



AXISVM

AUTO M_{cr} SEGÉDLET

Készítette: Inter-CAD Kft.

Ez az oldal szándékosan üres.

TARTALOMJEGYZÉK

1. RÉSZ - ELMÉLETI HÁTTÉR	1
I. BEVEZETÉS	1
II. OLDALIRÁNYÚ TÁMASZOK	2
2. RÉSZ - PÉLDÁK	7
I. GERENDATARTÓ	7
3. RÉSZ - VERIFIKÁCIÓS DOKUMENTÁCIÓ	11
I. VALIDÁLÁS LTBeam PROGRAMMAL ÉS HÉJMODELLEKKEL	12
II. ALAPESETEK ÖSSZEVETÉSE AZ ENV ANALITIKUS KÉPLETÉVEL	15
III. KÜLÖNBSÉGEK AZ AXISVM 12-ES ÉS 13-AS VERZIÓJA KÖZÖTT	18

Ez az oldal szándékosan üres.

1. RÉSZ - ELMÉLETI HÁTTÉR

I. BEVEZETÉS

Az Auto Mcr módszer az Acéltervező Modulban a rugalmas kritikus nyomaték (M_{cr}) számításához használt eljárás. Az M_{cr} a kifordulási ellenállás számításának alapjául szolgáló paraméter. Az Auto Mcr módszer a rúdelemek elkülönítésével, egy végeelemes almodellben, sajátérték feladat megoldásával határozza meg az M_{cr} értéket. Az almodell speciális rúd végeelemekből épül fel, melyeknek csak a kifordulás szempontjából mértékadó csomóponti szabadságfokai vannak:

- v oldaltírányú vagyis lokális y tengely irányú eltolódás
- θ_x rúdtengely vagyis lokális x tengely körüli elfordulás
- θ_z gyenge tengely vagyis lokális z tengely körüli elfordulás
- w öblösödés

Az elkülönítés során az almodell megtámasztásait a program automatikusan megkeresi, melyeket a felhasználó szerkeszthet. A megtámasztások merevségi komponensei az almodell lokális tengelye szerinti indexeléssel: R_y , R_{xx} , R_{zz} , R_w . Az automatikus támaszfelismerés részletei a következő alfejezetben (1/II) található meg.

Az Auto Mcr módszer számítási elve az LTBeam programmal azonos, melyről a következő szakirodalomban lehet részletesebben tájékozódni: *Yvan Galea: Moment critique de deversement elastique de poutres flechies presentation du logiciel ltbeam* [1].

A Segédlet célja kettős: egyrészt a program megértését, használatát segíti, másrészt verifikációs példákat tartalmaz. Az első rész rövid elméleti áttekintése után a második részben példákön keresztül szemlélteti az Auto Mcr módszer lehetőségeit és korlátait, illetve segítséget nyújt a program helyes használatához. A harmadik rész egy tömörebb verifikációs dokumentáció, melyben az AutoMcr eredményeit szakirodalmi adatokkal és más programokkal, módszerekkel számított M_{cr} értékekkel hasonlítja össze. Az Auto Mcr módszer használatának alapjait és technikai jellegű segítséget az *AXISVM Felhasználói kézikönyv* 6.6.1 fejezete tartalmazza.

Az Auto Mcr módszerrel legalább a gyenge tengelyre szimmetrikus keresztmetszetű, egyenes tengelyű szerkezeti elemek vizsgálhatók. A módszer képes kezelni:

- változó keresztmetszetű elemeket;
- konzolt: külön nem kell definiálni, hogy konzol vagy sem;
- külpontos terheket: gyenge tengely z irányú külpontosság, egyszerre egyféle értékkel;
- külpontos megtámasztásokat: támaszonként akár eltérő külpontossággal.

A módszer csak merevség és geometria szempontjából folytonos elemeket vizsgál, ezért a következő esetekben a vizsgált elemet részekre bontja:

- kiékelte gerenda (a vizsgált elem egyik része változó keresztmetszetű, másik része prizmatikus);
- közbenső csukló.

II. OLDALIRÁNYÚ TÁMASZOK

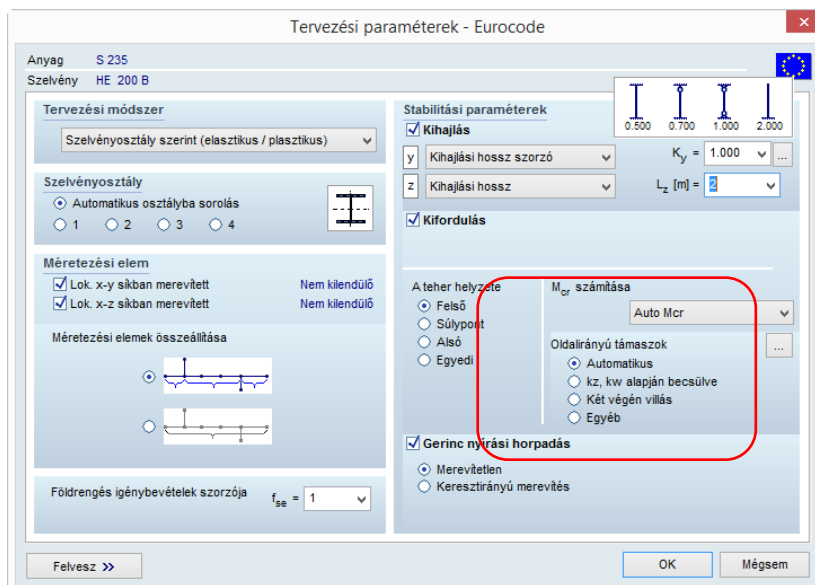
Az Auto Mcr módszer alapbeállítás mellett automatikusan felismeri a méretezett elem oldalirányú megtámasztásait, melyet a következőkben részletezünk. A modellben definiált támaszokon túl a méretezett elemhez közvetlenül csatlakozó elemek megtámasztó hatására ad becslést:

- Rács, rúd és bordaelemek;
- Héjelemek;
- Merev elemek, pont-pont kapcsolati elemek.

