

A.11. Nyomott rudak

A.11.1. Bevezetés

A „nyomott szerkezeti elem” fogalmat általában olyan szerkezeti elemek jelölésére használjuk, amelyekre csak tengelyirányú nyomóerő hat. Ez lehet speciális terhelésű oszlop, de általában mindkét végén csuklós megtámasztású nyomott rudat értünk alatta, mely rácsos tartó vagy merevítő rácsoszás eleme. Ha a tengelyirányú terhelés mellett jelentős hajlító nyomaték is működik, nyomott-hajlított elemről beszélünk.

Ez az előadás nyomott elemekkel foglalkozik, tehát csak kevésbé vonatkozik valóságos oszlopokra, amelyek esetén a tengelyirányú terhek külpontosság és az úgynevezett keresztirányú, a szerkezeti elem tengelyére merőleges erők általában nem elhanyagolhatóak. Mindazonáltal a nyomott elemek olyan alapesetet jelentenek, amelyek segítségével könnyebben megérthetőek a nyomás hatásai a nyomott-hajlított elemek vizsgálatában. Minthogy a legtöbb nyomott acélelem meglehetősen karcsú, bennük kihajlás következhet be. Az előadás vázlatosan ismerteti a különböző típusú nyomott elemeket, megmagyarázza mind a zömök, mind a karcsú oszlopok viselkedését, és megadja a karcsú oszlopok méretezésére használt kihajlási görbéket.

A.11.2. Zömök oszlopok

A zömök oszlopoknak olyan kicsiny a karcsúságuk, hogy az elem globális stabilitásvesztése nem következik be. Ilyen esetekben az elem nyomási ellenállását a keresztmetszet nyomási ellenállása határozza meg, amely a keresztmetszet osztályának függvénye. Az 1., 2. és 3. osztályba tartozó keresztmetszeteknél nem alakul ki horpadás, tehát a tervezési nyomási ellenállás a képlékeny tervezési ellenállással egyezik meg:

$$N_{c,Rd} = N_{pl,Rd} = A f_y / \gamma_{M1}. \quad (\text{A.11.1})$$

A 4. osztályba tartozó keresztmetszeteknél valamely (vagy egyszerre több), a szelvényt alkotó lemezelembe horpadás következik be, ami megakadályozza a teljes folyást okozó teher elérését, így a nyomási tervezési ellenállás a horpadási ellenállásra korlátozódik:

$$N_{c,Rd} = N_{o,Rd} = A_{eff} f_y / \gamma_{M1}, \quad (\text{A.11.2})$$

ahol A_{eff} a hatékony keresztmetszeti terület

A.11.3. Karcsú acéloszlopok

Karcsúságuktól függően az oszlopok kétféleképpen viselkednek. A nagy karcsúságú oszlopok gyakorlatilag rugalmas kihajlás formájában mennek tönkre, míg a közepes karcsúságú oszlopok viselkedése nagyban függ az imperfekcióktól.

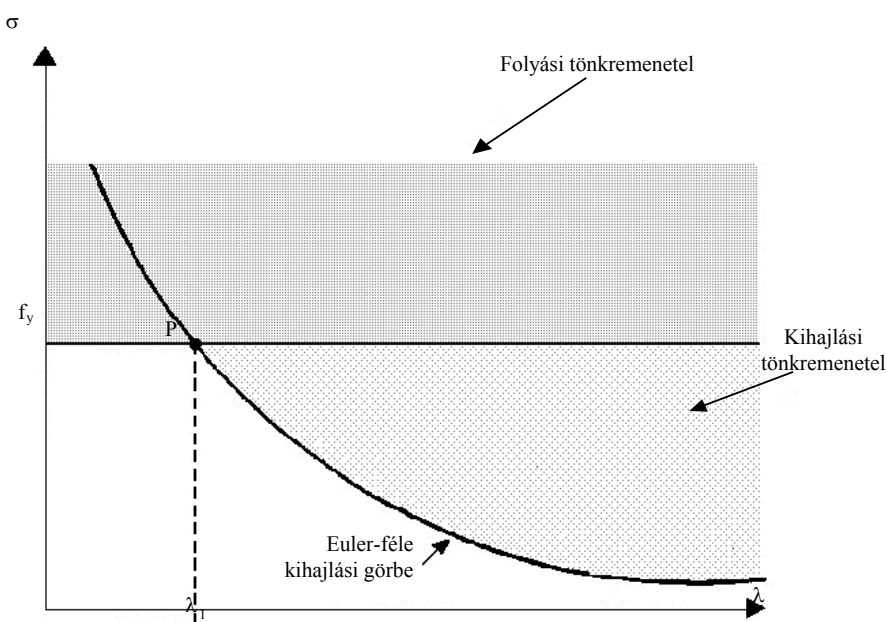
Ha a kritikus hosszt ℓ_{cr} -rel jelöljük, az Euler-féle kritikus erő a következőképpen adható meg:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{\ell_{cr}^2}, \quad (\text{A.11.3})$$

