



PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM
MŰSZAKI ÉS INFORMATIKAI KAR

Acélszerkezetek II.

2. gyakorlat

A kihajlási hosszak értelmezése,
hajlított elemek kifordulása

Szabó Imre Gábor

Pécsi Tudományegyetem Műszaki és Informatikai Kar

Építőmérnök Tanszék

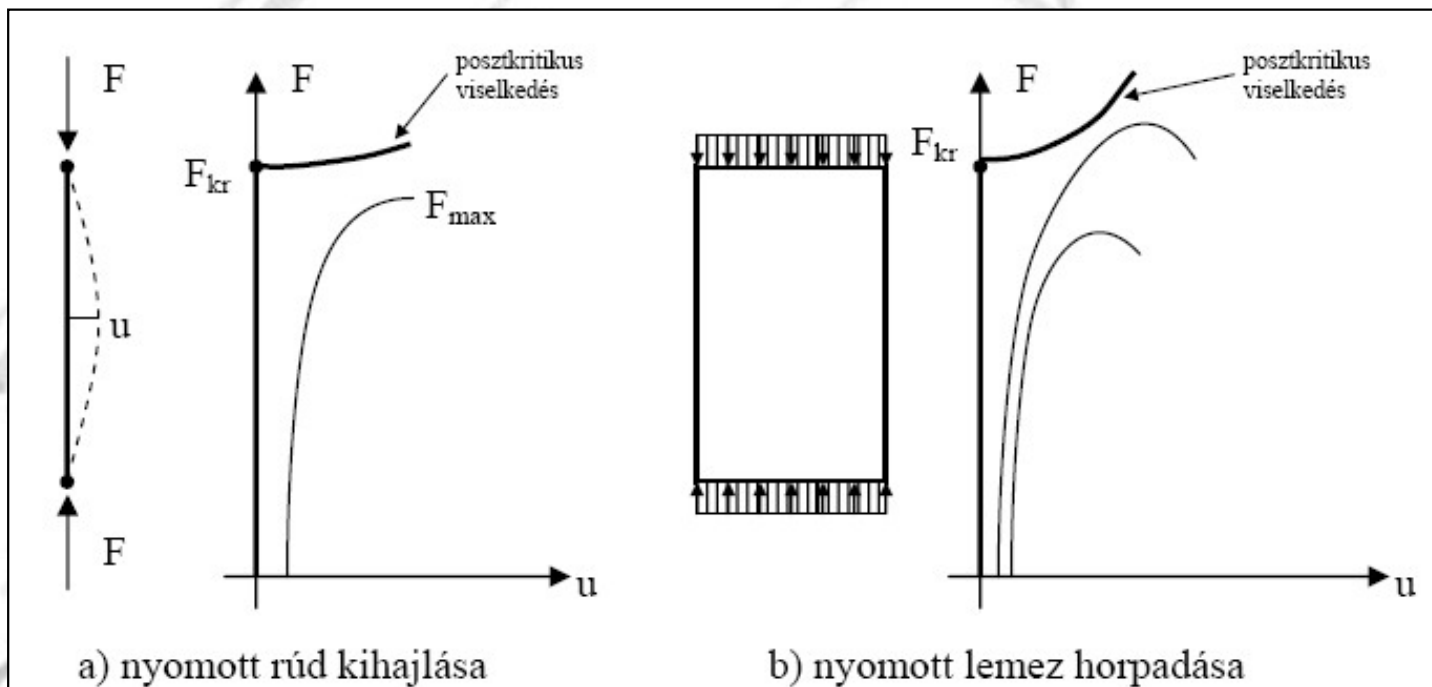
1. Stabilitási ellenállás

A központosan nyomott keresztmetszetek nem csak a keresztmetszet megfolyásával mehetnek tönkre, hanem stabilitásvesztéssel is.

Stabilitásvesztés: az ún. kritikus erőnél a rúd oldalirányban kihajlik, azaz az erő irányára merőleges értelmű deformált alakban veszi fel az új egyensúlyi helyzetét. Ezt egyensúlyi elágazásnak nevezzük. Nyomott rúd esetében ez gyakorlatilag a teherbírás maximumát is jelenti. Az elágazás utáni állapotban (posztkritikus viselkedés) a teher kismértékű növelése a deformáció jelentős növekedésével jár.

Másképpen fogalmazva a stabilitásvesztés egy szerkezet, vagy szerkezeti elem viselkedésének hirtelen, a keresztmetszeti feszültségekkel nem magyarázható megváltozását, teherbírásának ugrásszerű lecsökkenését jelenti.

A stabilitásvesztés a szerkezet-szerkezeti elem azonnali tönkremenetelét, és ezzel akár az egész építmény összeomlását idézheti elő, ezért ennek elkerülése a legfontosabb mérnöki feladat.



1. ábra. Egyensúly-elágazás [Dunai, Horváth 2007]

A stabilitásvesztés nem csak rudaknál és nem csak nyomás esetén jön létre. A stabilitásvesztési módokat aszerint is csoportosíthatjuk, hogy a teljes elemet érinti-e, vagy annak csak egy alkotó elemét:

- globális stabilitásvesztés: ilyenek lehetnek pl. síkbeli rúdkihajlás, elcsavarodó kihajlás, rúdkifordulás,
- lokális stabilitásvesztés: ilyenek lehetnek pl. az alkotó lemez horpadása, vagy összetett szelvények esetén az alkotó elemek rész-szelvény kihajlása.

Az egyes stabilitásvesztési módok létrejötte függ az elemre ható igénybevételtől is, így a globális módok közül lehet:

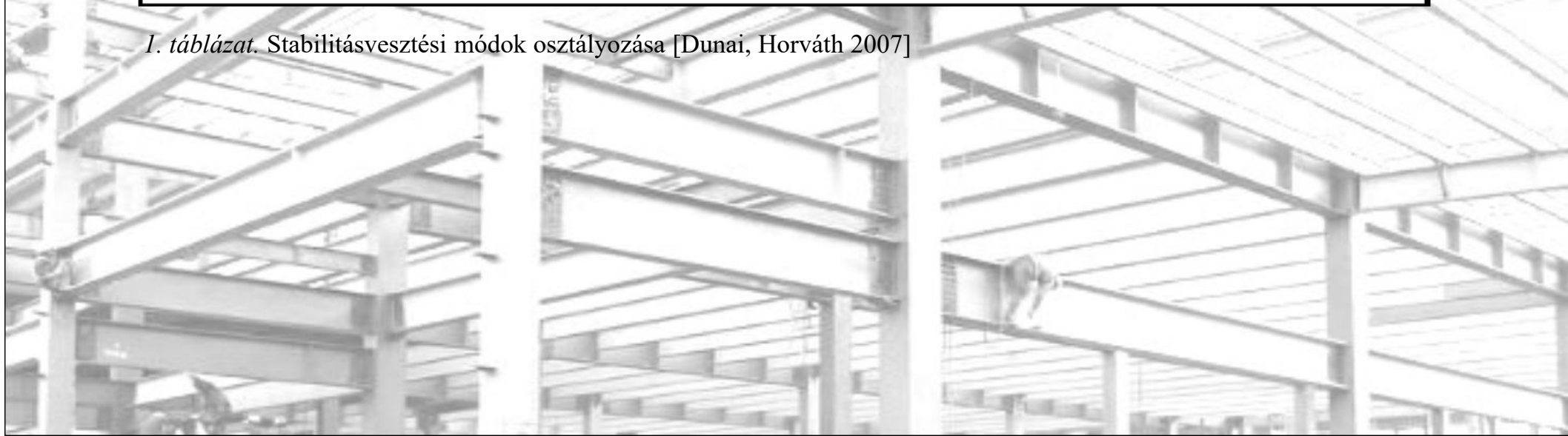
- kihajlás a nyomott rudaknál,
 - kifordulás a hajlított tartóknál,
- míg a lemezhorpadásoknál megkülönböztetünk:
- nyomott és/vagy hajlított lemezek horpadását (hosszirányú feszültségek),
 - keresztirányban nyomott lemezek beroppanását (közvetlenül a terhelt gerinc),
 - nyírt lemezek horpadását.

Az egyes stabilitásvesztési módokhoz jellegzetes alakok tartoznak. Az *1. táblázat* összefoglalja az igénybevételek hatására fellépő stabilitásvesztési módokat. A továbbiakban részletesen csak azokat tárgyaljuk, melyek a félév során elő fognak fordulni.

A további stabilitási jelenségekről bővebb útmutatással szolgál a kiadott segédlet (Dunai László, Horváth László, Kovács Nauzika, Varga Géza, Verőci Béla, Vigh L. Gergely: *Acélszerkezetek méretezése Eurocode 3 szerint, gyakorlati útmutató*. Budapest, 2007. 39. oldaltól).

