

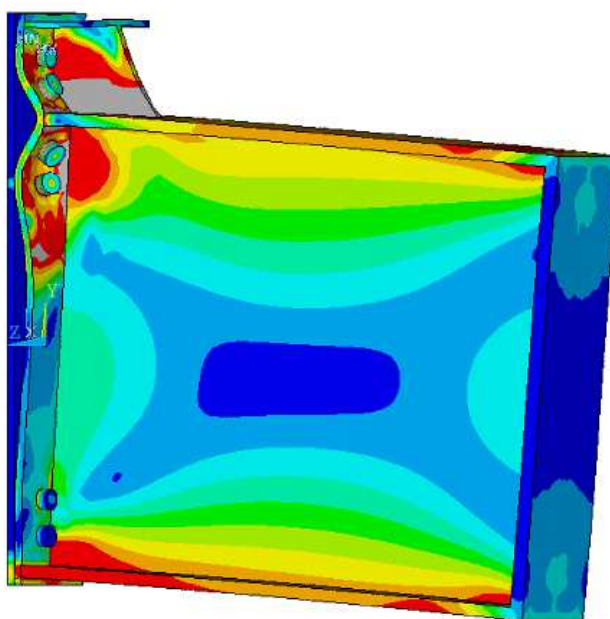


**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem**

**Hidak és Szerkezetek Tanszék**

## **TDK dolgozat**

**Acél nyomatékálló homloklemezcsatlakozások külső csavarsori  
erőeloszlásának vizsgálata**



*Készítette: Kövesi Krisztina, MSc II. évfolyam*

*Konzulens: Dr. Kövesdi Balázs, Hidak és Szerkezetek Tanszék*

**Budapest, 2013. október**

## *TARTALOMJEGYZÉK*

---

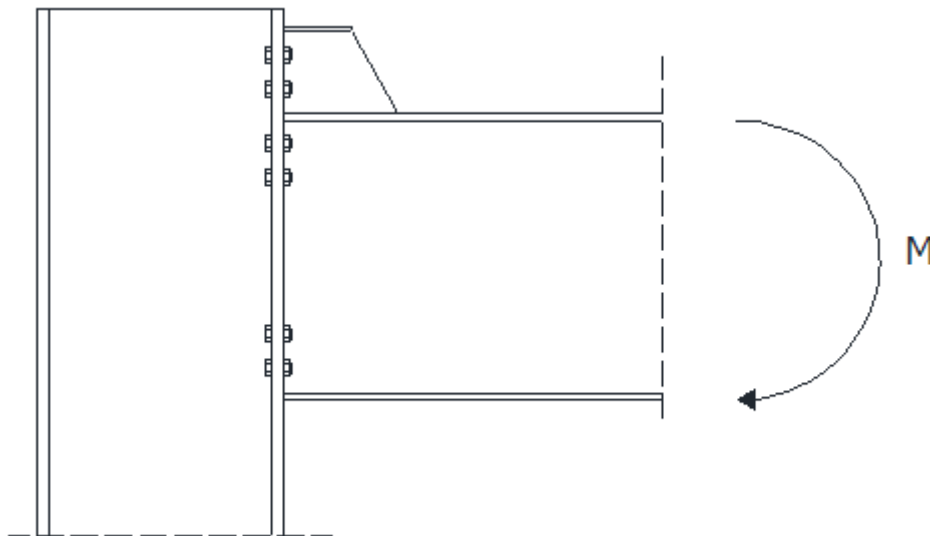
<b>1. Bevezetés .....</b>	<b>4</b>
1.1. Problémafelvetés.....	4
1.2. Célkitűzés .....	4
1.3. Megoldási stratégia .....	5
<b>2. Szakirodalmi áttekintés .....</b>	<b>6</b>
2.1. Homloklemez csomópont típusának meghatározása az Eurocode alapján.....	6
2.2. Az Eurocode 3 szerinti méretezés alapelve – a komponensmódszer .....	6
2.3. Hajlítási ellenállás meghatározása Eurocode alapján .....	8
2.3.1. Helyettesítő T-elem.....	8
2.3.2. Oszlop-gerenda kapcsolat hajlítási ellenállásának meghatározása .....	10
2.3.3. Csavarsori ellenállás redukálása a nyomott oldal ellenállása miatt .....	12
2.3.4. Csavarsori ellenállások redukálása csoportos tönkremeneteli mód miatt .....	12
2.3.5. Csavarsori ellenállás redukálása 3. tönkremeneteli mód miatt .....	13
<b>3. Numerikus modell bemutatása .....</b>	<b>14</b>
3.1. Numerikus modell jellemzői.....	14
3.1.1. Geometriai kialakítás .....	14
3.1.2. Alkalmazott elemtípusok .....	15
3.1.3. Végeelem hálózat.....	16
3.1.4. Peremfeltételek, teher.....	17
3.1.5. Anyagmodellek .....	18
3.2. Modellverifikálás.....	22
3.2.1. A modell verifikálásául szolgáló kísérleti eredmények .....	22
3.2.2. Modell viselkedése és verifikálása.....	23
<b>4. Szerkezeti viselkedés elemzése .....</b>	<b>26</b>
4.1. Tönkremeneteli módok .....	26
4.1.1. A homloklemez folyási tönkremenetele (1. mód).....	26
4.1.2. A homloklemez és a csavarok együttes tönkremenetele (2. mód) .....	27
4.1.3. Csavar szakadása (3. mód) .....	28
4.2. Hammerhead hatásának vizsgálata.....	29
4.2.1. Vizsgálat geometriai kialakítások .....	29

4.2.2.	A referencia és hammerhead-es kapcsolat összehasonlítása .....	31
4.2.3.	Hammerhead geometriai paramétereinek hatása a szerkezeti viselkedésre .....	35
<b>5.</b>	<b>Méretezési eljárás kidolgozása .....</b>	<b>44</b>
5.1.	Vizsgálatok stratégiája.....	44
5.2.	Hammerhead gerinc geometriájának hatása a teherbírásra .....	44
5.2.1.	Hammerhead gerinc vastagságának és hosszának együttes növelése .....	44
5.2.2.	Hammerhead magasságnak hatása a teherbírásra .....	46
5.3.	Méretezési eljárás kidolgozása .....	49
<b>6.</b>	<b>Összefoglalás .....</b>	<b>54</b>
<b>7.</b>	<b>Felhasznált irodalom.....</b>	<b>56</b>

# 1. BEVEZETÉS

## 1.1. Problémafelvetés

Acél csarnokszerkezetek esetén gyakorta előforduló nyomaték-bíró homloklemez-es oszlop-gerenda kapcsolatok és gerenda illesztések egy speciális kialakítása az u.n. kalapácsfejű (továbbiakban hammerhead-del) kialakított kapcsolat. A hammerhead-del rendelkező kapcsolatoknál a külső csavarsorok húzási ellenállásának növelése céljából a külső csavarsorok mellett öv- és gerinclemezből álló merevítő elemet alkalmaznak. Az u.n. hammerhead-ben elhelyezett csavarsorok geometriát tekintve hasonló helyzetben vannak, mint a belső csavarsorok, melyek szintén gerinc-, illetve övlemezzel vannak merevítve. Ennek megfelelően a csavarsori húzási ellenállás meghatározása is a belső csavarsorok húzási ellenállásának meghatározásának módja szerint történhet. Az EN1993-1-8 [1] szabvány nem tesz különbséget a hammerhead-ben elhelyezett „külső” és a hagyományos belső csavarsorok között. Ezzel ellentétben a szakirodalmi kísérleti eredmények [2] azt mutatták, hogy a belső csavarsorok csavarsori erőeloszlásához és húzási teherbírásához képest jelentős különbség tapasztalható a hammerhead-ben elhelyezett csavarsorok esetén, illetve a hammerhead-ben elhelyezett csavarsorok teherbírása jelentősen alatta marad a hagyományos belső csavarsorok ellenállásának. Ezért a TDK munkámban a hammerhead-ben elhelyezett csavarsorok speciális csavarsori erőeloszlását és ennek a méretezésben való figyelembe vételi lehetőségeit vizsgálom.



1.ábra: Tipikus hammerhead-es kapcsolat geometriája

## 1.2. Célkitűzés

A korábbi kísérletek azt az eredményt mutatták [2], hogy a hammerhead-es kapcsolat első csavarsorában jelentősen kisebb csavarsori erő épül fel a tönkremenetelhez tartozó maximális nyomatéki teher szinten, mint a második és a harmadik csavarsorban. A nyomaték-bíró homloklemez-es kapcsolatok méretezése az EN 1993-1-8 [1] szabvány előírásain alapszik. A szabványos méretezési eljárás nem tesz különbséget a hammerhead-ben elhelyezett csavarsorok és a belső csavarsorok

teherbírása között, így az első csavarsorban a második és harmadik sor csavarsori ellenállásával megegyező vagy annál akár nagyobb csavarsori ellenállást is figyelembe vehet a tervező. Ez azt eredményezi, hogy a kapcsolat méretezésénél figyelembe vett csavarsori erőeloszlás nem egyezik meg a tényleges kapcsolat csavarsori erőeloszlásával, ez pedig a nyomatéki teherbírás felülbecsléséhez vezethet, ami csökkenti a tervezésnél biztosítandó biztonsági szintet. Továbbá tipikus kialakítások esetén a legszélső csavarsornak a legkisebb a merevsége, ezért ebben lényegesen kisebb csavarsori erő alakul ki, mint a második és harmadik csavarsorban. Azonban a nyomatéki teherbírás számításánál ennek a csavarsornak a legnagyobb az erőkarja, tehát fajlagosan ez adhatja a nyomatéki teherbírás jelentős részét. Ez azt jelenti, hogy a legszélső csavarsor ellenállásának felülbecslése a tervezésben a biztonság kárára tett közelítés.

A TDK munkám célja, hogy a hammerhead-es kapcsolat csavarsori erőeloszlását és nyomatéki ellenállását elemezzem, majd a numerikus analízis során kapott eredmények ismeretében megvizsgáljam a speciális csavarsori erőeloszlás figyelembevételének lehetőségeit a méretezési eljárásban.

### 1.3. Megoldási stratégia

A kutatás első lépésében a hammerhead-es kapcsolatok szerkezeti viselkedését, speciális csavarsori erőeloszlását vizsgáltam meg. A kísérleti eredmények alapján verifikált numerikus modellt dolgoztam ki, mely képes követni a csavarozott homloklemez-es kapcsolatok szerkezeti viselkedését, tönkremenetelét és teherbírását. Néhány, a gyakorlatban alkalmazott tipikus geometriai kialakítású kapcsolat nem-lineáris szimulációjának elvégzése alapján a hammerhead-es és a hagyományos csak belső csavarsoros kapcsolatok szerkezeti viselkedését, csavarerő eloszlását és teherbírását hasonlítottam össze és elemeztem a méretezési eljárás szempontjából.

Második lépésben a hammerhead geometriai paramétereinek a csavarsori erőeloszlásra és a nyomatéki ellenállásra gyakorolt hatását vizsgáltam. A hammerhead négy vizsgált geometriai paramétere az övszélesség és vastagság, a gerinc vastagság és a hammerhead hossza voltak. A paraméteres vizsgálattal kapott eredmények alapján megállapítottam, hogy melyek azok a paraméterek, amelyek további vizsgálata szükséges a hammerhead hatás méretezési eljárásba valóbeépítéséhez.

Harmadik lépésben a paraméteres numerikus vizsgálatok alapján a hammerhead hatásának egy lehetséges figyelembe vételi módját dolgoztam ki, mely a szabványos méretezési eljárás menetébe beilleszthető. Az eredmények alapján ennek két lehetséges módja van. A hammerhead-es kapcsolat geometriájának változtatása olyan módon, hogy az első csavarsor ellenállása ne legyen kisebb, mint az ekvivalens belső csavarsori ellenállás. Ebben az esetben a hammerhead szükséges geometriai méretei meghatározhatók, mellyel biztosítható a feltételezettnek megfelelő csavarsori erőeloszlás. A másik lehetőség, hogy a méretezés során az első csavarsort csökkentett ellenállással veszünk figyelembe, ekkor azonban a csavarsori ellenállás nagyságát kell megfelelő mértékben csökkenteni. A TDK munkámban olyan méretezési eljárást dolgoztam ki, mellyel egyszerre mind a két módszer alkalmazható és a hammerhead-ben elhelyezett csavarsorok méretezése az EN1993-1-8 [1] szabványnak megfelelő megbízhatósági szinten elvégezhető.

## 2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

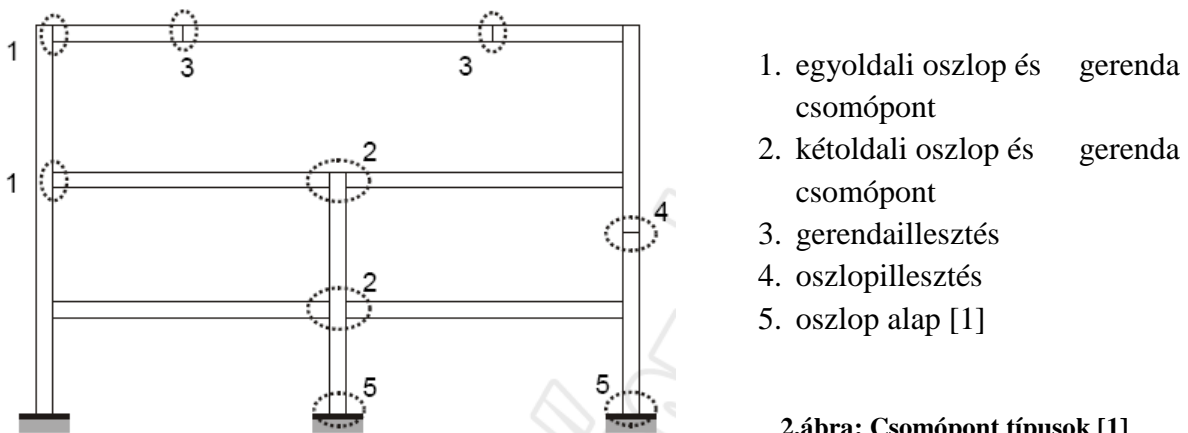
A szakirodalmi áttekintés főcélja, hogy bemutassa az EN 1993-1-8 [1] szabvány csavaros nyomatékbiró homloklemez-es kapcsolatok méretezésre vonatkozó alapelveit és számítási módszerét.

A hammerhead-es kapcsolatok számítására a gyakorlatban alkalmazott eljárások az EN1993-1-8 [1] szabvány méretezési módszerén alapszanak. A vonatkozó szabvány alapelveinek, számítási eljárásainak megismerése nélkülözhetetlen ahhoz, hogy e speciális külső csavarsoros kapcsolat viselkedésének a szabvány által figyelembevettől való eltérése egyértelműen meghatározható legyen. Az eltérések ismeretében, pedig ajánlást lehessen adni egy módszerre, amely a szabványos eljárással szemben nem csökkenti a kapcsolat megbízhatósági szintjét.

A hammerhead a csavarsori erőeloszlásra van hatással és ez által a kapcsolat nyomatéki teherbírását befolyásolja a legnagyobb mértékben, ezért a tanulmány középpontjában a nyomatékbiró homloklemez-es kapcsolatok nyomatéki teherbírásának meghatározása áll.

### 2.1. Homloklemez-es csomópont típusának meghatározása az Eurocode alapján

Az I és H szelvényekből kialakított keretszerkezetek általános csomópont típusait 2.ábra szemlélteti. A belső erők és nyomatékok átadása a szelvény tengelyére merőlegesen (vagy szögben) illesztett homloklemez-en és/vagy a szelvény övén történik. A nyomóerők (a nyomatékból származó is) átadása az érintkező felületeken következik be, a húzóerőket (húzott) csavarok közvetítik. [5]



A hammerhead-es kapcsolat egy speciális kialakítású homloklemez-es oszlop-gerenda csomópont. Ennek megfelelően TDK munkámban csak a 2. ábrán látható 1-es típusú csomópontok nyomatéki teherbírásával foglalkozom.

### 2.2. Az Eurocode 3 szerinti méretezés alapelve – a komponensmódszer

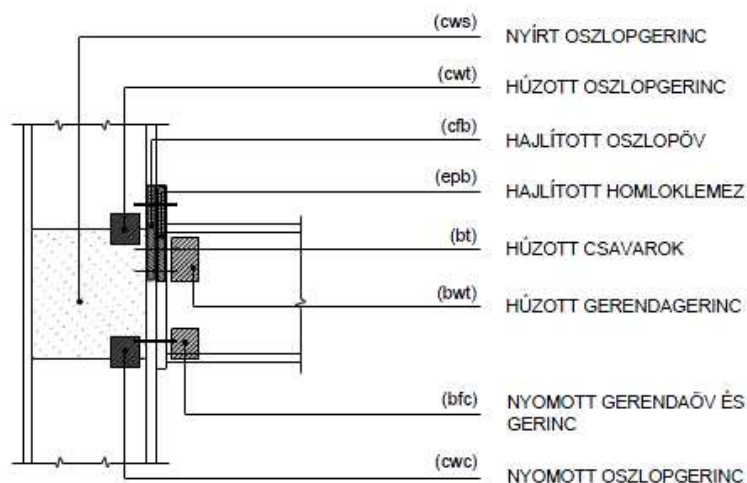
A nyomatékbiró homloklemez-es kapcsolatok méretezése összetett feladat. Az Eurocode lehetőséget nyújt egyszerűbb, kézi számítások elvégzésére, de viszonylag pontos eredményt

csak numerikus módszerekkel kaphatunk. A kapcsolat teherbírásának, merevségének és elfordulási képességének meghatározására szolgáló kézi számítási módszer az ún. „komponens módszer”. A méretezés során a következő lépések végre hajtása szükséges:

- Az erő „útjának” meghatározása a csomóponton keresztül.
- A ható erők ismeretében valamennyi komponens méretezhető (ellenállása ellenőrizhető). A komponensek közül a leggyengébb határozza meg a csomópont ellenállását.
- A csomópont merevsége az erők közvetítésében résztvevő komponensek alakváltozásától függ. Az egyes komponensek alakváltozásának összegéből lehet meghatározni a csomópont merevségét.
- A harmadik fontos mechanikai jellemző az alakváltozási képesség. Ez egy vagy több elem képlékeny alakváltozásának mértékétől függ. (A mennyiben a csomópont teherbírása jelentős mértékben meghaladja a kapcsolt elemek ellenállását, a képlékeny alakváltozási képességet az utóbbiak alakváltozása határozza meg.)

Az egyes komponensek mechanikai jellemzőinek összegzése révén kaphatjuk meg a teljes csomópontra érvényes mechanikai jellemzőket. Ezt az eljárást nevezzük komponens módszernek. A komponens módszer pontossága a modellezés korrektségétől és az elem jellemzők meghatározásának pontosságától függ. Az eljárás során feltételezzük, hogy az egyes komponensek egymástól függetlenül működnek. Ez a valóságban nem igaz, ezért a komponens módszer mindig közelítő jellegű. Érvényességét kísérletekkel és numerikus számításokkal verifikálták.

Oszlop-gerenda csomópont ellenállásának, illetve merevségének meghatározása során az 5. ábrán látható alkotó elemeknek (komponenseknek) a megadott igénybevételek működése esetén érvényes tulajdonságait kell megvizsgálni.



**5.ábra: Homloklemezcsatlakozás komponensei [3]**

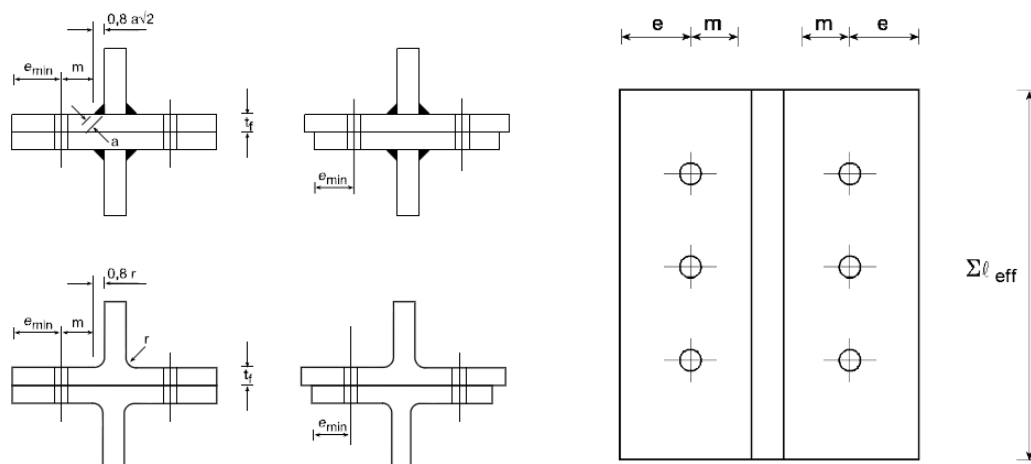
A húzott oldalon elhelyezett hammerhead nincs hatással a kapcsolat összes komponensére. Csak a húzott gerendagerinc, a hajlított homloklemez és a húzott csavarok viselkedését és

teherbírását befolyásolja, ezért csak ennek a három komponensnek a számítási módját vizsgáltam munkám során.

## 2.3. Hajlítási ellenállás meghatározása Eurocode alapján

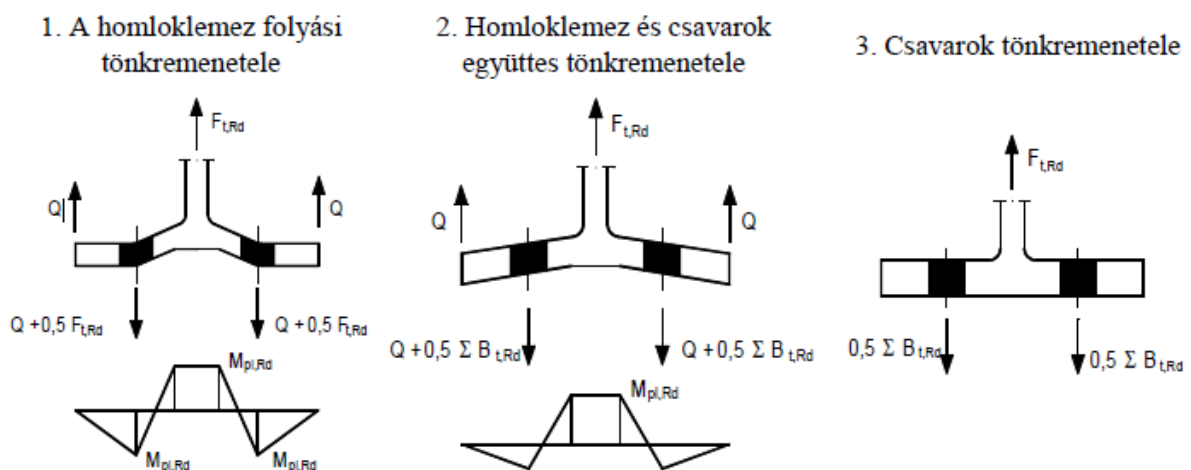
### 2.3.1. Helyettesítő T-elem

A helyettesítő T-elem csavarozott kapcsolatok homloklemez-csavar együttes ellenállásának meghatározására szolgáló modell. A T-elem méreteinek jelölését az 6. ábra mutatja be. A helyettesítő T-elem hossza elméleti alapon meghatározott mennyiség és nem azonos a figyelembe vett szerkezeti rész valós fizikai hosszával.



6.ábra: T-elem fő geometriai paraméterei [1]

A húzási ellenállás meghatározásához szükséges a húzóerőből keletkező homlok lemez végén ható  $Q$  „emelőerő” meghatározása. A homloklemez és a csavarok jellemzőinek (geometriai méretek, anyagminőségek) függvényében három tönkremeneteli mód lehetséges. A T-elem ellenállását a három tönkremeneteli módhoz tartozó  $F_{T,i,Rd}$  ellenállás értékek közül a legkisebb adja. Amennyiben nincs emelőerő két tönkremeneteli módhoz tartozó húzóerő ( $F_{T,1-2,Rd}$ ,  $F_{T,3,Rd}$ ) közül a kisebb adja a T-elem ellenállását.

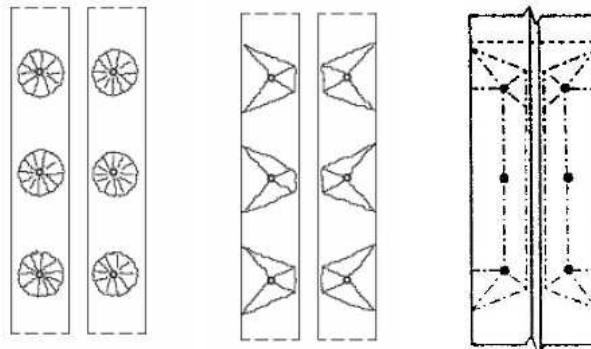


7.ábra: T-elem tönkremeneteli módjai [4]



A T-elem hosszát a törésképek alapján lehet meghatározni. A törésképek lehetséges alakjai és tönkremeneteli lehetőségei:

- egyedi csavar-tönkremenetel, kör alakú törésképpel;
- egyedi csavar-tönkremenetel, nem kör alakú törésképpel;
- csoportos csavar-tönkremenetel.



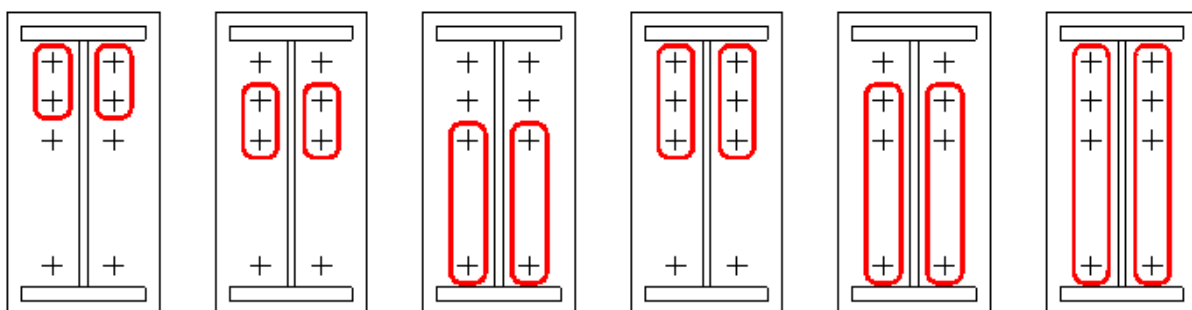
8.ábra: Törésképek [4]

A T elem ellenállása függ a csavarsorok pozíciójától. A csavarsorokat pozíciójuk szerint csoportosíthatjuk:

- csavarsor felett és alatt öv/merevítő lemez,
- csavarsor felett öv/merevítő lemez és alatta csavarsor,
- csavarsor felett csavarsor és alatta öv/merevítő,
- csavarsor két csavarsor között.