és definiálni lehet az Euler-féle kritikus feszültséget is:

$$\sigma_{cr} = \frac{N_{cr}}{A} = \frac{\pi^2 EI}{\ell_{cr}^2 A}. \quad (\text{A.11.4})$$

Bevezetve az inerciasugárra ($i = (I/A)^{0.5}$) és a mértékadó kihajlási módhoz tartozó karcsúságra ($\lambda = \ell_{cr}/i$) vonatkozó összefüggéseket, a (4) egyenlet a következő formában írható:



A.11.1. ábra: Az Euler-féle kihajlási görbe és a tönkremeneteli módok

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (\text{A.11.5})$$

Ha egy diagramon ábrázoljuk $\sigma_{cr} - \lambda$ függvénykapcsolatot, és $\sigma = f_y$ -nál berajzoljuk a teljes képlékenyedést jelképező vízszintes vonalat, az ábrán három idealizált zóna alakul ki, melyek a kihajlási tönkremenetelt, a folyási tönkremenetelt és a biztonságos viselkedést jelképezik (A.11.1. ábra).

A két vonal P metszéspontjának ordinátája adja meg a karcsúságnak azt az elméleti maximális értékét, amelynél az oszlop a folyáshatárig terhelhető. Ez a határkarcsúság, amikor tehát σ_{cr} egyenlő az acél folyáshatárával, az alábbi módon adható meg:

$$\lambda_1 = \lambda \cdot (E / f_y)^{0.5} = 93,9 \lambda \quad (\text{A.11.6})$$

ahol

$$\lambda = (235 / f_y)^{0.5} \quad (\text{A.11.7})$$

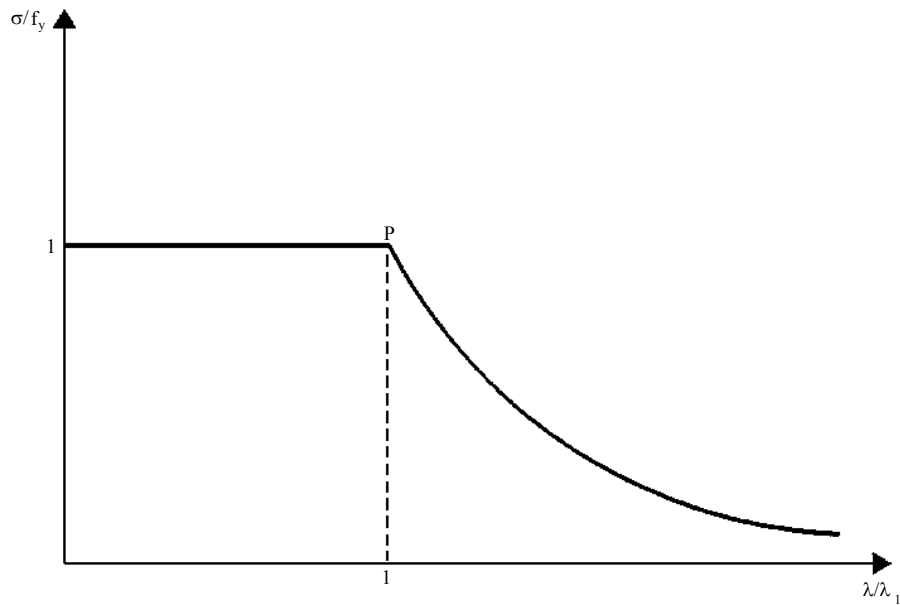
vagyis S 235 acélminőség esetén λ_1 értéke 93,9; S355 acélokra pedig és 76,4.

