



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2  
BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM  
TARTÓSZERKEZETEK MECHANIKÁJA TANSZÉK

**HIDEGEN HENGERELT ACÉLSZELVÉNYEK  
STABILITÁSVIZSGÁLATA  
ELMOZDULÁSKORLÁTOS VÉGESSÁVOS MÓDSZERREL**

**PhD disszertáció**

**BEREGSZÁSZI ZOLTÁN**

Témavezető:

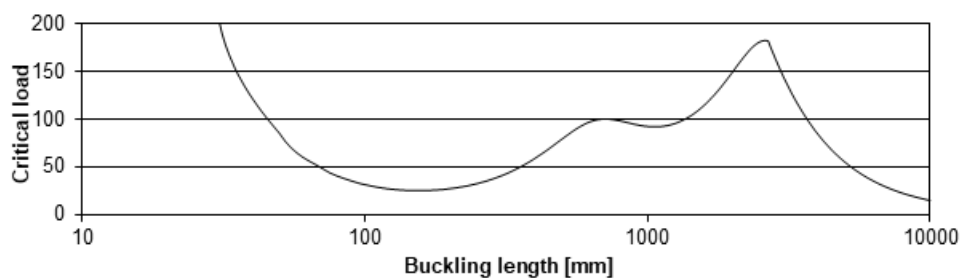
ÁDÁNY SÁNDOR, PhD

Budapest, 2019

## BEVEZETÉS

Az utóbbi évtizedekben a hidegen hengerelt vékonyfalú acél szerkezeti elemek egyre növekvő népszerűségnek örvendenek, különösen az építőipar és a járműgyártás területén, köszönhetően a szerkezeti hatékonyságuknak, azaz a nagy szilárdság/tömeg arányuknak, az alacsony termelési és logisztikai költségüknek, valamint a rendelkezésre álló keresztmetszetek széles skálájának. A karcsúságuk miatt a tönkremenetel jellemző módja a stabilitásvesztés, amelyet a szerkezet általános viselkedése gyakran nem jelez előre, és általában posztkritikus tartalékkal sem rendelkezik, amely egyfajta biztonsági tartalékként szolgálhatna. Mivel a keresztmetszetek lemezvastagsága általában ~1-3mm, ezért a hagyományos méretezési eljárások nem mindig alkalmazhatóak, és speciális tervezési módszerekre van szükség. Mindezek miatt nagyon fontos a jelenség kellő ismerete és megbízható előrejelzése.

A stabilitásvesztés általában két hatás, a rugalmas stabilitásvesztésként ismert idealizált jelenség, és a tökéletlenségek hatásainak kombinációja. A stabilitásvesztés hidegen hengerelt vékonyfalú acél szelvények esetében általában három fő módba sorolható: lemezhorpadás (L), torzulásos horpadás (D) és globális (G) stabilitásvesztés. A gyakorlatban a különböző stabilitásvesztési módok szinte sosem jelennek meg elkülönülve, azaz a különböző módok interakciója mindig jelen van, azonban a tervezési szabványokban és irányelvekben [1-3] a különböző módokra eltérő eljárások és módszertanok vonatkoznak, továbbá a különböző módokhoz eltérő posztkritikus tartalék tartozik. Ennélfogva, a hidegen hengerelt vékonyfalú szelvények méretezése során fontos a különböző stabilitásvesztési módok azonosítása. Az osztályozás egy viszonylag egyszerű és könnyen automatizálható módszere, a keresztmetszethez tartozó kritikus teher-kihajlási hossz görbe előállításával. A görbe előállításához a kritikus terheket meghatározzuk a különböző kihajlási hosszakhoz, majd ezeket ábrázoljuk, amint azt az 1. ábra mutatja. A görbe első minimumpontja a lemezhorpadás módhoz tartozik, a második a torzulásos horpadáshoz, míg a harmadik, lezáró szakasza a görbének a nagyobb kihajlási hosszúságoknál a globális stabilitásvesztés tartományát jelzi.

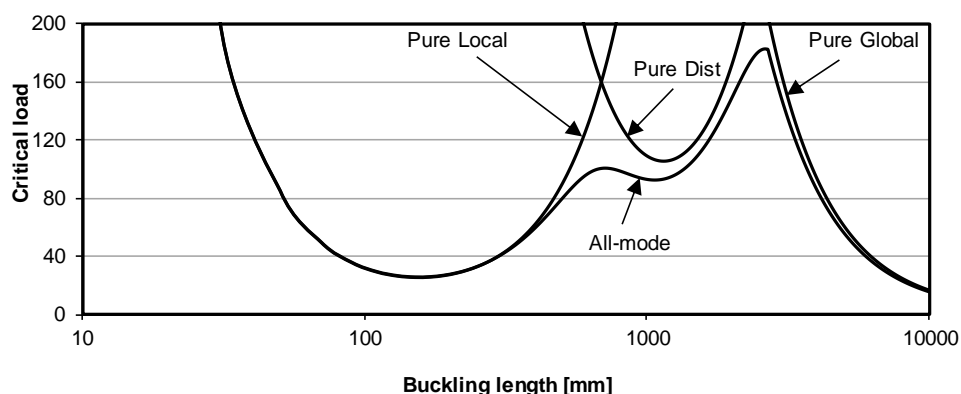


1. ábra: C keresztmetszet kritikus teher-kihajlási hossz görbéje

A jelenlegi tervezési szabványok a különböző módokhoz általában analitikus megoldások tartoznak, azonban ezek gyakran nagyon bonyolultak és nem mindig teljesen megbízhatóak a teherbírás előrejelzésében. Egy új és egyszerű javaslat, amely már része az észak-amerikai szabványnak (NAS), a közvetlen teherbírás módszer (Direct Strength Method – DSM) [4-5]. A DSM lényege, hogy a három fő stabilitásvesztési módhoz tartozó, numerikus analízis pl. végessávós módszer (VSM) [6-8], alapján kiszámított kritikus terhekből kiindulva néhány egyszerű lépésben meghatározza a végső teherbírást. Mivel egyes esetekben a kritikus teherkihajlási hossz görbe nem rendelkezik az egyik vagy mindkét minimumpontjával, ezért az adott módhoz tartozó kritikus teher nem állapítható meg egyértelműen. Ezt a problémát kiküszöbölendő került kidolgozásra a VSM kiterjesztése, elmozduláskorlátos végessávós módszer (az elterjedt angol rövidítése alapján a továbbiakban cFSM-nek jelölt) [9-12], amely révén a tiszta stabilitásvesztési módok elemezhetőek. A cFSM elve hasonló az általánosított gerenda elmélet (Generalized Beam Theory – GBT) [13-15] alapelveéhez, azaz a különböző módokat meghatározó, mód-specifikus mechanikai kritériumok alapján korlátozott deformációkra épül. A kutatáshoz szükséges számításokat a nyílt forráskódú CUFSM [16] szoftver segítségével – közvetlenül vagy kutatás-specifikus rutinokba ágyazva – végeztük.

