

A burkolatok rejtett szerkezeti szerepe acélszerkezetű épületek esetén

The hidden structural role of cladding in steel-framed buildings

dr. NAGY Zsolt^{1,2}, egyetemi tanár, okl. építőmérnök, LŐRINCZ Barnabás-Attila^{1,2}, doktorandusz, okl. építőmérnök, RÁCZ Sára¹, okl. építőmérnök, dr. KELEMEN Andrea^{1,2}, okl. építőmérnök

¹Kolozsvári Műszaki Egyetem, Unió utca, 28 sz., 400114 Kolozsvár, Románia, zsolt.nagy@dst.utcluj.ro, European University of Technology, European Union, www.constructii.utcluj

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

Abstract

Our article examines the hidden structural role of cladding systems in steel-framed buildings. The focus of the research is on the stiffness and stabilization effects of claddings made of trapezoidal sheets and sandwich panels, with particular attention to their diaphragm effect and interaction with the load-bearing steel frame. The aim of the research is to explore the extent to which cladding systems contribute to the global structural behavior of the building, and to what extent these effects appear in modern design practice and calculation models. The research is based on a literature review, a standard background study, performed experiments and numerical modeling.

Keywords: stressed skin action, diaphragm behavior of the cladding, structure-cladding interaction

Kivonat

Cikkünk az acélszerkezetű épületek burkolati rendszereinek rejtett szerkezeti szerepét vizsgálja. A kutatás középpontjában a trapézlemezekből és szendvicspanelekből álló burkolatok merevségi és stabilizáló hatása áll, különös tekintettel azok tárcsahatására és a teherhordó acélvázalakkal kialakuló kölcsönhatásra. A kutatás célja annak feltárása, hogy a burkolati rendszerek milyen mértékben járulnak hozzá az épület globális szerkezeti viselkedéséhez, illetve, hogy ezen hatások mennyiben jelennek meg a korszerű tervezési gyakorlatban és a számítási modellekben. A kutatás szakirodalmi elemzésre, szabványi háttérvizsgálatra, elvégzett kísérletekre és numerikus modellezésre épül.

Kulcsszavak: tárcsahatás, burkolatok tárcsahatása, szerkezet-burkolat kölcsönhatás

1. BEVEZETŐ

Az acélszerkezetű épületek tervezése során a teherhordó szerkezet és az épületburkolat hagyományosan különálló rendszerekként jelenik meg. A tartószerkezeti tervezés elsődlegesen az acél vázszerkezet teherviselésére, stabilitására és merevségére koncentrálnak, míg a burkolati elemeket sok esetben csupán épületfizikai és esztétikai funkcióval rendelkező réteggként kezelik. A valós szerkezeti működés azonban ennél lényegesen összetettebb. Az ipari csarnokok, logisztikai központok és könnyűszerkezetes épületek esetében a burkolati rendszerek — különösen a trapézlemezek, szendvicspanelek és homlokzati burkolatok — jelentős hatással lehetnek az épület globális viselkedésére. A burkolat képes részt venni a vízszintes erők továbbításában, hozzájárulhat a szerkezet síkbeli merevségéhez, valamint stabilizáló hatást fejthet ki az acél főtartók és másodlagos elemek működésére. Ezen kölcsönhatás különösen fontos nagy fesztávú és magas acélszerkezetek esetén, ahol a stabilitási problémák, az alakváltozások és a dinamikai hatások meghatározó szerepet játszanak. A burkolat és a tartószerkezet kapcsolata ugyanakkor sok esetben implicit módon jelenik meg: a valóságban a rendszer együtt dolgozik, miközben a számítási modellek ezt gyakran egyáltalán, vagy csak korlátozottan veszik figyelembe. A korszerű könnyűszerkezetes építés fejlődésével a burkolatok szerepe egyre összetettebbé vált. A vékonyfalú acéllemezekből és szendvicspanelekből álló rendszerek nemcsak burkoló másodlagos szerkezetként működnek, hanem bizonyos esetekben aktívan hozzájárulnak az épület stabilitásához és merevségéhez is. Ez különösen jelentős ott, ahol a gazdaságosság és az anyagtakarékosság miatt a szerkezetek egyre karcsúbbá válnak. A kutatásunk célja annak vizsgálata, hogy az épületburkolatok milyen módon járulnak hozzá az acélszerkezetű épületek szerkezeti viselkedéséhez, különös tekintettel a

