



Acélszerkezetek II.

1. előadás

Keresztmetszetek osztályozása, 4. osztályú keresztmetszet, oldalirányban megtámasztott gerendák

Szabó Imre Gábor

Pécsi Tudományegyetem Műszaki és Informatikai Kar

Építőmérnök Tanszék



1. Keresztmetszetek osztályozása

Az Eurocode 3 a keresztmetszetek szilárdsági jellegű tönkremenetelét, valamint az ún. hosszirányú normálfeszültségek okozta horpadását egységesen kezeli, a keresztmetszeti osztályok bevezetésével. Mivel csak nyomó normálfeszültségek okozhatnak horpadást egy adott keresztmetszet osztályba sorolása csak akkor szükséges, ha az legalább részben nyomott. Ekkor a keresztmetszet viselkedését a folyás megjelenése mellett a lemezek stabilitásvesztése, azaz horpadása is befolyásolja. A keresztmetszeteket eszerint annak alapján kell osztályozni, hogy e két jelenség egymáshoz képest mikor jelentkeznek.

Tiszta hajlítás esetén négy eset lehetséges. Első lehetőség, hogy a lemezhorpadás a szélső szál megfolyása előtt következik be, az ilyen keresztmetszeteket 4. osztályúnak nevezzük. Ha a lemezhorpadás a szélső szál megfolyása után, de a keresztmetszet teljes képlékenyedése előtt következik be, a keresztmetszet 3. osztályú. Ha a lemezhorpadás a teljes képlékenyedés után, de viszonylag kis alakváltozások lejátszódása előtt következik be, a keresztmetszet 2. osztályú. Ha pedig a lemezhorpadás bekövetkezése előtt viszonylag nagy alakváltozások játszódnak le, a keresztmetszet 1. osztályú.

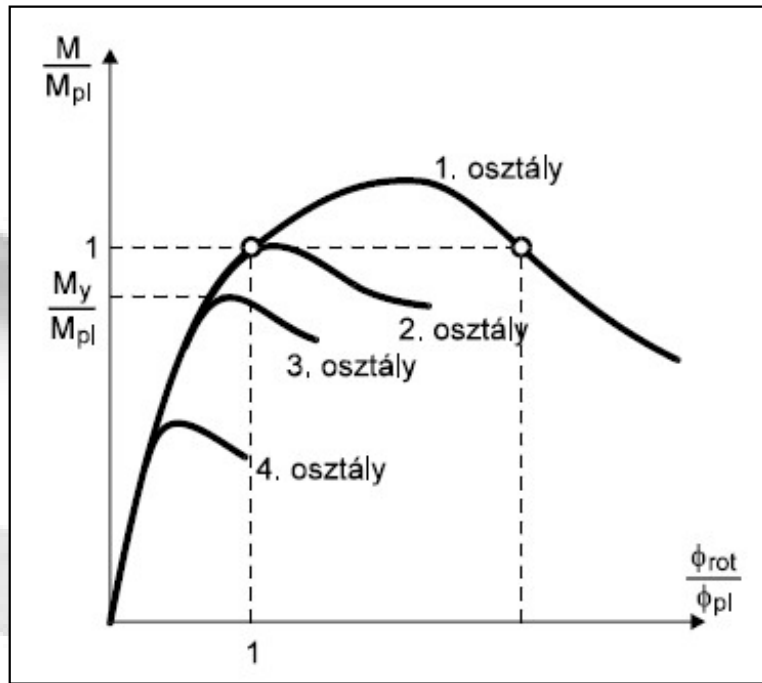


Tiszta nyomás esetén két eset van: vagy a keresztmetszet teljes megfolyása következik be előbb (ekkor a keresztmetszet 1. osztályú), vagy pedig a lemezhorpadás (ekkor a keresztmetszet 4. osztályú). 2. és 3. keresztmetszeti osztályról tiszta nyomás esetén nincs értelme beszélni, mert ilyenkor az első folyás és a korlátozatlan folyás határállapota egybeesik (azaz az első folyás megjelenésével elméletileg egy időben a teljes keresztmetszet megfolyik), és a folyást mindig nagy alakváltozások kísérik (azaz a korlátozatlan folyás bekövetkezése után elméletileg már nem alakulhat ki lemezhorpadás).

Nyomott-hajlított keresztmetszeteknél, továbbá olyan húzott-hajlított keresztmetszetek esetén, amelyek nyomott lemezekkel is rendelkeznek (nagy külpontosságú húzás) a tiszta hajlításhoz hasonlóan ugyancsak négy keresztmetszeti osztályt különböztetünk meg, ugyanazon kritériumok alapján.

Tehát röviden:

- a lemezben nyomóerő vagy hajlítás következtében horpadás keletkezhet,
- a horpadásra való hajlam korlátozza a keresztmetszet teherbírását,
- a számítás elején „kivágjuk” a horpadásra hajlamos részeket és a többire végezzük el a szilárdsági vizsgálatokat.



1. ábra. Keresztmetszetek osztályozása
[Dunai, Horváth 2007]

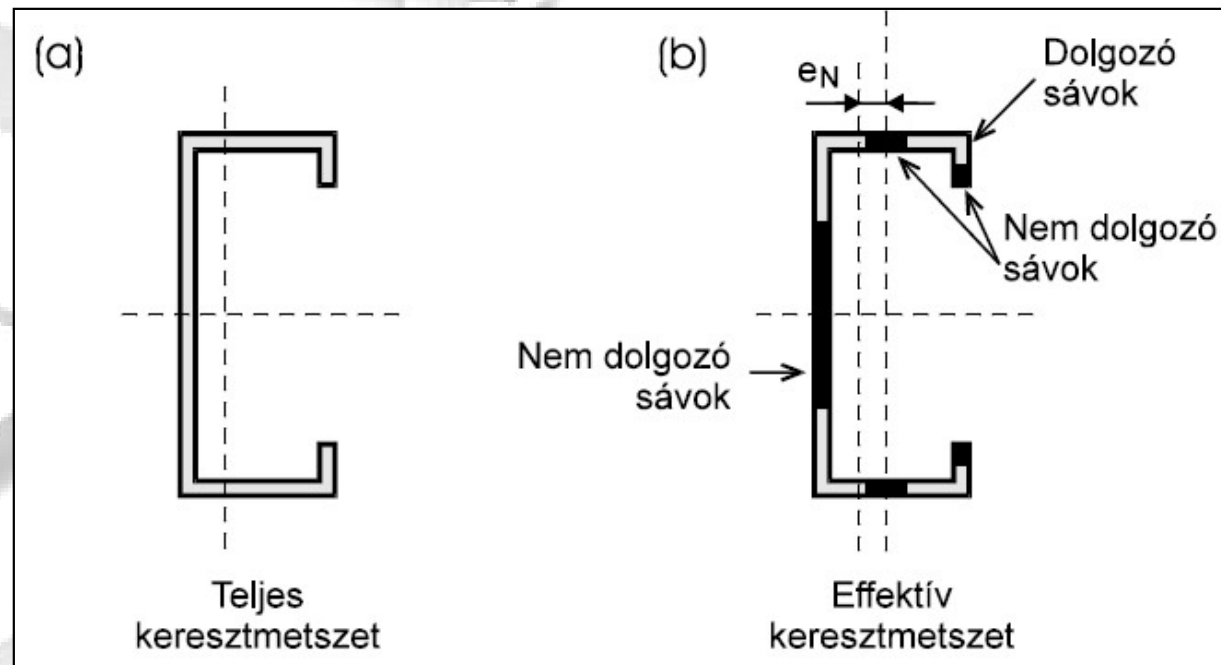
M_{pl} a keresztmetszet teljes megfolyásához tartozó, M_y pedig a szélső szál megfolyását okozó nyomaték. Az alakváltozást a keresztmetszet körüli rövid tartószakaszon mért elfordulással (a tartó görbületével) írjuk le. A görbe a felkeményedés miatt emelkedhet M_{pl} fölé, de méretezéskor ezt a tartalékot nem vesszük figyelembe.

A keresztmetszet osztályozása dönti el, hogy a keresztmetszet hogyan számítandó (képlékeny, rugalmas vagy csökkentett ellenállással).

Az osztályozás általános előírásai:

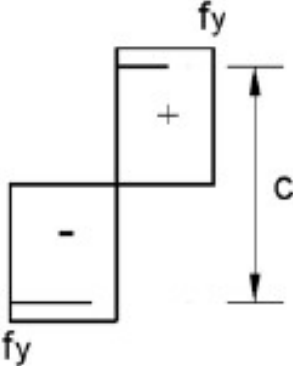
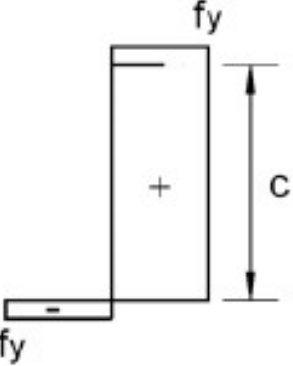
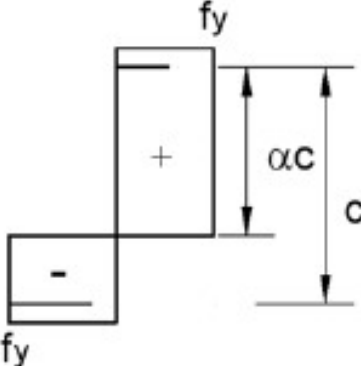
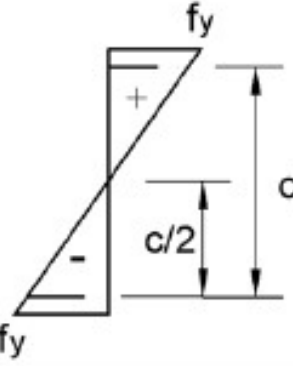
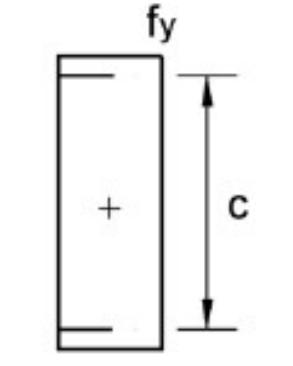
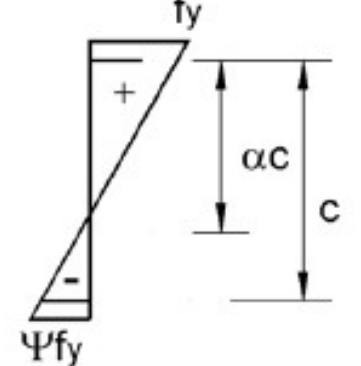
- A nyomott alkotólemezek szélesség/vastagság arányától és a nyomófeszültségek eloszlásától függ.
- A lemezek különböző alkotólemezei (pl. öv, gerinc) különböző osztályúak lehetnek, ilyenkor a teljes keresztmetszetre vonatkozó osztály a legkedvezőtlenebb alkotólemez osztályával egyezik meg.

