Válaszok Prof. Dr. Papp Ferenc

„Kövesdi Balázs Géza: Acélhidak innovatív méretezési módszerei” című MTA doktori értekezés bírálatára

Először is nagyon köszönöm az alapos bírálatot és az eredményeim pozitív megítélését. A bírálatban tett megjegyzésekre és kérdésekre az alábbiakban válaszolok:

1. észrevétel

A doktori mű vezérfonalával kapcsolatban a bírálatban felvetett észrevételre vonatkozóan a következőt tudom mondani. A hivatkozott felsorolásban megadott négy méretezési eljárás:

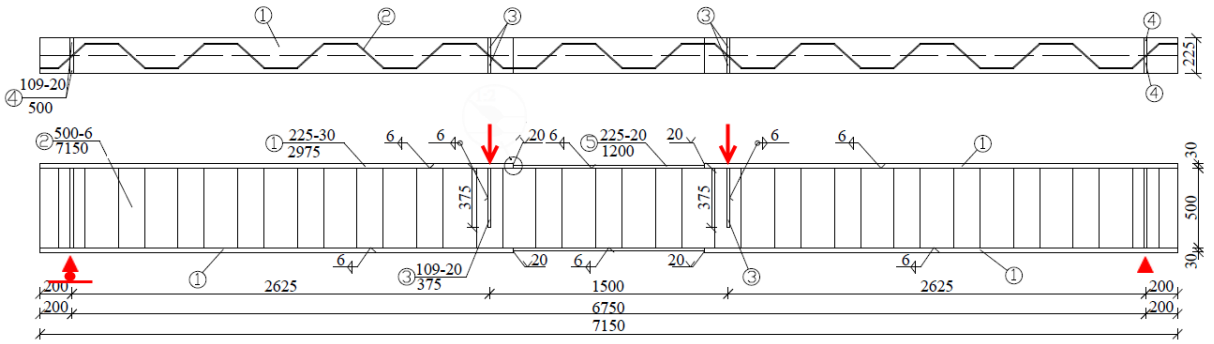
(i) a trapézlemez-gerincű tartókban nyíróerőből kialakuló keresztirányú hajlítónyomaték meghatározása,
(ii) a trapézlemez-gerincű tartók nyomatéki ellenállásának meghatározása,
(iii) a lemezes szerkezetek M-V interakciójának ellenőrzése és
(iv) a közvetlen teherrel nem terhelt kereszttartók merevségi és teherbírási vizsgálata,

azon méretezési formulák, melyeket én dolgoztam ki és melyek elfogadásra kerültek az új acél lemezesszerkezetek tervezésével foglalkozó, várhatóan 2024-ben megjelenő prEN 1993-1-5:2024 szabványba. A disszertáció ezenkívül tartalmazza még a több merevítőbordával merevített gerinclemezes tartók beroppanási ellenállásának meghatározására kidolgozott méretezési eljárásomat, valamint az M-V-F interakcióra vonatkozó vizsgálataimat, melyeket szintén fontosnak éreztem a doktori műben bemutatni. Azonban egyetértek azzal, hogy az egyértelműség kedvéért szerencsés lett volna ezeket is megjelölni a bevezetés végén lévő felsorolásban.

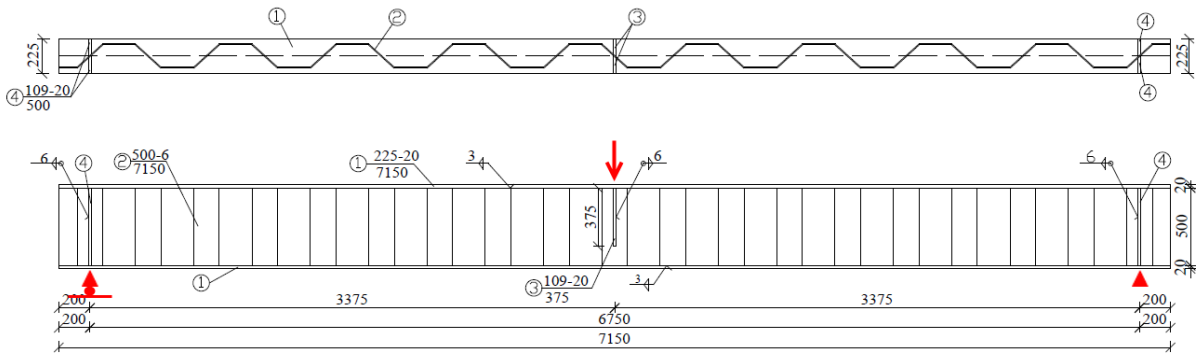
A 2. fejezet: „Trapézlemez-gerincű I-tartók hajlítási ellenállása”

2. észrevétel

A kísérleti próbatestekre való hivatkozásban a doktori műben szereplő *3-6. ábrákra* való hivatkozás sajtóhiba, helyesen *3-5. ábrákat* kellett volna írnom. Azzal a megjegyzéssel is egyetértek, hogy a próbatestek geometriai kialakításának ábráin jelölhettem volna a terheket és támaszokat az *1-2. ábrának* megfelelő módon, melyek javították volna a munka érthetőségét.



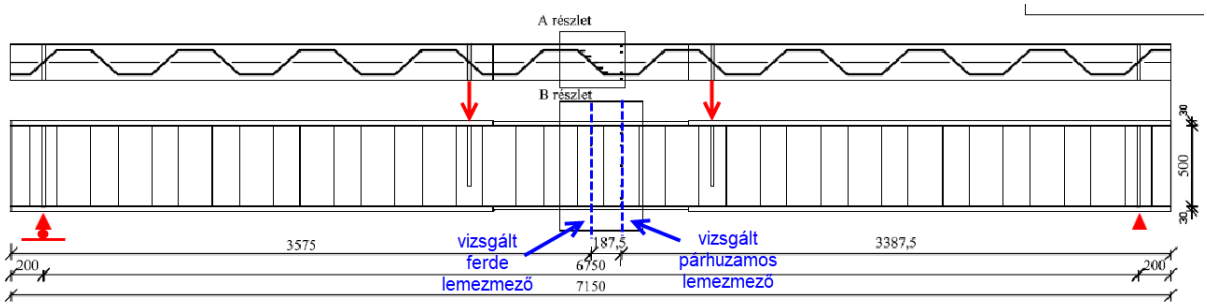
1. ábra: Négypontos hajlítással terhelt gerenda geometriai kialakítása (1. és 2. próbatest).



