



JOÓ Attila László

Könnyűszerkezetes tetőrendszerek vizsgálata és méretezése

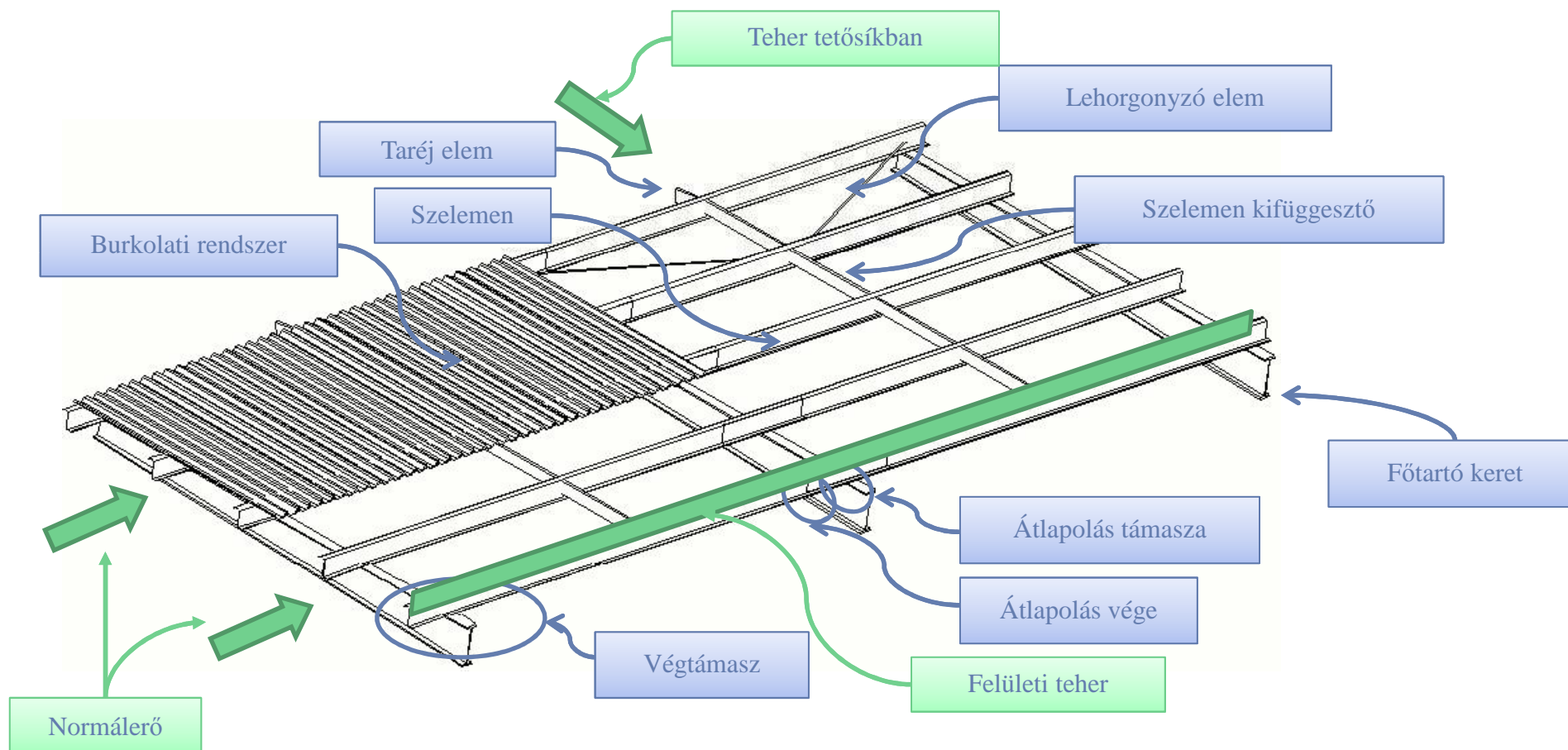
Analysis and design of thin-walled roof systems

PhD disszertáció
Nyilvános védés

Témavezető:
DUNAI László

Könnyűszerkezetes tetőrendszer

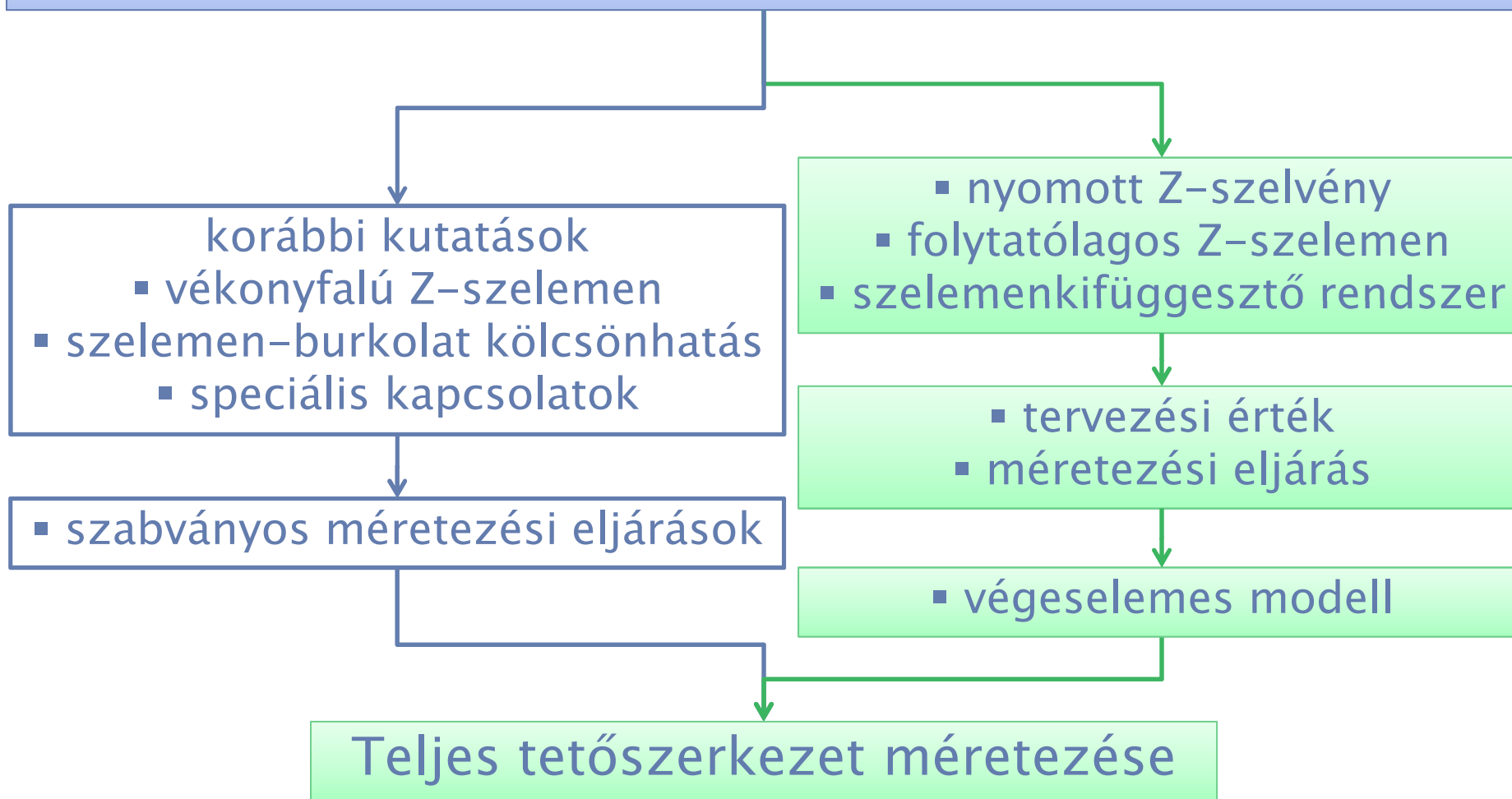
- összetett szerkezeti rendszer – komponensek
- összetett viselkedés – kölcsönhatás





