

Vékonyfalú, hidegen hajlított acélszelvények ellenőrzési módszereinek összehasonlítása

Comparison of the verification methods of thin-walled, cold-formed steel members

SÁNDULY Annabella,^{1,2} Dr. NAGY Zsolt, egyetemi docens^{2,3},
Dr. KOTEŁKO Maria, professzor¹, KELEMEN Andrea^{2,3}

¹ Lodzi Műszaki Egyetem, Stefana Żeromskiego utca, 116 sz., 90-924 Łódź, Lengyelország,
annabella.sanduly@dokt.p.lodz.pl, www.p.lodz.pl

² Gordias KFT, Kárpát utca, 1 sz., 400180 Kolozsvár, Románia, office@gordias.ro, www.gordias.ro

³ Kolozsvári Műszaki Egyetem, Unió utca, 28 sz., 400114 Kolozsvár, Románia, zsolt.nagy@dst.utcluj.ro,
www.constructii.utcluj.ro

Abstract

The thin-walled cold-formed steel members (TWCFS) are widely used in the construction industry, due to their several favourable properties. However, the capacity calculation of these members, according to the codes shows lower values than the results of numerical analyses or experimental tests. In order to improve these calculations, an analytical method is under development, which is based on the yield line theory, considering the plastic mechanisms of the TWCFS members. This paper aims to show the differences and similarities between the verification methods of the TWCFS members. The subject of the comparison is a lipped-channel with given geometrical properties.

Keywords: cold-formed steel member, verification methods, numerical calculation, analytical calculation, experimental tests

Kivonat

A vékonyfalú, hidegen hajlított acélszelvények népszerűsége növekedő tendenciát mutat az építőiparban, a számos kedvező tulajdonságaik miatt. Ennek ellenére, ezeknek az elemeknek a szabványon alapuló számítások eredményei alacsonyabbnak bizonyulnak, mint a numerikus, vagy a kísérleti tesztek során kapott eredmények. Ennek a javítására szolgál a jelenleg kidolgozás alatt levő, energiamódszeren alapuló, analitikus számolás, amely figyelembe veszi ezen szelvények képlékeny mechanizmusait is. A jelen kutatás célja, hogy bemutassa a különbségeket és a hasonlóságokat az ellenőrzési módszerek eredményei között. Az összehasonlítás tárgya egy adott geometriai paraméterekkel rendelkező C szelvény.

Kulcsszavak: hidegen hajlított acélszelvény, ellenőrzési módszerek, numerikus számolás, analitikus számolás, kísérleti tesztek

1. BEVEZETŐ

A hidegen hajlított acélszelvények az építőipar közkedvelt elemeivé léptek elő az utóbbi évtizedekben a számos kedvező tulajdonságainak köszönhetően. Az építőipar mellett széleskörű a felhasználási területük a gépiparban is autók, hajók, repülőgépek, ipari gépek részeként. Az építőiparban, mint másodlagos szerkezeti elemek, burkolati rendszerek kialakításához alkalmazzák első sorban, de acélházak, csarnokok, irodaépületek, ipari polcrendszerek, magasraktárok főszerkezeti elemeiként is felhasználják (1. ábra). Ha összehasonlítjuk a hengerelt acélidomokkal, a vékonyfalú, hidegen hajlított acélelemek esetenként gazdaságosabb és hatékonyabb szerkezeti kialakításokhoz vezethetnek, az alakíthatóságuknak, gyors gyártási és szerelési folyamatuknak, valamint aránylag alacsony súlyuknak köszönhetően.

A mindennapi tervezésben, a vékonyfalú, hidegen hajlított acélszelvények használata esetén számos problémába ütközhetünk. A vékony falaknak, az adott elem karcsúságának és az aszimmetrikus, vagy

részben szimmetrikus, nyitott keresztmetszeteknek köszönhetően, lokális és globális stabilitási problémákkal, valamint csavarodási problémákkal nézünk szembe. Ugyanakkor, ezen elemek közötti csomópontok kialakítása is fejtörést okoz a gyakorló mérnöknek.