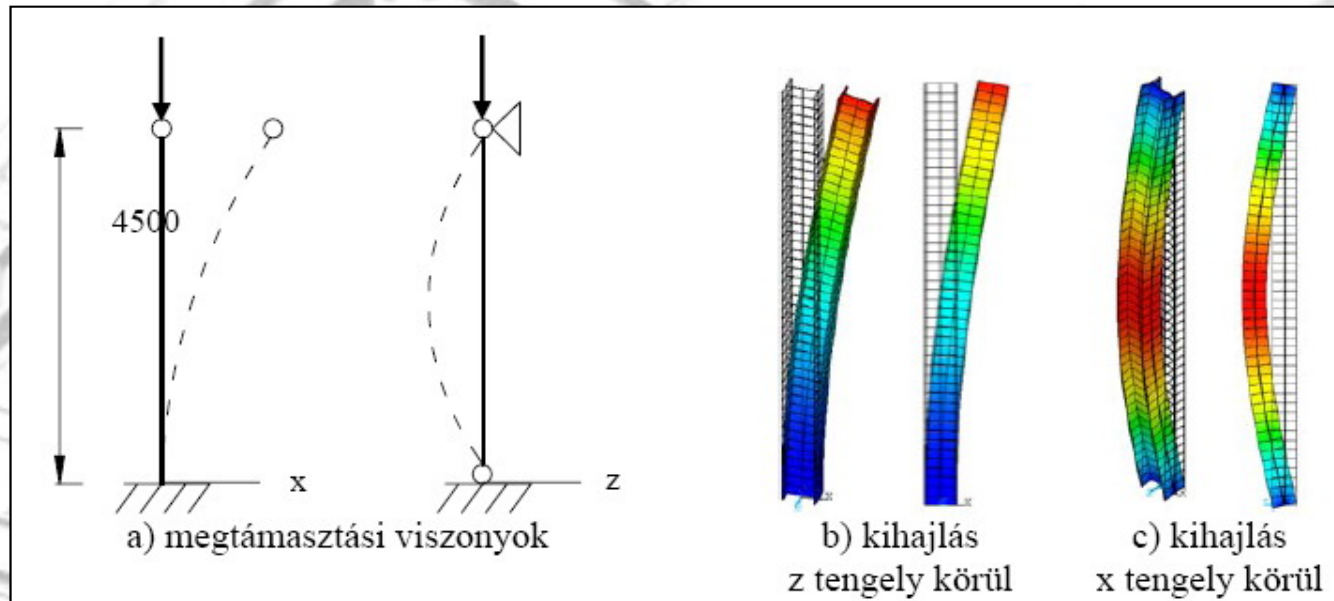
		központos nyomás	egyenes hajlítás	nyírás	keresztirányú feszültségek (közvetlen teher)
globális	rudak	síkbeli kihajlás térbeli elcsavarodó kihajlás	kifordulás		
lokális	alkotó lemez	lemez-horpadás	nyomott lemezrész horpadása	nyírási lemez-horpadás	beroppanás
	összetett szelvényű rúd rész-szelvénye	rész-szelvény kihajlása			
köölcsönhatások					

1. táblázat. Stabilitásvesztési módok osztályozása [Dunai, Horváth 2007]



1.1 Síkbeli rúdkihajlás

A kihajló rúd alakja síkgörbe, a keresztmetszete nem torzul és nem csavarodik.



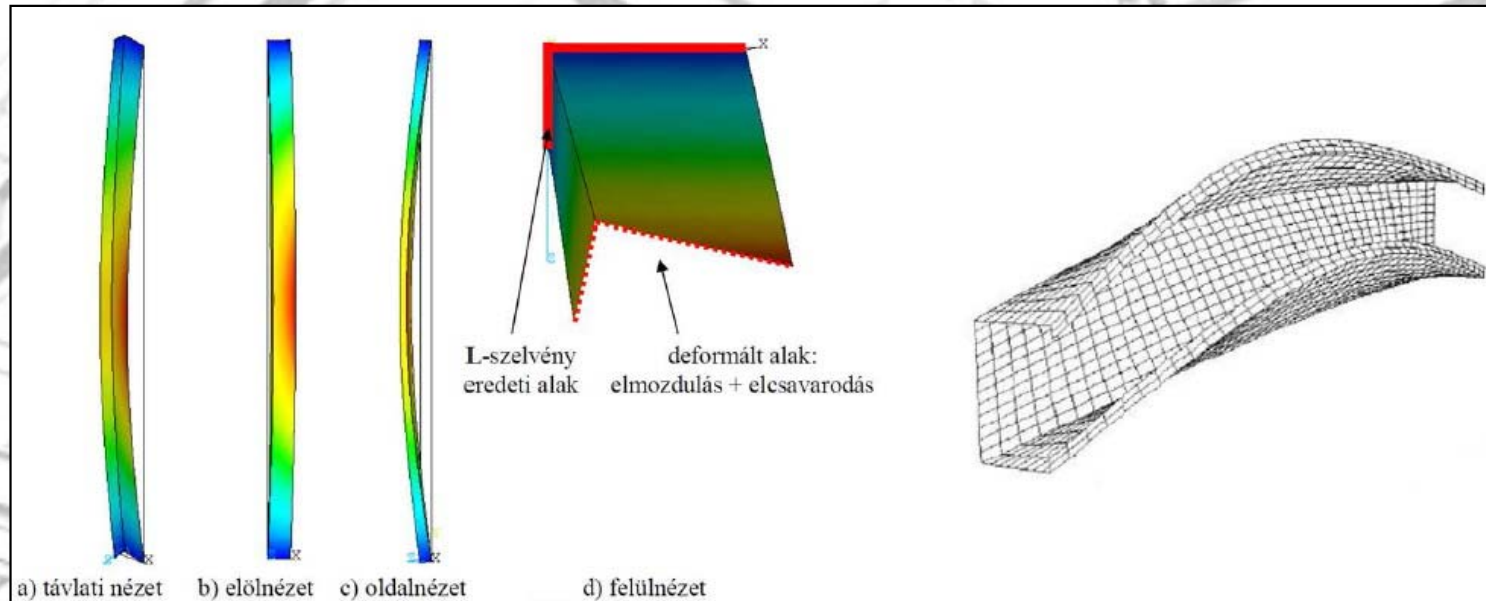
2. ábra. Síkbeli rúdkihajlás [Dunai, Horváth 2007]

Függ:

- az anyagminőségtől,
- a hajlítási merevségtől (arra a tengelyre vonatkoztatva, amely körül kihajlik a rúd),
- a keresztmetszeti területtől,
- a befogási viszonyoktól.

1.2 Térbeli rúdkihajlás

Vékonyfalú nyitott szelvények esetén a központosan nyomott rúd kihajlása nem síkbeli, hanem térbeli elcsavarodó kihajlás, amely során nemcsak a rúdtengely görbül meg, de a keresztmetszet is elfordul.



3. ábra. Térbeli rúdkihajlás [Dunai, Horváth 2007]

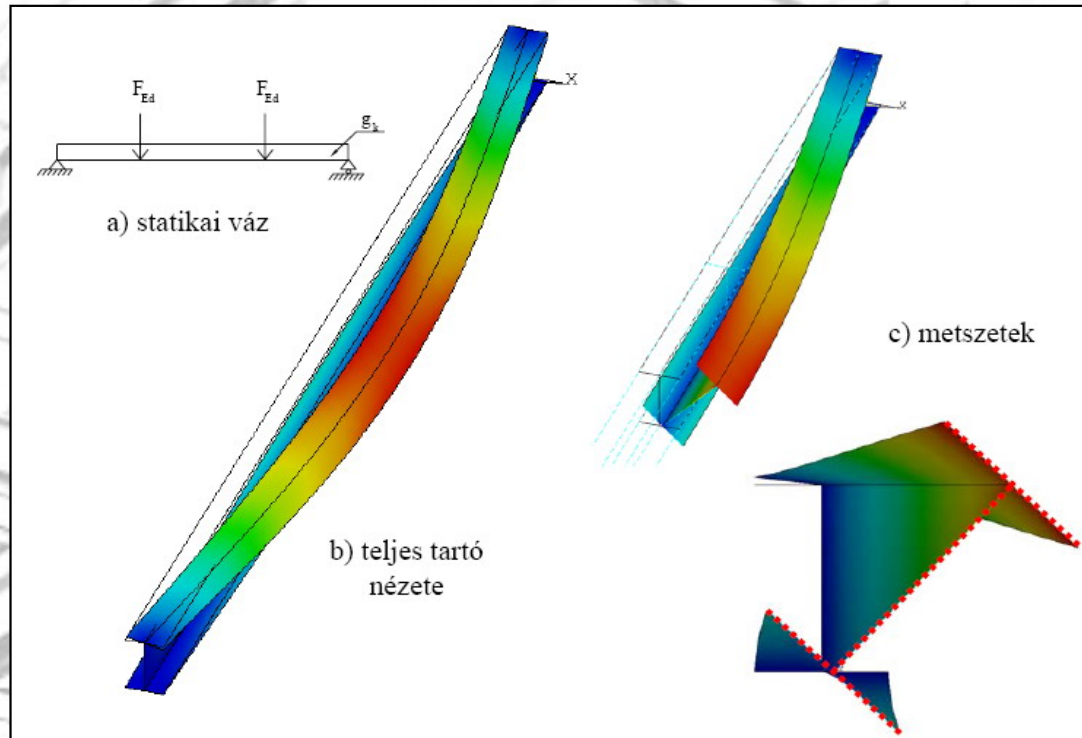
Függ:

- az anyagminőségtől,
- a hajlítási merevségtől (arra a tengelyre vonatkoztatva, amely körül kihajlik a rúd),
- a keresztmetszeti területtől,
- a befogási viszonyoktól.

