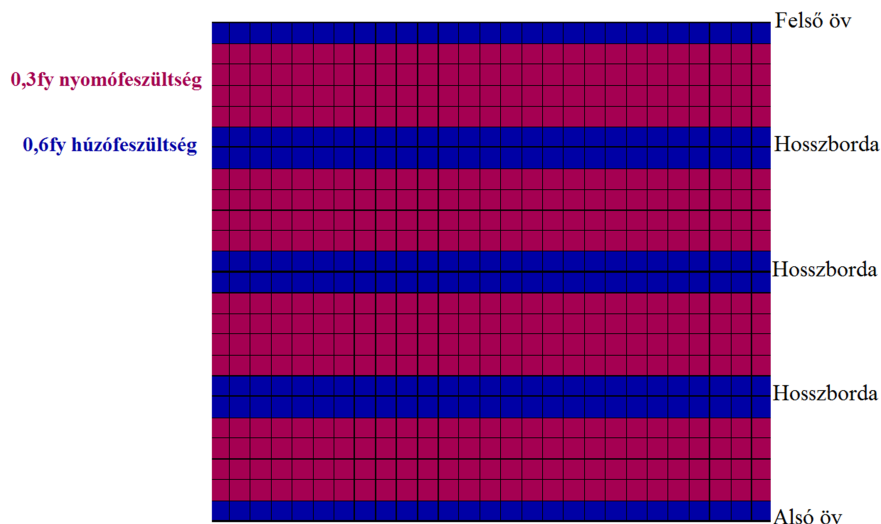
3.1.1. Imperfekciók, anyagmodell

A hosszbordák gerincre történő hegesztése jelentős imperfekciókat okoz. A kísérletek során minden egyes próbatesten lemérték a geometriai imperfekciókat, először a bordák ráhegesztése előtt, majd utána. Megmérték ezen kívül a sajátfeszültségeket, melyek a gyártási pontatlanságokból és a hosszbordák felhegesztéséből azármaztak. A geometriai imperfekciók legnagyobb értékei az egyes próbatesteken a 2.4. táblázatban található meg, eloszlásuk pedig a 3.2. ábrán látható.



3.2. ábra – a geometriai imperfekciók eloszlása az S8-as próbatest gerincében, a hosszbordák ráhegesztése után [5]

A numerikus modellen a geometriai imperfekciókat a kísérlet során mért értékeknek megfelelően állítottam be, míg az sajátfeszültségek eloszlását a modellen a 3.3. ábra mutatja. A valós feszültség – nyúlás diagramokat állítottam be a nemlineáris anyagi viselkedéshez. A számítások az anyagi és geometriai nemlinearitások és a nagy elmozdulások figyelembevételével történtek.



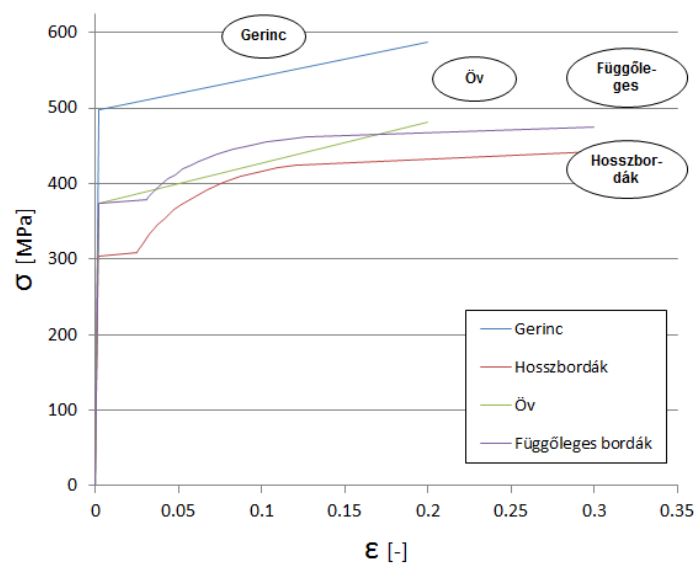
3.3. ábra – sajátfeszültségek eloszlása

A különböző méretű acéllemezek folyáshatárát és szakítószilárdságát húzó kísérlettel állapították meg, valamint a feszültség-fajlagos nyúlás értékpárokat több pontban is feljegyezték, így rendelkezésre állnak az anyagmodellek. Az egyes lemezek folyáshatárát,

szakítószilárdságát és szakadó nyúlását a 3.1. táblázat, az alkalmazott anyagmodelleket pedig a 3.4. ábra mutatja.

| Lemez | Osztály | $f_{y,l}$ [MPa] | $f_{y,l}$ [MPa] | f_u [MPa] | ϵ_u [%] |
|----------|---------|--------------------|--------------------|----------------|---------------------|
| 120 x 6 | S235 | 279 | 281 | 403 | 38 |
| 40 x 6 | S235 | 287 | 292 | 421 | 38,1 |
| 30 x 5 | S235 | 327 | 340 | 446 | 38,5 |
| 25 x 5 | S235 | 303 | 309 | 445 | 36,1 |
| 20 x 4 | S235 | 329 | 343 | 453 | - |
| 600 x 4 | S355 | 465 | 479 | 587 | - |
| 150 x 6 | S355 | 374 | - | 484 | - |
| 200 x 10 | S355 | 373 | - | 474 | - |

3.1. táblázat – az egyes lemezek folyáshatára, szakítószilárdsága és szakadó nyúlása

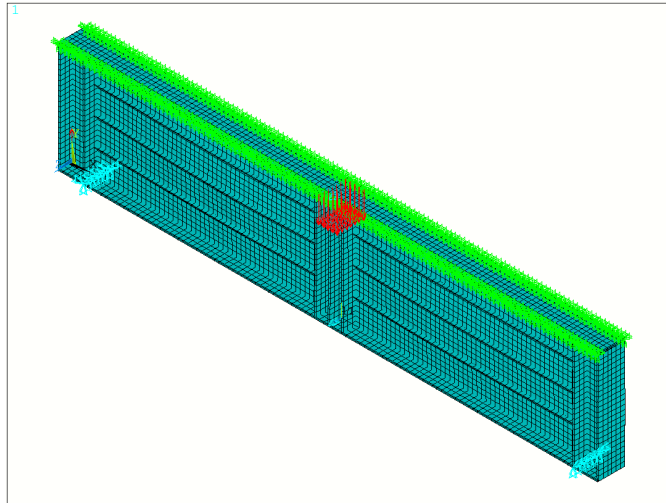


3.4. ábra – az alkalmazott anyagmodellek

3.2. Az S8-as és S12-es modellek

Az S8-as és S12-es próbatestek alapján készített modellek geometriai méreteit a kísérleti kialakításnak megfelelően vettem fel. A 3.5. ábra az S8-as modell kísérlet szerinti kialakítást mutatja, két szélén és középen a megtámasztások láthatóak, középen piros színnel a teher, a felső övön látható zöld elemek az öv és a teherelosztó lemez kapcsolata.

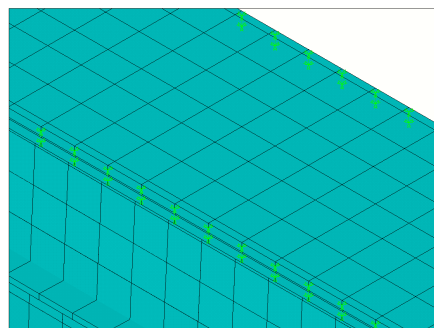
A modell egyszerű gerendaként van megtámasztva, egyik oldalán csuklós, a másikon pedig görgős támasszal. A középső keresztmetszetben, a kísérlethez hasonlóan az alsó és a felső övek meg vannak támasztva a tartó síkjára merőlegesen, megakadályozandó a tartó kifordulását. A végeelemes háló nagyságát a kezdeti feszültségek eloszlása határozta meg. Ahhoz, hogy a mért kezdeti feszültségek egyensúlyban lehessenek a modellen, a hálót 25 mm nagyságú elemekkel hoztam létre.



3.5. ábra – S8-as modell kísérlet szerinti kialakítása

A teher a terhelésre kialakított felületen található csomópontokra szétszött, az „y” tengellyel ellentétes irányú koncentrált erők, valamint a tartó önsúlya, mely az acél sűrűségével, 7850 kg/m^3 -el van figyelembe véve. Azért tekintettem el az elmozdulás-vezérelt megoldástól, mert az erő-vezérelt változattal gyorsabb konvergenciát sikerült elérnem. A modellben alkalmazott rugalmassági modulus: $E = 210.000 \text{ N/mm}^2$, a Poisson-tényező $\nu = 0,3$.

Az S12-es kísérlettől eltérően az S8-as modell esetén szükség volt rá, hogy a 6 mm vastagságú felső övre egy másik, szintén 6 mm vastag acéllemezt hegesszenek, ennek célja, hogy a relatíve koncentrált teher alatt ne szenvedjen nagy alakváltozásokat a vékony öv. Ezt a numerikus modellben szintén egy másik lemezzel modelleztem, melyet az övhöz rögzítettem és a megfelelő csomópontokat a „COUPLING” paranccsal összepárosítottam. Ez a kapcsolat biztosítja, hogy az elemek minden irányban együtt mozduljanak és együtt is forduljanak el. A kapcsolat a 3.6. ábrán látható.



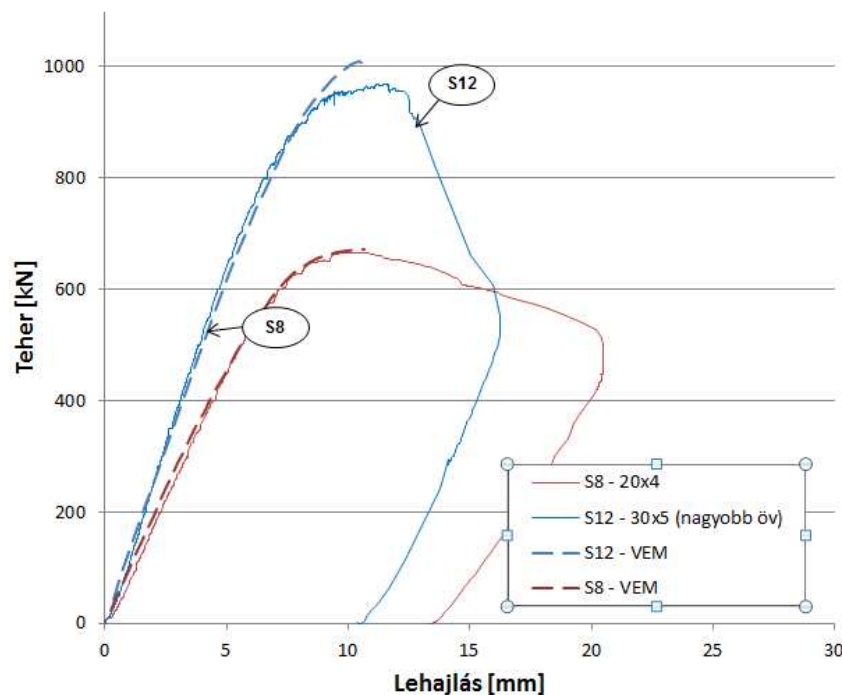
3.6. ábra – a párosított elemek kapcsolata az S8-as modellen

A számítások az anyagi és geometriai nemlinearitások és a nagy elmozdulások figyelembevételével történtek.

3.3. A valós és virtuális kísérletek összehasonlításai

A numerikus vizsgálatok első lépéseként virtuális kísérletekkel szimuláltam a valós kísérletek közül kettőt. Később ezeket felhasználva fejleszték további modelleket, melyeken további virtuális kísérleteket végezhetek el. Az előző, 3.2. fejezetben tárgyaltam az összetett modellek tulajdonságait.

A 3.7. ábrán láthatóak a numerikus modellekből és a kísérletekből kapott erő – elmozdulás diagramok.



3.7. ábra – a kísérleti és a numerikus modellekből kapott erő-elmozdulás diagramok összehasonlítása

A görbék alapján jól látható, hogy a virtuális modellek viselkedése igen jól közelíti a valós próbatestekét. Látható, hogy a teher – elmozdulás diagramok jól fedik egymást, és a maximális teherbírás is közel egybeesik. Az eltérés a teherbírásban mindkét esetben kevesebb, mint 5%. A kapott teherbírások és egymással, valamint az Eurocode-dal való összehasonlításuk a 3.2. és 3.3. táblázatokban látható.

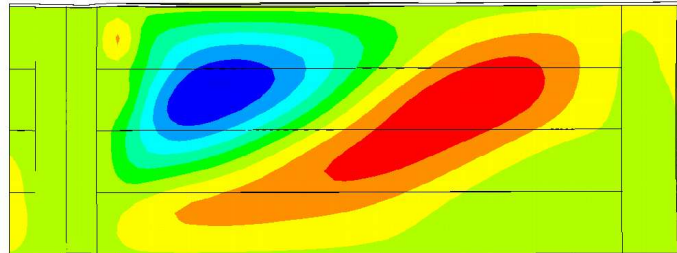
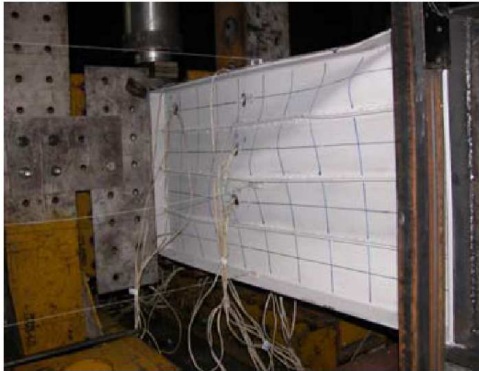
| | EC3-1-5 [kN] | Numerikus modell [kN] | Kísérlet [kN] |
|-----|-----------------|--------------------------|------------------|
| S8 | 573,6 | 675,01 | 664,6 |
| S12 | 831,2 | 1009,36 | 967,6 |

3.2. táblázat – teherbírások összehasonlítása

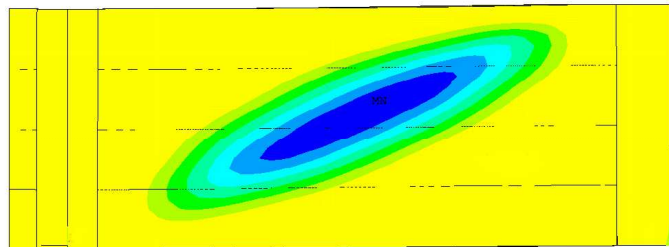
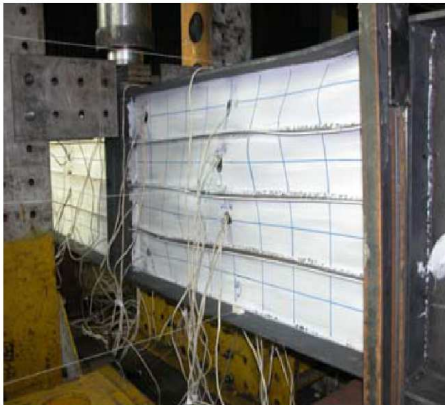
| | EC3-1-5 [kN] | Numerikus modell [kN] | Kísérlet [kN] |
|-----|-----------------|-----------------------|------------------|
| S8 | 0,863 | 0,989 | 1 |
| S12 | 0,859 | 1,043 | 1 |

3.3.táblázat – teherbírások aránya

A teherbírásen kívül fontos a tönkremenetel módjának egyezése is, ezek hasonlóságát mutatják a 3.8. és 3.9. ábrák.