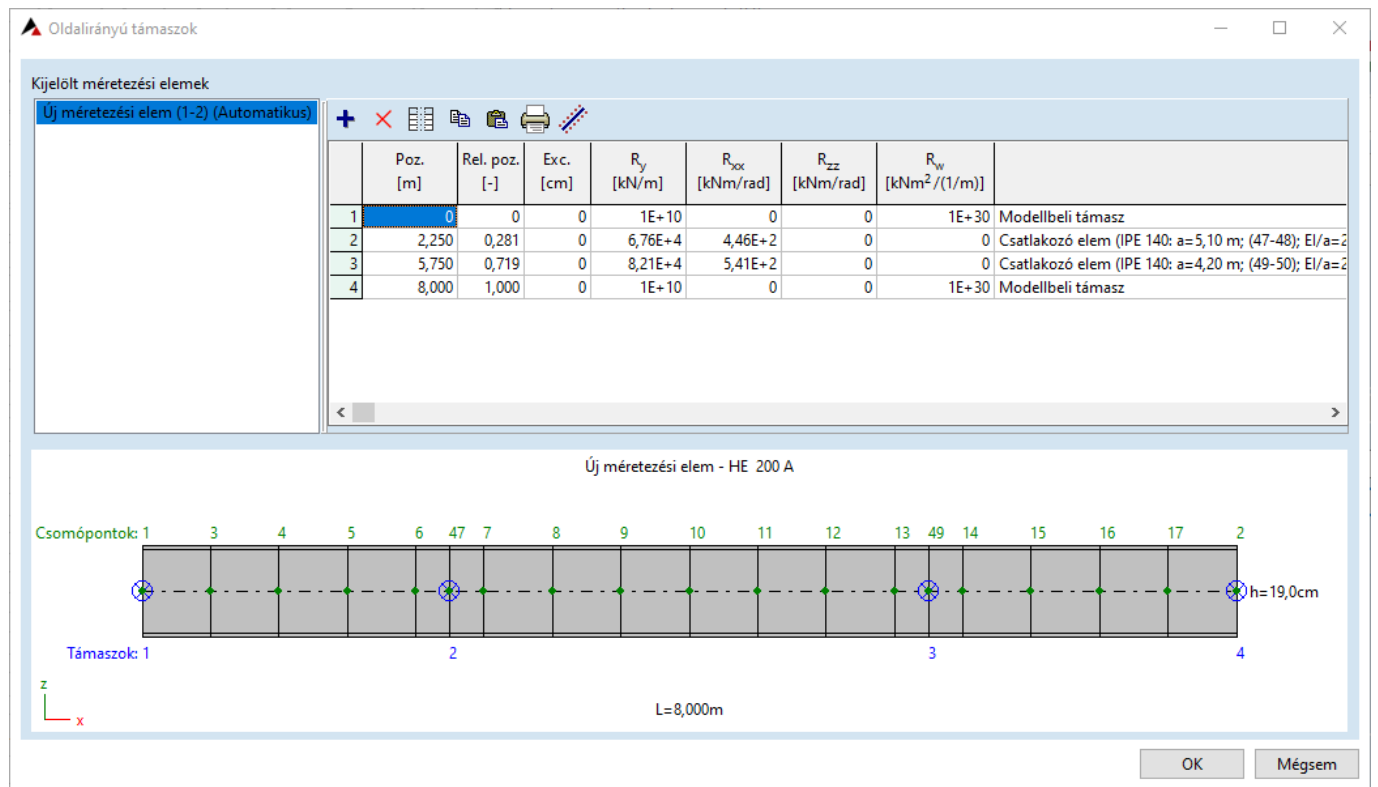
Az egyes esetekben figyelembe vett támaszmerevségeket a 2-3. táblázat foglalja össze.

A *Tervezési Paraméterek* ablakban (1. ábra) az Auto Mcr beállítás alatt lévő Oldalirányú támaszok felirat melletti [...] gombra kattintva lehetőség van a támaszmerevségek szerkesztésére. Ekkor megjelenik az *Oldalirányú Támaszok* ablak (2. ábra), ahol az Auto Mcr beállításától függően megjelennek a méretezett elemhez rendelt oldalirányú támaszok. Az AutoMcr beállításai a következők lehetnek:

Automatikus	Alapbeállítás; lásd 2-3. táblázat.
k_z , k_w alapján becsülve	A kihajlásnál megadott k_z és a kifordulásnál megadott k_w paraméterek alapján az AXISVM 12-es verziójához hasonlóan becslést ad az oldalirányú támaszok pozíciójára. Részletekért lásd az 1. táblázatot.
Két végén villás	A méretezett elem két végén olyan támaszokat feltételez, melyek R_y , R_{xx} komponensei merevek. Ha a felhasználó a „Konzol” jelölőnégyzetet bekapcsolta, akkor csak az elem egyik végén jelenik meg támasz, melynek R_y , R_{xx} és R_{zz} komponensei merevek.
Egyéb	Csak a felhasználó által az <i>Oldalirányú Támaszok</i> ablakban megadott támaszokat veszi figyelembe a program.



1. ábra: Tervezési Paraméterek ablak

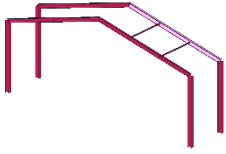

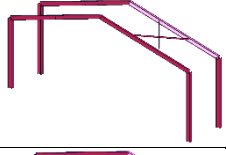
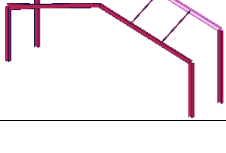


2. ábra: Oldalirányú Támaszok ablak

1. Táblázat: Támaszok k_z és k_w alapján

		1. támasz					2. támasz					
	k_z	k_w	Rel. poz.	R_y	R_{xx}	R_{zz}	R_w	Rel. poz.	R_y	R_{xx}	R_{zz}	R_w
	[-]	[-]	[-]	[kN/m]	$\frac{[kNm]}{[rad]}$	$\frac{[kNm]}{[rad]}$	$\frac{[kNm^2]}{[1/m]}$	[-]	[kN/m]	$\frac{[kNm]}{[rad]}$	$\frac{[kNm]}{[rad]}$	$\frac{[kNm^2]}{[1/m]}$
Nem konzol	$2 <$		0	10^{10}		10^7		-				
		$2 <$	0		10^{10}		10^7	-				
	2		0	10^{10}		10^{10}		-				
		2	0		10^{10}		10^{10}	-				
	$1 < k_z < 2$		0	10^{10}		10^{10}		1	$10^{5 \cdot (2 - k_z)}$		$10^{5 \cdot (2 - k_z)}$	
		$1 < k_w < 2$	0		10^{10}		10^{10}	1		$10^{5 \cdot (2 - k_w)}$		$10^{5 \cdot (2 - k_w)}$
	1	1	0	10^{10}	10^{10}	0	0	1	10^{10}	10^{10}	0	0
	0.75		0	10^{10}		10^7		1	10^{10}		10^7	
		0.75	0		10^{10}		10^7	1		10^{10}		10^7
	0.5		0	10^{10}		10^{10}		1	10^{10}		10^{10}	
		0.5	0		10^{10}		10^{30}	1		10^{10}		10^{30}
	< 0.5		0; 1	10^{10}		0		$\frac{1}{k_{zi}}$ $\frac{2}{k_{zi} \dots}$	10^{10}		0	
		< 0.5	0; 1		10^{10}		0			10^{10}		0
Konzol			0 vagy 1	10^{10}	10^{10}	10^{10}	0					

