

# Nagyszilárdságú acél hegesztett I-szelvények lokális horpadási ellenállása

## Local buckling resistance of high strength steel welded I-sections

SOMODI Balázs PhD<sup>1</sup>, KÖVESDI Balázs PhD<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest 1111 Műegyetem rkp. 3. cím,  
+36 1 463 1825, somodi.balazs@emk.bme.hu

<sup>2</sup>Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest 1111 Műegyetem rkp. 3. cím,  
+36 1 463 1998, kovesi.balazs@emk.bme.hu

### Abstract

*In the field of structural engineering accurate consideration of local buckling and determination of the effective cross-section properties are essential for economical and precise design. Previous research results showed the necessary safety level of the Eurocode is not reached in some cases, especially for high strength steel box-sections subjected by pure compression. The purpose of the present study is to examine the accuracy of the Winter-curve based formula of the EN 1993-1-5 for high strength steel I-sections.*

**Keywords:** local buckling, high strength steel, I-section, residual stress, equivalent imperfections

### Kivonat

*Építőmérnöki szerkezetek tervezése során a lokális horpadási jelenség pontos figyelembevétele és az effektív keresztmetszeti jellemzők meghatározása kiemelt fontosságú a gazdaságos és kellő pontosságú méretezéshez. Korábbi szakirodalmi vizsgálatok szerint az EN 1993-1-5 szabványban szereplő számítási módszer az effektív szélesség meghatározására nem kellően pontos nagyszilárdságú acélokból készült nyomott zárt szelvényekre vonatkozóan. Jelen tanulmány célja annak vizsgálata, hogy I-szelvények esetén a Winter-görbén alapuló szabványos eljárás milyen mértékben és milyen esetekben tekinthető kellően pontosnak.*

**Kulcsszavak:** stabilitásvizsgálat, lokális horpadás, nagyszilárdságú acél, I-szelvény, helyettesítő imperfekció

## 1. BEVEZETÉS

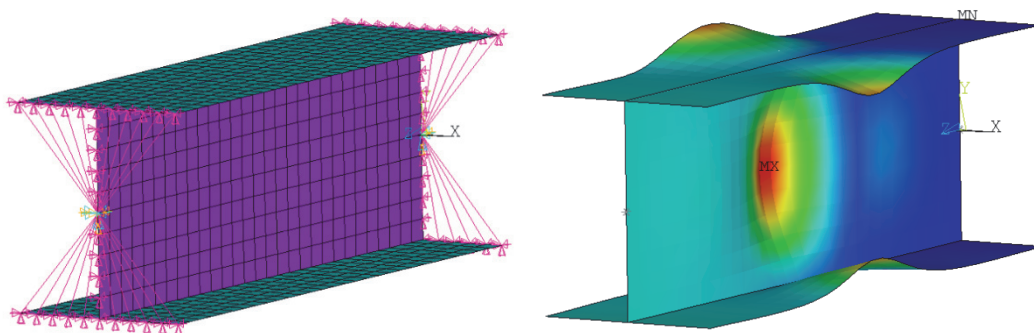
Napjainkban a nagyszilárdságú acélok (HSS – S420 és magasabb szilárdsági osztályú acélok S960-ig) alkalmazása az építőmérnöki gyakorlatban egyre nagyobb ütemben növekszik a HSS szerkezetek számos előnyös tulajdonságának köszönhetően. A nagyszilárdságú acélból készült szerkezeti elemek stabilitási viselkedésének pontos ismerete kiemelt fontosságú, mivel ezen szerkezeteknél a magasabb szilárdsági osztály miatt a tervezők általában karcsúbb szelvényeket alkalmazhatnak, melyek stabilitásvesztésre érzékenyek lehetnek. A hatályos Eurocode szabvány (EN 1993-1-1 [1], EN 1993-1-5[2]) S460-as acél anyagminőségig érvényes. Ugyan az EN 1993-1-12 [3] lehetővé teszi a HSS acélok alkalmazását és szabványos méretezését S700-as szilárdsági osztályig, de a lokális horpadási ellenállás meghatározására vonatkozóan ugyanazt a számítási módszert (Winter-görbét) adja mindkét szabvány. Szakirodalmi vizsgálatok eredményei azt mutatják, hogy sok esetben – normál szilárdságú acélok esetén is – az Eurocode szükséges biztonsági szintje nem igazolható a Winter-görbe alapú szabványos méretezési eljárás alkalmazásával. Ebből kifolyólag a horpadási ellenállás számítása mind a nagyszilárdságú, mind az alacsony szilárdságú acél anyagból készült szerkezetek esetén felülvizsgálatot, illetve módosítást igényel.

