

VÁLASZ

Szeidl György

bírálataira, amelyet a Magyar Tudományos Akadémia Doktori Tanácsa 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 a 21 pontba szedett észrevételeivel és kérdéseivel az értekezés olvasási rendjét (fejezeteit) követte, ezért a válaszaimat is annak megfelelően adom meg.

Az 1. fejezet

1. ÉSZREVÉTEL: Mi az oka az alaktorzulásra hajlamos vékonyfalú szerkezeti elemek vizsgálatokból történő kizárásának?

Az alaktorzulásos viselkedés ismert 1D modelles leírása az általánosított gerendaelmélet (GBT), amelynek legismertebb tudományos iskolája Camotim nevéhez fűződik, akinek több előadását élvezhettem az ECCS TC8 Stability bizottságban.

Meglátásom szerint a GBT a véges sávok módszerével analóg. Az utóbbi módszert alkalmazta Ádány Sándor a vékonyfalú szerkezeti elemek tiszta stabilitásvesztési módjainak szétválasztására, beleértve az alaktorzulásos módot is. Amennyiben rendelkezésre állnak a tiszta módoknak megfelelő teherbírási formulák vagy/és kísérleti adatbázisok, továbbá a módok interakciójára megfelelő mechanikai modell (mint például az Ayrton-Perry formula az alaktorzulást kizáró globális viselkedés leírásához), akkor megvan a feltétele annak, hogy az általam vázolt integrált analízis és méretezés módszert kiterjesszük a vékonyfalú szerkezeti elemekre. Az amerikai Schafer professzor munkássága ez irányba mutat.

Mivel az integrált analízis és méretezés módszertanának kiterjesztése elvben lehetséges, ezért ilyen irányú F+I tevékenységet jelenleg is folytatunk a ConSteel kutatócsoportban. A csoport szakmai vezetésével formálódik egy nemzetközi kutatási együttműködés, ami a probléma megoldására egy EUREKA projekt indítását célozta meg.

Összefoglalva az a válaszom, hogy az alaktorzulásos viselkedés leírása összetett és bonyolult feladat, én magam ezzel a kérdéssel az értekezés lezárásáig nem foglalkoztam, így nem állt rendelkezésemre a megfelelő ismeretanyag ahhoz, hogy a tárgyalásba a vékonyfalú keresztmetszetek viselkedését, illetve azon belül az alaktorzulási problémát is bevonjam.

2. ÉSZREVÉTEL: A kezdeti belső feszültségek szó a stabilitásvesztés pillanatát megelőző feszültségállapatra utal?

A GMNIA (geometrically and materially nonlinear analysis with imperfections) eljárást az egyparaméteres statikus terheléshez, illetve a határpontos teher-elmozdulás útvonal meghatározására alkalmaztam. A határpontot (teherbírás maximumához tartozó pontot) értelmezhetjük a „stabilitásvesztés pillanatának”, ugyanis innentől a statikus útvonal csak a teher megfelelő csökkentése árán követhető. A „kezdeti belső feszültség”-en a gyártási technológia (hengerlés, hegesztés) során létrejött „maradó alakváltozást” (vagy „maradó feszültséget”) értem, ami a GMNIA modellben a kezdeti tökéletlenségek egyike, amelyik a vizsgált szerkezeti elemekben már terheletlen állapotban is jelen van.

Összefoglalva az a válaszom, hogy a „kezdeti belső feszültség”-en nem a határpont előtti feszültségállapotot értem, hanem a terheletlen állapotban jelen lévő „maradó feszültséget”.

3. ÉSZREVÉTEL: Mi az erős tengely fogalma? A keresztmetszet 1 jelű tehetetlenségi főtengelye?

A válaszom egyértelműen igen: az „erős tengely” kifejezésen a keresztmetszet 1 jelű tehetetlenségi főtengelyét értem.

4. ÉSZREVÉTEL: A 3. o. állítása szerint " ... az általuk levezetett kifejezés harmadfokú, amelynek megoldása zárt alakban nem írható fel ... " Ha a kifejezés harmadfokú polinom az ismeretlenre nézve – szöveg ezt valószínűsíti –, akkor a szöveg állításával ellentétben van zárt alakú megoldás, de az kétségtelenül, hogy a képletek viszonylag bonyolultak (Cardano képletek).

A Bírálóm észrevételét jogosnak tartom. Természetesen létezik a harmadfokú kifejezés zárt alakú megoldása, de a bonyolultsága miatt azt a kutatók nem tartották alkalmasnak a mérnöki gyakorlat számára. A szövegben a „zárt” kifejezés helyett „a megszokott” kifejezés illik, amin az Ayrton-Perry (vagy Ayrton-Robertson) féle másodfokú formulát értem, amelyet a nyomott rúd feladatán keresztül az acélszerkezeti kutatói és mérnöki társadalom már megismert és elfogadott.

Itt szeretném megemlíteni, hogy kutatásunk egyik legfontosabb alaperedménye éppen az, hogy sikerült a másodfokú polinom alapú Ayrton-Perry formulát általánosítani a referencia modell térbeli globális stabilitásvesztési módjaira, beleértve a 3. oldalon tárgyalt kifordulás esetét is (Szalai és Papp, 2010; Szalai, 2017).

5. ÉSZREVÉTEL: Visszaidézzve az 1.1.2.2. szakaszban mondottakat megjegyzem, hogy a magam részéről vannak kételyeim a lineáris héjelemek megbízhatóságát és pontosságát illetően.

Az adott kérdésben elméleti szinten nem kívánok állást foglalni, mivel csak alkalmazóként foglalkozom a lineáris héjelemmel. A közel másfél évtizedes alkalmazói tapasztalatom kettős. Egyrészt az, hogy a sík acéllemezekből épített modellek esetében a globális stabilitásvesztéshez tartozó lineáris elágazási feladatok megoldása megbízható, viszont szimmetrikus lokális stabilitásvesztési (lemezhorpadás) feladatoknál sokszor tapasztaltam a

szimmetriavesztést (sajátérték, illetve sajátalak szétválást). Itt azonban nem zárható ki okként a numerikus megoldó pontatlansága sem. Másrészt az a tapasztalatom, hogy feszültséganalízis esetén a csúcshéjesítés környezetének kezelése valóban nem megbízható.

