

## VÁLASZ

### Vörös Gábor Miklós

bírálatára, amelyet a Magyar Tudományos Akadémia Doktori Tanácsa DT.58.041/18/06 számú felkérésére állított össze

#### Prológus

*Először tisztelettel megköszönöm a Bírálóm korrekt munkáját, amelyben a jogos észrevételek és kérdések mellett nagy gondot fordított az értekezés értékeinek feltárására.*

#### Válaszaim a Bíráló kérdéseire és észrevételeire

A Bírálóm az észrevételeivel és kérdéseivel az értekezés olvasási rendjét követte, ezért a válaszaimat is annak megfelelően adom meg. A Bírálóm az értekezés érdemi megítélését befolyásoló kérdéseit aláhúzással jelölte. A jelen válaszomban ezeket a kérdéseket **félkövér** szedéssel jelzem.

- 4.oldal: Az oldal felső részén szerepel először a "*.. GMNIA alapú ..*" kifejezés. Mi a GMNIA betűszó értelme?

Az észrevétel jogos, a betűszó csak később a 9. oldal utolsó bekezdésében kerül meghatározásra: „...*tökéletlen szerkezeti modell geometriailag és anyagilag nemlineáris analízise* (GMNIA, geometrically and materially nonlinear analysis with imperfection)...”. A tökéletlen szerkezeti modell esetünkben a kezdeti geometriai tökéletlenséggel és a maradó belső alakváltozással (feszültséggel) terhelt modellt jelenti.

- 2.1. 14. oldal: Az 1D (EPS) modell mellett miért van szükség a 2D (GSS) modellre is? A 2.1 példa tanulsága, hogy a két modellből származó eredmények lényegében azonosak. Ha jól értem, a továbbiakban a származtatott modellek csak az 1D modellre épülnek.

Történetileg először az EPS modell született meg. A GSS modell fejlesztésére az alábbiak miatt volt szükség:

- a felhasználók bizalmának megőrzése megkövetelte az acél keresztmetszetek jellemzőinek pontos számítását; ezt a GSS modellel lehetett megvalósítani, mivel jól követhetők az állapotjellemzők változása a lemezvastagság mentén, illetve a lekerekítések (pl. H szelvény nyaki részén) mentén.
- beton, vasbeton és öszvér keresztmetszetek jellemzőinek számítása.

Könnyű olyan keresztmetszetet találni, ahol a két modell eltérése már jól érzékelhető. Ilyen például a HEM300 jelű keresztmetszet, ahol az  $I_y$  inercianyomatékban az eltérés meghaladja a 0,5%-ot.

A származtatott modellek az 1D (EPS) modellre épülnek.

- 2.2. 15. oldal: A 2.2 táblázat 8. sorában a CHS mire utal?

A CHS betűszó (Circular Hollow Section) a vékonyfalú kör keresztmetszet nemzetközi jele. A kérdéses attribútum azt jelzi, hogy az EPS modell mely specifikus keresztmetszeti kategóriába tartozik. Az attribútumot a szabványos ellenőrzés algoritmus használja.

- 2.3. 15. oldal: Nem találtam a leírását annak, hogy az UPR modell milyen képlékeny jellemzőket határoz meg. A 2.1. példa eredményei között csak a  $W_{pl,y}$  és a  $W_{pl,z}$  szerepel. Ha a hajlítás tengelye nem szimmetriatengely, más jellemzőkre is szükség lehet.

Az UPR modell önmagában nem határoz meg képlékeny jellemzőket. A leírás az UPR modell származtatását adja meg. A modell az alábbi jellemzők számíthatóságát biztosítja:

- (i) az európai normarendszer (Eurocode) által megkívánt képlékeny jellemzők;
- (ii) a ConPlas nevű kutató programomban a tangens keresztmetszeti jellemzők.

Az (i) kapcsán két tényt kell megemlítenem: (1) az alapul vett európai méretezési szabványrendszer (EC3) nem alkalmaz „ferde” hajlításhoz tartozó képlékeny jellemzőket; (2) a ConSteel rendszer szabványos szelvénybankja nem tartalmaz olyan aszimmetrikus keresztmetszetet, ahol a képlékeny jellemzők számítása releváns volna. Ezek okán csak a kétszeresen vagy egyszeresen szimmetrikus keresztmetszetek  $W_{pl,y}$  és a  $W_{pl,z}$  számításához fejlesztettem általánosított algoritmust.

A (ii) kapcsán megemlítem, hogy a tangens keresztmetszeti jellemzők számításának alapelveit, illetve a kifejlesztett algoritmussal végzett pontossági tanulmány eredményeit a *Computers & Structures* folyóiratban közöltem (Papp et al. 2001).

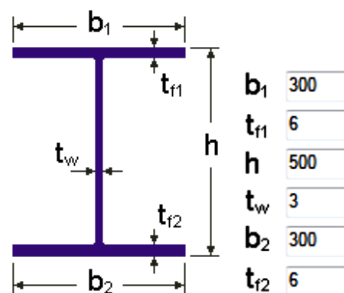
- 2.4. 16. oldal: A 2.2 fejezetben nagyon rövid az effEPS modell leírása. A nem hatékony lemezrészek méretének meghatározása a szöveg szerint az EN 1993-1-3 alapján történik. Ez vajon egyértelműen meghatározza a követendő eljárást? Úgy tudom, hogy az idézett szabvány alternatív számítási eljárásokat ad meg, például a 4.3 és az Annex E fejezetekben. Szükség van a számítások során iterációs lépésekre is?

Az értekezésem hivatkozott része pontosan így szól: „Az EN 1993-1-1 alapú keresztmetszeti ellenőrzések a 4. keresztmetszeti osztály esetén megkövetelik az EN 1993-1-5 alapján értelmezett hatékony (effektív) keresztmetszeti jellemzők alkalmazását.”. Az értekezésemben a szabványt pontosan jelöltem meg. A szabvány meghatározza a követendő eljárást, de nem egyértelműen. A szabvány logikájának két eljárás is megfelel, amelyek a következők:

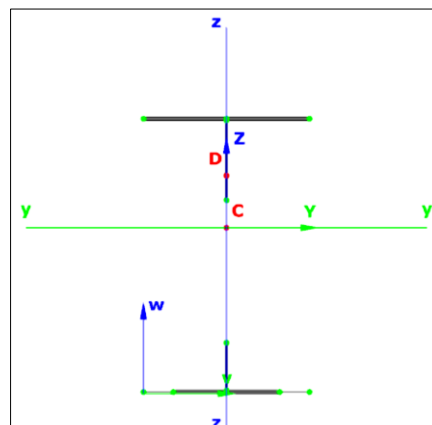
- 1) a 4.3(3) szerint a hatékony effEPS modelleket a tiszta igénybevételi esetekre ( $N, M_y, M_z$ ) külön-külön generáljuk, és a tiszta esetekhez számítjuk a hatékony jellemzőket ( $A_{eff}, W_{y,eff}, W_{z,eff}$ );
- 2) a 4.3(4) szerint az összetett igénybevételi állapotban számított normálfeszültségi eloszlásból egyetlen effEPS modellt generálunk, majd az összes jellemzőt azon a modellen számítjuk.