Csuklós-csuklós megtámasztású lemezek horpadási ellenállásának meghatározására Schillo és társai [4] egy kísérleti adatbázison alapuló új méretezési formulát dolgoztak ki, mely garantálja az Eurocode által előírt megbízhatósági szintet. Somodi és társai [5][6] determinisztikus és sztochasztikus módon végzett numerikus számításokkal egészítették ki az említett kísérleti kutatást. A kísérleti és numerikus eredmények alapján megadták, hogy négyzet keresztmetszetű zárt szelvények esetén milyen  $\gamma_{MI}$  parciális tényező alkalmazásával

teljesíti az Eurocode által megkövetelt biztonsági szintet a szabványban szereplő Winter-formulán alapuló méretezési eljárás. A vizsgálat konklúziója, hogy hajlítás esetén megfelelőnek bizonyul a szabványban jelenleg alkalmazandó  $\gamma_{MI} = 1,0$  parciális biztonsági tényező értéke, ugyanakkor tiszta nyomás esetén a viselkedés kedvezőtlenebb, ezért ekkor magasabb  $\gamma_{MI}$  használatára van szükség, melynek értéke függ az acél szilárdsági osztályától, a lokális karcsúságtól és a lemezvastagságtól. Tiszta nyomás esetén minden lemez azonos mértékben nyomott, így a lemezek négyzet alakú keresztmetszet esetén nem tudnak egymásnak érdemi elfordulási megtámasztást biztosítani, ugyanakkor hajlítás esetén a gerinclemezek kisebb mértékben válnak nyomottá, mint a nyomott felső öv, így a gerincek részlegesen meg tudják támasztani elfordulás ellen is a mértékadó nyomott övlemezt széleit, ebből következik a hajlítás esetén fennálló kedvezőbb viselkedés. Hasonlóképpen írható le a zárt szelvények és I-szelvények lemezei közti horpadási jelenség különbsége is, ugyanis I-szelvények esetén a csatlakozó lemezek más mértékben képesek a horpadó lemez megtámasztására, mint zárt szelvénynél. Emiatt kiemelt fontossága van a zárt szelvényekre vonatkozó vizsgálatok mellett külön I-szelvényű szerkezetek lemezeire is elvégezni a lokális horpadással kapcsolatos kutatást és a szükséges parciális tényezők meghatározásához végrehajtani a megfelelő elemzéseket.

Jelen tanulmány egy nagyobb kutatási program részeredményeit mutatja be. A teljes kutatási program keretén belül valós kísérleti vizsgálatokra alapozott determinisztikus és sztochasztikus numerikus számításokkal végzett vizsgálati program került végrehajtásra. A kísérleti és numerikus eredmények alapján célunk olyan horpadási görbe kidolgozása, ami teljesíti az Eurocode által megkövetelt biztonsági szintet mind kísérleti, mind numerikus úton igazolt széles paraméter tartományban. Az elvégzett numerikus kutatási program eredményeként tervezési horpadási görbéket határozunk meg különböző gerinckarcsúsággal (változó  $b_w/t_w$  arányok) és különböző övkarcsúsággal (változó  $b_f/t_f$  arányok) rendelkező I-szelvényű zömök oszlopokra. A horpadási görbét tiszta nyomás, tiszta hajlítás és kombinált nyomás és hajlítás esetére is kidolgozzuk. Az acél anyag szilárdságára vonatkozóan a vizsgálati spektrumunk S235 – S960 közé esik. A numerikus szimuláció alapján meghatározott horpadási görbéket értékeljük és összehasonlítjuk a szabványos Winter-görbével, illetve Schillo és társai [4] által javasolt méretezési eljárással.

