Válaszok Prof. Dr. Jármai Károly

„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:

2. fejezet: Trapézlemez-gerincű I-tartók hajlítási ellenállása

A bírálatban Professzor úr több fejezetet is érintő módon kérdezett rá az általam vizsgált jelenségek elemzéséhez alkalmazott numerikus modellek validációjára és verifikációjára. A kérdésre ennél a fejezetnél általánosan szeretnék válaszolni, mivel a későbbi fejezetekben alkalmazott numerikus modellek esetén is ugyanazt a stratégiát alkalmaztam.

A numerikus modell verifikációján a modell ellenőrzését értettem a matematikailag pontos megoldáshoz képest. A verifikáció célja tehát annak igazolása, hogy a matematikailag pontos megoldás kellően pontosan lett-e közelítve a numerikus modellben. Ennek megfelelően a verifikáció ellenőrzi a numerikus modell diszkretizációjának helyességét (pl. végeselem típus és hálósűrűség helyes alkalmazását), és igazolja a numerikus modell és a végeselemes számítás pontosságát a vizsgált paramétertartományban, a vizsgált tönkremeneteli mód esetén.

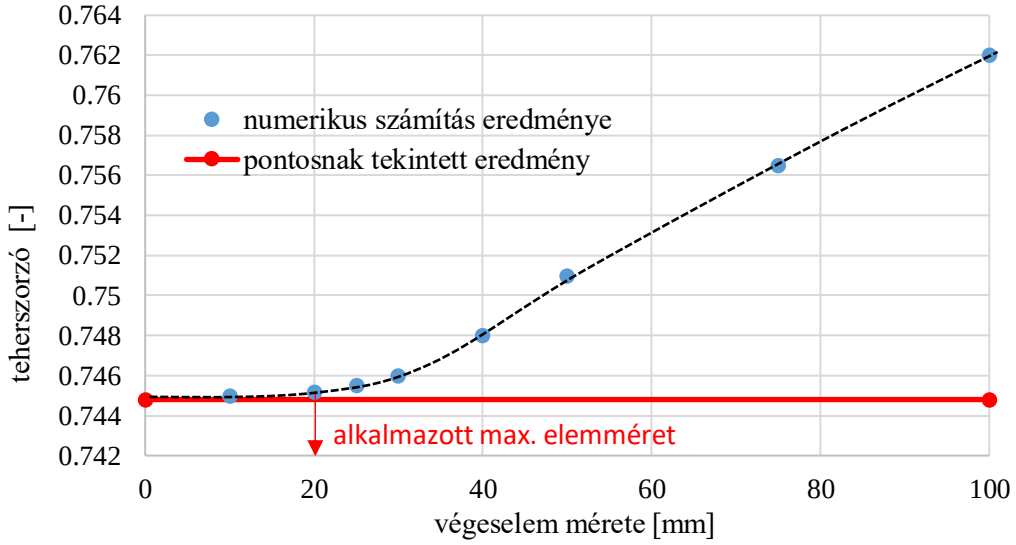
A numerikus modell validációján a modell alkalmazhatóságának és pontosságának ellenőrzését értettem a vizsgált fizikai jelenségekre vonatkozóan. A validálási folyamat célja annak meghatározása, hogy a numerikus modell képes-e megfelelően reprodukálni a vizsgált fizikai jelenséget. Ezért a numerikus modellt minden esetben úgy validáltam, hogy a számítási eredményeket összehasonlítottam kísérleti eredményekkel, igazolva ezzel, hogy a modell helyesen közelíti a modellezendő fizikai jelenséget, a vizsgált tönkremeneteli módot.

A verifikáció és validáció bizonyos esetekben részben vagy teljesen átfedheti egymást. Először mindig a numerikus modell pontosságát igazoltam verifikációval. A validáció általában a második lépés volt.