A fentiek alapján a Bírálóm észrevételét jogosnak tartom. Ugyanakkor itt fontosnak tartok két dolgot megjegyezni: (i) az értekezésben lineáris héjelemes modellt (néhány kivételes esettől eltekintve), csak lineáris elágazási (sajátérték) feladatok referencia megoldása céljából alkalmaztam; (ii) az eredményeket az Abaqus szoftver nemlineáris héj végelemes modelljeivel több esetben is ellenőriztük.

A 2. fejezet

6. ÉSZREVÉTEL: Az értekezés több példát is közöl. Ezek szinte mindegyikében szerepel ábra, de a főszöveggel ellentétben ábraszámítás nélkül. Magam részéről szerencsésebbnek véltem volna ezekben az esetekben is valamiféle ábraszámítás meglétét.

Az ábrát minden esetben a példa részének tekintem, és magának a példának adok konzekvens számítását. Ugyanakkor, ahol több ábra is van, ott már nem egyértelmű hivatkozás, ezért a Bírálóm észrevételét ilyen esetekben jogosnak tartom.

7. ÉSZREVÉTEL: A 20. oldalon álló 2.3 táblázat számos a keresztmetszeti ellenállás meghatározásával kapcsolatos képletet közöl. Az ezen képletekben előforduló jelölések egy része nem lelhető fel sem a Fontosabb jelölések című jelölésjegyzékben, sem pedig magában a főszövegben. Pl.:

$$N_{pl,Rd}, N_{u,Rd}, M_{y,Ed}, M_{z,Ed}, V_{y,Ed}, V_{z,Ed}, \dots \text{etc.}$$

Nem világos ugyanitt a több helyen előforduló és balra mutató nyíl szerepe, pl.:

$$\dots = \left(V_{c,Rd} \leftarrow \frac{\tau_{Ed}}{f_y / \sqrt{3} \gamma_{M0}}; \dots \right) \quad \text{etc.}$$

Avagy mi a hosszúságdimenziójú ν jelentése ugyanitt az $M_z + V_y \nu$, avagy az $M_z + N \nu$ képletekben?

A jelöléshiánytal kapcsolatos fenti lista nem teljes.

Hozzáteszem, hogy alapelvnek tekintem összhangban az 1. Bevezetés utolsó szakaszában mondottakkal azt a követelményt, hogy egy MTA doktora értekezés a jelölések tekintetében önmagában érthető kell, hogy legyen. Ha kezembe venném a EN 1993-1-1 szabványt - nem tettem és nem is teszem meg – akkor feltehetően választ kapnék a jelen Észrevételben felsorolt jelölések jelentésére. Ez azonban sértené az önmagában érthetőség követelményét.

Bírálómnak a 2.3 táblázattal kapcsolatos észrevételét jogosnak tartom, és sajnálatomat fejezem ki a félreérthető, vagy meghatározatlan jelölések okozta olvasási, illetve értékelési nehézségek miatt. Nem mentségül, csak magyarázatul jegyzem meg, hogy ezek a jelölések az acélszerkezeti méretezéselmélet szakirodalmában közismertek. A hibát azzal követtem el, hogy nem gondoltam arra, hogy az értekezést más tudományág művelői is olvasni fogják. A hiányzó jelölési magyarázatok a következők:

- N_{Rd} , M_{Ed} , V_{Ed} ,...etc. alapjelölések megtalálhatóak a „Fontosabb jelölések” listájában. Ezen alapjelölések további kiegészítő (értelmezést pontosító) alsó jelölést kaptak, amelyek a következő jelentéssel bírnak:
 pl , képlékeny határállapothoz tartozó érték;
 el , rugalmas határállapothoz tartozó érték;
 eff , rugalmas határállapothoz tartozó érték, hatékony keresztmetszet esetén;
 u , képlékeny határállapothoz tartozó érték lyukkal gyengített keresztmetszet esetén;
 $y, ; z$, keresztmetszet tehetetlenségi főtengelyeinek a jele;
 t , ellenállás húzással szemben;
 c , ellenállás nyomással vagy nyírással szemben;
 v , nyírás hatásával redukált érték;
 N , normálerő hatásával redukált érték;
- A táblázatban öt helyen alkalmaztam a $\leftarrow$ szimbólumot, amely valamely keresztmetszeti ellenállásra mutat, és jelzi, hogy annak értékét a jobb oldali feltételből kell meghatározni. Például a

$$V_{c,Rd} \leftarrow \frac{\tau_{Ed}}{f_y / \sqrt{3} \gamma_{M0}} = 1$$

jelentése, hogy a nyírási ellenállás a jobb oldali feltételből határozandó meg. (Itt sajnos jelezni kell, hogy a táblázatban az „=1” lemaradt.)

- A táblázat első oszlopában szereplő jelölések az igénybevételi állapotot szimbolizálják. Például az „ $M_z + V_y$ v. $M_y + V_z$ ” jelentése a következő: a z főtengely körül hajlított és az y főtengely irányában nyírt, vagy az y főtengely körül hajlított és a z főtengely irányában nyírt keresztmetszet esete. A v. jelet a „vagy” szó rövidítésének szántam.

8. ÉSZREVÉTEL: A 2.6. ábrát követő bekezdésben áll: *A SECTION ágensben a második (gazdaságos) megoldás került adaptálásra.* Nem kellett volna ezt a választást valamiféleképpen indokolni?

Az értekezésemben a következőt állítom: „a mértékadó kihasználtság meghatározása szubjektív alapokon áll”. Az állítást a 2.6 ábra felállításával, illetve annak elemzésével támasztottam alá. Mivel a döntés szubjektív, ezért nem feltétlen szükséges indokolni, hogy a SECTION ágens miért a „gazdaságos” megoldást tekinti mértékadónak. Természetesen Bírálom kérdése helyénvaló, hiszen a szubjektív döntésnek is van háttere. A döntés hátterét a jelző is mutatja: a cél a gazdaságos tervezés. Ugyanakkor a biztonságos tervezés is kiemelt szempont. A döntésnél azt is mérlegeltük, hogy a vizsgált acélszerkezetek esetén a keresztmetszeti kihasználtság csak ritkán szokott mértékadó határállapot lenni, szemben a stabilitási határállapottal.

A 3. fejezet

9. ÉSZREVÉTEL: Nem egyértelmű, vagy számomra érthetetlen, hogy mit kell érteni a rúdszerkezeti elem duális objektuma, mint fogalom alatt – lásd az értekezés 26. oldalát.

