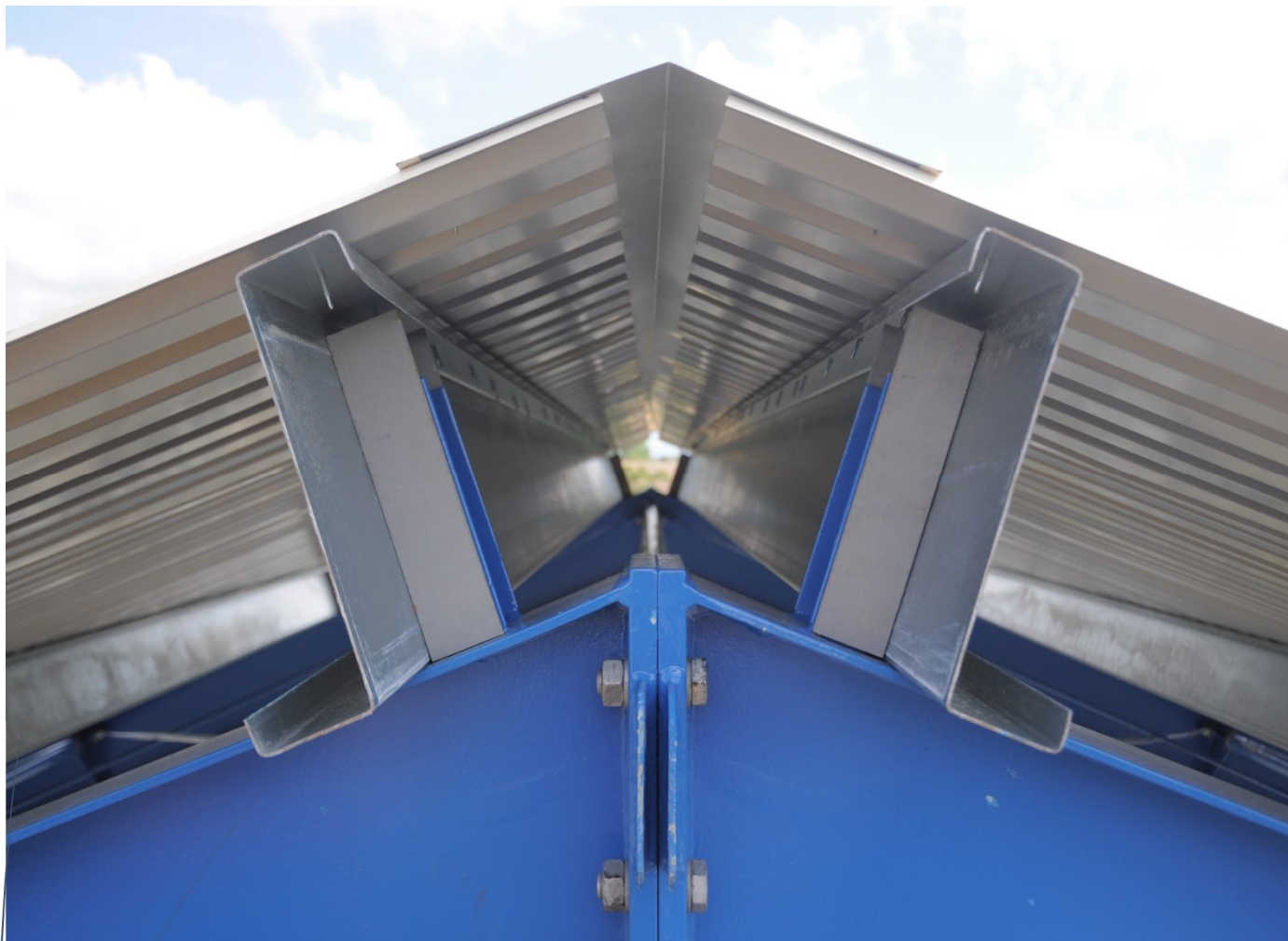




Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Építőmérnöki Kar



Acélcsarnokok trapézlemez burkolatának merevítő hatása

Tudományos Diákköri Konferencia 2014.

Készítette: Kenéz Ágnes, Rácz Annamária, BSc

Konzulensek: Dr. Dunai László, Egyetemi tanár

Dr. Joó Attila, Egyetemi docens

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3. oldal
1.1. Probléma bemutatása.....	3. oldal
1.1.1. A diafragma hatás	3. oldal
1.2. Célkitűzések.....	4. oldal
1.3. Kutatási módszer.....	4. oldal
2. Szakirodalmi áttekintés	5. oldal
2.1. Együttműködő burkolat figyelembevétele	5. oldal
2.1.1. Diafragma hatás alkalmazhatósága.....	6. oldal
2.2. Kialakítási lehetőségek.....	7. oldal
2.3. Merevség, keret és diafragma kölcsönhatása	12. oldal
2.4. Tönkremeneteli módok	14. oldal
2.5. Az irodalomkutatás konklúziója	16. oldal
3. Mérések, eredményeink.....	17. oldal
3.1. Kísérleti elrendezés	17. oldal
3.2. Szerkezeti konfigurációk.....	18. oldal
3.3. Mért és számított eredmények	21. oldal
4. Eredmények kiértékelése.....	24. oldal
4.1. Nyírási merevség a méréseink szerint	24. oldal
4.1.1. Trapézlemez hatása a merevségre.....	24. oldal
4.1.1.1. Külső trapézlemez hatása.....	24. oldal
4.1.1.2. Belső trapézlemez hatása	24. oldal
4.1.2. Merevségváltozás a trapézlemez méret hatására	25. oldal
4.1.3. Merevségváltozás a szelemen méret hatására	26. oldal
4.1.4. Csavarmennyiség merevítő hatása	27. oldal
4.1.5. Szerkezeti elemek hozzáadott merevsége	28. oldal
4.2. Nyírási merevség az Eurocode szerint	30. oldal

4.3. A kísérleti és a szabványos értékek közötti különbségek kiértékelése	32. oldal
4.3.1. A kísérleti és a számítási eredmények különbsége	32. oldal
4.3.2. Burkolat deformációjából adódó légyság vizsgálata	34. oldal
4.3.3. Szelemen merevségét figyelembe vevő új tag.....	37. oldal
4.3.4. Tető hajlásszögének figyelembe vétele.....	39. oldal
4.3.5. Szelemen merevségét figyelembe vevő tag módosítása	41. oldal
4.3.6. Külpontosság figyelembe vétele	43. oldal
4.3.7. Teljes csarnok légysága külső burkolat alkalmazása esetén...	45. oldal
4.3.8. Belső és külső burkolatot tartalmazó kialakítás esete.....	46. oldal
5. Összefoglalás	47. oldal
Köszönetnyilvánítás	50. oldal
6. Szakirodalmi hivatkozások.....	51. oldal

1. Bevezetés

1.1. Probléma bemutatása

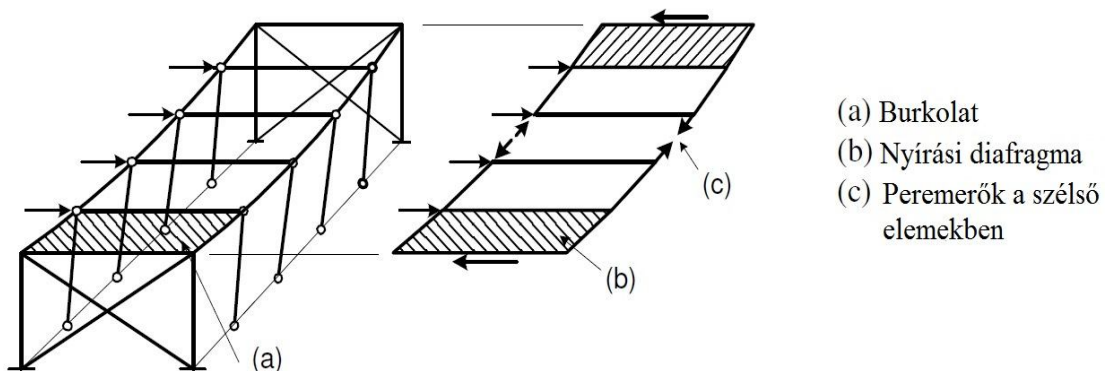
Acél csarnokok tervezése során hagyományosan csak az oszlopokat, gerendákat, merevítő rudakat, illetve hosszkötéseket, szélrácsokat tekintették a vízszintes terhek felvételére képes szerkezeti elemeknek. Általában külső, és sok esetben belső burkolatot is alkalmaztak a szerkezetekben, azonban ezeknek az elemeknek a síkjukban való merevségeit elhanyagolták, csak a függőleges irányú önsúly- és hóteherre, illetve szélteherre méretezték őket. Számos kutatásnak köszönhetően idővel nyilvánvalóvá vált, hogy a burkolat is merevíti a csarnokot, amelynek figyelembevétele gazdaságosabb tervezést, elhanyagolása egyes esetekben – pl. szeizmikus méretezés – a biztonság kárára történhet. A burkolat e viselkedését nevezzük diafragma hatásnak.

Az Eurocode [10] már tartalmazza az acél trapézlemez burkolat merevítő hatását figyelembevevő számítási eljárást. Azonban az újabb kutatási eredmények azt mutatják, hogy a formula további pontosítást igényel.

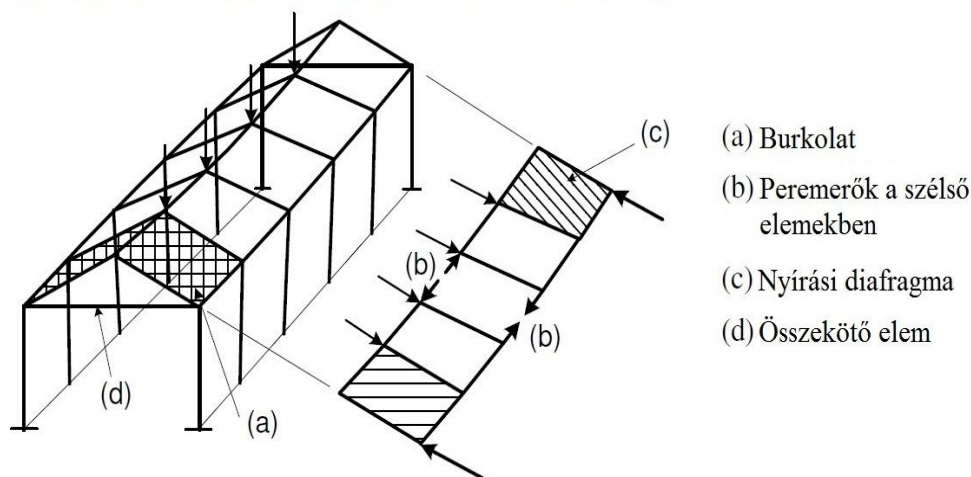
1.1.1. A diafragma hatás

A tetőburkolat egy lapostetős épület esetében, amelyet vízszintes erők terhelnek, úgy viselkedik, mint egy magas gerincű gerenda (1. ábra). Ebben a „gerendában” a szélső elemek tekinthetők a gerenda övének, amelyek felveszik a normál igénybevételt, a húzó- és nyomóerőket (1/c ábra), maga a burkolat pedig a nyírást. A magastető esetében a tető a lejtése miatt képes részt venni a vízszintes és a függőleges terhek hordásában is (2. ábra).

A tető, a falak és a földem igen hatásos együtt dolgozó diafragma. Ha a fedés megfelelően van leeresztve, akkor nagyon megbízható, ezért használható, méretezhető szerkezeti elemként. Az együttdolgozó diafragma hatásossága teljes léptékű kísérletekkel és használatban lévő épületeken keresztül is bizonyított.



1. ábra Diafragma hatás lapostetős épületeknél [2]



2. ábra Diafragma hatás magastetős épületeknél [2]

Ha figyelmen kívül hagyjuk a diafragma hatást, az épület tervezett viselkedése lehet, hogy nem a valós viselkedést mutatja. Ennek következtében a burkolat túlterheltté válhat, mivel nagyobb a valódi merevsége a figyelembe vetténél. Ezáltal nem tervezett nyírási terheket vonz magához. Kézenfekvő tehát, hogy a pontos erőjáték tervezéséhez, illetve meghatározásához szükséges tudni a burkolat merevítő hatásának mértékét.

1.2. Célkitűzések

Céljaink:

- a Hidak és Szerkezetek Tanszék által végzett korábbi kísérletek alapján megállapítani, hogy egyes esetekben mekkora merevítő hatása van a burkolatnak, illetve ebből következően a tervezés során hogyan és milyen mértékben vehetjük ezt figyelembe;
- továbbá megállapítani, hogy a diafragmák figyelembe vétele helyettesítheti-e az összes hosszalkötést, illetve szélrácsot;
- megvizsgálni a jelenlegi számítási formulát, a figyelembevett tényezőket, meghatározni az esetleges pontatlanságokat. Ennek eredményeként pedig javaslatot adni a szabvány egyes pontjainak további pontosítására, kiegészítésére.

1.3. Kutatási módszer

A Hidak és Szerkezetek Tanszék által végrehajtott teljes léptékű helyszíni kísérletsorozatban vettünk részt, melynek keretében egy teniszcsarnok tartószerkezetének merevített mezőjéhez tartozó két keretállás épült fel. Ennek a mérésorozatnak az eredményeit használtuk fel TDK dolgozatunkban. Az Eurocode [10] ajánlása szerint számított nyírási merevségeket

összehasonlítottuk a mérési eredményeinkkel, és a mért eredmények alapján pontosítottuk azokat.

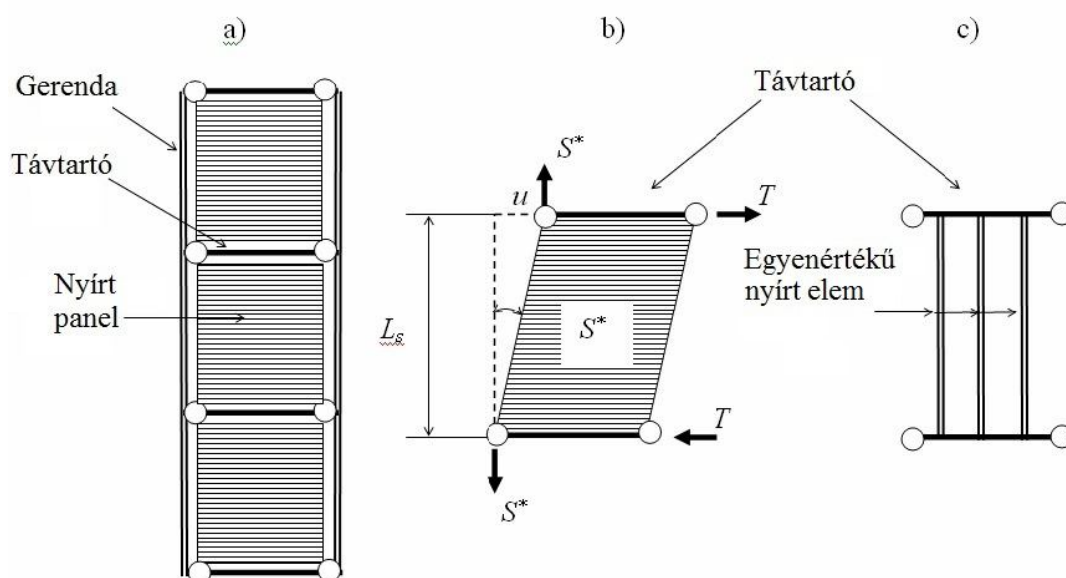
2. Szakirodalmi áttekintés

2.1. Együttdolgozó burkolat figyelembe vétele

A diafragma hatás érvényesül a tetőben, illetve a falban elhelyezett burkolatban is. Dolgozatunk során azonban csak a tetőben elhelyezett burkolatra vonatkozó ajánlásokkal foglalkozunk, ezért csak az ezzel összehasonlítható kísérleti eredményeket használtuk fel.

A burkolati rendszer diafragma hatása mérsékli az eltérő vízszintes terhelésű keretállások közti elmozdulás-különbségeket, tehát együttdolgoztatja azokat. Ezt szemlélteti a 3. ábra is: egyre egyszerűbb modellekkel mutatja be a burkolat hatását.

A későbbi fejezetekben látható kialakítási módoktól függően a burkolat nyíróerőt vesz fel, és ad át a szelemeneknek. Ezzel nagymértékben hozzájárul ahhoz, hogy a nyíróerő felvétele ne koncentráltan történjen.



3. ábra Trapézlemez diafragma hatásának egyszerűsített modellje a) trapézlemez helyettesítése nyírt panelekkel és távtartókkal b) nyírt panel merevsége c) egyenértékű rúd modell, egyenértékű nyírt elemekkel [3]

2.1.1. Diafragma hatás alkalmazhatósága

A diafragma hatást célszerű figyelembe venni, ha: [1]

- ezzel kiválhatunk végleges szélrácsokat,
- stabilizálni szeretnénk a szerkezetet kihajlás, térbeli elcsavarodó kihajlás, kifordulás, vagy ezek kombinációja ellen

A diafragmaként figyelembe vett burkolatnak meg kell felelni a következőknek: [1]

- acél profillemezből készüljön, továbbá elsődleges céljának megfelelően korlátozni kell az alakváltozását, hogy viselni tudja a síkjában ébredő igénybevételeket, elmozdulásokat,
- a burkolatot elsődlegesen az Eurocode 3 szerint meghatározott hajlításra kell méretezni, ezután kell ellenőrizni, hogy a legnagyobb nyírófeszültség nem haladja-e meg a folyáshatár 25%-át,
- a szerkezetre ható vízszintes (tetőn vagy födémlemezeken átadódó) erőket át kell tudni vezetni az alapokra a keretek sarokmerev kapcsolatai, a burkolat merevítő hatása vagy egyéb módszerek által,
- a szerkezeti kapcsolatoknak megfelelő szilárdságúnak és merevségűnek kell lennie, hogy kellő biztonsággal át tudja vezetni az erőket a fő teherviselő elemekre,
- a diafragmát biztosítani kell szélső elemekkel, amelyek (kapcsolataikkal együtt) képesek felvenni a diafragma hatás által ébredő peremerőket,
- a burkolatot az ajánlások szerint kell rögzíteni minden-, vagy minden második völgyben,
- a szomszédos trapézlemezek toldását az ajánlások szerint, és legfeljebb 500 mm távolságonként kell biztosítani.

