Szent István Egyetem

Ybl Miklós Építéstudományi Kar

SZAKDOLGOZAT

Boross Péter

2015

Szent István Egyetem
Ybl Miklós Építéstudományi kar
Építőmérnöki Intézet
Mechanika és Tartószerkezetek Szakcsoport

YBL

SZAKDOLGOZAT
Magasépítés szakirány

Acélszerkezeti elemek valós és névleges szilárdsági és méretjellemzői közötti eltérés hatásainak vizsgálata

Boross Péter
V. évf. levelező Építőmérnök BSc

Szigetszentmiklós, 2015. 05. 12.

SZENT ISTVÁN
EGYETEM

Dr.Dombay Gábor PhD.
intézetigazgató, főiskolai tanár

YBL

YBL MIKLÓS ÉPÍTÉSTUDOMÁNYI KAR, BUDAPEST
Építőmérnöki Intézet
Cím: 1146 Budapest, Thököly út 74.
Tel.:+36-1-252-1270
e-mail: epitomernoki.intezet@ybl.szie.hu

SZAKDOLGOZAT KIÍRÁS
2015

Boross Péter

Levelező Építőmérnök szakos
hallgató részére

A feladat címe: Acélszerkezeti elemek valós és névleges szilárdsági és méretjellemzői közötti eltérés hatásainak vizsgálata

Belső konzulens: Horváth Katalin mérnöktanár

Külső konzulens: -

A szakdolgozat beadási határideje: 2015. június 05., péntek $12^{\underline{00}}$

Budapest, 2015. május 28.

Dr. Dombay Gábor
intézetigazgató

SZENT ISTVÁN
EGYETEM

Dr.Dombay Gábor PhD.
intézetigazgató, főiskolai tanár

YBL

YBL MIKLÓS ÉPÍTÉSTUDOMÁNYI KAR, BUDAPEST
Építőmérnöki Intézet
Cím: 1146 Budapest, Thököly út 74.
Tel.:+36-1-252-1270
e-mail: epitomernoki.intezet@ybl.szie.hu

Részletes feladatkiírás

Boross Péter

Levelező Építőmérnök
hallgató részére

Acélszerkezeti elemek valós és névleges szilárdsági és méretjellemzői közötti eltérés hatásainak vizsgálata

című szakdolgozatához

Feladat leírása

Vizsgálandó a kijelölt acélszerkezeti elemek valós és névleges szilárdsági és méretjellemzői közötti eltérés hatása a vonatkozó szabványok figyelembe vételével.

A szakdolgozat tartalmazza:

- nemzetközi tudományos szakirodalom összefoglalását a témában,
- vonatkozó szabványok összefoglalását,
- szerkezeti elemek vizsgálatát mérési adatok felhasználásával,
- szerkezeti analízist a kiválasztott szerkezeteken, csomópontokon,
- kísérleteket kiválasztott szerkezeten, kapcsolaton,
- összefoglalást, kiértékelést.

Budapest, 2015. május 28.

Horváth Katalin.
Horváth Katalin
belső konzulens

TARTALOMJEGYZÉK

Fejezet		Oldal
Szakdolgozat feladatkiírás		**2.**
Tartalomjegyzék		**4.**
I.	**Bevezetés**	**6.**
II.	**Szakirodalmi áttekintés**	**7.**
1.	Az acél szerkezeti elemek valós és névleges szilárdsági és méretjellemzői közötti eltérés hatásainak vizsgálata a nemzetközi tudományos szakirodalomban	7.
2.	Az acél szerkezeti elemekre vonatkozó szabványok	10.
3.	A szilárdsági és méretjellemzők szabványosan megengedett eltérései a névleges értékektől	11.
III.	**Szerkezeti elemek vizsgálatai**	**16.**
1.	Jellemző méret- és szilárdságeltérések gyártói mérési adatok (önellenőrző vizsgálatok) alapján	16.
2.	Jellemző méret- és szilárdságeltérések saját (ÉMI-s) mérések alapján	22.
3.	Több termékjellemző szerkezeti szempontból kedvezőtlen irányú, de a szabványos követelmények között megengedett együttes eltérési lehetőségeinek azonosítása („worst case" meghatározása)	23.
IV.	**Modellezés**	**29.**
1.	Jellemző szerkezetek, csomópontok kialakítása párhuzamosan a névleges és a tényleges méretekkel megadott szelvényekből	29.
2.	Szerkezeti analízis (méretezés) a névleges és a tényleges méretű elemekkel kialakított szerkezeteken, csomópontokon	30.
2.1.	Eltérés hatása a húzott rúd teherbírására, valamint a nyomott oszlop teherbírására és kihajlására	30.
2.2.	Eltérés hatása a hajlított gerenda nyomatéki, nyírási, övlemez tönkremeneteli és gerinchorpadási teherbírására	44.
2.3.	Eltérés hatása a csavaros kapcsolatú húzott szelvények és hevederek tönkremeneteli teherbírására	59.
2.4.	Eltérés hatása a keresztmetszetek osztályba sorolására	65.

Fejezet		Oldal
3.	A geometriai és szilárdsági eltérések keresztkölcsönhatása	**70.**
V.	**Kísérletek**	**71.**
1.	Mintavétel, méretek	71.
2.	Húzott rúd teherbírásának vizsgálata (szakítóvizsgálat)	72.
3.	Nyomott oszlop kihajlásának vizsgálata (nyomóvizsgálat)	74.
4.	Nyomott oszlop kihajlásának számítása a névleges, illetve a kísérletből meghatározott adatokkal, a számítási és mérési módszer összehasonlítása	77.
VI.	**Kiértékelés**	**79.**
1.	A szerkezet várható teherbírás-csökkenése a mért valódi, illetve a lehetséges maximális eltérések hatására	79.
2.	Méretezési szabályok meghatározása a teherbírás-csökkenés kivédésére – ajánlott túlméretezés mértékének meghatározása	80.
VII.	**Összefoglalás**	**81.**
VIII.	**Irodalomjegyzék**	**82.**

I. Bevezetés

A vasbeton szerkezetekhez használt betonacélok jelentősen túlbiztosítottak:

- *egyrészt a gyártók a mért szilárdságértékeket mindig a névleges keresztmetszetre határozzák meg, így a névleges mérettől való negatív irányú eltérés sem okoz teherbírás-csökkenést*
- *másrészt a karakterisztikus minősítő érték ($f_{y,k}$) az átlagértéknek a szórással és a vizsgálati darabszámtól függő Student-tényezőnek a szorzatával csökkentett értéke*
- *harmadrészt a betonacél biztonsági tényezője $\gamma_M = 1{,}15$.*

A fentiek miatt a tervezés során pl. egy 435 MPa tervezési szilárdsággal ($f_{y,d}$) számított B500-as betonacél tényleges folyáshatárának minimum 510-520 MPa-nak kell lennie ahhoz, hogy a gyártói laboratóriumi mérések során is megfeleljenek.

Ezzel szemben a szerkezeti acélok esetében:

- *egyrészt a gyártók által megadott szilárdságértékek egy kimunkált próbatesten kerülnek meghatározásra, így azok valós méretekre fognak vonatkozni; emiatt a teljes profil névleges méreteitől való negatív irányú eltérés (szabvány szerint a keresztmetszet esetében akár -4%, öv- és gerincvastagságnál akár -10% is lehetséges!) teherbírás-csökkenést okozó hatását nem lehet névleges méretre való számítással kivédeni*
- *másrészt a karakterisztikus minősítő érték ($f_{y,k}$) azonos a mérések minimumértékével, nincs a betonacélokhoz hasonló csökkentő tényező, ami növelné a gyártói ellenőrzés során a termék megfelelővé nyilvánításának a biztonságát*
- *harmadrészt a szerkezeti acélok biztonsági tényezője (a csavaros kapcsolatok és lyukkal gyengített szerkezetek esetét kivéve) $\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1{,}00$.*

A fentiek miatt előfordulhat, hogy pl. a tervezés során 275 MPa tervezési szilárdsággal ($f_{y,d}$) számított IPE 300 szelvény tényleges folyáshatára csak néhány MPa-lal (1-2%) haladja meg a névleges tervezési szilárdságot, miközben a keresztmetszeti méretek negatív irányú eltérése akár 3-4%-kal is csökkentheti a teherbírást – így a keresztmetszetek maximális kihasználtságára törekedés mellett a méretezési teherbírás akár meg is haladhatja a beépítésre kerülő elem tényleges folyáshatárát.

Jelen munka keretében:

- *áttekintjük a nemzetközi szakirodalmat; beazonosítva a hasonló területen mások által végzett vizsgálatokat;*
- *áttekintjük a szerkezeti acélokra vonatkozó szabványokat, valamint a szabványosan megengedett maximális méreteltéréseket*
- *beazonosítjuk valós mérési adatok; valamint a szabvány által megengedett maximális eltéréseken belül felvett méreteltérések alapján a teherbírási szempontból legkedvezőtlenebb eseteket;*
- *a felvett kedvezőtlen irányú eltérések esetében számítások alapján, illetve valós szerkezetekkel végzett laboratóriumi kísérletek során modellezzük az eltérések hatását a teherbírásra*
- *végül a modellezés és a kísérletek eredményeinek elemzése alapján megállapítjuk a keresztmetszet méretezéskori kihasználásának – a tényleges méret- és szilárdsági jellemzők ismeretének hiányában is – biztonságos mértékét.*

II. Szakirodalmi áttekintés

1. Az acél szerkezeti elemek valós és névleges szilárdsági és méretjellemzői közötti eltérés hatásainak vizsgálata a nemzetközi tudományos szakirodalomban

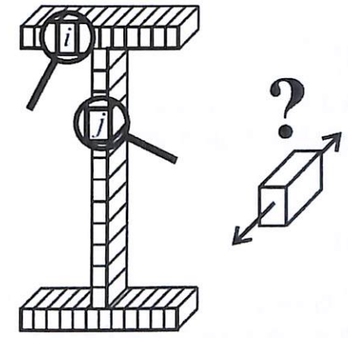
Általánosságban elmondható, hogy a nemzetközi szakirodalomban a névleges és tényleges jellemzők eltérésének hatását csak a tudományos kutatások során vizsgálják alaposabban; a gyakorlati felhasználás során (méretezési szabványok, eljárások, segédletek) alapvetően nem foglalkoznak vele; legfeljebb imperfekciók szintjén, összevonva más jellegű eltérések – mint pl. kivitelezési pontosság – hatásaival.

Az eltérések hatását első alkalommal 1974-ben Daddi és Mazzolani írták le [1], akik összehasonlító kísérleteket végeztek HE200 szelvények különböző szakaszaiból (öv, gerinc) kivett szakítópróbákon. Vizsgálataik során azt találták, hogy az övek szilárdsága akár 26%-kal is kisebb lehet, mint a gerincé (ennek az az oka, hogy gyártás során a gerinc gyorsabban hűl le, mint az öv). Rozlívka, Dvořáček és Fajkus 1999-ben végzett vizsgálataik [2] során azt tapasztalták, hogy az I-tartó övét több szegmensre felosztva a szilárdságértékek az egyes szegmensekben eltérnek egymástól; eredményeik szerint a szilárdságok átlaga 285,7 MPa-nak, a szilárdság szórása az egyes szegmensek között 26,76 MPa-nak adódott.

Fukumoto, Kajita és Aoki 1976-ban [3], valamint Soares 1988-ban [4] vizsgálta a rugalmassági modulus egyenletességét, és vizsgálataik alapján a modulus szórását 12,6 GPa-nak lehet felvenni.

A fenti előzmények nyomán Zdeněk Kala és Jiří Kala a Brünni Műszaki Egyetem Építőmérnöki karának Szerkezeti Mechanikai Tanszékén végeselemes modellezést végzett el IPE 240 profilon [5], aminek a bemenő paramétereihez felhasználták Daddi és Mazzolani [1]; Rozlívka, Dvořáček és Fajkus [2]; Fukumoto, Kajita és Aoki [3] valamint Soares [4] kísérletét.

Kaláék [5] felosztották az alsó- és felső övet, valamint a gerincet egyaránt 12-12 szegmensre (***1. ábra***). Az így kapott 36 szegmensre lefuttatott szimulációk előtt négy különböző alaphipotézist állítottak fel, amelyekre az ellenőrzést később elvégezték:



1. ábra: a profil keresztmetszet szegmensekre bontása [5]

A) variáns: Az egyes szegmensek folyáshatára statisztikailag független egymástól, a korreláció hossza L_{cor} = 0 mm

B) variáns: Az egyes szegmensek folyáshatára statisztikailag függ egymástól, a korreláció hossza L_{cor} = 90 mm

C) variáns: Az egyes szegmensek folyáshatára statisztikailag függ egymástól, a korreláció hossza L_{cor} = 180 mm

D) variáns: A folyáshatár konstans a keresztmetszet mentén (a korreláció hossza $L_{cor} = +\infty$).

Mindegyik variáns szimulációja során korábbi vizsgálatok és elemzések eredményeit használták peremfeltételnek, amelyek az alábbiak (***1. táblázat***):

Statisztikai változó (jellemző)	Középérték (átlag)	Szórás (Gauss)	Adatforrás
Öv folyáshatár ($f_{y,\,öv}$)	285,7 MPa	26,8 MPa	[1], [2]
Gerinc folyáshatár ($f_{y,\,ger}$)	305,7 MPa	26,8 MPa	[1], [2]
Rugalmassági modulus (E)	210 GPa	12,6 GPa	[3], [4]
Profil magasság (h)	240 mm	1,5 mm	[5]
Profil szélesség (b)	120 mm	1,5 mm	[5]
Gerinc vastagság (t_w)	6,2 mm	0,375 mm	[5]
Öv vastagság (t_f)	9,8 mm	0,75 mm	[5]
Felső öv talpdőlés (k_1)	0 mm	0,09 mm	[5]
Alsó öv talpdőlés (k_2)	0 mm	0,09 mm	[5]
Öv ferdeség (f_w)	0 mm	0,75 mm	[5]
Egyenesség (q)	0 mm	1,25 mm	[5]
Maradó feszültség (f_{res})	60 MPa	20 MPa	[1]
Kezdeti oszlopferdeség (e_0)	0 mm	1,9 mm	[1]

1. táblázat: szimulációs peremfeltételek [5]

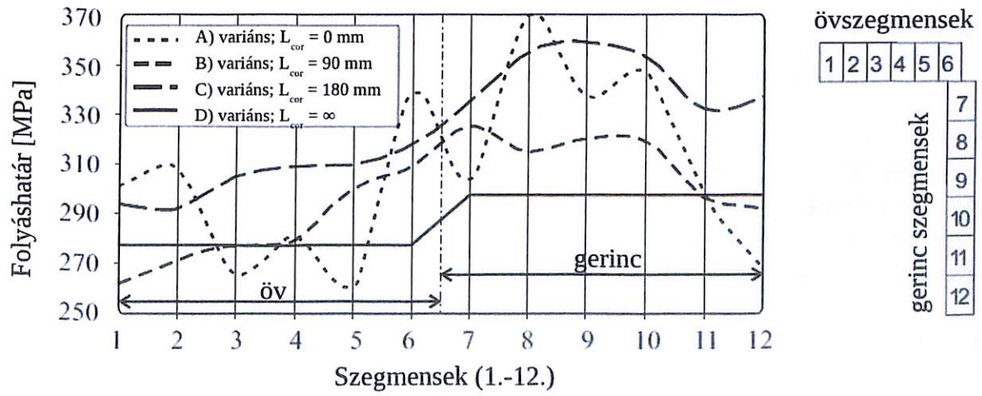
Kaláék vizsgálataik során – korábbi gyakorlatuk alapján – a következő autokorrelációs függvényt vették fel az egyes szegmensek közötti kapcsolat megadásához [5]:

$$c_{i,j}=\sigma^2\cdot e^{-\left(\left|\xi_{i,j}\right|/L_{cor}\right)} \tag{1}$$

ahol L_{cor} a korrelációs hossz (a négy hipotézisnél bemutatottak szerint), σ a szórás, $\xi_{i,j}$ az i. és j. szegmens távolsága mm-ben. Az (1) függvény alapján meghatározták a $\rho_{i,j}$ korrelációs együtthatót a következő képlettel [5]:

$$\rho_{i,j}=\frac{c_{i,j}}{\sqrt{c_{i,i}\cdot c_{j,j}}} \tag{2}$$

A fenti számítások alapján számítógéppel meghatározták a keresztmetszeti pozíció – folyáshatár függvényeket mind a négy alaphipotézis esetére, amelyeket a ***2. ábra*** mutat be (egyszerre ábrázolva mind a négy hipotézisre.



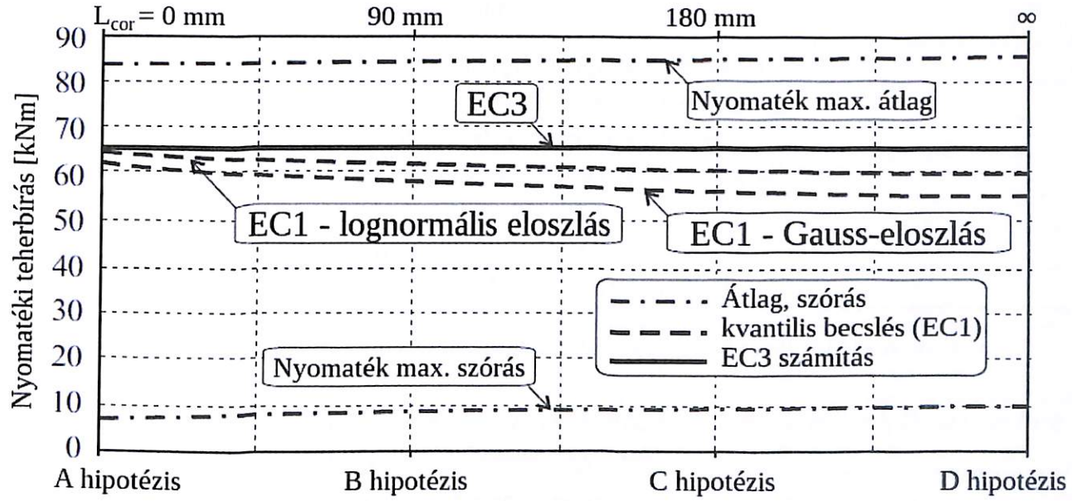
2. ábra: keresztmetszeti pozíció – folyáshatár függvények a négy alaphipotézishez [5]

A fenti adatok alapján lefuttattak véges elemes szimulációkat az ANSYS programcsomag segítségével egy rendkívül részletes véges elemes modell felhasználásával. A szimulációk eredményét összefoglalva a ***2. táblázat***ban adták meg a szelvény EN 1991 szerint számított tervezési teherbírását – összevetve az EN 1993 szerint méretezett ideális szelvény teherbírásával:

Méretezési modell		A hipotézis $L_{cor} = 0$	B hipotézis $L_{cor} = 90$	C hipotézis $L_{cor} = 180$	D hipotézis $L_{cor} = \infty$	EN 1993 szerinti méretezés ideális szelvényen
Nyomatéki maximum átlaga		83,8 kNm	84,7 kNm	84,7 kNm	84,8 kNm	-
Nyomatéki maximum szórása		6,9 kNm	8,7 kNm	8,9 kNm	9,3 kNm	-
Nyomatéki teherbírás tervezési értéke EN 1991 szerint ***0,1% kvantilis***	Gauss-eloszlásnál	62,5 kNm	58,0 kNm	57,1 kNm	56,1 kNm	65,8 kNm
	Lognormális eloszlásnál	64,8 kNm	61,4 kNm	60,9 kNm	60,1 kNm	

2. táblázat: a véges elemes számítás eredményei [5]

Kaláék elemzésük eredményét az alábbi diagramon foglalták össze (***3. ábra***):



3. ábra: a véges elemes számítás eredményei grafikusan ábrázolva [5]

Az eredmények alapján a legrosszabb hipotetikus esetben (Gauss-eloszlás 0,1%-os kvantilissal, végtelen korreláció) a valódi szelvény teherbírása 56,1 / 67,9 → 85,3%-a lenne az ideális szelvény EN 1993 szerint számított teherbírásának; de a legjobb hipotetikus esetben is (Lognormális eloszlás, nincs korreláció) alatta maradna a valós szelvény teherbírása az ideálisnak: 64,8 / 65,8 → 98,5%. A korreláció mértékét (az egyes gyártók és gyártmányok esetében) a valódi szelvényeken végzett szilárdságvizsgálatokkal lehet meghatározni.
Kaláék [6], [7], és [8]-ban fenti gondolatmenet szerinti vizsgálataikat tovább pontosították, illetve kiegészítették további tönkremeneteli jelenségek elemzésével is (pl. kihajlás, beroppanás, stb.).

2. Az acél szerkezeti elemekre vonatkozó szabványok

Az EN 1993 (EUROCODE3) szabványsorozat [9] szerint betervezhető, harmonizált európai szabványok által lefedett, valamint ezek közül a ***vizsgálatainkkal érintett*** szerkezeti acél termékek a következők:

EN 10025-1 [10] és EN 10025-2 [11] szerinti melegen hengerelt termékek ötvözetlen szerkezeti acélokból:	
EN 10017	Acélrúd húzásra és/vagy hideghengerlésre
EN 10024	Melegen hengerelt, lejtős talpú I acél
EN 10029 [12]	***Melegen hengerelt durvalemez***
EN 10034 [13]	***I és H szelvényű idomacélok***
EN 10048	Melegen hengerelt keskeny acélszalag
EN 10051	Folytatólagosan melegen hengerelt, bevonat nélküli lemez és szalag ötvözetlen és ötvözött acélokból
EN 10055	Melegen hengerelt, lekerekített egyenlő talpú T szelvényű idomacél belső lekerekítéssel
EN 10056-1 [14] ***EN 10056-2*** [15]	***Egyenlő és egyenlőtlen szárú szögacél***
EN 10058 [16]	***Általános célú, melegen hengerelt laposacél***
EN 10059 [17]	***Általános célú, melegen hengerelt négyzetacél***
EN 10060 [18]	***Általános célú, melegen hengerelt köracél***
EN 10061	Általános célú, melegen hengerelt hatszögacél
EN 10067	Melegen hengerelt bulbaacél
EN 10162	Hidegen hajlított idomacélok
EN 10279	Melegen hengerelt, U szelvényű idomacél

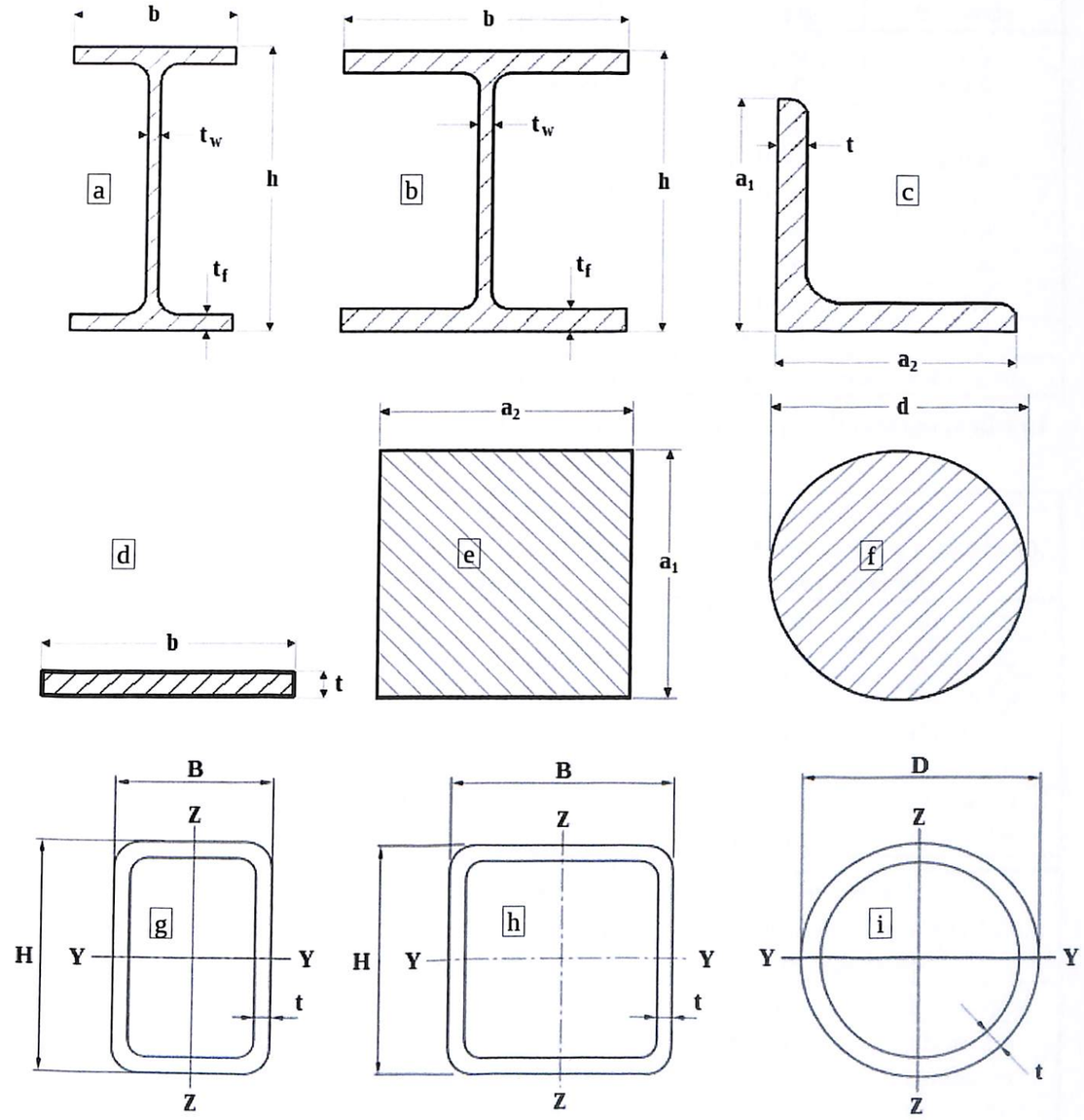
EN 10219-1 [19] **szerinti hidegen alakított, hegesztett, szerkezeti zárt idomacélok ötvözetlen acélokból:**	
EN 10219-2 [20]	***Hidegen alakított, hegesztett, szerkezeti zárt idomacélok (hosszvarratos hegesztett zártszelvények és csövek)***

3. táblázat: az ötvözetlen szerkezeti acélokra vonatkozó szabványcsalád

Vizsgálatainkat a leggyakrabban alkalmazott, tervezési feladatok során legtöbbször előkerülő, alábbi szelvényekre fogjuk elvégezni:
- Homloklemez, talplemez, heveder, hegesztett I tartó – EN 10029
- HEA, IPE tartók – EN 10034
- Egyenlő szárú szögacél – EN 10056-1, EN 10056-2
- Laposacél és négyszögacél – EN 10058, EN 10059
- Acélrúd (köracél) – EN 10060
- téglalap és négyzet keresztmetszetű zártszelvény, kerek acélcső – EN 10219-2

3. A szilárdsági és méretjellemzők szabványosan megengedett eltérései a névleges értékektől

A szelvények méretazonosítóit a 4. ábrán mutatjuk be.



4. ábra: a vizsgált szelvények alakja és méretazonosítói:
a) IPE; b) HEA; c) L-acél;
d) laposacél; e) négyzetacél; f) köracél;
g) téglalap zártszelvény; h) négyzet zártszelvény; i) acélcső

EN 10029 – melegen hengerelt durvalemezek alak- és mérettűrései (4-5. táblázat)

t [mm]	Δt [mm]			
	A osztály	B osztály	C osztály	D osztály
3-5	+0,7, -0,3	+0,7, -0,3	+1,0, -0	± 0,5
5-8	+0,8, -0,4	+0,9, -0,3	+1,2, -0	± 0,6
8-15	+0,9, -0,5	+1,1, -0,3	+1,4, -0	± 0,7
15-25	+1,0, -0,6	+1,3, -0,3	+1,6, -0	± 0,8
25-40	+1,3, -0,7	+1,7, -0,3	+2,0, -0	± 1,0
40-80	+1,7, -0,9	+2,3, -0,3	+2,6, -0	± 1,3
80-150	+2,1, -1,1	+2,9, -0,3	+3,2, -0	± 1,6
150-250	+2,4, -1,2	+3,3, -0,3	+3,6, -0	± 1,8
250-400	+3,5, -1,3	+4,5, -0,3	+4,8, -0	± 2,4
Osztály megjelölés nélküli igénylésnél a gyártók az „A” osztály szerint szállítanak.				