Amikor az utóbbi esetben a nominális keresztmetszeten vett kezdeti normálfeszültségi eloszlás az effEPS modellen számítva megváltozik, akkor az effEPS modell is módosul. Ez iteratív eljárásra vezet, ahol az iteráció, néhány speciális esettől eltekintve, konvergens. A két eljárás eltérő jellemzőket ad, az eltérés a keresztmetszeti kihasználtságban is megjelenik. Ezt illusztrálok az alábbi példával:

- **keresztmetszet:**



effEPS modell a 2) eljárás esetén



- **teher:**

$N=400.0\text{kN}$  nyomóerő

$M_y=100.0\text{kNm}$  hajlító nyomaték

- **eredmények**

| keresztmetszeti jellemző          | névleges modell | hatékony modell |            |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------|------------|
|                                   |                 | 1) eljárás      | 2) eljárás |
| $A \text{ (mm}^2\text{)}$         | 5064            | 2778            | 3644       |
| $W_y \text{ (mm}^3\text{)}$       | 994744          | 655856          | 650406     |
| $\eta_4$ szintű kihasználtság (%) |                 |                 |            |
|                                   | 76.39           | 111.6           | 99.04*     |

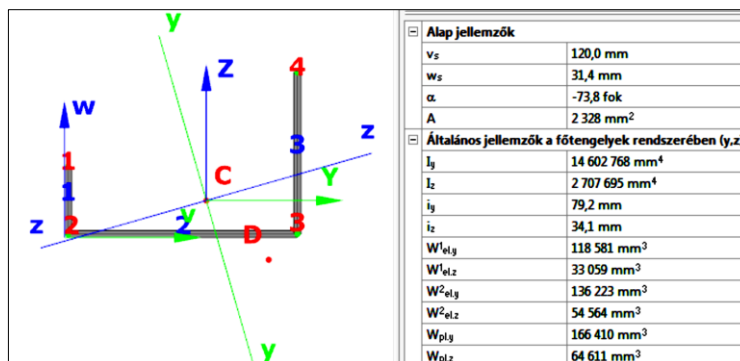
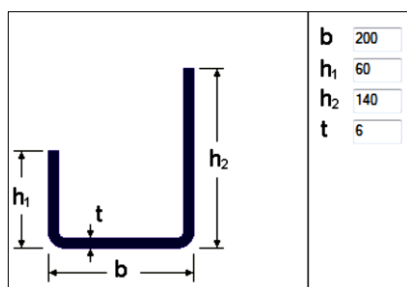
\*) a súlyponteltolódás figyelembevételével számítva

Az általam fejlesztett algoritmussal a 2) eljárást valósítottam meg. Az iteráció szükségességére sem a szabvány, sem a szakirodalom nem ad egyértelmű választ. Ezért tapasztaljuk azt, hogy a különböző szoftverek ugyanazon feladatra más és más eredményt adnak.

Az Annex E valóban kínál egy alternatív formulát arra az esetre, amikor a keresztmetszet szilárdsága nincs kihasználva. Ez előnyt jelenthet például a hidegen alakított keresztmetszetek (pl. szelemenek) esetében. Megjegyzem, hogy az előbbi típusú vékonyfalú keresztmetszeteket az értekezésemben kizártam. Abból indultam ki, hogy az általam vizsgált szerkezeti térben a mértékadó keresztmetszet a lehető legnagyobb mértékben kihasználta, és ezért nem építettem be az algoritmusba a szóban forgó alternatívát. Megjegyzem, hogy az effEPS modellt generáló algoritmusban az alternatíva beépítése egyszerű volna, ugyanis a módosítás a jellemzőket számító algoritmust értelem szerűen nem érinti.

- 2.5. 17. oldal: A 2.1. példa nominális keresztmetszeti jellemzői között megjelennek a  $W_{elY}$ ,  $W_{elZ}$  és a  $W_{elY}$ ,  $W_{elZ}$  eredmények. A felső index mit jelent?

Az <sup>1</sup> és a <sup>2</sup> felső index a keresztmetszet két tehetetlenségi főtengeleje irányában a két szélső pontot (legtávolabbi szálat) jelzi. A jelölésnek mono- vagy aszimmetrikus keresztmetszeteknél, illetve a hatékony keresztmetszeti modellnél van jelentősége. Az alábbi példánál a  $W_{el,z}$  esetén az <sup>1</sup> a 4-es ponthoz, a <sup>2</sup> a 3-as ponthoz tartozik, illetve a  $W_{el,y}$  esetén az <sup>1</sup> a 4-es ponthoz, a <sup>2</sup> a 2-es ponthoz:

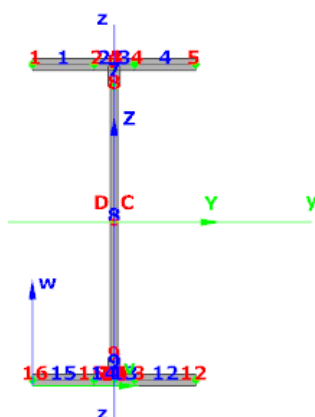


- 2.6. 18. oldal: Az ábra alatti első sorban lévő "EC3-1-5 4.3.(5)" hivatkozás valószínű, hogy az EN 1993-1-5 (2006) *Eurocode 3* 4.3 fejezetének (5) pontjára utal. Biztos, hogy helyes ez a hivatkozott hely?

Sajnos az (5) szakaszra történő hivatkozás helytelen, a helyes hivatkozás a (4).

- 2.7. 22. oldal: Kár, hogy a 2.2. példa jellemzői között nem jelenik meg a  $W_{pl,y}$  számértéke, amivel ellenőrizni lehetne a 23. oldal táblázatának eredményeit. (Saját számításom szerint a fél keresztmetszet  $S_y$  statikai nyomatókának kétszerese **628358 mm<sup>3</sup>**.)

