



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
ÉPÍTŐMÉRNÖKI KAR
Tudományos Diákköri Konferencia 2023

Öszvér rácsos tartók nyírt kapcsolatainak numerikus vizsgálata

.....
Készítette:

Rozgonyi Dániel,

szerkezet-építőmérnök mesterszakos hallgató

Konzulens:

Dr. Kovács Nauzika,

egyetemi docens, Hidak és Szerkezetek Tanszék

2023. október 31.

Tartalomjegyzék

Absztrakt	III
Abstract.....	IV
I. Bevezetés	1
II. Előkészítő tanulmány	1
II.1 Szakirodalmi áttekintés	1
II.1.1 Az öszvér rácsos födémekről általában	2
II.1.2 A csapok helyzete	4
II.1.3 A nyíró és húzó igénybevétel interakciója a csapokban	6
II.1.4 A beton önálló nyomott elemként	8
II.2 Korábbi kutatási eredményeim.....	10
II.2.1 Rácstopológia hatásának vizsgálata	10
II.2.2 Részleges kapcsolatok vizsgálata.....	12
II.3 Problémafelvetés és célkitűzés.....	14
III. A vizsgálat leírása	15
III.1 A vizsgálati modelljének leírása.....	15
III.1.1 Statikai váz és megtámasztási modell.....	15
III.1.2 Anyagmodellek	17
III.1.3 Tehermodell.....	19
III.1.4 Állandó és változó paraméterek.....	19
III.2 A vizsgálati modell végelemek implementálása	20
III.2.1 Geometria.....	20
III.2.2 Az anyagok definiálása.....	21
III.2.3 Felületi kapcsolati modellek.....	22
III.2.4 Végelem-háló.....	24
III.2.5 Terhek és támaszkényszerek.....	25

III.4 Validáció és verifikáció.....	27
III.4.1 Validáció	28
III.4.2 Verifikáció	31
IV. Eredmények	34
IV.2 Globális viselkedés	34
IV.2 Lokális jelenségek.....	39
IV.2.1 A laposacél felső öv kihajlása	39
IV.2.2 A csapok feszültségállapotának globális vonatkozásai	40
V. Összefoglalás, konklúzió és továbblépési lehetőségek	46
VI. Ábra- és táblázatjegyzék.....	48
VII. Irodalomjegyzék.....	50
VIII. Képforrások.....	52

Absztrakt

Az öszvérszerkezetek alkalmazásának nagyon sok gyakorlati mechanikai előnye ismert, azonban bizonyos szerkezeti kialakítások (öszvér rácsos tartók, korszerű nyírt kapcsolóelemek stb.) esetén a szabványos tervezési folyamat megalkotása még csak kezdeti fázisban van. TDK-dolgozatom a későbbi méretezési előírások megalkotásában nagy szerepe játszhat: az öszvér rácsos tartók viselkedésének vizsgálatáról szóló kutatássorozatomból következő szegmenseként a részleges nyírt kapcsolatok gazdaságosabb és előnyösebb alkalmazását helyezi új megvilágításba.

Korábbi vizsgálataim [1] konklúziójaként megállapítottam, hogy e szerkezetek esetében egy önmagában kisebb szelvényű acél felső öv esetén a csapozásnak jelentős hatása van: a vizsgált csapszám-tartományon a végső teherbírás 40%-át jelenti. Az Eurocode hajlított gerendák esetén előírt egyenletes csapkiosztását rácsos tartók esetén úgy módosítottam, hogy a húzott rácsrudak felett kettősével, valamint hármassával tömbösítettem a nyírt kapcsolóelemeket. A vizsgált tartományon e változtatásnak köszönhetően jelentősen nőtt az öszvér rácsos tartó teherbírása: kevesebb csap is elegendő a keresztmetszet kialakításából fakadó képlékeny teherbírás eléréséhez.

A teljes szerkezetre vonatkozó vizsgálataimat végelemes modellen végeztem el: a megoldás hitelességének és valódiságának biztosítása érdekében a globális mechanikai jellemzőket befolyásoló legfontosabb modell-elemek (beton és fejes csap kapcsolata, valamint anyagmodellek) viselkedését lokális modelleken, valós kísérletekkel validáltam. A globális teherbírást analitikus képletek alapján ellenőriztem, míg a numerikus vizsgálat kellő pontosságát hálózékekenység-vizsgálattal garantáltam.