Ez önmagában a lemezszerkezeti elem? És ha csak az, akkor mi a lemezszerkezeti elem?
A 3.2. ábrán vázolt séma nézetem szerint további magyarázatot kívánna meg.

A szakmai közbeszédben, és sokszor a szakmai irodalomban is, a „szerkezet” kifejezést elég tág értelemben használjuk: „szerkezet”-ről beszél a kivitelező mérnök, a tervező mérnök, és az alkalmazott mechanika művelője is. Ezért az értekezésemben a „szerkezet” fogalomára egy háromszintű értelmezést vezettem be.

Az első szint maga a valós vagy virtuálisan valós szerkezet, röviden a *szerkezet*. Amennyiben a szerkezet egyetlen tagból áll, akkor az a *szerkezeti elem*. A második szint a szerkezet absztrakciója, röviden a *szerkezeti modell*, amely lehet rúdszerű (*rúdszerkezeti modell*), vagy lemezszerű (*lemezszerkezeti modell*). A harmadik szint az analízis során alkalmazott mechanikai apparátus által meghatározott és a második szintű modellből származtatott mechanikai modell, röviden a *mechanikai modell*, illetve annak két megjelenési formája, a *rúd vége-selelemes modell* és a *hég vége-selelemes modell*.

A 26. oldalon a „*rúdelem*”-en, vagy „*rúdszerkezeti elem*”-en (mindkettő előfordul) az egy tagból álló szerkezeti modellt értem (pl. egy gerenda szerkezet szerkezeti modelljét), amely modell általánosabb értelemben is rúdszerű, azaz a hossza többszöröse a keresztmetszeti méretnek. Továbbá a *lemezszerkezet* határozót az általános értelmű rúdszerkezetre korlátozom, azaz a lemezmű értelmű lemezszerkezetet kizárom a tárgyalásból.

A rúdszerkezeti modell kétféle absztrakcióját használom: (i) a rúdszerkezeti absztrakció, és (ii) a lemezszerkezeti absztrakció. Az (i)-nek megfelelő modellt a referencia tengely és az EPS keresztmetszeti modell (esetileg további kiegészítő attribútumok) írják le, a (ii)-nek megfelelő pedig a megfelelő számú és helyzetű, éleik mentén kapcsolt síklemezek együttese. „*Duális*” modellnek (vagy objektumnak) nevezem a szerkezettanilag egyenértékű (i) és (ii) absztrakciók által meghatározott modellek együttesét.

A 3.2 ábra azt illusztrálja, hogy az (i) modellből a (ii) duális modell egyértelműen (és ezért automatikusan) származtatható az EPS keresztmetszeti modell alapján, amennyiben az EPS modell lemezmetszeteihez a szerkezeti elem referencia tengelye mentén hossz dimenziót rendelünk (hosszanti éleik mentén kapcsolt sík lemezeket képzünk). Ehhez prizmatikus elem esetén elegendő az állandó keresztmetszet EPS modellje, lineárisan változó keresztmetszet esetén a kezdő és a vég keresztmetszet EPS modelljére van szükségünk.

Lehetséges, hogy a vázolt fogalmi rendszer magyar nyelvi leírása még nem tökéletes, esetlegesen egyes fogalmak átfedésben vannak. Amennyiben így van, kérem a Bírálóm elnézését! Nem mentségül, csak magyarázatul megjegyzem, hogy az acélszerkezetek integrált analízis és méretezés rendszerét először kíséreltem meg magyar műszaki nyelven leírni.

10. ÉSZREVÉTEL: Rendkívül zavaró a

$$\vec{m} = f_y y_\omega - f_z z_\omega \quad (3.7)$$

képlet baloldalán az m betű felett álló vektorjel, mivel a baloldal is skalár. Lásd még a szöveg (3.8) képletét is.

A felső jelet nem vektorjelnek szántam, csak a már létező m mátrixelemtől való megkülönböztetésként alkalmaztam. A Bírálóm észrevételét jogosnak tartom.

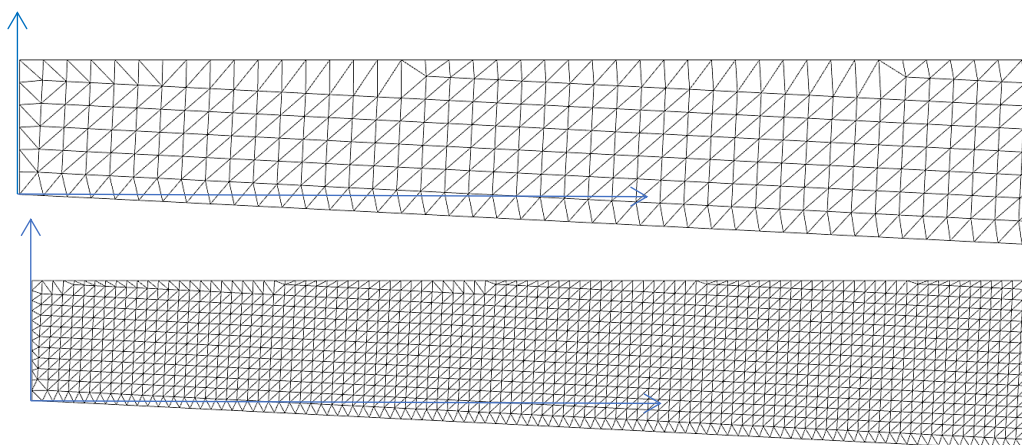
11. ÉSZREVÉTEL: Az értekezés 3.2. példája alapján megpróbáltam rájönni arra, hogy mi a különbség a rúdszerkezeti modell véges elemes számítása és a héjszerkezeti modell véges elemes számítása között. A példa leírása alapján sem világos a számomra, hogy mit kell pontosan érteni a héjszerkezeti modellen. Hivatkozok itt a véges elemes rúdmodellből generált héj véges elemes modell kifejezésre, valamint a 9. ÉSZREVÉTELben mondtakra is.

Abban bízom, hogy a Bírálónak a 9. Észrevételére adott válaszom erre az észrevételére is megfelelő választ ad.