merevségi, stabilitási és tárcsahatásokra. A kutatás továbbá arra is keresi a választ, hogy a burkolati rendszerek szerkezeti hozzájárulása miként jelenik meg a korszerű tervezési gyakorlatban, illetve milyen kihívásokat jelent a modellezés és a méretezés során.

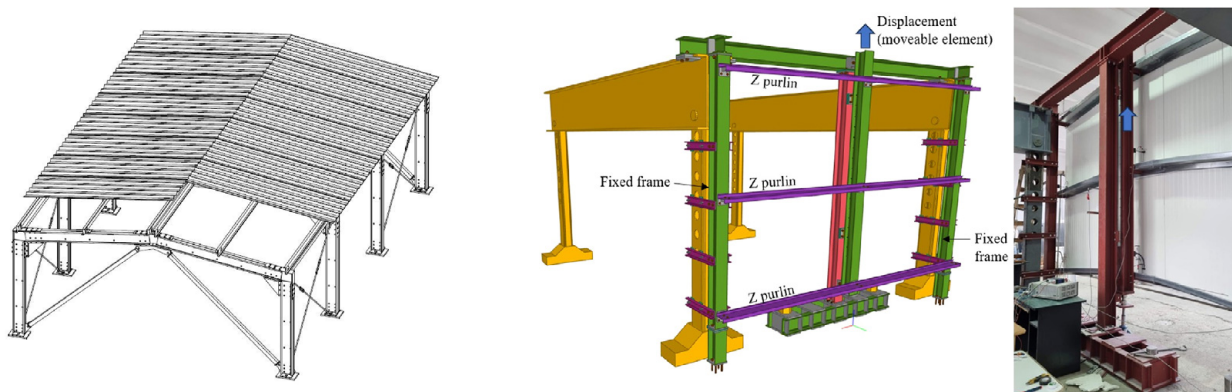
2. KÍSÉRLETI ÉS NUMERIKUS TANULMÁNYOK

A jelenlegi tervezési gyakorlatban a burkolati rendszer hatását szinte minden esetben figyelmen kívül hagyja a szerkezet tervező mérnök. Ennek oka egyrészt az, hogy a mérsékelt összetett szerkezetek esetében az analitikus értékelési módszerek alkalmazása nehézkes, másrészt pedig az, hogy ezek a módszerek nehezen integrálhatók numerikus számítási megközelítésekbe. Ezzel a tervező csökkenti a mérnöki számításokra szánt időt, és azt feltételezi, hogy az egyszerűsítés a biztonság javára van. Az így kapott szerkezeti válasz azonban leegyszerűsített, és nem tükrözi a szerkezet valós viselkedését.

A valóságban a burkolati rendszer stabilizálja a szerkezetet, valamint csökkenti a vízszintes elmozdulásokat. A legtöbb tervező által modellezett szerkezeti konfiguráció valójában csak abban az esetben lenne érvényes, ha a burkolati rendszer károsodna, és síkjában már nem lenne képes igénybevételeket továbbítani. Ez egyben azt is jelentené, hogy a károsodás mértéke miatt a burkolat az elsődleges — vagyis a vízzáróság elleni védelmet biztosító szerepét sem tudná többé ellátni. A burkolatok merevítő hatásának meghatározása céljából kísérleti és numerikus vizsgálatokat végeztünk.