Az eltérő csavarsor típusok esetén a T-elem effektív hosszának a számítása eltér egymástól. Az EN1993-1-8 [1] szabvány két csavaras csavarsorok esetére ad számítási eljárást. A T-elem ellenállása csavar csoportok esetén az egyedi csavarsorokhoz hasonlóan a csavar csoport pozíciójától függ. A csoportos tönkremenetelnek homloklemez-es kapcsolat esetén a következő típusai lehetnek:

- két csavarsort tartalmazó csoport
- több csavarsort tartalmazó csoport.



a. Két csavarsoros csoport

b. Több csavarsoros csoport

9.ábra: Csavarsor csoportok

Az egyedi csavarok esetén jellemző tönkremeneteleken alapszik a csoportos tönkremenetel definiálása is, de figyelembe kell venni, hogy a kapcsolat összes csavarsora hatással van egymásra. A csavarcsoporthoz tartozó effektív hossz az egyedi tönkremenetelhez hasonlóan kör alakú és nem kör alakú töréskép alapján határozható meg.

### 2.3.2. Oszlop-gerenda kapcsolat hajlítási ellenállásának meghatározása

Ha a csomópontot terhelő normálerő ( $N_{Ed}$ ) értéke kisebb, mint a kapcsolat húzási/nyomási ellenállásának ( $N_{Rd}$ ) 5%-a, akkor a csomópont hajlítási megfelelésének igazolásához az alábbi feltételnek kell teljesülnie:

$$\frac{M_{j,Ed}}{M_{j,Rd}} \leq 1,0$$

Amennyiben a normálerő ( $N_{Ed}$ ) meghaladja az ellenállás ( $N_{Rd}$ ) 5%-át, a következő biztonság javára szolgáló interakciós egyenlet teljesülését kell igazolni:

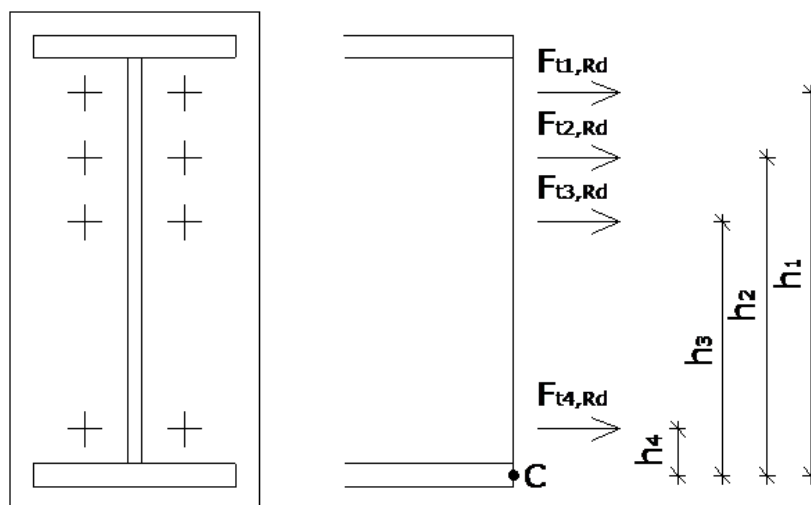
$$\frac{M_{j,Ed}}{M_{j,Rd}} + \frac{N_{j,Ed}}{N_{j,Rd}} \leq 1,0$$

ahol:  $M_{j,Rd}$  a csomópont nyomatéki ellenállása  
 $N_{j,Rd}$  a csomópont nyomási/húzási ellenállása

Homloklemezcsavarozott kapcsolattal kialakított oszlop-gerenda csomópontok nyomatéki ellenállását az egyes csavarsorok ellenállásának és a csavarsor és a nyomott zóna középsíkja közötti távolság szorzatának összege adja.

$$M_{j,Rd} = \sum_r h_r F_{tr,Rd}$$

ahol:  $F_{tr,Rd}$  r-edik csavarsor húzási ellenállása  
 $h_r$  r-edik csavarsor távolsága a nyomott zóna közepétől  
 $r$  csavarsor száma



10.ábra: Homloklemezcsavarozott kapcsolat csavarsorai

Több húzott csavarsorral rendelkező kapcsolatok esetén a csavarsorok számozását a nyomott zóna közepétől legtávolabb eső csavarsorral kezdjük. Csavarozott homloklemez kapcsolatok esetén a nyomott zóna közepe (C) a gerenda nyomott övének közép vonalában feltételezhető.

A csavarsorok húzási ellenállásának meghatározása összetett feladat, amely a következő lépésekben foglalható össze:

1. A nyomott oldal ellenállása az oszlop gerincének nyomási ellenállása ( $F_{c,wc,Rd}$ ), gerenda övének és gerincének nyomási ellenállása ( $F_{c,fb,Rd}$ ) és a nyírt elem ellenállása ( $V_{wp,Rd}$ ) közül a kisebb.

$$F_{c,Rd} = \min(F_{c,wc,Rd}, F_{c,fb,Rd}, V_{wp,Rd})$$

Amennyiben nincs nyírt elem a kapcsolatban, akkor a nyírási ellenállást nem kell számolni és a nyomott oldal ellenállását a másik két komponens ellenállása határozza meg.

2. A húzott oldal ellenállása (az egyes csavarsorok ellenállása ( $F_{tr,Rd}$ )) a T-elem ellenállása ( $F_{T,i,Rd}$ ) és a húzott gerenda gerinc ellenállása ( $F_{t,wb,Rd}$ ) közül a kisebb. A komponensek ellenőrzését az egyedi és az összes csoportos tönkremenetel esetére is el kell végezni. Majd az összes lehetséges töréskép ellenállást össze kell hasonlítani és ezek közül meghatározni a legkisebb ellenállás párok értékét.
3. A csavarsorok húzási ellenállásnak ( $F_{tr,Rd}$ ) összege nem lehet nagyobb a nyomott oldal ellenállásánál ( $F_{c,Rd}$ ), mert a kompatibilitási feltétel a normálerők egyensúlya, azaz a kapcsolatban figyelembevett erőknek egyensúlyt kell tartaniuk egymással. Ez alapján a csavarsor ellenállását a nyomott zóna ellenállása korlátozza. A csavarsori ellenállás redukálására vonatkozó eljárás a 2.3.3. pontban található.

$$F_{c,Rd} \geq \sum F_{tr,Rd}$$

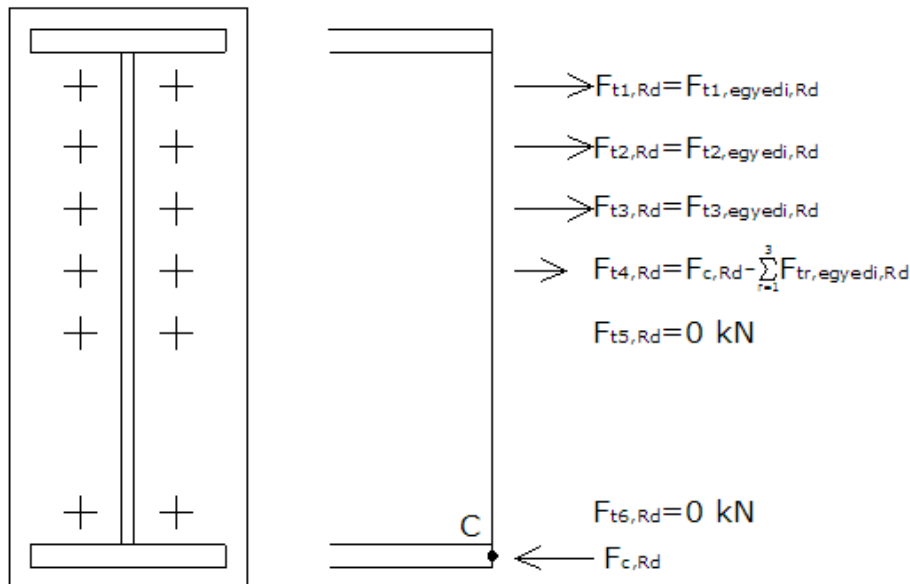
4. Az egyedi tönkremenetelhez tartozó csavarsor ellenállását ( $F_{tr,Rd}$ ) szintén korlátozza a csoportos tönkremeneteli módhoz tartozó ellenállásértéke. A csavarsori ellenállás redukálására vonatkozó eljárás a 2.3.4. pontban található.

$$F_{tr,Rd} = \min(F_{tr,egyedi,Rd}, F_{tr,csop,Rd})$$

5. Továbbá ha egy csavarsor tényleges húzási ellenállása nagyobb, mint  $0,95 \cdot F_{T,3,Rd}$  ( $F_{T,3,Rd}$  T-elem ellenállása 3. tönkremeneteli mód esetén), akkor a csavarsorok húzási ellenállásának csökkentése szükséges egy esetleges csavartörési tönkremenetel elkerülés érdekében. A csavarsori ellenállás redukálására vonatkozó eljárás a 2.3.5. pontban található. [7]

### 2.3.3. Csavarsori ellenállás redukálása a nyomott oldal ellenállása miatt

Az egyes csavarsorok húzási ellenállást ( $F_{tr,Rd}$ ) az első csavarsortól, azaz nyomási zóna közepétől legtávolabb eső csavarsortól elindulva sorban kell meghatározni.



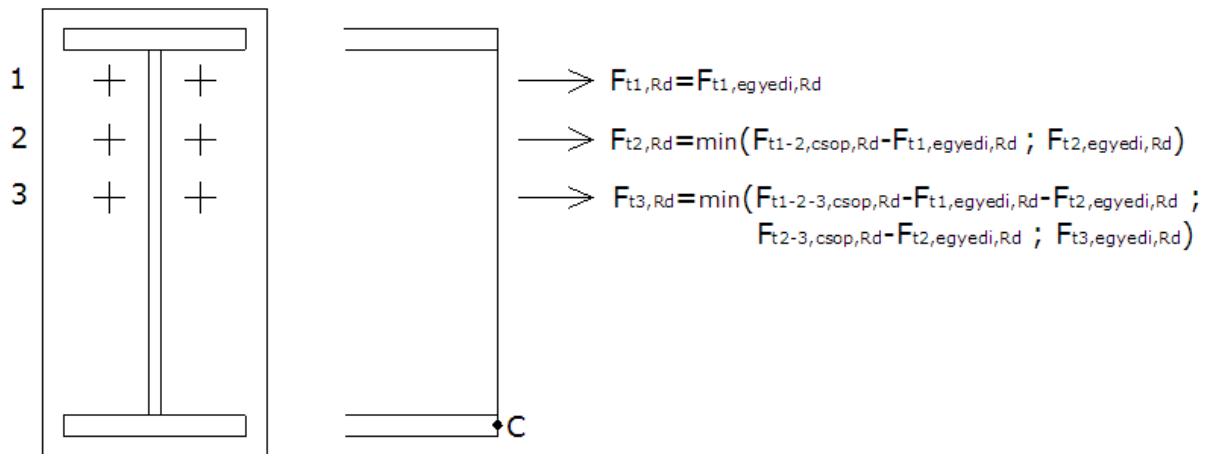
11.ábra: Csavarsori ellenállás redukálása

A korlátozások sorát addig kell folytatni, amíg a húzott csavarsorok ellenállása nem lesz egyenlő a nyomott oldal ellenállásával. Ha a nyomott oldal ellenállása kicsi, akkor csak a legtávolabbi csavarsor fog „dolgozni”, a többi csavarsorban 0 kN nagyságú erőt szabad figyelembe venni. Ha a nyomott oldal ellenállása elég nagy, akkor az összes csavarsor hatékonyan részt vesz a kapcsolat teherbírásában és a figyelembe vett húzóerő egyenlő lesz az egyes egyedi csavarsorok húzási ellenállásával. A csavarsori ellenállások redukálása a következő kifejezéssel írható le:

$$F_{tr,Rd} = \max \left[ 0 \text{ kN}, \min \left( F_{c,Rd} - \sum_{n=1}^{r-1} F_{Tr,egyedi,Rd}, F_{Tr,egyedi,Rd} \right) \right]$$

### 2.3.4. Csavarsori ellenállások redukálása csoportos tönkremeneteli mód miatt

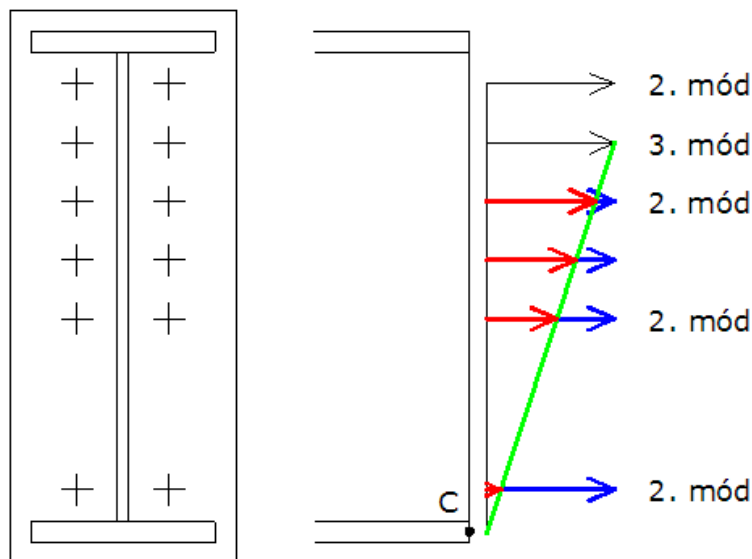
A korlátozás kiindulási alapja az előző pontban meghatározott csavarsori ellenállás, aminek az értékét a csoportos csavar tönkremeneteli mód húzott oldali ellenállása korlátozza. Az ellenállás csökkenése a gyakorlatban a következő módon történik. Az első csavarsor, ami a legtávolabb van a nyomott oldaltól, nincs korlátozva egyik csavar csoport által se, mert az összes csoport húzási ellenállása mindig nagyobb, mint az első csavar sor egyedüli húzási ellenállása. A második csavarsor húzási ellenállása az 1-2 csavarcsoport húzási ellenállása által korlátozott. A harmadik csavar sor húzási ellenállása a 1-2-3 és a 2-3 csavarcsoport ellenállása által korlátozott. Ez a sorozatos redukálás folytatódik a kapcsolat összes csavarsorára. A korlátozás logikáját az 12. ábra szemlélteti. [7]



12.ábra: Csoportos csavar tönkremenetel miatti csavarsori ellenállás redukciójának szemléltetése

### 2.3.5. Csavarsori ellenállás redukálása 3. tönkremeneteli mód miatt

A korlátozás kiindulási alapja az előző két pontban meghatározott húzási ellenállás. Amennyiben a kapcsolat egy csavar sorának tényleges húzási ellenállása nagyobb, mint a csavarsor 3. tönkremeneteli módhoz tartozó húzási ellenállásának 0,95-szöröse, akkor a csavarsor ellenállását redukálni kell az EN 1993-1-8 [1] szabvány 6.2.7.2 (9) pontja szerint. A korlátozás függvénye lineáris, aminek egyik végpontja a nyomott gerenda öv közép pontja (C), a másik végpontja az adott csavarsor tényleges tervezési húzási ellenállása, ami kielégíti az előbbieken említett kritériumokat. A korlátozás logikáját az 13. ábra mutatja be.



13.ábra: 3. tönkremeneteli mód miatti csavarsori ellenállás redukációs eljárása

A kék nyilak mutatják a 2.3.3. és 2.3.4. pontokban elvégzett korlátozások eredménye ként kapott húzási ellenállásokat. A csavar tönkremenetelhez tartozó vonalat a zöld vonal illusztrálja. A piros nyilak pedig az effektív erő értékét mutatják az összes korlátozás után.

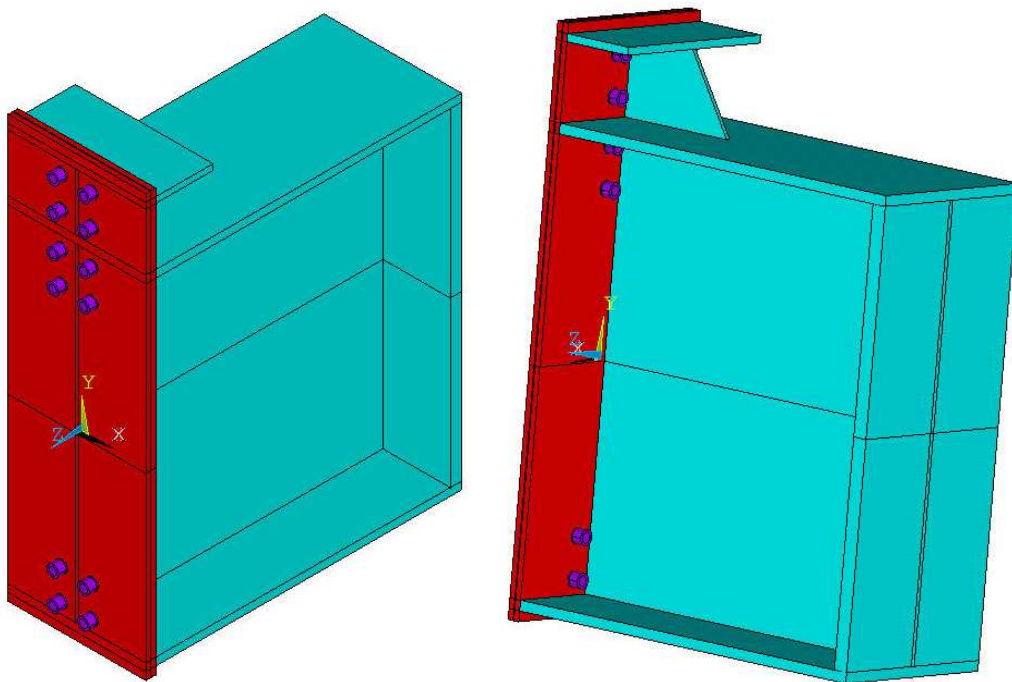
Ha az összes korlátozáshoz tartozó eljárást elvégeztük, akkor a nyomatéki ellenállás meglehetősen határozni az egyes csavarsorok hatékony tervezési ellenállása alapján. [7]

### 3. NUMERIKUS MODELL BEMUTATÁSA

#### 3.1. Numerikus modell jellemzői

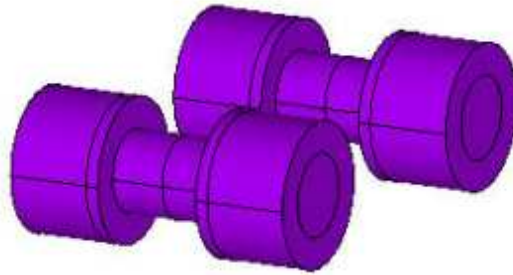
##### 3.1.1. Geometriai kialakítás

A végelem modell felépítéséhez és analizéséhez az ANSYS 14.0 [6] programot használok, mely alkalmas anyagi és geometriai nem-linearitás figyelembe vételére. A numerikus vizsgálat testelemes modellel történik. A homloklemez, a kapcsolódó gerenda és a csavarok (csavarszár, csavaranya és csavarfej) térfogat elemből állnak. A testelemek felhasználásával létrehozott modell geometriája megegyezik a vizsgálni kívánt kapcsolat geometriájával. A numerikus modell geometriai kialakítását a 14. ábra szemlélteti.



14. ábra: Testmodell felépítése

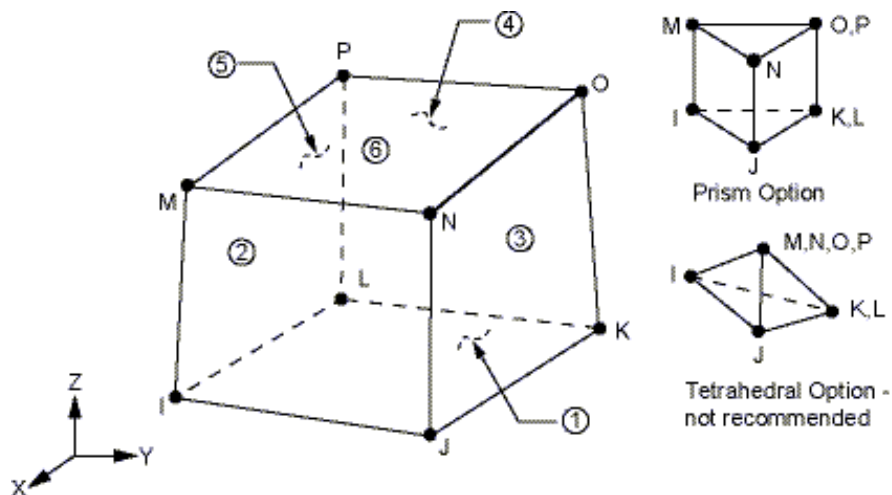
A modellben két homloklemez található, amelyek közül az egyik homloklemez a kapcsolat megtámasztását biztosítja a tér mind a három irányában. A modell másik homloklemeze, amelyhez a gerenda kapcsolódik, a homloklemezhez szokásos módon viselkedik. Az érintkező homloklemez felületek között a valóságban jelenlévő rést is modelleztem, ahol a két homloklemez kapcsolatát kontaktelemek biztosítják. A kontaktelemek csak nyomásra működnek, húzás és nyírás felvételére nem alkalmasak. Segítségükkel konzervatív közelítést kapunk, de a korábbi tapasztalatok alapján ez a közelítés a kapcsolatok hajlítási viselkedésének modellezésére megfelelőnek bizonyul. A gerenda elem végét diafragma zárja le (14. ábra), mely a gerenda oldal irányú megtámasztását biztosítja. A csavarok egyszerűsített geometriával (15. ábra) kerülnek kialakításra, azaz a csavarszár és csavarfej egyaránt henger alakú test. A csavarszár és csavaranya egy folytonos testet alkot, ezzel közelítéssel nem kerül figyelembevételre, hogy a csavarszár és az anyja fizikailag különálló elemek.



15.ábra: Csavar

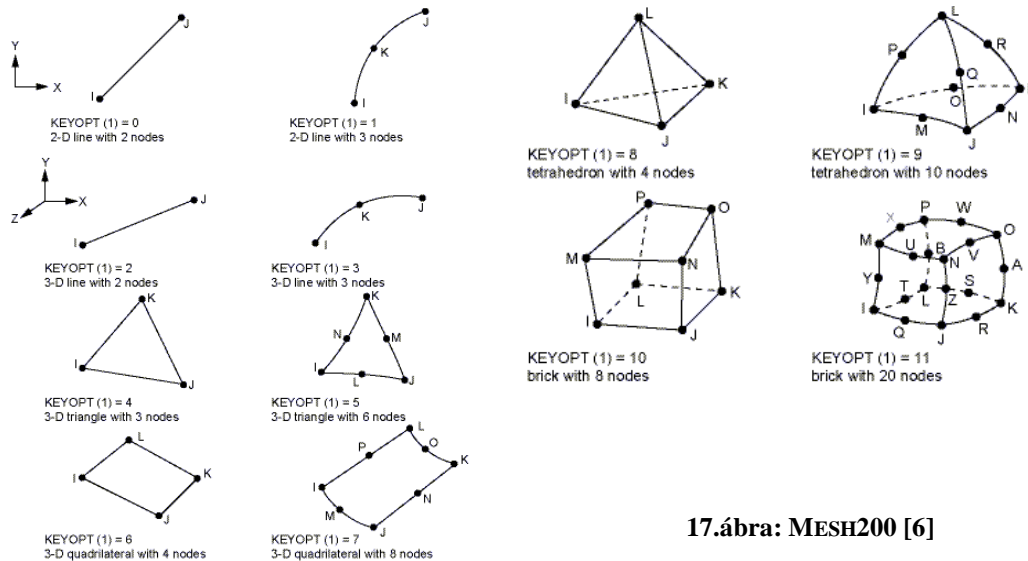
### 3.1.2. Alkalmazott elemtípusok

A modell alapvetően testelemekből áll, melyek az ANSYS végelem program SOLID185 elemtípusával kerülnek kialakításra. Ez egy nyolc csomópontú, csomópontonként három szabadságfokkal rendelkező elem, x,y és z irányú eltolódással. Az elem alkalmas nemlineáris anyagmodell, nagy elmozdulások és nyúlások figyelembevételére. Alapvetően az elemtípus a nyolc csomópontú elemeket támogatja, de ha a hálózni kívánt elem geometriája indokolja tetraéderek és hat csomópontú hasábok is alkalmazhatóak [6].



16.ábra:SOLID185 [6]

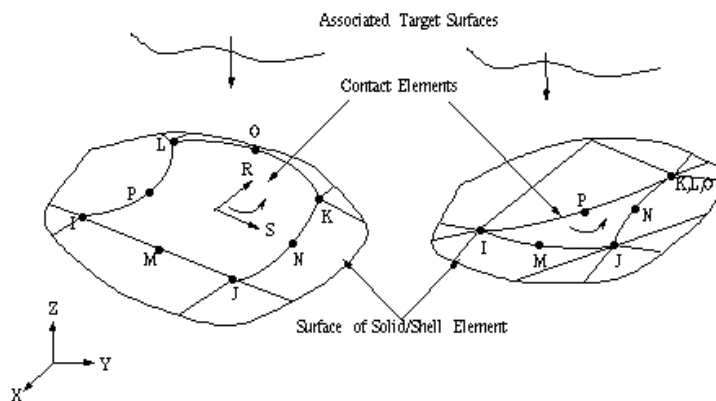
A hálózat szabályossága érdekében MESH200 elemeket is tartalmaz a modell. MESH 200 elem csak a hálózati kialakítást, a megoldást nem befolyásoló elem és bármelyik másik ANSYS elem típus esetén alkalmazható. Az elem segítségével először az érintkező vonalakon vagy felületeken létre kell hozni a vonal vagy felület hálózatát, majd ez alapján VSWEPT parancsot alkalmazva generálni a testelemeket. [6]



17.ábra: MESH200 [6]

Az érintkező felületek kapcsolatának kialakítására CONTA173 és TARGE170 elemtípust alkalmazok. A TARGE170 elem a kontaktelemek célfelületének létrehozására szolgál. CONTA173 elem a 3D célfelület közötti érintkezést és elcsúszást biztosítja. Csomópontonként három szabadságfokkal rendelkezik. Ez az elem 3D és héj elemek esetén alkalmazható. Nem rendelkezik elemen belüli csomóponttal és ugyanazokkal a geometriai tulajdonságokkal kell, hogy rendelkezzen, mint az elem, amire definiáljuk. A kapcsolat akkor jön létre, amikor az elem felületébe behatol az egyik célfelületi elem (TARGE170). [6]

A kontaktelemek számos beállítási lehetőséggel szolgálnak. A kontaktek beállítása nagymértékben befolyásolja az analízis sebességét és konvergencia sikerességét.