Az említett jellemző az alábbi kivágáson már látszik:



| Alap jellemzők                                       |                            |
|------------------------------------------------------|----------------------------|
| v <sub>s</sub>                                       | 75,0 mm                    |
| w <sub>s</sub>                                       | 150,0 mm                   |
| α                                                    | 0,0 fok                    |
| A                                                    | 5 381 mm <sup>2</sup>      |
| Általános jellemzők a főtengelyek rendszerében (y,z) |                            |
| I <sub>y</sub>                                       | 83 535 350 mm <sup>4</sup> |
| I <sub>z</sub>                                       | 6 018 750 mm <sup>4</sup>  |
| i <sub>y</sub>                                       | 124,6 mm                   |
| i <sub>z</sub>                                       | 33,4 mm                    |
| W <sup>1</sup> <sub>el,y</sub>                       | 556 902 mm <sup>3</sup>    |
| W <sup>1</sup> <sub>el,z</sub>                       | 80 250 mm <sup>3</sup>     |
| W <sup>2</sup> <sub>el,y</sub>                       | 556 902 mm <sup>3</sup>    |
| W <sup>2</sup> <sub>el,z</sub>                       | 80 250 mm <sup>3</sup>     |
| W <sub>pl,y</sub>                                    | 628 356 mm <sup>3</sup>    |
| W <sub>pl,z</sub>                                    | 124 596 mm <sup>3</sup>    |

- 3.1. 24. oldal: Az első bekezdésben az elcsavarodás deriváltjára használt *elcsavarodás sebessége* elnevezés nem túl szerencsés. Például a lehajlás deriváltját, a rúd keresztmetszet szögelfordulását sem nevezzük lehajlás sebességnek. Szerintem, a (3.3) formula utolsó tagjából kiindulva, jobb lenne a *vetemedési paraméter* elnevezés.

Az észrevételt jogosnak tartom.

- 3.2. 27. oldal: A (3.1) virtuális munka elv jobb oldala szerint a rúdelemre csak a két végén működik külső erőhatás. Hogyan veszi figyelembe a 3.2 példában (33. oldal) a Z irányú vonalterhelést, vagy más esetben a térfogaton megoszló önsúlyterhelést?

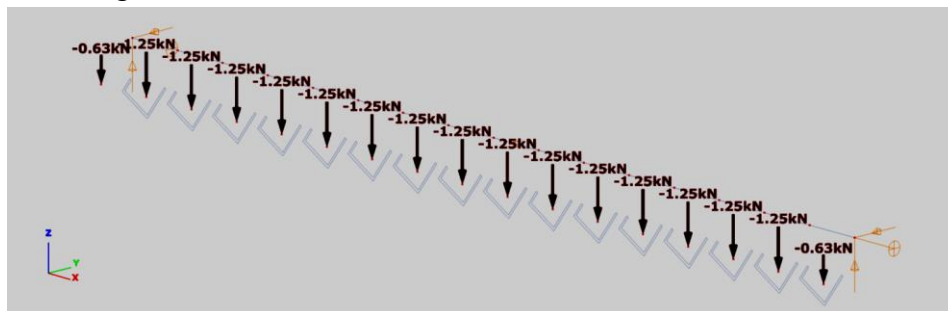
A ConSteel program prototípus algoritmusában a Rajasekaran féle 7 szabadságfokú végelelemet adaptáltam (Chen and Atsuta, 1977). Ez az elem nem tartalmaz elem mentén

ható külső hatásokat. Vonal mentén megoszló teher esetében a hatás redukálható az elem két csomópontjára. Amennyiben a szerkezeti modell vége-selemes felosztása megfelelően sűrű, az eredmények, legalábbis mérnöki szemmel nézve, megfelelően pontosak lesznek. A megfelelő sűrűségű felosztást az algoritmus automatikusan határozza meg a beépített szempontok és elvek alapján.

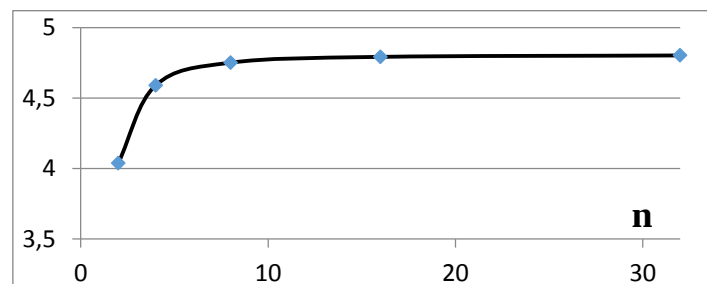
Több kutató újra értelmezte az eredeti elemet, és az elem mentén ható külső erőket is egzakt módon vették figyelembe (pl. Vörös, 2008; Kindmann and Kraus, 2011). Hajdú Gábor doktoranduszom a saját kutatási algoritmusában az utóbbi kutatókat követte. A tesztek során nem tapasztaltunk számottevő eltérést az általam kidolgozott és a Kindmann-Kraus féle algoritmus eredményei között. Ameddig az eredeti elem, illetve annak alkalmazási módja kielégíti a mérnöki igényeket, addig nem látom indokoltnak az összetettebb felírássra való áttérést.

Hasonló gondolatmenetet követtem az önsúlyteher figyelembe vételénél is.

A 3.2 példa esetében az automatikusan generált vége-selemes modell konkrétan 16 darab egyenlő méretű vége-selemet tartalmaz:



Az alábbi diagram a tartó közepén felvett csomópont referencia tengely körüli  $\theta_x$ [fok] elfordulásának konvergenciáját mutatja az  $n=2,4,8,16$  és 32 darab elemet tartalmazó felosztás esetén:



A modell felveti a teher külpontosságának kérdését is, de arra később, a 3.7 pontban kívánok kitérni.

- 3.3. 28. oldal: A táblázat után szerepel egy félreérthető kijelentés, " *Vlasov ... elméletét követve .... a keresztmetszet torzióját elhanyagoljuk.*" Ha van csavaró igénybevétel és elcsavaródás, azaz torzió, akkor az idézett *torzió* szó mire utal?

A „torzió” kifejezést helytelenül alkalmaztam, a helyes magyar kifejezés az „*alaktorzulás*” (distorsion), ami arra utal, hogy a hipotézisen alapuló megoldás alaktartó keresztmetszetet feltételez (a rúdelem deformációja során a keresztmetszet alakja nem változik meg). Természetesen a keresztmetszet öblösödése megengedett.