2.1. Kísérletek trapézlemez és szendvicspanel burkolatokon

A szendvics és trapézlemez burkolatok szerkezetre való hatásának vizsgálata céljából az 1-es ábrán látható 3D szerkezetből indultunk ki, amelynek a tető burkolatából kialakult tárcsáját használtuk kísérlet céljából. A vizsgált tetőszerkezeti részletet függőleges helyzetben illesztettük egy acél keretre, melynek középső gerendája egy gördülő csapágyon mozgatható. A vizsgált panel két darab, egyenként 2,5 méter széles mezőből álló, 3 méter hosszú, ahogyan az 1. ábrán bemutatott modellen és a valós kísérleti összeállításban is látható. Az alkalmazott elmozdulás irányát az 1. ábrán a kék nyíl jelöli. A függőleges elrendezést azért választottuk, hogy a kísérlet során a tárcsa mindkét oldala könnyen hozzáférhető legyen.

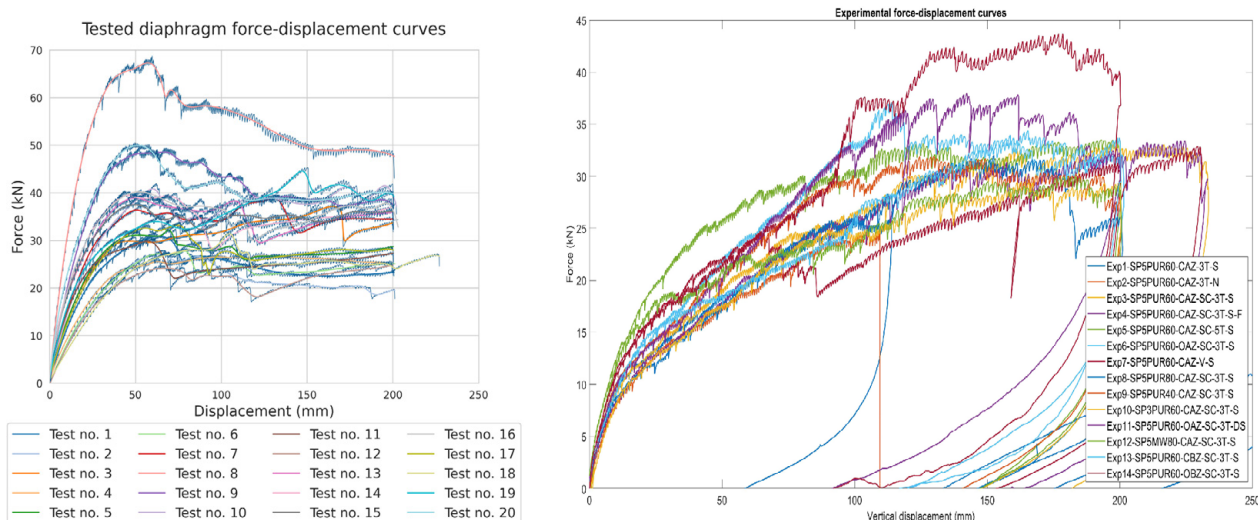


1. ábra – A 3D szerkezet konfigurációja (balra),
a kísérleti tetőpanel terve (középen) és megvalósítása (jobbra)

