



BUDAPESTI MŰSZAKI
ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
Építőmérnöki Kar - építőmérnöki képzés 1782 óta

Könnyűszerkezetes burkolati rendszerek kiterjesztett alkalmazása acél csarnokok globális stabilizálására

c. PhD disszertáció tézisei

LENDVAI Anita

Építőmérnöki Kar

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Témavezető:

Dr. JOÓ Attila László

Egyetemi Docens

Budapest

2020

Tartalom

1.	Bevezetés.....	2
1.1.	Problémafelvetés és célkitűzés	2
1.2.	Nyírási engedékenység	3
2.	A nyírási engedékenységet vizsgáló kutatási program összefoglalása	4
2.1.	Teljesléptékű kísérletsorozat.....	4
2.2.	Panelkísérletsorozat	6
2.3.	Csomóponti kísérletek	9
2.4.	Numerikus analízis a nyírási engedékenység meghatározására	10
2.5.	A “stressed skin design” méretezési eljárás továbbfejlesztése.....	12
3.	Új tudományos eredmények	15
3.1.	A PhD disszertáció tézisei angolul	15
3.2.	A PhD disszertáció tézisei magyarul	16
4.	További kutatási irányok	18
5.	A témához kapcsolódó publikációk.....	19

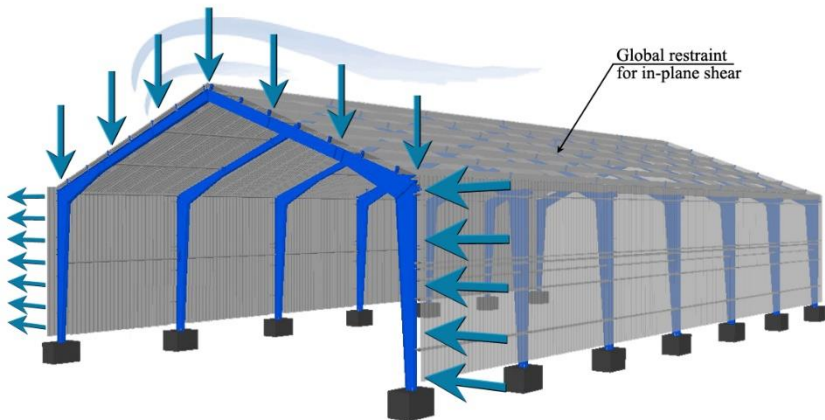
1. Bevezetés

1.1. Problémafelvetés és célkitűzés

A burkolati rendszerek napjainkban egyre szélesebb körben elterjedtek könnyű szerelhetőségüknek köszönhetően, gazdaságos megoldásnak bizonyulnak épületek burkolására. Ezen rendszerek fejlődésével szükségszerűvé vált a kapcsolódó méretezési eljárások fejlesztése, amelyek közül jelen disszertáció olyan területre fókuszál, amelyre vonatkozóan méretezési eljárás nem létezik.

Köztudott, hogy szelemből és trapézlemezéből álló burkolati rendszerek (ún. diafragmák) jelentős merevséggel rendelkeznek a síkjukban ható erőkkel szemben, mely hatást “stressed skin effect”-nek nevezzük. Korábbi kutatási eredmények igazolják, hogy jelentős anyagi megtakarítások érhetőek el abban az esetben, ha a szerkezetek stabilizálására diafragmák kerülnek alkalmazásra szélrácsok helyett. A hatással kapcsolatos legújabb tanulmányok eltéréseket mutattak a tervezési eljárás analitikus eredményei, valamint a kísérleti eredmények között, ezért szükségszerű az eljárás további vizsgálata ezen ellentmondások feloldása érdekében.

A disszertáció a burkolati rendszerek globális stabilizáló hatásához kapcsolódó azon méretezési eljárás továbbfejlesztésre fókuszál, melyre jelenleg nem létezik szabványos méretezési eljárás. A kutatás főbb területe a burkolati rendszerek által biztosított globális merevítőhatás vizsgálata, különös tekintettel a ECCS nyírási engedékenységre vonatkozó méretezési eljárás kiterjesztésére a gyakorlatban sűrűn alkalmazott, nem szabványos diafragmák esetére, mely a jelenlegi méretezési eljárás hatályán kívül esik (1. ábra).



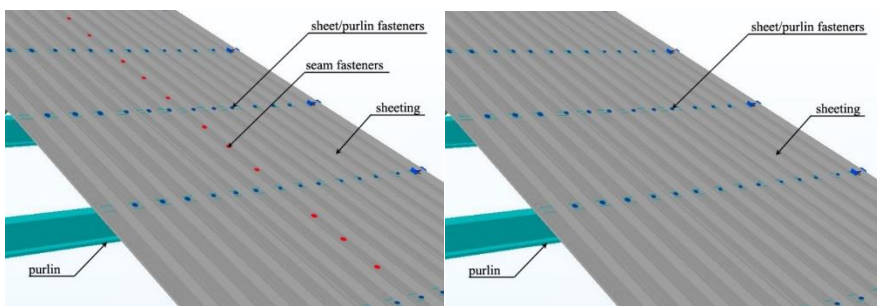
1.ábra: A disszertáció által vizsgált kutatási terület

1.2. Nyírási engedékenység

Nemzetközi kutatások diafragmák nyírási merevségével kapcsolatban a 20. század közepétől kezdődtek. A hatás figyelembevételével az épület merevítése bizonyos esetekben el is hagyható, így a panelmerevség pontos számításának gazdaságossági előnye is lehet. Korábbi kutatásaink alapján meghatároztuk a meglévő ECCS számítási eljárásának hiányosságait, melyek nem veszik figyelembe a növekvő szelemen- és trapézlemez keresztmetszetek merevség csökkentő hatását, ami a nagyobb külpontosság miatt következik be

A burkolat merevítőhatásával kapcsolatos első kutatásokat Bryan végezte a 20. sz. közepén, valamint ő alkotta meg az első nyírási engedékenységre vonatkozó méretezési eljárást is 1972-ben, amely később több szabványos méretezési eljárás alapját is képezte. A hatás figyelembevétele a méretezési eljárás során több komponens számítását igényli: trapézlemez, szelemen, valamint ezen szerkezeti elemek közti kötőelemek nyírási engedékenységét. A szabványok fejlesztése óta a csarnokok nagyobbak, rugalmasabbak lettek, a burkolati rendszerek fejlettebbek, és integráltak az elsődleges teherhordó szerkezettel, így a szabványos eljárások felülvizsgálatra szorulnak, és adott esetben az új konfigurációk már nem felelnek meg a jelenleg hatályos szabványos méretezési eljárásoknak.