- A szélesség/vastagság arányszámoknak az 1., 2., 3. osztályra vonatkozó határértékeit a 1-4. táblázat adja meg. Azon lemezeket, amelyek nem teljesítik a 3. osztályra megadott feltételeket sem, 4. osztályúnak kell tekinteni.
- 4. osztályú keresztmetszetek esetén a lemezeket csökkentett (effektív) szélességükkel kell számításba venni. A részletes számítás az AGYU 3.1.3 fejezete szerint.



2. ábra. 4. osztályú C szelvény teljes és hatékony keresztmetszete tiszta nyomás esetén. A keresztmetszet súlypontja e_N értékkel eltolódik, aminek hatására a keresztmetszetben az eredetileg központos normálerő hajlítónyomatékot is fog okozni.

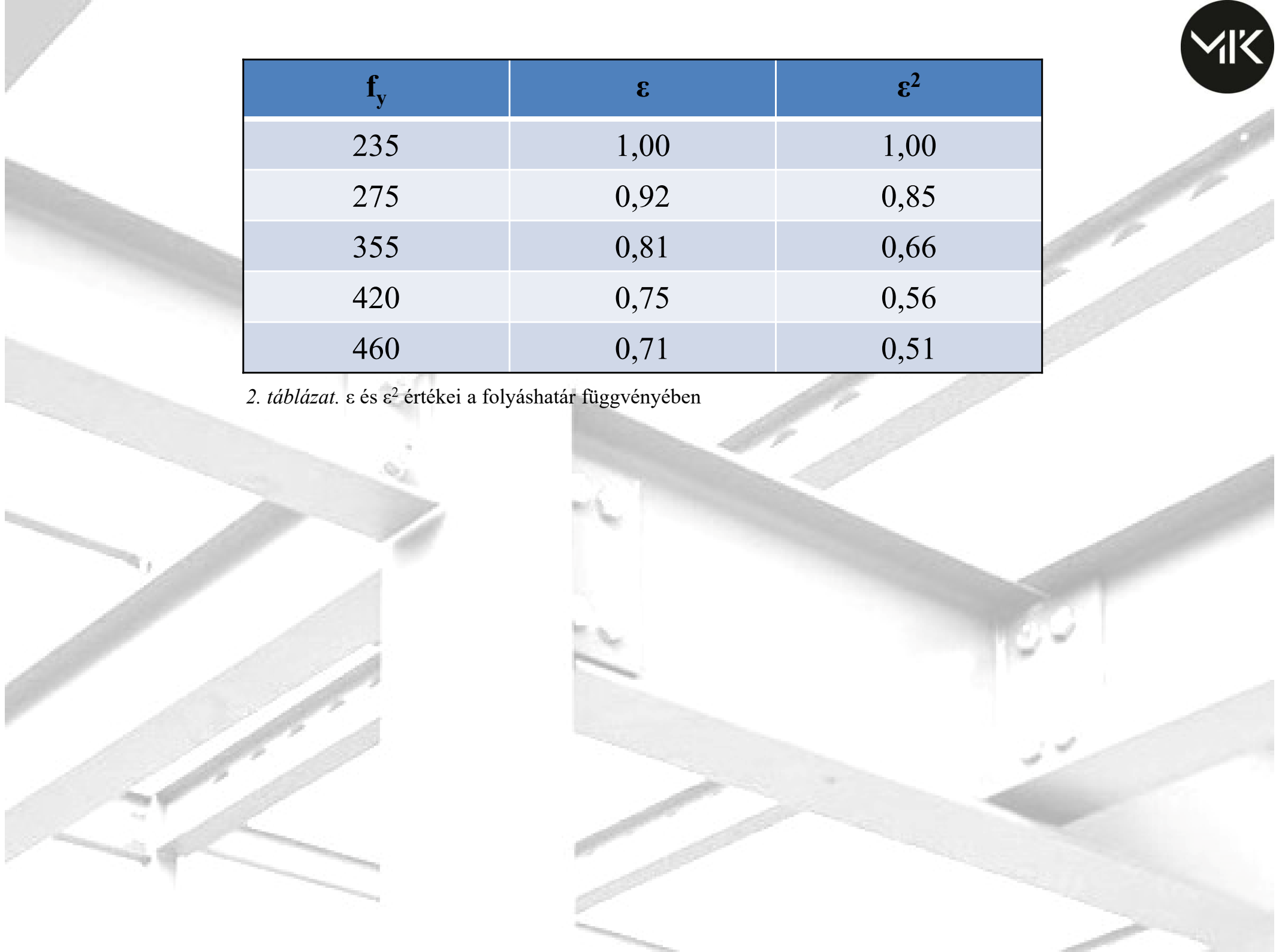
[Dunai, Horváth 2007]

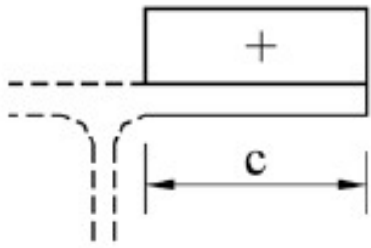
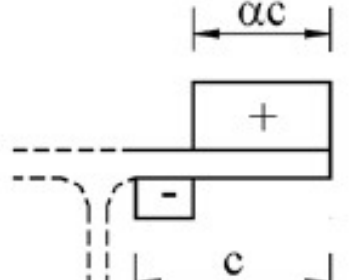
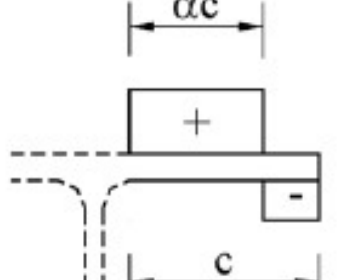
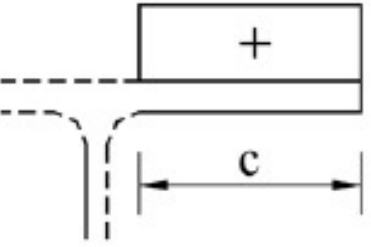
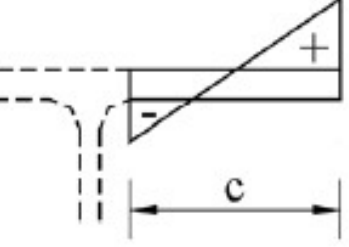
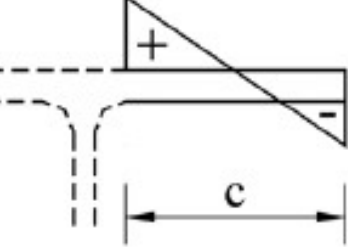
Feszültség-eloszlás			
1. osztály	$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$	$\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$	ha $\alpha > 0,5$: $\frac{c}{t} \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$ ha $\alpha \leq 0,5$: $\frac{c}{t} \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha}$
2. osztály	$\frac{c}{t} \leq 83\varepsilon$	$\frac{c}{t} \leq 38\varepsilon$	ha $\alpha > 0,5$: $\frac{c}{t} \leq \frac{456\varepsilon}{13\alpha - 1}$ ha $\alpha \leq 0,5$: $\frac{c}{t} \leq \frac{41,5\varepsilon}{\alpha}$
Feszültség-eloszlás			
3. osztály	$\frac{c}{t} \leq 124\varepsilon$	$\frac{c}{t} \leq 42\varepsilon$	ha $\psi > -1$: $\frac{c}{t} \leq \frac{42\varepsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ ha $\psi \leq -1$: $\frac{c}{t} \leq 62\varepsilon(1 - \psi)\sqrt{-\psi}$

1. táblázat. Osztályozási határok mindkét oldalukon megtámasztott lemezekre (az ábrákon a nyomófeszültség pozitív)
[Dunai, Horváth 2007]

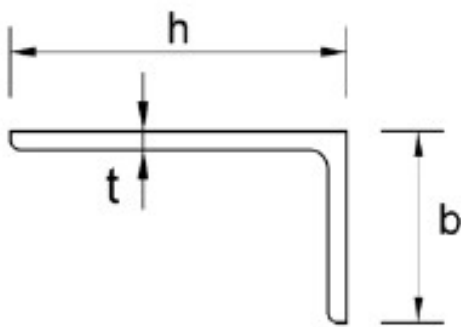
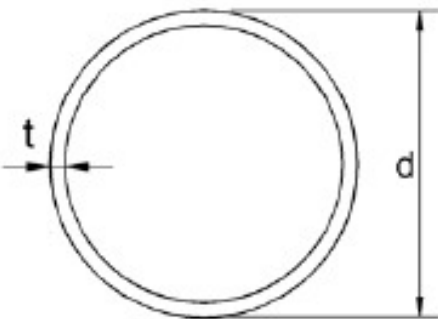
f_y	ε	ε^2
235	1,00	1,00
275	0,92	0,85
355	0,81	0,66
420	0,75	0,56
460	0,71	0,51

2. táblázat. ε és ε^2 értékei a folyáshatár függvényében



Feszültség-eloszlás			
1. osztály	$\frac{c}{t} \leq 9\varepsilon$	$\frac{c}{t} \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha}$	$\frac{c}{t} \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
2. osztály	$\frac{c}{t} \leq 10\varepsilon$	$\frac{c}{t} \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha}$	$\frac{c}{t} \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
Feszültség-eloszlás			
3. osztály	$\frac{c}{t} \leq 14\varepsilon$	$\frac{c}{t} \leq 21\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$	