Az eredmények rámutatnak arra, hogy az acél felső öv alkalmazása megfelelő csapkiosztás esetén a tartó hosszának döntő részében elhanyagolható, hiszen a vasbeton lemezt így sokkal jobban ki tudjuk használni tisztán nyomott felső övként. A nyomott acélszelvényt érintő anyagmegtakarítás pedig megtehető úgy, hogy a teherbírás és a merevség ne csökkenjen, ezáltal gazdaságosabb, hatékonyabban működő nagyfeszítávú födémszerkezetet konstruálható.

Abstract

Many practical mechanical advantages of using steel-concrete composite structures are well known, but for certain structural designs (composite trusses, modern shear connections, etc.) the standard design process is still in its initial stages. My thesis could play a major role in the development of future design specifications: the next segment of my research series on the behaviour of steel-concrete trusses will shed new light on the more economical and advantageous use of partial shear connections.

As a conclusion of my previous investigations [1], I have found that for these structures, in the case of a steel top chord with an intrinsically smaller section, shear connection has a significant effect: it represents 40% of the ultimate load capacity over the range of number of headed studs tested. I have modified the uniform stud assignment required by Eurocode for bended beams in the case of trusses by blocking the shear connection above the tensioned truss bars grouped by two or three studs a row. Thanks to this modification, the load capacity of the composite truss has been significantly increased over the tested range: fewer studs are sufficient to achieve the plastic load capacity resulting from the cross-sectional design.

My investigations on the whole structure were carried out on a finite element model, so to ensure the validity and realism of the solution, I validated the behaviour of the most important model elements (concrete and headed stud interaction and material models) influencing the global mechanical characteristics on a local model by real experiments. The global load-carrying capacity was verified by analytical formulae, while the accuracy of the numerical analysis was guaranteed by mesh sensitivity tests.

The results show that the use of a steel top chord can be neglected for the majority of the girder length if the stud allocation is correct, since the reinforced concrete slab can be much better used as a purely compressed top flange. And the material savings in the pressed steel section can be achieved without reducing the load capacity and stiffness, thus allowing a more economical and efficient large span slab structure to be constructed.

I. Bevezetés

A 2023. évi Tudományos Diákköri Konferenciára nevezett dolgozatomban a 2022-ben megkezdett, öszvér rácsos tartók témakörében végzett kutatásom következő fejezetét ismertetem. E kutatási program keretében először a rács-topológia ideális kialakítását [2], majd a részlegesen nyírt kapcsolattal kialakított szerkezetek viselkedését [1] tanulmányoztam.

Az utóbbi tekinthető e dolgozat közvetlen logikai előzményének, hiszen megállapítottam, hogy gyengébb (egyszerű laposacél) felső öv esetén a húzott rácsrudak miatt a kapcsolóelemek jelentős húzásnak vannak kitéve. E lokális probléma orvoslására született meg megoldási javaslatként a tömbösített fejes csapok módszerének gondolata.

Kutatási programom, valamint dolgozatom általánosan megfogalmazható célkitűzése, hogy az öszvér rácsos födémeket, az egyszerűen kivitelezhető, nagy fesztávú vízszintes teherhordó szerkezetek egyik zászlóshajóját még hatékonyabban, anyagtakarékosabban tudjuk tervezni és megépíteni. Ezt korábbi lépésként a nyírt kapcsolatok hangsúlyozása nyomán azonos csapszám mellett számottevően kisebb felső öv alkalmazásán keresztül értem el, míg most a tömbösített elhelyezéssel kevesebb kapcsolóelem alkalmazhatóságát vizsgálom.

II. Előkészítő tanulmány

Rácsos tartók esetében alkalmazott, tömbösített csapkiosztásra vonatkozó, nyilvánosan elérhető kutatást nem találtam. A tudomány jelenlegi állását (state-of-art) bemutatni hivatott előkészítő tanulmányomban a tömbösítő elhelyezett fejes csapok általános viselkedését körüljáró kutatások, az öszvér rácsos tartók, mint globális egység viselkedését leíró tanulmányok mellett a dolgozatomat megelőző és megalapozó saját kutatásaimat ismertetem.