## INTERAKCIÓS ÉS TISZTA STABILITÁSVESZTÉSI MÓDOK ÖSSZEHAJONLÍTÁSA

A fent leírtak szerint a cFSM megoldja annak a problémáját, hogy a kritikus teher minden esetben és módhoz meghatározható legyen. Ugyanakkor az interakciós (VSM alapú) és tiszta (cFSM-alapú) módok kritikus terhei eltérnek, amint az a 2. ábrán látható.



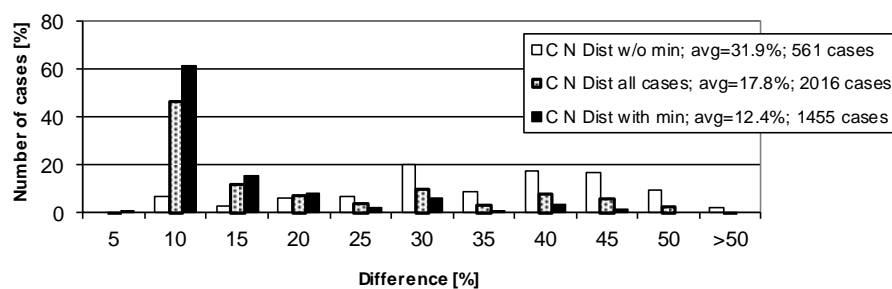
**2. ábra: VSM alapú interakciós és cFSM alapú tiszta módok kritikus terheinek összehasonlítása**

Mivel a DSM képleteket az interakciós módban számított kritikus terhekre kalibrálták, ezért vált szükségessé ennek a különbségnek az elemzése, hogy megállapítható legyen a végleges

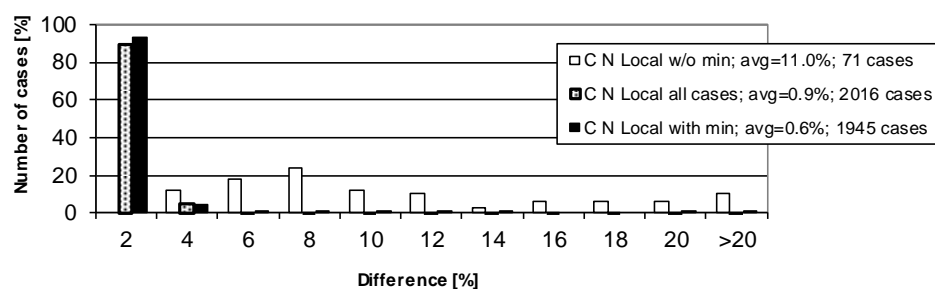
teherbírásra gyakorolt esetleges hatása. Ez a különbség, amely az interakció hiányának a következménye, természetes velejárója a tiszta módoknak, azonban, mivel a cFSM által előre jelzett kritikus terhek mindig nagyobbak, így a különbség a biztonság kárára téved.

A kutatás első része ezt a különbséget elemzi egy nagyszámú, különböző alakú és méretű szelvények széles tartományán elvégzett paraméteres vizsgálat statisztikai elemzése alapján, három terhelési módban: tisztán nyomott (oszlop), tisztán hajlított (gerenda) és nyomott-hajlított (gerenda-oszlop). Az első vizsgálat alapján az alábbi következtetéseket lehetett levonni: (i) habár a különbség az összes módban jelen van, a torzulásos horpadásnál a legjelentősebb az interakció hatása és (ii) a különbség azokban az esetekben nagyobb, amikor a kritikus teher-kihajlási hossz görbe legalább egyik minimumpontja nem létezik. Szintén megfigyelhető volt, hogy a fenti megállapítások alapvetően függetlenek az alkalmazott terhelés módjától.

A tisztán nyomott C keresztmetszeteknél megfigyelt különbségek nagyságát, külön-külön a lemez- és torzulásos horpadásra vonatkozóan, a 3. és 4. ábra mutatja be.



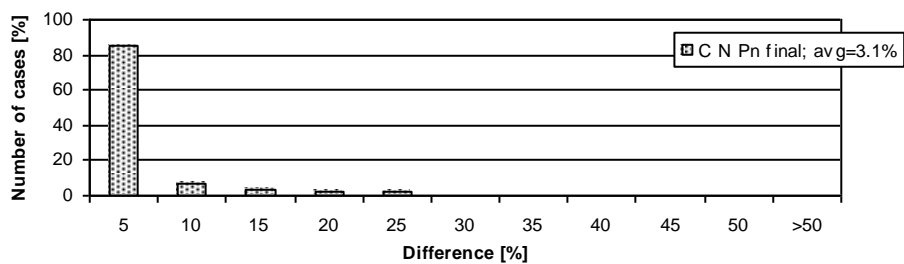
**3. ábra: A kritikus terhek különbségeinek megoszlása: C szelvény, N terhelés, D mód**



**4. ábra: A kritikus terhek különbségeinek eloszlása: C szelvény, N terhelés, L mód**

A vizsgálat következő lépése a kritikus teherbeli különbségek végső teherbírásra gyakorolt hatásának megállapítása volt. A második széleskörű paraméteres vizsgálat hat különböző keresztmetszeten került elvégzésre. Mivel a teherbírás kiszámítása a DSM-mel történt, a vizsgált keresztmetszetek tartományát annak megfelelően leszűkítve. Az interakciós és tiszta

módok közötti különbség ugyan a teherbírásban kisebb mértékben jelenik meg, mint a kritikus terhek esetében, de a megfigyelhető különbség még így sem elhanyagolható. Az 5. ábra tisztán nyomott C szelvényeknél jelentkező teherbírás különbségeket mutatja be. Az 1. táblázat az összes vizsgált keresztmetszet eredményeit foglalja össze. Megállapítható tehát, hogy a cFSM valóban rendelkezik azzal a gyakorlati előnnyel, hogy képes megkülönböztetni a tiszta stabilitásvesztési módokat és meghatározni a hozzájuk tartozó kritikus terheket, azonban a végső teherbírásban is megjelenő különbség nem elhanyagolható mértékű, és mindig a biztonság kárára téved.