4. táblázat: acél durvalemezek EN 10029 szabvány szerint megengedett vastagsági tűrései

t [mm]	Síklapúság – N osztály (normál síkság)			
	460 MPa-ig 1% L (0,01 L), de legfeljebb:		460 MPa felett 1,5% L (0,015 L), de legfeljebb:	
3-5	9mm/1m	14mm/2m	12mm/1m	17mm/2m
5-8	8mm/1m	12mm/2m	11mm/1m	15mm/2m
8-15	7mm/1m	11mm/2m	10mm/1m	14mm/2m
15-25	7mm/1m	10mm/2m	10mm/1m	13mm/2m
25-40	6mm/1m	9mm/2m	9mm/1m	12mm/2m
40-250	5mm/1m	8mm/2m	8mm/1m	12mm/2m
250-400	6mm/1m	9mm/2m	9mm/1m	13mm/2m

t [mm]	Síklapúság – S osztály (speciális síkság)			
	460 MPa-ig 0,5% L (0,005) L, de legfeljebb:		460 MPa felett 1% L (0,01 L), de legfeljebb:	
3-5	5mm/1m	10mm/2m	7mm/1m	14mm/2m
5-8	5mm/1m	10mm/2m	7mm/1m	13mm/2m
8-15	3mm/1m	6mm/2m	7mm/1m	12mm/2m
15-25	3mm/1m	6mm/2m	7mm/1m	11mm/2m
25-40	3mm/1m	6mm/2m	7mm/1m	11mm/2m
40-250	3mm/1m	6mm/2m	6mm/1m	10mm/2m
250-400	4mm/1m	7mm/2m	7mm/1m	11mm/2m

5. táblázat: N és S osztályú acél durvalemezek EN 10029 szabvány szerint megengedett síksága

EN 10034 – I és H szelvények alak- és mérettűrései (6-8. táblázat)

h [mm]	Δh [mm]	b [mm]	Δb [mm]	t_w [mm]	Δt_w [mm]	t_f [mm]	Δ_{tf} [mm]
180-ig	+3, -2	**110-ig**	+4, -1	**7-ig**	± 0,7	**6,5-ig**	+1,5; -0,5
180-400	+4, -2	**110-200**	+4, -2	**7-10**	± 1,0	**6,5-10**	+2,0; -1,0
400-700	+5, -3	**200-325**	+4, -4	**10-20**	± 1,5	**10-20**	+2,5; -1,5
700-tól	+5, -5	**325-től**	+6, -5	**20-40**	± 2,0	**20-30**	+2,5; -2,0
				40-60	± 2,5	**30-40**	± 2,5
				60-tól	± 3,0	**40-60**	± 3,0
						60-tól	± 4,0

6. táblázat: I és H szelvények EN 10034 szabvány szerint megengedett méreteltérései

Talpdőlés: k+k' [mm] Minden t-re		Gerinceltolódás: e = $(b_1-b_2)/2$ [mm]		
		b [mm]	t < 40 mm esetén	t ≥ 40 mm esetén
b = 110-ig	1,5	**110-ig**	2,5	5,0
b = 110-től	0,02b, max 6,5	**110 – 325**	3,5	5,0
		325-től	5,0	8,0

7. táblázat: I és H szelvények EN 10034 szabvány szerint megengedett talpdőlése és gerinceltolódása

Egyenesség: q_{xx} és q_{yy} a hosszra vetítve		Keresztmetszet (tömeg) eltérés
b = 80-180	0,30% L (0,003 L)	Minden méretre: ± 4,0
b = 180-360	0,15% L (0,0015 L)	
b = 360-tól	0,1% L (0,001 L)	

8. táblázat: I és H szelvények EN 10034 szabvány szerint megengedett egyenességeltérése

EN 10056-2 – egyenlő és egyenlőtlen szárú szögacélok alak- és mérettűrései (9. táblázat)

t [mm]	Δt [mm]	ΔG ΔA [%]	a [mm]	Δa [mm]	Derékszögtől való eltérés k [mm]	Egyenesség: q a hosszra vetítve [mm]	Egyenesség: q kötött szakasz-hosszon
4-ig	± 0,50	± 6,0	**50-ig**	± 1,0	≤ 1,0	≤ 0,004·L	≤ 6 mm / 1,5 m
4 – 5	± 0,50	± 4,0	**50 – 100**	± 2,0	≤ 1,0	≤ 0,004·L	≤ 6 mm / 1,5 m
5 – 10	± 0,75	± 4,0	**100 – 150**	± 3,0	≤ 1,5	≤ 0,004·L	≤ 6 mm / 1,5 m
10 – 15	± 1,00	± 4,0	**150 – 200**	± 4,0	≤ 2,0	≤ 0,002·L	≤ 3 mm / 2,0 m
15-től	± 1,20	± 4,0	**200-tól**	+ 6,0; – 4,0	≤ 3,0	≤ 0,001·L	≤ 3 mm / 3,0 m

9. táblázat: egyenlő- és egyenlőtlen szárú szögacélok EN 10056-2 szabvány szerint megengedett alak- és méreteltérései

EN 10058 – melegen hengerelt laposacélok (10. táblázat)

b [mm]	Δb [mm]	t [mm]	Δt [mm]	Derékszögtől való eltérés u [mm]	Keresztmetszet (b·t) [mm²]	Egyenesség: q a hosszra vetítve [mm]
40-ig	± 0,75	**20-ig**	± 0,5	≤ 0,5	**1000-ig**	≤ 0,004·L
40 – 80	± 1,0	**20 – 25**	± 1,0	≤ 0,5	**1000-től**	≤ 0,0025·L
80 – 100	± 1,5	**20 – 40**	± 1,0	≤ 1,0		
100 – 120	± 2,0	**40 – 80**	± 1,5	≤ 1,5		
120 – 150	± 2,5					

10. táblázat: laposacélok EN 10058 szabvány szerint megengedett alak- és méreteltérései

EN 10059 – melegen hengerelt négyzetacélok (11-12. táblázat)

a [mm]	Δa [mm]	a [mm]	r [mm]	a [mm]	q a hosszra vetítve [mm]
8 – 14	± 0,4	**8 – 12**	≤ 1,0	**8 – 25**	–
14 – 25	± 0,5	**12 – 20**	≤ 1,5	**25 – 80**	≤ 0,004·L
25 – 35	± 0,6	**20 – 30**	≤ 2,0	**80 – 150**	≤ 0,0025·L
35 – 50	± 0,8	**30 – 50**	≤ 2,5		
50 – 90	± 1,0	**50 – 100**	≤ 3,0		
90 – 100	± 1,3	**100 – 150**	≤ 4,0		
100 – 120	± 1,5				
120 – 150	± 1,8				

11. táblázat: négyzetacélok EN 10059 szabvány szerint megengedett méreteltérései

a [mm]	Csavarodottság [°/m]	Csavarodottság [°]	a [mm]	derékszögtől való eltérés [mm]
8 – 14	≤ 4	≤ 24	**50-ig**	≤ 1,50
14 – 50	≤ 3	≤ 18	**50 – 75**	≤ 2,25
50 – 150	≤ 3	≤ 15	**75 – 100**	≤ 3,00
			100 – 150	≤ 4,50

12. táblázat: négyzetacélok EN 10059 szabvány szerint megengedett alaki eltérései

EN 10060 – melegen hengerelt köracélok (13-14. táblázat)

Normál pontosságú		Precíziós	
d [mm]	**Δd [mm]**	**d [mm]**	**Δd [mm]**
15-ig	± 0,4	**12-ig**	± 0,15
15 – 25	± 0,5	**12 – 22**	± 0,20
25 – 35	± 0,6	**22 – 30**	± 0,25
35 – 50	± 0,8	**30 – 40**	± 0,30
50 – 80	± 1,0	**40 – 52**	± 0,40
80 – 100	± 1,3	**52 – 75**	± 0,50
100 – 120	± 1,5		
120 – 160	± 2,0		
160 – 200	± 2,5		
200 – 220	± 3,0		
220 – 250	± 4,0		

13. táblázat: köracélok EN 10060 szabvány szerint megengedett átmérőpontossága

d [mm]	q a hosszra vetítve [mm]	Ovalitás [mm]
8 – 25	–	az **átmérő tűrésének** 75 %-a
25 – 80	≤ 0,004·L	
80 – 250	≤ 0,0025·L	

14. táblázat: köracélok EN 10060 szabvány szerint megengedett alaki eltérései

EN 10219-2 – Hidegen alakított négyzet vagy téglalap keresztmetszetű zárt idomacél (zártszelvény, 15. táblázat)

H, B [mm]	ΔH, ΔB	t [mm]	Δt	H, B [mm]	Homorúság, domborúság	Elcsavarodás: ≤ 2 mm teljes hosszon, ≤ 0,5 mm/m
50-ig	± 0,5 mm	**5-ig**	± 10%	**62,5-ig**	± 0,5 mm	**Oldalak merőlegessége:** 90° ± 1°
50 – 100	± 1%	**5-től**	± 0,5 mm	**62,5-től**	± 0,8 %	**Egyenesség:** ≤ 0,15 % teljes hosszon; ≤ 3 mm/m
100 – 200	± 0,8%					**Keresztmetszet (tömeg) eltérés:** ± 6%
200-tól	± 0,6%					**Külső lekerekítési ív sugár:** 1,6·t – 2,4·t

15. táblázat: négyzet vagy téglalap keresztmetszetű zárt idomacélok (zártszelvények) EN 10219-2 szabvány szerint megengedett alak- és méreteltérései

A Celsa Huta Ostrowiec Sp. z.o.o. üzem mérési adatai alapján az S275 minőségű IPE 300 szelvényekre érvényes vizsgálati paraméterek:

Adat forrása	f_y (R_e) [MPa]	f_u (R_m) [MPa]	A_5 [%]	G [kg/m]	A [mm²]	h [mm]	b [mm]	t_w [mm]	t_f [mm]
Mérés	318	441	37,5	42,51	5415	300,8	149,6	7,1	10,7
	282	438	42,0	42,31	5390	301,1	150,6	7,0	10,6
	317	431	38,6	42,48	5411	300,8	149,6	7,1	10,7
	314	445	35,4	43,07	5487	300,9	150,0	7,1	10,5
	317	444	38,9	43,05	5484	300,9	150,0	7,1	10,5
	320	440	36,7	42,51	5415	301,0	149,5	7,0	10,7
	307	433	38,0	42,45	5408	301,4	150,7	7,0	11,0
	297	418	36,9	42,41	5403	301,4	150,7	7,0	10,6
	321	443	38,6	42,43	5405	301,4	150,4	7,0	10,6
	329	454	38,4	42,25	5382	301,1	150,6	7,0	10,8
	318	448	36,9	42,26	5383	301,1	150,6	7,0	10,8
	322	449	38,0	42,27	5385	301,0	150,7	7,0	10,8
	316	443	37,2	42,22	5378	301,3	150,6	7,1	10,7
	312	450	34,3	43,11	5492	300,6	150,2	7,1	10,7
	305	440	34,0	42,95	5471	300,6	150,2	7,1	10,7
	312	448	35,4	42,91	5466	300,6	149,8	7,1	10,6
	310	436	37,4	42,34	5394	301,1	151,0	7,0	11,0
	303	420	38,9	42,37	5397	301,6	150,1	7,0	10,8
	294	422	32,4	42,42	5404	301,6	150,1	7,0	10,7
	310	431	37,2	43,32	5518	301,4	150,2	7,0	10,9
	322	458	38,5	42,25	5382	301,0	150,7	7,0	10,7
	313	438	38,0	43,21	5504	300,6	151,6	7,0	10,9
	317	435	38,4	43,19	5502	300,6	151,6	7,0	11,0
Minimum (worst case)	**282**	**418**	**32,4**	**42,22**	**5378**	**300,6**	**149,5**	**7,0**	**10,5**
Névleges	275	410	23,0	42,26	5382	300,0	150,0	7,1	10,7

17. táblázat: Celsa Huta Ostrowiec Sp. z.o.o. gyártású IPE 300 szelvények valós jellemzői

A Celsa Huta Ostrowiec Sp. z.o.o. üzem mérési adatai alapján az S275 minőségű IPE 200 szelvényekre érvényes vizsgálati paraméterek:

Adat forrása	f_y (R_e) [MPa]	f_u (R_m) [MPa]	A_5 [%]	G [kg/m]	A [mm²]	h [mm]	b [mm]	t_w [mm]	t_f [mm]
Mérés	323	448	36,1	22,23	2832	198,5	101,1	5,8	8,6
	330	453	36,8	21,94	2795	198,5	101,3	5,8	8,2
	325	450	39,1	21,93	2794	198,5	101,3	5,8	8,2
	310	435	37,1	22,18	2825	198,6	99,6	5,8	8,7

18. táblázat: Celsa Huta Ostrowiec Sp. z.o.o. gyártású IPE 200 szelvények valós jellemzői

Adat forrása	f_y (R_e) [MPa]	f_u (R_m) [MPa]	A_5 [%]	G [kg/m]	A [mm²]	h [mm]	b [mm]	t_w [mm]	t_f [mm]
Mérés	312	440	36,5	22,26	2836	198,6	99,6	5,8	8,7
	305	435	38,4	22,25	2834	198,6	99,6	5,8	8,7
	318	442	37,9	22,31	2842	199,6	101,1	5,9	8,2
	300	432	40,4	22,98	2927	198,4	101,0	5,8	8,5
	309	434	38,9	22,72	2894	198,4	101,0	5,8	8,5
	305	436	38,7	22,68	2889	198,4	101,0	5,8	8,5
	323	443	37,9	22,26	2835	199,6	101,1	5,9	8,2
Minimum (worst case)	**300**	**432**	**36,1**	**21,93**	**2794**	**198,4**	**99,6**	**5,8**	**8,2**
Névleges	275	410	23,0	22,36	2849	200,0	100,0	5,6	8,5

18. táblázat (folytatás)

A Celsa Huta Ostrowiec Sp. z.o.o. üzem mérési adatai alapján az S275 minőségű HEA 160 szelvényekre érvényes vizsgálati paraméterek:

Adat forrása	f_y (R_e) [MPa]	f_u (R_m) [MPa]	A_5 [%]	G [kg/m]	A [mm²]	h [mm]	b [mm]	t_w [mm]	t_f [mm]
Mérés	337	449	38,1	29,74	3789	150,6	159,4	6,1	8,9
	306	418	38,4	30,31	3861	152,4	159,8	6,1	9,3
	315	436	35,3	31,49	4011	151,8	159,4	6,2	9,1
	296	434	37,1	31,52	4015	151,8	159,4	6,2	9,0
	316	430	34,7	31,48	4010	151,8	160,3	6,2	9,0
	302	425	39,7	31,55	4019	152,4	160,2	6,3	9,3
	313	431	37,1	30,92	3938	151,6	159,1	6,2	9,3
	332	438	36,0	30,94	3941	151,6	159,1	6,2	9,3
	337	440	35,3	30,87	3933	151,6	159,6	6,2	9,1
	329	437	36,7	31,43	4003	152,9	160,5	6,4	9,6
	325	425	38,5	31,58	4023	152,7	161,2	6,2	9,3
	320	417	40,3	30,98	3946	152,4	159,8	6,1	9,3
	341	444	36,5	30,87	3932	151,9	159,4	6,2	9,1
	309	424	38,5	31,20	3974	151,9	159,1	6,1	9,4
	345	451	39,1	31,27	3983	151,9	159,1	6,1	9,4
	327	441	39,2	31,48	4010	151,7	160,2	6,3	9,3
	352	456	36,7	29,67	3780	150,5	159,6	6,0	8,8
	362	460	36,7	29,69	3782	150,5	159,9	6,0	8,8
	347	443	37,1	31,24	3980	151,9	159,1	6,1	9,4
	340	442	38,0	30,83	3927	151,8	159,6	6,3	9,2
Minimum (worst case)	**296**	**417**	**34,7**	**29,67**	**3780**	**150,5**	**159,1**	**6,0**	**8,8**
Névleges	275	410	23,0	30,44	3878	152,0	160,0	6,0	9,0

19. táblázat: Celsa Huta Ostrowiec Sp. z.o.o. gyártású HEA 160 szelvények valós jellemzői

A Celsa Huta Ostrowiec Sp. z.o.o. üzem mérési adatai alapján az S355 minőségű 80×8 mm-es egyenlő szárú szögacél szelvényekre érvényes vizsgálati paraméterek:

Adat forrása	f_y (R_e) [MPa]	f_u (R_m) [MPa]	A_5 [%]	G [kg/m]	A [mm²]	a [mm]	t [mm]
Mérés	366	483	31,0	9,43	1201	80,2	7,9
	392	507	32,3	9,43	1201	80,2	7,9
	398	509	32,1	9,44	1202	80,2	7,9
	392	507	31,6	9,44	1202	80,2	7,9
	400	509	30,3	9,43	1201	80,1	7,8
	399	504	34,4	9,44	1202	80,2	7,8
	397	506	33,7	9,43	1202	80,2	7,8
	385	505	33,0	9,43	1201	80,2	7,8
	387	497	31,8	9,46	1205	80,2	7,9
	395	503	32,1	9,48	1208	80,3	7,9
	397	507	34,3	9,49	1209	80,2	7,9
	409	525	33,1	9,49	1208	80,2	7,9
Minimum (worst case)	**366**	**483**	**30,3**	**9,43**	**1201**	**80,1**	**7,8**
Névleges	355	470	22,0	9,63	1230	80,0	8,0

20. táblázat: Celsa Huta Ostrowiec Sp. z.o.o. gyártású 80×8 mm-es szögacélok valós jellemzői

A Celsa Huta Ostrowiec Sp. z.o.o. üzem mérési adatai alapján az S275 minőségű 40×4 mm-es egyenlő szárú szögacél szelvényekre érvényes vizsgálati paraméterek:

Adat forrása	f_y (R_e) [MPa]	f_u (R_m) [MPa]	A_5 [%]	G [kg/m]	A [mm²]	a [mm]	t_f [mm]
Mérés	327	474	35,2	2,46	313	40,0	4,2
	320	438	39,4	2,31	295	39,8	4,3
	318	435	40,6	2,36	300	39,8	4,3
	318	437	39,0	2,37	302	39,7	4,3
	316	435	39,4	2,46	313	40,0	4,2
	326	442	37,8	2,40	306	39,7	4,1
	326	448	39,0	2,46	313	40,0	4,2
	309	442	40,2	2,40	306	39,5	4,1
	329	456	38,6	2,41	307	39,7	4,1
	329	469	37,2	2,49	318	40,2	4,2
	330	465	36,8	2,37	302	39,6	4,0
	318	449	36,2	2,53	323	40,7	4,3
	327	454	36,4	2,52	321	40,6	4,3
	317	446	38,0	2,53	322	40,5	4,4

21. táblázat: Celsa Huta Ostrowiec Sp. z.o.o. gyártású 40×4 mm-es szögacélok valós jellemzői

Adat forrása	f_y (R_e) [MPa]	f_u (R_m) [MPa]	A_5 [%]	G [kg/m]	A [mm²]	h [mm]	t_f [mm]
Mérés	329	458	35,2	2,52	321	40,5	4,4
	318	460	37,2	2,44	310	40,0	4,2
	333	469	38,2	2,47	314	40,2	4,2
	319	463	35,2	2,45	312	40,0	4,2
	337	475	36,6	2,45	312	39,9	4,2
	318	455	38,8	2,41	307	39,8	4,2
	338	473	42,6	2,41	306	39,8	4,2
	322	452	35,2	2,41	307	40,2	4,2
Minimum (worst case)	**309**	**435**	**35,2**	**2,31**	**295**	**39,5**	**4,0**
Névleges	275	410	23,0	2,42	308	40,0	4,0

21. táblázat (folytatás)

A Celsa Huta Ostrowiec Sp. z.o.o. üzem mérési adatai alapján az S275 minőségű 100×12 mm-es laposacél szelvényekre érvényes vizsgálati paraméterek:

Adat forrása	f_y (R_e) [MPa]	f_u (R_m) [MPa]	A_5 [%]	b [mm]	t [mm]	A [mm²]
Mérés	289	443	37,4	99,2	12,0	1190
	277	448	38,4	99,2	12,0	1190
	284	447	36,7	98,9	12,0	1187
	278	448	35,8	98,9	12,0	1187
	275	449	36,6	99,0	12,0	1188
	275	445	36,7	99,0	12,0	1188
Minimum (worst case)	**275**	**443**	**35,8**	**98,9**	**12,0**	**1187**
Névleges	275	410	23,0	100,0	12,0	1200

22. táblázat: Celsa Huta Ostrowiec Sp. z.o.o. gyártású 100×12 mm-es laposacélok valós jellemzői

A Celsa Huta Ostrowiec Sp. z.o.o. üzem mérési adatai alapján az S275 minőségű 100×20 mm-es laposacél szelvényekre érvényes vizsgálati paraméterek:

Adat forrása	f_y (R_e) [MPa]	f_u (R_m) [MPa]	A_5 [%]	b [mm]	t [mm]	A [mm²]
Mérés	265	448	33,1	100,0	19,8	1980
	291	469	35,1	99,8	19,8	1976
	275	462	34,4	99,8	19,8	1976

23. táblázat: Celsa Huta Ostrowiec Sp. z.o.o. gyártású 100×20 mm-es laposacélok valós jellemzői

Adat forrása	f_y (R_e) [MPa]	f_u (R_m) [MPa]	A_5 [%]	b [mm]	t [mm]	A [mm²]
	275	449	32,3	99,8	20,1	2006
	290	451	33,5	99,9	19,9	1988
	294	451	34,1	99,9	19,9	1988
Minimum (worst case)	**265**	**448**	**32,3**	**99,8**	**19,8**	**1976**
Névleges értékek:						
EN 10025-2 (*gyártás*)	265	410	23,0	100,0	20,0	2000
EN 1993-1-1 (*méretezés*)	275	430	> 15	100,0	20,0	2000

23. táblázat (folytatás)

Az ÓAM Ózdi Acélművek Kft. üzem mérési adatai alapján az S235 minőségű 12 mm-es négyzetacél szelvényekre érvényes vizsgálati paraméterek:

Adat forrása	f_y (R_e) [MPa]	f_u (R_m) [MPa]	A_5 [%]	a_1 [mm]	a_2 [mm]	A [mm²]
Mérés	333	451	36,1	12,01	11,99	144,0
	338	454	36,4	11,91	11,93	142,1
	335	454	36,3	11,95	11,99	143,3
	317	428	41,3	12,12	12,24	148,4
	314	432	39,4	12,25	12,10	148,2
	307	431	39,6	12,15	12,35	149,7
	309	429	38,6	12,17	12,35	150,3
	297	421	39,4	12,16	12,31	149,7
	312	425	38,1	12,23	12,31	150,6
	308	435	38,9	12,17	12,27	149,3
	315	443	40,7	12,19	12,12	147,7
	321	443	38,6	12,20	12,13	148,0
Minimum (worst case)	**297**	**421**	**36,1**	**11,91**	**11,93**	**142,1**
Névleges	235	360	26,0	12,00	12,00	144,0

24. táblázat: ÓAM Ózdi Acélművek Kft. gyártású 12 mm-es négyzetacélok valós jellemzői

A COS Târgoviste S.A. üzem mérési adatai alapján az S355 minőségű Ø80 mm-es köracél szelvényekre érvényes vizsgálati paraméterek:

Adat forrása	f_y (R_e) [MPa]	f_u (R_m) [MPa]	A_5 [%]	d_1 [mm]	d_2 [mm]	Ovalitás o [mm]	A [mm²]
Mérés	362	488	32	80,7	80,3	0,4	5090
				79,9	80,2	0,3	5033
				79,9	80,3	0,4	5039
	406	546	25	79,5	79,9	0,4	4989
				79,8	80,0	0,2	5014
				80,1	79,8	0,3	5020
				80,4	80,1	0,3	5058
				79,6	80,0	0,4	5001
				80,1	79,7	0,4	5014
	357	497	32	80,2	79,9	0,3	5033
				79,8	80,2	0,4	5027
				80,4	79,9	0,5	5045
Minimum (worst case)	**357**	**488**	**25**	**79,5**	**79,7**	**0,5**	**4989**
Névleges értékek:							
EN 10025-2 (*gyártás*)	325	470	20,0	79,5	79,7	0,0	5027
EN 1993-1-1 (*méretezés*)	335	470	> 15	80,0	80,0	0,0	5027

25. táblázat: COS Târgoviste S.A. gyártású Ø80 mm-es köracélok valós jellemzői

2. Jellemző méret- és szilárdságeltérések saját (ÉMI-s) mérések alapján

Az ÉMI Nonprofit Kft.-ben az EN 10219-1 szabvány szerinti tanúsítási eljárás során S275J0H szilárdsági osztályú zártszelvények első típusvizsgálatait (méret, alak, szilárdság, vegyelemzés) végeztük el, amelyek közül a geometriai és szilárdság-eredményeket a 26. táblázat tartalmazza:

Szelvény	f_y (R_e) [MPa]	f_u (R_m) [MPa]	A_5 [%]	G [kg/m]	A [mm²]	H (D_1) [mm]	B (D_2) [mm]	t [mm]
Ø26,9×2,0	422	469	35,6	1,25	159,2	26,8	26,8	2,11
				1,25	159,5	27,0	26,8	2,16
				1,25	159,1	27,0	26,9	1,95
Minimum				**1,25**	**159,1**	**26,8**	**26,8**	**1,95**
Névleges				1,22	156,0	26,9	26,9	2,00
20×20×2,0	411	458	29,8	1,04	132,7	20,1	20,0	2,06
				1,03	131,3	20,1	20,0	2,03
				1,04	132,2	20,1	20,1	2,04
Minimum				**1,03**	**131,3**	**20,1**	**20,0**	**2,03**
Névleges				1,05	134,0	20,0	20,0	2,00

26. táblázat: téglalap, négyszög és kör zártszelvények ÉMI mérésű valós jellemzői

Szelvény	f_y (R_e) [MPa]	f_u (R_m) [MPa]	A_5 [%]	G [kg/m]	A [mm²]	H (D_1) [mm]	B (D_2) [mm]	t [mm]
30×30×2,0	414	459	30,8	1,58	201,5	29,9	30,2	1,91
				1,58	202,0	29,9	30,1	1,92
				1,57	201,6	29,9	30,0	1,89
Minimum				**1,57**	**201,6**	**29,9**	**30,0**	**1,89**
Névleges				1,68	214,0	30,0	30,0	2,00
40×20×2,0	419	461	33,7	1,58	201,8	40,0	19,9	1,88
				1,59	202,4	40,0	19,9	1,91
				1,58	201,7	40,0	19,9	1,87
Minimum				**1,59**	**201,7**	**40,0**	**19,9**	**1,87**
Névleges				1,68	214,0	40,0	20,0	2,00
60×40×2,0	451	499	20,9	2,76	351,8	59,6	40,1	1,93
				2,78	353,6	59,8	40,1	1,98
				2,77	352,6	59,7	40,0	1,95
Minimum				**2,76**	**351,8**	**59,6**	**40,0**	**1,93**
Névleges				2,94	374,0	60,0	40,0	2,00
60×40×3,0	441	494	24,0	4,41	561,5	60,2	40,2	3,09
				4,42	562,7	60,2	40,1	3,08
				4,40	561,0	60,2	40,2	3,04
Minimum				**4,42**	**561,0**	**60,2**	**40,1**	**3,04**
Névleges				4,25	541,0	60,0	40,0	3,00

26. táblázat (folytatás)

3. Több termékjellemző szerkezeti szempontból kedvezőtlen irányú, de a szabványos követelmények között megengedett együttes eltérési lehetőségeinek azonosítása („worst case" meghatározása)

Az előző fejezetekben részletezett gyártói és ÉMI-s vizsgálati adatok alapján beazonosítottuk a gyakorlatban nagy valószínűséggel előforduló (vizsgálati adattal bizonyíthatóan létező) legkedvezőtlenebb geometriai értékeket, és AXIS VM [21] program segítségével meghatároztuk az ilyen geometriai adatokkal rendelkező valós szelvények keresztmetszeti adatait (keresztmetszeti felület, inercia, inerciasugár, rugalmas és képlékeny keresztmetszeti modulus).
Ezeken túl a szabványos tűrések betartása mellett felvettünk olyan feltételezett (elméletben létező) „szélsőséges" szelvényméreteket is, amelyek közül legalább egy geometriai eltérés a termékszabvány szerint lehetséges szélsőértékével szerepel. Ezeknek a hipotetikus szelvényeknek a létezése a szabvány alapján nem kizárható; a szabvány követelményeit maradéktalanul teljesítik, vizsgálattal azonban nem tudtuk igazolni létezésüket: az elemzésünk során feldolgozott nagyszámú vizsgálati eredményben nem találtunk ilyen mértékű eltérést.

Ennek ellenére van gyakorlati jelentősége a hipotetikus szelvények elemzésének; ugyanis a gyártói laboratóriumokban rendkívül szigorúan veszik a szabványos követelményeket – de pró és kontra egyaránt: azokat a termékeket, amelyek a vizsgálatokon nem felelnek meg, azonnal visszatartják és kérdés nélkül selejtezik (újraolvasztás); ugyanakkor azokat a termékeket, amelyek éppen csak a szabványos minimumértékkel felelnek meg, feltétel nélkül továbbengedik és kiszállítják a kereskedelmi forgalomba (példa: a 22. táblázatban kék színnel jelölt, a gyártói ellenőrzés során megfelelőnek minősített szelvények mért folyáshatára azonos a szabványos minimummal). Emiatt nem lehet kizárni azt, hogy az általunk elemzett mennyiségnél nagyságrendekkel több (számos gyártónál éveken keresztül gyártott nagyszámú) forgalomba hozott acélszelvény között előfordulhat(tak) a hipotetikus szelvényeinkhez hasonló valós méretekkel rendelkező szelvények is.

IPE 300 szelvények

Geometriai és keresztmetszeti adatok eltérései:

Szelvény	h [mm]	b [mm]	t_w [mm]	t_f [mm]	A_x [mm²]	A_{vz} [mm²]
IPE 300 névleges	300,0	150,0	7,1	10,7	5382	2569
IPE 300 gyári minimum adatok	300,6 +0,20%	149,5 -0,33%	7,0 -1,41%	10,5 -1,87%	5290 -1,71%	2539 -1,17%
IPE 300 -10% t_w	300,0 +0,00%	150,0 +0,00%	6,4 -10,00%	10,7 +0,00%	5184 -3,68%	2363 -8,00%
IPE 300 -7% t_f	300,0 +0,00%	150,0 +0,00%	7,1 +0,00%	10,0 -7,00%	5167 -3,99%	2551 -0,70%
IPE 300 -2mm h, -2mm b; +10% t_w, -10% t_f	298,0 -0,67%	148,0 -1,33%	7,8 +10,00%	9,6 -10,00%	5221 -2,99%	2734 +6,45%
IPE 300 +4mm h, -2mm b; +5% t_w -10% t_f	304,0 +1,33%	148,0 -1,33%	7,5 +5,00%	9,6 -10,00%	5166 -4,00%	2676 +4,17%

Profil	I_y [mm⁴]	I_z [mm⁴]	i_y [mm⁴]	i_z [mm⁴]	$W_{el,y}$ [mm³]	$W_{el,z}$ [mm³]	$W_{pl,y}$ [mm³]	$W_{pl,z}$ [mm³]
IPE 300 névleges	$8{,}358 \cdot 10^7$	$6{,}038 \cdot 10^6$	124,6	33,5	557200	80500	628500	125200
IPE 300 gyári minimum adatok	$8{,}243 \cdot 10^7$ -1,37%	$5{,}866 \cdot 10^6$ -2,85%	124,8 +0,16%	33,3 -0,60%	548500 -1,56%	78500 -2,48%	618600 -1,58%	122100 -2,48%
IPE 300 -10% t_w	$8{,}228 \cdot 10^7$ -1,55%	$6{,}035 \cdot 10^6$ -0,05%	126,0 +1,12%	34,1 +1,79%	548600 -1,54%	80500 +0,00%	614600 -2,21%	124500 -0,56%
IPE 300 -7% t_f	$7{,}943 \cdot 10^7$ -4,97%	$5{,}617 \cdot 10^6$ -6,97%	124,0 -0,48%	33,0 -1,49%	529500 -4,97%	74900 -6,96%	598600 -4,76%	116800 -6,71%
IPE 300 -2mm h, -2mm b; +10% t_w, -10% t_f	$7{,}695 \cdot 10^7$ **-7,92%**	$5{,}226 \cdot 10^6$ **-13,45%**	121,4 -2,57%	31,6 -5,67%	516500 **-7,30%**	70600 **-12,30%**	589000 -6,28%	111100 **-11,26%**
IPE 300 +4mm h, -2mm b; +5% t_w -10% t_f	$7{,}985 \cdot 10^7$ -4,46%	$5{,}224 \cdot 10^6$ **-13,48%**	124,3 -0,24%	31,8 -5,07%	525300 -5,73%	70600 **-12,30%**	597500 -4,93%	110800 **-11,50%**

27. táblázat: IPE 300 szelvények geometriai és keresztmetszeti adatainak eltérései

IPE 200 szelvények:

Geometriai és keresztmetszeti adatok eltérései:

Profil	h [mm]	b [mm]	t_w [mm]	t_f [mm]	A_x [mm²]	A_{vz} [mm²]
IPE 200 névleges	200,0	100,0	5,6	8,5	2849	1451,6
IPE 200 gyári minimum adatok	198,4 -0,80%	99,6 -0,40%	5,8 +3,57%	8,2 -3,53%	2794 -1,93%	1454,1 +0,17%
IPE 200 -10% t_w	200,0 +0,00%	100,0 +0,00%	5,0 -10,00%	8,5 +0,00%	2746 -3,62%	1343,8 -7,42%
IPE 200 -7% t_f	200,0 +0,00%	100,0 +0,00%	5,6 +0,00%	7,9 -7,00%	2736 -3,97%	1436,4 -1,05%
IPE 200 -2mm h, -1mm b; +10% t_w, -10% t_f	198,0 -1,00%	99,0 -1,00%	6,2 +10,00%	7,7 -10,00%	2764 -2,98%	1525,9 +5,12%
IPE 200 +4mm h, -1mm b; +5% t_w -10% t_f	204,0 +2,00%	99,0 -1,00%	5,3 -5,00%	7,7 -10,00%	2748 -3,55%	1503,5 +3,58%

Profil	I_y [mm⁴]	I_z [mm⁴]	i_y [mm⁴]	i_z [mm⁴]	$W_{el,y}$ [mm³]	$W_{el,z}$ [mm³]	$W_{pl,y}$ [mm³]	$W_{pl,z}$ [mm³]
IPE 200 névleges	$1,944 \cdot 10^7$	$1,424 \cdot 10^6$	82,6	22,4	194400	28500	220700	44600
IPE 200 gyári minimum adatok	$1,866 \cdot 10^7$ -3,99%	$1,358 \cdot 10^6$ -4,63%	81,7 -1,09%	22,0 -1,79%	188100 -3,24%	27300 -4,21%	214300 -2,90%	42900 -3,81%
IPE 200 -10% t_w	$1,915 \cdot 10^7$ -1,49%	$1,423 \cdot 10^6$ -0,08%	83,5 +1,09%	22,8 +1,79%	191500 -1,49%	28500 +0,00%	216000 -2,13%	44300 -0,67%
IPE 200 -7% t_f	$1,850 \cdot 10^7$ -4,82%	$1,325 \cdot 10^6$ -6,97%	82,2 -0,48%	22,0 -1,79%	185000 -4,84%	26500 **-7,02%**	210400 -4,67%	41600 -6,73%
IPE 200 -2mm h, -1mm b; +10% t_w, -10% t_f	$1,783 \cdot 10^7$ **-8,25%**	$1,245 \cdot 10^6$ **-12,52%**	80,3 -2,78%	21,2 -5,36%	180100 **-7,36%**	25200 **-11,58%**	206500 -6,43%	39900 **-10,54%**
IPE 200 +4mm h, -1mm b; +5% t_w -10% t_f	$1,894 \cdot 10^7$ -2,56%	$1,245 \cdot 10^6$ **-12,56%**	83,0 +0,48%	21,3 -4,91%	185700 -4,48%	25100 **-11,93%**	212400 -3,76%	39800 **-10,76%**

28. táblázat: IPE 200 szelvények geometriai és keresztmetszeti adatainak eltérései

HEA 160 szelvények:

Geometriai és keresztmetszeti adatok eltérései:

Szelvény	h [mm]	b [mm]	t_w [mm]	t_f [mm]	A_x [mm²]	A_{vz} [mm²]
HEA 160 névleges	152,0	160,0	6,0	9,0	3878	1322
HEA 160 gyári minimum adatok	150,5 -0,99%	159,1 -0,56%	6,0 +0,00%	8,8 -2,22%	3791 -2,24%	1308 -1,09%
HEA 160 -10% t_w	152,0 +0,00%	160,0 +0,00%	5,4 -10,00%	9,0 +0,00%	3797 -2,09%	1236 -6,54%

29. táblázat: HEA 160 szelvények geometriai és keresztmetszeti adatainak eltérései