12. ÉSZREVÉTEL: Az 3.3. szakasz részletezi a lineárisan változó gerincmagasság figyelembevételének módját. Az az alapgondolat, hogy a lineárisan változó gerinc magasságot szakaszonként állandó gerinc magasságként kezeli a pályázó. Kérdezem, hogy miként történt meg pontosan a modell verifikációja? Más szóval kifejezve: mit kell a duális héj véges elemes modellel történő verifikáción érteni? Folytonosan változik az utóbbi modellben a gerincmagasság? Bár a szöveg nem említi a folytonosságot az F.7 Függelék ábrái arra utalnak, hogy a válasz igen.

Az általam alkalmazott héj végeselemes modellt az 1.1.2.2 szakaszban írom le röviden, ahol megjelölöm a részletes leírást tartalmazó irodalmat is. A háromszög elemes hálózat követi a szerkezeti modell folytonosan változó gerinclemezének éleit. A hálózati sűrűség növelésével a számítási eredmények (kritikus tehernövelő tényező, elmozdulások, normál feszültségek) konvergálnak. Az így meghatározott hálózaton számított eredményeket referenciának tekintem, ami a 14 DOF rúd végeselemes modell verifikációjának az alapja. A verifikációt mérnöki megfontolások alapján végzett parametrikus tanulmány keretében végezzük. Jelen esetben a főbb paraméterek a 2 tehetetlenségi főtengelyhez tartozó karcsúság, a gerincmagasság változásának mértéke és a gerinclemez formátuma.

Az alábbi ábrák az F.7 Függelékben látható szerkezeti elem gerinclemezének héj végeselemes hálózatát mutatják 50mm és 25mm maximális élhosszúságú elemek alkalmazása esetén. Az adott példánál a felső él hajlásszöge zérus, a gerincmagasság változását az alsó él hajlásszöge adja.



Az alábbi táblázat a felső él mentén közepén felvett csomópont függőleges elmozdulásának és a rugalmas kritikus tehernövelő tényezőnek (sajátértéknek) a konvergenciáját mutatja az alkalmazott maximális végeselem élhosszúság függvényében (a számításnál a modell önsúlyát nem vettem figyelembe):

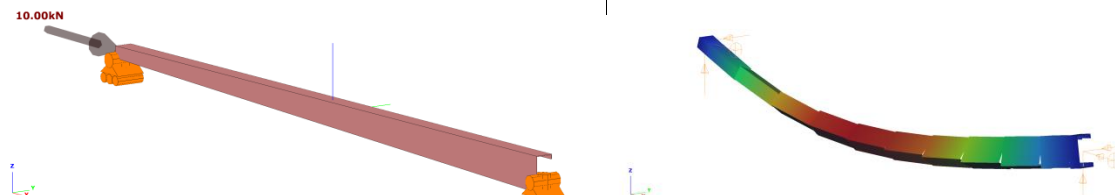
elem maximális él hossza [mm]	tartóközép felső pontjának függőleges elmozdulása [mm]	rugalmas kritikus tehernövelő tényező
50	26.38	1.210
25	26.42	1.190
12.5	26.43	1.185

13. ÉSZREVÉTEL: Az **u** szelvény egyszeresen szimmetrikus. Alkalmazható rá a 3.3. szakasz eljárása, ha a magassága lineáris függvénye a hosszkoordinátának?

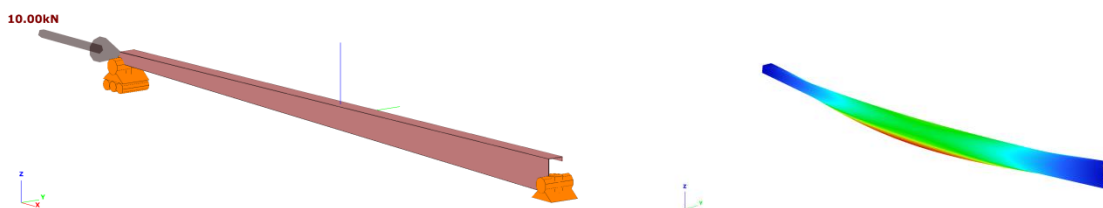
A 3.3 szakaszban a változó gerincmagasság következményeként a nem párhuzamos övlemezekben ébredő öblösödési normálfeszültségek csavaró hatását figyelembe vevő K_T merevségi mátrix csak I és H típusú keresztmetszetekre érvényes, és csak ezen a korláton belül érvényes az egyszeresen szimmetrikus keresztmetszetekre. Tehát az U típusú egyszeresen szimmetrikus keresztmetszetre nem alkalmazható a formula. A formula általános kiterjesztésén jelenleg még dolgozunk.

Ugyanakkor a 14DOF rúd végeleemes szegmentálási, illetve a duális héj végeleemes modellezési eljárás működik U típusú (például C) keresztmetszetre is, csak elmarad a K_T merevségi mátrix figyelembe vétele. Az alábbi rugalmas térbeli elcsavarodó kihajlási példa ezt az esetet illusztrálja, és rámutat arra is, hogy a K_T mátrix hatása a valós esetek jelentős hányadánál nem számottevő. Az adott példa esetében a 14 DOF rúd végeleemes modell kritikus terhének eltérése a referencia értéket adó héj végeleemes értéktől 4%-on belül van:

- 14 DOF rúd végeleemes analízis (rúdszerkezeti modell és stabilitásvesztési mód):



- héj végeleemes analízis (duális héjszerkezeti modell és stabilitásvesztési mód):



végeleemes modell típusa	rugalmas kritikus tehernövelő tényező
14 DOF rúd	30.86
lineáris háromszög héj (15mm él hossz)	32.06

A 4. fejezet

14. ÉSZREVÉTEL: Nincs megadva a (4.8) képletben a $W_{el,y}$ és $W_{el,z}$ betűk jelentése. Feltehetően az y és z tengelyre számított keresztmetszeti tényezőkről van szó.

A két jellemző a keresztmetszet két tehetetlenségi főtengelyére értelmezett rugalmas keresztmetszeti modulus (lásd még a 7. Észrevétel kapcsán a jelölésekre vonatkozó kiegészítéseket).

15. ÉSZREVÉTEL: Nincs megadva a (4.12) képletben az f_{yd} betű jelentése – maga az f_y folyáshatárt jelöl. Az olvasó találgathat: tervezéskor felvett folyáshatár?

