

M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2
Hidak és Szerkezetek Tanszéke

Tudományos Diákköri Konferencia

Csőszelvényű nyomott rudak szimulációs kihajlásvizsgálata (2019/20/I.)

Készítette:

Kovács Richárd /AJLLYG/

Konzulens:

Dr. Budaházy Viktor /BME Hidak és Szerkezetek Tanszék/

Kollár Dénes /BME Hidak és Szerkezetek Tanszék/

1. Absztrakt

Jelen TDK dolgozat keretein belül acél, cső keresztmetszetű szelvények stabilitási viselkedését elemeztem, többek között a szerkezeti elemet terhelő imperfekciók részletes vizsgálatán és modellezésén keresztül, az ilyen szelvények továbbra is biztonságos, ugyanakkor jelentősen gazdaságosabb tervezésének lehetővé tétele érdekében. Ehhez egyebek mellett vizsgálatra került a kezdeti imperfekciók nagyságának, és azok egymáshoz viszonyított helyzetének hatása a kihajlási ellenállás értékére, illetve ezen imperfekciók szabvány által előírt mértékének, a gyártás folyamán keletkező valós imperfekciók mértékével történő összevetése numerikus modell segítségével.

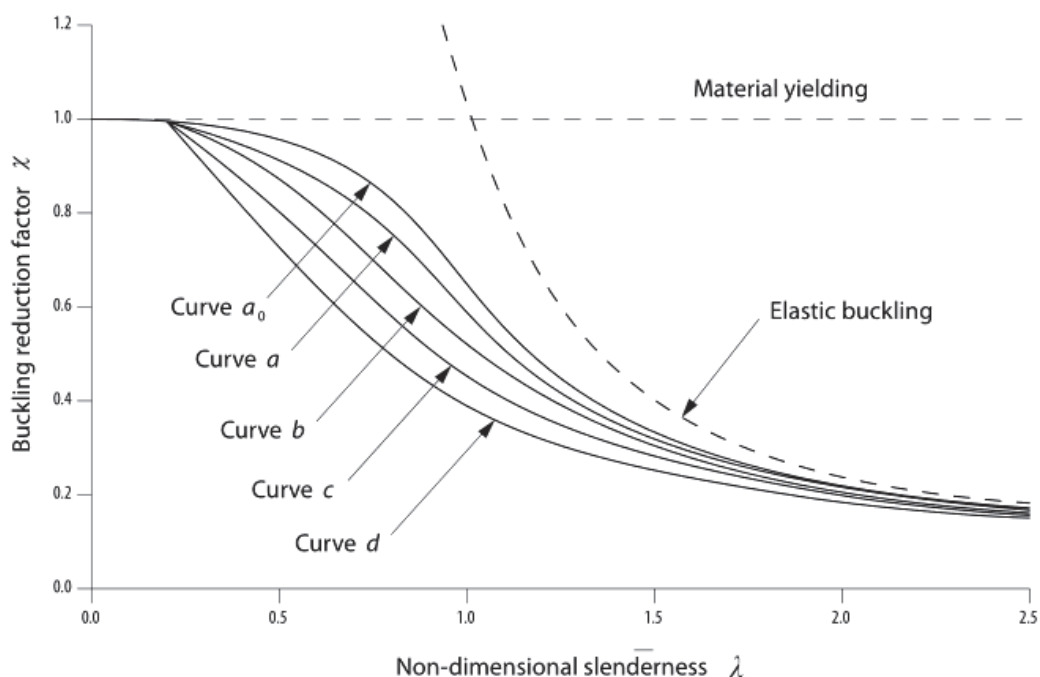
Egy másik irányból megközelítve, vizsgáltam még az acél szilárdságának, valamint a szelvény keresztmetszeti osztályának a kihajlási viselkedésre gyakorolt hatását.

A végeeselemes modellek eredményeinek kiértékelése alapján egyértelműen levonható következtetés, hogy az EUROCODE szabvány segítségével számolt értékeknél lényegesen nagyobb ellenállásokat kapunk, így a modellek eredményeihez kalibrált görbe (mint kihajlási görbe) alkalmazásával gazdaságosabb szerkezetek tervezhetők az iparba.

2. Bevezetés

2.1. EUROCODE

Az EUROCODE szabványsorozat a nyomott szerkezeti elemek stabilitási ellenállásának számítására csökkentő tényezős eljárást javasol, mely során a teljes keresztmetszet ellenállását csökkenti egy 1.00-ban maximalizált szorzó tényezővel, ezzel figyelembe véve a stabilitási ellenállását. A kihajlási csökkentő tényező a szerkezeti elem karcsúságának függvénye. A szabvány magával a függvényével (és ezáltal görbéjével) írja le, illetve táblázatosan is megadja, mely sorai és oszlopai között (közelítésképp) lineáris interpoláció alkalmazható. Az EUROCODE megkülönböztet 5 ilyen görbét (a_0 , a , b , c , d) a szelvények gyártástechnológiájához, keresztmetszetéhez, illetve szilárdságához rendelve.



1. ábra: Az EUROCODE kihajlási görbéi.

A görbék magukban foglalják a szabvány által meghatározott kezdeti alakhibák és egyéb imperfekciók egyéni és kombinációs hatását. A dolgozatban csak hidegen alakított cső keresztmetszetű szelvényt vizsgálunk, így végig az EUROCODE „c” jelű görbéjéről fogunk beszélni.

Az EUROCODE egy szerkezeti elemre a következő imperfekciókat állapítja meg, és veszi figyelembe:

- Geometriai imperfekciók
- Sajátfeszültségek

2.2. Fontosabb jelenségek

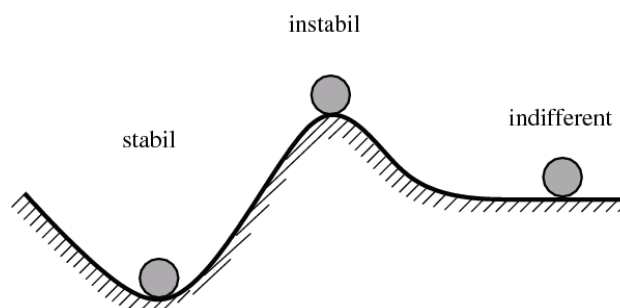
Ebben a fejezetben egy rövid tanulmány formájában foglalom össze azokat a háttér információkat, mennyiségeket és jelenségeket, amelyek későbbiekben felhasználásra kerülnek.

Egyensúly

A stabilitási tönkremenetel lényegében egyensúlyvesztési határállapot, így érdemes a szerkezet egyensúlyának definíciójából kiindulni.

Az **egyensúlyi állapotokat** tekintve egy szerkezetre (ill. szerkezeti elemre) nézve, a következő hármat tudjuk megkülönböztetni:

- **Stabil** egyensúlyi helyzetről akkor beszélünk, ha a szerkezet kimozdítása után, az visszatér az alaphelyzetbe.
- **Instabil** vagy labilis az egyensúlyi állapot, ha a kimozdítás hatására a szerkezetben további (nagy) alakváltozások jönnek létre. Ez legtöbbször a szerkezet tönkremeneteléhez vezet.
- **Indifferens** állapotban van a szerkezet, hogyha a kimozdítást követően, a test a kimozdított állapotban marad.



2. ábra: Az egyensúlyi helyzetek ábrázolása.

Stabilitás

Egy szerkezet stabilitási szempontból 4 kategóriába sorolható:

- **Egyensúlyi útelágazási határállapot**
- **Egyensúlyi útelágazás utáni határállapot**
- Képlékeny instabilitás
- Geometriai instabilitás

A felsoroltak közül az első kettővel foglalkozik részletesebben ez a kutatás a későbbiekben.

Az instabilitás jelenségének leírására a következő definíció áll rendelkezésünkre: „**A szerkezeti instabilitás akkor következik be, mikor a terhekben jelentkező kis változás hatására, nagy változások jönnek létre az elmozdulásokban.**” Ez lokális, elem, illetve szerkezet szinten is bekövetkezhet. Ugyanakkor érdemes megjegyezni, hogy ezek a definícióban leírt elmozdulások általában nem az őket okozó erő vonalában jönnek létre.

Ha ez az elmozdulás kellően nagy, vagy a szerkezet egyik kritikus elemében következik be, ez akár a szerkezet tönkremeneteléhez is vezethet. Ebből kifolyólag a stabilitás vizsgálata, nyomott acélszerkezetek tervezésének szerves és elengedhetetlen részét képezi.

A nyomott szerkezeti elemek keresztmetszeti szinten kevésbé kihasználtak, mivel a stabilitási tönkremenetelre történő méretezéskor nem számolhatunk a teljes keresztmetszeti nyomási teherbírással, hiszen azt a későbbiekben elemzésre kerülő kihajlási csökkentő tényezővel redukálnunk kell, továbbá a 4. keresztmetszeti osztály esetén bekövetkező lemezhorpadások hatását is figyelembe kell venni, így a dolgozó keresztmetszet is kisebb lesz (erre jelen feladat keretei között nem kerül sor). Mivel a mérnöki szakmában a biztonság alapvető szempont és fontos minden szerkezetbe elegendő tartalékot tervezni, így a stabilitásra történő méretezés figyelmen kívül hagyása komoly közelítés a biztonság kárára. A stabilitásvesztés gyakran katasztrófába torkollik.

A stabilitási viselkedés megértéséhez meg kell vizsgálnunk hogyan, és milyen teher alatt tér át a szerkezet stabilból, instabil egyensúlyi állapotba. **Ezt az erőt kritikus** vagy kihajlási **erőnek nevezzük**. A kritikus erő számítható statikai egyenlőségekből, illetve a rendszer potenciális energiájából.

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(v \cdot L)^2}$$

Ahol: $E \cdot I$ a szerkezet hajlító merevsége;
 $v \cdot L$ a szerkezet kihajlási hossza (inflexiós pontok távolsága).

A kritikus erő azonban **tökéletes, lineárisan rugalmas szerkezetre** vonatkozik, amely a valóságban nem létezik. Az ilyen szerkezettel szemben támasztott alapfeltevések:

- Nincsenek geometriai imperfekciók
- Nincsenek sajátfeszültségek
- A támaszokban sincs imperfekció

Valós szerkezetek esetén azonban ez aligha mondható el. A feladat során csak a **geometriai imperfekciókkal** és a **sajátfeszültségekkel** fogunk részletesebben, illetve modellezési szinten foglalkozni. A következőkben vizsgáljuk meg ezeket az imperfekciókat!

Imperfekciók

Geometriai imperfekciók: Mivel a tökéletes szerkezetet legyártása fizikailag lehetetlen, minden egyes szerkezeti elem tartalmazni fog különböző alakhibákat. Ezek kivétel nélkül megjelennek a szerkezeti elemekben akár egy gyengébb keresztmetszeti sík, akár egy kezdeti külpontosság formájában, ami a kritikus erőnél jelentősen kisebb teherintenzitásnál bekövetkező stabilitási tönkremenetelhez vezet. Az elem hossz tengelye soha sem tökéletesen egyenes, így terheletlen állapotban is rendelkezik valamekkora kihajlással, szögelfordulással, aminek köszönhetően a nyomóerő ráengedése után egy nyomaték is megjelenik. Ennek a hatását vesszük figyelembe a **másodrendű számítás**sal.

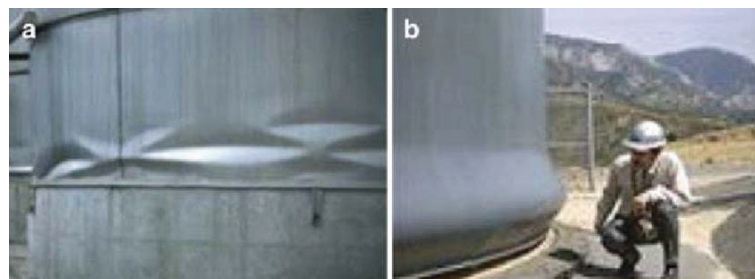
A dolgozat során csak képlékeny feszültségi állapotban lévő elemeket vizsgálunk. Az ezekhez **tartozó kezdeti** alakváltozások az **Eurocode** szabvány **szerint** a későbbiekben alkalmazott görbe függvényében:

-  kihajlási görbére: $e_0/(150 \cdot L)$

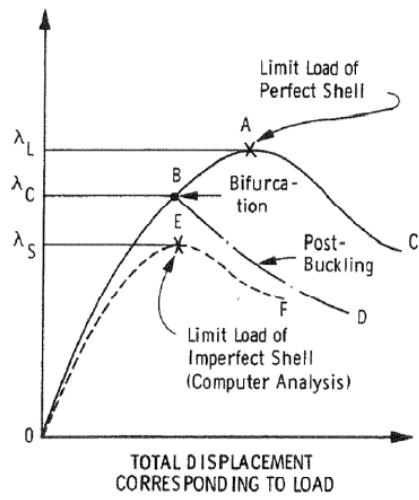
Sajátfeszültségek: Feszültségmentes szerkezeti elem nem létezik, ugyanis a gyártás során is elkerülhetetlenül kialakulnak az elemekben belső feszültségek. Ennek egyik oka lehet a gyártást követő egyenlőtlen lehűlés. A jelenség eredményezheti a keresztmetszet egy részének kimaradását a teherhordásból. A gyártástechnológia jelentősen befolyásolja a sajátfeszültségek értékét és eloszlását. A sajátfeszültségek modellezésével a projekt a későbbiekben foglalkozik.

Posztkritikus viselkedés

A tanulmány elején bemutatott egyensúlyi állapot típusok a kritikus erő elérése után kapnak nagyobb szerepet. A vizsgált **szerkezeti elem** típusa és kialakítása jelentősen **befolyásolja az egyensúlyi útelágazás utáni szakaszt**. Lemezszerkezeteknél ugyanis a membrán analógia jelenlétének köszönhetően számolhatunk egy úgynevezett **posztkritikus tartalékkal**, ez a lemezekre jellemző stabil másodlagos egyensúlyi út hatása. Ez azt jelenti, hogy III. és IV. keresztmetszeti osztály esetén a másodlagos egyensúlyi út további tehernövelésre képes. **Azonban ez héjszerkezetekre nem mondható el. Hengerhajak esetén** (tökéletlen szerkezetekről lévén szó) **a másodlagos egyensúlyi út instabil**, így posztkritikus tartalékkal nem számolhatunk. A hég horpadásos tönkremeneteleinek típusai a 2. ábrán láthatóak.



3. ábra: A hengerhég stabilitási tönkremeneteli módjai:
a) hálós (diamond), b) gyűrűs (elephant foot).



4. ábra: Hengerháj teher-kihajlás görbéje.

2.3. Probléma felvetése

TDK dolgozatomban csőszelvényű nyomott rudak stabilitásvizsgálatával foglalkozok. Összehasonlítom az Eurocode által használt csökkentő tényező eljárás fejlettebb, szimulációs módszereken alapuló teherbírás-vizsgálattal. Véleményem szerint az Eurocode a stabilitásra történő méretezésre túl nagy biztonsággal szolgál, így nem teszi lehetővé a kellően gazdaságos nyomott elemek, s ezáltal az ilyen elemeket tartalmazó szerkezetek tervezését, a többi méretezési eljárás során tőle megszokott módon. Célom az lesz, hogy a **valós szerkezetek** gyártástechnológiából származó **imperfekciónak** (kezdeti alakváltozás és sajátfeszültségek) hatását hasonlítsam össze az Eurocode ajánlásainak hatásával, majd a numerikus modellből kapott eredményekhez saját kihajlási görbét állítok elő, mellyel gazdaságosabb szerkezetek tervezhetők az adott keresztmetszetű szelvényekre.

2.4. Stratégia

A TDK dolgozatomban az alábbi stratégia szerint igyekszek választ találni a problémafelvetésben felvázolt kérdésre.

Elsősorban egy tanulmányban gyűjtöttem ki a fontosabb alapfogalmakat és szükséges mennyiségeket.

Ezt követően egy csuklós-csuklós megtámasztású numerikus, parametrikus modellt építettem ANSYS-ban. Ehhez felvettem egy állandó cső keresztmetszetet, majd a támaszköz módosításával változtattam az elem relatív karcsúságát 0.1-től 2.0-ig. Teherként egy központos nyomóerőt, valamint a gyártásból keletkező imperfekciónak (geometriai imperfekciónak, sajátfeszültségek) alkalmaztam.

A parametrikus modellt lefuttattam a paraméterek módosításával különböző szilárdságokra és keresztmetszeti osztályokra, majd az eredmények kiértékelése után saját kihajlási görbéket állítottam elő.

Ezeket a görbéket összevettem az Eurocode, megfelelő kihajlási görbéjével. Vizsgáltam továbbá a kezdeti imperfekciónak egymáshoz való viszonyát és azok hatását a szerkezeti elem stabilitására.

Végül, de nem utolsó sorban előállítottam egy, az EUROCODE által előírt görbénél gazdaságosabb, függvény által leírt görbét ipari használatra.

3. EUROCODE szerinti stabilitásvizsgálat

Az Eurocode szerinti stabilitásvizsgálat elvégzéséhez a következő lépéseket szükséges elvégezni:

1. Inerciasugár számítása

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

Ahol: I a szerkezet inercianyomatéka;
 A a keresztmetszeti terület.

2. A helyettesítő rúd karcsúsága

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

Ahol: E a rugalmassági modulus;
 f_y a folyáshatár.

