



BEROPPANÁSI TÖNKREMENETEL NUMERIKUS MODLLEZÉSE REALISZTIKUS SZÉLSŐ TÁMASZNÁL

NUMERICAL MODELLING OF WEB CRIPPLING UNDER REALISTIC END SUPPORT CONDITIONS

Nagy Örs,¹ Sánduly Annabella,² Gobesz F.-Zsongor³

- ¹ Kolozsvári Műszaki Egyetem, Építőmérnöki Kar, Doktori Iskola, Kolozsvár, Románia, rsnagy8@gmail.com
- ² Lodzi Műszaki Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Szilárdságtan Tanszék, Lodz, Lengyelország, annaberlla.sanduly@gordias.ro
- ³ Kolozsvári Műszaki Egyetem, Építőmérnöki Kar, Tartószerkezetek Mechanikája Tanszék, Kolozsvár, Románia, go@mecon.utcluj.ro

Abstract

Determination of web crippling resistance of thin-walled steel sections can be achieved by two different methods: by laboratory experiments or with numerical models, dividing the geometry into finite elements. Trapezoidal sheeting is particularly sensitive to concentrated loading. The support conformation has a significant influence on the resistance of the profile. Understanding the influential support parameters and taking into account in calculations is essential, since it can have a major influence on the bearing resistance and failure mode. The American and the European standards differ in their approach regarding the boundary conditions. The Eurocode does not consider the fixing of the sheets to the roof purlins or beams, which is generally applied in the construction industry. The present study investigates the web crippling resistance of trapezoidal cross-sections with numerical finite element models for several support configurations, considering also the influence of bottom flange fixing.

Keywords: cold-formed steel, trapezoidal sheeting, web crippling resistance, Eurocode, finite element model.

Összefoglalás

A vékonyfalú acélidomok beroppanási ellenállásának meghatározása kétféleképpen történhet: kísérleti vagy numerikus úton, a geometriát végeselemekre osztva. A trapézlemezek különösképpen érzékenyek a koncentrált terhekre. A támasz kialakítása jelentősen hozzájárul az idomok teherbírásának a mértékéhez. A valós támasz karakterisztikáinak ismerete és helyes számszerűsítése kiemelten fontos, nagyban befolyásolja a szelvény rezisztenciáját és tönkremeneteli módját. Az amerikai és az európai tervezési szabványok különböző megközelítéseket alkalmaznak a peremfeltételeket tekintve. Az Eurokód nem számol a lemezek szelemenhez vagy gerendához való rögzítésével, amelyet az építkezési gyakorlatban rendszerint alkalmaznak. A jelen tanulmány numerikus számítógépes modellekkel vizsgálja a trapézlemezek beroppanási ellenállását változó támaszkialakításokra, figyelembe véve az alsó öv lerögzítésének hatását.

Kulcsszavak: hidegen hajlított acél, trapézlemez, beroppanási ellenállás, Eurokód, végeselemes modell.

1. Bevezetés

1.1. Többgerincű szelvények beroppanási ellenállása

A vékonyfalú acélidomok egyik tönkremeneteli módja a gerinc beroppanása, amely koncentrált

nyíróerő hatására következik be. A magasbordás trapézlemezek különösképpen érzékenyek a vizsgált tönkremeneteli módra, mivel a nyírásnak kitett vékony (0.3–1 mm), de ugyanakkor magas (akár 150 mm) gerinclemez teherbírása sokszor alacsonyabb a teljes idom hajlítási teherbírásánál. Tetőlemezeknél, illetve a kompozitfödémek zsaluzatként alkalmazott lemezeinél jellemzően a támaszoknál koncentrálódik a legnagyobb nyíróerő. Méretezéskor kiemelten fontos a támasz valós paramétereinek használata. A kontaktfelület hossza, valamint a támaszon túlnyúló szabad vég hossza jelentősen befolyásolja a lemez beroppanási ellenállását. Megfelelő támaszkialakítással a legtöbb esetben elérhető, hogy ne a beroppanási tönkremenetel legyen a méretező.