2. ábra: Hárompontos hajlítással terhelt gerenda geometriai kialakítása (3 - 6. próbatest).

3. észrevétel

A feszültségek pontos mérési helyére vonatkozó észrevétellel kapcsolatban válaszként a *3. ábrán* bemutatom az 1. próbatest hossztengelye mentén a vizsgált keresztmetszetek pontos elhelyezkedését, melyek a gerenda középső keresztmetszete melletti első ferde, valamint párhuzamos lemezmezők közepén lettek felvéve. Egyetértek a Bírálóval, hogy ezen keresztmetszetek ábrán való megadása szintén növelte volna a munka érthetőségét, követhetőségét.



3. ábra: Gerinclemezben mért normálfeszültségek keresztmetszeti elhelyezkedése.

4. észrevétel

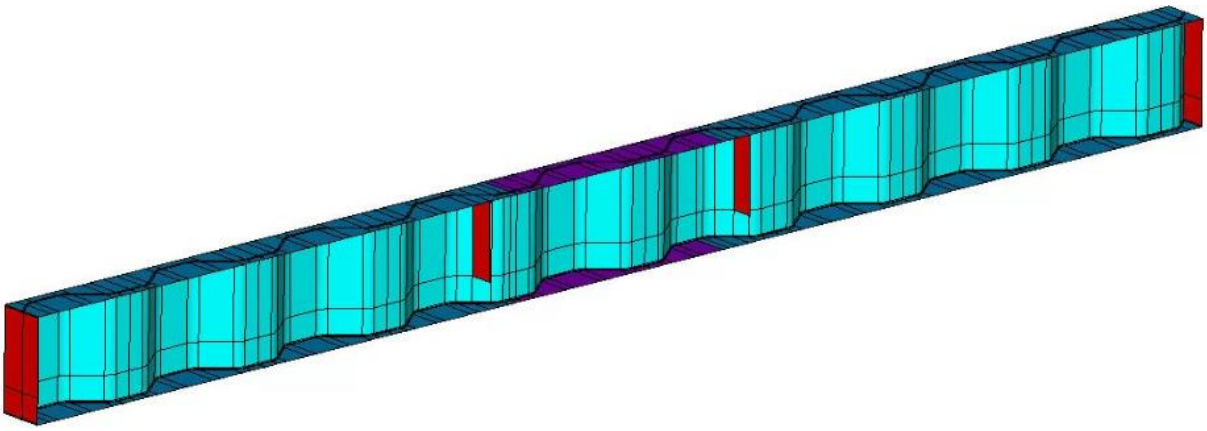
A doktori mű *7. és 8. ábráinak* eredményei valóban a doktori műben megjelölt tisztán nyomatékkal, vagy hajlítás-nyírás interakcióval terhelt gerendaszakaszokra vonatkoznak, köszönöm a pontosítást. A mérések helye a doktori mű *7. ábráján* szereplő normálfeszültségek esetén a fenti, *3. ábrán* bemutatott, vizsgált párhuzamos lemezmezőben volt. Ezzel analóg módon kerültek elhelyezésre a nyúlásmérő bélyegek a hárompontos hajlítással terhelt gerendán is, így itt is a mezőközépi keresztmetszetben a ferde lemezmezőn, illetve a mellette lévő első párhuzamos lemezmező középső keresztmetszetében történtek a nyúlásmérések.

5. észrevétel

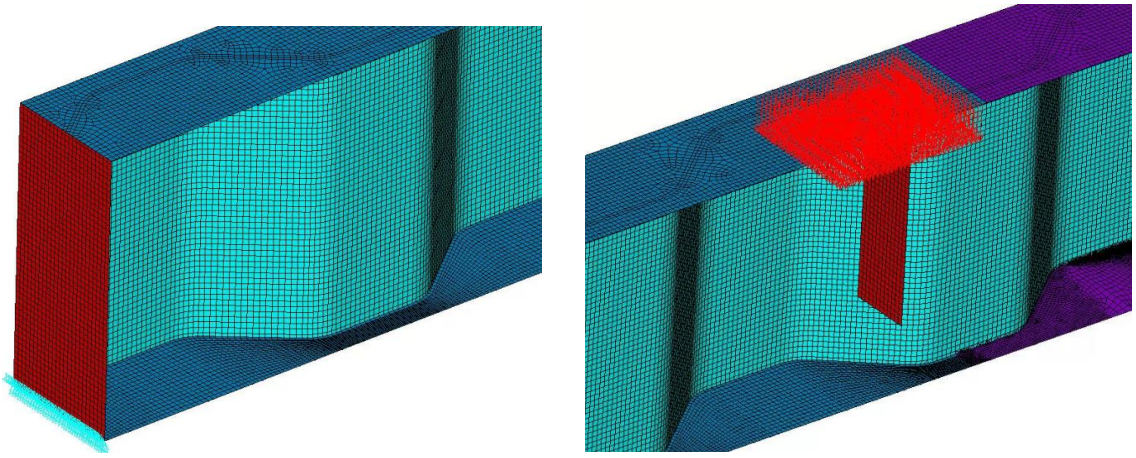
A Bíráló kifogásolta a numerikus modellek teljes részletességű, mindenre kiterjedő bemutatását a doktori műben, melyre terjedelmi korlátok miatt nem kerülhetett sor. A következő válaszomban ezt igyekszem pótolni.

A numerikus modellt Ansys programkörnyezetben dolgoztam ki. A feszültségeloszlás meghatározására először lineáris analízist hajtottam végre, majd a trapézlemez-gerincű tartók

hajlítási teherbírásának meghatározásához anyagi és geometriai nemlineáris analízist végeztem imperfekciók alkalmazásával. A numerikus modell egy teljes héjszerkezeti modell, melyben nyolc csomópontú Mindlin-Reissner típusú végeselemeket alkalmaztam, melyek az Ansys program Shell281 jelű végeselemei voltak. Az alkalmazott végeselemek alkalmasak a kis- és nagyelmozdulások követésére, valamint az anyagi nemlineáris viselkedés modellezésére is. A végeselemes geometriai modellt, valamint az alkalmazott jellemző végeselemes háló kiosztását két szerkezeti részletre (támaszkörnyezet és erőbevezetés környezete) vonatkozóan a *4-5. ábrák* mutatják be.