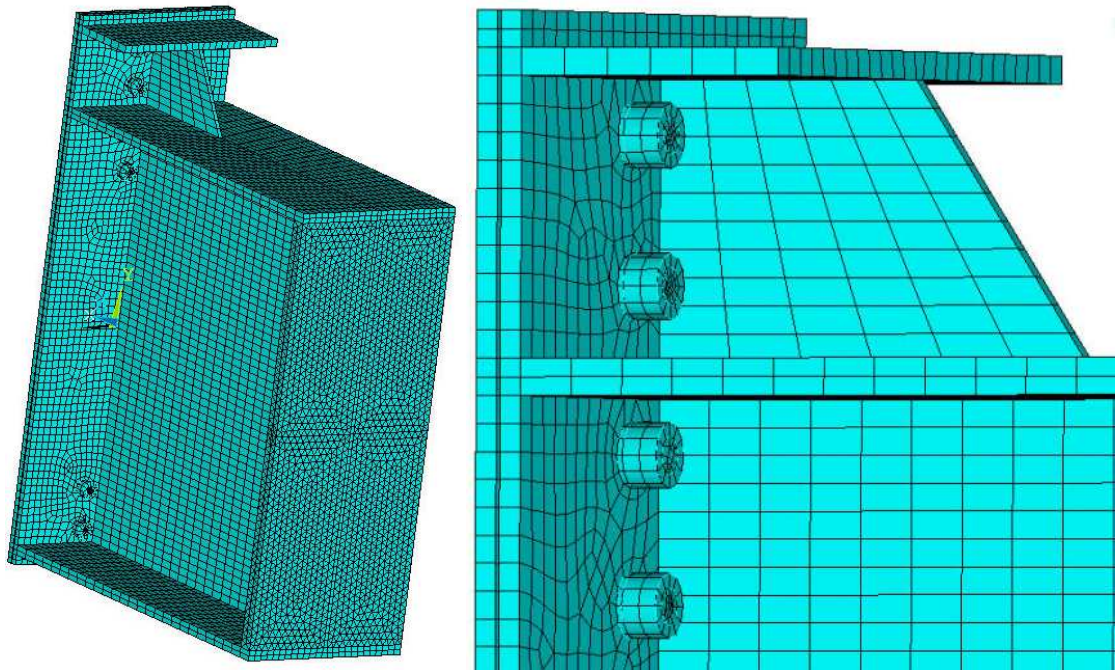
18.ábra: CONTA173 [6]

### 3.1.3. Végelem hálózat

A testmodell hálózása 15mm-es elemmérettel történik. Az elemméretet a csavarok hálózhatósága határozza meg. Kisebb elem alkalmazása jelentősen növeli a futás időt, ezzel kevesebb számú modell futtatását tesz lehetővé, viszont a verifikálás alapján 15mm-es elem mérettel is megfelelő pontosságú eredmény érhető el. Döntő részt téglatest elemek alkotják a



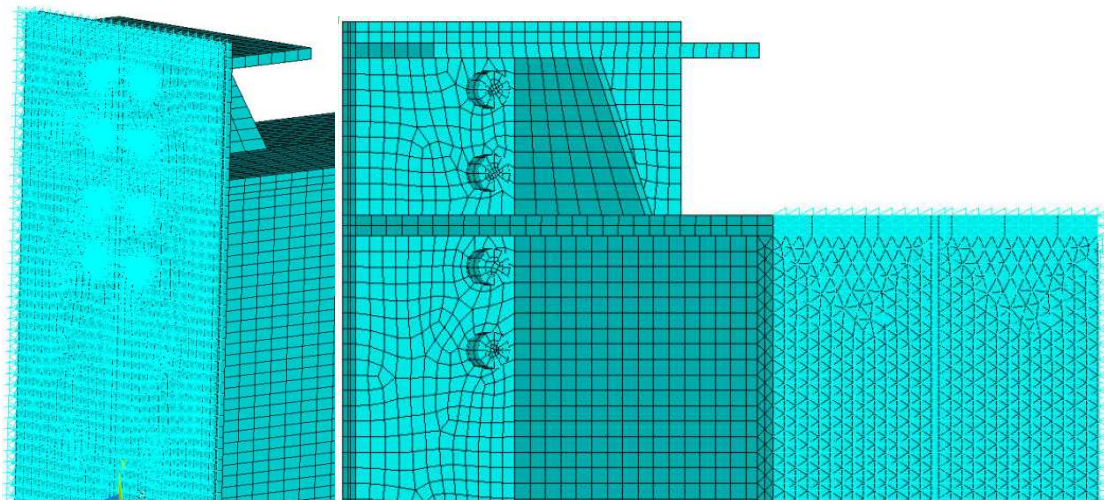
hálót, de a geometriai kialakítás néhol (például a csavarok környezetében) szükségessé teszi négy- és háromszög alapú hasábok alkalmazását is.



19.ábra: Modell végeelem hálója

### 3.1.4. Peremfeltételek, teher

A kapcsolat megtámasztására x, y, és z irányban a külső homloklemez (nem a gerenda felőli homloklemez) felületén kerül sor. A gerenda végén elhelyezkedő a diafragma oldalirányban megtámasztott.

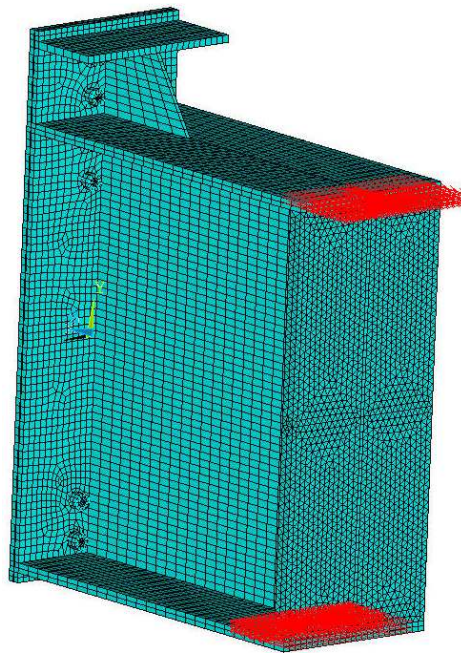


a. Homloklemez megtámasztása

b. Diafragma megtámasztása

20.ábra: Modell megtámasztásai

A kapcsolatra ható hajlító nyomatékot a gerenda két övének végelemein szétosztott egyenértékű koncentrált erőkként veszem figyelembe.



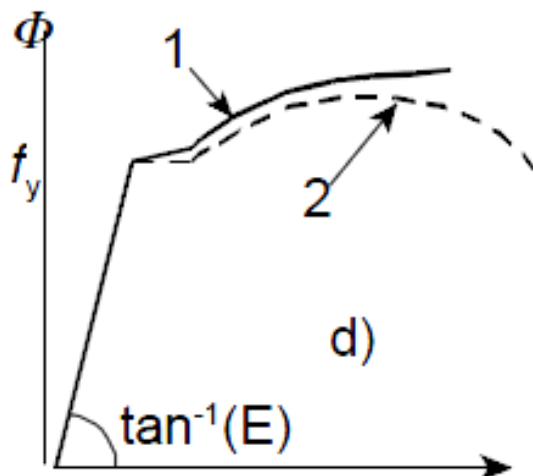
21.ábra: Modell terhe

### 3.1.5. Anyagmodellek

A modellezés során több anyagmodellt alkalmazok. A különböző szerkezeti részek külön anyagmodellt kapnak, hogy a későbbiekben szerkezeti elemenként eltérő modell alkalmazására legyen lehetőség. A kapcsolat minden eleme szerkezeti acélból készül, ezért a rugalmassági modulus egységesen  $E_0=210000\text{N/mm}^2$ , valamint a Poisson-tényező értéke  $\nu=0.3$ . AGMN analízisben lineárisan rugalmas–keményedően képlékeny anyagmodellt alkalmazok. Az alkalmazott anyagmodell követi a szakirodalmi kísérletek [2] során tapasztalt alakváltozás-feszültség diagramot. Az anyagmodell tartalmazza a Huber-Mises-Hencky-féle folyási feltételt és multilineáris izotropikus felkeményedési törvényt követ. A szakítószilárdság elérése után degradáció jelentkezik a homloklemez és a csavarok anyagmodelljében is. Ha nem alkalmaznánk degradációt a gerenda és a homloklemez anyagmodelljében, akkor a számítás a szakítószilárdság elérése után sem állna le és a program nem találná meg az erő-elmozdulás görbe maximumát, és egy fiktív felkeményedést eredményezne, ami a valóságban nem jöhet létre. Ennek a hatásnak a figyelembevétele gyakori problémát jelent a nagy alakváltozással járó képlékeny tönkremeneteli módok modellezésénél. A problémának egy lehetséges megoldása, hogy modellezzük az anyagi tönkremenetelt. Számos kísérlet készült, hogy meghatározzák a különböző acél anyagok degradációját, de nincs egy általánosan elfogadott és alkalmazott eljárás. Ennek következtében az anyagi degradáció modellezésnek alaposabb vizsgálatára volt szükség. A degradációt az ANSYS végelem programban tönkremeneteli modellek segítségével lehet figyelembe venni.

A csavarok és a homloklemez tönkremenetelének a modellezésére alkalmazott anyagmodellnek és végesesem modellnek alkalmasnak kell lennie nagy képlékeny alakváltozások és tönkremeneteli kritérium figyelembevételére. A két feltétel biztosításához tényleges elemeket alkalmazok, amelyek követni tudják a nagy képlékeny alakváltozásokat és alkalmazhatók olyan multilineáris - felkeményedő képlékeny anyagmodell esetén, amely a tönkremeneteli modellt is tartalmazza.

Az EN 1993-1-5 [9] szabvány C melléklete megengedi numerikus analízis esetén a kísérleti eredmények alapján a valós feszültség értékek figyelembe vételét. A valós feszültség és alakváltozás értékek a kísérleti eredményekből számíthatók:



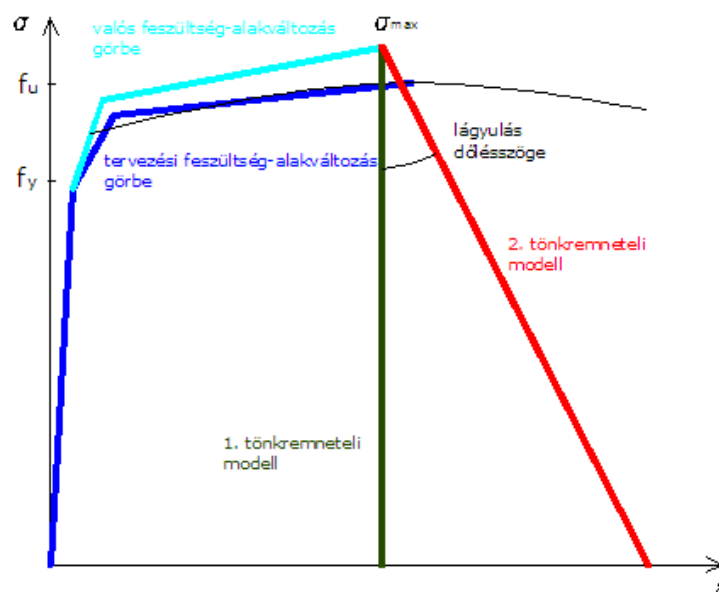
$$\sigma_{valós} = \sigma(1 + \varepsilon)$$

$$\varepsilon_{valós} = \log(1 + \varepsilon)$$

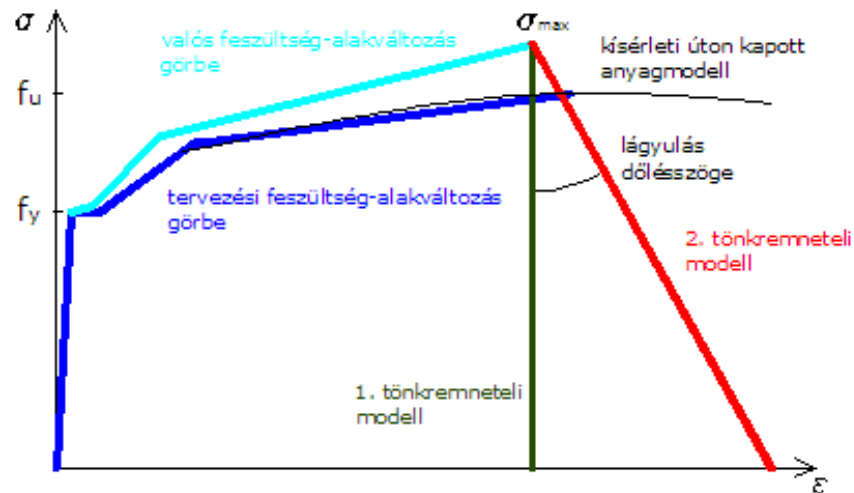
1. valós feszültség-alakváltozás görbe
2. kísérlet során kapott feszültség-alakváltozás görbe

22. ábra: Anyagi viselkedés modellezése [9]

A vonatkozó szabvány és a lehetséges tönkremeneteli módok alapján az alkalmazott anyagmodell alapvetően a 23.-24. ábra szemlélteti a csavarokra és a lemezekre:



23. ábra: Csavarok anyagmodellje



24. ábra: Lemezek anyagmodellje

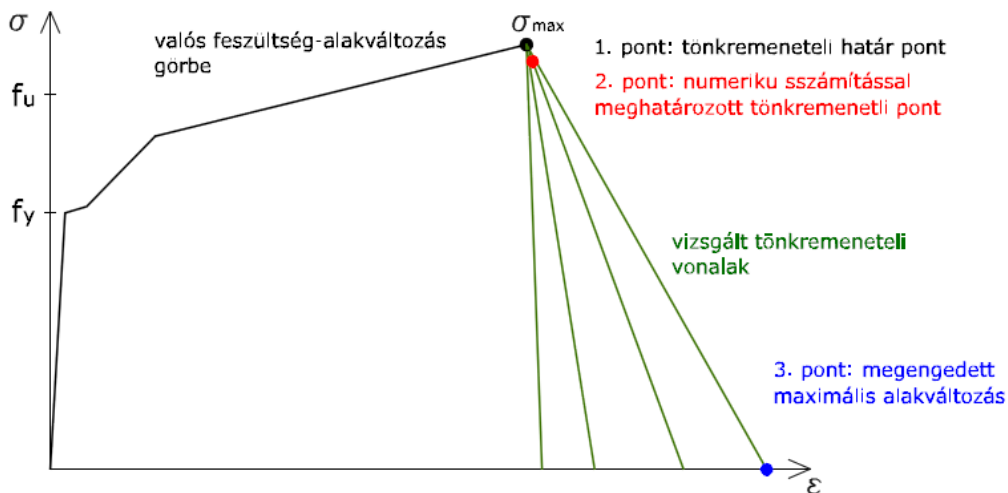
Nagy képlékeny deformációk esetén a numerikus modellben használt térfogatelemeknél a valós feszültség-alakváltozás görbe alkalmazása jobb eredményeket ad a valós szerkezeti viselkedésről. Ezért a valós feszültség-alakváltozás görbét veszem figyelembe a numerikus modellezés során.

A vizsgált kapcsolatok tönkremenetelének modellezésére az anyagmodellbe épített tönkremeneteli kritériumokat alkalmazom. Az ANSYS-ban többféle tönkremeneteli kritériumot lehet definiálni a tönkremenetel előtti anyagbeállításoktól, a tanulmányozott tönkremeneteli módtól és az analízis típusától függően. A két különböző tönkremeneteli kritériumot összehasonlítottam és kiválasztottam az adott problémára jobban alkalmazható modellt.

Az u.n. „halmozott tönkremeneteli modell” („cumulative damage model”) (1. tönkremeneteli modell típus, zöld vonal 23.-24. ábra) látható kék színnel. A tönkremeneteli határpont a szakítószilárdsághoz tartozó alakváltozás értékével határozható meg. A korábbi kísérletek alapján a nyúlás értéke a folyási feszültségnél ~8% volt a csavarok, ~14% a lemezek esetén. Az alakváltozások valós értékeit a kísérlet alapján kapott alakváltozások adják meg, valamint a tönkremeneteli határpontokat is ezek az értékek határozzák meg. Az anyag fokozatos szakadásának leírására alkalmazott tönkremeneteli függvény alkalmazható az anyag szakítószilárdságának redukálására. A tönkremeneteli faktor értéke 1, ami az adott anyag teljes tönkremente lét mutatja be. [6] Ez a tönkremeneteli modell elsősorban lineárisan rugalmas anyagmodellekhez lett kifejlesztve és gyakran alkalmazzák fáradási analízishez.

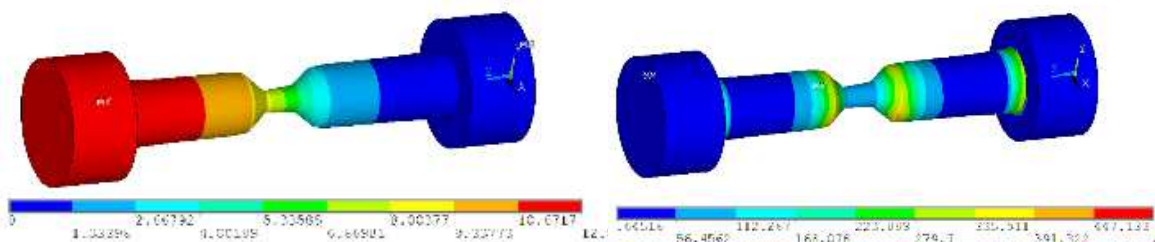
A végeelem program által nyújtott másik tönkremeneteli kritérium (2. tönkremeneteli modell típus, piros vonal 23.-24. ábra) a szakítószilárdság elérése utáni lágylás definícióján alapszik. Amennyiben a feszültség kívül kerül az anyagmodell folyási felületén Backwar-Euler algoritmus „visszafordítja” a feszültséget a tönkremeneteli felületre [6]. Ennek az anyagmodellnek a használata esetén a lágylás mértékét a felhasználónak kell meghatároznia. A lágylás dőlésszögének hatása a kapcsolat ellenállásának vizsgálatával elemezhető, ami azt mutatta, hogy az adott esetben a dőlésszög nincs hatással a kapcsolat hajlítási ellenállására. Ennek az oka, hogy az elért maximális nyúlási szint a numerikus számításban nagyon közel

van a tönkremeneteli ponthoz, ahogy a 25. ábra 2. pontja mutatja. Az első csavar tönkremenetel utána többi csavar a kapcsolatban gyorsan túlterhelődik és szintén tönkremegy. Ez gyakorlatilag azt jelenti, hogy ha a tönkremeneteli pontot elérjük a számításban, nincs konvergencia találat nagyobb teher szinthez, a számítás befejeződik és a hajlítási ellenállás meghatározható. Ez a második tönkremeneteli modell jobban alkalmazható a jelen numerikusszámításban, mert ez az anyagmodell jobb konvergenciát mutat a multilineáris anyagmodellel.



25.ábra: Vizsgált lágyulási vonalak

Az alkalmazott anyagmodell kalibrálása a csavarok húzási ellenállásával történik. A húzási tönkremenetelt a 26. ábra mutatja. Az a.ábrán a csavar alakváltozása látható és az elmozdulása a numerikus vizsgálat végén, a b.ábra a feszültség eloszlást mutatja a csavarokban. Látható, hogy a feszültségek a csavar középső zónájában nagyon kicsik a szakítószilárdashoz képest, ami reprezentálja a csavar húzási tönkremenetelét.



a.ábra: Csavar alakváltozása

b.ábra: Csavar feszültség eloszlása

26.ábra: Csavar viselkedése

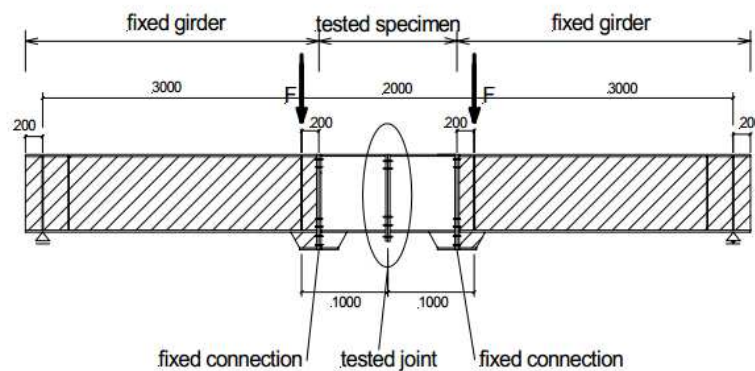
Hasonló anyagmodell alkalmazható a lemezekhez a korábbi kísérletben mért anyagjellemzők alakulásával. Az alkalmazott anyagmodell karakterisztikája a felkeményedő zónában különbözik a csavaroktól, a szakítószilárdság és a szakadó nyúlás is különböző, de az anyagmodell szintén kalibrált a lemez anyag jellemzőire is.

A paraméteres vizsgálatban az alkalmazott anyagok karakterisztikus értékeit vettem figyelembe a mért értékek helyett.

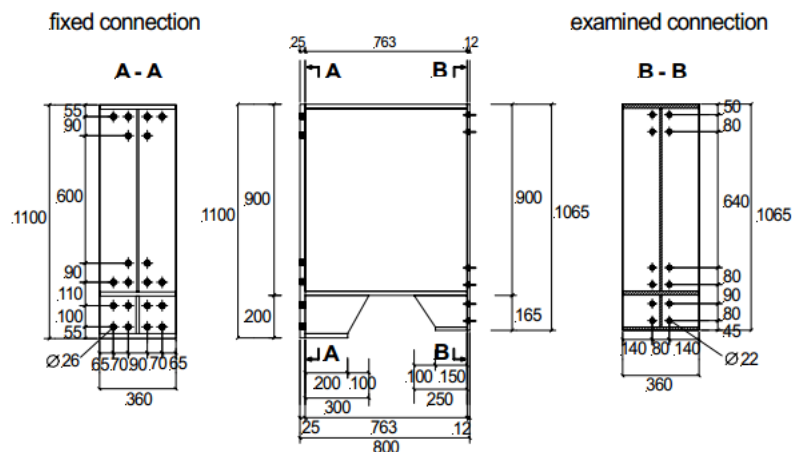
### 3.2. Modellverifikálás

#### 3.2.1. A modell verifikálásául szolgáló kísérleti eredmények

A numerikus modell fejlesztésének és verifikációjának alapjául szolgáló kísérleti kutatást a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Hidak és Szerkezetek Tanszéken végezték 2007-ben [2]. A kísérleti program teljes leírása és a továbbiakban felhasznált eredmények a [2] irodalomban találhatóak. A kísérlet sorozat célja az volt, hogy meghatározza a csavarsori erőeloszlást és a csavarsorok ellenállását, olyan csavaros homloklemezcsatlakozások esetén, amelyekre az EN1993-1-8 [1] szabvány nem ad számítási módszert. A kísérleti program során többféle csavarozott homloklemezcsatlakozási kialakítás vizsgálatára került sor, ezek közül három csatlakozási kialakítása hammerhead-es nyomatékbíró homloklemezcsatlakozás volt.



27.ábra: Modell verifikációhoz alkalmazott kísérlet vázlata [2]



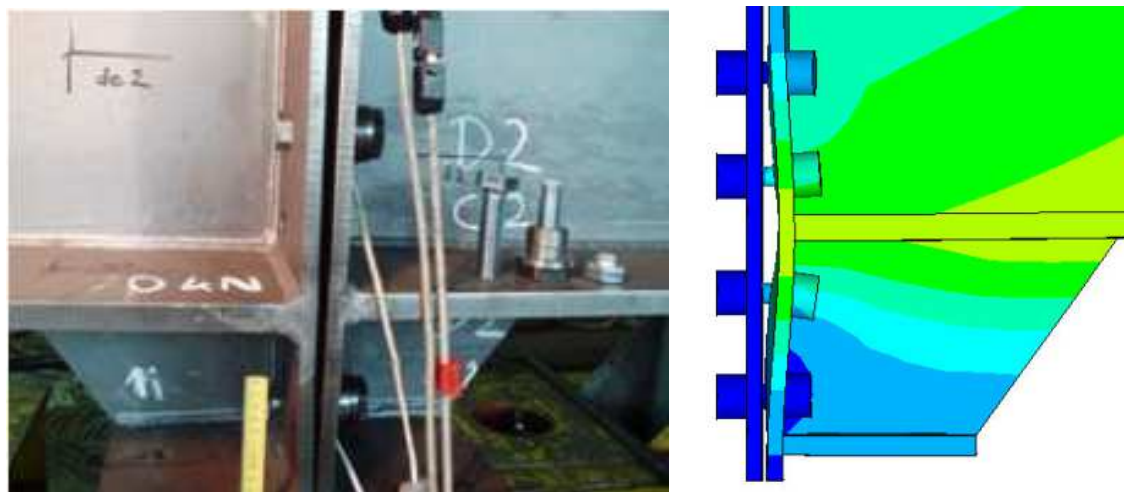
28.ábra: Kísérleti mintadarab geometriája [2]

A vizsgált három hammerhead-es csatlakozás a következő geometriai méretekkel lett kialakítva. A gerenda minden esetben megegyezett, gerince 860 mm magas és 8 mm vastag, övei pedig 360 mm szélesek és 20 mm vastagok voltak. A gerenda és a homloklemez anyagként egyaránt S355 anyagjelölésű szerkezeti acélt alkalmaztak. Az alkalmazott csavarok BSF20 (átmérő: 20mm, anyagminőség: 8.8) jelűek voltak. A csavar pozíciók 28. ábrán láthatók. A vizsgált hammerhead öve 360 mm széles és 15 mm vastag, a csavarok közti hammerhead

gerinc pedig 150 mm magas és 8 mm vastag volt. A hammerhead hossz a külső oldalon 150 mm a belsőgerenda felőli oldalon 250 mm volt. A három próbatestek között az egyedüli különbség a homloklemez vastagsága volt. A kísérlet során 12 mm, 15 mm és 20 mm vastag homloklemezeket alkalmaztak.