Jelen tanulmány azt vizsgálja, hogy I-tartók esetén a geometriai méretek és az acélszilárdság változásával milyen mértékben változik a csatlakozó lemezek előzőekben bemutatott megtámasztási képessége, és ez milyen hatással van a méretezésnél figyelembe vehető effektív keresztmetszetre és annak meghatározására. Az alkalmazott numerikus modellt az 1. ábra mutatja be. Az elvégzett vizsgálatok validált numerikus modellen végzett GMNI analízissel kerültek végrehajtásra determinisztikus analízis alkalmazásával.



1. ábra. Alkalmazott numerikus modell és numerikus horpadási alak.

## 2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS ÉS KUTATÁSI STRATÉGIA

A lokális horpadási ellenállás meghatározására vonatkozó, az EN 1993-1-5 [2] szabványban szereplő számítási modell Kármán Tódor 1932-ben publikált [8], hatékony szélességen alapuló módszerén alapszik. Ezt George Winter félempirikus elven továbbfejlesztette, megalkotva az 1947-ben publikált Winter görbét [9]. 1968-ban Winter módosította a saját képletét egy kísérletsorozat alapján, ami hajlítással terhelt hidegen alakított szelvények vizsgálatából állt, ezt a módosított formulát tartalmazza a jelenlegi Eurocode szabvány. Később több kutató is megkérdőjelezte a Winter-görbe alkalmazhatóságát, megfelelőségét, illetve néhányan új módszereket is javasoltak [4],[10]-[19]. A nemzetközi szakirodalom azt mutatja, hogy számos kísérleti és numerikus vizsgálat szolgáltat alacsonyabb teherbírási értékeket a Winter-görbe által kapható ellenállásoknál. Ezek alapján több kutatás is rávilágított, hogy a Winter-görbe szerinti eljárás nincs minden esetben a biztonság oldalán sem NSS, sem HSS szerkezetek esetén. Emiatt az Eurocode-ban szereplő, I-szelvények belső lemezei

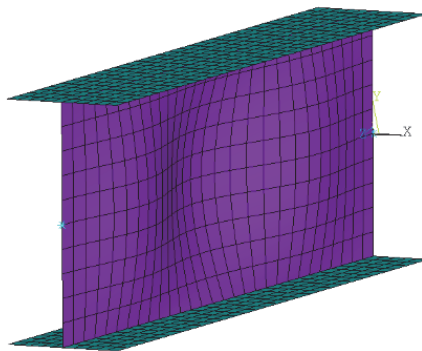
horpadási ellenállására vonatkozó számítási eljárás további vizsgálatokat igényel. Jelen tanulmányban egy numerikus modellt dolgoztunk ki tisztán nyomott, illetve tisztán hajlított hegesztett I-szelvény horpadási ellenállásának meghatározására. Több szilárdsági osztályt is megvizsgáltunk S235 és S960 szilárdsági osztályok között, így szolgáltatva eredményt NSS és HSS típusú acélokra egyaránt. A vizsgálatokat determinisztikus analízissel hajtottuk végre, amely esetén két vizsgálati szintet különböztethetünk meg az alábbiak szerint:

- 1. típus: analízis az EN 1993-1-5 [2] szerinti helyettesítő geometriai imperfekcióval,
- 2. típus: analízis valós geometriai imperfekció és hosszirányú sajátfeszültségek alapján.

Jelen tanulmányban bemutatott vizsgálat célja tisztán a geometriából és a folyáshatár változásából adódó különbség bemutatása I-szelvények lokális horpadására vonatkozóan. Ebből adódóan a végrehajtott vizsgálatokat úgy választottuk meg, hogy 1. típusú analízist hajtunk végre, tehát helyettesítő geometriai imperfekciót alkalmazunk, és a figyelembe vett terhelés az tiszta nyomás. A 2. típusú analízist és a hajlítás figyelembevételét a szerzők további kutatás keretén belül vizsgálják. Ugyanakkor a vizsgált hegesztett I-szelvény geometriáját széles paraméter tartományban vizsgáltuk külön változtatva gerincek és az övek vastagságát, valamint a karcsúságát.