Az ECCS méretezési eljárás szerint a “stressed skin design” módszer néhány szükséges alapfeltétel teljesítése esetén alkalmazható, melyek közül az egyik az átlapolásra alkalmazott rögzítőelemek legfeljebb 500 mm-enkénti elhelyezése. Napjainkban Magyarországon gyakran kiviteleznek burkolati rendszereket átlapolásos rögzítőelemek alkalmazása nélkül, a továbbiakban ezen konfigurációkat “nem szabványos” konstrukcióknak nevezem. A gyakorlati, ipari alkalmazás kiemeli az ECCS méretezési eljárás kiterjesztésének fontosságát, mivel ezen nem szabványos diafragmák nyírási engedékenysége sem elhanyagolható. A különbséget a szabványos és nem szabványos nyírt panelek között a [2. ábrán](#) szemléltettem.



2. ábra: Szabványos (bal) és “nem szabványos” (jobb) nyírt panelek

A szerző ismeretei szerint nem létezik kutatás nem szabványos diafragmák nyírási engedékenységre vonatkozóan, habár Európában ezek népszerű és széles körben alkalmazott konstrukciók.

A hatás vizsgálata érdekében laboratóriumi kísérleteket és numerikus analízist hajtottam végre annak érdekében, hogy a nem szabványos nyírt diafragmák nyírási engedékenységét befolyásoló fő paramétereket meghatározzam. A kutatás elsődleges célja a jelenleg hatályos szabványos ECCS méretezési javaslat értelmezési tartományának kiterjesztése, illetve módosított méretezési eljárás fejlesztése a nem szabványos diafragmák nyírási engedékenységének számítására.

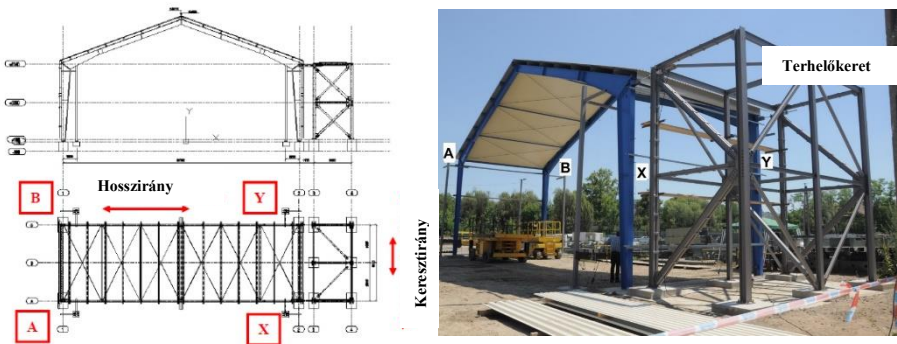
2. A nyírási engedékenységet vizsgáló kutatási program összefoglalása

2.1. Teljesléptékű kísérletsorozat

A kutatás első lépéseként teljesléptékű kísérletsorozat került végrehajtásra a globális merevséget befolyásoló paraméterek analizésére, mely során az eredmények kiértékelését végeztem el. A teljesléptékű kísérleti elrendezés a [3.ábrán](#) látható. A kísérleti elrendezésben a vizsgált keretállások mellett terhelő keret került kivitelezésre, amely a keretállások jobb oldali oszlop tetőpontjára vízszintes erőt fejtett ki. A terhelés során 2 sajtót alkalmaztak, mellyel az egyik keretállást a keret irányában terhelték (nyomás), ugyanakkor a másik keretállást ezzel ellentétes irányba (húzás). Minden kísérlet rugalmas tartományban került végrehajtásra. A helyszínen 116 konfigurációt teszteltek, mely során a két keretállásos épület globális merevségét határozták meg az oszlop tetőpontjainak elmozdulásaiból.

A kísérletek során a következő paramétereket mérték:

- az oszlop tetőpontok hossz- és keresztirányú elmozdulásai ([3. ábra](#)),
- a terhelőkerethez közelebbi szélrácsokban keletkező feszültségek,
- a terhelőkeret hosszirányú elmozdulásai, merevségének igazolására.



3.ábra: Kísérleti elrendezés és a mérőberendezés elhelyezkedése

A következő paramétereket változtatták a kísérleti konfigurációkban:

- szélrács alkalmazása vagy elhagyása (W),

- szelemen alkalmazása (P): szelvényméretek Z150/1.5 falban és Z200/1.5 tetőn, vagy Z200/2.0 falban és Z250/2.0 tetőben, (Z magasság/vastagság),
- trapézlemez alkalmazása: külső vagy belső oldali (E vagy I), keresztmetszeti méretek LTP20/0.5 vagy LTP45/0.5, (LTP –Lindab LKft. terméke, magasság/vastagság),
- leerősítések száma minden, vagy minden 2. völgyben.

A kísérleti eredmények kiértékelése során következtetéseket vontam le a szelvényméret (szelemen és trapézlemez), leerősítésszám, és a szerkezeti elemek alkalmazásának globális merevséget befolyásoló hatásaival kapcsolatban. A szerkezeti elemek jelenlétével kapcsolatban a kísérleti programban vizsgált konfigurációkban a szelemen, szélrács, trapézlemez és diafragma jelenlétének hatása került kiértékelésre.