### 3.2.2. Modell viselkedése és verifikálása

A numerikus modell verifikációja során összehasonlítom az egyes kapcsolatok kísérleti és numerikus tönkremeneteli módjait, a nyomatóki ellenállását és a csavarsori erőeloszlást két különböző nyomatóki szinten. A 29. ábra bemutatja a kísérleti próbatest és a numerikus modell tönkremeneteli deformációját. A próbatest tönkremenetele és viselkedése megegyezik a modellével. A kapcsolat tönkremenetele mindkét esetben a homloklemez és a húzott csavarok egyidejű folyásával (2. tönkremeneteli móddal) jellemezhető.



a. ábra: Próbatest deformációja [5]

b. ábra: Numerikus modell deformációja

29. ábra: Próbatest és numerikus modell deformációjának összehasonlítása

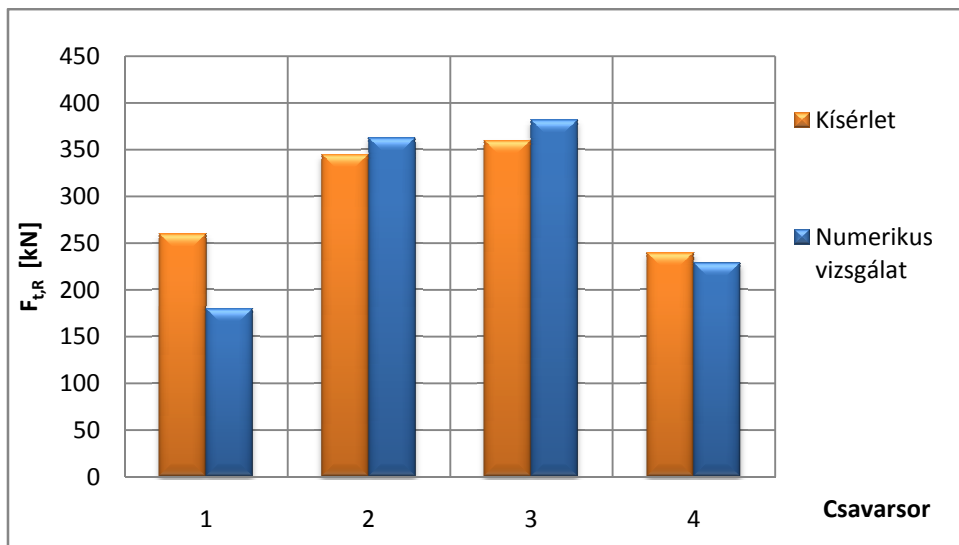
A kísérleti és a numerikus nyomatóki ellenállás értékeket az 1. táblázat mutatja be. A numerikus modell eredményei jó egyezést mutatnak a kísérleti eredményekkel. A két eredmény között 5-9 % eltérés tapasztalható.

Mintadarab	$M_{R,num}$ [kNm]	$M_{R,exp}$ [kNm]	Eltérés [%]
TB2	1438	1509	4,71
TB6	1490	1635	8,80
TB10	1501	1608	6,65

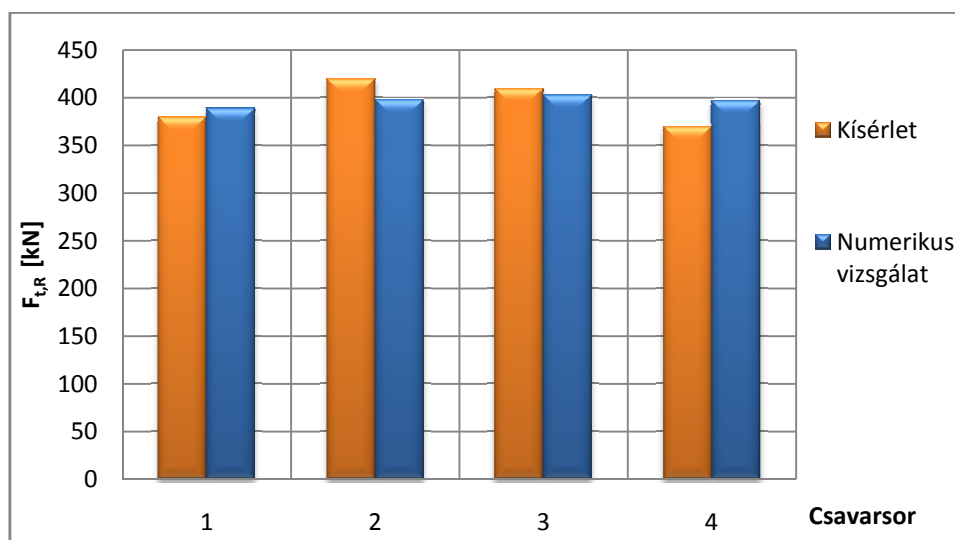
1. táblázat: Nyomatóki ellenállások összehasonlítása

A próbatest és a numerikus modell csavarsoraiban felépülő erők nagyságát rugalmas és képlékeny állapotban is összehasonlítom. A csavarsori erőeloszlást rugalmas állapotban 1000 kNm nyomatóki szinten a 1. diagram mutatja be. A képlékenyállapot csavarsori erőeloszlást 1400 kNm nyomatóki szinten a 2. diagram szemlélteti. A kísérleti és a numerikus eredmények

összevetésével megállapítható, hogy a numerikus modell csavarsori erőeloszlása rugalmas és képlékeny állapotban is jól közelíti a kísérleti eredményeket.



1. diagram: Csavarsori erőeloszlás 1000 kNm nyomaték esetén



2. diagram: Csavarsori erőeloszlás 1400 kNm nyomaték esetén

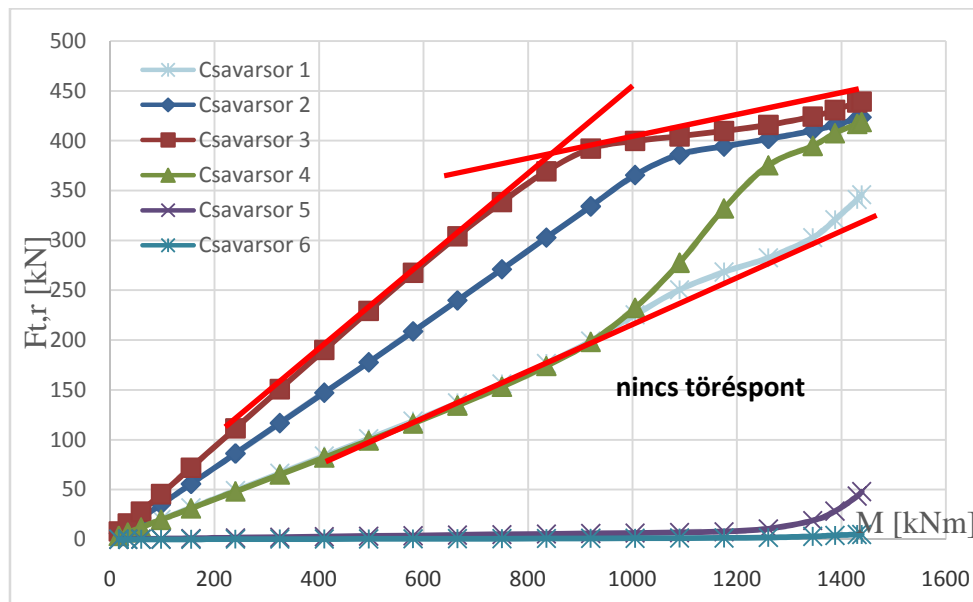
A verifikálás alapjául szolgáló irodalomban három következtetés található a hammerhead-es kapcsolatok nyomaték-csavarsori erő diagramjával kapcsolatban. A megállapítások a következők:

1. Az hammerhead-ben az első csavarsor kisebb merevséggel és ellenállással bír, mint azt a csavarkiosztásban betöltött pozíciója indokolná.
2. A 12 mm vastag homloklemezrel kialakított kapcsolat esetén a tönkremenetelt a homloklemez folyása okozza. Ebben az esetben nem lehet egy egyértelmű töréspontot meghatározni a nyomaték és a csavarsori erő kapcsolata alapján. A csavarok még képesek lennének további erő felvételére.

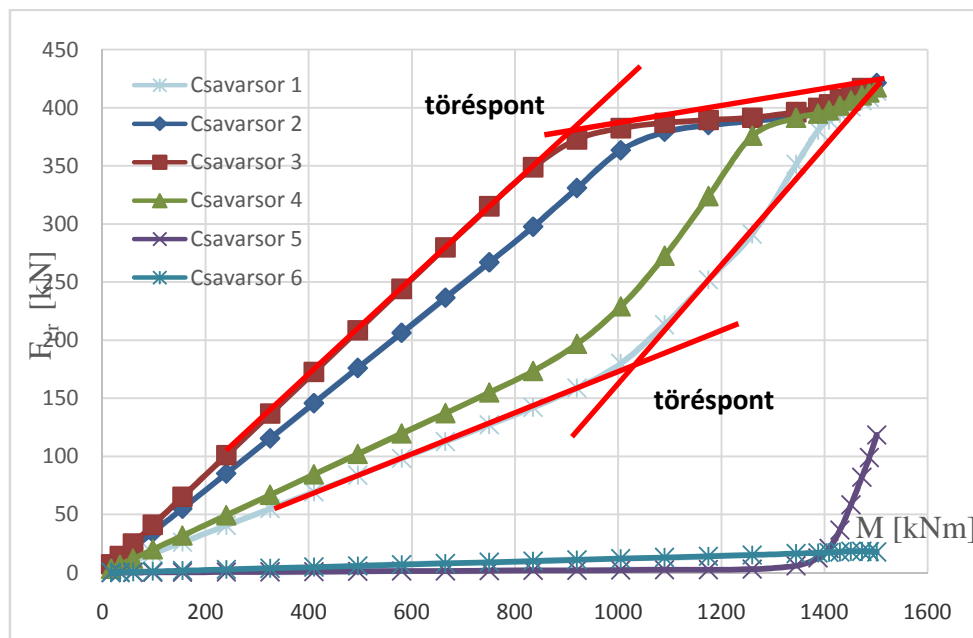


3. A 20 mm vastag homloklemezzel készült próbatest vizsgálatakor tapasztalható, hogy a kapcsolat tönkremenetelét a csavarszakadás okozza. A megnövelt teherszinten a csavarsori erőeloszlás átrendeződése következtében a töréspontok meghatározhatóak.

A fenti következtetések jól láthatók a 3-4. nyomaték és a csavarsori erő kapcsolatát bemutató diagramokon.



3. diagram: Nyomaték-csavarsori erő kapcsolata 12 mm vastag homloklemez esetén



4. diagram: Nyomaték-csavarsori erőkapcsolata 20 mm vastag homloklemez esetén

A további numerikus számítások során a verifikált modellhez képest a kapcsolat geometriájának és a csavarok anyagminőségének változtatására, 10.9 jelű csavarok alkalmazására van szükség.

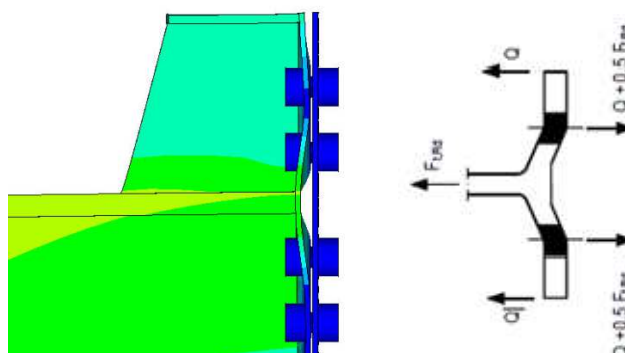
## 4. SZERKEZETI VISELKEDÉS ELEMZÉSE

### 4.1. Tönkrementeli módok

A megfelelő modell viselkedésének reprezentálni kell homloklemez-es kapcsolat tönkrementelére jellemző tönkrementeli módokat. A szakirodalmi áttekintésben bemutatott húzott oldal, azaz a T-elem tönkrementeléhez tartozó három lehetséges tönkrementeli mód bemutatására kerül sor a következő pontokban. Hammerhead-es kapcsolatok esetén a helyettesítő T-elem viselkedés a megszokottól  $90^\circ$ -kal elforgatva jelentkezik.

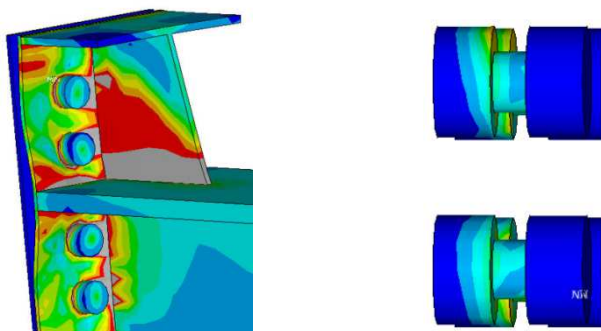
#### 4.1.1. A homloklemez folyási tönkrementele (1. mód)

Az 1. tönkrementeli mód kialakulásához aránylag vékony homloklemez alkalmazása szükséges. Jelen esetben 6mm vastagságú homloklemezzel és M20-as 10.9 anyagminőségű csavarokkal vizsgálom a kapcsolatot. A 30. ábra szemlélteti a modell deformációját és a helyettesítő T-elem várható alakváltozását 1. módú tönkrementel esetén. A két ábrát összehasonlítva jól látható, hogy a modell homloklemezének a deformációja megfelel a T-elem viselkedésének. A csavarok nem szenvedtek jelentős alakváltozást, míg a homloklemez nagymértékű deformációja következett be.



30. ábra: T-elem 1. módú tönkrementel

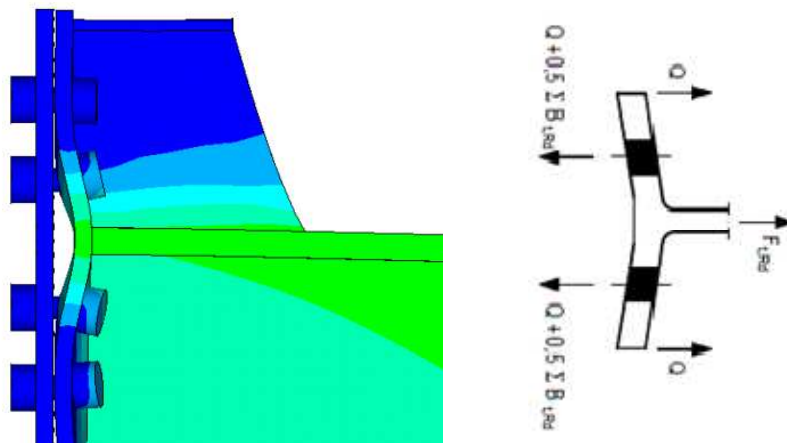
A 31. ábrán a felső két csavarsor és a homloklemez feszültség eloszlása látható. A homloklemez a csavarok környezetében a gerenda, illetve a hammerhead gerinc irányába megfolyik. A csavarokban keletkező feszültségek nem érik el a folyáshatárt. A numerikus modell jól tükrözi az első tönkrementeli módhoz tartozó viselkedést.



31. ábra: A homloklemez és a csavar folyás vonalai

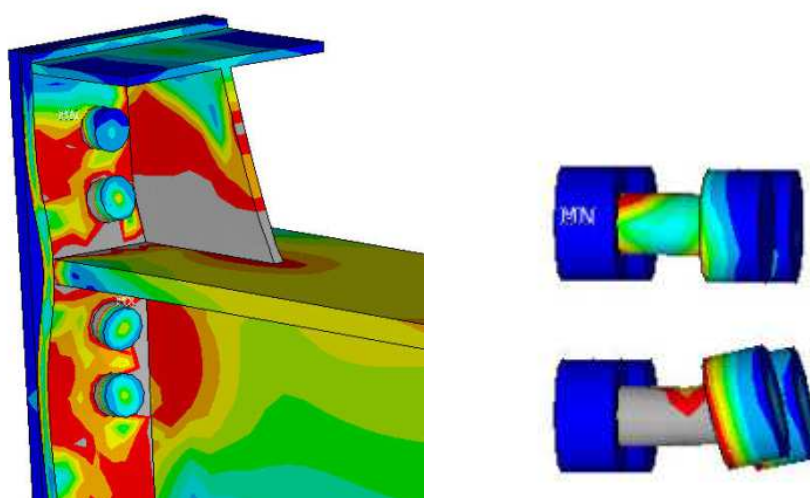
#### 4.1.2. A homloklemez és a csavarok együttes tönkremenetele (2. mód)

A homloklemez és a csavarok együttes tönkremenetelének reprezentálásához 12 mm vastag homloklemez és 10.9 anyagminőségű M20 csavarokat alkalmazok. Az alábbi ábrák alapján összehasonlítható a 2. tönkremeneteli mód esetén a modell és a helyettesítő T-elem deformációja. Megállapítható, hogy a modell és az elméleti viselkedés megegyezik. A csavarok és a homloklemez egyaránt jelentősen deformálódnak.



32. ábra: T-elem 2. módú tönkremenetel

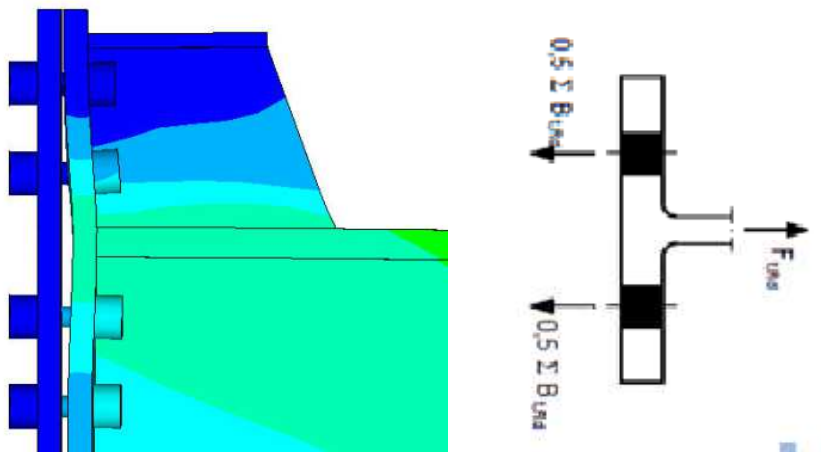
A homloklemez feszültség eloszlását bemutató 33. ábrán jól látható, hogy a homloklemez a harmadik és a negyedik sor környezetében megfolyik. A 33. ábrán a felső két csavarsor feszültség eloszlása is látható. Az első csavarsorban a hammerhead hatása miatt, nem alakul ki folyáshatárt elérő feszültség, viszont a második sorban a csavar megfolyik. A modell feszültség eloszlása megfelel a 2 tönkremeneteli mód esetén várható viselkedésnek. A csavarok és a homloklemez egyszerre megy tönkre.



33. ábra: A homloklemez és a csavar folyás vonalai

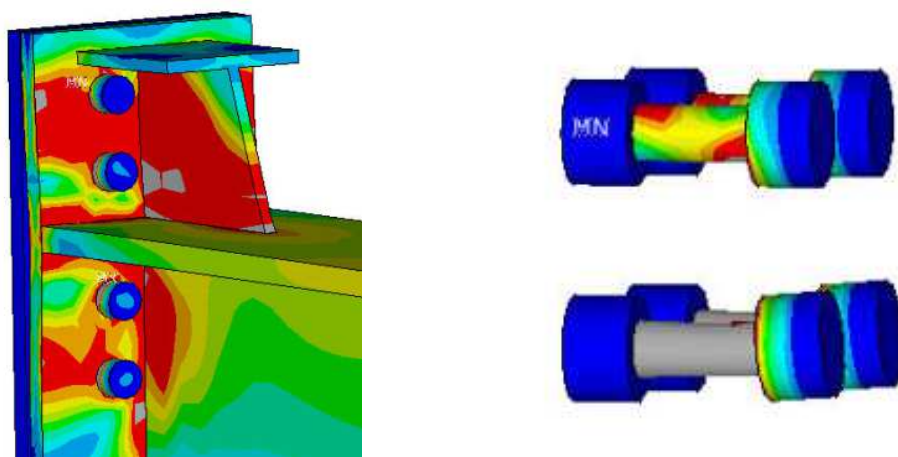
### 4.1.3. Csavar szakadása (3. mód)

Az utolsó tönkremeneteli mód bemutatásához 20 mm vastagságú homloklemezzel és az előző kapcsolatokhoz hasonlóan 10.9 anyagminőségű M20-as csavarokkal vizsgálom a kapcsolat viselkedését. Várhatóan a kapcsolat tönkremenetele során a homloklemez kis mértékben deformálódik és a csavarok jelentős alakváltozást szenvednek. Az első csavarsorban jelentősen kisebb erő alakul ki, mint a belső csavarsoros nyomatékú homloklemez kapcsolatoknál megszokott, ezért a csavarok deformációja kisebb lesz az első sorban és ez okozza a homloklemez kismértékű alakváltozását. Az előző megállapítás figyelembevételével az 34. ábra alapján látható, hogy a modell a várható viselkedést megfelelően reprezentálja.



34.ábra: T-elem 2. módú tönkremenetel

A folyásvonalakat bemutató ábrán jól látható, hogy a homloklemez nem folyik meg a csavarok környezetében, viszont a második csavarsorban fellépő feszületség eléri a csavar folyáshatárának értékét. Továbbá a csavarok feszültségeloszlása alapján jól látható, hogy a hammerhead hatása miatt az első csavarsorban ebben az esetben is jóval kisebb erő ébred, mint a második sor csavarjaiban.



35. ábra: A homloklemez és a csavar folyás vonalai

## 4.2. Hammerhead hatásának vizsgálata

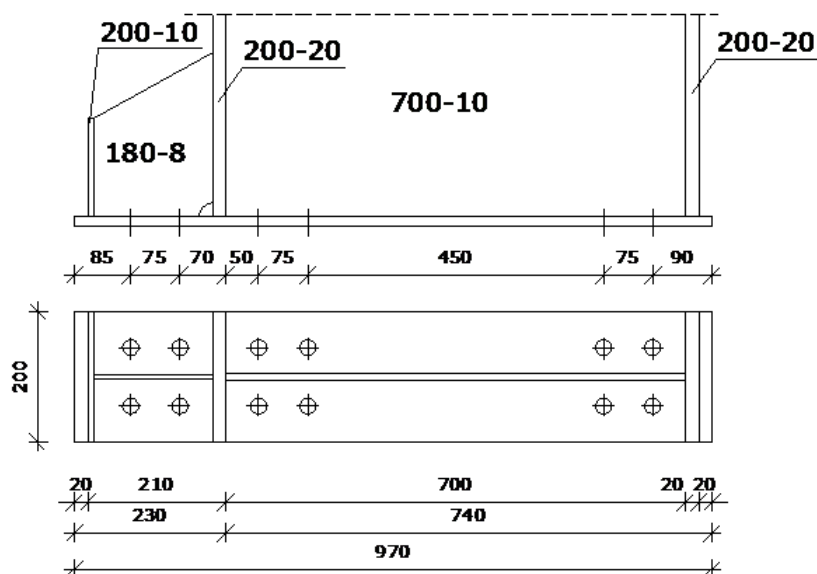
### 4.2.1. Vizsgálat geometriai kialakítások

A numerikus vizsgálat során a hammerhead-es kapcsolathoz tartozó gerendát és homloklemez olyan geometriai paraméterekkel vizsgálom, amelyeket a gyakorlatban is alkalmaznak. Alapvetően két különböző kapcsolati kialakítás kerül részletes elemzésre. A kapcsolatok geometriai adatait a 2. táblázat tartalmazza.

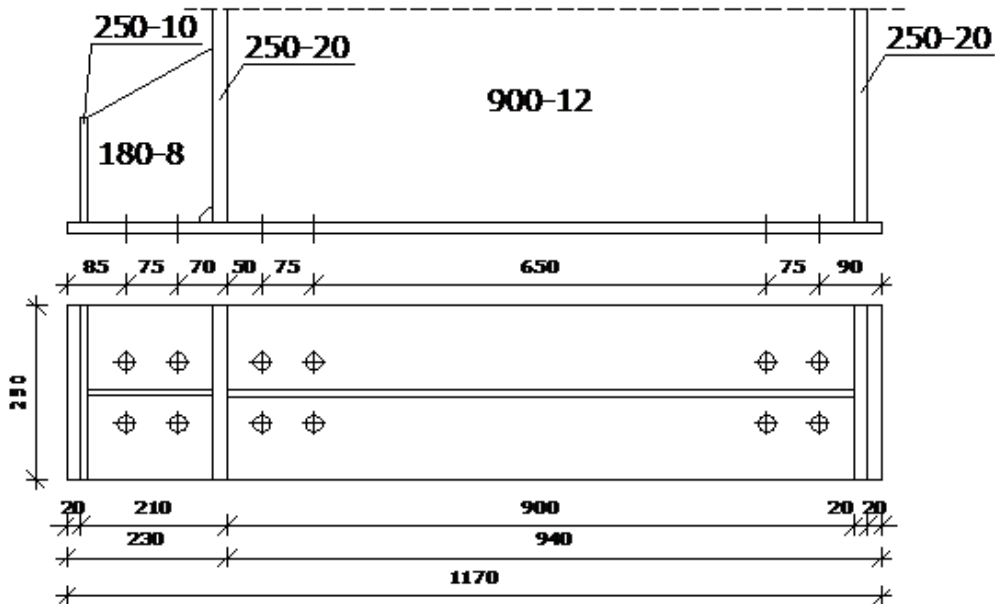
Kapcsolati jellemzők	1. kapcsolat típus	2. kapcsolat típus	
		2.1.	2.2.
<i>gerinc</i>	700-10	900-12	
<i>öv</i>	200-20	250-20	
<i>homloklemez</i>	200-16 magasság: 970 mm	250-16 magasság: 1170 mm	
<i>anyagminőség</i>	S355	S355	
<i>csavar</i>	BSK24	BSK20	BSK24
<i>csavar anyagminőség</i>	10.9	10.9	
<i>hammerhead gerinc</i>	180-8	180-8	
<i>hammerhead öv</i>	200-10	250-10	

2.táblázat: Vizsgált kapcsolatok méretei

A kapcsolatokat a gyakorlatban alkalmazott hammerhead méretek és csavarpozíciókkal vizsgálom. A általános hammerhead méret: öv vastagsága 10 mm, szélessége a gerenda övének szélességével megegyező, gerinc vastagsága: 8 mm, magassága 180 mm, hossza a gerenda felöli oldalon 200 mm a hammerhead öv felöli oldalán pedig 150mm. A kapcsolatok kialakítást az 36-37. ábra szemlélteti.



36.ábra: 1. kapcsolat típus



37.ábra: 2.1. és 2.2.kapcsolat típus

A vizsgálat első lépése egy referencia kapcsolat modellezése. A referencia kapcsolat egy hammerhead nélküli kialakítás, melyben a csavarok helyzete megegyezik a hammerheades kapcsolatokban alkalmazottal, viszont csak belső csavarsort tartalmaz. Az ilyen típusú kapcsolatok teherbírásának meghatározására mutat eljárást az EN1993-1-8 [1] szabvány. A referencia kapcsolat vizsgálta azért szükséges, hogy a hammerhead-es kapcsolat elemzése során kapott eredményeket össze lehessen hasonlítani egy olyan azonos geometriájú kapcsolat eredményeivel, amely méretezésére az EN1993-1-8 szabvány által meghatározott eljárás érvényes.