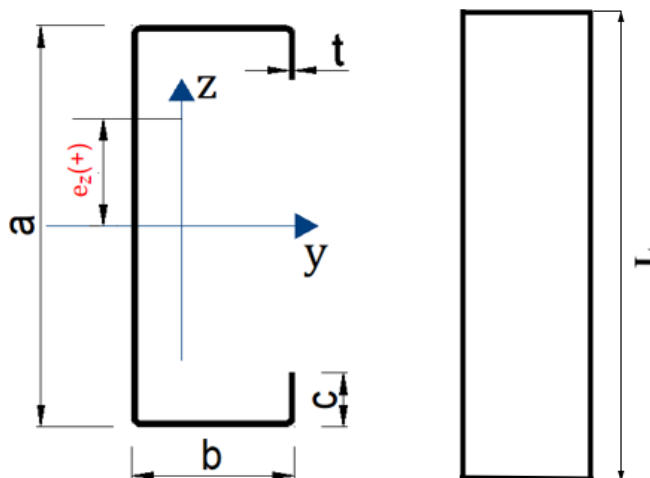


1. ábra. Magasraktár épület hidegen hajlított acélidomokból

Az fentiekben bemutatott elemek ellenőrzése, a szabványok szerinti számolások mellett, összetettebb analitikus számolással (az elemek képlékeny deformációra való képességeinek figyelembevételével), numerikus analízissel, valamint kísérleti módszerekkel is elvégezhető.

2. HIDEGEN HAJLÍTOTT C SZELVÉNYEK ELLENŐRZÉSI MÓDSZEREI KÜLPONTOS NYOMÁS ESETÉN

A 2. ábrán látható, az 1. táblázatban feltüntetett geometriai tulajdonságokkal rendelkező C szelvény ellenőrzése az előző bekezdésben említett módszerekkel történt. A szelvény figyelembe vett terhelése külpontos nyomóerő, a keresztmetszet erős irányú tengelyén, amely kombinált nyomóerőt és hajlító nyomatékot ad át az elemre. A továbbiakban, a módszerek rövid leírásával egybekötött eredmények bemutatása és összehasonlítása következik.



2 ábra. A számolt C szelvény geometriai paraméterei Forrás: [1]