Szelvény	h [mm]	b [mm]	t_w [mm]	t_f [mm]	A_x [mm²]	A_{vz} [mm²]
HEA 160	152,0	160,0	6,0	8,6	3739	1297
-5% t_f	+0,00%	+0,00%	+0,00%	-4,44%	-3,58%	-1,92%
HEA 160	150,0	158,0	6,6	8,5	3745	1370
-2mm h, -2mm b; +10% t_w, -6% t_f	-1,32%	-1,25%	+10,00%	-6,00%	-3,43%	+3,64%
HEA 160	155,0	158,0	6,6	8,3	3723	1404
+3mm h, -2mm b; +10% t_w -8% t_f	+1,97%	-1,25%	+10,00%	-8,00%	-4,00%	+6,20%

Profil	I_y [mm⁴]	I_z [mm⁴]	i_y [mm⁴]	i_z [mm⁴]	$W_{el,y}$ [mm³]	$W_{el,z}$ [mm³]	$W_{pl,y}$ [mm³]	$W_{pl,z}$ [mm³]
HEA 160 névleges	$1{,}673\cdot10^7$	$6{,}156\cdot10^6$	65,7	39,8	220200	76900	245200	117600
HEA 160 gyári	$1{,}602\cdot10^7$	$5{,}918\cdot10^6$	65,0	39,5	212900	74400	237100	113800
minimum adatok	-4,27%	-3,87%	-1,07%	-0,75%	-3,32%	-3,25%	-3,30%	-3,23%
HEA 160	$1{,}661\cdot10^7$	$6{,}154\cdot10^6$	66,1	40,3	218600	76900	242500	117300
-10% t_w	-0,74%	-0,03%	+0,61%	+1,26%	-0,73%	+0,00%	-1,10%	-0,26%
HEA 160	$1{,}612\cdot10^7$	$5{,}849\cdot10^6$	65,7	39,6	212000	73100	235900	111900
-5% t_f	-3,69%	-4,99%	+0,00%	-0,50%	-3,72%	-4,94%	-3,79%	-4,85%
HEA 160	$1{,}548\cdot10^7$	$5{,}575\cdot10^6$	64,3	38,6	206300	70600	230600	108300
-2mm h, -2mm b; +10% t_w, -6% t_f	**-7,52%**	**-9,44%**	-2,13%	-3,02%	-6,31%	**-8,19%**	-5,95%	**-7,91%**
HEA 160	$1{,}640\cdot10^7$	$5{,}457\cdot10^6$	66,4	38,3	211600	69100	236300	106100
+3mm h, -2mm b; +10% t_w -8% t_f	-2,02%	**-11,35%**	+1,07%	-3,77%	-3,91%	**-10,14%**	-3,63%	**-9,78%**

29. táblázat (folytatás)

L 80×80×8 mm szelvények:

Geometriai és keresztmetszeti adatok eltérései:

Szelvény	a [mm]	b [mm]	t_a [mm]	t_b [mm]	A [mm²]	I_y [mm⁴]	I_z [mm⁴]
L 80×80×8 névleges	80,0	80,0	8,0	8,0	1227	$7{,}22\cdot10^5$	$7{,}22\cdot10^5$
L 80×80×8	81,0	81,0	7,8	7,8	1213	$7{,}35\cdot10^5$	$7{,}35\cdot10^5$
gyári minimum	+1,25%	+1,25%	-2,50%	-2,50%	-1,14%	+1,80%	+1,80%
L 80×80×8	80,0	80,0	7,7	7,7	1183	$6{,}99\cdot10^5$	$6{,}99\cdot10^5$
-0,3 mm t	+0,00%	+0,00%	-3,75%	-3,75%	-3,59%	-3,19%	-3,19%
L 80×80×8	78,0	78,0	7,9	7,9	1181	$6{,}59\cdot10^5$	$6{,}59\cdot10^5$
-2mm a, -0,1mm t	-2,50%	-2,50%	-1,25%	-1,25%	-3,75%	**-8,73%**	**-8,73%**
L 80×80×8	82,0	82,0	7,5	7,5	1184	$7{,}38\cdot10^5$	$7{,}38\cdot10^5$
+2mm a, -0,5mm t	+2,50%	+2,50%	-6,25%	-6,25%	-3,50%	+2,22%	+2,22%

30. táblázat: L 80×80×8 mm szelvények geometriai és keresztmetszeti adatainak eltérései

L 40×40×4 mm szelvények:

Geometriai és keresztmetszeti adatok eltérései:

Szelvény	a [mm]	b [mm]	t_a [mm]	t_b [mm]	A [mm²]	I_y [mm⁴]	I_z [mm⁴]
L 40×40×4 névleges	40,0	40,0	4,0	4,0	308	$4{,}50 \cdot 10^4$	$4{,}50 \cdot 10^4$
L 40×40×4 gyári minimum	39,5 -1,25%	39,5 -1,25%	4,0 +0,00%	4,0 +0,00%	304 -1,30%	$4{,}30 \cdot 10^4$ -4,44%	$4{,}30 \cdot 10^4$ -4,44%
L 40×40×4 -2 mm t	40,0 +0,00%	40,0 +0,00%	3,8 -5,00%	3,8 -5,00%	293 -4,87%	$4{,}30 \cdot 10^4$ -4,44%	$4{,}30 \cdot 10^4$ -4,44%
L 40×40×4 +1mm a, -3mm t	41,0 +2,50%	41,0 +2,50%	3,7 -7,50%	3,7 -7,50%	294 -4,55%	$4{,}50 \cdot 10^4$ 0,00%	$4{,}50 \cdot 10^4$ 0,00%
L 40×40×4 -1mm a, -1mm t	39,0 -2,50%	39,0 -2,50%	3,9 -2,50%	3,9 -2,50%	293 -4,87%	$4{,}00 \cdot 10^4$ **-11,11%**	$4{,}00 \cdot 10^4$ **-11,11%**

31. táblázat: L 40×40×4 mm szelvények geometriai és keresztmetszeti adatainak eltérései

100×12 mm laposacél szelvények:

Geometriai és keresztmetszeti adatok eltérései:

Szelvény	b [mm]	t [mm]	A [mm²]	I_y [mm⁴]	I_z [mm⁴]
100×12 mm névleges	100,0	12,0	1200	$1{,}00 \cdot 10^6$	14000
100×12 mm gyári minimum	98,9 -1,10%	12,0 +0,00%	1187 -1,08%	$9{,}67 \cdot 10^5$ -3,30%	14000 +0,00%
100×12 mm -0,5 mm t	100 0,00%	11,5 -4,17%	1150 -4,17%	$9{,}58 \cdot 10^5$ -4,20%	13000 -7,14%
100×12 mm -1,5mm b	98,5 -1,50%	12,0 +0,00%	1182 -1,50%	$9{,}56 \cdot 10^5$ -4,40%	14000 +0,00%
100×12 mm -1,5mm b, -0,5mm t	98,5 -1,50%	11,5 -4,17%	1133 -5,58%	$9{,}16 \cdot 10^5$ **-8,40%**	12000 **-14,29%**

32. táblázat: 100×12 mm laposacél szelvények geometriai és keresztmetszeti adatainak eltérései

100×20 mm laposacél szelvények:

Geometriai és keresztmetszeti adatok eltérései:

Szelvény	b [mm]	t [mm]	A [mm²]	I_y [mm⁴]	I_z [mm⁴]
100×20 mm névleges	100,0	20,0	2000	$1{,}67 \cdot 10^6$	67000
100×20 mm gyári minimum	99,8 -0,20%	19,8 -1,00%	1976 -1,20%	$1{,}64 \cdot 10^6$ -1,62%	65000 -2,99%
100×20 mm -0,5 mm t	100,0 +0,00%	19,5 -2,50%	1950 -2,50%	$1{,}63 \cdot 10^6$ -2,52%	62000 **-7,46%**
100×20 mm -1,5mm b	98,5 -1,50%	20,0 +0,00%	1970 -1,50%	$1{,}59 \cdot 10^6$ -4,44%	66000 -1,49%
100×20 mm -1,5mm b, -0,5mm t	98,5 -1,50%	19,5 -2,50%	1921 -3,95%	$1{,}55 \cdot 10^6$ -6,84%	61000 **-8,96%**

33. táblázat: 100×20 mm laposacél szelvények geometriai és keresztmetszeti adatainak eltérései

□ 12 mm négyzetacél szelvények:

Geometriai és keresztmetszeti adatok eltérései:

Szelvény	a_1 [mm]	a_2 [mm]	A [mm²]	I_y [mm⁴]	I_z [mm⁴]
□ 12 mm névleges	12,0	12,0	144	1728	1728
□ 12 mm gyári minimum	11,91 -0,75%	11,93 -0,58%	142 -1,39%	1680 -2,80%	1685 -2,48%
□ 12 mm -0,4mm a_1	11,6 -3,33%	12,0 +0,00%	139 -3,47%	1561 **-9,67%**	1670 -3,33%
□ 12 mm -0,4mm a_1; -0,4mm a_2	11,6 -3,33%	11,6 -3,33%	135 -6,25%	1509 **-12,68%**	1509 **-12,68%**

34. táblázat: 12 mm négyzetacél szelvények geometriai és keresztmetszeti adatainak eltérései

Ø80 mm köracél szelvények:

Geometriai és keresztmetszeti adatok eltérései:

Szelvény	d [mm]	A [mm²]	I_z [mm⁴]
Ø80 mm névleges	80,0	5020	$2{,}01 \cdot 10^6$
Ø80 mm gyári minimum	79,6 -0,50%	4975 -0,90%	$1{,}97 \cdot 10^6$ -1,79%
Ø80 mm -1mm d	79,0 -1,25%	4901 -2,37%	$1{,}91 \cdot 10^6$ -4,74%

35. táblázat: Ø80 mm köracél szelvények geometriai és keresztmetszeti adatainak eltérései

30×30×2 mm négyzet zártszelvények:

Geometriai és keresztmetszeti adatok eltérései:

Szelvény	a_1 [mm]	a_2 [mm]	t_{a1} [mm]	t_{a2} [mm]	A [mm²]	I_y [mm⁴]	I_z [mm⁴]
□ 30×30×2 névleges	30,0	30,0	2,0	2,0	214	$2{,}70 \cdot 10^4$	$2{,}70 \cdot 10^4$
□ 30×30×2 mért minimum	29,9 -0,33%	30,0 0,00%	1,89 -5,50%	1,89 -5,50%	201,6 -5,79%	$2{,}60 \cdot 10^4$ -3,70%	$2{,}60 \cdot 10^4$ -3,70%
□ 30×30×2 -0,5mm a_1	29,5 -1,67%	30,0 0,00%	2,0 0,00%	2,0 0,00%	212 -0,93%	$2{,}60 \cdot 10^4$ -3,70%	$2{,}70 \cdot 10^4$ 0,00%
□ 30×30×2 -0,5mm a	29,5 -1,67%	29,5 -1,67%	2,0 0,00%	2,0 0,00%	210 -1,87%	$2{,}60 \cdot 10^4$ -3,70%	$2{,}60 \cdot 10^4$ -3,70%
□ 30×30×2 -0,5mm a, -0,1mm t	29,5 -1,67%	29,5 -1,67%	1,9 -5,00%	1,9 -5,00%	202 -5,61%	$2{,}50 \cdot 10^4$ **-7,41%**	$2{,}50 \cdot 10^4$ **-7,41%**

36. táblázat: 30×30×2 mm-es négyzet zártszelvények geometriai és keresztmetszeti adatainak eltérései

60×40×2 mm téglalap zártszelvények:

Geometriai és keresztmetszeti adatok eltérései:

Szelvény	a [mm]	b [mm]	t_a [mm]	t_b [mm]	A [mm²]	I_y [mm⁴]	I_z [mm⁴]
□ 60×40×2 névleges	60,0	40,0	2,0	2,0	374	$1,84 \cdot 10^5$	$9,80 \cdot 10^4$
□ 60×40×2 mért minimum	59,6 -0,67%	40,0 0,00%	1,93 -3,50%	1,93 -3,50%	359 -4,01%	$1,75 \cdot 10^5$ -4,89%	$9,50 \cdot 10^5$ -3,06%
□ 60×40×2 -0,6mm a; 0,1mm t	59,4 -1,00%	40,0 0,00%	1,9 -5,00%	1,9 -5,00%	353 -5,61%	$1,72 \cdot 10^5$ -6,52%	$9,30 \cdot 10^4$ -5,10%
□ 60×40×2 -0,5mm b; 0,1mm t	60,0 0,00%	39,5 -1,25%	1,9 -5,00%	1,9 -5,00%	354 -5,35%	$1,74 \cdot 10^5$ -5,43%	$9,10 \cdot 10^4$ **-7,14%**
□ 60×40×2 -0,6mm a; -0,5mm b; -0,09mm t	59,4 -1,00%	39,5 -1,25%	1,91 -4,50%	1,91 -4,50%	353 -5,61%	$1,71 \cdot 10^5$ **-7,07%**	$9,10 \cdot 10^4$ **-7,14%**

37. táblázat: 60×40×2 mm-es téglalap zártszelvények geometriai és keresztmetszeti adatainak eltérései

O26,9×2,0 mm acélcső szelvények:

Geometriai és keresztmetszeti adatok eltérései:

Szelvény	d [mm]	t [mm]	A [mm²]	I [mm⁴]
O26,9×2,0 névleges	26,9	2,0	156	$1,22 \cdot 10^4$
O26,9×2,0 mért minimum	26,8 -0,37%	1,95 -2,50%	152 -2,56%	$1,18 \cdot 10^4$ -3,11%
O26,9×2,0 -0,1mm t	26,9 0,00%	1,9 -5,00%	149 -4,49%	$1,17 \cdot 10^4$ -3,93%
O26,9×2,0 -0,5mm d; -0,05mm t	26,4 -1,86%	1,95 -2,50%	150 -3,85%	$1,13 \cdot 10^4$ **-7,70%**

38. táblázat: 26,9×2,0 mm-es acélcső geometriai és keresztmetszeti adatainak eltérései

IV. Modellezés

1. Jellemző szerkezetek, csomópontok kialakítása párhuzamosan a névleges és a tényleges méretekkel megadott szelvényekből

Az általunk vizsgált szelvényekből az alábbi szerkezeteket alakítjuk ki és modellezzük:
EN 10029 (Durvalemez):
- Homloklemez, talplemez, heveder: húzott, nyírt csavaros kapcsolat
- Hegesztett I tartó: hajlított kéttámaszú gerenda

EN 10034 (I-szelvények):
- IPE 300, IPE 240: hajlított kéttámaszú gerenda
- HEA 160: hajlított kéttámaszú gerenda; nyomott oszlop

EN 10056-1, EN 10056-2 (L-acélok):
- egyenlő szárú L-acélok: nyomott oszlop; húzott rúd; húzott, nyírt csavaros kapcsolat

EN 10058 (laposacélok):
- Laposacélok: húzott rúd; húzott, nyírt csavaros kapcsolat

EN 10059 (négyzetacélok):
- Négyzetacél: húzott rúd, nyomott oszlop

EN 10060 (köracélok):
- Köracél: húzott rúd, nyomott oszlop

EN 10219-2 (zártszelvények):
- téglalap zártszelvény: húzott rúd, nyomott oszlop
- négyzet zártszelvény: húzott rúd, nyomott oszlop
- acélcső: húzott rúd, nyomott oszlop

2. Szerkezeti analízis (méretezés) a névleges és a tényleges méretű elemekkel kialakított szerkezeteken, csomópontokon

2.1. Eltérés hatása a húzott rúd teherbírására, valamint a nyomott oszlop teherbírására és kihajlására

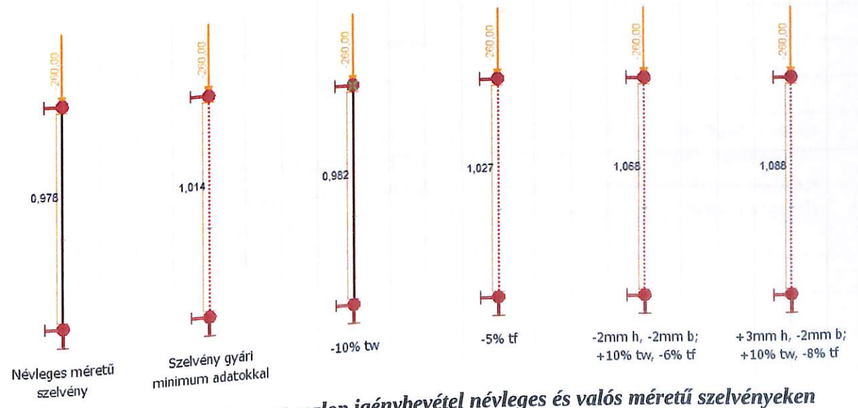
HEA 160:

Az acél csarnokok keretállás oszlopaihoz gyakran terveznek be HEA szelvényeket, így ezt a szelvénytípust – mint gerinclemezes tartót – nem csak hajlított gerendaként, hanem nyomott oszlopként is ellenőrizzük. Az elemzéshez felvettünk egy 6m magasságú HEA 160 szelvényből kialakított mindkét végén csuklós megtámasztású oszlopot, amit 260 kN nyomó irányú erővel terhelünk meg. Az elrendezést az 5. ábra mutatja be.



5. ábra: HEA 160 nyomott oszlop

Az AXIS-VM méretező program segítségével meghatároztuk a szerkezet igénybevételét, amit a 6. ábrán mutatunk be:



6. ábra: HEA 160 nyomott oszlop igénybevétel névleges és valós méretű szelvényeken

A kihasználtság meghatározásához elvégzett számítások a névleges méretű szelvényből kialakított oszlop esetében:

13. Kihajlási ellenállás:

EN 1993-1-1 6.3.1

Mértékadó keresztmetszet: $x = 0{,}00 \cdot L = 0{,}00 \cdot 600{,}00 = 0$ cm

$L_y = k_y \cdot L = 1 \cdot 600{,}00 = 600{,}00$ cm

$L_z = k_z \cdot L = 1 \cdot 600{,}00 = 600{,}00$ cm

Kihajlási görbe az y tengely körül: b 6.2 táblázat

$\rightarrow \alpha_y = 0{,}34$ 6.1 táblázat

Kihajlási görbe a z tengely körül: c 6.2 táblázat

$\rightarrow \alpha_z = 0{,}49$ 6.1 táblázat

Oktatási változat

$$\lambda_y^* = \frac{L_y}{i_y} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{600{,}00}{6{,}57} \cdot \frac{1}{86{,}8} = 1{,}05 \quad (6.50)$$

$$\lambda_z^* = \frac{L_z}{i_z} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{600{,}00}{3{,}98} \cdot \frac{1}{86{,}8} = 1{,}73 \quad (6.50)$$

$$\phi_y = \frac{1 + \alpha_y \cdot (\lambda_y^* - 0{,}2) + \lambda_y^{*2}}{2} = \frac{1 + 0{,}34 \cdot (1{,}05 - 0{,}2) + 1{,}05^2}{2} = 1{,}1984$$

$$\phi_z = \frac{1 + \alpha_z \cdot (\lambda_z^* - 0{,}2) + \lambda_z^{*2}}{2} = \frac{1 + 0{,}49 \cdot (1{,}73 - 0{,}2) + 1{,}73^2}{2} = 2{,}3806$$

$$\chi_y = \min\left(\frac{1}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 - \lambda_y^{*2}}}; 1\right) = \min\left(\frac{1}{1{,}1984 + \sqrt{1{,}1984^2 - 1{,}05^2}}; 1\right) = 0{,}5643 \quad (6.49)$$

$$\chi_z = \min\left(\frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \lambda_z^{*2}}}; 1\right) = \min\left(\frac{1}{2{,}3806 + \sqrt{2{,}3806^2 - 1{,}73^2}}; 1\right) = 0{,}2493 \quad (6.49)$$

$\chi_{TF} = 0{,}7011$ (6.52, 6.49)

$\chi = \min(\chi_y ; \chi_z ; \chi_{TF}) = \min(0{,}5643 ; 0{,}2493 ; 0{,}7011) = 0{,}2493 \leq 1{,}0$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f}{\gamma_{M1}} = \frac{0{,}2493 \cdot 38{,}78 \cdot 27{,}50}{1} = 265{,}89 \text{ kN} \quad (6.47)$$

$$\eta_{N_b} = \frac{|N_{Ed_1}|}{N_{b,Rd}} = \frac{|(-260{,}00)|}{265{,}89} = 97{,}8\,\% \quad (6.46) \qquad \textbf{megfelel}$$

A 6. ábrán látható módon a 97,8%-os kihasználtságra méretezett névleges szelvénnyel azonos elrendezésben a valódi **gyári** mérési adatokból meghatározott „worst case” **szelvénynél 1,4%-os**, a szabványos tűrésen belül felvehető, a modellezett elrendezés szempontjából **legkedvezőtlenebb szelvényméret esetében** viszont már **8,8%-os** a kihajlási **túlterhelés**. Ez utóbbi két esethez tartozó számításokat külön is részletezzük.

HEA 160 szelvény a gyári mérések minimuma alapján meghatározott méretekkel:

13. Kihajlási ellenállás:

EN 1993-1-1: 6.3.1

Mértékadó keresztmetszet: $x = 0{,}00 \cdot L = 0{,}00 \cdot 600{,}00 = 0$ cm

$L_y = k_y \cdot L = 1 \cdot 600{,}00 = 600{,}00$ cm

$L_z = k_z \cdot L = 1 \cdot 600{,}00 = 600{,}00$ cm

Kihajlási görbe az y tengely körül: *b* 6.2 táblázat

$\rightarrow \alpha_y = 0{,}34$ 6.1 táblázat

Kihajlási görbe a z tengely körül: *c* 6.2 táblázat

$\rightarrow \alpha_z = 0{,}49$ 6.1 táblázat

Oktatási változat

$$\lambda_y^* = \frac{L_y}{i_y} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{600{,}00}{6{,}50} \cdot \frac{1}{86{,}8} = 1{,}06 \quad (6.50)$$

$$\lambda_z^* = \frac{L_z}{i_z} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{600{,}00}{3{,}95} \cdot \frac{1}{86{,}8} = 1{,}75 \quad (6.50)$$

$$\phi_y = \frac{1 + \alpha_y \cdot (\lambda_y^* - 0{,}2) + \lambda_y^{*2}}{2} = \frac{1 + 0{,}34 \cdot (1{,}06 - 0{,}2) + 1{,}06^2}{2} = 1{,}2119$$

$$\phi_z = \frac{1 + \alpha_z \cdot (\lambda_z^* - 0{,}2) + \lambda_z^{*2}}{2} = \frac{1 + 0{,}49 \cdot (1{,}75 - 0{,}2) + 1{,}75^2}{2} = 2{,}4093$$

$$\chi_y = \min\left(\frac{1}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 - \lambda_y^{*2}}}; 1\right) = \min\left(\frac{1}{1{,}2119 + \sqrt{1{,}2119^2 - 1{,}06^2}}; 1\right) = 0{,}5575 \quad (6.49)$$

$$\chi_z = \min\left(\frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \lambda_z^{*2}}}; 1\right) = \min\left(\frac{1}{2{,}4093 + \sqrt{2{,}4093^2 - 1{,}75^2}}; 1\right) = 0{,}2459 \quad (6.49)$$

$\chi_{TF} = 0{,}6971$ (6.52, 6.49)

$\chi = \min(\chi_y ; \chi_z ; \chi_{TF}) = \min(0{,}5575 ; 0{,}2459 ; 0{,}6971) = 0{,}2459 \leq 1{,}0$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f}{\gamma_{M1}} = \frac{0{,}2459 \cdot 37{,}91 \cdot 27{,}50}{1} = 256{,}38 \text{ kN} \quad (6.47)$$

$$\eta_{N_b} = \frac{|N_{Ed_1}|}{N_{b,Rd}} = \frac{|(-260{,}00)|}{256{,}38} = \mathbf{101{,}4\ \%} \quad (6.46) \quad \textbf{nem felel meg!}$$

HEA 160 szelvény a szabványos tűrésen belül felvehető, a modellezett elrendezés szempontjából legkedvezőtlenebb szelvénymérettel:

13. Kihajlási ellenállás:

EN 1993-1-1: 6.3.1

Mértékadó keresztmetszet: $x = 0{,}00 \cdot L = 0{,}00 \cdot 600{,}00 = 0$ cm

$L_y = k_y \cdot L = 1 \cdot 600{,}00 = 600{,}00$ cm

$L_z = k_z \cdot L = 1 \cdot 600{,}00 = 600{,}00$ cm

Kihajlási görbe az y tengely körül: *b* 6.2 táblázat

$\rightarrow \alpha_y = 0{,}34$ 6.1 táblázat

Kihajlási görbe a z tengely körül: *c* 6.2 táblázat

$\rightarrow \alpha_z = 0{,}49$ 6.1 táblázat

Oktatási változat

$$\lambda_y^* = \frac{L_y}{i_y} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{600{,}00}{6{,}64} \cdot \frac{1}{86{,}8} = 1{,}04 \quad (6.50)$$

$$\lambda_z^* = \frac{L_z}{i_z} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{600{,}00}{3{,}83} \cdot \frac{1}{86{,}8} = 1{,}81 \quad (6.50)$$

$$\phi_y = \frac{1 + \alpha_y \cdot (\lambda_y^* - 0{,}2) + \lambda_y^{*2}}{2} = \frac{1 + 0{,}34 \cdot (1{,}04 - 0{,}2) + 1{,}04^2}{2} = 1{,}1854$$

$$\phi_z = \frac{1 + \alpha_z \cdot (\lambda_z^* - 0{,}2) + \lambda_z^{*2}}{2} = \frac{1 + 0{,}49 \cdot (1{,}81 - 0{,}2) + 1{,}81^2}{2} = 2{,}523$$

$$\chi_y = \min\left(\frac{1}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 - \lambda_y^{*2}}}; 1\right) = \min\left(\frac{1}{1{,}1854 + \sqrt{1{,}1854^2 - 1{,}04^2}}; 1\right) = 0{,}5709 \quad (6.49)$$

$$\chi_z = \min\left(\frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \lambda_z^{*2}}}; 1\right) = \min\left(\frac{1}{2{,}523 + \sqrt{2{,}523^2 - 1{,}81^2}}; 1\right) = 0{,}2333 \quad (6.49)$$

$$\chi_{TF} = 0{,}6817 \quad (6.52, 6.49)$$

$$\chi = \min(\chi_y ; \chi_z ; \chi_{TF}) = \min(0{,}5709 ; 0{,}2333 ; 0{,}6817) = 0{,}2333 \le 1{,}0$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f}{\gamma_{M1}} = \frac{0{,}2333 \cdot 37{,}23 \cdot 27{,}50}{1} = 238{,}93 \text{ kN} \quad (6.47)$$

$$\eta_{N_b} = \frac{|N_{Ed_1}|}{N_{b,Rd}} = \frac{|(-260{,}00)|}{238{,}93} = \mathbf{108{,}8\ \%} \quad (6.46) \quad \textbf{nem felel meg!}$$

80×80×8 mm L-acél szelvények:

Az L-acélokat leggyakrabban húzott szerkezetként alkalmazzák; ezért húzási igénybevételre vizsgáltuk.

Névleges méretekkel számított teherbírás:
$a_1 = a_2 = 80{,}0$ mm; $t = 8$ mm; $A = 1227$ mm^2; $f_y = 275$ MPa
$f_{rd} = f_y = 275\,MPa$
$N_{rd} = f_{rd} \cdot A = 275 \cdot 1227 = 337425\,N = 337{,}43\,kN$

Gyári mérési adatok minimumával számított teherbírás:
$a_1 = a_2 = 81{,}0$ mm; $t = 7{,}8$ mm; $A = 1213$ mm^2; $f_y = 275$ MPa
$f_{rd} = f_y = 275\,MPa$
$N_{rd} = f_{rd} \cdot A / \gamma_{M0} = 275 \cdot 1213 = 333575\,N = 333{,}58\,kN$ → 1,1%-os teherbírás-csökkenés

A szabványos tűrésen belül felvehető, a legkisebb keresztmetszetet biztosító szelvénymérettel számított teherbírás:
$a_1 = a_2 = 78{,}0$ mm; $t = 7{,}9$ mm; $A = 1181$ mm^2; $f_y = 275$ MPa
$f_{rd} = f_y = 275\,MPa$
$N_{rd} = f_{rd} \cdot A / \gamma_{M0} = 275 \cdot 1181 = 324775\,N = 324{,}78\,kN$ → 3,75%-os teherbírás-csökkenés

Amennyiben a névleges szelvény kihasználtságát 97%-ra tervezik, a legkedvezőtlenebb méretű valós szelvény esetében is a szerkezetet csak 0,75%-os túlterhelés fogja érni.

40×40×4 mm L-acél szelvények:

A 80×80×8 mm-es L-acélokhoz hasonlóan:

Névleges méretekkel számított teherbírás:
$a_1 = a_2 = 40{,}0$ mm; t = 4 mm; A = 308 mm²; $f_y = 275$ MPa
$f_{rd} = f_y = 275\,MPa$
$N_{rd} = f_{rd} \cdot A = 275 \cdot 308 = 84700\,N = 84{,}7\,kN$

Gyári mérési adatok minimumával számított teherbírás:
$a_1 = a_2 = 39{,}5$ mm; t = 4,0 mm; A = 304 mm²; $f_y = 275$ MPa
$f_{rd} = f_y = 275\,MPa$
$N_{rd} = f_{rd} \cdot A / \gamma_{M0} = 275 \cdot 304 = 83600\,N = 83{,}6\,kN$ → 1,3%-os teherbírás-csökkenés

A szabványos tűrésen belül felvehető, a legkisebb keresztmetszetet biztosító szelvénymérettel számított teherbírás:
$a_1 = a_2 = 39{,}0$ mm; t = 3,9 mm; A = 293 mm²; $f_y = 275$ MPa
$f_{rd} = f_y = 275\,MPa$
$N_{rd} = f_{rd} \cdot A / \gamma_{M0} = 275 \cdot 293 = 80575\,N = 80{,}58\,kN$ → 4,9%-os teherbírás-csökkenés

Amennyiben a névleges szelvény kihasználtságát 97%-ra tervezik, a legkedvezőtlenebb méretű valós szelvény esetében a szerkezetet 1,9%-os túlterhelés fogja érni.

100×12 mm laposacél szelvények:

A laposacélokat (önállóan) húzott elemként lehet felhasználni; így húzási igénybevételre vizsgáltuk; ez esetben csak a keresztmetszet negatív irányú eltérése vehető számításba, mint szilárdságcsökkentő tényező.

Névleges méretekkel számított teherbírás:
b = 100 mm; t = 12 mm; A = 1200 mm²; $f_y = 275$ MPa
$f_{rd} = f_y = 275\,MPa$
$N_{rd} = f_{rd} \cdot A = 275 \cdot 1200 = 330000\,N = 330\,kN$

Gyári mérési adatok minimumával számított teherbírás:
b = 98,9 mm; t = 12 mm; A = 1187 mm²; $f_y = 275$ MPa
$f_{rd} = f_y = 275\,MPa$
$N_{rd} = f_{rd} \cdot A / \gamma_{M0} = 275 \cdot 1187 = 326370\,N = 326{,}37\,kN$ → 1,1%-os teherbírás-csökkenés

A szabványos tűrésen belül felvehető, a legkisebb keresztmetszetet biztosító szelvénymérettel számított teherbírás:
b = 98,5 mm; t = 11,5 mm; A = 1133 mm²; $f_y = 275$ MPa
$f_{rd} = f_y = 275\,MPa$
$N_{rd} = f_{rd} \cdot A / \gamma_{M0} = 275 \cdot 1133 = 311506\,N = 311{,}51\,kN$ → 5,6%-os teherbírás-csökkenés

Amennyiben a névleges szelvény kihasználtságát 97%-ra tervezik, a legkedvezőtlenebb méretű valós szelvény esetében a szerkezetet 2,6%-os túlterhelés fogja érni:
$f_{Ed} = 275 \cdot 1{,}026 = 282\,MPa > f_y = 275\,MPa$.
Mint a 22. táblázatban részletezett gyártói vizsgálati eredmények mutatják, egyáltalán nem elhanyagolható annak az esélye, hogy a tényleges folyáshatár értéke megegyezzen a méretezési szilárdsággal; ilyen esetben viszont a szelvény meg fog folyni és nagy mértékű (akár 2%) maradó alakváltozást fog elszenvedni a „papíron megfelelő" teher hatása alatt.

100×20 mm laposacél szelvények:

A 100×12 mm-es laposacélokhoz hasonló felhasználással és teheresetekkel vizsgáljuk.