1. példa: Ellenőrizzük λ_1 értékét S275 és S355 acélminőség esetén $E = 210 \text{ kN/mm}^2$ feltételezésével.

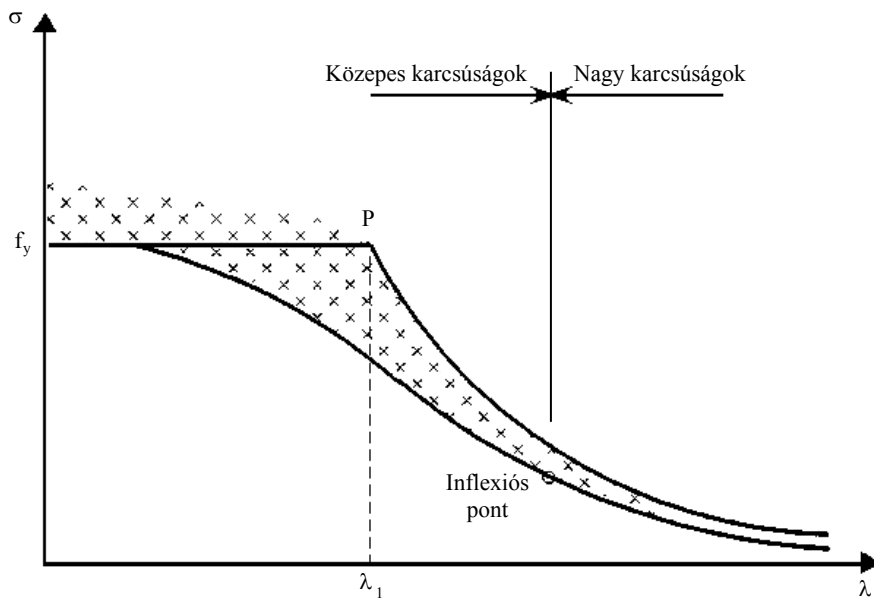
Az A.11.1. ábra dimenzió nélküli formában is megrajzolható (A.11.2. ábra), ha az Euler-féle kritikus feszültséget elosztjuk a folyáshatárral (σ_{cr}/f_y), a karcsúságot pedig a határkarcsúsággal (λ/λ_1). Ez azért hasznos, mert így egyazon ábra lesz használható különféle karcsúságú és anyagminőségű oszlopokra.

Az acéloszlopok tényleges viselkedése jelentős mértékben különbözik a fent leírt idealizált viselkedéstől. Az oszlopok általában képlékeny kihajlással mennek tönkre, az Euler-féle kihajlási teher elérése előtt, és pedig a valóságos elemek különféle imperfekciói (kezdeti görbesége, gyártási sajátfeszültségei, a terhelőerő külpontossága és az anyag felkeményedése) miatt. Az imperfekciók mind hatással vannak a kihajlásra, következésképpen az oszlop teherbírására is. A tényleges oszlopokon végzett kísérleti vizsgálatok a A.11.3. ábrán bemutatott eredményeket adják.

A tényleges viselkedés a közepes karcsúságok tartományában nagyobb eltéréseket mutat az elméleti görbétől, mint nagy karcsúságok esetén. Közepes karcsúságú rudakban (a gyakorlatban előforduló oszlopok leggyakrabban ilyenek) a szerkezeti imperfekciók hatása jelentős, így ezeket alkalmas módon figyelembe kell venni. A teherbírás az elméleti értékhez képest legnagyobb mértékben a λ_1 határkarcsúság környezetében csökken. Az alsó görbe a kísérleti eredmények statisztikai feldolgozásából származik, és a teher még biztonságos határát jelöli.