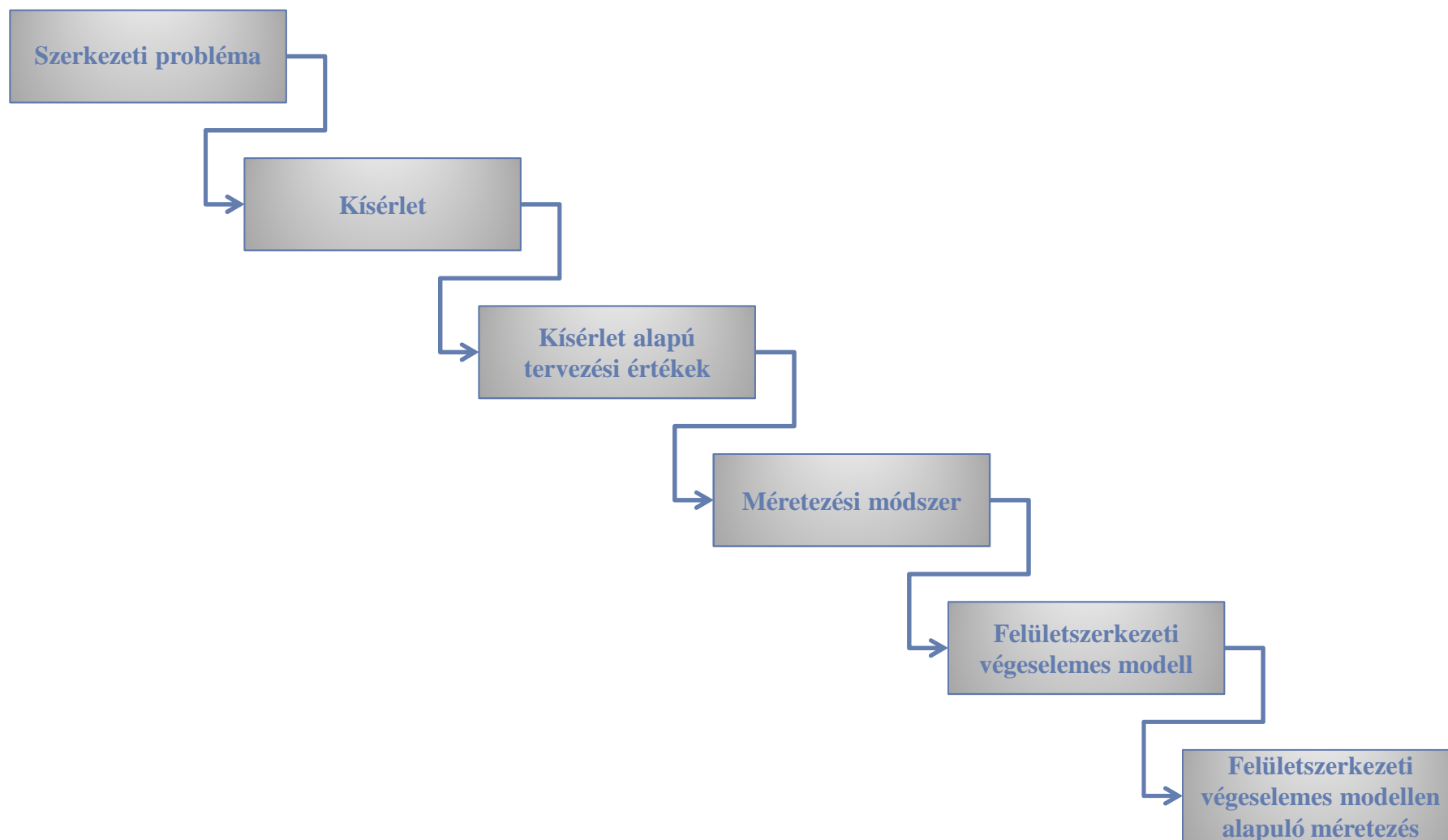
Célkitűzés

Összetett viselkedés, részben hiányzó szabványos háttér

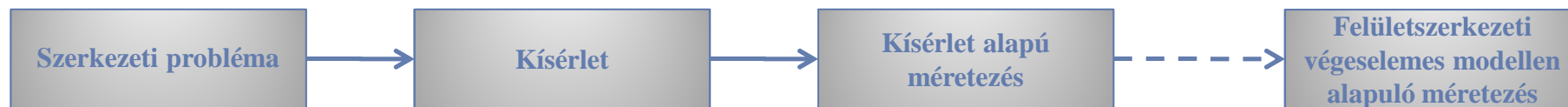




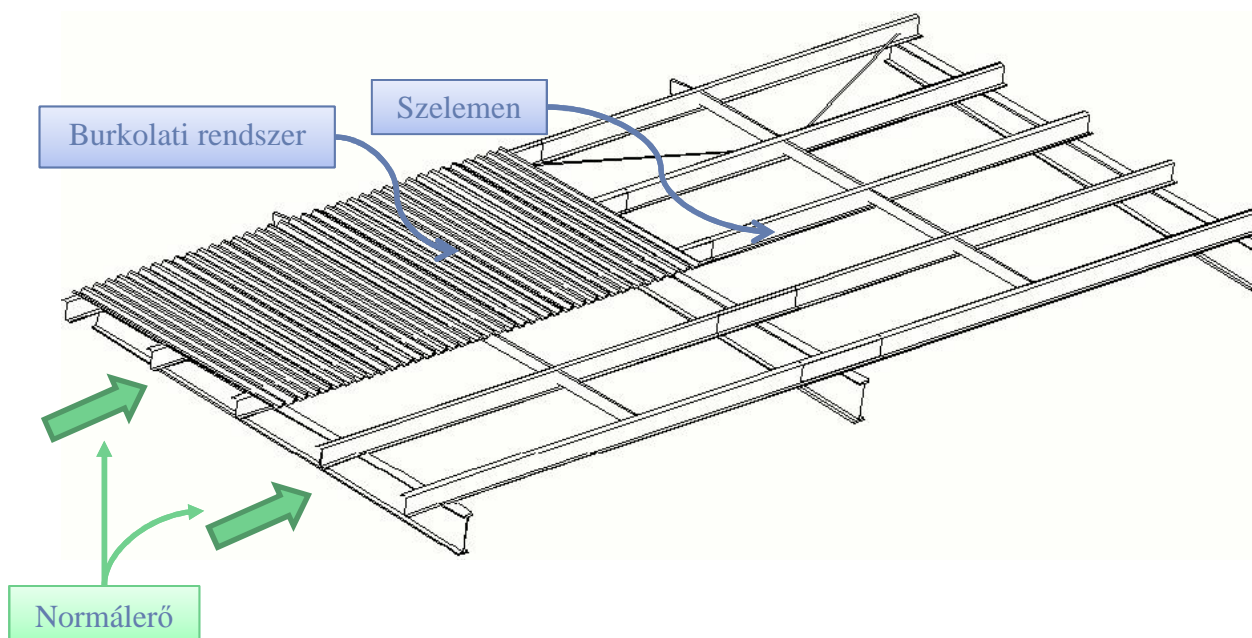
Megoldási stratégia



Nyomott Z-szelvény



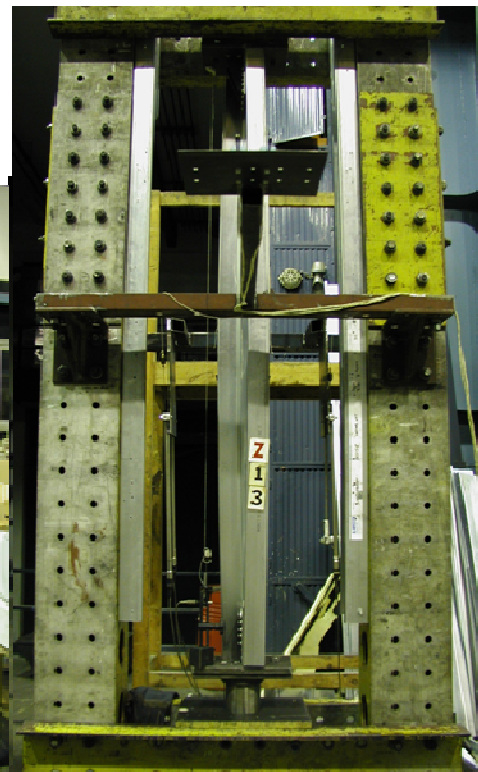
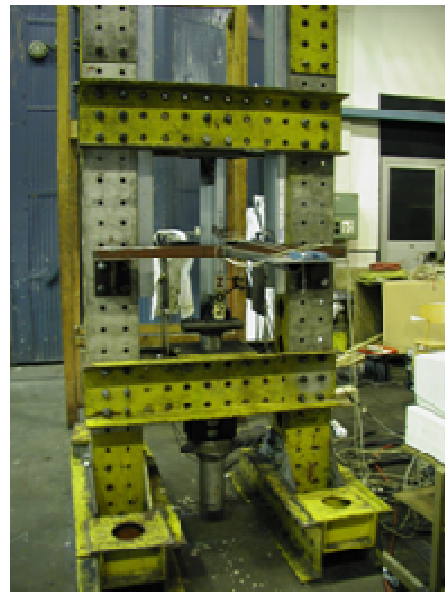
- vékonyfalú, nyomott Z-szelvény viselkedése
- burkolat megtámasztó hatása
- átlapolás környezet viselkedése
- speciális erőbevezetés a gerincbe



Kísérleti elrendezés

Összesen **24** kísérlet:

- 3 hossz (800, 2000, 3600)
- 3 szelvény (Z200/1, Z150/1, Z200/2)
- oldalirányú megtámasztás:
 - trapézlemezzel és szabadon
- szimpla és dupla szelvény



Tönkremenetel

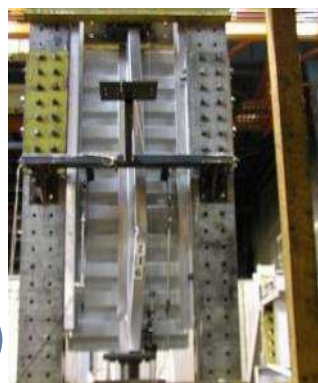
Tönkremeneteli módok:

- lokális tönkremenetel támasznál ①
- torzulásos horpadás ②
- globális stabilitásvesztés ③

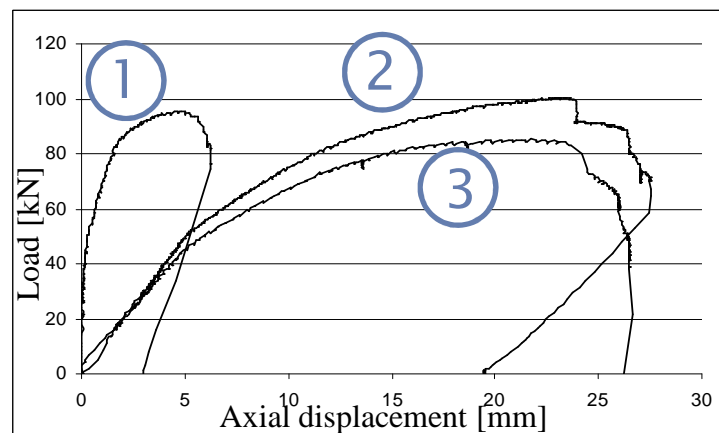
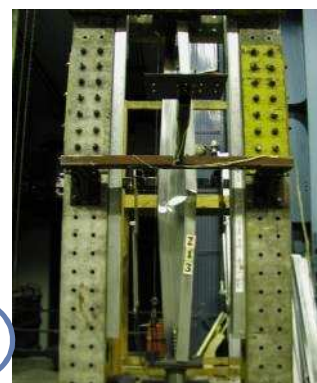
①



②



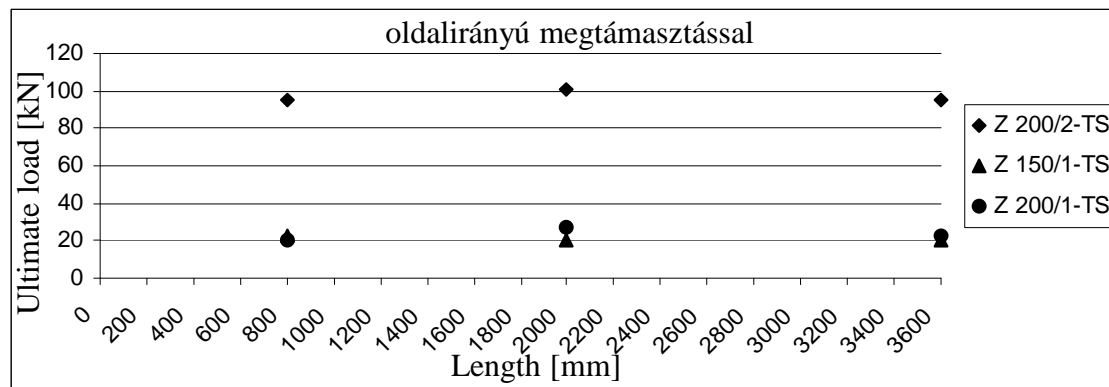
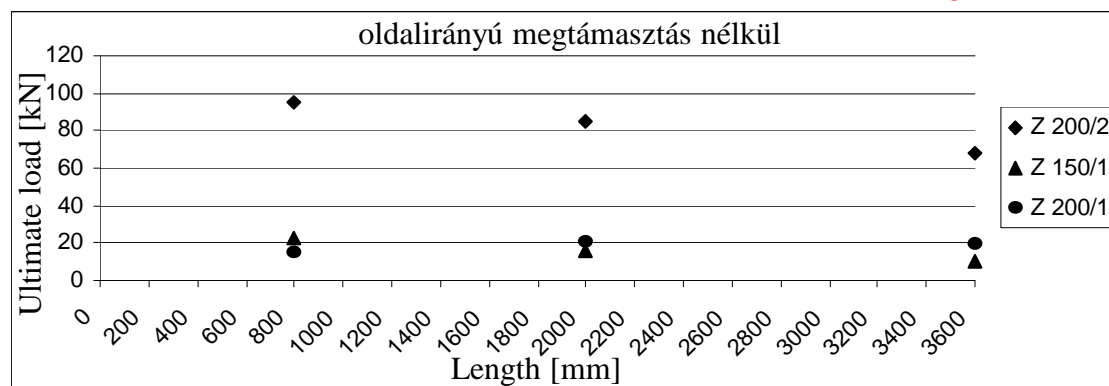
③





Kísérlet alapú tervezés

- 1 mm falvastagságú elemek kisebb teherbírása, mely **nem függ** a szelvénymagasságtól, a megtámasztástól és a hosszától (**beroppanás**)
- oldalirányú megtámasztás esetén azonos teherbírás, nem csökken a hossz növekedésével (**torzulásos horpadás**)





1. tézis

Megterveztem és végrehajtottam egy kísérleti programot eddigiekben nem vizsgált hidegen hajlított vékonyfalú Z-szelvényű nyomott elemek vizsgálatára különböző oldalirányú megtámasztási viszonyok és speciális erőbevezetés esetén:

- a) Kísérleti úton meghatároztam oldalirányban megtámasztatlan Z-szelvényű elemek lokális, torzulásos horpadás, illetve globális stabilitásvesztési módjait.
- b) Meghatároztam egyik övén trapézlemezzel megtámasztott Z-szelvényű nyomott elemek viselkedési módjait.
- c) Rövid, dupla Z-szelvényű próbatestek segítségével elemeztem az átlapolás környékének viselkedését nyomó igénybevételre.

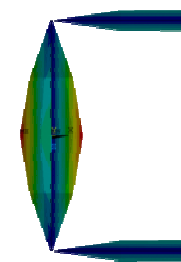
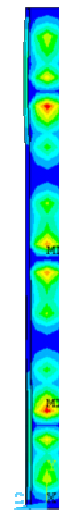
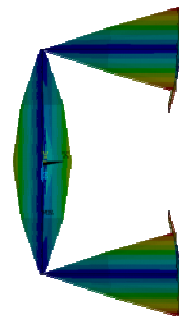
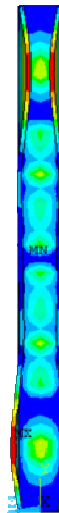
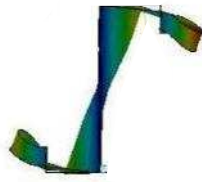
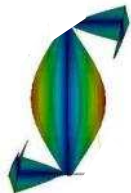
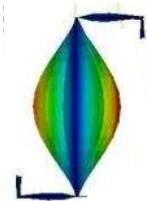
A kísérleti eredmények alapján meghatároztam a nyomott Z-szelvényű elemek kísérleti tervezésen alapuló tervezési teherbírását .