A különböző fejezetekben bemutatott, különböző tönkremeneteli módok és jelenségek vizsgálatára kidolgozott numerikus modelljeimet minden esetben külön-külön verifikáltam és validáltam. A verifikációt minden esetben a vizsgált mennyiség (feszültség; kritikus teher; teherbírás) szempontjából végeztem el, így egy numerikus modellt akár több különböző számítási mennyiség szempontjából is verifikáltam. Például a trapézlemez gerincű tartó esetén külön verifikáltam a numerikus modellt az övlemezben kialakuló feszültségeloszlás, majd a hajlítási teherbírás szempontjából. A hosszbordával merevített gerinclemezes tartó beroppanásvizsgálatához alkalmazott numerikus modellemet külön verifikáltam a kritikus erő, valamint a beroppanási ellenállás szempontjából, mivel mind a két mennyiségre vonatkozóan dolgoztam ki új méretezési eljárást. Ugyanígy a hajlított-nyírt gerinclemezes tartó esetén a verifikációt elvégeztem a hajlítási, majd a nyírási ellenállás meghatározására vonatkozóan is. A numerikus modell validációját minden esetben saját, vagy szakirodalmi kísérletek eredményei alapján végeztem el, a kísérleti és a numerikus eredmények összehasonlítása révén.

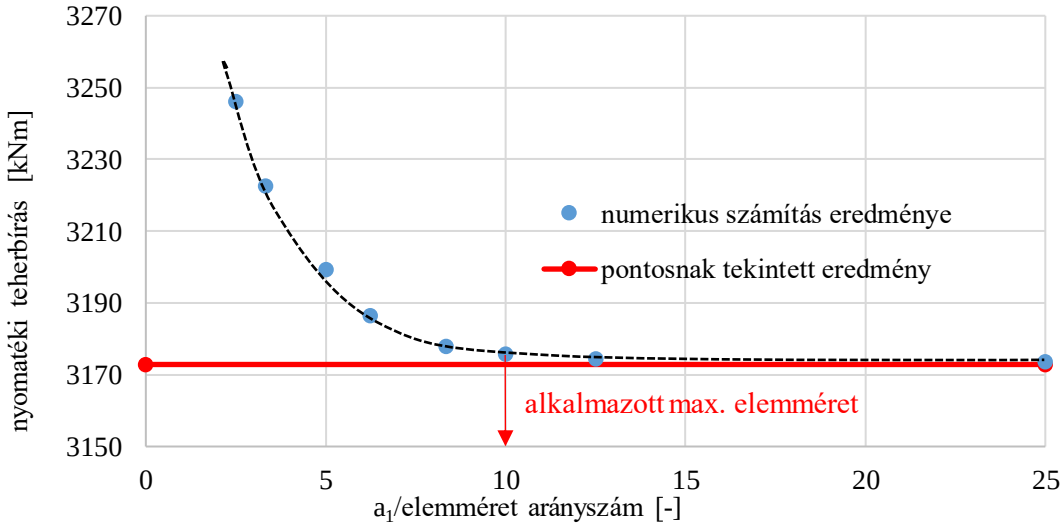
A bírálatban kért numerikus modell verifikációt egy esetben szeretném itt bemutatni, a trapézlemez gerincű tartó hajlítási ellenállásának meghatározására vonatkozóan. Az *1-2. ábrák*

a numerikus modellben meghatározott teherbírást mutatják be az alkalmazott elemméret függvényében. Az *1. ábra* vízszintes tengelyén a végeselemes modellben alkalmazott elemméret, a függőleges tengelyen a számítás végeredményeként kapott teherszorzó látható, ami a modellben alkalmazott teher tönkremenetelhez tartozó arányszáma. A vizsgálathoz h-típusú hálósűrítést alkalmaztam. Az eredményeken látható, hogy a végeselemes háló méretének csökkentésével a számított teherbírás csökken és egy határértékhez tart. Ezt a határértéket tekintjük a pontos megoldásnak. Az adott példa esetén 20 mm-es végeselemes háló alkalmazásával ezt a pontosnak tekintett megoldást 0,1% pontossággal tudjuk közelíteni a numerikus modellel.



1. ábra: Numerikus modell verifikációja – elemméret / teherszorzó összefüggés.

Az így meghatározott, kellően sűrű és kellően pontos megoldást eredményező végeselemes hálóméret azonban jellemzően függ a trapézlemezgerincű tartó geometriai jellemzőitől. Ezért a minimálisan alkalmazandó hálóméretet az a_1 lemezmezőszélesség arányában határoztam meg. Az ennek megfelelő kiértékelést a *2. ábra* mutatja be.



2. ábra: Numerikus modell verifikációja – elemméret / nyomatéki teherbírás összefüggés.