- 3.4. 29. oldal: Furcsa, de persze nem hiba, hogy Jelölt a (3.5) vektorban a szögelfordulásokat  $x, z, y$  sorrendben írja le, a természetesebbnek tűnő  $x, y, z$  sorrend helyett.

Az észrevétellel egyetérték.

- 3.5. 29. oldal: A (3.3) axiális elmozdulás értelmezésénél fontos lenne megadni, hogy itt mi az  $\omega$  jelentése. Ez a görög betű a jelölésjegyzékben sem szerepel. A szakirodalomban szinte kizárólag így jelölik a vékonyfalú szelvények  $D$  csavaró középpontjához tartozó szektor terület függvényt, és ebből kell számolni többek között az  $I\omega$  öblösödési tényezőt is.

Igen, az  $\omega$  a „szektor terület függvény” (vagy más megnevezéssel a *harmadik szektor koordináta*), amit az építőmérnöki szakirodalomban szokás „*torzulási mértéknek*” is nevezni (*warping function*). Sajnos az  $\omega$  valóban kimaradt a jelölésjegyzékből.

- 3.6. 34. oldal: A lineárisan változó gerincmagasságú gerendák kezelése és a (3.10) formula kapcsán a következő két kérdésre várom a választ:
  - A (3.10)-ben és az  $F3$  függelékben definiált  $K_T$  mátrix saját vagy valahonnan átvett eredmény? Ha saját eredmény, a részletesebb leírást, ha átvett, a hivatkozást hiányolom.
  - A  $K_S$  lineáris és a  $K_G$  geometriai merevség mátrixok egyaránt térfogati - hossz és keresztmetszet menti - integrálok eredményei. Mi a magyarázata, hogy a változó keresztmetszet hatása nem jelenik meg a  $K_G$  geometriai merevség mátrixban?

A változó gerincmagasságú I és H keresztmetszetű szerkezeti elemek állandó magasságú szegmensek (véges elemek) sorozatával történő közelítése régóta ismert és alkalmazott eljárás. A modell pontatlanságára már a korai tanulmányok is felhívták a figyelmet (pl. Kitipornchai and Trahair, 1975). Az eredeti Rajasekaran féle 7 szabadságfokú végelelemet maga Rajasekaran is újra értelmezte változó keresztmetszetre (Rajasekaran, 1994). Azóta több tanulmány is beszámolt a változó keresztmetszet hatásának figyelembe vételéről (pl. Mohri et al. 2015).

A ConSteel kapcsán olyan megoldást kerestünk, amely konzisztens a már adaptált állandó keresztmetszetű Rajasekaran féle végelelemmel. A tanulmányok felsorolását a 3.3 szakasz tartalmazza. Azt is kiemeltem, hogy a gyakorlatban alkalmazható megoldást legtisztább formában Ronagh és társai publikálták (Ronagh et al. 2000a és 2000b). A  $K_T$  mátrix elemei az említett tanulmányban is megjelennek. A ConSteel csoport K+F vezető munkatársa, Vaszilijevics-Sömjén Bálint a tanulmányok alapján megismételte a  $K_T$  mátrix felírását. Ezzel párhuzamosan Hajdú Gábor doktoranduszom is levezette a  $K_T$  mátrixot a saját kutató programja számára, amely a Kindmann-Kraus féle végelelem-változatra épül. A két levezetés azonos eredményre vezetett. Mindkét munka a kutatócsoportunk belső anyaga, publikálásra nem került, így arra hivatkozni sem tudtam. Ezért csak a szakirodalomban közismert tanulmányokra hivatkoztam, de annak látszatát is kerültem, hogy a  $K_T$  mátrix felírását saját eredményemnek tekintsem.

A változó gerincmagasság elvben a  $K_G$  mátrixot is módosítja. Erre jutott Yang és Yau, amikor a  $K_G$  mátrixban megjelenítik a Wagner hatást, azonban a többi tagot érintetlenül hagyják (Yang and Yau, 1987). Numerikus tanulmányt végeztünk annak eldöntésére, hogy feltétlenül szükség van-e a gyakorlati esetekben a  $K_G$  figyelembe vételére. A teszt során a  $K_T$  figyelembe

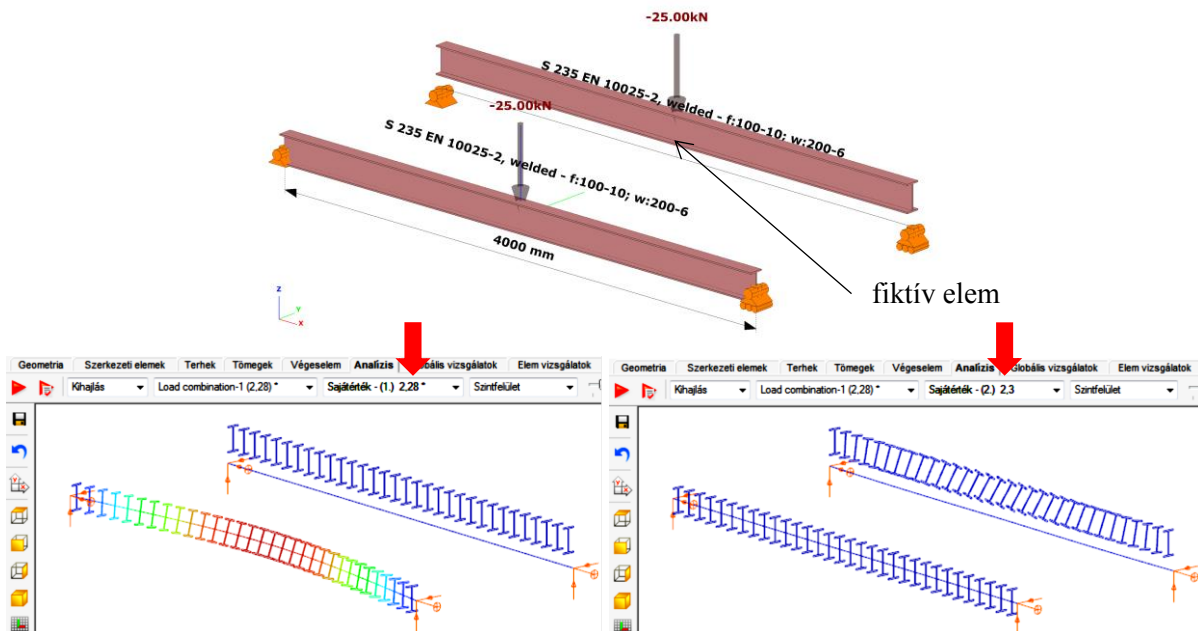
vételével kapott eredményeket egyenértékű héj végeleemes modellekkel hasonlítottuk össze. A  $K_T$  alapú megoldások rendre jól közelítették a referenciának tekintett héj végeleemes modellek eredményeit. Ezért a  $K_g$  mátrixot nem vesszük figyelembe.