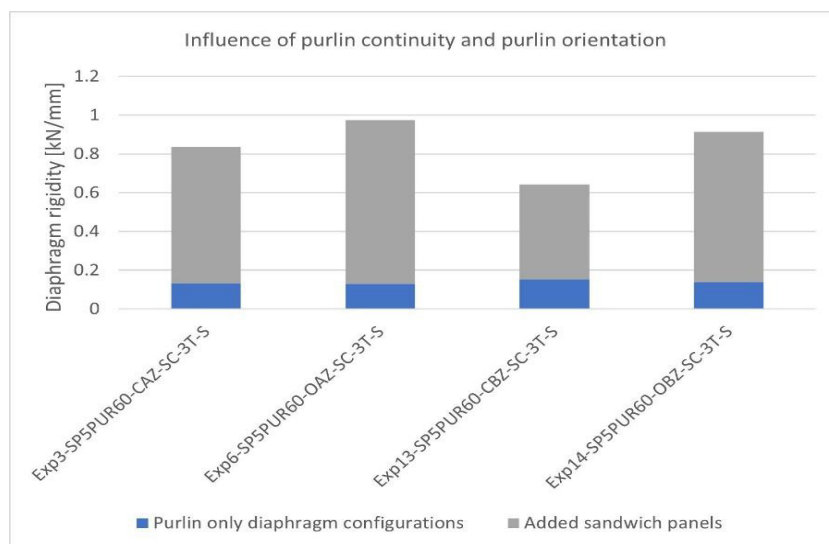
Szendvicspanelek esetén (14 kísérlet) kilenc specifikus kialakítási paraméter hatását vizsgáltuk a kísérletek során a tárcsamerevségére nézve. Az elemzett kialakítási paraméterek a következők voltak: a szendvicspanelek bordáinak száma, a peremrögzítés módja, a panel–szelemen kapcsolatok rögzítő elemei, a nyeregálatét (kaloda) alkalmazása a panel–szelemen kapcsolatoknál, a hosszanti illesztések rögzítő elemei, a szendvicspanelek vastagsága, a szelemenek folytonossága, a szelemen bakok orientációja, valamint a szendvicspanelek szigetelő anyagának típusa. Trapézlemezek esetén (20 kísérlet) valamennyi szerkezeti elemet — beleértve a szelemeneket, szelemen bakokat, trapézlemezeket és a rögzítő csavarokat — a jelenlegi építési gyakorlatban alkalmazott valós méreteikkel használtuk, geometriai méretarányosítás nélkül. A Z keresztmetszetű szelemenek névleges magassága 150 mm (Z150), illetve 200 mm (Z200) volt, névleges vastagságuk pedig 1,5 mm, 2,0 mm és 2,5 mm.

A kísérletek részletes leírása és értékelése az [1,2] referenciákban található. Egyszerűsített numerikus modellek kalibrálásának folyamata a [3] referenciában követhető lépésről lépésre. A 20 trapézlemez, valamint a 14 szendvicspaneles burkolat kísérletek erő-elmozdulás diagramjai a 2-es ábrán láthatóak. A

szendvics panel burkolatának hozzáadott merevítő hatását az 1-es ábrán látható vázszerkezet panelek nélküli és a panelekkel végzett összehasonlító mérései tükrözik a különböző kísérletekben (3-as ábra).



2. ábra – Trapézlemez (bal) és szendvics paneles (jobb) burkolatok erő-elmozdulás diagramjai



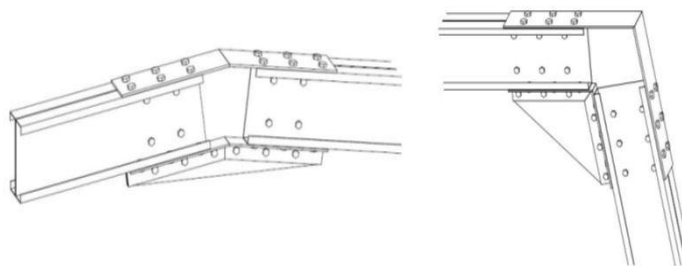
3. ábra – Vázszerkezet szendvics panelek nélküli (kék) és a panelekkel mért összmerevsége (szürke)