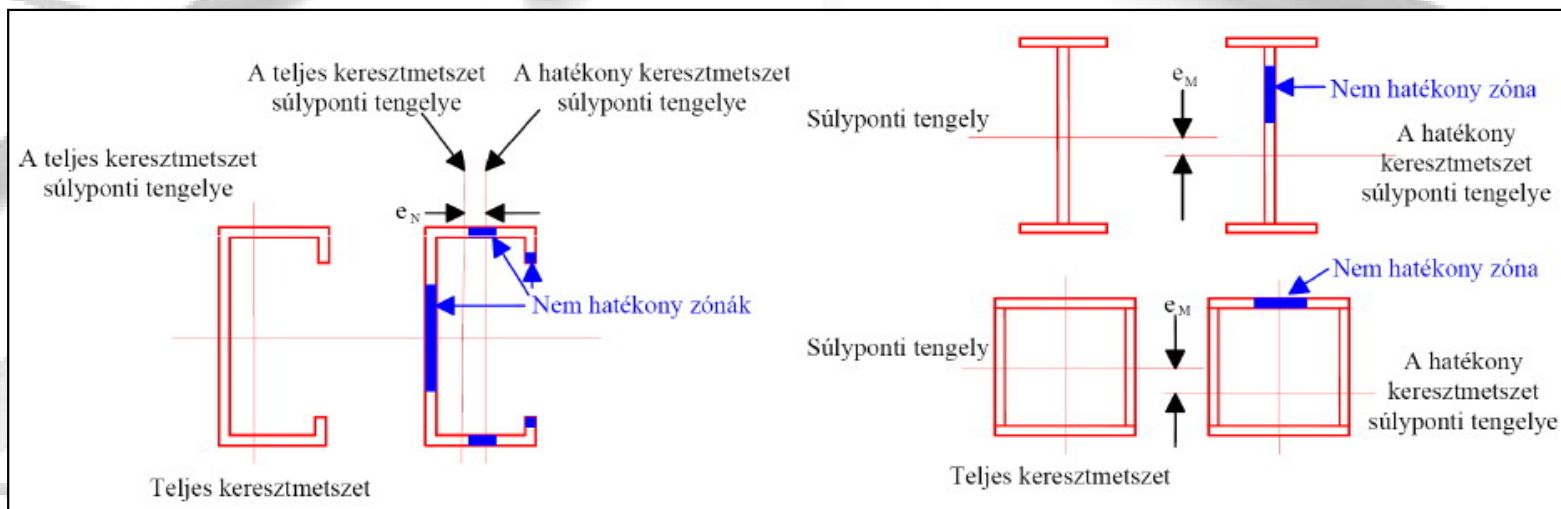
3. táblázat. Osztályozási határok egyikoldalukon megtámasztott lemezekre (az ábrákon a nyomófeszültség pozitív), k_σ magyarázata AGYU 3.1.3 fejezetben [Dunai, Horváth 2007]

	szögacél	csőszelvény
		
1. osztály	1. <előző táblázat>	$\frac{d}{t} \leq 50\epsilon^2$
2. osztály	1. <előző táblázat>	$\frac{d}{t} \leq 70\epsilon^2$
3. osztály	$\frac{h}{t} \leq 15\epsilon$ és $\frac{b+h}{2t} \leq 11,5\epsilon$	$\frac{d}{t} \leq 90\epsilon^2$

4. táblázat. Osztályozási határok szögacélokra és csőszelvényekre. A szögacélra megadott osztályozási határ nem vonatkozik arra az esetre, amikor a szögacél folyamatosan felfekszik egy másik elemre (az ábrákon a nyomófeszültség pozitív).
[Dunai, Horváth 2007]

2. 4. osztályú keresztmetszet

Ha egy keresztmetszet a vizsgált igénybevétel szempontjából 4. osztályúnak minősül, akkor a vizsgált igénybevétellel szembeni ellenállását úgy kell kiszámítani, mintha a keresztmetszet 3. osztályú lenne, de a tényleges keresztmetszeti jellemzőkkel (terület, keresztmetszeti modulus, stb.) egy csökkentett ún. *hatékony értékkel* vesszük figyelembe. Ezek a hatékony keresztmetszeti jellemzők egy ún. *hatékony keresztmetszeten* számíthatók, amelyet úgy veszünk fel, hogy az eredeti keresztmetszet nyomott alkotóelemei közül mindazokat, amelyek az előző szakasz szerint 4. osztályúak, a horpadásnak megfelelően csökkentjük.



4. ábra. 4. osztályú C szelvény, I szelvény és zártszelvény teljes és hatékony keresztmetszete tiszta nyomás esetén [Grün 2013]

A horpadó (4. osztályú) lemezek b_{eff} szélességének meghatározásához ki kell számolni a lemezelem $\bar{\lambda}_p$ viszonyított karcsúságát.

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}}$$

ahol: $\bar{\lambda}_p$ – a keresztmetszet viszonyított karcsúsága;

\bar{b} – a vizsgált lemez jellemző szélességi mérete a 5. táblázat szerint;

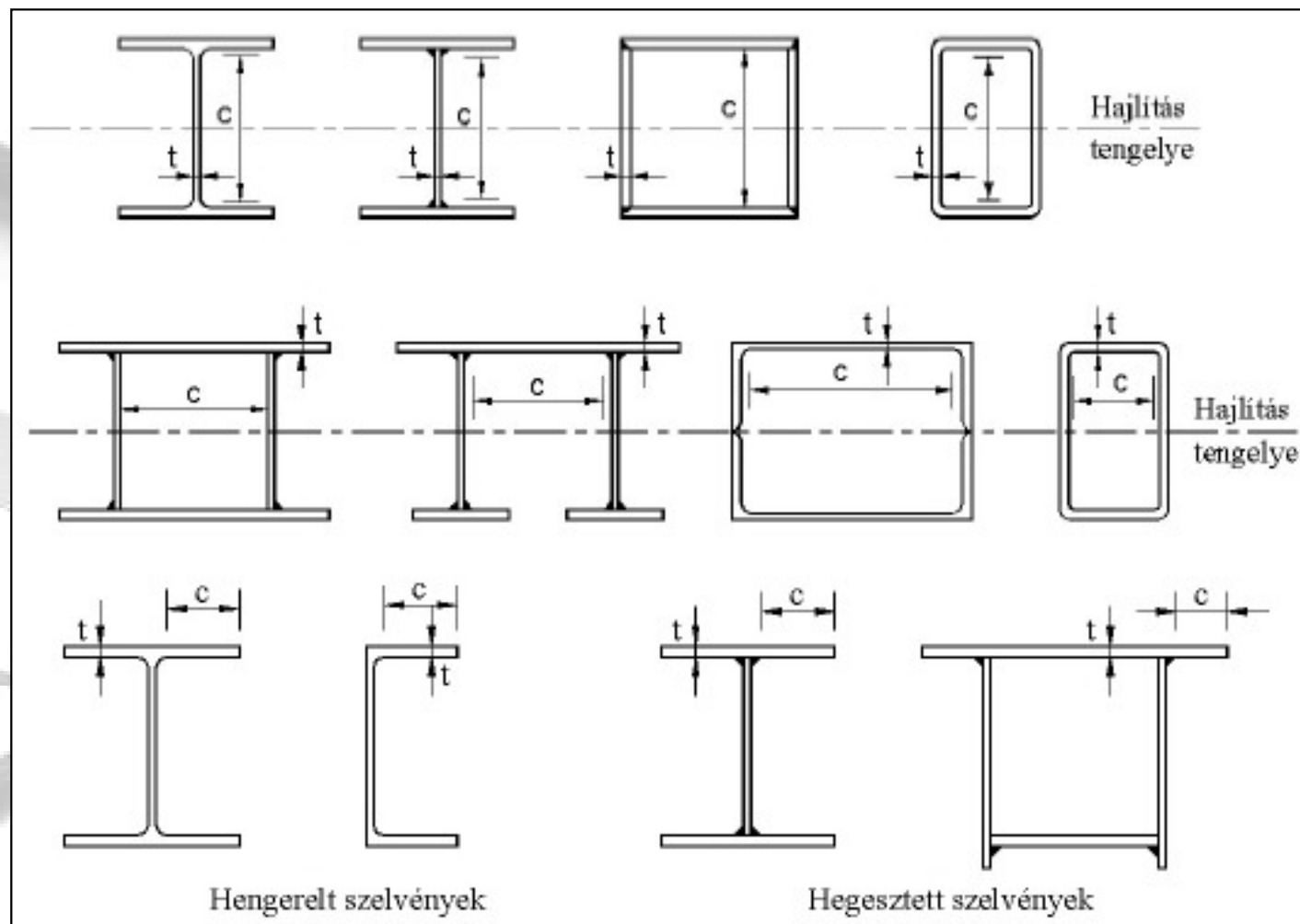
t – a lemez vastagsága;

k_σ – a horpadási tényező.

Eset	Jellemző \bar{b} szélességi méret
Gerinclemez	c
Belső övlemez általában	c
Hengerelt vagy hidegen hajlított zárt szelvényű idomacél belső övlemeze	c-3t
Szabad szélű övlemez	c
Egyenlő szárú szögacél	h
Egyenlőtlen szárú szögacél	h

5. táblázat. A jellemző szélességi méret felvétele a lemezhorpadás vizsgálatához

Az 5. táblázatban szereplő jelölések magyarázatát mutatja a 5. ábra:



5. ábra. Jellemző szélességi és vastagsági méretek az osztályozási táblázatokhoz
[Dunai, Horváth 2007]



Ha a lemez egy része húzott (pl. hajlított I tartó gerinclemezában, a $b_{\text{eff}} = \rho \cdot b$ képletben szereplő b csak a nyomott lemezrész szélességét jelenti, ugyanakkor a \bar{b} és a 1. táblázatban szereplő jelölések a teljes keresztmetszetre vonatkoznak!)

A k_{σ} horpadási tényező a nyomott lemezek horpadása során figyelembe veendő, a $\bar{\lambda}_p$ karcsúság képletében nem szereplő körülményeket tartalmazza, ezek a következők:

- a nyomott lemezek megtámasztási viszonyai,
- a nyomott lemez hossza (illetőleg az l/b arány),
- a nyomófeszültségek eloszlása.