Névleges méretekkel és EN 1993 szerinti szilárdsággal számított teherbírás:
b = 100 mm; t = 20 mm; A = 2000 mm²; **f_y = 275 MPa (EN 1993 szerint, 20 mm vtg.)**
$f_{rd} = f_y = 275\,MPa$
$N_{rd} = f_{rd} \cdot A / \gamma_{M0} = 275 \cdot 2000 = 550000\,N = 550\,kN$

Gyári mérési adatok minimumával és EN 10025 szerinti szilárdsággal számított teherbírás:
b = 99,8 mm; t = 19,8 mm; A = 1976 mm²; **f_y = 265 MPa (EN 10025 szerint, 20 mm vtg.)**
$f_{rd} = f_y = 265\,MPa$
$N_{rd} = f_{rd} \cdot A / \gamma_{M0} = 265 \cdot 1976 = 523640\,N = 523{,}64\,kN$ → 4,8%-os teherbírás-csökkenés

A szabványos tűrésen belül felvehető, a legkisebb keresztmetszetet biztosító szelvénymérettel és EN 10025 szerinti szilárdsággal számított teherbírás:
b = 98,5 mm; t = 19,5 mm; A = 1921 mm²; **f_y = 265 MPa (EN 10025 szerint, 20 mm vtg.)**
$f_{rd} = f_y = 265\,MPa$
$N_{rd} = f_{rd} \cdot A / \gamma_{M0} = 265 \cdot 1921 = 508999\,N = 509{,}00\,kN$ → 7,5%-os teherbírás-csökkenés

Amennyiben a névleges szelvény kihasználtságát EN 1993 szerinti 275 MPa-os névleges szilárdsággal 97%-ra tervezik, a legkedvezőtlenebb méretű valós szelvény esetében és a gyártók által alkalmazott EN 10025 szerinti 265 MPa-os névleges szilárdsággal a szerkezetet 4,5%-os túlterhelés fogja érni:
$f_{Ed} = 265 \cdot 1{,}045 = 277\,MPa > f_y = 265\,MPa$.
Mint a 23. táblázatban részletezett gyártói vizsgálati eredmények mutatják, egyáltalán nem elhanyagolható annak az esélye, hogy a tényleges folyáshatár értéke megegyezzen a EN 10025 szerinti névleges szilárdsággal, ami 10 MPa-lal alacsonyabb, mint a méretezési szilárdság. Ilyen esetben viszont a szelvény amiatt, hogy mind a keresztmetszet, mind a szilárdság külön-külön is és együttesen is alatta marad a tervezési értékeknek, túlterheltté fog válni, meg fog folyni és nagy mértékű (akár 2%) maradó alakváltozást fog elszenvedni a „papíron megfelelő" teher hatása alatt.

12×12 mm négyzetacél szelvények:

A 12 mm oldalhosszúságú szelvények kis keresztmetszete (144 mm²) nem teszi lehetővé azok nyomott rúdként való gazdaságos alkalmazását méteres hosszúságokban (legfeljebb néhány

10 cm hosszúságban érdemes ilyen keresztmetszetet nyomott rúdként alkalmazni). Így ezeket a szelvényeket (mivel húzott elemként lehet jól felhasználni) húzási igénybevételre vizsgáltuk; ez esetben csak a keresztmetszet negatív irányú eltérése vehető számításba, mint szilárdságcsökkentő tényező.

Névleges méretekkel számított teherbírás:
$a_1 = a_2 = 12$ mm; A = 144 mm^2; f_y = 235 MPa
$f_{rd} = f_y = 235\,MPa$
$N_{rd} = f_{rd} \cdot A / \gamma_{M0} = 235 \cdot 144 = 33840\,N = 33{,}84\,kN$

Gyári mérési adatok minimumával számított teherbírás:
a_1 = 11,91 mm; a_2 = 11,93 mm; A = 142,1 mm^2; f_y = 235 MPa
$f_{rd} = f_y = 235\,MPa$
$N_{rd} = f_{rd} \cdot A / \gamma_{M0} = 235 \cdot 142{,}1 = 33390\,N = 33{,}39\,kN$ → 1,3%-os teherbírás-csökkenés

A szabványos tűrésen belül felvehető, a legkisebb keresztmetszetet biztosító szelvénymérettel számított teherbírás:
$a_1 = a_2$ = 11,6 mm; A = 134,6 mm^2; f_y = 275 MPa
$f_{rd} = f_y = 235\,MPa$
$N_{rd} = f_{rd} \cdot A / \gamma_{M0} = 235 \cdot 134{,}6 = 31622\,N = 31{,}62\,kN$ → 6,6%-os teherbírás-csökkenés

Amennyiben a névleges szelvény kihasználtságát 97%-ra tervezik, a legkedvezőtlenebb méretű valós szelvény esetében a szerkezetet 3,6%-os túlterhelés fogja érni:
$f_{Ed} = 235 \cdot 1{,}036 = 243\,MPa > f_y = 235\,MPa$
Amennyiben a tényleges folyáshatár megegyezik, vagy megközelíti a névleges értéket, akkor a szelvény ilyen kedvezőtlen geometriai méretekkel meg fog folyni és nagy mértékű (akár 2%) maradó alakváltozást fog elszenvedni a „papíron megfelelő” teher hatása alatt.

Ø80 mm köracél szelvények:

A 80 mm átmérőjű köracélokat nyomott rúdként és húzott rúdként is lehet alkalmazni, így ezeket a szelvényeket mind húzási, mind nyomási igénybevételre is vizsgáltuk.

Húzás:

Névleges méretekkel számított teherbírás:
$d_1 = d_2$ = 80 mm; A = 5027 mm^2; f_y = 255 MPa (S275, 80 mm)
$f_{rd} = f_y = 255\,MPa$
$N_{rd} = f_{rd} \cdot A / \gamma_{M0} = 255 \cdot 5027 = 1281769\,N = 1281{,}77\,kN$

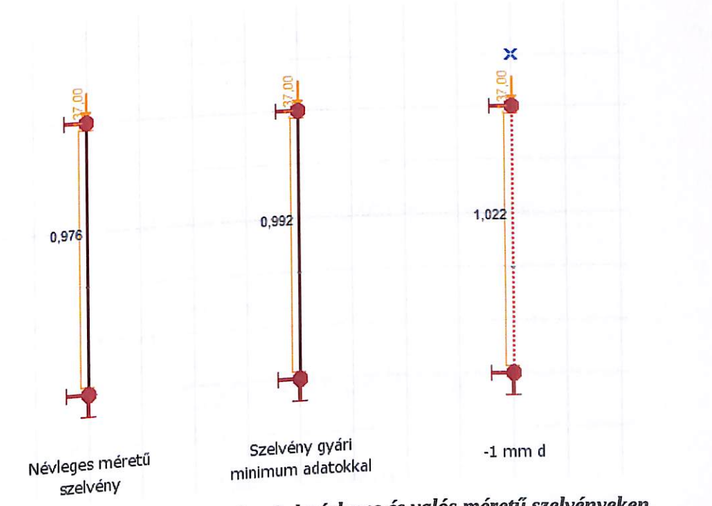
Gyári mérési adatok minimumával számított teherbírás:
$d_1 = d_2$ = 79,6 mm; A = 4976 mm^2; f_y = 255 MPa (S275, 80 mm)
$f_{rd} = f_y = 255\,MPa$
$N_{rd} = f_{rd} \cdot A / \gamma_{M0} = 255 \cdot 4976 = 1268984\,N = 1268{,}98\,kN$ → 1,0%-os teherbírás-csökkenés

A szabványos tűrésen belül felvehető, a legkisebb keresztmetszetet biztosító szelvénymérettel számított teherbírás:
$d_1 = d_2 = 79{,}0$ mm; A = 4902 mm^2; $f_y = 255$ MPa (S275, 80 mm)
$f_{rd} = f_y = 255\,MPa$
$N_{rd} = f_{rd} \cdot A / \gamma_{M0} = 255 \cdot 4902 = 1249926\,N = 1249{,}93\,kN$ → 2,5%-os teherbírás-csökkenés

Amennyiben a névleges szelvény kihasználtságát 97%-ra tervezik, még a legkedvezőtlenebb méretű valós szelvény esetében sem lesz a szerkezet túlterhelve, bár a feszültség meg fogja közelíteni a folyáshatárt.

Nyomás:

Az elemzéshez felvettünk egy 5m magasságú R80 szelvényből kialakított mindkét végén csuklós megtámasztású oszlopot, amit 138 kN nyomó irányú erővel terhelünk meg. Az elrendezést a 7. ábra mutatja be.



7. ábra: R80 nyomott oszlop igénybevétel névleges és valós méretű szelvényeken

A 7. ábrán látható, hogy a 97,6%-os kihasználtságra méretezett névleges szelvénnyel azonos elrendezésben a valódi gyári mérési adatokból meghatározott „worst case" szelvény sincs túlterhelve, bár a feszültség megközelíti a folyáshatárt. A szabványos tűrésen belül felvehető, a modellezett elrendezés szempontjából **legkedvezőtlenebb szelvényméret esetében** viszont **2,2%-os** a kihajlási **túlterhelés**. A névleges szelvényre vonatkozó, valamint a legkedvezőtlenebb szelvényméretre vonatkozó számításokat külön is részletezzük.

Számítások a névleges méretű szelvényből kialakított oszlop esetében:

13. Kihajlási ellenállás:

EN 1993-1-1: 6.3.1

Mértékadó keresztmetszet: $x = 0{,}00 \cdot L = 0{,}00 \cdot 500{,}00 = 0$ cm

$L_y = L_z = k \cdot L = 1 \cdot 500{,}00 = 500{,}00$ cm

Kihajlási görbe az y és z tengely körül: *c* 6.2 táblázat

$\rightarrow \alpha = 0{,}49$ 6.1 táblázat

Oktatási változat

$$\lambda^* = \frac{L}{i} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{500{,}00}{2{,}00} \cdot \frac{1}{90{,}1} = 2{,}77 \quad (6.50)$$

$$\phi = \frac{1 + \alpha \cdot (\lambda^* - 0{,}2) + \lambda^{*2}}{2} = \frac{1 + 0{,}49 \cdot (2{,}77 - 0{,}2) + 2{,}77^2}{2} = 4{,}9805$$

$$\chi = \min\left(\frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^{*2}}}\,;\,1\right) = \min\left(\frac{1}{4{,}9805 + \sqrt{4{,}9805^2 - 2{,}77^2}}\,;\,1\right) = 0{,}1097 \quad (6.49)$$

$\chi_{TF} = 1$ (6.52, 6.49)

$\chi = \min(\chi\,;\chi_{TF}) = \min(0{,}1097\,;\,0{,}1097\,;\,1) = 0{,}1097 \le 1{,}0$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0{,}1097 \cdot 50{,}20 \cdot 25{,}50}{1} = 140{,}42 \text{ kN} \quad (6.47)$$

$$\eta_{N_b} = \frac{|N_{Ed_1}|}{N_{b,Rd}} = \frac{|(-137{,}00)|}{140{,}42} = 97{,}6\,\% \quad (6.46)$$ **megfelel**

A szabványos tűrésen belül felvehető legkedvezőtlenebb szelvénymérettel:

13. Kihajlási ellenállás:

EN 1993-1-1: 6.3.1

Mértékadó keresztmetszet: $x = 0{,}00 \cdot L = 0{,}00 \cdot 500{,}00 = 0$ cm

$L_y = L_z = k \cdot L = 1 \cdot 500{,}00 = 500{,}00$ cm

Kihajlási görbe az y és z tengely körül: *c* 6.2 táblázat

$\rightarrow \alpha_y = 0{,}49$ 6.1 táblázat

Oktatási változat

$$\lambda^* = \frac{L}{i} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{500{,}00}{1{,}97} \cdot \frac{1}{90{,}1} = 2{,}81 \quad (6.50)$$

$$\phi = \frac{1 + \alpha \cdot (\lambda^* - 0{,}2) + \lambda^{*2}}{2} = \frac{1 + 0{,}49 \cdot (2{,}81 - 0{,}2) + 2{,}81^2}{2} = 5{,}0826$$

$$\chi = \min\left(\frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^{*2}}}\,;\,1\right) = \min\left(\frac{1}{5{,}0826 + \sqrt{5{,}0826^2 - 2{,}81^2}}\,;\,1\right) = 0{,}1073 \quad (6.49)$$

$\chi_{TF} = 1$ (6.52, 6.49)

$\chi = \min(\chi\,;\chi_{TF}) = \min(0{,}1073\,;\,0{,}1073\,;\,1) = 0{,}1073 \le 1{,}0$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0{,}1073 \cdot 49{,}01 \cdot 25{,}50}{1} = 134{,}10 \text{ kN} \quad (6.47)$$

$$\eta_{N_b} = \frac{|N_{Ed_1}|}{N_{b,Rd}} = \frac{|(-137{,}00)|}{134{,}10} = \mathbf{102{,}2\,\%} \quad (6.46)$$ **nem felel meg!**

30×30×2 mm négyzet zártszelvények:

Acél zártszelvényeket a leggyakrabban rácsos tartók rúdjaként alkalmaznak, amelyek így nyomott vagy húzott rúdként terhelődnek. Emiatt ezeket a szelvényeket mind húzási, mind nyomási igénybevételre is vizsgáltuk.

Húzás:

Névleges méretekkel számított teherbírás:
B = H = 30,0 mm; t = 2,00 mm; A = 213,7 mm^2; f_y = 275 MPa

$$f_{rd}=f_y=275\,MPa$$
$$N_{rd}=f_{rd}\cdot A/\gamma_{M0}=275\cdot 213{,}8=58768\,N=58{,}77\,kN$$

Gyári mérési adatok minimumával számított teherbírás:
B = 29,9 mm; H = 30,0 mm; t = 1,89 mm; A = 202,2 mm^2; f_y = 275 MPa

$$f_{rd}=f_y=275\,MPa$$
$$N_{rd}=f_{rd}\cdot A/\gamma_{M0}=275\cdot 202{,}2=55605\,N=55{,}61\,kN \rightarrow \text{5,4\%-os teherbírás-csökkenés}$$

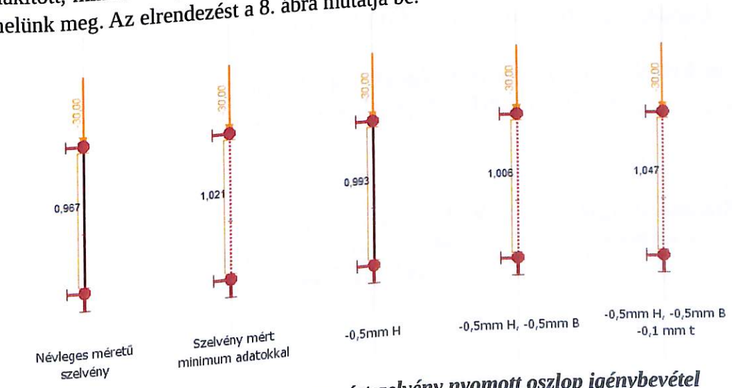
A szabványos tűrésen belül felvehető, a legkisebb keresztmetszetet biztosító szelvénymérettel számított teherbírás:
B = 29,5 mm; H = 29,5 mm; t = 1,9 mm; A = 200,8 mm^2; f_y = 275 MPa

$$f_{rd}=f_y=275\,MPa$$
$$N_{rd}=f_{rd}\cdot A/\gamma_{M0}=275\cdot 200{,}8=55220\,N=55{,}22\,kN \rightarrow \text{6,0\%-os teherbírás-csökkenés}$$

Amennyiben a névleges szelvény kihasználtságát 97%-ra tervezik, a legkedvezőtlenebb méretű valós szelvény esetében 3,0%-os lesz a húzott szelvény túlterhelése.

Nyomás:

Az elemzéshez felvettünk egy 1m magasságú 30×30×2 mm négyzet zártszelvényből kialakított, mindkét végén csuklós megtámasztású oszlopot, amit 30 kN nyomó irányú erővel terhelünk meg. Az elrendezést a 8. ábra mutatja be.



8. ábra: 30×30×2 mm négyzetes zártszelvény nyomott oszlop igénybevétel névleges és valós méretű szelvényeken

A 8. ábrán látható, hogy a 98,7%-os kihasználtságra méretezett névleges szelvénnyel azonos elrendezésben a valódi gyári mérési adatokból meghatározott „worst case" szelvény 2,1%-kal túlterhelt, míg a szabványos tűrésen belül felvehető, a modellezett elrendezés szempontjából **legkedvezőtlenebb szelvényméret esetében** már **4,7%-os** a kihajlási **túlterhelés** (a korábbi számításokban alkalmazott 97%-os kihasználtságra méretezés esetében 3% lenne a túlterhelés).

60×40×2 mm téglalap zártszelvények:

Felhasználása a korábban tárgyalt 30×30×2 mm négyzet zártszelvényekkel azonos, így a szelvényeket mind húzási, mind nyomási igénybevételre is vizsgáltuk.

Húzás:

Névleges méretekkel számított teherbírás:
B = 40,0 mm; H = 60,0 mm; t = 2,00 mm; A = 373,7 mm^2; f_y = 275 MPa
$f_{rd}=f_y=275\,MPa$
$N_{rd}=f_{rd}\cdot A/\gamma_{M0}=275\cdot 373{,}7=102768\,N=102{,}77\,kN$

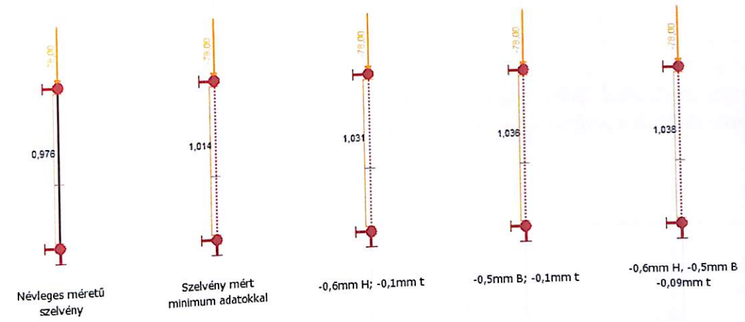
Gyári mérési adatok minimumával számított teherbírás:
B = 40,0 mm; H = 59,6 mm; t = 1,93 mm; A = 359,5 mm^2; f_y = 275 MPa
$f_{rd}=f_y=275\,MPa$
$N_{rd}=f_{rd}\cdot A/\gamma_{M0}=275\cdot 359{,}5=98862\,N=98{,}86\,kN$ → 3,8%-os teherbírás-csökkenés

A szabványos tűrésen belül felvehető, a legkisebb keresztmetszetet biztosító szelvénymérettel számított teherbírás:
D = 39,5 mm; H = 59,4 mm; t = 1,90 mm; A = 353,2 mm^2; f_y = 275 MPa
$f_{rd}=f_y=275\,MPa$
$N_{rd}=f_{rd}\cdot A/\gamma_{M0}=275\cdot 353{,}2=97130\,N=97{,}13\,kN$ → 5,5%-os teherbírás-csökkenés

Amennyiben a névleges szelvény kihasználtságát 97%-ra tervezik, a legkedvezőtlenebb méretű valós szelvény esetében 2,5%-os lesz a húzott szelvény túlterhelése.

Nyomás:

Az elemzéshez felvettünk egy 1m magasságú 60×40×2 mm négyzet zártszelvényből kialakított, mindkét végén csuklós megtámasztású oszlopot, amit 78 kN nyomó irányú erővel terhelünk meg. Az elrendezést a 9. ábra mutatja be.



9. ábra: 60×40×2 mm négyzetes zártszelvény nyomott oszlop igénybevétel névleges és valós méretű szelvényeken

A 9. ábrán látható, hogy a 97,6%-os kihasználtságra méretezett névleges szelvénnyel azonos elrendezésben a valódi gyári mérési adatokból meghatározott „worst case" szelvény 1,4%-kal túlterhelt, míg a szabványos tűrésen belül felvehető, a modellezett elrendezés szempontjából **legkedvezőtlenebb szelvényméret esetében** már **3,8%-os** a kihajlási **túlterhelés**.

<u>26,9×2 mm acélcső:</u>

Felhasználása a korábban tárgyalt 30×30×2 négyzet és 60×40×2 mm téglalap alakú zártszelvényekkel azonos, így a szelvényeket mind húzási, mind nyomási igénybevételre is vizsgáltuk.

<u>Húzás:</u>

<u>Névleges méretekkel számított teherbírás:</u>
D = 26,9 mm; t = 2,00 mm; A = 156,4 mm^2; f_y = 275 MPa
$f_{rd}=f_y=275\,MPa$
$N_{rd}=f_{rd}\cdot A/\gamma_{M0}=275\cdot 156{,}4=43010\,N=43{,}01\,kN$

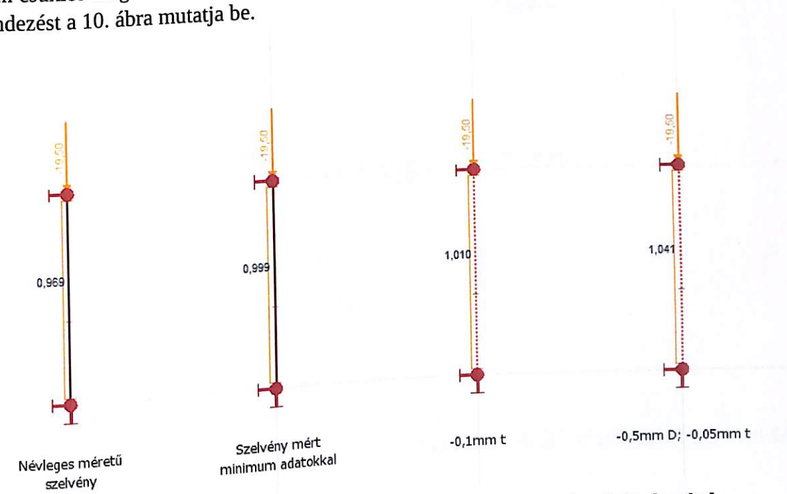
<u>Gyári mérési adatok minimumával számított teherbírás:</u>
D = 26,8 mm; t = 1,95 mm; A = 152,2 mm^2; f_y = 275 MPa
$f_{rd}=f_y=275\,MPa$
$N_{rd}=f_{rd}\cdot A/\gamma_{M0}=275\cdot 152{,}2=41855\,N=41{,}86\,kN$ → 2,7%-os teherbírás-csökkenés

<u>A szabványos tűrésen belül felvehető, a legkisebb keresztmetszetet biztosító szelvénymérettel számított teherbírás:</u>
D = 26,9 mm; t = 1,90 mm; A = 149,2 mm^2; f_y = 275 MPa
$f_{rd}=f_y=275\,MPa$
$N_{rd}=f_{rd}\cdot A/\gamma_{M0}=275\cdot 149{,}2=41030\,N=41{,}03\,kN$ → 4,6%-os teherbírás-csökkenés

Amennyiben a névleges szelvény kihasználtságát 97%-ra tervezik, a legkedvezőtlenebb méretű valós szelvény esetében 1,6%-os lesz a húzott szelvény túlterhelése.

Nyomás:

Az elemzéshez felvettünk egy 1m magasságú 26,9×2 mm acélcsőből kialakított, mindkét végén csuklós megtámasztású oszlopot, amit 19,5 kN nyomó irányú erővel terhelünk meg. Az elrendezést a 10. ábra mutatja be.



10. ábra: 60×40×2 mm négyzetes zártszelvény nyomott oszlop igénybevétel névleges és valós méretű szelvényeken

A 10. ábra alapján a 96,9%-os kihasználtságra méretezett névleges szelvénnyel azonos elrendezésben a valódi gyári mérési adatokból meghatározott „worst case" szelvény még éppen nincsen túlterhelve (99,9%-os kihasználtsággal), viszont a szabványos tűrésen belül felvehető, a modellezett elrendezés szempontjából **legkedvezőtlenebb szelvényméret esetében** már **4,1%-os** a kihajlási **túlterhelés**.

Összes zártszelvény:

A kihajlási számításokat a túlterhelés szempontjából két legkedvezőtlenebb esetben, a 30×30×2 mm négyzet zártszelvények és a 26,9×2 mm acélcső szabványos tűrésen belül felvehető, a modellezett elrendezés szempontjából legkedvezőtlenebb szelvényméreteire mutatjuk be.

Számítások a 30×30×2 mm négyzet zártszelvények szabványos tűrésen belül felvehető legkedvezőtlenebb szelvényméretére:

13. Kihajlási ellenállás:

EN 1993-1-1: 6.3.1

Mértékadó keresztmetszet: $x = 0{,}00 \cdot L = 0{,}00 \cdot 100{,}00 = 0$ cm

$L_y = L_z = k \cdot L = 1 \cdot 100{,}00 = 100{,}00$ cm

Kihajlási görbe az y és z tengely körül: *c* 6.2 táblázat

$\rightarrow \alpha_y = 0{,}49$ 6.1 táblázat

Oktatási változat

$$\lambda^* = \frac{L}{i} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{100{,}00}{1{,}11} \cdot \frac{1}{86{,}8} = 1{,}04 \quad (6.50)$$

$$\phi = \frac{1 + \alpha \cdot (\lambda^* - 0{,}2) + \lambda^{*2}}{2} = \frac{1 + 0{,}49 \cdot (1{,}04 - 0{,}2) + 1{,}04^2}{2} = 1{,}2421$$

$$\chi = \min\left(\frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^{*2}}}; 1\right) = \min\left(\frac{1}{1{,}2421 + \sqrt{1{,}2421^2 - 1{,}04^2}}; 1\right) = 0{,}5191 \quad (6.49)$$

$\chi_{TF} = 1$ (6.52, 6.49)

$\chi = \min(\chi; \chi_{TF}) = \min(0{,}5191; 0{,}5191; 1) = 0{,}5191 \leq 1{,}0$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0{,}5191 \cdot 2{,}01 \cdot 27{,}50}{1} = 28{,}66 \text{ kN} \quad (6.47)$$

$$\eta_{N_b} = \frac{|N_{Ed_1}|}{N_{b,Rd}} = \frac{|(-30{,}00)|}{28{,}66} = \mathbf{104{,}7\ \%} \quad (6.46) \quad \textbf{nem felel meg!}$$

Számítások a 26,9×2 mm acélcsövek szabványos tűrésen belül felvehető legkedvezőtlenebb szelvényméretére:

13. Kihajlási ellenállás:

EN 1993-1-1: 6.3.1

Mértékadó keresztmetszet: $x = 0{,}00 \cdot L = 0{,}00 \cdot 100{,}00 = 0$ cm

$L_y = L_z = k \cdot L = 1 \cdot 100{,}00 = 100{,}00$ cm

Kihajlási görbe az y és z tengely körül: *a* 6.2 táblázat

$\rightarrow \alpha_y = 0{,}21$ 6.1 táblázat

Oktatási változat

$$\lambda^* = \frac{L}{i} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{100{,}00}{0{,}87} \cdot \frac{1}{86{,}8} = 1{,}33 \quad (6.50)$$

$$\phi = \frac{1 + \alpha \cdot (\lambda^* - 0{,}2) + \lambda^{*2}}{2} = \frac{1 + 0{,}21 \cdot (1{,}33 - 0{,}2) + 1{,}33^2}{2} = 1{,}5009$$

$$\chi = \min\left(\frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^{*2}}}; 1\right) = \min\left(\frac{1}{1{,}5009 + \sqrt{1{,}5009^2 - 1{,}33^2}}; 1\right) = 0{,}4547 \quad (6.49)$$

$\chi_{TF} = 1$ (6.52, 6.49)

$\chi = \min(\chi; \chi_{TF}) = \min(0{,}4547; 0{,}4547; 1) = 0{,}4547 \leq 1{,}0$

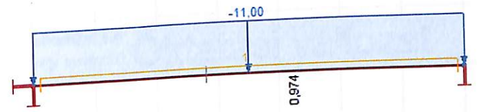
$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0{,}4547 \cdot 1{,}50 \cdot 27{,}50}{1} = 18{,}73 \text{ kN} \quad (6.47)$$

$$\eta_{N_b} = \frac{|N_{Ed_1}|}{N_{b,Rd}} = \frac{|(-19{,}50)|}{18{,}73} = \mathbf{104{,}1\ \%} \quad (6.46) \quad \textbf{nem felel meg!}$$

2.2. Eltérés hatása a hajlított gerenda nyomatéki, nyírási, övlemez tönkremeneteli és gerinchorpadási teherbírására

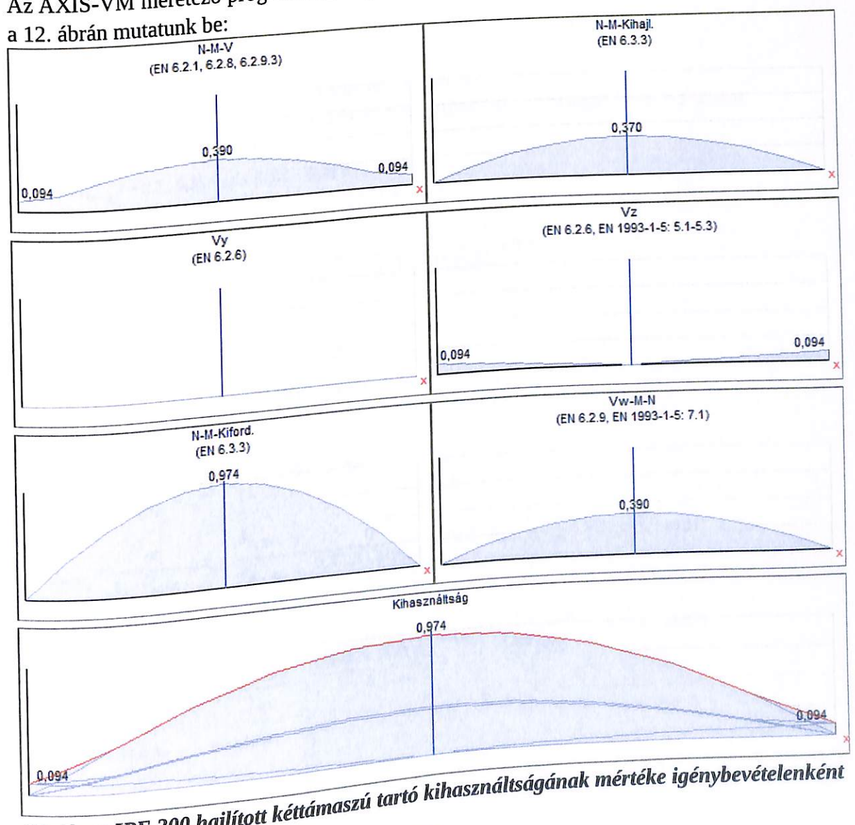
IPE 300:

A hatás modellezéséhez felvettünk egy 7m fesztávolságú, 11 kN/m megoszló teherrel terhelt kéttámaszú csuklós alátámasztású IPE 300 gerendát. Az elrendezést a 11. ábra mutatja be.