2.2. Numerikus vizsgálatok a rejtett burkolati hatás számszerűsítésére: esettanulmány

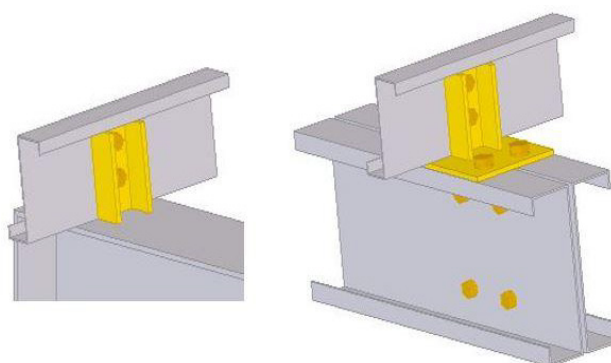
Az esettanulmány a referencia-modellen végzett numerikus analízisen alapul, amely egy ipari csarnok jellegű épületből áll. A vázszerkezet vékonyfalú, kettőzött $2 \times C250/3$ oszlopokból és tartókból van kialakítva, hasonlóan a [3]-ban vizsgált esettanulmány szerkezetéhez. A keret fesztávolsága 6 m, és három darab, egyenként 3 m-es mezőből áll, így a teljes hossza 9 m. A szerkezet hosszirányú keretei között elhelyezett rugalmas szélrácsok $\varnothing 20$ -as vonórudakból készültek, míg az oromkeretknél, valamint a gerinc- és keretsarok mentén alkalmazott merev szélrácsok és támasztó rudak SHS80 \times 4 méretű zártszelvényekből készültek. Az oszlopok alappal való kapcsolata csuklós. A valósághűbb modellezés érdekében az eresz- és gerinc-csomópontok félmerev viselkedését is figyelembe vettük az elemzés során: a gerinc-csomópont merevségét 2948 kNm/rad, az ereszcsoomópontot pedig 2062 kNm/rad merevséggel modelleztük [4]. Az alkalmazott csomóponti kialakítások a 4. ábrán láthatóak. A Z150/2 szelemeneket UPN65 profilok segítségével rögzítettük a keretgerendákhoz; ezek a kapcsolóelemek 2 darab M12, 8.8 szilárdsági osztályú csavarral kapcsolódtak a szelemenekhez, ahogyan az a 5. ábrán is látható.

A keresztirányú keretek oldalirányú elmozdulásait négy különböző szerkezeti modell esetében vizsgáltuk: (a) Egyszerű szerkezet: referencia-modell burkolat és rugalmas tetősíkbeli szélrácsok nélkül (6a. ábra); (b) Merevített szerkezet: referencia-modell burkolat nélkül, $\varnothing 20$ -as rudakból kialakított rugalmas

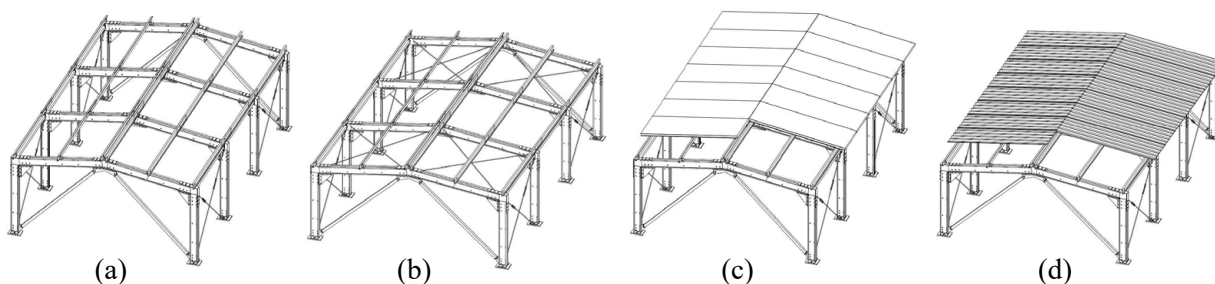
tetősíkbeli szélrácsokkal (6b. ábra); (c) Szendvicspaneles tetőburkolattal ellátott szerkezet: referencia-modell szendvicspaneles tetőburkolattal (TeraSteel ISOAC5MW – ásványgyapot 60 mm szigetelés vastagsággal), Z150/2 szelemenekre helyezve (6c. ábra); (d) Trapézlemezes tetőburkolattal ellátott szerkezet: referencia-modell trapézlemezes tetőburkolattal (Lindab LTP45 – 0,6 mm vastagsággal), Z150/2 szelemenekre helyezve (6d. ábra).