2. Táblázat: Automatikusan felismert támaszok – modellben definiált támaszok, csatlakozó vonalelemek

Támasz vagy megtámasztó elem	α	β	R_y	R_{xx}	R_{zz}	R_w	Példa	Megjegyzés
	[°]	[°]	[kN/m]	[kNm/rad]	[kNm/rad]	[kNm ² /(1/m)]		
Csomóponti támasz	-	-	támasz merevsége alapján			0		az R_{zz} meghatározásánál figyelembe veszi, ha a méretezett elem végpontjai csuklósak
Rács vagy csuklósan csatlakozó rúd- vagy bordaelem	-	-	$EA/a *$	0	0	0		
Mereven csatlakozó rúd- vagy bordaelem	90 ± 15	0 ± 15	<i>merev</i> $EA/a *$	<i>merev</i> $2 \cdot EI/a$	0	0		Csatlakozó elem tulajdonságai: EI, EA: merevség, a: hossz (konzervatív – feltételezzük, hogy az elem túlsó vége csuklós) R_{cs} : rúdvégi csukló merevsége, ahol: $cs = \{x, yy, zz\}$
			<i>Félmerev</i> $\frac{EA/a \cdot R_{cs}}{EA/a + R_{cs}}$	<i>Félmerev</i> $\frac{2EI/a \cdot R_{cs}}{2EI/a + R_{cs}}$				
	90 ± 15	90 ± 15	0	<i>merev</i> $2 \cdot EI/a$	0	0		
				<i>félmerev</i> $\frac{2EI/a \cdot R_{cs}}{2EI/a + R_{cs}}$				
$\neq 90 \pm 15$	0 ± 15	0	0	0	0		megjelenik a táblázatban, hogy a felhasználó szerkeszthesse	
90 ± 15	$\neq 0 \pm 15$	0	0	0	0			

* ha a vizsgált elem x-y síkban nem kilendülő; ellenkező esetben $R_y = 0$ kN/m

3. Táblázat: Automatikusan felismert támaszok – egyéb csatlakozó elemek

Támasz vagy megtámasztó elem	α	β	R_y	R_{xx}	R_{zz}	R_w	Példa	Megjegyzés
	[°]	[°]	[kN/m]	$\left[\frac{\text{kNm}}{\text{rad}}\right]$	$\left[\frac{\text{kNm}}{\text{rad}}\right]$	$\left[\frac{\text{kNm}^2}{1/\text{m}}\right]$		
Felületelem vagy Tartomány (merevségtől és megtámasztásoktól függetlenül)	90 ± 15	0 ± 15	$10^{10} *$	10^{10}	10^{10}	0	oszlop méretezése esetén az alaplemez/födém befogó hatása	
	0 ± 15	90 ± 15	0	0	0	0		
	0	≤ 45	$10^{10} *$	10^{10}	10^{10}	0	gerenda méretezése esetén a födém folytonos megtámasztó hatása	
Merev test vagy pont-pont kapcsolati elem - túlsó végén megtámasztott	Támasz tulajdonságai alapján						gerenda méretezése esetén külpontos támasz	támasz külpontossága: a merev elem hossza;
Merev test vagy pont-pont kapcsolati elem - túlsó végén csatlakozó rúd	Mint a rúd- vagy bordaelem						gerenda méretezése esetén külpontosan csatlakozó elem	pont-pont kapcsolati elem: csak azt vesszük figyelembe, mely a vizsgált elem lokális rendszere szerinti K_y és K_{xx} merevségű $\geq 10^{10}$
Merev test vagy pont-pont kapcsolati elem - túlsó végén csatlakozó felület	Mint a Felületelem / Tartomány						gerenda méretezése esetén merev elemmel kapcsolt födém	

* ha a vizsgált elem x-y síkban nem kilendülő; ellenkező esetben $R_y = 0$ kN/m

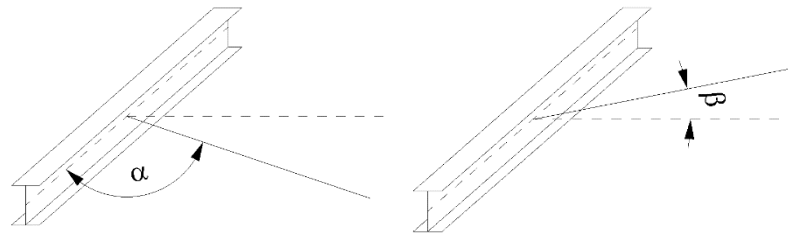
Az α és β magyarázata a következő oldalon található.

Jelmagyarázat

α méretezett elem tengelye + megtámasztó elem tengelye/födém síkja által bezárt legkisebb szög ($0 \div 90^\circ$)

β méretezett elem erős tengelye + megtámasztó elem tengelye/födém síkja által bezárt legkisebb szög ($0 \div 90^\circ$)

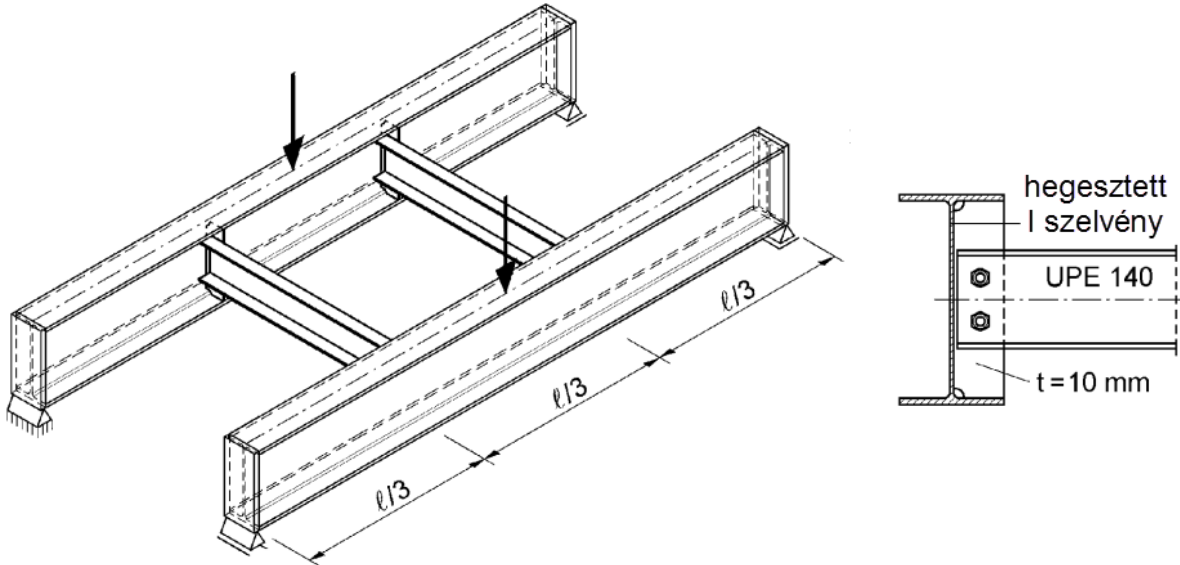
Például gerenda méretezése esetén a merevítő rendszer megtámasztó hatása:



2. RÉSZ - PÉLDÁK

I. GERENDATARTÓ

Az alábbi szerkezetben a szélső ún. Gerendatartók (3. ábra) kifordulását a végpontokban villás támaszok, a harmadolópontokban csatlakozó merevítő rúdelemek gátolják.



3. ábra: Gerendatartó és csomóponti kialakítás (forrás: [2])

A példa célja bemutatni:

- a csatlakozó elemek által biztosított támaszmerevségek felvételét;
- Auto Mcr eredményeinek (M_{cr}) összevetése héjmodellel és az LTBeam program eredményeivel.