11. ábra: IPE 300 hajlított kéttámaszú tartó

Az AXIS-VM méretező program segítségével meghatároztuk a szerkezet igénybevételét, amit a 12. ábrán mutatunk be:



12. ábra: IPE 300 hajlított kéttámaszú tartó kihasználtságának mértéke igénybevételenként

A kihasználtság meghatározásához elvégzett számítások:

ACÉL SZERKEZETI ELEM ELLENŐRZÉSE

1. acél méretezési elem
Csomópontok: **1-2**
Szabvány: **Eurocode-H**
MSZ EN 1993-1-1:2009 + AC:2009, MSZ EN 1993-1-5:2007
Anyag: **S 275**
Szelvény: **IPE 300 névleges**
Tehereset: **ST1**
Földrengés igénybevételek szorzója: **1,0**
Szelvényosztály: **1** (Képlékeny tervezés)

Oktatási változat

1. Normálerő-Hajlítás-Nyírás

EN 1993-1-1:6.2.1, 6.2.8, 6.2.9.3

Mértékadó keresztmetszet: $x = 0{,}50 \cdot L = 0{,}50 \cdot 700{,}00 = 350{,}00$ cm

$M_{y,Ed_6} = -6737{,}50$ kNcm $= -67{,}38 kNm$

$\eta_{NMV_{pl}} = \eta_{MV} = 39{,}0\,\%$ **megfelel**

2. Normálerő-Hajlítás-Kihajlás

EN 1993-1-1: 6.3.3, Annex B. Method 2

Mértékadó keresztmetszet: $x = 0{,}50 \cdot L = 0{,}50 \cdot 700{,}00 = 350{,}00$ cm

$C_{my} = \max\,(0{,}95 + 0{,}05 \cdot \alpha_{Cm};\, 0{,}9 + 0{,}1 \cdot \alpha_m) = \max\,(0{,}95 + 0{,}05 \cdot 0{,}0;\, 0{,}9 + 0{,}1 \cdot 0) = 0{,}95 \geq 0{,}4$ B.3 táblázat

$C_{mz} = 1 \geq 0{,}4$ B.3 táblázat

$f_{yy} = \min\,(\lambda_y^* - 0{,}2;\, 0{,}8) = \min\,(0{,}65 - 0{,}2;\, 0{,}8) = 0{,}447$

$f_{zz} = \min\,(2 \cdot \lambda_z^* - 0{,}6;\, 1{,}4) = \min\,(2 \cdot 2{,}41 - 0{,}6;\, 1{,}4) = 1{,}4$

$$k_{yy} = C_{my} \cdot \left(1 + f_{yy} \cdot \frac{\frac{|N_{Ed_6}|}{\chi_y \cdot N_{pl,Rd}}}{\gamma_{M1}}\right) = 0{,}95 \cdot \left(1 + 0{,}447 \cdot \frac{\frac{|0|}{0{,}8712 \cdot 1480{,}08}}{1}\right) = 0{,}95$$

$k_{zy} = 0{,}6 \cdot k_{yy} = 0{,}6 \cdot 0{,}95 = 0{,}57$ Annex B.1 táblázat

$$\chi_y = \min\left(\frac{1}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 - \lambda_y^{*2}}};\, 1\right) = 0{,}8712 \quad (6.49)$$

$$\chi_z = \min\left(\frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \lambda_z^{*2}}};\, 1\right) = 0{,}1497 \quad (6.49)$$

$$\eta_{NMBuckl_1} = \frac{N_{Ed_6}}{\frac{\chi_y \cdot N_{pl,Rd}}{\gamma_{M1}}} \pm k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed_6}}{\frac{M_{pl,Rd,y}}{\gamma_{M1}}} = \frac{0}{\frac{0{,}8712 \cdot 1480{,}08}{1}} \pm 0{,}95 \cdot \frac{(-6737{,}50)}{\frac{17283{,}09}{1}} = 37{,}0\,\% \quad (6.61)$$

$$\eta_{NMBuckl_2} = \frac{N_{Ed_6}}{\frac{\chi_z \cdot N_{pl,Rd}}{\gamma_{M1}}} \pm k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed_6}}{\frac{M_{pl,Rd,y}}{\gamma_{M1}}} = \frac{0}{\frac{0{,}1497 \cdot 1480{,}08}{1}} \pm 0{,}57 \cdot \frac{(-6737{,}50)}{\frac{17283{,}09}{1}} = 22{,}2\,\% \quad (6.62)$$

$\eta_{NMBuckl} = 37{,}0\,\%$ **megfelel**

3. Normálerő-Hajlítás-Kifordulás

EN 1993-1-1: 6.3.3, Annex B: Method 2

Mértékadó keresztmetszet: $x = 0{,}50 \cdot L = 0{,}50 \cdot 700{,}00 = 350{,}00$ cm

$C_{my} = \max\left(0{,}95 + 0{,}05 \cdot \alpha_{Cm};\ 0{,}9 + 0{,}1 \cdot \alpha_{Cm}\right) = \max\left(0{,}95 + 0{,}05 \cdot 0{,}0;\ 0{,}9 + 0{,}1 \cdot 0\right) = 0{,}95 \geq 0{,}4$ B.3 táblázat

$C_{mz} = 1 \geq 0{,}4$ B.3 táblázat

$C_{mLT} = \max\left(0{,}95 + 0{,}05 \cdot \alpha_{Cm};\ 0{,}9 + 0{,}1 \cdot \alpha_{Cm}\right) = \max\left(0{,}95 + 0{,}05 \cdot 0{,}0;\ 0{,}9 + 0{,}1 \cdot 0\right) = 0{,}95 \geq 0{,}4$ B.3 táblázat

$f_{yy} = \min\left(\lambda_y^{*} - 0{,}2;\ 0{,}8\right) = \min\left(0{,}65 - 0{,}2;\ 0{,}8\right) = 0{,}447$

$$f_{zy} = \min\left(\frac{0{,}1}{C_{mLT} - 0{,}25};\ \frac{0{,}1 \cdot \lambda_z^{*}}{C_{mLT} - 0{,}25}\right) = \min\left(\frac{0{,}1}{0{,}95 - 0{,}25};\ \frac{0{,}1 \cdot 2{,}41}{0{,}95 - 0{,}25}\right) = 0{,}143$$

$f_{zz} = \min\left(2 \cdot \lambda_z^{*} - 0{,}6;\ 1{,}4\right) = \min\left(2 \cdot 2{,}41 - 0{,}6;\ 1{,}4\right) = 1{,}4$

Oktatási változat

$$k_{yy} = C_{my} \cdot \left(1 + f_{yy} \cdot \frac{\frac{\left|N_{Ed_6}\right|}{\chi_y \cdot N_{pl,Rd}}}{\gamma_{M1}}\right) = 0{,}95 \cdot \left(1 + 0{,}447 \cdot \frac{\frac{|0|}{0{,}8712 \cdot 1480{,}08}}{1}\right) = 0{,}95$$

$$k_{zy} = 1 - f_{zy} \cdot \frac{\frac{\left|N_{Ed_6}\right|}{\chi_z \cdot N_{pl,Rd}}}{\gamma_{M1}} = 1 - 0{,}143 \cdot \frac{\frac{|0|}{0{,}1497 \cdot 1480{,}08}}{1} = 1$$ Annex B.1, B.2 táblázat

$$\chi_y = \min\left(\frac{1}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 - \lambda_y^{*2}}};\ 1\right) = 0{,}8712$$ (6.49)

$$\chi_z = \min\left(\frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \lambda_z^{*2}}};\ 1\right) = 0{,}1497$$ (6.49)

$$\chi_{LT} = \min\left(\frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \cdot \lambda_{LT}^{2}}};\ 1\right) = 0{,}4$$ (6.56)

$$\eta_{NMLTBuckl_1} = \frac{\frac{\left|N_{Ed_6}\right|}{\chi_y \cdot N_{pl,Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{yy} \cdot \frac{\frac{\left|M_{y,Ed_6}\right|}{\chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}}}{\gamma_{M1}} = \frac{|0|}{0{,}8712 \cdot 1480{,}08} + 0{,}95 \cdot \frac{|(-6737{,}50)|}{0{,}4 \cdot 17283{,}09} = 92{,}5\ \%$$ (6.61)

$$\eta_{NMLTBuckl_2} = \frac{\frac{\left|N_{Ed_6}\right|}{\chi_z \cdot N_{pl,Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{zy} \cdot \frac{\frac{\left|M_{y,Ed_6}\right|}{\chi_{LT} \cdot M_{pl,Rd,y}}}{\gamma_{M1}} = \frac{|0|}{0{,}1497 \cdot 1480{,}08} + 1 \cdot \frac{|(-6737{,}50)|}{0{,}4 \cdot 17283{,}09} = 97{,}4\ \%$$ (6.62)

$\eta_{NMLTBuckl} = 97{,}4\ \%$ **megfelel**

4. Nyírás (y) - szilárdsági vizsgálat:

EN 1993-1-1: 6.2.6

Mértékadó keresztmetszet: $x = 0{,}00 \cdot L = 0{,}00 \cdot 700{,}00 = 0$ cm

$$V_{pl,Rd,y} = \frac{A_{V,y} \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{32{,}10 \cdot 27{,}50}{\sqrt{3} \cdot 1} = 509{,}66\ \text{kN}$$ (6.18)

$$\eta_{V_y} = \frac{|V_{y,Ed\,1}|}{V_{pl,Rd,y}} = \frac{|0|}{509,66} = 0\,\% \quad (6.17) \qquad \textbf{megfelel}$$

5. Nyírási horpadási ellenállás:

EN 1993-1-5: 5.1, 5.2, 5.3, 5.5, Annex A: A.3

Mértékadó keresztmetszet: $x = 0,00 \cdot L = 0,00 \cdot 700,00 = 0$ cm

$\eta_w = 1,2$ 5.2 (2) NOTE 2

$h_w = h - 2 \cdot t_f = 30,00 - 2 \cdot 1,07 = 27,86$ cm

Nincs merevítés $\rightarrow k_\tau = 5,34$ (A.5)

$$\lambda_w = \frac{h_w}{37,4 \cdot t_w \cdot \varepsilon \sqrt{k_\tau}} = \frac{27,86}{37,4 \cdot 0,71 \cdot 0,92\sqrt{5,34}} = 0,4911 \quad (5.6)$$

$$\chi_w = \eta_w = \eta_w = 1,2 \leftarrow \frac{h_w}{t_w} \leq \frac{31 \cdot \varepsilon \sqrt{k_\tau}}{\eta_w} \quad 5.1\,(2)$$

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w \cdot f_y \cdot h_w \cdot t_w}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}} = \frac{1,2 \cdot 27,50 \cdot 27,86 \cdot 0,71}{\sqrt{3} \cdot 1} = 376,87 \text{ kN} \quad (5.1)$$

$$V_{pl,Rd,z} > V_{bw,Rd} \rightarrow V_{b,Rd} = V_{pl,Rd,z} = 407,89 = 407,89 \text{ kN}$$

$$\eta_{V_w} = \frac{|V_{z,Ed\,1}|}{V_{b,Rd}} = \frac{|(-38,50)|}{407,89} = 9,4\,\% \quad (5.10) \qquad \textbf{megfelel}$$

6. Nyírás-Hajlítás-Normálerő

EN 1993-1-1: 6.2.9; EN 1993-1-5: 7.1

Mértékadó keresztmetszet: $x = 0,50 \cdot L = 0,50 \cdot 700,00 = 350,00$ cm

$M_{f,Rd} = 12768,98$ kNcm $= 127,69 kNm$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right)\left(2 \cdot \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}} - 1\right)^2 \leq 1.0 \quad (7.1)$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} \geq \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}$$

$\eta_{V_w MN} = 39,0\,\%$ **megfelel**

Részeredmények

7. Normálerő - szilárdsági vizsgálat:

EN 1993-1-1: 6.2.4

Mértékadó keresztmetszet: $x = 0,00 \cdot L = 0,00 \cdot 700,00 = 0$ cm

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{53,82 \cdot 27,50}{1} = 1480,08 \text{ kN} \quad (6.10)$$

$$\eta_N = \frac{|N_{Ed\,1}|}{N_{pl,Rd}} = \frac{|0|}{1480,08} = 0\,\% \quad (6.9) \qquad \textbf{megfelel}$$

8. Nyomaték (yy) - szilárdsági vizsgálat:

EN 1993-1-1: 6.2.5

Mértékadó keresztmetszet: $x = 0,50 \cdot L = 0,50 \cdot 700,00 = 350,00$ cm

Oktatási változat

$$M_{pl,Rd,y} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{628{,}48 \cdot 27{,}50}{1} = 17283{,}09 \text{ kNcm} = 172{,}83 kNm \quad (6.13)$$

$$\eta_{M_{y,Pl}} = \frac{|M_{y,Ed_6}|}{M_{pl,Rd,y}} = \frac{|(-6737{,}50)|}{17283{,}09} = 39{,}0\ \% \quad (6.12) \quad \textbf{megfelel}$$

9. Nyomaték (zz) - szilárdsági vizsgálat:

EN 1993-1-1: 6.2.5

Mértékadó keresztmetszet: $x = 0{,}00 \cdot L = 0{,}00 \cdot 700{,}00 = 0$ cm

Oktatási változat

$$M_{pl,Rd,z} = \frac{W_{pl,z} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{125{,}23 \cdot 27{,}50}{1} = 3443{,}74 \text{ kNcm} = 34{,}44 kNm \quad (6.13)$$

$$\eta_{M_{z,Pl}} = \frac{|M_{z,Ed_1}|}{M_{pl,Rd,z}} = \frac{|0|}{3443{,}74} = 0\ \% \quad (6.12) \quad \textbf{megfelel}$$

10. Nyírás (z) - szilárdsági vizsgálat:

EN 1993-1-1: 6.2.6

Mértékadó keresztmetszet: $x = 0{,}00 \cdot L = 0{,}00 \cdot 700{,}00 = 0$ cm

$$V_{pl,Rd,z} = \frac{A_{V_z} \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{25{,}69 \cdot 27{,}50}{\sqrt{3} \cdot 1} = 407{,}89 \text{ kN} \quad (6.18)$$

$$\eta_{V_z} = \frac{|V_{z,Ed_1}|}{V_{pl,Rd,z}} = \frac{|(-38{,}50)|}{407{,}89} = 9{,}4\ \% \quad (6.17) \quad \textbf{megfelel}$$

11. Hajlítás-nyírás interakciós vizsgálat

EN 1993-1-1: 6.2.1, 6.2.8, 6.2.9.3

Mértékadó keresztmetszet: $x = 0{,}50 \cdot L = 0{,}50 \cdot 700{,}00 = 350{,}00$ cm

$V_{z,Ed_6} = 0 \text{ kN} \leq V_{pl,Rd,z}/2 = 203{,}95 \text{ kN} \rightarrow$ A hajlítás és a vele egyidejű nyírás hatását nem kell számításba venni. 6.2.8

(2)

$V_{y,Ed_6} = 0 \text{ kN} \leq V_{pl,Rd,y}/2 = 254{,}83 \text{ kN} \rightarrow$ A hajlítás és a vele egyidejű nyírás hatását nem kell számításba venni. 6.2.8

(2)

12. Hajlítás-normálerő interakciós vizsgálat

EN 1993-1-1: 6.2.1, 6.2.8, 6.2.9.3

Mértékadó keresztmetszet: $x = 0{,}50 \cdot L = 0{,}50 \cdot 700{,}00 = 350{,}00$ cm

$$n = \frac{|N_{Ed_6}|}{N_{pl,Rd}} = \frac{0}{1480{,}08} = 0\ \% \leq 25\%$$

$$|N_{Ed_6}| = 0 \text{ kN} \leq N_{Ed,w}/2 = \frac{h_w \cdot t_w \cdot f_y}{2 \cdot \gamma_{M0}} = \frac{27{,}86 \cdot 0{,}71 \cdot 27{,}50}{2 \cdot 1} = 271{,}98 \text{ kN}$$

$$M_{Ny,Rd} = M_{y,V,Rd} = 17283{,}09 = 17283{,}09 \text{ kNcm} = 172{,}83 kNm$$

$$M_{Nz,Rd} = M_{z,V,Rd} = 3443{,}74 = 3443{,}74 \text{ kNcm} = 34{,}44 kNm$$

$$\eta_{MN,1} = \frac{M_{y,Ed_6}}{M_{Ny,Rd}} = \frac{(-6737{,}50)}{17283{,}09} = 39{,}0\ \%$$

$$\eta_{MN,2} = \frac{M_{z,Ed\,6}}{M_{Nz,Rd}} = \frac{0}{3443,74} = 0\,\%$$

$$\alpha_{MN} = 2$$

$$\beta_{MN} = \max(5 \cdot n / 100;\ 1) = \max(5 \cdot 0 / 100;\ 1) = 1$$

$$\eta_{MN,3} = \left(\frac{M_{y,Ed\,6}}{M_{Ny,Rd}}\right)^{\alpha_{MN}} + \left(\frac{M_{z,Ed\,6}}{M_{Nz,Rd}}\right)^{\beta_{MN}} = \left(\frac{(-6737,50)}{17283,09}\right)^{2} + \left(\frac{0}{3443,74}\right)^{1} = 15,2\,\% \quad (6.41)$$

$$\eta_{MN} = \max(\eta_{MN,1};\ \eta_{MN,2};\ \eta_{MN,3};\ \eta_N) = \max(39,0;\ 0;\ 15,2;\ 0) = 39,0\,\% \quad \textbf{megfelel}$$

Oktatási változat

13. Kihajlási ellenállás:

EN 1993-1-1: 6.3.1

Mértékadó keresztmetszet: $x = 0,50 \cdot L = 0,50 \cdot 700,00 = 350,00$ cm

$L_y = k_y \cdot L = 1 \cdot 700,00 = 700,00$ cm

$L_z = k_z \cdot L = 1 \cdot 700,00 = 700,00$ cm

Kihajlási görbe az y tengely körül: a 6.2 táblázat

$\rightarrow \alpha_y = 0,21$ 6.1 táblázat

Kihajlási görbe a z tengely körül: b 6.2 táblázat

$\rightarrow \alpha_z = 0,34$ 6.1 táblázat

$$\lambda_y{}^* = \frac{L_y}{i_y} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{700,00}{12,46} \cdot \frac{1}{86,8} = 0,65 \quad (6.50)$$

$$\lambda_z{}^* = \frac{L_z}{i_z} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{700,00}{3,35} \cdot \frac{1}{86,8} = 2,41 \quad (6.50)$$

$$\phi_y = \frac{1 + \alpha_y \cdot (\lambda_y{}^* - 0,2) + \lambda_y{}^{*2}}{2} = \frac{1 + 0,21 \cdot (0,65 - 0,2) + 0,65^2}{2} = 0,7563$$

$$\phi_z = \frac{1 + \alpha_z \cdot (\lambda_z{}^* - 0,2) + \lambda_z{}^{*2}}{2} = \frac{1 + 0,34 \cdot (2,41 - 0,2) + 2,41^2}{2} = 3,7729$$

$$\chi_y = \min\left(\frac{1}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 - \lambda_y{}^{*2}}};\ 1\right) = \min\left(\frac{1}{0,7563 + \sqrt{0,7563^2 - 0,65^2}};\ 1\right) = 0,8712 \quad (6.49)$$

$$\chi_z = \min\left(\frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \lambda_z{}^{*2}}};\ 1\right) = \min\left(\frac{1}{3,7729 + \sqrt{3,7729^2 - 2,41^2}};\ 1\right) = 0,1497 \quad (6.49)$$

$\chi_{TF} = 0,5535$ (6.52, 6.49)

$\chi = \min(\chi_y;\ \chi_z;\ \chi_{TF}) = \min(0,8712;\ 0,1497;\ 0,5535) = 0,1497 \leq 1,0$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f}{\gamma_{M1}} = \frac{0,1497 \cdot 53,82 \cdot 27,50}{1} = 221,64 \text{ kN} \quad (6.47)$$

$$\eta_{N_b} = \frac{|N_{Ed\,6}|}{N_{b,Rd}} = \frac{|0|}{221,64} = 0\,\% \quad (6.46) \qquad \textbf{megfelel}$$

14. Kifordulási ellenállás:

EN 1993-1-1: 6.3.2

Mértékadó keresztmetszet: $x = 0,50 \cdot L = 0,50 \cdot 700,00 = 350,00$ cm

M_{cr} Számítási módszer: AutoMcr

$M_{cr} = 7054{,}12 \text{ kNcm} = 70{,}54 kNm$

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{628{,}48 \cdot 27{,}50}{7054{,}12}} = 1{,}57$$

Kihajlási görbe: b 6.3 táblázat

$\rightarrow \alpha_{LT} = 0{,}34$ 6.3 táblázat

$$\phi_{LT} = \frac{1 + \alpha_{LT} \cdot (\lambda_{LT} - \lambda_{LT,0}) + \beta \cdot \lambda_{LT}^2}{2} = \frac{1 + 0{,}34 \cdot (1{,}57 - 0{,}4) + 0{,}75 \cdot 1{,}57^2}{2} = 1{,}62$$

$$\chi_{LT} = \min\left(\frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \cdot \lambda_{LT}^2}}; 1\right) = \min\left(\frac{1}{1{,}62 + \sqrt{1{,}62^2 - 0{,}75 \cdot 1{,}57^2}}; 1\right) = 0{,}4 \quad (6.56)$$

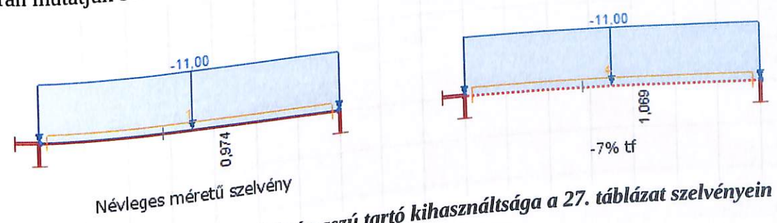
$$M_{b,Rd} = \frac{\chi_{LT} \cdot W_y \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0{,}4 \cdot 628{,}48 \cdot 27{,}50}{1} = 6918{,}24 \text{ kNcm} = 69{,}18 kNm \quad (6.55)$$

$$\eta_{M_b} = \frac{|M_{y,Ed_6}|}{M_{b,Rd}} = \frac{|(-6737{,}50)|}{6918{,}24} = 97{,}4\ \% \quad (6.54) \qquad \textbf{megfelel}$$

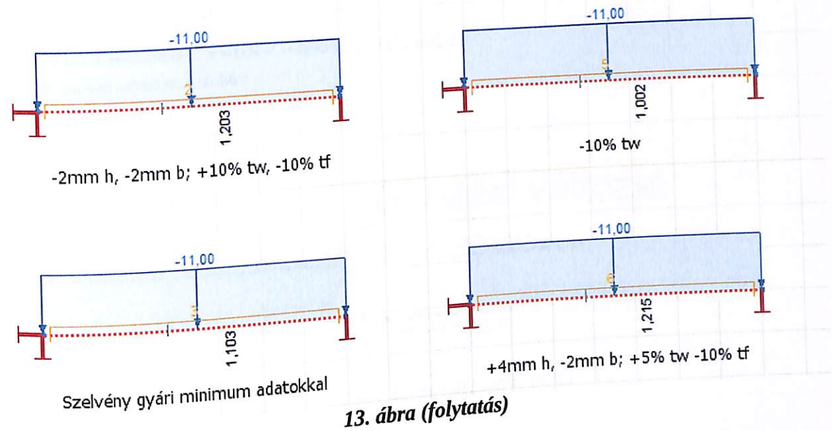
Oktatási változat

A méretezési számítások alapján az általunk vizsgált elrendezés esetében mértékadónak (a többi károsodási módnál lényegesen nagyobb, közel háromszoros kihasználtság mellett) a kifordulás bizonyult; így a továbbiakban – a módosított keresztmetszeti geometriájú szelvényeknél – csak a kifordulást fogjuk vizsgálni. Ennek oka az, hogy – az alapvető tartószerkezeti geometria és a terhelések változatlansága mellett – a keresztmetszet változtatásának mértékénél lényegesen nagyobb a kifordulási károsodás dominanciája a többi károsodási típus felett, így pusztán a keresztmetszet változtatásával nem fog megváltozni a mértékadó károsodás módja.
A névleges szelvénymérettel optimálisnak nevezett 97,5%-os kihasználtságot tudtunk elérni a kifordulási ellenállásnál a választott elrendezésben.

Ugyanezen elrendezésben meghatároztuk az igénybevételt a többi, a névlegestől eltérő mérettel rendelkező szelvény (27. táblázat) esetében is. A maximális kihasználtságokat a 13. ábrán mutatjuk be:

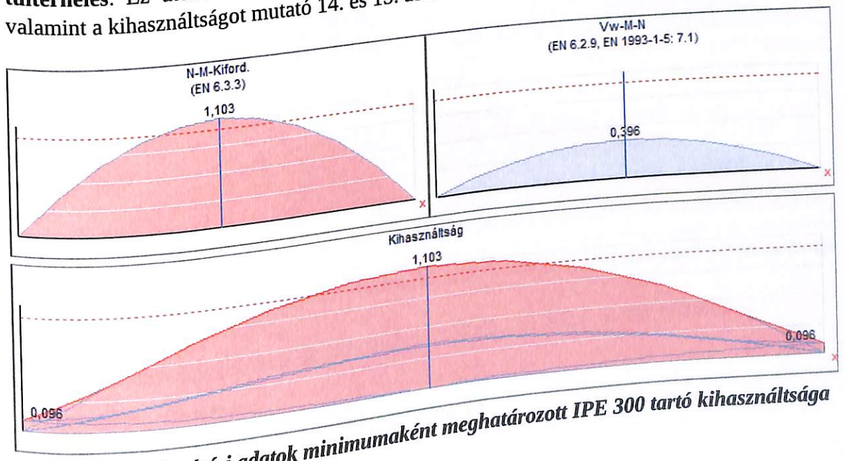


13. ábra: IPE 300 hajlított kéttámaszú tartó kihasználtsága a 27. táblázat szelvényein



13. ábra (folytatás)

Minden egyes szelvényméret esetén a kifordulási tönkremenetel volt a mértékadó. Az ábrán egyértelműen látszik, hogy a 97,5%-os kihasználtságra méretezett névleges szelvénnyel azonos elrendezésben egyetlen valódi mérettel számított szelvényméret sem felelt meg kifordulásra; a valódi **gyári** mérési adatokból meghatározott „worst case" **szelvénynél több, mint 10%-os**, a szabványos tűrésen belül felvehető, a modellezett elrendezés szempontjából **legkedvezőtlenebb szelvényméret esetében** viszont már **több, mint 20%-os** a kifordulási **túlterhelés**. Ez utóbbi két esetet részletesebben is bemutatjuk a kifordulás számításával, valamint a kihasználtságot mutató 14. és 15. ábrákon is.



14. ábra: Gyári mérési adatok minimumaként meghatározott IPE 300 tartó kihasználtsága

Gyári mérési adatok minimumaként meghatározott IPE 300 szelvény számításai:

14. Kifordulási ellenállás:

EN 1993-1-1: 6.3.2

Mértékadó keresztmetszet: $x = 0{,}50 \cdot L = 0{,}50 \cdot 700{,}00 = 350{,}00$ cm

M_{cr} Számítási módszer: AutoMcr

$M_{cr} = 6789{,}50$ kNcm $= 67{,}89 kNm$

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{618{,}57 \cdot 27{,}50}{6789{,}50}} = 1{,}58$$

Kihajlási görbe: c 6.3 táblázat

$\rightarrow \alpha_{LT} = 0{,}49$ 6.3 táblázat

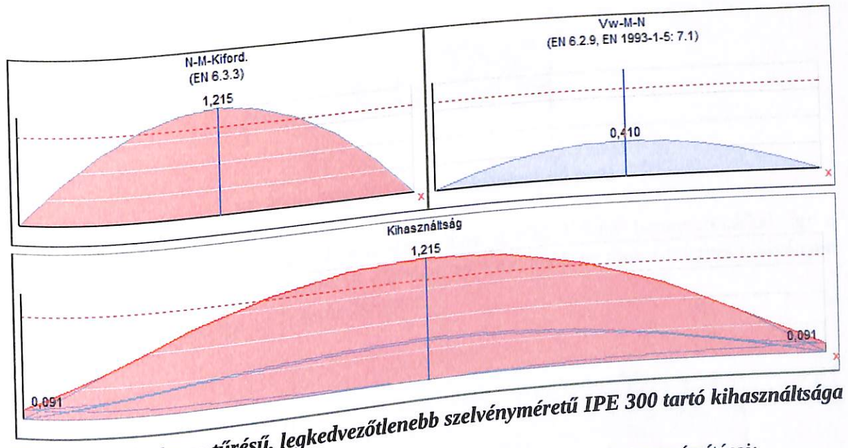
Oktatási változat

$$\phi_{LT} = \frac{1 + \alpha_{LT} \cdot (\lambda_{LT} - \lambda_{LT,0}) + \beta \cdot \lambda_{LT}^2}{2} = \frac{1 + 0{,}49 \cdot (1{,}58 - 0{,}4) + 0{,}75 \cdot 1{,}58^2}{2} = 1{,}73$$

$$\chi_{LT} = \min\left(\frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \cdot \lambda_{LT}^2}}; 1\right) = \min\left(\frac{1}{1{,}73 + \sqrt{1{,}73^2 - 0{,}75 \cdot 1{,}58^2}}; 1\right) = 0{,}36 \quad (6.56)$$

$$M_{b,Rd} = \frac{\chi_{LT} \cdot W_y \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0{,}36 \cdot 618{,}57 \cdot 27{,}50}{1} = 6110{,}95 \text{ kNcm} = 61{,}11 kNm \quad (6.55)$$

$$\eta_{M_b} = \frac{|M_{y,Ed_6}|}{M_{b,Rd}} = \frac{|(-6737{,}50)|}{6110{,}95} = \underline{110{,}3\ \%} \quad (6.54) \quad \underline{\text{nem felel meg!}}$$



15. ábra: Szabványos tűrésű, legkedvezőtlenebb szelvényméretű IPE 300 tartó kihasználtsága

Szabványos tűrésű, legkedvezőtlenebb szelvényméretű IPE 300 szelvény számításai:

14. Kifordulási ellenállás:

EN 1993-1-1: 6.3.2

Mértékadó keresztmetszet: $x = 0{,}50 \cdot L = 0{,}50 \cdot 700{,}00 = 350{,}00$ cm

M_{cr} Számítási módszer: AutoMcr

$M_{cr} = 6045{,}59$ kNcm $= 60{,}46 kNm$

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{597,52 \cdot 27,50}{6045,59}} = 1,65$$

Kihajlási görbe: *c* 6.3 táblázat
$\rightarrow \alpha_{LT} = 0,49$ 6.3 táblázat

Oktatási változat

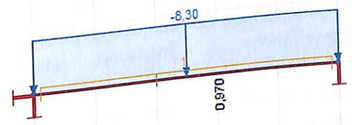
$$\phi_{LT} = \frac{1 + \alpha_{LT} \cdot (\lambda_{LT} - \lambda_{LT,0}) + \beta \cdot \lambda_{LT}^2}{2} = \frac{1 + 0,49 \cdot (1,65 - 0,4) + 0,75 \cdot 1,65^2}{2} = 1,83$$

$$\chi_{LT} = \min\left(\frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \cdot \lambda_{LT}^2}}; 1\right) = \min\left(\frac{1}{1,83 + \sqrt{1,83^2 - 0,75 \cdot 1,65^2}}; 1\right) = 0,34 \quad (6.56)$$

$$M_{b,Rd} = \frac{\chi_{LT} \cdot W_y \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,34 \cdot 597,52 \cdot 27,50}{1} = 5547,30 \text{ kNcm} = 55,47 kNm \quad (6.55)$$

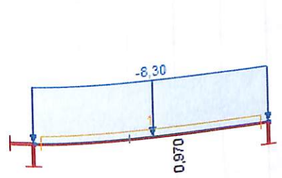
$$\eta_{M_b} = \frac{|M_{y,Ed,6}|}{M_{b,Rd}} = \frac{|(-6737,50)|}{5547,30} = 121,5\ \% \quad (6.54) \quad \textbf{nem felel meg!}$$

IPE 200:
A hatás modellezéséhez felvettünk egy 5m fesztávolságú, 8,3 kN/m megoszló teherrel terhelt kéttámaszú csuklós alátámasztású IPE 200 gerendát. Az elrendezést a 16. ábra mutatja be.

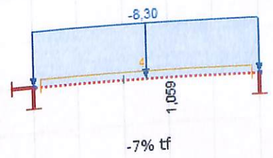


16. ábra: IPE 200 hajlított kéttámaszú tartó

A mértékadó károsodás, a számítás menete azonos az IPE 300-nál bemutatottakkal, így a részletes igénybevételi számításokat és görbéket nem mutatjuk be újra. Az egyes szelvények maximális kihasználtsága a 17. ábrán látható:

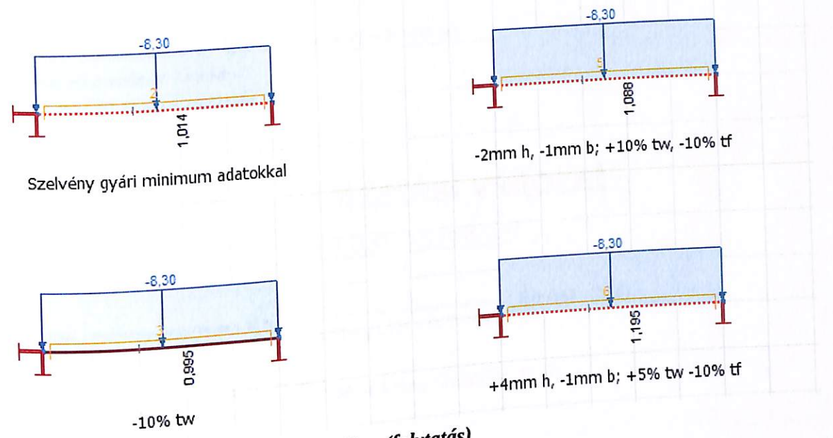


Névleges méretű szelvény



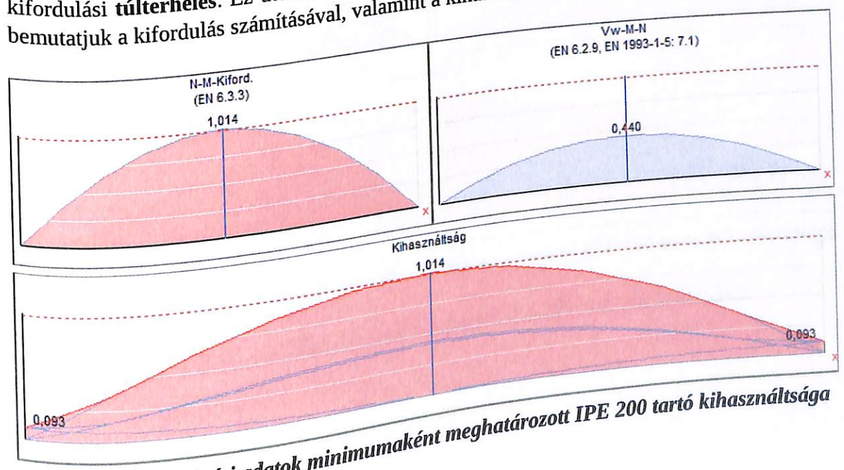
-7% tf

17. ábra: IPE 200 hajlított kéttámaszú tartó kihasználtsága a 28. táblázat szelvényein



17. ábra (folytatás)

Az IPE 300-hoz hasonlóan most is minden szelvényméret esetén a kifordulási tönkremenetel volt a mértékadó. A 97%-os kihasználtságra méretezett névleges szelvénnyel azonos elrendezésben a valódi **gyári** mérési adatokból meghatározott „worst case" **szelvénynél** – az IPE 300 méreteltéréseinél „kedvezőbb" mérési adatok miatt – most csak **1,4%-os**, viszont a szabványos tűrésen belül felvehető, a modellezett elrendezés szempontjából **legkedvezőtlenebb szelvényméret esetében** most is majdnem 20%-os (pontosan **19,5 %**) a kifordulási **túlterhelés**. Ez utóbbi két esetet – az IPE 300-hoz hasonlóan – részletesebben is bemutatjuk a kifordulás számításával, valamint a kihasználtságot mutató 18. és 19. ábrákon is.