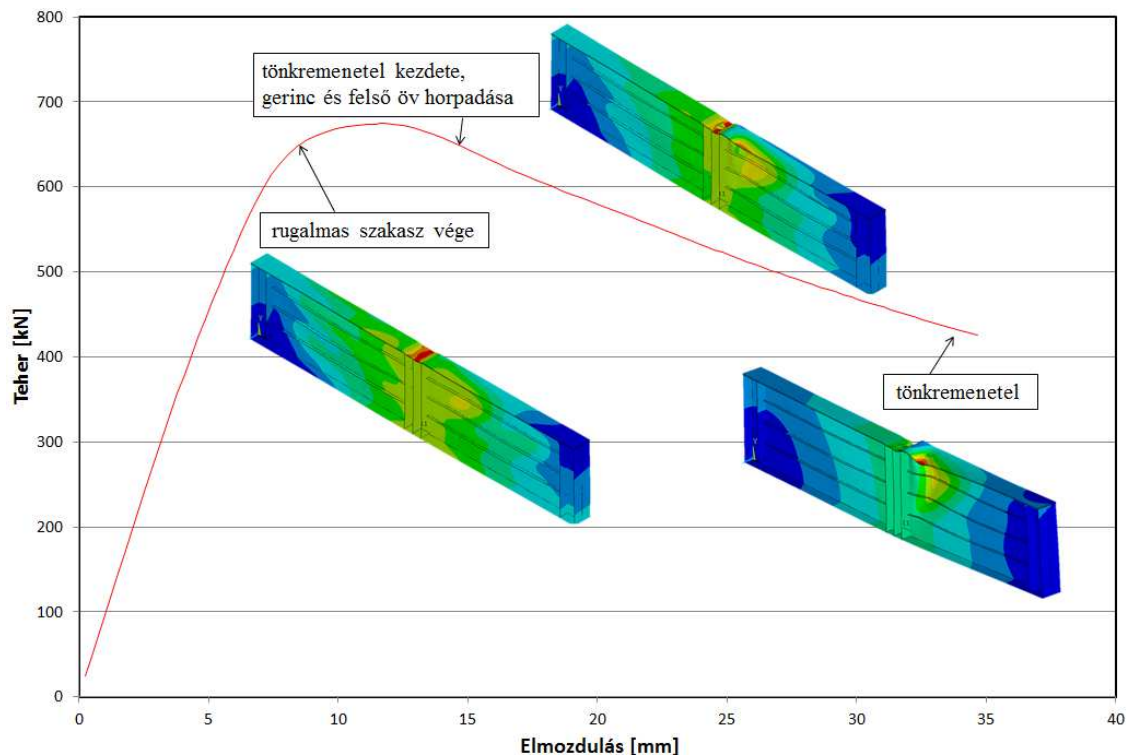
3.8. ábra – tönkremeneteli mód az S8-as próbatest esetén: nyírási horpadás



3.9. ábra – tönkremeneteli mód az S12-as próbatest esetén: nyírási horpadás

A fentiek alapján megállapítható, hogy a fejlesztett modellek jól visszaadják a valós próbatestek viselkedését, ezáltal alkalmasak arra, hogy későbbi virtuális kísérletekhez ezekre épülő modelleket fejlesszek. Az eredmények jól mutatják a kis bordák hatékonyságát nyírás és hajlítás esetén, valamint azt, hogy az Eurocode 3-1-5 alábecsüli a teherbírást.

Fontos a modellek leszálló ágának helyessége is. A 3.10. ábrán az S8-as modell erőelmozdulás diagramja látható, valamint a gerenda képe az egyes jellemző szakaszokon.



3.10. ábra – S8-as modell erő-elmozdulás diagramja

4. Virtuális kísérletek

4.1. Numerikus modellek a paraméteres kísérletekhez

Az S8-as és S12-es modellek tehát a valós kísérletek alapján verifikáltak. A virtuális kísérletekhez ezeket, illetve ezek részeit fogom felhasználni úgy, hogy bizonyos geometriai paramétereiket változtatom.

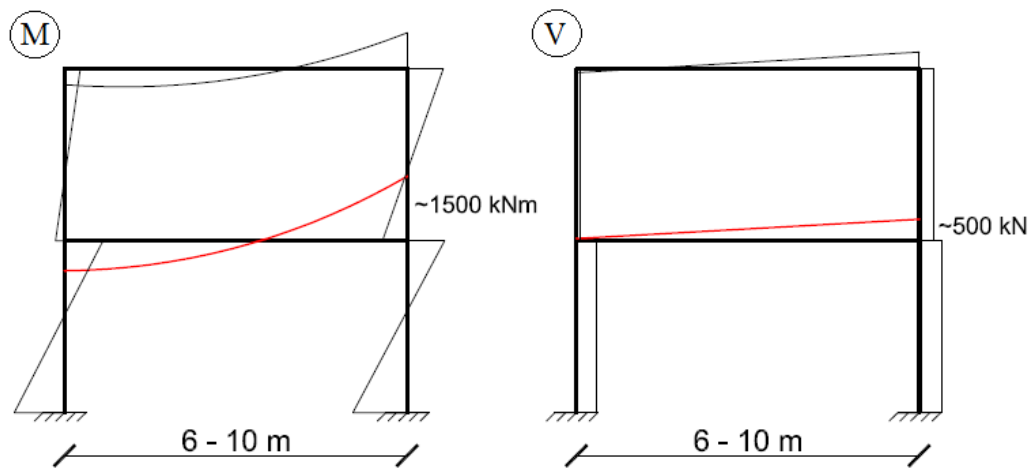
A következő modellek tehát bizonyos geometriai méretektől eltekintve megegyeznek a próbatestek kialakításával. Ezekhez a modellekhez viszont már nem állnak rendelkezésre mért imperfekciók és anyagmodellek, így ahogy azt a 2.3.2.-es pontban említettem, két lehetséges módja van az ezek figyelembevételének, azaz vagy mért adatok alapján, vagy szabvány szerint vehetem fel. Mivel rendelkezésemre állnak a valós próbatestek imperfekciói és anyagmodelljei, ezért a verifikált modelleknél felhasználtakat alkalmazom.

4.2. Kísérletek

Ahogy azt már említettem, a TDK dolgozat célja a többszörösen merevített lemezes szerkezetek duktilitását befolyásoló tényezők - úgymint bordaméret, megtámasztási viszonyok - megállapítása és a lehető legnagyobb duktilitást eredményező kialakítás

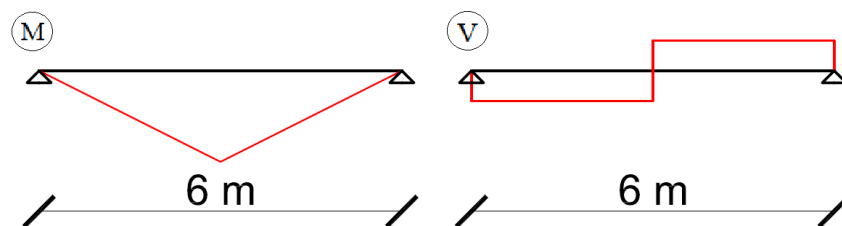
megtalálása. A lemezes szerkezetek közül a dolgozatom keretein belül csak a nyomatékábíró keret gerendájára térek ki. Ennek érdekében meg kell győződni arról, hogy a kísérleti próbatestekre épülő numerikus modellekkkel lehet-e megfelelő pontossággal szimulálni egy nyomatékábíró keret egyik gerendáját.

A legfontosabb vizsgálandó szempont az igénybevételek eloszlásának és arányának egyezése. Egy nyomatékábíró keret egy keretsíkjának jellemző nyomatéki és nyíróerő ábrája vízszintes földrengésteherre és önsúlyra a 4.1. ábrán látható. A gerendák közül a mértékadó a legalsó, ezen keletkeznek a legnagyobb nyíróerők és nyomatékok.



4.1. ábra – nyomatékábíró keret jellemző nyomatéki és nyíróerő ábrája vízszintes földrengésteherre és önsúlyra

Ahhoz, hogy a valós szerkezethez és egyben a próbatestekhez is a lehető legjobban hasonlítsanak a virtuális kísérleti kialakítások, az eredetinél kétszer hosszabb, 6 méteres, de ettől eltekintve hasonló geometriával rendelkező modelleket fogok vizsgálni. A 4.2. ábrán a kívánt szerkezeti kialakítás nyomatéki és nyíróerő ábrája látható.



4.2. ábra – a virtuális kísérlet nyomatéki és nyíróerő ábrája

A két ábra összehasonlítása alapján megállapítható, hogy a virtuális kísérleti kialakításokhoz hasonlóan a keretnél is közel háromszög alakú a nyomatéki ábra és közel konstans a nyíróerő, valamint az igénybevételek aránya is közel megegyezik, így megfelelő pontossággal tudom szimulálni a valós esetet.

Ennek érdekében két fő lépésben végeztem modellezést:

- az első lépésben az övek keresztmetszeti osztályának változtatásával, valamint a hosszbordák méretének változtatásával keresem az ideális kialakítást, cél a legnagyobb duktilitást biztosító öv osztály és megtámasztás megtalálása
- második lépésben az ideális övekkel keresem a legkedvezőbb bordaméreteket és bordaszámot
- ezeken kívül egy előzetes vizsgálatot is végeztem, hogy kizárhassak nem kívánatos tönkremeneteli módokat

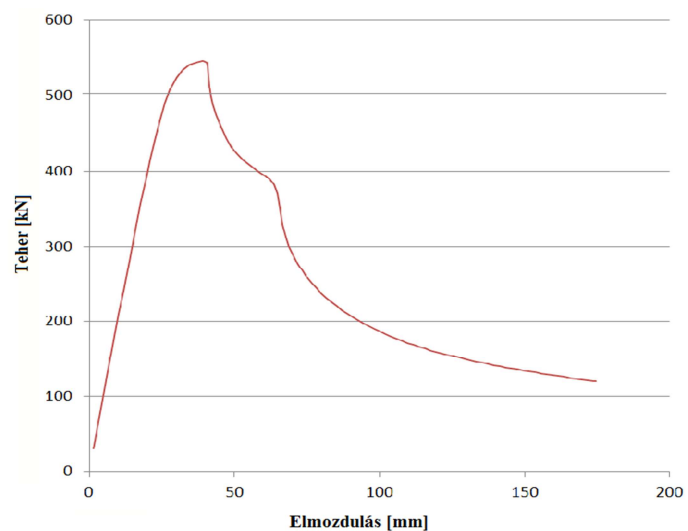
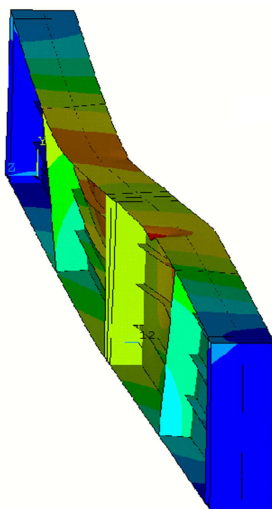
Ehhez a 4.1.-es pontban bemutatott modelleket használom fel, tehát valós imperfekciókat és anyagmodelleket alkalmazok.

4.3. Előzetes vizsgálatok

Az előzetes vizsgálatok célja az, hogy megtaláljam az olyan megtámasztási és terhelési viszonyokat, amelyek lehetővé teszik a nagy képlékeny alakváltozások kialakulását, illetve hogy kizárjam azokat, amelyek lerontják a duktilitást.

4.3.1. Felső öv kifordulása

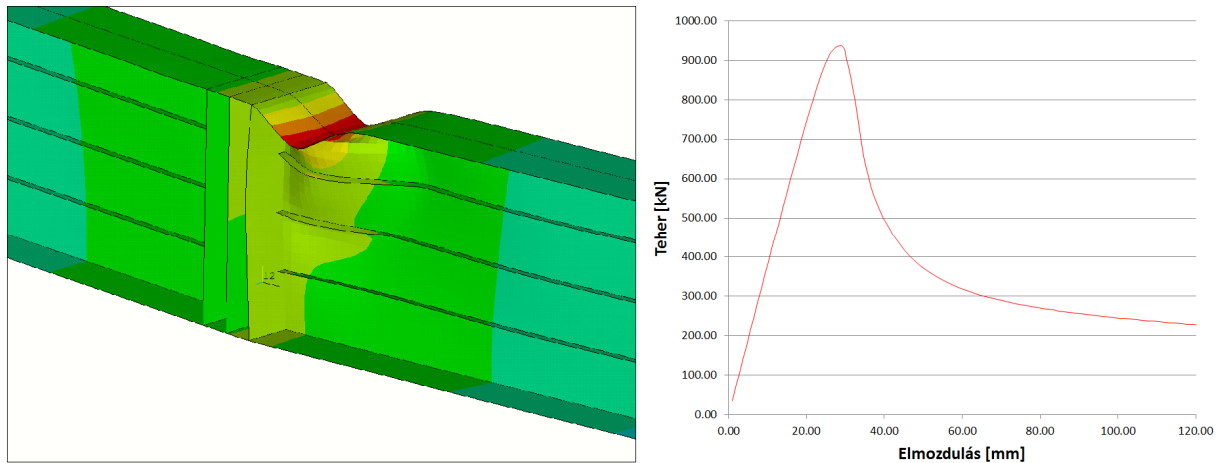
A hosszabb, 6 méteres gerendák esetén tönkremenetelként megjelenik a felső, nyomott öv kifordulása, mivel a tartó csak a hosszának felében van megtámasztva. Ez a probléma a rövidebb, 3 méteres gerendák esetén nem fordul elő, mivel ezen a nem olyan nagy a nyomatékok aránya a nyíráshoz képest. A 4.3. ábra a 6 méteres modell esetén bekövetkezett tönkremenetelt és a hozzá tartozó erő-elmozdulás diagramot mutatja.



4.3. ábra – kifordulási tönkremenetel és a hozzá tartozó erő-elmozdulás diagram

4.3.2. Gerinc beroppanása

Nem megfelelő terhelés esetén tönkremeneteli módként felléphet a gerinc beroppanása a függőleges teher hatására. Ez akkor fordulhat elő, ha a koncentrált erők a középső függőleges bordákon kívüli csomópontokra is szét van osztva. A 4.4. ábra a beroppanásos tönkremenetelt és a hozzá tartozó erő-elmozdulás diagramot mutatja.



4.4. ábra - a beroppanásos tönkremenetel és a hozzá tartozó erő-elmozdulás diagram.

4.3.3. Következtetések

Mindkét tönkremeneteli mód esetén nagyon meredek lesz a leszálló ág, így ezeket el kell kerülni ahhoz, hogy duktilis viselkedést tapasztalhassunk a gerendáknál.

Ennek megfelelően a modelleket a felső övük mentén végig megtámasztom függőleges elmozdulás ellen, ezzel elkerülve a nyomott öv kifordulását. Ezen kívül a terhelést csak a középső függőleges hosszbordák közé eső csomópontokra osztom szét, hogy elkerüljem a gerinc beroppanását.

4.4. A 3 méteres gerendák

Ezekkel a modellekkel a cél, hogy verifikált modellek alapján ellenőrizhessem az új kialakítást és a viselkedési sajátosságokat. A 3 méteres gerendák jele S12/1 - S12/7. Ezeken nyolc, paraméteres vizsgálatot végeztem el, az S12-es modell öveinek és a hosszbordáinak geometriájának változtatásával. Mivel virtuális kísérletet végzek és nem új modelleket készítek, az imperfekciókat és az anyagmodellt megtartottam az S12-es, verifikált modellből. Az eredményeket a 4.1. táblázat tartalmazza.