- 3.7. 36. oldal: A 3.3. példában a gerendaelem egyik terhelése a felső övre ható  $F_z$  keresztirányú erő. Hogyan veszi figyelembe a bemutatott modell a külső terhelések excentricitását?

A külső erők külpontosságát az alábbi két megoldás együttes alkalmazásával veszem figyelembe:

- 1) az értekezés 3.2.1 pontjában ismertetett módon, a  $K_g$  mátrix (3.7) szerinti módosításával a külső keresztirányú erő hatáspontját az elem referencia pontjába helyezem (kétszeresen szimmetrikus keresztmetszet esetében a  $C$  keresztmetszeti súlypontba);
- 2) a  $C$  keresztmetszeti súlyponthoz viszonyított támadási pontot fiktív elem beiktatásával hozom létre (a fiktív elem a referencia pontból a keresztirányú külső erő támadáspontjába mutat).

A fenti megoldást két modellel szemléltetem. Az első modellben az elem és az erő is központos, míg a másodikban mindkettő külpontos. A külpontosságot úgy vettem fel, hogy a felhasználói felületen mindkét esetben az erő a súlypontban helyezkedjen el. Ebben az esetben a felhasználó a modellek azonos viselkedésre számít, ami teljesül is: például a rugalmas kritikus teherszorozóban (első sajátérték) az eltérés kisebb, mint 1%:



Az erő külpontosságának figyelembevételére természetesen léteznek elegánsabb megoldások is (pl. Turkalj, 2000, 2003; Vörös, 2008).

➤ 3.8. F.2. Függelék:

- A  $c$  és  $f$  mátrixelemek hibásak, ez nyilván elírás, az  $l$  elemhossz nincs jó helyen.
- A több helyen is megjelenő  $P$  feltehetően a  $C$  (vagy más) támadáspontú axiális terhelő erő. Ez így nincs benne a jelölésjegyzékben, a 3.1 táblázatban és a 3.5 ábrán pedig  $f_x$  és  $f_l$  szerepel.
- A lap alján a  $\bar{K}$  definíciójában lévő  $a$  értelmezése hiányzik. Ez nyilván nem azonos az ezen az oldalon lévő  $a$  mátrixelemmel. Ha jól értem a szövegkörnyezetet, akkor ez a  $\bar{K}$  az úgynevezett Wagner féle nyomaték, amiben olyan új keresztmetszeti tényezők jelennek meg, amelyeket a SECTION modullal lehet (lehetne) meghatározni.

- 1) A  $K_g$  mátrix elemeinek felírása nem hibás, viszont a mellékelt leíró környezet hiányos: a mátrix felírása az eredeti Rajasekaran féle felírást követi, ami szerint a  $\theta_{zD}$ ,  $\theta_{yD}$  és  $\theta_{\omega D}$  elmozdulások  $l$ -el szorzott értékek, míg az  $m_{zC}$ ,  $m_{yC}$  és  $m_{\omega D}$  nyomatékok  $l$ -el osztott értékek (Chen and Atsuta, 1977). Sajnos ezt az információt a melléklet nem tartalmazza. A fentiek figyelembe vételével a mellékletben közölt  $K_g$  tagokhoz jutunk.
- 2) A  $P$  a  $K_g$  mátrix leírásában az elembe ébredő axiális erő. A (3.6) kifejezésben a csomóponti axiális erő  $f_C$ , míg a 3.5 ábrán ugyanez  $f_{xC}$ . A jelölésben valóban kavaro-dás van, ezért elnézést kérek, és természetesen Bírálom észrevételét jogosnak tartom.
- 3) A Bírálom észrevétele jogos, a  $\bar{K}$  Wagner hatás (vagy Wagner féle nyomaték) kifejezésében az  $a$  a 3.4 ábrán jelzett  $a$ -nak felel meg, és nem azonos a  $K_g$  egyik elemét jelölő  $a$ -val. A Bírálom észrevétele, miszerint a  $\bar{K}$  Wagner hatást a SECTION ágens számolhatja, helyes. Az általam megírt prototípus algoritmusban a  $\bar{K}$  számítását egy általánosított eljárás végezte az aktuális feszültségállapot alapján. Azonban ez a számítási eljárás nagyméretű modellek esetében rendkívüli módon lelassította az analízist, ezért zárt alakú felírással kellett áttérni (pl. Turkalj et al. „Large rotation analysis of elastic thin-walled beam-type structures using ESA approach”, C&S 2003; Vörös, 2008; Kindmann and Kraus, 2011). Természetesen ehhez is a SECTION ágens szolgáltatja a szükséges jellemzőket.

- 5.1. 46. oldal: Az oldal alján szerepel a következő mondat: "A kezdeti geometriai tökéletlenséget helyettesítő kezdeti teherrel veszem figyelembe." Az eddig leírtak alapján nem egyértelmű, hogyan veszi figyelembe a kezdeti alakhibát? A csomóponti koordinátákat módosítja, azaz egy kissé görbült rúdra végez másodrendű számítást, vagy kreál egy fiktív oldalirányú megoszló terhelést (lásd idézett szabvány 5.3.2(7) ajánlása) és ezzel kiegészítve a tényleges terhelést, az egyenes rúdelemen végez másodrendű statikai vizsgálatot.

Az algoritmus eredeti változatában a kezdeti geometriai alakot a kezdeti csomóponti koordináták tényleges módosításával veszem figyelembe. Bár ez a megoldás közelebb áll a mérnöki szemlélethez, a későbbiekben áttértünk a kezdeti helyettesítő teher alapú eljárásra.

Az utóbbi előnye a következők:

- a lineáris formában felírt kezdeti helyettesítő teher konzisztens az Ayrton-Perry formula által megkövetelt lineáris eljárással;
- a szakirodalom szinte kivétel nélkül másodrendű elmélet alatt az alábbi lineáris másodrendű elméletet érti.