3. Karcsúsági tényező

$$\lambda = \frac{v \cdot L}{i}$$

Ahol: $v \cdot L$ az elem kihajlási hossza, csuklós-csuklós megtámasztásnál ez a támaszközszel egyenlő, így a tanulmányban a kihajlási hosszokkal nem foglalkozok.

4. Viszonyított karcsúság

$$\lambda_v = \frac{\lambda}{\lambda_1}$$

5. Kihajlási csökkentő tényező

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda_v^2}} \leq 1.00$$

Valamint:

$$\Phi = \frac{[1 + \alpha \cdot (\lambda_v - 0.2) + \lambda_v^2]}{2}$$

Ahol: α a vizsgált kihajlási görbéhez tartozó alakhiba tényező.

A feladatban vizsgált kihajlási görbéhez tartozó alakhiba tényező:

- © kihajlási görbére: **0.49**

6. Az ellenállás számítása

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

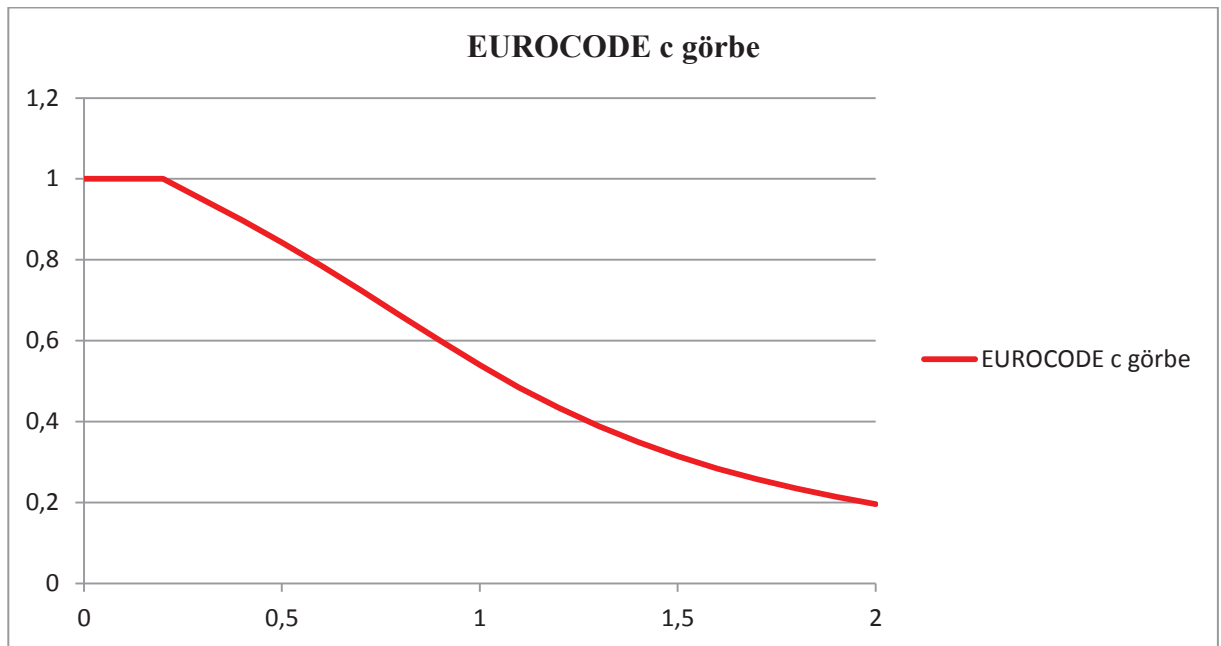
Ahol: γ_{M1} a stabilitási tönkremenetelhez tartozó biztonsági tényező, értéke 1.00 a magas-, 1.10 a hídépítésben.

Kihajlási görbék

Mivel a feladatban vizsgált keresztmetszet zárt szelvényű idomacél (csőszelvény), és a numerikus modellben alkalmazandó acélszilárdság S235 és S420 közé esik, az Eurocode a gyártástechnológia függvényében a következő görbét ajánlja:

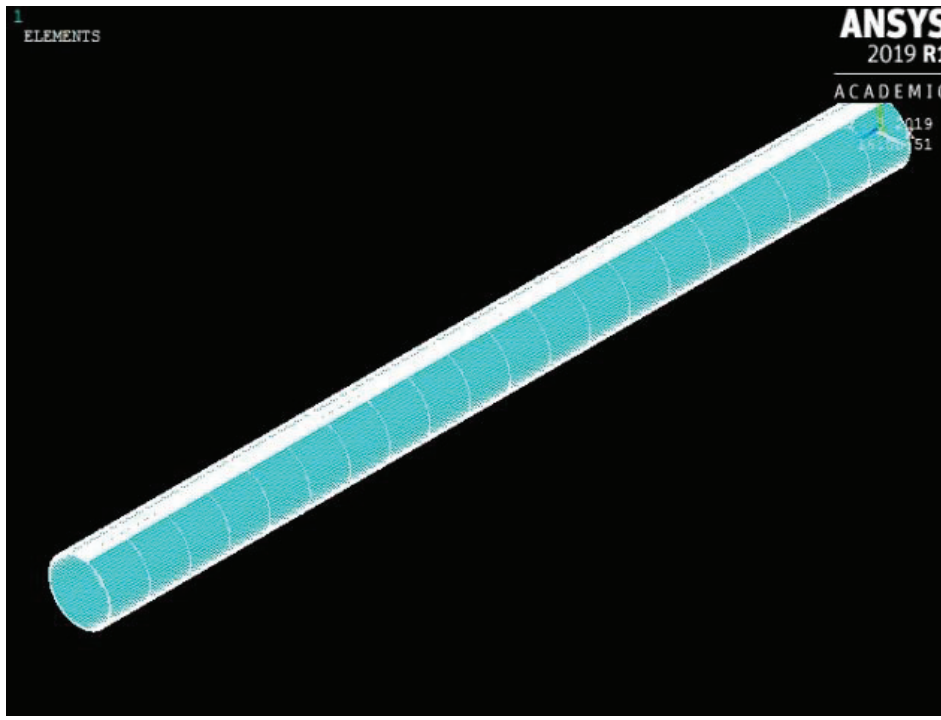
- **hidegen alakított** gyártásmóddal készült esetben a **Ⓒ görbe**

Ezen okból kifolyólag, a feladat keretein belül csak ezt az egy görbét vizsgálom, illetve ezzel hasonlítom össze a modellekből kapott eredményeket.



5. ábra: Az EUROCODE „c” jelű kihajlási görbéje.

4. Numerikus modell bemutatása



6. ábra: ANSYS modell.

4.1. Bevezető

A célkitűzésben megfogalmazott feladat végrehajtásához egy numerikus modellt kellett építeni, A modell építéséhez az ANSYS szoftver APDL modulját használtam. Egyebek mellett vizsgáltam a támaszköz, az oválosodás, és az anyagminőségek hatását. A modell fő változó paraméterének a támaszközt választottam, így a szelvény keresztmetszete, és ezzel a keresztmetszeti tulajdonságai is változatlanok lesznek az adott szilárdságokra, illetve keresztmetszeti osztályokra a teljes modellezés során. Továbbá a hegesztés hatásából esetlegesen fellépő különbségeket is kiküszöböltük az állandó keresztmetszettel.

A modell felépítéséhez Dr. Budaházy Viktor és Kollár Dénes egy korábbi, hasonló témát feldolgozó kutatása, és az ahhoz tartozó modellezési formulák és analógiák voltak segítségemül. A numerikus modell alapja ezek felhasználásával lett elkészítve.

A csőszelvény geometriájának megválasztásakor a következőképpen jártam el:

- A falvastagságot felvettem egy járatos méretre
- A csőszelvények keresztmetszeti osztályozásának határai alapján felvettem a külső átmérőt úgy, hogy a szelvény az éppen vizsgált keresztmetszeti osztályba tartozzon
- Kiszámítottam a feladat során használatos keresztmetszeti tulajdonságokat

- A karcsúsági tényező és a viszonyított karcsúság függvényében kifejeztem a támaszközt, mint változó paramétert
- A választott csuklós-csuklós megtámasztási viszonyokból, a hegesztett, hidegen alakított gyártástechnológiából és az alkalmazott acél anyagminőségéből adódik ν (befogási tényező) és α (alakhiba tényező) értéke.
- Ezek alapján már számítható a különböző karcsúságokhoz tartozó támaszközök mértéke.

A fent leírt eljárás, lépésről lépésre

A vizsgálat során **S235**, **S275**, **S355** és **S420** minőségű **acélt** alkalmazok, melyekhez hegesztett, hidegen alakított cső szelvényre az EUROCODE a **c** jelű **kihajlási görbét** rendel. Ezzel a görbével fogom összevetni a numerikus modelltől számított eredményeket.

Az acélok szilárdságtól független anyagtulajdonságai:

Rugalmassági modulus: $E := 210000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Poisson-tényező: $\nu_p := 0.3$

Nyírási modulus: $G := \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu_p)} = 80769.231 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Az egyes acélok szilárdságfüggő anyagtulajdonságai:

S235

Folyáshatár: $f_{yd} := 23.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$

Szakítószilárdság: $f_u := 36.0 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$

$$\varepsilon_w := \sqrt{\frac{23.5}{f_{yd} \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{kN}}}} = 1$$

S275

Folyáshatár: $f_{yd} := 27.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$

Szakítószilárdság: $f_u := 43.0 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$

$$\varepsilon_{\text{ww}} := \sqrt{\frac{23.5}{f_{yd} \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{kN}}}} = 0.924$$

S355

Folyáshatár: $f_{yd} := 35.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$

Szakítószilárdság: $f_u := 49.0 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$

$$\varepsilon_{\text{ww}} := \sqrt{\frac{23.5}{f_{yd} \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{kN}}}} = 0.814$$

S420

Folyáshatár: $f_{yd} := 42.0 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$

Szakítószilárdság: $f_u := 52.0 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$

$$\varepsilon_{\text{ww}} := \sqrt{\frac{23.5}{f_{yd} \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{kN}}}} = 0.748$$

4.2. Keresztmetszeti geometria felvétele

A keresztmetszet méreteit egy felvett, az építőiparban járatos mérethez rendelem hozzá a keresztmetszeti osztályba sorolás metódusa szerint.

A körszelvény falvastagsága: $t := 3\text{mm}$

Körszelvény esetén a különböző keresztmetszeti osztályokba történő besorolás feltételei

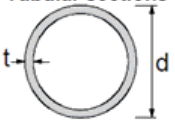
I. keresztmetszeti osztály: $\frac{d}{t} \leq 50\epsilon^2$

II. keresztmetszeti osztály: $50\epsilon^2 \leq \frac{d}{t} \leq 70\epsilon^2$

III. keresztmetszeti osztály: $70\epsilon^2 \leq \frac{d}{t} \leq 90\epsilon^2$

IV. keresztmetszeti osztály: $90\epsilon^2 \leq \frac{d}{t}$

IV. keresztmetszeti osztályú szelvény vizsgálatára a feladat keretei közt nem került sor, ugyanis a lokális héjhorpadások jelentős viselkedésbeli különbséget jelenthetnek.

Tubular sections	
	
Class	Section in bending and/or compression
1	$d/t \leq 50\epsilon^2$
2	$d/t \leq 70\epsilon^2$
3	$d/t \leq 90\epsilon^2$
<p>NOTE For $d/t > 90\epsilon^2$ see EN 1993-1-6.</p>	

7. ábra: Csőszelvény keresztmetszeti osztályba sorolása.

Példaként elvégzem a kiindulási adatok számítását egy II. keresztmetszeti osztályú, S235 anyagminőségű acélra.

Határértékek számítása a d/t értékre: - minimum: $50\epsilon^2 = 50$

- maximum: $70\epsilon^2 = 70$

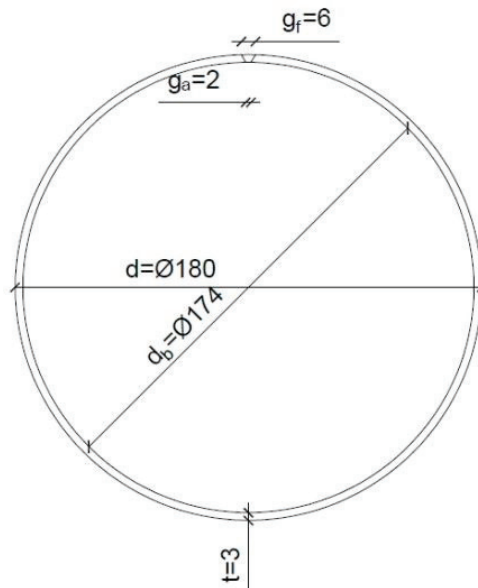
Ezek alapján a d/t értéket **60**-ra veszem fel: $\frac{d}{t} = 60$

A körszelvény külső átmérője: $d := 60t = 180 \text{ mm}$

$$r := \frac{d}{2} = 90 \text{ mm}$$

A belső átmérő: $d_b := d - 2 \cdot t = 174 \text{ mm}$

$$r_b := \frac{d_b}{2} = 87 \text{ mm}$$



8. ábra: A példában felvett II. keresztmetszeti osztályú csőszelvény.

A 7. ábrán láthatóak a keresztmetszet hegesztési varratának méretei mm-ben. Ezt egy járatos méret alapján felvettem a belső élre 2 mm-re, majd 60° -os nyílási szöget feltételezve számoltam a külső élre jutó ~ 6 mm széles értéket. Ez természetesen más keresztmetszeti osztályoknál a különböző átmérők és ezáltal görbületek miatt kis mértékben változik. A pontosabb modellezés érdekében ezt parametrikusan vettem figyelembe a következőképpen:

Alsó hézag: $g_a := 2\text{mm}$

Nyílásszög: $\omega := 60^\circ$

Felső hézag:
$$g_f := \sqrt{2 \cdot \left(\frac{g_a}{2 \cdot \sin\left(\frac{\omega}{2}\right)} + \frac{t}{\cos\left(\frac{\omega}{2}\right)} \right)^2 \cdot (1 - \cos(\omega))} = 5.464\text{mm}$$

A keresztmetszet tulajdonságai

Keresztmetszeti terület: $A := (r^2 - r_b^2) \cdot \pi = 16.682\text{cm}^2$

Inercia: $I_y := \frac{(r^4 - r_b^4) \cdot \pi}{4} = 653.47\text{cm}^4$

Inerciasugár: $i := \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 6.259\text{cm}$

Helyettesítő karcsúság: $\lambda_1 := \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_{yd}}} = 93.913$

A numerikus modellekhez, a viszonyított karcsúság változtatásával állítom elő a támaszközöket.

Karcsúsági tényező: $\lambda = \frac{v \cdot L}{i}$

Viszonyított karcsúság: $\lambda_v = \frac{\lambda}{\lambda_1}$

Ebből:
$$L = \frac{\lambda_v \cdot \lambda_1 \cdot i}{v}$$

Ettől a ponttól a korábban bevezetett stabilitásvizsgálat lépéseit követve juthatunk el az ellenállásig. Ezt egy példán keresztül be is mutatom, a későbbiekben ugyanis a számítás helyének megtakarítása érdekében vektoros számítási módszert alkalmazok, így a számítás menete nem lesz nyomon követhető. A példában legyen: $\lambda_v := 0.8$

További, a számítás során alkalmazott tényezők:

Csuklós-csuklós megtámasztási viszonyok esetén: $v := 1.0$

Használandó görbe: \underline{c} $\alpha := 0.49$

Stabilitási tönkremenetelhez tartozó biztonsági tényező: $\gamma_{M1} := 1.1$

Támaszköz:
$$L_1 := \frac{\lambda_v \cdot \lambda_1 \cdot i}{v} = 4702 \text{ mm}$$

Számítás az EUROCODE alapján

$$\Phi := \frac{1 + \alpha \cdot (\lambda_v - 0.2) + \lambda_v^2}{2} = 0.967$$

Kihajlási csökkentő tényező:
$$\chi := \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda_v^2}} = 0.662$$

Kihajlási ellenállás:
$$N_{b,Rd} := \chi \cdot \frac{A \cdot f_{yd}}{\gamma_{M1}} = 259.58 \text{ kN}$$

Ezt az analógiát követve egy vektorba kigyűjtöttem a **0.1-től 2.0-ig** terjedő **karcsúsági** tartományt, amely magában foglalja és körül is öleli a hídépítésben gyakorta használt karcsúságokat. A vektor elemei között a **lépésközt 0.1-re** vettem fel, ezzel már megfelelő finomságú kihajlási görbét szerkeszthetünk.

Ezekből a karcsúságokból számítjuk a támaszközöket a numerikus modellekhez, így (mivel a keresztmetszet állandó) az egyes modellek karcsúságai meg fognak egyezni a vektorban összegyűjtöttekkel.

A következőkben a modellekhez használatos támaszközöket (és annak számításához szükséges mennyiségeket) számítom, és gyűjtöm ki vektorokban, majd listázom egy táblázatban a különböző karcsúságokhoz tartozó értékeket.