### 3. NUMERIKUS MODELL

A numerikus modell ANSYS programkörnyezetben felépített, héjelemekből álló modell. A horpadási ellenállás meghatározása GMNI analízissel történt figyelembe véve a helyettesítő geometriai imperfekciókat. A hálóméret hosszirányban a gerincmagasság 1/10-ére lett felvéve, míg keresztirányban az adott lemezek szélességének 1/10-ére lett állítva. Ennek meghatározását konvergencia-vizsgálattal igazoltuk. A szelvények hossza a gerincmagasság háromszorosára lett felvéve, így globális értelemben megfelelően zömök kialakításokat vizsgáltunk, elkerülve a kihajlás jelenségét. A lokális imperfekciós alakot kézzel definiáltuk a geometriai modellépítés során a gerinclemezre, három felszínusz hullámból álló imperfekciós alak formájában, az övlemezen geometriai imperfekciót nem vettünk figyelembe. Az imperfekció nagyságára EN 1993-1-5 [2] szerinti helyettesítő imperfekciót alkalmaztuk. Az anyagi viselkedést NSS típusú szilárdsági osztályoknál rugalmas-képlékeny, folyási platóval rendelkező, felkeményedő anyagmodellel vizsgáltuk, míg HSS típusú anyagoknál a Ramberg-Osgood anyagmodellel alkalmaztuk.



2. ábra. Lokális imperfekció nagyított alakja tiszta nyomás esetén.

## 4. NUMERIKUS ANALÍZIS

### 4.1. Vizsgálati stratégia

A numerikus vizsgálatok során GMNI analízissel, determinisztikus elven határoztuk meg az egyes vizsgált geometriai kialakítások teherbírását. A vizsgált I-szelvény geometriáját minden esetben úgy határoztuk meg, hogy a tönkremenetel a gerinchorpadás bekövetkezésének hatására jöjjön létre, miközben az övek lokális karcsúságuk alapján 1., 2. vagy 3. keresztmetszeti osztályba tartoznak. Tehát maga a vizsgálat a gerinc effektív keresztmetszetének a meghatározására irányul. A figyelembe vett paraméter tartományt az 1. és 2. táblázat mutatja be. Az övvastagságok úgy lettek meghatározva, hogy minden gerincvastagsághoz 4 különböző övvastagság érték tartozott úgy, hogy az öv vastagsága mindig nagyobb legyen, mint a gerincé (például 8 mm-es gerinchez 10, 12, 14 és 15 mm-es övek tartoztak). Az övszélességet az öv keresztmetszeti osztálya, a gerincmagasságot pedig a gerinc-karcsúság, vagyis a  $b_w/t_w$  értékek definiálták. Az alkalmazott  $b_w/t_w$  arányokat a 2. táblázat mutatja be folyáshatáronként külön-külön.

Numerikus vizsgálatok paramétertartománya

1. táblázat

Paraméter	Vizsgált értékek darabszáma	Érték #1	Érték #2	Érték #3	Érték #4	Érték #5
Acélszilárdság	5	S235	S355	S500	S700	S960
Gerincvastagság ( $t_w$ )	4	5 mm	8 mm	12 mm	16 mm	-
Öv vastagság [mm] ( $t_f$ )	4	6,8,10,12	10,12,14,15	14,15,16,18	18,20,22,25	-
Öv km.-i osztály ( $c_f/t_f$ )	4	1. (8ε)	2. (9,5ε)	3. (12ε)	3-4. (14ε)	-
Gerinckarcúsúság ( $\lambda_w$ )	7-8	min: ~0,7	-	-	-	max: ~2.0

Numerikus vizsgálatok paramétertartománya – Gerinckarcúsúság ( $b_w/t_w$ )

2. táblázat

Acélszilárdság	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
S235	40	50	60	70	80	90	100	110
S355	30	45	55	65	75	85	95	-
S500	30	35	40	45	55	65	75	80
S700	25	30	35	40	50	55	60	65
S960	20	25	30	35	40	45	50	55

A bemutatott paramétertartomány, ha minden kombinációt figyelembe veszünk, akkor 2500 különböző esetet eredményez, ennyi eredmény egyben való értékelése és annak érthető vizualizációja nehézkes, ezért az eredmények bemutatásához különböző eredménycsoportokat definiáltunk, amelyen keresztül a teherbírási értékek értelmezhetőek. A definiált csoportok az alábbiak szerint alakultak:

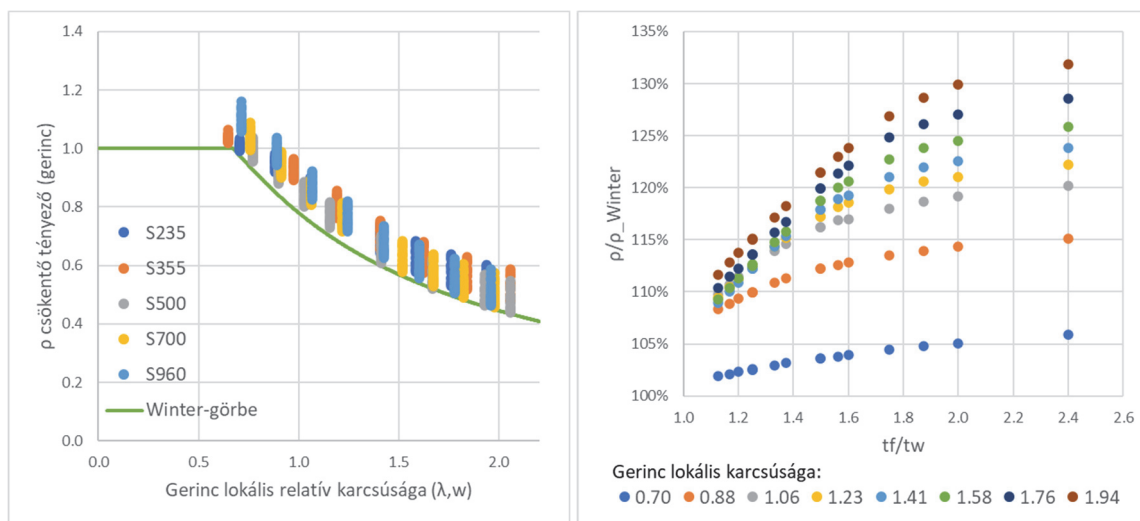
- 1) A csoport: minden eredmény együtt,
- 2) B csoport: csak S235 szilárdság, csak 2. km.-i osztályú öv: 128 darab eredmény,
- 3) C csoport: csak S235 szilárdság,  $t_w = 8\text{mm}$ ,  $t_f = 14\text{mm}$  ( $t_f / t_w = 1,75$ ): 32 darab eredmény.

Az eredmények értékelése során meghatároztuk, hogy a teherbírás elérésekor a gerinccben mekkora a normálerő ( $N_{w,VEM}$ ). Ebből az értékből meghatároztuk a gerinclemeze alkalmazandó szükséges csökkentő tényezőt a numerikus modell szerint,  $\rho_w = N_{w,VEM} / (h_w \cdot t_w \cdot f_y)$ , majd az így kapott  $\rho$  csökkentő tényezőket értékeltük, és hasonlítottuk össze a Winter-görbe alapján számítható ( $\rho_{EC}$ ) csökkentő tényezőkkel.

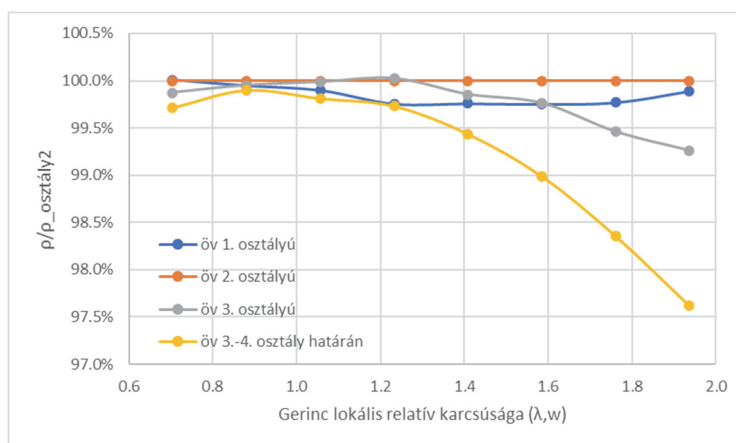
#### 4.2. Numerikus eredmények tiszta nyomás esetén