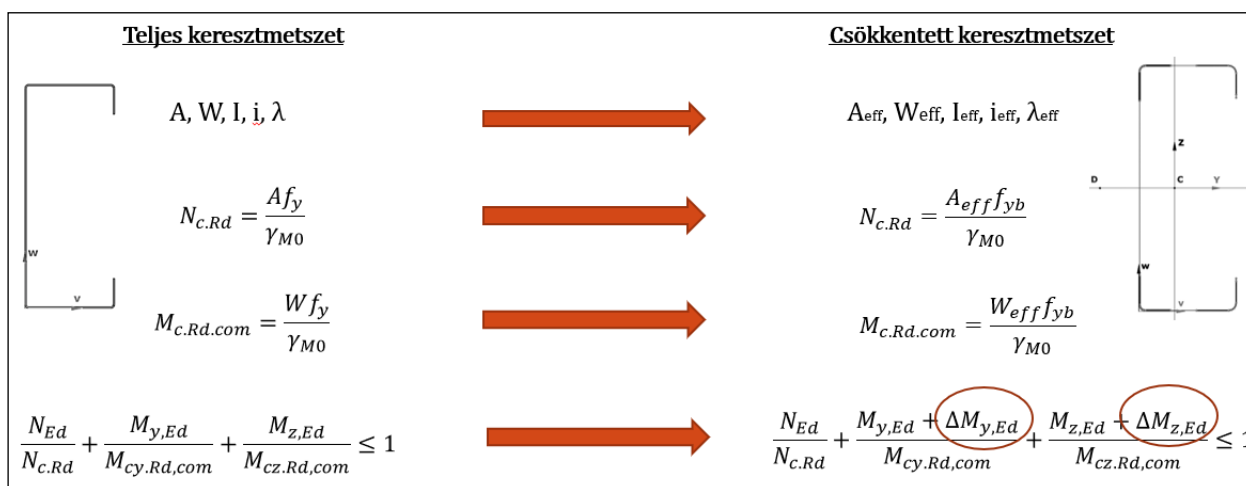
C szelvény geometriai paraméterei

1. táblázat

h [mm]	150
b [mm]	60
c [mm]	20
t [mm]	2
r [mm]	2
L [mm]	450

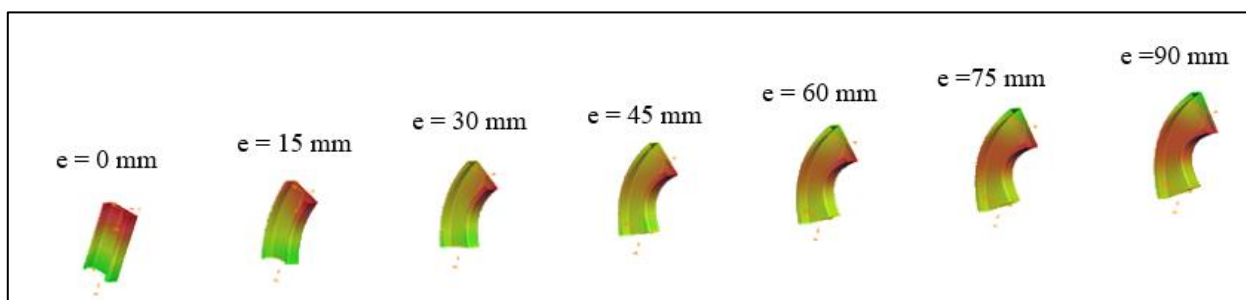
2.1. Szabványok szerinti ellenőrzés

Az acélszelvények ellenőrzését szabályzó Eurokód [2] négy különböző osztályba sorolja ezeket, a képlékeny csukló kialakítására való képességük alapján. A vékonyfalú, hidegen hajlított idomok rendszerint a negyedik osztályba sorolandók, amely kizárja a képlékeny mechanizmusok kialakulásának lehetőségét és előírja az effektív keresztmetszet figyelembe vételét, a falak lehetséges lokális és disztorziós stabilitásvesztése miatt. Ennek következtében, a vékonyfalú, hidegen hajlított acélelemek ellenőrzése a csökkentett keresztmetszeti tulajdonságok használatában, és az eltolódott súlypont miatti nyomoték megjelenésében tér el a magasabb osztályú, vastagabb falú szelvények ellenőrzésétől (3. ábra).



3. ábra. Teljes és csökkentett keresztmetszetekkel történő számolás

A 2. ábrán látható C szelvény Eurokód szerinti számolása a ConSteel [3] tervezői szoftver segítségével történt. A rudak deformációi az 4. ábrán láthatóak, a kapacitását meg a 9. ábrán látható grafikonon jelöli, amely a maximális nyomóerőt mutatja kN-ban kifejezve, az erő y irány szerinti külpontoságának függvényében.

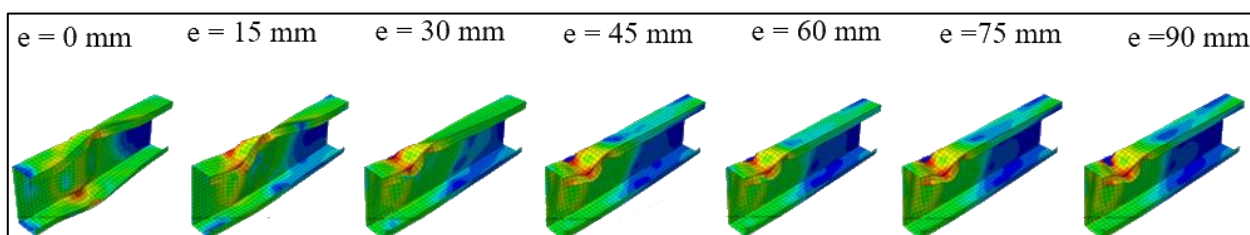


4. ábra. Eurokód alapján történő számolásból eredményezett deformációk külpontos nyomás esetén

2.2. Numerikus ellenőrzés végeelem módszerrel

A hidegen hajlított acélidomok numerikus ellenőrzése végeelem módszerrel kevésbé népszerű a mindennapi tervezésben, az erre alkalmas szoftverek nehezebb kezelhetősége és az ellenőrzés időigényessége miatt. Viszont, ezen szoftvereknek, kódoknak a megfelelő alkalmazása során kapott eredményekből visszakaphatjuk az elemek valós viselkedését. A vékonyfalú, hidegen hajlított elemek numerikus ellenőrzésének leglényegesebb elemei a peremfeltételek, és az anyagminőség helyes meghatározása, a szükséges imperfekciók figyelembe vétele, a végelemek alakjának és számának kiválasztása, valamint a megfelelő számolási módszer alkalmazása.