II.1 Szakirodalmi áttekintés

Az öszvérszerkezetek a tartószerkezeti tudományterület egyik legdinamikusabban és legsűrűbben kutatott szekciójává vált. Az innovatív és nagyfesztáv áthidalására alkalmas globális szerkezeti kialakítás (például az öszvér rácsos tartó) mellett a lokális megoldások is hangsúlyos szerepet kapnak.

E tanulmányban értelemszerűen az előbbire összpontosítok, hiszen a nyírt kapcsolóelemek szakaszos geometriai kiosztás esetén tapasztalható viselkedésének vizsgálatára és megértésére a tömbösített fejes csapok alkalmazása tökéletesen megfelelő. További előnye ennek a módszernek, hogy a rendelkezésre álló analitikus méretezési képletekkel, valamint korábbi kutatásaimmal egyértelműen összevethető az eredmény.

A tanulmány e szakaszában a dolgozatom szempontjából releváns nemzetközi tudományos cikkeket szemlélzem. A kutatás közvetlen előképeként és alapköveként szolgáló *korábbi munkáimat* [1][2] ezektől elkülönítve, a *II.2 pontban* ismertetem. Ennek az az oka, hogy az öszvér rácsos tartók témakörében elért eredményeim, valamint jelenlegi és jövőbeni terveim egy jól konstruált ívet követnek, ezért az előzmények sokkal részletesebb bemutatást igényelnek.

A szakirodalmi áttekintést az egyes források témájának megfelelően tagolom. Azokban a témákban kerestem cikkeket, amelyek az öszvérszerkezetű rácsos tartók témakörén belül is olyan aspektusokat világítanak meg, amelyek a modell megváltozásával akár esetemben is könnyen realizálódhatnak. Ilyen téma például a csapok egyidejű húzása és nyírása, vagy a nyomott elem kizárólag betonból történő kialakítása.

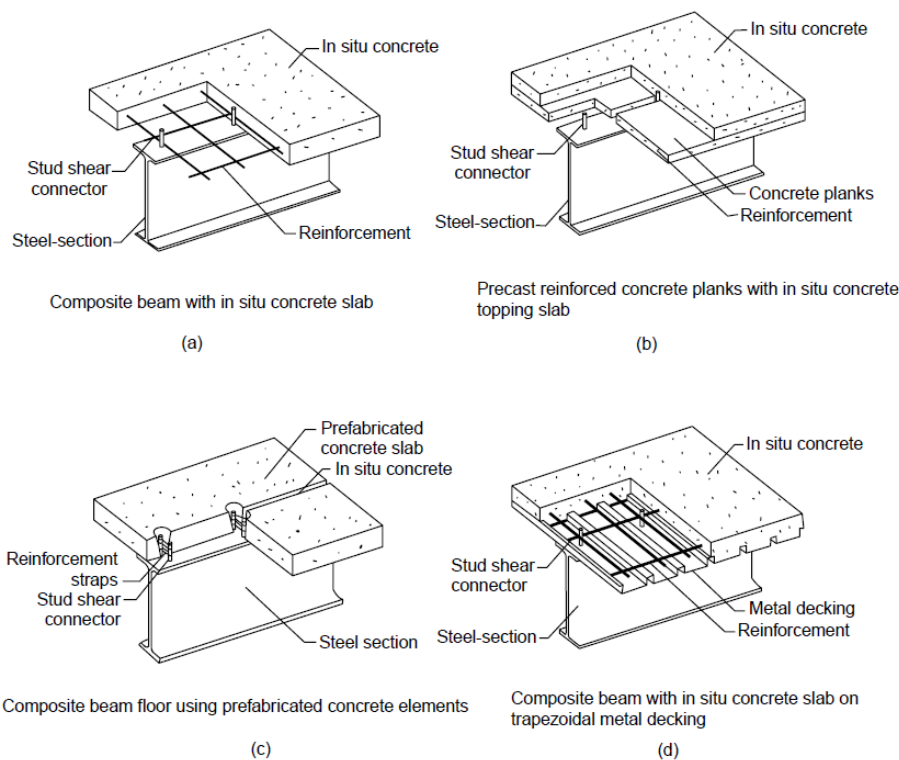
II.1.1 Az öszvér rácsos födémekről általában

Az öszvérszerkezeteket az építőmérnöki szakterületen jártas olvasónak nem kell bemutatni. A szerkezet típus nagyszerűsége leginkább abban rejlik, hogy az acél és a beton előnyösebb tulajdonságai ellensúlyozzák a másik anyag kedvezőtlen tulajdonságait. Az *Építőmérnöki kézikönyv (The Civil Engineering Handbook)* [3] a kedvező erőtani jellemzők mellett a tisztán vasbetonszerkezetű födémekhez viszonyított 20–40%-os szerkezeti tömegmegtakarítást becsül. Ez természetesen jelentősen csökkenti a többi elemre jutó terhelést, tehát például redukálni lehet a függőleges tartószerkezeteket, valamint az alapozás paramétereit is.