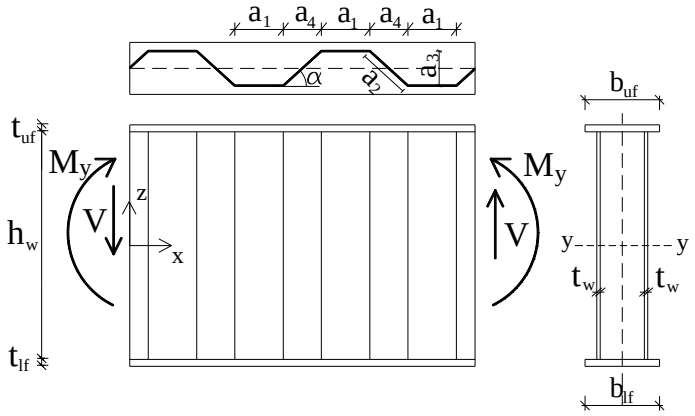
Látható, hogy az a_1 értékének 10%-ára felvett végeselem mérettel rendelkező numerikus modell 0,1% hibával adja meg a nyomatéki teherbírás értékét. Ezt a hálóméretet kellően pontosnak ítéltem meg, és ezt alkalmaztam a numerikus paramétervizsgálataim végrehajtásához. Nem ennyire pontos leírást, csak a numerikus verifikáció végeredményének összefoglalását a [KB1] cikk 4.1 fejezetében publikáltam.

Professzor úr megkérdezte, hogy milyen mértékben alkalmazható az általam kidolgozott méretezési módszer nagyszilárdságú acélok esetén. A laboratóriumi vizsgálatok és a numerikus szimulációk során is a trapézlemez gerincű tartók vizsgálatánál valóban szinte kizárólag S355-ös acél anyagminőséget vizsgáltam, így szigorúan véve a tudományos eredményeim erre a szilárdsági osztályra vonatkoznak. Ugyanakkor a keresztirányú hajlítónyomaték meghatározására kidolgozott képlet, mely a keresztirányú hajlítónyomaték fizikailag lehetséges maximális értékét adja meg, független az alkalmazott acélanyag szilárdsági osztályától, így ezen képlet szilárdsági osztálytól függetlenül alkalmazható. A trapézlemez gerincű tartók hajlítási ellenállására vonatkozó eredményeim elméletileg függenek az acélanyag szilárdsági osztályától. Ebben a témában a legfontosabb új tudományos eredményemnek azt tekintem, hogy igazoltam a keresztirányú hajlítónyomaték érdemben nem csökkenti a trapézlemez gerincű tartók hajlítási ellenállását, azt az övlemezek által alkotott keresztmetszet hajlítási ellenállásából lehet meghatározni. Hasonló módon, ahogy a hajlítási ellenállás képlete is hagyományos síklemez gerincű tartók esetén független a szilárdsági osztálytól, úgy ez a képlet is a normálszilárdságú acélok esetén (S235 – S460 szilárdsági osztály tartományban, mely acél anyagok határozott folyási platóval rendelkeznek) megítélésem szerint független kell legyen a szilárdsági osztálytól. Olyan nagyszilárdságú acélanyagok esetén, melyeknek nincs határozott folyási platója (S500 - S960 szilárdsági osztályú acélanyagok) a méretezési eljárás csak kiegészítő kutatási eredmények után lehet alkalmazható.

A bírálatban a kidolgozott méretezési eljárás alkalmazhatósági tartományára vonatkozó kérdésre a következő választ adom. A trapézlemez gerincű tartók feszültségeloszlás vizsgálatához és a hajlítási ellenállás meghatározásának vizsgálatához először összegyűjtöttem a szakirodalomban elérhető trapézlemez és szinuszhullám gerincű tartók jellemző paramétereit. Az általam készített adatbázis tartalmazott korábbi laboratóriumi vizsgálatok során alkalmazott kísérleti próbatestek geometriai jellemzőit, numerikus vizsgálatokban alkalmazott és dokumentált gerendák geometriai jellemzőit, megépült trapézlemez gerincű hidak geometriai méreteit, valamint acélgyártók katalógusában megadott, rendelhető hullámgerincű tartók méreteit is. A teljes adatbázis közel 2000 geometriai konfigurációt tartalmazott, melyet elemezve határoztam meg azt a paramétertartományt, melyre a kísérleti és numerikus vizsgálatokat elvégeztem. A hajlítási ellenállás meghatározásához és a tézis kimondásához a következő jellemző paramétertartományt vizsgáltam:

- h_w 300 – 2500 mm,
- t_w 1.5 – 10 mm,
- b_f 150 – 450 mm,
- t_f 12 – 50 mm,
- h_w/t_w 100 – 500 mm,
- a_1 150 – 450 mm,
- $a_1=a_2$,
- α 10° – 60°

mely lefedi a gyakorlatban alkalmazott, általam ismert trapézlemez gerincű tartók jellemző alkalmazási tartományát. A jelölésrendszer megegyezik a disszertációban is alkalmazott jelölésekkel, melyet a *3. ábra* mutat be.