5. ábra: A teherbírásbeli különbségek megoszlása: C szelvény, N terhelés

1. táblázat: VSM és cFSM közötti különbség a teherbírásban, tisztán nyomott terhelés

Keresztmetszet	Esetek száma	$P_{nl}$		$P_{nd}$		$P_n$	
		Átlag kül. [%]	Max. kül. [%]	Átlag kül. [%]	Max. kül. [%]	Átlag kül. [%]	Max. kül. [%]
C	1720	0,3	5,3	6,8	25,4	3,6	25,4
(valós D min)	(1233)			(4,1)	(11,4)	(2,0)	(10,6)
C gerincmer.	781	0,6	2,9	2,9	5,8	2,8	5,6
Z	240	0,3	2,2	3,9	7,8	2,0	7,8
Kalap	78	0,5	1,3	2,5	2,7	2,5	2,7
Állvány	156	0,1	0,8	1,8	2,6	1,8	2,6
Állvány övmer.	147	0,1	0,8	1,6	2,3	1,6	2,3

### 1. tézis

Összehasonlítottam a végessávós módszer és az elmozduláskorlátos végessávós módszer alkalmazásával végzett stabilitásvizsgálatokat hidegen hengerelt acél elemek lemezhorpadása és torzulásos horpadása esetén.

1a) Egy széles geometriai tartományba tartozó szelvényeken végzett paraméteres numerikus vizsgálatokkal összehasonlítottam tisztán nyomott, tisztán hajlított, illetve nyomott-hajlított elemekre a végessávós módszerrel és az elmozduláskorlátos végessávós módszerrel

meghatározott rugalmas kritikus terheket lemezhorpadás és torzulásos horpadás típusú stabilitásvesztések eseteire. A különbségek jellemző mértékeit számszerűen megadtam a különféle szelvényekre és terhelésekre. Megállapítottam, hogy lemezhorpadás esetén a két módszer eredményei közötti különbség átlagosan néhány százalékos, míg torzulásos horpadás esetén a különbségek – a lemezhorpadás eredményeinél nagyobb szórást mutatva – átlagosan körülbelül 10-20%-osak. Megállapítottam, hogy a különbségek lényegesen nagyobbak olyan esetekben, amikor a keresztmetszet teher-kihajlási hossz görbéjének (ún. signature curve) nincs egyértelmű minimuma az adott típusú stabilitásvesztésnél.

1b) A gyakorlatban alkalmazott hidegen hengerelt acél elemek széles körére végzett paraméteres numerikus vizsgálatokkal összehasonlítottam tisztán nyomott és tisztán hajlított elemekre a végessávós módszerrel és az elmozduláskorlátos végessávós módszerrel meghatározott rugalmas kritikus terhek alapján számított teherbírásokat. A különbségek jellemző mértékeit számszerűen megadtam a különféle szelvényekre és terhelésekre. Megállapítottam, hogy a különbségek átlagosan körülbelül 2-3%-osak, és a különbségeket elsősorban a torzulásos horpadáshoz tartozó kritikus terhek különbségei okozzák. Megállapítottam, hogy a különbségek lényegesen nagyobbak olyan esetekben, amikor a keresztmetszet teher-kihajlási hossz görbéjének (ún. signature curve) nincs egyértelmű torzulásos horpadási minimuma.

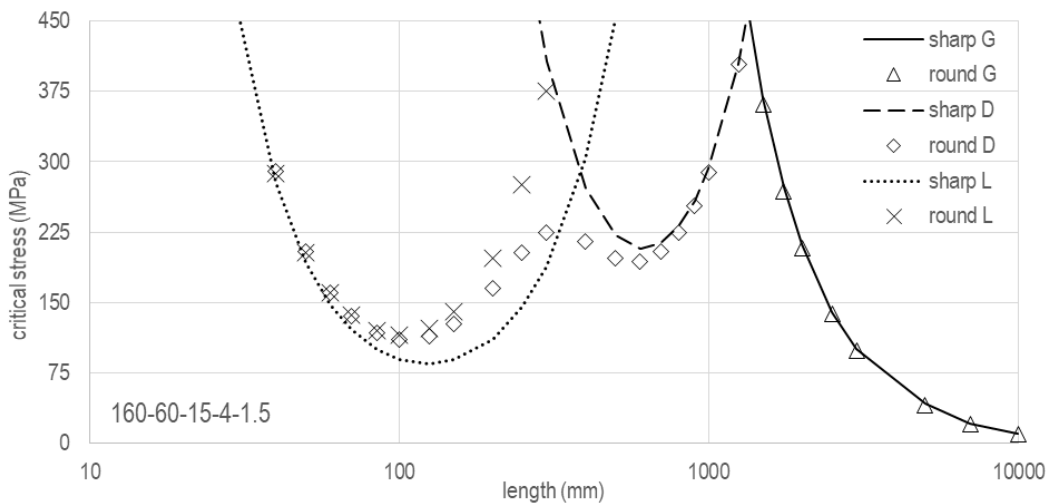
Kapcsolódó publikációk: [BZ1], [BZ2], [BZ3], [BZ4]

## **A CFM ALKALMAZÁSA A KÖZVETLEN TEHERBÍRÁS MÓDSZERREL**

A hidegen hengerelt vékonyfalú acél szelvények sarkai, a gyártási folyamat jellegéből adódóan, mindig lekerekítettek. A különböző szabványok a lekerekített sarkokat a stabilitásvesztési számítások során vagy leegyszerűsítve kezelik, vagy elhanyagolják. A lekerekített sarkok modellezése során a sarkot keskeny, egymással közel párhuzamos sávokra osztjuk. Hagyományos VSM-mel végzett számítások során ez a diszkretizáció nem okoz problémát, azonban cFSM alapú esetén, ugyan a számítások elvégezhetőek, de a mechanikai kritériumok (az egymással szöget bezáró sávok közötti csomópontok elmozdulásainak korlátozása) miatt, a kapott eredmények nem felelnek meg a mérnöki elvárásoknak, így nem tekinthetőek helyes eredménynek, amint azt az alábbi két példa szemlélteti.