4.3. A szükséges paraméterek számítása

Vektoros formában

A vizsgált karcsúságok: $\lambda_{v,i} :=$

$$\begin{pmatrix} 0.1 \\ 0.2 \\ 0.3 \\ 0.4 \\ 0.5 \\ 0.6 \\ 0.7 \\ 0.8 \\ 0.9 \\ 1.0 \\ 1.1 \\ 1.2 \\ 1.3 \\ 1.4 \\ 1.5 \\ 1.6 \\ 1.7 \\ 1.8 \\ 1.9 \\ 2.0 \end{pmatrix}$$

A numerikus modellekhez szükséges támaszközök: $L_i := \frac{\lambda_{v,i} \cdot \lambda_{1,i}}{v}$

Φ tényezők: $\Phi_i := \frac{[1 + \alpha \cdot (\lambda_{v,i} - 0.2) + \lambda_{v,i}^2]}{2}$

Kihajlási csökkentő tényezők: $\chi_i := \frac{1}{\Phi_i + \sqrt{\Phi_i^2 - \lambda_{v,i}^2}}$

$L_i =$ $\cdot \text{mm}$

	0
0	440
1	879
2	1319
3	1759
4	2198
5	2638
6	3078
7	3517
8	3957
9	4397
10	4836
11	5276
12	5716
13	6155
14	6595
15	7035
16	7474
17	7914
18	8354
19	8793

$\Phi_i =$

	0
0	0.48
1	0.52
2	0.57
3	0.629
4	0.699
5	0.778
6	0.867
7	0.967
8	1.077
9	1.196
10	1.326
11	1.465
12	1.615
13	1.774
14	1.944
15	2.123
16	2.313
17	2.512
18	2.721
19	2.941

$\chi_i =$

	0
0	1.0521
1	1
2	0.9491
3	0.8973
4	0.843
5	0.7854
6	0.7247
7	0.6622
8	0.5998
9	0.5399
10	0.4842
11	0.4338
12	0.3888
13	0.3492
14	0.3145
15	0.2842
16	0.2577
17	0.2345
18	0.2141
19	0.1962

A kihajlási csökkentő tényező természetesen felülről korlátozott, 1.00 értékben, így a 0.1-es karcsúsági értékhez tartozó kihajlási csökkentő tényező is 1.00.

Ezekből már számíthatóak az Eurocode szerinti kihajlási ellenállás tervezési értékei, melyek közlése a feladat szempontjából irreleváns, hiszen a kihajlási csökkentő tényezők összehasonlítása az ellenállások összehasonlításával teljesen analóg, így a feladat megoldásához szükségtelen kiszámolni őket.

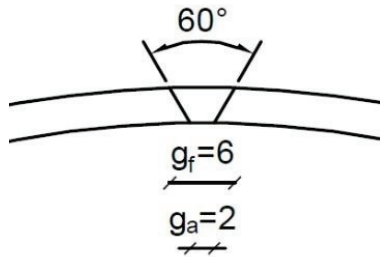
Karcsúság λ [-]	Támaszköz L [m]	Φ	χ
0	0	0,451	1
0,1	587,801467	0,4805	1
0,2	1175,602934	0,52	1
0,3	1763,404401	0,5695	0,949147795
0,4	2351,205868	0,629	0,897320772
0,5	2939,007335	0,6985	0,84299103
0,6	3526,808802	0,778	0,785384591
0,7	4114,610269	0,8675	0,724688919
0,8	4702,411736	0,967	0,662154766
0,9	5290,213203	1,0765	0,599830672
1	5878,01467	1,196	0,539939027
1,1	6465,816137	1,3255	0,484247232
1,2	7053,617604	1,465	0,433769485
1,3	7641,419071	1,6145	0,388817962
1,4	8229,220538	1,774	0,349219299
1,5	8817,022005	1,9435	0,314535022
1,6	9404,823472	2,123	0,284220452
1,7	9992,624939	2,3125	0,257719247
1,8	10580,42641	2,512	0,234511531
1,9	11168,22787	2,7215	0,214133821
2	11756,02934	2,941	0,19618362

1. táblázat: Vizsgált rúdkarcsúságok és a hozzájuk tartozó számított értékek

4.4. ANSYS modell felépítése

Elsősorban a modellhez szükséges bemenő paraméterek kerültek definiálásra, mint a folyáshatár (f_y), illetve a keresztmetszeti ellenállás (F). Az alkalmazott acél anyagminőségének megfelelően vettem fel a folyáshatárt, valamint a szakítószilárdságot. Az definiált nyomóerő mértékét a keresztmetszet húzási ellenállásával egyenértékűre választottam. Az erő normálásakor ezzel az F erővel osztottam le az egyes modellek kihajlásához tartozó erőt, így input paraméterként elmozdulás [mm] fajlagos erő [-] pontpárokat tartalmazó táblázatokat kaptam. A fajlagos erő maximuma maga, a kihajlási csökkentő tényező.

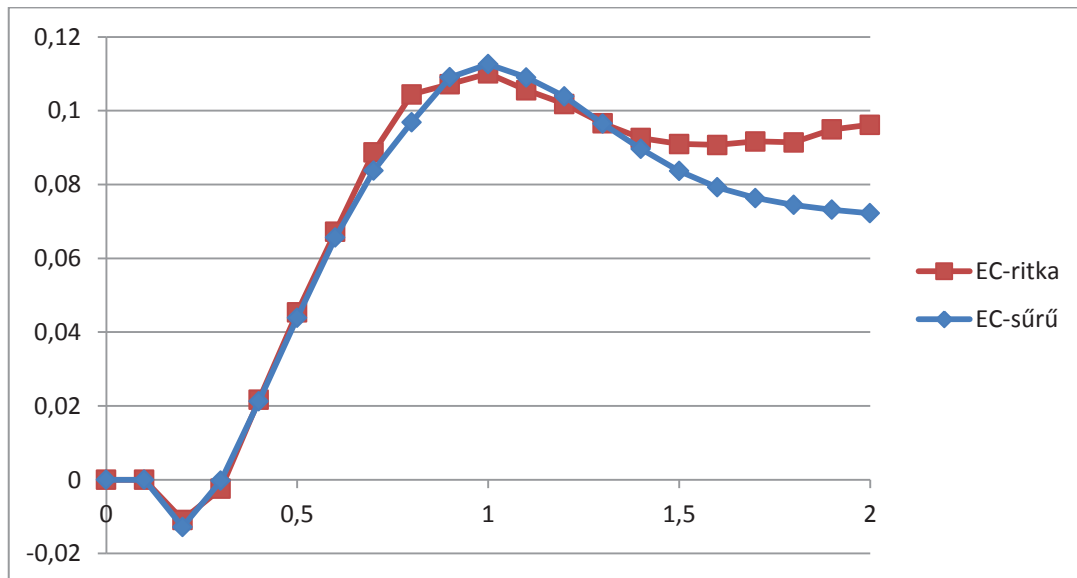
A feladatban **testmodell**t alkalmaztam, mely lehetővé teszi a hegesztésből és hidegen alakításból származó **saját feszültségek** figyelembevételét. A keresztmetszet geometriáját a korábban tárgyaltak alapján vettem fel. A falvastagság értéke 3 mm, a külső átmérő a szilárdság, illetve a keresztmetszeti osztály függvényében változik. A hegesztési hézag mértékére a korábban leírtakkal megegyező módon, a csőszelvény belső felületén 2 mm-es értéket alkalmaztam. Erre az értékre a külső felületen az él-lemunkálás és a $\sim 60^\circ$ -os varratmeredekség figyelembevételével számítottam az értékeket.



9. ábra: Az alkalmazott hegesztési geometria.

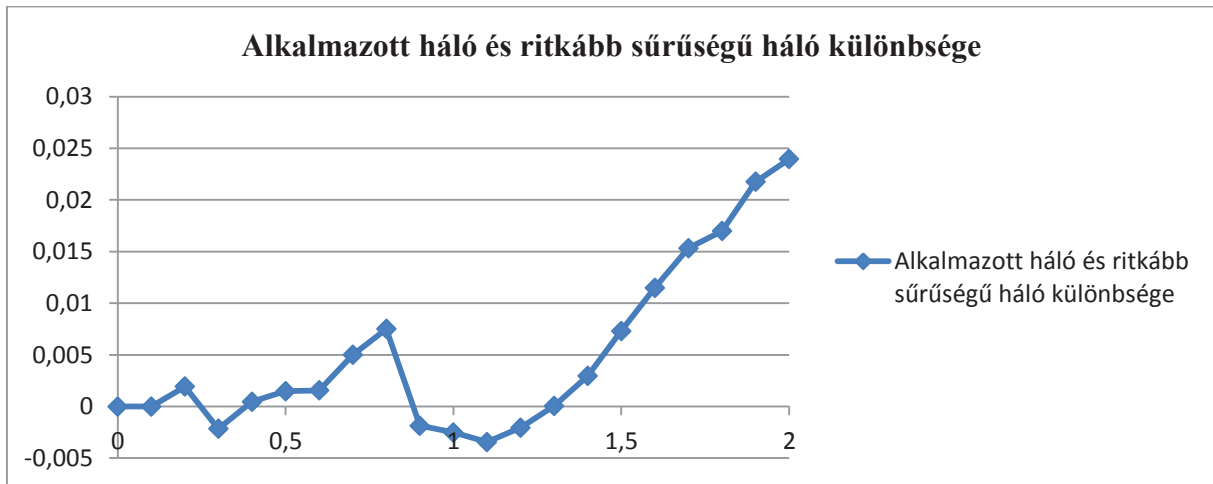
4.5. A végelemek kiosztása

A háló méreteinek meghatározására több futtatást végeztem, a háló sűrűségének változtatásával. Az alábbi ábrán a megfelelő sűrűségű végelem háló és egy nem kellő sűrűségű háló az EUROCODE által ajánlott görbétől való eltérései láthatók.



10. ábra: Végeselemes háló elegendően sűrű és ritka kiosztásának hatása.

Megfigyelhető, hogy míg az elég sűrű hálóval felosztott modell görbéje szép, folyamatos meredekség váltással jellemezhető, addig a ritka végelemhálós modell eredményeiben ingadozások és hirtelen meredekség változások vannak.

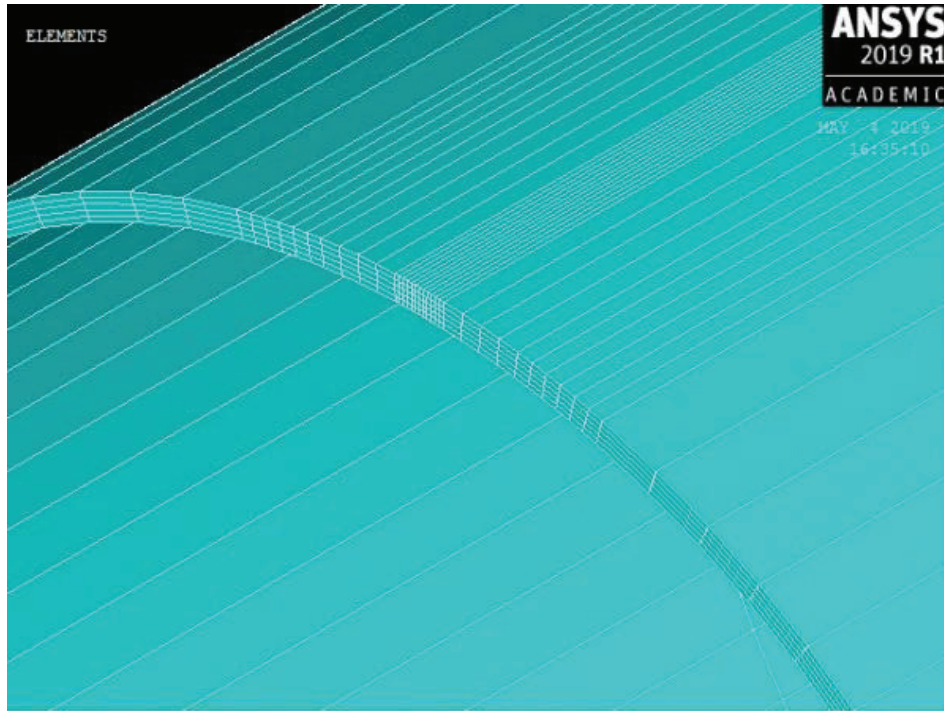


11. ábra: Végeselemes háló elegendően sűrű, illetve ritka kiosztásának különbsége.

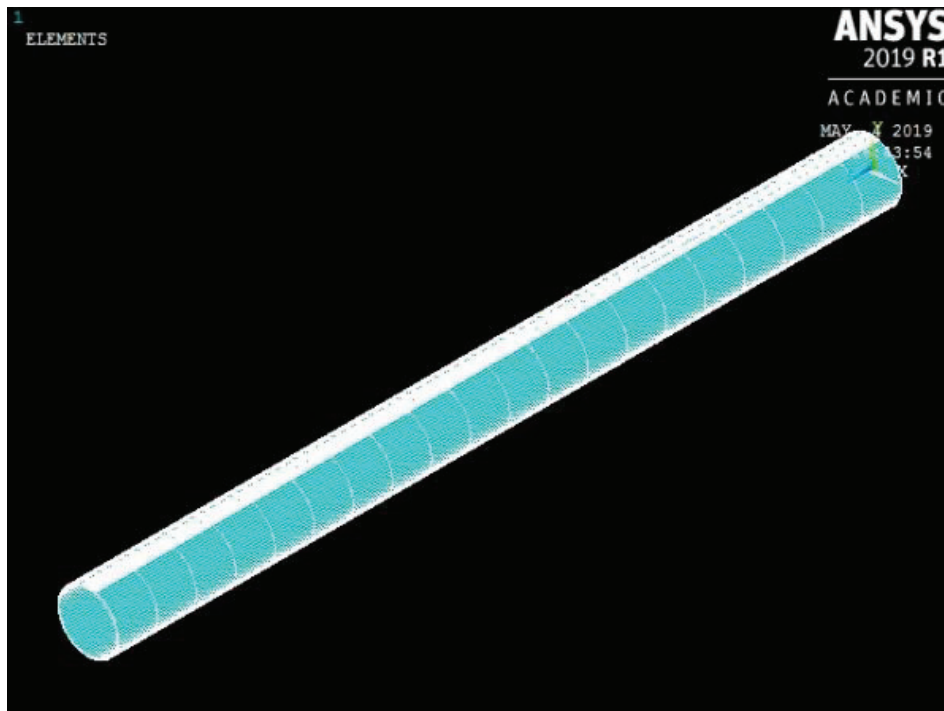
A két különböző hálósűrűségű modell eredményei több helyen is keresztezik egymást, ebből is látszik, hogy a túl ritka végeselemhálós modell nem konvergál a feladat elvégzéséhez szükséges precizitással.

Fontos megjegyezni, hogy a numerikus modellen elmozdulás-vezérelt megoldásmódot választottunk, hogy a maximális érték elérése utáni viselkedés is nyomon követhető legyen.

A végül alkalmazott végeselem háló elemeinek rúdtengely irányú mérete a rúd hosszának 20-ad részeként lett definiálva, így annak valós mérete a támaszközzel együtt, avval arányosan változik. A sugárirányú méret megválasztásakor szem előtt kellett tartani, hogy a modell sajátfeszültségekkel terhelt, így ezt a felosztást aránylag sűrűre állítottuk. Ennek megfelelően a szelvény 3 mm vastag falát 5 rétegre osztottuk fel. A körív mentén az átlagos elemméretre a hossz tengely körüli 6°-os elfordulásnak megfelelő ívhosszt rendeltünk, ezen felül a hegesztési varrat környezetében a hálót sűrűbbre állítottuk a pontosabb eredmény érdekében.

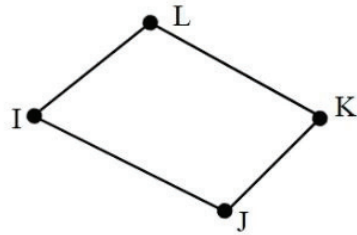


12. ábra: Végeselemes háló kiosztása a keresztmetszet mentén, a varrat közelében.



13. ábra: Végeselemes háló kiosztása a hossz tengely mentén.

A háló generálását a MESH200 paranccsal végeztem, melyben a 6-os KEYOPT-tal a végeselemeket, a jelen feladathoz legideálisabb négyszög alakúra állítottam.

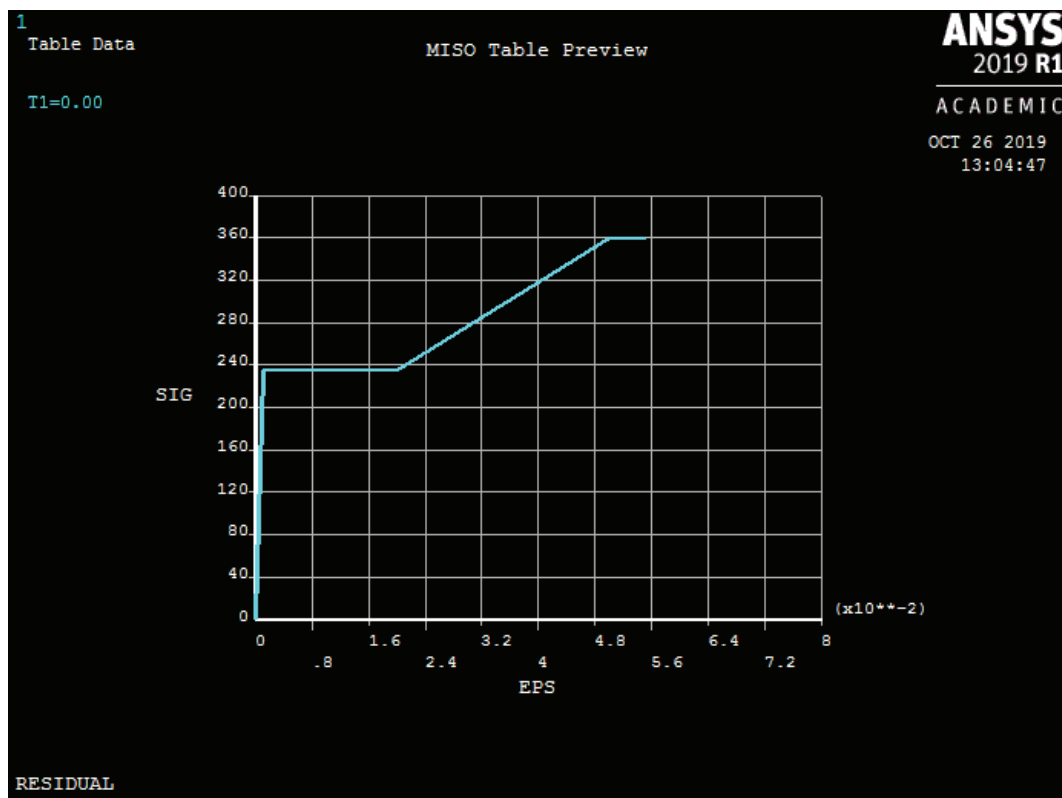


KEYOPT (1) = 6
3-D quadrilateral with 4 nodes

14. ábra: Az alkalmazott MESH200 négyszög alakú végelem típusa.