1.3 Rúdkifordulás

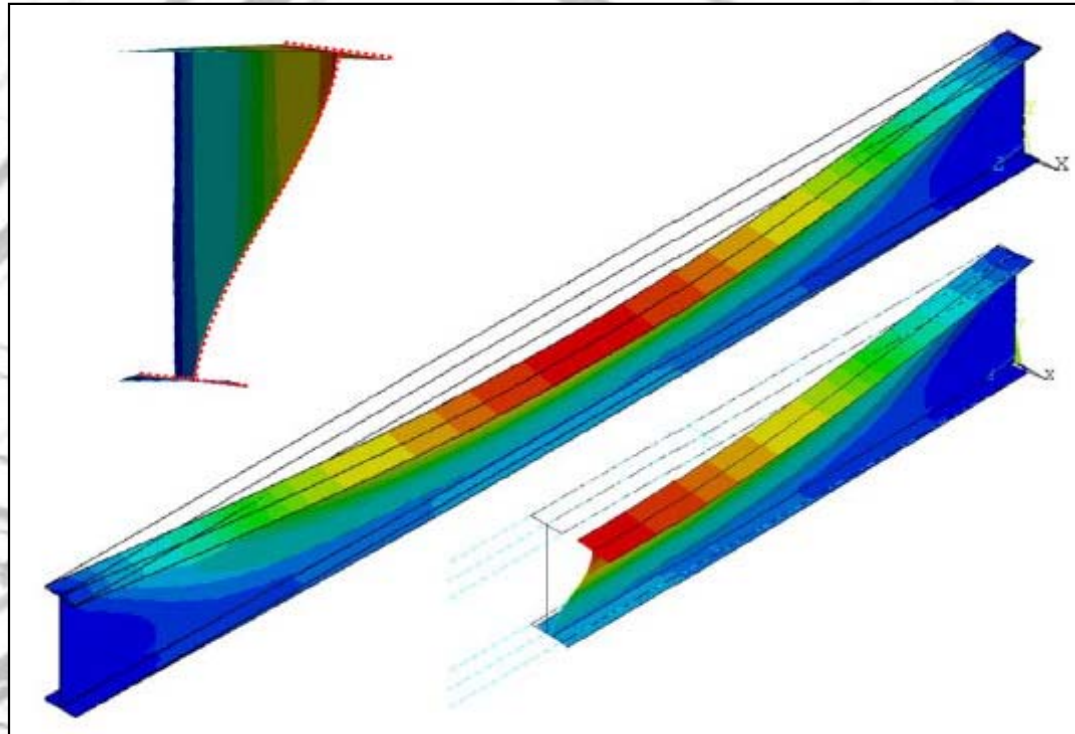
A rúdkifordulás hajlított tartó esetén jön létre, a teljes rúd meghajlik és a keresztmetszet elcsavarodik. Két fajtája van:

Alaktartó kifordulás: a keresztmetszet elcsavarodik, de nem torzul.



4. ábra. Rúdkifordulás – alaktartó keresztmetszet [Dunai, Horváth 2007]

Nem alaktartó kifordulás: a keresztmetszet jellegzetes módon torzul.
 Általában a magasgerincű tartókra jellemző, a húzott öv szinte helyben marad, a tartó felső öve viszont elmozdul és csavarodik, a gerinc pedig deformálódik.

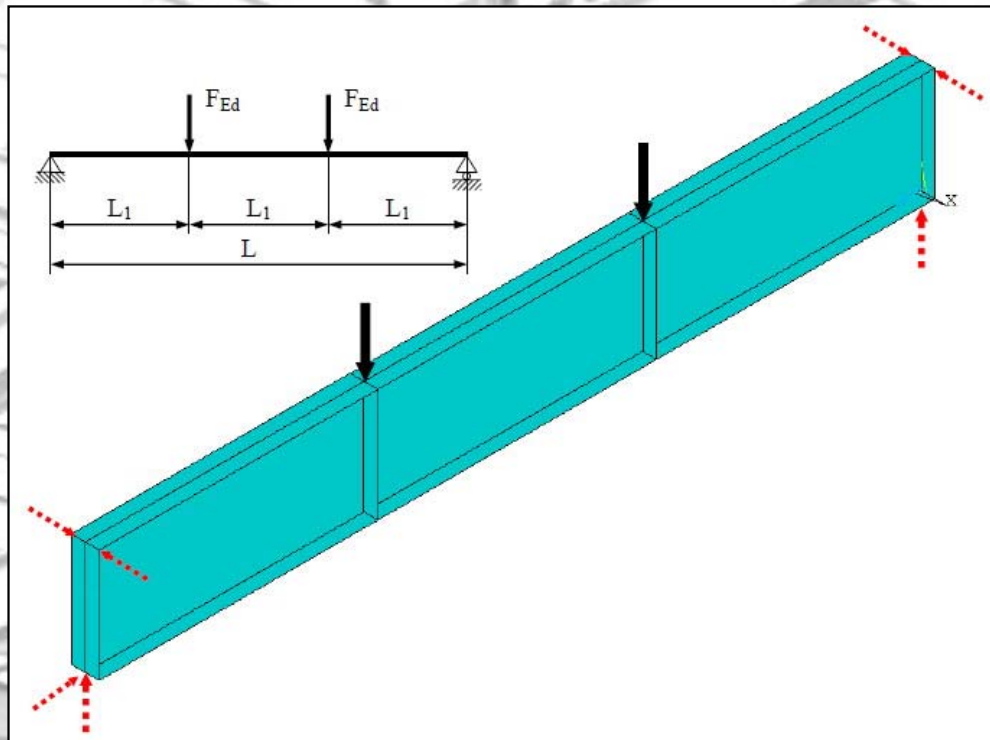


5. ábra. Rúdkifordulás – nem alaktartó keresztmetszet [Dunai, Horváth 2007]

1.4 Lemezhorpadás (lokális horpadás)

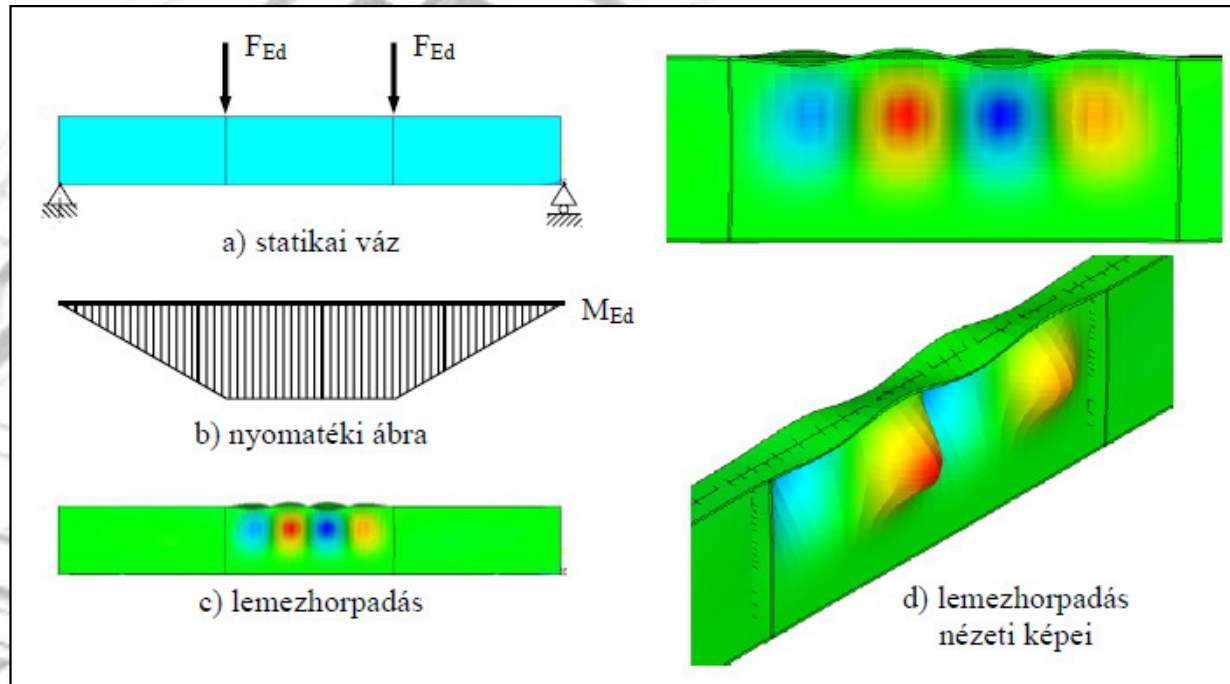
Az egyes alkotó lemezekben nyomás illetve nyírás hatására lemezhorpadás keletkezhet.

Például két koncentrált erővel terhelt „I” szelvényű hajlított gerenda esetében az övben, illetve a gerinclemezekben a nyomásból vagy a hajlításból származó rúdtengely irányú feszültségek hatására a lemezekben a rúdtengellyel párhuzamos hullámok képében jelenik meg a lemezhorpadás.



6. ábra. Hegesztett gerenda terhelése koncentrált erőkkel [Dunai, Horváth 2007]

A két koncentrált erő közötti gerinclemez mező tisztán hajlított, a legnagyobb nyomaték itt keletkezik. A felső öv tisztán nyomott, abban szintén keletkezhethet lemezhorpadás.