A példa alapjául szolgált az alábbi szakirodalom, mely a csatlakozó elemek merevségének felvételében nyújt segítséget: *Stahlbau: Teil 2 - Stabilität und Theorie II. Ordnung* [2]

Alapadatok:

- Szelvények [mm]:
 - gerendatartó: a héjelemes modellel való összehasonlíthatóság érdekében IPE300-nak megfelelő méretű hegesztett I szelvény: gerinc: 300*7 öv: 150*11;
 - merevítő elemek: UPE 140;
- Fesztávok:
 - gerendatartó: $l=6\text{m}$;
 - merevítő elemek: $a=3\text{m}$;
- Teherelrendezés: a gerendatartókon végig futó megoszló teher vagy koncentrált teher a gerendatartók közepén; a szelvény súlypontjában illetve a felső öv középpontjában;
- Megtámasztás: eltolódási támaszok a gerendák végein az 3. ábra szerint (az egyik gerenda oldalirányban képes elmozdulni)

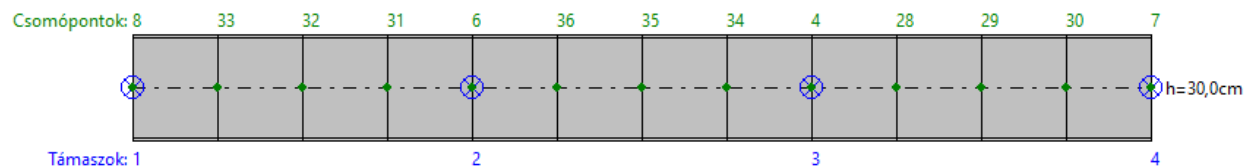
Axis modellek neve:

- rúdelemes modell Auto Mcr módszerrel: I. Gerendatartó - rúdelemmel.axs
- héjelemes modell sajátérték feladatként: I. Gerendatartó - héjelemmel.axs

Támaszmerevségek

A gerendatartók végpontjaiban villás megtámasztás működik. Az AXISVM 13 programban, az *Elemek >> Csomóponti támaszok* segítségével beállított merevségeket az Auto Mcr módszer az almodell elkülönítésekor automatikusan felismeri. A *Tervezési Paraméterek >> Oldalirányú támaszok* ablakban (4. ábra) láthatóak az automatikusan felismert *modellbeli támaszok*, melyek (a gerendatartó lokális tengelye szerinti indexeléssel) R_y eltolódási és R_{xx} csavarási merevségi komponensei merevek.

	Poz. [m]	Rel. poz. [-]	Exc. [cm]	R_y [kN/m]	R_{xx} [kNm/rad]	R_{zz} [kNm/rad]	R_w [kNm ² /(1/m)]	Típus
1	0	0	0	1E+10	1E+10	0	0	Modellbeli támasz
2	2,000	0,333	0	1,29E+5	8,39E+2	0	0	Csatlakozó elem (UPE 140: a=3,00 m; (5-6); EI/a=420 kNm; EA/a=128929 kN/m; $\alpha=90^\circ$; $\beta=0^\circ$)
3	4,000	0,667	0	1,29E+5	8,39E+2	0	0	Csatlakozó elem (UPE 140: a=3,00 m; (3-4); EI/a=420 kNm; EA/a=128929 kN/m; $\alpha=90^\circ$; $\beta=0^\circ$)
4	6,000	1,000	0	1E+10	1E+10	0	0	Modellbeli támasz



4. ábra: Oldalirányú támaszok megadása az AXISVM 13 programban

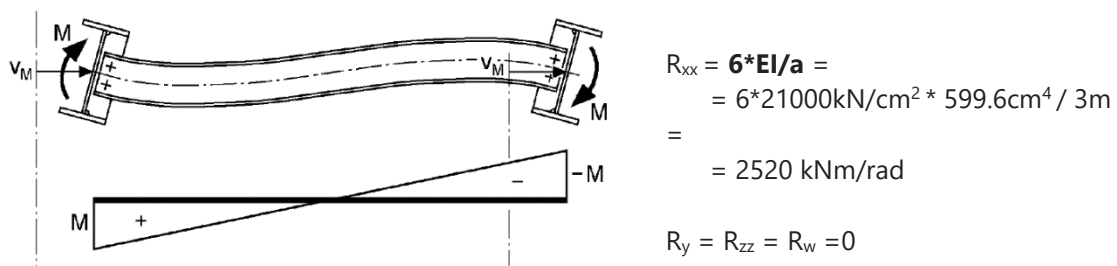
A táblázatban a modellbeli támaszokon túl a csatlakozó merevítő elemek által biztosított támaszok is megjelennek. A program az R_y és R_{xx} merevségkomponensekre ad becslést:

- $R_y = 10^{10}$ kN/m ha a vizsgált elem x-y síkban nem kilendülő; ellenkező esetben $R_y = 0$ kN/m;
- $R_{xx} = 2 \cdot EI/a$ a csatlakozó elem I inerciája, és a hossza alapján.

A felhasználó feladata szükség esetén ezek pontosabb megadása. A merevítő elemek által nyújtott támaszmerevségek felvételére [2] a következőt ajánlja: a merevítő elem hajlítási merevsége (EI/a) alapján könnyen becsülhető a gerendatartó támaszainak csavarási merevsége (R_{xx}). A támaszmerevségeket kétféleképpen lehet felvenni a szerkezet alakváltozásai alapján:

Nem szimmetrikus eset

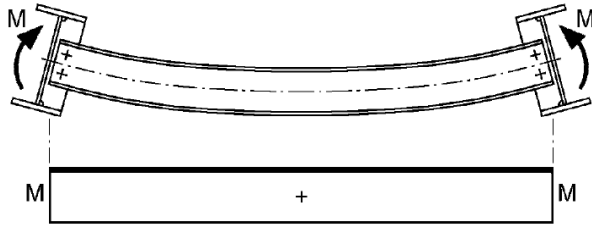
A gerendák eltolódnak és azonos irányban elcsavaródnak. A merevítőelemek nem biztosítanak megtámasztást oldalirányú eltolódás ellen.