Sajátalakok osztályozása



nemlineáris végelelemes szimuláció:

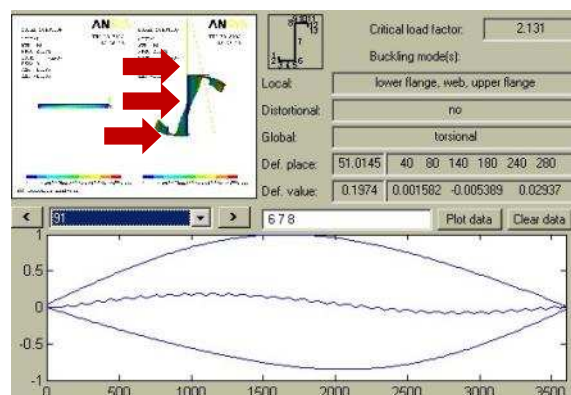
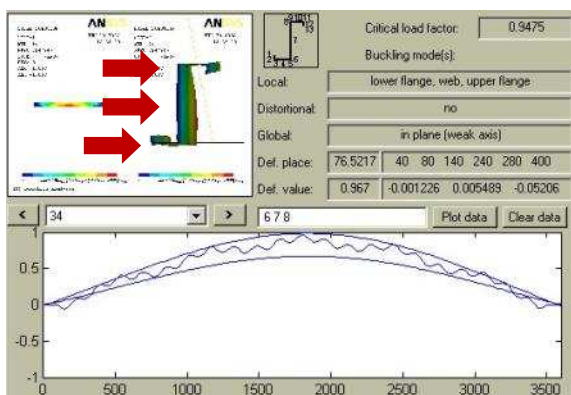
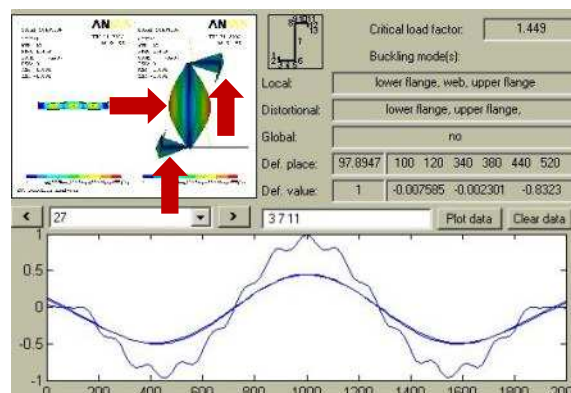
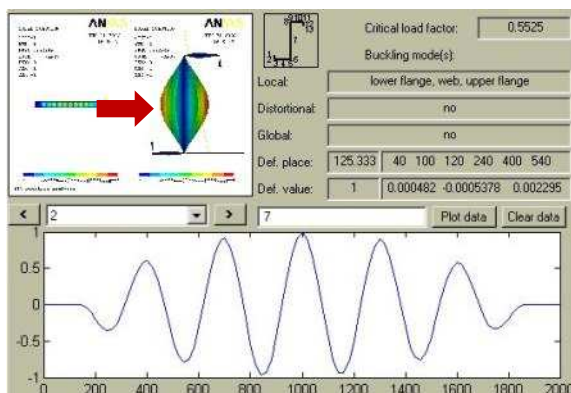
- helyettesítő geometriai imperfekció
- alak: kihajlási/horpadási alaknak megfelelő
- nagysága EC3 1–3-ban nem definiált
- meghatározza a posztkritikus viselkedést



Automatizált alakfelismerés

Automatizált eljárás:

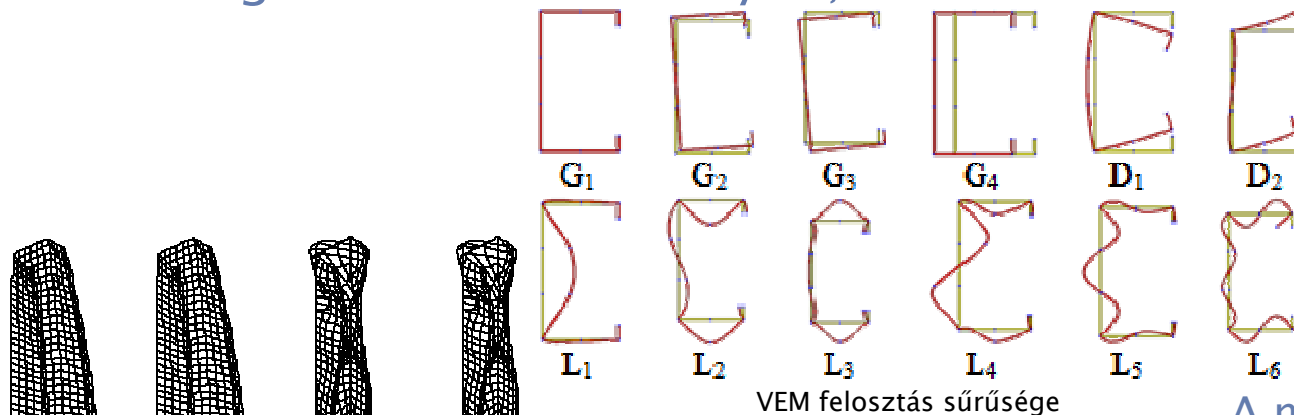
- VEM modell élek elmozdulása
- maximális elmozdulások, hullámhosszak elemzése
- tapasztalati értékelés



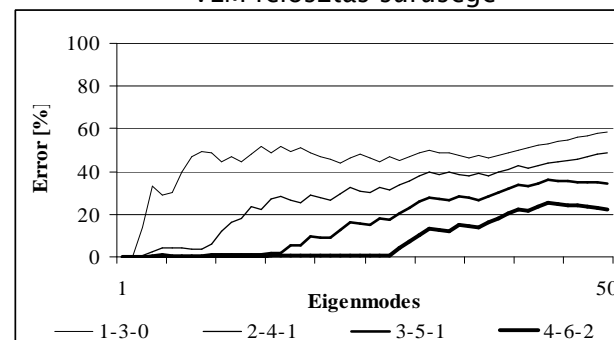
Osztályozás végessávos bázisfüggvények segítségével

Végessávos bázisfüggvények tiszta kihajlási alakoknak megfelelően

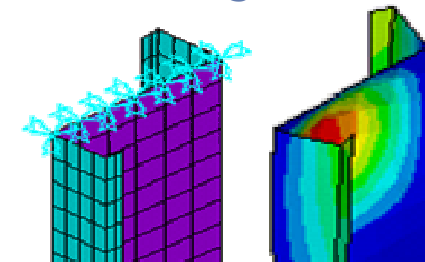
- VEM kihajlási alak előállítás a végessávos bázisfüggvények (sin) **lineáris kombinációja** alapján
- tiszta alakok részesevé a VEM alakban
- paraméteres vizsgálat: bázisfüggvények hullámhossza, megtámasztási viszonyok, VEM felosztás sűrűsége



VEM felosztás sűrűsége

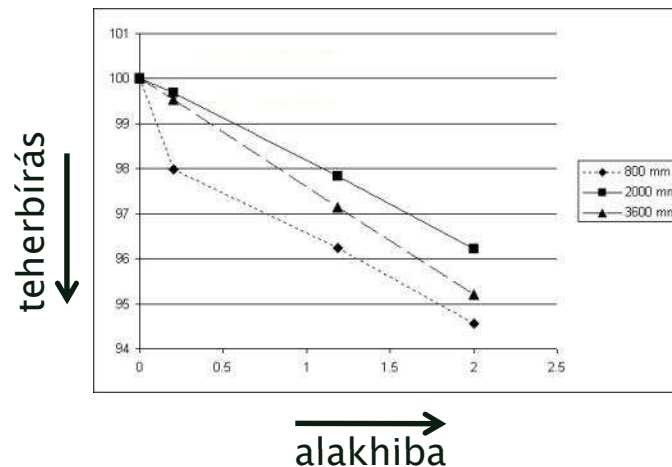
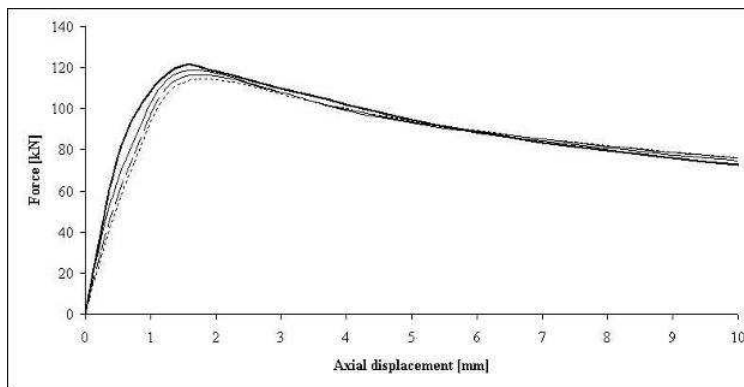


A módszer nem alkalmazható:
nincs megtámasztás

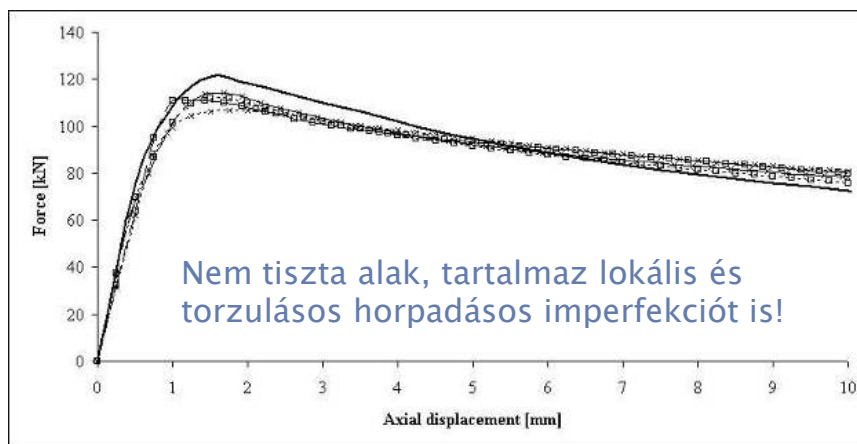


Imperfekció érzékenység vizsgálat

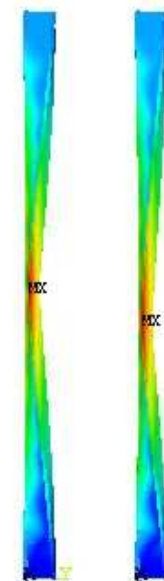
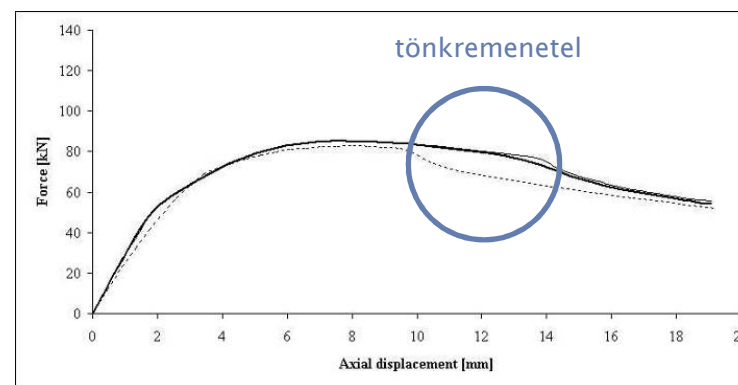
Lemezhorpadás hatása