Következő lépésként a hammerhead geometriai paramétereinek a csavarsori erőeloszlásra gyakorolt hatását vizsgálom. A hammerhead vizsgált paraméterei a következők:

- a hammerhead övének vastagsága (10/12/16/20 mm)
- a hammerhead szélessége (150/200/250mm)
- a hammerhead gerincének vastagsága (8/10/12/16/20/25/30 mm)
- a hammerhead hossza (200/300/400/600/800mm/gerenda hosszával megegyező)

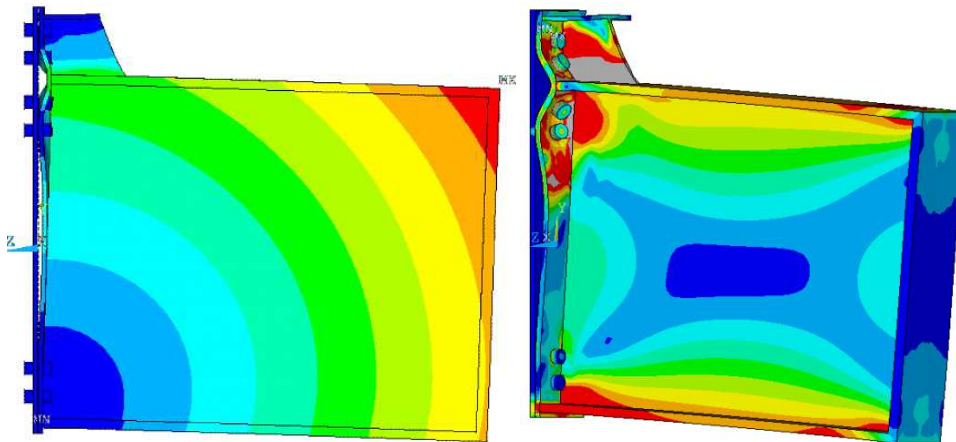
A hammerhead geometriájának analízise alapján a további vizsgálatok során csak azon paraméterek részletes elemzésére kerül sor, amelyek befolyásolják a csavarerő eloszlást a hammerhead-es kapcsolatokban.

A szerkezeti viselkedést, a csavarsori erőeloszlást, a nyomatéki ellenállás összehasonlítását és az eredmények elemzését minden vizsgált kapcsolat esetén elvégeztem, de a TDK munkában nem minden eredmény kerül bemutatásra. A következő pontokban akiértékelt adatok alapján tett megállapítások az összes vizsgált kapcsolati kialakításra igazak.

#### 4.2.2. A referencia és hammerhead-es kapcsolat összehasonlítása

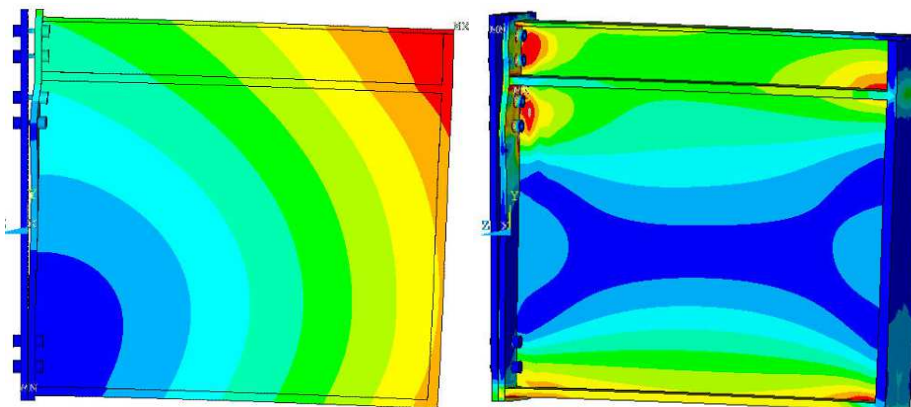
##### Szerkezeti viselkedés összehasonlítása

Az alábbi ábrákon a hammerhead-es kapcsolat tipikus tönkremeneteli módja látható. Az eredmények azt mutatják, hogy a hammerhead-es kapcsolatnál a legnagyobb alakváltozás a második és a harmadik csavarsor között következik be, ahol a gerenda öve a homloklemezhez kapcsolódik. A gerenda merevsége nagyobb, mint a hammerhead merevsége, ezért a húzott zóna csavarjai közül az első csavarsorban lesz a legkisebb az erő, hiszen az alakváltozás is itt a legkisebb. A hammerhead-ben keletkező feszültség eloszlásból látható, hogy a hammerhead gerince egész hossza mentén megfolyik. A megfolyt hammerhead már nem képes több erő átadására, ezért a csavarsorokban fellépő erő értéke nem tud tovább nőni.



38.ábra: Hammerhead-es kapcsolat viselkedése

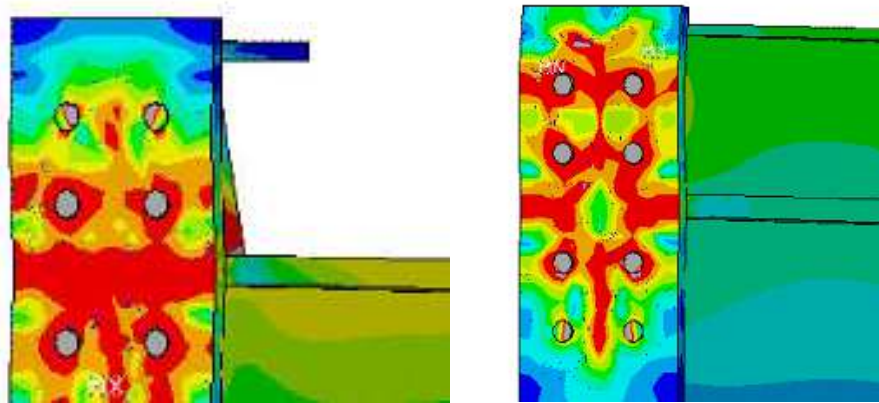
A referencia kapcsolat viselkedése megfelel a tipikus nyomatékbíró homloklemez-es kapcsolatok viselkedésének. A kapcsolat tönkremenetelét 2. tönkremeneteli mód okozza, a homloklemez megfolyik és a csavarok elszakadnak. A homloklemez deformációja jelentősen kisebb, mint hammerhead-es kapcsolat esetén. A referencia kapcsolat abban tér el egy általános homloklemez-es kapcsolattól, hogy egy merevítést tartalmaz, ami a hammerhead-es kapcsolat gerenda övének felel meg. Alkalmazása azért, szükséges, hogy a numerikus vizsgálat során kapott eredmények összehasonlíthatóak legyen.



39.ábra: Referencia kapcsolat viselkedése

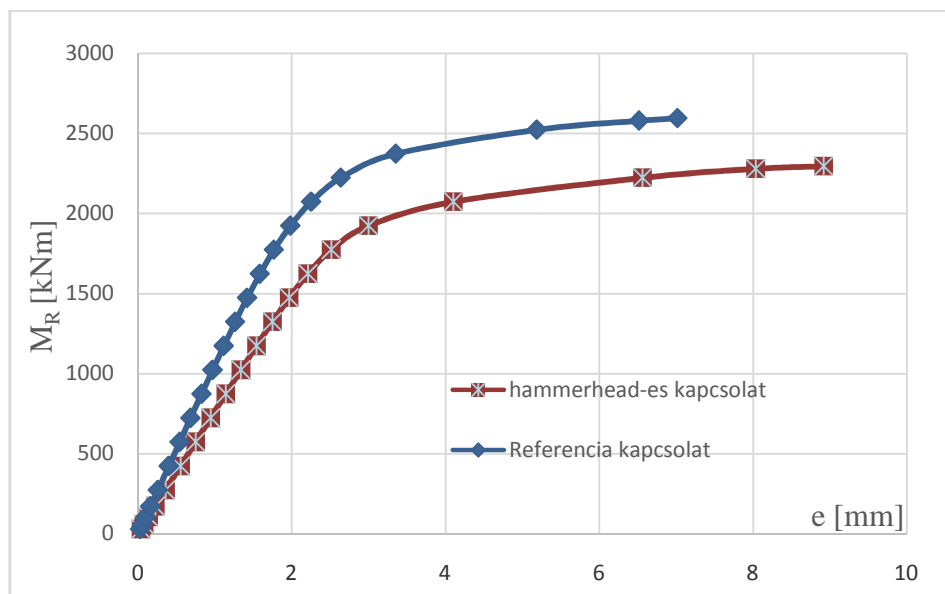
A két kapcsolati kialakítás feszültség eloszlását összehasonlítva látható, hogy a két esetben különbözőfeszültség eloszlás alakul ki a gerincben. A referencia kapcsolatnál az első és a második csavarsornál alakul ki a legnagyobb feszültség a gerincben, de nem folyik meg a gerinc. A hammerhead-es kapcsolatnál szintén az első és a második csavarsor mögött alakulnak ki a legnagyobb feszültség értékek, amelyek meghaladják a folyáshatárt.

A 40. ábra a két kapcsolati kialakítás homlokmezét hasonlítja össze. Látható, hogy a feszültség eloszlások a két esetben teljesen mások. A referencia kapcsolat ábrája jól szemlélteti az első és a második csavarsorban a csoportos csavar tönkremenetelt, míg a hammerhead-es kapcsolat esetén a tipikustól eltérő tönkremeneteli mód tapasztalható, mert  $90^\circ$ -kal elforgatott T-elem tönkremenetel következik be.



40.ábra: Homlokmez feszültség eloszlása

A nyomaték-elmozdulás görbék összehasonlítása az 5. diagramon látható. A piros színű görbe hammerhead-es, kék színű görbe pedig a referencia kapcsolathoz tartozik. Megállapítható, hogy a referencia kapcsolat merevsége és teherbírása jelentősen nagyobb, mint a hammerhead-es kapcsolaté.



5.diagram: Nyomaték-elmozdulás diagram (2.2. kapcsolat típus)



Az alábbi táblázat eredményei ismertetik, hogy a referencia és a hammerhead-es kapcsolat nyomatéki teherbírása között mekkora eltérés tapasztalható. A nyomatéki ellenállás értékek a két kialakítása esetén 15-17%-kal térnek.

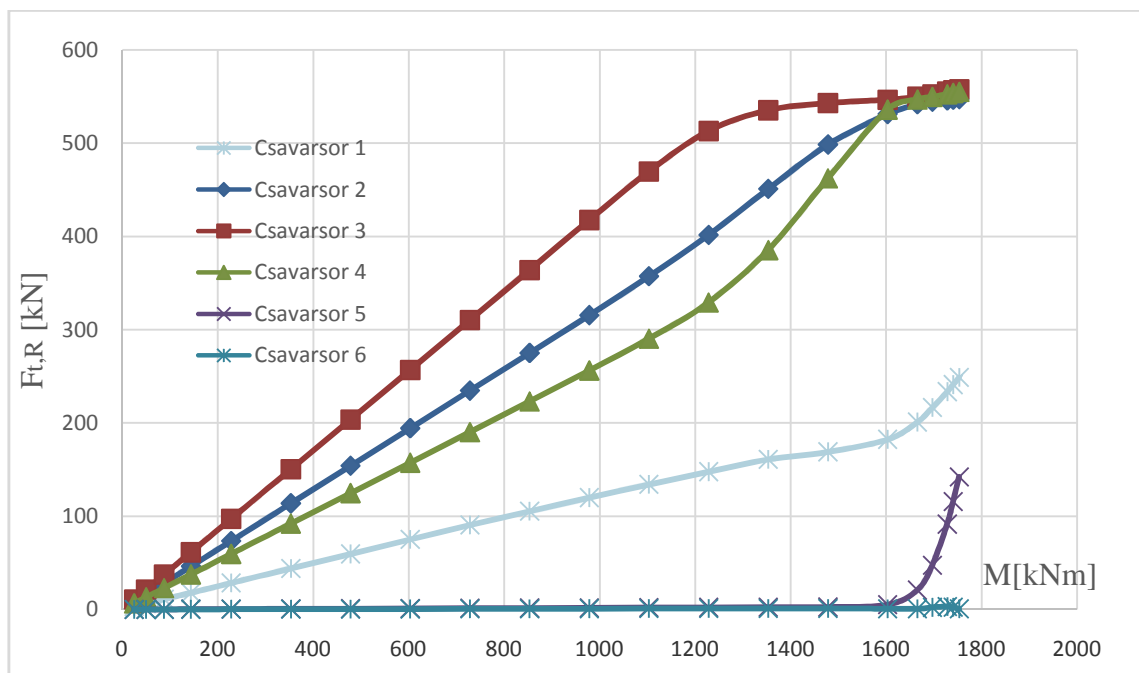
Nyomatéki ellenállás	1. kapcsolati típus	2.1. kapcsolati típus	2.2. kapcsolati típus
$M_R$ [kNm]	1587	1253	2158
$M_{R,ref}$ [kNm]	1857	1517	2566
Eltérés [%]	-14,5	-17,4	-15,9

3.táblázat: Nyomatéki ellenállások összehasonlítása

### Csavarsori erőeloszlás összehasonlítása

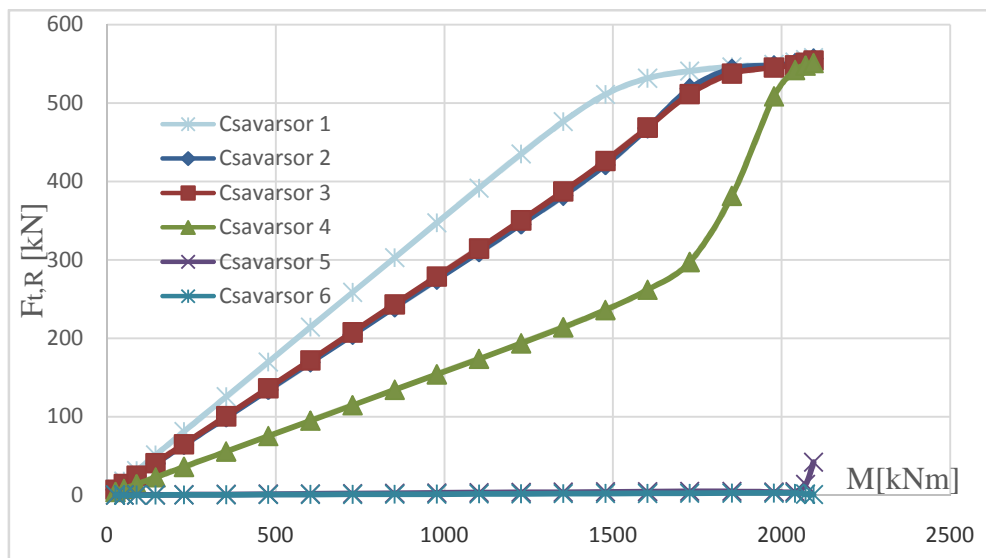
A következő diagramok ábrázolják egy kiemelt referencia kapcsolat és egy a jelenlegi gyakorlatban alkalmazott geometriai méretekkel kialakított hammerhead-es kapcsolat nyomadék-csavarsori erő diagramjait. A diagramok alapján tett megállapítások érvényesek a többi vizsgált kapcsolat nyomadék-csavarsori erő diagramjaira is. A vízszintes tengelyen az aktuális nyomaték szint látható, a függőleges tengelyen pedig az egyes csavarsorok adott nyomatéki szinthez tartozó csavarsori erői.

A 6.diagram alapján jól látható, hogy a hammerhead-et tartalmazó kapcsolati kialakításnál a második és a harmadik csavarsor merevsége és csavarereje a legnagyobb. Az első csavarsorban ébredő erő jelentősen kisebb a második és a harmadik csavarsorban átadódó erőnél.



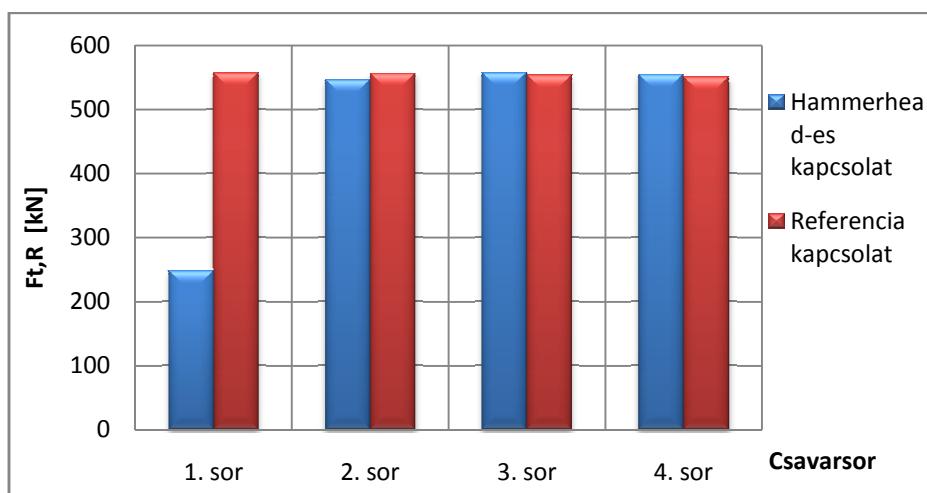
6.diagram: Nyomaték-csavarsori erő diagram hammerhead-es kapcsolat esetén (2.1. kapcsolati típus)

A referencia kapcsolatesetében az első csavarsor a legmerevebb és ebben a sorban a legnagyobb a csavarsori erő értéke. A következő csavarsorokban pozíciójuknak megfelelően kisebbek a kialakuló erők. A 7. diagram tükrözi egy tipikus belső csavarsoros nyomaték bíró homloklemezkes kapcsolat viselkedését. A referencia kapcsolat nyomatéki ellenállása is jelentősen nagyobb.



7. diagram: Nyomaték-csavarsori erő diagram referenciacapcsolat esetén (2.1. kapcsolat típus)

A referencia és a hammerhead-es kapcsolat csavarsoraiban ébredő erőket összehasonlítva látható, hogy jelentős különbség az első csavarsorban tapasztalható. A húzott oldal másik három csavarsorában közel azonos erő épül fel mind a két esetben.



8. diagram: Csavarsori erőeloszlás összehasonlítása (2.1. kapcsolat típus)

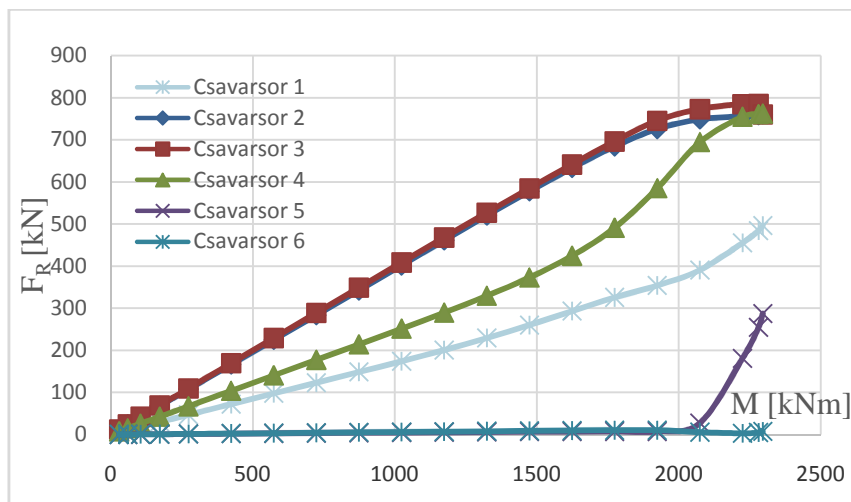
Az EN 1993-1-8 [1] szabványon alapuló eljárást hammerhead-es kapcsolatra alkalmazva az első csavarsorban nagyobb csavarerőt veszünk figyelembe, mint a csavarsorban kialakuló tényleges csavarerő. A nagyobb csavarerő feltételezése nagyobb nyomatéki ellenállást eredményez, ami pedig a kapcsolatok méretezése során figyelembe vett biztonságot jelentősen csökkenti. Ez a megállapítás indokolja a hammerhead geometriai paramétereinek növelését,

hogy a csavarsori erőeloszlás megegyezzen a belső csavarsoros nyomatékbíró homloklemez kapcsolatokéval és így az EN1993-1-8 szabvány eljárása alkalmazható legyen hammerhead-es kapcsolatok esetén is. A másik lehetőség a méretezés során a figyelembe vehető első csavarsori erő csökkentésének bevezetése, hogy a szükséges a kapcsolat nyomatéki teherbírásának meghatározása során a biztonsági szint ne csökkenjen.

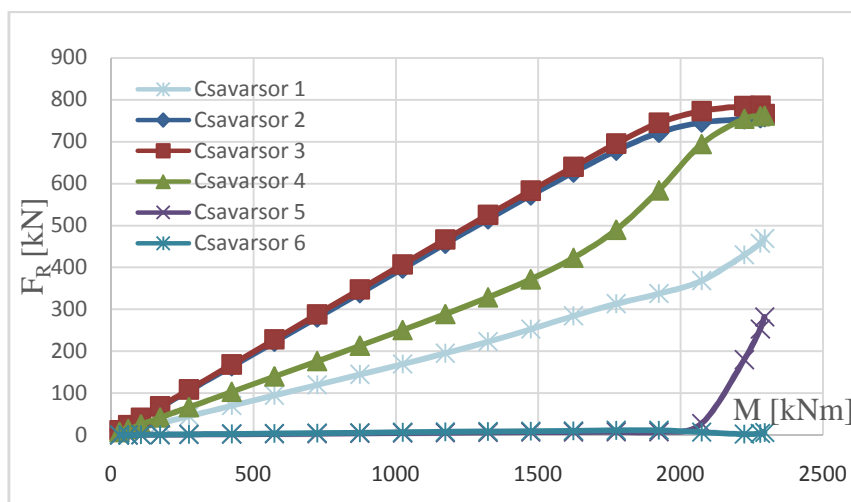
#### 4.2.3. Hammerhead geometriai paramétereinek hatása a szerkezeti viselkedésre

##### Hammerhead öv vastagságának és szélességének hatása

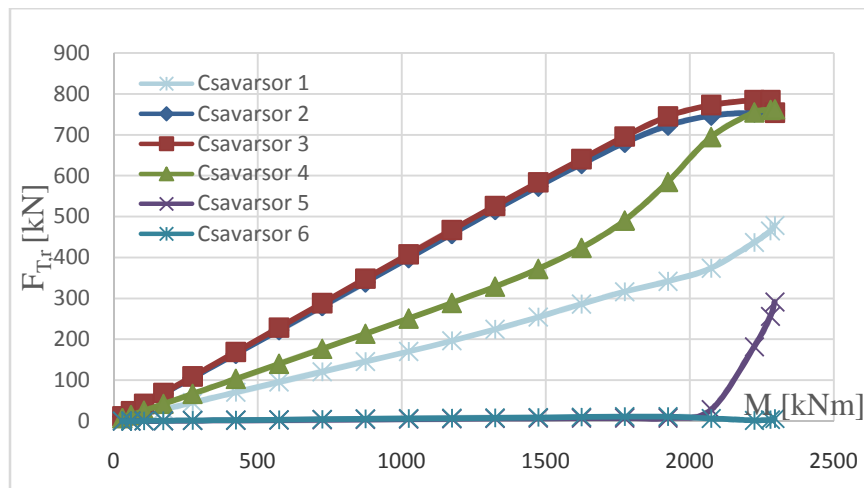
A paraméteres numerikus vizsgálat első lépéseként a hammerhead öv vastagságának hatását vizsgálom. A 2.2. típusú kapcsolati kialakítás esetén négy különböző (10mm,12mm,16mm és 20mm) vastagságú hammerhead övvel és két különböző (150mm és 250mm) szélességgel végeztem futtatásokat. A numerikus számítás eredményeül kapott csavarsori erőeloszlásokat 9-11. diagramok szemléltetik. Megállapítható, hogy a csavarsori erőeloszlásra a hammerhead öv vastagsága és szélessége nincs hatással.



9.diagram:: Nyomaték-csavarsori erő kapcsolat,150-10 hammerherd övlemez (2.2. kapcsolat típus)

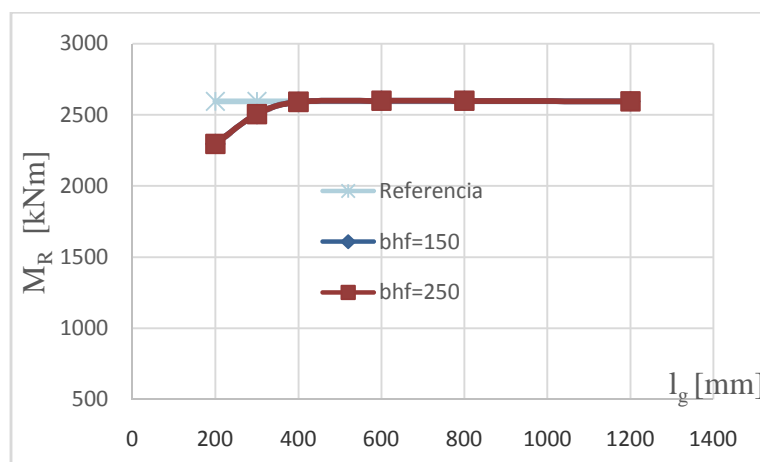


10.diagram:: Nyomaték-csavarsori erő kapcsolat250-10 hammerherd övlemez e (2.2. kapcsolat típus)

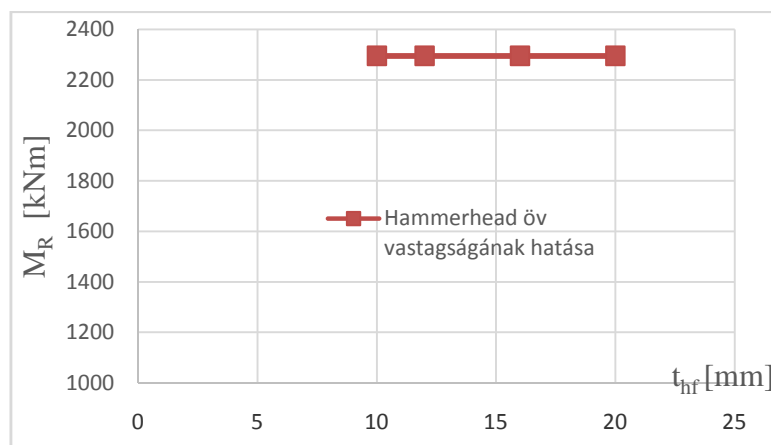


11.diagram:: Nyomaték-csavarsori erő kapcsolat , 250-20 hammerhead övlemez (2.2. kapcsolat típus)

A nagyobb öv vastagság és szélesség sem eredményez az első csavarsorban jelentős csavarsori erő növekedést, ezért a kapcsolat nyomatéki ellenállása sem nőtt. A hammerhead övszélessége és a nyomatéki ellenállás közötti kapcsolatot a 12. diagram, a hammerhead öv vastagság és a nyomatéki ellenállás közötti kapcsolatot pedig 13. diagram szemlélteti.