5. ábra: Gerendatartó lehetséges alakváltozása: antimetrikus eset

Szimmetrikus eset

A gerendák nem tolódnak el és ellenkező irányban elcsavarodnak. A merevítőelemek kisebb mértékben megtámasztást biztosítanak oldalirányú eltolódás ellen.



$$\begin{aligned}
 R_{xx} &= 2 \cdot EI/a = \\
 &= 2 \cdot 21000 \text{ kN/cm}^2 \cdot 599.6 \text{ cm}^4 / 3 \text{ m} \\
 &= \\
 &= 840 \text{ kNm/rad}
 \end{aligned}$$

$$R_y > 0$$

$$R_{zz} = R_w = 0$$

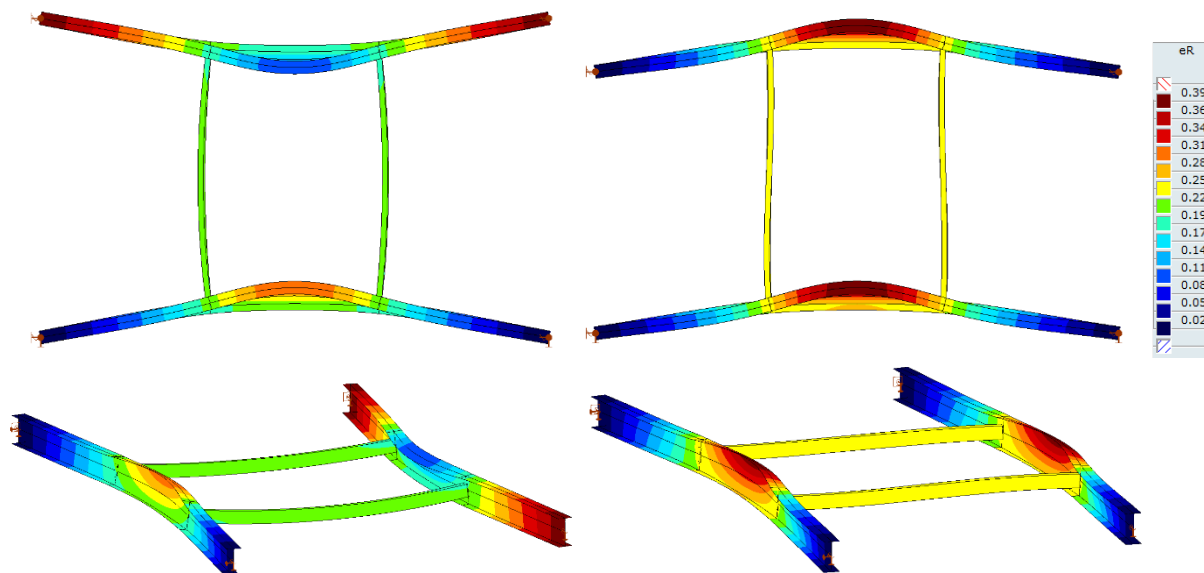
6. ábra: Gerendatartó lehetséges alakváltozása: szimmetrikus eset

Mivel a valóságban a félmerev kapcsolatok illetve a gerenda torzulása a fenti támaszmerevségeket csökkentik, ezért a biztonság javára a második esetet használja a program. A következőkben mindkét esetet vizsgáljuk, a második esetben az R_y elhanyagolásával.

Eredmények összehasonlítása

A kapott M_{cr} értékeket az azonos elven működő LTBeam program valamint az AXISVM 13 programban készült héjmodell eredményeivel vetjük össze, táblázatos formában. Az LTBeam programban (v1.0.10) a modellek az Auto Mcr módszerrel azonos beállításokkal készültek. Az eltérés csak a megoldó algoritmus numerikus hibájából és a végeleemes modellek diszkretizálásból fakadhat.

A héjeleemes modell az AXISVM 13 programban a *Szerkesztés >> Rúdelemek helyettesítése héjmodellel* funkció segítségével készült. A terhek megadása után, a sajátértékfeladat (*Kihajlás fül*) megoldásával teherszorozót kapunk, melyeket a gerendatartóra ható maximális igénybevétellel felszorozva számítható az M_{cr} . A héjeleemes modell a rúdeleemes modellekhez képest részletesebben és pontosabban képes modellezni a valóságot, ezért a rúdeles modellekhez képest pontosabb megoldást kapunk. A héjeleemes modell további előnye, hogy nem kell az elemeket elkülöníteni. Hátránya azonban a modellezés bonyolultsága és a számítás időigénye. Az Auto Mcr módszer számítás a héjeleemes számításhoz viszonyítva kb. 100-szor gyorsabb. A lokális deformációk elkerülése érdekében a gerendatartó gerincét a merevítőelem csatlakozásaiánál definiált merev elemek teszik alaktartóvá (a merevítő borda pontosabb modellezését most elhanyagoljuk). A héjeleemes modellek legkisebb sajátalakja a szimmetrikus eset, a második a nem szimmetrikus eset (7. ábra).



7. ábra: Héjelemes modell sajátalakjai: balra: szimmetrikus eset; jobbra: nem szimmetrikus eset [mm]
Eredmények [kNm]

A 4. táblázat Δ oszlopai az Auto Mcr eredmények (M_{AutoMcr}) eltérését jelentik a többi eredményhez képest (M_{cr}) a $\Delta = (M_{\text{AutoMcr}} - M_{\text{cr}}) / M_{\text{cr}}$ összefüggés szerint.

4. táblázat: Eredmények összevetése

Teher jellege	Teher pozíciója	Alakváltozás jellege	AutoMcr	LTBeam	Δ	Héjmodell	Δ
Megoszló	Felül	Nem szimmetrikus	597	596	0%	644	-8%
		Szimmetrikus	554	554	0%	581	-5%
	Súlypontban	Nem szimmetrikus	625	624	0%	619	1%
		Szimmetrikus	578	577	0%	558	3%
Koncentrált	Felül	Nem szimmetrikus	628	629	0%	624	1%
		Szimmetrikus	569	569	0%	566	1%
	Súlypontban	Nem szimmetrikus	702	702	0%	669	5%
		Szimmetrikus	639	639	0%	610	5%

Az LTBeam programmal való összevetés alapján az Auto Mcr számítás pontos. Továbbá megállapítható, hogy a héjmodelles eredmények és a rúdmodelles eredmények jó egyezést mutatnak, tehát a támaszmerevségek felvétele elegendően pontos a fent megadott módszer szerint.

3. RÉSZ - VERIFIKÁCIÓS DOKUMENTÁCIÓ

Ebben a részben az AutoMcr módszer validálása található. A számított M_{cr} értékeket az azonos elven működő LTBeam programmal illetve más számítási módszerek eredményeivel hasonlítottuk össze. Az első részben az LTBeam és héj végeleemes modellel készült eredmények az LTBeam validálási dokumentációjából származnak: *Yvan Galea: LTBeam – Report on Validation Tests* [3]. Ezt követően található az alapesetekre az ENV [4] szerinti analitikus formulával kapott eredményekkel való összevetés. Végezetül pedig az AutoMcr módszer AXISVM 12-es és 13-as verziója közötti különbségek találhatóak.

Az Auto Mcr eredmények ($M_{AutoMcr}$) hibáját (Δ) a többi módszerrel számolt eredményhez képest (M_{cr}) a következőkben a $\Delta = (M_{AutoMcr} - M_{cr}) / M_{cr}$ összefüggés szerint adjuk meg.

I. VALIDÁLÁS LTBeam PROGRAMMAL ÉS HÉJMODELLEKKEL

Ansysis héjmodell

[3] 2. fejezete alapján készült.

Ez a rész az AutoMcr módszerrel számítható összes típusú példát végigveszi, egyszerű modelleken. Az eredményeket az LTBeam programhoz és Ansysban készült héjmodellekhez [3] hasonlítjuk a 2-3 táblázatban. Az eredmények $-4\div 3\%$ eltérést mutatnak, mely nagyon jó egyezés.