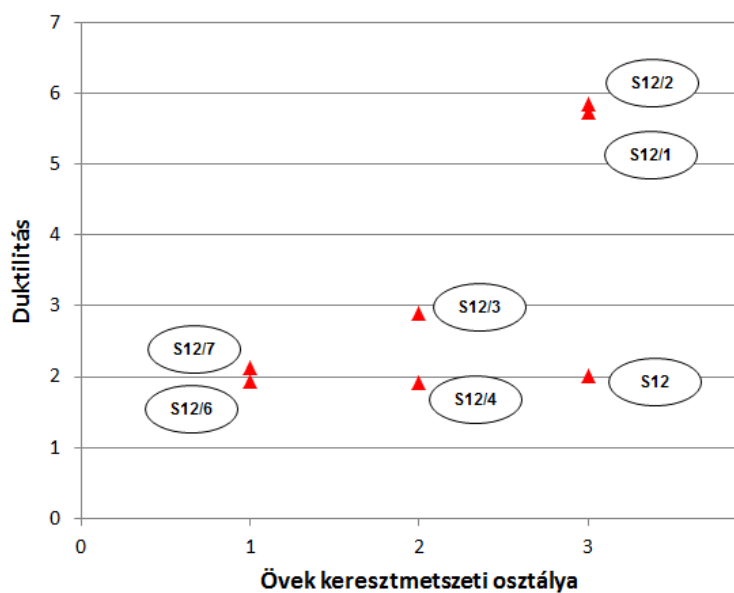
| Modell | Öv keresztmetszeti osztálya [-] | Bodraméret [mm x mm] | Teherbírás [kN] | Max. teherbíráshoz tartozó lehajlás [mm] | Duktilitás [-] |
|--------|---------------------------------|----------------------|-----------------|--|----------------|
| S12 | 3 | 30 x 5 | 1009,36 | 10,43 | 2,02 |
| S12/1 | 3 | 40 x 6 | 1046,76 | 14,76 | 5,73 |
| S12/2 | 3 | 35 x 6 | 1046,17 | 14,31 | 5,85 |
| S12/3 | 2 | 40 x 6 | 1196,37 | 17,74 | 2,90 |
| S12/4 | 2 | 30 x 5 | 1021,27 | 8,66 | 1,92 |
| S12/5 | 1 | 30 x 5 | 1034,17 | 7,98 | 2,06 |
| S12/6 | 1 | 40 x 5 | 1202,08 | 10,73 | 1,93 |
| S12/7 | 1 | 40 x 6 | 1227,33 | 11,65 | 2,13 |

4.1. táblázat – S12 – S12/7-es modellek eredményei és összehasonlítása

A táblázat alapján látható, hogy a 3. keresztmetszeti osztályú övekkel rendelkező modelleknek van a legnagyobb duktilitásuk azonos bordaméretűk esetén. Ezeknél a gerendáknál a rövid fesztáv miatt inkább a nyírás, így a nyírófeszültségek dominálnak, ennek köszönhető, hogy az övekre kisebb teher hárul, ezért horpadhatnak. Látható, hogy ebben az esetben relatíve nagy hosszbordák esetén kapjuk a legnagyobb duktilitást.

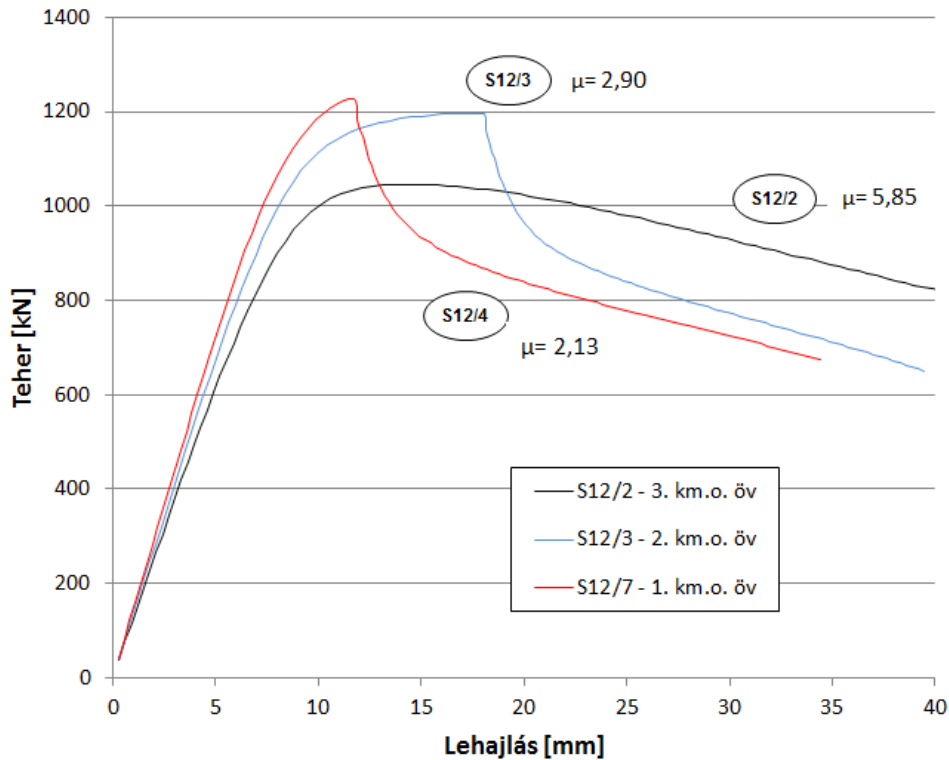
4.4.1. Eredmények bemutatása

A 4.5. ábrán a különböző keresztmetszeti osztályokhoz tartozó duktilitás értékeket hasonlítottam össze. Látható, hogy a 3. keresztmetszeti osztályú övekhez tartozik a legnagyobb μ érték: 5,85.



4.5. ábra – különböző keresztmetszeti osztályú övekhez tartozó duktilitás értékek

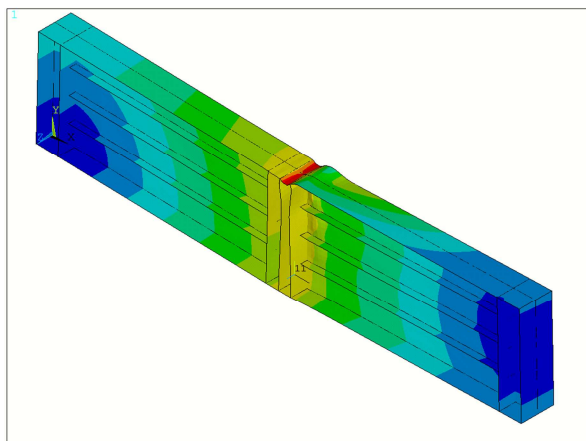
A 4.6. ábrán a különböző osztályú övekkel rendelkező modellek közül a legduktilisabbak erő-elmozdulás diagramjait hasonlítom össze. Az összes 3 méteres modell erő-elmozdulás diagramja megtalálható az „A.1. Függelékben”.



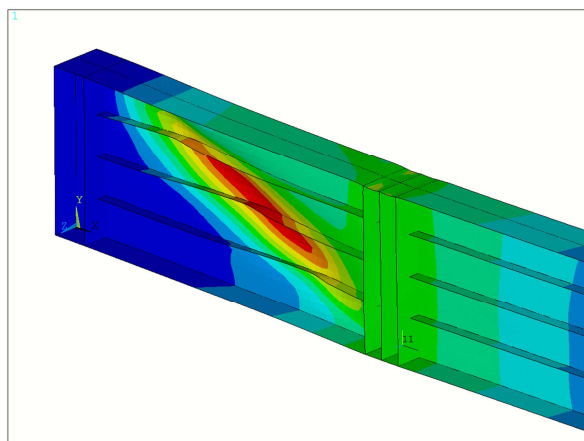
4.6. ábra – 3 méteres, különböző osztályú övekkel rendelkező modellek közül a legduktilisabbak erő-elmozdulás diagramjának összehasonlítása

Az ábra alapján látható, hogy rövid gerenda esetén, ahol nagyobb a nyírófeszültségek aránya a hajlításhoz képest, a 3. keresztmetszeti osztályú övű gerenda viselkedik legduktilisabban. Ennek oka, hogy ezzel a kialakítással elkerülhető a nyírási horpadás kialakulása. A másik két keresztmetszeti osztálynál az utóbbi tönkremenetel a mértékadó, ezért meredek a leszálló ágak.

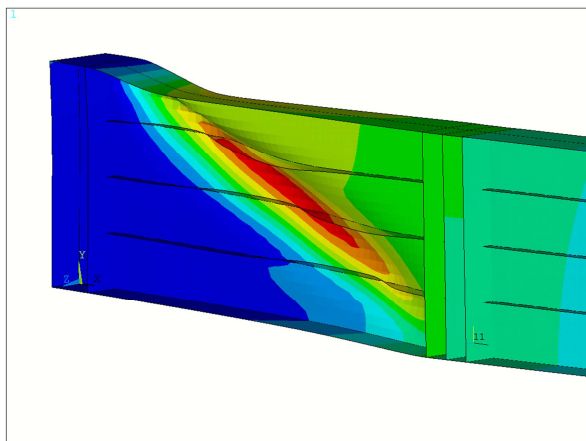
Fontos megfigyelni az egyes duktilitási értékekhez tartozó tönkremeneteli módot, hogy tudjunk következtetni a viselkedési jellemzőkre. Az 4.7.-4.9.-ig ábrákon bemutatom a 3 méteres modellekre jellemző tönkremeneteli módokat. Valamennyi modell tönkremenetele megtalálható az „B.1. Függelékben”.



4.7. ábra – S12/1-es modell (3. km o. öv, 40x6 mm-es borda) öv tönkremenetele és gerinc lokális horpadása normálfeszültség hatására



4.8. ábra – S12/6-es modell (1. km o. öv, 40x5 mm-es borda) gerinc nyírási horpadása

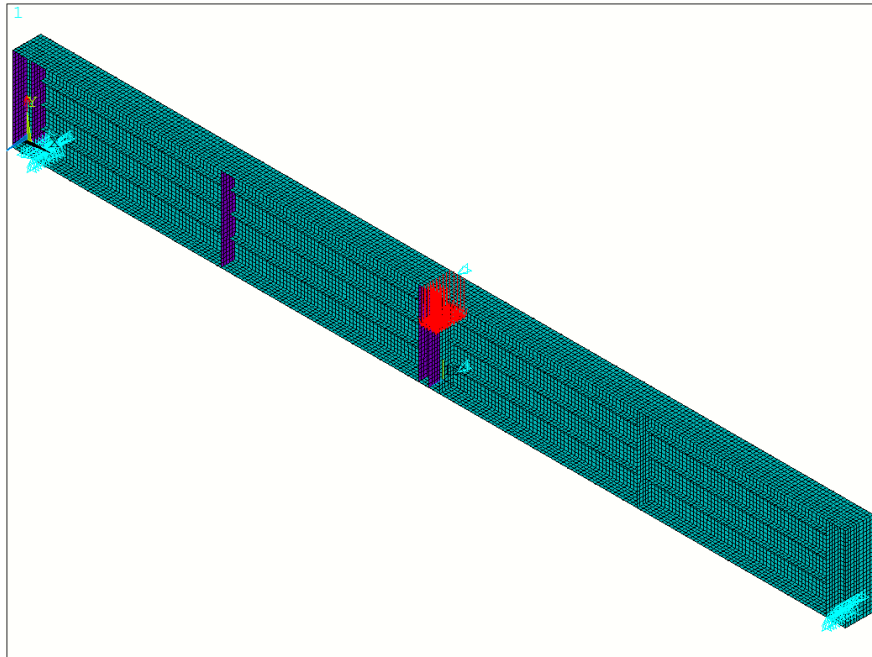


4.9. ábra – S12/4-es modell (2. km o. öv, 30x5 mm-es borda) gerinc nyírási horpadása és öv kihajlása

Az ábrák alapján látható, hogy három jellemző tönkremeneteli mód fordul elő a 3 méteres gerendák esetén. Az egyik a 4.7. ábrán látható övtönkremenetel és gerinc horpadása normálfeszültség hatására, a másik a 4.9. ábrán látható öv horpadása és gerinc horpadása nyírófeszültség hatására. A harmadik, a gerinc tiszta nyírási horpadása, a 4.8. ábrán látható.

4.5. A 6 méteres gerendák

Ahogy azt korábban említettem, a cél az eredeti próbatestnél kétszer hosszabb, 6 méter hosszúságú gerenda vizsgálata. Ezekkel a kísérletekkel a céloom, hogy megállapítsam, miként módosulnak a viselkedési sajátosságok, ha a 3 méteres gerendákkal ellentétben nyírás helyett a hajlítás dominál. A 6 méteres gerendák jele 2xS12 - 2xS12/4. Ezeken a gerendákon is az előzőekhez hasonlóan az öv osztályát és a bordák keresztmetszetét változtattam. A 2xS12-es gerendát két S12-es egymás mellé másolásával készítettem el. Az imperfekciók és anyagmodellek megegyeznek az S12-es gerendáknál alkalmazottakkal. A 4.10. ábrán a 2xS12-es modell látható.



4.10. ábra – a 2xS12-es modell és terhelési, megtámasztási viszonyai

A többi kísérletnél ennek a gerendának az öveit és a hosszbordáit változtattam és kerestem a duktilitás szempontjából legkedvezőbb kialakítást. Az eredményeket a 4.2. táblázat tartalmazza.

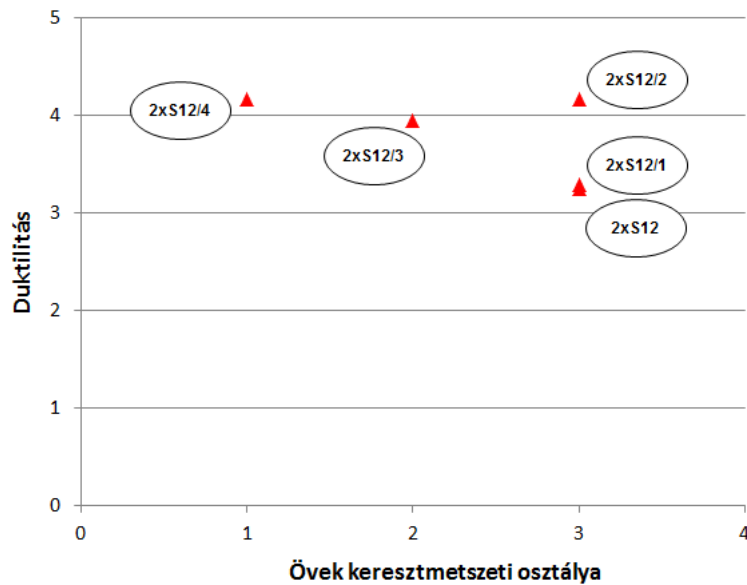
| Modell | Öv keresztmetszeti osztálya [-] | Bodraméret [mm x mm] | Teherbírás [kN] | Max. teherbíráshoz tartozó lehajlás [mm] | Duktilitás [-] |
|---------|---------------------------------|----------------------|-----------------|--|----------------|
| 2xS12 | 3 | 30 x 4 | 549,29 | 39,17 | 3,24 |
| 2xS12/1 | 3 | 25 x 4 | 550,97 | 40,16 | 3,29 |
| 2xS12/2 | 3 | 40 x 6 | 546,63 | 39,21 | 4,16 |
| 2xS12/3 | 2 | 30 x 5 | 643,93 | 49,46 | 3,94 |
| 2xS12/4 | 1 | 40 x 6 | 719,85 | 43,47 | 4,19 |