A.11.2. ábra: Dimenzió nélküli kihajlási görbe

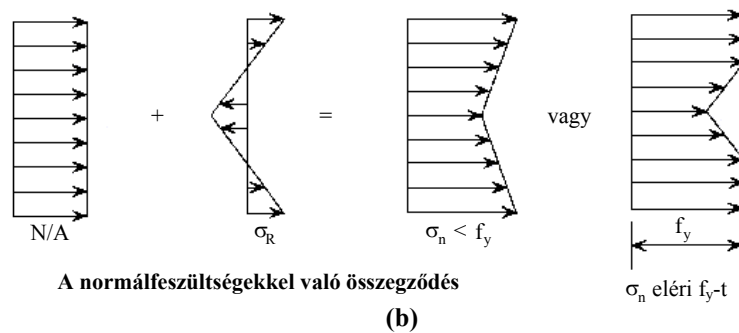
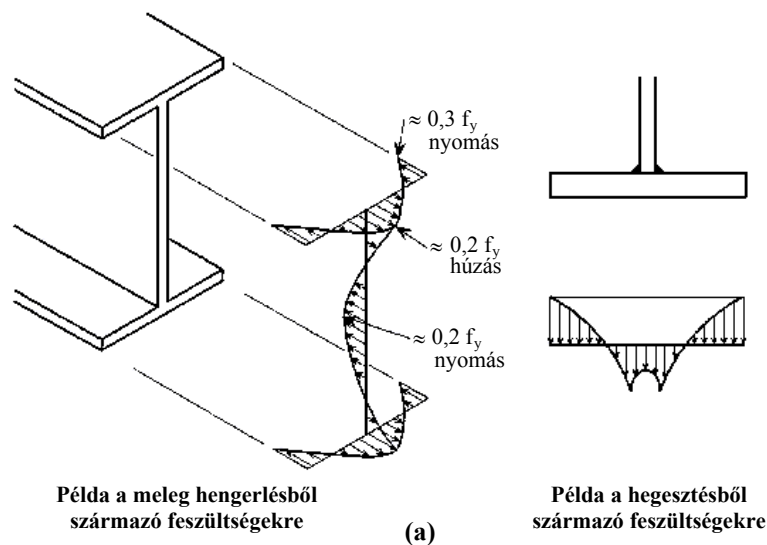


A.11.3. ábra: Tényleges oszlopkísérletek eredményei és a kihajlási görbék

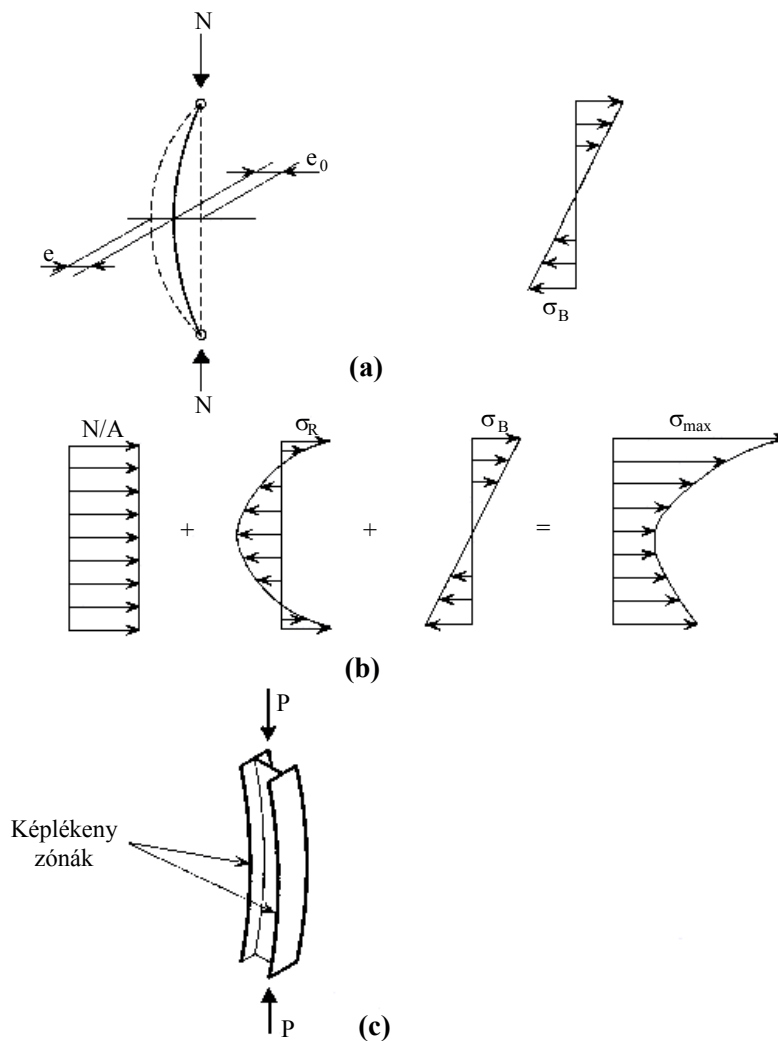
Karcsúnak tekinthető egy oszlop akkor, ha karcsúsága nagyobb, mint a A.11.3. ábra alsó határoló görbéjének inflexiós pontjához tartozó karcsúság. A teherbírás ebben az esetben közel van az Euler-féle kritikus teherhez (N_{cr}), és így független a folyáshatártól.