Az előző bekezdésben részletezett előnyök a két egység között biztosított megfelelő együttműködés esetén valósulnak meg igazán. A hajlított szerkezetek esetében az acél és a beton határfelületén fellépő csúsztatóerőt kell felvenni

ahhoz, hogy a keresztmetszet ideális inhomogén szelvényként viselhesse a nyomatóki igénybevételt.

A kapcsolat kialakítására számtalan módszert alkalmazhatunk: a keresztben felhegesztett U-profiltól kezdve az 1. ábrán bemutatott fejes csapokon át az innovatív perfobond kapcsolóelemekig minden elképzelhető. A rácsos tartók esetében a húzott rácsrudak hatására az acél felső öv kialakításának függvényében kisebb vagy nagyobb mértékű húzófeszültség indukálódik a nyírt elemekben – jelentősen nagyobb, mint egy gerinclemezes öszvérgerenda esetében.



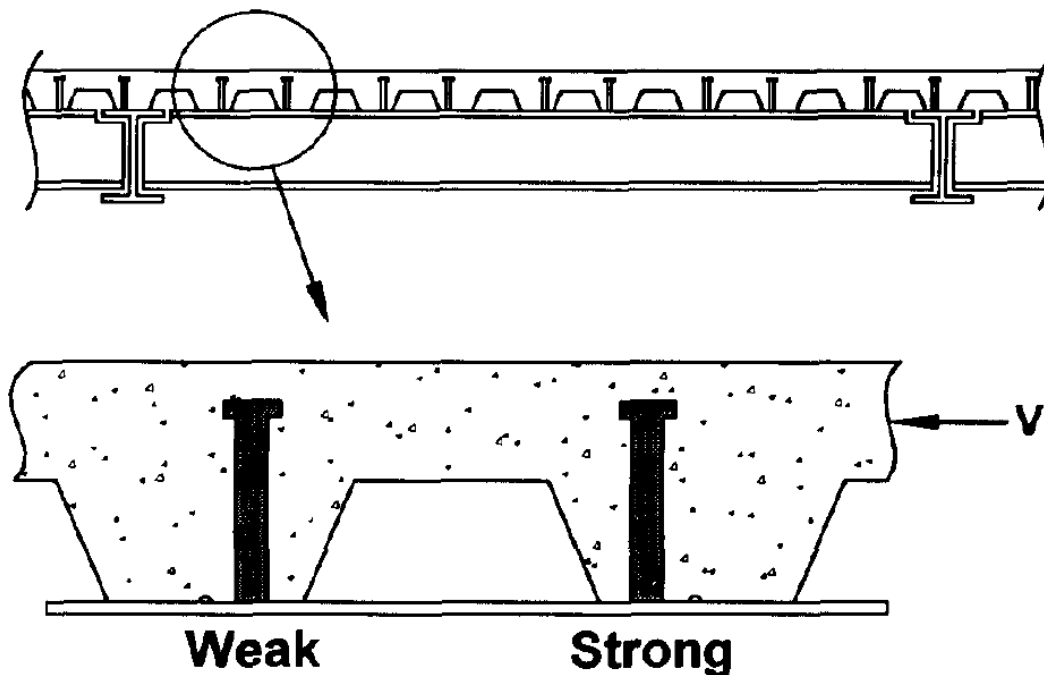
1. ábra: az öszvérszerkezetek fejes csapos kapcsolatainak kialakítási lehetőségei [3]

Az öszvérrácsok kutatásának újszerűségét mi sem bizonyítja jobban, mint a tény, hogy az *említett kézikönyvet* [3] 2003-ban adták ki, az öszvérszerkezetekkel foglalkozó 51. fejezet 62 oldalából pedig kevesebb, mint egy foglalkozik az acél elem rácsos kialakításával. A szerkeztípussal kapcsolatos ismeretanyagunk nagy része tehát az elmúlt 20 évben született.