Globális kihajlás hatása



Torzulásos horpadás hatása



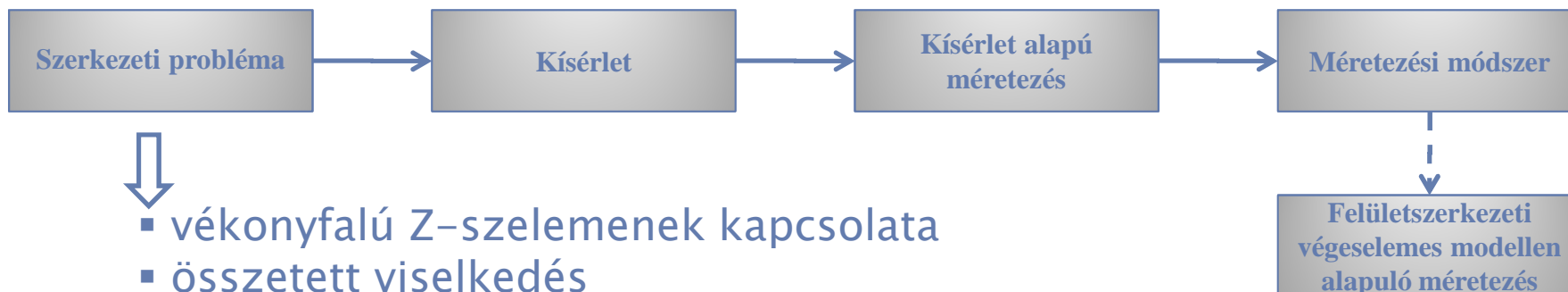


2. tézis

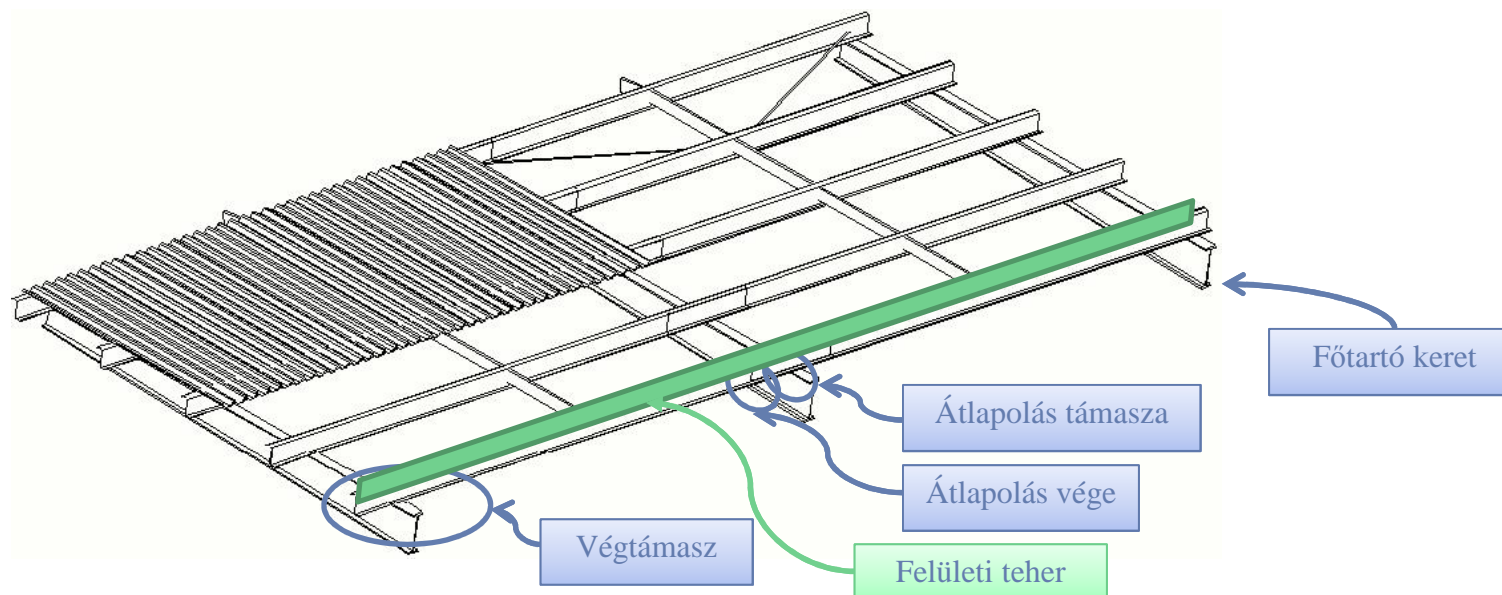
Nyomott Z-szelvényű elemek viselkedésének modellezésére felületszerkezeti végeleemes modellt dolgoztam ki. A felületszerkezeti modellen anyagi- és geometriai nemlinearitás figyelembevételével imperfekció érzékenységi vizsgálatsorozatot hajtottam végre. A helyettesítő geometriai imperfekciót a modell sajátalakjai alapján vettem fel és meghatároztam azok hatását a szerkezet viselkedésére: merevség, teherbírás és tönkremeneteli mód. A sajátalakok elemzését kétféleképpen hajtottam végre:

- a) Módszert dolgoztam ki a felületszerkezeti végeleemes modell sajátalakjainak osztályozására az alap kihajlási és horpadási alakok geometriai definíciója alapján. A javasolt módszer algoritmusát beépítettem egy vékonyfalú tetőszerkezetek modellezését végző saját fejlesztésű számítógépes programba.
- b) Paraméteres vizsgálatsorozatot hajtottam végre vékonyfalú nyomott C-és Z-szelvények felületszerkezeti végeleemes modelljének sajátalakjainak osztályozására végessávós bázisfüggvények segítségével. Az osztályozás segítségével meghatároztam a lokális, a torzulásos horpadás és a globális alakok részarányát különböző megtámasztási viszonyok és hálósűrűség esetén, és bizonyítottam a módszer alkalmazhatóságát.

Folytatólagos Z-szelemen



- vékonyfalú Z-szelemenek kapcsolata
- összetett viselkedés
- átlapolt kapcsolat merevsége, teherbírása
- beroppanás végtámasznál



Kísérleti elrendezés

Összesen **84** kísérlet

36 kísérlet (M+V):

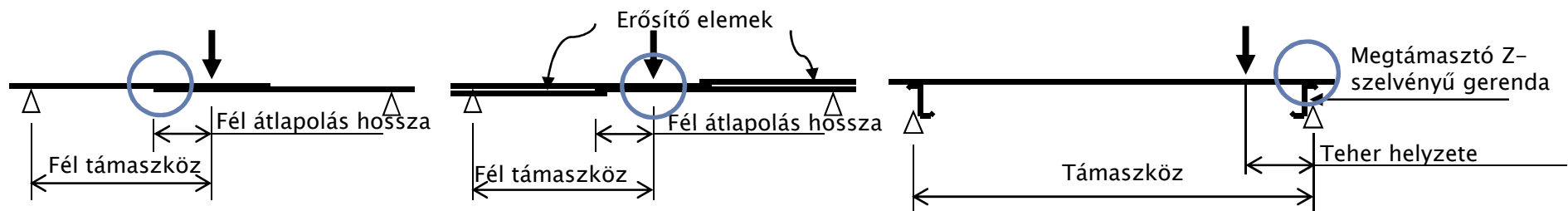
- 3 hossz
- 6 szelvény
- 2x

36 kísérlet (M+R):

- 3 hossz
- 6 szelvény
- 2x

12 kísérlet (R):

- 6 szelvény
- 2x

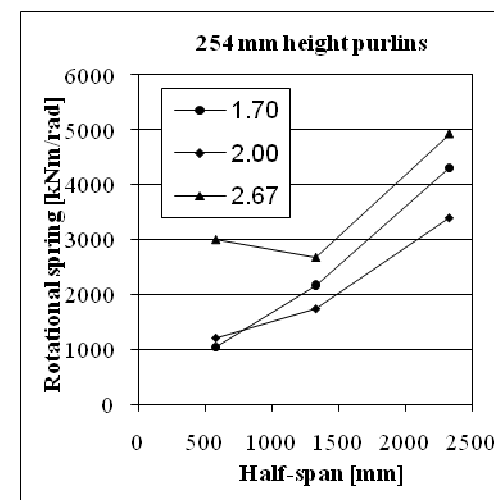
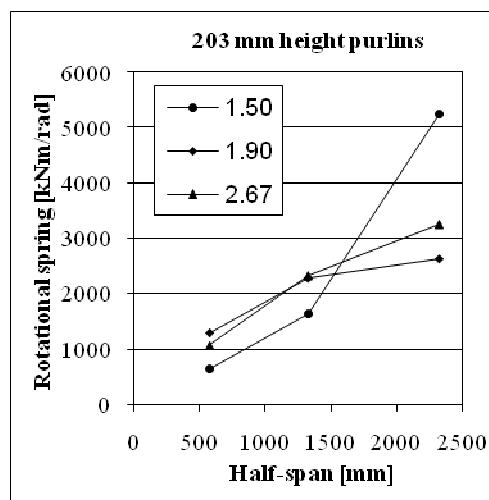
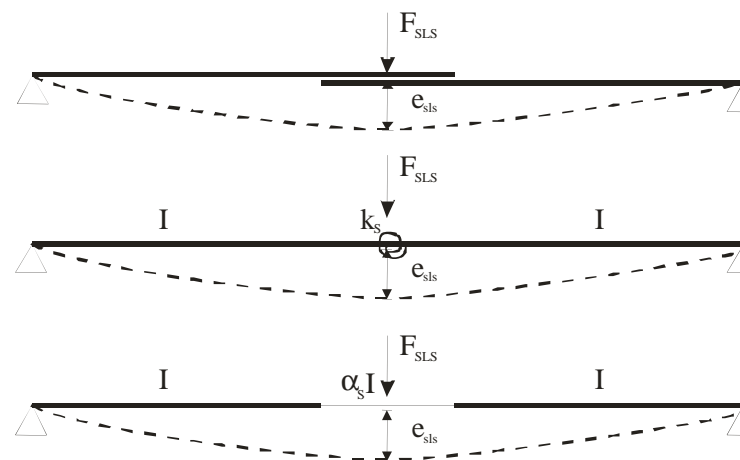


Kísérleti eredmények

Tönkremeneteli módok



Átlapolás merevsége





Méretezési eljárás

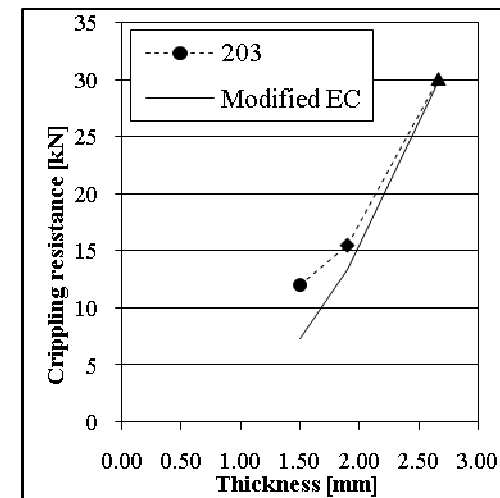
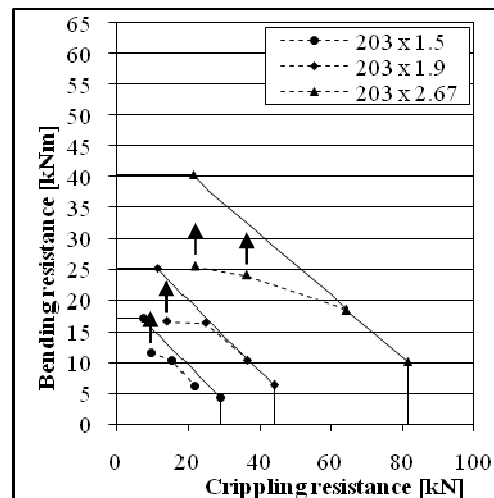
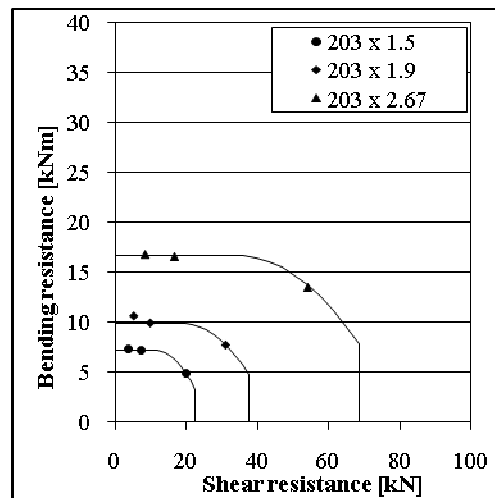
Átlapolás végének nyomaték-nyíróerő interakciója:

$$M_{V.Rd}^o = \alpha M_{Rd} \quad \text{if } V_{Ed} \leq \beta \times 0.5 \times V_{Rd}$$

$$M_{V.Rd}^o = \alpha M_{Rd} \left[1 - \left(1 - \frac{M_{f.pl}}{M_{pl}} \right) \left(2 \frac{V_{Ed}}{\beta V_{Rd}} \right)^2 \right] \quad \text{if } V_{Ed} > \beta \times 0.5 \times V_{Rd}$$

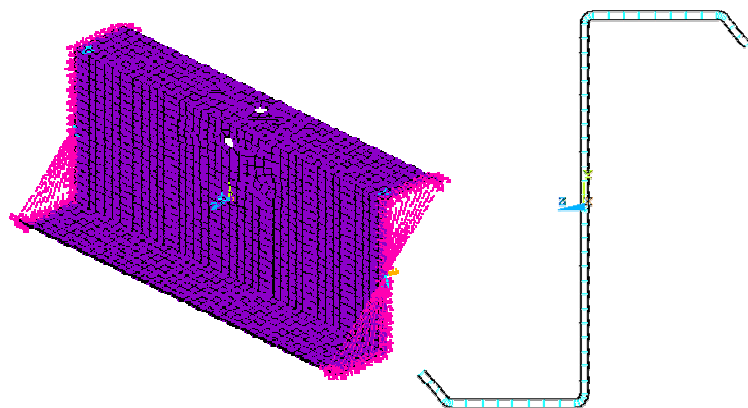
Beroppanás végső támasznál:

$$R_{w.Rd} = \alpha \left[k_1 k_2 k_3 \left[6.66 - \frac{h_w / t}{64} \right] \left[1 + 0.001 \frac{s_s}{t} \right] t^2 f_{yb} / \gamma_{M1} \right]$$