A következő lényeges következtetéseket vontam le a kísérletsorozat eredményei alapján:

- A teljes burkolattal rendelkező esetekben a szelemenméret növelése 6-109%-kal növelte a globális engedékenységet. Azokban az esetekben, ahol a szélrácsot elhagyták, ez az engedékenységsökkenés csak 1-55% volt.
- A trapézlemez keresztmetszeti méretének növelése LTP20-ról LTP45-re 53 %-kal növeli a globális engedékenységet.
- A leerősítésszámnak jelentős hatása van a globális engedékenységre. Nagyobb profilmagasságú, LTP45 trapézlemez alkalmazása csökkenti a globális engedékenységet 17-40 %-kal azokban az esetekben, ahol kétszeres mennyiségű csavart alkalmaztak. Ez az intervallum mindösszesen 2-30 % a kisebb profilmagasságú, LTP20 trapézlemez konfigurációknál.
- A szelemenek hatását vizsgálva az épület globális engedékenységére vonatkozóan az eredmények alapján azt a következtetést lehet levonni, hogy a tetőszelemen meglétének nagyobb hatása van a globális engedékenységre, mint a falszelemennek.
- A tetőben alkalmazott szélrács 2-3-szorosára növeli a csarnok merevségét, míg a tetőben és falakban alkalmazott szélrácsok a merevséget 8-10-szeresére növelik.
- Külső és belső oldali trapézlemez alkalmazása 40-78 %-kal csökkenti a globális engedékenységet, amely igazolja a burkolat merevítőhatásának meglétét és fontosságát.
- Belső oldali trapézlemez alkalmazásának kis hatása van a globális engedékenység csökkentésére vonatkozóan, összevetve a külső oldali trapézlemez jelentőségével. Ez az érték 1-5 % közötti kis profilmagasságú (egyidejűleg alkalmazott Z150/1.5 és Z200/1.5) szelemenek alkalmazása esetén, és 1-15 % magasabb profilmagasságú (egyidejűleg alkalmazott Z200/2.0 és Z250/2.0) szelemenek alkalmazásakor.
- A diafragma hatást vizsgálva az eredmények igazolják, hogy nem szabványos esetekben a diafragmák merevítőhatása a szélrács jelentőségével összevethető.

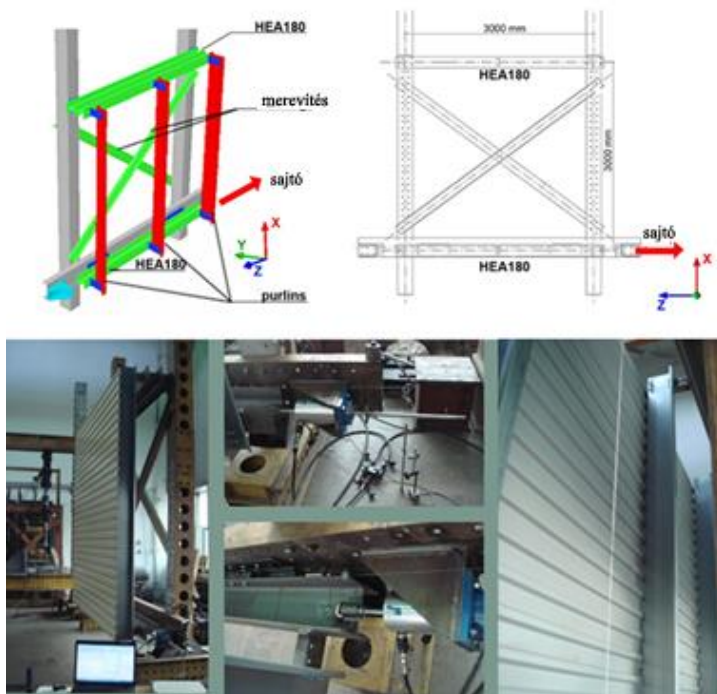
A teljesléptékű kísérlet következtetéseit a további panelkísérletsorozat megtervezéséhez, a nem szabványos diafragmák további vizsgálatára alkalmaztam.

2.2. Panelkísérletsorozat

A nem szabványos diafragmák nyírási engedékenységét befolyásoló paraméterek vizsgálata érdekében panel kísérletsorozatot hajtottam végre, melyben 18 konfigurációt vizsgáltam.

A kísérleti elrendezés a [4. ábrán](#) látható. Az alsó HEA szelvényű gerenda vízszintes irányú elmozdulását a terhelő keret vízszintes gerendáján levő sín mentén tettük lehetővé. A sajtót az alsó HEA gerenda jobb végéhez erősítettük, mellyel a panelekben növekvő teherlépcsőben fejtettünk ki nyíróerőt. A panelkísérletsorozat a következő paraméterek nyírási engedékenységre való hatását vizsgálta: (a) szelemen profilmagasság (b) trapézlemez magasság, (c) leerősítések száma (d), trapézlemez alkalmazása (egyszemélyes vagy dupla trapézlemez konfigurációk). A következő szerkezeti elemek paramétereit változtattam a kísérletek során:

- szelemenméret: Z200/1.5; Z250/2.0; Z300/2.0;
- trapézlemez méret: LTP20/0.5; LTP45/0.5;
- leerősítések száma: minden völgyben, minden 2. völgyben;
- trapézlemez alkalmazása: egyszemélyes- vagy dupla trapézlemez konfigurációk.



4. ábra: Kísérleti elrendezés

A kísérletek során mértem az alsó HEA gerenda vízszintes elmozdulásait, és az ehhez tartozó panel nyíróerőt. A kapott adatsorokat erő-elmozdulás diagramban ábrázoltam. A jellemző tönkremeneteli módokat osztályoztam, és az [5. ábra](#) szerinti jelöléssel láttam el. Minden esetben a tönkremeneteli módok egymással való kombinálódása volt megfigyelhető.

Legtöbb esetben a próbatest tönkremenetele az 'A' típusú tönkremeneteli móddal, a lemezmezők szétnyílásával kezdődött. Merevebb konfigurációkban a tönkremenetel a szelemenvég elcsavarodásával kezdődött ('B' típusú tönkremeneteli mód), amely 'C' vagy 'D' típusú tönkremeneteli móddal, vagyis a lemezszél vertikális vagy horizontális hullámosodásával folytatódott. A végső tönkremenetel a trapézlemez oválsodásával következett be ('E' típusú tönkremeneteli mód). Csavar elnyíródását a kísérletek végrehajtása során nem észleltem.



5. ábra: Jellemző tönkremeneteli módok: A) lemezmezők szétnyílása, B) szelemenvég elcsavarodása C) és D) lemezszél vertikális és horizontális hullámosodása, E) palástnyomási tönkremenetel.

A kísérleti eredmények alapján a nyírási engedékenység értékeit számítottam, majd összevetést végeztem a következők alapján: az [1. táblázatban](#) az egyes konfigurációk különböző nyírási engedékenység értékeit tüntettem fel az egyes teherlépcsők alapján (minimum, maximum és átlag). A legalacsonyabb nyírási engedékenység értékeket a táblázatban vastagon jelöltem. A kísérleti eredmények alapján a következő következtetéseket vontam le:

- A legmerevebb konfigurációk a dupla trapézlemez konstrukciók voltak, magas profilmagassággal (Z250 és Z300). Kétoldali trapézlemez alkalmazása 32-45 %-kal csökkentette a próbatest nyírási engedékenységét.