Az f_{yd} az f_y folyáshatár parciális tényezővel módosított értéke. A tárgyalás során a $\gamma_{M0} = 1.0$ parciális tényezőt feltételeztem, ami megfelel a hazai szabályozásnak. Az f_{yd} meghatározása elmaradt, így a Bírálom észrevétele jogos!

16. ÉSZREVÉTEL: A (4.13) képlet feletti második sorban feltehetően $\chi_{op,k}$ helyett χ_{bc} -t kell gondolni. Az is lehet, hogy a jelölésbeli különbséget a vonatkozó szabvány és az értekezés jelölésmódja közti eltérés okozza.

A Bírálom helyesen értelmezte a jelölésbeli problémát! A χ_{bc} és a χ_{op} azonos méretezéselméleti tartalmat jelöl (stabilitási csökkentő tényező), de az előbbi az általam már 1998-ban alkalmazott jelölés (bc =beam-column), míg az utóbbi az EC3 által később bevezetett jelölés (op =out-of-plane). Sajnos a szövegben a χ_k jelölés téves (jelenléte hiba), amiért elnézést kérek!

17. ÉSZREVÉTEL: Mit kell érteni a (4.12) formula pontosítása esetén a nagyszámú numerikus számításon. Mi a pontosítás elvi alapja?

18. ÉSZREVÉTEL: A negyedik fejezet, illetve szakasz szövege nem kellően precíz, a gondolatmenet vázlatos, és több esetben hiányoznak a jelölések – néhány ezek közül fentebb már szerepelt, de vannak továbbiak pl. $\sigma_{\max}$, $\sigma_{\min}$ – és emiatt a szöveg nehezen áttekinthető. Az itt a fő gondom, hogy a szöveg alapján nem derül ki az a gondolat, ami a (4.12) képlet (4.16) alatti általánosításához vezetett. Kérem ennek rövid ismertetését a bírálatra adott válaszban.

A (4.12) formula a nyomott és hajlított kétszeresen szimmetrikus keresztmetszetű szerkezeti elemekre érvényes, ahol a stabilitásvesztés szempontjából aktív N nyomóerő és M_y szimmetriasíkban működő hajlítónyomaték mellett nincs jelen a stabilitásvesztés szempontjából passzívnak számító M_z és B nyomaték.

A (4.16) egyrészt a **passzív** nyomatékok figyelembevételére tesz javaslatot, másrészt bevezeti a **K képlékenyedési** tényezőt, ami a kis- és közepes karcsúsági tartományban ($\bar{\lambda} < 1.0$) figyelembe veszi a keresztmetszet képlékeny többletterhelését, illetve biztosítja a stabilitási ellenállási formula átmenetét a keresztmetszeti ellenállási formulába (amikor a karcsúság közel nulla, a stabilitási formula a keresztmetszeti ellenállást adja meg).

A századfordulón még nem volt lehetőségem az ellenőrzést tudományos program (ANSYS, Abaqus) alkalmazásával GMNIA alapon végezni. A „nagyszámú numerikus számításon” az

akkori lehetőségeket kell érteni: (i) a saját fejlesztésű ConPlas programommal végeztem ellenőrző számításokat, (ii) az eredményeimet az akkori EC3/Method 2 formulával vetettem össze. Az utóbbi interakciós formulát akkoriban a legpontosabb interakciós formulának tekintette a kutatói-szakmai közösség. Mai szemmel ezeket az ellenőrző számításokat már nem tartom kielégítőnek, ahogy azt az 5. fejezet is mutatja. A ConPlas program fejlesztésével leálltunk, mivel nem volt célszerű „konkurálni” a fent említett tudományos programokkal. Az EC3/Method 2 formulát pedig az európai kutatói/szakmai közösség visszavonta.

Itt is szeretném hangsúlyozni, hogy a (4.12) illetve a (4.16) formula megérzésen alapszik, a „pontosságát” nem tudtam kielégítően igazolni, de az európai kutatói-szakmai közösség visszaigazolta a gondolatom helyességét, amikor a (4.12) formula bekerült az európai méretezési szabványba. A (4.16) formula által felvetett „általánosítás” még ma is progresszív témának számít, jelenleg is nemzetközi szintű kutatás zajlik a stabilitásvesztés szempontjából passzív erők és nyomatékok figyelembe vétele kapcsán. Az értekezésem leadását (2018. június hó) követő közel egy évben jelentős eredményeket értünk el a kutatásban, részben az 5. fejezetben bemutatott módszertanhoz kapcsolódóan, részben a Szalai József által folytatott Ayrton-Perry alapú általános csökkentő tényezős módszertan vonatkozásában [1,2,3,4].

Az 5. fejezet

19. ÉSZREVÉTEL: Mi az (5.4) képletben álló N_{Rk} értelmezése? Az elnevezés: normál erővel szembeni ellenállás karakterisztikus értéke önmagában semmit mondó. Mi az index nélküli W az (5.5) képletben?

Az N_{Rk} az anyagi ellenállás karakterisztikus értékét jelöli. A karakterisztikus érték fogalmát az EN 1990 pontosan definiálja: „Az az érték, amelyet az anyag- vagy termékjellemző értéke egy elképzelt, végtelen elemszámú kísérletsorozat során adott valószínűséggel nem ér el. Ezt az értéket általában az anyag- vagy termékjellemző statisztikai eloszlása alapján egy előírt kvantilissal adják meg. Bizonyos esetekben a névleges értéket alkalmazzák karakterisztikus értéként.” [5]. Esetünkben a keresztmetszet tiszta nyomással szembeni ellenállásának karakterisztikus értéke $N_{Rk}=A f_y$, ahol f_y az acélanyag folyási határának karakterisztikus értéke. Az (5.5) képletben a W továbbra is a keresztmetszet tehetetlenségi főtengelyére értelmezett keresztmetszeti modulus. Mivel a kifejezés formailag mindkét főtengelyre érvényes (azaz W lehet W_y vagy W_z is), azért a főtengely jelét nem tüntettem fel.