3. ábra: Trapézlemez-gerincű tartó esetén alkalmazott jelölésrendszer.

3. fejezet: Hosszbordával merevített gerendák beroppanási ellenállása

Köszönöm Professzor úr helyettesítő geometriai imperfekcióra vonatkozó megjegyzését, és azt is, hogy a numerikus szimulációk esetére javasolt $b_i/200$ értékű imperfekció alkalmazhatóságát jónak ítélte meg. A kérdésben megjelölt alkalmazhatósági tartományra és az érték érvényességére vonatkozóan a következőt tudom mondani. A szükséges helyettesítő geometriai imperfekció értékét saját kísérletek és numerikus szimulációk alapján határoztam meg. A kísérleti adatbázisom gazdasági okok miatt limitált volt, ugyanakkor a numerikus számítások kísérleti eredményekkel való összehasonlítása megítélésem szerint meggyőzően mutatta, hogy a lemezekre kidogozott helyettesítő geometriai imperfekció amplitúdó ($b_i/200$) értéke a beroppanási ellenállás meghatározására is a biztonság oldalán alkalmazható normálszilárdságú acélok esetén. Az alkalmazhatóság fontos korlátja azonban, hogy a tönkremeneteli módnak a terhelt övlemez és a merevítőborda közötti lokális horpadási tönkremenetelnek kell lennie, mivel a vizsgálataim kizárólag erre a tönkremeneteli módra vonatkoznak. A disszertáció *30. ábráján* bemutatott globális, vagy interakciós tönkremenetel esetén a helyettesítő geometriai imperfekció értéke további vizsgálatokat igényel, erre azonban nem vonatkozik az új tudományos eredményem.

A hálóérzékenység-vizsgálatot a disszertáció *38. ábrája* 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. Ebben az esetben is a hálóméret csökkentésével a beroppanási ellenállás értéke egy bizonyos értékhez tart, melyet a pontos megoldásnak tekinthetünk. Ennek a pontosnak tekintett értéknek a maximum 1%-os hibával való meghatározását tekintettem a maximálisan alkalmazható végeselem méretnek a numerikus modellben.

A beroppanási ellenállásra kidolgozott méretezési eljárást S355 szilárdsági osztályú acélanyag esetén vizsgáltam, és erre vonatkozóan dolgoztam ki a méretezési eljárást, mivel a legtöbb hídépítési acélszerkezet ebből az acélanyagból készül. Ugyanakkor hasonlóan a trapézlemezgerincű tartók esetén leírtakhoz, megítélésem szerint a méretezési képlet

normálszilárdságú acélanyagok esetén (S235 – S460 szilárdsági osztályok esetén) alkalmazható lehet változtatás nélkül, ennek pontos bizonyítására azonban további vizsgálatok szükségesek.

4. fejezet: Gerinclemezes I-tartók interakciós viselkedése

Az új méretezési eljárások alkalmazhatósági tartományára vonatkozó bírálói kérdésre az alábbiakban válaszolok. A gerinclemezes tartók interakciós viselkedését a következő paramétertartományokban vizsgáltam: (i) az M-V interakciós képlet kidolgozására az *1. táblázatban* megadott paramétertartományt elemeztem, (ii) az M-V-F interakciós viselkedésre vonatkozóan a *2. táblázatban* megadott értékeket vettem figyelembe. A jelölésrendszert a *4. ábra* szemlélteti.