Az Euler-féle elmélettől legjobban a közepes karcsúságú oszlopok viselkedése tér el. Amikor a kihajlás bekövetkezik, a keresztmetszetben a feszültség már egyes helyeken elérte a folyáshatárt, így a teherbírás nem egyszerűen csak a karcsúság függvénye, hanem minél jelentősebbek az imperfekciók, annál nagyobb az eltérés a tényleges és az elméleti viselkedés között. Ezen oszlopok viselkedésére a kezdeti görbeségnek és gyártási sajátfeszültségeknek van a legnagyobb hatása. A gyártási sajátfeszültségek keresztmetszet mentén való eloszlása többféle is lehet (A.11.4. ábra). A gyártási sajátfeszültségek és a terhelésből származó normálfeszültségek együtt a keresztmetszet megfolyását eredményezik, aminek következtében csökken az a terület, amely a tengelyirányú terhek viselésében hatékonyan részt tud venni.

Az e_0 kezdeti görbeség hajlítónyomatékot eredményez. Amikor a hajlításból származó σ_B maximális feszültség (A.11.5.a ábra) összegződik a σ_R gyártási sajátfeszültségekkel, az A.11.5.b ábrán látható feszültségeloszlás alakul ki. Ha σ_{max} nagyobbra adódik, mint a folyáshatár, akkor a tényleges feszültségeloszlás részlegesen képlékeny lesz, és a szerkezeti elem bizonyos részei folyási állapotba kerülnek (A.11.5.c ábra).



A.11.4. ábra: A gyártási sajátfeszültségek eloszlása



A.11.5. ábra: Részlegesen megfolyt nyomott szerkezeti elem

A.11.4.A $\bar{\lambda}$ redukált karcsúság

Az EC3 a $\bar{\lambda}$ redukált karcsúságot a következőképpen definiálja:

$$\bar{\lambda} = \left[\beta_A \frac{Af_y}{N_{cr}} \right]^{0,5}, \quad (\text{A.11.8})$$

amit az (5) és (6) egyenletek felhasználásával a következő egyszerűbb formában is írhatunk:

$$\bar{\lambda} = \left(\frac{\lambda}{\lambda_1} \right) (\beta_A)^{0,5}, \quad (\text{A.11.9})$$

ahol 1., 2. és 3. osztályba tartozó keresztmetszetek esetén $\beta_A = 1$, míg 4. osztályú keresztmetszetekre $\beta_A = A_{\text{eff}} / A$.

A.11.5. Az ECCS kihajlási görbái

Az ECCS kihajlási görbái több mint ezer különböző típusú (I, H, T és zárt szelvényű), különböző (55 és 160 közötti) karcsúságú elemen végzett kísérlet eredményein alapulnak. A kísérleti úton kapott teherbírások valószínűség-elméleti értékelése elméleti vizsgálatokkal kiegészítve lehetővé teszi olyan görbék meghatározását, amelyek a redukált karcsúság függvényében megadják az oszlop teherbírását. Az elméleti vizsgálatok során az oszlophossz ezredrészével egyenlő amplitúdójú, fél szinuszhullám alakú geometriai imperfekció, valamint az adott keresztmetszetre jellemző gyártási sajátfeszültségek hatását vették figyelembe.

Az ECCS kihajlási görbéit (*a*, *b*, *c* és *d*) a *A.11.6. ábra* szemlélteti. E görbék az oszlop ellenállásának számításához szükséges χ csökkentő tényező értékét adják meg a redukált karcsúság függvényében, különböző keresztmetszetekre (az α alakhiba-tényező különböző értékein keresztül).

