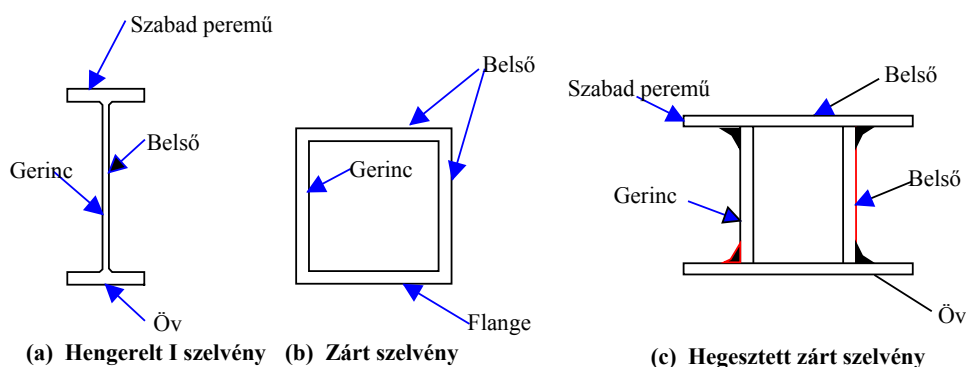


A.8. Lemezhorpadás és a keresztmetszetek osztályozása

A.8.1. Bevezetés

Az acélszerkezetek keresztmetszeit, legyenek akár hengerelték vagy hegesztettek, önálló lemezelemek együttesének lehet tekinteni, melyek közül egyesek *belső*k (pl. nyitott szelvényű gerendák gerincei vagy zárt szelvények övei), míg mások *szabadperemű*ek (pl. nyitott szelvények övei vagy szögacélok szárai) – lásd az *A.8.1. ábrát*. Míthogy ezek a lemezelemek szélességükhöz viszonyítva vékonyak, nyomófeszültség (az egész keresztmetszetre ható nyomóerő és/vagy hajlítás) következtében horpadás alakulhat ki bennük. A keresztmetszet bármely lemezelemének horpadásra való hajlma korlátozhatja a nyomóerővel vagy hajlító nyomatékkal szembeni teherbírást azáltal, hogy megakadályozza a folyási feszültség elérését. A horpadás hatására kialakuló korai tönkremenetel megakadályozása megvalósítható a keresztmetszet önálló lemezelemei szélesség–vastagság arányának korlátozásával. Ez az alapja a keresztmetszetek osztályozásának.



A.8.1. ábra: Belső és szabad peremű elemek

A.8.2. Osztályozás

Az EC3 négy keresztmetszeti osztályt definiál. Egy adott keresztmetszet osztálya lemezelemeinek karcsúságától (melyet a szélesség–vastagsággal adunk meg) és a nyomófeszültségek eloszlásától (egyenletes vagy lineárisan változó) függ. Az osztályokat a hajlító nyomatékkal szembeni viselkedés követelményei alapján adjuk meg.

- Az **1. osztályba** azok a keresztmetszetek tartoznak, melyekben a képlékeny vizsgálat által megkívánt elfordulási képességű képlékeny csuklók kialakulhatnak.
- A **2. osztályba** azok a keresztmetszetek tartoznak, amelyekben ugyan a képlékeny nyomatéki ellenállás ki tud alakulni, de az elfordulási képességük korlátozott, következésképpen nem alkalmazhatók olyan szerkezetekben, amelyeket képlékeny vizsgálat alapján tervezünk.
- A **3. osztályba** azok a keresztmetszetek tartoznak, amelyekben a nyomott szélső szálaban számított feszültség elérheti a folyási szilárdságot, de a horpadás megakadályozza a képlékeny nyomatéki teherbírás kifejlődését.
- A **4. osztályba** azok a keresztmetszetek tartoznak, amelyekben a lemezhorpadás korlátozza a nyomatéki ellenállást (vagy normálerővel terhelt rudak esetén a nyomási ellenállást). Ekkor a horpadás hatását közvetlenül kell figyelembe venni.