1.2. Szélsőtámasz-kialakítások

A gyakorlatban a magasbordás elemekkel legtöbbször nagy nyílásokat áthidaló tetőburkolatként találkozunk. A támasz paraméterei széles skálán mozognak, az elsődleges szerkezet anyagának és a tervezési részletek függvényében. A betonszelemenek felső síkja rendszerint nem követi a tető dőlésszögét, ezért a szelemen-lemez kontakt egy elméleti vonalon koncentrálódik. A gerincen fekvő támasznál a trapézidom ezért minden esetben rendelkezik egy konzolban álló szabad véggel (1. ábra).

Az acéltetőknél a támasz felső síkja sokszor követi a tetőszöget, de gyakori a szelemenek vízszintes elhelyezése is.



Az eresztámaszoknál a konzolban lévő lemez-

szakasz hossza változó (2. ábra). Sok esetben a

szélessége, vagy tetősíkot nem követő támasznál egy keskeny él. A másik paraméter a konzolban álló szabad vég hossza. A jelenlegi tanulmány nem vizsgálja a beroppanási ellenállást a köztes támaszoknál.

Analitikus számolás sajátosságai

2.1. AISI szabvány

Az acélidomok beroppanási ellenállásának a kutatása az 1940-es években kezdődött a Cornell egyetemen Winter és Pian kísérletével [1], amelyben 2 egymásnak háttal fordított, hidegen hajlított C idomot teszteltek 4 különböző teheresetre: IOF – egy mezőben terhelt öv, EOF – egy szélen terhelt öv, ITF – mezőben terhelt mindkét öv, ETF – szélen terhelt mindkét öv (3. ábra).



1. ábra. Tipikus támasz a tetőgerincnél betonszelemenek esetén



2. ábra. Lehetséges támaszok az eresznél beton- vagy acélszelemen esetén



3. ábra. Megkülönböztetett teheresetek (forrás – AISI S909-17 [3])

A laborkísérleteket később LaBoube és Schuster standardizálta [2], amely bekerült az amerikai AISI S909-17 [3] szabványba.

A gerinc koncentrált nyírásra való ellenállása meghatározásának a mai napig népszerű módja a fizikai kísérletek elvégzése, ugyanis a vékonyfalú idomok tönkremenetelét több, egyszerre fellépő tényező okozza [4]. Különböző keresztmetszeteken végzett kísérletsorozatok alapján az AISI S100-16 [5] szabványban empirikus képlet (1) lett kidolgozva [6]. A szabvány a beroppanási ellenállást a következő paraméterek alapján határozza meg: lemezvastagság (*t*), folyáshatár (F_y), gerinc dőlésszöge (θ), belső hajlítási sugár (R), teherhordó szakasz - lemez-támasz közötti kontaktfelület hossza (N), gerincmagasság (h).

$$P_n = Ct^2 F_y sin\theta \left(1 - C_R \sqrt{\frac{R}{t}}\right) \left(1 + C_N \sqrt{\frac{N}{t}}\right) \left(1 - C_h \sqrt{\frac{h}{t}}\right)$$
(1)

2.2. Eurokód

Az Eurokód 3-1-3 [7] szerinti számolás is az AISI standardra épül [8], de külön kezeli az egy, kettő vagy többgerincű idomokat. A több gerinccel rendelkező trapézlemezek beroppanási ellenállását a (2) összefüggéssel számolja, amelyben a változók hasonlóak az amerikai szabványhoz: lemezvastagság (t), folyáshatár (f_{yb}), rugalmassági modulus (*E*), hajlítási sugár (*r*), effektív támaszkodási felület hossza (l_a), gerinc dőlésszöge (ϕ).

$$R_{w} = \frac{\alpha \cdot t^{2} \sqrt{f_{yb} \cdot E}}{\gamma_{M1}} \cdot \left(1 - 0.1 \cdot \sqrt{\frac{r}{t}}\right)$$

$$\left(0.5 + \sqrt{0.02 \cdot \frac{l_{a}}{t}}\right) \left(2.4 + \left(\frac{\phi}{90}\right)^{2}\right)$$
(2)

2.3. Szabványok összehasonlítása

Mindkét összefüggés figyelembe veszi a támaszkialakítás sajátosságait. Az AISI szabvány konstansokat ad (C, CR, CN, Ch), amelyek függenek a keresztmetszet típusától (C, Z, Omega, trapézlemez), a lemezek esetleges rögzítésétől, valamint az alkalmazott terhelés pozíciójától (IOF, EOF, ITF, ETF).