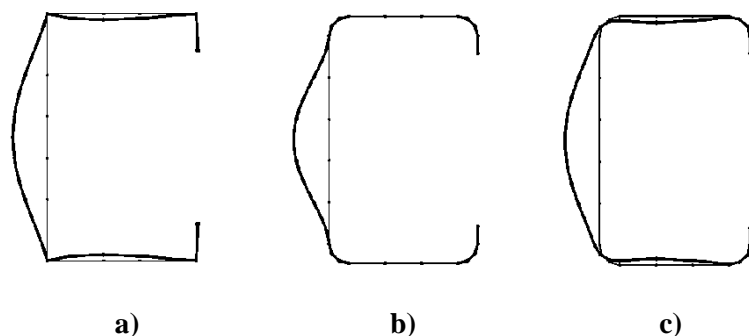
A 6. ábrán egy éles és lekerekített sarkú modell tiszta módú eredményei láthatóak. Míg a G mód eredményei az elvárt tendenciát mutatják, az L és D módok esetében nem a várakozásoknak megfelelőek, például az L mód kritikus értékei lekerekített sarkú modell

esetén túl magasak az éles sarkú eredményekhez képest. Egy másik szokatlan jelenség, hogy a tiszta D mód görbéjének két minimumpontja van: egy nem várt az L tartományban, míg a másik a várakozásoknak megfelelően a D tartományban. Továbbá, ez utóbbi esetben, a lekerekített sarkokkal számított D kritikus feszültség minimum értéke nem várt módon alacsonyabb, mint a kapcsolódó éles sarkú D kritikus feszültség. Az ábra 160-60-15-4-1,5 jelölése a szelvény geometriájára utal, azaz a gerincmagasság 160mm, az övszélesség 60mm, a merevítő hossza 15mm, a sarok lekerekítési sugara 4mm és a lemezvastagság 1,5mm.



**6. ábra: Tiszta módú eredmények éles és lekerekített sarkú modellnél, 160-60-15-4-1,5 szelvény**

A problémát egy tisztán nyomott C szelvény is jól szemlélteti, a 7. ábra a) egy éles sarkú modell cFSM analízis eredményét mutatja, b) egy lekerekített sarkú modell cFSM analíziséből származót, míg c) az elvárt deformált alakot. A b) ábrán látható alakváltozás jelzi, hogy a kapott eredmények nem megfelelőek.



**7. ábra: Keresztmetszet deformált alakjai különböző L módú stabilitásvesztések esetén**

Gyakorlatilag ez azt jelenti, hogy valós keresztmetszetű modellekre tiszta módú eredmények meghatározása nem lehetséges. Ennek a korlátozásnak a leküzdésére egy ún. extrapolációs

eljárás került kidolgozásra, amely alkalmas lekerekített sarkú szelvények tiszta módjaihoz tartozó numerikus értékek megbecslésére. Az eljárás azon alapul, hogy együtthatókat határozunk meg, amelyek figyelembe veszik a lekerekített és éles sarkok közötti különbség hatását (i) a keresztmetszetek geometriai jellemzőire, (ii) a kritikus feszültségekre, valamint (iii) a stabilitásvesztési módok interakciójának hatását. Ezen együtthatók alapján, a lekerekített sarkú interakciós és az éles sarkú tiszta módú numerikus analízis eredményeiből extrapolálással előállíthatóak a lekerekített sarkú tiszta módú értékek az alábbiak szerint:

$$\text{lekerekített cFSM} \approx \text{éles cFSM} * k_{c,W} * k_{c,LD} * k_{m,LD}$$

$k_{c,W}$  : lekerekített sarkok hatása a keresztmetszeti jellemzőkre

$k_{c,LD}$  : lekerekített sarkok hatása a kritikus feszültségekre

$k_{m,LD}$  : interakció hatása a kritikus feszültségekre

A javasolt extrapolációs eljárás ellenőrzése céljából egy olyan keresztmetszet sorozaton került numerikus analízis elvégzésre, amelyekhez rendelkezésre álltak meglévő laboratóriumi eredmények [17-18]. A kísérleteket oly módon hajtották végre, hogy tiszta módú teherbírási értékek álljanak elő, így megfelelő alapként szolgáltak ellenőrzési célokra. Mivel ezek tényleges, kereskedelmi forgalomban kapható acélszelvények, így természetesen lekerekített sarkúak. Az extrapolációs eljárással számított, lekerekített sarkú modellek tiszta módú teherbírási eredményei kerültek összehasonlításra a kísérleti eredményekkel, valamint ellenőrzésképp DSM alapon számítottakkal is, végül a kapott eredményeket statisztikailag kiértékeltem. Megállapítható, hogy az extrapolációs eljárás eredményei legalább ugyanolyan jónak bizonyultak, mint a DSM-mel számítottak, így a javasolt eljárás elfogadható alternatív megoldást jelent a problémára. Az összehasonlítások eredményeit a 2. táblázat foglalja össze.

**2. táblázat: Kísérleti eredmények összehasonlítása az extrapolációs eljárás és a DSM alapú számítások eredményeivel**

	<b>Mód</b>	<b>átlag</b>	<b>szórás</b>	<b>min.</b>	<b>max.</b>
DSM/kísérlet	All-L	0,976	0,084	0,837	1,246
Extrap./ kísérlet		0,989	0,080	0,826	1,228
DSM/ kísérlet	All-D	0,992	0,070	0,829	1,164
Extrap./ kísérlet		1,018	0,099	0,863	1,218



## **2. tézis**

Javaslatot tettem egy egyszerű, teljesen automatikusan végrehajtható méretezési eljárásra lekerekített sarkú, hidegen hengerelt acél szelvények teherbírásának meghatározására az elmozduláskorlátos végessávós módszer és a közvetlen teherbírás módszer (direct strength method – DSM) alkalmazásával. A javasolt eljárásban módosító tényezőket vezettem be a végessávós módszer és elmozduláskorlátos végessávós módszer, továbbá a lekerekített sarkú és lekerekítés nélküli keresztmetszetek közötti különbségek figyelembe vételére. Paraméteres numerikus vizsgálatok eredményei alapján megadtam a szükséges módosító tényezőket a gyakorlatban alkalmazott hidegen hengerelt acél elemek különféle szelvényeihez. A javasolt méretezési eljárás eredményeit összehasonlítottam kísérleti eredményekkel, és megállapítottam, hogy a javasolt eljárás statisztikailag egyenértékű a jelenleg a gyakorlatban alkalmazott és szabványokban is elfogadott „direct strength method” méretezési eljárással.