4. ábra: Alkalmazott geometriai modell globális kialakítása a trapézlemez gerincű tartók feszültségeloszlásának vizsgálatára.



a) támaszkörnyezet modellje *b) erőbevezetési környezet modellje*

5. ábra: Alkalmazott jellemző végeselemes háló kialakítása.

A numerikus modellben alkalmazott csomópontszám a bemutatott esetben 162815, ami ~976500 csomóponti szabadságfoknak felel meg. Az alkalmazott tehermodell csomópontokon működtetett, egyenletesen megoszló terhelés volt az övlemezszélesség és a kísérletek során alkalmazott teherátadó lemez hossza mentén. A támaszmodell a gerenda két végén, az alsó övlemez szélessége mentén alkalmazott két-, illetve háromirányú elmozdulás elleni megtámasztás volt. Az anyagmodell a feszültségek számításához lineárisan rugalmas anyagmodell volt, a rugalmassági modulust E=210000 MPa értékűre vettem fel. A nemlineáris számítások során lineárisan rugalmas – keményedően képlékeny anyagmodellt alkalmaztam, Huber-Mises-Hencky folyási feltétel és az EN 1993-1-5 szabvány C mellékletében megadott

E/10000 értékű keményedési modulus alkalmazásával. A nemlineáris megoldás során a konvergenciát a kiegyensúlyozatlan belső erők euklideszi normája alapján vizsgáltam 0,1% konvergencia-toleranciafaktor alkalmazásával.

6. észrevétel

A 11. ábrához fűzött észrevétellel egyetértek, korábban is definiálhattam volna a terhelési eseteket, már a kísérleti próbatestek bemutatása során (a fent bemutatott *2. és 3. ábrának* megfelelő módon), ami javította volna a doktori mű érthetőségét. Azonban megítélésem szerint az eredmények megértéséhez szükséges információ a doktori műben rendelkezésre áll.

7. észrevétel

A (2.14) képletben szereplő normálfeszültség az (M_z) keresztirányú hajlítónyomaték függvénye, így a (2.14) képletben megadott felírás helyes. A képlet alatti magyarázatban a (M_z) sajnos lecsúszott indexbe, ami sajtóhiba a doktori műben, nagyon köszönöm a pontosítást.

8. észrevétel

A (2.14) képletben szereplő χ tényező értelmezésére vonatkozott a következő kérdés. A χ tényező szabványos definíciója alapján az övlemez, síkra merőleges kihajlásához tartozó csökkentő tényező, melyet az EN 1993-1-1 6.3 fejezete szerint kell meghatározni. Értelmezésem szerint a hivatkozott χ tényező az egyszerűsített kifordulásvizsgálat (övmerevségvizsgálat) számítási módszerét követi trapézlemez gerincű tartók esetére vonatkozóan. A doktori disszertációban nem foglalkoztam külön a trapézlemez gerincű tartók kifordulásvizsgálatával, de a doktori mű megírása után intenzív kutatást folytattam kutatócsoportommal a témában. Ezen kutatások során nem övmerevségvizsgálattal, hanem általános módszerrel vizsgáltuk a trapézlemez gerincű tartók kifordulási ellenállását és adtunk javaslatot a kritikus nyomaték, valamint a megfelelő kifordulási görbe alkalmazására. A (2.14)-es képletben szereplő csökkentő tényezőt a hagyományos, síklemez gerincű tartókra vonatkozó méretezési eljárással analóg módon kell meghatározni annyi különbséggel, hogy a helyettesítő T-keresztmetszetben nem szükséges az együttdolgozó gerinclemezrész figyelembe vétele.

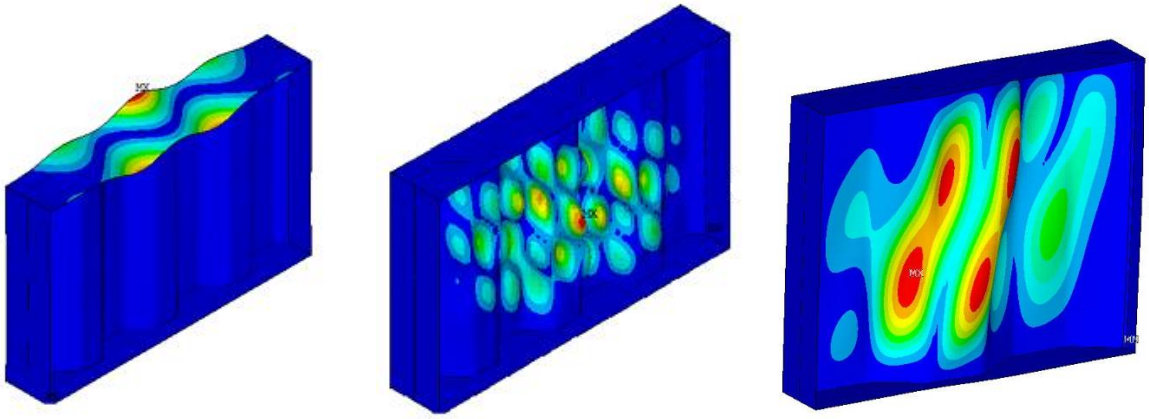
9. észrevétel

Köszönöm az észrevételt, miszerint a 24. oldalon az f_y és f_u acélszilárdságokra „*nominális*” érték helyett helyesebb lenne „*karakterisztikus*” értékként hivatkozni. Ezzel egyetértek, holott a számításokban alkalmazott érték valójában az alkalmazott acél anyagok nominális értéke, melytől kismértékben a karakterisztikus érték eltérhet. Ugyanakkor szokás az acél anyagok esetén a nominális értéket és a karakterisztikus értéket azonos értéknek tekinteni.

10. kérdés

A helyettesítő geometriai imperfekcióra vonatkozó kérdésekre válaszolva azt tudom mondani, hogy a sajátalak formájú imperfekció alkalmazásánál a következő stratégia szerint jártam el:

(i) A tisztán hajlított esetben a sajátalak jellemzően övlemez horpadás volt (*6.a ábra*); a tisztán nyírt esetben két esetet is vizsgáltam, a gerinclemez lokális (*6.b ábra*) és globális tönkremenetele (*6.c. ábra*) is előfordult a vizsgált paramétertartományban.



a) tiszta hajlítás b) lokális nyírási horpadás c) globális nyírási horpadás

6. ábra: Jellemző sajátalakok az imperfekció felvételéhez.