Axis modellek neve: LTBeam Validation - 2. fejezet - #.axis (ahol # a modell sorszáma)

5. táblázat: Eredmények összevetése I.

Példa típusa	Példa sorszáma #	Assz. km.	Külj. teh.	Auto Mcr [kNm]	LTBeam		Ansys		Megjegyzés	
					M _{cr} [kNm]	Δ [%]	M _{cr} [kNm]	Δ [%]		
					VÁLTOZÓ keresztmetszet	40				188
	41			156	155	-0.7	157	0.4		
TÖBBTÁMASZÚ TARTÓ: közbenő oldalirányú támasszal	50			275	274	-0.4	274	-0.4	<i>Méretezési elemek összeállítása</i> paraméter: csak az egyben méretezett elemek pontosak	
	51			293	288	-1.6	288	-1.6		
	52			343	338	-1.5	338	-1.5		
	53			254	255	0.3	255	0.3		
	54			212	210	-0.8	210	-0.8		
	55	x		160	160	0.3	160	0.3		
	56			130	129	-0.9	129	-0.9		
	57			184	184	0.3	184	0.3		
58			157	156	-0.6	156	-0.8			
KONZOL: teher támadáspontja változó: felső öv, nyírési középpont, alsó öv	60		x	180	184	1.7	185	2.4		
				233	233	0.2	234	0.6		
			x	268	267	-0.3	268	-0.1		
	61		x	292	300	2.6	300	2.6		
				421	424	0.7	422	0.2		
			x	538	536	-0.3	532	-1.1		
	62		x	282	290	2.7	291	3.2		
				424	425	0.4	425	0.3		
			x	529	527	-0.4	525	-0.7		
	65			x	119	121	1.4	121	1.8	
					132	133	0.2	133	0.5	
				x	155	157	1.0	157	0.9	
66		x		x	190	193	1.8	193	1.6	
					223	224	0.7	223	0.3	
				x	298	305	2.3	303	1.5	
67			x	184	188	2.3	189	2.5		
				220	221	0.4	221	0.3		
			x	285	290	1.6	288	1.0		

6. táblázat: Eredmények összevetése II.

Példa típusa	Példa sorszáma #	Assz. km.	Külj. teh.	Auto Mcr [kNm]	LTBeam		Ansys		Megjegyzés
					M _{cr} [kNm]	Δ [%]	M _{cr} [kNm]	Δ [%]	
KÉTTÁMASZÚ TARTÓ: változó megtámasztási beállításokkal	70			150	149	-0.5	149	-0.7	
	71			530	523	-1.4	523	-1.2	
	72			361	358	-0.9	358	-0.9	
	75	x		105	105	-0.4	105	-0.4	
	76			264	264	0.1	263	-0.4	
77			223	222	-0.3	221	-0.7		
KÉTTÁMASZÚ TARTÓ: közbenső oldalirányú támasszal	80			854	853	-0.1	847	-0.9	A közbenső oldalirányú támasz definiálható modellbeli támaszként, melyet az Auto Mcr automatikusan felismer; illetve definiálható az Oldalsó támaszok ablakban
	82			625	625	0.1	622	-0.4	
	83			1265	1230	-2.9	1220	-3.7	
	84		x	625	622	-0.4	622	-0.4	
				579	577	-0.3	577	-0.3	
		x	359	363	1.2	363	1.2		
	85			477	478	0.1	476	-0.2	
	86			299	300	0.2	299	-0.1	
	87			344	345	0.1	344	-0.1	
	88		x	432	432	-0.1	431	-0.4	
				403	403	0.1	402	-0.1	
		x	377	378	0.4	378	0.1		
89			330	324	-1.7	323	-1.9	folytonos támasz: csak sűrű pontbeli támszok definiálásával vehető figyelembe	
90			319	314	-1.5	313	-1.8		
91		x	315	309	-1.7	310	-1.6		
92	x		225	224	-0.4	223	-0.5		
T SZELVÉNY: kéttámaszú tartó	100	x		17.7	17.8	0.6	17.8	0.7	
	101			15.1	15.1	-0.3	15.1	-0.2	
	102			15.6	15.7	0.7	15.8	1.0	
	103			13	13.0	-0.1	13.0	0.3	

Változó keresztmetszet

[3] 5. fejezete alapján készült.

Két végén villás megtámasztású gerenda, változó gerincmagasságú szelvényvel ($h_{w1} \div h_{w2}$), M_1 és M_2 végnyomatékokkal. Az eredmények általában +2%-kal, maximum -9%-al térnek el az LTBeam és Finelg [3] programok eredményeitől, mely a szelvények eltérő diskretizálásából fakad. Az eltérés a változó keresztmetszetű modellek egyéb bizonytalanságai mellett elhanyagolható mértékű.

Axis modell neve: LTBeam Validation - 5. fejezet - Változó keresztmetszet.axs

7. táblázat: Változó keresztmetszetű gerendák eredményeinek összevetése

Model Nb.	Span [m]	hw1 [mm]	hw2 [mm]	M1 [kNm]	M2 [kNm]	AutoMcr	LTBeam		Finelg	
						M _{cr} [kNm]	M _{cr} [kNm]	Δ %	M _{cr} [kNm]	Δ %
P1-1A	5	400	800	200	-800	3498	3591	2.6	3586	2.4
P1-2A					-600	3718	3817	2.6	3811	2.4
P1-3A					400	2012	2064	2.5	2062	2.4
P1-4A					600	2253	2311	2.5	2308	2.4
P1-5A					800	2391	2453	2.5	2450	2.4
P1-6A					200	1501	1541	2.6	1539	2.5
P3-1A	5	200	1000	200	-1200	3599	3365	-6.9	3361	-7.1
P3-4A					1000	2674	2483	-7.7	2480	-7.8
P3-6A					200	1579	1455	-8.5	1454	-8.6
P1-1A	10	400	800	200	-800	1173	1189	1.3	1189	1.3
P1-6A					200	510	520	2.0	521	2.0
P3-1A	10	2000	1000	200	-1200	1169	1137	-2.8	1138	-2.8

II. ALAPESETEK ÖSSZEVEETÉSE AZ ENV ANALITIKUS KÉPLETÉVEL

Az AXISVM program több verzió óta használja a gyakorlatban elterjedt ún. 3 C tényezőös analitikus formulát az M_{cr} számítására, mely az Eurocode előszabványának mellékletében található [4] – erre a továbbiakban ENV képletként hivatkozunk. A képletben használt 3 C tényező és a k_z , k_w befogási tényezők felvételére számos szakirodalom esetenként jelentősen eltérő értékeket ajánl és csupán alapesetekre tér ki. A C_1 tényező felvételére Lopez és társai [7] zárt formulát adtak, melyet az AXISVM program is használ. Ezt a C_1 Lopez képletet különböző megtámasztási viszonyokban és számos terhelési esetben numerikus eredmények alapján kalibrálták.