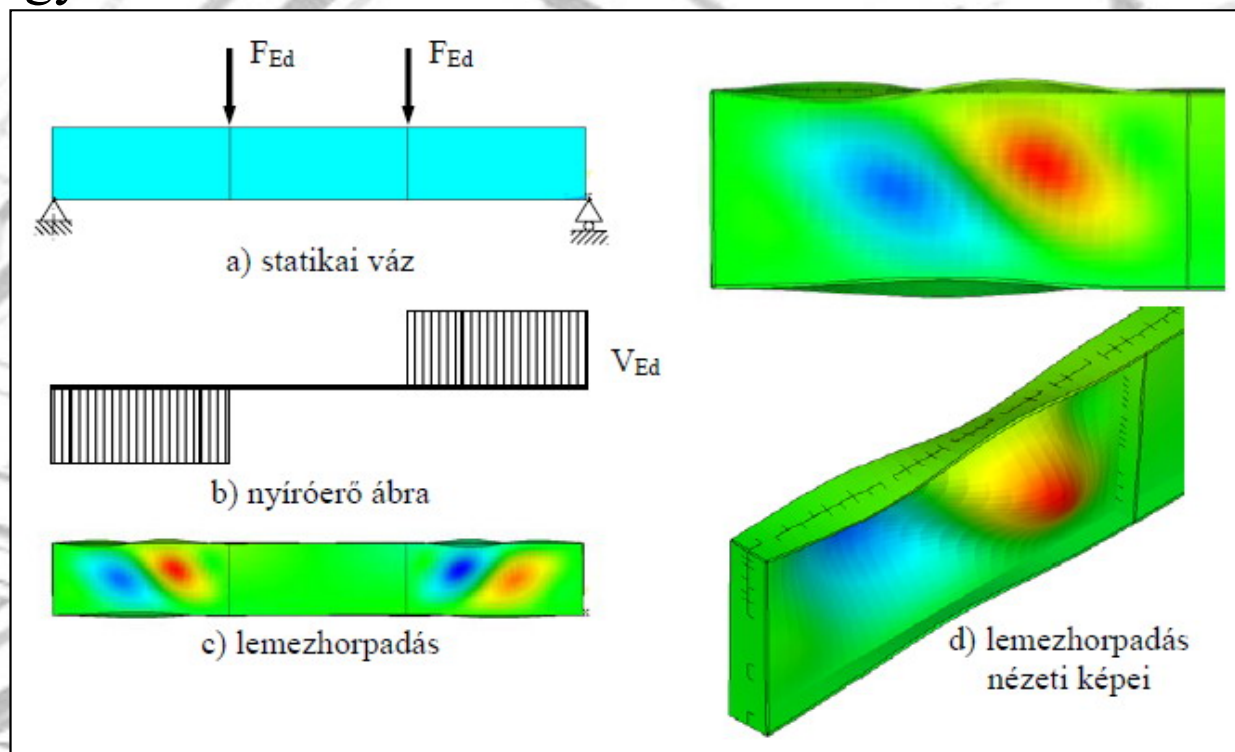


7. ábra. Hajlított gerinclemez horpadása [Dunai, Horváth 2007]

Függ:

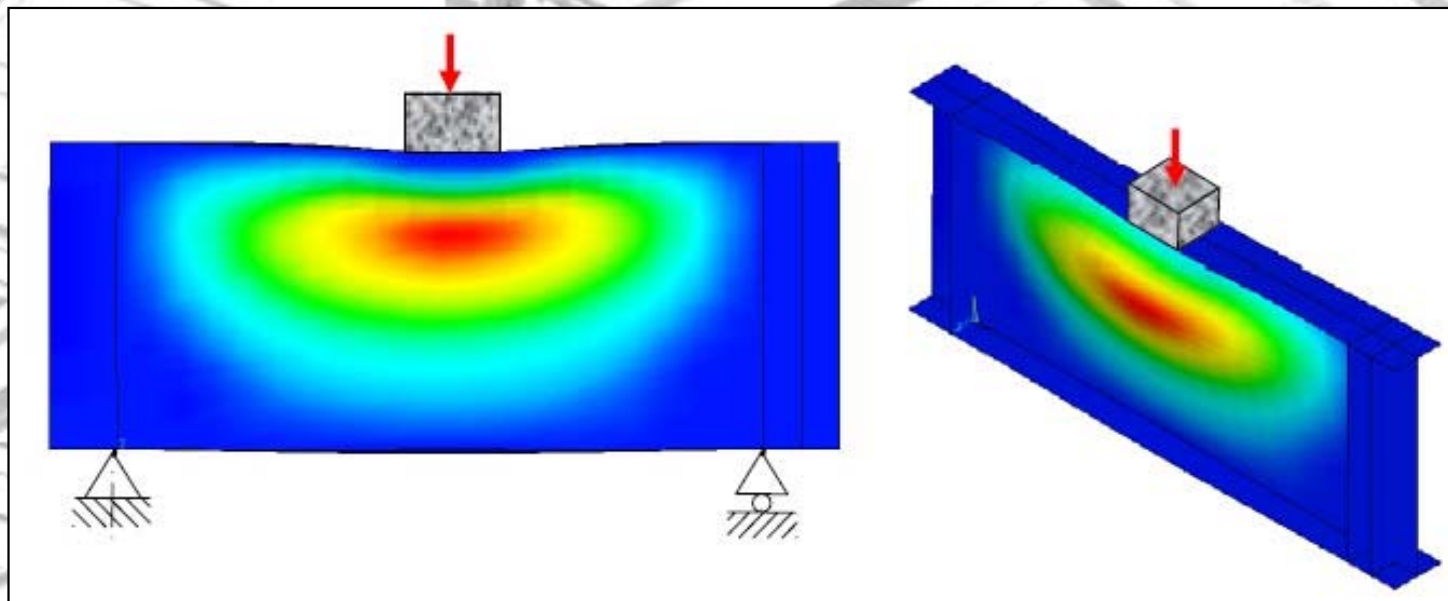
- a lemez geometriai méreteitől,
- a lemezvastagságtól,
- a feszültségeloszlástól (nyomott/hajlított),
- a megtámasztási viszonyoktól (hány oldalán van megtámasztva, kapcsolódó elemek, pl. övlemez merevsége, stb.)

A függőleges értelmű nyírást a gerinclemez veszi fel. A nyírás hatására jellegzetes, ferde hullámok jönnek létre a gerincben. A fenti példában a szélső lemezmezőkben van csak nyíróerő, nyírési horpadás így ott keletkezik.



8. ábra. Nyírt gerinclemez lemezhorpadása [Dunai, Horváth 2007]

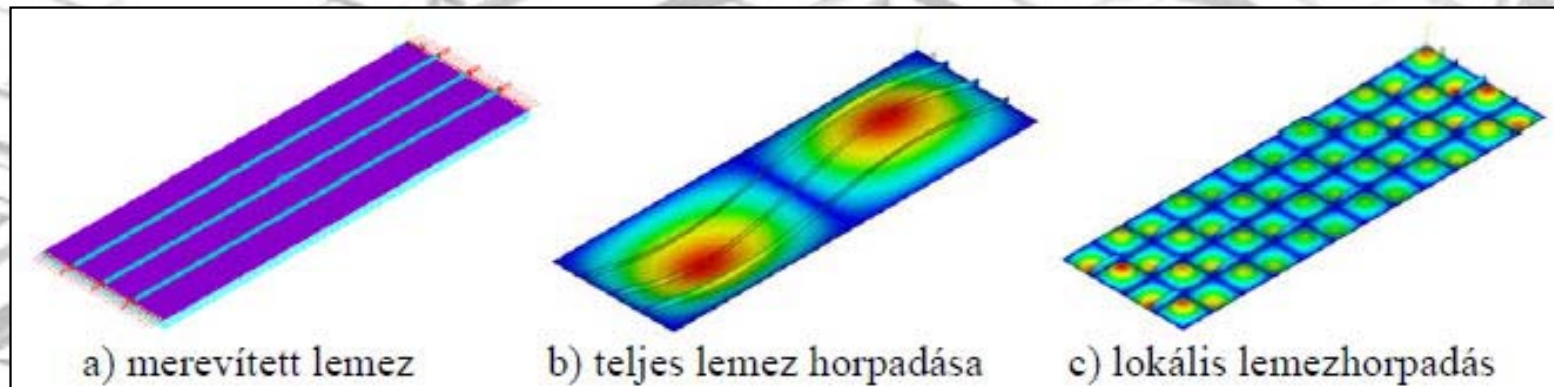
Előfordulhat olyan eset is, amikor nemcsak a hosszirányú, de arra merőleges, ún. *keresztirányú feszültségek* is ébrednek egy-egy lemezben. Ennek egy speciális fajtája a nagy koncentrált (vagy kis hosszon kiterjedő) erők bevezetésének környezete. Ilyen ún. *közvetlenül terhelt lemez* jellemzően például a támaszok környezetében a gerinclemez, darupályatartóknál a darukerék alatti gerinclemezmező. Ezen koncentrált erők alatt a gerinclemez beroppanhat, ha nincs függőleges értelemben merevítve.



9. ábra. Beroppanás erőbevezetés alatt [Dunai, Horváth 2007]

A lemezhorpadás merevített lemezek esetén is létrejöhet, de ekkor kétféleképpen: teljes merevített lemezben (10. ábra, „b” eset) vagy amennyiben a merevítőbordák kellően merevek, a bordák között (10. ábra, „c” eset).

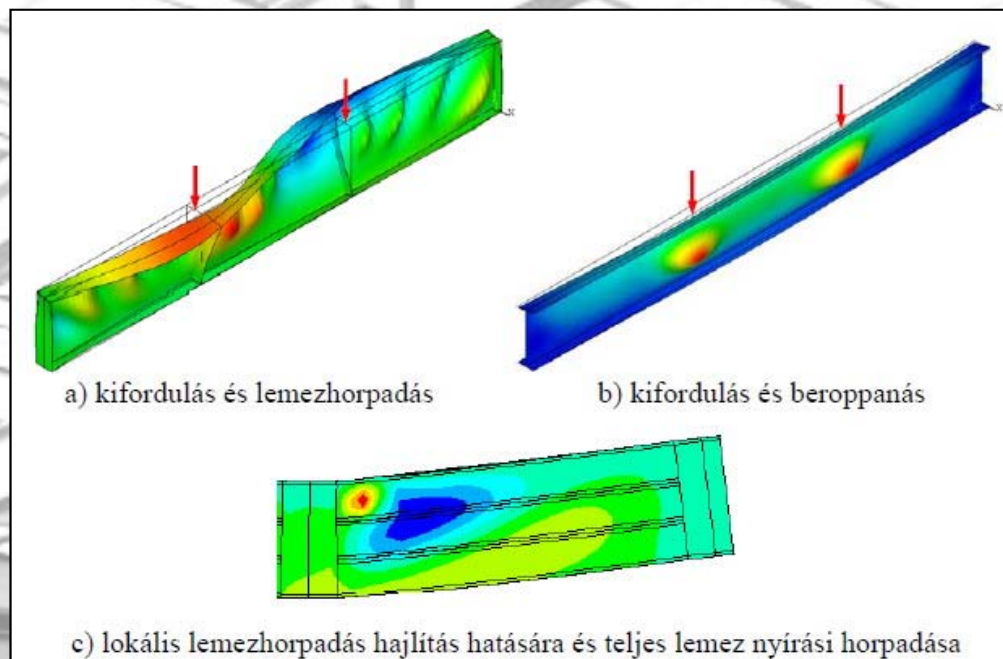
A merevítőbordák alkalmazásával, a lemez vastagítása nélkül nagyobb stabilitás érhető el. A függőleges bordák tervezésekor mindig arra kell törekedni, hogy a horpadás csak a bordák között jöhessen létre. Vízszintes merevítés esetén számos esetben elegendőek a nem merev-bordák is.