A 3. ábra bal oldali diagramján megjelenítettük az összes eredményt, a kapott  $\rho$  csökkentő tényezőket a Winter görbéhez viszonyítva, színekkel elkülönítve az egyes szilárdsági osztályokat. Látható, hogy a numerikus eredmények elég nagy szórást mutatnak az azonos karcúsághoz tartozó csökkentő tényezőre vonatkozóan. Egy adott karcúsághoz tartozóan a kapott legnagyobb és legkisebb  $\rho$  csökkentő tényező különbsége kb. 0,2, ami elég jelentős eltérésnek mondható. Ugyanakkor látható, hogy az Eurocode által javasolt helyettesítő imperfekciót alkalmazva a numerikus eredmények jó egyezést mutatnak a Winter-görbével, a Winter-görbe szinte tökéletesen alulról burkolja a numerikus eredményeket. A 3. ábra bal oldali diagramjáról megfigyelhető, hogy a jelentősen eltérő csökkentő tényezőket nem az eltérő szilárdsági osztály magyarázza, ugyanis minden szilárdsági osztálynál egyedileg felfedezhető a nagy szórás. A nagy eltérést tisztán geometriai eltérésekből fakadó hatások okozzák. A geometriából adódó különbségekhez képest a szilárdsági osztály által okozott különbség sokkal kisebb mértékű. Ezt ugyanakkor az is magyarázza, hogy a vizsgálatok a helyettesítő imperfekciók alkalmazásával történtek, ebben az esetben a szilárdságkülönbségből adódó szerkezeti

viselkedéskülönbség nem jelenik meg érdemben. A szilárdság növelésével ugyanakkor a valóságban kedvezőbb stabilitási viselkedés érhető el, de ez elsősorban az egyes szilárdsági osztályok közti eltérő sajátfeszültségekből ered, így numerikus modellel ez a jelenség csak akkor kapható vissza, ha a modellezés valós geometriai imperfekciók és sajátfeszültségek figyelembevétele történik [5][6].



3. ábra. a) Összes eredmény a Winter-görbéhez hasonlítva, b) B eredménycsoport –  $t_f/t_w$  arány hatása.



4. ábra. C eredménycsoport – keresztmetszeti osztályának hatása.

A továbbiakban a numerikus eredményeket elemezve arra kerestük a választ, hogy a geometriai eltérésekből fakadó különbségeket a  $\rho$  csökkentő tényező értékében elsősorban milyen geometriai paraméterek okozzák. Az eredmények azt mutatták, hogy a feltett kérdésre az öv és gerinc vastagságának aránya ( $t_f/t_w$ ) adja meg a választ. Ezt a viselkedést a 3. ábra jobb oldali diagramja mutatja be. A diagram a B eredménycsoportot jeleníti meg, a függőleges tengelyen ábrázolva a csökkentő tényező Winter-görbéhez képesti eltérését. Látható, hogy az eredményeket  $t_f/t_w$  szerinti csoportosítva  $\rho$  csökkentő tényezőben tapasztalható szórás eltűnik (a diagramon egy pontban többféle különböző geometria is megjelenik, melyek  $t_f/t_w$  aránya azonos). Tehát valójában a  $t_f/t_w$  arány határozza meg, hogy egy adott kialakításnál a numerikus eredmények mennyire térnek el a Winter-görbétől. Továbbá elemeztük, hogy fix  $t_f/t_w$  arány mellett az öv keresztmetszeti osztálya mennyire befolyásolja a gerinc horpadási viselkedését, ezt a vizsgálatot mutatja be a 4. ábra. A diagram a C eredménycsoportot jeleníti meg, a függőleges tengelyen ábrázolva a csökkentő tényezőt, arányosítva a 2. keresztmetszeti osztályú esethez képest. Az eredmények azt mutatják, hogy a gerinc viselkedése akkor a legkedvezőbb, ha az öv 2. keresztmetszeti osztályú, de 1. és 3. osztály esetén sincs nagy különbség, a csökkentő tényező csökkenése jellemzően 0,5%-nál kisebb. Ugyanakkor, ha az öv a 3. és 4. keresztmetszeti osztály határán van, akkor az általa kifejtett megtámasztó hatás csökken, és így nagy karcsúságú gerinceknél már 2-3%-os effektív keresztmetszet csökkenés is megfigyelhető a 2. keresztmetszeti osztályú öv esetéhez képest.