18. ábra: Gyári mérési adatok minimumaként meghatározott IPE 200 tartó kihasználtsága

Gyári mérési adatok minimumaként meghatározott IPE 200 szelvény számításai:

14. Kifordulási ellenállás:

EN 1993-1-1 6.3.2

Mértékadó keresztmetszet: $x = 0{,}50 \cdot L = 0{,}50 \cdot 500{,}00 = 250{,}00$ cm

M_{cr} Számítási módszer: AutoMcr

$M_{cr} = 2676{,}50$ kNcm $= 26{,}77 kNm$

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{214{,}29 \cdot 27{,}50}{2676{,}50}} = 1{,}48$$

Kihajlási görbe: b 6.3 táblázat

$\rightarrow \alpha_{LT} = 0{,}34$ 6.3 táblázat

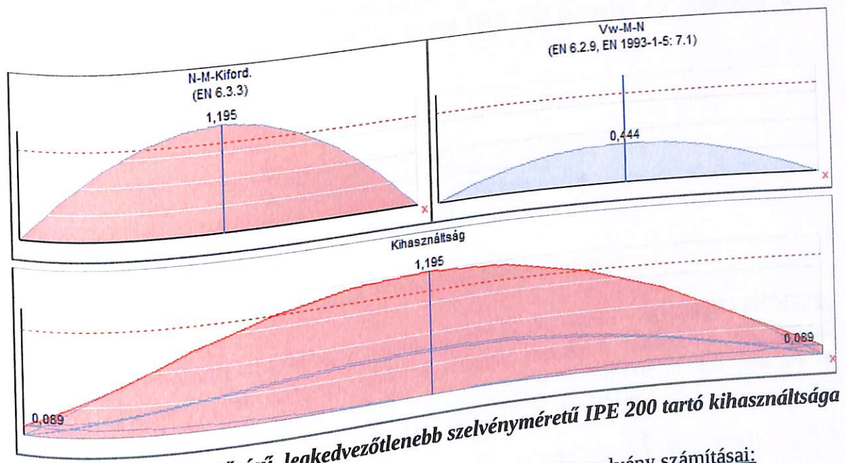
Oktatási változat

$$\phi_{LT} = \frac{1 + \alpha_{LT} \cdot (\lambda_{LT} - \lambda_{LT,0}) + \beta \cdot \lambda_{LT}^2}{2} = \frac{1 + 0{,}34 \cdot (1{,}48 - 0{,}4) + 0{,}75 \cdot 1{,}48^2}{2} = 1{,}51$$

$$\chi_{LT} = \min\left(\frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \cdot \lambda_{LT}^2}}; 1\right) = \min\left(\frac{1}{1{,}51 + \sqrt{1{,}51^2 - 0{,}75 \cdot 1{,}48^2}}; 1\right) = 0{,}43 \quad (6.56)$$

$$M_{b,Rd} = \frac{\chi_{LT} \cdot W_y \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0{,}43 \cdot 214{,}29 \cdot 27{,}50}{1} = 2559{,}19 \text{ kNcm} = 25{,}59 kNm \quad (6.55)$$

$$\eta_{M_b} = \frac{|M_{y,Ed_6}|}{M_{b,Rd}} = \frac{|(-2593{,}75)|}{2559{,}19} = \mathbf{101{,}4\ \%} \quad (6.54) \quad \textbf{nem felel meg!}$$



19. ábra: Szabványos tűrésű, legkedvezőtlenebb szelvényméretű IPE 200 tartó kihasználtsága

Szabványos tűrésű, legkedvezőtlenebb szelvényméretű IPE 200 szelvény számításai:

14. Kifordulási ellenállás:

EN 1993-1-1 6.3.2

Mértékadó keresztmetszet: $x = 0{,}50 \cdot L = 0{,}50 \cdot 500{,}00 = 250{,}00$ cm

M_{cr} Számítási módszer: AutoMcr

$M_{cr} = 2438{,}10$ kNcm $= 24{,}38 kNm$

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{212{,}39 \cdot 27{,}50}{2438{,}10}} = 1{,}55$$

Kihajlási görbe: *c* 6.3 táblázat
$\rightarrow \alpha_{LT} = 0{,}49$ 6.3 táblázat

Oktatási változat

$$\phi_{LT} = \frac{1 + \alpha_{LT} \cdot (\lambda_{LT} - \lambda_{LT,0}) + \beta \cdot \lambda_{LT}^2}{2} = \frac{1 + 0{,}49 \cdot (1{,}55 - 0{,}4) + 0{,}75 \cdot 1{,}55^2}{2} = 1{,}68$$

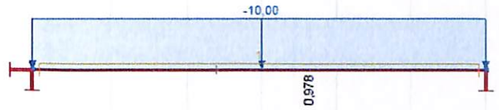
$$\chi_{LT} = \min\left(\frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \cdot \lambda_{LT}^2}}; 1\right) = \min\left(\frac{1}{1{,}68 + \sqrt{1{,}68^2 - 0{,}75 \cdot 1{,}55^2}}; 1\right) = 0{,}37 \quad (6.56)$$

$$M_{b,Rd} = \frac{\chi_{LT} \cdot W_y \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0{,}37 \cdot 212{,}39 \cdot 27{,}50}{1} = 2169{,}99 \text{ kNcm} = 21{,}70 kNm \quad (6.55)$$

$$\eta_{M_b} = \frac{|M_{y,Ed_6}|}{M_{b,Rd}} = \frac{|(-2593{,}75)|}{2169{,}99} = \mathbf{119{,}5\ \%} \quad (6.54) \quad \textbf{nem felel meg!}$$

HEA 160:

A HEA szelvények, bár jellegükben hasonlítanak az IPE-szelvényekre (széles talpak között keskeny gerinc), azoktól arányaikban eltérnek, mivel ún. szélesövű szelvények. Emiatt más az egyes igénybevételek aránya, illetve a geometriai méretek változásának hatása, mint az IPE szelvények esetében. Az elemzéshez felvettünk egy 6m fesztávolságú, 10,0 kN/m megoszló teherrel terhelt kéttámaszú csuklós alátámasztású HEA 160 gerendát. Az elrendezést a 20. ábra mutatja be.

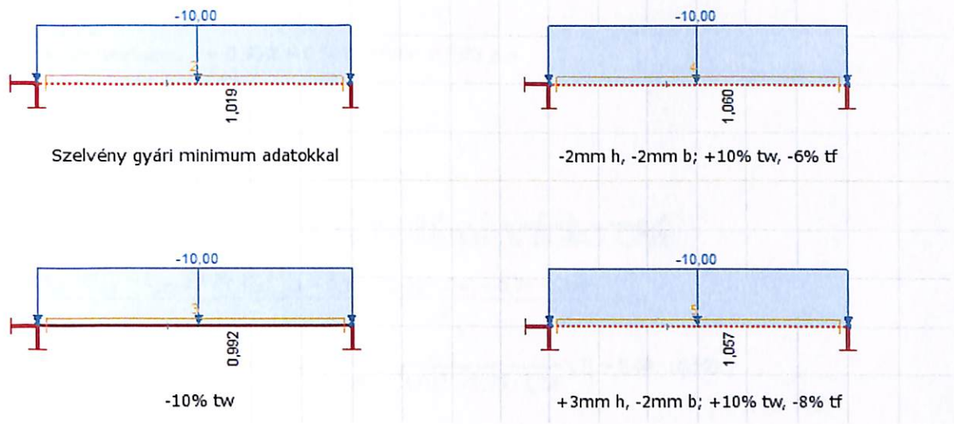


20. ábra: HEA 160 hajlított kéttámaszú tartó

A mértékadó károsodás – bár kevésbé domináns, mint az IPE esetén – ugyanúgy a kifordulás, mint az IPE szelvények esetében. Mivel a számítás menete is azonos az IPE 300-nál bemutatottakkal, így a részletes igénybevételi számításokat és görbéket itt sem mutatjuk be újra. Az egyes szelvények maximális kihasználtsága a 21. ábrán látható:

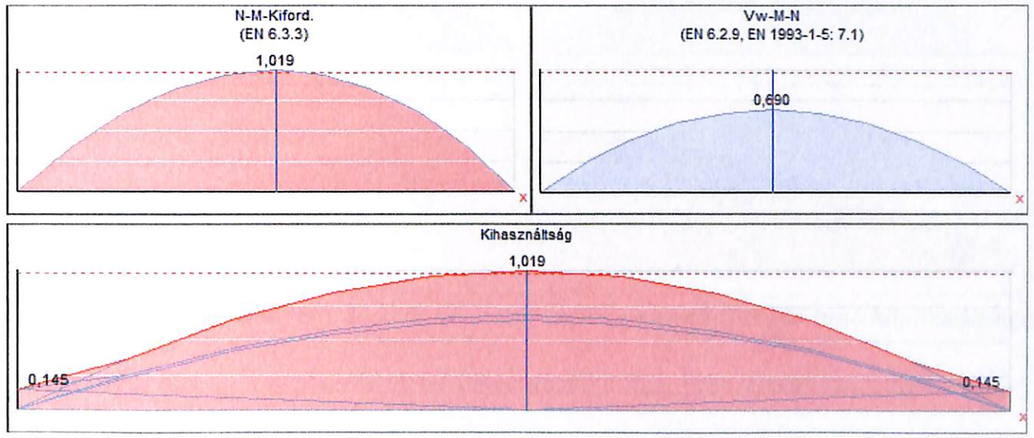


21. ábra: HEA 160 hajlított kéttámaszú tartó kihasználtsága a 29. táblázat szelvényein



21. ábra (folytatás)

A 97,8%-os kihasználtságra méretezett névleges szelvénnyel azonos elrendezésben a valódi **gyári** mérési adatokból meghatározott „worst case” **szelvénynél 1,9%-os**, a szabványos tűrésen belül felvehető, a modellezett elrendezés szempontjából **legkedvezőtlenebb szelvényméret esetében** most „csak” **6%-os** a kifordulási **túlterhelés**. A HEA szelvények méreteltérése az IPE-hez képest kevésbé karcsú kialakítás miatt az annál a szelvénynél tapasztalt közel 20%-nál lényegesen kisebb mértékű, 6%-os túlterhelést okoz teherbírás-csökkenést okoz. Ezt a két esetet – az IPE szelvényekhez hasonlóan – részletesebben is bemutatjuk a kifordulás számításával, valamint a kihasználtságot mutató 22. és 23. ábrákon is.



22. ábra: Gyári mérési adatok minimumaként meghatározott HEA 160 tartó kihasználtsága

Gyári mérési adatok minimumaként meghatározott HEA 160 szelvény számításai:

14. Kifordulási ellenállás:

EN 1993-1-1 6.3.2

Mértékadó keresztmetszet: $x = 0{,}50 \cdot L = 0{,}50 \cdot 600{,}00 = 300{,}00$ cm

M_{cr} Számítási módszer: AutoMcr

$M_{cr} = 6074{,}10$ kNcm $= 60{,}74 kNm$

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{237{,}08 \cdot 27{,}50}{6074{,}10}} = 1{,}04$$

Kihajlási görbe: b 6.3 táblázat

$\rightarrow \alpha_{LT} = 0{,}34$ 6.3 táblázat

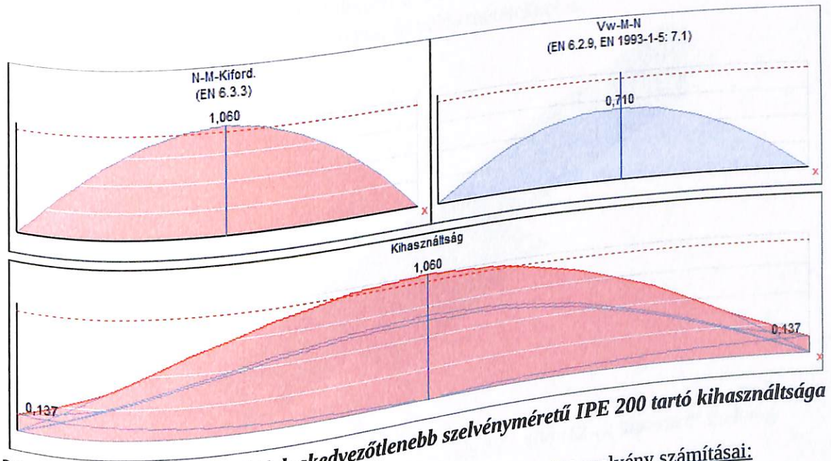
Oktatási változat

$$\phi_{LT} = \frac{1 + \alpha_{LT} \cdot (\lambda_{LT} - \lambda_{LT,0}) + \beta \cdot \lambda_{LT}^2}{2} = \frac{1 + 0{,}34 \cdot (1{,}04 - 0{,}4) + 0{,}75 \cdot 1{,}04^2}{2} = 1{,}01$$

$$\chi_{LT} = \min\left(\frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \cdot \lambda_{LT}^2}}; 1\right) = \min\left(\frac{1}{1{,}01 + \sqrt{1{,}01^2 - 0{,}75 \cdot 1{,}04^2}}; 1\right) = 0{,}68 \quad (6.56)$$

$$M_{b,Rd} = \frac{\chi_{LT} \cdot W_y \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0{,}68 \cdot 237{,}08 \cdot 27{,}50}{1} = 4417{,}79 \text{ kNcm} = 44{,}18 kNm \quad (6.55)$$

$$\eta_{M_b} = \frac{|M_{y,Ed_6}|}{M_{b,Rd}} = \frac{|(-4500{,}00)|}{4417{,}79} = \mathbf{101{,}9\ \%} \quad (6.54) \quad \textbf{nem felel meg!}$$



23. ábra: Szabványos tűrésű, legkedvezőtlenebb szelvényméretű IPE 200 tartó kihasználtsága

Szabványos tűrésű, legkedvezőtlenebb szelvényméretű HEA 160 szelvény számításai:

14. Kifordulási ellenállás:

EN 1993-1-1 6.3.2

Mértékadó keresztmetszet: $x = 0{,}50 \cdot L = 0{,}50 \cdot 600{,}00 = 300{,}00$ cm

M_{cr} Számítási módszer: AutoMcr

$M_{cr} = 5759{,}96$ kNcm $= 57{,}60 kNm$

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{230{,}63 \cdot 27{,}50}{5759{,}96}} = 1{,}05$$

Kihajlási görbe: *b* 6.3 táblázat
$\rightarrow \alpha_{LT} = 0{,}34$ 6.3 táblázat

Oktatási változat

$$\phi_{LT} = \frac{1 - \alpha_{LT} \cdot (\lambda_{LT} - \lambda_{LT,0}) + \beta \cdot \lambda_{LT}^2}{2} = \frac{1 + 0{,}34 \cdot (1{,}05 - 0{,}4) + 0{,}75 \cdot 1{,}05^2}{2} = 1{,}02$$

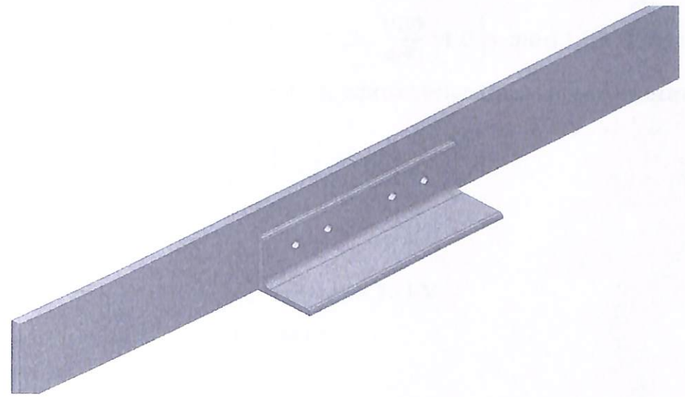
$$\chi_{LT} = \min\left(\frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \cdot \lambda_{LT}^2}}; 1\right) = \min\left(\frac{1}{1{,}02 + \sqrt{1{,}02^2 - 0{,}75 \cdot 1{,}05^2}}; 1\right) = 0{,}67 \quad (6.56)$$

$$M_{b,Rd} = \frac{\chi_{LT} \cdot W_y \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0{,}67 \cdot 230{,}63 \cdot 27{,}50}{1} = 4245{,}91 \text{ kNcm} = 42{,}46 kNm \quad (6.55)$$

$$\eta_{M_b} = \frac{|M_{y,Ed_6}|}{M_{b,Rd}} = \frac{|(-4500{,}00)|}{4245{,}91} = \mathbf{106{,}0\ \%} \quad (6.54) \quad \textbf{nem felel meg!}$$

2.3. *Eltérés hatása a csavaros kapcsolatú húzott szelvények és hevederek tönkremeneteli teherbírására*

Az L-acélokat, laposacélokat, illetve a durvalemezből kivágott acél táblákat sok esetben alkalmazzák csavaros kapcsolatokban hevederként, illetve kapcsolják össze azokat csavarosan heveder segítségével. Ennek megfelelően a 24. ábrán látható húzott, csavaros kapcsolatos szerkezetet fogjuk megvizsgálni névleges, és valós méretekkel is.



24. ábra: 80x8 mm-es L-acéllal összekapcsolt 2 db 100x12-es laposacél szelvény

Méretezés névleges szelvényméretekkel:
b_{la} = 100 mm, a_L = 8 mm, t_{la} = 12 mm, t_L = 8 mm; A_{la} = 1200 mm², A_L = 1227 mm²;
d = 16 mm (M16), d_0 = 18 mm, A_d = 201 mm²; β_3 = 0,52 (p_1 = 50mm)
f_y = 275 MPa (S275), f_u = 430 MPa, f_{ub} = 500 MPa (5.5)

Teljes keresztmetszet folyási ellenállása, laposacél:

$$N_{pl,Rd,la} = \frac{f_y \cdot A_{la}}{\gamma_{M0}} = 275 \cdot 1200 = 330\,kN$$

Teljes keresztmetszet folyási ellenállása, L-acél:

$$N_{pl,Rd,L}=\frac{f_y\cdot A_L}{\gamma_{M0}}=275\cdot 1227=337{,}42\,kN$$

Lyukakkal gyengített keresztmetszet törési ellenállása, laposacél:

$$N_{u,Rd,la}=\frac{0{,}9\cdot A_{la,net}\cdot f_u}{\gamma_{M2}}=\frac{0{,}9\cdot(1200-18\cdot 12)\cdot 430}{1{,}25}=304{,}65\,kN$$

Lyukakkal gyengített keresztmetszet törési ellenállása, L-acél:

$$N_{u,Rd,L}=\frac{\beta_3\cdot A_{L,net}\cdot f_u}{\gamma_{M2}}=\frac{0{,}52\cdot(1227-18\cdot 8)\cdot 430}{1{,}25}=194{,}56\,kN$$

5.5 osztályú csavar nyírási ellenállása (egyszer nyírt):

$$F_{v,Rd}=1\cdot\frac{\alpha_v\cdot f_{ub}\cdot A}{\gamma_{M2}}=1\cdot\frac{0{,}6\cdot 500\cdot 201}{1{,}25}=48{,}25\,kN$$

4 db csavar: $N_{v,Rd}=4\cdot F_{v,Rd}=193{,}02\,kN$

Palástnyomási ellenállás:

$$k_1=min\left(\frac{2{,}8\cdot e_2}{d_o}-1{,}7;2{,}5\right)=min\left(\frac{2{,}8\cdot 40}{13}-1{,}7;2{,}5\right)=min(6{,}92;2{,}5)=2{,}5$$

Szélső csavar:

$$\alpha_b=min\left(\frac{e_1}{3\cdot d_o};\frac{f_{ub}}{f_u};1{,}0\right)=min\left(\frac{50}{3\cdot 13};\frac{800}{430};1{,}0\right)=min(1{,}28;1{,}86;1)=1$$

Közbülső csavar:

$$\alpha_b=min\left(\frac{p_1}{3\cdot d_o}-\frac{1}{4};\frac{f_{ub}}{f_u};1{,}0\right)=min\left(\frac{50}{3\cdot 13}-0{,}25;\frac{800}{430};1{,}0\right)=min(1{,}03;1{,}86;1)=1$$

A szélső és közbülső csavarok azonos palástnyomási ellenállással rendelkeznek.

L-acélra:

$$F_{b,Rd,L}=k_1\cdot\frac{\alpha_b\cdot f_u\cdot d\cdot t_L}{\gamma_{M2}}=2{,}5\cdot\frac{1\cdot 430\cdot 16\cdot 8}{1{,}25}=110{,}08\,kN$$

4 db csavar: $N_{b,Rd,L}=4\cdot F_{b,Rd,L}=440{,}32\,kN$

laposacélra:

$$F_{b,Rd,la}=k_1\cdot\frac{\alpha_b\cdot f_u\cdot d\cdot t_{la}}{\gamma_{M2}}=2{,}5\cdot\frac{1\cdot 430\cdot 16\cdot 12}{1{,}25}=165{,}12\,kN$$

2 db csavar: $N_{b,Rd,la}=2\cdot F_{b,Rd,la}=330{,}24\,kN$

Mértékadó:

$$N_{Rd}=min\left(N_{pl,Rd,la};N_{pl,Rd,L};N_{u,Rd,la};N_{u,Rd,L};N_{v,Rd};N_{b,Rd,la};N_{b,Rd,L}\right)=$$
$$=min(330;337{,}42;304{,}65;193{,}73;194{,}56;440{,}32;330{,}24)=193{,}02\,kN=N_{v,Rd}$$

Mértékadó a csavarok nyírási ellenállása.

Méretezés minimum oldalhosszakkal (L-acél: 78 mm; laposacél: 98,5 mm)

b_{la} = 98,5 mm, a_L = 78 mm, t_{la} = 12 mm, t_L = 8 mm; A_{la} = 1182 mm^2, A_L = 1195 mm^2;
d = 16 mm (M16), d_0 = 18 mm, A_d = 201 mm^2; β_3 = 0,52 (p_1 = 50mm)
f_y = 275 MPa (S275), f_u = 430 MPa, f_{ub} = 500 MPa (5.5)

Teljes keresztmetszet folyási ellenállása, laposacél:

$$N_{pl,Rd,la}=\frac{f_y\cdot A_{la}}{\gamma_{M0}}=275\cdot 1182=325{,}05\,kN$$

Teljes keresztmetszet folyási ellenállása, L-acél:

$$N_{pl,Rd,L}=\frac{f_y\cdot A_L}{\gamma_{M0}}=275\cdot 1195=328{,}63\,kN$$

Lyukakkal gyengített keresztmetszet törési ellenállása, laposacél:

$$N_{u,Rd,la}=\frac{0{,}9\cdot A_{la,net}\cdot f_u}{\gamma_{M2}}=\frac{0{,}9\cdot(1182-18\cdot 12)\cdot 430}{1{,}25}=299{,}07\,kN$$

Lyukakkal gyengített keresztmetszet törési ellenállása, L-acél:

$$N_{u,Rd,L}=\frac{\beta_3\cdot A_{L,net}\cdot f_u}{\gamma_{M2}}=\frac{0{,}52\cdot(1195-18\cdot 8)\cdot 430}{1{,}25}=188{,}81\,kN$$

5.5 osztályú csavar nyírási ellenállása (egyszer nyírt):

$$F_{v,Rd}=1\cdot\frac{\alpha_v\cdot f_{ub}\cdot A}{\gamma_{M2}}=1\cdot\frac{0{,}6\cdot 500\cdot 201}{1{,}25}=48{,}25\,kN$$

4 db csavar: $N_{v,Rd}=4\cdot F_{v,Rd}=193{,}02\,kN$

Palástnyomási ellenállás:

$$k_1=min\left(\frac{2{,}8\cdot e_2}{d_o}-1{,}7\,;2{,}5\right)=min\left(\frac{2{,}8\cdot 39}{13}-1{,}7\,;2{,}5\right)=2{,}5$$

Szélső csavar:

$$\alpha_b=min\left(\frac{e_1}{3\cdot d_o}\,;\frac{f_{ub}}{f_u}\,;1{,}0\right)=min\left(\frac{50}{3\cdot 13}\,;\frac{800}{430}\,;1{,}0\right)=min(1{,}28\,;1{,}86\,;1)=1$$

Közbülső csavar:

$$\alpha_b=min\left(\frac{p_1}{3\cdot d_o}-\frac{1}{4}\,;\frac{f_{ub}}{f_u}\,;1{,}0\right)=min\left(\frac{50}{3\cdot 13}-0{,}25\,;\frac{800}{430}\,;1{,}0\right)=min(1{,}03\,;1{,}86\,;1)=1$$

A szélső és közbülső csavarok azonos palástnyomási ellenállással rendelkeznek.

L-acélra:

$$F_{b,Rd,L}=k_1\cdot\frac{\alpha_b\cdot f_u\cdot d\cdot t_L}{\gamma_{M2}}=2{,}5\cdot\frac{1\cdot 430\cdot 16\cdot 8}{1{,}25}=110{,}08\,kN$$

4 db csavar: $N_{b,Rd,L}=4\cdot F_{b,Rd,L}=440{,}32\,kN$

laposacélra:

$$F_{b,Rd,la}=k_1\cdot\frac{\alpha_b\cdot f_u\cdot d\cdot t_{la}}{\gamma_{M2}}=2{,}5\cdot\frac{1\cdot 430\cdot 16\cdot 12}{1{,}25}=165{,}12\,kN$$

2 db csavar: $N_{b,Rd,la}=2\cdot F_{b,Rd,la}=330{,}24\,kN$

Mértékadó:

$$N_{Rd}=min\left(N_{pl,Rd,la}\,;N_{pl,Rd,L}\,;N_{u,Rd,la}\,;N_{u,Rd,L}\,;N_{v,Rd}\,;N_{b,Rd,la}\,;N_{v,Rd}\,;N_{b,Rd,L}\right)=$$

$=188{,}81\,kN=N_{u,Rd,L}$ → 2,2% teherbírás-csökkenés.

Mértékadó az L-acél lyukakkal gyengített keresztmetszetének törési ellenállása, **vagyis a valós méretek szabványos eltérése miatt megváltozott a tönkremeneteli mód, más jellegű károsodás következne be.**

Méretezés minimum keresztmetszettel (L-acél: 1184 mm²; laposacél: 1133 mm²)

b_{la} = 98,5 mm, a_L = 78 mm, t_{la} = 11,5 mm, t_L = 7,9 mm; A_{la} = 1133 mm², A_L = 1184 mm²;
d = 16 mm (M16), d_0 = 18 mm, A_d = 201 mm²; β_3 = 0,52 (p_1 = 50mm)
f_y = 275 MPa (S275), f_u = 430 MPa, f_{ub} = 500 MPa (5.5)

Teljes keresztmetszet folyási ellenállása, laposacél:

$$N_{pl,Rd,la}=\frac{f_y\cdot A_{la}}{\gamma_{M0}}=275\cdot 1133=311{,}56\,kN$$

Teljes keresztmetszet folyási ellenállása, L-acél:

$$N_{pl,Rd,L}=\frac{f_y\cdot A_L}{\gamma_{M0}}=275\cdot 1184=325{,}60\,kN$$

Lyukakkal gyengített keresztmetszet törési ellenállása, laposacél:

$$N_{u,Rd,la}=\frac{0{,}9\cdot A_{la,net}\cdot f_u}{\gamma_{M2}}=\frac{0{,}9\cdot(1133-18\cdot 11{,}5)\cdot 430}{1{,}25}=286{,}69\,kN$$

Lyukakkal gyengített keresztmetszet törési ellenállása, L-acél:

$$N_{u,Rd,L}=\frac{\beta_3\cdot A_{L,net}\cdot f_u}{\gamma_{M2}}=\frac{0{,}52\cdot(1184-18\cdot 7{,}9)\cdot 430}{1{,}25}=187{,}15\,kN$$

5.5 osztályú csavar nyírási ellenállása (egyszer nyírt):

$$F_{v,Rd}=1\cdot\frac{\alpha_v\cdot f_{ub}\cdot A}{\gamma_{M2}}=1\cdot\frac{0{,}6\cdot 500\cdot 201}{1{,}25}=48{,}25\,kN$$

4 db csavar: $N_{v,Rd}=4\cdot F_{v,Rd}=193{,}02\,kN$

Palástnyomási ellenállás:

$$k_1=min\left(\frac{2{,}8\cdot e_2}{d_o}-1{,}7;2{,}5\right)=min\left(\frac{2{,}8\cdot 39}{13}-1{,}7;2{,}5\right)=2{,}5$$

Szélső csavar:

$$\alpha_b=min\left(\frac{e_1}{3\cdot d_o};\frac{f_{ub}}{f_u};1{,}0\right)=min\left(\frac{50}{3\cdot 13};\frac{800}{430};1{,}0\right)=min(1{,}28;1{,}86;1)=1$$

Közbülső csavar:

$$\alpha_b=min\left(\frac{p_1}{3\cdot d_o}-\frac{1}{4};\frac{f_{ub}}{f_u};1{,}0\right)=min\left(\frac{50}{3\cdot 13}-0{,}25;\frac{800}{430};1{,}0\right)=min(1{,}03;1{,}86;1)=1$$

A szélső és közbülső csavarok azonos palástnyomási ellenállással rendelkeznek.
L-acélra:

$$F_{b,Rd,L}=k_1\cdot\frac{\alpha_b\cdot f_u\cdot d\cdot t_L}{\gamma_{M2}}=2{,}5\cdot\frac{1\cdot 430\cdot 16\cdot 7{,}9}{1{,}25}=108{,}70\,kN$$

4 db csavar: $N_{b,Rd,L}=4\cdot F_{b,Rd,L}=434{,}82\,kN$

laposacélra:

$$F_{b,Rd,la}=k_1\cdot\frac{\alpha_b\cdot f_u\cdot d\cdot t_{la}}{\gamma_{M2}}=2{,}5\cdot\frac{1\cdot 430\cdot 16\cdot 11{,}5}{1{,}25}=158{,}24\,kN$$

2 db csavar: $N_{b,Rd,la}=2\cdot F_{b,Rd,la}=316{,}48\,kN$

Mértékadó:

$$N_{Rd}=min\left(N_{pl,Rd,la};N_{pl,Rd,L};N_{u,Rd,la};N_{u,Rd,L};N_{v,Rd};N_{b,Rd,la};N_{v,Rd};N_{b,Rd,L}\right)=$$

$=187{,}15\,kN=N_{u,Rd,L}$ → 3,0% teherbírás-csökkenés.