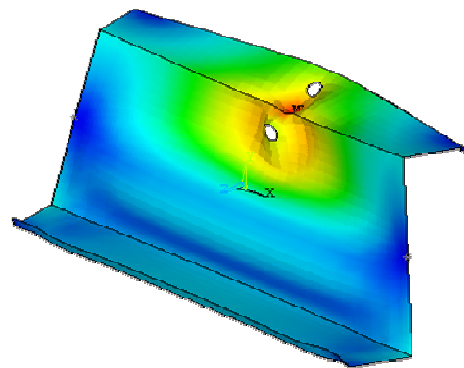


Felületszerkezeti modell

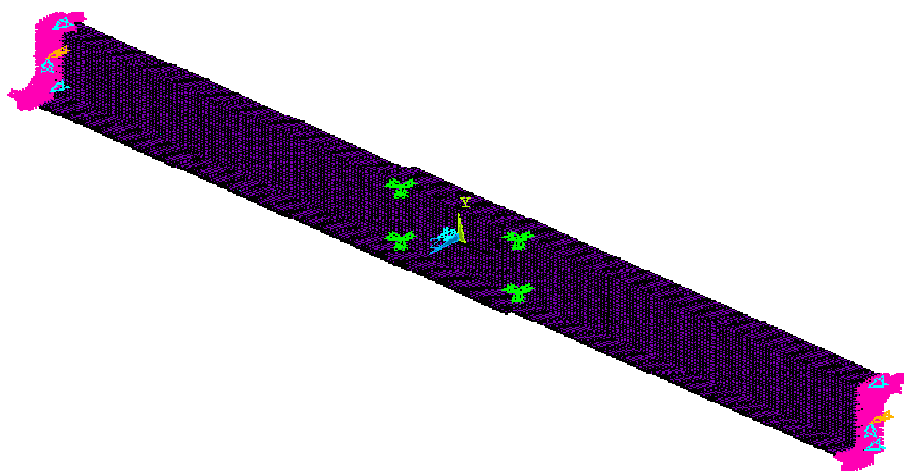
Lokális modell:



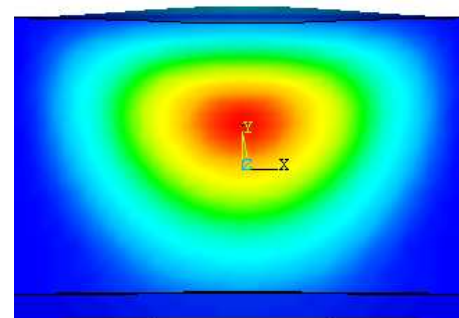
Rugalmas-képlékeny lemezhorpadás
M+V interakció



Teljes modell:



Beroppanási tönkremenetel
M+R interakció





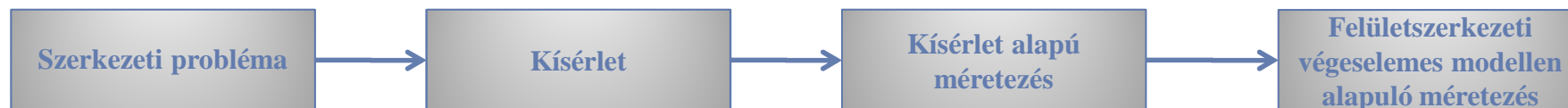
3. tézis

Megterveztem és végrehajtottam egy kísérleti programot folytatólagos Z-szelemenek különböző komponenseinek vizsgálatára. Az átlapolt kapcsolatot az alábbi **speciális szerkezeti kialakításban** vizsgáltam: (i) a Z-szelemenek övszélessége azonos, ezért az átlapolást összefeszítéssel kell kialakítani, (ii) a két szelemet összekapcsoló csavarok lyukátmérője jelentősen nagyobb a csavarátmérőnél, illetve (iii) az átlapolás közepén a gerincben nincs csavar. Erre a szerkezeti kialakításra meghatároztam a viselkedési módokat és a tervezési teherbírás értékeket az alábbiak szerint:

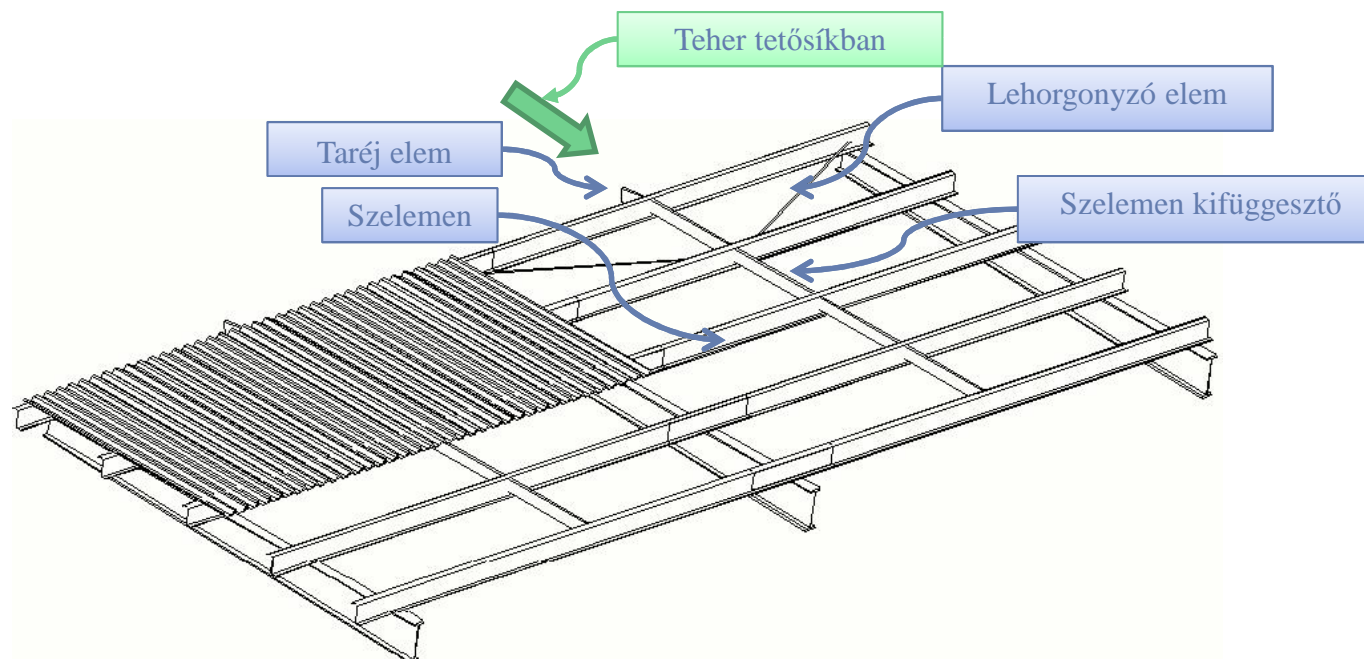
- Meghatároztam az **átlapolás végének** tervezési teherbírását különböző nyomték és nyíróerő arányok esetén. Az eredmények alapján az átlapolás végének **nyomték nyíróerő interakciójának** számítására Eurocode 3 alapú **méretezési eljárást** dolgoztam ki.
- Meghatároztam az **átlapolás közepének** tervezési teherbírását különböző nyomték és reakcióerő arányok esetén. Az eredmények alapján igazoltam, hogy az **Eurocode 3** szabványos méretezési eljárása **alkalmazható** az átlapolás közepének méretezésre.
- Külön vizsgálati programot dolgoztam ki egy **szélső támasz** feletti Z-szelemen **beroppanásának** vizsgálatára. A kísérletek alapján meghatároztam a viselkedési módjait és tervezési teherbírás értékeket. Az eredmények alapján javaslatot tettem az Eurocode 3 alapú **méretezési eljárás** módosítására.

Kidolgoztam az alkalmazott átlapolás csomópont **felületszerkezeti végelelemes modelljét** és a végrehajtott numerikus vizsgálatokkal jellemeztem az átlapolás végének és a támaszkörnyezet **viselkedési módjait**

Szelemenkifüggesztő rendszer

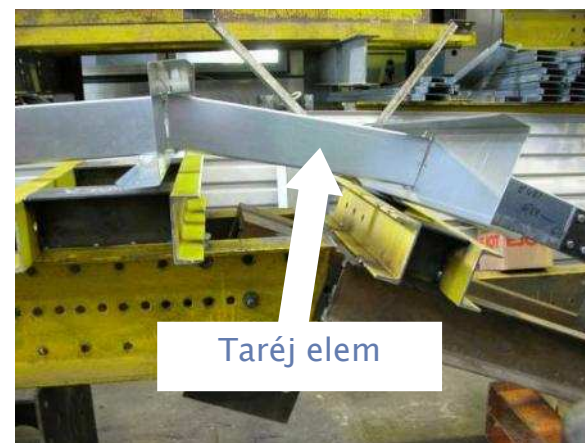
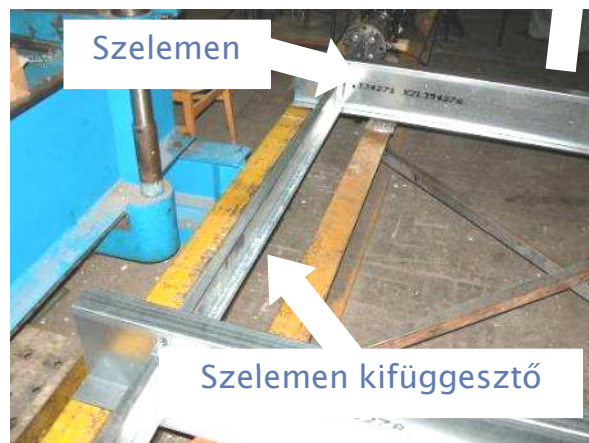


- vékonyfalú U szelvény lyukgyengítéssel, speciális kapcsolatok
- egyes komponensek húzási, nyomási ellenállása

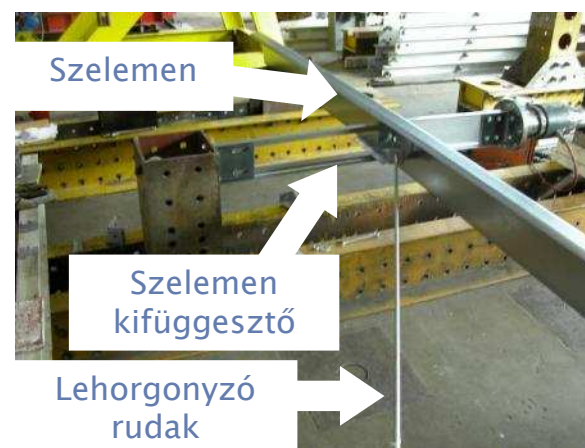
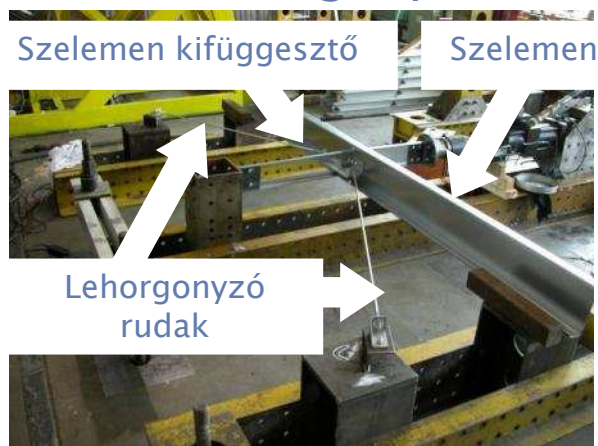


Kísérleti elrendezés

Szelemen kifüggesztő: 17+6 Taréj elem: 12 kísérlet
nyomásra és húzásra, 4x



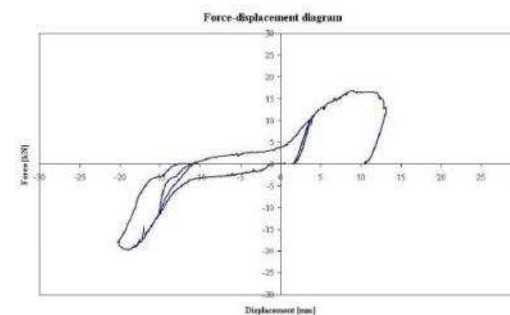
Lehorgonyzó elem: 16+16 kísérlet húzásra



Összesen
67 kísérlet

Kísérleti eredmények

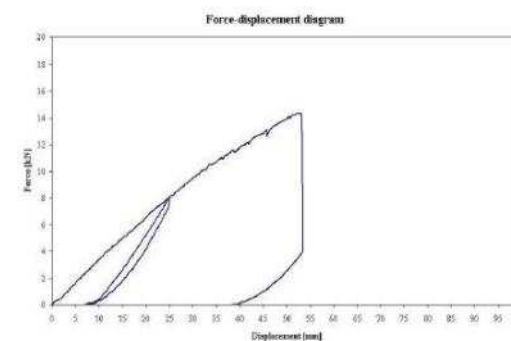
Szelemenkifüggesztő nyomási és húzási tönkremenetele:



Lehorgonyzó rudak kapcsolatának tönkremenetele:

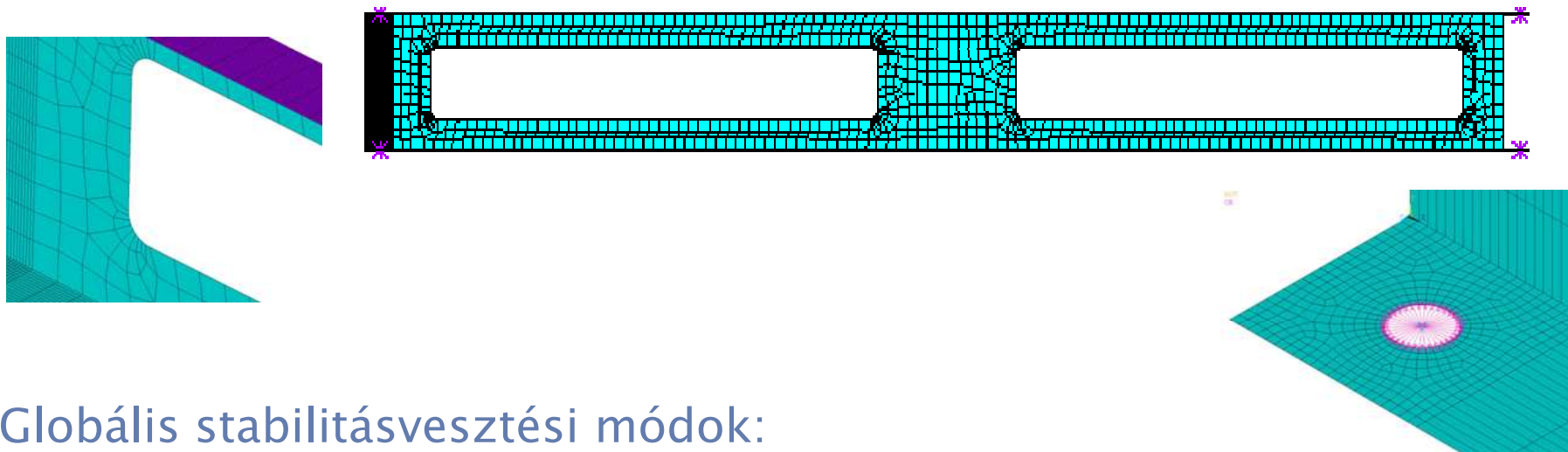


javított
→
kialakítás

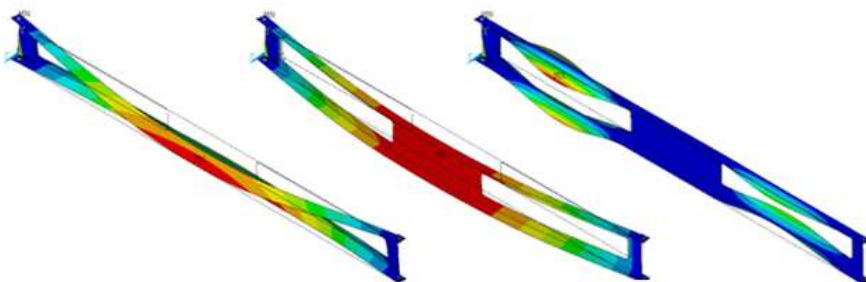


Felületszerkezeti modell

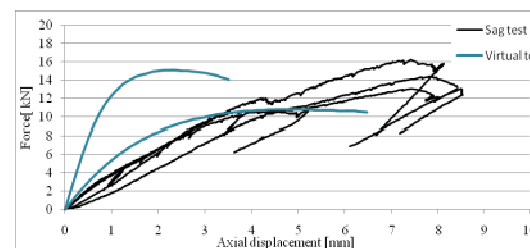
U-szelvény modellje:



Globális stabilitásvesztési módok:



Imperfekció érzékenység vizsgálat



Helyettesítő geometriai imperfekció



4. tézis

Megterveztem és végrehajtottam egy kísérleti programot könnyűszerkezetes tetőszerkezetek **kiegészítő elemeinek** a vizsgálatára. Meghatároztam a vizsgált elemek viselkedési módjait és a **tervezési ellenállásait** az alábbiak szerint.

- a) Hidegen alakított **vékonyfalú U-szelvényű** szelemenkifüggesztő elem nyomásra és húzásra, kétféle konfigurációban: nagyméretű kivágással a gerincben, illetve kivágás nélkül.
- b) **Állítható** szelemenkifüggesztő elem nyomásra és húzásra különböző csavarpozíciók esetén.
- c) **Tarék eleme** a szelemenkifüggesztő rendszernek nyomásra és húzásra különböző tetőhajlások esetén.
- d) A szelemen kifüggesztő rendszer **rúdjai** húzásra, szimmetrikus és nem szimmetrikus elrendezésben.

Kidolgoztam a nyomott szelemenkifüggesztő elem **felületszerkezeti végeelemes modelljét**. Jellemeztem a modell tönkremeneteli módjait és meghatároztam virtuális kísérletekkel a **helyettesítő geometriai imperfekcióit**.



Tetőszerkezet méretező algoritmus

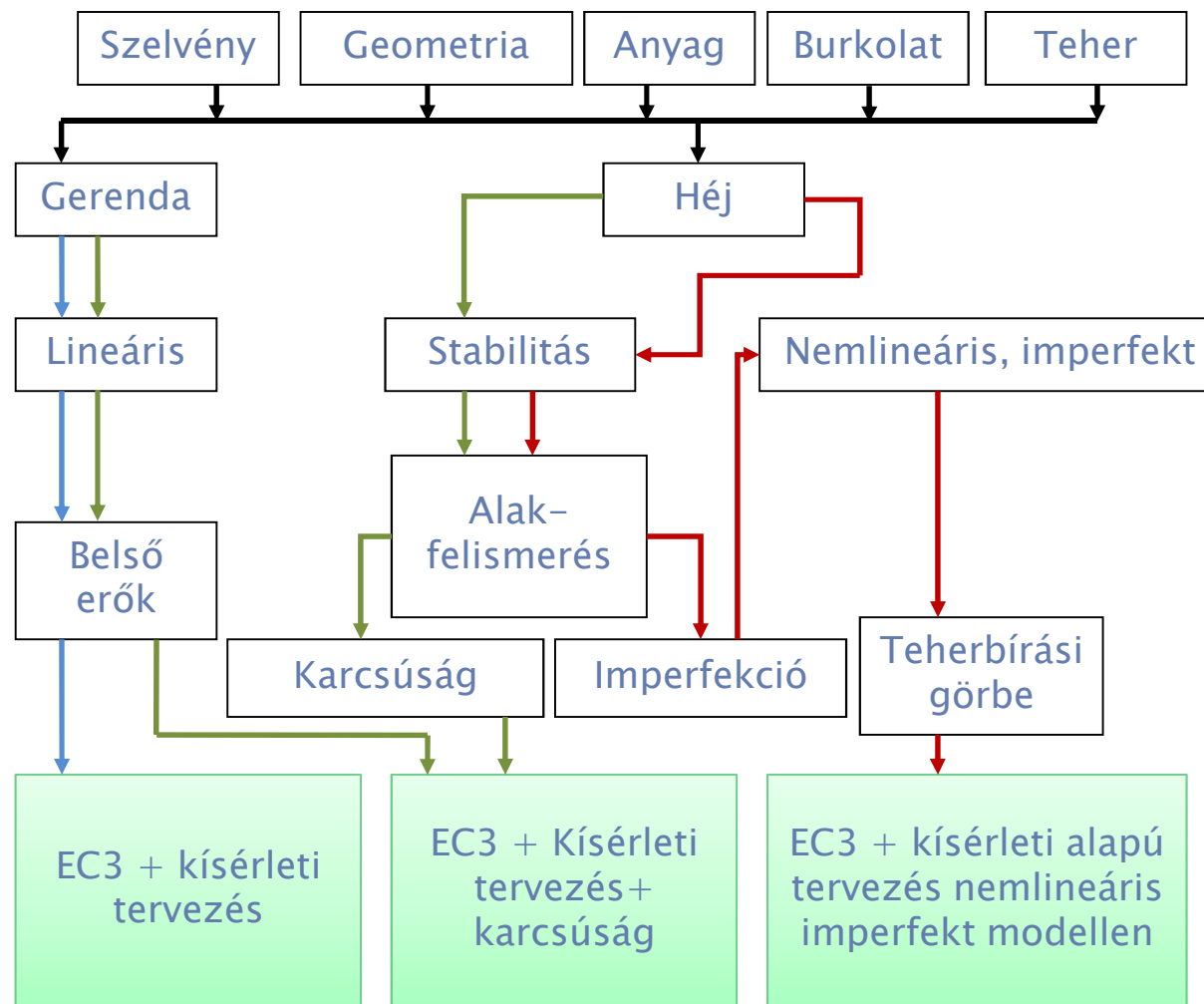
Modellalkotás

Modell

Megoldó

Kiértékelés

Tervezés



PurlinFED program

Matlab alapú

- geometria
- szelvények
- anyagmodellek
- burkolatok:
 - trapézlemez
 - korcolt tető
- terhek
- vizsgálati módszer

The screenshot shows the Purlin-FED software interface with the following sections and settings:

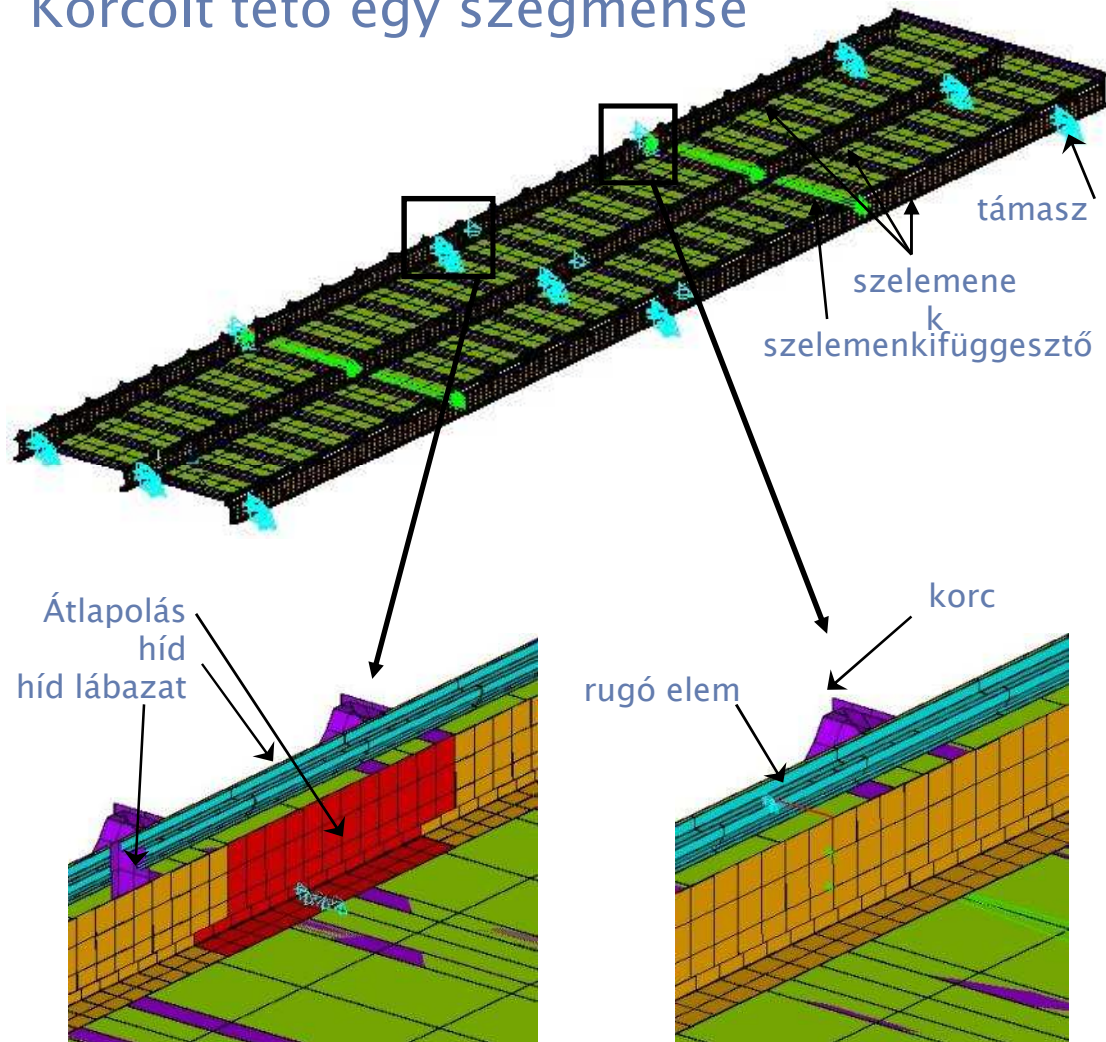
- Section:** Z100/1.0, Z, C70/0.7, C. Dimensions: h: 200, b1: 61, b2: 64, t: 21, t: 2.
- Geometry:** Overhang: 0, Span: 6000 6000, Overhang: 0. Overlaps: 300 300. Angles: 50 50 50 50. Anti-sag bars: 0 0 0; 1500 1500 3000. Roof slope: Degree 3, Percent 14. Purlin distance: 1500 1500. Placing: 1 1 0.
- Element type & length:** Shell: SHEL181, Element length: 100, Web: 4, Flange: 2, Lip: 1.
- Material:** Density: 7850, E: 210000, Poisson's ratio: 0.3. Yield stress: 400. Tangent mod.: 1043.
- Cladding system:** MR24 system without bridge, Trapezoidal sheeting. Bridge feet height: 100, Bridge feet distance: 600. LTP45/0. Positive, Negative h: 43, Trough, Crest t: 0.5. Unique sheeting, Every, Every 2nd. Dimensions: 77, 28, 47.
- Loading:** Constraints: at lower flange (2 x 2, 20 + 80), at web (3 x 3). Vertical: 100, Partial: 0, 0, 0. End-wall: force: 25, displacement: 100.
- Analysis:** Linear, Buckling 100, Nonlinear..., Imperfection 0, 0, EC3 Part 1-3.10.1.
- Input file:** Preprocessor, Solution, Postprocessor. Create input file only, Create input file and run Ansys. Working directory: C:\, File name: input.inp.db.