A 4. osztályú keresztmetszetek alkotólemezei a megtámasztás szempontjából két csoportra oszthatók:

- két oldalán megtámasztott (belső) nyomott lemezek (pl. I szelvény gerince, zártszelvény valamennyi alkotó lemeze),
- egyik oldalán megtámasztott (szabad szélű) nyomott lemezek (pl. I szelvény öve).

A nyomófeszültségek eloszlását lineárisnak tételezzük fel, és a szélső szálak feszültségének $\sigma_{min}/\sigma_{max,ny}$ hányadosát Ψ -vel jelöljük (a $\sigma_{max,ny}$ a lemez valamely szélén ébredő legnagyobb nyomófeszültség, a σ_{min} pedig a lemez ellentétes szélén ébredő feszültség). Ekkor k_{σ} értéke a 6. táblázat szerint alakul.

Eset	ψ értéke	k_{σ} képlete
BELSŐ NYOMOTT ELEMÉK	$\psi = 1$	4,0
	$0 < \psi < 1$	$\frac{8,2}{1,05 + \psi}$
	$\psi = 0$	7,81
	$-1 < \psi < 0$	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$
	$\psi = -1$	23,9
	$-2 < \psi < -1$	$5,98 \cdot (1 - \psi)^2$
SZABAD SZÉLŰ NYOMOTT ELEMÉK, $\sigma_{max,ny}$ A SZABAD SZÉLEN VAN	$\psi = 1$	0,43
	$\psi = 0$	0,57
	$\psi = -1$	0,85
	$-1 < \psi < 1$	fenti értékek között lineáris interpoláció
	$-3 < \psi < -1$	$0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$ (*)
SZABAD SZÉLŰ NYOMOTT ELEMÉK, $\sigma_{max,ny}$ A MEGTÁMASZTOTT SZÉLEN VAN	$\psi = 1$	0,43
	$0 < \psi < 1$	$\frac{0,578}{\psi + 0,34}$
	$\psi = 0$	1,70
	$-1 < \psi < 0$	$1,70 - 5\psi + 17,1\psi^2$
	$\psi = -1$	23,8

Az elméleti értékek a csuklós megtámasztáshoz tartoznak, a szabvány ezen értékek használatát javasolja, a biztonság javára való közelítésként. A (*)-gal jelölt képlet alternatív számítási módot jelent a fentebb megadottakhoz képest.

6. táblázat. k_{σ} értékei $\Psi = \sigma_{min}/\sigma_{max,ny}$ függvényében
[Dunai, Horváth 2007]

A lemezkarcsúság ismeretében a b_{eff} hatékony szélességet az eredeti b szélességnek egy ρ tényezővel való csökkentésével határozzuk meg.

$$b_{eff} = \rho \cdot b$$

ahol: b_{eff} – a hatékony szélesség;

b – az eredeti szélesség;

ρ – csökkentő tényező.

A ρ csökkentő tényező meghatározása:

➤ két oldalán megtámasztott („belső”) nyomott lemezekre:

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \Psi)}{\bar{\lambda}_p^2}, \text{ de } \rho \leq 1,0$$

➤ egyik oldalon megtámasztott („szabad szélű”) nyomott lemezekre:

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2}, \text{ de } \rho \leq 1,0$$

ahol: ρ – csökkentő tényező;

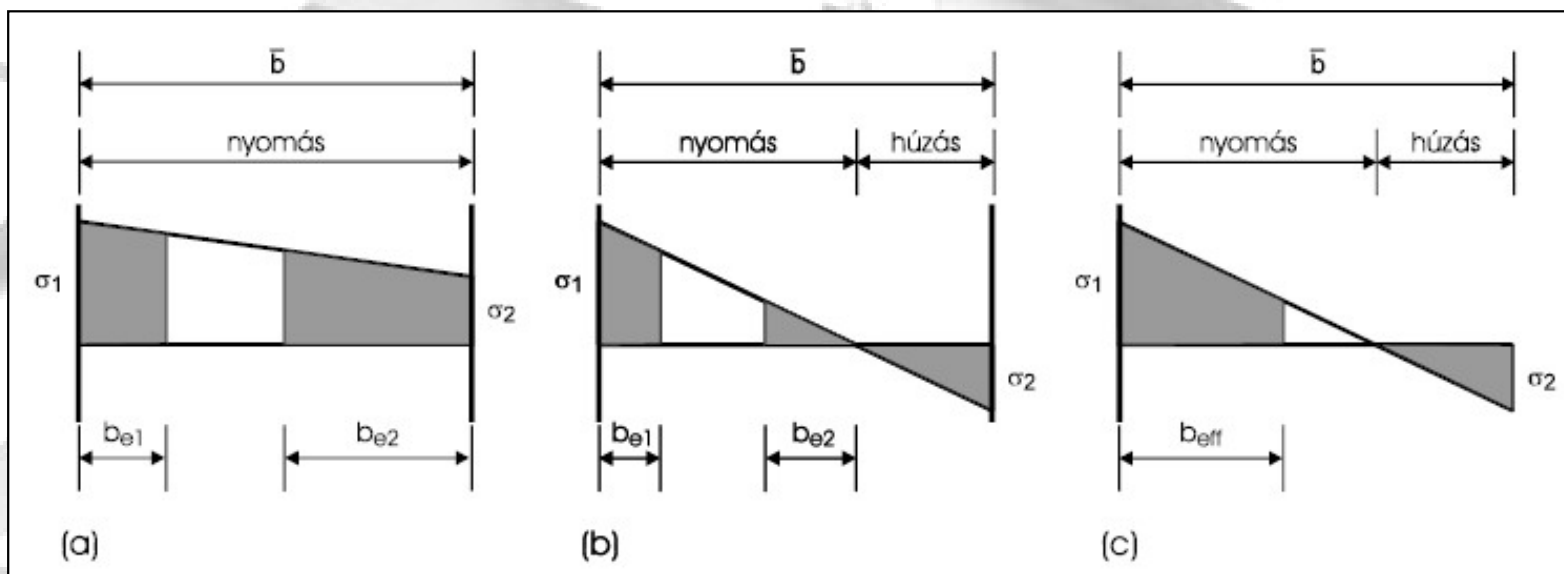
Ψ – a lemez két szélén számított feszültség aránya;

$\bar{\lambda}_p$ – a keresztmetszet viszonyított karcsúsága.

A b itt is csak a nyomott lemezrész szélességét jelöli, szemben a \bar{b} -sal, amely a jellemző szélességi méretet (a teljes szélességet) jelenti.

A hatékony lemezrész meghatározása után meg kell határozni, hogy a lemeznek mely részét kell elhagyni. (Erre egyedül a kétszeresen szimmetrikus, központosan nyomott elemek esetében nincs szükség, mivel ott a lemezhorpadás is szimmetrikusan következik be, így az eredetileg központos nyomás a horpadás megindulása után is központos marad.)

Belső nyomott lemezek esetén, ha a feszültségeloszlás egyenletes, a horpadó lemezrész a vizsgált lemez közepén helyezkedik el, más esetekben a 11. ábra szerint hagyjuk el a kihorpadó lemezrészeket.



6. ábra. Honnan kell elhagyni a horpadó részeket 4. osztályú keresztmetszetet alkotó lemezeiben: (a) belső nyomott lemezben, amely végig nyomott, (b) belső nyomott lemezben, amely egyik szélén húzott, (c) bal oldalán megtámasztott, jobb oldalán szabad lemezben [Dunai, Horváth 2007]

A 6. ábra szerinti (a) esetben:

$$b_{e1} = \frac{2}{5 - \Psi} \cdot b_{\text{eff}} \quad \text{és} \quad b_{e2} = b_{\text{eff}} - b_{e1}$$

ahol: Ψ – a lemez két szélén számított feszültség aránya

$$\Psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$$

A 6. ábra szerinti (b) esetben:

$$b_{e1} = 0,4 \cdot b_{\text{eff}} \quad \text{és} \quad b_{e2} = 0,2 \cdot b_{\text{eff}}$$

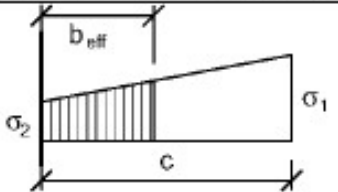
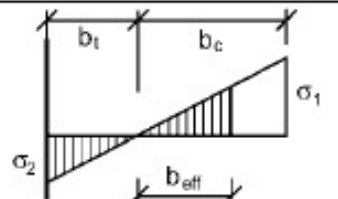
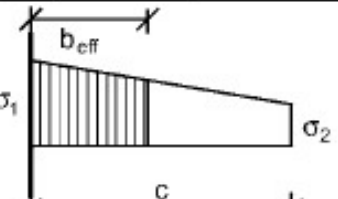
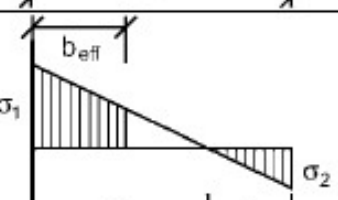
A 6. ábra szerinti (c) esetben:

Szabad szélű nyomott elemek esetén a nem hatékony rész mindig a nyomott lemez szélére esik: ha a lemez széle húzott, akkor a nyomott résznek a megtámasztástól további szélére.



Feszültségeloszlás (nyomás pozitív)			b_{eff} hatékony szélesség			
			$\underline{\psi = 1}$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff} \qquad b_{e2} = 0,5 b_{eff}$			
			$\underline{1 > \psi \geq 0}$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} b_{eff} \qquad b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$			
			$\underline{\psi < 0}$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff} \qquad b_{e2} = 0,6 b_{eff}$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi > -2$
Horpadási tényező k_σ	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	23,9	$5,98(1 - \psi)^2$

7. táblázat. Belső nyomott lemezelemek [Iványi M. én.]