- Szelemenmagasság növelése 47 %-kal csökkentette az engedékenységet egyoldali trapézlemez konfigurációknál. Abban az esetben, ha kevesebb leerősítést alkalmazunk, a szelemenmagasság növelése nagymértékben növeli a merevséget.
- Azoknál az eseteknél, ahol kisebb szelvényméretű szelemen került alkalmazásra (1-3 és 4-6 sz. konfigurációk), kétszer annyi leerősítésszám alkalmazása hasonló mértékben csökkenti az engedékenységet, mintha egy újabb trapézlemez alkalmaznánk (dupla konfiguráció). Minden völgyben alkalmazott csavarok 45 %-kal csökkentik a engedékenységet, összevetve a minden 2. völgyben leerősített konfigurációk nyírási engedékenység értékeivel.
- Megállapítható, hogy a kisebb profilmagasságú trapézlemez alkalmazása (LTP20) 25-60%-kal csökkentette a panel engedékenységet, összevetve a magasabb profilmagasságú esetek engedékenység értékeivel (LTP45).
- A leerősítésszám jelentősen befolyásolja a nyírási engedékenységet. A leerősítések számát duplázza a nyírási engedékenység 15-54 %-kal csökkenthető.

No.	Szelemen	Trapézlemez	Leerősítésszám völgyben	Trapézlemez alkalmazása	Nyírási engedékenység min., [mm/kN]	Nyírási engedékenység c_{min} max., [mm/kN]	Nyírási engedékenység c_{max} c [mm/kN]	Szórás	
1	Z200/1.5	LTP20/0.5	Minden völgyben	Egyoldali	1.93	2.75	2.31	0.31	
2			2.	Egyoldali	3.29	5.33	4.31	1.02	
3				Dupla	2.62	2.66	2.64	0.02	
4		LTP45/0.5	5	Minden völgyben	Egyoldali	3.26	4.85	3.85	0.54
5				2.	Egyoldali	6.15	7.59	6.97	0.61
6					Dupla	3.69	4.25	3.87	0.17
7	Z250/2.0	LTP20/0.5	Minden völgyben	Egyoldali	1.52	2.32	2.03	0.23	
8			2.	Egyoldali	1.95	2.59	2.37	0.23	
9				Dupla	1.47	1.84	1.63	0.14	
10		LTP45/0.5	5	Minden völgyben	Egyoldali	2.29	3.22	2.72	0.30
11				2.	Egyoldali	4.43	7.70	5.87	1.16
12					Dupla	3.09	3.52	3.29	0.15
13	Z300/2.0	LTP20/0.5	Minden völgyben	Egyoldali	1.41	2.46	1.92	0.26	
14			2.	Egyoldali	1.83	3.10	2.53	0.48	
15				Dupla	1.25	2.01	1.57	0.20	
16		LTP45/0.5	5	Minden völgyben	Egyoldali	2.27	3.08	2.59	0.24
17				2.	Egyoldali	4.71	5.83	5.34	0.38
18					Dupla	2.82	3.57	3.24	0.20

1. táblázat: Kísérlet nyírási engedékenység értékek

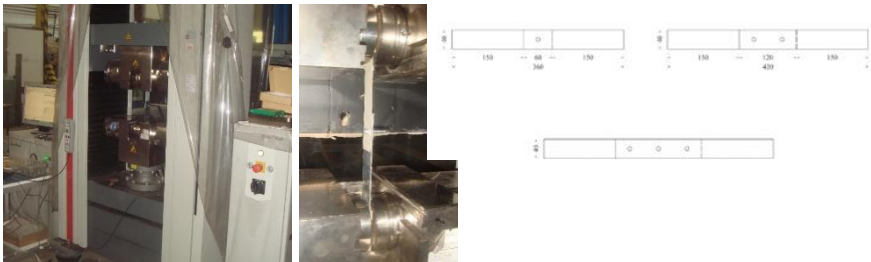
A kísérletek során minden konfiguráció legkisebb, legnagyobb és átlag nyírási engedékenységet kiértékeltem az egyes teherlépcsőkből, melyet az [1. táblázat](#)ban tüntettem fel. A panelkísérletsorozat konklúzióit és eredményeit további numerikus analízis végrehajtására, valamint a “stressed skin design” nyírási engedékenységre vonatkozó méretezési eljárás továbbfejlesztésére, illetve a meglévő eljárás értelmezési tartományának nem szabványos diafragmákkal való kiterjesztésére alkalmaztam.

2.3. Csomóponti kísérletek

A panel kísérletsorozat végrehajtása után csomóponti kísérleteket hajtottam végre a szelemen-trapézlemez kapcsolat nyírási engedékenysége meghatározására, mivel az alkalmazott kötőelemek esetén nem létezett ECCS szerinti ajánlás a kötőelemek megcsúszására vonatkozóan. Három különböző – egy-, két-, és három kötőelemes - egyszernyírt próbatestet terveztem a [6.ábrán](#) látható módon. Összesen 18 kísérletet hajtottam végre, amelyekben az alábbi paramétereket változtattam:

- trapézlemez vastagság [mm]: 0.4; 0.5;
- szelemenvastagság [mm]: 1.5; 2.0; 2.67;
- kötőelemek száma: 1, 2, 3.

A próbatestek alsó vége befogott volt, míg felső végét monoton növekvő húzóerővel terheltük a próbatest tönkremenetelig. A kísérletek végrehajtása során megfigyeltem a jellemző tönkremeneteli módokat, valamint a húzóerőt mértem a hozzá tartozó elmozdulásokkal.



6.ábra Zwick 400 szakítógép és próbatestek

A következő tipikus tönkremeneteli módokat tapasztaltam:

- lemez lokális horpadása a csavarfej körül,
- szabad lemezek hullámosodása,
- palástnyomási tönkremenetel a csavarfej körül,
- csavarszár ferdülése.