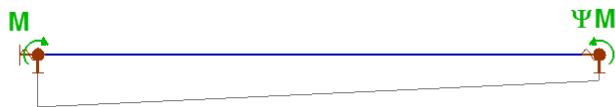
A magyarországi gyakorlatban legelterjedtebben használt C értékek találhatóak az *Acélszerkezetek, 1. Általános eljárások, Tervezés az Eurocode alapján* [5] könyvben (5.13-14-es táblázatok). Az itt és más szakirodalomokban ajánlott értékeket hasonlítja össze a 9. táblázat -10. táblázat az Auto Mcr módszer eredményeivel. A példák kéttámaszú tartók, nyírási középpontban terhelve és megtámasztva, kétszeresen és egyszeresen szimmetrikus I szelvényvel és többféle befogási tényezővel.

Az ENV képlet alkalmazásakor [5]-nek megfelelően egyenlő k_z és k_w értéket vettünk fel. A csuklós és befogott megtámasztási viszonyokon túl egy átmeneti, ún. „félmerev” esetre is ad ajánlást, amikor a k értékeket 0.7-re vették fel. Ez kevesebb információt ad a tartó megtámasztási viszonyairól, mint amit az Auto Mcr programban meg kell adni. Ezért az Auto Mcr programban három módon modelleztük ezt a „félmerev” esetet. Logikailag a $k=0.7$ -nek az egyik végén befogott, másik végén csuklós tartó felel meg, ebben az esetben a kisebb kritikus nyomaték értéket közöljük. Ezen túl azokat a gyakorlatban is használt átmeneti eseteket vettük, ahol csak k_z vagy $k_w=0.5$, a másik 1. Az 8. táblázat a megtámasztási viszonyokat foglalja össze. (Az Auto Mcr módszer esetén a táblázatban nem szereplő merevségkomponensek értéke nulla.)

8. táblázat: *Megtámasztási viszonyok*

Megtámasztás típusa	ENV		Auto Mcr	
	k_z	k_w	Bal oldali támasz	Jobb oldali támasz
csuklós	1	1	$R_y = R_{xx} = 10^{10}$	$R_y = R_{xx} = 10^{10}$
„félmerev”	0.7	0.7	$R_y = R_{xx} = R_{zz} = R_w = 10^{10}$	$R_y = R_{xx} = 10^{10}$
	0.5	1	$R_y = R_{xx} = R_{zz} = 10^{10}$	$R_y = R_{xx} = R_{zz} = 10^{10}$
	1	0.5	$R_y = R_{xx} = R_w = 10^{10}$	$R_y = R_{xx} = R_w = 10^{10}$
befogott	0.5	0.5	$R_y = R_{xx} = R_{zz} = R_w = 10^{10}$	$R_y = R_{xx} = R_{zz} = R_w = 10^{10}$

Közvetlenül nem terhelt tartók, végnyomatékokkal



8. ábra: Közvetlenül nem terhelt tartó, végnyomatékokkal

Szelvény: szimmetrikus hegesztett I-szelvény (IPE 300 méreteivel).

Fesztáv: 8 méter.

Axis modell neve: Alapesetek - Végnyomaték - Szimmetrikus keresztmetszet.axs

9. táblázat: Kézi és numerikus számítások összevetése, közvetlenül nem terhelt gerendákra

Tartóvégi nyomatékok aránya	Befogási tényező		Auto M _{cr}	ENV analitikus képlet [4] C tényezők [5]					Engineering Mechanics 2012 képlet - LTB Resistance of beams [6]					ENV képlet C ₁ tényező: Lopez [7]			Access Steel [8]			LTBeam v1.0.10		Abaqus [9]				
	ψ	k		k _w	M _{cr}	C ₁	C ₂	C ₃	M _{cr}	Δ	C _{1.0}	C _{1.1}	C ₃	M _{cr}	Δ	C ₁	M _{cr}	Δ	C ₁	M _{cr}	Δ	M _{cr}	Δ	M _{cr}	Δ	
[-]	[-]	[-]	[kNm]	[-]	[-]	[-]	[kNm]	[%]	[-]	[-]	[-]	[kNm]	[%]	[-]	[kNm]	[%]	[-]	[kNm]	[%]	[-]	[kNm]	[%]	[kNm]	[%]	[kNm]	[%]
1	1	1	57	1,000			57	0	1,000	1,000		57	0	1	57	0	1	57	0	57	0	57	0			
	0,7L	0,7L	92	1,000			91	-1	1,016	1,100		99	8	1	91	-1				91	-1					
	0,7R	0,7R	91						1,016	1,100		99	9							91	0					
	0,5	1	127	1,000			114	-10	1,000	1,127		122	-4	1	114	-10				126	-1					
	1	0,5	84	1,000			75	-11						1	75	-11				84	0					
	0,5	0,5	150	1,000			150	0						1	150	0				150	0					
0,5	1	1	75	1,323			75	1	1,312	1,320		75	0	1,301	74	-1	1,31	75	0	75	0					
	0,7L	0,7L	137	1,473			134	-2	1,480	1,616		145	6	1,302	119	-13				134	-2					
	0,7R	0,7R	109						1,213	1,317		118	9						109	0						
	0,5	1	165	1,514			173	5	1,310	1,482		161	-3	1,301	148	-10				165	0					
	1	0,5	111	1,323			99	-10						1,301	98	-12				111	0					
	0,5	0,5	198	1,514			227	15						1,305	196	-1				198	0					
0	1	1	103	1,879			107	4	1,770	1,847		103	0	1,78	102	-1	1,77	101	-2	104	1					
	0,7L	0,7L	223	2,092			191	-14	2,331	2,683		239	7	1,785	163	-27				225	1					
	0,7R	0,7R	133						1,453	1,592		143	7						134	1						
	0,5	1	224	2,150			245	10	1,753	2,027		218	-3	1,782	203	-9				226	1					
	1	0,5	155	1,879			141	-9						1,782	134	-14				157	1					
	0,5	0,5	273	2,150			323	18						1,803	271	-1				275	1					
-0,5	1	1	142	2,704			154	9	2,331	2,591		141	0	2,397	137	-4	2,33	133	-6	143	1					
	0,7L	0,7L	319	3,009			275	-14	3,078	3,399		305	-4	2,499	228	-29				321	1					
	0,7R	0,7R	162						1,711	1,897		170	5						163	1						
	0,5	1	285	3,093			353	24	2,230	2,579		277	-3	2,472	282	-1				289	1					
	1	0,5	224	2,704			203	-9						2,472	186	-17				228	2					
	0,5	0,5	371	3,093			465	25						2,679	402	8				375	1					
-1	1	1	154	2,752			157	2	2,555	2,733		152	-2	2,449	140	-9	2,55	140	-9	154	0	153	-1			
	0,7L	0,7L	191	3,063			280	46	1,921	2,103		189	-1	2,652	242	27				190	-1					
	0,7R	0,7R	189						1,921	2,103		189	0						190	1						
	0,5	1	273	3,149			359	32	2,223	2,390		265	-3	2,599	296	8				271	-1					
	1	0,5	268	2,752			207	-23						2,599	195	-27				268	0					
	0,5	0,5	380	3,149			473	25						3,024	454	19				378	-1					

A táblázatban látható, hogy a különböző módszerekkel és megközelítésekkel számított eredmények jelentősen szórnak. Az Auto Mcr módszer és az LTBeam eredmények minden esetben kiváló egyezést mutatnak.