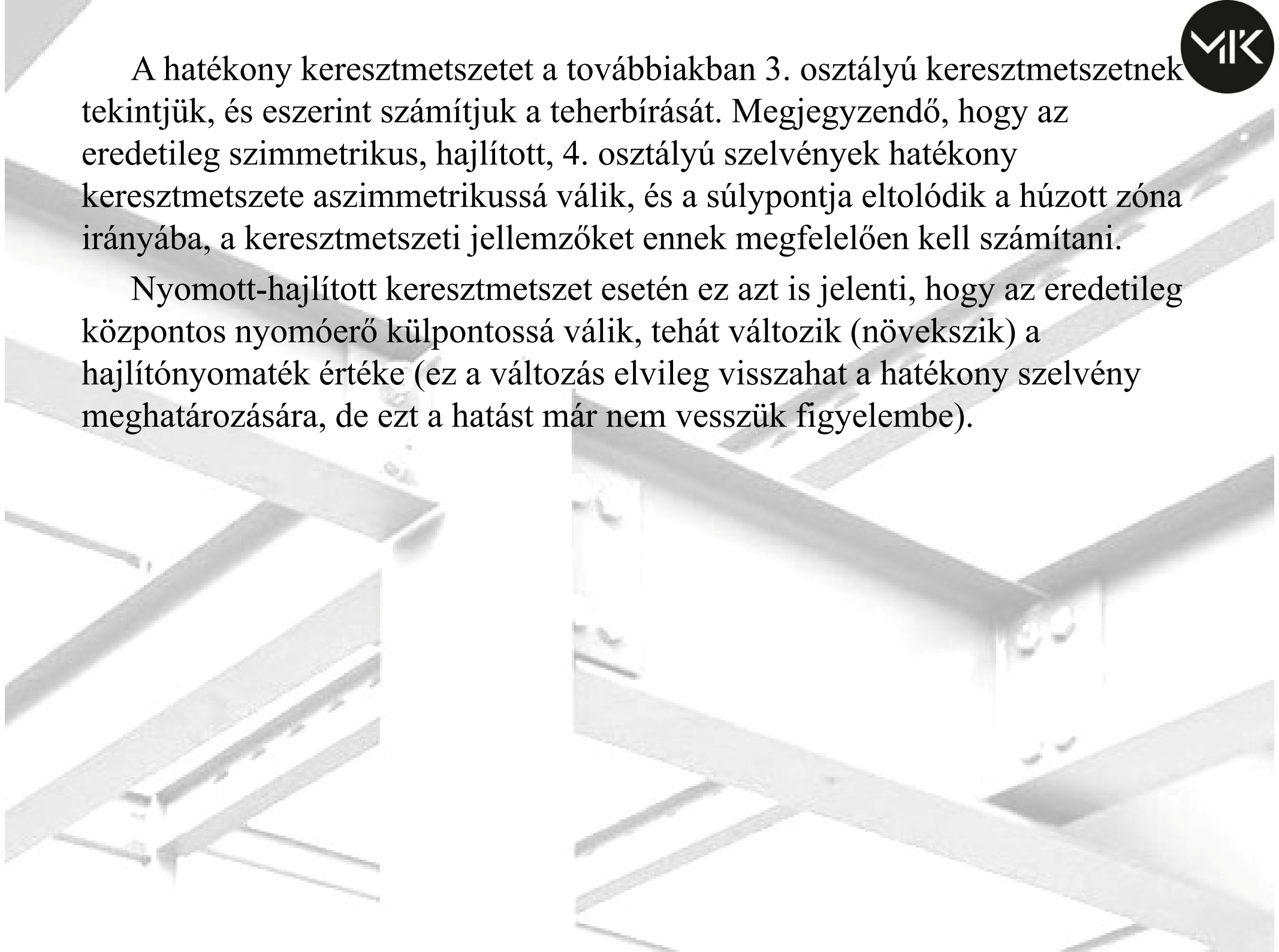
Feszültségeloszlás (nyomás pozitív)		b_{eff} hatékony szélesség			
		$1 > \psi \geq 0$ $b_{\text{eff}} = \rho c$			
		$\psi < 0$ $b_{\text{eff}} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	0	-1	$-1 > \psi > -3$	
Horpadási tényező k_σ	0,43	0,57	0,85	7	
		$1 > \psi \geq 0$ $b_{\text{eff}} = \rho c$			
		$\psi < 0$ $b_{\text{eff}} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	1
Horpadási tényező k_σ	0,43	$0,578 / (\psi + 0,34)$	1,70	$1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$	23,8

8. táblázat. Szabad peremű nyomott lemezelemek [Iványi M. én.]



A hatékony keresztmetszetet a továbbiakban 3. osztályú keresztmetszetnek tekintjük, és eszerint számítjuk a teherbírását. Megjegyzendő, hogy az eredetileg szimmetrikus, hajlított, 4. osztályú szelvények hatékony keresztmetszete aszimmetrikussá válik, és a súlypontja eltolódik a húzott zóna irányába, a keresztmetszeti jellemzőket ennek megfelelően kell számítani.

Nyomott-hajlított keresztmetszet esetén ez azt is jelenti, hogy az eredetileg központos nyomóerő külpontossá válik, tehát változik (növekszik) a hajlítónyomaték értéke (ez a változás elvileg visszahat a hatékony szelvény meghatározására, de ezt a hatást már nem vesszük figyelembe).



3. Oldalirányban megtámasztott gerendák

A gerendák talán a legalapvetőbb szerkezeti elemek. Különböző típusúak lehetnek és sokféle alakú keresztmetszettel rendelkezhetnek a teherintenzitás és a támaszköz függvényében, melyet a 9. táblázat mutat.

sz.	A gerenda típusa	A támaszköz tartománya (m)	Megjegyzések
0.	Szögacélok	3–6	tetőszelemenként, falvázgerendaként stb. alkalmazzák, kisebb terhek esetén
1.	Hidegen alakított szelvények	4–8	tetőszelemenként, falvázgerendaként stb. alkalmazzák, kisebb terhek esetén
2.	Melegen hengerelt szelvények (UB,IPE,UPN,HE)	1–30	a leggyakrabban alkalmazott szelvénytípus, melynek arányait úgy választották meg, hogy számos tönkremeneteli mód ne jöhessen létre
3.	Könnyű rácsos tartók	4–40	előregyártással készül, szögacélok vagy csövek alkotják az öveket, köracélok a húzott rácsrudakat; melegen hengerelt szelvények helyettesítésére szolgálnak
4.	Sejttartók	6–60	nagy támaszközök és/vagy kis terhek esetén alkalmazzák, a szelvény magassága az alapszelvényhez képest 50%-kal nő, a nyílások gépészeti célokra használhatók
5.	Összetett szelvények (pl. IPE+UPN)	5–15	akkor alkalmazzák, ha egyetlen önálló melegen hengerelt szelvény nem elegendő teherbírású; gyakran használják a vízszintes hajlítással szembeni erősítésre is
6.	Hegesztett, nyitott keresztmetszetű gerendák	10–100	3 lemez összehegesztésével készül, 3–4 m-es gerincmagasságig, esetenként merevítések szükségesek
7.	Szekrénytartók	15–200	lemezekből gyártják, általában merevített, jelentős csavarási és keresztirányú merevségi jellemzőik miatt darupálya-tartókban és hidakban alkalmazzák

9. táblázat. Különböző célokra alkalmazott gerendatípusok [Iványi M. 2007.]



Az acélgerendákat gyakran egyszerűen a *nyomatéki ellenállás és a merevség* alapján lehet tervezni, vagyis azt kell biztosítani, hogy a választott keresztmetszet tervezési nyomatéki ellenállása legyen legalább akkora, mint az alkalmazott maximális nyomaték, illetőleg a gerenda lehajlása ne legyen olyan mértékű, amely a használhatóságot befolyásolja.

Azokat a gerendákat, amelyek oldalirányban nem képesek elmozdulni, „*oldalirányban megtámasztott*” gerendáknak nevezzük (ezeknél nem jöhet létre a kifordulással járó stabilitásvesztés). A gerendákat oldalirányban megtámasztottnak lehet tekinteni, ha:

- folytonos oldalirányú megtámasztás van, például abban az esetben, amikor a kéttámaszú gerenda felső övéhez teherbíró kapcsolattal csatlakozik egy padlórendszer,
- a nyomott öv elcsavarodása megfelelően meg van gátolva, például acél profillemez révén,
- sűrűn elhelyezett merevítő elemek biztosítják, hogy a gyenge tengely síkjában a karcsúság kicsi legyen (a részleteket lásd az oldalirányban nem megtámasztott gerendákról szóló előadásban).



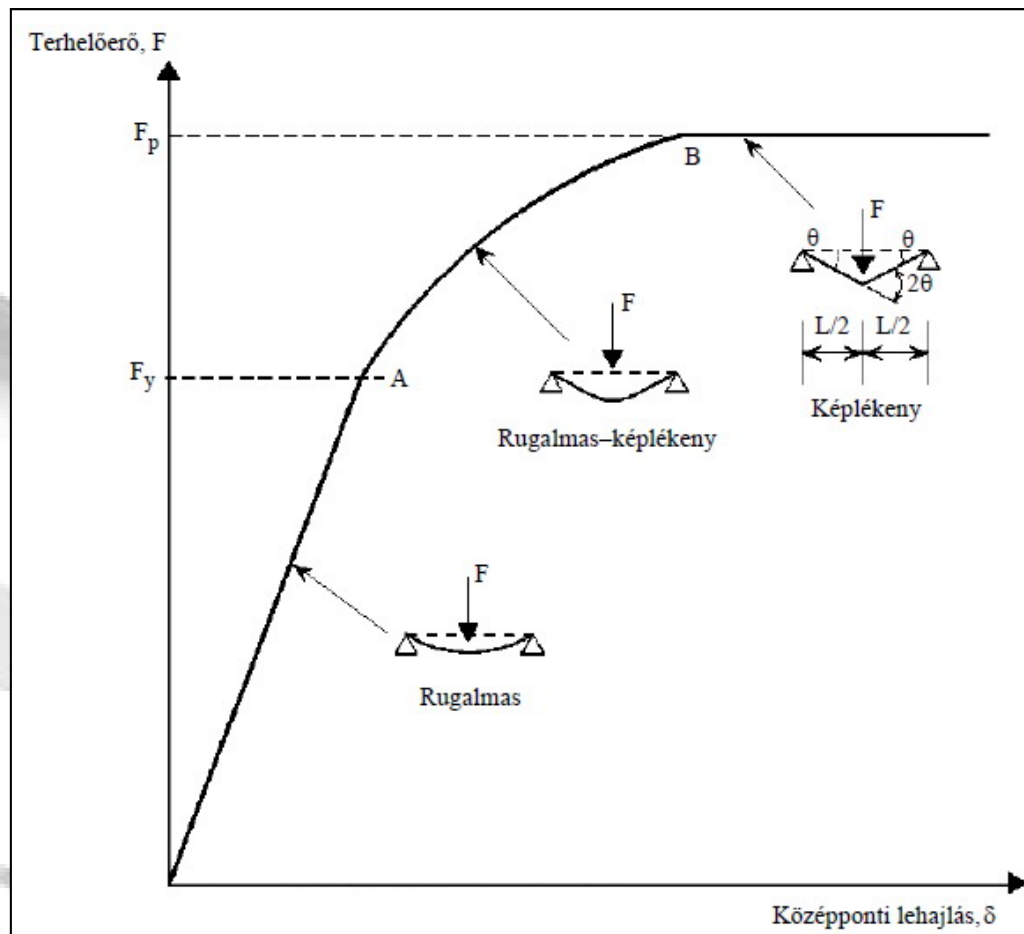
A gyenge tengelyük körül hajlított elemek nem mehetnek tönkre kifordulás útján, és az is valószínűtlen, hogy a nagy csavarási és oldalirányú merevséggel rendelkező szelvények (például a téglalap keresztmetszetű zárt szelvények) ilyen módon menjenek tönkre.