4.2. táblázat – 2xS12 – S12/6-es modellek eredményei és összehasonlítása

4.5.1. Eredmények bemutatása

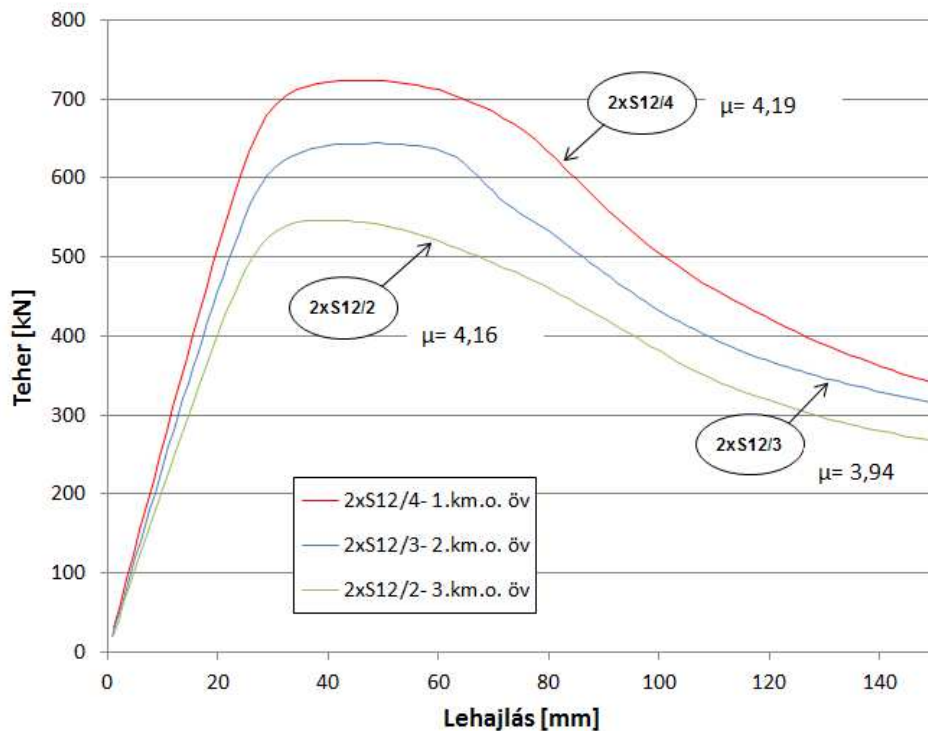
A 4.2. táblázat alapján látható, hogy a 6 méteres fesztávnál a különböző kialakításokra hasonló duktilitást kapunk. Fontos tendencia, hogy már az 1. keresztmetszeti osztályú övvel rendelkező gerenda is nemcsak, hogy duktilis, de ez rendelkezik a legnagyobb képlékeny alakváltozási képességgel. A 2. és 3. keresztmetszeti osztályú övű gerendák teherbírása jelentősen elmarad az 1. osztályútól, és mivel a kedvező duktilitás mellett a lehető legnagyobb teherbírás is szempontja a kutatásnak, ezért a későbbiekben 1. keresztmetszeti osztályú övű gerendákat fogok vizsgálni. A fenti vizsgálatok megmutatták, hogy ha megnő a hajlító

igénybevételek aránya a nyíráshoz képest, akkor ezzel az övvel is el lehet érni a megfelelő alakváltozó képességet. A 4.11. ábrán a különböző keresztmetszeti osztályokhoz tartozó duktilitás értékeket hasonlítottam össze.



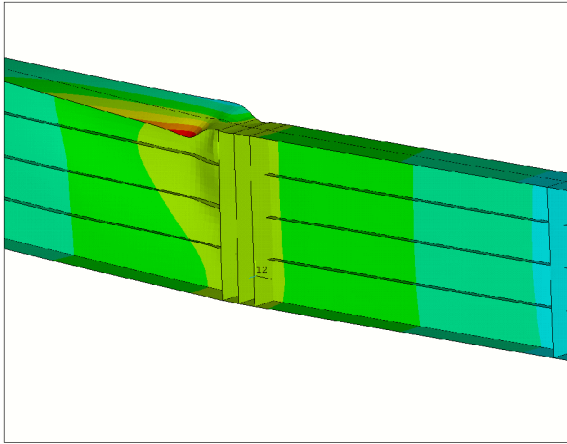
4.11. ábra – különböző keresztmetszeti osztályú övekhez tartozó duktilitás értékek

A 4.12. ábrán a különböző osztályú övekkel rendelkező modellek közül a legduktilisabbak erő-elmozdulás diagramjait hasonlítom össze. Az összes 6 méteres modell erő-elmozdulás diagramja megtalálható az „A.2. Függelékben”.

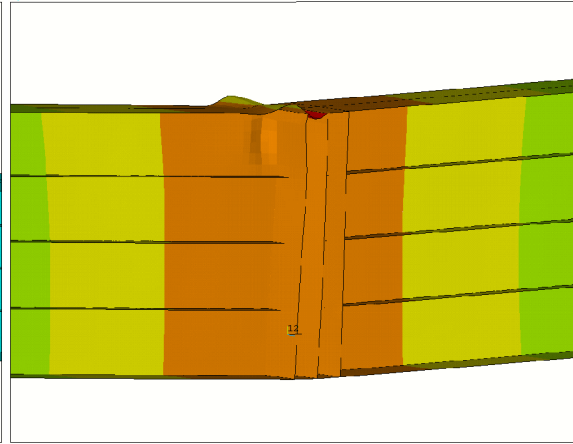


4.12. ábra – különböző osztályú övekkel rendelkező modellek közül a legduktilisabbak erő-elmozdulás diagramjának összehasonlítása

Fontos megfigyelni az egyes duktilitási értékekhez tartozó tönkremeneteli módot, hogy tudjunk következtetni a viselkedési jellemzőkre. Az 4.13. és 4.14. ábrákon bemutatom a 6 méteres modellekre jellemző tönkremeneteli módokat. Valamennyi modell tönkremenetele megtalálható a „B.2. Függelékben”.



4.13. ábra – 2xS12/1-es modell (3. km. o. öv, 25x4 mm-es borda) öv tönkremenetele és gerinc globális horpadása normálfeszültség hatására



4.14. ábra – 2xS12/2-es modell (3. km. o. öv, 40x6 mm-es borda) öv tönkremenetele és gerinc lokális horpadása normálfeszültség hatására

A tönkremenetelt az okozza minden esetben, hogy a gerinc felső része globálisan vagy lokálisan behorpad a hajlításból származó nyomófeszültségek hatására. Az első keresztmetszeti osztályú öv azért viselkedik kedvezőbben, mert az erősebb öv révén a gerincre kevesebb igénybevétel hárul a hajlításból, így később alakul ki a horpadás majd utána sem következik be nagymértékű teherbírás csökkenés.

4.6. Kísérleti gerendák

Az eddigi kísérletekkel az volt a célom, hogy megkeresem azt az általános kialakítást és öv keresztmetszeti osztályt, amellyel érdemes további paraméteres vizsgálatokat végezni. Ebben a lépésben tehát első keresztmetszeti osztályú övekkel keresem a lehető legnagyobb duktilitású kialakítást, mivel a legnagyobb képlékeny alakváltozási képesség úgy biztosítható, hogy az öv nem horpad be és ehhez megtaláljuk azt a gerinc – geometriát, amellyel a gerinc alakváltozásai megengedik az öv teherbírásának kihasználását.

Ehhez paraméteres vizsgálatokat végzek három próbatest-csoporton, melyeknek övei mind első keresztmetszeti osztályúak, de a szélességük és vastagságuk eltérő. Így ezekben a csoportokban eltérő lesz a feszültségeloszlás a gerinc és az öv között:

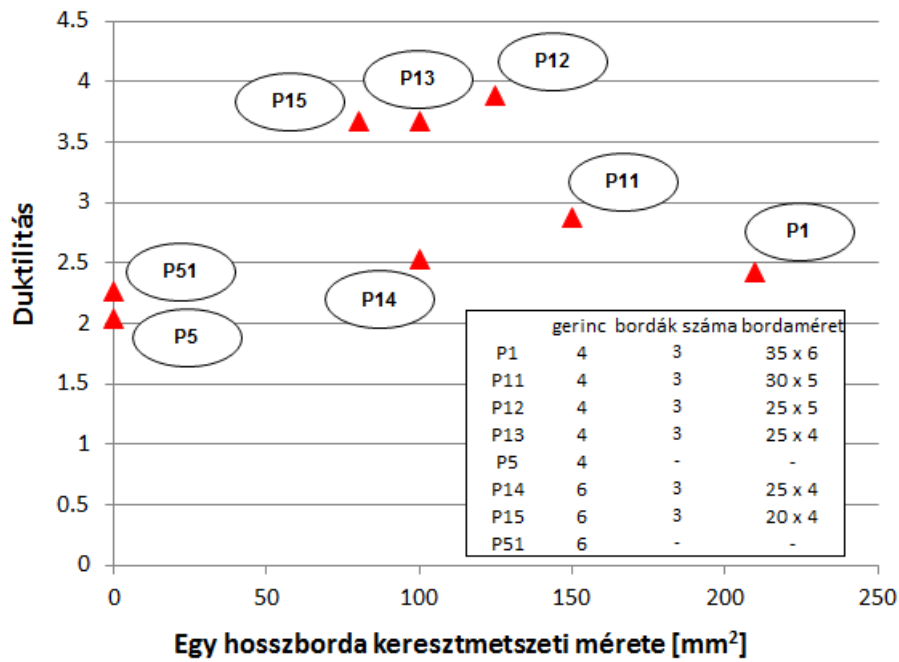
- a P1 – P15, P5 és P51 esetben viszonylag gyengébb, 200 x 14 mm-es övet,
- a P2 – P24, P52, P6 és P61 esetben erősebb, 240 x 16 mm-es övet,
- a P4 – P43, P53 pedig nagy, 300 x 20 mm-es övet alkalmazok.

Mindegyik modell a korábbi virtuális kísérletekre épül, a gerenda hossza, gerincmagassága, lemezmezői nagysága és imperfekciói változatlanok a 4.5. pontban ismertetetthez képest. Az eredményeket a 4.3. táblázat tartalmazza.

| Modell | Öv keresztmetszeti méterei [mm x mm] | Gerinc vastagsága [mm] | Bordák száma [-] | Bodraméret [mm x mm] | Teherbírás [kN] | Duktilitás [-] |
|--------|--------------------------------------|------------------------|------------------|----------------------|-----------------|----------------|
| P1 | 200 x 14 | 4 | 3 | 35 x 6 | 722,24 | 2,43 |
| P11 | 200 x 14 | 4 | 3 | 30 x 5 | 722,81 | 2,87 |
| P12 | 200 x 14 | 4 | 3 | 25 x 5 | 726,74 | 3,89 |
| P13 | 200 x 14 | 4 | 3 | 25 x 4 | 721,48 | 3,67 |
| P5 | 200 x 14 | 4 | - | - | 688,42 | 2,04 |
| P14 | 200 x 14 | 6 | 3 | 25 x 4 | 808,70 | 2,53 |
| P15 | 200 x 14 | 6 | 3 | 20 x 4 | 721,48 | 3,67 |
| P51 | 200 x 14 | 6 | - | - | 736,76 | 2,26 |
| P2 | 240 x 16 | 4 | 3 | 35 x 6 | 972,86 | 3,53 |
| P21 | 240 x 16 | 4 | 3 | 30 x 5 | 960,12 | 1,84 |
| P22 | 240 x 16 | 6 | 3 | 25 x 5 | 1072,03 | 4,14 |
| P23 | 240 x 16 | 6 | 3 | 20 x 5 | 1063,08 | 3,51 |
| P24 | 240 x 16 | 6 | 3 | 60 x 5 | 107,77 | 6,36 |
| P52 | 240 x 16 | 6 | - | - | 999,93 | 2,98 |
| P6 | 240 x 16 | 6 | 4 | 30 x 5 | 1059,22 | 5,51 |
| P61 | 240 x 16 | 6 | 4 | 40 x 6 | 1069,99 | 6,56 |
| P54 | 240 x 16 | 18 | - | - | 1388,68 | 8,05 |
| P4 | 300 x 20 | 6 | 3 | 35 x 6 | 1566,41 | 4,82 |
| P41 | 300 x 20 | 6 | 3 | 30 x 5 | 1560,82 | 4,70 |
| P42 | 300 x 20 | 6 | 3 | 25 x 5 | 1531,21 | 2,82 |
| P43 | 300 x 20 | 6 | 3 | 40 x 6 | 1570,37 | 4,98 |
| P53 | 300 x 20 | 6 | - | - | 718,97 | 2,73 |

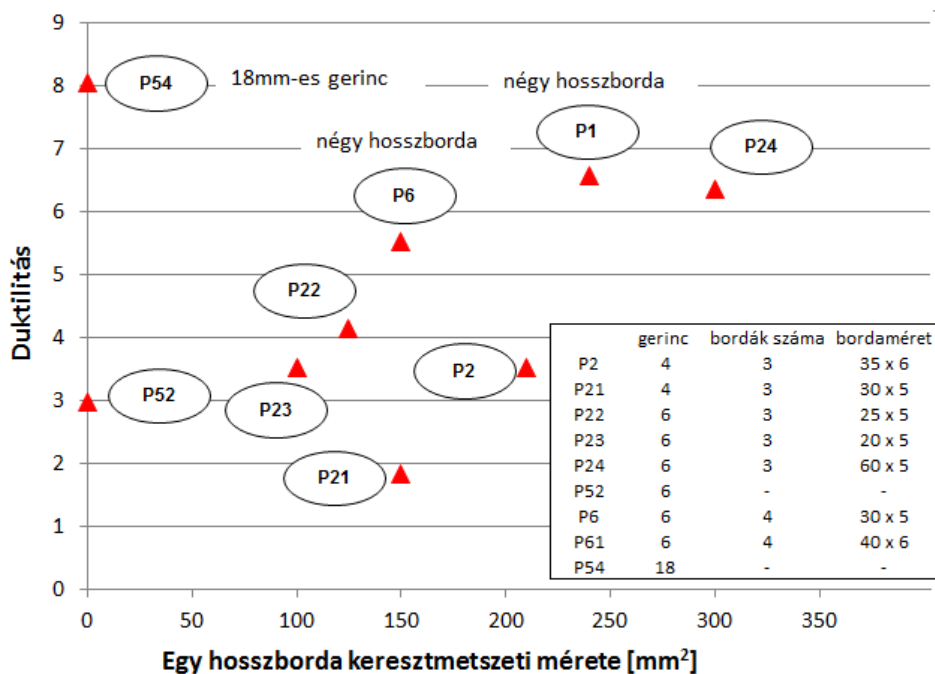
4.3. táblázat – a virtuális kísérletek eredményei és összehasonlítása

A 4.15. ábra a 200 x 14 mm-es öv esetén tartalmazza az egyes bordaméretekhez és gerincvastagságokhoz tartozó duktilitás értékeket, referenciaként a P5-ös és P51-es modell is szerepel, ezek hosszbordák nélkül készültek, pusztán a függőleges bordákkal van négy azonos méretű lemezmezőre osztva. A viselkedésük gyakorlatilag megegyezik, a duktilitásukban nincs jelentős különbség, viszont a 4 mm vastag gerinchez tartozó leszálló ágak túl meredek, nincs jelentős képlékeny tartalékuk, mivel a gerinc hamar tönkremegy a hajlításból származó nyomás okozta horpadásra. Erre megoldás lehet a 6 mm vastag gerinc alkalmazása. Az eredmények azonban azt mutatják, hogy ilyen övméret esetén a duktilitást nem befolyásolja ez a különbség a gerincvastagságok között.