20. ESZREVÉTEL: Mi a garancia arra, hogy valósak χ_{LT} -re nézve az (5.16) polinom gyökei?

A matematikai formalizmus alapján a valós gyök létezése az alábbiakkal bizonyítható:

Ha az (5.16) másodfokú egyenletnek a diszkriminánsa pozitív, akkor két különböző valós gyöke van (ha nulla, akkor egy). A $\bar{\lambda}_{LT}$ helyett $\bar{\lambda}$, a η_{LT} helyett η , továbbá a χ_{LT} helyett χ jelöléseket alkalmazva:

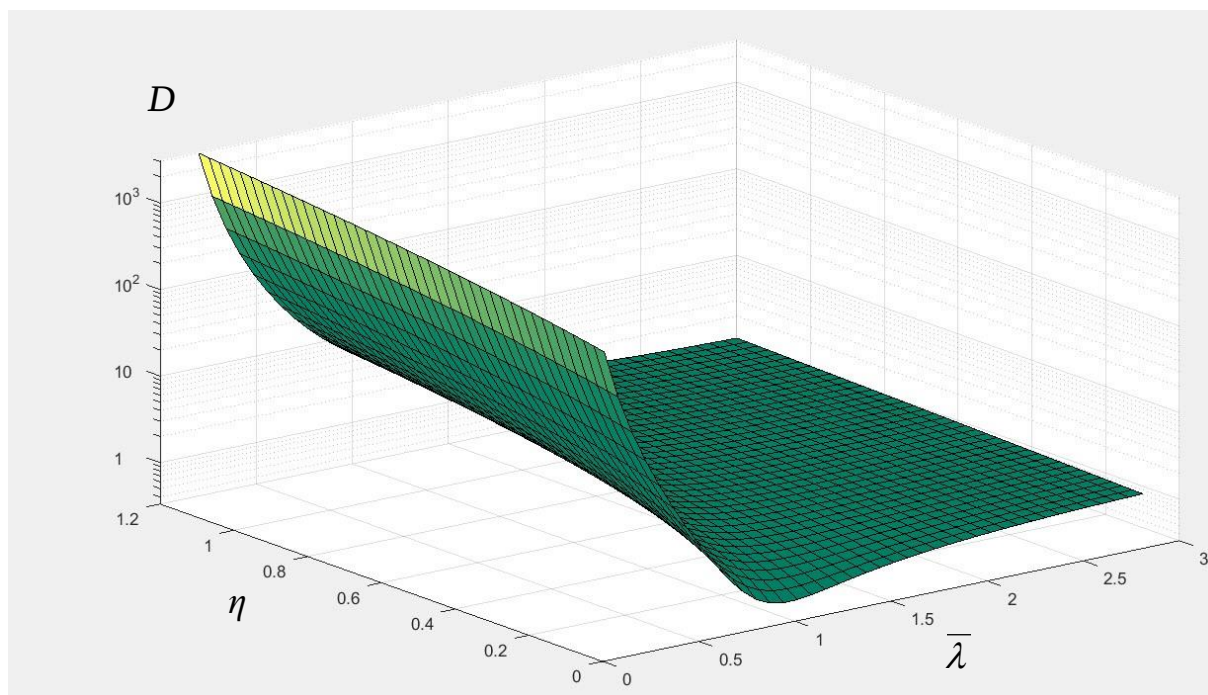
$$D = 1 + 2(\eta - 1) \frac{1}{\bar{\lambda}^2} + (1 + 2\eta + \eta^2) \frac{1}{\bar{\lambda}^4} \geq 0$$

ahol a keresett gyök $0 < \chi \leq 1$ és $\bar{\lambda} \geq 0.2$. Mivel $\bar{\lambda}$ valós szám, ezért $\eta \geq 1$ esetén biztosan létezik valós gyöke a kifejezésnek. Valós gyök a $0.1 \leq \eta < 1$ tartományban is létezik, ahogy azt a MATLAB szoftverrel készített és a jelen válasz végén elhelyezett grafikon mutatja.

Az (5.16) alakú kifejezést a múlt század 70-es éveiben vezették be a nyomott rúd ellenállásának becslésére. Rondal és Maquoui kimutatta, hogy ha a tökéletlenségi tényezőt a

$\eta = \alpha(\bar{\lambda} - 0.2)$ alakban írjuk fel, és az α keresztmetszeti tökéletlenségi tényező értékét megfelelően vesszük fel ($0.21 \leq \alpha \leq 0.76$), akkor az (5.16) kifejezésnek van valós gyöke, ami megfelelően közelíti a nagyszámú kísérletből valószínűségi alapon meghatározott χ csökkentő tényezőt (Rondal and Maquoi, 1979).

Az (5.16) kifejezés a fent említett kifejezéssel azonos, és a kiforduló gerenda ellenállásnak becslésére alkalmazzuk (Szalai and Papp, 2010; Szalai, 2017). Taras és Greiner numerikus vizsgálatokra alapozva kimutatta, hogy ha a η_{LT} tökéletlenségi tényezőt az (5.19) alakban vesszük fel, akkor az (5.16) kifejezésnek van valós gyöke az α_{LT} tényező megfelelő megválasztása esetén, és a gyök megfelelően közelíti a kísérletekből valószínűségi alapon meghatározott χ_{LT} csökkentő tényezőt (Taras and Greiner, 2010).



21. ÉSZREVÉTEL: Az 5.5. ábra. 4-edik rész ábráján a legjelentősebb az eltérés a GIM-NIA és az (5.46) képletben alapuló számítási eredmények között (HEA300 szelvény, L/v_{0d} az n függvényében.). A szöveges magyarázatot az oldal tetején nem érzem meggyőzőnek – mit kell pontosan érteni a kalibrációk hibáinak öröklésén?

Az 5.5 ábra feletti három pontból álló magyarázat 2. pontja így szól:

„Az (5.46) formula „örökli” az (5.5) és az (5.20) kalibrációk hibáit. Ez okozza a peremértékeknél (tisztá kihajlás és kifordulás) látható eltéréseket, különösen az IPE 360 szelvénynél a 0.8 karcsúságnál, illetve a HEA300 szelvénynél az 1.6 karcsúságnál.”

Először utalnék az 5.2 táblázatra, amellyel azt kívántam illusztrálni, hogy a két számítási mód eredményének eltérése a teherbírási szinten jóval kisebb, mint az L/v_{0d} egyenértékű geometriai tökéletlenség szintjén. Konkrétan: az utóbbi szinten látható kb. 20%-os eltéréshez a teherbírás szintjén csak 4,6%-os eltérés tartozik. Tehát az 5.5 ábra az eltéréseket „felnagyítva”, kedvezőtlen dimenzióban mutatja meg. A célom a globális stabilitási teherbírást megfelelő pontossággal közelítő módszertan kidolgozása volt. Ebből a nézőpontból az utóbbi eltérés, ha nem is elenyésző, de nem is jelentős.