A következőkben megfelelő oldalirányú megtámasztást tételezünk fel.

3.1 Nyomatéki ellenállás

Egy egyszerű kéttámaszú gerenda (7. ábra) tönkremenetele akkor következik be, ha a hajlítónyomaték M_{Ed} tervezési értéke meghaladja a keresztmetszet tervezési hajlítási ellenállását, amelynek a nagysága függ:

- a szelvény alakjától,
- az anyagminőségtől,
- a keresztmetszet osztályától.



7. ábra. Kéttámaszú gerenda viselkedése [Iványi M. 2007.]

Azokban az esetekben, amikor a keresztmetszetben működő nyíróerőt elég kicsinek lehet tekinteni ahhoz, hogy a nyomatéki ellenállásra gyakorolt hatását elhanyagoljuk (az EC3 ezt a nyíróerőértéket a képlékeny nyírás ellenállás 50%-ában határozza meg), a keresztmetszet $M_{c,Rd}$ tervezési nyomatéki ellenállását a következő értékre kell felvenni:



Az alább szereplő számítások feltétele, hogy a hajlítás síkja egybeesik a keresztmetszet valamely szimmetriasíkjával, tehát az igénybevétel egyenes hajlítás.

3.1.1 A keresztmetszet hajlítási ellenállásának számítása, ha csavarlyukak nem gyengítik a keresztmetszetet

1. és 2. keresztmetszeti osztály esetén:

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

3. keresztmetszeti osztály esetén:

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

4. keresztmetszeti osztály esetén:

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



ahol: $M_{c,Rd}$ – a keresztmetszet hajlítási ellenállása;

W_{pl} – a keresztmetszet képlékeny keresztmetszeti modulusa;

W_{el} – a keresztmetszet rugalmas keresztmetszeti modulusa;

W_{eff} – a hatékony keresztmetszet keresztmetszeti modulusa;

f_y – az anyag folyáshatár értéke;

γ_{M0} – parciális tényező keresztmetszeti osztályokra (értéke 1,00).

A rugalmas keresztmetszeti modulus az inercia és a szélső-száltávolság hányadosaként, a képlékeny keresztmetszeti modulus pedig a félkeresztmetszetnek a súlyponti tengelyre vett statikai nyomatéka kétszereseként számítható.

3.1.2 Ha a keresztmetszet húzott zónáját csavarlyukak gyengítik akkor e gyengítés hatása figyelmen kívül hagyható, ha teljesül a következő feltétel:

$$0,9 \cdot \frac{A_{\text{net}}}{A} \geq \frac{f_y}{f_u} \cdot \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M0}}$$

ahol: A_{net} – a gyengített keresztmetszeti felület;

A – a keresztmetszet teljes felülete;

f_y – az anyag folyáshatár értéke;

f_u – az anyag szakítószilárdsága;

γ_{M2} – a képlékeny töréshez tartozó biztonsági tényező (értéke 1,25);

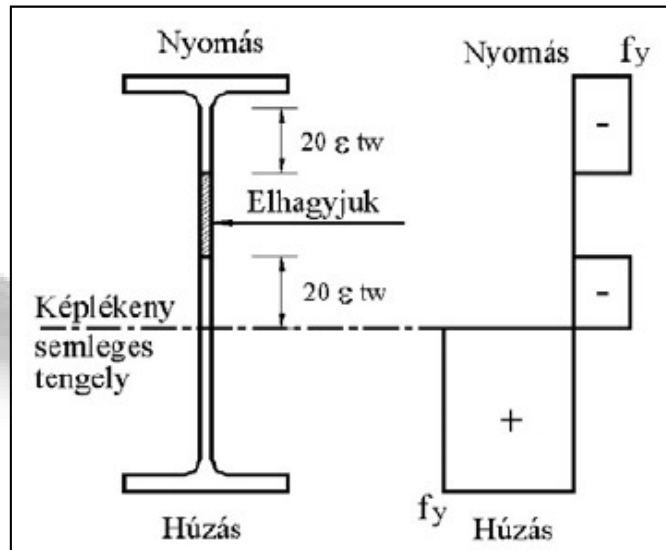
γ_{M0} – parciális tényező keresztmetszeti osztályokra (értéke 1,00).

A húzási ellenállás szempontjából a korlátozatlan folyás határállapota a mértékadó a képlékeny töréssel szemben. Ha ez a feltétel nem teljesül, akkor a húzott zóna A területét (célszerű az övlemez szélességének csökkentésével) képzeletben úgy csökkentjük, hogy a feltétel teljesüljön.

3.1.3 A nyomott zónában lévő csavarlyukak nem befolyásolják a hajlítási ellenállás nagyságát

Ennek feltétele azonban, hogy a furatokban csavar helyezkedik el, és nem túlméretes vagy hasítéklyukról van szó.

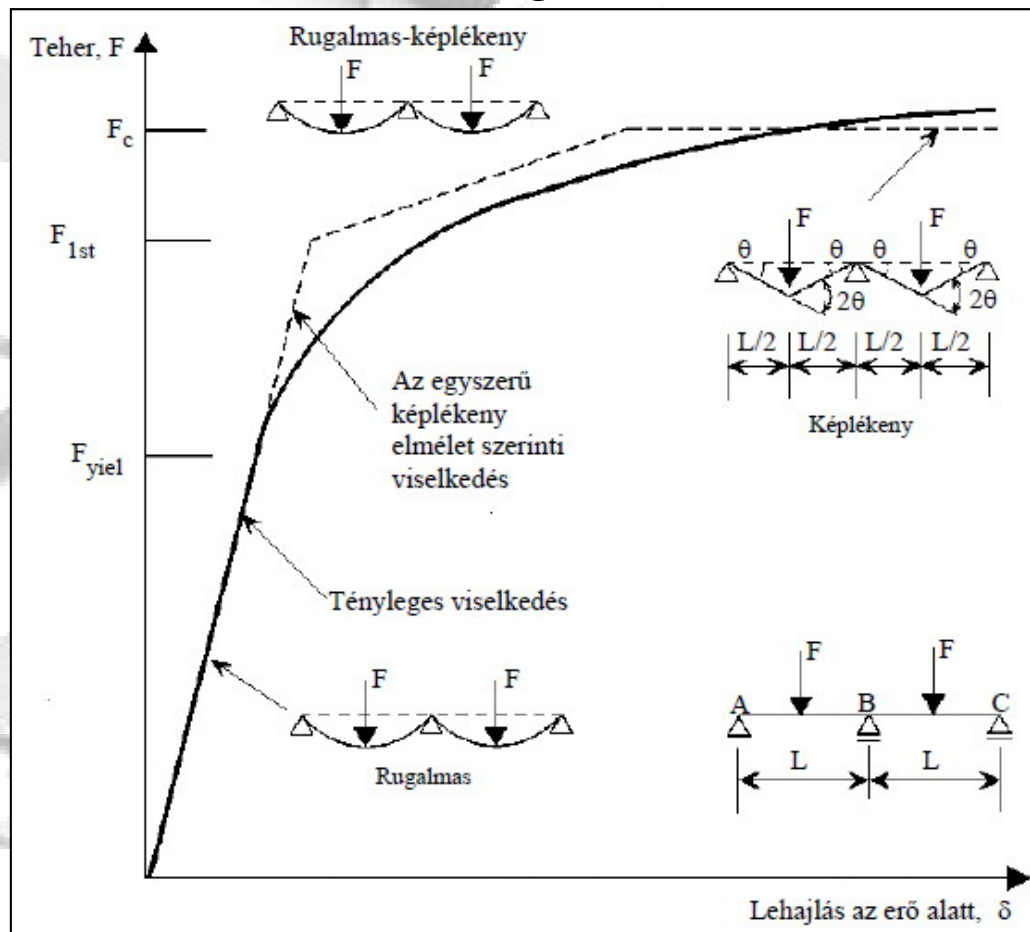
Lehetőség van arra, hogy az 1. vagy 2. osztályú övvel és 3. osztályú gerinccel rendelkező keresztmetszetet hajlításra 2. osztályúként vizsgáljuk (szemben a korábban tanultakkal, mely szerint a keresztmetszet ilyenkor 3. osztályú lenne). Ilyenkor azonban a gerinclemezt nem szabad teljes egészében figyelembe venni, hanem csak oly módon, hogy a gerinclemez nyomott szakaszában alul-felül egy-egy $20 \cdot \varepsilon \cdot t_w$ szélességű csonkot képezünk, és a gerinc nyomott szakaszának maradék részét elhagyjuk. (A húzott rész változatlanul teljes hatékonysággal működik.)