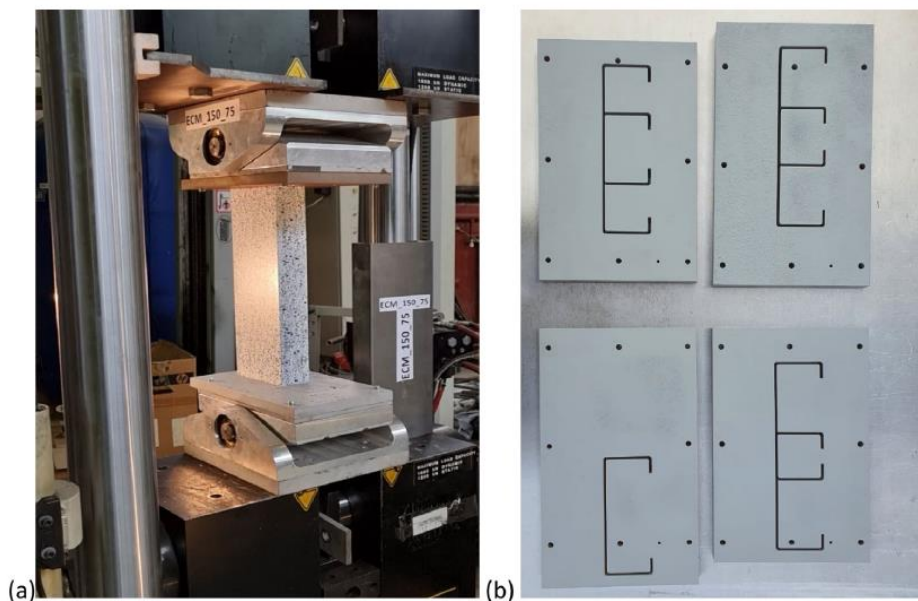
A 2. ábrán látható C szelvény numerikus módszerrel történő ellenőrzése az Abaqus szoftver [4] segítségével történt, geometriai imperfekciók figyelembevételével. A rudak tönkremeneteli deformációi az 5. ábrán láthatóak, a kapacitása meg a 9. és 10. ábrákon látható grafikonok mutatják, amelyek a maximális nyomóerőt tüntetik fel, kN-ban kifejezve, az erő külpontosságának (9. ábra), illetve az elem saját hosszanti tengelye irányában történő elmozdulás (10. ábra) függvényében.



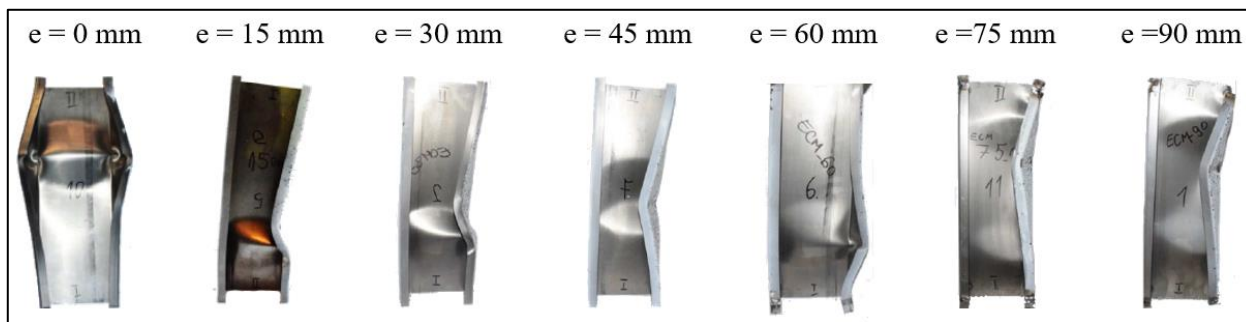
5. ábra. Numerikus számolások során kapott tönkremeneteli deformációk külpontos nyomás esetén