4. ábra – Alkalmazott (félmercv) gerinc és ereszcsonóparti kialakítások



5. ábra – Szelemenek rögzítésének részlete a keretgerendához



6. ábra – A vizsgált szerkezetek

Mind a négy szerkezetre azonos terhelést alkalmaztunk, amely a szokásos építési terhek: önsúly, hóteher és szélteher, a terheket pedig az Eurocode 0 által ajánlott biztonsági tényezőkkel szoroztuk fel. A tetőfelületre csak hóteher vettünk figyelembe. A vizsgált teheresetek a következők voltak:

- (P) A burkolat önsúlya: 0,25 kN/m²
- (S) Karakterisztikus hóteher: 1,5 kN/m²
- (W) Referencia szélteher: 0,4 kN/m²

Az egyszerűség kedvéért csak egyetlen teherkombinációt használtunk az összehasonlításhoz: 1.35P+1.05S+1.5W.

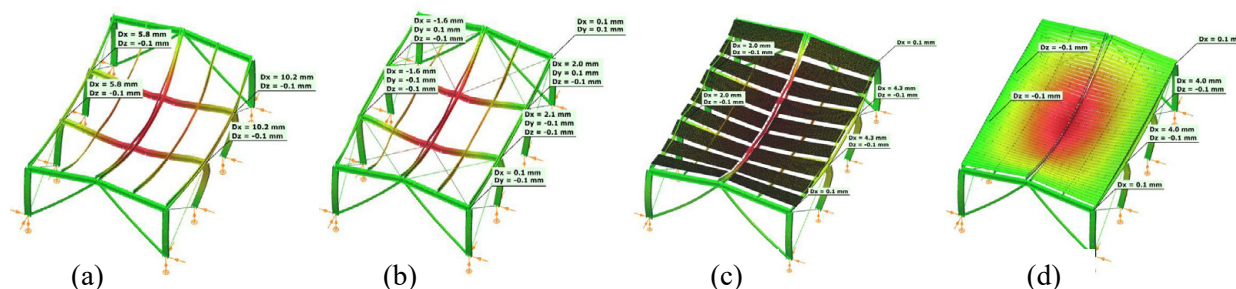
Deformációk számszerűsítése az elemzett keretszerkezeteken

1. táblázat

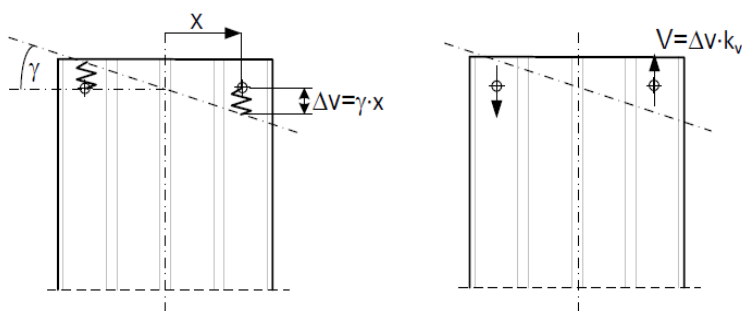
Szerkezeti modell	(a) szerkezet	(b) szerkezet	(c) szerkezet	(d) szerkezet
Max. elmozdulás	10.2 mm	2.1 mm	4.3 mm	4.0 mm

Az 1. táblázat a négy szerkezeti modellen elvégzett másodrendű analízis eredményeit mutatja be a maximális oldalirányú elmozdulások tekintetében, a fent definiált teherkombináció figyelembevételével. Az