Az öszvér rácsos tartók általános szerkezeti bemutatását ezzel lezárom, a következő fejezetekben az egyes lokális és globális jelenségekkel kapcsolatos cikkeket foglalom össze. A témával kapcsolatban az interneten számos további forrás áll az érdeklődők rendelkezésére.

II.1.2 A csapok helyzete

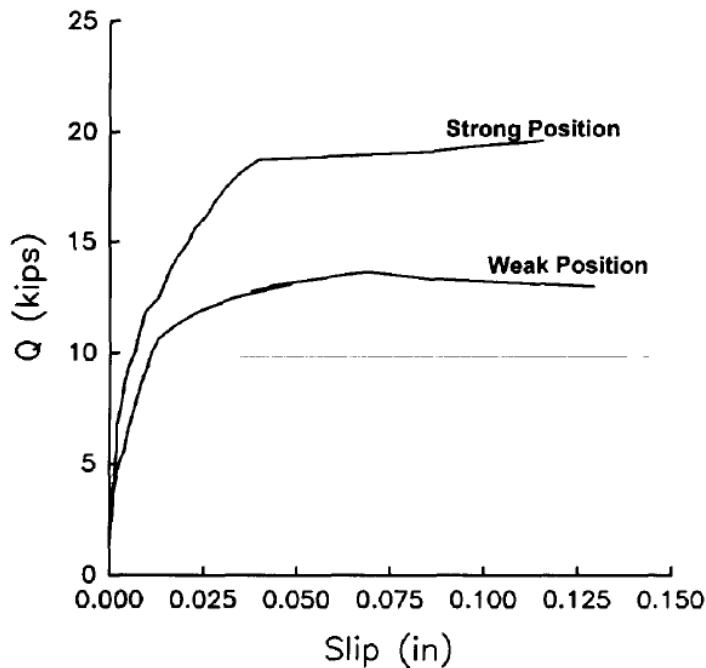
A bevezető és az absztraktok ismeretében nehéz volna tagadni, hogy a dolgozat tematikája a csapok „alaprajzi” elhelyezésének hatásai köré épül. Először úgy tűnhet, hogy ha nyírt kapcsolóelem geometriája és anyagminősége nem változik, akkor a teherbírása is állandó. Ez a gondolat azonban hibás: a csap ellenállása a lokális zavaró hatásoktól függően akár jelentősen is eltérhet két különböző pozíción, legyen ez az irregularitás mondjuk a profillemez hulláma, vagy öszvér rács esetében a koncentrált húzóerő. *Easterling, Gibbings és Murray* [4] 1993-ban kinyomó kísérletek segítségével jelentős különbséget fedezett fel a nyírási teherbírás tekintetében akkor, amikor állandó terhelés mellett a félhullám egyik vagy másik ferde síkjához helyezték közel ugyanazt a csapot. (2. ábra)



2. ábra: a fejes csap elhelyezésének „erős” és „gyenge” módja [4]

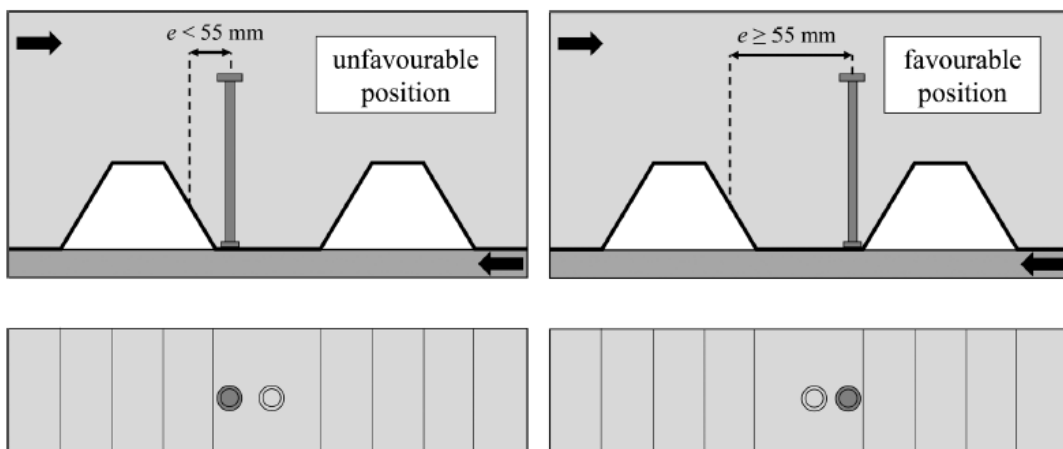
Az eredménygrafikonon nagyjából 33%-kal nagyobb teherbírás figyelhető meg az „erős” kialakítás javára. A különbség drasztikus, főleg, ha figyelembe vesszük, hogy a profillemez félhulláma acélgerendára támaszkodó felületének tengelyirányú mérete mindössze 12 centiméter (4.75”). A grafikont a 3. ábra szemlélteti.