Mértékadó az L-acél lyukakkal gyengített keresztmetszetének törési ellenállása **(megváltozott tönkremeneteli mód).**

Méretezés minimum oldalhosszal, nagyobb vastagsággal; közel névleges keresztmetszettel (L-acél: 1223 mm²; laposacél: 1202 mm²)

b_{la} = 98,5 mm, a_L = 78 mm, t_{la} = 12,2 mm, t_L = 8,2 mm; A_{la} = 1202 mm², A_L = 1223 mm²;
d = 16 mm (M16), d_0 = 18 mm, A_d = 201 mm²; β_3 = 0,52 (p_1 = 50mm)
f_y = 275 MPa (S275), f_u = 430 MPa, f_{ub} = 500 MPa (5.5)

Teljes keresztmetszet folyási ellenállása, laposacél:

$$N_{pl,Rd,la}=\frac{f_y\cdot A_{la}}{\gamma_{M0}}=275\cdot 1202=330{,}55\,kN$$

Teljes keresztmetszet folyási ellenállása, L-acél:

$$N_{pl,Rd,L}=\frac{f_y\cdot A_L}{\gamma_{M0}}=275\cdot 1223=336{,}33\,kN$$

Lyukakkal gyengített keresztmetszet törési ellenállása, laposacél:

$$N_{u,Rd,la}=\frac{0{,}9\cdot A_{la,net}\cdot f_u}{\gamma_{M2}}=\frac{0{,}9\cdot(1202-18\cdot 12{,}2)\cdot 430}{1{,}25}=304{,}15\,kN$$

Lyukakkal gyengített keresztmetszet törési ellenállása, L-acél:

$$N_{u,Rd,L}=\frac{\beta_3\cdot A_{L,net}\cdot f_u}{\gamma_{M2}}=\frac{0{,}52\cdot(1223-13\cdot 8{,}2)\cdot 430}{1{,}25}=193{,}19\,kN$$

5.5 osztályú csavar nyírási ellenállása (egyszer nyírt):

$$F_{v,Rd}=1\cdot\frac{\alpha_v\cdot f_{ub}\cdot A}{\gamma_{M2}}=1\cdot\frac{0{,}6\cdot 500\cdot 201}{1{,}25}=48{,}25\,kN$$

4 db csavar: $N_{v,Rd}=4\cdot F_{v,Rd}=193{,}02\,kN$

Palástnyomási ellenállás:

$$k_1=min\left(\frac{2{,}8\cdot e_2}{d_o}-1{,}7\,;2{,}5\right)=min\left(\frac{2{,}8\cdot 39}{13}-1{,}7\,;2{,}5\right)=2{,}5$$

Szélső csavar:

$$\alpha_b=min\left(\frac{e_1}{3\cdot d_o}\,;\frac{f_{ub}}{f_u}\,;1{,}0\right)=min\left(\frac{50}{3\cdot 13}\,;\frac{800}{430}\,;1{,}0\right)=min(1{,}28\,;1{,}86\,;1)=1$$

Közbülső csavar:

$$\alpha_b=min\left(\frac{p_1}{3\cdot d_o}-\frac{1}{4}\,;\frac{f_{ub}}{f_u}\,;1{,}0\right)=min\left(\frac{50}{3\cdot 13}-0{,}25\,;\frac{800}{430}\,;1{,}0\right)=min(1{,}03\,;1{,}86\,;1)=1$$

A szélső és közbülső csavarok azonos palástnyomási ellenállással rendelkeznek.
L-acélra:

$$F_{b,Rd,L}=k_1\cdot\frac{\alpha_b\cdot f_u\cdot d\cdot t_L}{\gamma_{M2}}=2{,}5\cdot\frac{1\cdot 430\cdot 16\cdot 8{,}2}{1{,}25}=112{,}80\,kN$$

4 db csavar: $N_{b,Rd,L}=4\cdot F_{b,Rd,L}=451{,}33\,kN$
laposacélra:

$$F_{b,Rd,la}=k_1\cdot\frac{\alpha_b\cdot f_u\cdot d\cdot t_{la}}{\gamma_{M2}}=2{,}5\cdot\frac{1\cdot 430\cdot 16\cdot 12{,}2}{1{,}25}=167{,}87\,kN$$

2 db csavar: $N_{b,Rd,la}=2\cdot F_{b,Rd,la}=335{,}74\,kN$

Mértékadó:

$N_{Rd}=min\left(N_{pl,Rd,la};N_{pl,Rd,L};N_{u,Rd,la};N_{u,Rd,L};N_{v,Rd};N_{b,Rd,la};N_{v,Rd};N_{b,Rd,L}\right)=$

$=193{,}02\,kN=N_{V,Rd}$ → 0,1% teherbírás-csökkenés.

Mértékadó a csavarok nyírási ellenállása.

Méretezés maximális oldalhosszal, és a hozzá tartozó legkisebb lehetséges vastagsággal (L-acél: 1184 mm²; laposacél: 1133 mm²)

b_{la} = 101,5 mm, a_L = 82,0 mm, t_{la} = 11,5 mm, t_L = 7,5 mm; A_{la} = 1133 mm², A_L = 1184 mm²;
d = 16 mm (M16), d_0 = 18 mm, A_d = 201 mm²; β_3 = 0,52 (p_1 = 50mm)
f_y = 275 MPa (S275), f_u = 430 MPa, f_{ub} = 500 MPa (5.5)

Teljes keresztmetszet folyási ellenállása, laposacél:

$$N_{pl,Rd,la}=\frac{f_y\cdot A_{la}}{\gamma_{M0}}=275\cdot 1133=311{,}51\,kN$$

Teljes keresztmetszet folyási ellenállása, L-acél:

$$N_{pl,Rd,L}=\frac{f_y\cdot A_L}{\gamma_{M0}}=275\cdot 1184=325{,}60\,kN$$

Lyukakkal gyengített keresztmetszet törési ellenállása, laposacél:

$$N_{u,Rd,la}=\frac{0{,}9\cdot A_{la,net}\cdot f_u}{\gamma_{M2}}=\frac{0{,}9\cdot(1133-18\cdot 11{,}5)\cdot 430}{1{,}25}=286{,}61\,kN$$

Lyukakkal gyengített keresztmetszet törési ellenállása, L-acél:

$$N_{u,Rd,L}=\frac{\beta_3\cdot A_{L,net}\cdot f_u}{\gamma_{M2}}=\frac{0{,}52\cdot(1184-18\cdot 7{,}5)\cdot 430}{1{,}25}=188{,}45\,kN$$

5.5 osztályú csavar nyírási ellenállása (egyszer nyírt):

$$F_{v,Rd}=1\cdot\frac{\alpha_v\cdot f_{ub}\cdot A}{\gamma_{M2}}=1\cdot\frac{0{,}6\cdot 500\cdot 201}{1{,}25}=48{,}25\,kN$$

4 db csavar: $N_{v,Rd}=4\cdot F_{v,Rd}=193{,}02\,kN$

Palástnyomási ellenállás:

$$k_1=min\left(\frac{2{,}8\cdot e_2}{d_o}-1{,}7;2{,}5\right)=min\left(\frac{2{,}8\cdot 41}{13}-1{,}7;2{,}5\right)=2{,}5$$

Szélső csavar:

$$\alpha_b=min\left(\frac{e_1}{3\cdot d_o};\frac{f_{ub}}{f_u};1{,}0\right)=min\left(\frac{50}{3\cdot 13};\frac{800}{430};1{,}0\right)=min(1{,}28;1{,}86;1)=1$$

Közbülső csavar:

$$\alpha_b=min\left(\frac{p_1}{3\cdot d_o}-\frac{1}{4};\frac{f_{ub}}{f_u};1{,}0\right)=min\left(\frac{50}{3\cdot 13}-0{,}25;\frac{800}{430};1{,}0\right)=min(1{,}03;1{,}86;1)=1$$

A szélső és közbülső csavarok azonos palástnyomási ellenállással rendelkeznek.
L-acélra:

$$F_{b,Rd,L}=k_1\cdot\frac{\alpha_b\cdot f_u\cdot d\cdot t_L}{\gamma_{M2}}=2{,}5\cdot\frac{1\cdot430\cdot16\cdot8{,}75}{1{,}25}=103{,}20\,kN$$

4 db csavar: $N_{b,Rd,L}=4\cdot F_{b,Rd,L}=412{,}80\,kN$

laposacélra:

$$F_{b,Rd,la}=k_1\cdot\frac{\alpha_b\cdot f_u\cdot d\cdot t_{la}}{\gamma_{M2}}=2{,}5\cdot\frac{1\cdot430\cdot16\cdot11{,}5}{1{,}25}=158{,}24\,kN$$

2 db csavar: $N_{b,Rd,la}=2\cdot F_{b,Rd,la}=316{,}48\,kN$

Mértékadó:

$N_{Rd}=min\left(N_{pl,Rd,la};N_{pl,Rd,L};N_{u,Rd,la};N_{u,Rd,L};N_{v,Rd};N_{b,Rd,la};N_{v,Rd};N_{b,Rd,L}\right)=$

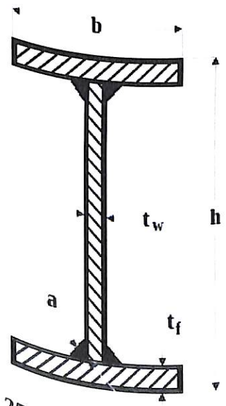
$=308{,}74\,kN=N_{v,Rd}$ → 4,2% teherbírás-csökkenés.

Mértékadó az L-acél lyukakkal gyengített keresztmetszetének törési ellenállása **(megváltozott tönkremeneteli mód).**

2.4. *Eltérés hatása a keresztmetszetek osztályba sorolására*

A névleges és tényleges méretek eltérése akár a keresztmetszeti osztályba besorolást is megváltoztathatja. A 25. ábrán látható hegesztett I tartó az 500×280×12×10 mm-es névleges méretekkel 3. keresztmetszeti osztályú, az 500×270×13×13 mm-es névleges méretekkel pedig 2. keresztmetszeti osztályú. A valós méretű szelvények legkedvezőtlenebb esetének meghatározásához a durvalemezekre szabványosan megengedett vastagságeltéréssel (A osztály) csökkentettük a névleges vastagságot. Ezen túl a nagy táblalemezekből való kivágásra feltételeztünk 1 mm-es pontatlanságot, amivel csökkentettük az öv és gerinc szélességét. Az így kapott szelvények rendre egy-egy keresztmetszeti osztállyal kedvezőtlenebb besorolásúak lettek; a névleges méretekkel 3. osztályú szelvényből a valós méretekkel 4. osztályú lett; a 2. osztályúból 3. osztályú. A részletes számítások:

Hegesztett I tartó: I 500×280×12×10; S275 minőségben



25. ábra: hegesztett I tartó méretei

h = 500 mm
b = 280 mm
t_w = 12 mm
t_f = 10 mm
a = 0,5 · tw = 6 mm
f_y = 275 MPa → $\varepsilon=\sqrt{235/f_y}=\sqrt{235/275}=0{,}9244$

Szelvény osztályba sorolása:

gerinc:

$$c_w=h-2\cdot t_f-2\cdot\sqrt{2}\cdot a=500-2\cdot10-2\cdot\sqrt{2}\cdot6=463{,}03$$

$$\frac{c}{t}=\frac{c_w}{t_w}=\frac{463{,}03}{12}=38{,}59<42\cdot\varepsilon=38{,}83\ \rightarrow\ \text{3-as keresztmetszeti osztály}$$

öv:

$$c_f=b/2-t_w/2-\sqrt{2}\cdot a=280/2-12/2-\sqrt{2}\cdot6=125{,}51$$

$$\frac{c}{t}=\frac{c_f}{t_f}=\frac{125{,}51}{10}=12{,}55<14\cdot\varepsilon=12{,}94\ \rightarrow\ \text{3-as keresztmetszeti osztály}$$

Így a teljes szelvény 3-as keresztmetszeti osztályú.

A szelvény EN 10029 szabvány szerint gyártott durvalemezből kerül kialakításra; a pontossági osztály megjelölése nélkül rendelt tétel a szabvány szerint „A" osztályúként kerül leszállításra, így a lemez valódi vastagsága akár 0,5 mm-rel is kisebb lehet, mint a névleges érték. Ehhez ha hozzávesszük a lemezek méretre vágásának 1 mm-re becsülhető pontosságát (negatív irányban), akkor a következő valós méretű szelvényt kapjuk (a hegesztési varratot továbbra is névleges adattal vettük):

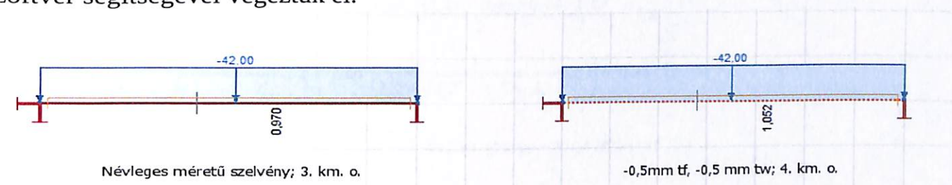
$h = 499$ mm; $b = 279$ mm; $t_w = 11{,}5$ mm; $t_f = 9{,}5$ mm; $a = 0{,}5 \cdot t_{w,nom} = 6$ mm

$c_w = 463{,}03$ mm; $c_f = 125{,}26$ mm

$$\frac{c}{t} = \frac{c_w}{t_w} = \frac{463{,}03}{11{,}5} = 40{,}26 > 42 \cdot \varepsilon = 38{,}83 \rightarrow \text{4-es keresztmetszeti osztály}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{c_f}{t_f} = \frac{125{,}26}{9{,}5} = 13{,}19 > 14 \cdot \varepsilon = 12{,}94 \rightarrow \text{4-es keresztmetszeti osztály}$$

A fenti hegesztett I-szelvényből kialakítottunk egy 7 m támaszközű kéttámaszú gerendát, amit 42 kN/m egyenletesen megoszló teherrel terheltünk meg. A teherbírás-számítást az AXIS-VM szoftver segítségével végeztük el:



Névleges méretű szelvény; 3. km. o. -0,5mm tf, -0,5 mm tw; 4. km. o.

26. ábra: névleges méretekkel 3-as keresztmetszeti osztályú hegesztett I tartók kihasználtsága

Számítás névleges méretű szelvényre:

14. Kifordulási ellenállás:

EN 1993-1-1 6.3.2

Szelvényosztály: **3** (Rugalmas tervezés)

Mértékadó keresztmetszet: $x = 0{,}50 \cdot L = 0{,}50 \cdot 700{,}00 = 350{,}00$ cm

M_{cr} Számítási módszer: AutoMcr

$M_{cr} = 35781{,}30$ kNcm $= 357{,}81 kNm$

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{W_{el,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{1787{,}12 \cdot 27{,}50}{35781{,}30}} = 1{,}17$$

Kihajlási görbe: c 6.3 táblázat

$\rightarrow \alpha_{LT} = 0{,}49$ 6.3 táblázat

Oktatási változat

$$\phi_{LT} = \frac{1 + \alpha_{LT} \cdot (\lambda_{LT} - \lambda_{LT,0}) + \beta \cdot \lambda_{LT}^2}{2} = \frac{1 + 0{,}49 \cdot (1{,}17 - 0{,}4) + 0{,}75 \cdot 1{,}17^2}{2} = 1{,}2$$

$$\chi_{LT} = \min\left(\frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \cdot \lambda_{LT}^2}}; 1\right) = \min\left(\frac{1}{1{,}2 + \sqrt{1{,}2^2 - 0{,}75 \cdot 1{,}17^2}}; 1\right) = 0{,}54 \quad (6.56)$$

$$M_{b,Rd} = \frac{\chi_{LT} \cdot W_{el,y} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0{,}54 \cdot 1787{,}12 \cdot 27{,}50}{1} = 26533{,}16 \text{ kNcm} = 265{,}33 kNm \quad (6.55)$$

$$\eta_{M_b} = \frac{|M_{y,Ed_6}|}{M_{b,Rd}} = \frac{|(-25725{,}00)|}{26533{,}16} = 97{,}0\ \% \quad (6.54) \qquad \textbf{megfelel}$$

Számítás valós méretű szelvényre:

14. Kifordulási ellenállás:

EN 1993-1-1 6.3.2

Szelvényosztály: 4 (Rugalmas tervezés)

Mértékadó keresztmetszet: $x = 0{,}50 \cdot L = 0{,}50 \cdot 700{,}00 = 350{,}00$ cm

M_{cr} Számítási módszer: AutoMcr

$M_{cr} = 33073{,}46$ kNcm $= 330{,}73 kNm$

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{W_{eff,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{1639{,}26 \cdot 27{,}50}{33073{,}46}} = 1{,}17$$

Kihajlási görbe: c 6.3 táblázat

$\rightarrow \alpha_{LT} = 0{,}49$ 6.3 táblázat

Oktatási változat

$$\phi_{LT} = \frac{1 + \alpha_{LT} \cdot (\lambda_{LT} - \lambda_{LT,0}) + \beta \cdot \lambda_{LT}^2}{2} = \frac{1 + 0{,}49 \cdot (1{,}17 - 0{,}4) + 0{,}75 \cdot 1{,}17^2}{2} = 1{,}2$$

$$\chi_{LT} = \min\left(\frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \cdot \lambda_{LT}^2}}; 1\right) = \min\left(\frac{1}{1{,}2 + \sqrt{1{,}2^2 - 0{,}75 \cdot 1{,}17^2}}; 1\right) = 0{,}54 \quad (6.56)$$

$$M_{b,Rd} = \frac{\chi_{LT} \cdot W_{eff,y} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0{,}54 \cdot 1639{,}26 \cdot 27{,}50}{1} = 24447{,}50 \text{ kNcm} = 244{,}47 kNm \quad (6.55)$$

$$\eta_{M_b} = \frac{|M_{y,Ed_6}|}{M_{b,Rd}} = \frac{|(-25725{,}00)|}{24447{,}50} = \textbf{105,2 \%} \quad (6.54) \quad \textbf{nem felel meg!}$$

A névleges méretű, 3-as keresztmetszeti osztályú gerenda (rugalmas méretezéssel) 97%-ban kihasznált kifordulásra (a többi tönkremeneteli mód kihasználtsága 60% alatti, így a továbbiakban azokat nem vizsgáljuk). A valós méretű, 4-es keresztmetszeti osztályú gerenda (rugalmas méretezéssel, csökkentett hatásos keresztmetszettel) kihasználtsága kifordulásra 105,2%-os, vagyis 5,2%-kal túlterhelt. A keresztmetszeti-osztály változás hatását külön is tudjuk vizsgálni, ha a valós méretű gerendát – annak ellenére, hogy nem teljesíti a 3. osztály feltételeit – méretezzük 3. keresztmetszeti osztály szerint is. Ebben az esetben csak 3,7%-os lenne a túlterhelés, vagyis azt mondhatjuk, hogy a keresztmetszeti adatok (A, I, W) csökkenéséből származó teherbírás-csökkenést tovább rontja a keresztmetszeti osztály változása: jelen esetben a névleges szelvényhez viszonyított, a tisztán geometriai eltérés okozta 6,7%-os kihasználtság-növekedés további 1,5%-kal nőtt meg a keresztmetszeti osztály változása miatt.

Ugyanez a jelenség fokozottabban megfigyelhető a 2-es és 3-as keresztmetszeti osztály közötti átmenetnél, ahol a 2. osztályban alkalmazható képlékeny tervezési módszerben rejlő többlet teherbírást veszítjük el a 3. osztályban kötelezően alkalmazandó rugalmas tervezés miatt. A minta szelvényünk a névleges adatokkal az alábbi:

Hegesztett I tartó: I 500×270×13×13; S275 minőségben

h = 500 mm; b = 270 mm; t_w = 13 mm; t_f = 13 mm; a = 0,5 · t_w = 6,5 mm
c_w = 463,03 mm; c_f = 125,26 mm; f_y = 275 MPa → ε = 0,9244
Szelvény osztályba sorolása:
gerinc:

$$c_w = h - 2 \cdot t_f - 2 \cdot \sqrt{2} \cdot a = 500 - 2 \cdot 13 - 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 6{,}5 = 455{,}62$$

$$\frac{c}{t} = \frac{c_w}{t_w} = \frac{455{,}62}{13} = 35{,}05 < 38 \cdot \varepsilon = 35{,}13 \rightarrow \text{2-es keresztmetszeti osztály}$$

öv:

$$c_f = b/2 - t_w/2 - \sqrt{2} \cdot a = 270/2 - 13/2 - \sqrt{2} \cdot 6{,}5 = 119{,}31$$

$$\frac{c}{t} = \frac{c_f}{t_f} = \frac{119{,}31}{13} = 9{,}18 < 10 \cdot \varepsilon = 9{,}24 \rightarrow \text{2-es keresztmetszeti osztály}$$

Így a teljes szelvény 2-es keresztmetszeti osztályú.

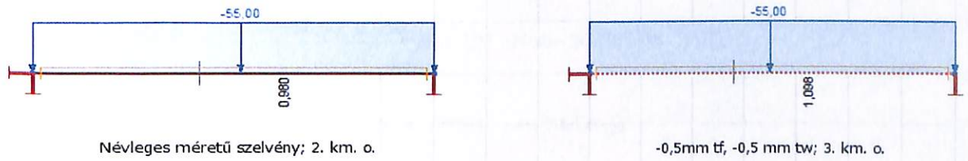
A szelvény szintén EN 10029 szabvány szerint gyártott durvalemezből kerül kialakításra; az előző, névlegesen 3-as pontossági osztályú szelvénnyel azonosan vett méreteltérésekkel a következő valós méretű szelvényt kapjuk:
h = 499 mm; b = 269 mm; t_w = 12,5 mm; t_f = 12,5 mm; a = 0,5 · $t_{w,nom}$ = 6,5 mm
c_w = 455,61 mm; c_f = 119,06 mm

$$\frac{c}{t} = \frac{c_w}{t_w} = \frac{455{,}61}{12{,}5} = 36{,}45 > 38 \cdot \varepsilon = 35{,}13, \textit{ de } < 42 \cdot \varepsilon = 38{,}83 \rightarrow \text{3-as keresztmetszeti osztály}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{c_f}{t_f} = \frac{119{,}06}{12{,}5} = 9{,}52 > 10 \cdot \varepsilon = 9{,}24, \textit{ de } < 14 \cdot \varepsilon = 12{,}94 \rightarrow \text{3-as keresztmetszeti osztály}$$

Így a teljes szelvény 3-as keresztmetszeti osztályú.

A fenti hegesztett I-szelvényből – a korábbi 3-as osztályú szelvényhez hasonlóan – kialakítottunk egy 7 m támaszközű kéttámaszú gerendát, amit 55 kN/m egyenletesen megoszló teherrel terheltünk meg. A teherbírás-számítást az AXIS-VM szoftver segítségével végeztük el:



Névleges méretű szelvény; 2. km. o. -0,5mm tf, -0,5 mm tw; 3. km. o.

27. ábra: névleges méretekkel 2-es keresztmetszeti osztályú hegesztett I tartók kihasználtsága

Számítás névleges méretű szelvényre:

14. Kifordulási ellenállás:
EN 1993-1-1 6.3.2
Szelvényosztály: **2** (Képlékeny tervezés)
Mértékadó keresztmetszet: $x = 0{,}50 \cdot L = 0{,}50 \cdot 700{,}00 = 350{,}00$ cm
M_{cr} Számítási módszer: AutoMcr

$M_{cr} = 44753,84$ kNcm $= 447,54 kNm$

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{2439,57 \cdot 27,50}{44753,84}} = 1,22$$

Kihajlási görbe: c 6.3 táblázat
$\rightarrow \alpha_{LT} = 0,49$ 6.3 táblázat

Oktatási változat

$$\phi_{LT} = \frac{1 + \alpha_{LT} \cdot (\lambda_{LT} - \lambda_{LT,0}) + \beta \cdot \lambda_{LT}^2}{2} = \frac{1 + 0,49 \cdot (1,22 - 0,4) + 0,75 \cdot 1,22^2}{2} = 1,26$$

$$\chi_{LT} = \min\left(\frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \cdot \lambda_{LT}^2}}; 1\right) = \min\left(\frac{1}{1,26 + \sqrt{1,26^2 - 0,75 \cdot 1,22^2}}; 1\right) = 0,51 \quad (6.56)$$

$$M_{b,Rd} = \frac{\chi_{LT} W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,51 \cdot 2439,57 \cdot 27,50}{1} = 34362,57 \text{ kNcm} = 343,63 kNm \quad (6.55)$$

$$\eta_{M_b} = \frac{|M_{y,Ed_6}|}{M_{b,Rd}} = \frac{|(-33687,50)|}{34362,57} = 98,0\ \% \quad (6.54) \quad \textbf{megfelel}$$

Számítás valós méretű szelvényre:

14. Kifordulási ellenállás:
EN 1993-1-1 6.3.2
Szelvényosztály: 3 (Rugalmas tervezés)
Mértékadó keresztmetszet: $x = 0,50 \cdot L = 0,50 \cdot 700,00 = 350,00$ cm
M_{cr} Számítási módszer: AutoMcr
$M_{cr} = 41787,55$ kNcm $= 417,88 kNm$

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{W_{el,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{2039,85 \cdot 27,50}{41787,55}} = 1,16$$

Kihajlási görbe: c 6.3 táblázat
$\rightarrow \alpha_{LT} = 0,49$ 6.3 táblázat

Oktatási változat

$$\phi_{LT} = \frac{1 + \alpha_{LT} \cdot (\lambda_{LT} - \lambda_{LT,0}) + \beta \cdot \lambda_{LT}^2}{2} = \frac{1 + 0,49 \cdot (1,16 - 0,4) + 0,75 \cdot 1,16^2}{2} = 1,19$$

$$\chi_{LT} = \min\left(\frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \cdot \lambda_{LT}^2}}; 1\right) = \min\left(\frac{1}{1,19 + \sqrt{1,19^2 - 0,75 \cdot 1,16^2}}; 1\right) = 0,55 \quad (6.56)$$

$$M_{b,Rd} = \frac{\chi_{LT} W_{el,y} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,55 \cdot 2039,85 \cdot 27,50}{1} = 30692,78 \text{ kNcm} = 306,93 kNm \quad (6.55)$$

$$\eta_{M_b} = \frac{|M_{y,Ed_6}|}{M_{b,Rd}} = \frac{|(-33687,50)|}{30692,78} = \textbf{109,8 \%} \quad (6.54) \quad \textbf{nem felel meg!}$$

A névleges méretű, 2-es keresztmetszeti osztályú gerenda (képlékeny méretezéssel) 98%-ban kihasznált kifordulásra (a többi tönkremeneteli mód kihasználtsága 60% alatti). A valós méretű, 3-as keresztmetszeti osztályú gerenda (rugalmas méretezéssel) kihasználtsága kifordulásra 109,8%-os, vagyis 9,8%-kal túlterhelt. A keresztmetszeti-osztály változás hatását a névlegesen 3-as osztályú szelvényhez hasonlóan külön is tudjuk vizsgálni, így – keresztmetszeti osztály változás nélkül – csak 4%-os lenne a túlterhelés. Így azt mondhatjuk, hogy a keresztmetszeti adatok (A, I, W) csökkenéséből származó teherbírás-csökkenést a 2 →

3 osztály átmenetnél jelentősen tovább rontja a keresztmetszeti osztály változása: itt a névleges szelvényhez viszonyított, a tisztán geometriai eltérés okozta 6%-os kihasználtság-növekedés további 5,8%-kal nőtt meg a keresztmetszeti osztály változása miatt; vagyis **a képlékeny tervezés lehetőségének elvesztése közel megkétszerezte a geometriai eltérés teherbírás-csökkentő hatását!**

3. A geometriai és szilárdsági eltérések keresztkölcsönhatása

Az előző fejezetekben részletezett gyártói vizsgálati adatokból és számítási modellezésből egyértelműen kiderült, hogy az esetek nagy részében a gyártott szelvények tényleges szilárdsága szignifikánsan (több, mint 10%-kal) meghaladja a névleges értéket, ami ezekben az esetekben elfedi a geometriai eltérések szilárdságcsökkentő hatását. Ezért annak érdekében, hogy a geometriai hatásokat külön is ki tudjuk mutatni, egy modellkísérlet-sorozatot állítottunk fel:

- központosan húzott rúdon (hidegen alakított, hosszvarratos, hegesztett zártszelvény és cső az EN 10219-1 és EN 10219-2 szerint) meghatároztuk a tényleges szakítószilárdságot és folyáshatárt
- ugyanezen típusú zártszelvényeket és csöveket központosan nyomott oszlopként is terheltük, és meghatároztuk a maximális terhelés (tönkremeneteli erő) értékét
- a szakítószilárdság és folyáshatár arányaként meghatároztuk a szelvény „képlékeny tartalékát": ez a mennyiség megmutatja, hogy a folyáshatár (névleges érték esetén a tervezési szilárdság) elérését követően a szelvény maradó károsodása mellett mekkora további terhet képes még a szerkezet a teljes tönkremenetelig elviselni (ez az érték a mentés és menekítés megvalósíthatóságához fontos)
- a nyomott oszlop vizsgálata során a teljes (tönkremenetelt okozó) teherbírást tudjuk vizsgálni, így az oszlop üzemszerű maximális terhelhetőségének kísérleti meghatározásához a mért maximális erőt visszaosztottuk a szilárdság-aránnyal; az így kapott teher az a maximális érték, amit az oszlop legfeljebb elhanyagolható mértékű maradó alakváltozás mellett el tud viselni (rugalmas terhelhetőség).
- a húzott rúdon végzett vizsgálatok eredményei alapján lehetséges az EN 1993 szerinti méretezési eljárás végrehajtása valós szilárdsági és geometriai paraméterek mellett is.
- az oszlopnyomási kísérletből számított rugalmas terhelhetőséget és a valós adatokkal elvégzett EN 1993 szerinti méretezés eredményeinek összehasonlítása alapján megbecsülhető a méretezési eljárás „tartaléka" (az az érték, amivel várhatóan kisebb teherbírási értéket kapunk számítással a vizsgálattal igazolható teherbírásnál)
- a „méretezési tartalék" alapján a névleges szilárdság- és geometriai értékkel végrehajtott méretezés alapján meg tudjuk becsülni, hogy mi lehetne a névleges méretű és szilárdságú „ideális szelvény" vizsgálattal igazolható teherbírása
- a geometriai adatok módosításával – a szilárdság változtatása nélkül – össze tudjuk hasonlítani a névleges és tényleges méretek alapján számítható teherbírást, és el tudjuk dönteni, hogy a szilárdság emelése nélkül lehetséges-e a geometriai eltéréseknek olyan kedvezőtlen esete, amelyiknél a szilárdságcsökkenés meghaladja a becsült méretezési tartalékot – ez esetben az EN 1993 szerint a névleges adatokkal méretezett szelvény számított teherbírása szerinti erőhatás okozhat maradó károsodást a valós szelvényben.

Ennek a modellnek az a gyakorlati jelentősége, hogy kis gyakorisággal előfordul olyan eset, amikor a gyártmány valódi szilárdsága alig haladja meg a névleges értéket; ezek viszont elég ritkák ahhoz, hogy csak gyártói háttérrel lehessen vizsgálni – annak az esélye, hogy a vasudvarból vásárolt mintaanyag szilárdsága is alacsony legyen, nagyon csekély.

V. Kísérletek

1. Mintavétel, méretek

A fent vázolt modellkísérlethez az ÉMI Nonprofit Kft. anyagvizsgáló laboratóriuma biztosított zártszelvényeket (60×60×6,3 mm-es négyzet keresztmetszetű zártszelvény S355J2H minőségben; 40×40×5,0 mm-es négyzet keresztmetszetű zártszelvény S275J0H minőségben; Ø51×2,6 mm-es kör keresztmetszetű zártszelvény S235JRH minőségben) vizsgálati anyagként. Az egyes zártszelvényekből próbatest-párokat vettünk ki; az első próbatesten szakító-, a másodikon nyomóvizsgálatot végeztünk az ÉMI Nonprofit Kft. anyagvizsgáló laboratóriumának Instron 1500KN típusú húzó-nyomó gépével (28. ábra). A szakítóvizsgálat elvégzése előtt meghatároztuk a szelvény valós keresztmetszeti méreteit (oldalhossz, falvastagság, metszeti felület) is, amit a 39. táblázat tartalmaz.

Szelvény	a [mm] b [mm]	t [mm]	G [kg/m] A [mm²]
60×60×6,3 1.	60,05 60,15	6,26	9,71 1236,9
60×60×6,3 2.	60,15 60,25	6,20	9,65 1229,0
60×60×6,3 3.	60,15 60,35	6,33	9,71 1236,7

Szelvény	a [mm] b [mm]	t [mm]	G [kg/m] A [mm²]
40×40×5,0 6.	39,95 40,05	4,96	4,93 628,1
40×40×5,0 7.	40,05 40,05	4,87	4,82 613,8
40×40×5,0 8.	40,00 40,05	4,90	4,95 630,6

39. táblázat: szelvények mért geometriai adatai:
a) 60x60x6,3 mm-es zártszelvény;
b) 40x40x5,0 mm-es zártszelvény;
c) Ø51×2,6 mm-es acélcső



28. ábra: Instron SATEC 1500KN típusú, 1500 kN méréshatárú húzó-nyomó anyagvizsgáló gép (ÉMI Nonprofit Kft.)