4.6. Anyagmodell

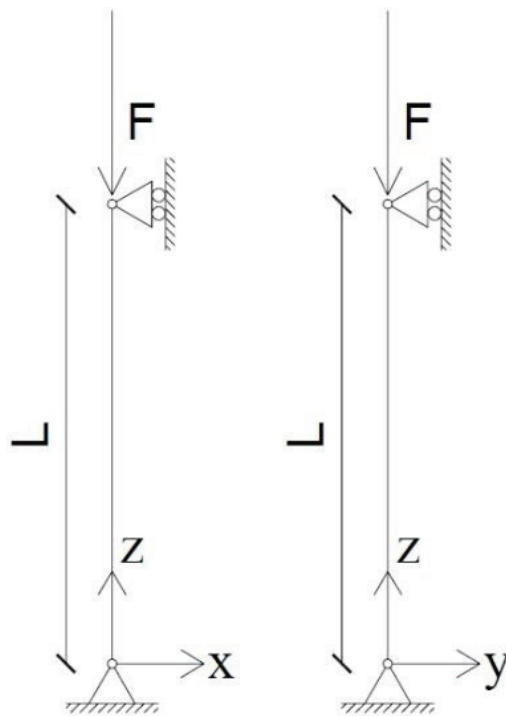
A Stabilitásvizsgálathoz keményedni képes anyagmodell használata javasolt, így MISO (multilinear isotropic hardening plasticity) anyagmodell alkalmazása mellett döntöttem, mely az acél anyag valós viselkedését leginkább képes megközelíteni. Az anyagmodellt úgy definiáltam, hogy folyáshatár eléréséig az acél általános rugalmassági modulusa a σ - ϵ diagram meredeksége, inentől viszont a meredekség az eddigi 1000-ed részére csökken (konstansnak tekinthető, egy folyási platót kialakítva ezzel), egészen a 2%-os fajlagos nyúlás eléréséig. Ezt követően, 5%-os fajlagos nyúlásnál éri el a szakítószilárdságot..



15. ábra: Az alkalmazott multilineáris anyagmodell σ - ϵ diagramja.

4.7. Statikai váz

A modellek statikai váza megegyezik az egyszerű stabilitási vizsgálatoknál alkalmazott modell statikai vázával. Az egyik végén minden irányban csuklós megtámasztású, míg a másik végén a rúdtengely irányában nincs megtámasztva, a másik két irányban csuklós. Ez utóbbi végén hat a központos nyomóerő. Térben mindkét irányban **csuklós-görgős** támasszal modellezhetjük. Ez a váz statikailag **határozott**, így a kényszerek miatt nem kell többlet belső feszültségekkel számolni. A szerkezet ugyanakkor **imperfekt**, így a hegesztésből és a hidegen alakításból származó belső feszültségek, továbbá kezdeti alakváltozások, mint az ovális keresztmetszet, vagy a kardosodás terhelik.



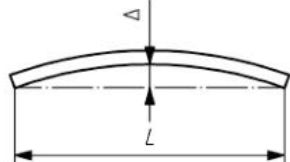
16. ábra: A modell statikai váza az x-z, illetve az y-z koordinátarendszerben

4.8. Imperfekciók

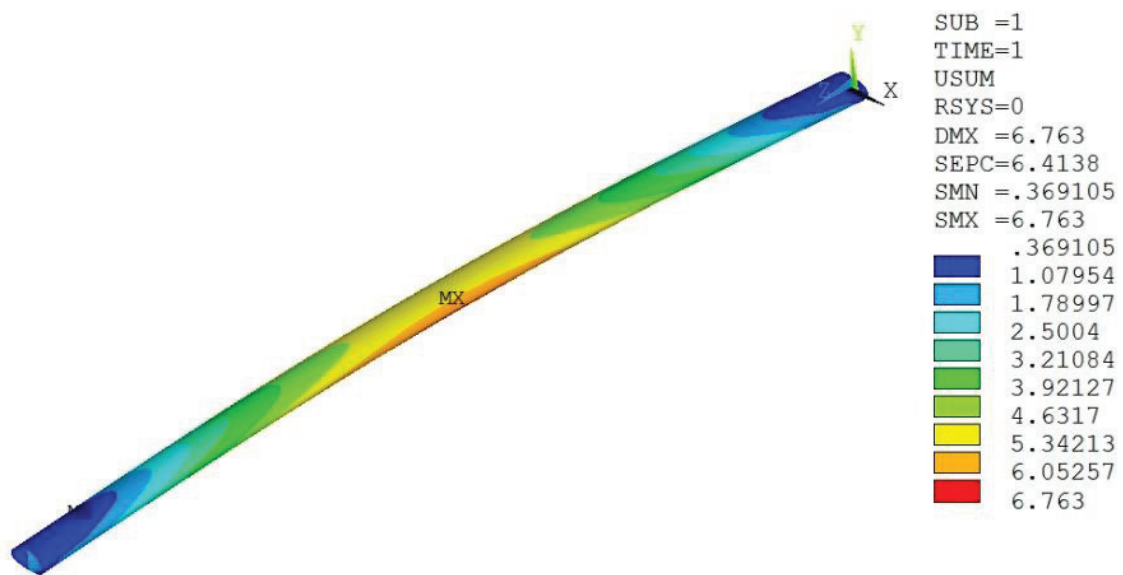
A szerkezetet tökéletlen, az azt terhelő imperfekciókat a következőkben külön-külön fogom tárgyalni.

- Kardosság

Terheletlen állapotban a rúdtengely egyenestől való eltérését nevezzük kardosságnak, mely mértékét a középső keresztmetszet egy pontjának távolsága adja, ugyanezen pont elméleti helyétől tökéletesen egyenes tengely esetén. A kardosságot az EUROCODE szabvány előírását követve vettem fel, amely a támaszköz 1000-ed részére ad ajánlást. Ugyan a szabvány II. keresztmetszeti osztályánál 3, I. keresztmetszeti osztály esetében 5 mm-ben minimalizálja a kardosság értékét, a feladatban ezektől a korlátoktól eltekintek, hogy az eredmények az arányoknak megfelelőek lehessenek.

Criterion	Parameter	Functional tolerances ^a Permitted deviation Δ	
		Class 1	Class 2
Straightness: 	Deviation Δ from rectangular axes of a fabricated or press braked section:	$\Delta = \pm L/1000$ but $ \Delta \geq 5$ mm	$\Delta = \pm L/1000$ but $ \Delta \geq 3$ mm

17. ábra: EN-1990-2:2018 ajánlása a szerkezetes kardosodásának értékére.



18. ábra: A modellen alkalmazott kardosság 25-szörös torzításban.

- Ovális keresztmetszet

A keresztmetszet oválosodása a szerkezeten elmozdulás-teherként lett definiálva. A tökéletes keresztmetszettől való eltérést az EN 1993-1-6 a szelvény gyártási pontatlanságokra vonatkozó érzékenysége alapján kategorizálja. 3 osztályt különböztet meg. Az **A** osztályba a **kiváló**, a **B** osztályba a **magas**, a **C** osztályba pedig a **normális** gyártási pontatlansággal szembeni toleranciájú elemek sorolandók. Ezek, és az átmérő alapján az Eurocode egy U_r paramétert határoz meg, amelyből meghatározható az ovális keresztmetszetre alkalmazandó maximális és minimális átmérő értéke.

Table 8.1: Recommended values for out-of-roundness parameter $U_{r,max}$

	Diameter range	$d [m] \leq 0,50m$	$0,50m < d [m] < 1,25m$	$1,25m \leq d [m]$
Fabrication tolerance quality class	Description	Recommended value of $U_{r,max}$		
Class A	Excellent	0,014	$0,007 + 0,0093(1,25-d)$	0,007
Class B	High	0,020	$0,010 + 0,0133(1,25-d)$	0,010
Class C	Normal	0,030	$0,015 + 0,0200(1,25-d)$	0,015

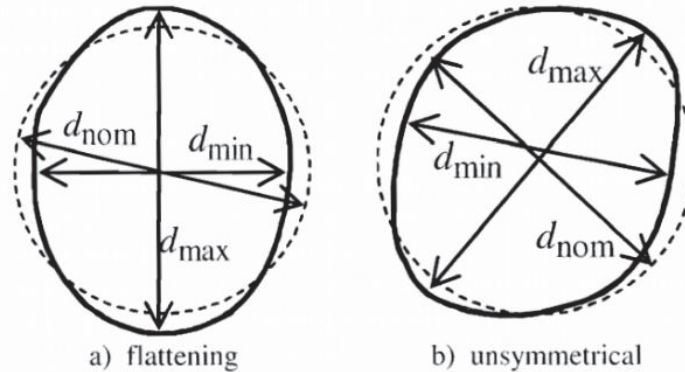


Figure 8.2: Measurement of diameters for assessment of out-of-roundness

19. ábra: EN-1993-1-6 előírása csőszelvény oválosodására.

$$U_r = \frac{d_{max} - d_{min}}{d_{nom}}$$

Ahol: d_{nom} a csőszelvény középvonalának átmérője;
 d_{max} a maximális átmérő;
 d_{min} a minimális átmérő.

B osztály: magas gyártási tolerancia minőségi osztály, $d < 0,5m$

$$U_r := 0.02t$$

A feladatban alkalmazott keresztmetszetre

Középvonal átmérője: $d_{nom} := d - 2 \frac{t}{2} = 177 \text{ mm}$

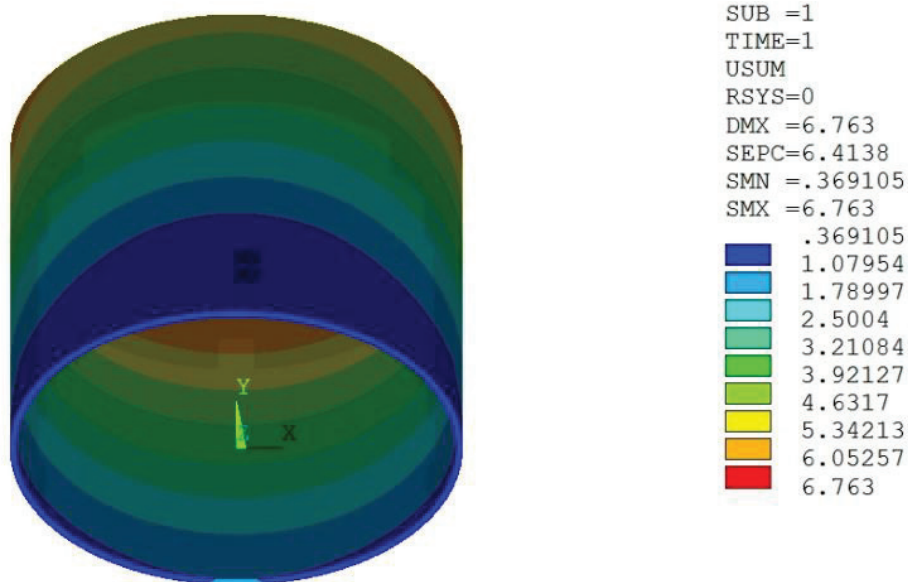
A projektfeladat során **B osztályú (magas)** gyártási pontatlanságokkal szembeni toleranciát tételezünk fel.

$$\Delta := U_r \cdot d_{\text{nom}} = 3.54 \text{ mm}$$

$$\frac{\Delta}{2} = 1.77 \text{ mm}$$

$$\text{Maximális átmérő: } d_{\text{max}} := d_{\text{nom}} + \frac{\Delta}{2} = 178.77 \text{ mm}$$

$$\text{Minimális átmérő: } d_{\text{min}} := d_{\text{nom}} - \frac{\Delta}{2} = 175.23 \text{ mm}$$

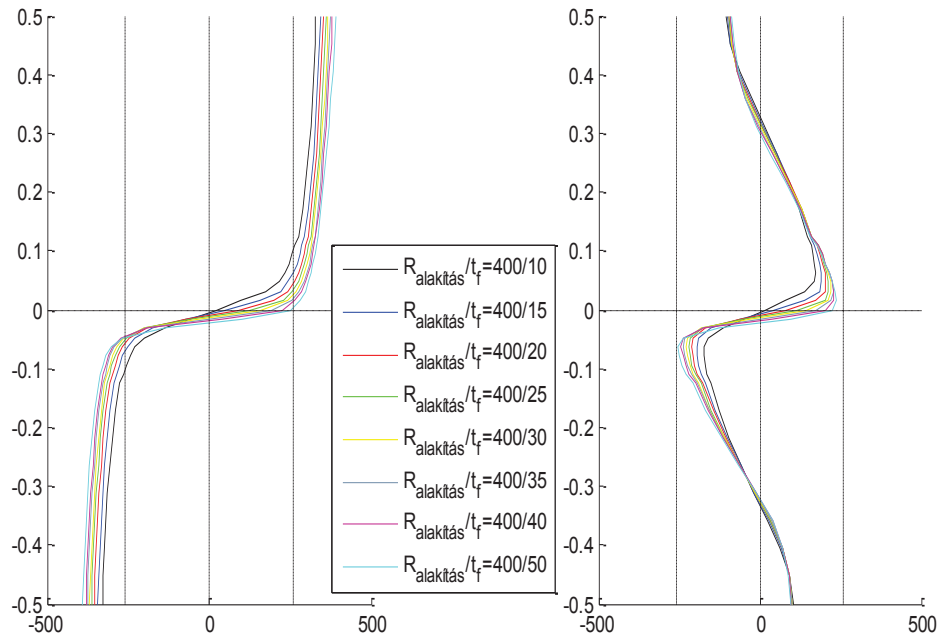


20. ábra: A modellen alkalmazott keresztmetszeti oválosodás 25-szörös torzításban.

- Sajátfeszültségek a hidegen alakításból

A cső keresztmetszeti szelvények hidegen alakítása során, a lemez többszörösen végigmegy egy hajlító pofán, mely egyre jobban hengeríti. A hidegen alakításból származó feszültségek önmagukban, egyensúlyban lévő feszültségrendszert alkotnak.

A modellezés során ezt egy, a teljes elemfelületen megoszló, állandó nagyságú, sugár irányú feszültségként vettük figyelembe. Továbbá a vastagság mentén változó feszültséget modelleztünk, a folyási feszültség függvényében, Dr. Budaházy Viktor „Energiatermelő berendezések nagy teljesítőképességű acél szerkezeti elemeinek kutatás-fejlesztése” című korábbi kutatásának eredményeiből kiindulva.

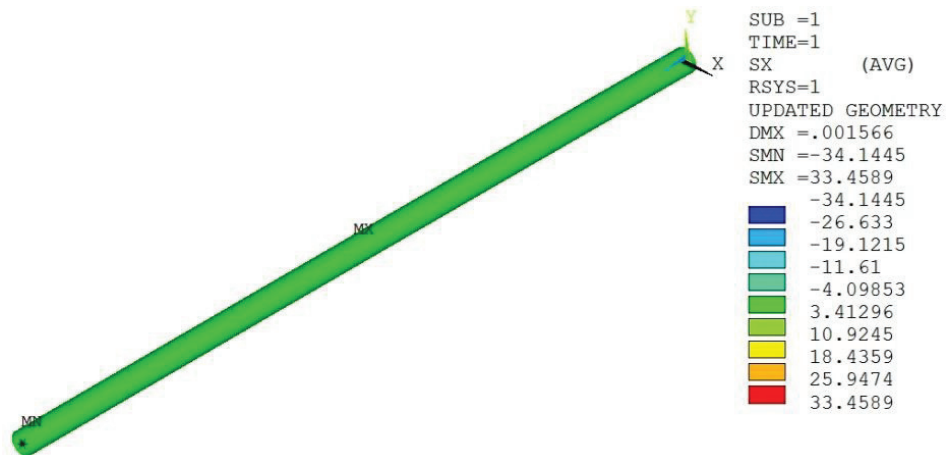


21. ábra: Gyártás közbeni maradó sajátfeszültség eloszlás

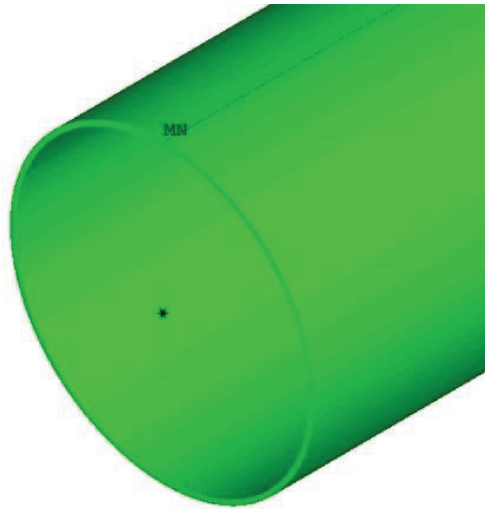
- Sajátfeszültségek a hegesztésből

A hegesztési sajátfeszültségek figyelembevételét, egy, a rúd hossz tengelyével (mely egyben a varrat hossz tengelye is) megegyező irányú, az anyag folyáshatárával megegyező nagyságú feszültség alkalmazásával oldottuk meg a varrat helye mentén, Kollár Dénes kutatásainak felhasználásával.