alakváltozott szerkezetek a 7. ábrán láthatóak. Megfigyelhető, hogy a legnagyobb oldalirányú merevséget a Ø20-as rugalmas tetősíkbeli szélrácsokkal merevített szerkezet biztosítja. Ugyanakkor a két különböző burkolati típus is hasonló tendenciát mutat, mivel jelentősen csökkentik a belső keretek oldalirányú elmozdulását a referencia szerkezethez képest. Ez igazolja, hogy a burkolati rendszerek által biztosított hatás a tetősíkbeli szélrácsok működéséhez hasonló, de kevésbé merev, viszont hatékonyabban merevíti a szerkezetet, mivel minden tető szelemennek kapcsolódási pontja van a gerendához, ellentétesen a szélrács merevítésekhez képest, amelynek csak a végpontjai jelentenek kapcsolódási pontot. Szendvicspaneles burkolat esetén a szelemenek és a szendvicspanelek közötti kapcsolóelem teherbírását az [5] referencia segítségével határoztuk meg. Ennek alapján egy rögzítés kapacitása 1,18 kN lett, a maximális nyírási szög amelyet a 8. ábra szemléltet 1,17 mrad értékre állapítottuk meg, ennek megfelelően az oromkeret és a közbenső keret közötti maximálisan megengedhető relatív alakváltozás 3,5 mm lehet.



7. ábra – Deformációk az elemzett kereteken



8. ábra – Deformáció és erők számolása a rögzítő elemekben [5] alapján

Ez az alakváltozási határ azt a pontot jelöli, ahol a szendvicspanel tárcsaként már nem lineárisan viselkedik. Annak biztosítása érdekében, hogy a burkolati rendszer kezdeti merevsége használat közben ne csökkenjen, ezt az elmozdulási határt nem szabadna túllépni. Ezt az értéket összehasonlítva az oromfali- és közbenső keretek közötti relatív alakváltozással – amelyet rugalmas másodrendű analízissel határoztunk meg – megállapítható, hogy a vizsgált tervezési teherkombináció esetén a határértéket túllépték (4,2 mm a megengedett 3,5 mm helyett). Így feltételezhető, hogy a szendvicspanel belső acéllemezének tönkremenetele a 3,5 mm-es relatív alakváltozás határán következik be, és a szerkezeti deformációk ezt követően a szendvicspanel-tárcsa merevségének csökkenése miatt gyorsabban növekednek. A szendvicspanel-tárcsa merevségcsökkenésének figyelembevételéhez a szerkezeti számítások során rugalmas-ideálisan képlékeny merevségi modellt kellene alkalmazni.

Trapézlemez tárcsa esetén a nyírási teherbírását az ECCS ajánlásai [6] alapján határoztuk meg, amelynek eredménye $V_{ult}=7,171$ kN. Kísérleti eredmények alapján látható, hogy szendvicspanel burkolatok esetén a nemlineáris viselkedés már 10 mm-t meghaladó deformációnál elkezdődik, míg ez a trapézlemez burkolatok esetén csak 20 mm deformáció fölött történik meg.

3. ÖSSZEGZÉS ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

Az FprEN 1993-1-3: 2023 [7] szerint a burkolatok szerkezeti osztályozása: 4.2. (6)-os bekezdés, az I. szerkezeti osztály esetén a szerkezet tervezője feltételezi, hogy a szerkezet merevítését a lemezburkolat biztosítja. A II. szerkezeti osztály esetén a lemezburkolatot vagy szendvicspaneleket közvetlenül alátámasztó szerkezeti elemek tervezője feltételezi, hogy ezek az elemek megtámasztást biztosítanak a globális kihajlással

vagy a lemezburkolat, illetve szendvicspanel síkjával párhuzamos hajlítással szemben. A III. szerkezeti osztály szerint a lemezburkolatot vagy szendvicspaneleket közvetlenül alátámasztó szerkezeti elemek tervezője feltételezi, hogy ezek az elemek nem biztosítanak megtámasztást a globális kihajlítással vagy a lemezburkolat, illetve szendvicspanel síkjával párhuzamos hajlítással szemben.