Másodszor szeretném leszögezni, hogy az ábrákon (beleértve a 4-edik részabrárt is), az $n=0$ értékhez a referencia modell tiszta kifordulási stabilitásvesztése tartozik, amely határállapot esetében az európai kutatói közösség az (5.19) szerinti kalibrációt szabványosításra alkalmasnak tartja (Taras and Greiner, 2010). Tehát az ábra az Európában elfogadott (5.19) kalibráció és a saját GMNIA alapú kalibráció eltérését mutatja (a „saját” alatt a Hajdú Gábor doktoranduszommal végzett számításainkat értem). Ebből az következik, hogy az eltérésnek két oka lehet: (i) az (5.19) európai kalibráció pontatlan, (ii) a saját GMNIA számítás pontatlan. A saját GMNIA számítások eredményeit összevetettük a fent hivatkozott kutatók azonos modellekre vonatkozó GMNIA eredményeivel, és a teherbírási szinten nem találtunk számottevő eltérést. Ezért állítom, hogy az eltérés oka a kalibrációs formula pontatlanságában keresendő. Egyúttal utalok azon tényre, hogy az ilyen típusú kalibrációs formulák lényegéből következik, hogy „pontatlanok”, mert a kísérleti értékektől való eltéréseket legfeljebb csak optimalni tudják (például a legkisebb négyzetek módszere alapján).

Harmadszor, a kalibráció „hibája” (talán helyesebben „pontatlansága”) az (5.46) kifejezésben értelemszerűen megjelenik, hiszen az (5.46) a kihajlás és a kifordulás tiszta esetei között ad interpolációs összefüggést a kezdeti egyenértékű geometriai tökéletlenségre. Tehát az n értelmezési tartományának szélső pontjaiban jelentkező pontatlanság a kalibrációs formula tulajdonságából ered, azaz „öröklött” tulajdonság.

Ugyanakkor Bírálóm jogosan kérdezhetné, hogy okozhatja-e a szélső pontokban „öröklött” pontatlanság a közbelső pontokban tapasztalat eltéréseket? Véleményem szerint ez az „öröklött” tulajdonság általában befolyásolja az OIM formula pontosságát, de a konkrét esetben (HEA300 keresztmetszet és $\bar{\lambda}_z = 1.6$ redukált karcsúság) az eltérést (5.5 ábra, 4. részabrá) nem magyarázza meg. Az (5.46) közel lineáris viselkedését a HEA300 típusú keresztmetszet sajátossága indokolja, mivel a $\bar{\lambda}_z$ kihajlási és a $\bar{\lambda}_{LT}$ kifordulási karcsúság közel esik egymáshoz, és ezért a megfelelő két egyenértékű amplitúdó is. A GMNIA görbe lineáristól való eltérő viselkedésére egzakt magyarázattal nem tudok szolgálni, mivel:

- a GMNIA modellek érzékenysége a kezdeti geometriai tökéletlenségre igen tág határok között mozog, és nagymértékben függ a keresztmetszet alakjától, illetve a karcsúságtól (Badari and Papp, 2015; Badari, 2016);
- az (5.46) formula elhanyagolásokat tartalmaz, amelyeknek számszerűsített hatását jelenleg nem ismerjük (Szalai, 2017);
- az (5.34) szerinti OIM formula általánosítása a jelen interakciós problémára önmagában is hipotetikus, ezért a pontosságát alapvetően csak a teherbírás szintjén vizsgálom (5.6 ábra), ahol az eltérés nem olyan nagyságrendű, hogy különösebb magyarázatot igényelne.

Megjegyzések az „4. Összegzés és állásfoglalás” ponthoz

Köszönettel és örömmel olvastam, hogy Bírálóm a munkám értelmét és keretét adó ConSteel szoftvert „értékes mérnöki alkotásnak” tartja, amely „jelentős mechanikai tudást tükröz”.

Bírálóm felteszi a kérdést, hogy a „jogszabályok alapján mindez (5. tézis), természetesen mint alkotás, tézis értékű lehet-e?”. Bírálóm a doktori eljárást szabályozó Ügyrend alapján nem találta a választ, ami számomra azt jelenti, hogy műszaki alkotás tézisként történő elfogadása nem kizárt.

Bírálóm a továbbiakban a téziseket egyenként értékeli. Az értékeléshez az alábbi általános és specifikus megjegyzéseket kívánom fűzni.

Általános megjegyzés

Az értekezésem témáját illetően két lehetőség közül választhattam: (1) a témát és a téziseket a jelen értekezés 4. és 5. fejezeteire szűkítem, és kizárólag méretezéselméleti (alkalmazott mechanikai) kérdéseket, illetve téziseket fejtek ki; (2) a témát kiterjesztem a munkám végső célját és értelmét jelentő *integrált analízis és méretezés* módszertan egészére, amely téma magában foglalja a kutatási eredményeim mellett a fejlesztési és alkotási eredményeimet is. Mivel magam sem találtam az MTA szabályzatban olyan utalást, amelyik az alkotás alapú tézist kizárja, az utóbbi téma mellett döntöttem, számolva az esetleges hátrányos következményekkel is.

A döntésem meghatározta az értekezésem tematikáját: az fejezeteknek az entitást jelentő kutatás-fejlesztés-alkotás történet legfontosabb mérföldköveit kell követni. Így született meg az öt lényegi fejezet, és azok összegzéseként a történetet meghatározó öt lényegi eredmény, az öt tézis. Következésképpen az öt tézis tartalmát maga a történet (az értekezés címe és témája) determinálta.

Az értekezés szerkezete és tartalma kapcsán feltételeztem, hogy a bírálatok és a bizottsági döntés a munkámat a teljes entitásában értékeli.

Megjegyzések a tézisek értékeléséhez

1. Tézis

Tekintettel arra, hogy Vörös Gábor bírálóm is hasonló állásfoglalást tett, és elsőnek az ő bírálatára adott válaszomat fogalmaztam meg, itt megismétlem az ott írott válaszomat:

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

- a keresztmetszet szerkezetei objektumként történő értelmezése, amely megközelítés szakított azzal 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 keresztszetszeti 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 keresztszetszeti probléma, mint építőmérnöki műszaki tudományos téma, tényleges megoldásához, lezárásához.”