A diafragma hatás kevésbé használható ki: [1]

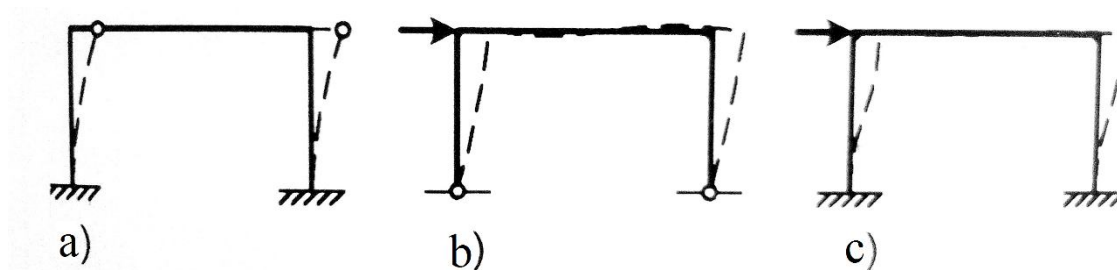
- összetett tetőszerkezeteknél, illetve ha nincs olyan szerkezet, ami közvetíti a terheket az alapozáshoz a falakon, hosszkötéseken és homlokzatokon keresztül,
- kedvezőtlen helyen lévő nagy nyílással rendelkező tetőknél, ahol nem különíthetők el diafragmák,
- falak és homlokzatok esetén, melyek lehet, hogy nem maradnak véglegesen az épület részei.

Az Európai Ajánlás [5] elsődlegesen acél burkolatok tetőben, födémekben és falban való alkalmazását érti diafragma alatt. A számítási eljárás főként trapézlemez burkolatot, kazettás

szerkezetet ajánl, de hullámlemez vagy akár homorú szögű profil burkolat is lehetséges. Egyéb típusú burkolatnál (pl. szendvicspaneleknél) is figyelembe vehető a diafragma hatás, azonban a nyíró szilárdságot és merevséget kísérleti eredményekkel alá kell támasztani. Továbbá, a méretezési eljárás 1,5 mm-nél nem vastagabb acél anyagú burkolatra vonatkozik (speciális számítási eljárást igényel, ha vastagabb lemezt vagy alumíniumot alkalmazunk).

2.2. Kialakítási lehetőségek

Svédországban leggyakrabban befogott oszlopokat alkalmaznak (4/a ábra). Ezzel szemben Magyarországon a csarnokokat gyakran sarokmerv keret kialakítással stabilizálják (4/b,c ábra) és csuklós alapozást alkalmaznak. Főleg kisebb épületeknél használják ezt a megoldást. Nagyobb méretű csarnokok esetében befogott oszloptalpakat alakítanak ki.

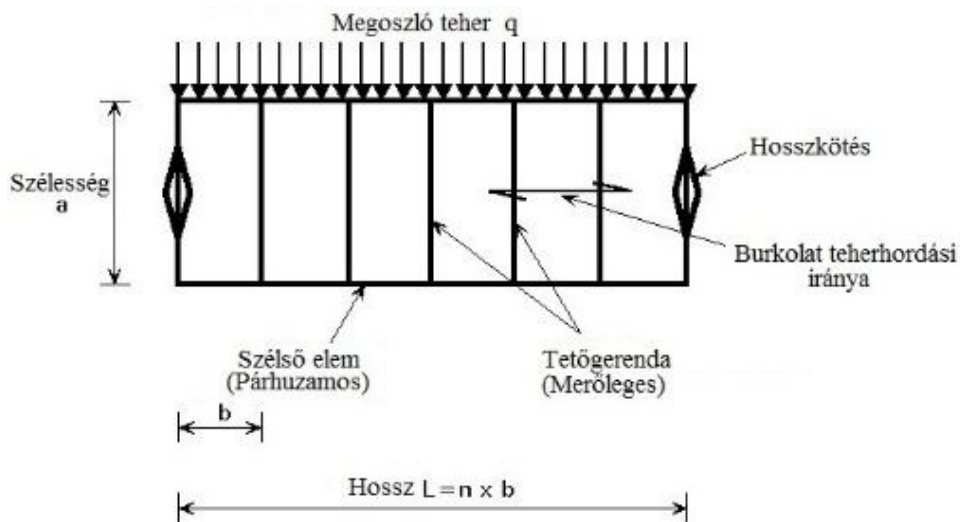


4. ábra Keretmervítés keretsíkban [1]

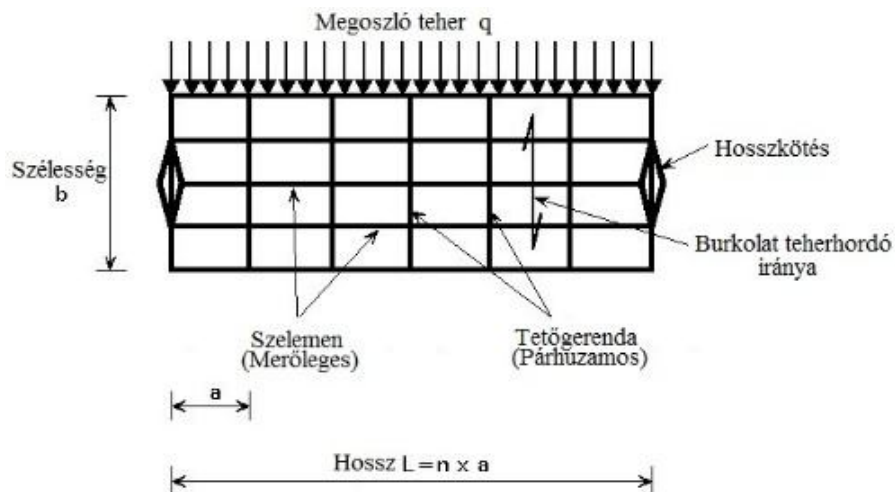
A keretsíkra merőleges vízszintes erők felvételére általában mervítő rendszer beépítése szükséges. Ennek egyik módja a szélrácsok és hosszkötések alkalmazása. Majd megfigyelték, hogy a burkolat is mervíti a csarnokot, de ennek számítása összetettebb, ezért csak nagyszámú kísérletek elvégzése által tudjuk ezt az eljárást – folyamatosan pontosítás mellett – alkalmazni.

A burkolat elhelyezése különböző módon történhet (szelemen, rögzítések, végleerősítések). Ez hatással van a merevségére is, különböző kialakításoknál különböző lehet a burkolat teherhordásának módja, iránya, ezért fontos ezeket meghatározni.

Az 5. ábrán látható, hogy szelemenek nélkül a diafragmák teherhordási iránya a keretsíkokra merőleges. A 6. ábrán lévő csarnokon szelemenek is elhelyezésre kerültek, melynek következtében a szelemenek közötti fesztávolság kisebb lesz, mint a keretállások közötti távolság, így ebben az irányban lesz teherhordó a burkolat.

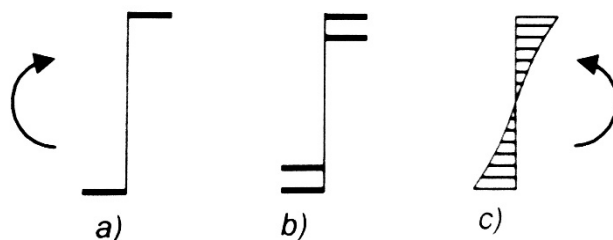


5. ábra Burkolat teherhordási iránya szelemen nélkül [1]



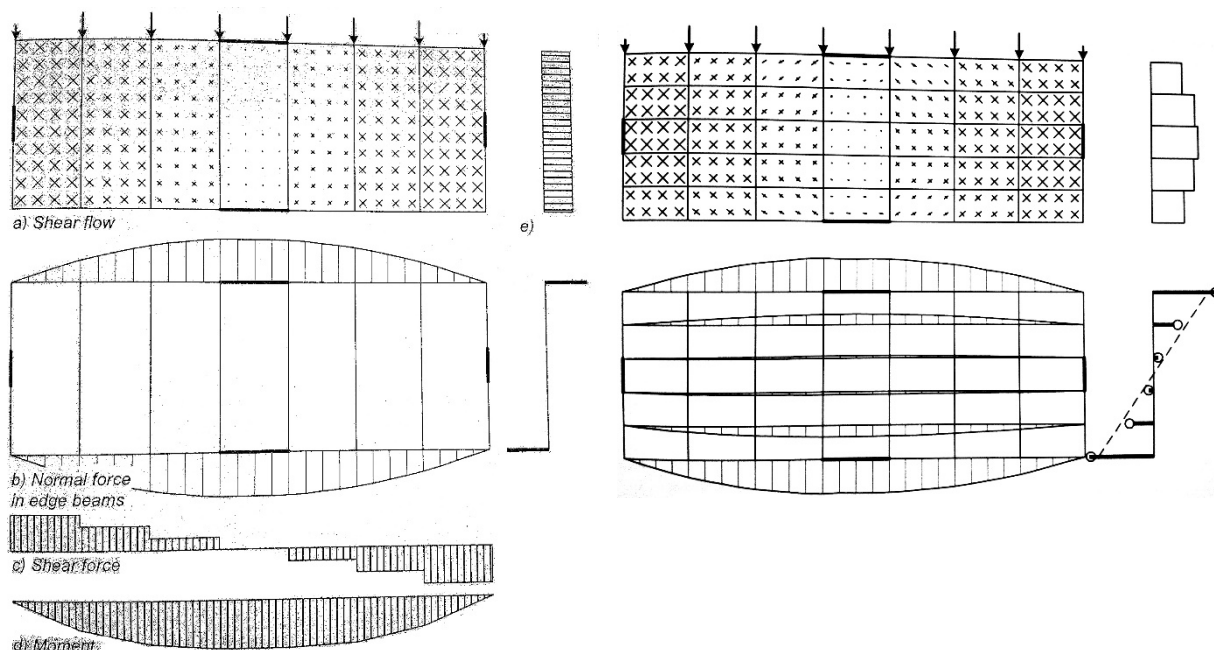
6. ábra Burkolat teherhordási iránya szelemenek alkalmazásával [1]

A szerkezetre ható nyomaték felvételében részt vevő elemekben ébredő erőt, illetve feszültség eloszlást mutatja a 7. ábra. Ez alapján megállapítható, hogy a burkolat diafragma hatása egy sokkal egyenletesebb erőátadást, igénybevétel-eloszlást tesz lehetővé. Az egyenletes erőátadást szelemenek alkalmazásával növelhetjük. Ez jól látszik a 8. ábrán, ahol a feszültség eloszlása látható az egész tetőben (felülnézet) oldalirányú teherre (pl. szélteher). Így nagyobb lesz a szerkezet teherbírása is (bár a külpontosság is nő).

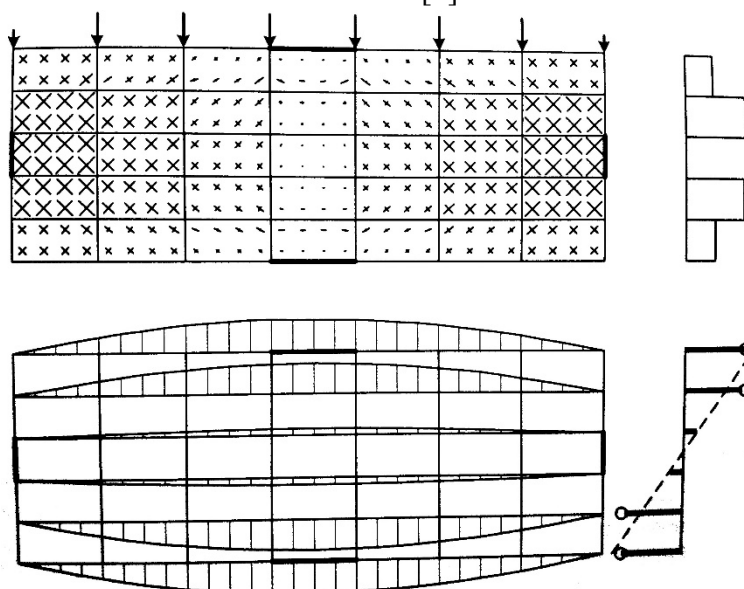


7. ábra Erő- és feszültségeloszlás peremgerenda (a), szelemen (b), illetve burkolat (c) alkalmazása esetén [1]

Merev végleerősítés esetén a feszültségek eloszlása nem egyenletes, a szélső szelemenekben nagyobb erő ébred, mint lineáris eloszlás feltételezésénél. (8. ábra). Ezt a nyírási deformációnál is figyelembe kell venni. Ha nincs merev végleerősítés a szélső két-két szelemen veszi fel többnyire a nyomatékot, így a két-két szelemenben közel azonos erő ébred (9. ábra).



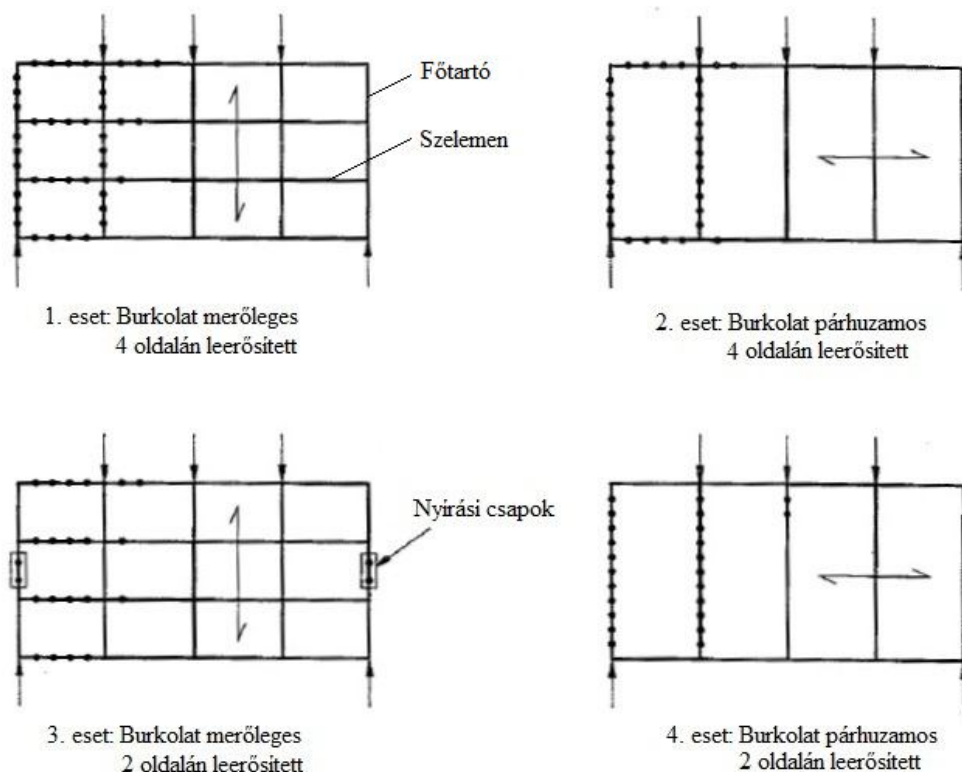
8. ábra Tetőgerendára (a), szelemenre (b) rögzített trapézlemez teher- illetve igénybevétel eloszlása [1]



9. ábra Gyenge szélső szelemenek [1]

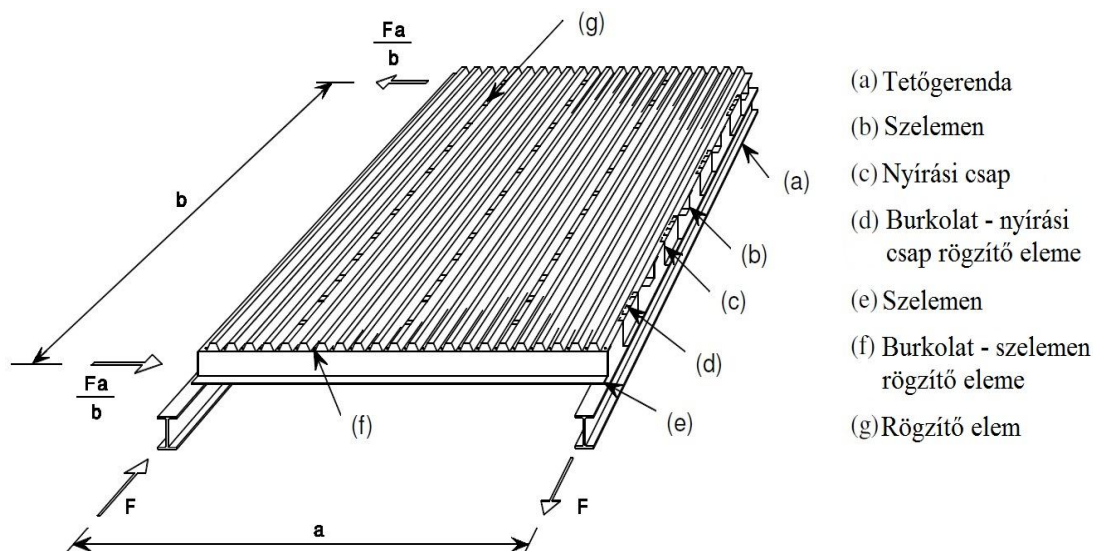
A burkolatok leerősítése több módon történhet: négy oldalon vagy két oldalon. A 10. ábra alapján az első és a második eset, ha a burkolat mind a négy oldalán le van erősítve (merőleges

/1./ és párhuzamos /2./ teherhordás esetén), a harmadik és a negyedik eset, ha a burkolat két oldalán van leerősítve és merőleges /3./ vagy párhuzamos /4./ a teherhordás.



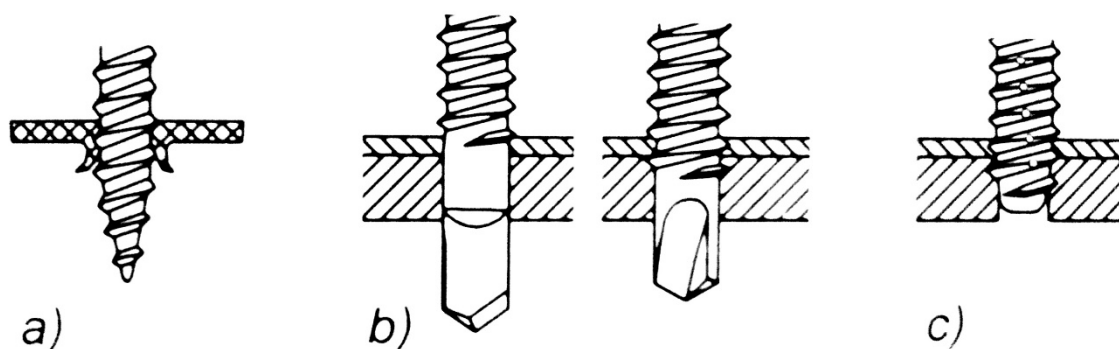
10. ábra Leerősítési lehetőségek [1]

A 11. ábrán a leggyakrabban alkalmazott burkolatot, egy trapézlemez panelt láthatunk. Az ábrán feltüntettük az egyes szerkezeti elemek megnevezését, elhelyezkedését. A nyírási csapokat közvetlenül a tetőgerendára rögzítik a szelemenek között, ezáltal egyenletesebben adódik át a nyíróerő a burkolatról a gerendára. A magasabb profilú elemek rugalmasabbak, mint az alacsonyabbak, ezért ezeknél nagyobb torzulás (kisebb merevségnövekedés) várható, főleg a szélek közelében [8].