10. ábra. Négy szélén megtámasztott, merevített lemez teljes és lokális lemezhorpadása egyenletes nyomás esetén [Dunai, Horváth 2007]

Az egyes stabilitásvesztési módok kölcsönhatásba (interakcióba) is léphetnek egymással. Például egy gerinclemezes tartó lemezhorpadása interakcióba léphet a teljes rúd globális rúdkifordulásával (11. ábra. „a” és „b” eset).

A lokális módok is kombinálódhatnak pl. hajlított-nyírt gerinclemez különböző lemezhorpadásai (11. ábra. „c” eset). Némely esetben a kölcsönhatásba lépő módok gyengíthetik egymás hatását (tehát kedvezőbb teherbírást is eredményezhet), vagy éppen semmilyen hatással sincsenek egymásra. Általában azonban erősítik egymást, ezért különösen fontos az interakciók vizsgálata.



11. ábra. Stabilitási jelenségek kölcsönhatása [Dunai, Horváth 2007]



Acélszerkezetek esetén a stabilitásvizsgálat sohasem a rugalmas stabilitástan eszköztárával levezethető kritikus feszültségek és igénybevételek alapján történik. Ennek az az oka, hogy a rugalmas stabilitástan tökéletesen rugalmas anyagi viselkedést tételez fel, valamint abból indul ki, hogy a vizsgálandó szerkezeti elem tökéletes, *imperfekcióktól* mentes, azaz tökéletesen egyenes, vagy sík geometriájú, sajátfeszültségektől mentes, tökéletesen központosan terhelt. A valóságban azonban ilyen tökéletes (ideális) szerkezeti elem nincs. Mindig vannak gyártási, beépítési hibák.

A kezdeti *imperfekciók* miatt így *képlékeny instabilitással* van dolgunk. A képlékeny instabilitás nem egy meghatározott teherszinten következik be, hanem egy, számos tényezőtől (pl. kezdeti görbeség) függő folyamat során.

A kísérleti eredmények alapján a vizsgálatokat kalibrált féltapasztalati összefüggésekkel végezzük.

2. Hajlított elemek kifordulása

A hajlított elemek kifordulás vizsgálatára az Eurocode 3 három módszert ajánl.

2.1 Általános módszer

Minden esetben alkalmazható. Abból indul ki, hogy a gerenda keresztmetszetei a kifordulás során megőrzik eredeti alakjukat, azaz ún. alaktartó kifordulás következik be, továbbá feltételezi, hogy a kifordulás ún. szabad tengely körüli kifordulás formájában játszódik le.

Formailag a nyomott rudak kihajlás vizsgálatával egyezik meg.

A vizsgálat során feltételezzük, hogy a gerenda hajlítása a keresztmetszet erős (y) tengelye körül történik, valamint, hogy a keresztmetszet legalább egyszeresen, a gyenge (z) tengelyre nézve szimmetrikus.

A vizsgálat két fő lépésből áll:

2.1.1 A kifordulási viszonyított karcsúság meghatározása

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{\alpha_u}{\alpha_{cr}}}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W \cdot f_y}{M_{cr}}}$$

ahol: $\bar{\lambda}$ – kifordulási viszonyított karcsúság;

α – tehermodell;

W – keresztmetszeti modulus (1. és 2. osztályú szelvény esetén W_{pl} , 3. osztály esetén W_{el} , 4. osztály esetén W_{eff});

f_y – az anyag folyáshatár értéke;

M_{cr} – kifordulási kritikus nyomaték.

A kifordulási kritikus nyomaték a nyomatéki maximum értéke a kritikus állapotban.



A kifordulási kritikus nyomaték a rugalmas stabilitástan módszereivel határozható meg. (A kritikus szó arra utal, hogy ideális, tökéletes geometriájú, sajátfeszültségektől mentes és lineárisan rugalmas anyagú gerenda teherbíró képességéről van szó.)

A kifordulás vizsgálat alapmodellje a kéttámaszú, két végén csuklós/villás megtámasztású, két végén egyenlő nyomatékkal terhelt, kétszeresen szimmetrikus keresztmetszetű gerenda.

A kritikus nyomaték általános képlete:

$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(k \cdot L)^2} \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_w} \right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k \cdot L)^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z} + (C_2 \cdot z_g - C_3 \cdot z_j)^2} - (C_2 \cdot z_g - C_3 \cdot z_j) \right]$$

ahol: M_{cr} – kifordulási kritikus nyomaték;

L – a tartó támaszköze (két szomszédos oldalirányú megtámasztás távolsága);

I_z – a gyenge tengely körüli inercia;

I_t – egyszerű csavarási inercia, az értéke nyitott vékonyfalú szelvények esetén:

$$I_t = \frac{1}{3} \cdot \sum b_i \cdot t_i^3$$

ahol: – b_i és t_i a szelvényt alkotó lemezek szélességi mérete és vastagsága

Hengerelt szelvények esetén általában szelvénytáblázatból kivehető adat.



$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(k \cdot L)^2} \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k \cdot L)^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z} + (C_2 \cdot z_g - C_3 \cdot z_j)^2} - (C_2 \cdot z_g - C_3 \cdot z_j) \right]$$

ahol: I_w – gátolt csavarási inercia (torzulási, öblösödési modulus), melynek mértékegysége: cm^6 , közelítő képlete kétszeresen szimmetrikus „I szelvényekre”:

$$I_w = \frac{I_z \cdot (h - t_f)^2}{4}$$

Értéke általában szelvénytáblázatból kivehető adat.

z_g – közvetlenül terhelt gerendák esetén a teher támadáspontja és a keresztmetszet csavarási középpontja közötti függőleges távolság, akkor pozitív, ha támadáspont a csavarási középpont felett van; ha nincs közvetlen teher (a gerendát csak a két végén ható hajlítónyomatékok terhelik), akkor értéke zérus;

z_j – kétszeresen szimmetrikus keresztmetszet esetén zérus, egyszeresen szimmetrikus keresztmetszet esetén a számítását a szakirodalom ismertetése szerint kell végezni;



$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(k \cdot L)^2} \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k \cdot L)^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z} + (C_2 \cdot z_g - C_3 \cdot z_j)^2} - (C_2 \cdot z_g - C_3 \cdot z_j) \right]$$

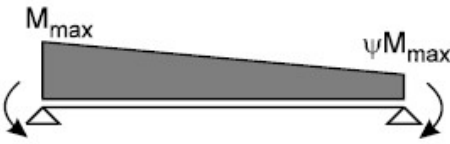
ahol: C_1, C_2, C_3 – a nyomatéki ábrának a vizsgált szakaszon (két szomszédos oldalirányú megtámasztás között) érvényes alakjától, valamint k értékétől függő tényező, értékeit a 2. és 3. táblázat mutatja;

k – a vizsgált szakasz végkeresztmetszeteinek elfordulás elleni megfogását jellemző szám (mindkét végén teljes értékű megfogása esetén $k=0,5$; két szabad rúdvég esetén $k=1,0$;

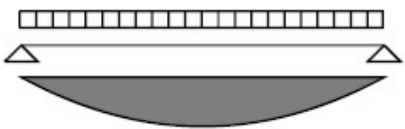
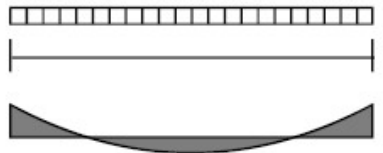
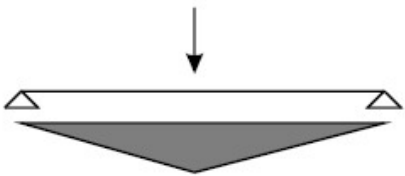
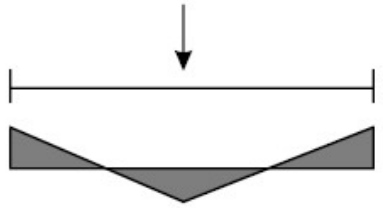
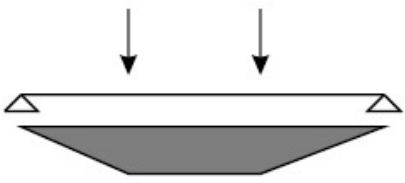
k_w – a vizsgált szakasz végkeresztmetszeteinek vetemedés (öblösödés) elleni megfogását jellemző szám (mindkét végén teljes értékű megfogása esetén $k_w=0,5$; két szabad rúdvég esetén $k_w=1,0$;

G – a nyírási modulus (acél esetén értéke 8100 kN/cm^2).