(ii) Helyettesítő geometriai imperfekcióként minden esetben alaki tökéletlenséget alkalmaztam, amit technikailag úgy definiáltam a numerikus modellen, hogy az adott terheléskombinációhoz tartozó első sajátalakot határoztam meg, melyet megfelelő módon skálázva alkalmaztam a tökéletlen szerkezet kezdeti geometriájának létrehozására.

(iii) Az imperfekciós alak változásán azt értettem, hogy a sajátalak formájú imperfekció figyelembe veszi a szerkezetre ható terheket, és egy, stabilitási szempontból érzékeny alakot eredményez, aminek kezdeti helyettesítő geometriai imperfekcióként való alkalmazása a biztonság oldalán való teherbírásértékre vezet a GMNI analízis során.

A 3. fejezet: „Hosszbordával merevített gerendák beroppanási ellenállása”

11. észrevétel

A méretezéstörténeti összefoglalóhoz tett észrevételt köszönöm. A témában megjelent folyóiratcikkemben én is inkább ezt a stratégiát követtem a korábbi méretezési eljárásokban alkalmazott beroppanási ellenállás korrekciós tényezőjének esetében, melyet az *1. táblázat* mutat be.

1. táblázat: Beroppanási ellenállás meghatározására javasolt korrekciós tényezők.

év	*kutató*	*korrekciós tényező*	*értelmezési tartomány*
1979	*Bergfelt*	$f(s) = 1 + \left(\frac{1}{3} + \frac{b_1}{h_w}\right) \cdot \sqrt{\frac{s_\eta}{3 \cdot b_1}}$	$0.1 \leq \frac{b_1}{h_w} \leq 0.3$
1992	*Markovic és Hajdin*	$f(s) = 1.28 - 0.7 \cdot \frac{b_1}{h_w}$	$0.1 \leq \frac{b_1}{h_w} \leq 0.3$
1992	*Kutmanová és Skaloud*	$f(s) = 0.958 - 0.09 \cdot ln\left(\frac{b_1}{h_w}\right)$	-
2002	*Graciano*	$f(s) = 0.556 - 0.277 \cdot ln\left(\frac{b_1}{h_w} \cdot \left(\frac{f_{yf}}{f_{yw}} \cdot \frac{t_w}{t_f}\right)\right)$	$0.1 \leq \frac{b_1}{h_w} \leq 0.3$

A csökkentő tényezős eljárás esetén hasonló táblázatos összefoglaló adható lenne, azonban itt az egyik legfontosabb korábbi vizsgálat, Davaine kutatási eredménye mindenképpen kilóg a sorból, mivel két kritikus teher kombinációjából javasolja kiszámítani a beroppanáshoz tartozó kritikus teherparaméter értékét. Kilóg a sorból Seitz méretezési módszere is, aki a nyomott lemezek esetén megszokott oszlopszerű és lemezszerű viselkedés kombinációjából vezeti le a beroppanási ellenállás értékét. Ezt a két méretezési eljárást nehéz lenne azonos formátumú táblázatban összefoglalni.

12. kérdés

A beroppanási ellenállási kísérleti eredményeinek módosítására a következő választ adom. A kísérletek során minden próbatest esetén mind az övlemez, mind a gerinclemez folyáshatára és szakítószilárdsága külön-külön meg lett határozva. Az egyes próbatestek anyagjellemzői között számottevő különbségek voltak tapasztalhatók, amik korrekció nélkül félrevezető eredményre vezettek volna az egyes mérési eredmények egymáshoz képesti összehasonlításában. Ezért minden próbatest beroppanási ellenállásértékét a gerinclemez folyáshatára, valamint a kísérletben alkalmazott gerinclemezek átlagos folyáshatárának arányában módosítottam. Azért a gerinclemez anyagjellemzőjét használtam a módosításhoz, mert a tönkremenetel egyértelműen minden kísérleti próbatest esetén a gerinclemezben alakult ki. A módosítást elvégeztem a folyáshatár és a szakítószilárdság alkalmazásával is, ami a legtöbb próbatest esetén 1-2%-os pontossággal azonos teherbírásértékre vezetett.

Egy konkrét esetben, például az 1. próbatest esetén a módosítás a következőképpen alakult:

mért érték: 206,4 kN; mért f_{yw} = 286 MPa; átlagos f_{yw} = 311,3 MPa

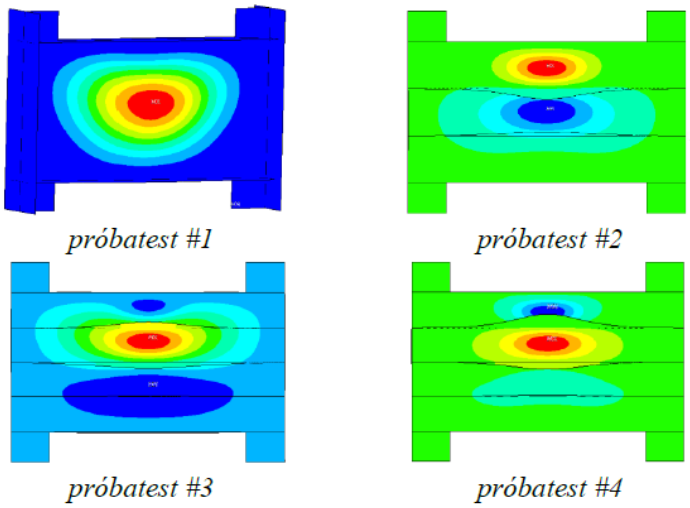
módosított beroppanási ellenállás: 206,4 kN /286 MPa · 311,3 MPa = 224,6 kN

Ugyanakkor megjegyzem, hogy a módosított értéket kizárólag a kísérletek egymáshoz képesti összehasonlításához használtam. A numerikus modell validációját, valamint a doktori mű 3.4 fejezetében bemutatott imperfekcióérzékenység vizsgálatát minden próbatest esetén a mért folyáshatár és szakítószilárdság, illetve a ténylegesen mért beroppanási ellenállásértékek alapján végeztem el, így a fent bemutatott konverzió nincs hatással a doktori műben közölt tudományos eredményeimre.

A bírálatban kérdezett erő-elmozdulás diagramok pedig kizárólag az áttekinthetőség kedvéért kerültek külön diagramra, mivel az egyik csoport 100 mm hosszúságú, a másik csoport 200 mm hosszúságú erővezetési hosszhoz tartozik, így a hosszbordák hatása az 1. és 5. jelű referencia próbatesthez képest így volt a legjobban ábrázolható.