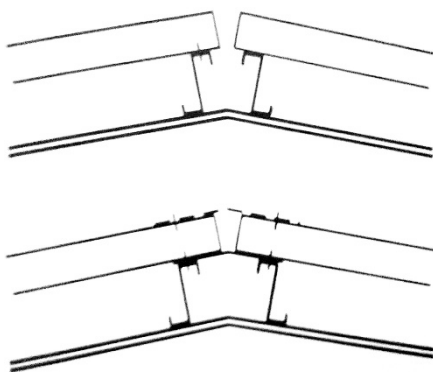
11. ábra Egy panel elrendezése [2]

A diafragma teherbírását és merevségét egyaránt meghatározza a rögzítő elem típusa [6]. A rögzítő elemek legfontosabb kritériumai, hogy megfelelő biztonsággal adják át az erőt, illetve, hogy nem mehetnek tönkre a trapézlemez tönkremenetele előtt. A lehetséges csavartípusok a 12. ábrán láthatók. Az önmetsző csavar (a) kis átmérőjű, kialakítása olyan, hogy vékony lemezek esetén is biztonságos az elhelyezése, a megfelelő előfúrási átmérő megválasztásával. Az önfúró csavar (b) el van látva egy fúrófejjel, ezáltal egy lépésben történik a fúrás, menetbe helyezés és rögzítés. A hagyományos csavar (c) esetében szükséges a csavar helyének előfúrása.

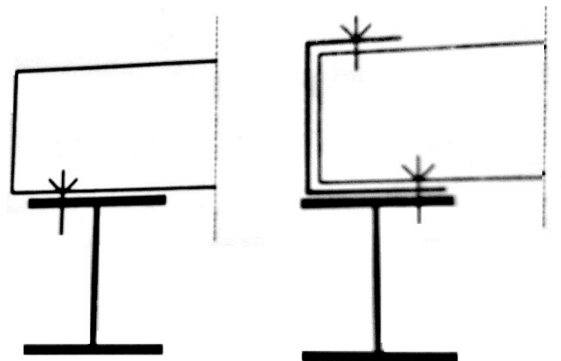


12. ábra a) önmetsző csavar b) önfúró csavar c) tompa végű csavar [1]

A csarnok tarójának kialakítása többféleképpen is történhet. Mivel nem lehet a trapézlemezeket közvetlenül összekapcsolni, ezért szükséges egy hullámmal átlapolni őket (13. ábra). A burkolat végére kerülhet végerősítő elem (14. ábra), mely merevebbé teszi a kapcsolatot, és megváltoztatja a burkolat feszültség eloszlását is.



13. ábra Taréj csomópont kialakítás [1]

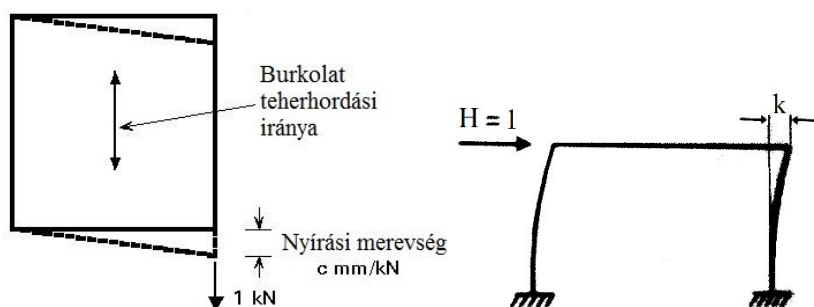


14. ábra Trapézlemez végerősítés [1]

Az előzőekben leírtak szerint szelemenre erősített (egy és két oldalon megtámasztott) trapézlemez burkolatot vizsgálunk. A rögzítő elemek önfűró csavarok voltak, trapézlemez végerősítést és nyírási csapokat nem helyeztünk el a szerkezetben.

2.3. Merevség, keret és diafragma kölcsönhatása

A 15. ábra alapján, a nyírási diafragma elmozdulása „v”, „V” nyíróerő alatt. A nyírási lágyság ezek alapján $c=v/V$ és az „S” nyírási merevség ennek reciproka: $S=V/v$.



15. ábra Diafragma és keret merevsége [1]

Egy tetőburkolat teljes nyírási lágysága az egyes elemek nyírási lágyságának összegével egyenlő, a következők szerint (16. és 17. ábra):

- 1) burkolat deformáció (h és i),
- 2) burkolat nyíró igénybevétele (j),
- 3) burkolat/szelemen rögzítő elem megcsúszása (c és d),
- 4) átlapoló elem megcsúszása (a),
- 5) burkolat/nyírási csap rögzítő elem megcsúszása (b),
- 6) szelemen/tetőgerenda kapcsolat (k),
- 7) szelemen axiális igénybevétele (g).

Az egyes merevség/lágyság tényezők részletes bemutatása [4]:

- 1) A trapézlemez alakváltozásából származtatható lágyság ($c_{1.1}$) függ:
 - a trapézlemez geometriájától,
 - a lemez vastagságától,
 - a leerősítések távolságától (minden- vagy minden második völgyben),
 - a közbenső szelemenek számától,
 - a trapézlemezek számától a diafragma szélességében.
- 2) A burkolat nyíró igénybevételéből származtatható lágyság ($c_{1.2}$) függ:
 - a trapézlemez geometriájától,
 - a lemez vastagságától,
 - közbenső szelemeneket figyelembevevő együtthatótól.
- 3) Burkolat-szelemen közötti rögzítőelem megcsúszásából származtatható lágyság ($c_{2.1}$) függ:
 - megcsúszási alapértéktől (kísérleti eredményeken alapuló közelítő érték, ami függ a rögzítőelem típusától, átmérőjétől, és a neoprén alátétől),
 - rögzítőelemek közötti távolságtól.
- 4) Átlapolásra alkalmazott rögzítőelem megcsúszásából származtatható lágyság ($c_{2.2}$) függ:
 - megcsúszási alapértéktől,
 - az alkalmazott darabszámtól.
- 5) Burkolat-nyírási csap közötti rögzítőelem megcsúszásából származtatható lágyság.
- 6) Szélső elemekhez kapcsoló rögzítőelem megcsúszásából származtatható lágyság ($c_{2.3}$) függ:
 - megcsúszási alapértéktől,
 - az alkalmazott darabszámtól.
- 7) Szelemen axiális igénybevételéből származtatható lágyság (c_3), függ:
 - fedés hosszától,
 - szelemen hosszától,
 - szelemen keresztmetszeti méretétől.

Az egyes elemek nyírási lágyságai a következő módon számíthatóak (Az Eurocode-ban [5] alkalmazott jelölések használatával):

No.	Komponens jelentése	Komponens képlete (EURÓPAI MODELL) (Brian & Davies)
1	Merevség a tetőburkolat alakváltozásából	$c_{1.1} = \frac{ad^{2.5}\alpha_1\alpha_4K}{Et^{2.5}b^2}$
2	Merevség a tetőburkolat nyíróigénybevételéből	$c_{1.2} = \frac{2a(1+\nu)[1+(2h/d)]}{Etb}$
3	Mer. a burkolat-szelemen közötti rögzítő megcsúszásából	$c_{2.1} = \frac{2as_p p}{b^2}$
4	Merevség a korcolt rögzítő megcsúszásából	$c_{2.2} = \frac{2s_s s_p (n_{sh} - 1)}{2n_s s_p + \beta_1 n_p s_s}$
5	Merevség a nyírócsap megcsúszásából	$c_{2.3} = \frac{2}{n_p} (s_{pr} + \frac{s_p}{\beta_2})$
6	Merevség a szélső elemek axiális igénybevételéből	$c_3 = \frac{2a^3}{3EAb^2}$

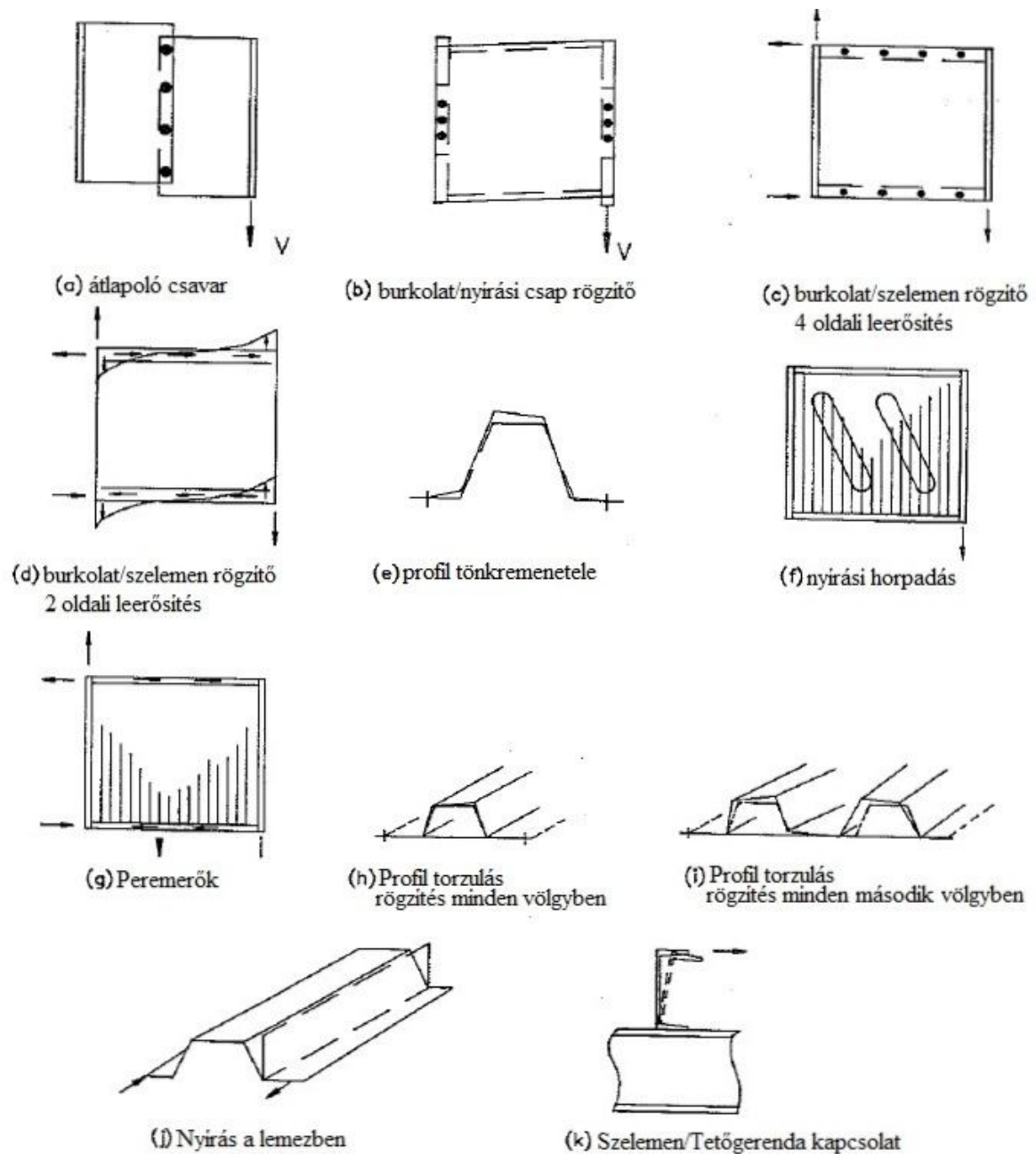
16. ábra Egyes elemek nyírási lágyságai [9]

2.4. Tönkremeneteli módok

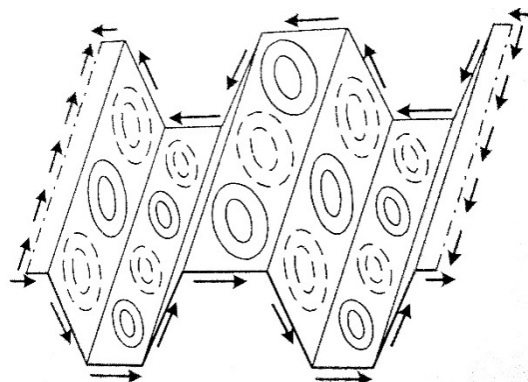
A lehetséges szempontok a diafragma tönkremenetelére vonatkozóan (17. és 18. ábra):

- lemez elnyíródása az átlapoló csavarok mentén (a),
- lemez elnyíródása a burkolat/nyírási csapok rögzítő elemei mentén (b),
- lemez elnyíródása burkolat/szelemen rögzítő elemei mentén (c és d),
- trapézlemez profil tönkremenetele (e),
- lemez nyírási horpadása (f),
- peremelemek tönkremenetele húzásra/nyomásra (g).

Az elfogadható tönkremeneteli módok a fent említettekből az (a) és (b), tehát a tervezési szempontokat ezek alapján kell meghatározni. A többi módnak, bár kisebb duktilitásúak, nagyobb biztonsági tartalékkal kell rendelkezniük.



17. ábra Szilárdsági és stabilitási tönkremenetelek



18. ábra Lokális horpadások a trapézlemezben [1]

2.5. Az irodalomkutatás konklúziója

Az acél csarnokok tervezésére számos előírás és ajánlás található az európai szabványokban. Az angol nyelvű Eurocode tartalmaz erre vonatkozó ajánlásokat, azonban ezeket korábbi kutatások eredményei alapján folyamatosan fejleszteni, pontosítani kell.

Egy csarnok keretsíkbeli merevítése történhet befogott oszloptalpakkal vagy sarokmerev kialakítással, esetleg ezek kombinációjával. Ezt is figyelembe kell venni a tervezés során, hiszen az igénybevételek eloszlása hatással van a burkolatra is. A burkolat merevsége függ a szerkezeti elemektől, azok elhelyezkedésétől, geometriai méreteiktől, egymáshoz viszonyított merevségi arányaiktól.

A szelemenek elhelyezése a szerkezetben előnyösebb abból a szempontból, hogy a lemezburkolatok fesztávolságát csökkenti, így gazdaságosabb, a hátránya viszont, hogy a burkolat diafragma külpontosságát növeli.

A leerősítések helye, típusa gondos tervezést igényel, hiszen nem csak az épületszerkezeti problémákat kell megoldani (pl. megfelelő vízállóság), hanem számolni kell a feszültségek eloszlásával, a gátolt alakváltozás miatti feszültségekkel is. A lemezvastagság függvényében kell dönteni a csavar típusáról.

A burkolat tervezése során figyelembe kell venni az esetleges alakváltozásokat, torzulásokat. Meg kell határozni a tönkremeneteli módok közül azt, amire méretezni szeretnénk, és ami szemrevételezhető is. Ez alapján a burkolatnak, a többi tönkremeneteli mód ellen elegendően nagy tartalékkal kell rendelkeznie ahhoz, hogy azok ne legyenek mértékadóak.

A jelenleg érvényben lévő szabvány tartalmaz számos tényezőt, melyektől a burkolatok merevítő hatása függ; például a geometriai méretek, csavar típusa, száma, illetve a szelemenek száma. Azonban számos kutatás azt mutatta, hogy a diafragmák merevsége függ a szelemenek és a trapézlemez külpontosságától is. Minél távolabb helyezkedik el a trapézlemez súlypontja a tetőgerenda felső övétől, annál kisebb mértékben képes kifejteni kedvező merevítő hatását. Továbbá, a szabvány nem veszi figyelembe a tető hajlásszögét, illetve nem ad ajánlást belső és külső burkolatot egyaránt tartalmazó kialakítás esetére.

Korábbi egyetemi kutatások már foglalkoztak a tető hajlásszögének figyelembevételével, illetve a szelemen hajlítási merevségének hatásával a burkolat merevségére.

Kutatási témánk a szelemen és trapézlemez fedés merevítő hatásának pontosítása, további változó paraméterek bevezetésével, illetve az eddigiek módosításával. Munkánk során elemezzük az Eurocode által meghatározott merevségi tagokat és ajánlást adunk a belső és

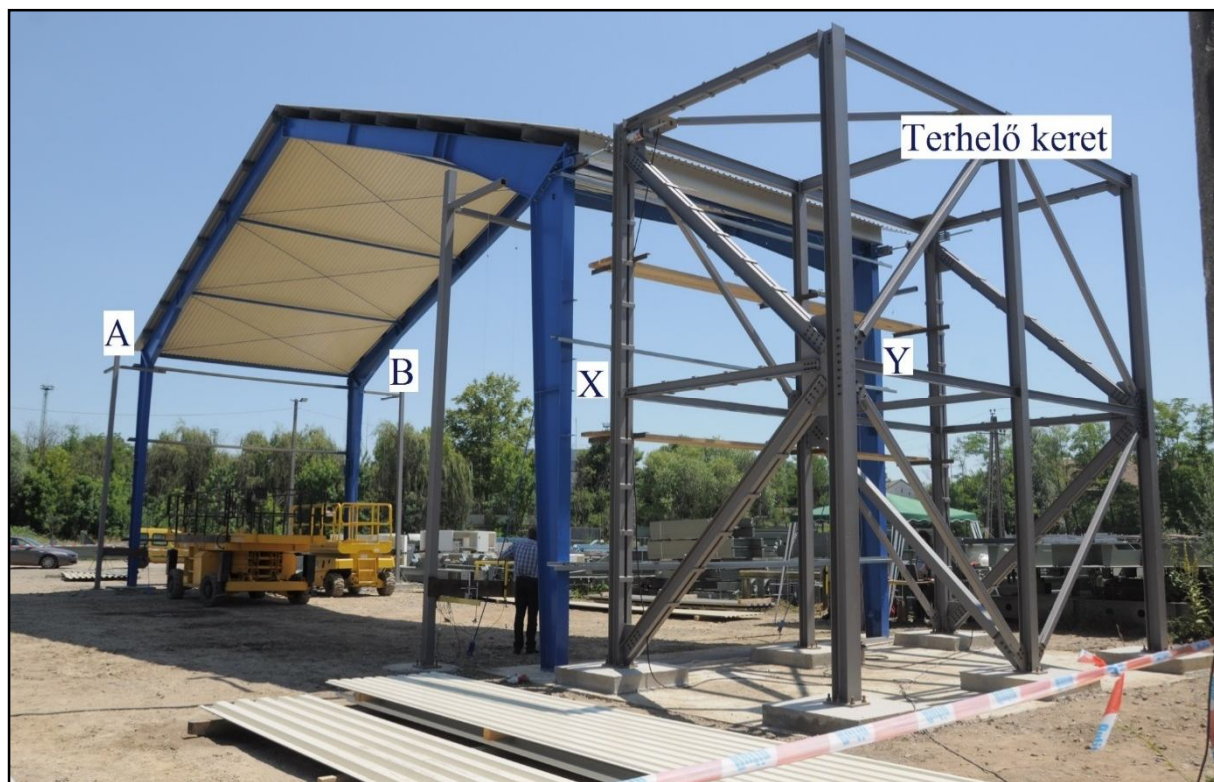
külső trapézlemezzel ellátott burkolat merevségi számítására, és az egész csarnokszerkezetre vonatkozó merevségére.