- Csuklós tartó esetében minden esetben jó az egyezés.
- Befogott esetben a Lopez és társai [7] által megadott C_1 tényező közelebb áll a Auto Mcr eredményeihez, főként $\Psi > 0$ esetben.
- A „félmerev” eset eltérései a megtámasztási viszonyok különböző feltételezéseiből adódnak.


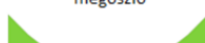
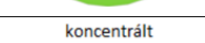

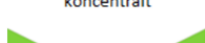
Közvetlenül terhelt tartók

Szelvény: IPE 400 hengerelt I-szelvény.

Fesztáv: 10 méter.

Axis modell neve: Alapesetek - Közvetlenül terhelt - Szimmetrikus keresztmetszet.axs

10. táblázat: Kézi és numerikus számítások összevetése közvetlenül terhelt gerendákra

Teher jellege és a nyomatéki ábra alakja	Befogási tényező		Auto Mcr	ENV analitikus képlet [4] C tényezők [5]					Engineering Mechanics 2012 képlet - LTB Resistance of beams [6]						ENV képlet C_1 tényező: Lopez [7]			LTBeam v1.0.10	
	k	k_w	M_{cr}	C_1	C_2	C_3	M_{cr}	Δ	$C_{1,0}$	$C_{1,1}$	C_2	C_3	M_{cr}	Δ	C_1	M_{cr}	Δ	M_{cr}	Δ
	[-]	[-]	[kNm]	[-]	[-]	[-]	[kNm]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kNm]	[%]	[-]	[kNm]	[%]	[kNm]	[%]
 megoszló	1	1	135	1,132	0,459	0,525	134	-1	1,127	1,132	0,459	0,525	134	-1	1,129	134	-1	134	-1
	0,5	0,5	292	0,972	0,304	0,980	290	-1	0,947	0,97	0,31	0,674	283	-3	1,014	302	3	289	-1
 megoszló	1	1	314	2,576	1,562	0,753	305	-3	2,576	2,608	1,562	-0,859	305	-3	2,408	285	-9	308	-2
	0,5	0,5	525	1,494	0,652	1,070	446	-15	1,494	1,746	0,825	0,003	446	-15	1,908	569	8	516	-2
 koncentrált	1	1	161	1,365	0,553	0,411	162	0	1,348	1,363	0,553	0,411	160	-1	1,247	148	-8	161	0
	0,5	0,5	318	1,070	0,432	0,338	319	0	1,031	1,067	0,437	0,516	308	-3	1,030	307	-3	318	0
 koncentrált	1	1	203	1,565	1,267	2,640	186	-9	1,683	1,726	1,388	-0,716	199	-2	1,382	164	-19	203	0
	0,5	0,5	313	0,938	0,715	4,800	280	-12	0,937	1,057	0,843	-0,068	280	-11	1,037	309	-1	313	0
 koncentrált	1	1	130	1,046	0,430	0,562	124	-5	1,038	1,040	0,431	0,562	123	-5	1,124	133	2	130	0
	0,5	0,5	277	1,010	0,410	0,539	301	8	0,922	0,945	0,237	0,772	275	-1	1,013	302	9	277	0

III. KÜLÖNBSÉGEK AZ AXISVM 12-ES ÉS 13-AS VERZIÓJA KÖZÖTT

A 12-es verzió az elkülönítés során az oldalsó megtámasztásokat a felhasználó által definiált k_z és k_w befogási tényezők alapján becsüli. Az így számolt M_{cr} értékek az alapesetekben ($k=0.5$ vagy $k=1$) jó egyezést mutatnak a v13-as verzióval, de $k_z \neq k_w$ esetében pontatlanabbak.

Fontos eltérés továbbá, hogy a 13-as verzióban a befogott, kéttámaszú gerenda esetén a modellbeli támaszokat a biztonságos modellezés érdekében az Auto Mcr módszer $R_y=R_{xx}=R_{zz}=10^{10}$ beállításként ismeri fel, az R_w merevséget a felhasználónak kell megadnia. Ettől eltérően a 12-es verzióban $k_z=k_w=0.5$ esetén R_w is merev.

11. táblázat: Megtámasztási viszonyok

Megtámasztás típusa	Befogási tényezők		Oldalirányú támaszok merevsége	
	k_z	k_w	Axis VM 12	AXISVM 13 alapbeállítás
csuklós	1	1	$R_y = R_{xx} = 10^{10}$	$R_y = R_{xx} = 10^{10}$
befogott	0.5	0.5	$R_y = R_{xx} = R_{zz} = R_w = 10^{10}$	$R_y = R_{xx} = R_{zz} = 10^{10}$

A 13-as verzióban az AutoMcr módszer numerikusan pontosabb, az M_{cr} értékében legfeljebb $\pm 10\%$ eltéréssel a 12-es verzióhoz képest. Az AXISVM 13 programban először megnyitott 12-es modellekben az M_{cr} értékek a 12-es verzióban beállított befogási tényezők alapján kerülnek meghatározásra, de a pontosabb 13-as algoritmussal. Ez a paraméterablakban az „AutoMcr_v12” módszerként látható. Javasoljuk a modellek konvertálását, és a kifordulási paraméterek újradefiniálást az oldalsó megtámasztások megadásával.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Yvan Galea: Moment critique de deversement elastique de poutres flechies presentation du logiciel ltbeam, CTICM, www.cticm.com, 2003.
- [2] Stahlbau: Teil 2 - Stabilität und Theorie II. Ordnung, 10.4 Stabilisierung durch behinderung der verdrehungen, szerző: Rolf Kindmann, Ernst&Sohn, 4. kiadás, pp. 336-338., 2008.
- [3] Yvan Galea: LTBeam – Report on Validation Tests, CTICM, July 2002, www.cticm.com
- [4] ENV 1993-1-1: Appendix F
- [5] Ádány, Dulácska, Dunai, Fernezely, Horváth: Acélszerkezetek, 1. Általános eljárások, Tervezés az Eurocode alapján, 2006
- [6] Y. Koleková, I. Baláž: LTB resistance of beams influenced by plastic reserve or local buckling, 18th International Conference Engineering Mechanics, Svratka, Czech Republic, 2012
- [7] López, Yong, Serna: Lateral-torsional buckling of steel beams: A general expression for the moment gradient factor. Proceedings of the International Colloquium of Stability and Ductility of Steel Structures, D. Camotim et al. Eds., Lisbon, Portugal, September 6-8, 2006.
- [8] Access Steel: NCCI: Elastic critical moment for lateral torsional buckling, SN003a-EN-EU, 2008
- [9] Braham M. – "Le déversement élastique des poutres en I à section monosymétrique soumises à un gradient de moment de flexion" – Revue Construction Métallique n°1-2001 – CTICM