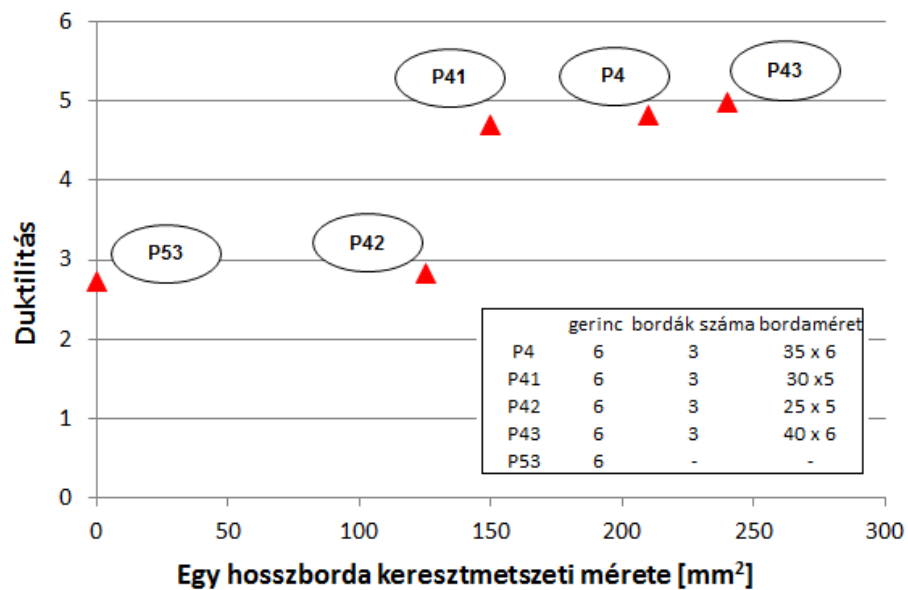
4.15. ábra – különböző borda keresztmetszetekhez tartozó duktilitások összehasonlítása 200x14 mm-es öv esetén

A 4.16. ábra a 240 x 16 mm-es övű modellek duktilitásait hasonlítja össze. Látható, hogy ebben az esetben a nagyobb keresztmetszetű, illetve több hosszborða eredményezi a kedvezőbb duktilitást. A P54-es modell esetén a gerinc is első keresztmetszeti osztályú.



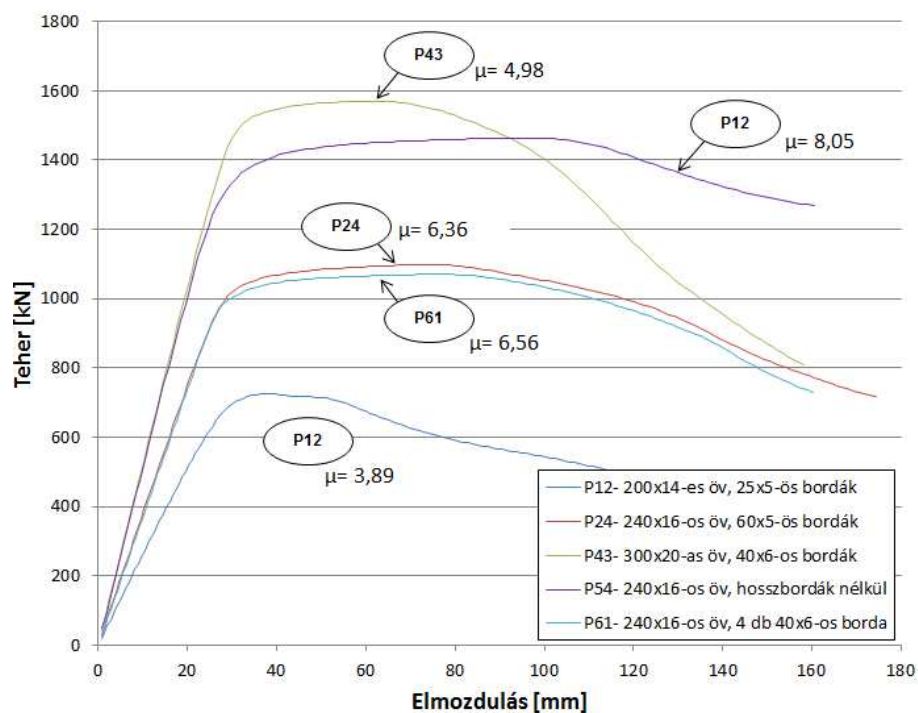
4.16. ábra – különböző borda keresztmetszetekhez tartozó duktilitások összehasonlítása 240x16 mm-es öv esetén

A 4.17. ábra a 300 x 20 mm-es öv modellek duktilitásait hasonlítja össze. Ebben az esetben is a relatíve nagyobb bordák adják a kedvezőbb duktilitást. Ebben az esetben is látható, hogy a nagyobb bordákkal nagyobb képlékeny alakváltozási képesség érhető el.



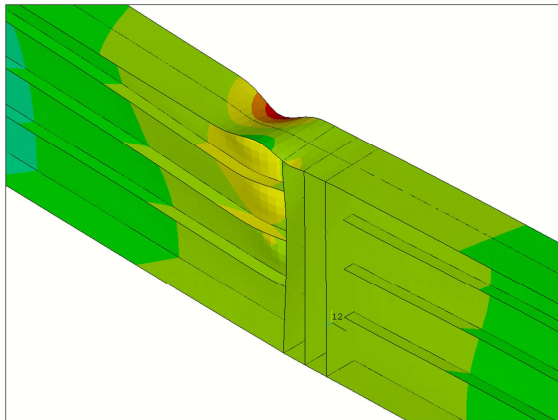
4.17. ábra – különböző borda keresztmetszetekhez tartozó duktilitások összehasonlítása 300x20 mm-es öv esetén

Mindhárom övméret esetén sikerült duktilis kialakítást találni, a legnagyobbakat a második esetben. Fontos még a három övméret egymással történő összehasonlítása, melyet a 4.18. ábra mutat. Valamennyi kísérleti modell erő-elmozdulás diagramja megtalálható az „A.3. Függelékben”

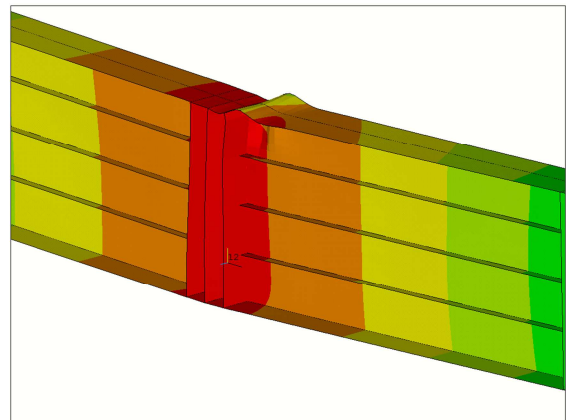


4.18. ábra – legnagyobb duktilitású kialakítások összehasonlítása

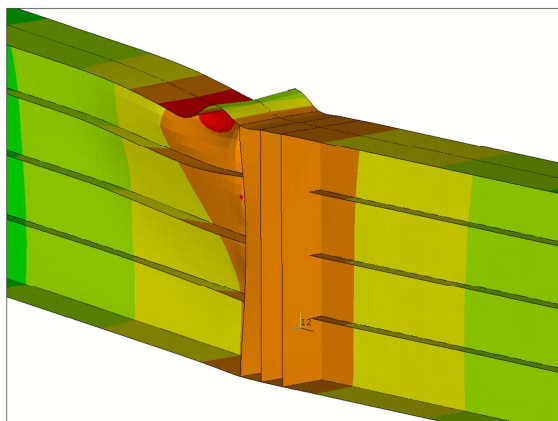
Az 4.19.-4.26.-ig ábrákon bemutatom a kísérleti modellekre jellemző tönkremeneteli módokat. Valamennyi modell tönkremenetele megtalálható a „B.3. Függelékben”.



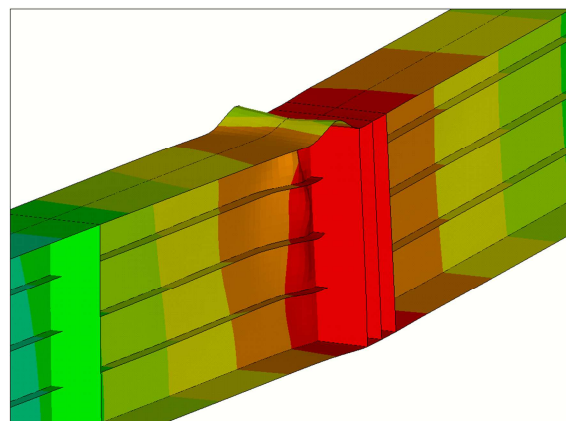
4.19. ábra – P1-es modell (200x14 mm-es öv, 35x6 mm-es borda) tönkremenetele, gerinc globális horpadása normál feszültség hatására



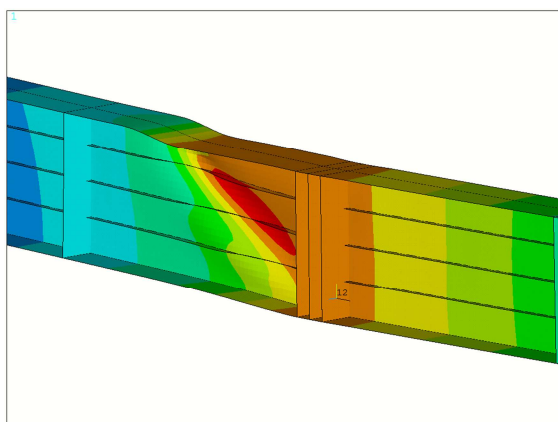
4.20. ábra – P11-es modell (200x14 mm-es öv, 30x5 mm-es borda) tönkremenetele, gerinc lokális horpadása normál feszültség hatására



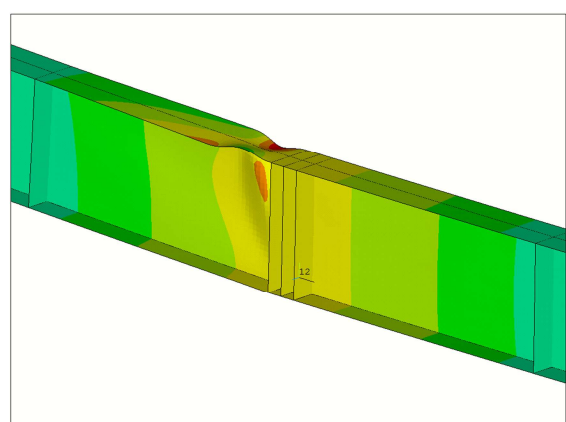
4.21. ábra – P2-es modell (240x16 mm-es öv, 35x6 mm-es borda) tönkremenetele, gerinc globális horpadása normál feszültség hatására



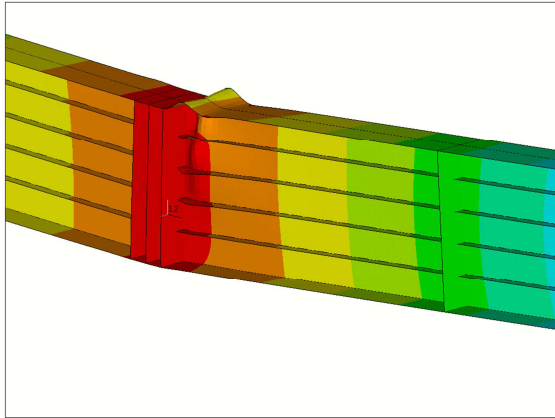
4.22. ábra – P4-es modell (300x20 mm-es öv, 35x6 mm-es borda) tönkremenetele, gerinc globális horpadása normál feszültség hatására



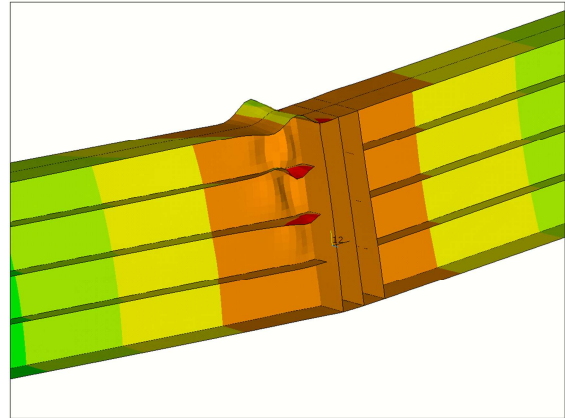
4.23. ábra – P42-es modell (300x20 mm-es öv, 25x5 mm-es borda) tönkremenetele, gerinc horpadása nyírőfeszültség hatására



4.24. ábra – P52-es modell (240x16 mm-es öv, 40x6 mm-es borda) tönkremenetele, gerinc globális horpadása normál feszültség hatására



4.25. ábra – P61-es modell (240x16 mm-es öv, 40x6 mm-es borda) tönkremenetele, gerinc globális horpadása normálfeszültség hatására



4.26. ábra – P24-es modell (240x16 mm-es öv, 60x5 mm-es borda) tönkremenetele. A bordák elég erősek, hogy a gerinc lokális horpadása következzen be

Az ábrák alapján látható, hogy a tönkremenetelt majdnem minden esetben a gerinc, hajlításból származó nyomófeszültség hatására bekövetkező, horpadása okozza, melyet az öv horpadása követ.

4.7. Eredmények értékelése

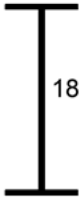
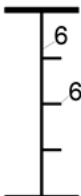
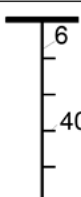
A 4.6. pontban ismertetett kísérletek eredményei alapján megtaláltam azokat a kialakításokat, amelyek biztosítják a gerendák duktilis viselkedését statikus teher esetén. A 4.2. pontban ismertetett vizsgálat pedig biztosítja, hogy az eredmények alkalmazhatóak legyenek nyomatékbiró keretek esetén.

A duktilis viselkedés biztosításához el kell kerülni a gerinc beroppanását és a nyomott öv kifordulását. Nyomatékbiró keret esetén hasznos és szeizmikus teher kombinációja esetén a nagyobb nyomaték helyén az alsó öv a nyomott (4.1. ábra), melyet oldalirányban nem támaszt meg a földem. Fontos tehát a gerenda alsó övének megtámasztása kifordulás ellen.

A legnagyobb teherbírás és képlékeny alakváltozási képesség eléréséhez első keresztmetszeti osztályú övet kell alkalmazni. A kísérleti modellek nagy részénél az okozta a tönkremenetelt, hogy kis bordák esetén a gerinc hamar behorpadt a hajlításból származó nyomás hatására. Ezekben az esetekben közepes $\sim\mu = 3$ -as duktilitást lehet elérni. Azonban ha erősebb bordákat alkalmazunk (P24-es modell) vagy a hosszbordák számát megnöveljük háromról négyre (P6 és P61-es modellek), akkor a horpadás bekövetkezése után nem lesz olyan meredek a leszálló ág, vagyis nagyobb duktilitást $\sim\mu = 6$ érhetünk el. Ez már megfelelően nagy értéknek tekinthető szeizmikus terhek esetére is. Nagy képlékeny

alakváltozási képességet biztosít az is, ha hosszbordák nélküli, de első keresztmetszeti osztályú gerincet alkalmazunk.

Az első keresztmetszeti osztályú gerinc alkalmazásának előnye a nagy duktilitáson kívül az, hogy nincs szükség a hosszbordák felhegesztésére, de emellett hátrányai is vannak, ilyen a nagyobb önsúly és anyagköltség. A 4.4. táblázat ezeket az előnyöket illetve hátrányokat foglalja össze 240 x 16 mm-es övek esetén.

| Típus | Gerinc területe (hosszbordákkal együtt) [cm ²] | Összes keresztmetszeti terület [cm ²] | Keresztmetszeti területek aránya [-] | Varrathossz [m] | Fajlagos súly [kg/m] |
|---|--|---|--|--------------------|----------------------------|
|  18 | 108 | 184,8 | 1 | 0 | 145,1 |
|  6 60x5 | 45 | 121,8 | 0,66 | 18 | 95,6 |
|  6 40x6 | 45,6 | 122,4 | 0,66 | 24 | 96,1 |

4.4. táblázat – az egyes kialakítások összehasonlítása

A táblázat alapján látható, hogy jelentős ~34%-os anyagmegtakarítás érhető el a hosszbordával merevített változatokkal. Ilyen arányok mellett már érdemes vállalni a hegesztés plusz költségeit a magas anyagköltség és önsúly helyett. Legkedvezőbb megoldás a 3 nagy bordával merevített változat, ennek legkisebb ugyanis az önsúlya és csak három hosszbordát kell felhegeszteni a gerincre.