3. Teljes léptékű kísérlet és eredményei

Dolgozatunk megírásához egy, a Hidak és Szerkezetek Tanszék által végzett kísérletsorozat eredményeit használtuk fel. Ezekben a kísérletekben, illetve az eredmények rendezésében, értékelésében mi is részt vettünk.

3.1. Kísérleti elrendezés

A projekt részeként megépült egy teljes léptékű acélsarnok két keretállása. Az oszlopok elhelyezkedései és azonosítói a 19. ábrán láthatók. Mindegyik oszlop mellett egy mérőoszlop áll. Ezeken az oszlopokon helyezték el az elmozdulás-mérőket.



19. ábra Kísérleti elrendezés

A csarnokrész mellé terhelőkeret épült, mely segítségével az egyik keretállásra nyomóerőt, a másik keretállásra húzóerőt fejtettünk ki, hogy a szerkezet nyírási merevségét vizsgálni tudjuk. A szerkezeti elemek későbbi felhasználhatóságához, a méréseket rugalmas állapotban végeztük.



20. ábra Terhelő berendezés – hidraulikus sajtó

3.2.Szerkezeti konfigurációk

Az acél keretek terhelése során 150 és 200 mm magasságú Z szelement, valamint 20 és 45 mm magasságú trapézlemez használtunk. A különböző konfigurációkat a belső, illetve külső trapézlemez burkolat, a szelemenek, a falváz tartók, a csavarok száma, a szélrács, illetve hossz-kötés variációi alkották. Vizsgálatainkban szerepelt csak a tetőn alkalmazott burkolat, valamint tető- és falburkolat együttese is. Dolgozatunkban a kísérleti eredményeket a meglévő angol nyelvű Eurocode eljárása alapján számított értékekkel hasonlítottuk össze. A szabványban csak tető diafragma méretezésére van ajánlás, ezért csak a tetőn burkolt eseteket használtuk fel.

Az egyes szerkezeti elemek jelölései a következők:

F - keret (frame)

W - szélrács vagy hossz-kötés (wall/ windbracing)

P - szelemen (purlin)

E - külső burkolat (external cladding)

I - belső burkolat (internal cladding)

Ezek után kötőjellel szerepel, hogy ezek a szerkezeti elemek a tetőn (R - roof) vagy a falban (W - wall) vannak. A következő ábra (21. ábra) a végzett kísérletek számát a konfigurációk szerint tartalmazzák felhasználva az ismertett jelöléseket. Pirossal a konfiguráció száma, kékkel pedig a kísérlet száma olvasható.

F-W			16	F-RW			15	W-R			13	W-RW			14
	Tető (R)	Fal (W)			Tető (R)	Fal (W)	113		Tető (R)	Fal (W)	109		Tető (R)	Fal (W)	111
Keret (F)				Keret (F)			114	Keret (F)			110	Keret (F)			112
Szélrács (W)				Szélrács (W)			115	Szélrács (W)				Szélrács (W)			
Szelemen (P)				Szelemen (P)			116	Szelemen (P)				Szelemen (P)			
Külső burkolat (E)				Külső burkolat (E)				Külső burkolat (E)				Külső burkolat (E)			
Belső burkolat (I)				Belső burkolat (I)				Belső burkolat (I)				Belső burkolat (I)			

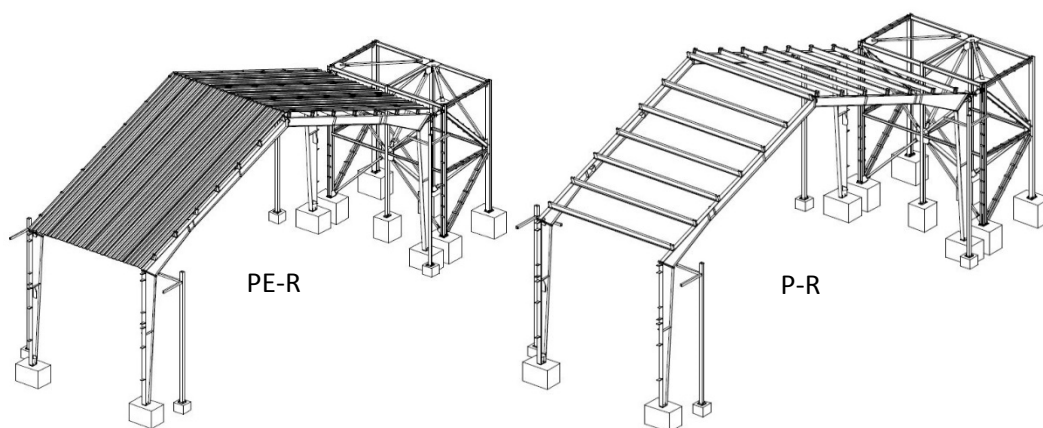
P-R			9	P-RW			10	WP-R			12	WP-RW			11
	Tető (R)	Fal (W)	101		Tető (R)	Fal (W)	103		Tető (R)	Fal (W)	107		Tető (R)	Fal (W)	105
Keret (F)			102	Keret (F)			104	Keret (F)			108	Keret (F)			106
Szélrács (W)				Szélrács (W)				Szélrács (W)				Szélrács (W)			
Szelemen (P)				Szelemen (P)				Szelemen (P)				Szelemen (P)			
Külső burkolat (E)				Külső burkolat (E)				Külső burkolat (E)				Külső burkolat (E)			
Belső burkolat (I)				Belső burkolat (I)				Belső burkolat (I)				Belső burkolat (I)			

PE-R			6	PE-RW			3	WPE-R			5	WPE-RW			4
	Tető (R)	Fal (W)	87		Tető (R)	Fal (W)	80		Tető (R)	Fal (W)	85		Tető (R)	Fal (W)	82
Keret (F)			88	Keret (F)			81	Keret (F)			86	Keret (F)			83
Szélrács (W)			89	Szélrács (W)				Szélrács (W)				Szélrács (W)			84
Szelemen (P)			6a	Szelemen (P)				Szelemen (P)				Szelemen (P)			
Külső burkolat (E)			90	Külső burkolat (E)				Külső burkolat (E)				Külső burkolat (E)			
Belső burkolat (I)			91	Belső burkolat (I)				Belső burkolat (I)				Belső burkolat (I)			
			92												

PEI-R			7	PEI-RW			2	WPEI-R			8	WPEI-RW			1
	Tető (R)	Fal (W)	97		Tető (R)	Fal (W)	78		Tető (R)	Fal (W)	95		Tető (R)	Fal (W)	72
Keret (F)			98	Keret (F)			79	Keret (F)			96	Keret (F)			73
Szélrács (W)			7a	Szélrács (W)				Szélrács (W)				Szélrács (W)			74
Szelemen (P)			93	Szelemen (P)				Szelemen (P)				Szelemen (P)			75
Külső burkolat (E)			94	Külső burkolat (E)				Külső burkolat (E)				Külső burkolat (E)			76
Belső burkolat (I)				Belső burkolat (I)				Belső burkolat (I)				Belső burkolat (I)			77

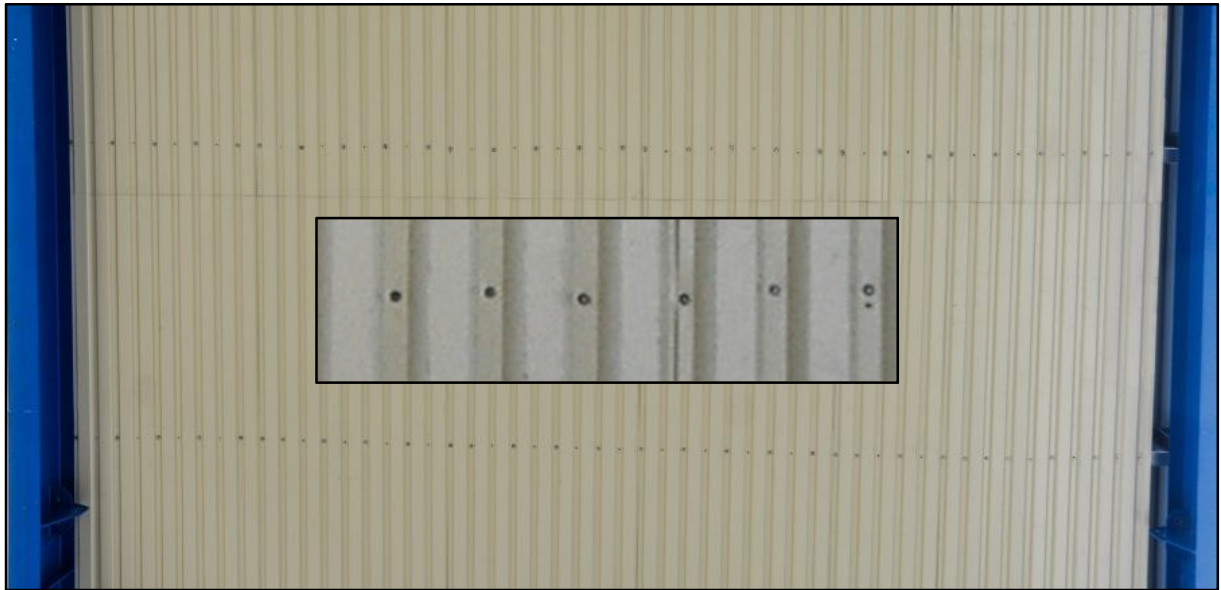
21. ábra Z250-200 LTP45 konfigurációi

A 22. ábrán két példát láthatunk, jelöléssel együtt. Mivel a dolgozatunkban csak a tetőn elhelyezett burkolat esetével foglalkozunk, ezért ezeket mutatjuk be.



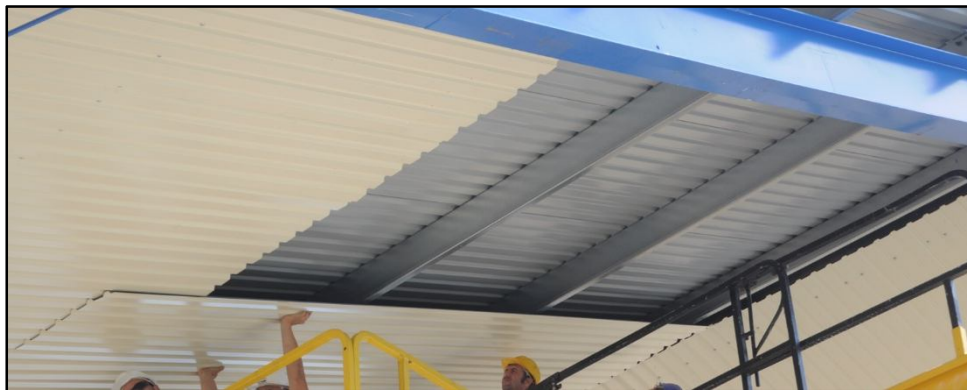
22. ábra Szerkezeti konfigurációi

A konfigurációk egyik változója volt, hogy minden vagy minden második völgyben volt leerősítve a burkolat. A 23. ábrán a minden völgyben leerősített eset látható. Ezeket a konfigurációkat 'a'-val jelöltük. Például a PE-R konfiguráció száma 6, a minden völgyben leerősített PE-R pedig 6a.



23. ábra Minden völgyben leerősített burkolat

Külső- és belső burkolatot egyaránt tartalmazó kialakítást is vizsgáltunk, hogy tudjunk számítási ajánlást tenni ezekre az esetekre is. A számításoknál 7-essel jelöltük a duplaburkolatú kialakításokat (24. ábra).



24. ábra Belső burkolat felhelyezése

Ahhoz, hogy vizsgálni tudjuk az egyes szerkezeti elemek hozzáadott merevségét, végeztünk vizsgálatot csak keret, illetve keret és szelemenek együttesével is.



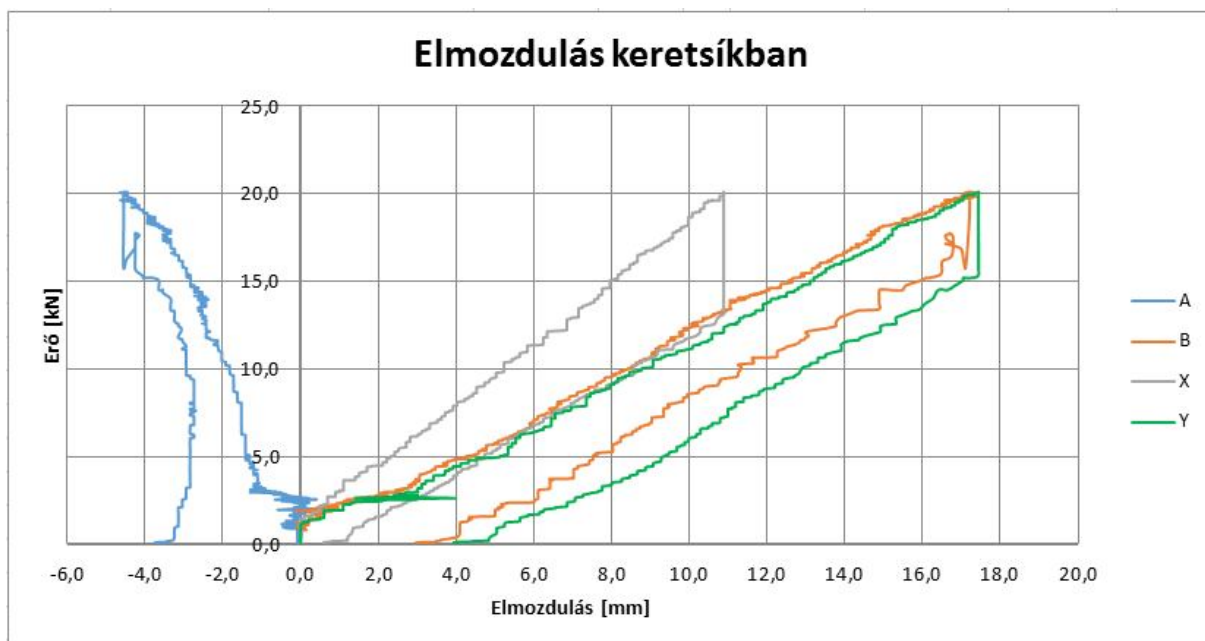
25. ábra Keret és szelemenek együttése



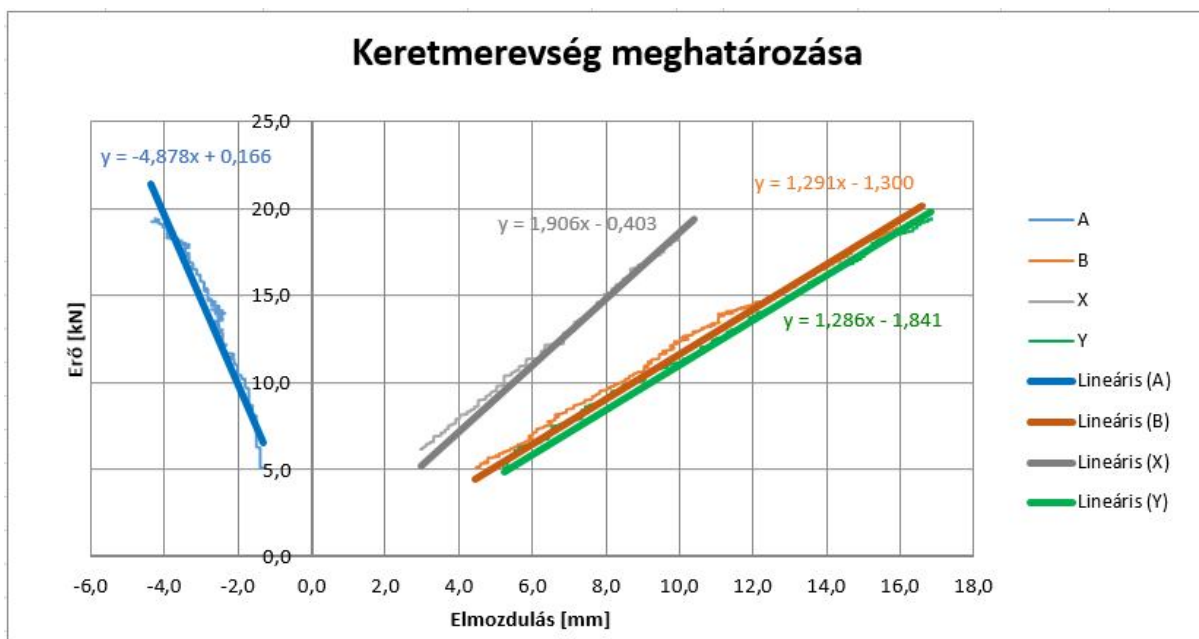
26. ábra Szelemenbakok elhelyezése

3.3. Mért és számított eredmények

Mért mennyiségek voltak az egyes oszlopok keretsíkba eső, és keretsíkra merőleges elmozdulása, és a szélső szélrácsok megnyúlása (feszültsége). Továbbá mértük a terhelő keret elmozdulásait, hogy lássuk valóban megfelel-e az elvárásoknak a merevsége. Az erő-elmozdulás ábrák alapján (27. ábra) számítottuk az egyes oszlopok – ebből következően a keret – merevségeit, illetve a szélrácsokban keletkező erőt.



27. ábra Elmozdulás-erő diagram



28. ábra Keretmerevség meghatározása

A 28. ábrán ugyanazok a diagramok láthatók, mint a 27.-on, azzal a különbséggel, hogy csak a lineárisan terhelt szakaszt vettük ki, és ezekre illesztettünk egyeneseket. Ezeknek az egyeneseknek a meredeksége adja meg a merevségeket.

Az ilyen módon kapott merevségeket az 1. és 2. táblázat foglalja össze. Az összehasonlításnál a merevségek reciprokát, a lágyságot fogjuk összevetni a számítás alapján kapott lágyságokkal.

Konfiguráció		Kísérlet száma	Merevségek átlagai konfigurációnként [kN/mm]			
			A	B	X	Y
Z150	P-R (9)	36	1,258	0,953	0,957	0,770
		37				
Z150-LTP20	PE-R (6)	30	6,245	1,449	1,854	1,359
		31				
	PEI-R (7)	32	7,300	1,514	1,924	1,381
		33				
Z150-LTP45	PE-R (6)	14	5,034	1,695	1,709	1,308
		15				
	PEI-R (7)	16	5,812	1,864	1,779	1,344
		17				

1. táblázat Z150 szelemenhez tartozó merevségi értékek

Konfiguráció		Kísérlet száma	Merevségek átlagai konfigurációnként [kN/mm]			
			A	B	X	Y
Z200	P-R (9)	101	1,284	0,939	0,977	0,776
		102				
Z200-LTP20	PE-R (6)	62	3,545	1,417	1,835	1,322
		63				
	PE-R-a (6a)	64	5,104	1,322	1,887	1,357
		65				
	PEI-R-a (7a)	66	7,298	1,374	1,910	1,379
		67				
	PEI-R (7)	68	5,409	1,333	1,797	1,326
		69				
Z200-LTP45	PE-R (6)	87	3,349	1,020	1,133	0,865
		88				
		89				
	PE-R (6a)	90	5,642	1,978	2,171	1,589
		91				
		92				
	PEI-R (7a)	93	8,794	2,029	2,309	1,615
		94				
	PEI-R (7)	97	5,351	1,554	1,689	1,313
		98				

2. táblázat Z200 szelemenhez tartozó merevségi értékek

4. Eredmények kiértékelése

4.1. Nyírási merevség a méréseink szerint

Az előző fejezet tartalmazza a kísérlettel kapott merevségi értékeket (1. és 2. táblázat). A merevségek meghatározása összetett feladat, nagyon sok tényező befolyásolja a kapott eredményt, éppen ezért kaphatunk nagyon eltérő eredményeket is. Emiatt az egy-egy kiugró eredményt minden esetben figyelmen kívül hagytuk. Minden konfigurációhoz legalább két mérés tartozott.