Az Eurokód többgerincű acélidomokra vonatkozó összefüggése az (a) és (l_a) paraméterek segítségével különbözteti meg a támaszkonfigurációkat. Az (a) tényező függ a teherkategóriától, azaz a teher alkalmazási pontjától. Az effektív támaszkodási felület (l_a) függ a teherkategóriától, valamint a támasz szélességétől. A legszembetűnőbb eltérés a szabványok között az, hogy az Eurokód nem tér ki a lemezek támaszhoz való rögzítésének a hatására, míg az AISI eltérő konstansokat ír elő a csavarral rögzített kialakításokra. A jelen tanulmány a következő fejezetekben a beroppanási ellenállást vizsgálja szélső támaszoknál, rögzített, illetve szabadon felfekvő végek esetén.

3. Végeselemes modellezés

3.1. Vizsgált geometria

A kutatás során a GRISPE projektben tesztelt [9, 10] PCB80 egyenes gerincű trapézlemez volt a referencia-alany. Egyéb keresztmetszetek is vizsgálatra kerültek, de a parametrikus tanulmány során a 0.75 mm vastag BACACIER PCB80 profilt használtuk. A támasz szélessége (l_{sb}) a kísérletek során használt 40 mm volt (4. ábra és 5. ábra).



4. ábra. A referenciaprofil geometriája



5. ábra. A laborkísérlet felépítése (forrás – GRISPE-dokumentum [10])



6. ábra. A konzolban álló vég reprezentálása

A numerikusan vizsgált szélső támaszoknál a konzolban álló szabad vég hossza (l_{end}) változó volt. Öt kialakítást elemeztünk rögzített, valamint rögzítetlen végekkel, ahol $l_{end} = 0/20/40/80/160$ mm és $l_{ch} = 40$ mm (6. ábra).

3.2. Numerikus modell

A szerzők több végeselemes modellt építettek fel **[11, 12]** Ansys Workbench 2020 R2, valamint Ansys Mechanical 2019 szoftver segítségével. Az analízisek során a geometriai és az anyagi nemlinearitást egyaránt figyelembe vettük.

A gyakorlatban a trapézlemezeket a hosszirányú átfedéseknél fűzőcsavarokkal rögzítik, ami megakadályozza az oldalirányú elmozdulást, ezért a tönkremeneteli mód gerincenként azonosnak tekinthető. A számítási idő csökkentése végett csak egy fél borda került bemodellezésre, és a hosszanti éleken szimmetria-peremfeltételt határoztunk meg. Az alkalmazott teherhez közelebb eső részen a lemez egy enyhén megdőlt acéllemezen támaszkodik, az ellentétes végen pedig csukló található. A terhelés az alsó övre irányított függőleges elmozdulásként lett alkalmazva, melynek a mértéke inkrementumonként növekszik (7. ábra).

A háló kialakítása követi a várható deformációk eloszlását. A lemezt három szakaszra bontottuk. A támasz körül a háló 3 mm-es, a terhelés alatt 6 mm-es, és a tehertől távolabb eső részen 10 mm-es. A végeselemek dominánsan négyoldalú, másodfokú SHELL281 típusú elemek. A hajlított éleken a háló úgy lett kialakítva, hogy az ívet minimum 4 szakaszra ossza.

A folyáshatár a kísérletnek megfelelően 362.8 MPa. A numerikus modellezés során bilineáris anyaggörbét használtunk, az első szakaszon



7. ábra. Peremfeltételek

E = 210 GPa, a második szakaszon E = 2.1 GPa rugalmassági modulussal. A t = 0.75 mm helyett a $t_{real} = 0.684$ mm mért lemezvastagság került bevezetésre. (8. ábra)

A végeselemes modell a GRISPE projekt kísérletei **[9, 10]** alapján lett validálva. A numerikus modellel kapott beroppanási ellenállás 0.23%-kal tért el a kísérletitől, a posztelasztikus zónában található második teherbírás-maximum pedig 13.34%-kal lett kisebb a kísérletinél **[11]**. A numerikusan kapott deformált alak és tönkremeneteli mód hasonló a valóságban megfigyeltekkel.