Folytatólagos tartók közbenső támaszainak ellenőrzéséhez k és k_w tényezők értékét 1,0-gyel vesszük számításba.

Statikai váz	ψ	k	C_1	C_2	C_3
	1	1,0	1,000	–	1,000
		0,7	1,000		1,113
		0,5	1,000		1,144
	0,75	1,0	1,141	–	0,998
		0,7	1,270		1,565
		0,5	1,305		2,283
	0,5	1,0	1,323	–	0,992
		0,7	1,473		1,556
		0,5	1,514		2,271
	0,25	1,0	1,563	–	0,977
		0,7	1,739		1,531
		0,5	1,788		2,235
	0	1,0	1,879	–	0,939
		0,7	2,092		1,473
		0,5	2,150		2,150
	-0,25	1,0	2,281	–	0,855
		0,7	2,538		1,340
		0,5	2,609		1,957
	-0,5	1,0	2,704	–	0,676
		0,7	3,009		1,059
		0,5	3,093		1,546
	-0,75	1,0	2,927	–	0,366
		0,7	3,009		0,575
		0,5	3,093		0,837
-1	1,0	2,752	–	0,000	
	0,7	3,063		0,000	
	0,5	3,149		0,000	

2. táblázat. A kifordulás vizsgálatához szükséges C tényezők közvetlenül nem terhelt gerendákra
[Dunai, Horváth 2007]

Statikai váz	ψ	k	C_1	C_2	C_3
	–	1,0 0,5	1,132 0,972	0,459 0,304	0,525 0,980
	–	1,0 0,5	1,285 0,712	1,562 0,652	0,753 1,070
	–	1,0 0,5	1,365 1,070	0,553 0,432	1,730 3,050
	–	1,0 0,5	1,565 0,938	1,267 0,715	2,640 4,800
	–	1,0 0,5	1,046 1,010	0,430 0,410	1,120 1,890

3. táblázat. A kifordulás vizsgálatához szükséges C tényezők közvetlenül terhelt gerendákra [Dunai, Horváth 2007]

2.1.2 A kifordulási ellenállás

$$M_{b,Rd} = \frac{\chi_{LT} \cdot W \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$$

ahol: $M_{b,Rd}$ – a kifordulási ellenállás;

χ_{LT} – kifordulási csökkentő tényező;

W – keresztmetszeti modulus (1. és 2. osztályú szelvény esetén W_{pl} , 3. osztály esetén W_{el} , 4. osztály esetén W_{eff});

f_y – az anyag folyáshatár értéke;

γ_{M1} – parciális tényező rudak stabilitásvizsgálatára (értéke 1,00).

A χ_{LT} kifordulási csökkentő tényező a χ kihajlási csökkentő tényezőre vonatkozó, a kihajlásnál megismert képletek alapján számítható a 4. táblázat szerinti kihajlási görbe, valamint az annak megfelelő α tényező feltételezésével. Kézi számítás esetén a kihajlás vizsgálatnál is alkalmazott táblázatok használhatók.



Keresztmetszet	Korlátozás	Kihajlási görbe
Hengerelt I szelvény	$h/b \leq 2$	a
	$h/b > 2$	b
Hegesztett I szelvény	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d
Más szelvény		d

4. táblázat. A kihajlási görbe felvétele a kifordulás vizsgálatához [Dunai, Horváth 2007]

A kihajlásnál megismert képletek alapján:

A χ kihajlási csökkentő tényezőt a viszonyított karcsúságtól és a keresztmetszet besorolásától függően a következő képlet szolgálja:

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad \text{de} \quad \chi \leq 1,0$$

ahol:

$$\Phi = \frac{1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2}{2}$$

ahol: α – alakhiba-tényező, amely a keresztmetszet besorolásától függ;

$\bar{\lambda}$ – viszonyított karcsúság.

Az α alakhiba-tényező az alakhibák, vagyis imperfekciók nagyságát adja meg, melynek értékeit a 5. táblázat mutatja:

a keresztmetszet csoportja	α alakhiba tényező
a_0	0,13
a	0,21
b	0,34
c	0,49
d	0,76

5. táblázat. Az α alakhiba-tényező értékei

Kihajlási görbe táblázatok:

- Dunai László, Horváth László, Kovács Nauzika, Varga Géza, Verőci Béla, Vigh L. Gergely:
Acélszerkezetek méretezése Eurocode 3 szerint, gyakorlati útmutató. Budapest, 2007. 51-55 oldalon;
- Dunai László, Horváth László, Kovács Nauzika, Varga Géza, Verőci Béla, Vigh L. Gergely:
Acélszerkezetek méretezése Eurocode 3 szerint, gyakorlati útmutató. Budapest, 2009. 141-145 oldalon.



	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	
0,20	1,0000	0,9986	0,9973	0,9959	0,9945	0,9931	0,9917	0,9903	0,9889	0,9874	0,20
0,30	0,9859	0,9845	0,9829	0,9814	0,9799	0,9783	0,9767	0,9751	0,9735	0,9718	0,30
0,40	0,9701	0,9684	0,9667	0,9649	0,9631	0,9612	0,9593	0,9574	0,9554	0,9534	0,40
0,50	0,9513	0,9492	0,9470	0,9448	0,9425	0,9402	0,9378	0,9354	0,9328	0,9302	0,50
0,60	0,9276	0,9248	0,9220	0,9191	0,9161	0,9130	0,9099	0,9066	0,9032	0,8997	0,60
0,70	0,8961	0,8924	0,8886	0,8847	0,8806	0,8764	0,8721	0,8676	0,8630	0,8582	0,70
0,80	0,8533	0,8483	0,8431	0,8377	0,8322	0,8266	0,8208	0,8148	0,8087	0,8025	0,80
0,90	0,7961	0,7895	0,7828	0,7760	0,7691	0,7620	0,7549	0,7476	0,7403	0,7329	0,90
1,00	0,7253	0,7178	0,7101	0,7025	0,6948	0,6870	0,6793	0,6715	0,6637	0,6560	1,00
1,10	0,6482	0,6405	0,6329	0,6252	0,6176	0,6101	0,6026	0,5951	0,5877	0,5804	1,10
1,20	0,5732	0,5660	0,5590	0,5520	0,5450	0,5382	0,5314	0,5248	0,5182	0,5117	1,20
1,30	0,5053	0,4990	0,4927	0,4866	0,4806	0,4746	0,4687	0,4629	0,4572	0,4516	1,30
1,40	0,4461	0,4407	0,4353	0,4300	0,4248	0,4197	0,4147	0,4097	0,4049	0,4001	1,40
1,50	0,3953	0,3907	0,3861	0,3816	0,3772	0,3728	0,3685	0,3643	0,3601	0,3560	1,50
1,60	0,3520	0,3480	0,3441	0,3403	0,3365	0,3328	0,3291	0,3255	0,3219	0,3184	1,60
1,70	0,3150	0,3116	0,3083	0,3050	0,3017	0,2985	0,2954	0,2923	0,2892	0,2862	1,70
1,80	0,2833	0,2804	0,2775	0,2746	0,2719	0,2691	0,2664	0,2637	0,2611	0,2585	1,80
1,90	0,2559	0,2534	0,2509	0,2485	0,2461	0,2437	0,2414	0,2390	0,2368	0,2345	1,90
2,00	0,2323	0,2301	0,2280	0,2258	0,2237	0,2217	0,2196	0,2176	0,2156	0,2136	2,00
2,10	0,2117	0,2098	0,2079	0,2061	0,2042	0,2024	0,2006	0,1989	0,1971	0,1954	2,10
2,20	0,1937	0,1920	0,1904	0,1887	0,1871	0,1855	0,1840	0,1824	0,1809	0,1794	2,20
2,30	0,1779	0,1764	0,1749	0,1735	0,1721	0,1707	0,1693	0,1679	0,1665	0,1652	2,30
2,40	0,1639	0,1626	0,1613	0,1600	0,1587	0,1575	0,1563	0,1550	0,1538	0,1526	2,40
2,50	0,1515	0,1503	0,1491	0,1480	0,1469	0,1458	0,1447	0,1436	0,1425	0,1414	2,50
2,60	0,1404	0,1394	0,1383	0,1373	0,1363	0,1353	0,1343	0,1333	0,1324	0,1314	2,60
2,70	0,1305	0,1296	0,1286	0,1277	0,1268	0,1259	0,1250	0,1242	0,1233	0,1224	2,70
2,80	0,1216	0,1207	0,1199	0,1191	0,1183	0,1175	0,1167	0,1159	0,1151	0,1143	2,80
2,90	0,1136	0,1128	0,1120	0,1113	0,1106	0,1098	0,1091	0,1084	0,1077	0,1070	2,90
3,00	0,1063	0,1056	0,1049	0,1043	0,1036	0,1029	0,1023	0,1016	0,1010	0,1003	3,00
3,10	0,0997	0,0991	0,0985	0,0979	0,0972	0,0966	0,0960	0,0955	0,0949	0,0943	3,10
3,20	0,0937	0,0931	0,0926	0,0920	0,0915	0,0909	0,0904	0,0898	0,0893	0,0888	3,20
3,30	0,0882	0,0877	0,0872	0,0867	0,0862	0,0857	0,0852	0,0847	0,0842	0,0837	3,30
3,40	0,0832	0,0828	0,0823	0,0818	0,0814	0,0809	0,0804	0,0800	0,0795	0,0791	3,40
3,50	0,0786	0,0782	0,0778	0,0773	0,0769	0,0765	0,0761	0,0756	0,0752	0,0748	3,50
3,60	0,0744	0,0740	0,0736	0,0732	0,0728	0,0724	0,0720	0,0717	0,0713	0,0709	3,60
3,70	0,0705	0,0702	0,0698	0,0694	0,0691	0,0687	0,0683	0,0680	0,0676	0,0673	3,70
3,80	0,0669	0,0666	0,0662	0,0659	0,0656	0,0652	0,0649	0,0646	0,0642	0,0639	3,80
3,90	0,0636	0,0633	0,0630	0,0626	0,0623	0,0620	0,0617	0,0614	0,0611	0,0608	3,90
4,00	0,0605	0,0602	0,0599	0,0596	0,0593	0,0591	0,0588	0,0585	0,0582	0,0579	4,00
4,10	0,0576	0,0574	0,0571	0,0568	0,0566	0,0563	0,0560	0,0558	0,0555	0,0552	4,10
4,20	0,0550	0,0547	0,0545	0,0542	0,0540	0,0537	0,0535	0,0532	0,0530	0,0527	4,20
4,30	0,0525	0,0522	0,0520	0,0518	0,0515	0,0513	0,0511	0,0508	0,0506	0,0504	4,30
4,40	0,0502	0,0499	0,0497	0,0495	0,0493	0,0491	0,0488	0,0486	0,0484	0,0482	4,40
4,50	0,0480	0,0478	0,0476	0,0474	0,0472	0,0470	0,0468	0,0466	0,0464	0,0462	4,50
4,60	0,0460	0,0458	0,0456	0,0454	0,0452	0,0450	0,0448	0,0446	0,0444	0,0442	4,60
4,70	0,0440	0,0439	0,0437	0,0435	0,0433	0,0431	0,0430	0,0428	0,0426	0,0424	4,70
4,80	0,0423	0,0421	0,0419	0,0417	0,0416	0,0414	0,0412	0,0411	0,0409	0,0407	4,80
4,90	0,0406	0,0404	0,0402	0,0401	0,0399	0,0398	0,0396	0,0395	0,0393	0,0391	4,90
5,00	0,0390	0,0388	0,0387	0,0385	0,0384	0,0382	0,0381	0,0379	0,0378	0,0376	5,00