Buttons at the bottom: Check Geom., Multi Run, Run, Results, Quit.



Tetőszerkezet modellezése – példa

Korcolt tető egy szegmense



Modell verifikációja
teljes léptékű
kísérleti
eredményekkel

Tönkremeneteli mód:
torzulásos horpadás





5. tézis

Kidolgoztam az **alapjait és az algoritmusát** könnyűszerkezetes tetők **összetett méretezési módszerének**. A méretezési módszer összekapcsolja a (i) kísérleti alapú ellenállásokat, amelyekhez nincsen szabványos háttér és (ii) az Eurocode 3 alapú imperfekt modellen alapuló nemlineáris szimulációt. A kifejlesztett algoritmus – **PurlinFED** – három különböző méretezési szintet tartalmaz tetőszerkezetekre vonatkozóan:

- a) **rúdmodell** kiegészítve a **kísérleti** úton meghatározott átlapolás merevségekkel és a javasolt méretezési eljárásokkal az átlapolás végére és a szélső támaszra vonatkozóan,
- b) **rúdmodell** kiegészítve **hég végeelemes** alapú **stabilitásvizsgálattal** ahol a karcsúságot a teljes tetőszerkezet végeelemes modelljéből határozom meg, ami figyelembe veszi a burkolat valós megtámasztó hatását a szelemenre,
- c) **hég végeelemes** modell, ahol az anyagi és geometriai **nemlineáris számítás** imperfekt modellen alapul, az imperfekciók a sajátalakokból származnak, melyek a beépített osztályozó algoritmus segítségével választók ki.



Alkalmazás, továbblépés

Közvetlen alkalmazás:

- átlapolás környezetének méretezése
 - végső támasz méretezése
 - átlapolás merevségének figyelembevétele
- Bauhaus–Universtät Weimar egyetemen kifejlesztett programban

Továbblépés:

- kifejlesztett végeelemes modellek beépítése PurlinFED programba (átlapolás, szelemenkifüggesztő részletesebb modellezése), gyakorlati alkalmazás

Közvetett alkalmazás:

- Dunaújvárosi Duna–híd: kísérlet, numerikus szimuláció, tervezés
- számos szerkezet héj végeelemes modellezése, tervezése



Köszönetnyilvánítás

Dunai László



Köszönetnyilvánítás

Kollár László

Ádány Sándor

Labor munkatársak

Hidak és Szerkezetek Tanszéke

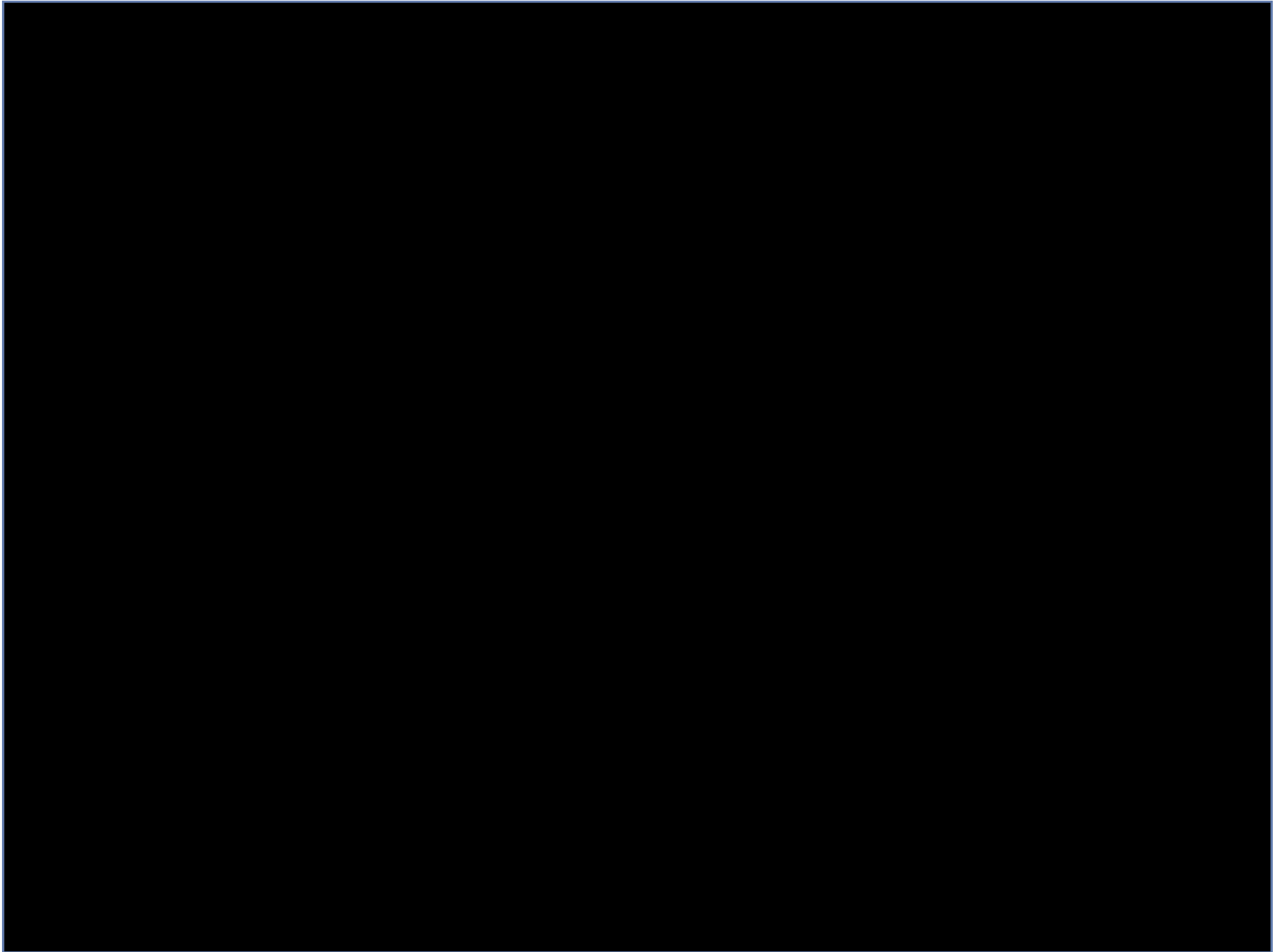


Köszönetnyilvánítás

Családomnak



Köszönöm a figyelmüket!





Válaszok Dr. Bojtár Imre bírálatára

**1.**

A nyomott Z-szelvényű elemek mechanikai tulajdonságainak vizsgálatával kapcsolatos **második** tézis mindkét részét önálló eredménynek tekintem és a **tézist elfogadom**. Kérésem a Jelölthöz, hogy a *nyilvános védésen térjen ki arra, hogy az itt bemutatott sajátalak-osztályozást minden esetben megbízhatónak és főleg elegendőnek tartja-e, nem fordulhat-e elő olyan speciális terhelési eset, amelynek hatására a vizsgálatnak ki kell lépnie ebből a körből?*

A második tézissel kapcsolatos kérdésre az a válaszom, hogy a bemutatott módszer sajátossága a jelen kutatási szinten, hogy a végessávós bázisfüggvények **szinuszos alakúak**, ezért olyan esetben **nem alkalmasak** az osztályozás végrehajtására, amikor egy adott elem kezdő keresztmetszetében (akár teljesen, mint például egy konzol esetében, vagy részlegesen egy-egy lemezre vonatkozóan) **nincs megtámasztás**. A disszertációban is található erre példa, a 31-es ábra b) részén tüntettem fel azt a megtámasztás típust, amikor nem minden esetben működik helyesen az osztályozás. Ebben az esetben egy Z-szelvényű szerkezeti elem csak a gerincén volt megtámasztva, amivel egy valós, önfűró csavarokkal kialakított kapcsolatot próbáltam modellezni. Ezt a problémát kiküszöbölendő kutatócsoportunkkal új – **cosziniuszos** vagy polinomiális – bázisfüggvények bevezetését javasoljuk.



2.

A Z-szelvényekből álló folytatólagos szelemenek átlapolt kapcsolatainak elemzésére elvégzett vizsgálatokat önálló eredménynek tekintem és a **harmadik tézist elfogadom**. Kérdésem a Jelölthöz, hogy az átlapolások következtében létrejövő *geometriai változások* hatásának figyelembevételét nem tartaná-e szükségesnek egy ilyen léptékű modellezés esetén? A héjmodellekkel történő vizsgálatnál erre könnyebben van lehetőség, de megjelenik-e ez a hatás a *gyakorlati ellenőrzés-tervezés szintjén*?

A harmadik tézissel kapcsolatos kérdés, hogy az **átlapolás környezetében** bekövetkező **geometriai változás** hatását szükségesnek tartom-e figyelembe venni a modellezés során? A válaszom az, hogy az általam vizsgált esetben megjelent e geometria megváltozása, ugyanis a szelemenek alsó és felső öve azonos szélességű volt, ezért össze kellett feszíteni őket, azonban létezik olyan szelvény is, ahol különböző az övszélesség, ezért nincs szükség összefeszítésre. Az összefeszítésnek a szerkezet geometriájának megváltozására gyakorolt hatása úgy gondolom közvetlenül nem jelentős, az összefeszítés kézzel elvégezhető, a geometriai változás maximuma milliméteres nagyságrendű lehet, és azt az elemvéget érinti, amelyik nem ment tönkre a kísérletek során.

Ha **héj végeeselemes modellen** alapuló méretezési eljárást tekintjük, akkor az a véleményem, hogy ez is egy olyan hatás, amit a modell **helyettesítő geometriai imperfekciójának** tartalmazni kell, de közvetlenül nem kell megjelennie a modellben. A helyettesítő geometriai imperfekció mértékét úgy kell megválasztani, hogy a kísérletekkel egyező viselkedést, teherbírást és merevséget kapjunk eredményül, nem csak összefeszített hanem összefeszítés nélküli esetben is.

A gyakorlati ellenőrzés-tervezés szintjén pedig, amennyiben az **rúdmodellel** történik, nem szükséges közvetlenül megjelennie a geometria megváltozás hatásának, mert **kísérlettel meghatározott tervezési ellenállás** értékek ezt a hatást tartalmazzák.

**3.**

A könnyűszerkezetes tetőszerkezetek kiegészítő elemeinek vizsgálatára vonatkozó **negyedik** tézist **elfogadom**. Kérdezem a Jelölttől, hogy a nagyszámú kísérlet elemzése és az ehhez kapcsolódó numerikus tesztek után lát-e esélyt arra, hogy ezen kiegészítő elemek tervezése *is* hasonló szinten *szabványosítható* legyen, mint azt például a harmadik tézis esetében megtette?

A szelemenkifüggesztő rendszer méretezési eljárásának **szabványosításával** kapcsolatos kérdésre azt válaszolom, hogy az adott szerkezeti kialakításra sikerült szabványos tervezési teherbírás értékeket meghatározni. A nagy számú, több szerkezeti kialakításban végrehajtott kísérlet ezen túlmenően alkalmas arra, hogy meghatározzak olyan **szerkesztési szabályokat**, melyekkel a tönkremenetel egy adott helyre, a szelemenkifüggesztő fő elemébe, a vékonyfalú U-szelvénybe koncentrálódik. Ennek az elemnek a húzási és nyomási teherbírása pedig könnyen számítható szabványos úton.

A kísérletek kiértékelése továbbá felhívta a figyelmet arra is, hogy a szelemenkifüggesztő rendszer rendkívül lágy, igen nagy alakváltozások ébrednek a teherbírás szintjén, melyek egy burkolatot is tartalmazó valós szerkezeti kialakítás esetén nem tudnak kialakulni. Azaz szabvány szintjén **használhatósági korlátozás** beépítést javaslom, mely szigorúbb feltételt jelent a teherbírás korlátozásánál.



4.

Az ötödik tézist tartom magam részéről az egész munka legértékesebb elemének, az előző részek szintézisének. Ennek megfelelően ezt a tézist is elfogadom. Kérem a Jelöltet, hogy a nyilvános védésen részletesen elemezze, hogy milyen kimutatható számítási illetve gazdasági előnyökkel jár ennek a komplex változatnak a használata a teljes szerkezet részenként történő mechanikai elemzésével összevetve.