Kapcsolódó publikációk: [BZ3], [BZ4]

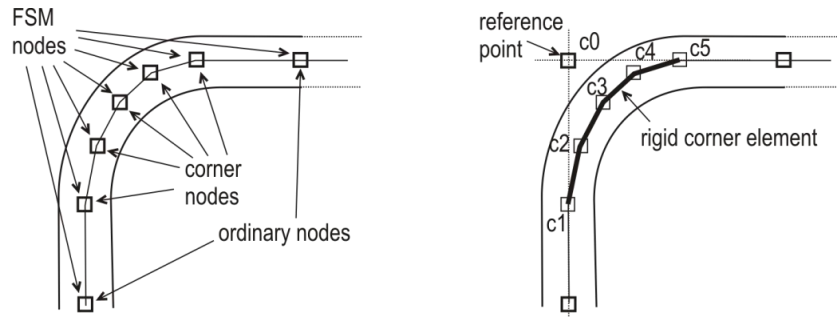
## **A LEKEREKÍTETT SARKOK MECHANIKAI MODELLEZÉSE**

### **Merev sarokmodell**

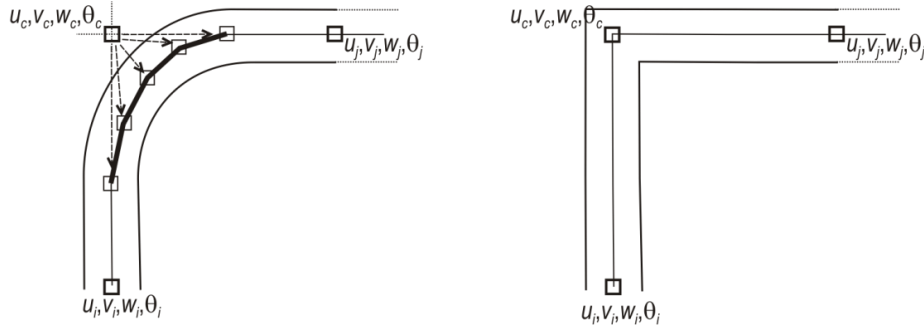
Annak ellenére, hogy az extrapolációs eljárás teljesítménye meglehetősen jónak tűnik, de mivel olyan feltételezéseken alapul, amelyeket nem lehet közvetlenül ellenőrizni, ezért egy olyan megoldást kellett keresni, amely alkalmas a lekerekített sarkok közvetlen modellezésére. A sarokmodellezés célja, hogy kiküszöbölje a lekerekített sarkok csomópontjait, ezáltal lehetővé téve a tiszta stabilitásvesztési módok numerikus analízisét.

Két sarokmodell került kidolgozásra, majd kiértékelésre. Az első modell egy úgynevezett merev sarokmodell volt, ahol a sarokcsomópontok elmozdulásai az egyenes részek metszéspontjában levő virtuális (referencia) csomóponthoz vannak hozzárendelve, ezáltal egy olyan éles sarkú keresztmetszetet képez, amely egyenértékű az eredeti, lekerekített sarkú keresztmetszettel, amint az a 8. ábrán látható.

Ezután a modell teljesítményét összehasonlítottam a hagyományos és elmozduláskorlátos VSM analízis eredményeivel lekerekített és éles sarkú modelleken. Mivel, a korábban ismertettek szerint, a lekerekített sarkú szelvények cFSM alapú analízise nem ad értékelhető eredményt, ezért erre az esetre az extrapolációs eljárás eredményei szolgáltak összehasonlítási alapként. Bár ez az eredmények értelmezésében bizonyos mértékű bizonytalanságot okoz, mégis megfelel arra a célra, hogy általános következtetéseket vonhassunk le.



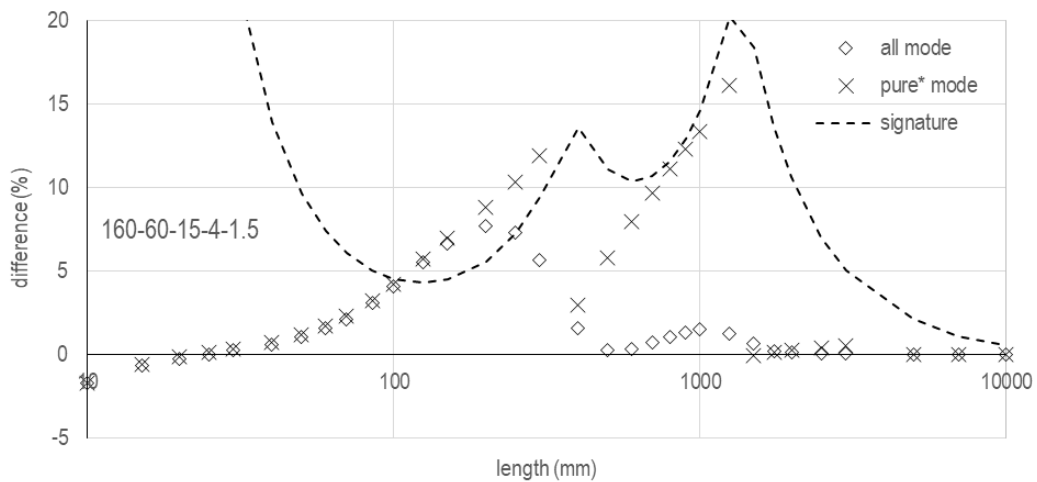
a) VSM modell lekerekített sarokkal b) merev sarokelem és annak referenciapontja



c) a lekerekített sarokmodell tényleges sz.foka d) hasonló éles sarkú modell sz.foka

### 8. ábra: A merev sarokmodell illusztrációja

A merev sarokelem teljesítményének értékeléséhez meg kell határozni a merev sarokmodell és a lekerekített sarkú modellek kritikus terhei közötti különbségeket. A különbség („merev” - „lekerekített”)/„lekerekített” mind az interakciós, mind a tiszta módú eredmények esetében került meghatározásra, amely a 9. ábrán látható. A stabilitásvesztési módok azonosítását elősegítendő az ábrán az adott keresztmetszet kritikus teher-kihajlási hossz görbéje is feltüntetésre került.