4.1.1. Trapézlemez hatása a merevségre

4.1.1.1. Külső trapézlemez hatása

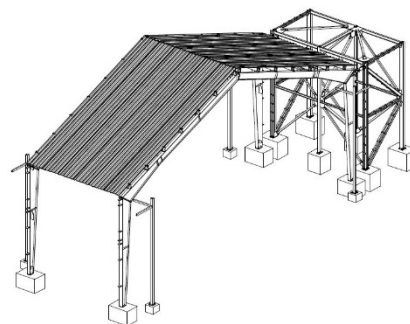
A trapézlemez merevítő hatása igen nagy, jelentős mértékben együttdolgoztatja a keretállásokat. A csak szelemeneket tartalmazó kialakításhoz tartozó merevségi értékeket tekintettük 100%-nak. A trapézlemez burkolat elhelyezése minimum 50%-kal, maximum 95%-kal növeli a szerkezet merevségét (3. és 4. táblázat).

P-R (9) /PE-R (6) Z150					
[kN/mm]		A	B	X	Y
P-R (9)		1,258	0,953	0,957	0,770
PE-R (6)	LTP45	5,034	1,695	1,709	1,308
	LTP20	6,245	1,449	1,854	1,359
százalékos változás	LTP45	400,2%	177,9%	178,6%	169,9%
	LTP20	496,4%	152,0%	193,7%	176,5%

3. táblázat Merevségváltozás a külső trapézlemez hatására – Z150 szelemen

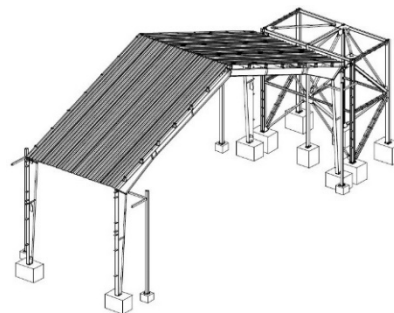
P-R (9) /PE-R (6) Z200					
[kN/mm]		A	B	X	Y
P-R (9)		1,284	0,939	0,977	0,776
PE-R (6)	LTP45	3,349	1,531	1,619	1,301
	LTP20	3,545	1,417	1,835	1,322
százalékos változás	LTP45	260,8%	163,0%	165,7%	167,7%
	LTP20	276,1%	150,9%	187,8%	170,4%

4. táblázat Merevségváltozás a külső trapézlemez hatására – Z200 szelemen

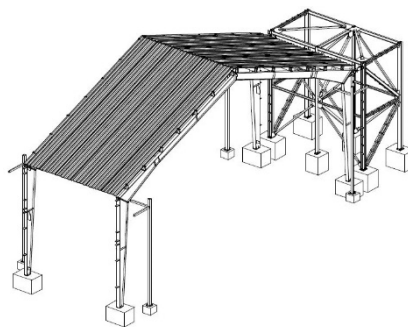


4.1.1.2. Belső trapézlemez hatása

További belső trapézlemez elhelyezése jelentősen nem növeli a szerkezet merevségét, azokban az esetekben, amikor csak a tetőn helyezük el azokat. A belső burkolatot nem tartalmazó kialakítás merevségét tekintettük 100%-nak (5. és 6. táblázat).



PE-R (6)/PEI-R (7) Z150					
[kN/mm]		A	B	X	Y
PE-R (6)	LTP45	5,034	1,695	1,709	1,308
	LTP20	6,245	1,449	1,854	1,359
PEI-R (7)	LTP45	5,812	1,864	1,779	1,344
	LTP20	7,300	1,514	1,924	1,381
százalékos változás	LTP45	115,5%	110,0%	104,1%	102,8%
	LTP20	116,9%	104,5%	103,8%	101,6%



5. táblázat Merevségváltozás a belső trapézlemez hatására – Z150 szelemen

PE-R (6)/PEI-R (7) Z200					
[kN/mm]		A	B	X	Y
PE-R (6)	LTP45	3,349	1,531	1,619	1,301
	LTP20	3,545	1,417	1,835	1,322
PEI-R (7)	LTP45	5,351	1,554	1,689	1,313
	LTP20	5,409	1,333	1,797	1,326
százalékos változás	LTP45	159,8%	101,5%	104,3%	100,9%
	LTP20	152,6%	94,1%	97,9%	100,3%

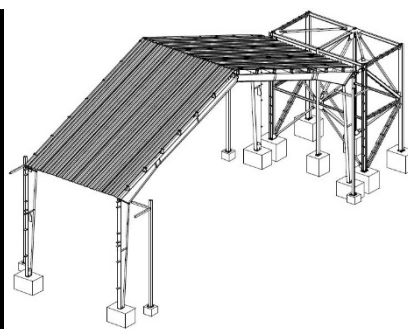
6. táblázat Merevségváltozás a belső trapézlemez hatására – Z200 szelemen

4.1.2. Merevségváltozás a trapézlemez méret hatására

A trapézlemez-méret változásának hatását a merevségre a 7. és 8. táblázatokban tüntettük fel. Általánosságban elmondható, hogy a profilméret növelésével a merevség csökken. Tehát a külponosság növekedése nagyobb hatással bír a merevségre, mint a keresztmetszet növekedése. Ez azt jelenti, hogy a nagyobb (LTP45) trapézlemez alkalmazása esetén a merevségek általában kisebbek, mint a kisebb (LTP20) trapézlemez alkalmazásakor. A százalékos változás feltüntetésénél minden esetben az LTP45 trapézlemezhez tartozó merevséget tekintettük 100%-nak.

A csak külső trapézlemez burkolatú konfiguráció esetén a merevségnövekmény 2% és 24% között változik (7. táblázat).

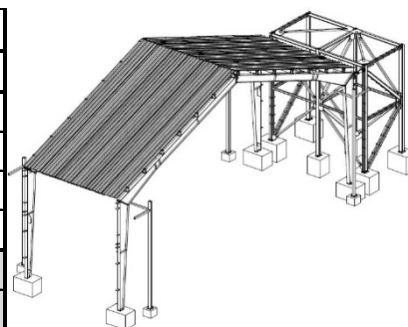
PE-R (6)					
[kN/mm]		A	B	X	Y
Z150	LTP45	5,034	1,695	1,709	1,308
	LTP20	6,245	1,449	1,854	1,359
Z200	LTP45	3,349	1,531	1,619	1,301
	LTP20	3,545	1,417	1,835	1,322
százalékos változás	Z150	124,1%	85,5%	108,5%	103,9%
	Z200	105,9%	92,6%	113,3%	101,6%



7. táblázat: Merevségváltozás a trapézlemez-magasság függvényében PE-R (6)

A külső és belső trapézlemez burkolatú kialakítás esetén a merevségnövekmény 1% és 26% között változik (8. táblázat).

PEI-R (7)					
[kN/mm]		A	B	X	Y
Z150	LTP45	5,812	1,864	1,779	1,344
	LTP20	7,300	1,514	1,924	1,381
Z200	LTP45	5,351	1,554	1,689	1,313
	LTP20	5,409	1,333	1,797	1,326
százalékos változás	Z150	125,6%	81,2%	108,2%	102,8%
	Z200	101,1%	85,8%	106,4%	101,0%



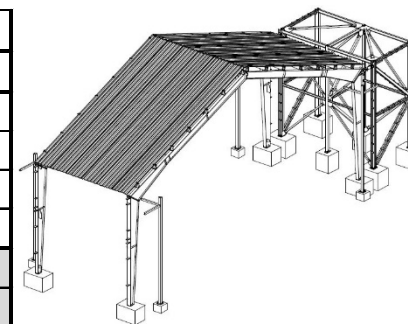
8. táblázat: Merevségváltozás a trapézlemez-magasság függvényében PEI-R (7)

4.1.3. Merevségváltozás a szelemenméret hatására

A szelemenméret változásának hatását a merevségre a 9. és 10. táblázatokban tüntettük fel. A szelemen méret változásának hatása a merevségre hasonló tendenciát mutat a trapézlemezeknél megfigyeltékkel. A százalékos változás feltüntetésénél minden esetben a Z150 szelemenmérethez tartozó merevséget tekintettük 100%-nak.

A csak külső trapézlemez burkolatú konfiguráció esetén a merevségcsökkenés 1% és 10% között változik (9. táblázat).

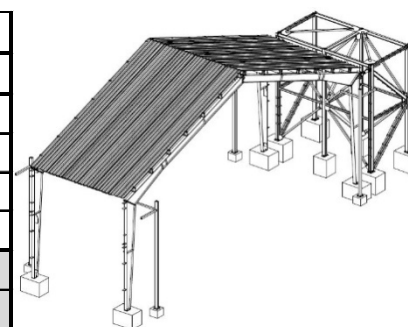
PE-R (6)					
[kN/mm]		A	B	X	Y
LTP45	Z150	5,034	1,695	1,709	1,308
	Z200	3,349	1,531	1,619	1,301
LTP20	Z150	6,245	1,449	1,854	1,359
	Z200	3,545	1,417	1,835	1,322
százalékos változás	LTP45	66,5%	90,3%	94,7%	99,5%
	LTP20	56,8%	97,8%	99,0%	97,3%



9. táblázat: Merevségváltozás a szelemenmagasság függvényében PE-R (6)

A külső és belső trapézlemez burkolatot is tartalmazó kialakítás esetén a merevségcsökkenés 2% és 17% között változik (10. táblázat).

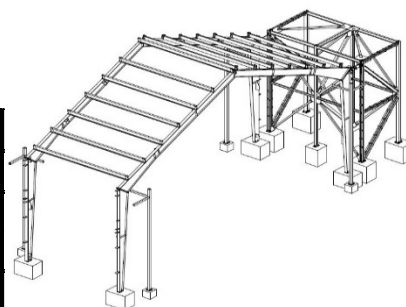
PEI-R (7)					
[kN/mm]		A	B	X	Y
LTP45	Z150	5,812	1,864	1,779	1,344
	Z200	5,351	1,554	1,689	1,313
LTP20	Z150	7,300	1,514	1,924	1,381
	Z200	5,409	1,333	1,797	1,326
százalékos változás	LTP45	92,1%	83,4%	94,9%	97,7%
	LTP20	74,1%	88,0%	93,4%	96,0%



10. táblázat: Merevségváltozás a szelemenmagasság függvényében PEI-R (7)

A csak szelement tartalmazó szerkezeti kialakítás esetén a merevségcsökkenés 2% és 9% között változik (11. táblázat).

P-R (9)					
[kN/mm]		A	B	X	Y
P-R (9)	Z150	1,258	0,953	0,957	0,770
	Z200	1,284	0,939	0,977	0,776
százalékos változás		102,1%	98,5%	102,1%	100,8%

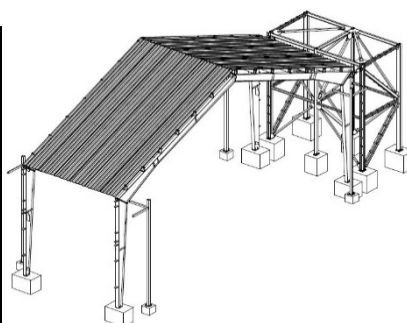


11. táblázat: Merevségváltozás a szelemenmagasság függvényében P-R (9)

4.1.4. Csavarmennyiség merevítő hatása

A 6. és 7. konfigurációhoz tartozik egy-egy elrendezés, amikor minden hullámvölgyben helyeztünk el csavarokat. Ezek további merevségnövelő hatással bírnak. A kétszeres csavarmennyiség 20-70%-kal növeli a merevséget. Az összehasonlításoknál a minden második hullámban elhelyezett önfűró csavar kialakításhoz tartozó merevséget tekintettük 100%-nak (12. táblázat).

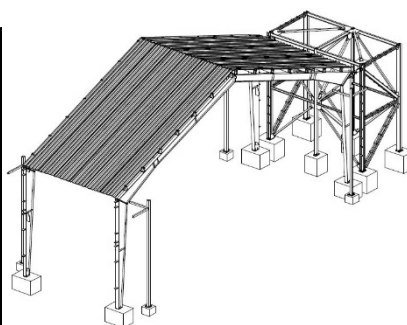
PE-R (6-6a) / PEI-R (7-7a)					
[kN/mm]		A	B	X	Y
Z250-Z200 LTP45	6	3,349	1,531	1,619	1,301
	6a	5,642	1,945	2,171	1,589
	7	5,351	1,554	1,689	1,313
	7a	8,794	2,029	2,309	1,614
százalékos változás	6	168,5%	127,0%	134,1%	122,1%
	7	164,3%	130,6%	136,7%	122,9%



12. táblázat: Merevségváltozás a csavarszám függvényében PE/PEI-R Z200-LTP45

A kisebb trapézlemez esetén is a csavarszám növekedésével nő a merevség, azonban ez a növekedés kisebb, mint az előző esetben, ~2%-45% (13. táblázat).

PE-R (6-6a) / PEI-R (7-7a)					
[kN/mm]		A	B	X	Y
Z250-Z200 LTP20	6	3,545	1,417	1,835	1,322
	6a	5,104	1,322	1,887	1,357
	7	5,409	1,333	1,797	1,326
	7a	7,298	1,374	1,910	1,379
százalékos változás	6	144,0%	93,3%	102,8%	102,6%
	7	134,9%	103,1%	106,3%	104,0%



13. táblázat: Merevségváltozás a csavarszám függvényében PE/PEI-R Z200-LTP20

4.1.5.Szerkezeti elemek hozzáadott merevsége

Mivel rugalmas állapotban vizsgáltuk a szerkezetet, ezért az egyes szerkezeti elemek merevsége egyszerű additív/eliminatív módon számolható. Például a keret és szélrács együttes merevségéből levonható a kereten mért merevség, így megkapjuk a szélrács merevségét. A további szerkezeti elemek hozzáadott merevsége hasonlóan számítható. Az eredmények a 14-16. táblázatban láthatók.

A Z150 szelemen merevítő hatása 0,020-0,036 kN/mm-re, a Z200 szelemen hozzáadott merevsége 0,011-0,046 kN/mm-re tehető (14. táblázat).

Szelemenek merevsége					
[kN/mm]		A	B	X	Y
F-RW		1,238	0,928	0,932	0,734
P-R	Z200-Z150	1,258	0,953	0,957	0,770
	Z250-Z200	1,284	0,939	0,977	0,776
Merevség	Z200-Z150	0,020	0,025	0,025	0,036
	Z250-Z200	0,046	0,011	0,045	0,042

14. táblázat: Szelemenek merevsége

Az LTP45 típusú külső burkolati trapézlemez hozzáadott merevsége 0,535-0,707 kN/mm-re, a belső burkolaté 0,024-0,096 kN/mm-re becsülhető. Tehát a külső és belső trapézlemezek merevítő hatása között nagyságrendi különbség van (15. táblázat).

LTP45					
[kN/mm]		A	B	X	Y
Z200-150	P-R (9)	1,258	0,953	0,957	0,770
	PE-R (6)	5,034	1,695	1,709	1,308
	PEI-R (7)	5,812	1,864	1,779	1,344
	külső burk. merevség	3,776	0,742	0,752	0,538
	belső burk. merevség	0,778	0,169	0,070	0,036
	burkolat merevség	4,554	0,911	0,822	0,574
Z250-Z200	P-R (9)	1,284	0,939	0,977	0,776
	PE-R (6)	3,349	1,531	1,619	1,301
	PEI-R (7)	5,351	1,554	1,689	1,313
	külső burk. merevség	2,091	0,578	0,662	0,531
	belső burk. merevség	2,002	0,023	0,070	0,012
	burkolat merevség	4,093	0,601	0,732	0,543
Átlag	külső burk. merevség	2,934	0,660	0,707	0,535
	belső burk. merevség	1,390	0,096	0,070	0,024
	burkolat merevség	4,324	0,756	0,777	0,559

15. táblázat: LTP45 trapézlemez merevsége tetőben

Az LTP20 trapézlemez külső burkolati merevítő hatása 0,480-0,888 kN/mm-re, a belső burkolaté 0,013-0,070 kN/mm-re becsülhető. Tehát értéke valamivel alacsonyabb az LTP45

típusú trapézlemezétől, viszont a nagyságrendi különbség a külső és belső burkolat hozzáadott merevsége között itt is megjelenik.(16. táblázat).

LTP20					
[kN/mm]		A	B	X	Y
Z200-150	P-R (9)	1,258	0,953	0,957	0,770
	PE-R (6)	6,245	1,449	1,854	1,359
	PEI-R (7)	7,300	1,514	1,924	1,381
	külső burk. merevség	4,987	0,496	0,897	0,589
	belső burk. merevség	1,055	0,065	0,070	0,022
	burkolat merevség	6,042	0,561	0,967	0,611
Z250-Z200	P-R (9)	1,284	0,939	0,977	0,776
	PE-R (6)	3,545	1,417	1,835	1,322
	PEI-R (7)	5,409	1,333	1,797	1,326
	külső burk. merevség	2,287	0,464	0,878	0,552
	belső burk. merevség	1,864	-	-	0,004
	burkolat merevség	4,151	0,380	0,840	0,556
Átlag	külső burk. merevség	3,637	0,480	0,888	0,571
	belső burk. merevség	1,460	0,065	0,070	0,013
	burkolat merevség	5,097	0,471	0,904	0,584

16. táblázat: LTP20 trapézlemez merevsége tetőben

4.2. Nyírási merevség az Eurocode szerint

Az Eurocode számításának eredménye lágysági érték, ezért ezek után lágyságokban adjuk meg a diafragmák jellemzőjét.