13. észrevétel

A helyettesítő geometriai tökéletlenség megadása terjedelmi okok miatt maradt ki a doktori műből; a kérdésre válaszolva ezt az alábbiakban szeretném pótolni. A numerikus modellben itt is helyettesítő geometriai imperfekciót alkalmaztam, melyet hasonló numerikus modellek esetén szokásos módon, sajátalak formájú imperfekcióként vettem fel, melynek maximális értékét $b_i/200$ értékre skáláztam. Az alkalmazott imperfekció alakját a *7. ábra* mutatja be a négy különböző típusú próbatest esetére.



7. ábra: Első sajátalak formájú helyettesítő geometriai imperfekciók alakjai.

A sajátalak formájú helyettesítő geometriai imperfekció hasonló stabilitási problémák esetén elterjedten alkalmazott és korábbi szakirodalmi adatok alapján alkalmazása általában a biztonság oldalán lévő teherbírásértékre vezet. Mivel több hosszbordával merevített gerinclemezes tartók esetére nem állt rendelkezésemre kiterjedt kísérleti és numerikus vizsgálat az alkalmazandó imperfekció alakjára és nagyságára vonatkozóan, ezért első körben a sajátalakformájú imperfekciót alkalmaztam, majd a 3.4. fejezetben a különböző imperfekciós alakok teherbírásra gyakorolt hatását vizsgáltam, mely hiánypótló számítássorozat volt a több hosszbordával merevített gerinclemezek beroppanási ellenállásának meghatározása esetén.

14. kérdés

A disszertáció *38. ábrája* a hálóérzékenység-vizsgálatot mutatja be, melynek vízszintes tengelyéről sajnos hiányzik a felirat. A vízszintes tengely a végeselemes háló méretét, a függőleges tengely a numerikus modellben alkalmazott elemszámot (piros oszlopdiagram formájában), illetve a beroppanási ellenállás értékét (kék pontokkal és ezeket összekötő egyenesekkel) mutatja. Látható, hogy a hálóméret csökkentésével a beroppanási ellenállás értéke egy bizonyos értékhez tart, melyet pontos megoldásnak tekinthetünk. Ennek az elméleti értéknek a maximum 1%-os hibával való meghatározását tekintettem a minimálisan alkalmazandó végeselem méretnek a numerikus modellben.

15. kérdés

Az első sajátalak formájú imperfekció alkalmazását a doktori mű *41. ábráján* bemutatott alakoknak megfelelően vizsgáltam, ami úgy gondolom, megfelel a bírálatban kérdezett módszernek. Eszerint a sajátalak tartalmazza, vagy legalábbis tartalmazhatja mind a lokális, mind a globális stabilitásvesztéshez tartozó imperfekciót, a szerkezet stabilitási szempontból való érzékenységének függvényében.

A másik módszert, a lokális és globális geometriai imperfekciók szétválasztását azért tartottam fontosnak megvizsgálni, mert merevített lemezes szerkezetek horpadásvizsgálata során fontos, hogy mind a globális bordakihajlás jellegű, mind a lokális lemezhorpadás jellegű tönkremeneteli mód is figyelembe legyen véve a számításokban, melyet a doktori mű *42. ábráján* látható imperfekciókkal szokás figyelembe venni. A numerikus számításaim éppen arra

mutattak rá, hogy az általam vizsgált „erős hosszbordák” alkalmazása esetén a globális, hosszbordakihalás jellegű imperfekció elhanyagolható, a lokális horpadási imperfekció alkalmazása ennél a tönkremeneteli módnál elegendő.

16. kérdés

Az analitikus képletek eredményeinek kísérleti értékekkel való összehasonlítása (doktori mű *46. ábrája*) során a következő módszer szerint jártam el. Minden esetben a kísérleti próbatestek mért anyagjellemzőivel számoltam az analitikus méretezési eljárások képleteiben is, így biztosítva az analitikus méretezési eljárások pontosságának és tendenciájának kiértékelhetőségét és a kísérleti eredményekkel való közvetlen összehasonlíthatóságot.

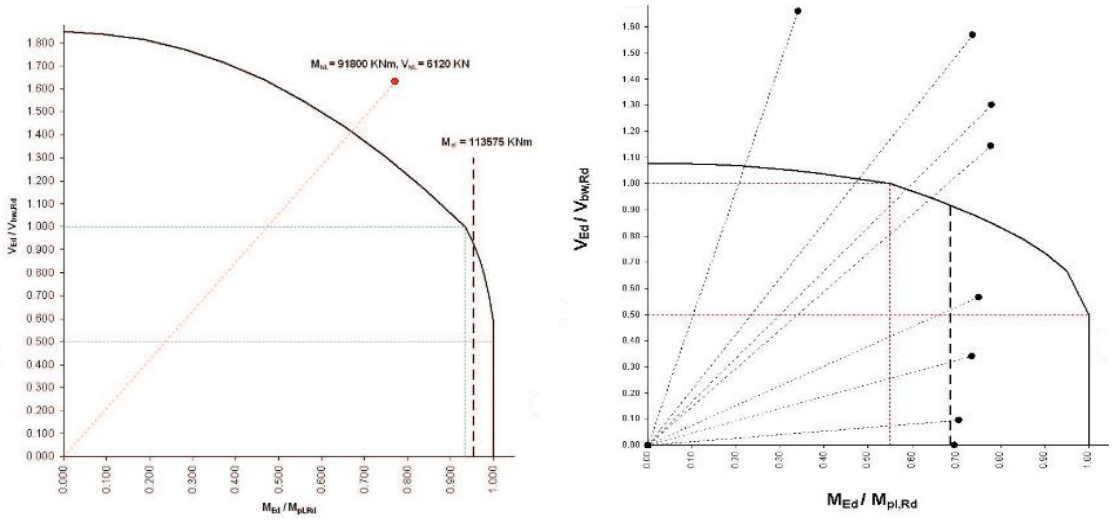
17. észrevétel

A doktori mű *51. ábráján* megjelölt, beroppanási tönkremenetelhez tartozó szabványos horpadási görbe a doktori mű 3.1 fejezetében megadott (3.2) – (3.5) egyenletek által definiált görbe, ami nagy pontossággal megegyezik a jelenleg érvényben lévő EN 1993-1-5 szabvány 6.4 fejezetében lévő (6.3) képlettel megadott horpadási görbének. Az egyenletek felírásában való különbség oka az, hogy az új, várhatóan 2024-ben megjelenő második generációs prEN 1993-1-5 szabványban a horpadási görbe a (3.1) – (3.5) alakra lett átalakítva, igazodva ezzel a többi stabilitásvizsgálatban is alkalmazott Ayrton-Perry típusú felíráshoz. Az összehasonlítás azonban azonos megbízhatósággal mindkét egyenlet alapján elvégezhető. Én a diagramon már az új szabványverzió szerinti görbét tüntettem fel, ez azonban az eredmények kiértékelését nem befolyásolja a két görbe közti elhanyagolható különbség miatt.