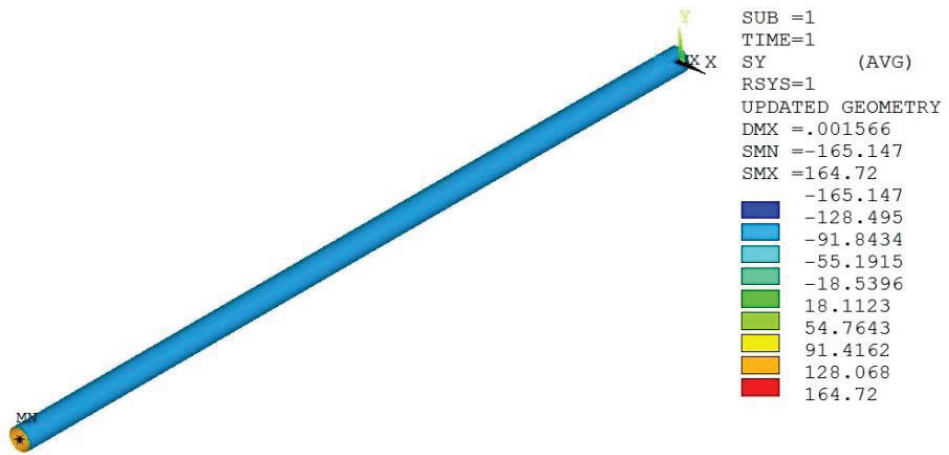
Ezen elveket követve, a modellen az erő ráengedésének pillanatában a következő ábrák által bemutatott feszültségrendszer található. Az ábrák poláris koordinátarendszerben mutatják be a feszültségeket.



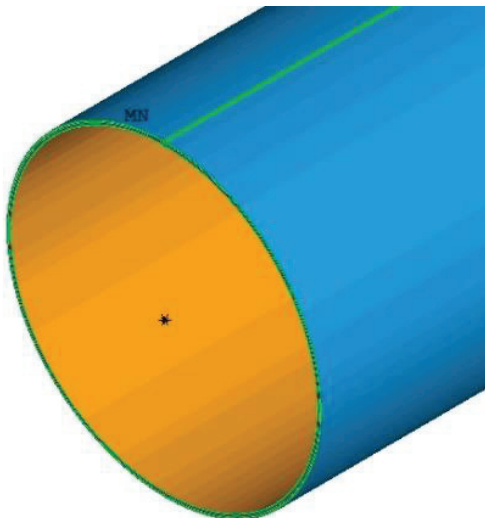
22. ábra: Sugár irányú feszültségek (1).



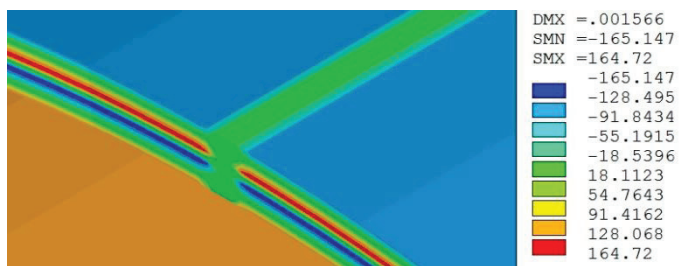
23. ábra: Sugár irányú feszültségek (2).



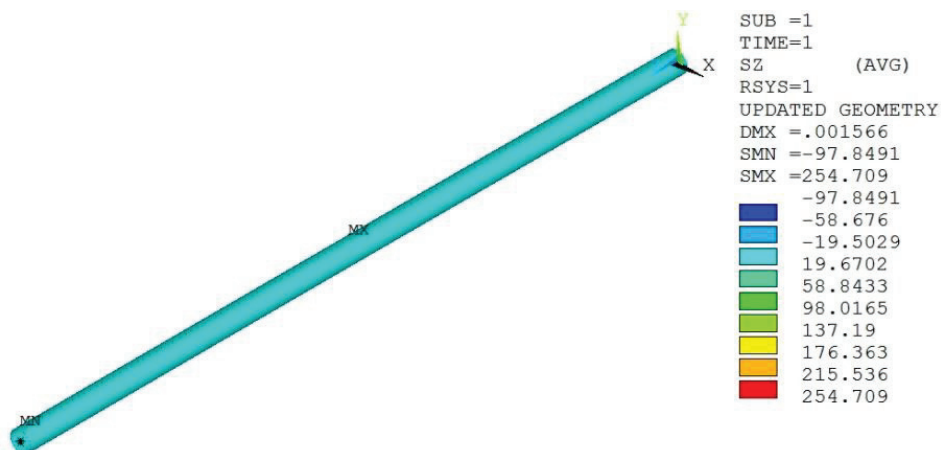
24. ábra: Gyűrű irányú feszültségek (1).



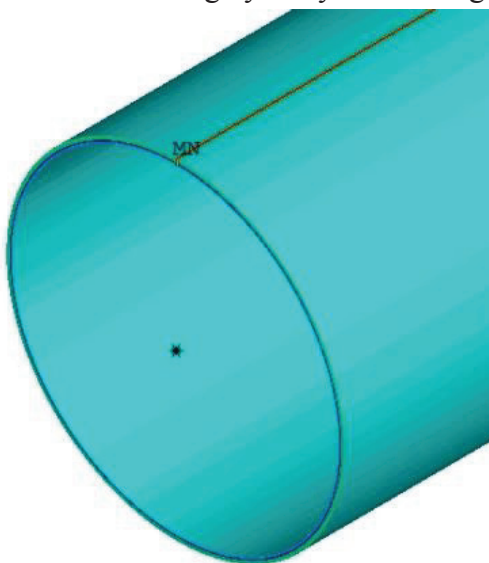
25. ábra: Gyűrű irányú feszültségek (2).



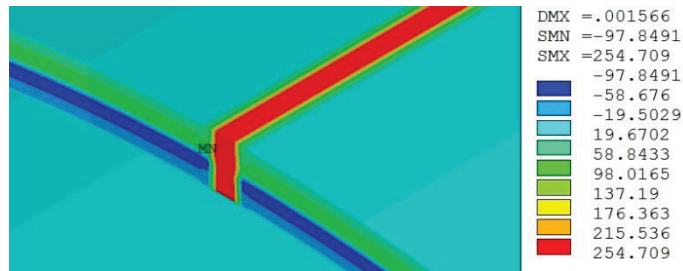
26. ábra: Gyűrű irányú feszültségek eloszlása a vastagság mentén, a varrat környezetében.



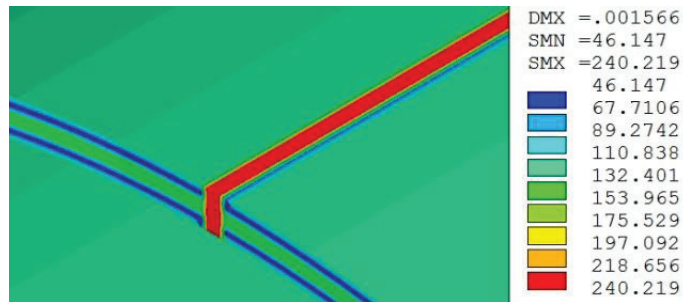
27. ábra: Hossztengely irányú feszültségek (1).



28. ábra: Hossztengely irányú feszültségek (2).



29. ábra: Hossztengely irányú feszültségek eloszlása a vastagság mentén, a varrat környezetében.



30. ábra: Von Mises feszültségek.

- Kardosság és oválosodás viszonya

Az imperfekciók szerkezetre gyakorolt hatására nem csak az imperfekciók mérete, de az egymással való interakciója és ezáltal helyzete is szerepet játszik. A kardosodás és oválosodás kölcsönhatása valószínűsíthetően úgy van a legrosszabb hatással a szerkezetre, ha a kardosság amplitúdójának iránya merőleges az oválosodott keresztmetszet hosszabb átlójára. Ez azt eredményezi, hogy a másodrendű igénybevételeként fellépő hajlítás tengelyében az inercianyomaték lecsökken, így megnő a feszültség. Ezt a későbbiekben egy, a két imperfekció egymáshoz viszonyított helyzetét vizsgáló modell segítségével részletesen is kifejtem.

Érdeemes azt is itt megjegyezni, hogy a hegesztési varrattal szemben, a varrat összehúzódásából is keletkezik egy lényegesen kisebb kihajlás, mely szintén felerősítheti a kardosság hatását.

5. Parametrikus vizsgálatok

A következőkben feltüntetett kihajlási görbék, a feladat során közölt imperfekciókkal és egy központos nyomóerővel terhelt, parametrikus modellcsoport futtatásának eredményeit dolgozzák fel. A következő diagramok mindegyikén a függőleges tengely a kihajlási csökkentő tényező értékét, míg a vízszintes tengely a rúd karcsúságát mutatja.

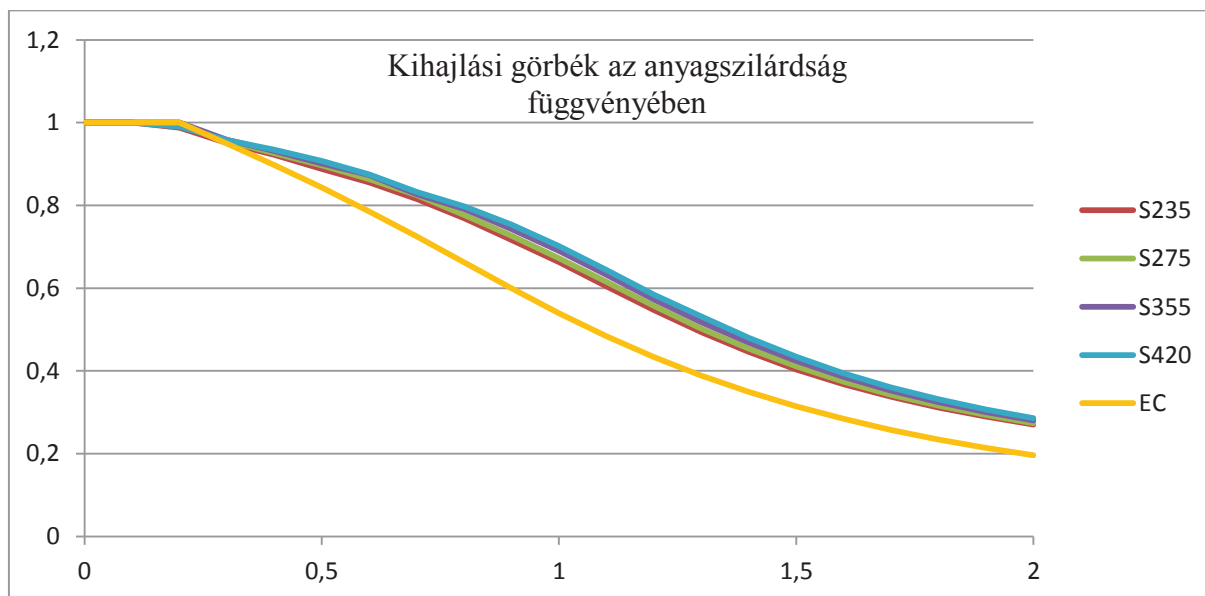
A kapott kihajlási görbe minden esetben a várakozásoknak megfelelően, (alakját tekintve) hasonló az Eurocode kihajlási görbéihez, leszámítva, hogy az EC 0,2-es karcsúság alatt 1,0-s csökkentő tényező alkalmazását javasolja. Ennek következményeként, az ilyen zömök rudaknál számolhatunk nyomásra is a húzási teherbírás értékével. Természetesen az ebbe a karcsúsági tartományba eső rudak ritkán kerülnek felhasználásra az építőiparban.

A numerikus modellek lefuttatását követően az eredményeket ezen kihajlási görbék felrajzolásán, elemzésén, valamint a szabvány által megadottal történő összehasonlításon keresztül közlöm. A modellek vizsgált szakaszát azért a 0-tól 2,0-ig terjedő karcsúsági tartományban állapítottam meg, hogy egy egészebb, esztétikusabb görbét kapjunk eredményül, ugyanakkor ebben a tartományban előfordulnak az iparban szinte soha nem alkalmazott karcsúságok is.

Fontos megjegyezni, hogy a feladat során mindvégig az Eurocode c jelű görbéről beszélünk és a modellezés során is az ezt kiváltó, csak cső keresztmetszetű szelvényekre vonatkozó görbét próbáljuk előállítani.

5.1. Anyagminőség

Az EUROCODE hidegen alakításos technológiával készült acéloknál az S420, valamint az annál alacsonyabb, Magyarországon járatos acélszilárdságok (S235, S275, S355) kihajlás vizsgálatához a „c” jelű kihajlási görbét javasolja, így ezekre részletes vizsgálatokat végeztem, és végtermékként előállítottam a különböző acélszilárdságokhoz rendelve egy-egy kihajlási görbét. Ezeket tüntettem fel a következő ábrán.



31. ábra: A különböző anyagminőségek kihajlási görbéi.

A szilárdságok módosítása során egy paramétert vettem állandónak, mégpedig a keresztmetszeti osztály. A különböző anyagminőségekhez tartozó keresztmetszetek átmérőjét egyaránt a II. keresztmetszeti osztály közepét jelentő $60 \varepsilon^2$ -hez rendeltem.

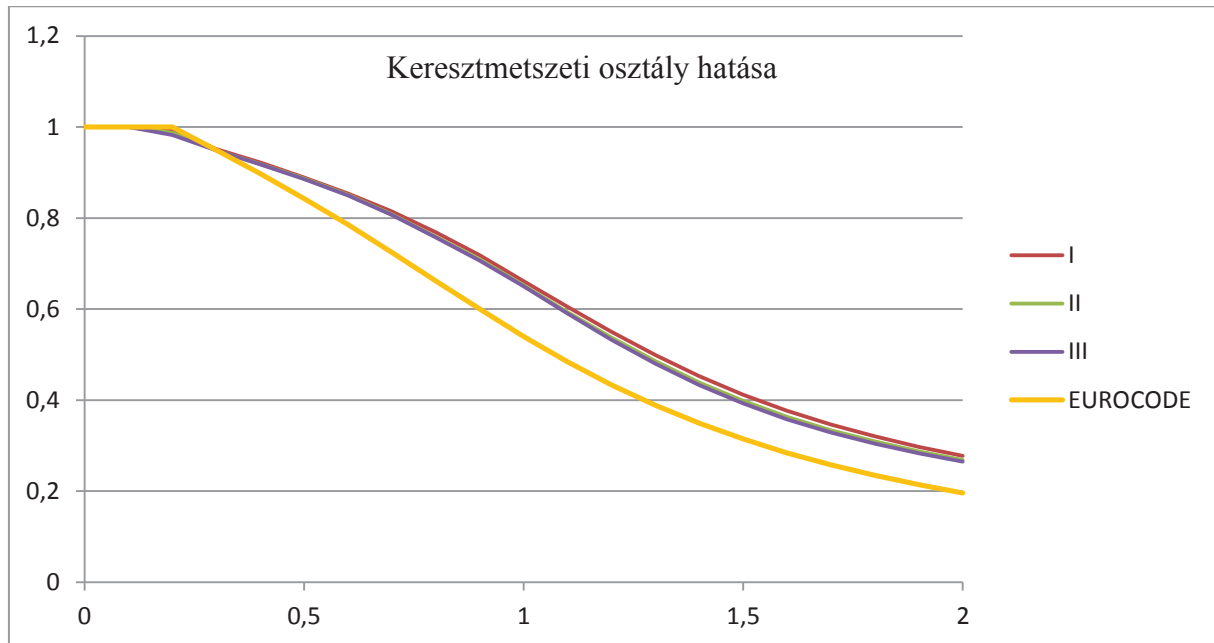
A görbék analógiájából megállapítható, hogy egymáshoz nagyon közel helyezkednek el, követik egymás alakját, ám mégse keresztezik egymást egyetlen rövid szakaszon sem. Továbbá az is kijelenthető, hogy minél nagyobb az acél szilárdsága, a vizsgált görbe annál távolabb esik az EUROCODE görbétől. Ez alapján levonható a következtetés, miszerint az anyag szilárdságának növekedése kedvező hatással van a kihajlási ellenállásra, ám ez természetesen nem vehető készpénznek, hiszen ezek a keresztmetszetek a keresztmetszeti osztályba történő besorolás alapján lettek kiválasztva, így teherbírásuk közel sem azonos. Ahhoz, hogy messzemenő következtetést lehessen levonni, egy kitüntetett teherszintre kéne méretezni a keresztmetszeteket a vizsgált szilárdságokra. Minél nagyobb szilárdságú acélt alkalmazunk a kitüntetett teherszint felvételére, annál kisebb keresztmetszet szükséges (illetve elégséges), a hossz viszont nem változik, így nagyobb szilárdságú acélnál jelentősen nagyobb karcsúságú elem válik elegendővé. Ebből kifolyólag ezek a görbék csak önmagukban értelmezhetőek, az hozzájuk tartozó anyagminőségek folyáshatárának függvényében. Egymáshoz hasonlítani őket felesleges, hiszen egész más teherszinthez tartozik a görbék egy adott karcsúsági értéknél felvett ordinátája.