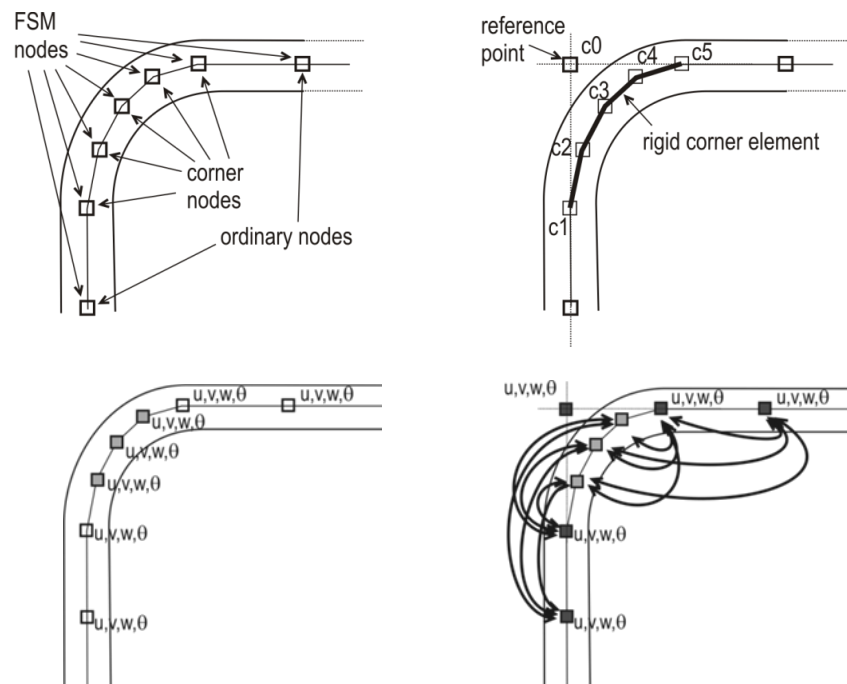


9. ábra: Merev sarokmodell és lekerekített sarkú modell kritikus terhei közötti különbségek, 160-60-15-4-1,5 szelvény

A kapott eredmények azt mutatják, hogy a merev sarokmodell elfogadható teljesítményt nyújt, azonban szisztematikusan túlbecsüli a kritikus terheket, különösen abban az esetben, amikor a sarok lekerekítési sugara nagy. Ennek oka a modell egyszerűségéből ered; a merev sarokelem a keresztmetszet sarokzónáinak többletmerevséget ad, amely a keresztmetszet általános viselkedésére is hatással van.

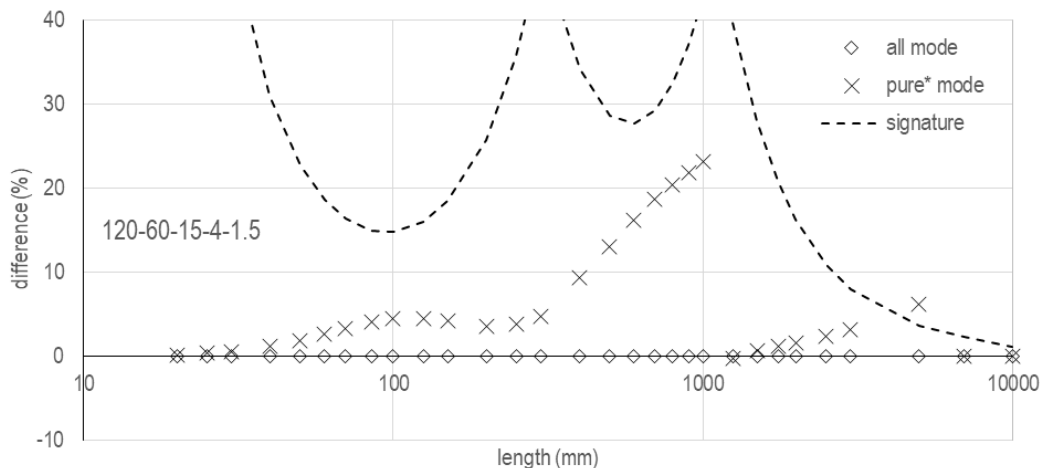
### Rugalmas sarokmodell

A merev sarokmodell bebizonyította, hogy a lekerekített sarkú szelvények mechanikai modellezése jó megközelítés. Rugalmas sarokmodell néven egy továbbfejlesztett modellezési eljárás került kidolgozásra, amelyben a sarokcsomópontok elmozdulásai az egyenes szakaszok csomópontjainak elmozdulásaiból lettek levezetve, így maguk a sarokcsomópontok nem vesznek részt a numerikus analízisben. A módszer alapelvét a 10. ábra szemlélteti.



10. ábra: A rugalmas sarokmodell alapelve

A rugalmas sarokmodell által szolgáltatott eredmények ugyanolyan módon kerültek kiértékelésre, mint a merev sarokmodell esetében, a kapott eredmények a 11. ábrán láthatóak.



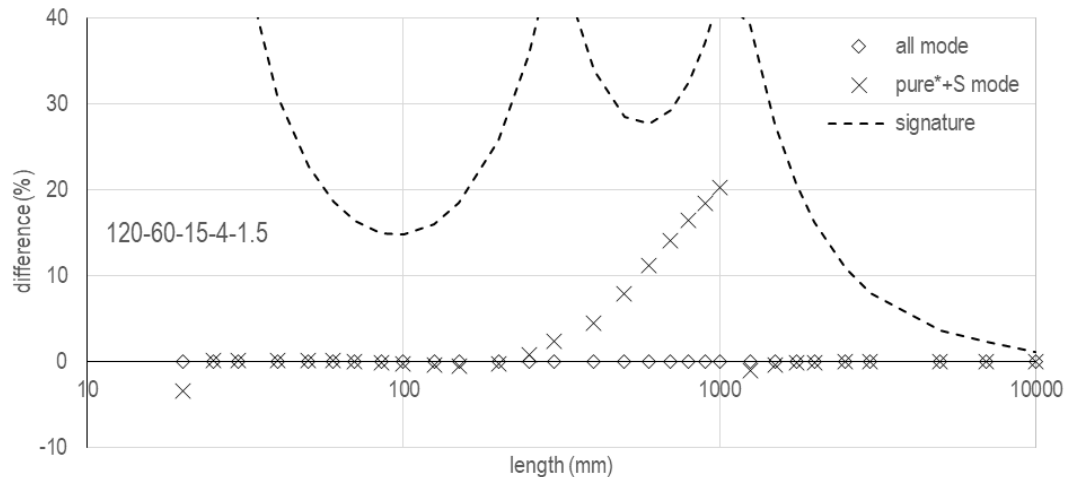
**11. ábra: Rugalmas sarokmodell és lekerekített sarkú modell kritikus terhei közötti különbségek, 120-60-15-4-1,5 szelvény**