Az Eurocode [5] szerinti nyírási lágyság számítása egy példán keresztül:

Nyírási merevség meghatározása ECCS szerint:

Anyagjellemzők

Rugalmassági modulus: $E := 210000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Nyírási rugalmassági modulus: $G := 81000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Poisson tényező: $\nu := 0.3$

Geometriai adatok:

Szelemen:

Profil: Z150

Vastagság: $t_p := 1.5 \text{ mm}$

Magasság: $H_p := 150 \text{ mm}$

Felső öv szélessége: $B_{1,p} := 41 \text{ mm}$

Alsó öv szélessége: $B_{2,p} := 47 \text{ mm}$

Élbordamagassága: $L_p := 17.7 \text{ mm}$

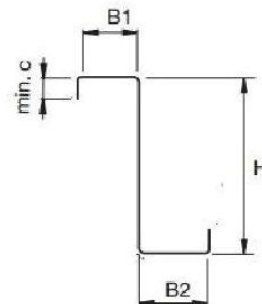
Hossza: $a := 6 \text{ m}$

Osztásköz: $b_1 := 1.5 \text{ m}$

Darabszám: $n_p := 8$

Darabszám/Trapézlemez: $n_{p1} := 4$

Trapézlemezek száma a keretsíkban: $n_b := 2$



A közbelső szelemeket figyelembevevő tényezők:

$$\alpha_1 := 0.85 \quad \alpha_2 := 0.44 \quad \alpha_3 := 0.58 \quad \alpha_4 := 1 + 0.3 \cdot n_b = 1.6$$

Keresztmetszeti terület: $A_p := [H_p - 2 \cdot t_p + B_{1,p} + B_{2,p} + 2 \cdot (L_p - t_p)] t_p = 401.1 \cdot \text{mm}^2$

Trapézlemez:

Profil: LTP20

Vastagság:

$$t_t := 0.5 \text{ mm} \quad \text{LTP20 / HU}$$

Magasság:

$$h_t := 20 \text{ mm}$$

Hullámhossz:

$$d_t := 114.2 \text{ mm}$$

Felső öv:

$$l_{1t} := 25 \text{ mm}$$

Alsó öv:

$$l_{2t} := 64.2 \text{ mm}$$

Fedés hossza:

$$b_t := 9.5 \text{ m}$$

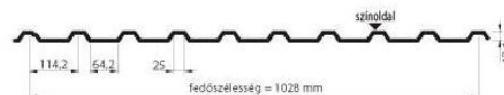
Darabszáma:

$$n_{sh} := \text{round}\left(\frac{a}{1028 \text{ mm}}\right) = 6$$

Arányszámok:

$$l_d := \frac{l_{1t}}{d_t} = 0.219 \quad h_d := \frac{h_t}{d_t} = 0.175$$

$$\Theta := \text{atan}\left(\frac{d_t - l_{1t} - l_{2t}}{2} \cdot \frac{1}{h_t}\right) = 32.005 \cdot \text{deg}$$



$$K_2 := \text{linterp} \left(\begin{pmatrix} 30 \\ 35 \end{pmatrix}, \begin{bmatrix} \text{linterp} \left(\begin{pmatrix} 0.1 \\ 0.2 \end{pmatrix}, \begin{bmatrix} \text{linterp} \left(\begin{pmatrix} 0.2 \\ 0.3 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0.150 \\ 0.194 \end{pmatrix}, \text{ld} \end{bmatrix}, \text{hd} \right) \\ \text{linterp} \left(\begin{pmatrix} 0.1 \\ 0.2 \end{pmatrix}, \begin{bmatrix} \text{linterp} \left(\begin{pmatrix} 0.2 \\ 0.3 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0.500 \\ 0.621 \end{pmatrix}, \text{ld} \end{bmatrix}, \text{hd} \right) \end{bmatrix}, \frac{\Theta}{\text{deg}} \right) = 0.437$$

Rögzítés:

Típus: önfúró csavar

Keresztmetszeti átmérő:

$$d_n := 5.5 \text{ mm}$$

Hossz:

$$l_n := 25 \text{ mm}$$

Darabszám/Szelemen:

$$n_s := \text{round} \left(\frac{a}{2 \cdot d_t} \right) = 26$$

$$p := 2d_t = 228.4 \text{ mm}$$

A szelemen-trapézlem ez közti rögzítést figyelembe vevő tényezők:

$$\beta_1 := 0.58$$

$$\beta_2 := 1.25$$

1 db rögzítő elem (trapézlem ez átlapolására) megcsúszásának értéke:

$$s_s := 0.25 \frac{\text{mm}}{\text{kN}}$$

1 db trapézlem ez és szelemen közötti rögzítő elem megcsúszásának értéke:

$$s_p := 0.35 \frac{\text{mm}}{\text{kN}}$$

Szelemen és főtartó közötti rögzítő elem megcsúszásának értéke:

$$s_{pr} := 0.38 \frac{\text{mm}}{\text{kN}}$$

Lágyságok értékei:

Burkolat deformációból:

Lágyság a burkolat alakváltozásából:

$$c_{1.1} := \frac{a \cdot d_t^{2.5} \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_4 \cdot K_2}{E \cdot t_t^{2.5} \cdot b_t^2} = 0.148 \frac{\text{mm}}{\text{kN}}$$

Lágyság a burkolat nyíró igénybevételéből:

$$c_{1.2} := \frac{2 \cdot a \cdot (1 + \nu) \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot h_t}{d_t} \right)}{E \cdot t_t \cdot b_t} = 0.021 \frac{\text{mm}}{\text{kN}}$$

Rögzítőelemek deformációból:

Lágyság a burkolat-szelemen közötti rögzítőelem megcsúszásából:

$$c_{2.1} := \frac{2 \cdot a \cdot s_p \cdot p}{b_t^2} = 0.011 \frac{\text{mm}}{\text{kN}}$$

Lágyság az átlapolásra alkalmazott rögzítő elemek megcsúszásából:

$$c_{2.2} := \frac{2 \cdot s_s \cdot s_p \cdot (n_{sh} - 1)}{2 \cdot n_s \cdot s_p + \beta_1 \cdot n_p \cdot s_s} = 0.045 \frac{\text{mm}}{\text{kN}}$$

Lágyság a szélső elemekhez kapcsoló rögzítő elemek megcsúszásából:

$$c_{2.3} := \frac{2}{n_p} \cdot \left(s_{pr} + \frac{s_p}{\beta_2} \right) = 0.165 \frac{\text{mm}}{\text{kN}}$$

Lágyság a szelemenek axiális igénybevételéből:

$$c_3 := \frac{2 \cdot b_t^3}{3 \cdot E \cdot A_p \cdot a^2} = 0.188 \frac{\text{mm}}{\text{kN}}$$

Teljes panel lágysága az EC szerint:

$$c := \frac{b_t^2}{a} \cdot (c_{1.1} + c_{1.2} + c_{2.1} + c_{2.2} + c_{2.3}) + c_3 = 1.198 \frac{\text{mm}}{\text{kN}}$$

A többi konfigurációhoz tartozó légysági értékeket az alábbi táblázatok tartalmazzák. Az értékek a fél tetőre értelmezendők, a teljes tető légyságát az értékek felezésével kapjuk meg.

PE-R (6)								
		c _{1.1}	c _{1.2}	c _{2.1}	c _{2.2}	c _{2.3}	c ₃	EC [mm/kN]
Z150	LTP45	0,936	0,023	0,017	0,084	0,183	0,188	3,305
	LTP20	0,148	0,021	0,011	0,045	0,165	0,188	1,167
Z200	LTP45	0,936	0,023	0,017	0,084	0,183	0,100	3,217
	LTP20	0,148	0,021	0,011	0,045	0,165	0,100	1,079

17. táblázat Fél tető légysága, komponensei

PE-R (6a)								
		c _{1.1}	c _{1.2}	c _{2.1}	c _{2.2}	c _{2.3}	c ₃	EC [mm/kN]
Z200	LTP45	0,118	0,023	0,017	0,043	0,183	0,100	0,995
	LTP20	0,026	0,021	0,011	0,022	0,165	0,100	0,642

18. táblázat Fél tető légysága, komponensei

4.3. A kísérleti és szabványos eredmények közötti különbségek kiértékelése

4.3.1. Kísérleti és Eurocode számítási eredmények különbsége

A 19. és 20. táblázatokban láthatók az Eurocode által ajánlott számítás eredményeinek eltérése a kísérlet során kapott eredményekétől. A százalékos változás feltüntetésénél minden esetben a kísérletben kapott merevségeket tekintettük 100%-nak. A legnagyobb eltérés közel 65%, tehát indokolt a különbség elemzése és a számítási ajánlás korrigálása. A minden völgyben leerősített burkolat légysági értékei adták a legnagyobb eltéréseket. Minden számítási formulát két értékkel jellemeztünk. Az átlagos abszolút eltéréssel a kísérleti eredményektől,

amit a következőképpen számítottunk: $d = \frac{\sum_1^n |x_{c,i} - x_{e,i}|}{n}$, ahol

x_c – a számított merevség

x_e – a kísérletben kapott merevség

n – kiértékelt konfigurációk száma

Továbbá leírtuk a számított és kísérletben kapott értékek viszonyát egy jobban jellemző mennyiséggel. Ez figyelembe veszi az eltérések és a kísérleti eredmények arányát, illetve érzékenyebb az eredmények szórására. Ezt röviden (de nem pontosan) relatív eltérésnek nevezzük a továbbiakban és a következőképpen számítjuk (a jelölések azonosak az előzővel):

$$d = \sqrt{\frac{\sum_1^n \left(\frac{|x_{c,i} - x_{e,i}|}{x_{e,i}} \right)^2}{n}}$$

Az átlagos abszolút eltérés 0,557 mm/kN, a relatív eltérés 50,6%. Az Eurocode sokkal merevebbnek tekinti a burkolatot a valós merevségénél. Ez a számításoknál, illetve a használhatósági kritériumok megfeleltetésénél okozhat problémát.

PE-R (6)				
		EC [mm/kN]	Kísérlet [mm/kN]	Összehasonlítás [%]
Z150	LTP45	1,652	1,416	116,6%
	LTP20	0,583	1,293	45,1%
Z200	LTP45	1,608	1,616	99,5%
	LTP20	0,539	1,515	35,6%

19. táblázat Burkolat számított és kísérletben kapott lágysági értékei, minden második völgyben leerősített kialakítás szerint

PE-R (6a)				
		EC [mm/kN]	Kísérlet [mm/kN]	Összehasonlítás [%]
Z200	LTP45	0,497	0,964	51,6%
	LTP20	0,321	1,267	25,3%

20. táblázat Burkolat számított és kísérletben kapott lágysági értékei, minden völgyben leerősített kialakítás szerint

Az eltérés okának meghatározásához szükséges az Eurocode által megadott lágysági tagok megvizsgálása. Ezek a tagok a szelemen és trapézlemez magasságtól, illetve a csavarszámtól függenek.

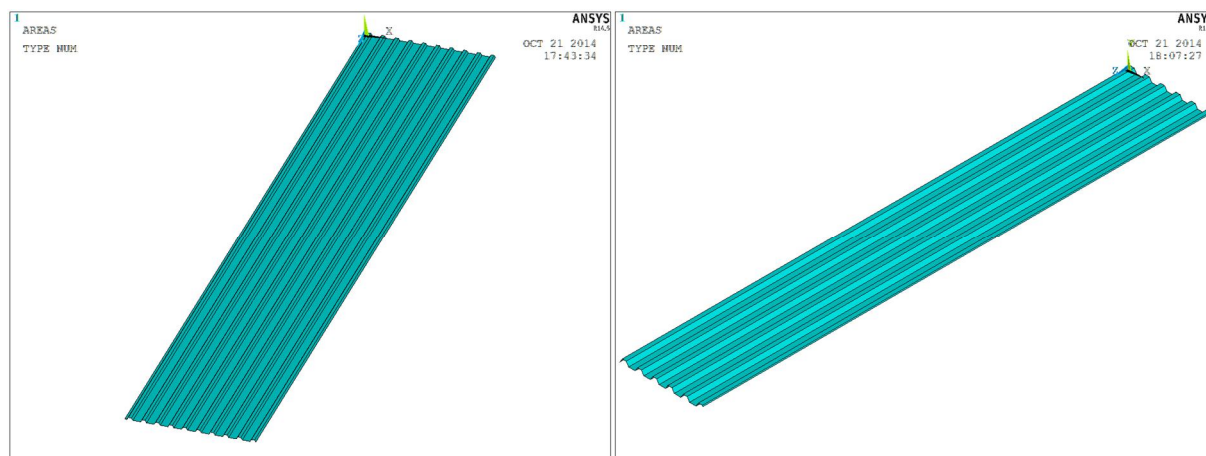
Lágysági komponensek						Lágysági komponens	
mm/kN	c _{1.1}	c _{1.2}	c _{2.1}	c _{2.2}	c _{2.3}	mm/kN	c ₃
LTP45	0,936	0,023	0,017	0,084	0,183	Z150	0,188
LTP20	0,148	0,021	0,011	0,045	0,165	Z200	0,100
Százalékos arány	15,8%	91,3%	64,7%	53,6%	90,2%	Százalékos arány	53,2%

21. táblázat Lágysági komponensek a trapézlemez és szelemen típusától függően, minden második völgyben leerősített kialakítás esetén

A különböző típusú trapézlemeznek a burkolat deformációiból adódó lágyságai ($c_{1.1}$ és $c_{1.2}$) közötti eltérés a valós viselkedést mutatja, miszerint a 45 mm magasságú trapézlemezhez nagyobb lágyság tartozik, mint a 20 mm magasságú trapézlemezhez. Azonban mivel a megfelelő tendenciájuk szükséges, de nem elégséges feltétel, ezért vizsgálnunk kellett, hogy ezek az értékek elegendően pontosak-e.

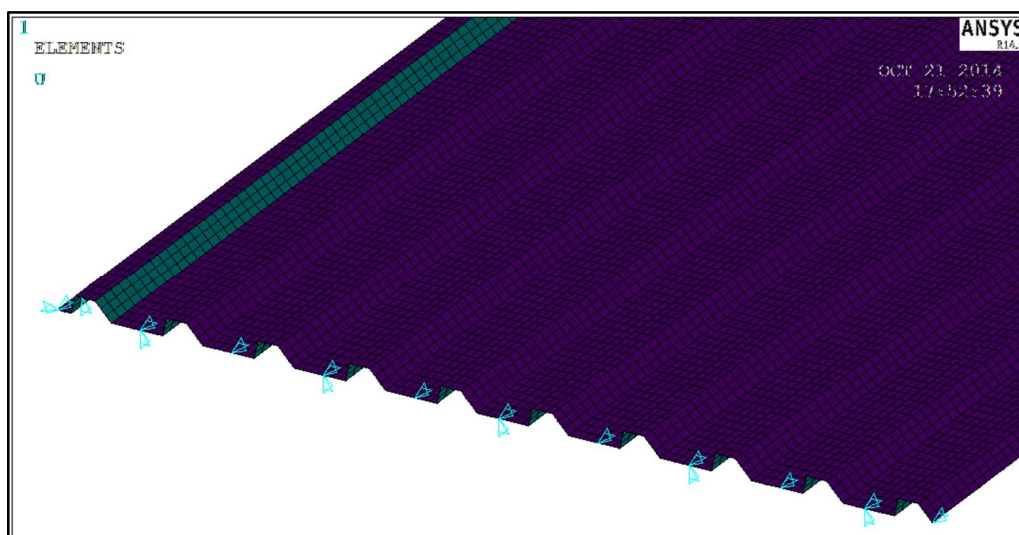
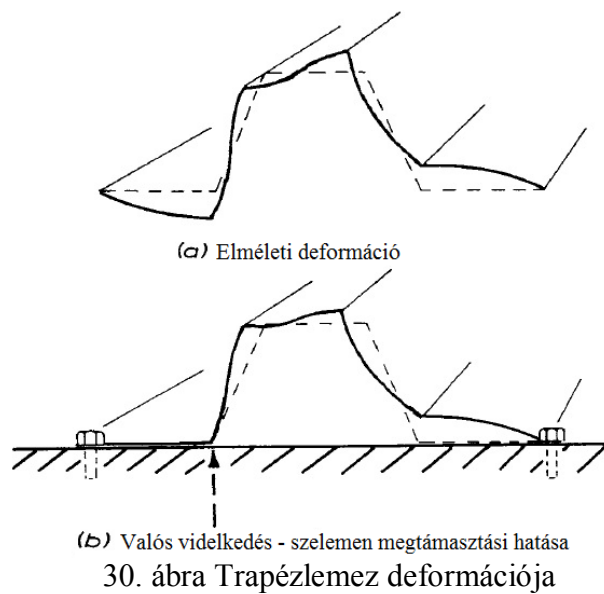
4.3.2. Burkolat deformációjából adódó lágyság vizsgálata

A tagok helyességének ellenőrzéséhez készítettünk egy-egy véges elemes modellt Ansys programban [11] a különböző trapézlemez profilokhoz (29. ábra). A modellek hossza 6 méter, szélességük egyenlő a gyártási szélességgel, ami az LTP45 esetében 900 mm, az LTP20 esetében 1028 mm.



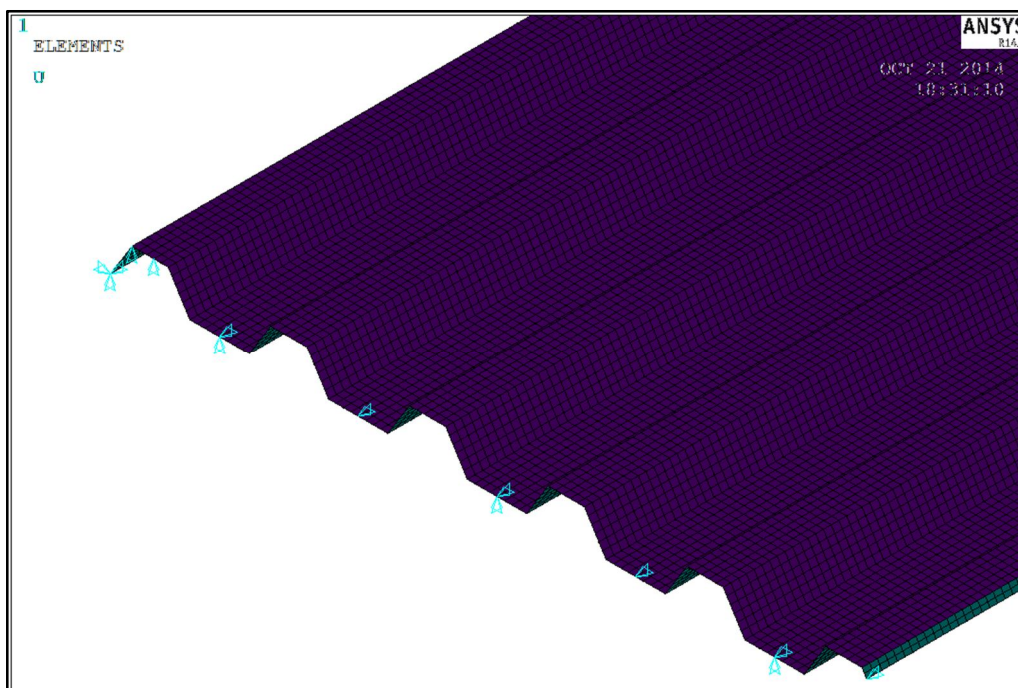
29. ábra LTP20 (bal) és LTP45 (jobb) végeselemes modellje

A trapézlemezt a két végén a csavarok helyén függőlegesen támasztottuk meg, illetve minden völgyben működtettünk egy teherhordási iránnyal párhuzamos vízszintes elmozdulást (z irány), hogy a trapézlemez nyírással vegye fel a terheket. Ez a z irányú elmozdulás lineárisan változik a vízszintes élek mentén a völgyekben, nullától 1 mm-ig. Tehát a fix megtámasztású oldalon 0 mm az elmozdulás-kényszer, a másik oldalon pedig 1 mm. A megtámasztási kényszerek felvételénél figyelembe vettük a valós viselkedést (30. ábra), ezért van a fix támasz melletti hullám felső öve közepén megtámasztva függőlegesen (31. és 32. ábra).