A 4. fejezet: „Gerinclemezes I-tartók interakciós viselkedése”

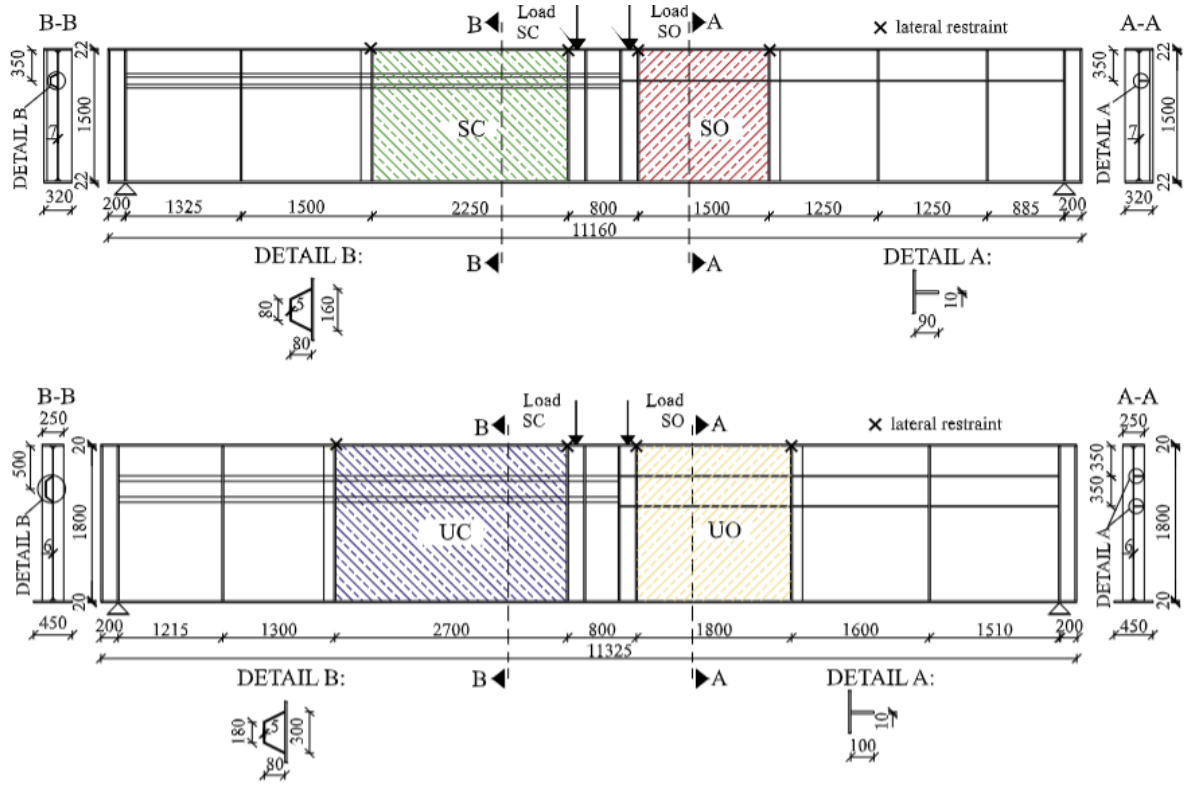
13. észrevétel

A kutatási cél meggyőzőségére vonatkozó észrevétellel egyetértek. A 4.1. fejezetben a kutatási célkitűzésben hivatkozott eredmények, melyeket Hendy és Presta tipikus hídszerkezeti gerendákon hajtottak végre valóban numerikus számítási eredmények, amit a *8. ábra* mutat be. Ezen ábrákon látható, hogy a számítási eredmények jelentősen nagyobb teherbírásra vezetnek, mint a szabványos méretezési módszer, így az jelentősen a biztonság oldalán van.



8. ábra: Hendy és Pesta számítási eredményei a doktori műben hivatkozott műből, [63].

Ugyanakkor a szintén hivatkozott Sinur és Beg által végzett kutatásnak van kísérleti alapja is, a vizsgált próbatestek geometriáját a *9. ábra* mutatja be. Sinur is a kísérleteket nagyszámú numerikus paramétervizsgálattal egészítette ki a végső konklúziójának kijelentéséhez, miszerint több vizsgált geometriai konfiguráció esetén a szabványos méretezési eljárás nincs a biztonság oldalán.



9. ábra: Sinur és Beg kísérleti próbatestjei a doktori műben hivatkozott mű alapján [64].

A két kutató jelentősen eltérő következtetése miatt a témát érdemesnek találtam további vizsgálatokra. Számottevő eredménynek gondolom azt is, hogy én mutattam rá a két kutatási eredmény és két eltérő következtetés közti különbség okára, és a kutatási eredményeim alapján bemutattam, hogy milyen paramétertartományban kapjuk a Hendy és Pesta által kapott eredményeket, és mely paramétertartományban jutunk a Sinur által kapott eredményre. Ez adta az ötletet a kölcsönhatási összefüggés keresztmetszeti jellemzők függvényében való felírására, ami végül biztosítani tudja a teljes vizsgált paramétertartományban a közel azonos különbséget az elméletileg pontos teherbírásértékektől.

14. kérdés

A doktori mű *55. ábrája* három különböző numerikus modellt mutat be, melyeket vegyesen alkalmaztam a kölcsönhatás vizsgálatára irányuló numerikus paramétervizsgálat során. A M-V és az M-V-F interakciós viselkedés elemzésére kismértékben más numerikus modelleket alkalmaztam a koncentrált erőbevezetés miatt, ami aszimmetrikussá teszi a gerenda viselkedését. Az M-V-F interakciós viselkedés megítélésem szerint megnyugtatóan nem volt vizsgálható szimmetriafeltétel alkalmazásával, ugyanakkor az M-V interakcióra való vizsgálatokban szimmetrikus a teherelrendezés, ami szimmetriafeltétellel is megbízhatóan vizsgálható volt. A bírálatban kérdezett b) jelű konzolos modellt ezért kizárólag az M-V

interakciós viselkedés vizsgálatára alkalmaztam, ahol minden esetben szimmetrikus tönkremenetelt vártam az általam vizsgált terhelések és megtámasztások alkalmazásával. Így jelentős futási időt tudtam megtakarítani az időigényes GMNI analízisek során.