5. Összefoglalás

Dolgozatom célja a nagy duktilitást és teherbírást biztosító kialakítások megtalálása volt magas gerincű, hosszbordákkal merevített tartók esetén. Virtuális kísérleteket végeztem különböző hosszúságú és kialakítású gerendákon.

Ehhez először áttekintettem a szakirodalmat, tisztáztam a duktilitás fogalmát a teljes szerkezetre és egy adott szerkezeti elemre. Tanulmányoztam a merevített lemezek numerikus modellezésének szokásos módjait és lépéseit meglévő vizsgálatok és szabvány alapján.

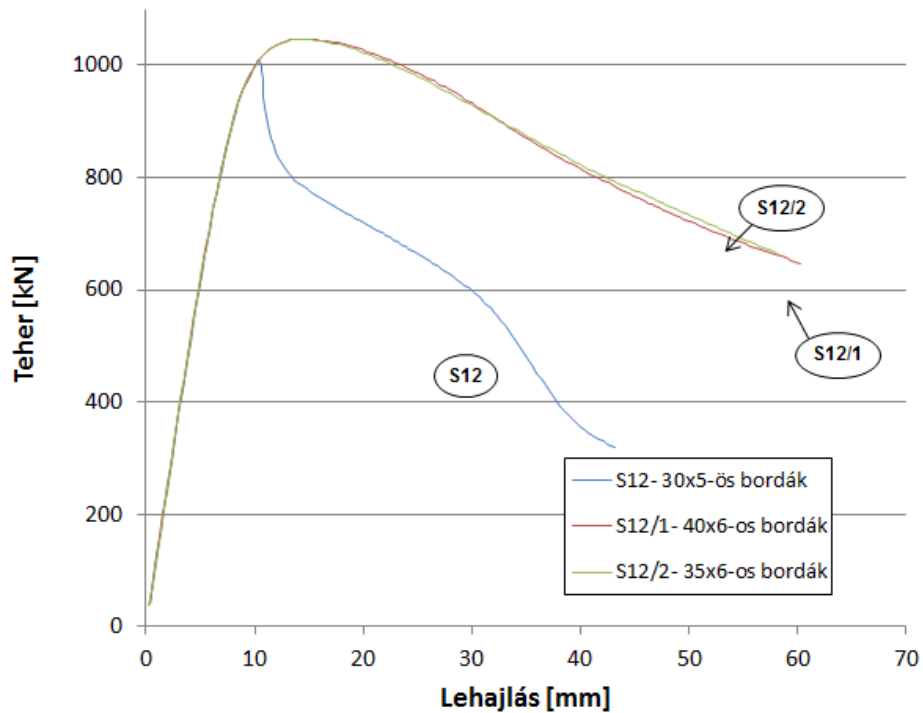
Ezt követően valós kísérletek alapján saját verifikált végeselemes modelleket készítettem, melyek alapjául szolgáltak a későbbi virtuális kísérleteknek, melyek során először megvizsgáltam, hogy milyen keresztmetszeti osztályú és kialakítású gerendákkal érhető el relatíve nagy duktilitás. Ezután több paraméteres modellen kerestem a legnagyobb képlékeny alakváltozási képességet biztosító hosszbordák méretét és számát.

Az eredmények megmutatták, hogy az előzetes felvetés (mely szerint a duktilitás növelésére hatékony módszer lehet a viszonylag kicsi, hajlékony hosszbordák alkalmazása) részben igaz csak, a kísérletek során alkalmazott 600 mm-es gerincmagasság mellett ugyanis három hosszborða esetén nagyobb duktilitás érhető el merevebb hosszbordákkal. Négy hosszborða esetén viszont már relatíve kicsi, 30-40 mm-es bordákkal is nagy képlékeny alakváltozási képesség biztosítható.

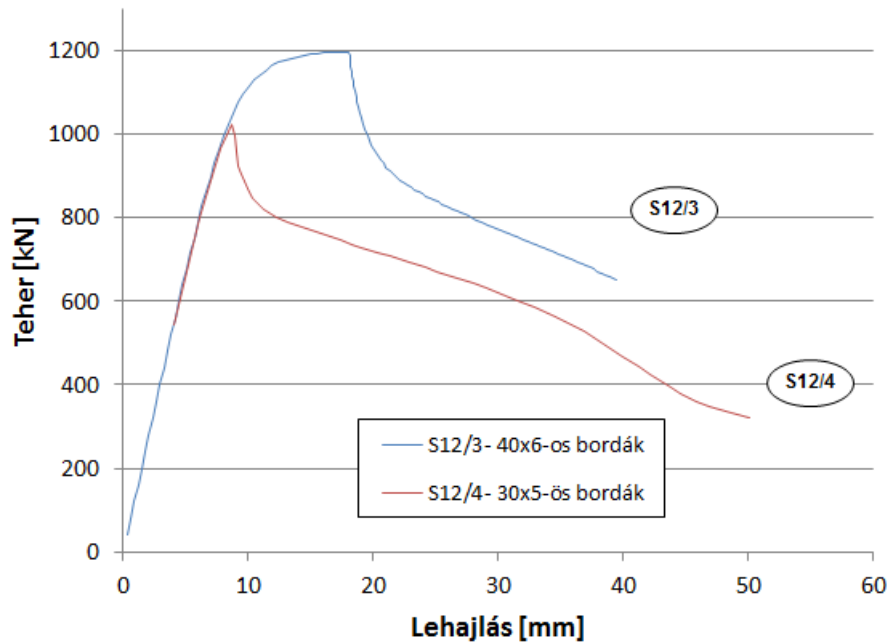
További szerkezeti elemek vizsgálata nem képezi dolgozatom témáját, de a kísérleteket ki lehetne terjeszteni például hídpillérekre vagy külpontosan merevített keret disszipatív elemeire. Ezen kívül a vizsgálatokat ki lehetne terjeszteni statikus helyett ciklikus terhelésre, hogy pontosabban szimulálhassuk a tartók képlékeny viselkedését szeizmikus terhekre.

A Függelék – Erő-elmozdulás diagramok

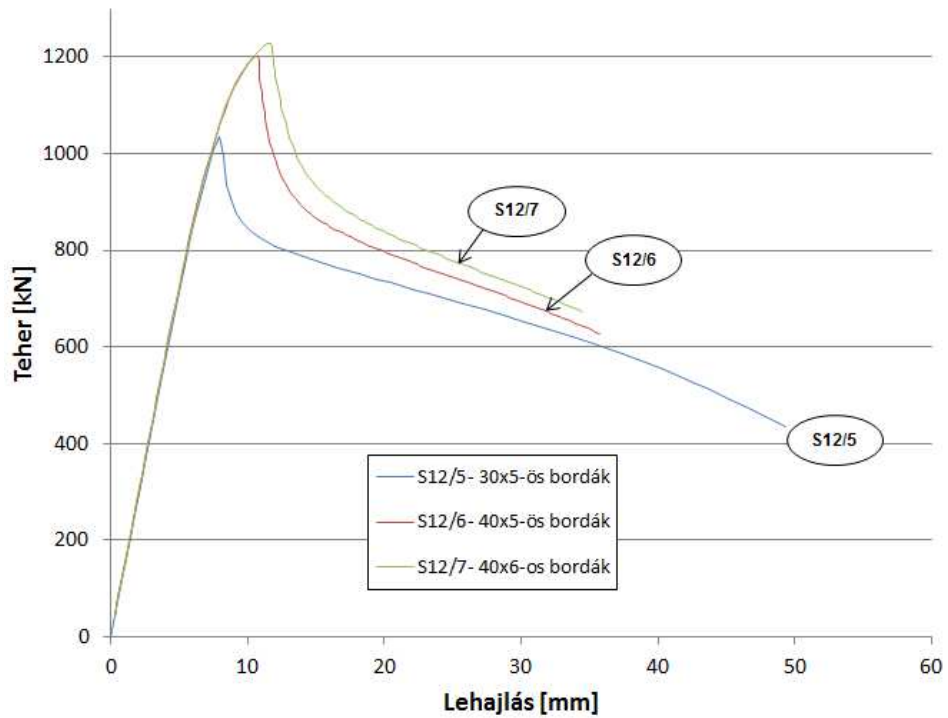
A.1. 3 méteres (S12 jelű) gerendák



A.1. ábra – 3. keresztmetszeti osztályú övű modellek erő-elmozdulás diagramjainak összehasonlítása

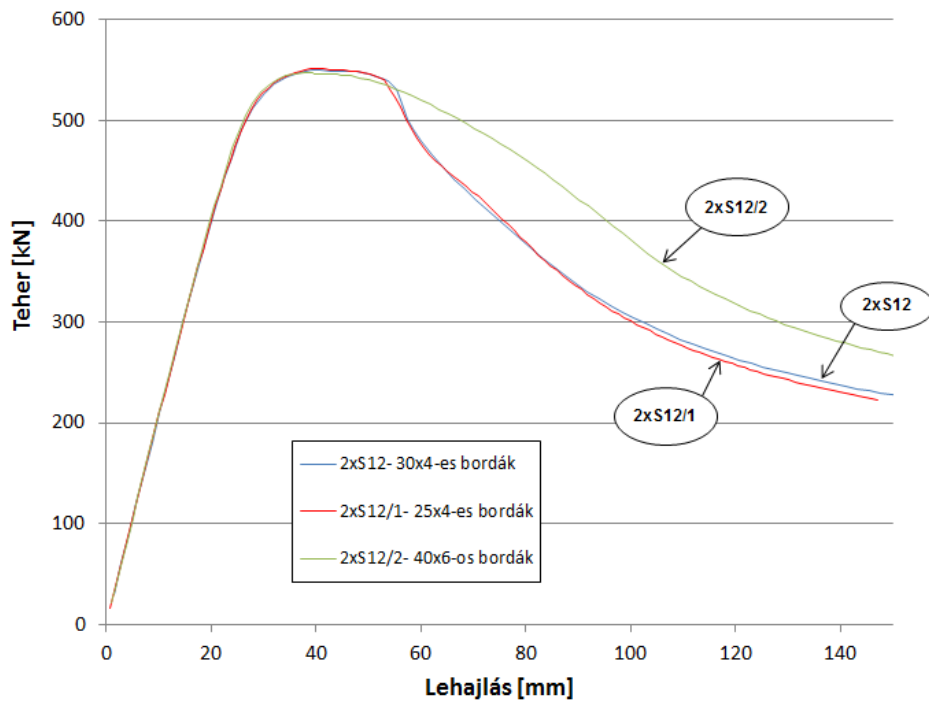


A.2. ábra – 2. keresztmetszeti osztályú övű modellek erő-elmozdulás diagramjainak összehasonlítása

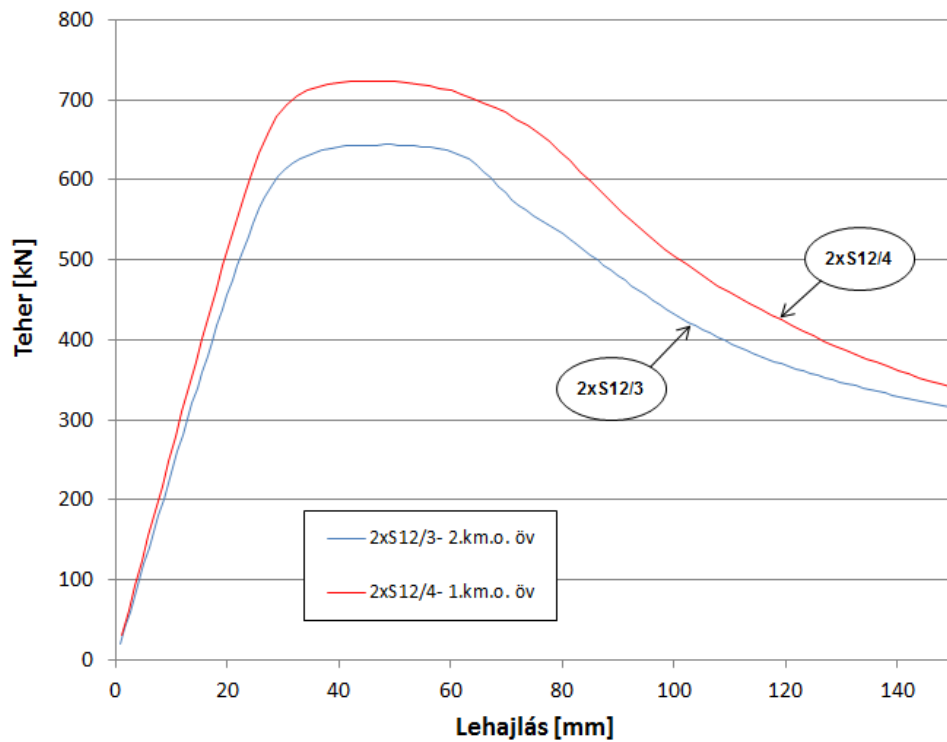


A.3. ábra – 2. keresztmetszeti osztályú övű modellek erő-elmozdulás diagramjainak összehasonlítása

A.2. 6 méteres (2xS12 jelű) gerendák

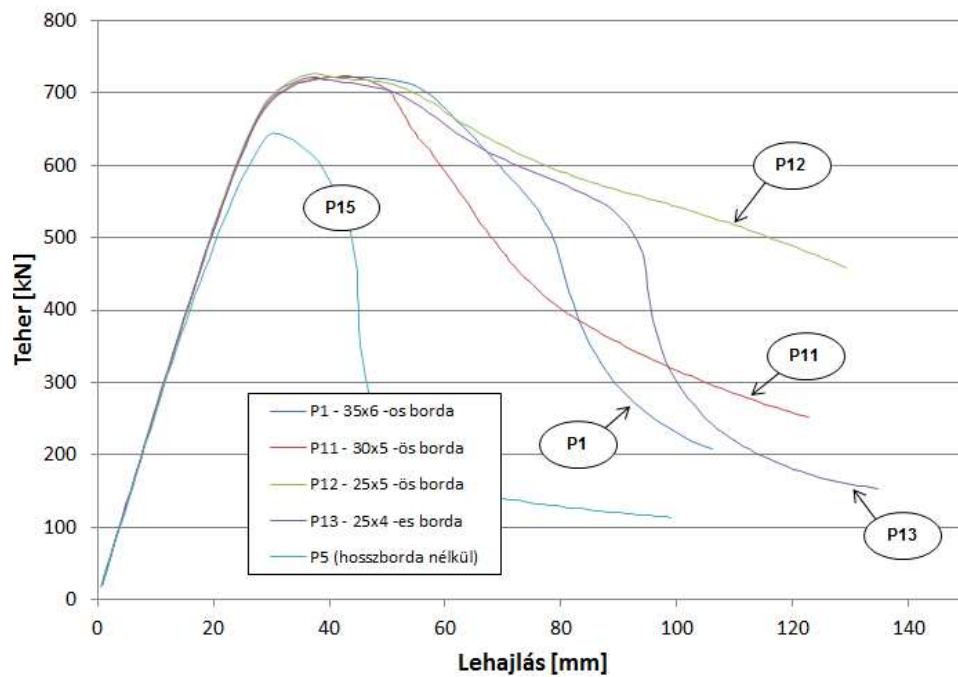


A.4. ábra – 3. keresztmetszeti osztályú övű modellek erő-elmozdulás diagramjainak összehasonlítása