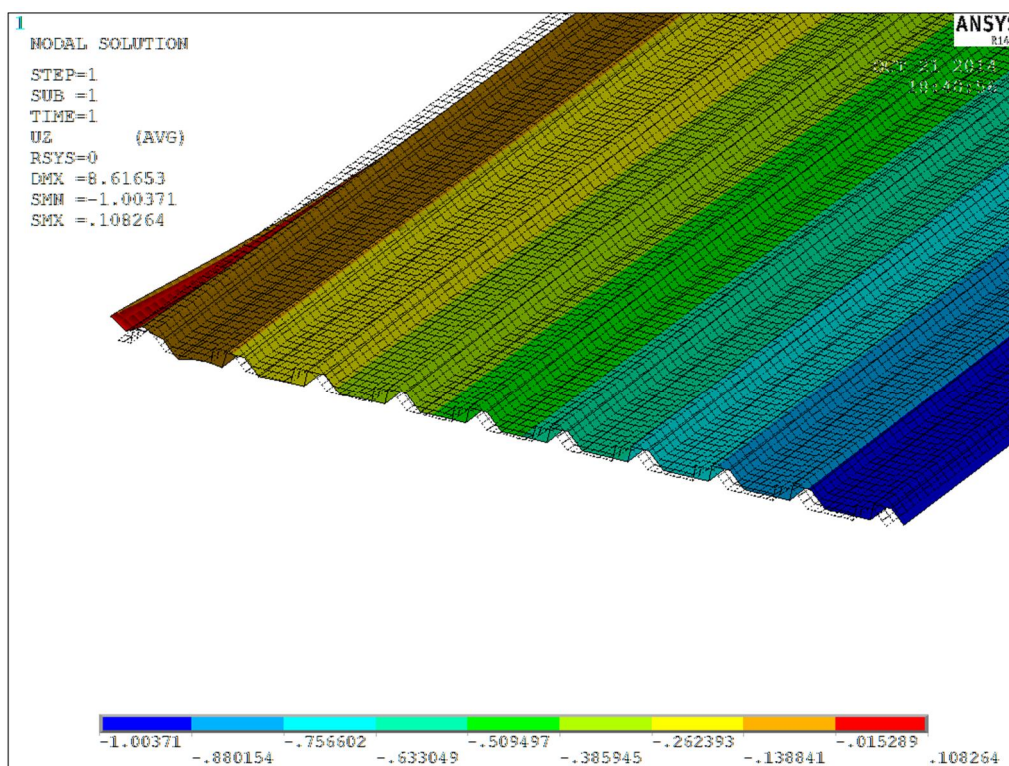
31. ábra LTP20 megtámasztási viszonyai

Mivel az LTP45 trapézlemez lágyabban viselkedik, ezért a modellben szükséges volt a fix támasz melletti hullám felső övét a szélén is megtámasztani (32. ábra).

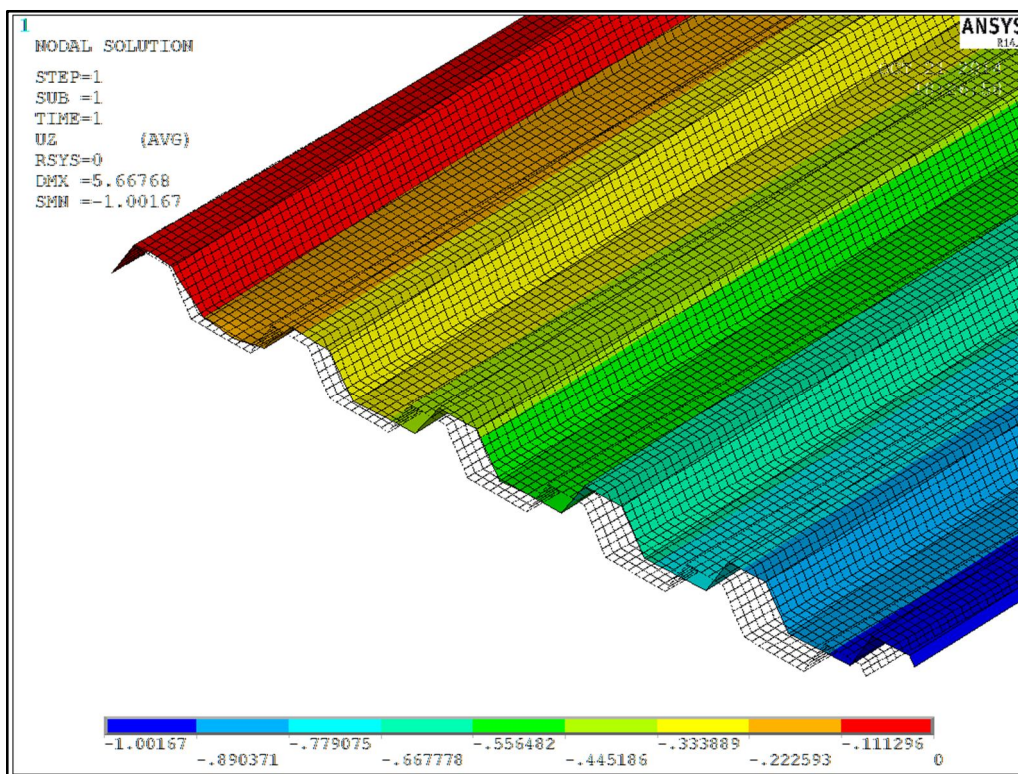


32. ábra LTP45 megtámasztási viszonyai

Az elmozdulások az LTP20 esetében 5-szörös (33. ábra), az LTP45 esetében (34. ábra) 40-szeres nagyításban ábrázoltuk, hogy jobban láthatók legyenek a deformációk.



33. ábra LTP20 elmozdulási ábrája



34. ábra LTP45 elmozdulási ábrája

Az egységnyi elmozdulás hatására ébredő reakcióerő alapján számítható a lágyság. Ezeket az értékeket a 22. táblázatban tüntettük fel. A modellel kapott lágysági értékek közel megegyeznek az Eurocode számításban kapott értékekkel, tehát elmondható, hogy a trapézlemez deformációiból adódó lágyságot az Eurocode elegendően pontosan veszi figyelembe.

Lágysági értékek			
Profil	ANSYS [mm/kN]	EC [mm/kN]	Százalékos arány
LTP20	1,885	1,792	105,2%
LTP45	10,922	11,755	92,9%

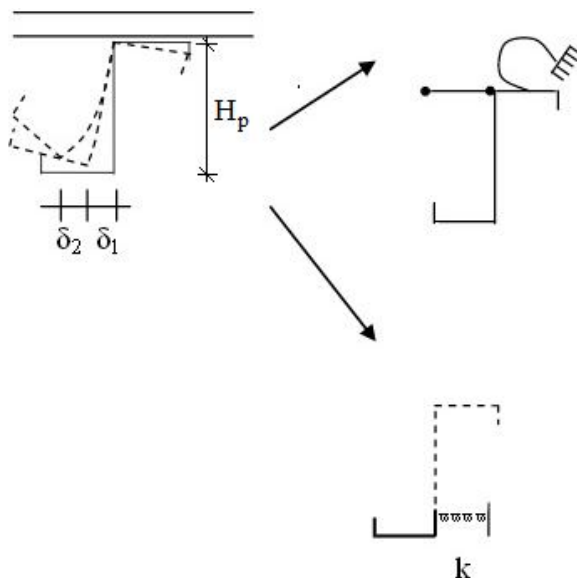
22. táblázat Trapézlemez deformációiból adódó lágyság

4.3.3. Szelemen merevségét figyelembe vevő új tag

A burkolat lágyságának számításához szükséges további tényezők a rögzítő elemek deformációiból, illetve a szelemen axiális igénybevételéből eredő lágyság. Mivel ezek a tagok nehezen ellenőrizhetők, ezért a következő lépésben a számítással és a kísérlettel kapott, egész tetőre vonatkozó lágysági értékeket hasonlítjuk össze. A 19. táblázat szerint, az Eurocode alapján számított és a kísérletben kapott értékek közötti legnagyobb különbség ~ 65%.

Ez a hiba abból adódhat, hogy az Eurocode a merevség meghatározása során nem veszi figyelembe, hogy a profilméreték növelésével a trapézlemezek súlypontja egyre távolabb kerül a tetőgerenda felső szélétől, így a merevítő hatása csökken.

Előzetes kutatási eredmények [9] alapján elmondható, hogy a szelemen merevségéből számított helyettesítő rugóállandó megfelelően közelíti a számítás és a kutatásban alkalmazott végeselemes modell közti különbséget. A szelemen merevsége kétfajta viselkedésből tevődik össze: a szelemen effektív keresztmetszetének hajlítási merevségéből, és a megmaradó alsó övre és gerincdarabra vonatkoztatott helyettesített rugómerevségből (35. ábra). A feltételezés szerint a szelemen felső effektív keresztmetszete ($\frac{5}{6} H_p$) az, ami hozzájárul a teljes rendszer lágyságához [9].



35. ábra Szelemen jellemző alakváltozásai [9]

A szelemen merevségét figyelembe vevő új tag:

$$c_{3.2.c} := \frac{4 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \left(H_p - \frac{H_p}{6} \right)^2 \cdot \left(H_p - \frac{H_p}{6} + \frac{B_{1.p}}{2} \right)}{a \cdot E \cdot t_p^3}$$

A fél tetőn lévő burkolat légysága az új tag figyelembevételével:

PE-R (6)									
		c _{1.1}	c _{1.2}	c _{2.1}	c _{2.2}	c _{2.3}	c ₃	c _{3.2}	EC [mm/kN]
Z150	LTP45	0,936	0,023	0,017	0,084	0,183	0,188	1,946	5,250
	LTP20	0,148	0,021	0,011	0,045	0,165	0,188	1,946	3,112
Z200	LTP45	0,936	0,023	0,017	0,084	0,183	0,100	2,003	5,219
	LTP20	0,148	0,021	0,011	0,045	0,165	0,100	2,003	3,081

23. táblázat Fél tető légysága, a szelemen hajlítási merevségét figyelembe véve

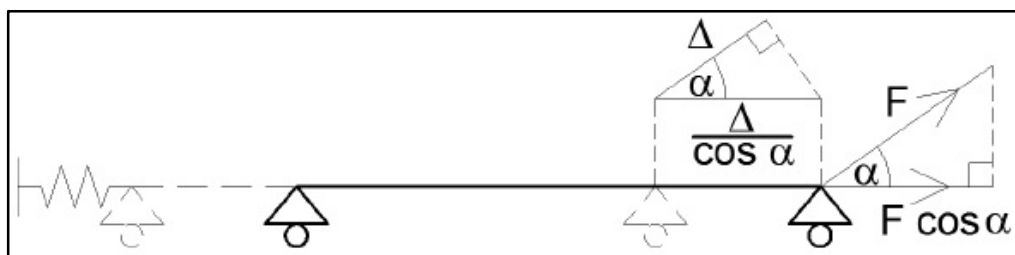
Ezek az értékek a fél tetőre értelmezendők, a teljes tető légyságát az értékek felezésével kapjuk meg. Ezzel a lépéssel, a számított légyságok sokkal nagyobbra adódtak a valós légyságoknál. (24. táblázat) Az LTP45-höz tartozó számított légysági értékek nagyobb kiugrást mutatnak, az LTP20 trapézlemezhez tartozó légysági értékeknél. Ez igaz a Z150 és Z200 szelemenekhez tartozó légysági értékekre is (a Z150 eltérése nagyobb). Az átlagos abszolút eltérés 0,513 mm/kN, a relatív eltérés 49,3%.

PE-R (6-6a)					
		EC [mm/kN]	EC módosított [mm/kN]	Kísérlet [mm/kN]	Összehasonlítás [%]
Z150	LTP45	1,652	2,625	1,416	185,33%
	LTP20	0,583	1,556	1,293	120,35%
Z200	LTP45	1,608	2,610	1,616	161,53%
	LTP20	0,539	1,540	1,515	101,66%
Z200(a)	LTP45	0,497	1,499	0,964	155,45%
	LTP20	0,321	1,322	1,267	104,33%

24. táblázat Burkolat számított és kísérlettel meghatározott légysági értékei

4.3.4. Tető hajlásszögének figyelembe vétele

Az Eurocode a burkolat légyságának meghatározása során nem veszi figyelembe a tető hajlásszögét. Magastetők esetében azonban ez elengedhetetlen, ennek hiányában a valóságtól számottevően eltérő értékeket kapunk. A tető ferdeségét a 36. ábrán látható módon vehetjük figyelembe:



36. ábra Tető ferdeségének figyelembevétele [7]

Ahol:

F – terhelő erő [kN]

Δ – erő irányú elmozdulás komponens [m]

Tehát a tető ferdeségét figyelembe véve a teljes burkolat lágysága a következőképpen számítható [7]:

$$c_{ferde} = c_{diafragma} * \cos^2 \alpha$$

A tető hajlásszögének figyelembevételével kapott lágysági értékeket a 25. táblázat tartalmazza. A számított és a kísérlettel meghatározott értékek legnagyobb eltérése még mindig ~ 65%, azonban az átlagos abszolút eltérés már csak 0,381 mm/kN, a relatív eltérés 35,3%.

PE-R (6-6a)					
		EC [mm/kN]	EC módosított [mm/kN]	Kísérlet [mm/kN]	Összehasonlítás [%]
Z150	LTP45	1,460	2,320	1,416	163,8%
	LTP20	0,515	1,375	1,293	106,3%
Z200	LTP45	1,421	2,306	1,616	142,7%
	LTP20	0,476	1,361	1,515	89,8%
Z200(a)	LTP45	0,440	1,325	0,964	137,4%
	LTP20	0,283	1,168	1,267	92,2%

25. táblázat Burkolat számított és kísérlettel meghatározott lágysági értékei a tetőhajlást figyelembe véve

4.3.5. Szelemen merevségét figyelembe vevő tag módosítása

A szelemenek merevségéhez hozzájárul a trapézlemez megtámasztás elfordulási merevsége, tehát a $c_{3,2}$ tagban ezt is figyelembe kell venni [10]. A számításaink során azt kaptuk, hogy a rugós megtámasztás figyelembevételével a szelemen effektív magasságát nem kell csökkenteni. Továbbá, hogy a szelemen hozzáadott merevsége függ a szelemenek és a csavarok számától. Ennek számítási módja, az Eurocode-ban használt rövidítésekkel:

Szelemen hajlításából adódó lágyág:

$$\frac{1}{K} = \frac{4(1-\nu^2)h^2(h_d + b_{\text{mod}})}{Et^3} + \frac{h^2}{C_D}$$

Elfordulás ellen megtámasztó rugómerevség:

$$C_D = \frac{1}{(1/C_{D,A} + 1/C_{D,C})}$$

Elfordulás elleni rugómerevség a trapézlemez hajlítási merevségéből:

$$C_{D,C} = \frac{k E I_{\text{eff}}}{s}$$

Elfordulás elleni rugómerevség a trapézlemez és szelemen kapcsolatából:

$$C_{D,A} = C_{100} \cdot k_{ba} \cdot k_t \cdot k_{bR} \cdot k_A \cdot k_{bT}$$

A trapézlemez és szelemen kapcsolatából adódó elfordulás elleni rugómerevség számításához szükséges tényezők:

$$k_{ba} = (b_a / 100)^2 \quad \text{if } b_a < 125 \text{ mm};$$

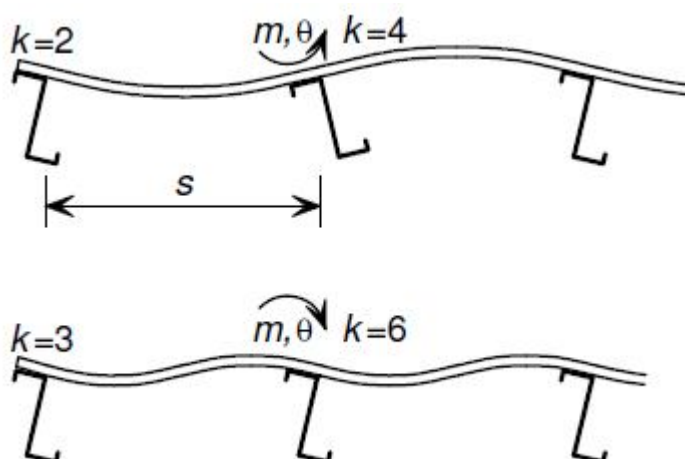
$$k_t = (t_{\text{nom}} / 0,75)^{1,5} \quad \text{if } t_{\text{nom}} < 0,75 \text{ mm};$$

$$k_{bR} = 1,0 \quad \text{if } b_R \leq 185 \text{ mm};$$

$$k_A = 1,0$$

$$k_{bT} = \sqrt{\frac{b_{T,\text{max}}}{b_T}}$$

Mivel 0,75 mm-nél vékonyabb trapézlemez esetére nem ad számítási formulát az Eurocode, ezért ezt felvettük 1,0-ra:



37. ábra C_{DC} számításához szükséges k tényező [10]

Példa a szelemen hajlításából adódó lágyság számítására (Z150-LTP20 esetére, a 4.2. fejezetben definiált jelölésekkel):

Trapézlemez effektív másodrendű nyom atéka, 1 m szélességre vonatkozóan:

$$I_{\text{eff}} := 23.12 \frac{\text{mm}^4}{\text{m}}$$

Elmozdulási alaktól függő tényező:

$$k := 6$$

Trapézlemez szelemenhez rögzített övének szélessége:

$$l_{2t} = 64.2 \cdot \text{mm}$$

Burkolat kialakításától függő tényezők:

$$b_{T,\text{max}} := 120 \text{ mm}$$

$$C_{100} := 2 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

Trapézlemez egységnyi hosszra eső keresztmetszeti területe:

$$A_t := 0.537 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

Burkolatról a gerendára áthatódó függőleges erő:

$$A_1 := A_p \cdot \frac{a}{2} \cdot 78.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot \frac{n_p}{b_1} + A_t \cdot a \cdot 78.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 0.504 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

A trapézlemez és szelemen kapcsolatából adódó elfordulás elleni rugómerevség számításához szükséges tényezők:

$$k_{bR} := 1.0$$

$$k_{ba} := \left(\frac{\frac{B_{1,p}}{\text{mm}}}{100} \right)^2 = 0.168$$

$$k_t := \left(\frac{\frac{t_t}{\text{mm}}}{0.75} \right)^{1.5} = 0.544$$

$$k_A := 1$$

$$k_{bT} := 1$$

Elfordulás elleni rugómerevség a trapézlemez és szelemen kapcsolatából:

$$C_{DA} := C_{100} \cdot k_{ba} \cdot k_t \cdot k_{bR} \cdot k_A \cdot k_{bT} = 183.004 \text{ N}$$