8. ábra. A helyettesítő 2. osztályú keresztmetszet felvétele az 1. vagy 2. osztályú övlemezzel és 3. osztályú gerinclemezzel rendelkező szelvény vizsgálatához [Dunai, Horváth 2007]

Meg kell jegyezni, hogy folytatólagos többtámaszú (statikailag határozatlan) gerendák esetén a szerkezet tönkremenetele nem feltétlenül következik be akkor, amikor a rugalmas vizsgálatból adódó maximális nyomaték eléri a tervezési nyomatéki ellenállást (9. ábra). Ugyanis – amennyiben rendelkezik a szükséges elfordulási képességgel – a maximális nyomaték helyén a keresztmetszet csuklóként kezd viselkedni, és miközben a csuklók fokozatosan kialakulnak, a nyomatékok eloszlása folyamatosan módosul az eredeti rugalmas eloszláshoz képest.

A lehetséges nyomatékátrendeződés következtében a szerkezet az első csuklót létrehozó terheknél nagyobbakat is képes elviselni, mindaddig, amíg elegendő számú csukló nem alakul ki a szerkezet képlékeny mechanizmussá válásához. Mindez a képlékeny tervezés körébe tartozik, amely megkívánja, hogy a keresztmetszetek elfordulhassanak a képlékeny nyomatéki ellenállás viselése közben, azaz 1. osztályba tartozó keresztmetszet szükséges.

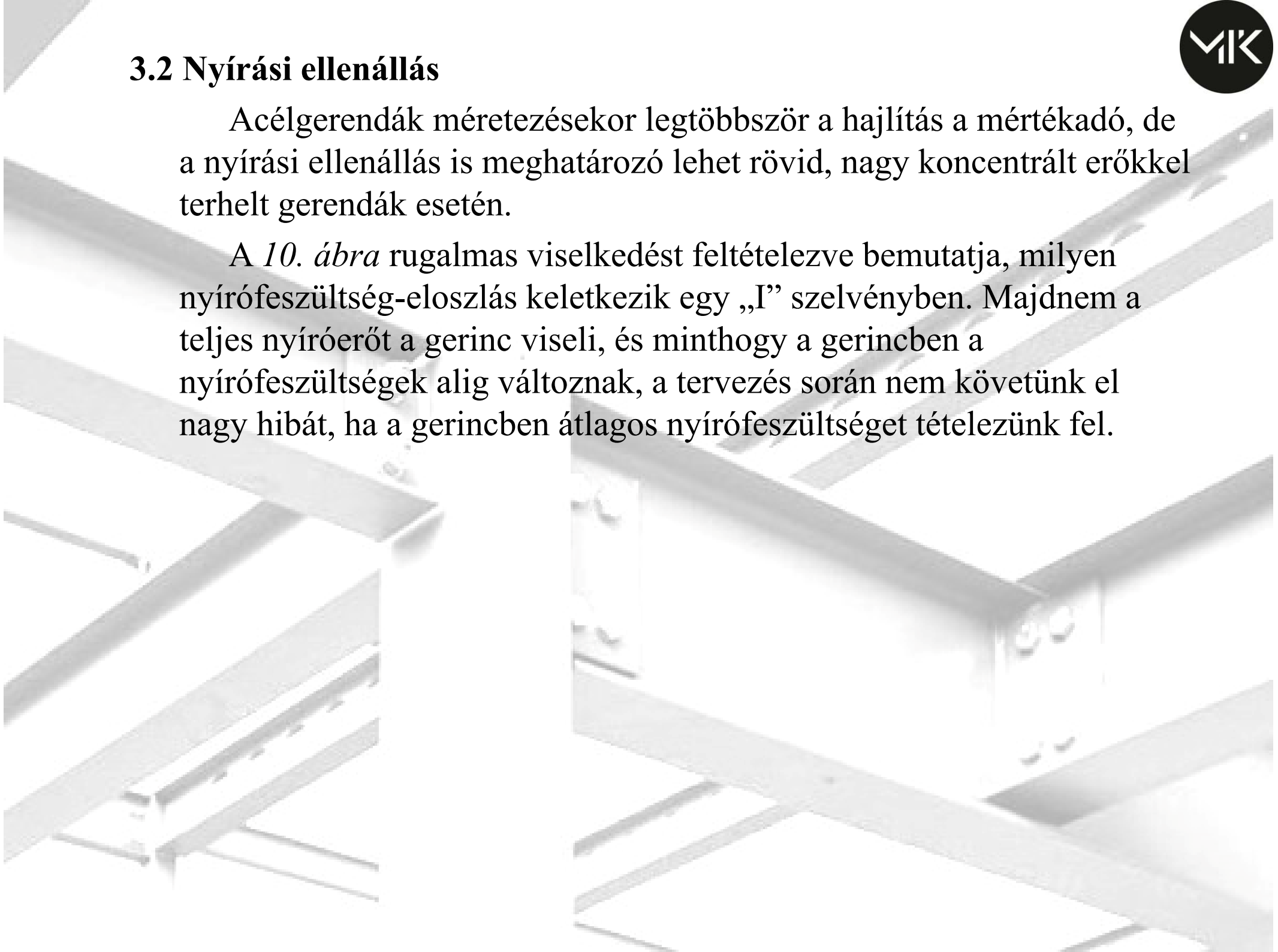


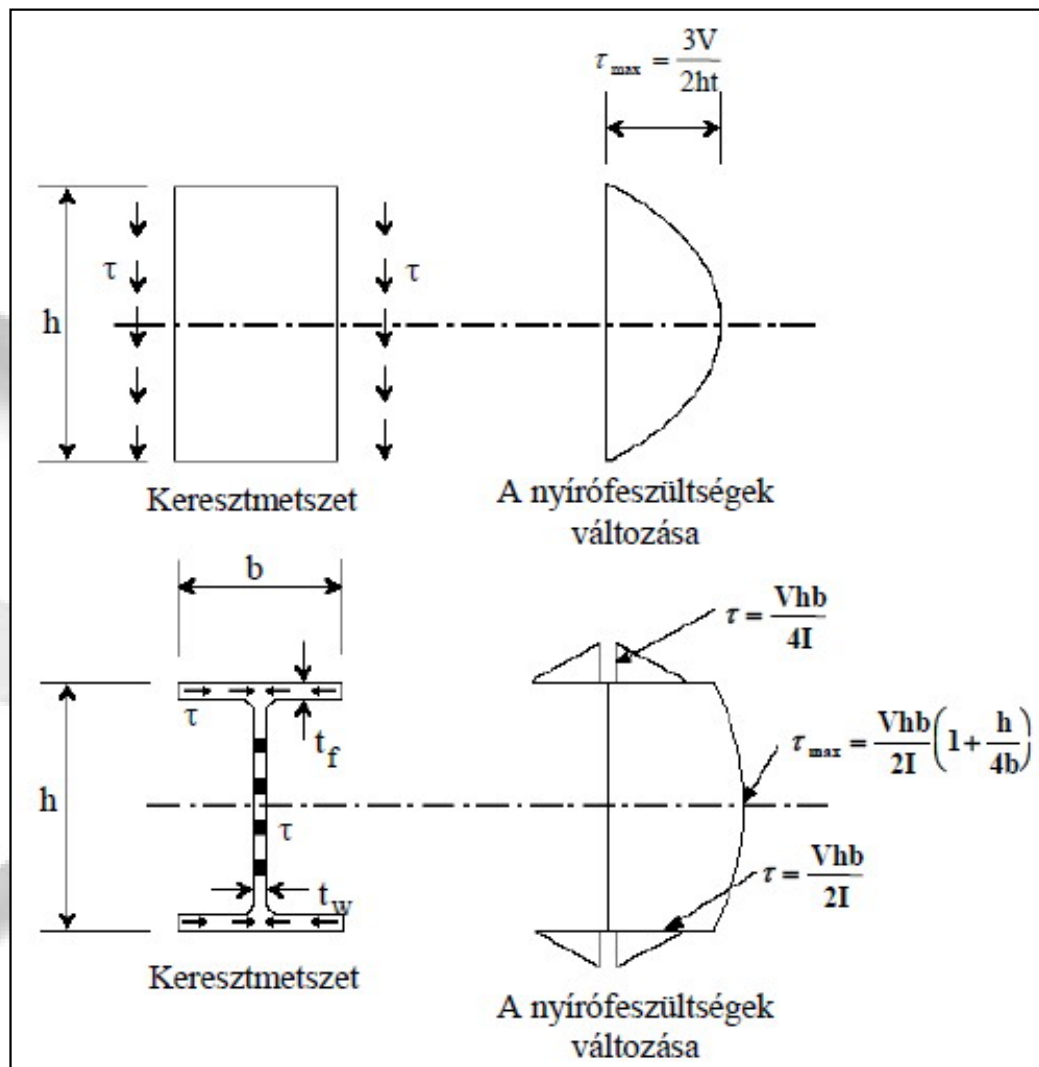
9. ábra. Statikailag határozatlan gerenda teheralakváltozás görbéje [Iványi M. 2007.]

3.2 Nyírási ellenállás

Acélgerendák méretezésekor legtöbbször a hajlítás a mértékadó, de a nyírási ellenállás is meghatározó lehet rövid, nagy koncentrált erővel terhelt gerendák esetén.

A *10. ábra* rugalmas viselkedést feltételezve bemutatja, milyen nyírófeszültség-eloszlás keletkezik egy „I” szelvényben. Majdnem a teljes nyíróerőt a gerinc viseli, és minthogy a gerincben a nyírófeszültségek alig változnak, a tervezés során nem követünk el nagy hibát, ha a gerincben átlagos nyírófeszültséget tételezünk fel.





10. ábra. A nyírófeszültségek eloszlása gerendákban [Iványi M. 2007.]

A keresztmetszet nyírási ellenállását a következő képlet alapján lehet meghatározni:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$$

ahol: $V_{pl,Rd}$ – a keresztmetszet nyírási ellenállása;

A_v – a nyírt keresztmetszeti terület;

f_y – az anyag folyáshatár értéke;

γ_{M0} – parciális tényező keresztmetszeti osztályokra (értéke 1,00).