Fl.1. táblázat: Az „a₀” kihajlási görbe táblázata χ értékei $\bar{\lambda}$ függvényében.

	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	
0,20	1,0000	0,9978	0,9956	0,9934	0,9912	0,9889	0,9867	0,9844	0,9821	0,9798	0,20
0,30	0,9775	0,9751	0,9728	0,9704	0,9680	0,9655	0,9630	0,9605	0,9580	0,9554	0,30
0,40	0,9528	0,9501	0,9474	0,9447	0,9419	0,9391	0,9363	0,9333	0,9304	0,9273	0,40
0,50	0,9243	0,9211	0,9179	0,9147	0,9114	0,9080	0,9045	0,9010	0,8974	0,8937	0,50
0,60	0,8900	0,8862	0,8823	0,8783	0,8742	0,8700	0,8657	0,8614	0,8569	0,8524	0,60
0,70	0,8477	0,8430	0,8382	0,8332	0,8282	0,8230	0,8178	0,8124	0,8069	0,8014	0,70
0,80	0,7957	0,7899	0,7841	0,7781	0,7721	0,7659	0,7597	0,7534	0,7470	0,7405	0,80
0,90	0,7339	0,7273	0,7206	0,7139	0,7071	0,7003	0,6934	0,6865	0,6796	0,6726	0,90
1,00	0,6656	0,6586	0,6516	0,6446	0,6376	0,6306	0,6236	0,6167	0,6098	0,6029	1,00
1,10	0,5960	0,5892	0,5824	0,5757	0,5690	0,5623	0,5557	0,5492	0,5427	0,5363	1,10
1,20	0,5300	0,5237	0,5175	0,5114	0,5053	0,4993	0,4934	0,4875	0,4817	0,4760	1,20
1,30	0,4703	0,4648	0,4593	0,4538	0,4485	0,4432	0,4380	0,4329	0,4278	0,4228	1,30
1,40	0,4179	0,4130	0,4083	0,4036	0,3989	0,3943	0,3898	0,3854	0,3810	0,3767	1,40
1,50	0,3724	0,3682	0,3641	0,3601	0,3561	0,3521	0,3482	0,3444	0,3406	0,3369	1,50
1,60	0,3332	0,3296	0,3261	0,3226	0,3191	0,3157	0,3124	0,3091	0,3058	0,3026	1,60
1,70	0,2994	0,2963	0,2933	0,2902	0,2872	0,2843	0,2814	0,2786	0,2757	0,2730	1,70
1,80	0,2702	0,2675	0,2649	0,2623	0,2597	0,2571	0,2546	0,2522	0,2497	0,2473	1,80
1,90	0,2449	0,2426	0,2403	0,2380	0,2358	0,2335	0,2314	0,2292	0,2271	0,2250	1,90
2,00	0,2229	0,2209	0,2188	0,2168	0,2149	0,2129	0,2110	0,2091	0,2073	0,2054	2,00
2,10	0,2036	0,2018	0,2001	0,1983	0,1966	0,1949	0,1932	0,1915	0,1899	0,1883	2,10
2,20	0,1867	0,1851	0,1836	0,1820	0,1805	0,1790	0,1775	0,1760	0,1746	0,1732	2,20
2,30	0,1717	0,1704	0,1690	0,1676	0,1663	0,1649	0,1636	0,1623	0,1610	0,1598	2,30
2,40	0,1585	0,1573	0,1560	0,1548	0,1536	0,1524	0,1513	0,1501	0,1490	0,1478	2,40
2,50	0,1467	0,1456	0,1445	0,1434	0,1424	0,1413	0,1403	0,1392	0,1382	0,1372	2,50
2,60	0,1362	0,1352	0,1342	0,1332	0,1323	0,1313	0,1304	0,1295	0,1285	0,1276	2,60
2,70	0,1267	0,1258	0,1250	0,1241	0,1232	0,1224	0,1215	0,1207	0,1198	0,1190	2,70
2,80	0,1182	0,1174	0,1166	0,1158	0,1150	0,1143	0,1135	0,1128	0,1120	0,1113	2,80
2,90	0,1105	0,1098	0,1091	0,1084	0,1077	0,1070	0,1063	0,1056	0,1049	0,1042	2,90
3,00	0,1036	0,1029	0,1022	0,1016	0,1010	0,1003	0,0997	0,0991	0,0985	0,0978	3,00
3,10	0,0972	0,0966	0,0960	0,0954	0,0949	0,0943	0,0937	0,0931	0,0926	0,0920	3,10
3,20	0,0915	0,0909	0,0904	0,0898	0,0893	0,0888	0,0882	0,0877	0,0872	0,0867	3,20
3,30	0,0862	0,0857	0,0852	0,0847	0,0842	0,0837	0,0832	0,0828	0,0823	0,0818	3,30
3,40	0,0814	0,0809	0,0804	0,0800	0,0795	0,0791	0,0786	0,0782	0,0778	0,0773	3,40
3,50	0,0769	0,0765	0,0761	0,0757	0,0752	0,0748	0,0744	0,0740	0,0736	0,0732	3,50
3,60	0,0728	0,0724	0,0721	0,0717	0,0713	0,0709	0,0705	0,0702	0,0698	0,0694	3,60
3,70	0,0691	0,0687	0,0683	0,0680	0,0676	0,0673	0,0669	0,0666	0,0663	0,0659	3,70
3,80	0,0656	0,0652	0,0649	0,0646	0,0643	0,0639	0,0636	0,0633	0,0630	0,0627	3,80
3,90	0,0623	0,0620	0,0617	0,0614	0,0611	0,0608	0,0605	0,0602	0,0599	0,0596	3,90
4,00	0,0594	0,0591	0,0588	0,0585	0,0582	0,0579	0,0577	0,0574	0,0571	0,0568	4,00
4,10	0,0566	0,0563	0,0560	0,0558	0,0555	0,0552	0,0550	0,0547	0,0545	0,0542	4,10
4,20	0,0540	0,0537	0,0535	0,0532	0,0530	0,0527	0,0525	0,052			



Bizonyos esetekben előfordulhat, hogy nem a kihajlás a mértékadó:
Ha az alábbi két feltétel közül valamelyik teljesül, akkor a szilárdsági
tönkremenetel lesz a mértékadó, a kifordulási hatás elhanyagolható:

$$\bar{\lambda}_{LT} \leq 0,4 \quad \text{vagy} \quad \frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq 0,16$$

ahol: $\bar{\lambda}$ – viszonyított karcsúság;