Elfordulás elleni rugómerevség a trapézlemez hajlítási merevségéből:

$$C_{DC} := \frac{k \cdot E \cdot I_{\text{eff}}}{b_1} = 19.421 \text{ N}$$

Elfordulás elleni megtámasztó rugómerevség:

$$C_D := \frac{1}{\frac{1}{C_{DC}} + \frac{1}{C_{DA}}} = 17.558 \text{ N}$$

$$\text{Szelemen hajlításából adódó lágyság: } c_{3,2} := \frac{4 \cdot (1 - \nu^2) \cdot (H_p)^2 \cdot \left(H_p + \frac{B_{1,p}}{2} \right)}{n_p \cdot a \cdot E \cdot t_p^3} + \frac{(H_p)^2}{\frac{a}{2d_t} \cdot n_p \cdot a \cdot C_D} = 1.427 \cdot \frac{\text{mm}}{\text{kN}}$$

Az új szelemen-merevség képlet alapján számított lágyságok ($c_{3,2}$):

PE-R (6-6a)		
Szelemen	Trapéz- lemez	$c_{3,2}$ [mm/kN]
Z150	LTP45	0,662
	LTP20	1,427
Z200	LTP45	0,997
	LTP20	2,121
Z200(a)	LTP45	0,69
	LTP20	2,097

26. táblázat Szelemen merevségéből származó diafragma lágyságok

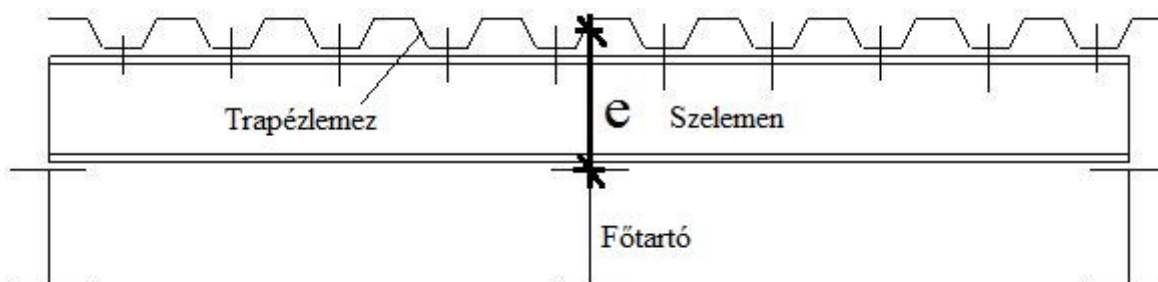
A rugós megtámasztás figyelembevételével számított lágysági értékeket a 27. táblázatban tüntettük fel. A legnagyobb eltérés lecsökkent 24%-ra. Az átlagos abszolút eltérés 0,185 mm/kN, a relatív eltérés 15,9%.

PE-R (6-6a)				
Szelemen	Trapéz- lemez	Számított [mm/kN]	Kísérlet [mm/kN]	Százalékos arány
Z150	LTP45	1,752	1,416	123,7%
	LTP20	1,145	1,293	88,6%
Z200	LTP45	1,861	1,616	115,2%
	LTP20	1,413	1,515	93,3%
Z200(a)	LTP45	0,744	0,964	77,2%
	LTP20	1,210	1,267	95,5%

27. táblázat Burkolat merevsége a rugós megtámasztás figyelembevételével

4.3.6. Külpontosság figyelembe vétele

Az előzőekben ismertetettek (4.3.3. fejezet) szerint a burkolat lágysága függ a trapézlemez külpontosságától. Ezt ábrázolja a 38. ábra: a trapézlemez súlypontjának távolsága a gerenda felső övétől.



38. ábra Trapézlemez külpontossága

Ennek megfelelően módosítjuk a $c_{3.2}$ tagot, ami figyelembe veszi a külpontosság kedvezőtlen hatását is:

$$c_{3.2} := \frac{4 \cdot (1 - \nu^2) \cdot (H_p)^2 \cdot \left(H_p + \frac{B_{1,p}}{2} \right)}{n_p \cdot a \cdot E \cdot t_p^3} + \frac{e_{tr} \cdot H_p}{\frac{a}{2d_t} \cdot n_p \cdot a \cdot C_D}$$

Az így kapott szelemen merevségét és külpontosságát figyelembe vevő diafragma lágyságok ($c_{3.2}$)

PE-R (6-6a)		
Szelemen	Trapéz-lemez	$c_{3.2}$ [mm/kN]
Z150	LTP45	0,822
	LTP20	1,715
Z200	LTP45	1,153
	LTP20	2,483
Z200(a)	LTP45	0,763
	LTP20	2,454

28. táblázat Szelemen merevségéből származó diafragma lágyságok

A trapézlemez külpontosságát is figyelembe vevő, egész tetőre értelmezett lágysági eredmények:

PE-R (6-6a)				
Szelemen	Trapéz-lemez	Számított [mm/kN]	Kísérlet [mm/kN]	Százalékos arány
Z150	LTP45	1,823	1,416	128,7%
	LTP20	1,273	1,293	98,4%
Z200	LTP45	1,930	1,616	119,5%
	LTP20	1,573	1,515	103,8%
Z200(a)	LTP45	0,777	0,964	80,5%
	LTP20	1,368	1,267	107,9%

29. táblázat Burkolat merevsége a számítási eljárásunkkal

A külpontosság figyelembevételével a legnagyobb eltérés ~ 30%, az átlagos abszolút eltérés a kísérleti eredményektől már csak 0,181 mm/kN, a relatív eltérés 16,6%. Ez az érték kevesebb, mint 1 %-kal nagyobb, mint az előző esetben, ez adódhat a mérési pontatlanságból. Ez a számítási formula azonban tartalmazza a külpontosság hatását is, ami a valós viselkedést jobban leírja. Az eredmények alapján elmondható, hogy az általunk megadott számítási eljárás pontosabb eredményeket ad az Eurocode számításához képest.

4.3.7. Teljes csarnok lágysága külső burkolat alkalmazása esetén

A teljes csarnokra vonatkozó lágyságot a következő összefüggéssel számíthatjuk:

$$C_{csarnok} = \frac{1}{\frac{1}{c_{keret}} + \frac{1}{c_{burkolat}}}$$

A képlet alapján számított, a csarnok egészére vonatkozó lágysági értékek:

Keret PE-R (6-6a)				
Szelemen	Trapéz-lemez	Számított [mm/kN]	Kísérlet [mm/kN]	Százalékos arány
Z150	LTP45	0,724	0,663	109,2%
	LTP20	0,619	0,622	99,4%
Z200	LTP45	0,740	0,674	109,8%
	LTP20	0,681	0,656	103,8%
Z200(a)	LTP45	0,472	0,526	89,7%
	LTP20	0,639	0,657	97,3%

30. táblázat Keret lágysága külső burkolattal

A c_{keret} a kísérletek alapján számított keret lágyság. A $c_{burkolat}$ pedig a c_1 , c_2 és c_3 tényezőkkel számított lágyság az Eurocode módosítása alapján. A maximális eltérés 10,3%, az átlagos abszolút eltérés 0,038 mm/kN, a relatív eltérés 7,2%, ami egy jó közelítést jelent.

4.3.8. Belső és külső burkolatot tartalmazó kialakítás esete

Az előző számítások alapján végeztük a dupla trapézlemezt tartalmazó burkolat lágyságának számítását is. Azonban ez a kialakítás kétszer annyi trapézlemezt tartalmaz, amit a burkolat deformációiból adódó lágyságok ($c_{1.1}$ és $c_{1.2}$) számításában vettünk figyelembe. Ezeknek a tagoknak az értékét feleztük, ami kétszeres hozzáadott merevséget jelent (31. táblázat).

PEI-R (7-7a)									
[mm/kN]		$c_{1.1}$	$c_{1.2}$	$c_{2.1}$	$c_{2.2}$	$c_{2.3}$	c_3	$c_{3.2}$	Számított
Z150	LTP45	0,468	0,012	0,017	0,084	0,183	0,188	0,822	2,584
	LTP20	0,074	0,011	0,011	0,045	0,165	0,188	1,715	2,358
Z200	LTP45	0,468	0,012	0,017	0,084	0,183	0,100	1,153	2,798
	LTP20	0,074	0,011	0,011	0,045	0,165	0,100	2,483	2,959
Z200(a)	LTP45	0,059	0,012	0,008	0,043	0,165	0,100	0,763	1,397
	LTP20	0,013	0,011	0,005	0,022	0,142	0,100	2,454	2,683

31. táblázat Dupla trapézlemez burkolat lágysági értékei fél tetőre vonatkozóan

A dupla trapézlemez burkolat lágysági értékeit az egész tetőre vonatkozóan a 32. táblázat tartalmazza. A legnagyobb eltérés 22%. Az átlagos abszolút eltérés 0,103 mm/kN, a relatív eltérés 10,8%. Tehát a számítás erre az esetre is jól használható.

PEI-R (7-7a)					
		EC [mm/kN]	Számított [mm/kN]	Kísérlet [mm/kN]	Százalékos arány
Z150	LTP45	0,929	1,292	1,254	103,0%
	LTP20	0,421	1,179	1,221	96,6%
Z200	LTP45	0,890	1,399	1,529	91,5%
	LTP20	0,383	1,480	1,373	107,7%
Z200(a)	LTP45	0,361	0,699	0,893	78,2%
	LTP20	0,257	1,342	1,233	108,8%

32. táblázat Dupla trapézlemez burkolat légysága egész tetőre vonatkozóan

Az egész csarnokra vonatkozó légysági értékeket a következő táblázat tartalmazza:

Csarnok PEI-R (7-7a)				
Szelemen	Trapéz- lemez	Számított [mm/kN]	Kísérlet [mm/kN]	Százalékos arány
Z150	LTP45	0,622	0,602	103,4%
	LTP20	0,595	0,623	95,5%
Z200	LTP45	0,646	0,658	98,1%
	LTP20	0,663	0,673	98,4%
Z200(a)	LTP45	0,442	0,504	87,6%
	LTP20	0,634	0,644	98,4%

33. táblázat Egész csarnokra vonatkozó légysági értékek

A legnagyobb eltérés 12%, az átlagos abszolút eltérés 0,024 mm/kN, a relatív eltérés 5,7%.

5. Összefoglalás

A tető, a falak és a földem igen hatásos együtt dolgozó diafragma merevítést biztosítanak. A diafragma hatásossága teljes léptékű kísérletekkel és használatban lévő épületeken keresztül is bizonyított. Ha figyelmen kívül hagyjuk a diafragma hatást, az épület tervezett viselkedése ellentmondásba kerülhet a valóssal. Ennek következtében egyes szerkezeti elemek, részek túlterheltté válhatnak, mivel nagyobb a valódi merevségük a figyelembe vettnél. Ezáltal nem tervezett nyírási terheket vonz magához. A pontos erőjáték tervezéséhez, illetve meghatározásához tehát szükséges ismerni a burkolat merevítő hatásának mértékét.

Az acél csarnokok tervezésére számos előírás és ajánlás található az európai szabványokban. Az Eurocode tartalmazza az acél trapézlemez burkolat merevítő hatását figyelembevevő számítási eljárást. Azonban az újabb kutatási eredmények azt mutatják, hogy a formula további pontosítást igényel.

A kísérletek alapján levonható következtetések: a tetőben elhelyezett szélrácsok hozzáadott merevsége 0,452 és 0,785 kN/mm között változik, míg a szelemenek és a burkolat együttes hozzáadott merevsége 0,504-0,904 kN/mm. Tehát a burkolat merevsége hozzávethető a szélrács merevségéhez, elhanyagolásával egyes esetekben ténylegesen hibát véthetünk. Kevésbé földrengés veszélyeztetett területeken a szélrácsok akár ki is válthatóak a burkolattal.

Kísérleteink alapján egyértelműen kimutatható, hogy a trapézlemez együttdolgoztatja a keretállásokat. Általánosságban elmondható, hogy csak külső burkolat elhelyezése esetén a profilméret növelésével a merevség csökken. Tehát a külponosság növekedése nagyobb hatással bír a merevségre, mint a keresztmetszet növekedése. Ezen a lerögzítések száma változtatható. Ha minden völgyben lerögzítjük a trapézlemez burkolatot, ezzel csökkentjük annak deformációját, a trapézlemez magasságának növelésével a burkolat merevsége is nőni fog.

Külső trapézlemez burkolat alkalmazása minimum másfélszeresére növeli a csarnok merevségét. További belső burkolat elhelyezése azonban egy nagyságrenddel kisebb merevség-növekményt eredményez. A kétszeres csavarmennyiség 20-70%-kal növelte a merevséget.

Mivel rugalmas állapotban vizsgáltuk a szerkezetet, ezért az egyes szerkezeti elemek merevségét egyszerű additív/eliminatív módon számolhattuk. A különböző méretű szelemenek merevítő hatása között nem tapasztalható nagyobb mértékű eltérés. Azonban a magasabb szelemennel rögzített trapézlemez merevítő hatása kisebb, a kisebb szelemennel rögzítettéhez képest.

Kutatásunk további célja az Eurocode angol nyelvű ajánlásának módosítása és kiegészítése volt, a burkolat merevítő hatását illetően.

Először a burkolat deformációjából adódó lágyságot figyelembe vevő tényezőt vizsgáltuk meg. Ehhez vége-selemes modellt készítettünk a trapézlemezekről, és azt kaptuk, hogy a tényező megfelelően pontos.

A következő tényezőről, mely a szelemen merevségét veszi figyelembe, azonban nem mondható el ugyanez. A jelenleg érvényben lévő Eurocode szabvány nem veszi figyelembe a szelemen hajlítási merevségét, ami nagymértékben befolyásolja az eredményt. A szelemen hajlítási merevségének megállapításánál figyelembe vettük azok rugós megtámasztását.

Az Eurocode a merevség meghatározása során nem veszi figyelembe, hogy a profilméretek növelésével a trapézlemezek súlypontja egyre távolabb kerül a tetőgerenda felső szélétől, így a merevítő hatása csökken. Továbbá, hogy a szelemen gerincmagasságának növekedésével a stabilitási ellenállása csökken. Ezen a belső burkolat változtatható, ami megtámasztja az alsó

övet, így meggátolja a szelemen kifordulását. A szabványt ezen a ponton korrigáltuk, hogy a képletben a külpontosság mértéke is szerepeljen.

Tehát a szelemenek merevségét és megtámasztását figyelembevevő új tag számítása:

$$c_{3.2} := \frac{4 \cdot (1 - \nu^2) \cdot (H_p)^2 \cdot \left(H_p + \frac{B_{1p}}{2} \right)}{n_p \cdot a \cdot E \cdot t_p^3} + \frac{e_{tr} \cdot H_p}{n_s \cdot n_p \cdot a \cdot C_D}$$

Ez a tag függ a szelemen magasságától (H_p), a szelemen felső övének szélességétől (B_{1p}), a szelemenek számától (n_p), hosszától (a), a trapézlemez vastagságától (t_p), a trapézlemez súlypontjának külpontosságától (e_{tr}), a csavarok számától (n_s).

A tető hajlásszögét egy szakirodalomban ismertetett képlet alapján vettük figyelembe;

$$c_{ferde} = c_{diafragma} * \cos^2 \alpha \quad [7]$$

Ezekkel a módosításokkal a számítási eredmények átlagos abszolút eltérést 0,557 mm/kN-ról 0,181mm/kN-ra, a relatív eltérést 50,6%-ról 16,6%-ra csökkentettük.

Ugyanezt a számítási módszert használtuk a külső és belső burkolat alkalmazása esetén is. A burkolat deformációiból adódó lágysági értékek felezésével vettük figyelembe, hogy kétszerannyi burkolat került elhelyezésre a csarnokon. Ezek az eredmények is maximum 22%-os eltérést mutattak. A duplaburkolatú kialakítások esetén az átlagos abszolút eltérés 0,103 mm/kN-ra, a relatív eltérést 10,8%-ra adódott.

Az egész csarnokszerkezetre vonatkozó lágyság a következő módon számítható:

$$C_{csarnok} = \frac{1}{\frac{1}{C_{keret}} + \frac{1}{C_{burkolat}}}$$

Célkitűzéseinknek megfelelően sikerült megállapítani az egyes szerkezeti elemek merevítő hatásának mértékét, illetve az egyes konfigurációk közötti merevségkülönbséget. Pontosítottunk az Eurocode számítási eredményein, és adtunk számítási ajánlást a külső és belső burkolatot egyaránt tartalmazó kialakítás esetére, illetve az egész csarnokra vonatkozóan. Acélsarnokok tervezése során, a trapézlemez burkolat merevségét az általunk módosított és kiegészített képletek alapján nagyobb pontossággal lehet meghatározni.

További, pontosabb modellen alapuló kutatások és kísérletek végezhetők, más paraméterű burkolatok merevségének meghatározására.

Köszönetnyilvánítás

Először is köszönjük mindazoknak, akik segítettek és támogatták a kutatásunkat.

Külön köszönetet szeretnénk mondani:

- BME Hidak és Szerkezetek Tanszéknek, hogy eredményeiket felhasználhattuk
- BME Hidak és Szerkezetek Tanszék labor minden dolgozójának, akik segítették munkánkat

Szeretnénk megköszönni konzulenseinknek, Dr. Dunai Lászlónak és Dr. Joó Attila Lászlónak a támogatásukat és szakmai segítségüket.

6. Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Torsten Höglund, Stabilisation by stress skin diaphragm action, AB C O Ekblad & Co. 2002
- [2] MSZ-EN-1993-1-3-2007: Kiegészítő szabvány hidegen alakított elemekre, 2007
- [3] Papp Ferenc, Magasépítési acélszerkezetek előadás – Másodlagos szerkezeti elemek tervezése, 2013
- [4] Risto Siirilä, Frames, Bracings and Diaphragms, Helsinki University of Technology: Industrial Buildings, 2004
- [5] European Recommendations for the Application of Metal Sheeting acting as a Diaphragm – Stressed Skin Design, ECCS (European Convention for Constructional Steelwork), 1995
- [6] Michael Davies, Developments in stressed skin design, Elsevier, 2006
- [7] Radnay László: Meglévő acél keretszerkezetek határállapotainak vizsgálatai PhD értekezés (A merevítő rendszer átalakítása, a burkolat hatása), 2014 tavasz
- [8] Wei-Wen Yu, Roger A. LaBoube, Cold-Formed Steel Design, John Wiley & Sons, Inc. ISBN 978-0-47076-7, 2010
- [9] Schaul Péter, Trapézlemezes burkolat merevségének hatása acél csarnokok viselkedésére, MSc diplomamunka, BME, 2013
- [10] MSZ-EN-1993-1-3-2006: General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheeting, ISBN 0 580 49665 1
- [11] ANSYS Academic, Release 14.5