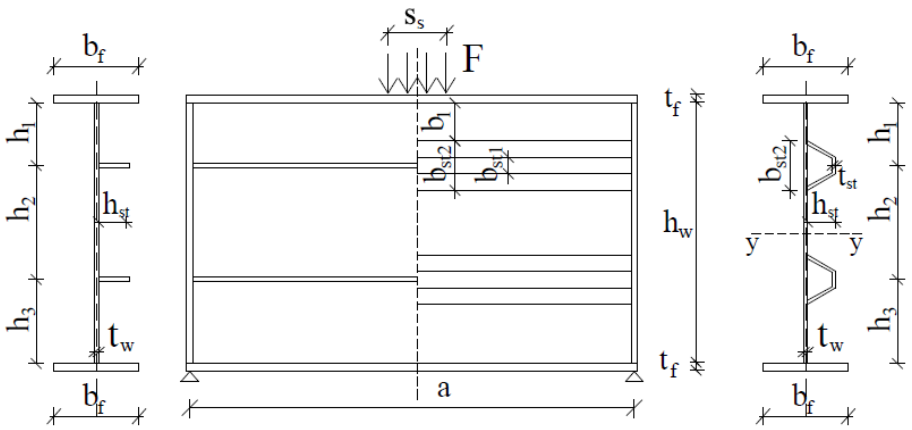
1. táblázat: Vizsgált paramétertartomány – M-V interakciós viselkedés.

	merevítettlen gerinc	merevített gerinclemez
h_w	300 – 1500 mm	1000–3000 mm
t_w	4 – 16 mm	3–14 mm
b_f	200 – 450 mm	200–550 mm
t_f	12 – 40 mm	10–50 mm
$h_{w,i}/t_w$	50 – 200	50–200
b_f/t_f	7.5 – 22.5	7.5–22.5
α	1.5 – 2.0	1.5–2.0
A_f/A_w	0.22 – 3.00	0.22–6.11
γ		23–8000 (zártbordák esetén)
		11–2300 (nyitott bordák esetén)

2. táblázat: Vizsgált paramétertartomány – M-V-F interakciós viselkedés.

h_w	300 – 1200 mm
t_w	4 – 6 mm
b_f	200 – 450 mm
t_f	12 – 20 mm
s_s	200 – 600 mm

A vizsgálataim során az öv- és a gerinclemezek méretein kívül a hosszbordák számát és geometriáját is változtattam. Zárt és nyitott keresztmetszetű hosszbordákat is vizsgáltam, mivel ezek lényegesen eltérő szerkezeti viselkedést mutatnak, ami a hosszbordák különböző csavarási merevségével magyarázható. A hosszbordák számát 2-re, vagy 3-ra vettem fel, mert az Eurocode alapú ellenállási modell eltérő méretezési képleteket ad az 1-2 és a 3 vagy több hosszbordával rendelkező tartók esetén. Mindkét kialakítást külön-külön elemeztem, és a számítási eredményeket külön értékeltem.



4. ábra: Interakciós viselkedés esetén alkalmazott jelölésrendszer.

Észrevehető, hogy az M-V-F interakciós viselkedést lényegesen kisebb paramétertartományban, kevesebb paraméterváltoztatással vizsgáltam, mint az M-V interakciós képletet, melyet én fejlesztettem ki. Ennek oka, hogy egyrészt az M-V-F interakció vizsgálatára egy adott geometriai konfigurációhoz lényegesen nagyobb számú igénybevétel-kombináció tartozott, mint az M-V interakció vizsgálatához, valamint az M-V-F interakciós vizsgálataim során Braun korábbi numerikus számítási eredményeit is felhasználtam a konklúzió megfogalmazásakor.

Az eredményeim itt is S355 szilárdsági osztályú acélanyagra vonatkoznak. Megítélésem szerint a korábbiakhoz hasonlóan az S235 – S460 tartományban az eredmények azonos módon alkalmazhatók lehetnek, ezt azonban további vizsgálatokkal lenne szükséges bizonyítani.

5. fejezet: Közvetlen teherrel nem terhelt keresztartók méretezése

Professzor úr megkérdezte, hogy a közvetlen teherrel nem terhelt keresztartók méretezése esetén a szükséges minimális méretek meghatározása esetén a csavarási merevség szerepe teljesen elhanyagolható-e? Megítélésem szerint szerencsésebb megfogalmazás az, hogy a keresztartó csavarási merevségére vonatkozóan nem szükséges további kiegészítő, csavarómerevségre vonatkozó feltétel ellenőrzése, amennyiben (i) a közvetlen teherrel nem terhelt keresztartók kielégítik az általam vizsgált méretezési eljárásban megadott támaszmerevségi (hajlítómerevségi) és szilárdsági kritériumot, továbbá (ii) a hosszbordákkal merevített lemez, amit a keresztartók megtámasztanak, csuklós-csuklós mechanikai modellel kerül méretezésre. Fontos, hogy mindkét feltételnek teljesülnie kell ahhoz, hogy a csavarási kritérium ellenőrzése elhagyható legyen.