A kísérletek végrehajtása után következtetéseket vontam le a nyírási engedékenység változására vonatkozóan a leerősítésszám függvényében. A nyírási engedékenység 29-48 %-kal csökken azokban az esetekben, ahol egy helyett két leerősítést alkalmaztunk. A csavarszám további növelése további 19-30 % csökkenést eredményez a nyírási engedékenységben. A legnagyobb csökkenést azon próbatestek

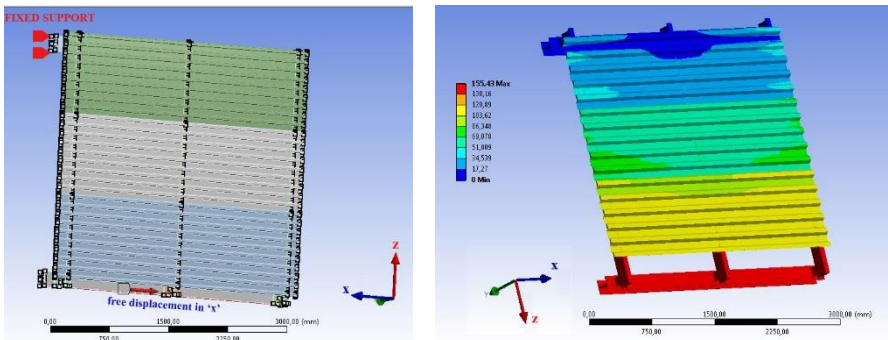
eredményezték, melyekben a legvastagabb lemezt alkalmaztam. 1.50 mm vastag lemez helyett 2.00 mm-es alkalmazása 16-41 %-kal csökkenti a nyírási engedékenységet, míg a lemezvastagság további növelése csak 5-14 % csökkenést eredményes a nyírási engedékenységekben. Magasabb engedékenységszökkenést egycsavaros próbatestknél tapasztaltam.

A csomóponti kísérletek eredményeit közvetlenül felhasználtam a numerikus szimuláció során, a szelemen-trapézlemez kapcsolat merevségére.

2.4. Numerikus analízis a nyírási engedékenység meghatározására

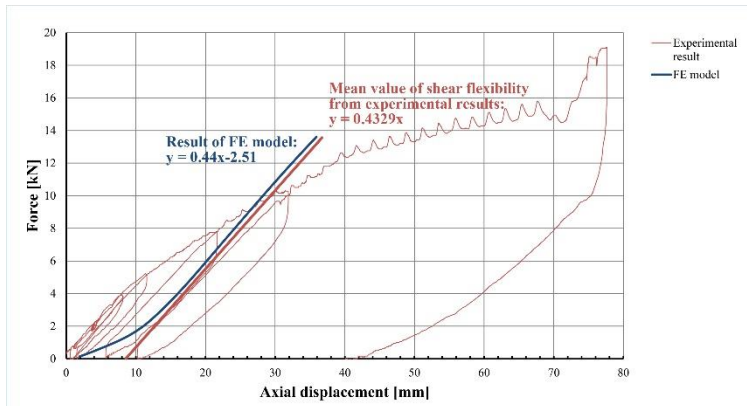
A kísérletek végrehajtása után numerikus szimulációkat hajtottam végre Ansys 14.5 Workbenchben, hogy virtuális kísérletekkel szimuláljam és kiterjesszem a korábban vizsgált laboratóriumi kísérleteket [LA9].

A panelkísérlet modellje a deformált alakkkal a 7. ábrán látható. A numerikus szimuláció során monoton növekvő húzóerőt alkalmaztam teherlépcsőben az alsó HEA180 gerendán. A numerikus modellel a panelkísérletsorozat során kapott engedékenységek alapján verifikáltam.



7.ábra: A 10-es panelkonfiguráció VE modellje (Z250/LTP45)

A kísérleti és numerikus eredmények erő-elmozdulás diagramjainak összevetését a 8. ábrán reprezentáltam, amely mutatja, hogy a kísérleti diagram egyes teherlépcsőiből származó nyírási engedékenységeinek középértéke, valamint a numerikus szimulációból származó nyírási engedékenység érték jó egyezést mutat.

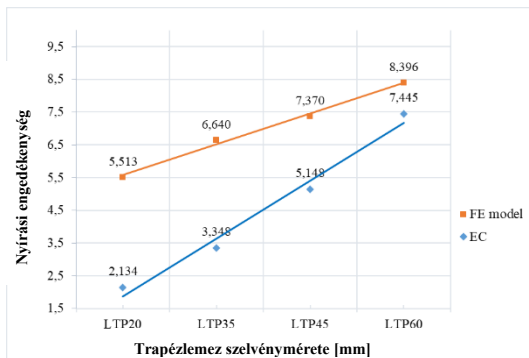


8. ábra: Kíséret és numerikus modell erő.-elmozdulás diagramja (1-es panelkíséret)

Paraméteres vizsgálatot hajtottam végre annak érdekében, hogy megvizsgáljam a nyírási engedékenységet befolyásoló paramétereket:

- leerősítésszám (LTP20 trapézlemez esetén): 36; 45; 54; 63; 72; 78; 81 leerősítés
- trapézlemez profilmagasság: 60; 43; 33; 17,4 mm
- szeleminvastagság: 3; 2; 1,5; 1 mm
- szelemin profilmagasság: 300; 250; 200; 150 mm
- trapézlemez vastagság: 1,0; 0,9; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5 mm

A numerikus vizsgálat részeredményeként azt a konklúziót vontam le, hogy a trapézlemez profilmagasságának növelése jelentősen megnöveli a nyírási engedékenységet (9. ábra).



9. ábra: Trapézlemez profilmagasságának hatása a nyírási engedékenységre (Z200 szelemin, 36 leerősítés)

A numerikus vizsgálat eredményei alapján a következő következtetéseket vontam le:

- Ipari gyakorlatban a nem szabványos diafragmák alkalmazása gyakori, melyek nyírási engedékenysége nem elhanyagolható.
- A szelemen-trapézlemez leerősítések száma jelentősen befolyásolja a nyírási engedékenységet, mely hatást az ECCS módszer nem tükrözi megfelelően.
- Az ECCS méretezési eljárás nem veszi figyelembe a szelemen vastagságának, és szelvényméretének jelentős hatását a nyírási engedékenységre vonatkozóan.
- Az ECCS méretezési eljárás alulbecsli a nyírási engedékenységet a vizsgált konfigurációkban; az eltérés 4-66 % közötti a 2. völgyben leerősített konfigurációk esetén., és 37-100 % közötti azok esetekben, ahol minden völgyben kerültek leerősítések, így jelen méretezési eljárás egyszerűen nem adaptálható nem szabványos esetekre, a formula továbbfejlesztése szükséges.