A teljes tetőszerkezet méretezésnek komplex változata jelenleg kutatási stádiumban van, ezért részletes tervezési, gazdasági előnyököt nem tudok felmutatni. Azonban tapasztalataim alapján egyértelmű, hogy csak egy ilyen szintű komplex modell képes követni a tetőszerkezet valóságos viselkedését, és túllépni a szabványban alkalmazott közelítéseken, elősegítve ezzel a gazdaságosabb tervezést. Az általános alkalmazhatóságon túlmenően két példát emelnék ki, ahol szükséges a komplex végeleemes modell alkalmazása.

Az acélcsarnokok földrengési viselkedésének megismerését segíti elő egy ilyen modell alkalmazása teljes tetőszerkezetekre. A könnyűszerkezetes tető merevsége jelentősen befolyásolja az egyes keretekben és merevítésekben ébredő erőket a földrengés hatásból, ezért fontos annak pontos ismerete. Ezen kutatás eredményeként közvetlen gazdasági előny érhető el az által, hogy a fő tartószerkezetben igazolhatóan kisebb erők a lágyabb tetőkialakítás miatt.

Egy másik kutatási terület, ahol gazdasági előny érhető el az egy olyan szelemenrendszer kifejlesztése, mely nem tartalmaz szelemenbakokat, mellyel anyagmegtakarítás illetve gyártási költségmegtakarítás érhető el. Ebben az esetben még fontosabb a tetőfelület síkjában keletkező erők eloszlásának és levezetésének pontos ismerete, mellyel eddig nem foglalkoztak részletesen a tervezés során, mert a szelemenbak képes volt felvenni ezeket az erőket. Az általam bemutatott komplex modell alkalmas arra, hogy elemezzem ilyen rendszerek viselkedését és az eredményekkel közvetlen támogatást nyújtsak a tervezéshez. Megjegyzem, hogy ehhez a kutatáshoz kapcsolódóan tervezzük egy újabb kísérletsorozat végrehajtását, melynek során a függőleges és vízszintes terheket együttesen működtetünk egy adott szelemenrendszerre, így vizsgálva a szelemenbak nélküli kialakítás alkalmazhatóságát.



Köszönöm bírálómnak a dolgozat elfogadására
tett javaslatát!



Válaszok Dr. Jármái Károly bírálataira



1.

A 11. oldalon írja, hogy alig talált irodalmat a témára. Az interneten gyors keresést végezve találtam az alább megadott irodalmakat, melyek egy negyedóra után már a kezembben voltak. Kihagytam belőle a 2008 és utáni éveket. Így is látható, hogy elérhető nagyon jól használható, sőt kísérleteket bemutató irodalom is.

11. oldalon szereplő mondat, mely szerint nem találtam irodalmat a témára, kifejezetten a második fejezetre vonatkozik, mely nyomott Z-szelvényű elemek vizsgálatával foglalkozik. Köszönöm a Tanár úrnak a gyors irodalomkutatót, melynek eredményeként előálló listából több cikk vagy közvetlenül, vagy közvetve (azonos témájú cikk azonos szerzővel) megtalálható a dolgozatomban. Az utolsó cikket valóban nem találtam meg, ezért külön köszönöm, hogy felhívta rá a figyelmemet.

2.

- Angolban a „global buckling” helyett sokszor az „overall buckling” kifejezést használják.

Köszönöm, hogy felhívta a figyelmemet az „overall buckling” kifejezés gyakoribb használatára.

3.

- A 17. oldal 2. táblázatában a „coupled instability”-vel nem foglalkozik, pedig akkor a „design resistance” értéke változhat.

A 17. oldalon szereplő 2. táblázat a nyomott Z-szelvényű elemek kísérleteinek összefoglalását tartalmazza. Az ebben szereplő viselkedésmódok között több interakciós módot tüntettem fel, melyek „coupled instability”-nek tekinthetőek.

**4.**

- A 26-dik oldalon a 16. ábrán a nagyobb alakpontatlanság nagyobb tengelyirányú elmozdulás esetén nagyobb erőt ad, mint kisebb alakpontatlanság esetén (nem túl nagy az eltérés). Vajon miért lehet ez?

A 26. oldalon szereplő erő-elmozdulás diagramokon nagyobb alakpontatlansághoz kisebb teherbírás tartozik.

5.

- A 29-dik oldal 8. táblázatában mi a különbség az 1-3 és 2-4 sorok között a 800-2000-3600 hosszak esetén? Ez két-két szimulációt takar? Miért van esetenként majdnem nagyságrendi eltérés a kezdeti alakpontatlanságban?

A 29. oldalon szereplő 8. táblázatban kétféle maximális alakhibához (L/200 és L/600) tartozó eredményeket tüntettem fel. További eseteket jelent, hogy kétféle irányban bekövetkező síkbeli kihajlás hatását vizsgáltam, illetve megvizsgáltam a síkbeli kihajlás alakú és a térbeli elcsavarodó alakú alakhibák hatását is, a 2000 és 3600 mm-es esetekben.

6.

- A 30-dik oldal 19. ábráján ugyanaz a kérdésem, mint a 16. ábra kapcsán, csak itt már nagyobb az eltérés.

A 30. oldal 19. ábráján szereplő erő-elmozdulás diagramok a 8. táblázatban bemutatott alakhibákkal számított eredményeket mutatják be. Ezekben az esetekben, a globális alakhibákon kívül megjelentek lokális és torzulásos horpadásos alakhibák is, melyek posztkritikus tartalékukkal befolyásolták az adott elemek viselkedését.



7.

- A 35-dik oldal képleteinek megadása pontatlan a bennük szereplő mennyiségek definiálási hiánya folytán. Itt segített volna egy jelölésjegyzék. A hibát úgy definiálja, hogy a végeselemes eredményből kivonja a linearizálási eredményt. Tehát a hiba nem feltétlenül pontos, sőt nagyon pontatlan is lehet, mint ahogy az értekezés további részeiben tárgyalja a végeselemes háló finomításának szükségességét. Hogyan tudja ezt a hibát használni (37. oldal cFSM pontossága)?

A jelölésjegyzékre vonatkozóan köszönöm az észrevételt, valóban segített volna a megértést. A (7) képletben megadott hiba a végeselemes modell elmozdulásainak és a bázisfüggvények lineáris kombinációival előállított elmozdulások különbségét jelenti. Ez a hiba vagy különbség egy adott elemsűrűség esetén „pontos” információt ad a közelítés pontosságáról, azonban nem tartalmazza a rosszul megválasztott végeselemes osztás által okozott „hibát”



8.

- A 38-dik oldalon a 10. táblázatban a hiba értéke nagyságrendileg változik oszlopról oszlopra. Itt felvetődik a hibaszámítás megbízhatósága a másik oldalról, a linearizálás oldaláról, az hogy mit tud lekezelni a cFSM módszer. Nem adott mértéket erre, mikor fogadja el és mikor nem az eredményeket?

A 38. oldal 10. táblázatában szereplő hibák értelmezése volt a kutatásunk célja. Ezzel a témával foglalkoztunk egy újabb cikkünkben: Joó Attila, Ádány Sándor: „FEM-based approach for the stability design of thin-walled members by using cFSM base functions”. Ebben a cikkben alkalmaztuk először az osztályozást a Direct Strength Method méretezési módszerrel együtt, mely a tiszta stabilitásvesztési módok ismeretén alapszik. Végezzávos eredményekkel összevetve a végelelemes eredményeket beláttuk, hogy az osztályozás során elegendő 70–80%-os arány ahhoz, hogy egy adott stabilitásvesztési módot „tisztának” tekintsünk, és figyelembe vegyünk a méretezés során. Tapasztalataink alapján a hiba mértéke kiugróan változik, azaz leggyakoribbak a néhány százalék hibával és a nagy hibával rendelkező esetek, közbenső eset kevés akad az osztályozás során. Mindezek alapján az 5 %-on belüli hibával rendelkező eseteket fogadtuk el alkalmazhatónak a gyakorlati tervezés szempontjából.



9.

- A 39-40-dik oldal szövege és 30. ábrája kapcsán az az állítás, hogy „buckling stressespredicted by FE and FSM models are nearly identical” számomra nem nyilvánvaló, mert valamikor nagyon eltérnek egymástól, esetenként 2.5-os szorzóval is.

A 40. oldalon szereplő 30. ábra a) része mutatja be a „buckling stress” eredményeket, melyen látható a jó egyezés FSM és FE módszerek között.

10.

- Az 50-54-dik oldal. Ennél a szelvénytípusnál és méretnél hozzávetőlegesen mely érték(ek)nél (hossz, terhelés, stb.) lehet az átmenet a hajlítás és a nyírás dominanciája között?
Tudna erre valamilyen általánosítást javasolni?

A gyakorlatban alkalmazott támaszközöknél és szelvényméreteknél az átlapolás végén a hajlítási tönkremenetel dominál, ehhez választottuk meg a kísérleti próbatestek támaszközét is. A gyakorlati alkalmazástól eltérően csak nagyon kis támaszközénél jelenne meg a nyírési tönkremenetel dominanciája.

**11.**

- Az 56-dik oldal 13. képlete kapcsán a következő kérdésem van. A (3)-ban megadott 0.9-es tényező itt nem szerepel. 3.6.2. fejezet magyarázatát hogyan kell érteni a 0.9-es szorzó tekintetében?

Az 56. oldal (13) képletében azért nem szerepel a (3)-ban alkalmazott 0,9-es szorzó, mert azt csak akkor kell alkalmazni, ha egy kísérletünk volt egy adott szerkezeti kialakításból. Két azonos kísérlet esetén már a (13) képletnek megfelelően lehet a két érték átlagával számolni, és ebben az esetben nem kell figyelembe venni a 0,9-es szorzót. Ennek megfelelően a a 3.6.2 fejezetben található egy elírás, azaz ebben az esetben nem kell figyelembe venni a 0,9-es szorzót, a következtetés azonban helytálló, mert 4 kísérletnél már statisztikai kiértékelést tesz lehetővé a szabvány, ami vélhetően tovább javítana az eredményeken.

**12.**

- A 62-dik oldal 58. ábrán a mért értékek sokszor vannak alatta annak az értéknek, amit az Eurocode interakciós görbéje ad. A javasolt módosítás, (17) képlet, hogyan jött létre? Maximum mekkora hibát adhat?

A 62. oldalon szereplő 58-as ábra a nyomaték–reakcióerő összefüggésre vonatkozik, abban az esetben az Eurocode méretezési módszere megfelelően működik. Megjegyzem, hogy az ábrán nyíllal jelölt kísérletek esetében azért kaptunk kisebb teherbírást, mert nem beroppanási tönkremenetel következett be. A (17)–es képlet nem erre a kialakításra, hanem a szélső támasz beroppanási tönkremenetelére vonatkozik, melynek eredményei az 59. és 60. ábrákon találhatóak. Ezekben az esetekben mért és számított eredmények közötti eltérés minden esetben azonos tendenciát mutat.

13.

- A 68-oldal “anti-sag system” téma irodalma szintén viszonylag nagy, mint az alábbi lista mutatja annak egy részét.

Köszönöm szelemenkifüggesztő rendszerrel kapcsolatos irodalomkutatását. Az itt felsorolt cikkek nem magával a szelemenkifüggesztő rendszer elemeivel, hanem általában a burkolatok megtámasztó hatásával foglalkoznak a másodlagos teherhordó szerkezeti elemekre vonatkozóan. Az én kutatásom ebben a témában kifejezetten a megtámasztó elem (jelen esetben egy vékonyfalú U-szelvény), annak kapcsolatainak és lehorgonyzásának) vizsgálatával foglalkozik, melyet a 4. tézisemben foglaltam össze.

**14.**

- A 70-dik oldalon szereplő nagyobb számú rövidítés kissé zavaró. Például a HSH módosított szelvény részleteit nem találtam.

Köszönöm az észrevételt, sajnos valóban sok rövidítést alkalmaztam, mely a gyártó saját jelölésrendszere. A módosított HSH szelvény az állítható hosszúságú elemmel együtt a 67-es ábrán látható, csak annyiban különbözik az alapszelvénytől, hogy több lyuk található az övekben a változatható illesztési hely miatt.

15.

- A 90-dik oldalon érdekelne, hogy a MATLAB és az ANSYS konkrét összekapcsolása hogyan valósult meg?

A Matlab program alkalmas arra, hogy bármilyen szövegfájlt generáljunk vele. Ebben az esetben az Ansys program saját programnyelvén (APDL) íródott programot generál a Matlab algoritmus, melyet input fájl felhasználva lehet futtatni Ansys programban. A kettő összekapcsolása történhet az Ansys batch módban való futtatásával, amikor is a Matlabból közvetlenül kiadott DOS paranccsor segítségével hívható meg egy input fájl.



Köszönöm bírálómnak a dolgozat elfogadására
tett javaslatát!