Ez a megállapítás alapvetően abból származik, hogy a hosszbordákkal merevített lemez horpadásvizsgálata csuklós-csuklós mechanikai modellel kerül ellenőrzésre, ahol nem számítunk a támaszként szolgáló keresztartók befogási hatására. Az általam kidolgozott, keresztartóra vonatkozó merevségi és szilárdsági minimumkövetelmény tehát ebből a feltételezésből indult ki és elhanyagolja a keresztartók csavarómerevségét. Természetesen, amennyiben olyan pontosított eljárást alkalmaznánk a merevített lemezmező méretezésére, ami figyelembe veszi a keresztartók csavarómerevségét is (pl. kritikus feszültség meghatározásában ezt figyelembe vesszük), akkor a csavarómerevségre vonatkozó minimumfeltételt is kellene vizsgálni.

A disszertáció *89. ábráján* látható a numerikus modellből meghatározott kritikus feszültség és folyáshatár aránya a kereszttartó θ paraméterének függvényében egy vizsgált hosszbordával merevített lemez geometria esetén. A különböző pontokkal jelölt számítási eredmények a diagramon különböző kereszttartóméretttel végzett számításokhoz tartoznak. A számítási eredmények jelentős szórása azt mutatja, hogy a θ paraméter növelésével a hosszbordával merevített lemez kritikus teherparaméterének értéke nem nő, illetve nem tart egy határértékhez, mint ahogyan azt várnánk egy merevségi paraméter növelésének hatására. A disszertáció *89. ábráján* bemutatott pontfelhőnek a *88. ábrán* bemutatottal azonos tendenciát kellene mutatnia, amennyiben a θ paraméter megfelelő jelzőszám lenne a minimális kereszttartó-merevség meghatározásához. Hasonló eredményt kaptam az I_t/I_p arányszámmal való összehasonlítás esetén is, de ezt nem tettem be a disszertációba a terjedelmi korlátok betartása érdekében. Ezek az eredmények vezettek arra a következtetésre, hogy a csavarási jelzőszámok ellenőrzésének elhanyagolásával is lehet garantálni a szükséges minimális kereszttartó-merevséget.

A doktori mű *92 - 93. ábráin* bemutatott számítási eredmények szórásának több oka is van. Ezek közül az egyik és legfontosabb, hogy az általam kidolgozott támaszmerevségi kritérium alapvetően a kritikus feszültségek határértéke alapján kidolgozott méretezési képlet, mely a kritikus feszültségek szintjén nagy pontossággal megegyezik a numerikus modell által adott eredményekkel. Ugyanakkor a merevségi kritérium csak a hosszbordák stabilitásvesztésének elkerülésére, a kellő megtámasztó hatás biztosításának szempontjából fontos, viszont nem ellenőrzi a kereszttartót az őt terhelő igénybevételekre. Ezért lehet az, hogy a merevségi kritérium teherbírás szintjén való alkalmazása lényegesen nagyobb szórással adja meg a minimális kereszttartó-merevség értékét, és a jelenség természetéből adódóan lesznek eredmények, melyek a biztonság kárán vannak, melyet a disszertációban a *92.a) ábra* mutat. Ez az eredmény mutatott rá, hogy a támaszmerevségi követelmény ellenőrzése önmagában nem elegendő, szilárdsági kritériummal együtt alkalmazandó, melyre vonatkozó mechanikai modell már rendelkezésemre állt a szakirodalomban és az EN 1993-1-5 szabványban is. A két követelményrendszert dolgoztam össze olyan módon, hogy a méretezési eljárás el tudja dönteni, hogy az adott geometriai kialakítás esetén melyik követelmény ellenőrzése szükséges, melyik eredményezi a nagyobb kereszttartóméreteket, és azt alkalmazva biztosítja a biztonság oldalán lévő megoldást. Ugyanakkor a kombinált méretezési módszer tartalmazza a támaszmerevségi és a szilárdsági kritérium meghatározási módjában rejlő szórásokat, ami a *93. ábrán* látható pontfelhőt eredményezi.

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