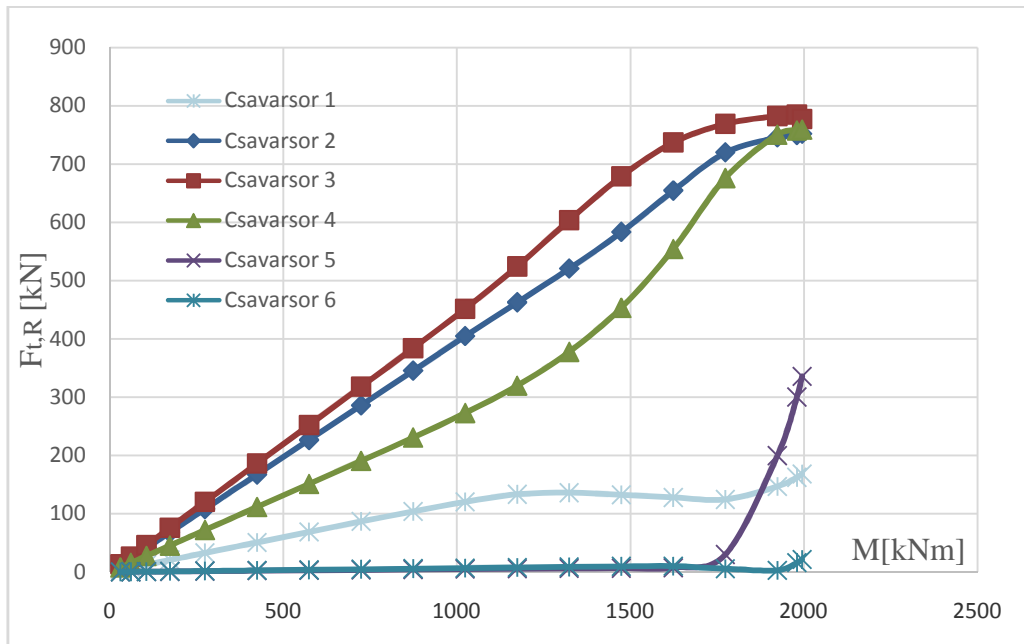
12.diagram: Nyomatéki ellenállás- hammerhead öv szélesség kapcsolata (2.2. kapcsolat típus)



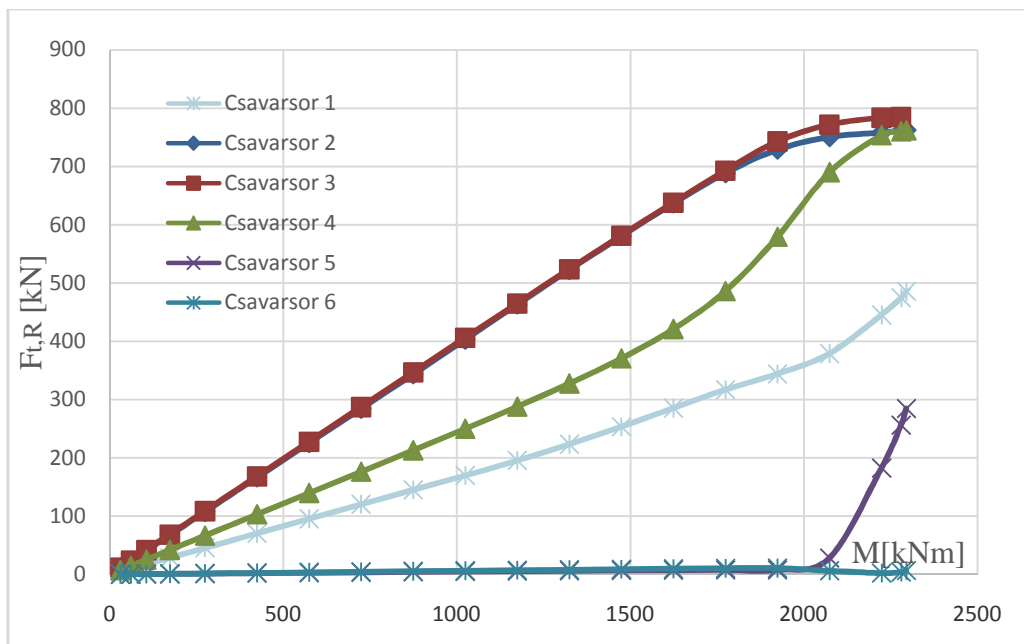
13. diagram: Nyomatéki ellenállás- hammerhead öv vastagság kapcsolata (2.2. kapcsolat típus)

### Hammerhead gerinc vastagságának hatása

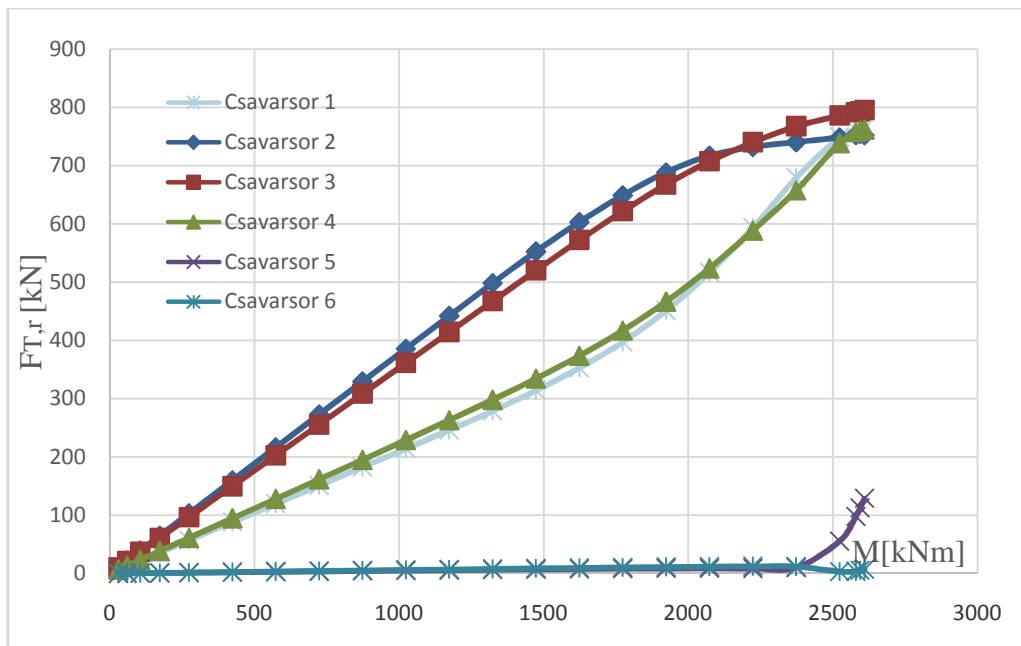
Következő lépésként a hammerhead gerinc vastagságának a csavarsori erőeloszlásra és nyomatéki ellenállásra gyakorolt hatását elemzem. Hét különböző (8mm, 10mm, 12mm, 16mm, 20mm, 25mm, 30mm) vastagsággal végeztem el a numerikus számításokat. A 14-16. diagramok a 8mm, 16mm és a 30mm vastag gerinclemez vastagsághoz tartozó csavarsori erőeloszlást szemléltetik.



14. diagram: Nyomaték-csavarsori erő kapcsolat, 8mm vastag hammerhead gerinc (2.2. kapcsolat típus)

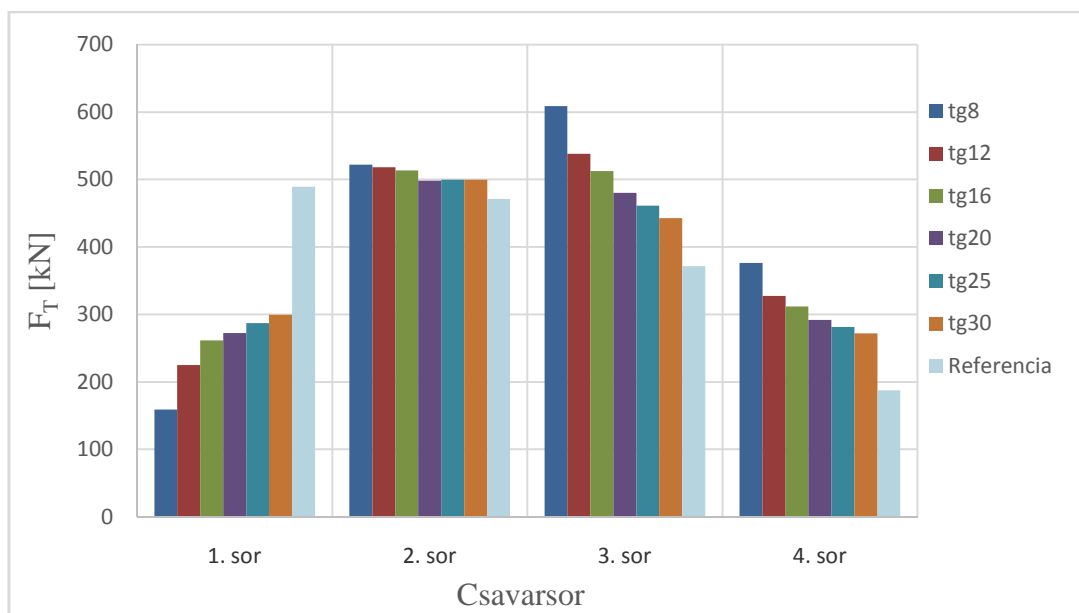


15. diagram: Nyomaték-csavarsori erő kapcsolat, 16mm vastag hammerhead gerinc (2.2. kapcsolat típus)



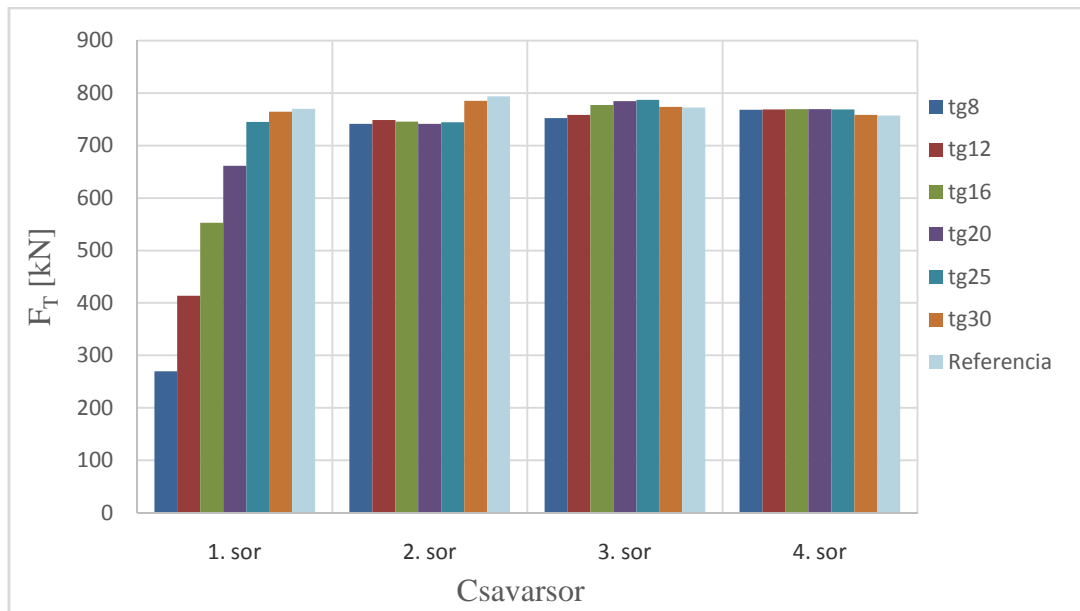
16. diagram: Nyomaték-csavarsori erő kapcsolat, 30mm vastag hammerhead gerinc (2.2. kapcsolat típus)

A hammerhead övvastagságának növelésével az első csavarsorban ébredő erő folyamatosan nő. A növekvő első csavarsori erő hatására a nyomatéki ellenállás is nő. Elegendően nagy vastagságú hammerhead gerinc lemez esetén a referencia kapcsolat nyomatéki ellenállást is el lehet érni. Az eredmények azt mutatják, hogy a csavarsori erőeloszlás teljesen más a kapcsolat rugalmas és képlékeny állapotában. Rugalmas állapotban a gerincvastagság növelésével sem lehet elérni az első csavarsorban a referencia kapcsolat esetén kialakuló csavarsori erő értéket. Hammerhead-es kapcsolatoknál a húzott oldalon a második és a harmadik csavarsor vesz részt aktívabban a teher átadásban, ezért ezekben a sorokban ébred a legnagyobb csavarerő, amíg a csavarok el nem érik folyáshatárukat.



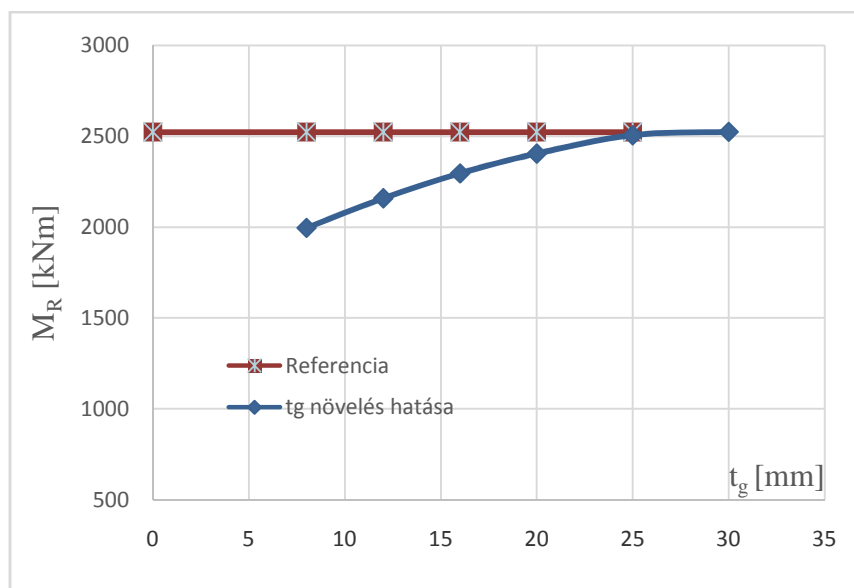
17. diagram: Csavarsori erőeloszlás rugalmas viselkedés esetén (2.2. kapcsolat típus)

A szerkezeti viselkedés a kapcsolat képlékenyedésével megváltozik és a gerinc vastagság növelésével elérhető hammerhead-es kapcsolatok esetén a referencia kapcsolatéval közel azonos csavarsori erőeloszlás. Az első csavarsorban ébredő erő növekedése közel lineáris tendenciát mutat a gerinc vastagság függvényében.

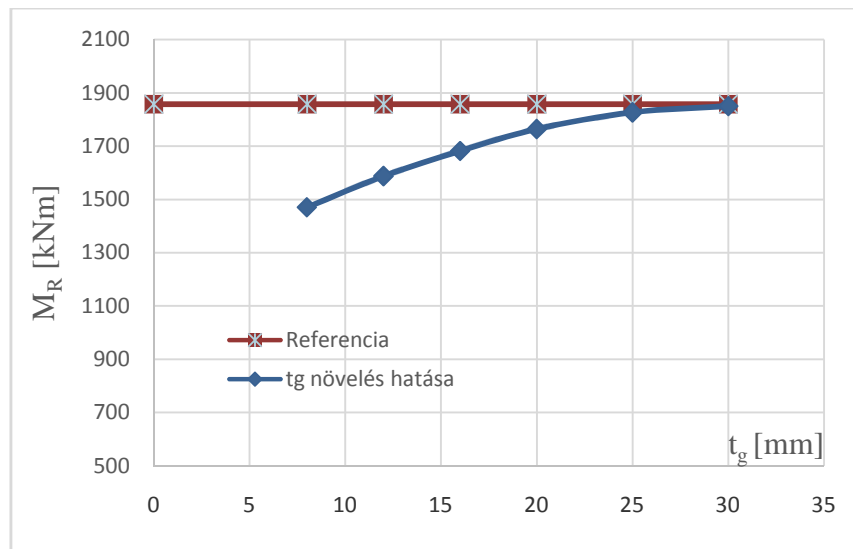


18.diagram: Csavarsori erőeloszlás képlékeny viselkedés esetén (2.2. kapcsolat típus)

Az alábbi diagramok alapján is látható, hogy a hammerhead gerinc vastagságának növelésével a nyomatéki ellenállás kvázi-lineárisan nő. A szükséges gerinc vastagság a kapcsolat kialakításától, a csavarok és a homloklemez ellenállásától függ. A 1. és a 2.2. kapcsolati típus esetben 30mm vastag gerinc alkalmazása lenne szükséges, hogy a referencia nyomatéki ellenállást elérje a hammerhead-es kapcsolat ellenállása.

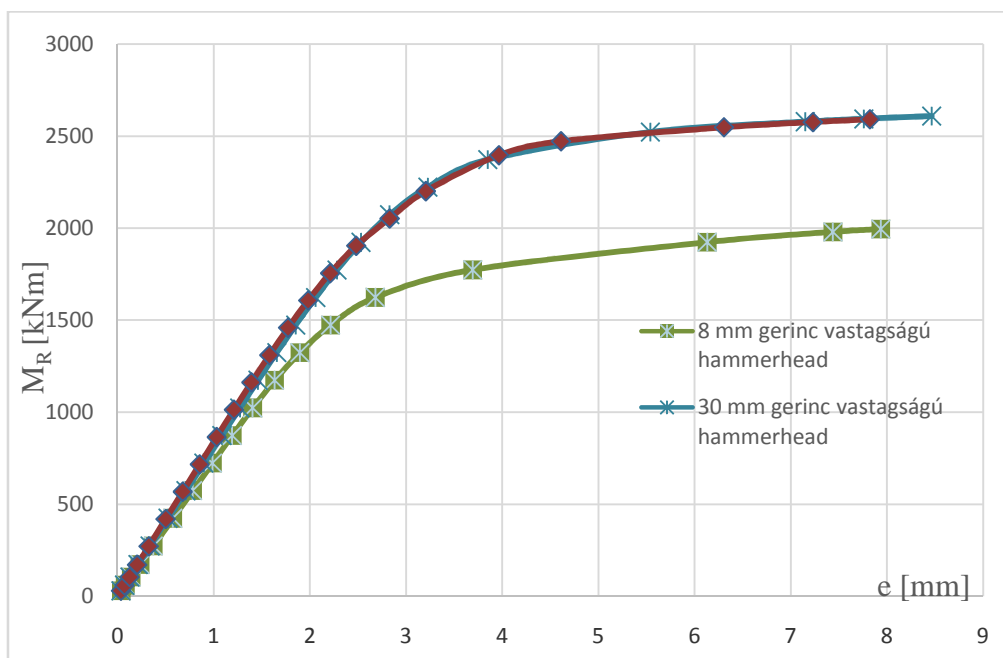


19.diagram: Nyomatéki ellenállás- hammerhead gerinc vastagság kapcsolata (2.2. kapcsolat típus)



**20. diagram: Nyomatéki ellenállás- hammerhead gerinc vastagság kapcsolata (1. kapcsolat típus)**

A kapcsolatok nyomaték-elmozdulás görbét összehasonlítva látható, hogy a gerinc vastagság növelésével a kapcsolat merevsége eléri a referencia kapcsolat merevségét (21. diagram). A megnövelt gerincű hammerhead-es kapcsolat viselkedése ebből a szempontból is megegyezik a referencia kapcsolatával.



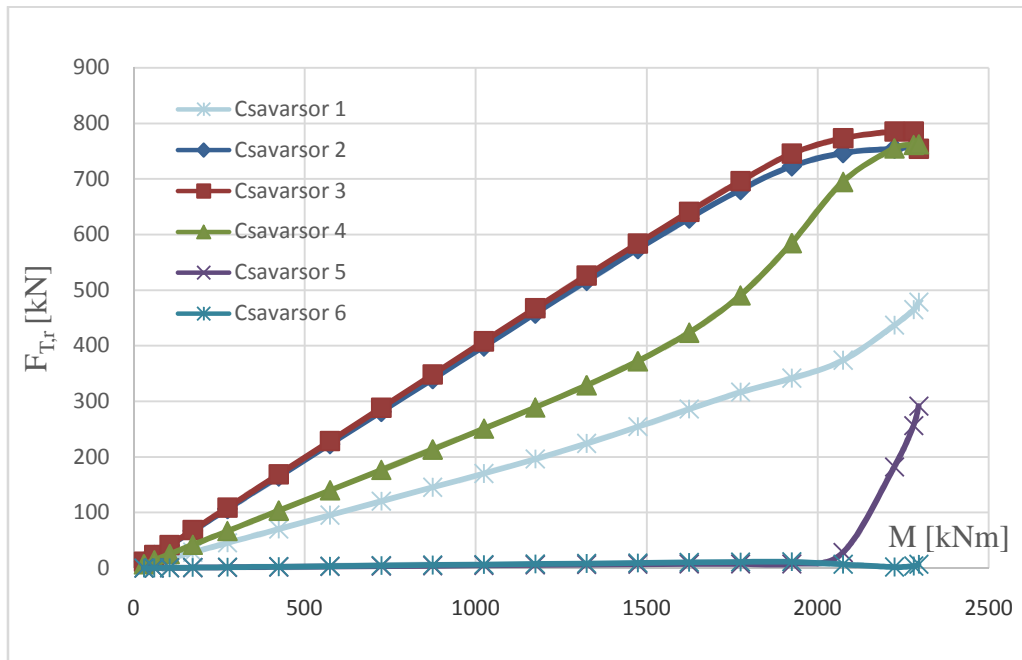
**21. diagram: Nyomaték-elmozdulás görbék összehasonlítása (2.2. kapcsolat típus)**

A numerikus vizsgálat eredményei alapján megállapítható, hogy vastagabb hammerhead gerinc alkalmazásával megközelíthető a referencia kapcsolat ellenállása és viselkedése képlékeny állapotban, azaz a hammerhead-es kapcsolat méretezhető az EN1993-1-8 [1] szabvány alapján. A szabvány szerint a nyomatékbíró homloklemez-es kapcsolatok méretezése képlékeny alapon történik, ezért a hammerhead gerinc vastagságának növelése megoldást jelenthet, hogy a hammerhead-es kapcsolat egyenértékű legyen a referencia kapcsolattal.

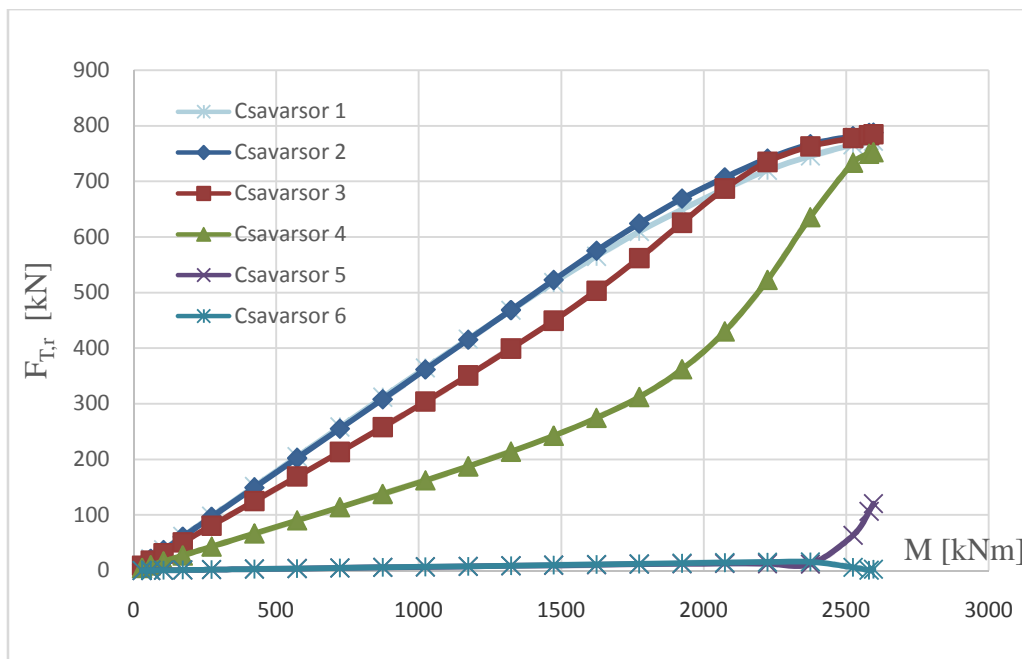


### Hammerhead hosszának hatása

A hammerhead utolsó vizsgált geometriai paramétere a hossza. Hat különböző (200 mm, 300 mm, 400 mm, 600 mm, 800 mm és 1200 mm) hosszú hammerhead analízisét végeztem el. A csavarsori erőeloszlásra gyakorolt hatása közel hasonló, mint a gerinc vastagság növelésének. A hammerhead hosszának növelésével az első csavarsorban fellépő erő eléri a második és harmadik csavarsori erő értékét.