15. kérdés

A doktori mű *56-57. ábrái* mutatják be a kölcsönhatási viselkedéshez alkalmazott imperfekciókat. Az *56. ábra* a merevítetlen gerincű tartókat, az *57. ábra* a hosszbordával merevített gerinclemezes tartókat mutatja be. A merevítetlen kialakítás esetén a paramétervizsgálatot sajátalak formájú imperfekciókkal hajtottam végre, mely képes követni a különböző terhelési esetekhez tartozó stabilitásvesztési módot és a vizsgált lemezmezők terhelési és szerkezeti viselkedési sajátosságait. Ugyanezt a stratégiát alkalmaztam a lokális imperfekciók esetén a hosszbordával merevített gerendák esetén. A bírálatban feltett kérdésre válaszolva, az a megfontolásom, hogy az imperfekció képes követni a stabilitásvesztési alakot azt jelenti, hogy amennyiben a vizsgált szerkezeti elem dominánsan hajlított volt, a hajlításhoz tartozó első sajátalaknak megfelelő imperfekciós alak került alkalmazásra a modellben. Amennyiben a szerkezeti elem dominánsan nyírva volt, akkor a nyírási horpadáshoz tartozó első sajátalaknak megfelelő alak került a numerikus modellre imperfekcióként. Ennek megfelelően minden vizsgált szerkezeti kialakítás esetén a vizsgált szerkezeti elem és az adott terhelésnek megfelelő sajátalaknak megfelelő imperfekciós alak került a numerikus modellben definiálására, ami korábbi szakirodalmi és saját tapasztalataim alapján a biztonság oldalán lévő megoldásra vezet.

A második kérdésre vonatkozóan, hosszbordák esetén a numerikus modellben szükséges alkalmazni egy olyan imperfekciót is, ami a hosszborda hossztengelyre merőleges elfordulásához, elcsavarodásához tartozik. Erre a hosszborda imperfekcióra utaltam az 1/50 amplitúdójú elfordulási imperfekcióval. Lehet, hogy egyértelműbb lett volna hosszborda „*elcsavarodási imperfekciónak*” nevezni ezt az imperfekció típust.

16. kérdés

A *73. ábrán* bemutatott, M-F kölcsönhatásra vonatkozó kérdésre vonatkozóan az a válaszom, hogy éppen az általam javasolt görbe ad a biztonság oldalán lévő méretezési javaslatot. A doktori mű *72. ábrája* mutatja be az eredetileg Braun által javasolt M-V-F interakciós egyenlet M-F síkra vonatkozó metszetét. Látható, hogy a *72. ábrán* a sárga szaggatott vonal alatt vannak numerikus számítási eredmények, ami azt jelenti, hogy a méretezési görbe nincs minden esetben a biztonság oldalán. A *73. ábra* pedig azt mutatja, hogy amennyiben az általam javasolt, kismértékben módosított görbét alkalmazzuk, akkor minden számítási eredmény a biztonság oldalán lesz.

Az 5. fejezet: „Közvetlen teherrel nem terhelt kereszttartók méretezése”

17. észrevétel

A doktori mű *79. ábrájával* az 5. fejezetben vizsgált szerkezeti elemet szerettem volna bemutatni a fejezet további részének könnyebb érthetősége érdekében, egyértelművé téve és ábrákon is demonstrálva, hogy a vizsgált, közvetlenül nem terhelt kereszttartó a gyakorlatban általában a szekrénytartók fenéklemezének keresztirányú merevítőtartói. Az ábra a) és b) része

nem függ össze, nem azonos szerkezet ábrázolnak, kizárólag a vizsgált szerkezeti elem szemléltetése miatt kerültek be a dokumentumba, a könnyebb érthetőség elősegítése érdekében.

18. kérdés

A bírálatban kérdezett (5.3) képlet Choi és tsai. [92] által levezetett összefüggés, melyben a levezetés egy pontján a lemezszélesség helyére behelyettesítették a következő összefüggést a lemezszélesség mentén egyenletes bordakiosztás feltételezésével:

$$b = (n + 1)\cdot w$$

ahol n a hosszbordák száma, w pedig a hosszbordák közti távolság. Nyitott bordák esetén ez megegyezik a hosszbordák távolságával. Ezért az (5.3) képletben a lemezszélesség indirekt módon szerepel a fent megadott formában.

19. észrevétel

A *85.* és a *87. ábra* valóban összetartozik, egyetértek a bírálatban tett észrevétellel. Jobbnak láttam ugyanakkor az érthetőség kedvéért először egy áttekintő ábrát adni a numerikus modellről és a vizsgált geometriai kialakításról, ez látható a doktori mű *85. ábráján*. Majd egy másik ábrát közölni, melyen a vizsgált paraméterek láthatók, ezeket változtattam a numerikus paramétervizsgálatban. Ugyanakkor a bírálatban tett megjegyzéssel egyetértek, akár egy ábrán is feltüntethettem volna ezt a két információt.

20. észrevétel

A doktori mű *91. ábráján* valóban a legtöbb számítási eredmény nagyon jó egyezést mutat az analitikus megoldással, 4 esetben viszont vannak jelentősebb eltérések is, melyek a kiértékelés módszertanával vannak összefüggésben, mivel mind a négy érték relatíve kicsi kereszttartó-merevséghez tartozik. A disszertációban bemutatott *88. ábra* jól mutatja, hogy a kritikus teherparaméter értéke a kereszttartó-merevség növelésével egy bizonyos tartományban gyorsan nő, majd a növekedés üteme jelentősen lassul, és egy bizonyos érték elérése után nem nő tovább, eléri az elméleti maximális értékét. A kiértékelés során azt tekintettem szükséges kereszttartó-merevségnek, amelyik kereszttartó alkalmazásával a kritikus teherparaméter értéke elérte a referencia modell által eredményül adott kritikus terhet. A *88. ábrán* bemutatott mintaszámítás alapján is látható, hogy a referenciamodellel számított kritikus teherparaméter értékében való kis változás a szükséges kereszttartó-merevségben jelentős különbséget tud okozni. Azonban ennek a változásnak a kritikus teherparaméterre való hatása jellemzően kicsi (néhány százalék). Ezzel magyarázható, hogy a kritikus teherparaméterben való 1-2% változás a szükséges kereszttartó-merevségben akár 50%-os, vagy még annál is nagyobb különbséget eredményezhet. Ismerve a numerikus számítások és a kiértékelés módjában lévő jelentős hibalehetőséget, nagy hangsúlyt fektettem a pontos numerikus számításokra, melyek a legtöbb vizsgált geometria esetén nagyon jó egyezést adtak a tisztán elméleti úton levezetett analitikus megoldással, melyet így megítélésem szerint helyesnek és a numerikus számításokkal kellően alátámasztottnak lehet elfogadni.