Ez a kutatási eredmény tehát bebizonyította azt, hogy az eltérő geometriai viszonyok miatt a csap elhelyezése jelentősen befolyásolja a teherbírást.



3. ábra: kinyomókísérletek eredményei „erős” és „gyenge” elrendezés esetén [4]

Az eredményt később mások is felhasználták és kiegészítették. Konrad és társai [5] hasonló témakörben végeztek kutatást, szintén kinyomókísérletek segítségével vizsgálták a profillemez kialakításának függvényében a teherbírást. A kísérleti eredmények a „kedvezőtlen” pozíció alkalmazásakor számottevően kisebb értéket adtak, míg a központi, illetve „kedvező” esetekben minimális differencia alakult ki a nyírási ellenállás analitikus meghatározására használt képletekhez képest. A teherbírás szempontjából előnyös és előnytelen elhelyezkedéseket a 4. ábra szemlélteti. Ez természetesen analóg a 2. ábrán feltüntetett „erős” és „gyenge” esettel.

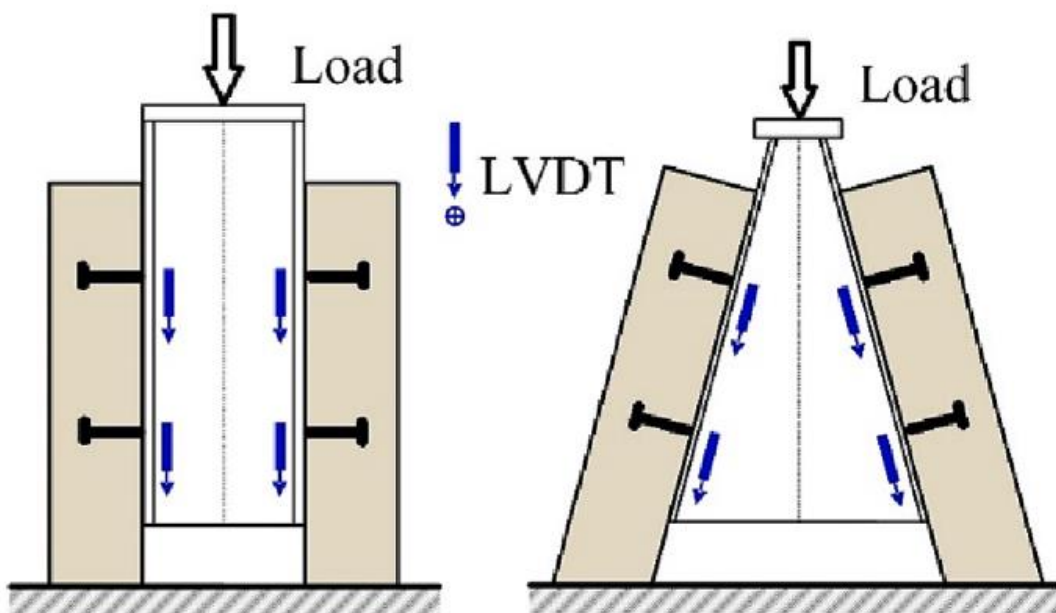


4. ábra: „kedvező” és „kedvezőtlen” pozíciók megjelölése Konrad és társai kísérletében [5]

Mivel a kísérlet fő célja nem a pozíciók hatásának vizsgálata volt, így erre vonatkozó részletes adatokat nem közöltek.