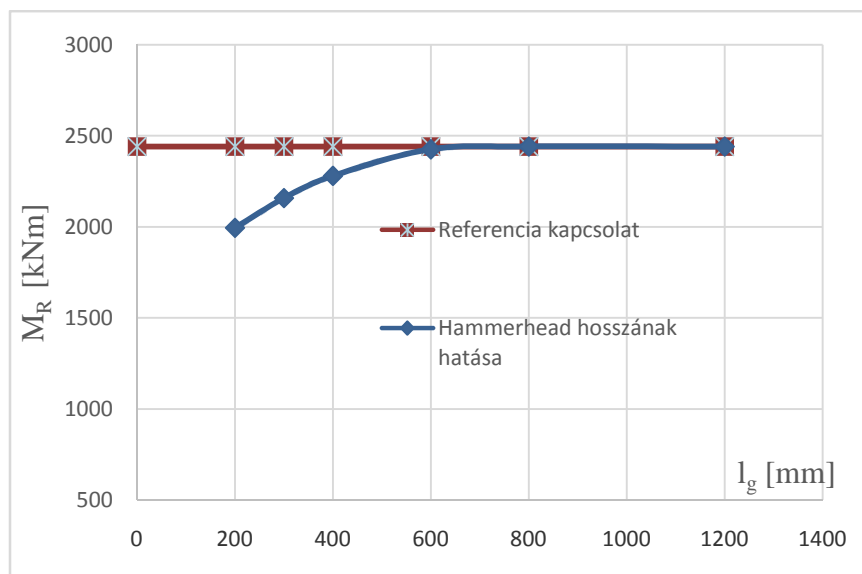


22.diagram: Nyomaték-csavarsori erő kapcsolat,200mm hosszú hammerhead (2.2. kapcsolat típus)



23.diagram: Nyomaték-csavarsori erő kapcsolat,1200mm hosszú hammerhead (2.2. kapcsolat típus)

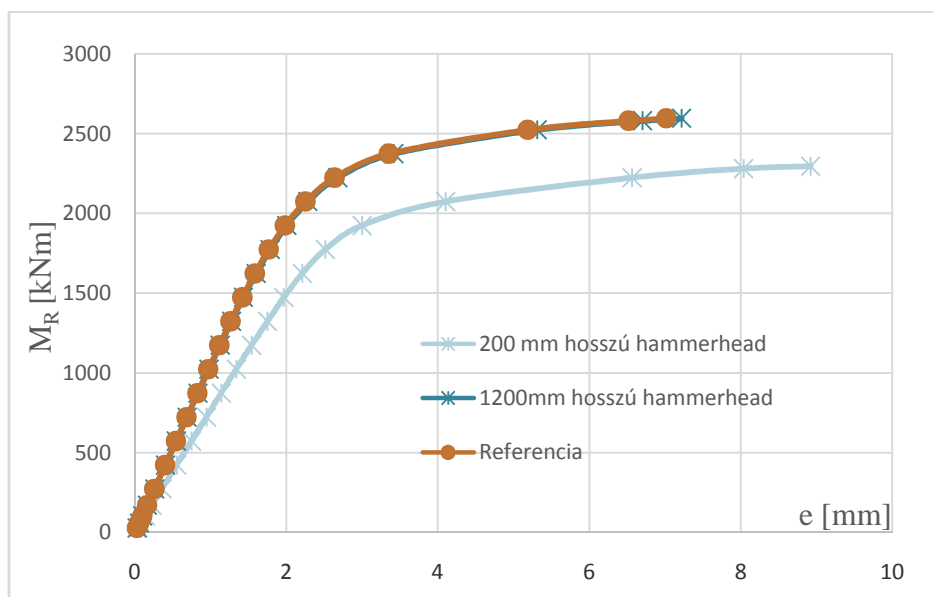
A 24. diagram megmutatja, hogy a hammerhead hosszának növelésével elérhető a referencia kapcsolat nyomatóki ellenállásának értéke.



24. diagram: Nyomatóki ellenállás- hammerhead hossz kapcsolata (2.1. kapcsolat típus)

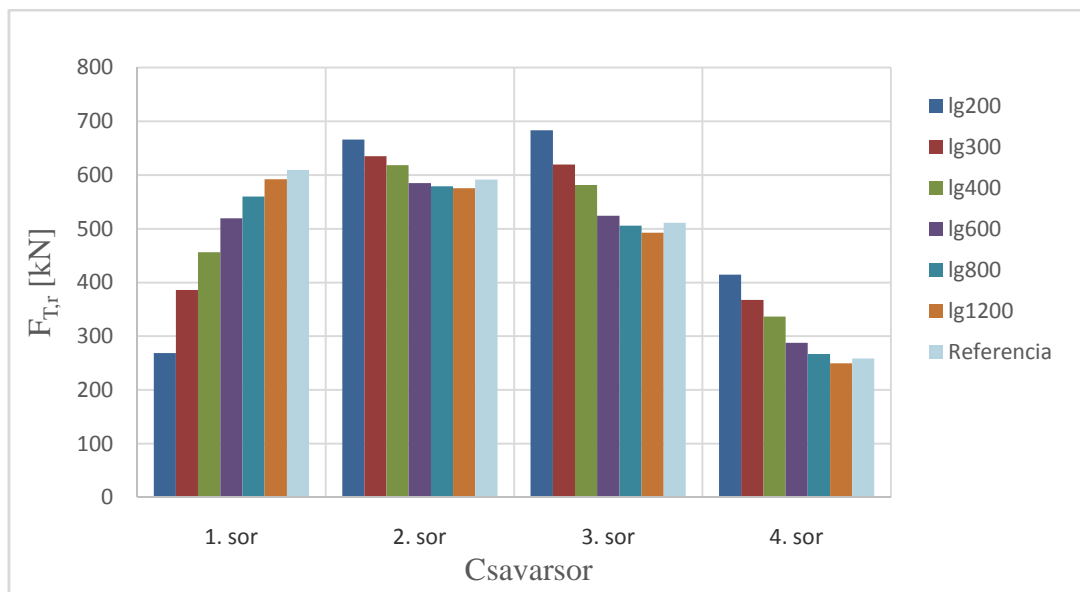
Az egyes kapcsolati kialakítások esetén különböző hammerhead hosszak alkalmazásával érhető el a referencia viselkedés. Minden esetben a gyakorlatban alkalmazott 200 mm hosszú hammerhead hosszának jelentős növelésére van szükség. A szükséges hossz a kapcsolat paramétereitől függ (csavar méret és anyag, csavarpozíció, homloklemez vastagság és hammerhead gerinc vastagság).

A nyomaték-elmozdulás görbék alapján megállapítható, hogy a nagyobb hammerhead hosszúságú kapcsolat szerkezeti viselkedése megegyezik a referencia kapcsolat viselkedésével.

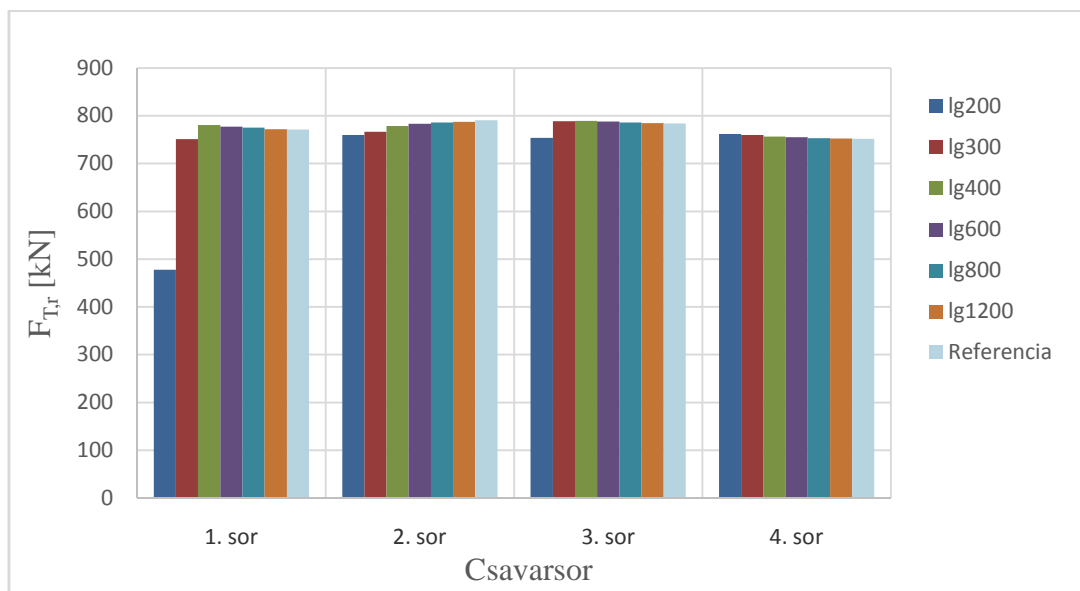


25. diagram: Nyomaték-elmozdulás görbék összehasonlítása (2.2. kapcsolat típus)

A csavarsori erőeloszlás rugalmas és képlékeny állapotban azonos tendenciát mutat a hammerhead gerinc növelésénél tapasztalt viselkedéssel. A kapcsolat rugalmas állapotában 1200 mm hosszú hammerhead esetén is csak megközelíti a hammerhead kapcsolat első csavarsori ereje a referencia kapcsolót, míg képlékeny állapotban már 400 mm hosszúságú hammerhead alkalmazása is elegendő a referencia csavarsori erő eléréséhez.



26. diagram: Csavarsori erőeloszlás rugalmas viselkedés esetén (2.1. kapcsolat típus,  $t_g=16$  mm)



27. diagram: Csavarsori erőeloszlás képlékeny viselkedés esetén (2.1. kapcsolat típus,  $t_g=16$  mm)

## 5. MÉRETEZÉSI ELJÁRÁS KIDOLGOZÁSA

---

### 5.1. Vizsgálatok stratégiája

Az előző fejezetben bemutatott eredmények alapján megállapítható, hogy megfelelő geometriai kialakítás esetén a hammerhead-es kapcsolatok képlékenyállapotában az első csavarsorban felépülő erő értéke eléri a második és a harmadik sorban fellépő csavarsori erők nagyságát, valamint a referencia kapcsolat csavarsori erőeloszlásával azonos eloszlás alakul ki. Ennek következtében a hammerhead-es kapcsolat nyomatéki ellenállása közel azonos értékű lehet a referencia kapcsolatéval. Az előző megállapítások teljesülése esetén pedig a kapcsolat méretezhető az EN 1993-1-8 [1] szabvány eljárása alapján.

A hammerhead geometriai méretei közül két paraméter (a hammerhead gerinc vastagság és a hammerhead hossz) változtatása volt hatással a csavarsori erőeloszlásra és a hajlítási ellenállásra. Ennek következtében hammerhead öv tetszőleges méretűre vehető fel egy minimális gyártástechnológiai mérethatár felett. Ennek a lemeznek a funkciója csak a töréskép felső lemezszelhez való kifutásának megakadályozása.

A referencia értékek eléréséhez a hammerhead gerinc 8mm vastagságról közelítőleg 30 mm vastagságra történő növelése volt szükséges. A gyakorlatban ilyen nagy lemezek alkalmazása több szempontból (például: hegesztési problémák, gazdaságosság, aránytalan geometria) is gondot jelenthet, ezért csak a gerinc vastagságának növelése nem célra vezető a probléma megoldásával kapcsolatban. A hammerhead másik geometriai paramétere, amelynek a változtatása megoldást jelenthet a hammerhead hossza. A jelenlegi gyakorlatban alkalmazott 200 mm-es hammerhead hosszát jelentősen meg kell növelni.

A következő pontokban szükséges hammerhead hossz meghatározásán kívül azt is vizsgáltam, hogy a két paraméter együttes változtatásával, a hammerhead gerinc vastagságának kisebb mértékű és a hammerhead hosszának jelentős növelésével milyen hatást lehet elérni.

Továbbá megvizsgálom, hogy milyen módon lehet kézi számítással meghatározni a szükséges hammerhead nagyságát, hogy a csavarsori ellenállások megegyezzenek az ekvivalens belső csavarsori ellenállások értékével.

### 5.2. Hammerhead gerinc geometriájának hatása a teherbírásra

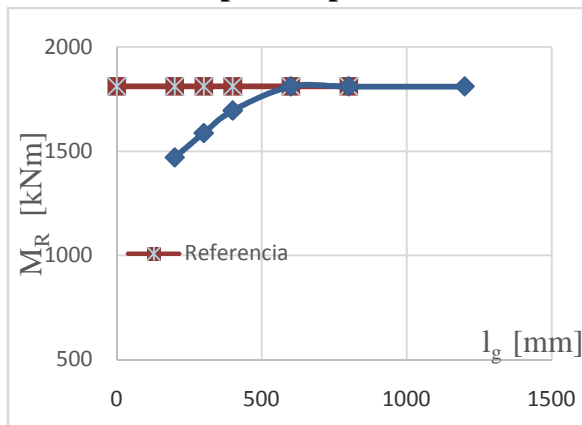
#### 5.2.1. Hammerhead gerinc vastagságának és hosszának együttes növelése

A referencia kapcsolat nyomatéki ellenállásának eléréséhez a jelenlegi gyakorlatban alkalmazott hammerhead-nél több mint kétszeres hossznövelésre lehet szükség. A jelentősen megnövekedett hammerhead hossz problémát jelenthet megvalósítási szempontból, ezért a rövidebb hammerhead hossz alkalmazása érdekében szükség van a gerinc és a hossz egyszerre történő növelésének az elemzésére. A következőkben két különböző gerendához tartozó kapcsolati kialakítás esetén (1. és 2.1. típusú kapcsolat esetén) mutatom be a

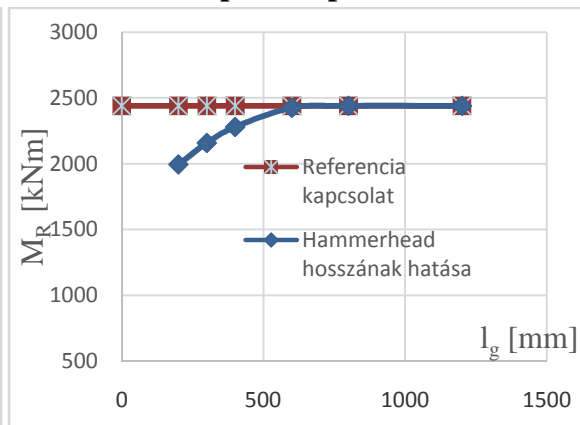
hammerhead gerinc vastagság és hossz változásának együttes hatását a nyomatéki teherbírásra.

Az első esetben a 1. és 2.2. típusú kapcsolat viselkedését vizsgálom 8mm, 12 mm és 16 mm vastag hammerhead gerinc alkalmazásával. A 28-30. ábrák bemutatják, hogy a hammerhead hossz változásának függvényében, hogyan változik a hammerhead-es kapcsolat nyomatéki ellenállása és ez az érték hogyan viszonyul a referencia kapcsolat ellenállásához.

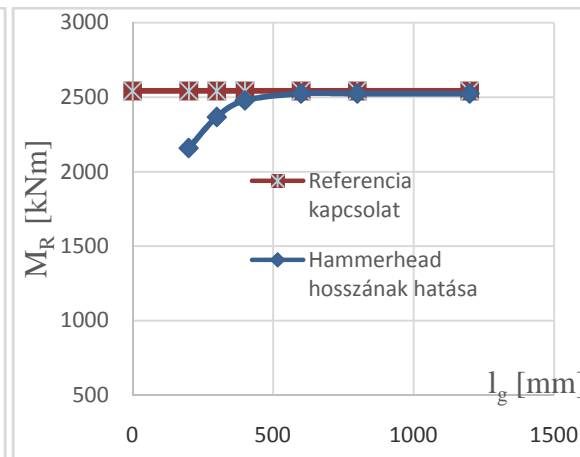
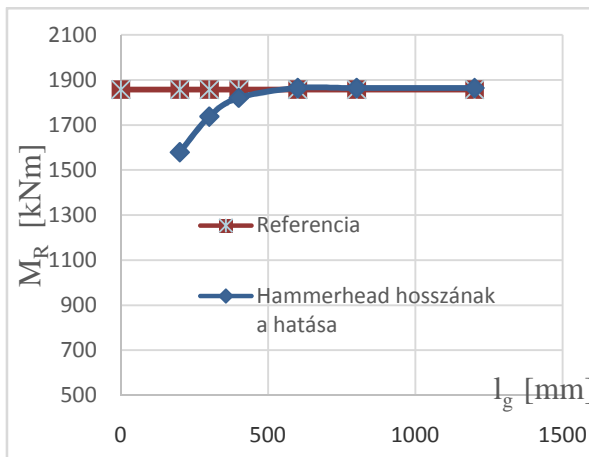
1. típusú kapcsolat



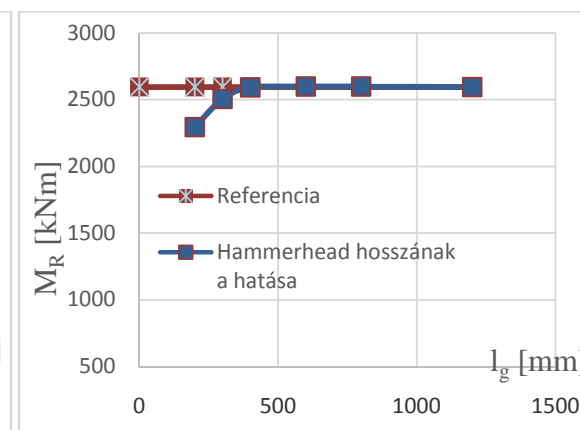
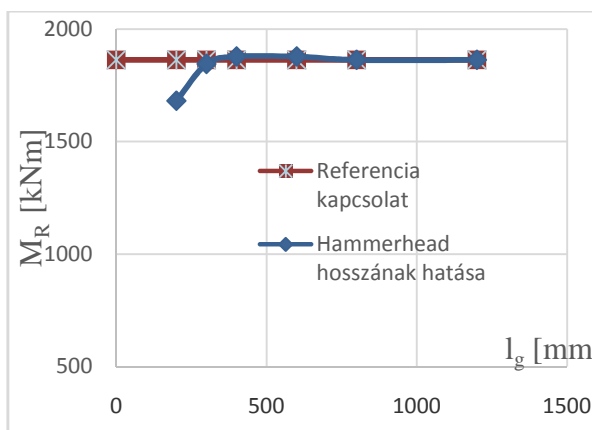
2.2. típusú kapcsolat



28.diagram: Hammerhead hossz és a nyomatéki ellenállás a kapcsolat, 8 mm-es gerinc esetén



29.diagram: Hammerhead hossz és a nyomatéki ellenállás kapcsolat, 12mm-es gerinc esetén



30.diagram: Hammerhead hossz és a nyomatéki ellenállás kapcsolat, 16mm-es gerinc esetén

A diagramok alapján megállapítható, hogy minden esetben a hammerhead hossz növekedésével lineárisan nő a nyomatéki ellenállás értéke. A numerikus vizsgálat során kapott eredmények azt mutatják, hogy nagyobb gerinc vastagság alkalmazása esetén jelentősen kisebb hammerhead hossz alkalmazása szükséges a referencia viselkedés eléréséhez. Ha a két kapcsolat típus diagramjait összehasonlítjuk látható, hogy az azonos gerinc vastagsághoz tartozó diagramok nagyon hasonlóak és a nyomatéki ellenállás változásának tendenciája megegyezik, csak a nyomatéki szintkülönböző.

A 4. táblázat bemutatja a diagramokról leolvasható egyes hammerhead gerinc vastagsághoz tartozó szükséges hosszakat a két kapcsolati típus esetén.

Hammerhead gerinc vastagság [mm]	Szükséges hammerhead hossz [mm]	
	1.típusú kapcsolat	2.1. típusú kapcsolat
8	500	500
12	430	420
16	330	350

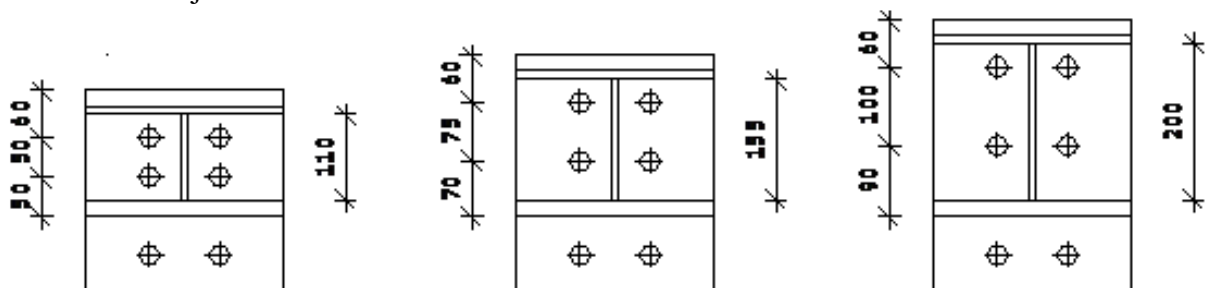
4. táblázat: Szükséges hammerhead hosszak

A numerikus vizsgálat során kapott eredmények azt mutatják, hogy a két kapcsolati típus esetén az azonos hammerhead gerinc vastagsághoz tartozó szükséges hammerhead hosszak közelítőleg megegyeznek. Ennek oka, hogy azonos pozíciójú, méretű és anyagminőségű csavarok és azonos vastagságú homloklemez található a kapcsolatokban, így a hammerhead-re homloklemez-csavar együttesének tönkremenetele esetén mind a két esetben ugyanakkora erő hat.

A csavarsori erők nyírást és hajlítást okoznak a hammerhead gerincében és a homloklemezben, ezért a méretezési eljárás kidolgozásánál a hammerhead kialakítás hajlítási és nyírési teherbírását vizsgáltam meg. A következő pontokban a hammerhead magasságának változtatásával a hammerhead hajlításának hatását vizsgálom.

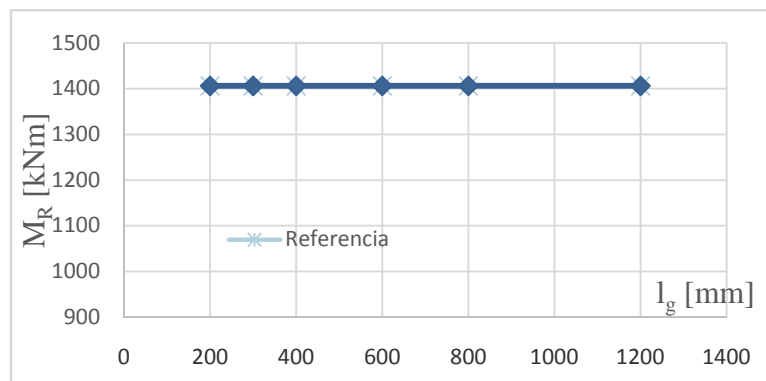
### 5.2.2. Hammerhead magasságnak hatása a teherbírásra

A hammerhead hajlítását három különböző magasságú hammerhead és két különböző vastagságú (12 mm és 20 mm) homloklemez esetén vizsgáltam. A hammerhead kialakításokat a 41. ábra mutatja be.



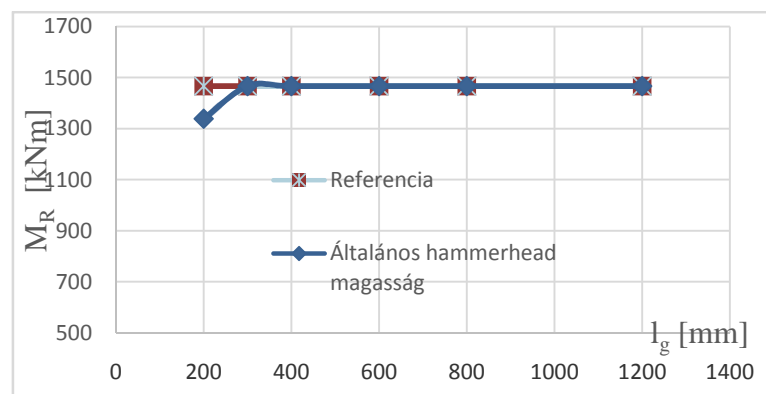
41.ábra: Különböző hammerhead magasságok

A csökkentett hammerhead magasság esetén a csavarok túl közel kerülnek az övhöz és egymáshoz, így a hammerhead hatás nem tud érvényesülni. A hammerhead hosszának növelésével nem növelhető az ellenállás, mert már 200 mm-es hammerhead hosszhoz tartozó ellenállás is megegyezik a referencia kapcsolattal. A csökkentett magasságú hammerhead esetén nem tapasztalható a tipikus hammerhead viselkedés.

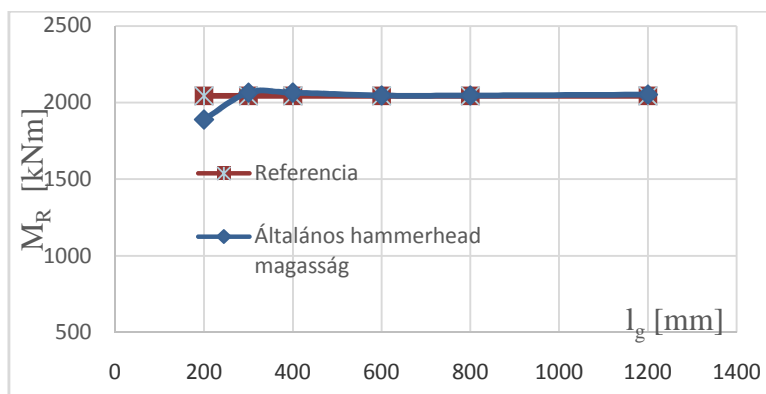


31. diagram: Hammerhead hossz és a nyomatéki ellenállás kapcsolat

Az általános hammerhead magasságú 2.1. típusú kapcsolatnál már 300 mm hosszú hammerhead alkalmazása esetén elérhető a referencia kapcsolat nyomatéki ellenállása. A két különböző homlokleméhez tartozó 32. és 33. diagramot összehasonlítva látható, hogy a nyomatéki ellenállás jelentősen nagyobb a 20 mm vastag homloklemez esetén.

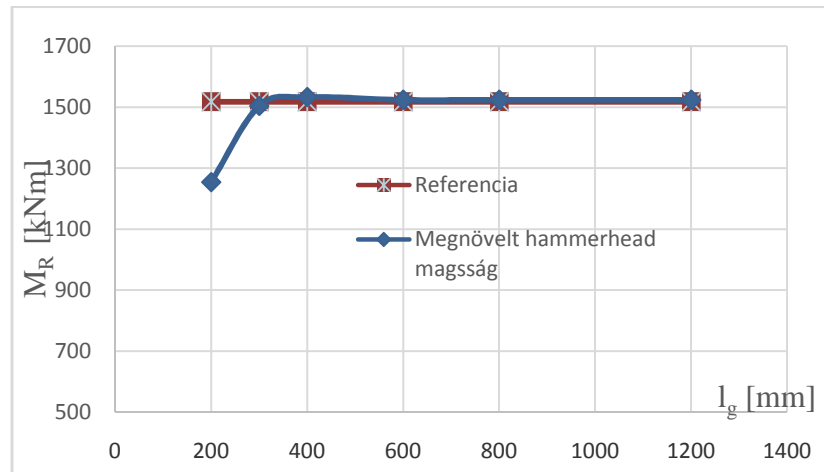


31. diagram: Hammerhead hossz és a nyomatéki ellenállás kapcsolat,  $t_{cp}=12$  mm

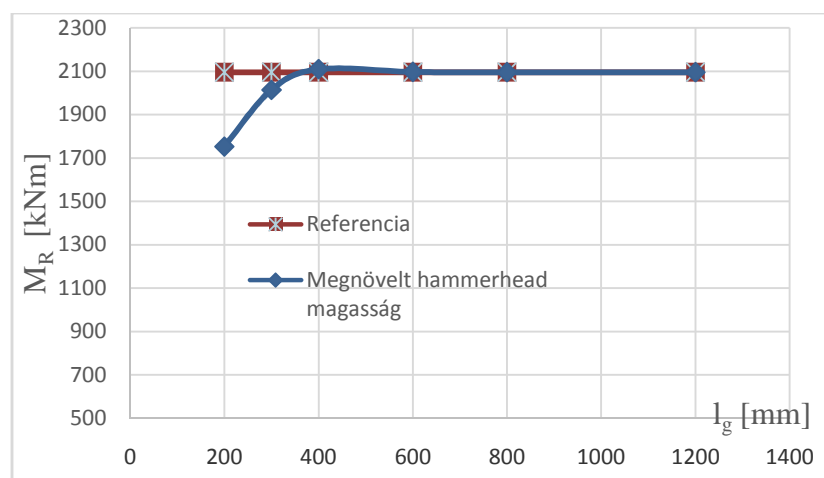


32. diagram: Hammerhead hossz és a nyomatéki ellenállás kapcsolat,  $t_{cp}=20$  mm

A 33-34. diagram a megnövelt hammerhead magasság paraméteres vizsgálatának eredményeit szemlélteti. A referencia kapcsolat ellenállása a hammerhead magasság növelésének hatására kismértékben nő. Magasabb gerinc lemez alkalmazásánál a referencia ellenállás eléréséhez hosszabb hammerhead-re van szükség, mint általános hammerhead magasság esetén. A homloklemez vastagságának növelésével jelentősen nő a kapcsolat nyomatóki ellenállása és a 20 mm vastagságú homloklemezzel kialakított kapcsolat esetén a szükséges hammerhead hossz is nagyobb.