4. Eredmények

Az utóbbi években elvégzett európai laborkísérletek alatt **[10, 13]** a trapézlemezek nem voltak a támaszhoz rögzítve, az építkezési gyakorlatban viszont a lemez mindig össze van kapcsolva a támaszként szolgáló szelemennel vagy gerendával. A jelen fejezet a szélső támaszhoz csavarozott és a nem rögzített lemezek beroppanási ellenállását hasonlítja össze, változó szabad véghosszakra. A köztes támaszoknál kevésbé releváns a rögzítés hatásának a vizsgálata, mivel általában nem jelentkezik olyan teherfeltétel, amely hatására az alsó öv eltávolodna a támasztól.

A csavar és az alátét merevsége nagyobb, mint a lefogott lemezé. Húzás hatására jelentős deformációk csak a vékonyfalú idom alsó övében jelentkeznek. A számolási idő csökkentése miatt az Ansys-modellekben a rögzítési felületen a merev csavarnak csak a hatása került bevezetésre. Az alsó öv és a támasz összefogása az alátét peremének a vonalán történt.

4.1. Rövid konzolok

Rögzítetlen rövid végeknél mind a kísérletek, mind a végeselemes modellek igazolják, hogy a trapézlemez szélső szakasza a teher növekedésével megemelkedik. A feszültségek a trapézlemez gerincének és a támasz élének a kontaktpontjánál koncentrálódnak.

A támaszokhoz való rögzítés megakadályozza a végek felemelkedését. A feszültségek már nem egy pontban, hanem az alsó, hajlított gerinc-él



8. ábra. Hálózás



9. ábra. Rövid konzolokra jellemző deformáció, rögzítés nélkül



10. ábra. Feszültségeloszlás a rövid végeknél, rögzítés nélkül (balra) és rögzítéssel (jobbra)

mentén koncentrálódnak. A **9. ábrá**n a következő konfiguráció deformált alakja, a **10. ábrá**n pedig a feszültségeloszlása látható: támaszszélesség (l_{sb}) 40 mm, konzol hossza (l_{end}) 0 mm.

4.2. Hosszú konzolok

Hosszú szabad végeknél a szélső támasz által átadott koncentrált teher hatása lokálissá válik. A szelvény vége nem deformálódik, a lemez hasonlóan viselkedik, mint a mezőben alkalmazott tehernél.

A **11. ábra** a 80 mm hosszú konzollal rendelkező PCB80 idom deformációit és feszültségeloszlásait mutatja csavarral és csavar nélkül. A lemez viselkedése a két esetben hasonló. Észrevehető, hogy a rögzített esetben a feszültségeloszlás szimmetrikusabb a támaszra nézve.

4.3. Rögzítés hatása a beroppanási ellenállásra

Összehasonlítottuk a numerikus úton kapott erő-elmozdulás görbéket rögzített és szabadon fekvő végeknél, különböző konzolhosszakra. A rövid végeknél a rögzítés jelentősen befolyásolja a koncentrált erőkre való teherbírást. A hosszú konzoloknál a rögzítés hatása elhanyagolható.

Számszerűsítve az eredményeket (12. ábra), a rövid konzoloknál (AISI – EOF, EN – kategória 1) a lemez csavaros rögzítése 20–23%-kal növelte a beroppanási ellenállást, ami megfelel az AISI S100-16 szerinti különbségnek. A hosszú végeknél (AISI – IOF, EN – kategória 2), az amerikai szabványnak megfelelően, a rögzítésnek nincs számottevő hatása. (1. táblázat)



 ábra. Feszültségeloszlás a hosszú, szabad végeknél, rögzítés nélkül (fent), rögzítéssel (lent)



12. ábra. Numerikusan kapott erő–elmozdulás görbék növekvő konzolhosszakra rögzítve és rögzítés nélkül