A bemutatott szerkezetek analízisei igazolják, hogy önmagában a burkolatok jelenlétének szerkezet-merevítő hatása van, függetlenül attól, hogy a tervező tudomást vesz vagy sem erről a hatásról. Eszerint, azon feltételezés, hogy a III. szerkezeti osztályba sorolt burkolat nem biztosít megtámasztást, veszélyeket rejteget a burkolatra nézve, ha nem váltja ezeket ki egy kellő merevségű szélrács merevítő rendszer, főként szendvicspanel használata esetén, mert ennek a burkolatnak a deformációs tartománya sokkal szűkebb, mint a trapézlemezes burkolatoké. A referencia szerkezeten végzett analízisek azt mutatják, hogy a két kiválasztott tárcsatípus és konfiguráció közül a trapézlemezes tárcsa nagyobb stabilizáló hatást és nagyobb nyírási teherbírást biztosít, mint a szendvicspanelből kialakított tárcsa. Meg kell jegyezni, hogy a vizsgált terhek hatására a szendvicspanel-tárcsa túllépte az analitikus módon meghatározott nyírási teherbírást, ami azt jelenti, hogy a szendvicspanel merevsége a tervezési terhek hatására csökken, nemlineáris viselkedése folytán. Továbbá ezen pont után a szendvicspanel viselkedése már nem tekinthető lineárisnak, és a rögzítő csavarok környezetében a belső acéllemez tönkremenetele is bekövetkezhet.

A tervezési terhek hatására az ilyen szendvicspanel-tárcsák viselkedése tehát nem lineáris. Lineárisan rugalmas analízist alkalmazva, amennyiben az alakváltozási határt túllépjük, az alkalmazott modell a valós szerkezeti deformációkat alul becsülheti, mivel a számolás során állandó a tárcsamerevség. A helyes számítás érdekében a szendvicspaneles tetőburkolatokkal rendelkező modellek esetén bi-lineáris viselkedést ajánlott figyelembe venni.

A két alkalmazott szerkezeti modell eredményei nem általánosíthatóak, mivel a tárcsamerevség változhat – amint a végzett kísérletek is mutatják, a felhasznált rögzítő elemek számának növelése vagy a rögzítő elemek típusának megváltoztatása esetén. Fontos megjegyezni, hogy burkolatok szerkezeti osztályozása nem végezhető tetszőlegesen, hanem egy tudatos döntési folyamat eredményeként kell a besorolást elvégezni. A burkolatok viselkedésének mélyebb megértése érdekében a kutatás az elvégzett laboratóriumi vizsgálatok feldolgozásával és parametrikus elemzésekkel folytatódik.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Andrea Renáta Kelemen , Zsolt Nagy , Barnabás-Attila Lőrincz , *Experimental testing of stressed skin effect of sandwich panel roof diaphragms – Test result evaluation considering diaphragm rigidity*, Journal of Structures, 80 (2025) 110073, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.110073>
- [2] Barnabás-Attila Lőrincz, Zsolt Nagy, Andrea Renáta Kelemen, Szabolcs-Botond Lőrincz-Molnár, *Two-side fastened trapezoidal sheet diaphragms: investigation of the diaphragm to rafterconnection*, Journal of Constructional Steel Research (under review)
- [3] Zsolt Nagy, Andrea Renáta Kelemen, Gelu Zaharia, Béla Bács, *Comparative study between stressed skin effect of trapezoidal sheet and sandwich panel roof cladding*, ce/papers. 4. 423-431. 10.1002/cepa.1312
- [4] Nagy, Zs.; Muresan, A.; Fodor, R. (2019) *Experimental investigations for joints made by cold-formed sigma profiles*. 18th International Conference Modern Technologies for the Third Millennium, ISBN 978-88-87729-61-0, S. 247–252
- [5] Käßlein, S.; Misiek, T. (2011) EASIE project - Report no. D3.3 – part 2: In-plane shear resistance of sandwich Panels. Karlsruhe: *Ensuring Advancement in Sandwich Construction Through Innovation and Exploitation*.
- [6] ECCS Technical Working Group 7.5. (1995) *European Recommendations for the Application of Metal Sheeting acting as a Diaphragm – Stressed Skin Design*. European Convention for Constructional Steelwork
- [7] European Committee for Standardization. FprEN 1993-1-3. Design of steel structures – Part 1-3: General rules and rules - *Supplementary rules for cold-formed members and sheeting*. 2023.