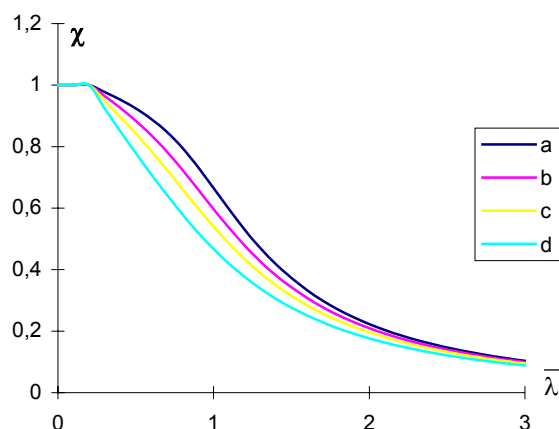
Az EC3 a következő matematikai összefüggéssel adja meg az ECCS kihajlási görbéit:

$$\chi = \frac{1}{\phi + [\phi^2 - \bar{\lambda}^2]^{0,5}} \leq 1, \quad (10)$$

ahol

$$\phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]. \quad (11)$$

A α csökkentő tényező értékei a $\bar{\lambda}$ redukált karcsúság függvényében az EC3 5.2.2. táblázatából is felvehetők.



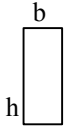
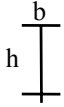


A.11.6. ábra: Az európai kihajlási görbék

A.11.1. táblázat: Alakhiba-tényezők

Kihajlási görbe	a	b	c	d
α alakhiba tényező	0,21	0,34	0,49	0,76

A.11.2. táblázat: A megfelelő kihajlási görbe kiválasztása egy adott keresztmetszethez

A keresztmetszet típusa	Méretarány-korlátok	A kihajlás tengelye	Kihajlási görbe
Nyitott hengerelt szelvények	h/b > 1,2		

	$t \leq \bar{\alpha} \text{ mm}$	y-y	a
	$40 \text{ mm} < \text{övvastagság} < 100 \text{ mm}$	z-z	b
		y-y	b
	$\mathbf{h/b} \leq 1,2$ $\text{övvastagság} \leq 100 \text{ mm}$	z-z	c
y-y		b	
	$\text{övvastagság} > 100 \text{ mm}$	z-z	c
		y-y	d
		z-z	d
Zárt szelvények 	melegen hengerelt	bármely	a
	hidegen hajlított EC3 5.5.1.4.(4) és 5.5.2. ábra	bármely	b vagy c
	nincs	bármely	c

Az α alakhiba-tényező függ az oszlopkeresztmetszet alakjától, az iránytól, amelyben a kihajlás bekövetkezhet (y vagy z tengely körül), továbbá a nyomott elem gyártási módjától (melegen hengerelt, hegesztett vagy hidegen hajlított). Az α tényező értékeit, amelyek az imperfekciók mértékével nőnek, az *A.11.1. táblázat* tartalmazza.

A *A.11.2. táblázat* segít a megfelelő kihajlási görbe kiválasztásában, a keresztmetszet típusának, a méretkorlátoknak és annak a tengelynek a függvényében, mely körül a kihajlás létrejöhet.

A.11.6.A nyomott elemek méretezésének lépései

Amikor egy nyomott szerkezeti elemet méretezünk, először is meg kell határozni a két tehetetlenségi főtengelyhez tartozó kihajlási hosszt, figyelembe véve az elemvégek várható kapcsolatait is. Az ellenőrzés ezután a következő lépésekben történik.

- A szelvényalak geometriai jellemzői és a folyáshatár alapján meghatározzuk a $\bar{\lambda}$ redukált karcsúságot.
- A $\bar{\lambda}$ függvényében valamelyik kihajlási görbe alapján, a szelvényvastagság és a gyártási mód figyelembevételével kiszámítjuk a α kihajlási csökkentő tényezőt.
- A nyomott elem kihajlási tervezési ellenállása ezek után:

$$N_{b,Rd} = \chi \beta_A \frac{A f_y}{\gamma_{M1}}, \quad (\text{A.11.12})$$

ahol 1., 2. és 3. osztályba tartozó keresztmetszetek esetén $\alpha_A = 1$, míg 4. osztályú keresztmetszetekre $\alpha_A = A_{\text{eff}} / A$.

Ha ez nagyobb, mint a tervezési normálerő, az oszlop megfelel. Ha nem, akkor nagyobb szelvényt kell választani és azt ellenőrizni.