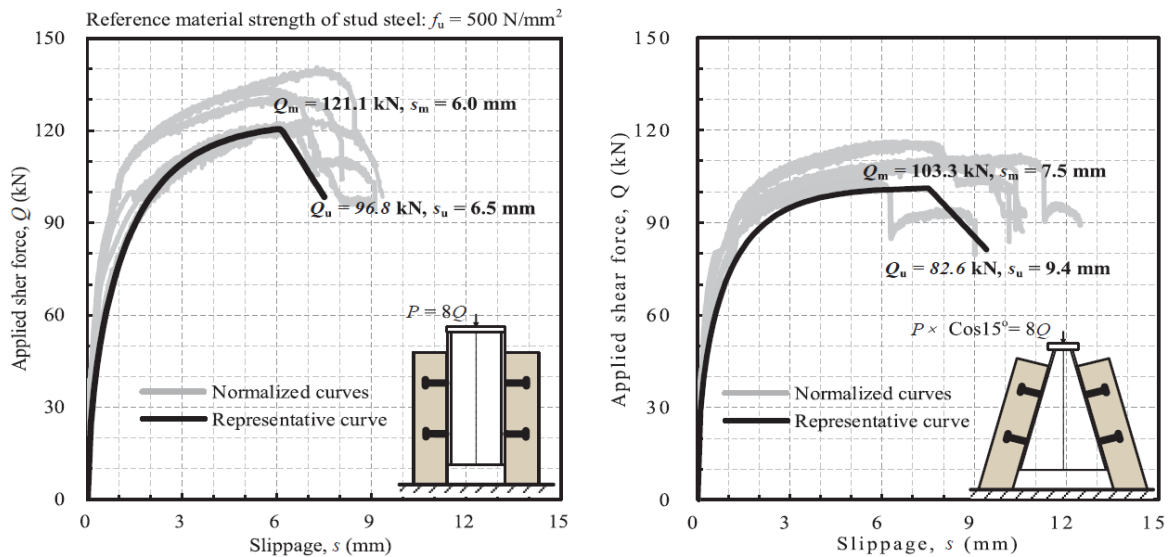
II.1.3 A nyíró és húzó igénybevétel interakciója a csapokban

Korábbi vizsgálatom [1] során a térbeli, testelemes modell alkalmazásának köszönhetően világossá vált, hogy a nyírt kapcsolóelemek a húzott rácsrudak által generált koncentrált erőbevezetés környezetében különleges feszültségállapotban vannak: a nyírófeszültség mellett értelemszerűen számottevő húzófeszültség is indukálódik. *Shen és társai* [6] ezt az interakciót egy speciális módosított kinyomókísérlet segítségével vizsgálták. A kísérleti összeállításban a két betonlemez nem párhuzamos, hanem a terhelő erő irányában csökken köztük a távolság. (5. ábra) Mivel az ezeket összekötő hegesztett acélszelvényt továbbra is függőlegesen tolja a berendezés, így az a betonlemezeketől távolodni fog, vagyis a nyírás mellett a húzás is megjelenik a nyírt kapcsolóelemekben.



5. ábra: klasszikus és módosított kinyomókísérlet összeállítása [6]

A kutatók összesen 30 próbatestet törtek el, az eredményeket pedig két grafikonon ábrázolták. (6. ábra) A reprezentatív görbék összehasonlítása során számos érdekes különbséget lehet felfedezni. Mint az várható volt, az interakciós igénybevétel csökkentette a nyírási teherbírást (~15%-kal), azonban a húzóerőnek köszönhetően a teherbíráshoz, valamint a szakadó nyúláshoz tartozó elmozdulás értéke 25 és 44 százalékkal nagyobb, amely duktilisabb szerkezeti viselkedést jelent. Az elcsúszást („*slippage*”) az 5. ábrának megfelelően, az acél-beton határfelülettel párhuzamosan kell értelmezni.