1. táblázat. Beroppanási ellenállás változása a rögzítés hatására változó konzolhosszakra

l _{end}	R _{w.Rd} rögzítés nélkül [N]	R _{w.Rd} rögzített véggel [N]	Rögzítés hatása [%]
0	1360	1672.7	22.99
20	1747.9	2104.7	20.41
40	2105.6	2528.5	20.08
80	2479.3	2580.6	4.09
160	2489.6	2592.5	4.13

5. Következtetések

A trapézlemezek beroppanási ellenállásának pontos meghatározásához elengedhetetlen a valós támasz-paraméterek ismerete. A validált végeselemes modellek alapján a rövid szabad végekkel kialakított szélső támaszoknál a rögzítés jelentős mértékben befolyásolja a profil kapacitását, amit az amerikai szabvány figyelembe is vesz.

Az Eurokód nem tárgyalja a tanulmány során vizsgált paramétert, ezzel sok esetben alábecsülve a lemezek koncentrált erőhatás alatti teherbírását. A szerzők fontosnak tartják, hogy az európai tervezőmérnökök tisztában legyenek a megfelelő támaszok kialakításának a fontosságával.

A jövőben javasolni fogjuk az Eurokód szabvány vonatkozó fejezetének a felülvizsgálatát, figyelembe véve a rögzítés hatását a vékonyfalú, többgerincű acélidomok beroppanási ellenállására.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás a Sapientia Hungariae Alapítvány Collegium Talentum ösztöndíjprogramja és az Eötvös Loránd Tudományegyetem Márton Áron Szakkollégium Műszaki Műhelyének támogatásával készült, amiért a szerzők köszönetet mondanak.

Szakirodalmi hivatkozások

- Winter G., Pian R. H. J.: Crushing Strength of Thin Steel Webs. Engineering Experiment Station Bulletin, 35/1. (1946) New York, USA.
- [2] LaBoube R., Schuster R.: Standard Test Method for Determining the Web Crippling Strength of Colf-Formed Steel Members. Research Report RP02-6, American Iron Steel Institute, USA, 2002.
- [3] AISI S909-17: Test Standard for Determining the Web Crippling Strength of Colf-formed Steel Flexural Members, 2017.

- [4] Macdonald M., Heiyantuduwa M. A., Harrison D. K., Bailey R., Rhodes J.: *Literature Review of Web Crippling Behavior*. Proceedings of the 2nd Scottish Conference for Postgraduate Researchers of the Built and Natural Environment (PRoBE), 2005, Rotterdam, Netherlands, 473–482.
- [5] AISI S100-16: North American Specifications for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, 2016.
- [6] Dwivedi R., Vyavahare A.Y.: Review: Web Crippling Behavior of Cold-Formed Beam Sections. Structures, 33. (2021) 4629–4641. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.042
- [7] EN 1993 1-3: Design of Steel Structures Part 1-3: General Rules – Supplementary Rules for Cold-Formed Members and Sheeting, 2006.
- [8] Misiek T., Belica A.: Calibration of European Web-Crippling Equations for Cold-Formed C-and Z-Sections. Steel Construction, Design and Research, 12/1. (2019) 31–43. https://doi.org/10.1002/stco.201800006
- [9] GRISPE WP1: Background Guidance for EN-1993-1-3 to Design of Sheeting with Embossments and Indentations, 2015.
- [10] GRISPE: Test Report of Steel Trapezoidal Sheeting with and without Embossments and Outward Stiffeners, Annex, 2015.
- [11] Nagy Ö.: Influence of End Support Configuration on Web Crippling Resistance of Trapezoidal Profiles. MS thesis, Technical University of Cluj-Napoca, 2021, Cluj-Napoca, Romania.
- [12] Sánduly A.: Web Crippling in Deep Trapezoidal Sheeting. MS thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2020, Barcelona, Spain.
- [13] Ádány S., Kachichian M., Kövesdi B., Dunai L.: Experimental Studies on Deep Trapezoidal Sheeting with Perforated Webs. Journal of Structural Engineering, 139/5. (2013) 729–739. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000593