A konklúziót levonva, miszerint az EUROCODE görbéjéhez legközelebb lévő görbe az S235 anyagminőségű acélhoz tartozó, az ezentúli vizsgálatokat kivétel nélkül erre az anyagminőségre végeztem.

5.2. Keresztmetszeti osztály

Az anyagszilárdságon túl, az adott szerkezeti elem keresztmetszeti osztálya is hatást gyakorol kihajlási görbékre. A következőkben ezt a hatást elemzem.

Révén, hogy a IV. keresztmetszeti osztály viselkedése jelentősen eltér az első 3-étól, annak vizsgálatától jelen feladat keretein belül eltekintettünk, hiszen a lokális lemezhorpadás tárgyában, új tényezővel jelentkezik az anyag viselkedésében, és ez megbonyolítaná az összehasonlítást, amely a másik három osztály esetében egyértelmű.



32. ábra: A különböző keresztmetszeti osztályok kihajlási görbéi.

A görbék elhelyezkedése hasonló struktúrájú, mint a szilárdságok esetében, egymást nem keresztezik, ugyanakkor végig követik egymás alakját. A keresztmetszeti osztály növekedésével egyre közelebb kerülünk az EUROCODE által javasolt „c” görbéhez.

Ebből az következik, hogyha a keresztmetszeti méretek úgy vannak megválasztva, hogy a teljes keresztmetszet megfolyása megelőzi a lemezhorpadást (tehát I. keresztmetszeti osztályú), akkor kapjuk a legkedvezőbb stabilitási viselkedést is. Ezt követően a keresztmetszet osztály növelésével egyre kedvezőtlenebb viselkedést kapunk. Valószínűsíthető továbbá, hogy a IV. keresztmetszeti osztályhoz tartozó görbe a III. keresztmetszeti osztályé alá esne, folytatva ezzel a sort.

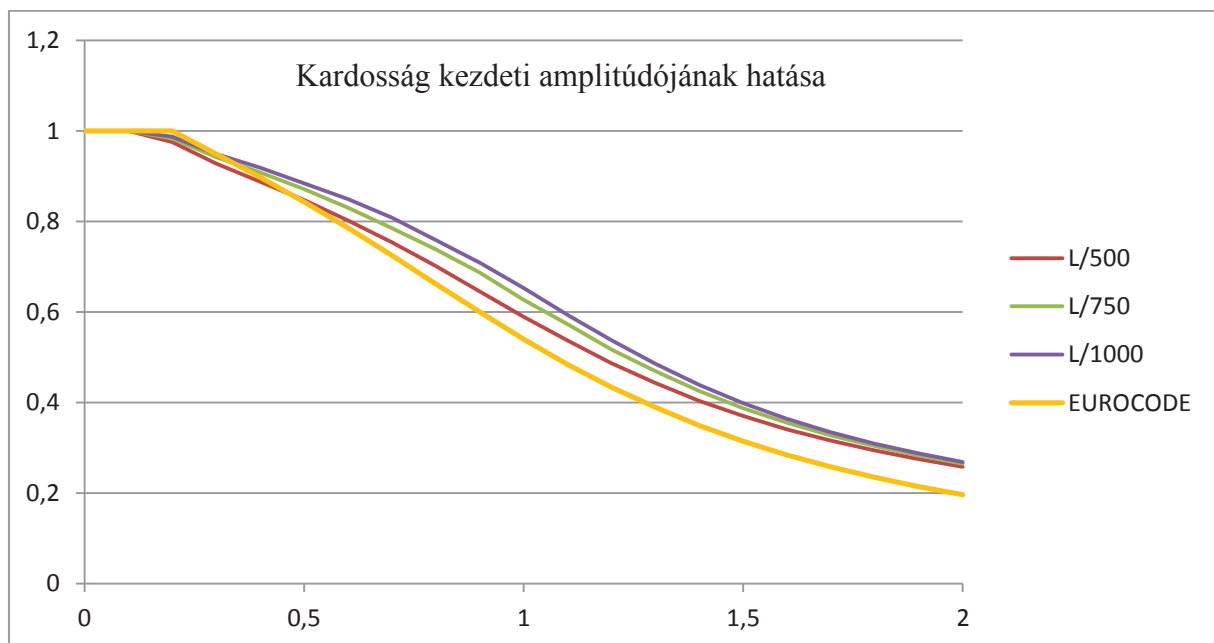
5.3. Kardosság

Ebben a fejezetben a kardosság, mint kezdeti imperfekció mértékének hatását vizsgáltuk a stabilitási ellenállásra. A kardosság középső keresztmetszetben (maximális) felvett amplitúdóját változtattam $L/1000$, $L/750$, valamint $L/500$ között, ahol L a szerkezeti elem hossza.

Fontos megjegyezni, hogy geometria felvételekor nem vettem figyelembe, hogy az Eurocode a kardosság értékét általánosságban a támaszköz ezred részéként írja elő, azonban ezt 3 mm-ben minimalizálja. Ezt kiküszöbölni csak úgy tudtam volna, ha a járatos tartományból kieső vastagságú szelvényt veszek fel, ezáltal a legkarcsúbb modell hossza is

eléri a 3 métert (és a kardosság minimális 3mm-es korlátja nem befolyásolja az eredményeket). A jelenség figyelmen kívül hagyásának oka, az eredmények torzításának elkerülése volt. Ugyan ez így a legkarcsúbb elemeknél nem tökéletesen felel meg a szabvány követelményeinek, de a struktúrát követi. Ez közelítés a biztonság kárára, ugyanakkor a dolgozat célja a csőszelvények kihajlási viselkedésének elemzése volt, amelyet a szóban forgó 3mm-es minimális kardosság figyelembe vétele ellehetetlenített volna.

Jelen esetben nem volt kérdéses a görbék elhelyezkedésének sorrendje, hiszen a kezdeti amplitúdó növelésével nem kaphatunk nagyobb ellenállást. A kérdéses paraméter a görbék közötti különbségek voltak, illetve, hogy az EUROCODE görbéje alá megy-e valamelyik a szerkesztett görbe, az építőiparban is használatos karcsúsági tartományban.



33. ábra: A különböző kezdeti amplitúdók hatása.

A görbék közötti hézag itt már szemmel láthatólag sokkal nagyobb, mint az ezt megelőző vizsgálatok esetében. Ezt azt jelenti, hogy a kihajlási görbe alakja és karakterisztikája nagymértékben függ a kardosság kezdeti értékétől.

Megfigyelhető még, hogy minél nagyobb az amplitúdó kezdeti értéke, annál később emelkedik az EUROCODE görbéje fölé az adott görbe. Az, ha a valós szerkezeti elem lenne L/1000-nél nagyobb kezdeti kihajlással terhelve, akár komoly veszélyeket is hordozhatna magában, hiszen az analógia szerint, minél nagyobb a kezdeti imperfekció, annál nagyobb karcsúsági értéknél éri csak el az EUROCODE segítségével számolt ellenállás, a valós értéket.

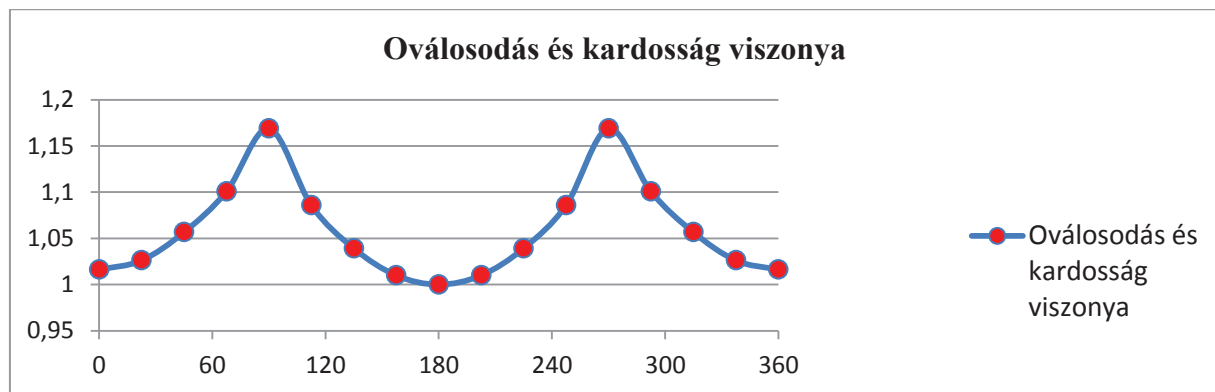
Ez alapján akár a gyártás során kéne ellenőrizni és szabályozni, hogy L/1000-nél nagyobb kihajlással rendelkező terheletlen (később nyomott) szerkezeti elemek ne kerülhessenek ki a gyárból.

5.4. Kardosság és oválosodás viszonya

Miután a kardosság hatását önmagában megfigyelhettük állandó egyéb imperfekciók mellett, vizsgáljuk meg egy (illetve kettő) másik imperfekcióval közös hatását az egymáshoz viszonyított helyzetük függvényében. A kör keresztmetszet gyártás során történő oválosodása és a kardosság egyaránt fontos szerepet játszik a stabilitásvesztésben, ugyanakkor az egymáshoz viszonyított helyzetük alapján tudják erősíteni, valamint gyengíteni egymást.

Induljunk ki a hegesztési varrat helyzetéből, legyen a kör keresztmetszet legfelső pontján. Ilyenkor a varratban történő összehúzódás egy a kardosodásnál kisebb mértékű kihajlást okoz a szemben lévő pont felé mutató amplitúdóval, azaz a csőszelvény origójából kiindulva 180° -ra a varrattól. Az oválosodás legyen erre merőleges úgy, hogy a legkisebb átmérő mutasson a hegesztési varratba az egyik oldalon, a másikon pedig az az okozta kihajlás felé (a legnagyobb átmérő iránya merőleges az eddigi kihajlásra). Ennek következtében a már meglévő kihajlás síkjában lesz minimális a hajlítási inercianyomaték, ami további gyengülést okoz az ellenállásban. Ezen két imperfekció viszonya egymáshoz képest nem változik. A kardosodás definiálásánál egy szög kerül bevezetésre, amely a más vázolt felépítés mellett, az origóból kiindulva a hegesztési varratba mutató, valamint a kardosodás amplitúdójának irányába mutató vektor által bezárt szög. Ezt a szöget változtattam a teljes kör 16 egyenlő részre osztásának megfelelően (22.5° -onként).

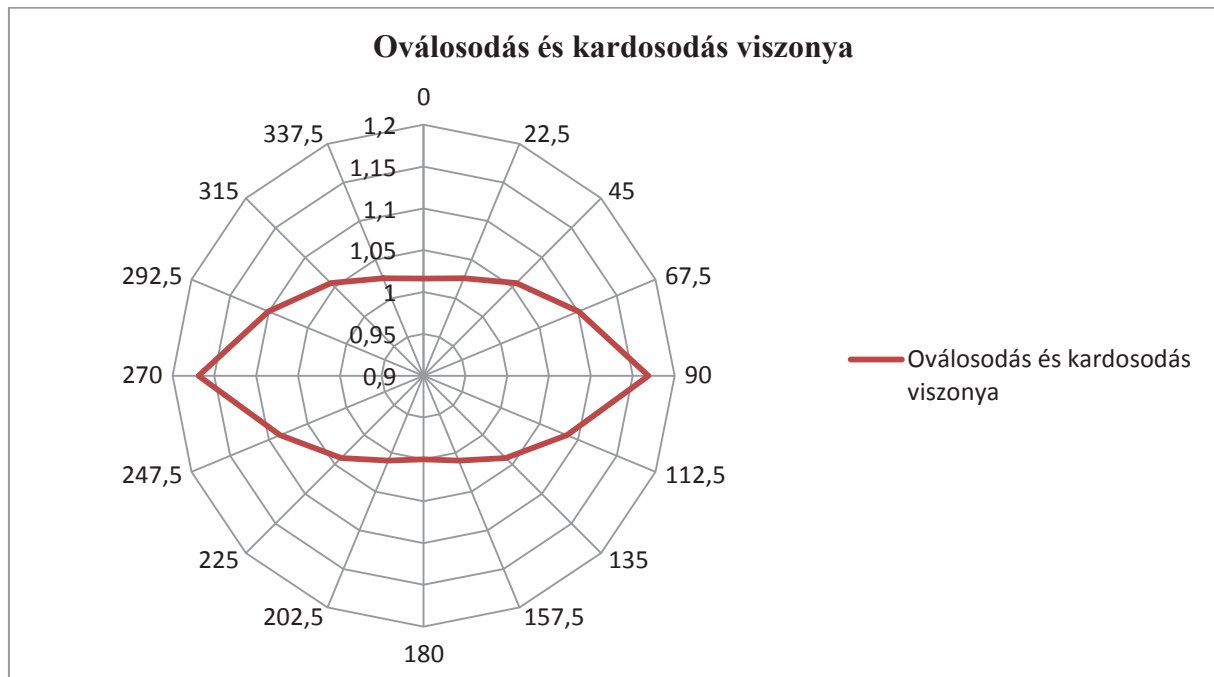
A vizsgálatot az EUROCODE görbétől legtávolabb eső, 1.0-s karcsúsági értékre végeztem.



34. ábra: Oválosodás és kardosság viszonya.

Az ábra a minimális (legkritikusabb keresztmetszetben kapott) csökkentő tényezővel fajlagosított, százalékos értékeket jelöl. Mint látható, a kardosodás és oválosodás ciklikusan erősíti, illetve gyengíti egymást. A legkisebb ellenállást az eredményezte, ha a szög 180° , tehát az ovális keresztmetszet legnagyobb átmérőjére merőleges a kardosság amplitúdójának iránya, továbbá a varrat összehúzódásából keletkező kihajlással egy irányba mutat. Megfigyelhető, hogy az ábra egy szabálytalan sinus hullámot, illetve két szabályos sinus félhullámot követ. Ebből kifolyólag két helyen van minimuma, egy lokális, és egy abszolút. Maximuma szintén két helyen van, ám ezek megegyeznek, ugyanis a keresztmetszet imperfekciós terhelése a függőleges tengelyre szimmetrikus.

Egy szemléletesebb ábrázolási móddal bemutatva ugyanezeket az eredményeket egy „szem” alakú görbét kapunk.



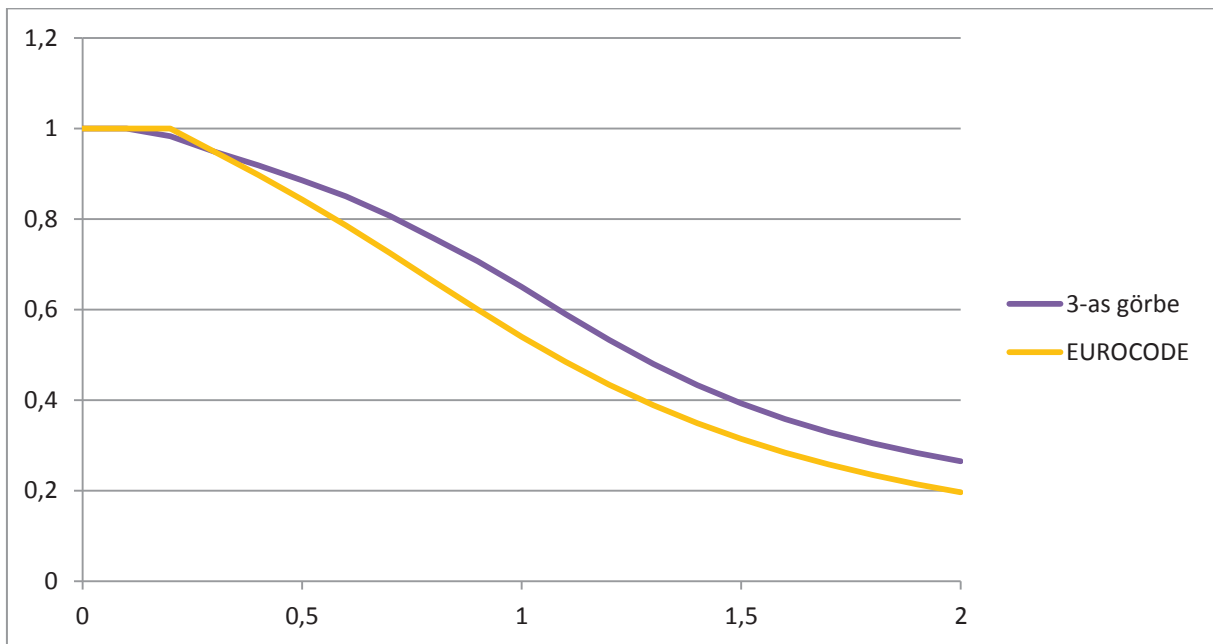
35. ábra: Ovólosodás és kardosság viszonya sugárdiagramon.