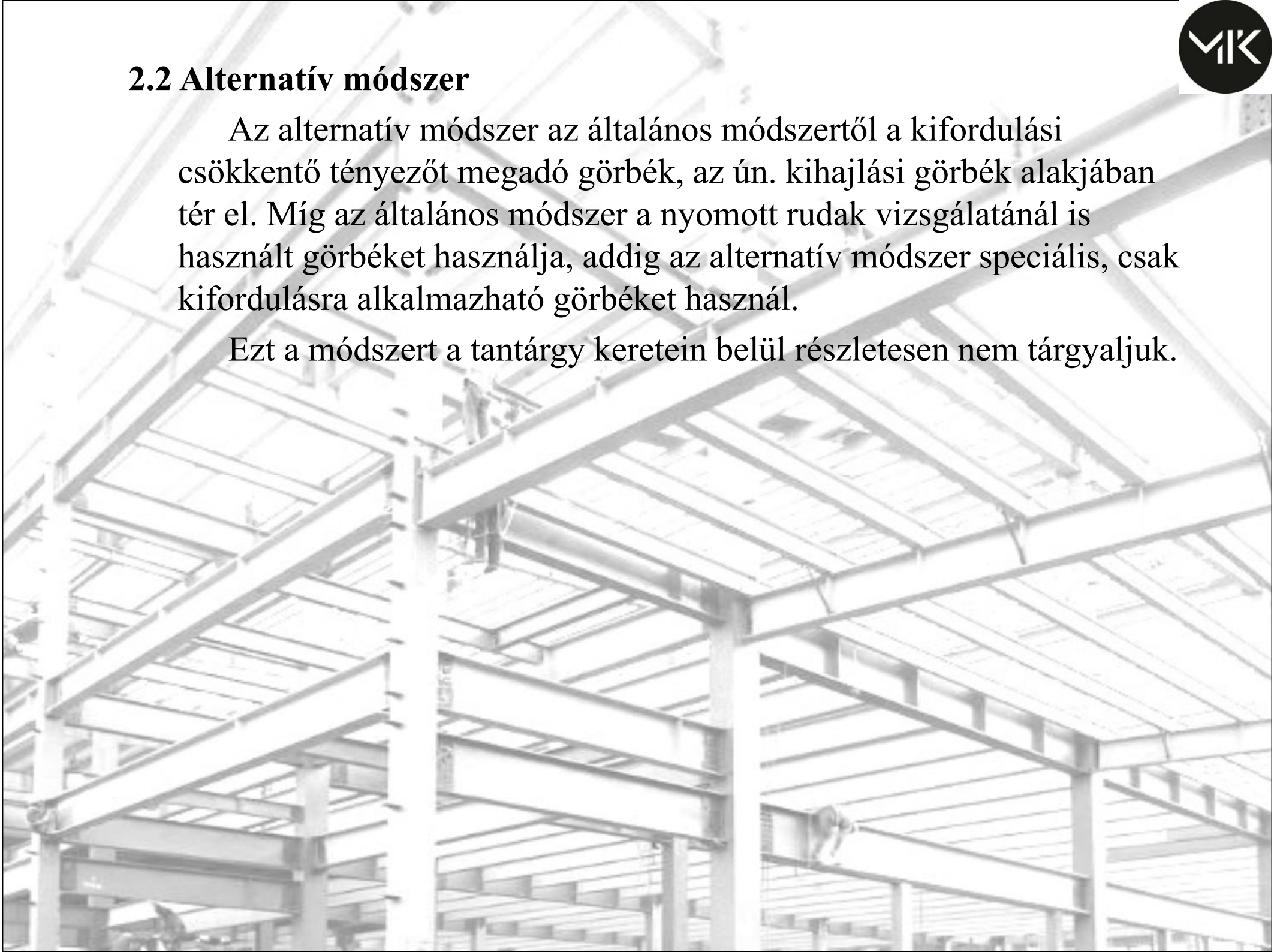
M_{Ed} – a mértékadó teher;

M_{cr} – a kritikus nyomaték.

2.2 Alternatív módszer

Az alternatív módszer az általános módszertől a kifordulási csökkentő tényezőt megadó görbék, az ún. kihajlási görbék alakjában tér el. Míg az általános módszer a nyomott rudak vizsgálatánál is használt görbéket használja, addig az alternatív módszer speciális, csak kifordulásra alkalmazható görbéket használ.

Ezt a módszert a tantárgy keretein belül részletesen nem tárgyaljuk.



2.3 Egyszerűsített módszer (övmerevség-vizsgálat)

Az egyszerűsített módszer kiindulási feltételei gyökeresen eltérnek az előző két módszertől. A számítási módszer egy helyettesítő nyomott rúd kihajlás vizsgálatából áll, ami mögött az a megfigyelés húzódik meg, hogy a kifordulás közben a vékonygerincű tartók gerinclemeze eltorzul (elhajlik), nem tartja meg eredeti sík alakját, úgy viselkedik, mintha valóban a tartó nyomott övlemeze és annak környéke hajlana ki nyomott rúd módjára.

Ez a módszer az Eurocode 3 szerint csak magasépületekben elhelyezett gerendák vizsgálatára alkalmazható.

A helyettesítő rúd „T” szelvényű, övlemeze megegyezik a vizsgált gerenda szelvényének nyomott övével, gerinclemeze pedig az eredeti szelvény gerinclemeze nyomott szakaszának harmadával megegyező magasságú, az eredetivel azonos vastagságú lemez. (Előírás szerint a gerinclemez nyomott része területének harmadát kell figyelembe venni, de gyakorlati szempontból egyszerűbb, ha a magasság harmadával számolunk, így a biztonság javára közelítünk.)

Tisztán hajlított keresztmetszet esetében, mivel ott a teljes gerincmagasság fele nyomott az övmerevség-vizsgálathoz felveendő helyettesítő „T” szelvény gerincének magassága az eredeti gerincmagasság hatodával egyenlő.

A gerenda kifordulási nyomatéki ellenállás számítása:

$$M_{b,Rd} = k_{fl} \cdot \chi \cdot M_{c,Rd} \quad \text{de} \quad M_{b,Rd} \leq M_{c,Rd}$$

ahol: $M_{b,Rd}$ – a kifordulási ellenállás;

k_{fl} – korrekciós tényező (ajánlott értéke: 1,10);

$M_{c,Rd}$ – a gerenda keresztmetszetének nyomatéki ellenállása, amelynek számításában azonban a γ_{M0} helyett γ_{M1} biztonsági tényezőt kell figyelembe venni;

χ – a helyettesítő „T” keresztmetszet λ_f viszonyított karcsúságból és a c kihajlási görbe feltételezésével számított kihajlási csökkentő tényező. A d kihajlási görbét kell azonban felhasználni akkor, ha a tartó olyan hegesztett „I” keresztmetszetből készül, amelyben a teljes magasság és az övlemezvastagság aránya:

$$\frac{h}{t_f} \leq 44\varepsilon$$

Az említett viszonyított karcsúságot a következő összefüggés adja:

$$\bar{\lambda}_f = \frac{k_c \cdot L_c}{i_{fz} \cdot \lambda_1}$$

ahol: $\bar{\lambda}_f$ – viszonyított karcsúság;

k_c – a nyomatéki ábra alakjától függő korrekciós tényező, értékét a 8. táblázat mutatja;

L_c – a nyomott öv oldalirányú megtámasztásai közötti távolság;

i_{fz} – a helyettesítő nyomott öv inerciasugara a hajlítás síkjára merőleges (azaz gyenge) tengelyre számítva, 4. keresztmetszeti osztály esetén az effektív keresztmetszeti felületből kell meghatározni;

λ_1 – anyagjellemző, mely a rugalmassági modulustól és a folyáshatártól függ.



λ_1 – anyagjellemző, mely a rugalmassági modulustól és a folyáshatártól függ.

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

Ennek megfelelően:








S235 anyagra: $\lambda_1 = 93,9$

S275 anyagra: $\lambda_1 = 86,8$

S355 anyagra: $\lambda_1 = 76,4$

S420 anyagra: $\lambda_1 = 70,2$

S460 anyagra: $\lambda_1 = 67,1$

A nyomatéki ábra alakja	k_c tényező
	$\frac{1}{1,33 - 0,33\psi}$
	0,94
	0,90
	0,91
	0,86
	0,77
	0,82

8. táblázat. A k_c tényező értéke [Dunai, Horváth 2007]



Nem szükséges elvégezni az övmerevség-vizsgálatot akkor, ha teljesül a következő feltétel:

$$\bar{\lambda}_f \leq \bar{\lambda}_{c0} \cdot \frac{M_{c,Rd}}{M_{y,Ed}}$$

ahol: $\bar{\lambda}_{c0}$ – a határkarcsúság, melynek értéke 0,5;

$M_{c,Rd}$ – a gerenda keresztmetszetének nyomatéki ellenállása, amelynek számításában azonban a γ_{M0} helyett γ_{M1} biztonsági tényezőt kell figyelembe venni.

Ha a hatékony oldalirányú megtámasztások kellően sűrűn vannak, akkor a vizsgálat szükségtelenné válik:

$$L_c \leq 0,5 \cdot \frac{M_{c,Rd}}{M_{y,Ed}} \cdot \frac{i_{fz} \cdot \lambda_1}{k_c}$$

ahol: L_c – a nyomott öv oldalirányú megtámasztásai közötti távolság;

$M_{c,Rd}$ – a gerenda keresztmetszetének nyomatéki ellenállása;

$M_{y,Ed}$ – az oldalirányú megtámasztások közötti szakaszon fellépő legnagyobb nyomaték;



i_{fz} – a helyettesítő nyomott öv inerciasugara a hajlítás síkjára merőleges (azaz gyenge) tengelyre számítva;

λ_1 – anyagjellemző;

k_c – a nyomatéki ábra alakjától függő korrekciós tényező.

Megjegyzés:

Melegen hengerelt vagy ekvivalens hegesztett szelvények esetén a helyettesítő nyomott öv inerciasugara a gyakorlati számítások pontosságának megfelelő közelítéssel, a következő összefüggéssel számítható:

$$\text{ha } \frac{h}{b} > 1,2 \quad i_{f,z} = 1,15 \cdot i_z$$

$$\text{ha } \frac{h}{b} > 1,2 \quad i_{f,z} = (1,15 + 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot h) \cdot i_z$$

Mintapélda: AGYU: 3.13 Példa

Felhasznált irodalom

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

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

GRÜN TAMÁS: *Acélszerkezetek I. Nyomott elemek kihajlása. A kihajlási hosszak értelmezése. 4. gyakorlat.* Elektronikus jegyzet, Pécs, 2013

GRÜN TAMÁS: *Acélszerkezetek II. Hajlított elemek kifordulása. Stabilitásvesztési módok.* Elektronikus jegyzet, Pécs, 2013