33. diagram: Hammerhead hossz és a nyomatóki ellenállás kapcsolat,  $t_{cp}=12$  mm



34. diagram: Hammerhead hossz és a nyomatóki ellenállás kapcsolat,  $t_{cp}=20$  mm

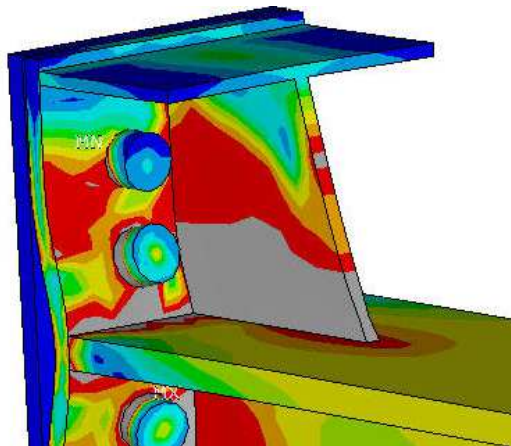
A hammerhead gerinc méreteinek analízise alapján a hammerhead hosszát befolyásoló paraméterek a következők:

- csavarok mérete és anyagminősége,
- csavarok pozíciója (hammerhead magassága),
- hammerhead gerinc vastagsága,
- homloklemez vastagsága.



### 5.3. Méretezési eljárás kidolgozása

A hammerhead hosszának meghatározására szükség van egy olyan eljárásra, méretezési módszer kidolgozására, amellyel a gyakorlatban könnyedén meg lehet határozni a hammerhead szükséges méretét. A következőkben egy olyan eljárás kerül bemutatásra, amely segítségével a geometriai kialakítás és a kapcsolat nyomatéki ellenállásának számításához szükséges redukált csavarsori erők ismeretében meghatározható a hammerhead hossza vagy a hammerhead hosszának ismeretében meghatározható a csavarsori erők további csökkentésének mértéke.



42. ábra: Hammerhead gerinc feszültség eloszlása

A hammerhead-es kapcsolat feszültség eloszlását bemutató 41. ábrán látható, hogy a gerinc gerenda öv felőli oldala teljesen megfolyik. Az ábra és az előző pontban tett következtetések alapján megállapítható, hogy a hammerhead igénybevétele a felső két csavarsorban ébredő erőből keletkezik, ezért ha a hammerhead-et egy nyírt hajlított elemnek tekintjük, akkor egy T keresztmetszet kell nyírásra, hajlításra és a két hatás interakciójára méretezni. Az EN1993-1-1 [8] szabvány alapján hengerelt T elem esetén a nyírt területet ( $A_v$ ) a következő értékre kell felvenni:

$$A_v = 0,9(A - bt_f)$$

ahol:  $A$  a T-keresztmetszet teljes területe  
 $b$  övlemez szélessége (jelen esetben a homloklemez szélessége)  
 $t_f$  övlemez vastagsága (jelen esetben a homloklemez vastagsága)

A nyírt keresztmetszet ellenállása:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \left( \frac{f_y}{\sqrt{3}} \right)}{\gamma_{M0}}$$

A keresztmetszet hajlítási ellenállása:

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}}$$

A keresztmetszetre nyíróerő és hajlítás is hat egyidejűleg, ezért a két hatás interakciójának vizsgálata is szükséges. A hajlítás és nyírás interakciójának ellenőrzése:

$$\rho = \left( \frac{2V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2, \text{ ha } V_{Ed} > 0,5V_{pl,Rd}$$

$$\rho = 0, \quad \text{ ha } V_{Ed} \leq 0,5V_{pl,Rd}$$

A csökkentett nyomatéki ellenállást, úgy kell figyelembe venni, hogy a nyírt területeken a következő csökkentet folyáshatárt vesszük figyelembe:

$$f_y' = (1 - \rho)f_y$$

A T elemre ható nyíróerő a hammerhead két külső csavarsorában ébredő csavarerők összege, a nyomaték pedig szintén a két csavarsor csavarerőinek a gerenda felső övétől mért távolsággal vett szorzata.

A numerikus analízis során meghatározott csavarerők figyelembe vételével, mint a keresztmetszet terhével a T elem kihasználtságát négy módon számítottam ki. Első esetben a T keresztmetszet teljes területét figyelembe vettem a nyírási ellenállás ( $V_{R,T}$ ) számításához, második esetben viszont csak a szabvány alapján figyelembe vehető nyírt területet ( $V_{R,I}$ ). A hajlítás és a nyírás interakcióját, pedig a két eltérő módon számított nyírási területtel meghatározott  $\rho$  csökkentő tényező figyelembevételével határozom meg.

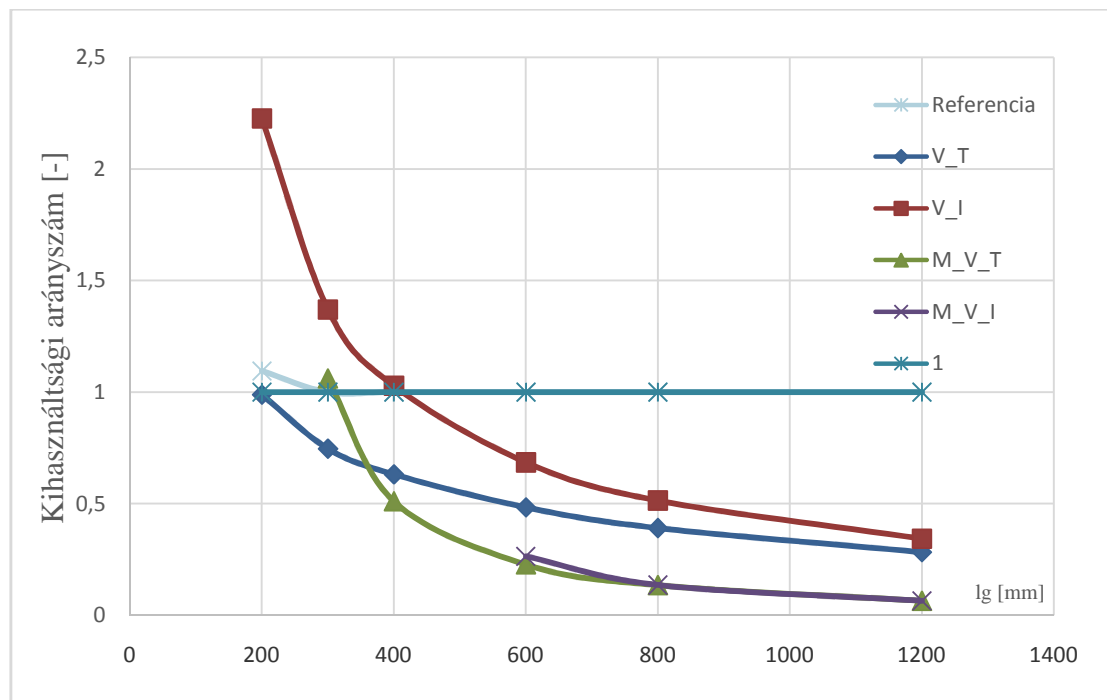
A hammerhead T keresztmetszeti terheinek és a négy eltérő módon számított ellenállásainak ismeretében a keresztmetszet kihasználtsági meghatározhatóak. A T keresztmetszet vizsgálatának eredményeit 2.1. típusú kapcsolat esetén mutatom be.

Először általános hammerhead kialakítással elemeztem a T-keresztmetszet viselkedését. Az alábbi táblázat első harmada bemutatja, hogy adott hammerhead hossz esetén mekkora a kapcsolat nyomatéki ellenállása és ez az ellenállás értéke milyen arányban van a referencia kapcsolat nyomatéki ellenállásának értékével. A következő négy oszlopban látható, hogy a T keresztmetszet kihasználtságának értéke a négy ellenállás esetén, ha teherként a referencia kapcsolat csavarerőit vesszük figyelembe. A táblázat utolsó része pedig szintén a négy ellenálláshoz tartozó kihasználtságokat mutatja, de a figyelembe vett terhek ebben az esetben az adott hammerhead hosszhoz tartozó csavarsori erők.

Általános hammerhead magasság, 12 mm vastag homloklemez											
Nyomatékok alakulása			Arány	$V_T$	$V_I$	$M-V_T$	$M-V_I$	$V_T$	$V_I$	$M-V_T$	$M-V_I$
$I_g$	$M_R$	Ref. $M_R$		Referenciához viszonyított kihasználtságok				Adott kialakítás kihasználtságai			
200	1338,75	1466,25	1,095238	0,989	2,226	41,478	$V_{R,D} \leq V_{Ed}$	0,779	1,752	1,986	$V_{R,D} \leq V_{Ed}$
300	1466,25	1466,25	1	0,747	1,37	1,061	$V_{R,D} \leq V_{Ed}$	Referencia csavarerőhöz viszonyított értékekkel megegyező értékek			
400	1466,25	1466,25	1	0,632	1,028	0,511	$V_{R,D} \leq V_{Ed}$				
600	1466,25	1466,25	1	0,484	0,685	0,228	0,264				
800	1466,25	1466,25	1	0,391	0,514	0,135	0,136				
1200	1466,25	1466,25	1	0,283	0,343	0,065	0,065				

5.táblázat: Általános hammerhead magassághoz tartozó kihasználtságok

A 35. diagram szemlélteti a táblázat eredményeit. A numerikus vizsgálat alapján a referencia ellenállás elérése körülbelül 300 mm hosszú hammerhead esetén lehetséges. A diagram alapján látható, hogy amennyiben a nyírási ellenállást a teljes keresztmetszeti terület figyelembe vételére határozzuk meg jelentős tévedést követünk el a biztonság kárára, viszont a szabvány szerint figyelembe vett nyírási terület túlságosan a biztonság javára történő közelítést eredményez. A nyomték-nyírás interakciójának, teljes keresztmetszeti területtel figyelembe vett nyírás esetén számított kihasználtsága viszont közel azonos hammerhead hosszánál lesz 1, mint a numerikus vizsgálatot kapott számítások során.



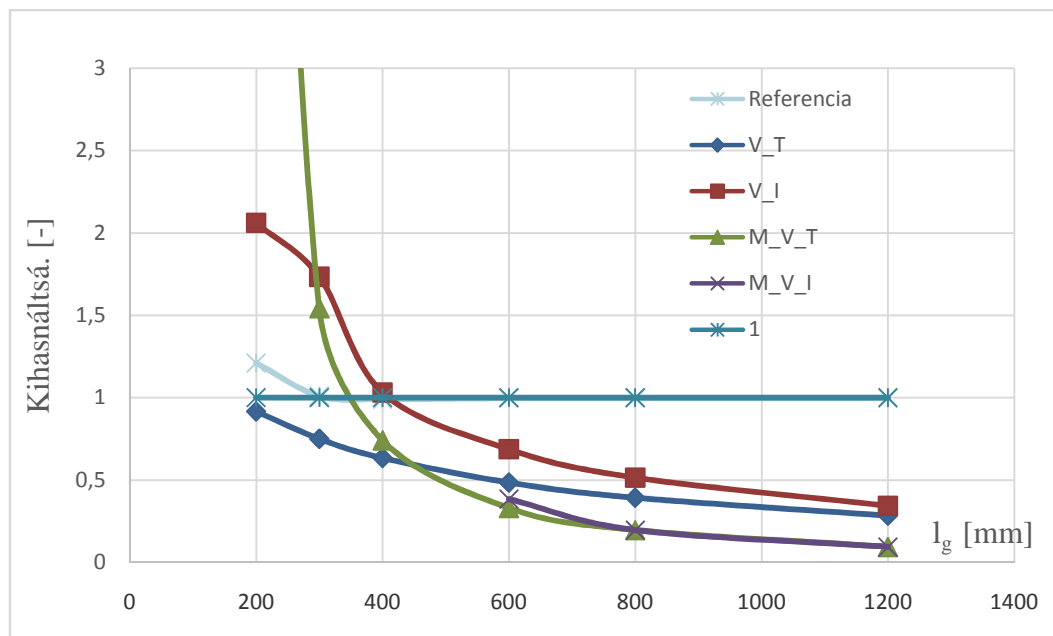
35. diagram: T keresztmetszet kihasználtsági arányai

Következő esetben a megnövelt hammerhead kihasználtságait elemeztem. Megnövelt hammerhead magasság és 12 mm vastag homloklemez esetén a referencia ellenállás eléréséhez szükséges hammerhead hossza a numerikus számítások alapján 320 mm körüli értékre adódik. A kapcsolati kialakításhoz tartozó nyomtékeny ellenállásokat és kihasználtságokat az alábbi táblázat tartalmazza:

Általános hammerhead magasság, 12 mm vastag homloklemez											
Nyomatékok alakulása			Arány	V <sub>T</sub>	V <sub>I</sub>	M-V <sub>T</sub>	M-V <sub>I</sub>	V <sub>T</sub>	V <sub>I</sub>	M-V <sub>T</sub>	M-V <sub>I</sub>
I <sub>ε</sub>	M <sub>R</sub>	Ref. M <sub>R</sub>		Referenciához viszonyított kihasználtságok				Adott kialakítás kihasználtságai			
200	1253,25	1517,5	1,210852	0,916	2,061	7,873	V <sub>RD</sub> ≤ V <sub>ED</sub>	0,621	1,397	1,573	V <sub>RD</sub> ≤ V <sub>ED</sub>
300	1503	1517,5	1,009647	0,75	1,734	1,542	V <sub>RD</sub> ≤ V <sub>ED</sub>	Referencia csavarerőhöz viszonyított értékkel megegyező értékek			
400	1532,25	1517,5	0,990374	0,634	1,031	0,741	V <sub>RD</sub> ≤ V <sub>ED</sub>				
600	1523,25	1517,5	0,996225	0,485	0,687	0,33	0,384				
800	1523,25	1517,5	0,996225	0,393	0,515	0,196	0,196				
1200	1523,25	1517,5	0,996225	0,284	0,344	0,094	0,094				

6. táblázat: Megnövelt hammerhead magassághoz tartozó kihasználtságok

Az általános magasságú hammerhead-hez hasonlóan megállapítható, hogy a nyomaték- teljes keresztmetszeti területre figyelembe vett nyírás interakciója közelít legjobban a numerikus vizsgálattal kapott metszéspontot. Továbbiakban a nyomaték-nyírás interakción a nyomaték- teljes keresztmetszeti területre számított nyírás interakciót értem.



36. diagram: T keresztmetszet kihasználtságai

Az előző megállapítások alapján arra a következtetésre jutunk, hogy a hammerhead hosszát kézi számítással a T keresztmetszet nyomaték-nyírás interakciója alapján lehet meghatározni. A feltételezést igazolja a korábbi fejezetekben bemutatott 1. és 2.1. típusú kapcsolatok vizsgálata is. Minden kapcsolati és hammerhead kialakítás esetén hasonló kihasználtságú diagramokat kaptam, mint a 35-36. diagramok.

A méretezési eljárás ellenőrzésére a 2.2. típusú kapcsolatok esetén analitikusan meghatároztam a nyomaték-nyírás interakció alapján szükséges hammerhead hosszt, majd numerikus számítással ellenőriztem annak helyességét. A 7. táblázat tartalmazza a kézi és a numerikus számítás eredményeit és összehasonlítását.

Hammerhed magasság	Homloklemez vastagság [mm]	Szükséges $l_g$		Nyomatéki ellenállás		
		Numerikus $l_{g,N}$ [mm]	Analitikus $l_{g,A}$ [mm]	Referencia [kNm]	$l_{g,A}$ hosszhoz	Eltérés [%]
Általános	12	<300	307	1466	1466	0
Általános	20	<300	267	2046	2016	1,5
Megnövelt	12	320	353	1517	1526	0,6
Megnövelt	20	310	330	2095	2081	0,7

7. táblázat: nyomatéki ellenállások összehasonlítása

A nyomaték-nyírás interakcióval meghatározott hammerhead hossz a biztonság javára közelíti a numerikus úton kapott eredményt és az eltérés nem mondható jelentősnek. Az

analitikusszámítással meghatározott hammerhead hosszal végzett numerikus analízis eredményei azt mutatják, hogy a hammerhead-es kapcsolat nyomatéki ellenállása 1-2%-os eltéréssel teljesen megközelíti a referencia kapcsolót. A nyomaték-nyírás interakcióval meghatározott hammerhead hossz a biztonság oldalán történő közelítést ad, de nem vezet jelentős túltervezéshez.

A TDK munkámban bemutatott vizsgálatok és eredmények alapján konzulenseimmel együtt javaslatot dolgoztam ki, hogy hammerhead-es kapcsolatok esetén a méretezési eljárásba egy új komponens kerüljön figyelembe vételre. A hammerhead-es kapcsolatok esetén a hammerhead hatását figyelembe vevő komponens alkalmazásával az EN 1993-1-8 [1] szabvány előírásainak megfelelő biztonsági szint érhető el.

A hammerhead komponens figyelembe vétele a méretezési eljárásban két módon történhet. Az egyik esetben a referencia kapcsolat nyomatéki ellenállásával megegyező ellenállású hammerhead-es kapcsolatot alkalmazásra van szükség. Ebben az esetben a méretezés során a következő lépések végrehajtása szükséges:

1. Az EN 1993-1-8 [1] szabvány eljárása alapján a hammerhead-es kapcsolat komponenseinek ellenállást, mint belső csavarsoros nyomatékbíró homloklemez kapcsolat komponensek ellenállást kell meghatározni.
2. A nyomatéki ellenállás számítása, amelyhez a csavarsori erők redukált értékét kell meghatározni.
3. A három csavarsori erő korlátozásának figyelembevételével a hammerhead T keresztmetszetére ható erők ismertek, így a kapcsolat geometriai paramétereinek ismeretében a hammerhead-et terhelő nyírás és hajlítás meghatározható. Az igénybevételek ismeretében a nyomaték-nyírás interakciós feltétele alapján a hammerhead szükséges hossza számítható.

A hammerhead-es kapcsolat méretezésének másik esete, hogy a gyakorlatban alkalmazott hammerhead kialakítás változtatására nincs lehetőség, ekkor a nyomatéki ellenállás csökkentése szükséges. A méretezési eljárás lépései ekkor a következők:

1. Az előző eljáráshoz hasonlóan először a csavarsorok / komponensek ellenállását kell meghatározni EN1993-1-8 [1] alapján.
2. Majd a külső csavarsori erők hammerhead hatás miatti redukálást kell elvégezni a következő módon. A kapcsolat geometriájának ismeretében a hammerhead nyomaték-nyírás interakciója alapján meghatározható a két külső csavarsori erő maximális értéke. Kis külső csavarsori erők esetén csak a második csavarsorban alakul ki csavarerő. Ha elegendően nagy a számított külső csavarsori erő értéke, akkor a második csavarsorban a csavar húzási teherbírásának megfelelő erőt kell figyelembe venni. Az első csavarsorban pedig a nyomás-nyírás interakciós feltétele során meghatározott maximális külső csavarsori erő és a második sorban figyelembe vett erő különbségét.
3. A kapcsolat ellenállása a hammerhead hatása miatt redukált csavarsori erők figyelembevételével meghatározható.

## 6. ÖSSZEFOGLALÁS

---

A dolgozatban a speciális kialakítású úgy nevezett hammerhead-del ellátott külső csavarsoros nyomatékábíró homloklemez-es kapcsolatok szerkezeti viselkedését vizsgáltam numerikus modell segítségével. A numerikus vizsgálathoz alkalmazott modell szakirodalmi kísérletek alapján lett verifikálva. A numerikus modellel a gyakorlatban alkalmazott tipikus kapcsolatok szerkezeti viselkedésének bemutatására a helyettesítő T-elem mindhárom tönkremeneteli módjához tartozó jellemző tönkremeneteli módot megvizsgáltam és elemeztem.

A kutatási főcélja a hammerhead-nek a kapcsolat nyomatéki ellenállásra gyakorolt hatásának elemzése. Az egyes hammerhead-es kapcsolati kialakítások nyomatéki ellenállását az azonos geometriai paraméterekkel kialakított belső csavarsoros referencia kapcsolat nyomatéki ellenállásával hasonlítottam össze. A két kialakítás eredményéből látható, hogy az u.n. hammerhead hatás, mely a szélső csavarsor csökkentett hatékonyságát jelenti, 15-17%-kal csökkenti a nyomatéki teherbírást, amit a hammerhead-es kapcsolatok méretezési eljárásában mindenképpen figyelembe kell venni. A csavarsori erőeloszlások összehasonlítása azt mutatta, hogy az első csavarsorban ébredő erő és a csavarsor merevsége a hammerhead-es kapcsolat esetében jelentősen kisebb, mint a referencia kapcsolatnál.

A két kapcsolat tönkremeneteli módja, a csavarsori erőeloszlás és a tönkremenetelhez tartozó nyomatéki ellenállás értéke alapján azt tapasztaltam, hogy a hammerhead-es és a hammerhead nélküli belső csavarsoros kapcsolati kialakítások különbözően viselkednek. A jelenlegi szabványok azonban nem veszik figyelembe a hammerhead-ben elhelyezett csavarsorok redukált teherbírását. Az eredmények azt mutatták, hogy a biztonság kárára téved a tervező, ha belső csavarsorként veszi figyelembe a hammerhead-ben elhelyezett csavarsorokat. Ennek megfelelően a homloklemez-es kapcsolatok méretezési eljárása módosítása szorul a hammerhead-del kialakított kapcsolatok esetén.

Paraméteres numerikus vizsgálatokkal a hammerhead geometriai méreteinek a nyomatéki ellenállás értékére és a csavarsori erőeloszlásra gyakorolt hatásának vizsgálatát elvégeztem. Négy geometriai paraméter (a hammerhead öv szélessége és vastagsága, a gerinc vastagsága és a hammerhead hossz) hatást vizsgáltam a különböző kapcsolat-típusok esetén. A paraméteres vizsgálat eredményei azt mutatták, hogy a hammerhead öv méretének nincs hatása a nyomatéki ellenállásra és a csavarsori erőeloszlásra sem, viszont a gerinc vastagság és a hammerhead hossz jelentősen befolyásolja a kapcsolat nyomatéki ellenállását és a kapcsolat csavarerő eloszlását. Mind a két paraméternövelésével a nyomatéki ellenállás nő és a kapcsolat képlékeny állapotában a csavarsori erőeloszlás közel meggyezik a belső csavarsoros „referencia” kapcsolatok csavarsori erőeloszlásával.

A hammerhead gerinc vastagság és hossz növelésével lineáris nő a nyomatéki teherbírás, így meghatározható a referencia kapcsolat ellenállásának eléréséhez szükséges gerinc vastagság és hammerhead hossz. A hammerhead gerincének növelése esetén a jelenlegi gyakorlatban alkalmazott általában ~8 mm vastag gerinclemez helyett körülbelül 30 mm vastag lemez alkalmazása szükséges, ezért a probléma megoldását a hammerhead hosszának növelése vagy a két paraméter értékének együttes növelése jelentheti.

A hammerhead hosszának meghatározásához a hammerhead-et, mint egy hajlított-nyírt T keresztmetszetet vizsgáltam. A hajlítás hatásának figyelembe vételére három különböző magasságú hammerhead-et vizsgáltam két különböző homloklemez vastagság esetén. A vizsgálat eredménye azt mutatta, hogy a hammerhead szükséges hossza meghatározható a hajlítás-nyírás interakciós

feltételével. A hajlítás-nyírás interakcióval történő közelítés a biztonság javára történik, de nem vezet jelentős túltervezéshez. A szükséges hammerhead hossz alkalmazásával, pedig a kapcsolat méretezhető az EN 1993-1-8 [1] szabvány alapján belső csavarsoros nyomatékbíró homloklemez-es kapcsolatként.

Összefoglalva tehát tipikus hammerhead-del rendelkező kapcsolatok esetére dolgoztam ki olyan méretezési eljárást, mely az EN1993-1-8 [1] szabvány méretezési eljárását egészíti ki a hammerhead hatás figyelembe vételére, ezáltal a hammerhead-del rendelkező kapcsolatok biztonságos méretezését teszi lehetővé.

## 7. FELHASZNÁLT IRODALOM

---

- [1] EN 1993-1-8:2005; Eurocode 3: Design of steel structures Part 1-8: Design of joints, 2005. 54-99.
- [2] L. Katula: “Bolted end-plate joints for crane buckets and beam-to-beam connectons”, PhD dissertation, Department of Structural Engineering, Budapest University of Technology and Economics, 2007.
- [3] Dr. Papp Ferenc: Magasépítési acélszerkezetek segédlet, 2011. 54.
- [4] Dr. Horváth László: Acélszerkezetek II (oktatási segédlet), 2007. 40-55.
- [5] Ádány Sándor , Dulácska Endre, Dunai László, Fernezelyi Sándor, Horváth László: Acélszerkezetek, 2. Speciális eljárások, Tervezés az Eurocode alapján, 2008. 9-20.
- [6] ANSYS® v14.0, Canonsburg, Pennsylvania, USA.
- [7] Péter Márai, Dr. Balázs Kövesdi: Calculation methode of fixed steel-steel joints, 2012.
- [8] MSZ EN1993-1-1:2005; Eurocode 3: Acélszerkezetek tervezése. 1-1. rész: Általános és az épületekre vonatkozó szabályok, 2009. 51-54.
- [9] EN1993-1-5:2006; Eurocode 3: Design of steel structures Part1-5: Plated structural elements, 2006. 48.