Az *A.8.1. táblázat* összefoglalja a keresztmetszeti osztályokat a viselkedés, a nyomatéki teherbírás és az elfordulási képesség szempontjából.

A.8.3. Nyomott lemezelemek viselkedése

Egy vékony, sík, téglalap alakú, rövidebbik oldalai mentén nyomóerővel terhelt lemez rugalmas horpadáshoz tartozó σ_{cr} kritikus feszültsége az alábbi képlettel adható meg:

$$\sigma_{cr} = \frac{k_{\square} \pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2, \quad (\text{A.8.1})$$

ahol

- k_{\square} a lemezhorpadási tényező, amely figyelembe veszi az élek megtámasztási viszonyait, a feszültségeloszlást és a lemez oldalainak arányát (lásd a *A.8.2.a ábrát*);
- ν a Poisson-tényező;
- E a rugalmassági modulus.

A rugalmas horpadáshoz tartozó σ_{cr} kritikus feszültség tehát fordítottan arányos $(b/t)^2$ -tel, analóg módon az oszlopkihajlás L/i karcsúságával.

Nyitott keresztmetszetek tartalmaznak olyan lemezeket, amelyek nagyon hosszúak a szélességükhöz viszonyítva, és hosszanti élük mentén nincsenek megtámasztva (lásd a *A.8.2.b ábrát*). Az ilyen lemezek horpadt alakját szemlélteti a *A.8.2.c ábra*. Az ilyen hosszú, vékony, szabadperemű elemek oldalarány-tényezője és horpadási tényezője közötti összefüggést mutatja a *A.8.2.d ábra*, amelyből világosan látszik, hogy az oldalarány-tényező növekedésével a horpadási tényező 0,425-höz mint határértékhez tart.

A 3. vagy jobb (1., 2.) osztályba tartozó keresztmetszetek rugalmas horpadáshoz tartozó kritikus feszültsége (σ_{cr}) meghaladja az f_y folyáshatárt. Ez teljesül, ha (az (1) egyenletben ν helyére 0,3-at helyettesítve és átrendezve):

$$b/t < 0,92(k_{\square} E / f_y)^{0,5} \quad (\text{A.8.2})$$

Ez az összefüggés általános érvényű, minthogy a k_{\square} horpadási tényező tartalmazza mind a feszültségeloszlás, mind a peremfeltételek, mind az oldalarány-tényező hatását. A *A.8.2. táblázat* különböző rugalmas feszültségeloszlások esetére megadja a k_{\square} horpadási tényező értékét belső és szabad peremű lemezelemekre, nagy oldalarány-tényezők (azaz hosszú lemezsíkok) feltételezésével.

A.8.1. táblázat: Keresztmetszetek osztályozása a nyomatéki teherbírás és az elfordulási képesség alapján

| A viselkedés modellje | Nyomatéki ellenállás | Elfordulási képesség | Osztály |
|-----------------------|--|----------------------|---------|
| | <p>A teljes keresztmetszet képlékeny nyomatéka</p> | <p>Elegendő</p> | 1 |
| | <p>A teljes keresztmetszet képlékeny nyomatéka</p> | <p>Korlátozott</p> | 2 |
| | <p>A teljes keresztmetszet rugalmas nyomatéka</p> | <p>Nincs</p> | 3 |
| | <p>A hatékony keresztmetszet képlékeny nyomatéka</p> | <p>Nincs</p> | 4 |