2.3. Laboratóriumi kísérletekkel történő ellenőrzés

A 2. ábrán látható C szelvény kísérleti vizsgálatához használt felszerelések a következők: Instron elektromechanikus gép, amely a nyomóerőt biztosítja (6.a. ábra), a szelvény keresztmetszetének a formájára barázdált lemezek, amely meghatározza a peremfeltételeket és a kívánt külpontosságot (6.b. ábra), valamint digitális képkorreláció elvén működő Aramis rendszerre, amely feltérképezi az elem alakváltozását a teszt során. A rudak deformációi a 7. ábrán láthatóak, a kapacitása meg a 9. ábrán látható grafikonról olvasható le, amely a maximális nyomóerőt tünteti fel, kN-ban kifejezve, az erő külpontosságának függvényében. [5]



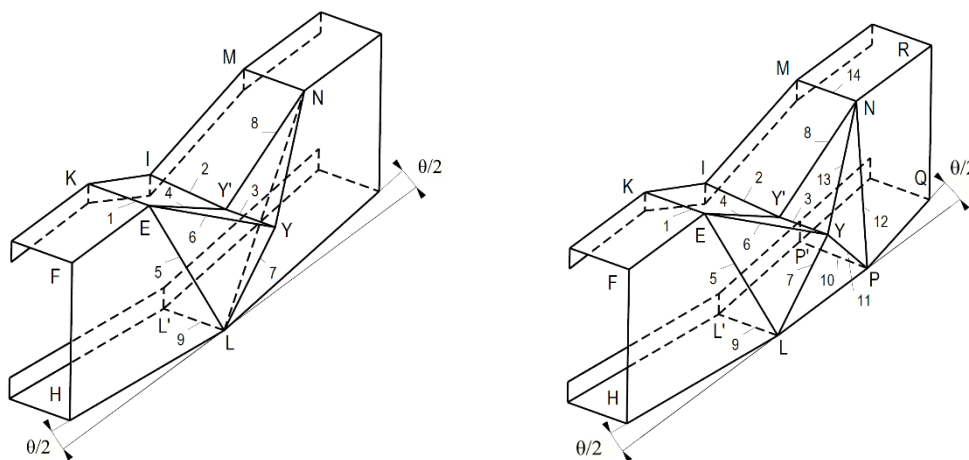
6. ábra. Kísérleti vizsgálathoz alkalmazott eszközök. Forrás: [5]



7. ábra. Kísérletekből kapott deformációk külpontos nyomóerő esetén. Forrás: [5]

2.4. Analitikus számolás a szelvények képlékeny deformációra való képességeinek figyelembevételével

A hidegen hajlított C szelvények képlékeny deformációra való képességét kísérleti eredmények bizonyítják. Az eddigi publikációkban kifejtett megfigyelések alapján [6], a szelvény erős irányában történő külpontos nyomás esetén, ezen elemek V, W és RV alakú plasztikus deformációkat eredményeznek, amelyek közül a V és W alakú deformációk fordulnak elő a leggyakrabban (8. ábra). A képlékeny deformáció egy, a virtuális munka elvén alapuló, analitikus számolás segítségével van figyelembe véve, amely eredetileg betonlemezekre volt alkalmazva. Az első releváns képlékeny mechanizmusok vékonyfalú szelvények esetében 1981-ben voltak publikálva Murray és Khoo [7] által. Azóta számos kutatás témáját alkotja a C szelvények képlékeny mechanizmusa. Ezen kutatások bizonyítják az energiamódszerrel [6] történő számolások alkalmazhatóságát. Ehhez a legfontosabb információ a mechanizmus alakjának a helyes meghatározása és paramétereinek a felhasználása. A mechanizmus alakjának a számolásban használt paramétereit, kalibrálásra szorulnak.