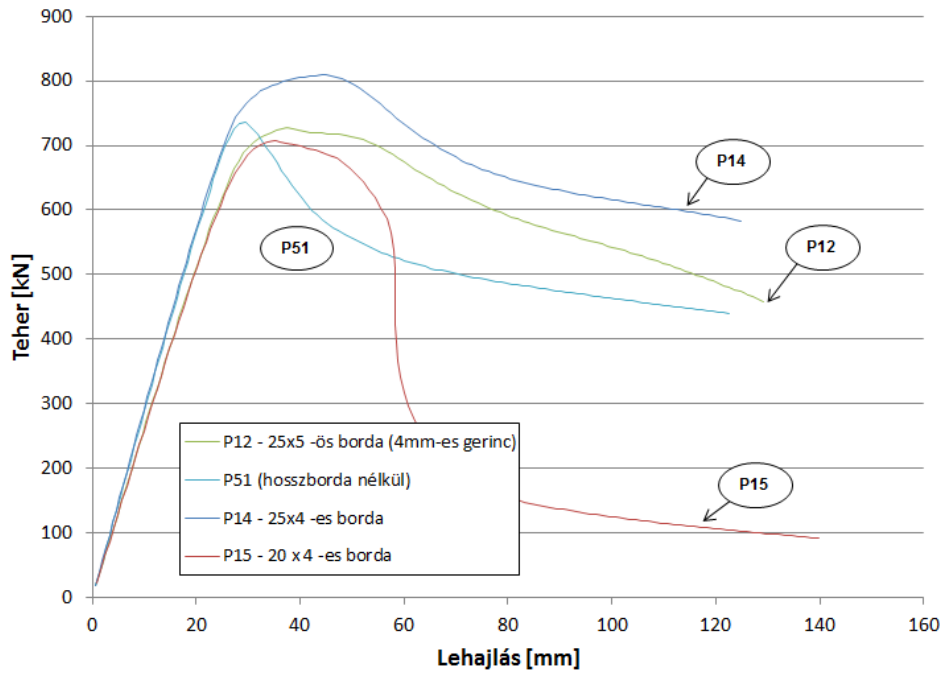


A.5. ábra – 1. és 2. keresztmetszeti osztályú övű modellek erő-elmozdulás diagramjainak összehasonlítása

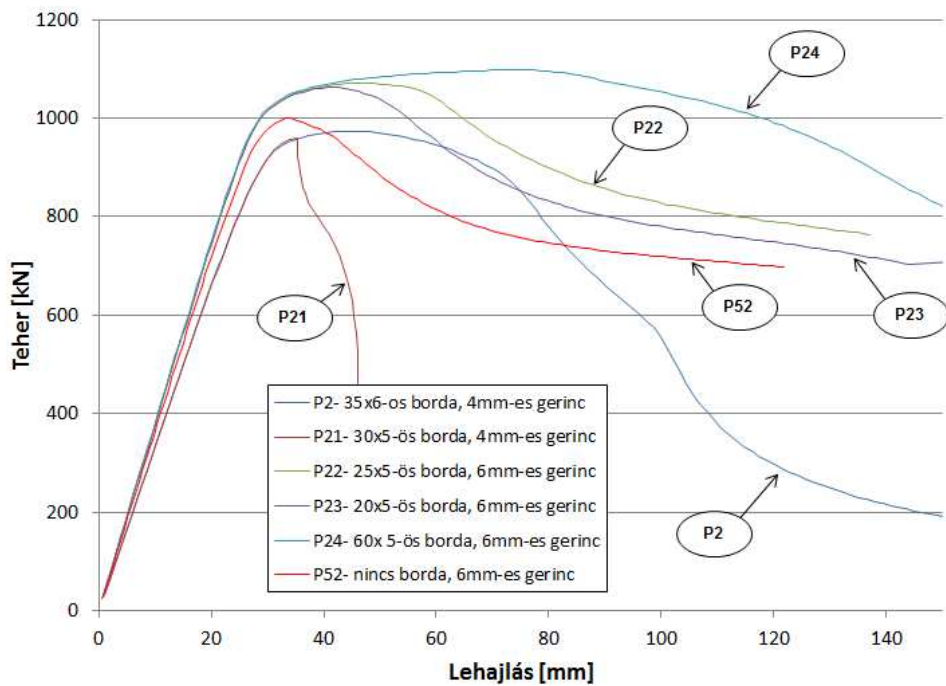
A.3. Kísérleti (P jelű) gerendák



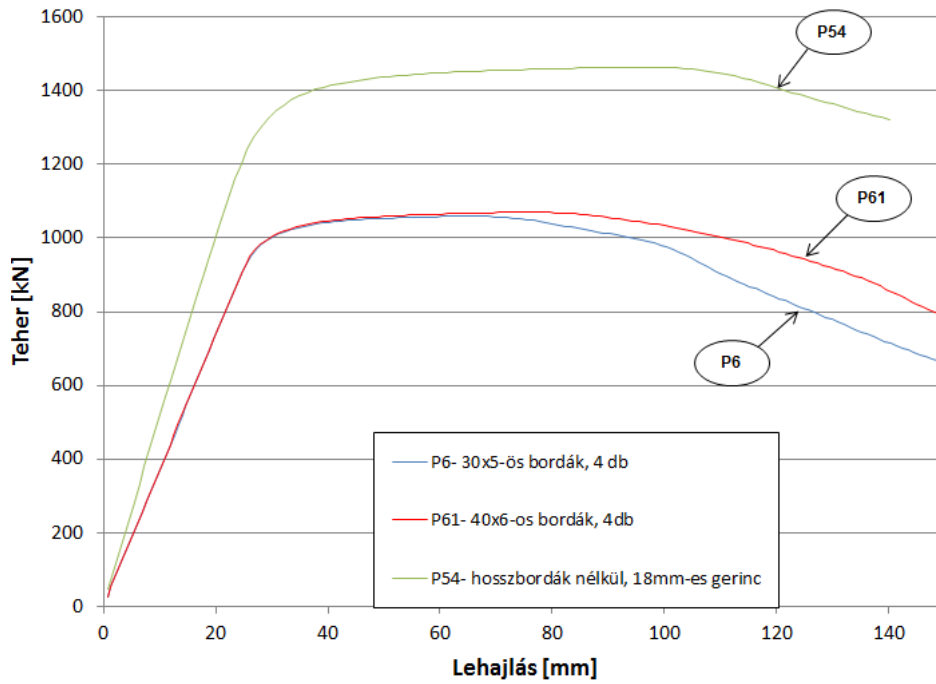
A.6. ábra – 200x14 mm-es övű, 4mm-es gerincű, modellek erő-elmozdulás diagramjainak összehasonlítása



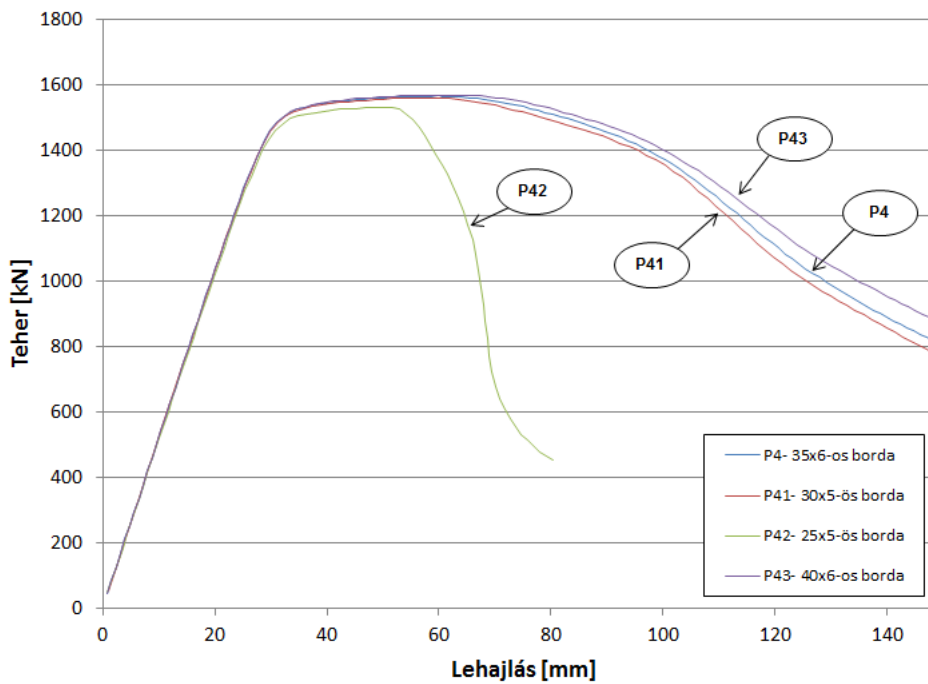
A.7. ábra – 200x14 mm-es övű, 6mm-es gerincű, modellek erő-elmozdulás diagramjai és összehasonlításként a 4mm-es gerincűek közül legduktilisabb, P12-es modell



A.8. ábra – 240x16 mm-es övű, 3 hosszborlás modellek erő-elmozdulás diagramjai és összehasonlításként a P52-es hosszborlás nélküli modell



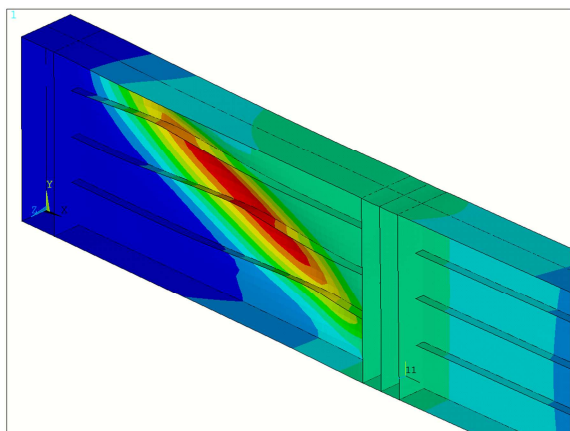
A.9. ábra – 240x16 mm-es övű, 4 hosszbordás modellek erő-elmozdulás diagramjai és összehasonlításként a P54-es, hosszborða nélküli, első keresztmetszeti osztályú gerincű modell



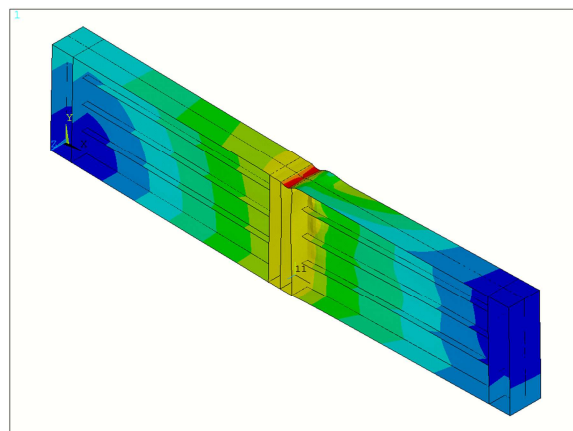
A.10. ábra – 300x20 mm-es övű, 3 hosszborða modellek erő-elmozdulás diagramjai

B Függelék – Tönkrementeli módok

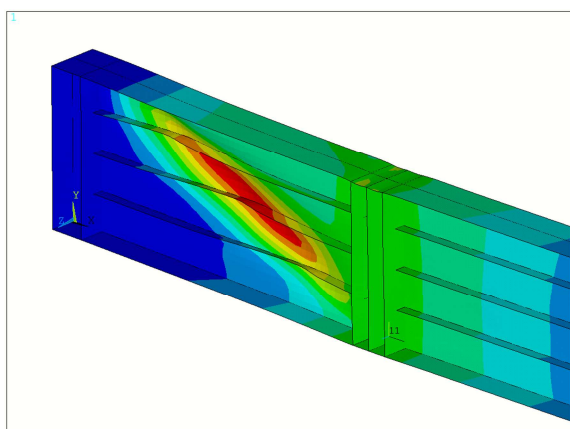
B.1. 3 méteres (S12 jelű) gerendák



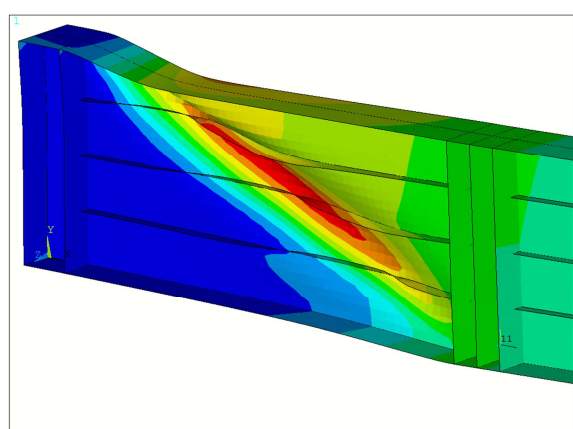
B.1. ábra – S12-es modell (3. km o. öv, 30x5 mm-es borda) tönkrementele



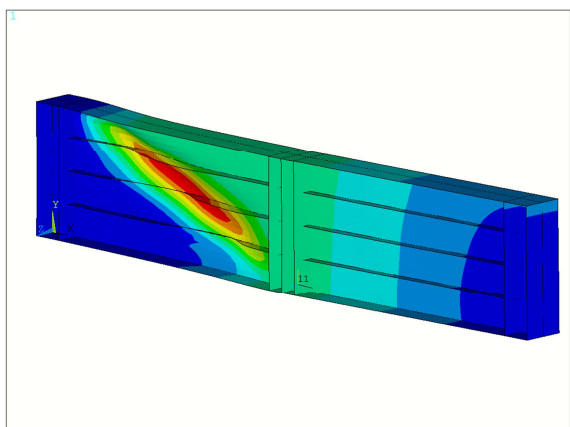
B.2. ábra – S12/2-es modell (3. km o. öv, 35x6 mm-es borda) tönkrementele