Szelvény	d_1 [mm] d_2 [mm]	t [mm]	G [kg/m] A [mm^2]
Ø51×2,6 11.	50,91 50,72	2,49	3,02 384,7
Ø51×2,6 12.	50,85 50,57	2,29	2,97 378,3
Ø51×2,6 13.	50,96 50,61	2,40	3,02 384,7

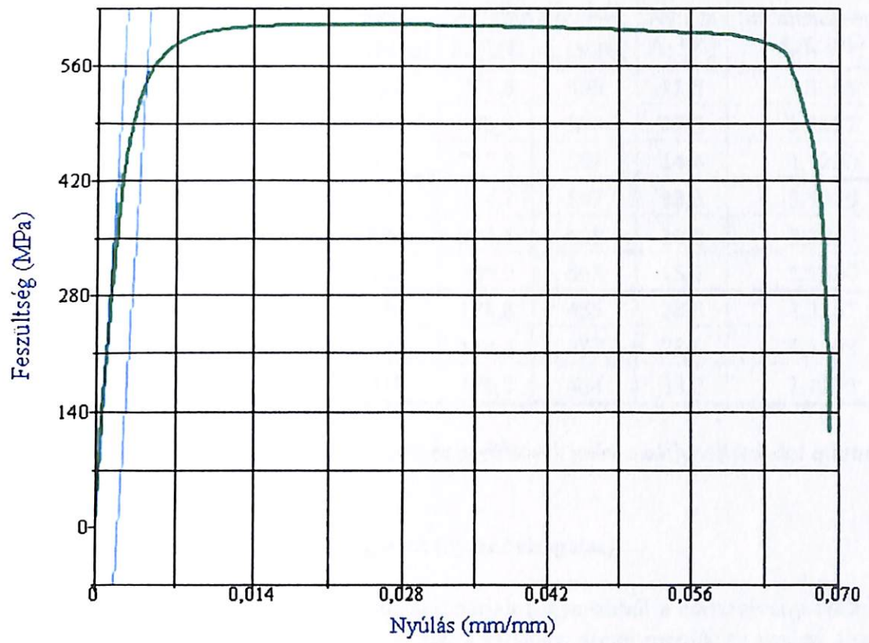
39. táblázat (folytatás)

2. Húzott rúd teherbírásának vizsgálata (szakítóvizsgálat)

A méretfelvételek után az EN 10219-1 szabvány előírása alapján az EN ISO 6892-1 szabvány szerinti szakítóvizsgálatot végeztünk el teljes zártszelvény próbatesteken az ÉMI Nonprofit Kft. laboratóriumában. A próbatestek befogási károsodásának csökkentése céljából a vizsgálatot dugózott próbatesteken végeztük, így a befogás nem lapította el a csővégeket, nem vitt be a vizsgálati elrendezésbe indokolatlan deformációt. A vizsgálati elrendezést és az elszakított próbatestet a 29. ábra mutatja be; a szakítóvizsgálat eredményeit a 30. ábra (szakítódiagram) és a 40. táblázat (eredmények) tartalmazza.



29. ábra: Zártszelvény szakítóvizsgálata az ÉMI Nonprofit Kft. laboratóriumában



Test Summary	
Counter:	2458
Elapsed Time:	00:00:45
Procedure Name:	acélcső szakítás M500B ext 1500kN
Start Date:	2015.04.23.
Start Time:	13:39:35
End Date:	2015.04.23.
End Time:	13:40:20
Workstation:	INTESZT-F7E9337
Tested By:	Default
Érkezési szám:	Diploma BP.
Témaszám:	
Megrendelő:	
Minta azonosító:	7.
Adagszám:	
Vizsgáló:	B. A.
Megjegyzés:	
A5:	%
Próbatest befogási hossz:	522 mm

Test Results	
Area:	613,8000 mm²
Szakító szilárdság:	609,4000 MPa
Szakítóerő:	374,0800 kN
Agt:	2,1200 %
Felső folyáshatár:	609,4000 MPa
Szakadási nyúlás:	6,9150 %
Egyezményes folyási erő (Fp 0,2):	330,9556 kN
Egyezményes folyáshatár (Rp 0,2):	539,1604 MPa
Keresztfej szakítóerőnél:	19,1560 mm
Agt keresztfejről:	3,6697 %
Young's Modulus:	243,4062 GPa
Specimen Gage Length:	522,0000 mm

30. ábra: az ÉMI Nonprofit Kft. Instron 1500 KN típusú vizsgálógépével készített szakítóvizsgálati diagram és mérési lap

Szelvény	Minta sorszám	Folyáshatár		Szakítószilárdság		Nyúlás	Szilárdság-arány
		F_y [kN]	f_y [MPa]	F_u [kN]	f_u [MPa]	A_5 [%]	f_u/f_y [%]
60×60×6,3 (S355J2H)	1.	645,2	522	721,6	583	15,8	1,1185
	2.	631,6	514	705,9	574	17,5	1,1177
	3.	641,0	518	717,9	581	14,4	1,1200
40×40×5,0 (S275J0H)	6.	340,1	541	374,7	597	13,8	1,1019
	7.	331,0	539	374,1	609	10,8	1,1303
	8.	335,4	532	380,0	603	15,1	1,1330
Ø51×2,6 (S235JRH)	11.	160,3	416	178,8	465	28,8	1,1157
	12.	159,7	423	178,3	472	31,6	1,1159
	13.	160,6	418	178,3	464	33,2	1,1102

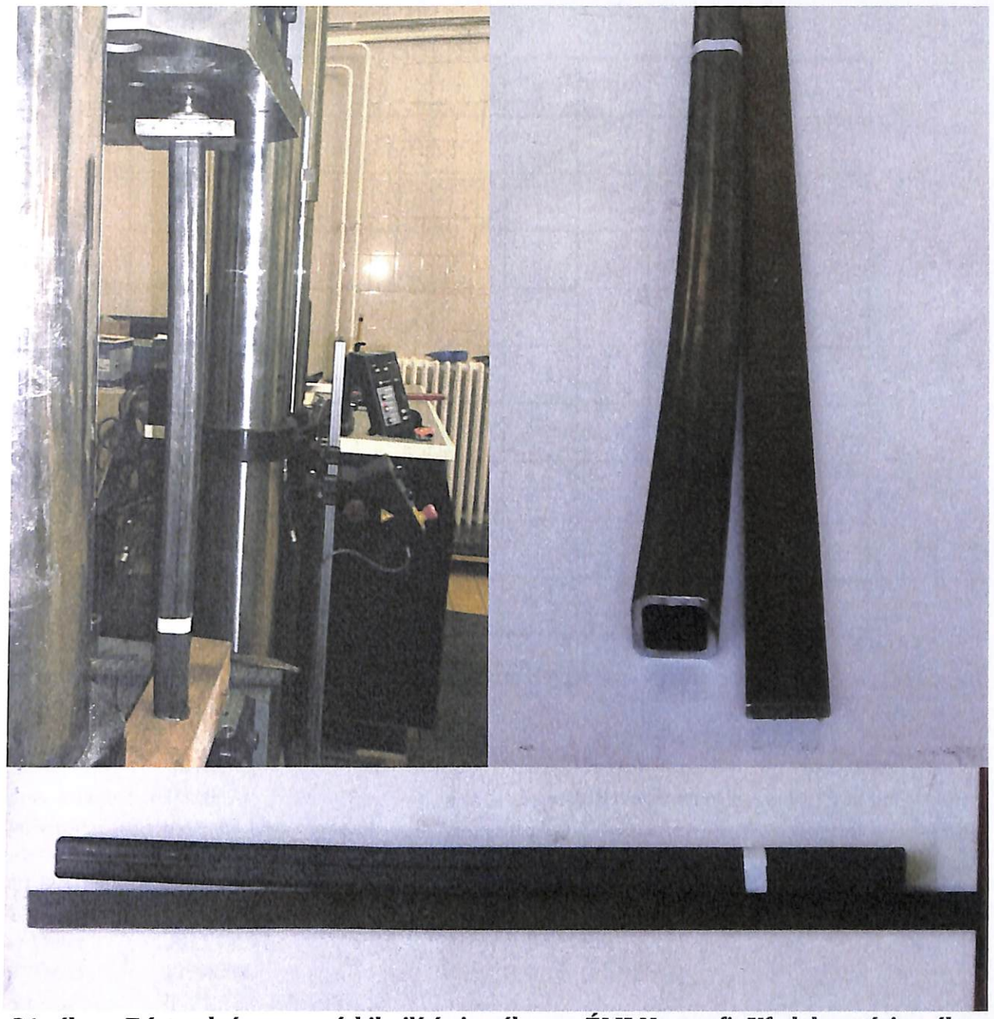
40. táblázat: a vizsgált zártszelvények és acélcsövek mért szakítószilárdsági adatai

3. Nyomott oszlop kihajlásának vizsgálata (nyomóvizsgálat)

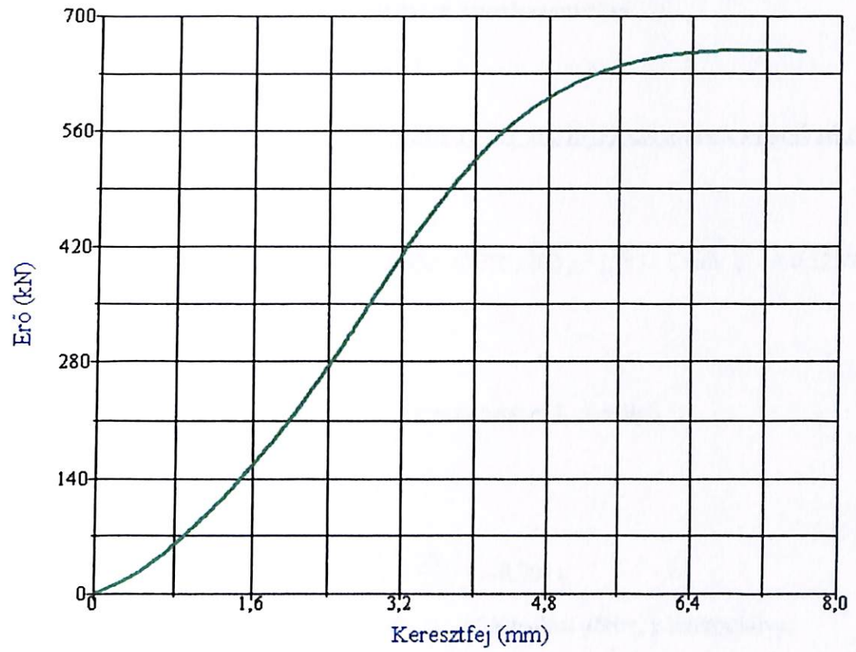
A húzóvizsgálatokhoz használt próbatestek párjait (ugyanabból a zártszelvény-szálból kivett mintákat) nyomóvizsgálatnak vetettünk alá; a vizsgálat során mértük az oszlop által felvett maximális terhelést. A vizsgálatokat addig végeztük, amíg az oszlop fel tudott venni további terheket; vagyis a vizsgálatokat leállítottuk azt követően, hogy a nyomás-terhelési görbe csökkenni kezdett. A kapott terhelési görbe maximuma adta meg a kritikus (tönkremeneteli) teherértéket. A vizsgálati elrendezést és a levizsgált (deformált) próbatesteket a 31. ábra, a nyomóvizsgálati diagramot a 32. ábra, a mérési eredményeket a 41. táblázat adja meg.

Szelvény	60×60×6,3			40×40×5,0			Ø51×2,6		
Minta száma	1.	2.	3.	6.	7.	8.	11.	12.	13.
Oszlophossz l [mm]	644	644	645	751	749	749	752	753	749
Teherbírás $F_{R,c}$ [kN]	687,24	644,61	657,88	261,39	286,76	226,29	135,78	134,68	141,23

41. táblázat: a vizsgált zártszelvények és acélcsövek kihajlási hossza és az azon mért maximális nyomóterhelés értéke



31. ábra: Zártszelvény nyomó-kihajlító vizsgálata az ÉMI Nonprofit Kft. laboratóriumában



Test Summary		Test Results	
Counter:	2495	Maximális erő:	657,88 kN
Elapsed Time:	00:01:31	Keresztfej maximumnál:	7,08 mm
Procedure Name:	nyomás-testsz.sebesség-1500kN		
Start Date:	2015.04.27.		
Start Time:	12:43:35		
End Date:	2015.04.27.		
End Time:	12:45:06		
Workstation:	INTESZT-F7E9337		
Tested By:	Default		
Érkezési szám:	Diploma BP.		
Témaszám:			
Megbízó:			
Vizsgáló:	B.P.		
Minta azonosító:	60x60 3.		
Megjegyzés:	l = 645 mm		
Nyomási sebesség:	5 mm/min		

32. ábra: az ÉMI Nonprofit Kft. Instron 1500 KN típusú vizsgálógépével készített nyomóvizsgálati diagram és mérési lap

4. Nyomott oszlop kihajlásának számítása a névleges, illetve a kísérletből meghatározott adatokkal, a számítási és mérési módszer összehasonlítása

Nyomott rúd ellenőrzése:

60x60x6,3 mm-es zártszelvény (EN 10219-1, EN 10219-2) számításos ellenőrzése névleges geometriai és szilárdsági adatokkal:

Keresztmetszet:

$a=60\,mm$; $t=6{,}3\,mm$; $f_y=355\,MPa$ (S355J2H) ; $i_y=21{,}5\,mm$; $A=1257\,mm^2$

$c=a-2\cdot t=60-2\cdot 6{,}3=47{,}4\,mm$

$\varepsilon=\sqrt{235/f_y}=\sqrt{235/355}=0{,}8136$

$\lambda_E=93{,}9\cdot\varepsilon=76{,}40$

$\frac{c}{t}=47{,}4/6{,}3=7{,}52\leqslant 33\cdot\varepsilon=26{,}85$ → keresztmetszet 1. osztályú

$l=644\,mm$

Csuklós megtámasztás mindkét végén:

$\nu\cdot l=L_{cr}=1{,}0\cdot l=644\,mm$

$\lambda_y=\frac{\nu_y\cdot l_y}{i_y}=\frac{1{,}0\cdot 644}{21{,}5}=29{,}95\Rightarrow\bar{\lambda}_y=\frac{\lambda_y}{\lambda_E}=\frac{29{,}95}{76{,}4}=0{,}3921$

négyzetes hidegen alakított zártszelvény → „c” kihajlási görbe; χ interpolálva:

$\chi=\frac{(0{,}8973-0{,}9235)}{0{,}05}\cdot 0{,}0421+0{,}9235=0{,}9014$

$N_{b,Rd}=\frac{\chi\cdot A_1\cdot f_y}{\gamma_{M1}}=\frac{0{,}9014\cdot 1257\cdot 355}{1{,}00}=402{,}24\,kN$

60x60x6,3 mm-es zártszelvény (EN 10219-1, EN 10219-2) számításos ellenőrzése tényleges geometriai és szilárdsági adatokkal (3 db zártszelvény-minta alapján):

Keresztmetszet:

$a_1=60{,}05\,mm$; $a_2=a_3=60{,}15\,mm$; $b_1=60{,}15$; $b_2=60{,}25$; $b_3=60{,}35$;

$t_1=6{,}26\,mm$; $t_2=6{,}20\,mm$; $t_3=6{,}33\,mm$; $A_1=A_3=1237\,mm^2$ $A_2=1229\,mm^2$

$i_{y,1}=22{,}1\,mm$; $i_{y,2}=22{,}7\,mm$; $i_{y,3}=23{,}0\,mm$; $f_{y,1}=521\,MPa$; $f_{y,2}=514\,MPa$;

$f_{y,3}=518\,MPa$; $l_1=l_2=644\,mm$; $l_3=645\,mm$

$c=a-2\cdot t$ → $c_1=60{,}05-2\cdot 6{,}255=47{,}54\,mm$; $c_2=60{,}15-2\cdot 6{,}20=47{,}75\,mm$;

$c_3=60{,}15-2\cdot 6{,}33=47{,}49\,mm$

$\varepsilon=\sqrt{235/f_y}$ → $\varepsilon_1=\sqrt{235/521}=0{,}6716$; $\varepsilon_2=\sqrt{235/514}=0{,}6762$;

$\varepsilon_3=\sqrt{235/518}=0{,}6735$

$\lambda_E=93{,}9\cdot\varepsilon$ → $\lambda_{E,1}=63{,}06$; $\lambda_{E,2}=63{,}50$; $\lambda_{E,3}=63{,}24$

1. minta: $\frac{c_1}{t_1}=47{,}54/6{,}255=7{,}60\leqslant 33\cdot\varepsilon_1=22{,}16$ → keresztmetszet 1. osztályú

2. minta: $\frac{c_2}{t_2}=47,75/6,20=7,70\leqslant 33\cdot\varepsilon_2=22,31$ → keresztmetszet 1. osztályú

3. minta: $\frac{c_1}{t_1}=47,54/6,255=7,60\leqslant 33\cdot\varepsilon_3=22,23$ → keresztmetszet 1. osztályú

Csuklós megtámasztás mindkét végén:

$\nu=1 \rightarrow l=L_{CR}$

$$\lambda_{y,1}=\frac{\nu_y\cdot l_{y,1}}{i_{y,1}}=\frac{1,0\cdot 644}{22,1}=29,14\Rightarrow\bar{\lambda}_{y,1}=\frac{\lambda_{y,1}}{\lambda_{E,1}}=\frac{29,14}{63,06}=0,4621$$

$$\lambda_{y,2}=\frac{\nu_y\cdot l_{y,2}}{i_{y,2}}=\frac{1,0\cdot 644}{22,7}=28,37\Rightarrow\bar{\lambda}_{y,2}=\frac{\lambda_{y,2}}{\lambda_{E,2}}=\frac{28,37}{63,50}=0,4468$$

$$\lambda_{y,3}=\frac{\nu_y\cdot l_{y,3}}{i_{y,3}}=\frac{1,0\cdot 645}{23,0}=28,04\Rightarrow\bar{\lambda}_{y,3}=\frac{\lambda_{y,3}}{\lambda_{E,3}}=\frac{28,04}{63,24}=0,4434$$

négyzetes hidegen alakított zártszelvény → „c” kihajlási görbe; χ interpolálva:

$$\chi_1=\frac{(0,8430-0,8705)}{0,05}\cdot 0,0121+0,8705=0,8638$$

$$\chi_2=\frac{(0,8705-0,8973)}{0,05}\cdot 0,0621+0,8973=0,8722$$

$$\chi_3=\frac{(0,8705-0,8973)}{0,05}\cdot 0,0434+0,8973=0,8740$$

$$N_{b,Rd,1}=\frac{\chi_1\cdot A_1\cdot f_{y,1}}{\gamma_{M1}}=\frac{0,8638\cdot 1237\cdot 521}{1,00}=556,70\,kN$$

$$N_{b,Rd,2}=\frac{\chi_2\cdot A_2\cdot f_{y,2}}{\gamma_{M1}}=\frac{0,8722\cdot 1229\cdot 514}{1,00}=550,97\,kN$$

$$N_{b,Rd,3}=\frac{\chi_3\cdot A_3\cdot f_{y,3}}{\gamma_{M1}}=\frac{0,8740\cdot 1237\cdot 518}{1,00}=560,03\,kN$$

<u>60x60x6,3 mm-es zártszelvény (EN 10219-1, EN 10219-2) laboratóriumi vizsgálati ellenőrzése (3 db zártszelvény-minta alapján):</u>

Szakítás:

Erő a folyáshatárnál: $F_{y,1}=645,2\,kN$; $F_{y,2}=631,6\,kN$; $F_{y,3}=641,0\,kN$

Maximális húzóerő: $F_{u,1}=721,6\,kN$; $F_{u,2}=705,9\,kN$; $F_{u,3}=717,9\,kN$

Szakítószilárdság és folyáshatár aránya (képlékeny tartalék):

$F_{u,1}:F_{y,1}=1,1185$; $F_{u,2}:F_{y,2}=1,1177$; $F_{u,1}:F_{y,1}=1,1200$

Nyomás:

Maximális (tönkremenetelt okozó) nyomási teherbírás:

$F_{R,c,1}=687,24\,kN$; $F_{R,c,2}=644,61\,kN$; $F_{R,c,3}=657,88\,kN$

Folyáshatár és szakítószilárdság arányával csökkentett nyomási teherbírás (rugalmas, számottevő mértékű maradó deformációt nem okoz a szerkezetben):

$F_{R,y,c,1}=687,24/1,1185=614,43\,kN$; $F_{R,c,2}=576,73$; $F_{R,c,3}=587,39$

Az alkalmazott méretezési módszer (EN 1993: „központosan nyomott rudak") méretezési tartaléka (laboratóriumi körülmények között végzett kísérleti ellenőrzésekhez viszonyítva):
1. minta: 614,43 / 556,70 = 1,1037 → **10,37%**
2. minta: 576,73 / 550,97 = 1,0467 → **4,68%**
3. minta: 587,39 / 560,03 = 1,0488 → **4,89%**

VI. Kiértékelés

1. A szerkezet várható teherbírás-csökkenése a mért valódi, illetve a lehetséges maximális eltérések hatására

A vizsgálataink és elemzéseink alapján a következő megállapításokat tettük:
- A keresztmetszeti méretek eltérésének maximális mértéke 4-6% körüli, az egyes termékek saját termékszabványában megadottak függvényében.
- A keresztmetszeti modulus (W) eltérésének maximális mértéke eléri a 10%-ot is, az inerciáé (I) jelentősen meg is haladhatja.
- A méreteltérésekre legkevésbé érzékeny igénybevétel, ha a szelvényeket központosan húzott rúdként alkalmazzuk; ekkor a maximális teherbírás-csökkenés 4-6 % lehet.
- A méreteltérésekre közepesen érzékeny igénybevétel, ha a szelvényeket központosan nyomott rúdként vagy oszlopként alkalmazzuk; ekkor a maximális teherbírás-csökkenés 6-9 % lehet.
- A méreteltérésekre legérzékenyebb igénybevétel, ha a szelvényeket hajlított tartóként, gerendaként alkalmazzuk; ekkor a maximális teherbírás-csökkenés 9-25 % is lehet.
- A 18-40 mm vastagságú acéltermékek esetében a gyártók által alkalmazott termékszabvány (EN 10025-2) kevésbé szigorú követelményeket fogalmaz meg, mint a tervezők által alkalmazott (EN 1993 sorozat). Ezen tartományban lehetséges (és erre gyártói vizsgálati példát is bemutattunk a III. fejezetben), hogy az EN 10025 szerint forgalomba hozott acélszelvény megfolyik azon a szilárdságon, amire méretezhető az EN 1993 szerint.
- A méreteltérések hatására lehetséges, hogy a tartószerkezetet kedvezőtlenebb keresztmetszeti osztályba kell sorolni, mint amit a névleges adatok alapján számíthatunk; ez különösen a 2. és 3. keresztmetszeti osztályok közötti átlépésnél meg is duplázhatja a tartó teherbírás-csökkenését amiatt, hogy a 2-es osztályban alkalmazható, nagyobb teherbírást eredményező képlékeny tervezési módszer helyett a 3. osztályban kötelezően rugalmas módszerrel kell tervezni.
- A méreteltérések hatására megváltozhat a mértékadó igénybevétel, illetve túlterhelés esetén a bekövetkező károsodás módja: erre a csavarkötéses húzott szerkezeteknél láttunk példát, ahol a névleges méretekkel mértékadó „csavar nyírási ellenállása" helyett egyes esetekben az „L-acél lyukakkal gyengített keresztmetszetének törési ellenállása" lett mértékadó.
- Szakirodalmi elemzés alapján megállapítottuk, hogy a tartók gyártás során bekövetkező egyenetlen hűlési viszonyai miatt a keresztmetszet mentén a szilárdság értéke nem egyenletes, és az ennek modellezésével az EN 1991 (Eurocode 1) alapján számított teherbírás értéke 1-10%-kal alacsonyabb lehet az EN 1993 szerint egyenletes szelvényszilárdság mellett méretezhető teherbírásnál.

2. Méretezési szabályok meghatározása a teherbírás-csökkenés kivédésére – ajánlott túlméretezés mértékének meghatározása

A VI.1. pontban összefoglalt, a II., III., IV. és V. pontokban részletezett eredmények alapján az alábbi javaslatokat tesszük:

- **Amennyiben nem tudjuk** más módon **igazolni**, hogy **a** szelvényekre jutó **terhek** meghatározásánál **jelentős mértékű túlbiztosítás**t alkalmaztunk, akkor **kerülni kell a 97-98%-os kihasználtságra való méretezést**, ennél alacsonyabb célértéket kell meghatározni.
- **Húzott szelvények esetében** szükséges a legkisebb mértékű túlbiztosítás, **~90%-os kihasználtság**ra méretezés mellett már garantálható, hogy nem fog a szelvény a tényleges méretek mellett sem túlterhelődni. Ugyanakkor ebben az esetben nincsen a méretezési eljárásban tartalék: a névleges f_y értékkel számított feszültség (a γ_{M0} = 1,0 miatt) teljesen azonos lehet az acél folyáshatárával, ahol tényleges, 2% körüli maradó alakváltozás következik be ennek a feszültségnek a hatására. A jelenség fokozottabban jelentkezik a 16-40 mm vastagságú szelvényeknél, ahol az EN 1993 magasabb feszültséget enged meg, mint amennyi a termékszabvány szerinti folyáshatár.
- **Nyomott rudak és oszlopok esetében** is alkalmazható a **~90%-os kihasználtság**ra méretezés, mert bár a túlterhelhetőség ebben az esetben nagyobb, mint a húzott szerkezetek esetében, de a nyomott oszlopok esetén – a húzott szerkezetekkel ellentétben – van tartalék a méretezési módszerben: a vizsgálatok és számítások összevetése (V. és VI. fejezet) azt mutatta, hogy az oszlopok valódi kihajlási ellenállása 5-10 %-kal magasabb tud lenni, mint amennyit számítani lehet a valós szilárdsági és méretjellemzők alkalmazása mellett.
- **Hajlított szerkezetek esetén** lényegesen óvatosabbnak kell lenni; a **~80%-os kihasználtsági szint**et semmiképpen sem javasolt meghaladni, kivéve, ha igazolható, hogy a terhek túltervezettek, vagy ha a szabványosnál szigorúbb követelményeket írnak elő a gerendák adataira / a kivitelezés során folyamatosan ellenőrzik a beépített szelvények valós adataival azok megfelelőségét.
- Hasonlóan óvatosan kell eljárni a **keresztmetszeti osztályok határán található szelvények**kel: a méreteltérés hatására kedvezőtlenebb keresztmetszeti osztályba kerülhet a termék, aminek hatására a pusztán a méretekből adódó mértéknél nagyobb teherbírás-csökkenés következik be, így itt is **javasolt a 80-85%-os kihasználtsági szint**re való méretezés.
- Lehetséges az is, hogy a **méreteltérések hatására megváltozik a mértékadó tönkremeneteli mód**; ez akkor következhet be, ha az egyik tönkremeneteli mód nem, vagy kevéssé érzékeny a méretváltozásra, míg egy másik jelentősen változik a méreteltérések függvényében. Így ilyen esetben **~85%-os kihasználtság**ra méretezés javasolt.

VII. Összefoglalás

A munkánk elején áttekintettük a nemzetközi szakirodalmat, és feldolgoztunk néhány tudományos munkát, amiben a szelvények keresztmetszete mentén mérhető lokális szilárdságok eltérésének hatását vizsgálták.
A mi vizsgálataink és modellezéseink keretében meghatározásra kerültek az egyes méretezett szelvények névleges méretei, a szabvány által megengedett méreteltérések, valamint megvizsgáltuk több gyártó és az ÉMI Nonprofit Kft. mérési adatait a gyakorlatban előforduló, a névleges méretektől kedvezőtlen irányba eltérő szelvények keresése céljából. Ezután a gyártói vagy ÉMI-s mérési adatok minimuma alapján meghatároztunk egy kedvezőtlen irányban eltérő valós méretű szelvényt, ami nagy valószínűséggel található a kereskedelmi forgalomban is, illetve a szabványos eltérések betartása mellett meghatároztuk azon legkedvezőtlenebb szelvényméreteket is, amelyek létezését mérési adattal nem tudjuk igazolni, de a szabványos követelményeknek megfelelő mivoltuk miatt nem tudjuk kizárni létezésüket.
Következő lépésben a vizsgált szelvényeket méreteztük az EN 1993 szerint nyomott, húzott és hajlított szerkezetként is a névleges és a valós méretekkel is; valamint meghatároztuk a maximális teherbírás-csökkenések mértékét.
Ezután megvizsgáltuk a keresztmetszeti osztály változásának hatását is hegesztett I-tartóval, ami névleges méretekkel kedvezőbb keresztmetszeti osztályba sorolandó, mint a tényleges méretekkel.
Vizsgáltuk még csavaros kapcsolatok húzási teherbírását is, és megállapítottuk, hogy megváltozhat a mértékadó tönkremeneteli mód (mert egyes igénybevételek egymástól eltérő mértékben tudnak változni a méreteltérés függvényében) is.
A következő lépésben zártszelvényeken méretfelvételt, valamint húzó- és nyomóvizsgálatokat végeztünk el; majd ezen eredmények alapján kiszámítottuk a névleges, illetve a mért adatokkal is a nyomott oszlop kihajlási ellenállását, megbecsülve ezzel az EN 1993-ban megadott méretezési módszerben található „méretezési tartalékot".
Végül az elemzési, modellezési és mérési adatok alapján javaslatot állítottunk össze a maximális tervezési kihasználtság mértékére.

A munkához nagy segítséget nyújtott a lengyel Celsa Huta Ostrowiec Sp. z.o.o. üzem, a román COS Târgoviste S.A. üzem, valamint a magyar ÓAM Ózdi Acélművek Kft. üzem, akik az általunk kiválasztott szelvényekhez gyártói vizsgálati eredményeket bocsátottak rendelkezésünkre, az ÉMI Nonprofit Kft., aki zártszelvények gyártóktól független laboratóriumi vizsgálati eredményeit biztosították nekünk, valamint Bohák Attila ÉMI-s vizsgálótechnikust, aki a szakítóvizsgálatokat végezte, illetve akinek segítségével végeztem el a nyomóvizsgálatokat.

VIII. Irodalomjegyzék

[1] Daddi, I., Mazzolani, F., M. (1974). Détermination expérimentale des imperfections structurales des profilés en acier, Construction métallique, n.1, pp.24-45.

[2] Rozlívka, L., Dvořáček, P., Fajkus, M. (1999). Dimension deviations of welded steel beams and their influence on design strength of structural steels, Building Review, 8-2/99, pp.38-43 (in Czech).

[3] Fukumoto, Y., Kajita, N., Aoki, T. (1976). Evaluation of column curves based on probabilistic concept, in: proc. of int. Conference on Stability, Prelim. Rep., Publ. by Gakujutsu Bunken Fukyu – Kai, Tokyo, pp.1-37.

[4] Soares, G. C. (1988). Uncertainty modeling in plate buckling, structural safety, 5, pp.17-34.

[5] Zdeněk Kala and Jiří Kala (2002). Respecting the influence of geometrical and material imperfections of steel beam when calculating their load-carrying capacity, Stability and Ductility of Steel Structures (SDSS 2002), 2002, Akadémiai Kiadó, Budapest

[6] J. Kala, Z. Kala (2005). Influence of yield strength variability over cross-section to steel beam load-carrying capacity, Nonlinear Analysis: Modelling and Control, 2005, Vol. 10, No. 2, 151–160

[7] Z. Kala, J. Kala (2005). Sensitivity analysis of lateral buckling stability problems of hot-rolled steel beams, Slovak Journal of Civil Engineering, No. 2, 2005, pp. 9 - 14

[8] Z. Kala, J. Kala (2005). Sensitivity analysis of the effect of initial imperfections on the steel plate girder fatigue limit state, Structural Mechanics, Vol. 38, No. 1, 2005, pp. 3 - 12

[9] EN 1993: Eurocode 3: Acélszerkezetek tervezése. EN 1993-1-1 – EN 1993-1-12: 1-1 – 1.12. rész. (2015)

[10] MSZ EN 10025-1:2005 Melegen hengerelt termékek szerkezeti acélokból. 1. rész: Általános műszaki szállítási feltételek

[11] MSZ EN 10025-2:2005 Melegen hengerelt termékek szerkezeti acélokból. 2. rész: Ötvözetlen szerkezeti acélok műszaki szállítási feltételei

[12] MSZ EN 10029:2011 Melegen hengerelt, legalább 3 mm vastagságú acél durvalemezek. Méret- és alaktűrések

[13] MSZ EN 10034:1994 I és H szelvényű idomacélok. Alak- és mérettűrések

[14] MSZ EN 10056-1:1999 Egyenlő és egyenlőtlen szárú szögacél. 1. rész: Méretek

[15] MSZ EN 10056-2:1994 Egyenlő és egyenlőtlen szárú szögacél. 2. rész: Alak- és mérettűrések

[16] MSZ EN 10058:2004 Általános célú, melegen hengerelt laposacél. Méretek, valamint a méret és az alak tűrései

[17] MSZ EN 10059:2004 Általános célú, melegen hengerelt négyzetacél. Méretek, valamint a méret és az alak tűrései

[18] MSZ EN 10060:2004 Általános célú, melegen hengerelt köracél. Méretek, valamint a méret és az alak tűrései

[19] MSZ EN 10219-1:2006 Hidegen alakított, hegesztett, szerkezeti zárt idomacélok ötvözetlen és finomszemcsés acélokból. 1. rész: Műszaki szállítási feltételek

[20] MSZ EN 10219-2:2006 Hidegen alakított, hegesztett, szerkezeti zárt idomacélok ötvözetlen és finomszemcsés acélokból. 2. rész: Mérettűrések, méretek és keresztmetszeti jellemzők

[21] AxisVM 12 R3e Hallgatói változat, Inter-CAD Kft. - Mérnöki CAD programfejlesztés és tanácsadás, Budapest, Hungary; www.axisvm.com