A numerikus szimulációk elsődleges célja a laboratóriumi kísérletek kiterjesztése virtuális kísérletekkel a nem vizsgált paramétertartományban, valamint további cél az ECCS méretezési eljárás továbbfejlesztése.

2.5. A “stressed skin design” méretezési eljárás továbbfejlesztése

Az ECCS nyírási engedékenységre vonatkozó méretezési eljárás 5 engedékenység komponens összegzéséből tevődik össze: trapézlemez profiltorzulása ($c_{1,1}$), trapézlemez nyíróigénybevétele ($c_{1,2}$), szelemen-trapézlemez rögzítőelemek megcsúsztatása ($c_{2,1}$), áltapulásra alkalmazott rögzítőelemek megcsúsztatása ($c_{2,2}$), nyírócsap megcsúsztatása ($c_{2,3}$), merevség a szélső elemek axiális igénybeviteléből (c_3).

A [2.táblázatban](#) összevettem a kísérleti és az ECCS méretezési eljárás alapján számított analitikus nyírási engedékenység értékeket, következésképp az ECCS módszer alulbecsüli a nem szabványos diafragmák nyírási engedékenységét. Habár az eltérés jelentős, a nem szabványos diafragmák nyírási engedékenysége mégsem elhanyagolható.

A kutatás célja az ECCS nyírási engedékenységre vonatkozó méretezési eljárás módosítása oly módon, hogy bármilyen típusú diafragmára alkalmazható legyen. A kísérleti és analitikus eredményeket összevetve az a következtetés vonható le, hogy az ECCS eljárás bizonyos tendenciákat nem követ:

- A vizsgálat, nem szabványos konfigurációk merevítő hatása nem elhanyagolható, diafragmaként figyelembevehetőek.
- Az ECCS méretezési eljárás alulbecsüli a vizsgált konfigurációk nyírási engedékenységét; a differencia minden 2. völgyben leerősített konstrukciók esetén 4-66 %, míg minden völgyben leerősített eseteknél 37-100 %, így a módszer közvetlenül nem alkalmazható nem szabványos diafragmák nyírási engedékenységének számítására.

Következésképp egyszerű módosításokat terveztem bevezetni az ECCS formula változtatására, a következő paramétereket illetően: $c_{1,1m}$ (trapézlemez profiltorzulása), $c_{2,1m}$ (szelemen-trapézlemez rögzítőelemek megcsúsztatása) és c_{3m} (szélső elemek axiális igénybeviteléből származó megcsúsztatás). A módosított formulának tartalmaznia kell azt a hatást, hogy a profiltorzulás és a szelemen-trapézlemez rögzítőelemek megcsúsztatása függ a leerősítések számától. Ezt a hatást egy új paraméter bevezetésével

tettem lehetővé, amely a szelemen-trapézlemez rögzítőelemek távolságának és a hullámhossznak a hányadosa (p/d). A módosított komponensek a következők:

$$C_{1.1m} = \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_4 \cdot a \cdot d^{2.5} \cdot K}{\left(\frac{p}{d}\right)^{0.5} \cdot E \cdot t^{2.5} \cdot b^2} \quad (1)$$

$$C_{2.1m} = \frac{\alpha_3 \cdot a \cdot s_p \cdot \frac{p}{d}}{b} \quad (2)$$

$$C_{3m} = \frac{\alpha_3 \cdot n^2 \cdot b_1 \cdot a^3}{E \cdot A \cdot b^2 \cdot H_p \cdot \frac{p}{d}} \quad (3)$$

Az új paraméter azt a hatást tükrözi, hogy a trapézlemez geometriai kialakításának hatása van a maximálisan alkalmazható leerősítésszámra (hullámszélességek száma egy lemezszélességen belül). Az új paraméteren kívül integráltam a szelemenmagasság hatását is, melynek nyírási lágyságot csökkentő szerepe van.

No.	Szelemen	Trapézlemez	Leerősítések száma a völgyben	Lemez alkalmazása	Kísérleti eredmények			Nyírási engedékenység EC szerint [mm/kN]	Módosított formula nyírási engedékenység [mm/kN]
					Nyírási engedékenység min. [mm/kN]	Nyírási engedékenység max. [mm/kN]	Nyírási engedékenység középérték [mm/kN]		
1	Z200/1.5	LTP20 / 0.5	Minden	Egyoldali	1.93	2.75	2.31	1.05	2.93
2			Minden 2.	Egyoldali	3.29	5.33	4.31	1.84	3.16
3			Dupla	2.62	2.66	2.64	1.60	2.08	
4		LTP45 / 0.5	Minden	Egyoldali	3.26	4.85	3.85	1.83	3.16
5			Minden 2.	Egyoldali	6.15	7.59	6.97	5.63	6.10
6			Dupla	3.69	4.25	3.87	3.78	3.91	
7	Z250/2.0	LTP20 / 0.5	Minden	Egyoldali	1.52	2.32	2.03	0.97	2.16
8			Minden 2.	Egyoldali	1.95	2.59	2.37	1.83	2.78
9			Dupla	1.47	1.84	1.63	1.59	2.09	
10		LTP45 / 0.5	Minden	Egyoldali	2.29	3.22	2.72	1.80	2.54
11			Minden 2.	Egyoldali	4.43	7.70	5.87	5.63	5.48
12			Dupla	3.09	3.52	3.29	3.76	3.10	
13	Z300/2.0	LTP20 / 0.5	Minden	Egyoldali	1.41	2.46	1.92	0.96	1.60
14			Minden 2.	Egyoldali	1.83	3.10	2.53	1.82	2.49
15			Dupla	1.25	2.01	1.57	1.58	2.03	
16		LTP45 / 0.5	Minden	Egyoldali	2.27	3.08	2.59	1.80	2.72
17			Minden 2.	Egyoldali	4.71	5.83	5.34	5.63	5.57
18			Dupla	2.82	3.57	3.24	3.77	3.41	

2.táblázat: Módosított nyírási engedékenységre vonatkozó formula összevetése a kísérleti és analitikus eredményekkel

A módosított formulát alkalmazva a különbség 0,5-28 % a kísérleti átlagértékektől, a legtöbb esetben az új formulából származtatott nyírási engedékenység értékek a kísérleti engedékenységtételek minimum és maximuma közé esnek. Mivel az ECCS formula legfeljebb 117 %-ban tér el a kísérleti eredményektől, így a javasolt méretezési eljárás jobb közelítést ad. Ily módon az ECCS méretezési eljárás kiterjeszhető nem szabványos diafragmák méretezésével.