Az interakciós módban a különbségek elhanyagolhatóan kicsik bármely kihajlási hossz és keresztmetszet esetén, ugyanakkor a tiszta módok eredményeiben nem elhanyagolható mértékű különbségek adódtak. Mivel a lekerekített sarkú keresztmetszetek tiszta L és D módú kritikus terheire vonatkozóan nincs ismert elméleti megoldás, ezért, ha a különbség nullától eltér, az nem feltétlenül az egyik vagy a másik számítási módszer hibájából ered. A lekerekített sarkú modellből származó tiszta G kritikus terhek azonban pontosnak tekinthetők, ezért ebben az esetben az attól eltérő eredmények valóban hibára utalnak. A szemléltető példát elemezve megállapítható, hogy a sarokzóna keresztmetszeti pontjaiban nem megfelelő a hosszirányú eltolódások eloszlása, és ez a hiba a vártnál nagyobb kritikus terhekben jelent meg.

Erre a problémára egy lehetséges megoldás, a tiszta módok kritikus értékeinek meghatározása során, a síkbeli nyírás figyelembevétele. Mivel az úgynevezett nyírás-öblösödés móddal nem jár együtt a keresztmetszet torzulása, mert a keresztmetszeti pontok csak a hossz tengely mentén tolódnak el, ezért annak a tiszta módokhoz történő hozzáadása gyakorlatilag nem módosítja a keresztmetszet alakját.

A síkbeli nyírás figyelembevétele úgy tűnik, hogy kiküszöböli a tiszta G és L módok hibáit, mivel a lekerekített sarkú és a rugalmas sarokmodellt alkalmazó szelvények kritikus terhei többnyire megegyeznek. Tiszta D módban, a síkbeli nyírás figyelembevétele csökkenti a rugalmas sarokmodell és a lekerekített sarkú modell eredményei közötti különbséget. A rugalmas sarokmodellt alkalmazó megközelítés valamivel nagyobb tiszta D kritikus terheket eredményez, azonban, mivel nincs ismert elméleti megoldás a tiszta D kritikus terhekre lekerekített sarkokkal rendelkező keresztmetszet esetén, nehéz megítélni, hogy az egyik vagy

a másik előrejelzés jobb vagy pontosabb. A rugalmas sarokmodellel és a lekerekített sarkú modellel számított kritikus terhek közötti különbségek a 12. ábrán láthatóak.



**12. ábra: Rugalmas sarokmodell és lekerekített sarkú modell kritikus terhei közötti különbségek, síkbeli nyírás figyelembevételével, 120-60-15-4-1,5 szelvény**

Egy mintapélda alapos tanulmányozása után mind a merev, mind a rugalmas modellek teljesítményét egy széleskörű paraméteres vizsgálat statisztikai elemzése alapján értékeltem. Megállapítható, hogy az elsődleges cél, azaz egy olyan lekerekített sarokmodell létrehozása, amelyen az elmozduláskorlátos VSM elemzés végrehajtható, megtörtént, bár egyes esetekben a kritikus terhek bizonyos mértékű túlbecslése volt megfigyelhető.

### 3. tézis

Javaslatot tettem lekerekített sarkú mechanikai modellekre hidegen hengerelt acél szelvényekhez, amelyek lehetővé teszik az elmozduláskorlátos végessávós módszer alkalmazását.

3a) Javaslatot tettem merev sarokelem alkalmazására lekerekített sarkú vékonyfalú elemek végessávós módszerrel történő modellezésére. Megmutattam, hogy a merev sarokelem lehetővé teszi az elmozduláskorlátos végessávós módszer alkalmazását a lekerekített sarkok közvetlen modellezése esetén is. Mintapéldákon és paraméteres numerikus vizsgálatokon keresztül elemeztem a merev sarokelem hatását a tiszta stabilitásvesztésmódokhoz tartozó kritikus terhek értékeire az elmozduláskorlátos végessávós módszer alkalmazása esetén. Megállapítottam, hogy a merev sarokelem alkalmazása a mérnöki várakozásoknak megfelelő stabilitásvesztési eredményekre vezet, de bizonyos esetekben túlbecsüli a kritikus teher értékét. A túlbecslés mértéke a szelvény geometriájától, elsősorban is a sarok lekerekítés

sugarától függ, és számos esetben nem elhanyagolható mértékű. Megállapítottam, hogy a túlbecslést részben a sarokelem merev volta okozza, ezért merev sarokelem alkalmazása esetén a hiba nem szüntethető meg.

3b) Javaslatot tettem rugalmas sarokelem alkalmazására lekerekített sarkú vékonyfalú elemek végessávós módszerrel történő modellezésére. Megmutattam, hogy a rugalmas sarokelem lehetővé teszi az elmozduláskorlátos végessávós módszer alkalmazását a lekerekített sarkok közvetlen modellezése esetén is. Mintapéldákon és paraméteres numerikus vizsgálatokon keresztül elemeztem a rugalmas sarokelem hatását a tiszta stabilitásvesztésmódokhoz tartozó kritikus terhek értékeire az elmozduláskorlátos végessávós módszer alkalmazása esetén. Megállapítottam, hogy a rugalmas sarokelem alkalmazása a mérnöki várakozásoknak megfelelő stabilitásvesztési eredményekre vezet, de bizonyos esetekben túlbecsüli a kritikus teher értékét. Megállapítottam, hogy a túlbecslést a hosszirányú eltolódások hibája okozza, és megmutattam, hogy az ún. nyírási módok figyelembe vételével ez a hiba megszűnik és a mérnöki várakozásoknak megfelelő stabilitásvesztési eredményekre vezet. A rugalmas sarokelemeket alkalmazó módszer eredményei azt mutatják, hogy a sarok lekerekítése némileg megnöveli a torzulásos horpadáshoz tartozó, a végessávós módszer és az elmozduláskorlátos végessávós módszerrel számított kritikus terhek közötti különbséget.