B.3. ábra – S12/3-as modell (2. km o. öv, 40x6 mm-es borda) tönkrementele

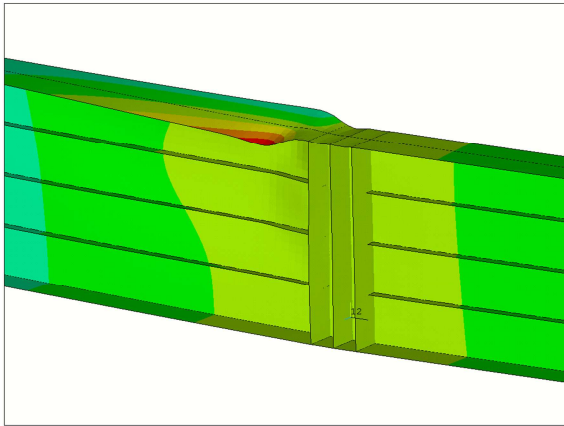


B.4. ábra – S12/5-ös modell (1. km o. öv, 30x5 mm-es borda) tönkrementele

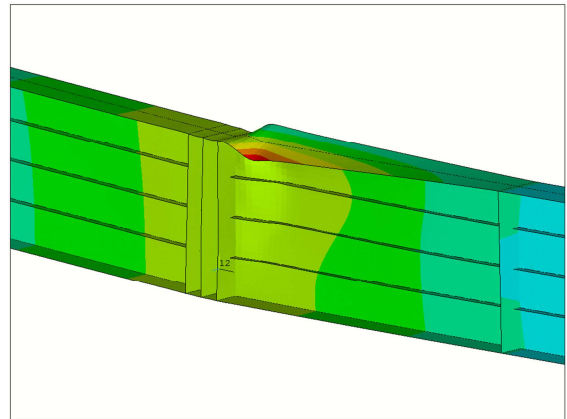


B.5. ábra – S12/7-es modell (1. km o. öv, 40x6 mm-es borda) tönkrementele

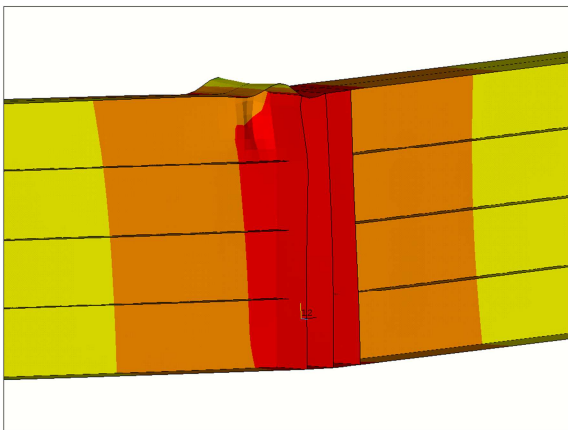
B.2. 6 méteres (2xS12 jelű) gerendák



B.6. ábra – 2xS12-es modell (3. km o. öv, 30x4 mm-es borda) tönkremenetele

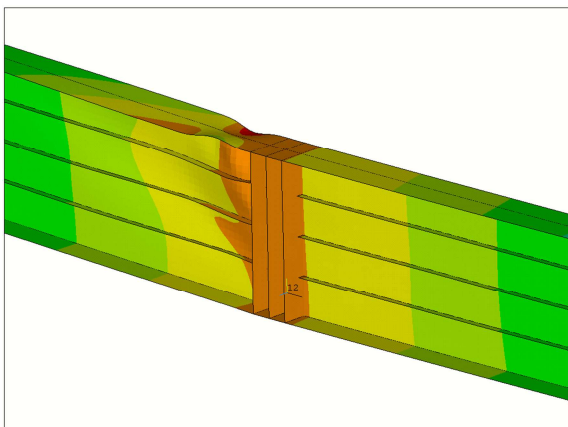


B.7. ábra – 2xS12/3-as modell (2. km o. öv, 30x5 mm-es borda) tönkremenetele

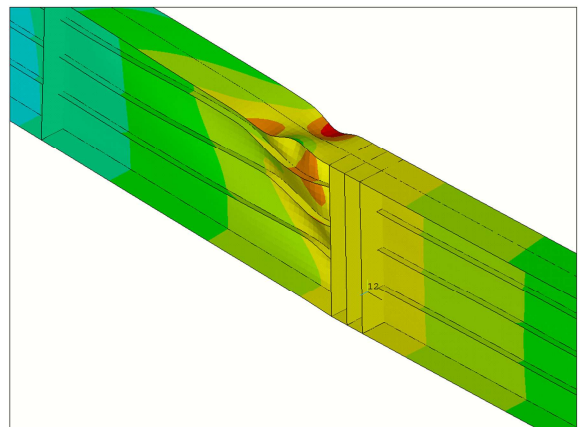


B.8. ábra – 2xS12/4-es modell (1. km o. öv, 40x6 mm-es borda) tönkremenetele

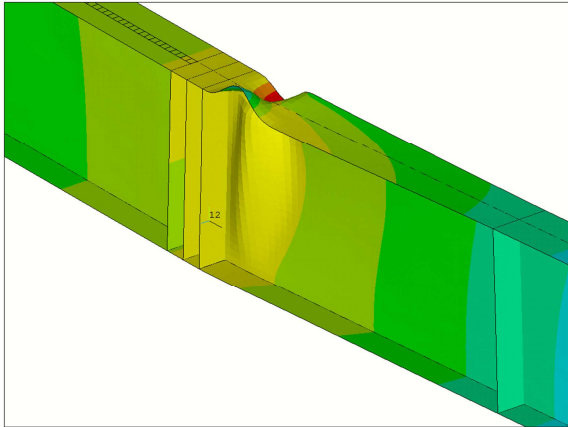
B.3. Kísérleti (P jelű) gerendák



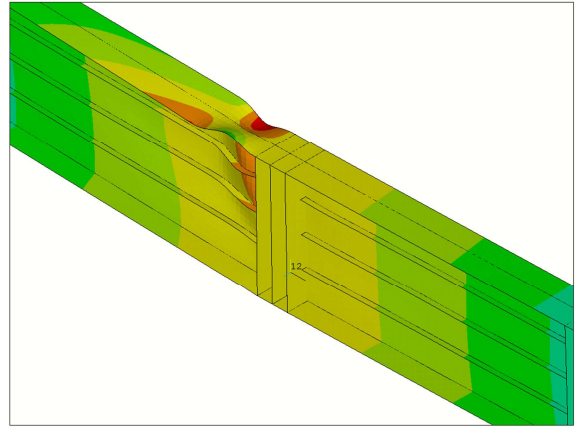
B.9. ábra – P12-es modell (200x14mm-es öv, 4mm-es gerinc, 25x5mm-es borda) tönkremenetele



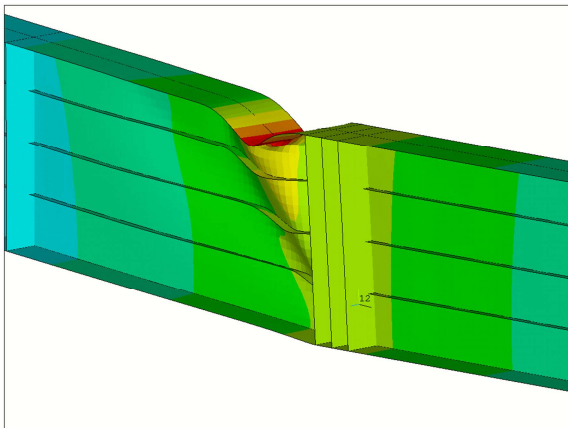
B.10. ábra – P13-as modell (200x14mm-es öv, 4mm-es gerinc, 25x4mm-es borda) tönkremenetele



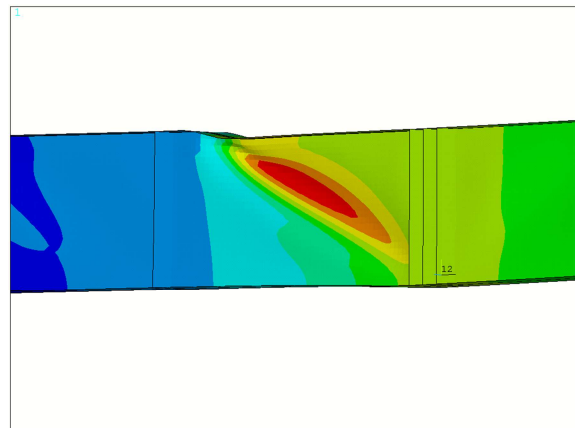
B.11. ábra – P5-ös modell (200x14mm-es öv,
4mm-es gerinc,hosszborda nélkül)
tönkrementele



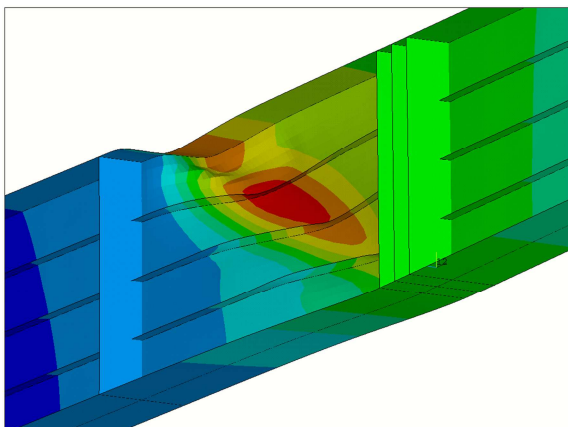
B.12. ábra – P14-es modell (200x14mm-es öv,
6mm-es gerinc,25x4mm-es borda)
tönkrementele



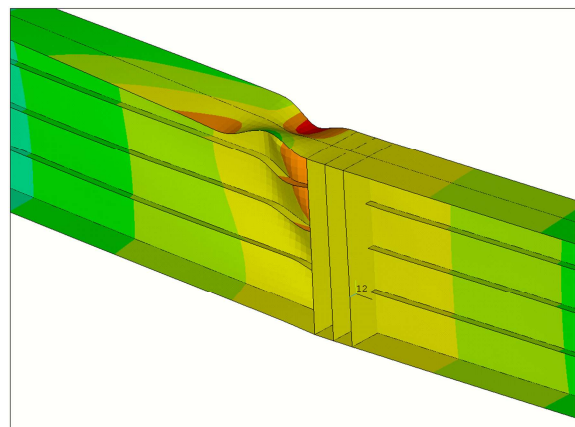
B.13. ábra – P15-ös modell (200x14mm-es öv,
6mm-es gerinc,20x4mm-es borda)
tönkrementele



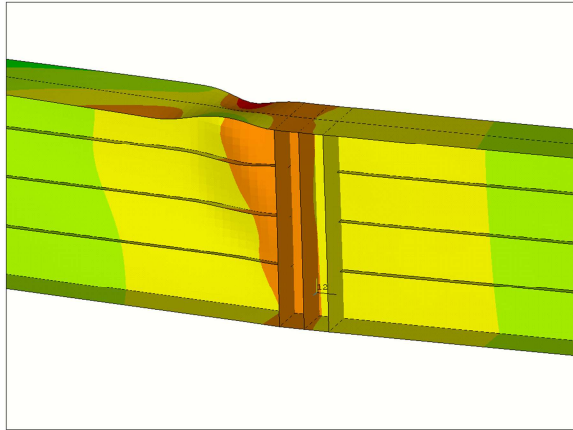
B.14. ábra – P51-es modell (200x14mm-es öv,
6mm-es gerinc,hosszborda nélkül)
tönkrementele



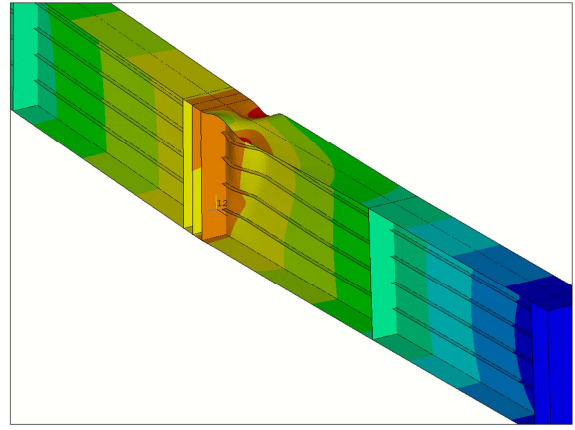
B.15. ábra – P21-es modell (240x16mm-es öv,
4mm-es gerinc,35x5mm-es borda)
tönkrementele



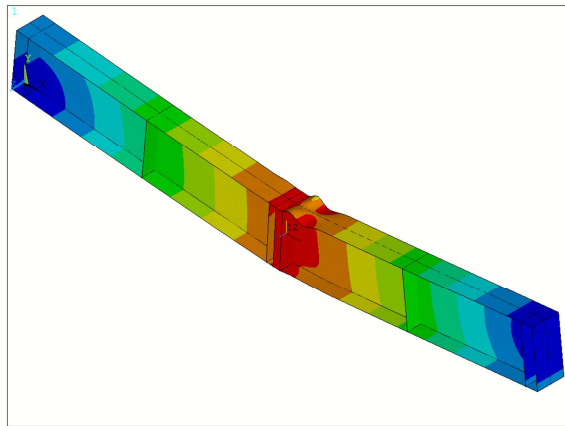
B.16. ábra – P22-es modell (240x16mm-es öv,
6mm-es gerinc,25x5mm-es borda)
tönkrementele



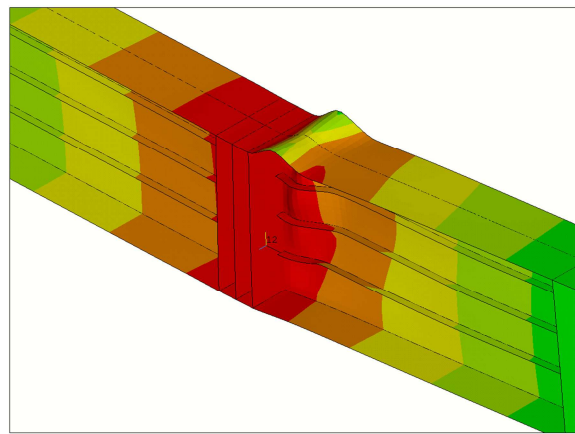
B.17. ábra – P23-as modell (240x16mm-es öv,
6mm-es gerinc, 20x5mm-es borda)
tönkrementelete



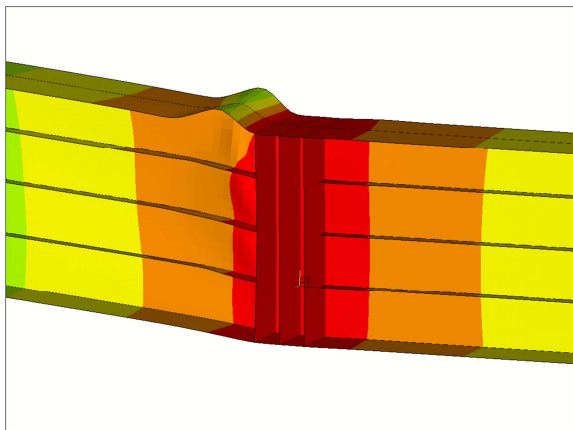
B.18. ábra – P6-os modell (240x16mm-es öv,
6mm-es gerinc, 4 db 30x5mm-es borda)
tönkrementelete



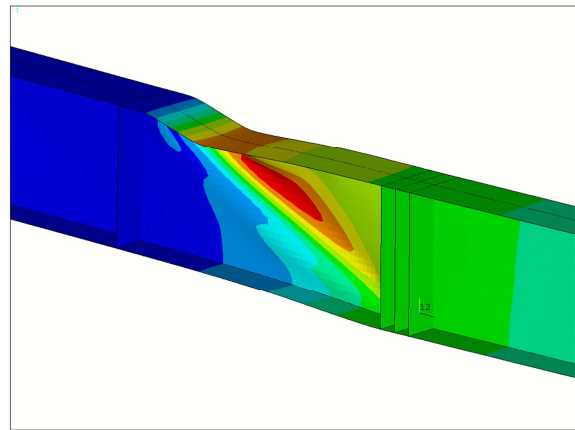
B.19. ábra – P54-es modell (240x16mm-es öv,
18mm-es gerinc, hosszborða nélkül)
tönkrementelete



B.20. ábra – P41-es modell (300x20mm-es öv,
6mm-es gerinc, 30x5mm-es borda)
tönkrementelete



B.21. ábra – P43-as modell (300x20mm-es öv,
6mm-es gerinc, 40x6mm-es borda)
tönkrementelete



B.22. ábra – P53-as modell (300x20mm-es öv,
6mm-es gerinc, hosszborða nélkül)
tönkrementelete

Irodalomjegyzék

- [1] Dulácska E., Joó A., Kollár L.: *"Tartószerkezetek tervezése földrengési hatásokra"*, Akadémiai kiadó, 2008.
- [2] *EN 1998-1:2008 Eurocode – Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*, Final Draft, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 2008.
- [3] Haryanto Y., Satyarno I., Sulisty D.: *"Strength and Ductility of Reinforced T-beams strengthened in the Negative Moment Region With Wire Rope and Mortar Composite"*, Civil Engineering Forum Vol. XXI/1, 2012.
- [4] Khosrow G., Mohammed R. K.: *"Nonlinear Large Deflection Analysis of Stiffened Plates"*, 2012.
- [5] *EN 1993-1-5:2007 Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-5: Plated structural elements*, CEN, Brussels, 2007.
- [6] Vigh L.G.: *"Virtual and real test based analysis and design of non-conventional thin-walled metal structures"* Budapest, 2006.
- [7] *ANSYS Structural Analysis Guide, Online Documentation ANSYS Inc., 2005.*
- [8] *ANSYS Structural Analysis Guide, Online Documentation ANSYS Inc., 2005.*