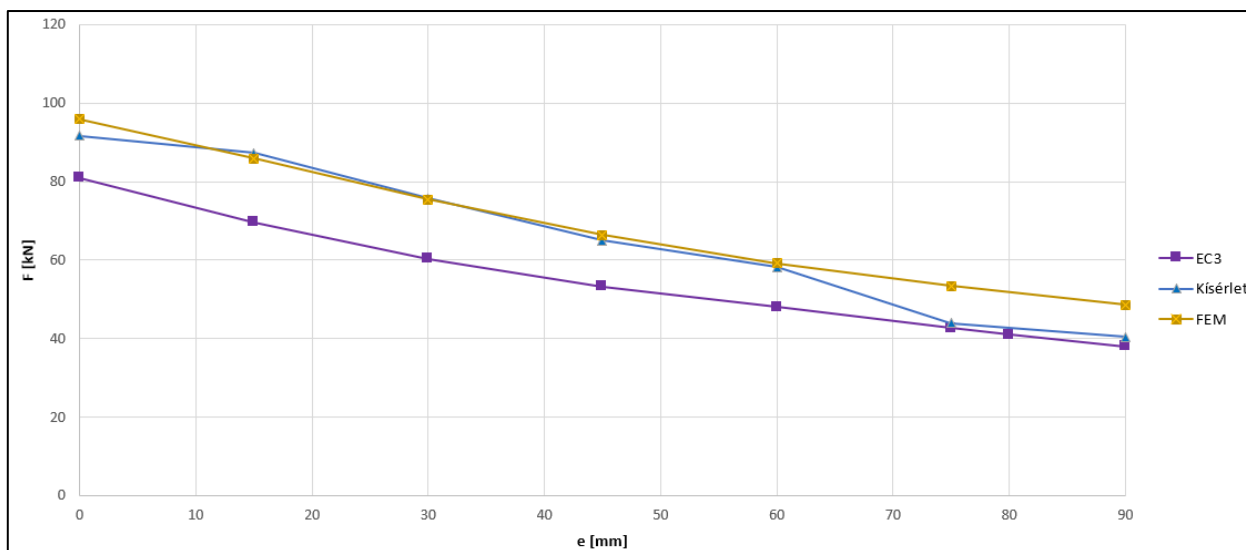
8. ábra. V és W mechanizmusok alakjai. Forrás: [1]

A 10. ábrán látható grafikon bemutatja a V mechanizmus esetén számolt C szelvény kapacitását, kN-ban kifejezve, a rúdnak a saját hosszanti tengelye irányában történő elmozdulása (összenyomása) függvényében.

3. ELLENŐRZÉSI MÓDSZEREK ELŐZETES EREDMÉNYEINEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA ÉS KÖVETKEZTETÉSEK LEVONÁSA

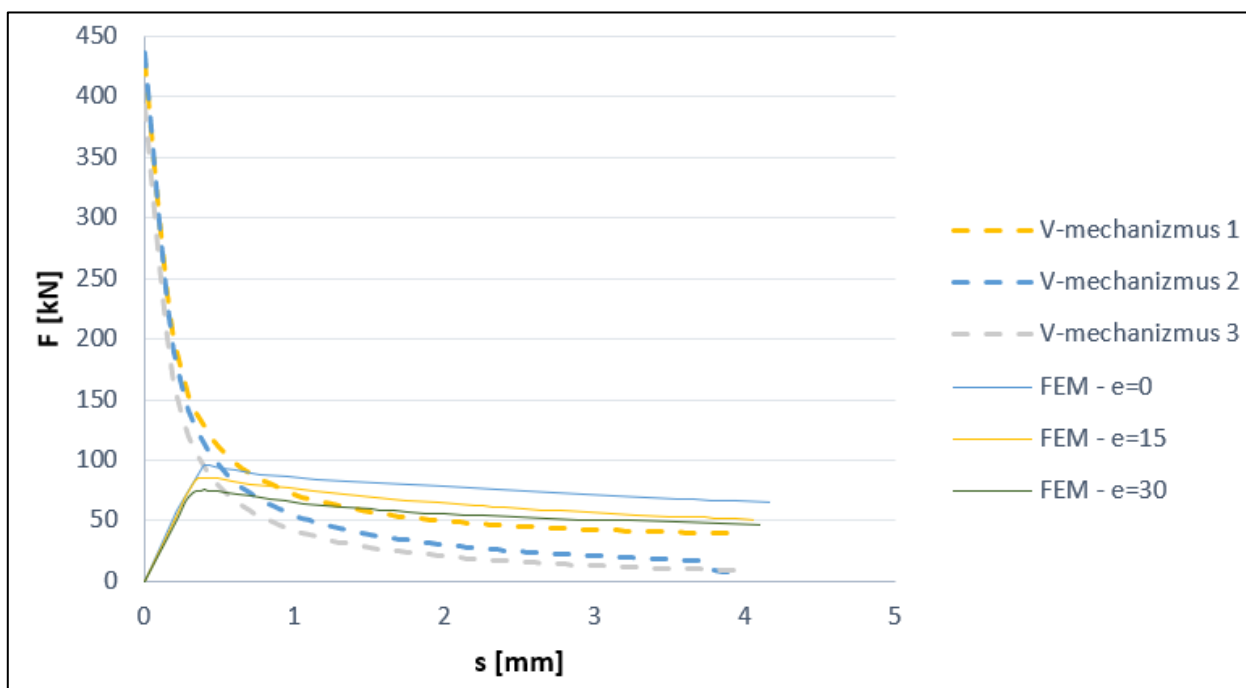
Az 9. ábrán látható grafikon bemutatja a jelenleg érvényben levő szabvány [1] szerinti számolásból származó kapacitást a fent említett C szelvény esetén, amely a nyomóerő külpontosságának függvényében van ábrázolva, valamint megmutatja ugyanezen kapacitásokat, amelyeket numerikus számolások és kísérleti tesztek eredményeznek. Az összehasonlító ábra alapján kijelenthető, hogy a jelenlegi szabvány szerinti számolás a kísérleti tesztek és a numerikus analízisek eredményeihez képest alacsony kapacitást feltételez a