Kapcsolódó publikációk: [BZ5], [BZ6], [BZ7], [BZ8]

## **A TÉZISEKHEZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK**

- [BZ1] Ádány, S. and Z. Beregszászi, ‘Local and Distortional Buckling of Thin-Walled Members: Numerical Study to Compare Conventional and Constrained Finite Strip Method’, *Fifth International Conference on Thin-Walled Structures (ICTWS 2008)*, Brisbane, 2008, vol. 2, pp. 1121-1128.
- [BZ2] Ádány, S. and Z. Beregszászi, ‘The Effect of Mode Coupling on the Design Buckling Resistance of Cold-Formed Members Calculated via the Direct Strength Method’, *Proceedings of the Eurosteel 2008 Conference (Eurosteel 2008)*, Graz, 2008, vol. A, pp. 117-122.
- [BZ3] Beregszászi, Z. and S. Ádány, ‘The effect of rounded corners of cold-formed steel members in the buckling analysis via the direct strength method’, *The Twelfth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*, Funchal, Madeira, 2009, paper no. 36 on CD-ROM, p. 14.

- [BZ4] Beregszászi, Z. and S. Ádány, ‘Application of the constrained finite strip method for the buckling design of cold-formed steel members via the direct strength method’, *Computers and Structures*, vol. 89, 2011, pp. 2020-2027.  
<https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2011.07.003>.
- [BZ5] Beregszászi, Z. and S. Ádány, ‘cFSM with rigid corner element for the buckling analysis of thin-walled members with rounded corners’, *Periodica Polytechnica ser. Civil Eng.*, 2019, <https://doi.org/10.3311/PPci.12949>
- [BZ6] Ádány, S. and Z. Beregszászi, ‘Constrained finite strip method for thin-walled members with rounded corners’, *Proceedings of Eurosteel 2014*, Naples, 2014, pp. 405-406, on CD-ROM, p. 6.
- [BZ7] Ádány, S. and Z. Beregszászi, ‘Modal Decomposition for Thin-walled Members with Rounded Corners: an Extension to cFSM by using Elastic Corner Elements’, *Proceedings of Eighth International Conference on Advances in Steel Structures* (eds.: D. Camotim, P.B. Dinis, S.L. Chan, C.M. Wang, R. Goncalves, N. Silvestre, C. Basaglia, A. Landesmann, R. Bebiano), Lisbon, 2015, paper no. 83 on CD-ROM, p. 13.
- [BZ8] Beregszászi, Z. and S. Ádány, ‘Modal buckling analysis of thin-walled members with rounded corners by using the constrained finite strip method with elastic corner elements’, *Thin-Walled Structures*, Submitted

## HIVATKOZÁSOK

- [1] CEN, EN 1993-1-3:2006 - Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-3: General rules, Supplementary rules for cold-formed members and sheeting, European Committee for Standardization, Belgium, 2006.
- [2] CEN, EN 1993-1-5:2006 - Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-5: Plated structural elements, European Committee for Standardization, Belgium, 2006.
- [3] NAS, North American specification for the design of cold-formed steel structural members, American Iron and Steel Institute, USA, 2007.
- [4] Direct strength method design guide, American Iron and Steel Institute, USA, 2006.
- [5] Schafer, B.W., ‘Review: The Direct Strength Method of cold-formed steel member design’, *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 64, no. 7–8, 2008, pp. 766-778, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.01.022>.
- [6] Cheung Y.K., ‘Finite strip method in the analysis of elastic plates with two opposite ends simply supported’, *Proc Inst Civ Eng*, 40, 1-7, 1968.

- [7] Cheung Y.K., 'Finite strip method in structural analysis', Pergamon Press, 1976.
- [8] Papangelis, J.P. and G.J. Hancock, 'Computer analysis of thin-walled structural members.', *Computers & Structures*, vol. 56, no. 1, 1995, pp. 157-176.
- [9] Ádány, S. and B.W. Schafer, 'Buckling mode decomposition of unbranched open cross-section members via Finite Strip Method: derivation', *Thin-Walled Structures*, vol. 44, no. 5, 2006, pp. 563-584.
- [10] Ádány, S. and B.W. Schafer, 'Buckling mode decomposition of unbranched open cross-section members via Finite Strip Method: application and examples', *Thin-Walled Structures*, vol. 44, no. 5, 2006, pp. 585-600.
- [11] Ádány, S. and B.W. Schafer, 'A full modal decomposition of thin-walled, unbranched open cross-section members via the constrained finite strip method', *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 64, no. 1, 2008, pp. 12-29.
- [12] Li, Z. et al., 'Impact of basis, orthogonalization, and normalization on the constrained Finite Strip Method for stability solutions of open thin-walled members', *Thin-Walled Structures*, vol. 49, no. 9, 2011, pp. 1108-1122.
- [13] Davies, J.M. and P. Leach, 'First-order generalised beam theory', *J. of Constructional Steel Research*, vol. 31, no. 2-3, 1994, pp. 187-220.
- [14] Davies, J.M., P. Leach and D. Heinz, 'Second-order generalised beam theory', *J. of Constructional Steel Research*, vol. 31, no. 2-3, 1994, pp. 221-241.
- [15] Dinis, P.B., D. Camotim and N. Silvestre, 'GBT formulation to analyse the buckling behaviour of thin-walled members with arbitrarily 'branched' open cross-sections', *Thin-Walled Structures*, vol 44, no. 1, 2006, pp. 20-38.
- [16] CUFSM: Elastic Buckling Analysis of Thin-Walled Members by Finite Strip Analysis. CUFSM v4.05, 2012, <http://www.ce.jhu.edu/bschafer/cufsm>
- [17] Yu, C. and B.W. Schafer, 'Local Buckling Tests on Cold-Formed Steel Beams', *ASCE, Journal of Structural Engineering*, vol. 129, no. 12, 2003, pp. 1596-1606. (doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:12(1596))
- [18] Yu, C. and B.W. Schafer, 'Distortional Buckling Tests on Cold-Formed Steel Beams', *17th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, Orlando, 2004.