Örömmel vettem Bírálóm állásfoglalását, miszerint „*a gyakorlati hasznát egyáltalán nem vitatom*”. Ez legalább akkora elismerés, mint az, hogy ezt az eszközt több kutató szerkezet-kutatásra is alkalmasnak tartotta, többek között Bernuzzi professzor (lásd a D1 presztízssű folyóiratokban kapott hivatkozásokat).”

2. Tézis

Örömmel vettem, hogy Bírálóm a tézist alapvetően elfogadja, kivéve egy mondatát. A mondatokkal kapcsolatos 9. és 12. Észrevételekre a válaszaimat a fentiekben megadtam.

3. Tézis

Az európai acélszerkezeti kutatói-szakmai közösség az „*általános módszer*”-en a (4.12) formulát érti. A formula megfelel a későbbi EN1993-1-1(6.3.4) „*General Method*” formulának. A (4.12) csak a szimmetria síkjában terhelt nyomott és/vagy hajlított szerkezetek globális stabilitásvizsgálatára vonatkozik.

A (4.16) formula az MSZ ENV 1993-1-1 NAD Magyar Nemzeti Dokumentumban került adaptálásra, az európai EN1993-1-1 rendszerben még nem jelent meg. A formula alapvető hiányossága, hogy a χ_{bc} csökkentő tényezőben nem veszi figyelembe a passzív erők és nyomatékok hatását (Szalai, 2017).

Az elmúlt évben továbbfejlesztettük az OSDM (Overall Stability Design Method) módszerünket, ahol az általánosított karcsúságban illetve csökkentő tényezőben figyelembe vesszük a stabilitásvesztés szempontjából passzív hatásokat [2]. A (4.16) vonatkozásában passzív hatásnak számít a σ_{M_z} és a σ_B axiális feszültségeket generáló M_z és B nyomaték.

Az OSDM módszerről átfogó képet adtunk ECCS TC8 Stability (European Convention for Constructional Steelworks TC8 Stability jelű tudományos bizottsága) ülésén elhangzott előadásunkban (Papp and Szalai, 2017), továbbá több nemzetközi tudományos konferencia előadásban és cikkben [1,2,3]. A teljes módszertant a jelenleg készülő - a tervek szerint az ECCS kiadásában megjelenő - könyv formájában kívánjuk publikálni (Szalai, J. and Papp, F.: Overall Stability Design Methods of Steel Structures, tervezett megjelenés 2020).

4. Tézis

Bírálóm érvelését elfogadom, a munka valóban „*befejezetlen*”. Ugyanakkor szeretném jelezni, hogy a munka befejezése nagy valószínűséggel nem is lehetséges: ez a munka tipikusan egy „*végtelen játszma*” [6]. A munka túlmutat egy kutató, sőt egy kutatócsoport teljesítő képességén, és talán az életén is. Vizionálom, hogy mire létrejöhetne az összes lehetséges oszlop-gerenda csomóponti kialakításra érvényes 14 DOF rúd végeeselemes alapú M_z és B nyomatéki átviteli modell, továbbá a megfelelő számú esetet tartalmazó kalibrációs adatbázis, addigra a tervezés nemzetközi módszertanában már a fejlettebb eljárások és technológiák fognak uralkodni (GMNIA alapú virtuális kísérleti módszer (Dunai, 2007); mesterséges mérnöki intelligencia [7], stb.).

Ilyen helyzetben a műszaki kutató két út között választhat: a jövő fejlett technológiáinak kutatására koncentrálni, vagy a felhalmozott tudományos eredményekből alkot olyan mérnöki rendszert, amely az átmeneti időszakban a szerkezettervező mérnöki társadalom mindennapi munkáját támogatja. Az utóbbi mellett döntöttem. Az 5. fejezet végén a kutatás irányát jelöltem meg összetett szerkezetek (keretszerkezetek) esetében. Ennek okán került be a kifogásolt mondat a tézisbe. Hogy a következő egy-két évtizedben az általam javasolt módszertan helyes irány, abban biztos vagyok. Azt viszont csak találgatni tudom, hogy az említett fejlettebb technológiák mikor válnak uralkodóvá az acélszerkezeti tervezésben. És azt is, hogy az eredményeimből mi lesz átmenthető.

5. Tézis

Bírálom problémafelvetését értem, azt indokoltnak tartom.

Az **Általános megjegyzés** szakaszban (12. oldal) vázoltam a disszertációm témaválasztásának körülményeit. Remélem, hogy a Bizottság a téma specifikusságát elfogadja, a disszertáció anyagát teljes entitásban vizsgálja, és a téma specifikusságból következő leírási törvényszerűségeket figyelembe véve ítéli meg a munkám értékét.

Győr, 2019. május 15.

Papp Ferenc
pályázó

Hivatkozások

- [1] Szalai, J. : *Direct buckling analysis based stability design method of steel structures*. Ninth International Conference on Advances in Steel Structures (ICASS2018) 5-7 December 2018 - Hong Kong, China.
- [2] Papp, F. and Szalai, J.: *New stability design methodology through overall linear buckling analysis*. The 14th Nordic Steel Construction Conference, September 18–20, 2019, Copenhagen, Denmark
- [3] Papp, F., Movahedi, RM. and Szalai, J.: Az új globális stabilitásvizsgáló módszerek kiterjesztése acél keretszerkezetekre. XIII. Magyar Mechanikai Konferencia, Miskolc, 2019. augusztus 27-29.
- [4] Szalai, J., Papp, F. and Hajdú, G.: *Validation of the Overall Stability Design Methods (OSDM) for tapered members*. International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures SDSS 2019, 11 - 13 September 2019, Prague, Czech Republic
- [5] MSz EN 1990. Eurocode: A tartószerkezetek tervezésének alapjai, 2005., 1.5.4.1 szakasz.
- [6] Scharle Péter: *Játszmázási modellek a műszaki mechanika művelésének felsőoktatási környezetében*. XIII. Magyar Mechanikai Konferencia, Miskolc, 2019. augusztus 27-29.
- [7] Yuval Noah Harari: 21 lecke a 21. századra. I. RÉSZ A technológiai kihívás. Central Kiadói Csoport, 2018.