A gerenda síkjában terhelt „I” szelvény esetén az A_v nyírt keresztmetszeti terület felvehető a gerinclemez területére, vagy pontosabban a *11. ábra a)* részén jelzett területre.

$$A_v = h_w \cdot t_w$$

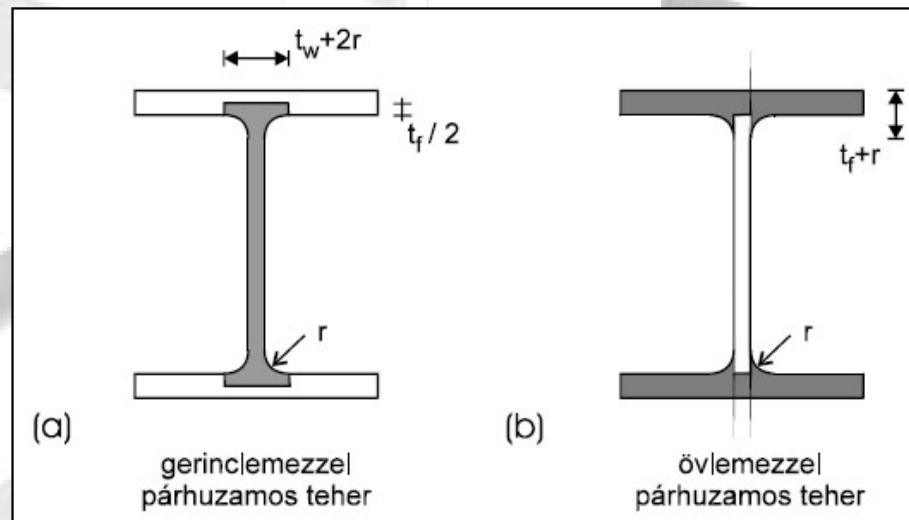
ahol: A_v – a nyírt keresztmetszeti terület;

h_w – az övlemezek belső élei közötti távolság, ami hegesztett profilnál a gerinclemez magasságával egyezik meg, míg hengerelt szelvénynél $h_w = h - (2 \cdot t_f)$ (t_f az öv vastagsága);

t_w – a gerinc vastagsága.

A gerenda síkjára merőlegesen terhelt „I” szelvény esetén az A_v nyírt keresztmetszeti terület a 11. ábra b) részén jelzett területtel egyezik meg.

Abban az esetben, ha a nyíróerő olyan vízszintes teherből származik, amely közvetlenül terheli valamelyik (pl. a felső) övlemezt, akkor csak a felső övlemeznek a 11. ábra jobb oldali ábráján jelölt területe dolgozik. (Ilyen nyíróerő például a darupályatartó felső övére a daruról átadódó vízszintes teher, az ún. oldallökő erő.)



11. ábra. A nyírt keresztmetszeti terület gerinclemezével párhuzamosan terhelt és övlemezével párhuzamosan terhelt hengerelt I szelvényre [Dunai, Horváth 2007]

Hegesztett keresztmetszetek esetén a nyírt keresztmetszeti terület a gerinclemez, illetve az övlemez(ek) területére kell felvenni, a hengerelt eset elve alapján.

Különböző kialakítású szelvények nyírt keresztmetszeti területének számítását mutatja az *10. táblázat*:

Keresztmetszet formája	Előállítási mód	Nyíróerő iránya	A_v
I és H profilok	hengerelt	gerinccel párhuzamos	$A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f$
U és C profilok	hengerelt	gerinccel párhuzamos	$A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + r) \cdot t_f$
T profilok	hengerelt	gerinccel párhuzamos	$0,9 \cdot (A - b \cdot t_f)$
I, H és zártszelvények	hegesztett	gerinccel párhuzamos	$\sum (h_w \cdot t_w)$
I, H, U, C és zártszelvények	hegesztett	övvel párhuzamos	$A - \sum (h_w \cdot t_w)$
Négyszög keresztmetszetű zártszelvény	hengerelt	a „h” magassággal párhuzamos	$\frac{A \cdot h}{b + h}$
Négyszög keresztmetszetű zártszelvény	hengerelt	a „b” szélességgel párhuzamos	$\frac{A \cdot b}{b + h}$
Kör keresztmetszetű zártszelvény, cső	bármely	bármely	$\frac{2 \cdot A}{\pi}$

10. táblázat. Nyírt keresztmetszeti terület számítása [Ádány 2007]



3.3 Nyomatéki ellenállás nagy nyíróerő esetén

Ha a nyíróerő tervezési értéke meghaladja a képlékeny nyírási ellenállás 50%-át, a tervezési nyomatéki ellenállást a nyíróerő és a nyomaték kölcsönhatása miatt csökkenteni kell. Feltételezzük, hogy a normál- és a nyírófeszültségek kombinációja esetén az acélanyag megfolyása a következő interakciós összefüggésnek megfelelően következik be:

$$\left(\frac{\sigma}{f_y}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_y}\right)^2 = 1$$

ahol: σ – normálfeszültség;

τ – nyírófeszültség;

f_y – az anyag folyáshatár értéke.



Jelentős egyidejű nyíróerőt viselő keresztmetszet képlékeny tervezési nyomatóki ellenállását úgy számítjuk ki, hogy a nyírt keresztmetszeti területen csökkentett szilárdságot veszünk figyelembe. A csökkentés a nyíróerő és a nyírási ellenállás hányadosának függvényében, a következő összefüggéssel definiált szorzótényező révén hajtjuk végre:

$$\rho = \left(\frac{2 \cdot V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2$$

ahol: V_{Ed} – nyíróerő;

$V_{pl,Rd}$ – nyírási ellenállás.

A nyírt keresztmetszeti területre vonatkozó csökkentett szilárdság ekkor $(1 - \rho) \cdot f_y$.



Nyíróerő jelenléte esetén ez $M_{v,Rd}$ csökkentett nyomatéki tervezési ellenállásra vezet, amely erős tengelyük körül hajlított „I” és „H” szelvényekre a következő összefüggéssel adható meg:

$$M_{v,Rd} = \left[W_{pl} - \frac{\rho \cdot A_v^2}{4 \cdot t_w} \right] \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

ahol: $M_{v,Ed}$ – csökkentett nyomatéki tervezési ellenállás;

W_{pl} – a keresztmetszet képlékeny keresztmetszeti modulusa;

ρ – csökkentő tényező;

A_v – a nyírt keresztmetszeti terület;

t_w – a gerinc vastagsága;

f_y – az anyag folyáshatár értéke;

γ_{M0} – parciális tényező keresztmetszeti osztályokra (értéke 1,00).

3.4 Kéttengelyű hajlítás (ferde hajlítás)

Mindkét keresztmetszeti tengelyük körül hajlított gerendák képlékeny semleges tengelye szöget zár be a tengelyekkel. E szög nagysága függ a nyomatékok arányától és a keresztmetszet pontos alakjától.

3.5 Használhatóság

Az előzőkben körvonalazott szilárdsági ellenőrzések mellett szükséges a gerendák használhatósági határállapotokban való ellenőrzése is. A szerkezet esztétikai megjelenését vagy hatékony használatát károsan befolyásoló, az emberi komfortérzetet rontó, vagy az épület burkolatait és felszerelését károsító jelenségek elkerülése érdekében korlátozni kell a gerendák alakváltozásait és rezgéseit.

Az elfogadható alakváltozási határokat a megbízó, a tervező és az illetékes hatóságok egyetértésével kell megállapítani. Iránymutatásként ajánlott lehajlási határértékeket tartalmaz a *11. táblázat*.

Feltételek	Határértékek	
	\square_{\max}	\square_2
Tetők általában	L/200	L/250
Gyakran, nem csak fenntartás céljából járt tetők	L/250	L/300
Födémek általában	L/250	L/300
Födémek és tetők, amelyek vakolatot vagy más rideg burkolatot vagy merev válaszfalakat hordoznak	L/250	L/350
Oszlopokat megtámasztó födécek (amennyiben a lehajlások hatását a teherbírási határállapotban végzett globális vizsgálatban nem vettük figyelembe)	L/400	L/500
Ha δ_{\max} rontja az épület esztétikai megjelenését	L/250	–

11. táblázat. Ajánlott lehajlási határértékek [Iványi M. 2007.]

A nagyközönség számára nyitott szerkezetek esetén fontos biztosítani, hogy a lengések és a rezgések ne legyenek olyan mértékűek, amelyek rontják a használók komfortérzetét. A szerkezetet ebből a szempontból dinamikai vizsgálatokkal lehet ellenőrizni, sok esetben azonban elegendő az alakváltozások korlátozása is.



A lakóépületek és az irodák födémjeinek legkisebb sajátfrekvenciáját például célszerű 3 Hz-ben korlátozni. Ez a feltétel teljesül, ha az esetleges terhekből származó lehajlás kisebb, mint 28 mm. Tornatermek és tánctermekek födémjeinek legkisebb sajátfrekvenciája ne legyen kisebb 5 Hz-nél, amit a 10 mm-es lehajlási korlát biztosít.

A lapos tetőkön (lapos tetőnek szokás tekinteni minden 5°-nál kisebb hajlású tetőt) a tető lehajlása következtében a csapadékvíz összegyűlhet. Ez az oka annak, hogy gondosan ellenőrizni kell a tető lehajlásait, figyelembe véve az építési pontatlanságokat, az alapozás süllyedéseit, a tetőszerkezet lehajlásait stb.



Felhasznált irodalom

DR. IVÁNYI MIKLÓS: *Acélszerkezetek I-II. Oktatási segédlet.* Elektronikus jegyzet, Pécs, 2007

DR. IVÁNYI MIKLÓS: *Acélszerkezetek tervezése Eurocode 3 szerint.* Elektronikus jegyzet, Budapest, é.n.

DR. IVÁNYI MIKLÓS: *TÁBLÁZATOK Acélszerkezetek méretezéséhez az Eurocode 3 szerint.* Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2004.

DUNAI LÁSZLÓ, HORVÁTH LÁSZLÓ, KOVÁCS NAUZIKA, VARGA GÉZA, VERŐCI BÉLA, VIGH L. GERGELY: *Acélszerkezetek méretezése Eurocode 3 szerint, gyakorlati útmutató.* Budapest, 2007

DUNAI LÁSZLÓ, HORVÁTH LÁSZLÓ, KOVÁCS NAUZIKA, VARGA GÉZA, VERŐCI BÉLA, VIGH L. GERGELY: *Acélszerkezetek méretezése Eurocode 3 szerint, gyakorlati útmutató.* Budapest, 2009