A kezdeti helyettesítő teherrel figyelembe vett geometriai tökéletlenség esetében az egyensúlyi egyenlet az alábbi formát ölti (pl. Agüero et al. 2015):

- tökéletes geometriai alak esetén:  $(\mathbf{K}_S + \alpha \mathbf{K}_G) \mathbf{U} = \mathbf{F}$
- tökéletlen geometriai alak esetén:  $(\mathbf{K}_S + \alpha \mathbf{K}_G) \mathbf{U} = \mathbf{F} - \alpha \mathbf{K}_G \boldsymbol{\eta}_{\text{init}}$

ahol  $\alpha$  az egyparaméteres teher szorzója,  $\boldsymbol{\eta}_{\text{init}}$  pedig a sajátalak formájában felvett kezdeti geometriai alak.

- 5.2. 47. oldal: Ha igaz, hogy az 5.1. ábra szerinti  $v(x)$  (zöld) lehajlást a tökéletes (kék) alaktól mérjük, akkor az (5.2) eredmény helyesen  $v_{\text{init}}(x) \alpha_{cr} / (\alpha_{cr} - 1)$ . A (5.2) leírt alakja csak akkor helyes, ha a  $v(x)$  (zöld) lehajlást a tökéletlen (fekete) alaktól mérjük.

A Bírálom észrevétele azért jogos, mert a szövegben a  $v''(x)$  kifejezésre vonatkozó „*deformáció másodrendű alakja*” meghatározás pontatlan. A helyes meghatározás a „*deformáció másodrendű tagja*”, és a helyes összefüggés a következő:

$$v(x) = v_{\text{init}}(x) + v''(x)$$

- 5.3. 48. oldal: Itt mit jelent az „*affin*” leképzés? Az (5.6) összefüggésből, tekintettel (5.1) és (5.2)-re,  $v_{\text{init}, \max} = v_{cr, \max}$  következik.

- 1) Az „*affin*” leképzés alatt - lehet, hogy matematika szempontjából helytelen szóhasználat - azt értem, hogy a kezdeti tökéletlenség alakját a sajátalak lineáris leképpezésével (nyújtásával) veszem fel, amit formálisan az (5.1) fejez ki.
- 2) Az (5.6)-ból valóban a  $v_{\text{init}, \max} = v_{cr, \max}$  következne, amennyiben a  $v''(x)$  ugyanazt jelölné, mint az (5.2)-ben. Szándékom szerint az (5.6) felírás arra a speciális esetre vonatkozik, amikor a kezdeti tökéletlenséget a tetszőleges amplitúdójú  $v_{cr}(x)$ -el vesszük fel. Az (5.6) feletti mondat sajnos pontatlan, és így félrevezető, nem írja le egyértelműen a szándékomat.

Itt is szeretném jelezni, hogy az (5.1-10) nem több mint egy formális átalakítás, amely átalakítás az 5.1.3 szakasszal kezdődően nyer értelmet, amikor megtörténik a referencia elemre vonatkozó formula munkahipotézisen alapuló általánosítása, majd az így kapott eredmények validálása.

- 5.4. 49. oldal: Ha jól értem az indoklást az oldal tetején, az (5.10) előnye, szemben az (5.5) kifejezéssel az, hogy nincs szükség az EC3 6.3.12 fejezet szerinti  $\alpha$  „*imperfection factor*” meghatározására.

A 49. oldal első bekezdése arra utal, hogy az (5.10) formula alkalmazása nem követeli meg a módszert alkalmazni kívánó szerkezetméretező szoftver jelentős fejlesztését, mert a nevezőben szereplő feszültséget a  $\eta_2$  szintű keresztmetszeti formula megfelelő tagjai megadják. A  $\eta_2$  formula kiértékelés bizonyosan rendelkezésre áll egy szerkezettervező szoftverben.

Az eljárásomnak éppen az a lényege, hogy a 6.3.1.2 és a 6.3.2.2 szakaszokban a referencia elemek (nyomott rúd, hajlított gerenda) esetében tudományos módszertannal meghatározott ellenállásokból következtet a nem referencia elemek (reális elemek) ellenállására. Erre azért van szükség, mert a reális elemek ellenállásának meghatározása - legalábbis a referencia elemek eseteire jellemző tudományos módszertan alapján - gyakorlatilag lehetetlen az esetek

szinte végtelen száma miatt (az esetek számát az eltérő megtámasztások, a külpontos és/vagy változó intenzitású és arányú terhek, valamint az elem mentén változó keresztmetszet teszi gyakorlatilag végtelen számúvá). Tehát a válaszom az, hogy az (5.10) kifejezetten a 6.3.1.2 tudásbázison alapszik, annak érvényességét terjeszti ki a reális elemekre (részletesen kifejtve az 5.1.3 szakasztól).

- 5.5. 50. oldal: Az (5.12) egy közismert aránypár, de ismereteim szerint az csak a sajátvektorok  $v_{cr,max}$  és  $\varphi_{cr,max}$  maximumaira érvényes. Hogyan következik ebből az itt felírt (5.12) összefüggés?

A referencia elem (villás megtámasztású és állandó hajlító nyomatékkal terhelt gerenda) kifordulása esetében az (5.12) nem csak a maximumok helyén (jelen esetben a modell közepén) érvényes, hanem az egész modell mentén (Szalai and Papp, 2010, (6)-(11)).

Az (5.12) abból a kezdeti feltételből következik, hogy kezdeti geometriai tökéletlenséget a sajátalakokkal, illetve annak lineáris leképezésével (nyújtásával) vesszük fel. Az összefüggés formálisan is levezethető:

1. Az (5.11)-ből következik, hogy

$$\frac{v_{0d}}{\varphi_{0d}} = \frac{v_{cr,max}}{\varphi_{cr,max}} \frac{v_{init}(x)}{\varphi_{init}(x)} \frac{\varphi_{cr}(x)}{v_{cr}(x)} \quad (1)$$

2. Kezdeti feltétel, hogy

$$\frac{\varphi_{cr}(x)}{\varphi_{init}(x)} = \frac{v_{cr}(x)}{v_{init}(x)} = c \quad (2)$$

ahol  $c$  konstans.

3. A (2)-ből adódik, hogy az (1)-ben az utolsó két hányados szorzata 1, és így

$$\frac{v_{0d}}{\varphi_{0d}} = \frac{v_{cr,max}}{\varphi_{cr,max}} \quad (3)$$

4. Mivel  $\frac{v_{cr,max}}{\varphi_{cr,max}} = \frac{M_{cr}}{N_{cr,z}}$ , ezért a (3)-ból következik, hogy  $\frac{v_{0d}}{\varphi_{0d}} = \frac{M_{cr}}{N_{cr,z}}$ .

- 5.6. 57. oldal: Az 1. munkahipotézis nem csak I szelvényre vonatkozik? Erre utal még az is, hogy az 59. oldalon idézett adatbázisban, ha jól látom, csak I szelvényekre vonatkozó eredmények vannak.