A sugárdiagramon ábrázolva talán még szemetűnőbb a függőleges tengely körüli szimmetria.

A vizsgált imperfekciók legkedvezőbb kombinációjának kiválasztásával közel 17%-os teherbírás növekedés figyelhető meg a legkedvezőtlenekkel szemben. Látható tehát, hogy nagy hatása van a kihajlási csökkentő tényező értékére az imperfekciók egymáshoz viszonyított helyzete. Éppen ezért fontos az imperfekciók relatív helyzete a keresztmetszeten.

5.5. Saját kihajlási görbe előállítása

Az összes vizsgált, szabványos imperfekciókkal terhelt görbe közül az S235 anyagminőségű, III. keresztmetszeti osztályú görbe a legkedvezőtlenebb. A továbbiakban erre a görbére csak 3-as görbeként fogok hivatkozni.

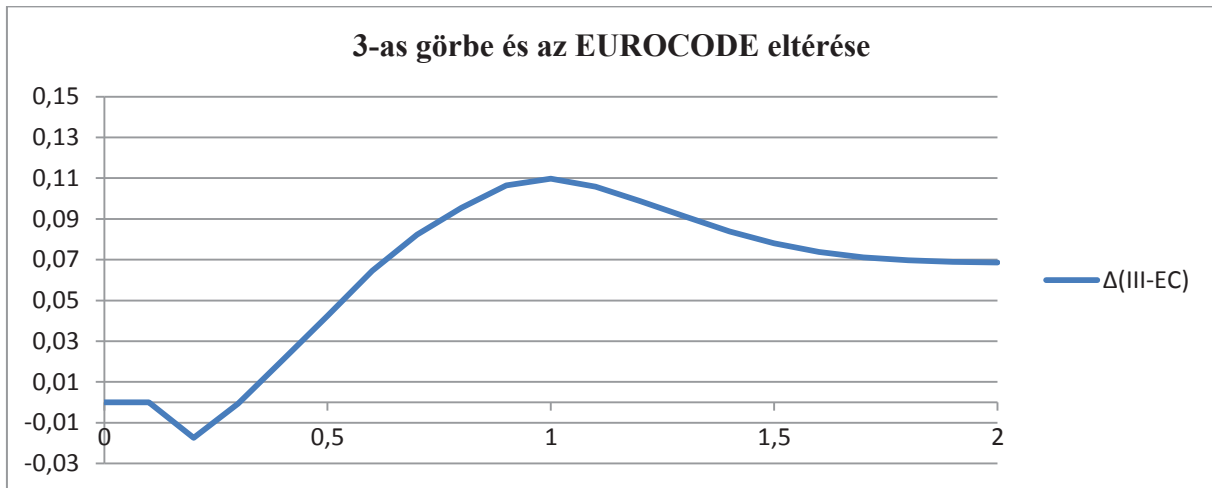


36. ábra: 3-as görbe és az EUROCODE „c” görbájének viszonya.

Vizsgáljuk meg a 3-as görbét és annak jelentését, az EUROCODE görbéjéhez viszonyított helyzete alapján. **A vizsgált szakasz legnagyobb részén az Eurocode görbáját használva kisebb kihajlási csökkentő tényezőt kapunk, mint ha a valós imperfekciók modellezésével előállított görbét alkalmaznánk.** Ezzel a biztonság oldalán állunk ugyan, de nem mindegy, hogy mekkora a különbség, ugyanis ez túlméretezéshez is vezethet, ami gátat szabhat a gazdaságos, kihasznált szerkezet tervezésének.

A szakasz másik része (ahol az Eurocode görbéje feljebb van) már sokkal inkább lehetne veszélyesnek mondható. Ezen a szakaszon ugyanis **az Eurocode a biztonság kárára közelít.** Szerencsére az érintett karcsúságok már **kiesnek a járatos karcsúsági tartományból** (ritkán alkalmaznak valós szerkezetek esetében ilyen zömök rudakat), és ezen a szakaszon **a két görbe közötti különbség is olyan kicsi,** hogy az EC szerinti méretezés során alkalmazott számos egyéb komponensbe épített biztonság által **sokszorososan lefedésre kerül.**

A feladat céljaul kitűzött kalibrált görbét is a szóban forgó 3-as görbére illesztettem. A görbe kalibrálásához a legkisebb négyzetek módszerét alkalmaztam azzal a kikötéssel, hogy a függvény segítségével előállított görbe mindenhol maradjon a 3-as görbe alatt (és ezáltal adjon kisebb ellenállást a biztonság javára történő közelítésként). Az ábrán azonban látható, hogy ugyan nem a járatos tartományban, de a 3-as görbe az EUROCODE görbéje alatt van egy rövid szakaszon (0.1-től 0.3-ig tartó karcsúsági tartományban). Ez a következő ábrán tisztábban kivehető.



37. ábra: 3-as görbe és az EUROCODE „c” görbéjének eltérése.

Ennek a jelenségnek az oka, hogy az EUROCODE görbéje 0.2-es karcsúsági értékig konstans 1.0. Ebből kifolyólag az EUROCODE kihajlási csökkentő tényezőit leíró függvényével képtelenség megoldani, hogy a 3-as görbe végig a kalibrált görbe felett legyen, képletmódosításra van szükség.

Ahhoz, hogy a görbe 0.2 helyett 0.1-ig legyen konstans 1.0, a Φ tényező képletét kell módosítani, a függvény 0.1-gyel történő eltolásával. A módosított Φ tényezőt jelöljük Φ_m -mel

A Φ tényező EUROCODE szerinti képlete:

$$\Phi = \frac{[1 + \alpha \cdot (\lambda_v - 0.2) + \lambda_v^2]}{2}$$

A Φ_m tényező számítási módja:

$$\Phi_m = \frac{[1 + \alpha \cdot (\lambda_v - 0.1) + \lambda_v^2]}{2}$$

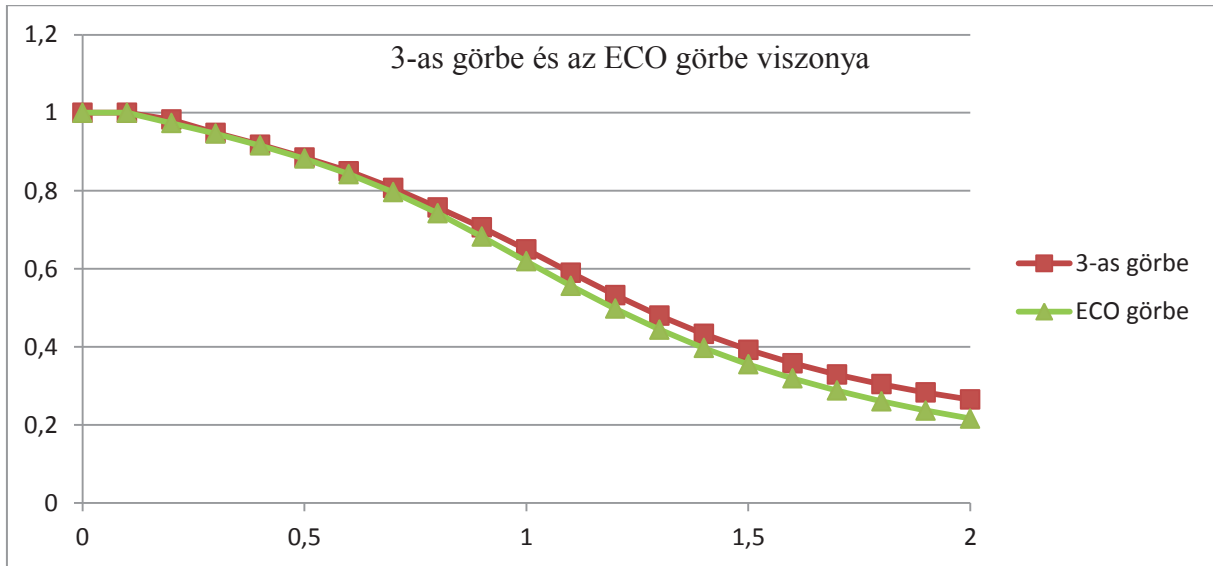
A képletben α -val jelölt alakhiba tényezőt, mint a csőszelvényekre vonatkozó állandó paramétert, a legkisebb négyzetek módszerének alkalmazásával kalibráltam a legmegfelelőbb olyan kéttizedes értékű számmá, ahol a kapott görbe végig a 3-as görbe alatt van (minden vizsgált pontban), az eltérések négyzetösszege ugyanakkor a legkisebb.

A χ kihajlási csökkentő tényező számítási módját szükségtelen módosítani, így azt az EUROCODE által javasolt képlet alkalmazásával számítható.

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda_v^2}} \leq 1.00$$

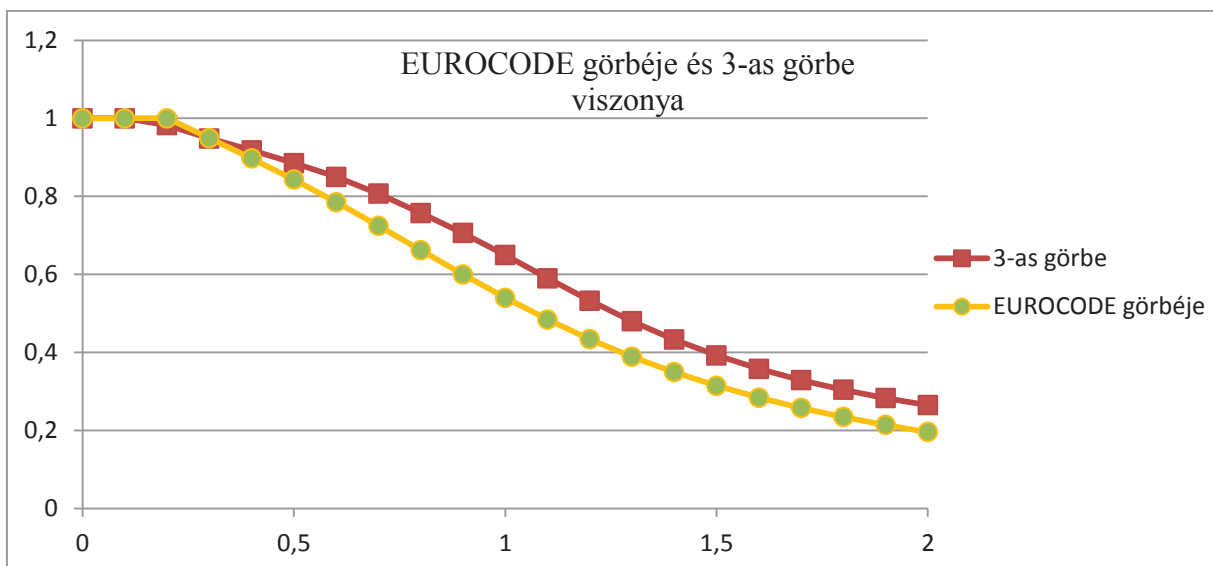
A képletekben alkalmazott λ_v a karcsúság a vizsgált rúd karcsúságát jelöli.

Az EUROCODE rövidítése (EC), a cső keresztmetszetű szelvények „O” alakja (amelyekre a görbe vonatkozik), valamint a görbe funkciója (miszerint gazdaságosabb szerkezetek tervezését teszi lehetővé) a görbét az angol „economical” szóból is kiindulva, ECO görbének kereszteltem. A továbbiakban így hivatkozok rá.



38. ábra: 3-as görbe és ECO görbe viszonya.

A fenti ábrán látható, hogy az ECO görbe elég jól konvergál a vizsgált 3-as görbéhez, ugyanakkor mindenhol alatta van. Összehasonlításképpen a következő ábrán a 3-as görbe EUROCODE által javasolt görbéhez képesti helyzetét ábrázoltam.

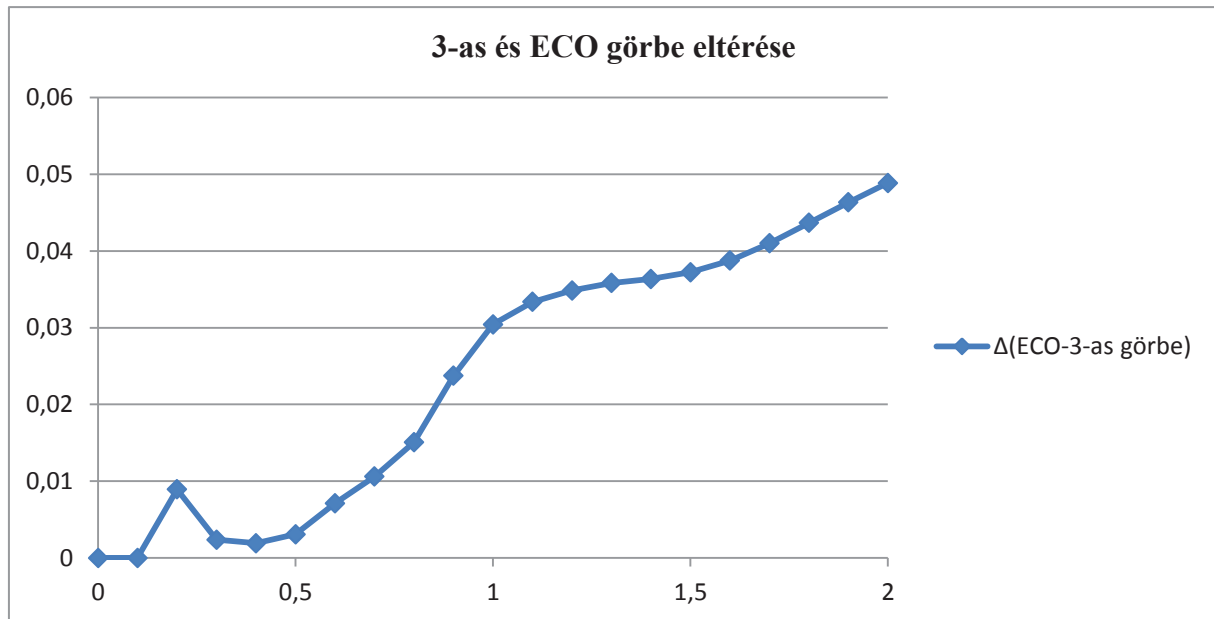


39. ábra: Az EUROCODE „c” görbéjének viszonya a 3-as görbével.

A különbség szabad szemmel is látható. Tovább sorakoztatja az előnyöket az ECO görbe mellett, hogy az EUROCODE görbéje (ha nem is járatod tartományban, de) a 3-as

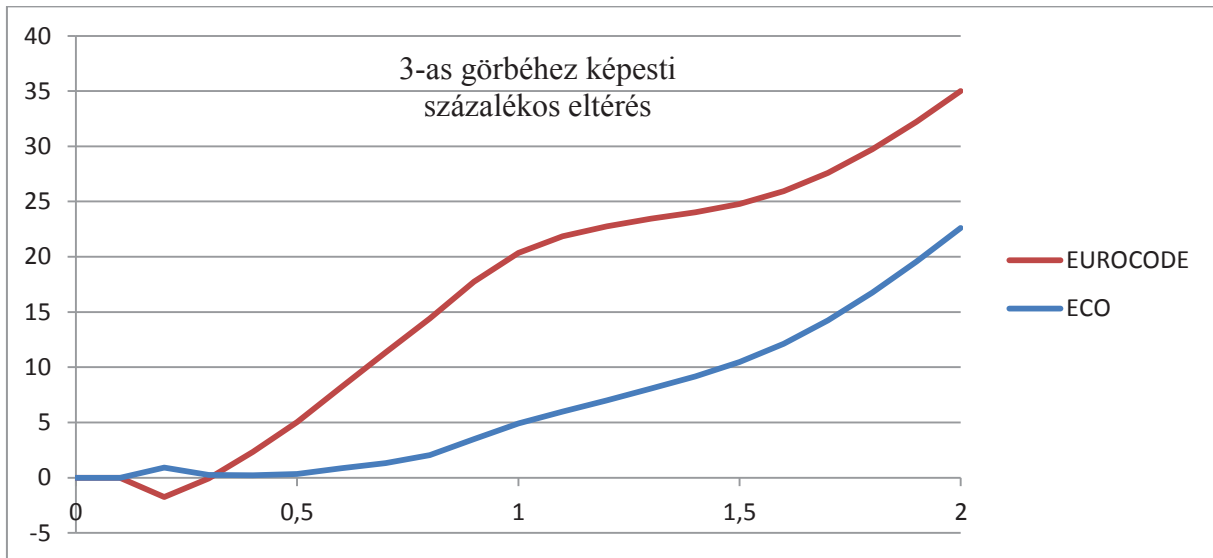
görbe fölé megy egy rövid szakaszon. A valóságban ilyenkor a biztonság kárára történő méretezést követnénk el. Ez az ECO görbéről nem mondható el, ugyanis úgy lett kalibrálva, hogy két fő szempontot tartottunk szem előtt:

- A görbe ordinátája sehol egy vizsgált pontban se haladja meg a 3-as görbe ugyanazon ponthoz tartozó ordinátáját
- A görbe a lehető legjobban konvergáljon a 3-as görbéhez alulról



40. ábra: 3-as és ECO görbe eltérése.