3. Új tudományos eredmények

3.1. A PhD disszertáció tézisei angolul

Thesis 1

I evaluated an experimental full-scale test series of 116 configurations, which investigated the global flexibility of industrially applied, nonstandard steel diaphragms.

- a) Based on the experimental full-scale test series, I determined the significant effect of the section size of structural members and the number of fixings on global flexibility, as well as the effect of the presence of structural members. My conclusions are drawn for nonstandard diaphragms, which were previously not investigated and out of the domain of current standard.
- b) Based on the experimental full-scale test series, I determined the influence of the existing parameters of stressed skin design methodology and the new, previously not investigated parameters on global flexibility of nonstandard diaphragms.
- c) Based on the results of the global flexibility values of roof diaphragms, I compared the experimental global flexibility results, with the analytical results derived from the current stressed skin design method.

Publications linked to the thesis: [\[LA1\]](#) [\[LA2\]](#) [\[LA5\]](#)

Thesis 2

I designed and carried out a panel experimental test series, in which 18 nonstandard, 3.00 x 3.00 m sized diaphragms were subjected to in-plane-shear.

- a) On the basis of the results of the experimental panel test series I determined and classified the typical failure modes of nonstandard diaphragms, which are subjected to in-plane shear. Besides this, the shear flexibilities and the ultimate load was assessed as well.
- b) On the basis of the results of the experimental panel test series, I defined a new parameter influencing shear flexibility (p/d), which is not introduced in the ECCS standard. I determined the influence of the existing parameters of stressed skin design methodology to the shear flexibility of nonstandard diaphragms, besides this I determined the influence of the new parameter on shear flexibility and I assessed the possible improvement of stressed skin design methodology.

Publications linked to the thesis: [\[LA6\]](#) [\[LA7\]](#) [\[LA10\]](#) [\[LA11\]](#) [\[LA12\]](#)

Thesis 3

I developed an empirical model to determine the shear flexibility of nonstandard diaphragms, upon which a numerical model validated upon the experimental panel test series was developed. The validated numerical model is able to take into consideration the effect of the new parameter on shear flexibility.

I compared the experimental panel test results and the numerical test results with the analytical shear flexibility values derived from stressed skin design formulae. Upon comparison, I made a proposal to extend the domain of stressed skin design methodology, including nonstandard diaphragms investigated in this research.

- a) With the help of validated numerical model, the range of experimental tests was extended with the virtual tests of previously not investigated section sizes. Based on the extended numerical study, I draw further conclusions on the effect of those relevant parameters (i.e. number of fixing, section size and thickness of purlin and trapezoidal sheeting), which are influencing shear flexibility. I determined the range of parameters for analytic investigation of the nonstandard diaphragms, and the shear flexibility values of the virtual tests.
- b) I investigated applicability of standard methodology during comparison of experimental, numerical and analytical results, and I established, that current methodology is not applicable without any modification to calculate the shear flexibility of nonstandard diaphragms. I made a proposal to modify the ECCS stressed skin design method. I proved, that the new formulae gives a better approach to calculate the shear flexibility of industrially applied, nonstandard diaphragms. I determined the required analyzes level for numerical model-based design method of nonstandard diaphragms subjected to in-plane shear.

Publications linked to the thesis: [\[LA3\]](#) [\[LA7\]](#) [\[LA8\]](#)

3.2. A PhD disszertáció tézisei magyarul

1. tézis

Kiértékeltem egy 116 kísérletből álló teljesléptékű kísérletsorozatot, mely nem szabványos kialakítású, gyakorlatban sűrűn alkalmazott könnyűszerkezetes diafragmák globális merevítőhatását vizsgálta.

- a) A teljesléptékű kísérletek alapján megállapítottam a szerkezeti elemek keresztmetszeti méretének, a leerősítésszám változásának jelentős hatását, valamint az egyes szerkezeti elemek jelenlétének hatását a globális merevségre vonatkozóan, következtéseimet eddig nem vizsgált és szabványban nem szereplő konfigurációkra vontam le.
- b) A teljesléptékű kísérletek alapján meghatároztam a nem szabványos kialakítású diafragmák esetén a szabványos kialakítású diafragmákra vonatkozó paraméterek és a szabványos kialakításra nem vonatkozó új paraméterek hatását a globális merevségre vonatkozóan.

- c) Tetődiafragmák esetén összevetést végeztem a kísérletek során meghatározott globális merevségek és a szabványos kialakítású diafragmák esetén számított analitikus eredmények között.

A tézishez kapcsolódó publikációk: [\[LA1\]](#) [\[LA2\]](#) [\[LA5\]](#)

2. tézis

Megterveztem és végrehajtottam egy 18 kísérletből álló panelkísérletsorozatot 3x3 m-es, gyakorlatban sűrűn alkalmazott, de szabványtól eltérő kialakítású könnyűszerkezetes diafragmákon, melyeket síkjukban ható nyíróerővel terheltem.

- a) A panelkísérletek alapján megállapítottam és osztályoztam a nyíró igénybevételnek kitett, nem szabványos kialakítású diafragmák mértékadó tönkremeneteli módjait, valamint meghatároztam a nyírási engedékenység értékeit és teherbírását.
- b) A panelkísérletek alapján definiáltam azt a nyírási engedékenységet befolyásoló új p/d paramétert, amely a szabványban nem szerepel, valamint meghatároztam a nem szabványos kialakítású diafragmák esetén a szabványos kialakítású diafragmákra vonatkozó paraméterek és az általam újonnan definiált paraméterek hatását a nyírási engedékenységre vonatkozóan, és meghatároztam a jelenlegi szabványos méretezési módszerre vonatkozó fejlesztési irányt.