A Bírálom észrevétele jogos. A 4. fejezetben tárgyalt OIM nevű módszer kalibrálása az értekezés lezárásáig valóban csak I és H keresztmetszetekre korlátozódott. Az 1. munkahipotézisben szereplő összegzési tétel kétszeresen szimmetrikus keresztmetszetre lett levezetve (Szalai, 2017). Sajnos ezt a tényt direkt módon nem rögzítettem a fejezet elején.

Az 1. munkahipotézis egyszerűen szimmetrikus keresztmetszetre történő kiterjesztésén jelenleg is dolgozunk.

- 5.7. 58. oldal: Az 5.4. (és később, az 5.11.) ábrán a gyártási maradó feszültség eloszlás  $\beta$  paraméterének mi a szerepe a bemutatott számításokban?

A  $\beta$  konstans a nemzetközi szakirodalomban elfogadott és alkalmazott sajátfeszültségi eloszlások maximum értékeit határozza meg. A  $\beta$  használata csak prezentációs fogás.

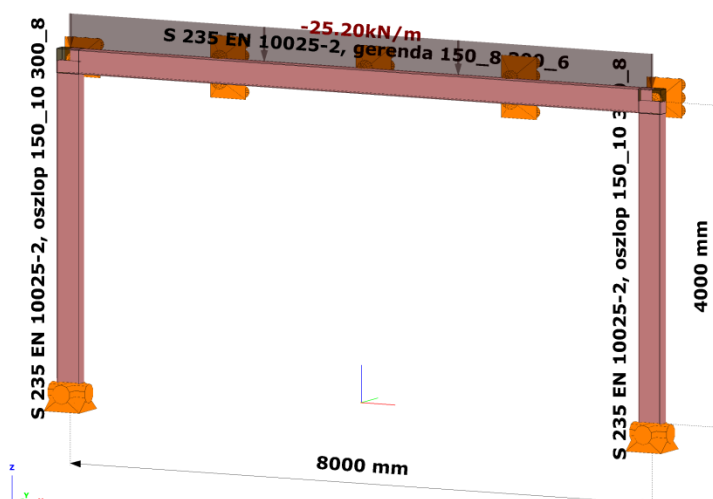
➤ 5.8. 68. oldal: Milyen a lap alján említett SHS szelvény?

A hengerelt szelvény területe ( $A$ ), erős ( $I_y$ ) és gyenge ( $I_z$ ) tengely körüli inercianyomatéka és a tiszta csavarási inercianyomatéka ( $I_t$ ) ismert. Ismertek továbbá a héj végelemek modell által meghatározott jellemzők is, de ismeretlen az SHS szelvény két geometriai paramétere (szélesség és lemezvastagság). Mivel a feladat határozatlan (négy feltételhez két ismeretlen tartozik), a két paramétert az erős tengely körüli inercianyomaték ( $I_y$ ) és a csavarási inercianyomaték ( $I_t$ ) egyenlőségéből határozzuk meg. A numerikus vizsgálatok során szerzett tapasztalataink szerint az így kapott modell megfelelően pontos, a másik két jellemző esetén is jó közelítéssel teljesül az azonosság.

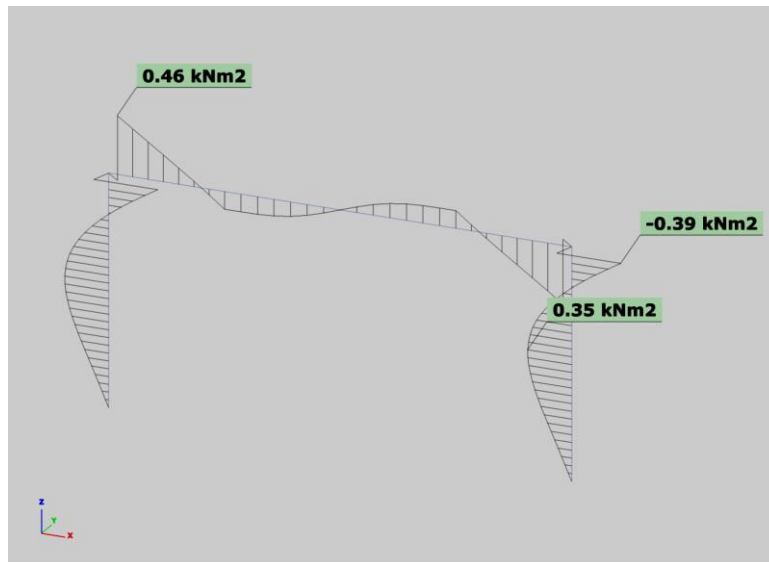
➤ 5.9. 75. oldal: Milyen tapasztalatok vezettek a 3. munkahipotézis megfogalmazásához? Ez a szöveg azt sejteti, hogy a vékony szelvényeknél a gátolt csavarásnak a stabilitási feladatokban sokkal nagyobb jelentősége van, mint a statikai, szilárdsági számításoknál. Saját tapasztalatom szerint hasonló a helyzet dinamikai számítások esetén is. A sajátfrekvenciák értékét és a lengésképeket a gátolt csavarás figyelembevétele, vagy éppen az elhanyagolása számottevően befolyásolja.

A 3. munkahipotézishez pontosan ugyanazon tapasztalat vezetett, mint amelyről a Bírálom tesz említést, csak statikus hatás és globális stabilitási határállapot esetében. A gátolt csavarás hatása alapvetően befolyásolja az (5.34) kifejezés értékét (egyenértékű amplitúdó), így a gátolt csavarással összefüggő  $B$  és  $M_z$  nyomatékok pontos számításának igénye triviális. Az már kevésbé, hogy a gátolt csavarásnak a  $\eta_4$  szintű konzervatív interakciós ellenállási formula - ami a módszer esetében a stabilitási kihasználtságot megadó formula - eredményére is jelentős hatása lehet. Az alábbiakban erre szeretnék egy példát mutatni.

A vizsgált modellt az alábbi ábra szemlélteti:



Amennyiben figyelembe vesszük az első sajátalakokkal felvett kezdeti egyenértékű geometriai tökéletlenséget, akkor a másodrendű rugalmas analízis az alábbi *bimoment* eloszláshoz vezet:



Bár az egyenértékű pont az oszlop közepe táján van, a  $\eta_4$  szintű konzervatív interakciós ellenállási formula a gerenda végein lesz mértékadó, ahol a  $B$  értéke maximumot vesz fel. A 100%-os stabilitási kihasználtság esetén a gátolt csavarás részesedése 16,9%. Az eredmény helyességét a GMNIA alapú számítás visszaigazolta.