A korábban közölt 37. ábrán látható, hogy az EUROCODE görbéje 1.0-s karcsúsághoz tartozó értéke elérte a 0.11-et, míg az ECO görbénél ugyanehhez a karcsúsághoz tartozó érték csupán ~ 0.03 . Hogy még szembeűnőbb legyen a különbség, a következő grafikonon az ECO és EUROCODE görbéjének, a 3-as görbétől való százalékos eltérését ábrázoltam. Ezek a számértékek azt mutatják, hogy a különböző karcsúsági értékeknél a valós (modellből kapott) kihajlási ellenálláshoz képest hány százalékkal tervezzük túl az elemet.



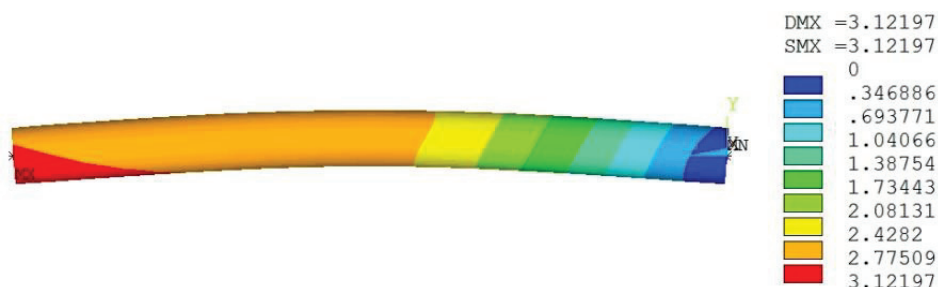
40. ábra: A két görbe százalékos eltérése a 3-as görbétől.

A két görbe között így már tetemesebb különbség figyelhető meg. A 0.1 és 0.3 közötti karcsúsági tartományban az EUROCODE görbéje bizonyul kedvezőbbnek, viszont ebben a tartományban a valós eredményekhez képest (3-as görbe) is kedvezőbb eredményekkel szolgál. A grafikonok ezt követően szétválnak és az EUROCODE görbéje sokkal meredekebb kezdeti tangenssel indul meg felfelé, mint az ECO görbe. Látható, hogy míg az ECO görbe megközelítőleg egyre növekvő meredekséggel éri el a nagyjából 23%-os túltervezési szintet 2.0-s karcsúsági értéknél, az EUROCODE által javasolt görbe ezt már 1.2-es karcsúsági értéknél megteszi, valamint a meredekségében is megfigyelhetők komolyabb változások.

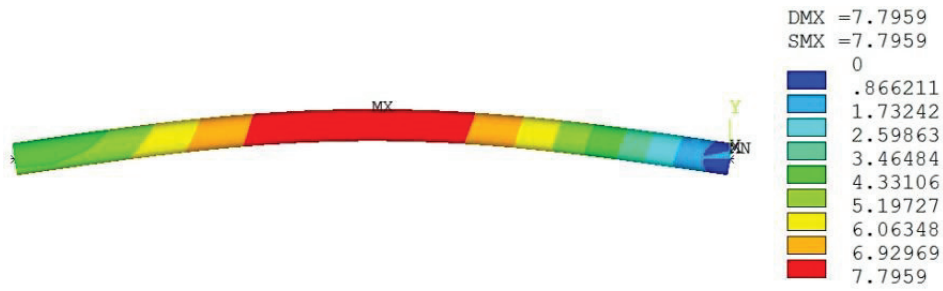
5.6. Tönkremeneteli módok vizsgálata

A tönkremeneteli módok vizsgálata nem része a feladatnak, ezért csak felületesen foglalkozom vele.

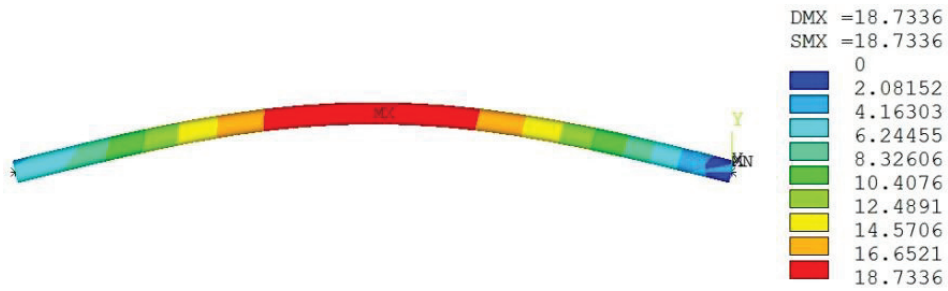
A tönkremeneteli módok vizsgálatához elemeznünk kell a kihajlási alakokat, melyekhez a következőkben kigyűjtöttem 4 különböző karcsúsági értékhez tartozó deformációs ábrát.



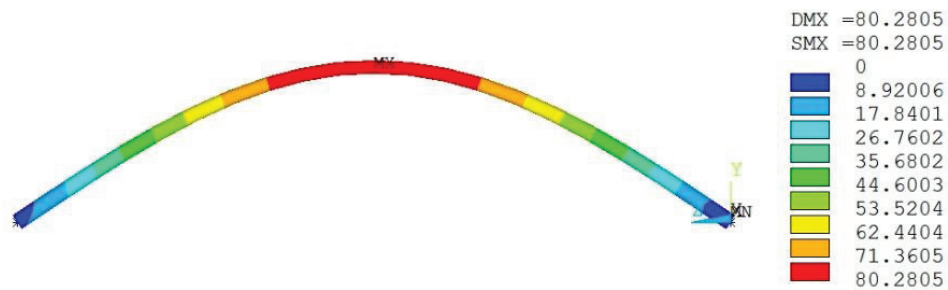
41. ábra: 0.4-es karcsúsághoz tartozó kihajlási alak.



42. ábra: 0.7-es karcsúsághoz tartozó kihajlási alak.



43. ábra: 1.0-es karcsúsághoz tartozó kihajlási alak.

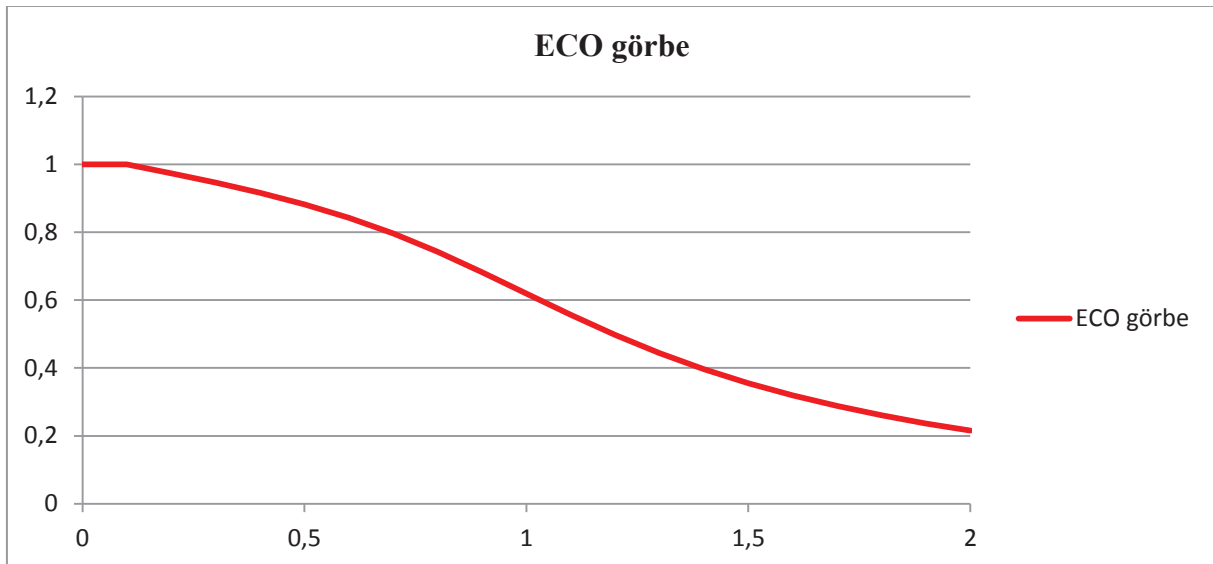


44. ábra: 1.6-es karcsúsághoz tartozó kihajlási alak.

Megfigyelhető, hogy a legzömökebb (0,4) kiragadott elemnél még **lokális** deformáció dominál, míg a nagyobb **karcsúságú** elemeknél ez a tönkremeneteli forma egyre inkább átmegy **globális** és **szimmetrikus** stabilitásvesztésbe.

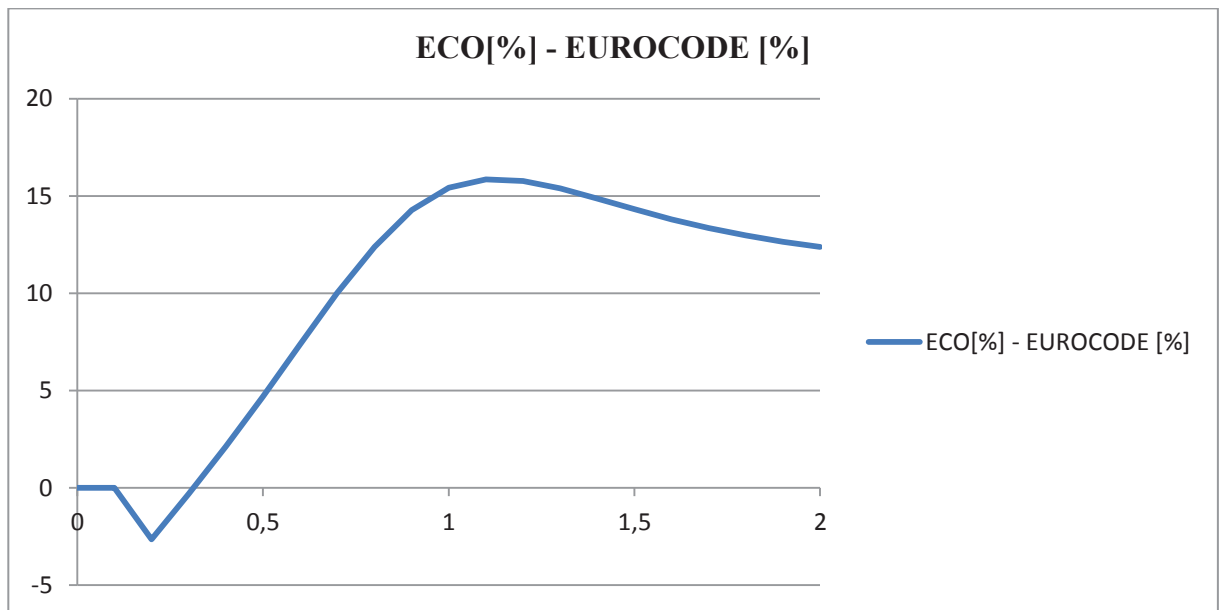
6. Méretezési javaslat

A projekt során előállított ECO görbe lényegesen jobban közelíti a valós imperfekciókkal terhelt zárt idomacélok kihajlási görbáját, mint az EUROCODE által javasolt „c” görbe. Ebből kifolyólag javaslom a gazdaságosabb szerkezetek tervezésének lehetővé tétele érdekében, az S420 jelű, valamint az annál alacsonyabb szilárdságú acél anyagminőségű csőszelvényekre az ECO görbe használatát a nyomott szerkezeti elemek kihajlás-vizsgálatára.



45. ábra: ECO görbe.

Az ECO görbe használata akár kisebb szükséges szelvényméreteket is jelenthet, így nem csak a szerkezet lesz akár építészeti szempontból nézve esztétikusabb, de csökken az önsúly, valamint a festendő felület is. Ezenfelül természetesen az anyagköltség, illetve a szállítás költsége is csökken.



46. ábra: Numerikus modellekből számított görbék százalékos eltérése az EUROCODE görbéjétől.

A fenti ábrán jól kivehető, hogy iparban járatos, rendszeresen felhasználásra kerülő karcsúsági tartományban az EUROCODE szerint számolt kihajlási ellenálláshoz képest 5, 10, de akár 15%-ot is nyerhetünk. Ez bizonyítja tehát, hogy az ECO görbe használata kihajlás-vizsgálatoknál gazdasági szempontból kedvezőbb tervezést tesz lehetővé az építőiparban.

Érdeemes lenne hasonló vizsgálatokat elvégezni más, szabványos keresztmetszetű szelvényekre (mint például az RHS szelvényekre), szintén gazdasági okokból kifolyólag. Véleményem szerint az EUROCODE számítási rendszerét nem bonyolítaná meg jelentősen, ha nem az 5 meglévő görbe közül rendelne egyet az egyes szelvényekhez, hanem egy-egy Φ - α párossal szolgálna (ahol a Φ -t egy képletrel, az α -t egy skalárral adná meg). Jelen esetben ez a páros:

$$\Phi_m = \frac{1 + \alpha \cdot (\lambda_v - 0.1) + \lambda_v^2}{2}$$

$$\alpha := 0.26$$

Ahol a Φ képletében az egyetlen különbség a belső zárójelben lévő λ_v -ből kivont skalár, mely jelen esetben 0.1 az EUROCODE által megadott egyenletben szereplő 0.2-höz képest.

Természetesen ez csak egy szelvénytípus elemzése volt. Ahhoz, hogy messzemenő következtetést lehessen levonni, és akár indítványozni az ECO görbe bevezetését, további vizsgálatok lennének szükségesek. Ezenfelül érdemes lenne más (c görbéhez tartozó) keresztmetszetű rudakat, magasabb szilárdsági osztályú acélokat, illetve ezek különböző kombinációit is hasonló módon megvizsgálni.

7. Összefoglalás

A TDK dolgozatomban acél cső keresztmetszetű szelvények stabilitási viselkedésével foglalkoztam. Témaválasztásom alapja a nyomott szerkezeti elemekben rejlő, a jelen tervezési körülmények között kihasználatlanul maradó tartalékok feltárása volt.

A dolgozatban összehasonlítottam a hidegen alakítás, valamint a hegesztés szimulációján keresztül kapott valós imperfekciók hatását, az EUROCODE szabványsorozat által javasolt értékek hatásával. Vizsgáltam az imperfekciók stabilitásvesztésre gyakorolt hatását individuális módon, valamint az imperfekciók egymáshoz viszonyított helyzetének változtatásával a legkedvezőtlenebb kombináció megállapítására. A kihajlás-vizsgálatokat elvégeztem különböző keresztmetszeti osztályokra és anyagszilárdságokra, hogy kiderítsem ezek a tényezők mekkora szerepet játszanak a stabilitási viselkedésben.

Végül a legkedvezőtlenebb viselkedésű modell futtatásának eredményeiből szerkesztett kihajlási görbére szerkesztettem egy, az EUROCODE megfelelő görbéjénél jelentősen gazdaságosabb, ugyanakkor még mindig kellő biztonságot nyújtó, függvényt leírható görbét.

8. Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném megragadni az alkalmat arra, hogy tiszteletem és köszönetem fejezzem ki konzulenseimnek.

Dr. Budaházy Viktornak, aki elvállalta, hogy segítségemre lesz a dolgozatom elkészítésében, és egyéb elfoglaltságai mellett mindig tudott időt szakítani rám. Hasznos, jól felépített konzultációi során választ adott minden felmerülő kérdésemre, és magas szintű szakértelmével irányított a problémák megoldásához vezető útra. Továbbá köszönöm Neki a témaválasztásban nyújtott segítséget.

Hálával tartozom Kollár Dénesnek, aki végtelen türelemmel, többek között szakmai tudásával és lenyűgöző programozási képességeivel segítette a dolgozatom előre haladását, és ezáltal betekintést nyújtott az acélszelvények gyártási folyamatainak modellezésébe.

Továbbá köszönöm a családomnak a barátnőmet is beleértve, akik mindenben támogattak és motiváltak, valamint Benedek Gergelynek az adminisztrációs segítséget.

Irodalomjegyzék

[1] Structural stability of steel: concepts and applications for structural engineers - Theodore V. Galambos Andrea E. Surovek

[2] Stabilitáselmélet a mérnöki gyakorlatban – Dr. Papp Ferenc

[3] Imperfection - Josef Machacek, EQUESTA, Czech Technical University in Prague

[4] Acélszerkezetek tervezése az Eurocode szerint - Dr. Iványi Miklós

[5] Korábbi tanulmányok

Tartalomjegyzék

1. Absztrakt.....	1
2. Bevezetés.....	2
2.1. EUROCODE.....	2
2.2. Fontosabb jelenségek.....	3
2.3. Probléma felvetése.....	7
2.4. Stratégia.....	7
3. EUROCODE szerinti stabilitásvizsgálat.....	8
4. Numerikus modell bemutatása.....	10
4.1. Bevezető.....	10
4.2. Keresztmetszeti geometria felvétele.....	12
4.3. Szükséges paraméterek számítása.....	16
4.4. ANSYS modell felépítése.....	18
4.5. Végeselemek kiosztása.....	19
4.6. Anyagmodell.....	22
4.7. Statikai váz.....	23
4.8. Imperfekciók.....	23
5. Parametrikus vizsgálatok.....	31
5.1. Anyagminőség.....	31
5.2. Keresztmetszeti osztály.....	32
5.3. Kardosság.....	33
5.4. Kardosság és oválosodás viszonya.....	35
5.5. Saját kihajlási görbe előállítás.....	36
5.6. Tönkremeneteli módok vizsgálata.....	41
6. Méretezési javaslat.....	43
7. Összefoglalás.....	45
8. Köszönetnyilvánítás.....	46
Irodalomjegyzék.....	47