C szelvénynek, külpontos nyomás esetén. Ez a különbség nagy mértékben tudható be annak, hogy a szabvány nem veszi figyelembe a 4. osztályba sorolt keresztmetszetek képlékeny deformációját, holott úgy a numerikus analízis, mint a kísérleti tesztek is az ellenkezőjét bizonyítják.



9. ábra. Összehasonlító ábra: maximális külpontos nyomóerő [kN] – az erő külpontossága [mm]

A 2.4. fejezetben összefoglalt analitikus számolási módszer jelenleg kalibrálási stádiumban van, a külpontosság értékének meghatározása a deformáció paramétereinek függvényében még folyamatban levő kutatás. Ebből adódóan, ezek a számolási eredmények a numerikus analízisekből kapott erő-elmozdulás diagrammokkal vannak összehasonlítva az 10. ábrán. Három, különböző külpontosság során kapott, eredmény összehasonlítása látható, három, a feltételezett végső deformáció különböző paramétereiben eltérő, analitikus számolási eredménnyel. Ezek a különböző paraméterek a módszer úgynevezett kalibrációs paraméterei, amelyek részben a kísérletek során mért értékek, részben kiigazító tényezők. Az grafikonok alátámasztják, hogy az energiamódszerrel számolt maximális kapacitás, adott kalibrációs paraméterek esetén, a numerikus analízisekhez közeli értékeket eredményez. A kutatás folytatódik további eredmények feldolgozásával.



10. ábra. Analitikus számolásból kapott erő-elmozdulás görbe összehasonlítása a numerikus számolásokkal.

4. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A jelen munkát Magyarország Collegium Talentum programja támogatta.

5. IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] V. Ungureanu, M. Kotelko, F. Bodea, I. Both, L. Czechowski: *Failure mechanisms of TWCFS members considering various eccentricities*, Steel Construction, Volume 16, 44-55.
- [2] EN 1993-1-3: *Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-3: General rules. Supplementary rules for coldformed members and sheeting*.
- [3] ConSteel Solutions Ltd. (1999) ConSteel, www.consteelsoftware.com.
- [4] ABAQUS Inc. (1978) Abaqus/CAE.
- [5] V. Ungureanu, I. Both, M. Kotelko, L. Czechowski, F. Bodea, D. Dubina: *Buckling strength and post- ultimate behaviour of lipped channel section short columns under eccentric compression*, Thin-Walled Structures 181, 2022.
- [6] M. Kotelko, J. Grudziecki, V. Ungureanu, D. Dubina: *Ultimate and post-ultimate behaviour of thin-walled cold-formed steel open-section members under eccentric compression. Part I: Collapse mechanisms database (theoretical study)*, Thin-Walled Structures, 2021.
- [7] Murray N.W., Khoo P.S.: *Some basic plastic mechanisms in thin-walled steel structures*. Int. J. Mech. Sci, 23(12), 703-713, 1981.