A példa arra is rámutat, hogy az OIM még abban az esetben is helyes eredményre vezet, amikor a rugalmas stabilitási analízis az oszlopok stabilitásvesztését vetíti előre, de a kritikus keresztmetszet mégis más helyen található (jelen esetben a rugalmas stabilitásvesztésben „passzív” gerendán).

- 5.10. 77. oldal: Véleményem szerint az 5.4.3 fejezetet inkább tekinthetjük probléma felvetésnek, vagy egy fontos új kutatási irány kijelölésének, mint gyakorlati alkalmazásra kész eredménynek.

A Bírálóm észrevételét elfogadom. A 3. munkahipotézis verifikálása még az I keresztmetszetű egyszerű portál keretekre korlátozott modellter esetén is több éves munka lesz. Az első lépéseket azonban már megtettük, az eredményeket a következő 6 oldalas lektorált konferencia cikkben közöltük:

Ferenc Papp, József Szalai, Movahedi R. Majid: “Out-of-Plane Buckling Assessment of Frames through Overall Stability Design Method”, The 14<sup>th</sup> Nordic Steel Construction Conference, September 18–20, 2019, Copenhagen, Denmark.

### Hozzászólásom a „3. Állásfoglalás a tézisekről” ponthoz

- 3.1 Az első tézist nem fogadom el MTA doktori tézisként. Keresztmetszeti jellemzők számításának különböző algoritmusai jól ismertek. Ugyancsak ismertek az effektív keresztmetszeti jellemzők számítására alkalmazott EC3 szabványos összefüggések. Vagyis itt alapvetően adaptációról van szó. Hozzá kell tennem ugyanakkor, hogy Jelölt által létrehozott számoló modul - ami egyébként joggal szerepel a 6. fejet kiemelkedő alkotásai között is - a szerkezettervezés igen fontos és hasznos eszköze.

A Bírálóm állásfoglalását tiszteletben tartva a következő megjegyzést kívánom tenni.

Tény, hogy a keresztmetszeti jellemzők számításához alkalmazott alapmodellek, valamint a jellemzők kifejezései régről ismertek (pl. Урбан, И.В. 1955; Kolbrunner, F.C. and Basler, K. 1966; Pilkey, 2002). Tény, hogy az effektív keresztmetszeti modell több évtizede ismert (pl. EC3-1-5, 2005). Amennyiben a SECTION ágens csupán ezek számítási és megjelenítési algoritmusai volna, akkor valóban csak „*adaptációról van szó*”.

A SECTIONS ágens új tudományos tartalmát értelem szerűen nem a fent említett alapismeretekben látom, hanem a probléma újszerű megközelítésében. Az újszerűség ismérvei a következők:

- a keresztmetszet szerkezeti objektumként történő értelmezése, amely megközelítés szakított a konzervatív felfogással, hogy a keresztmetszeti probléma egyenlő az 1D/2D keresztmetszeti modelleken kiszámított jellemzők halmazával;
- annak felismerése, hogy az analízis és a méretezés integrációjának első és meghatározó lépése az, hogy az objektum tulajdonságait ki kell terjeszteni méretezéselméleti paraméterekkel;
- annak szisztematikus feltárása, hogy az analízis és a méretezés elkülönült világában meghatározott adatmodellek hogyan integrálhatók az egységes keresztmetszeti osztályba; melyek az osztály objektumainak természetes és melyek a származtatható paraméterei; mit kell tudnia a keresztmetszeti objektumnak önmagáról ahhoz, hogy képes legyen teljes mértékben kiszolgálni az analízis és méretezés integrált rendszerét;
- annak feltárása, hogy milyen szabályokat kell betartani az EPS alapmodell leírásakor, hogy tetszőleges kialakítású keresztmetszet esetén is minden számított jellemző megfelelően pontos legyen;
- annak feltárása, hogy a természetes geometriai adatokból milyen származtatott modelleket kell leképezni ahhoz, hogy a SECTION ágens képes legyen kiszolgálni a különböző típusú analíziseket, a rugalmastól a rugalmas-képlékenyig bezárólag.
- mely és milyen általánosított méretezési algoritmusok tartoznak az egységes SECTION osztályhoz.

Véleményem szerint a műszaki tudományok feladata a technológia állandó fejlesztése, ami a gazdaság növekedésének az előfeltétele. Felfogásom szerint az építőmérnöki tudományokban az egységes K+F+I jelenti a tudományos entitást. Ezen entitás egy-egy felbontása egy adott korra jellemző civilizációs, kulturális és tudományos „termékre” vezet.

Amikor a kérdéses tézisem két tudományos lábát (modellek és jellemzők; méretezési formulák) sok évtizeddel ezelőtt megalkották, akkor a K felbontás jelentette a tudományos terméket. Az F+I felbontáshoz szükséges volt az információs technológia fejlődésére. Tehát a keresztmetszeti problémának, mint tudományos entitásnak időben és térben szét kellett válnia K és F+I teljesítményre. A tézisem azt mondja ki, hogy az F+I teljesítményem (a megfogalmazott elvek, modellek és algoritmusok) vezetett el a komplex K+F+I entitáshoz, azaz acélszerkezeti keresztmetszeti probléma, mint építőmérnöki műszaki tudományos téma, tényleges megoldásához, lezárásához.

Örömmel vettem Bírálom állásfoglalását, miszerint „... *a számoló modul - ami egyébként joggal szerepel a 6. fejelet kiemelkedő alkotásai között is - a szerkezettervezés igen fontos és hasznos eszköze.*”. Ez legalább akkora elismerés, mint az, hogy ezt az eszközt több kutató

szerkezet-kutatásra is alkalmasnak tartotta, többek között Bernuzzi professzor (lásd a D1 presztízű folyóiratokban kapott hivatkozásokat).

- 3.2 A második tézis elfogadásáról a 3. fejezet kapcsán megfogalmazott kérdésekre adandó válaszok ismeretében tudok nyilatkozni.

A 3.1 állásfoglalás kapcsán kifejtett álláspontom lényegét a 2. tézisem esetében is fenntartom.

A 3.3-5 állásfoglalásokhoz nem kívánok hozzászólni, azokat tudomásul veszem.

A Bírálom 4. pontban leírt álláspontját, miszerint támogatja a nyilvános vita kitűzését, megköszönöm.

Győr, 2019. május 10.

Papp Ferenc  
pályázó