21. kérdés

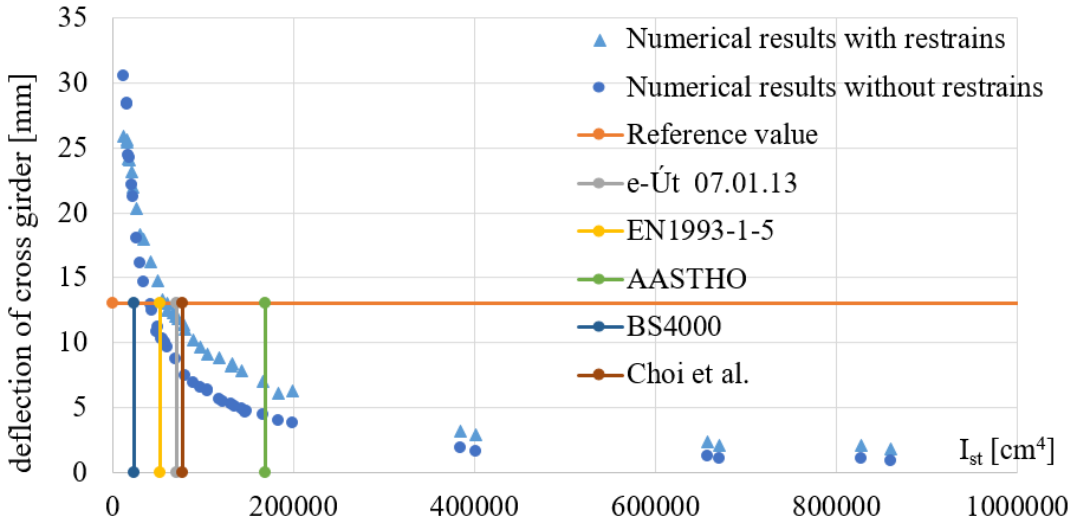
A bírálatban kérdezett, a 87. oldalon található mondat, miszerint „*Ennek megfelelően minden egyes geometria esetén meghatároztam a minimális kereszttartó inercianyomaték nagyságát a teherbírás értéke, valamint maximális deformáció alapján is.*” a következőt jelenti:

A numerikus modellel meghatároztam az ortotrop lemez horpadási ellenállását különböző kereszttartóméretek alkalmazásával, valamint a kereszttartó közepén kialakuló lemezsíkra merőleges elmozdulások értékeit is kiértékeltem a teherbíráshoz tartozó teherszinten. Az imperfekt numerikus modellel meghatározott ellenállásra vonatkozik a hivatkozott *teherbírás értéke* kifejezés. Az így meghatározott teherbírásértékeket a kritikus feszültséghez hasonló módon elemeztem a kereszttartó-merevség függvényében, melynek eredményeként a doktori műben bemutatott *88. ábrával* azonos jellegű diagramokat kaptam, csak a függőleges tengelyen a teherbírásértékek szerepeltek. Ezen diagramok kiértékelésével határoztam meg a szükséges minimális kereszttartó-merevség értékét a teherbírási határállapotra vonatkozóan.

A doktori műben terjedelmi korlátok miatt nem volt lehetőségem a kiértékelést reprezentáló ábrák bemutatására, melyek biztosan javították volna a számítási eredményeim érthetőségét.

22. kérdés

A valós viselkedést jól követő numerikus modell eredményeit a szabványos deformációs kritériumhoz való hasonlítás kapcsán a következőt tudom mondani. A valós, pontos szerkezeti viselkedést ellenőrző teherbírási kiértékeléshez hasonló elemzést végeztem el a kereszttartó középső keresztmetszetében számított, lemezsíkra merőleges elmozdulások értékére is, melyre egy példát a *10. ábra* mutat be. Az ábrán látható, hogy a kereszttartó-merevség növelésével a kereszttartók maximális elmozdulása jelentősen csökken. A maximálisam megengedett másodrendű alakváltozások korlátjaként min(b/300, a/300) értékű limitet alkalmaztam, melyből a szükséges kereszttartó-merevség minden vizsgált geometria esetén meghatározható volt.



10. ábra: Maximális deformáció a kereszttartó-merevség értékének függvényében teherbírási határállapotban.

A deformáció felső határának meghatározására először a szabványban megadott min(b/300, a/300) határértéket alkalmaztam, melyben egyetértek a Bírálóval, hogy egy önkényesen felvett határérték. Azonban a vizsgálataim kiindulásakor nem állt rendelkezésemre más, elméletileg jobban megalapozott határérték. A sok ezer számítás elvégzése után be lehetett azonban kalibrálni, hogy milyen elmozdulási határértékre lenne szükség az analitikus megoldásban ahhoz, hogy minden számítási eredmény a biztonság oldalán legyen. Ez a feltételrendszer adta az alapot a 92. oldalon az elmozdulási határérték módosítására.

A doktori műről alkotott átfogó véleményben köszönöm, hogy az általam végzett kiterjedt kísérleti, numerikus modellezési és méretezési kutatás értékelve lett. Köszönöm a téziseim új tudományos eredményként való elfogadását is. A tézisek szövegezésére vonatkozóan azt tudom mondani, hogy a végleges megfogalmazásban igyekeztem az általam elvégzett kutatás eredményeit, az új tudományos eredményeket általánosan összefoglalni, a kidolgozott új méretezési módszereket szövegesen megadni, valamint azok újdonságtartalmát pontosan definiálni.

Bízva abban, hogy a fentiekkel kellően megalapozott válaszokat sikerült adnom az opponensi véleményben feltett kérdésekre és megjegyzésekre, szeretném ismét megköszönni az alapos bírálatot.

Budapest, 2022. november 20.

Kövesdi Balázs

Dr. Kövesdi Balázs Géza