## 5. KÖVETKEZTETÉSEK

Az elvégzett kutatás során determinisztikus numerikus vizsgálatot hajtottunk végre helyettesítő geometriai imperfekciót figyelembe véve I-szelvények gerinclemezőnek horpadási ellenállásának vizsgálatára. Az eredmények azt mutatták, hogy a  $\rho$  csökkentő tényezőben jelentős szórás tapasztalható azonos gerinckarcsúság mellett, amit elsősorban az  $\omega$  és a gerinc vastagságának aránya határoz meg. A numerikus eredményeket a Winter-görbe alulról burkolja.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A jelen kutatás és cikk az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-20-4 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült, mely támogatásokért a szerzők köszönetüket fejezik ki.



## IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] EN 1993-1-1. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, CEN. 2009.
- [2] EN 1993-1-5. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-5: Plated structural elements, CEN. 2006.
- [3] EN 1993-1-12. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-12: Additional rules for the extension of EN 1993 up to steel grades S700, CEN. 2007.
- [4] N. Schillo, A. Taras, M. Feldmann: Assessing the reliability of local buckling of plates for mild and high strength steels, *Journal of Constructional Steel Research*, 2018, 142: 86-98.
- [5] B. Kövesdi, B. Somodi, T. Hornyák: Local buckling resistance of welded box section columns, 8th International Conference on Thin-Walled Structures, Lisbon, July 2018.
- [6] B. Somodi, B. Kövesdi, T. Hornyák: Partial factor for local buckling of welded box sections, *Structures*, 30, 440-454, 2021.
- [7] N. Schillo, A. Taras, M. Feldmann: Assessing the reliability of local buckling of plates for mild and high strength steels, *Journal of Constructional Steel Research* 142, 86-98, 2018.
- [8] T. Kármán, E.E. Sechler, L.H. Donnell: "The strength of thin plates in compression, *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 54, 53-57, 1932.
- [9] G. Winter: Strength of thin steel plates compression flanges, *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 112(1), 527-554, 1947.
- [10] M. Clarin: High Strength Steel: Local Buckling and Residual Stresses, Licentiate, Lulea University of Technology, Lulea, 06.12.2004.
- [11] U. Kuhlmann, B. Kövesdi: Partial safety factor for plate buckling, ECCS/TC8 Meeting, Coimbra, 27 October 2017.
- [12] F. Nishino, Y. Ueda, L. Tall: Experimental Investigation of the buckling of plates with residual stresses", Lehigh University, 1966.
- [13] K.J.R. Rasmussen, G.J. Hancock: Plate slenderness limits for HSS sections, *Journal of Constructional Steel Research*, 23(1-3), 73-96, 1992.
- [14] R.Q. Bridge, M.D. O'Shea: Behaviour of thin-walled steel box sections with or without internal restraint, *Journal of Constructional Steel Research* 47(1-2), 73-91, August 1998.
- [15] M. Pircher, M.D. O'Shea, R.Q. Bridge: The influence of the fabrication process on the buckling of thin-walled steel box sections, *Thin-Walled Structures* 40(2), 109-123, February 2002.
- [16] G. Shi, W. Zhou, Y. Bai, C. Lin: Local buckling of 460 MPa high strength steel welded section stub columns under axial compression, *Journal of Constructional Steel Research*, 100, 60-70, September 2014.
- [17] G. Shi, K. Xu, H. Ban, C. Lin: Local buckling behavior of welded stub columns with normal and high strength steels, *Journal of Constructional Steel Research*, 119, 144-153, March 2016.
- [18] N. Schillo and M. Feldmann: Local buckling behaviour of welded box sections made of high-strength steel - Comparing experiments with EC3 and general method, *Steel Construction – Design and Research* Vol. 8. September 2015, No. 3.
- [19] N. Schillo, A. Taras and M. Feldmann: Assessment of safety factor for local buckling, CEN/TC250/SC3/WG5 Meeting Stuttgart, 26 February 2016.