A tézishez kapcsolódó publikációk: [\[LA6\]](#) [\[LA7\]](#) [\[LA10\]](#) [\[LA11\]](#) [\[LA12\]](#)

3. tézis

Megalkottam egy empirikus modellt a nyírási engedékenységek meghatározására nem szabványos kialakítású diafragmák esetén, amelyre a panelkísérletek alapján validált numerikus modellt fejlesztettem. A validált numerikus modell képes figyelembe venni a nyírási engedékenységet befolyásoló újonnan definiált paraméterek hatását is.

A panelkísérletek nyírási engedékenységre vonatkozó értékeit, valamint a végeeselemes modell numerikus eredményeit összevettem a szabványos kialakítású diafragmák nyírási engedékenységre vonatkozó analitikus eredményeivel. Az összevetés alapján javaslatot tettem a szabványos eljárás kiterjesztésére nem szabványos kialakítású diafragmák esetén.

- a) A validált végeeselemes modell segítségével kiterjeszttem a panelkísérletsorozatot egyéb, kísérlettel nem vizsgált keresztmetszeti méretek analizisével. A kiterjesztett numerikus vizsgálatok alapján további következtetéseket vontam le az nyírási engedékenységet befolyásoló, releváns paraméterek (leerősítésszám, szelemen és trapézlemez szelvénymagassága és szelvényvastagsága) hatásának mértékével kapcsolatban. Meghatároztam a nem szabványos kialakítású diafragmák analitikus vizsgálatához szükséges paramétertartományt és azon belül a nyírási engedékenységek értékeit.

b) A kísérleti, analitikus valamint numerikus eredményeket összevetve megvizsgáltam a szabványos eljárás alkalmazhatóságát, és megállapítottam, hogy a méretezési eljárás módosítás nélkül nem alkalmazható az általam vizsgált diafragmák esetén. Javaslatot tettem az ECCS szabványos, nyírási engedékenységekra vonatkozó méretezési eljárás módosítására. Bizonyítottam, hogy az új méretezési eljárás alkalmas a gyakorlatban alkalmazott, nem szabványos kialakítású diafragmák nyírási engedékenységének számítására. Meghatároztam a szükséges analízis szintet a nyíróerővel terhelt, általam vizsgált diafragmák numerikus modell alapú méretezési eljárásához.

A tézishez kapcsolódó publikációk: [\[LA3\]](#) [\[LA7\]](#) [\[LA8\]](#)

4. További kutatási irányok

A disszertációban bemutatott kutatási eredmények közvetlenül felhasználhatóak a szabványos “stressed skin design” méretezési eljárás fejlesztése során. A bemutatott kutatási területen további vizsgálatok lehetségesek. A burkolati rendszerek globális megtámasztó hatásával kapcsolatban továbblépési irány lehet a teljesléptékű kísérlet numerikus szimulációja, valamint ezen eredmények összevetése a javasolt formula alapján számított analitikus engedékenység értékeivel. A kísérleti eredmények közvetlenül felhasználhatóak a gyakorlati tervezés során.

5. A témához kapcsolódó publikációk

Nemzetközi folyóiratcikkek

[LA1] Lendvai A., Joó A. L., Dunai L. Experimental full scale tests on steel portal frames for development of diaphragm action – Part I, Experimental results. *Thin-Walled Structures*, 132: 729-739. (2018)

[LA2] Lendvai A., Joó A. L. Experimental full scale tests on steel portal frames for development of diaphragm action – Part II, Effect of structural components on shear flexibility. *Thin-Walled Structures* 2018, 132: 740-758. (2018)

[LA3] Lendvai A., Joó A. L. Improvement of stressed skin design procedure based on experimental and numerical simulations. *Constructional Steel Research*, DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.105874 (Available online: 29. November 2019.)

Magyar folyóiratcikkek

[LA4] Lendvai A., Kenéz Á., Rácz A., Joó A.L. Acélsarnokok burkolati merevsége - 3. rész: az ECCS módszerének pontosítása. *MAGÉSZ ACÉLSZERKEZETEK* 12: (1. különszám) pp. 78-83. (2015)

[LA5] Lendvai A., Joó A. L. Acélsarnokok burkolati merevségének kísérleti kutatása. Budapest: BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke, 2016. pp. 175-184 (2016)

[LA6] Lendvai A., Joó A. L. Acélsarnokok burkolati merevsége - 1. rész: panelkísérletek. *MAGÉSZ ACÉLSZERKEZETEK* 12:(1. különszám) pp. 60-65. (2015)

Nemzetközi konferenci cikkek

[LA7] Lendvai A., Joó A. L. Test based finite element development for diaphragm action, *Proceedings of the International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures*. 1006 p. Temesvár, Románia. pp. 337-344. (ISBN:[978-92-9147-133-1](#)) (2016)

[LA8] Lendvai A., Joó A. L. Development in calculation of stressed skin effect upon experimental and numerical research results. In: *EUROSTEEL 2017, The 8th European Conference on Steel and Composite Structures*, Copenhagen, Denmark, 13-15 September 2017., (2017)

[LA9] Lendvai A., Joó A. L. Experimental investigation of stability behaviour of members supported by sandwich panels at elevated temperature, *Proceedings of the International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures*. 1006 p. Prága, Csehország, 2019.09.11-13. (2019)

Magyar konferenci cikkek

[LA10] Lendvai A., Joó A. L. Könnyűszerkezetes tetőburkolati rendszer merevségének és teherbírásának kísérleti meghatározása – panelkísérletek. XII. Magyar Mechanikai Konferencia. Miskolc, Magyarország, 2015.08.25-2015.08.27. (ISBN:[978-615-5216-74-9](#)) (2015)

[LA11] Lendvai A., Joó A. L. Könnyűszerkezetes tetőburkolati rendszer merevségének és teherbírásának kísérleti vizsgálata ciklikus panelkísérletekkel. XIX. Nemzetközi Építéstudományi Konferencia: ÉPKO 2015. Kolozsvár: Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT), pp. 128-131. (2015)

[LA12] Lendvai A., Joó A. L. Szelemen-trapézlemez kapcsolat merevségének és teherbírásának kísérleti vizsgálata. XX. Nemzetközi Építéstudományi Konferencia: ÉPKO. Kolozsvár: Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT), pp. 153-156. (2016)

[LA13] Lendvai A., Joó A. L. Szendvicspanelek megtámasztó hatásának kísérleti vizsgálata emelt hőmérsékleten. XIII. Magyar Mechanikai Konferencia. Miskolc, Magyarország, 2019.08.27-29. (2018)