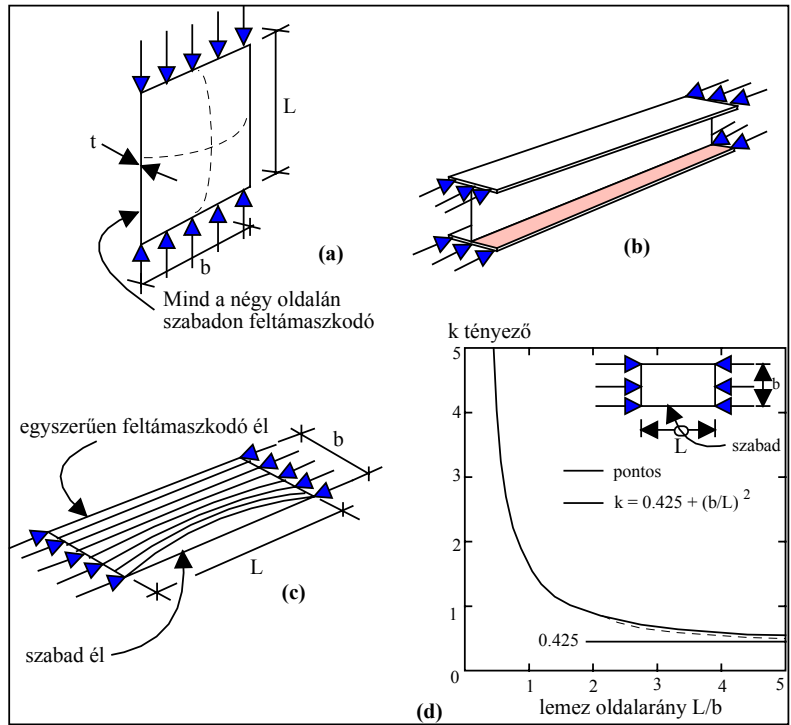
M_{el} a keresztmetszet rugalmas nyomatéki ellenállása

M_{pl} a keresztmetszet képlékeny nyomatéki ellenállása

M a terhelő nyomaték

ϕ a szelvény elfordulása (görbülete)

ϕ_{pl} az az elfordulás (görbület), amely a képlékeny feszültségeloszlás kialakulásához szükséges



A.8.2. ábra: Nyomott lemezelemek viselkedése

A.8.2. táblázat: Horpadási tényezők és feszültségeloszlás

I

II

III

□□ maximális nyomófeszültség

| $\psi \square \square_2 / \square_1$ | +1 | $1 > \psi > 0$ | 0 | $0 > \psi \square_1$ | -1 |
|--------------------------------------|------|---|------|---|------|
| 1. eset: belső lemezelem | 4,0 | $8,02 / (1,05 + \psi)$ | 7,81 | $7,81 + 6,29 \psi \square \square \square \psi \square$ | |
| 2. eset: szabad peremű lemezelem | 0,43 | $0,57 - 0,21 \tilde{\psi} \square \square \psi \square$ | 0,57 | $0,57 - 0,21 \tilde{\psi} \square \square \psi \square$ | 0,85 |
| 3. eset: szabad peremű lemezelem | 0,43 | $0,578 / (\tilde{\psi} \square \square \square)$ | 1,70 | $1,7 - 5 \psi \square_1 \square \psi \square$ | 23,8 |

A tökéletes, egyenletes nyomásnak kitett lemez rugalmas-képlékeny viselkedése jól ábrázolható egy normalizált teher-karcsúság diagrammal, ahol az \bar{N}_p normalizált nyomási ellenállás és a $\bar{\lambda}_p$ normalizált lemezkarcsúság az alábbi képletekkel adható meg:

$$\bar{N}_p = \sigma_{ult} / f_y ; \tag{A.8.3}$$

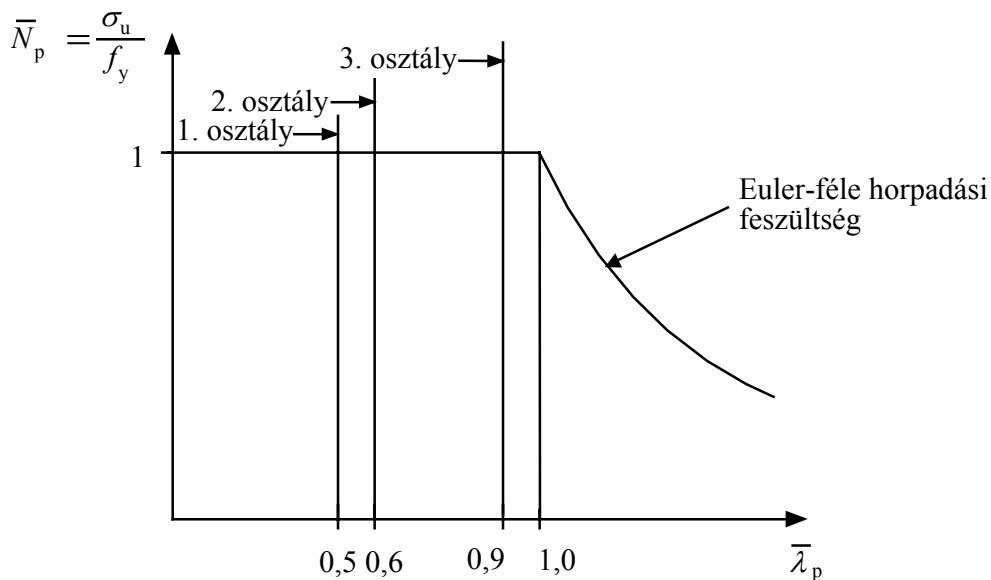
$$\bar{\lambda}_p = (f_y / \sigma_{cr})^{0,5}. \quad (\text{A.8.4})$$

Az (1) egyenletet (4)-be helyettesítve, és f_y helyére $235 / \square^2$ -et írva (hogy a kifejezés használható legyen bármely anyagminőségre), a $\bar{\lambda}_p$ redukált lemezkarcúság kifejezhető az alábbi formában:

$$\bar{\lambda}_p = \left(\frac{f_y}{\sigma_{cr}} \right)^{0,5} = \left(\frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} \right), \quad (\text{A.8.5})$$

ahol \bar{b} a keresztmetszet és a lemezelem típusának megfelelő szélesség.

A A.8.3. ábra az \bar{N}_p és a $\bar{\lambda}_p$ közötti összefüggést mutatja. Egynél kisebb redukált lemezkarcúság esetén a normalizált nyomási ellenállás egységnyi, ami azt jelenti, hogy a lemezben kialakulhat a teljes képlékenyedés. Egynél nagyobb $\bar{\lambda}_p$ értékek esetén a lemezkarcúság növekedésével az \bar{N}_p csökken, annak megfelelően, hogy a maximális feszültséget a rugalmas horpadás kritikus feszültsége (σ_{cr}) korlátozza.



A.8.3. ábra: A rugalmas-képlékeny horpadási feszültség ábrázolása dimenzió nélküli formában

A.8.1. példa: Vezessük le a redukált lemezkarcúság képletét.

- Ismeretes, hogy:

$$\bar{\lambda}_p = (f_y / \sigma_{cr})^{0,5}.$$

- Rajzoljuk fel az $\bar{N}_p - \bar{\lambda}_p$ összefüggést!
- Figyelembe véve a feszültség normalizálására vonatkozó $\epsilon = (235/f_y)^{0,5}$ kifejezést, az (1) egyenletből:

$$\sigma_{cr} = \frac{k_\sigma \pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2;$$

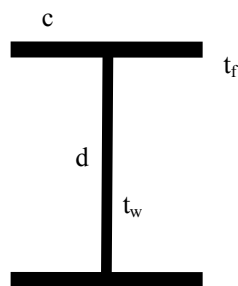
az (5) egyenlet levezethető.–

A keresztmetszetekben lévő lemezek nem tökéletesen síkok és az acél sem rugalmas-tökéletesen képlékeny, hanem felkeményedő. Ezek a tényezők, együtt a lemezek posztkritikus viselkedésével (vagyis avval a jelenséggel, hogy képesek a rugalmas horpadást okozó tehernél nagyobb teher viselésére is), megkívánják $\bar{\lambda}_p$ értékeinek csökkentését, hogy a horpadás csak később, a szükséges alakváltozási állapot (feszültségállapot) – folyás a szélső szálban vagy az egész keresztmetszet képlékeny állapota – elérése után következzen be. Az EC3 az alábbi redukált karcsúságokat használja az osztályozásra:

- **1. osztály:** $\bar{\lambda}_p < 0,5$;
- **2. osztály:** $\bar{\lambda}_p < 0,6$;
- **3. osztály:** $\bar{\lambda}_p < 0,9$ lineárisan változó feszültségeloszlás esetén, és 0,74 tisztán nyomott keresztmetszetekre.

Behelyettesítve a k_{\square} tényező megfelelő értékeit az (5) egyenletbe, továbbá figyelembe véve $\bar{\lambda}_p$ különböző osztályokra érvényes értékeit, kiszámolhatók a b/t tényező határértékei. A A.8.3. táblázat megadja ezeket a határértékeket hengerelt szelvényekre, erős tengely körüli hajlítás vagy nyomás esetére. A hegesztett szelvényeket hasonlóan lehet kezelni, de a b/t és d/t arányokra vonatkozó korlátokat csökkenteni kell a hegesztés okozta nagyobb maradó feszültségek káros hatása miatt.

A.8.3. táblázat: Maximális karcsúságok hengerelt szelvények lemezelemeire, nyomás és hajlítás esetén



| Lemezelem | 1. osztály | 2. osztály | 3. osztály | |
|------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|--|
| Öv | $c / t_f = 10 \square$ | $c / t_f = 11 \square$ | $c / t_f = 15 \square$ | |
| Hajlított gerinc | $d / t_w = 72 \square$ | $d / t_w = 83 \square$ | $d / t_w = 124 \square$ | |
| Nyomott gerinc | $d / t_w = 33 \square$ | $d / t_w = 38 \square$ | $d / t_w = 42 \square$ | |

A TÁBLÁZATOK, melyek az EC3 kivonatai, megadják az 1–3. osztályok nyomott elemeire vonatkozó határértékeket. Ha egy keresztmetszet bármely lemezeleme nem teljesíti a 3. osztályra megadott feltételt, az egész keresztmetszet 4. osztályúnak minősül (általánosan használt elnevezés szerint: „karcsú”), és a tervezés során a hatékony keresztmetszet alkalmazásával figyelembe kell venni a horpadást.

A.8.4. A hatékony szélességek módszere 4. osztályba tartozó keresztmetszetek tervezésére

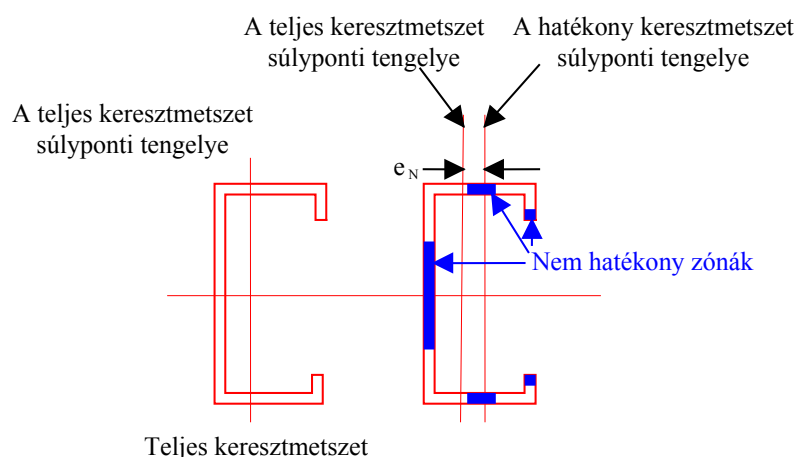
Azok a keresztmetszetek, amelyeknek lemezelemei között 4. osztályba tartozóak is vannak, helyettesíthetők egy hatékony keresztmetszettel, amelyet úgy kapunk, hogy a teljes keresztmetszetből lyukakat vonunk le a horpadások helyén. Ezután a tervezés a 3. osztályú keresztmetszetekhez hasonló módon történik, a szélső szál folyása által meghatározott rugalmas keresztmetszeti ellenállás alkalmazásával. A nyomott elemek hatékony szélessége egy ρ csökkentő tényező alkalmazásával számolható, amely a redukált lemezkarcsúságtól függ (amely viszont a k_{\square} horpadási tényezőn keresztül függ a feszültségeloszlástól és az elem megtámasztási viszonyaitól), az alábbiak szerint:

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,22}{\bar{\lambda}_p^2} \quad (\text{A.8.6})$$

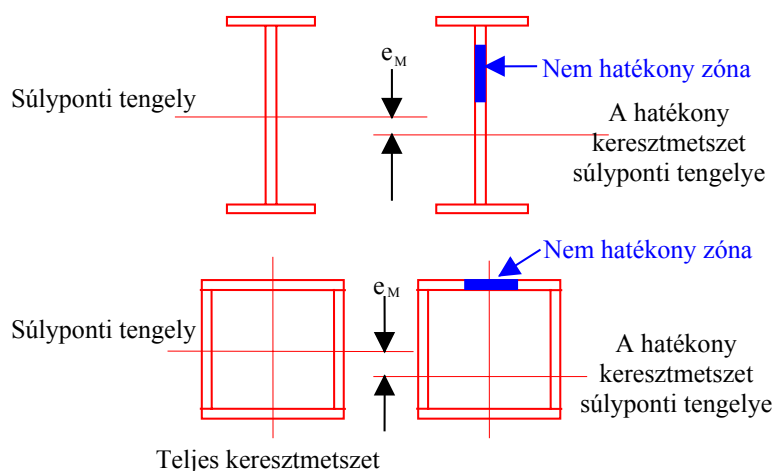
A ρ csökkentő tényező ezután alkalmazható szabad peremű vagy belső elemekre, a TÁBLÁZATOK szerint. A (6) egyenlet az eredeti, *Winkler*-től származó kifejezése az EC 3 kissé módosított formulát használ. A *A.8.4. ábra* példákat mutat nyomott és hajlított rudak hatékony keresztmetszeteire. Vegyük észre, hogy a hatékony keresztmetszet súlyvonala elvándorolhat a teljes keresztmetszetéhez képest: egy hajlított rúd keresztmetszeti jellemzőinek számításánál ezt figyelembe is kell venni. Normálerővel terhelt rudak esetén a súlyvonal elvándorlása nyomatókót okoz, amelyet a rúd tervezésében számításba kell venni.

A.8.2. példa: Vezessük le vázlatosan az EC3 2. osztályra vonatkozó karcsúsági tényezőit hengerelt szelvényekre, nyomás és hajlítás esetén

- A *A.8.3. ábra* szerint 2. osztályú hengerelt szelvények esetén a redukált lemezkarcsúságnak a következő feltételt kell kielégítenie: $\bar{\lambda}_p < 0,6$.
- Első lépésben k_{\square} megfelelő értékeinek az (5) egyenletbe történő behelyettesítésével, és $\bar{\lambda}_p$ felhasználásával meghatározzuk az övre vonatkozó b/t tényezőket.
- Ezután elvégezzük ugyanezt a nyomott gerinc d/t_w tényezőjére.
- Ezután meghatározzuk egy megadott keresztmetszet osztályát.



(a) 4. osztályú keresztmetszetek - normálerő



(b) 4. osztályú keresztmetszetek - hajlítónyomaték

A.8.4. ábra: Hatékony keresztmetszetek 4. osztályú nyomott és hajlított szelvényekre