6. ábra: klasszikus és módosított kinyomókísérlet eredményei [6]

Ding és társai [7] a jelenséget hasonló módosított kinyomókísérletekkel vizsgálták, UHPC (ultra nagy teljesítményű beton) esetén. Kísérletüket azért idézem, mert a globális eredmények mellett különböző húzófeszültség-nyírófeszültség arány esetén bemutatták az egyes csapok tönkremeneteli állapotához tartozó deformációkat. (7. ábra)



(a) Ratio of tension to shear=0

(b) Ratio of tension to shear=0.17

(c) Ratio of tension to shear=0.27

7. ábra: tönkremeneteli állapot és feszültségarány kapcsolata [7]

A képek kiválóan szemléltetik a fokozatosan nagyobb húzófeszültség hatását: zérus húzóerő esetén (a) a talpkérszmetzetben felismerhető a tiszta nyíráshoz tartozó deformáció, a (b) képen az alapsík szögtorzulása még kivehető, de már szabad szemmel is észrevehető a tengelyirányú nyúlás. Az utolsó képen a csap nyakának alapfelülete alig torzult, a tönkremenetelt minden bizonnyal a jelentősen megnövekedett húzó igénybevétel okozta.

II.1.4 A beton önálló nyomott elemként

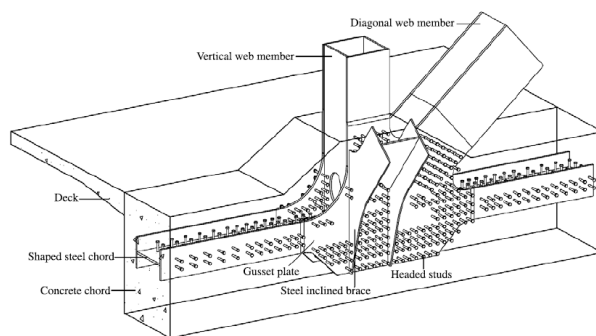
Végül, de nem utolsósorban két forrás alapján ismertetek egy olyan szerkezeti kialakítást, amely a hidak tervezésénél már jelen van és minden jel arra utal, hogy magasépítési szerkezeteknél is valamilyen hasonló megoldás lehet az erőtanilag és gazdaságilag legkedvezőbb konstruktóri elvek alapja.

Xue és társai [8] egy dupla – egymás fölé helyezett – pályalemezes ferdekábeles híd alsó és felső lemeze közti rácsos öszvértartó csomópontját vizsgálták. (8. ábra) A teljes alsó öv egy öszvér gerenda, amelyhez egy óriási csomólemezen keresztül kapcsolódnak a diagonális rácsrudak. A rácsos peremtartó felső öve is hasonló kialakítású. A kapcsolat lemezeire minden oldalról számtalan csapot hegesztettek, mint az a 8. b) ábrán is látható.

A vizsgálat konklúziójaként megállapították az egyes csapsorok között a nyíró igénybevétel eloszlását, a laboratóriumi kísérletet pedig végeleselemes számítással egészítették ki.



a) Minpu híd látképe [K3]

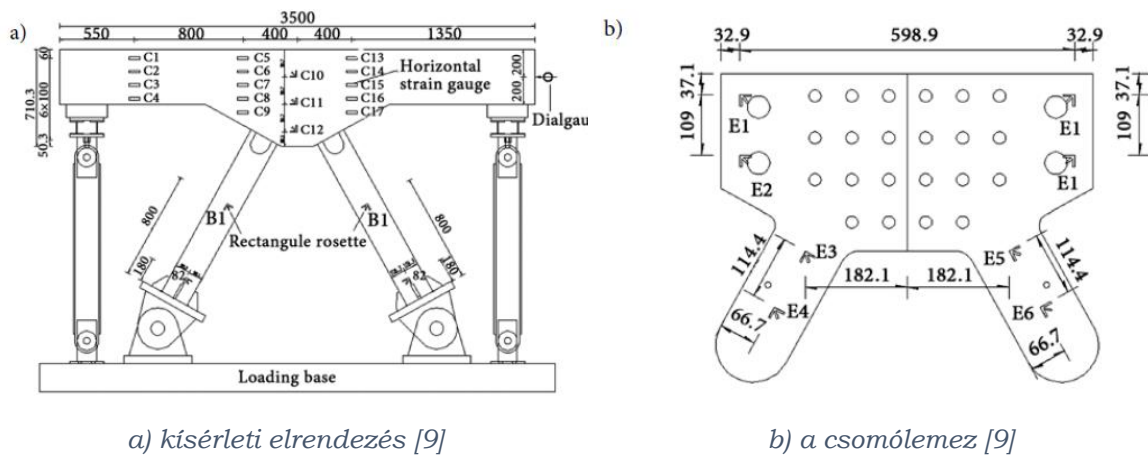


b) a vizsgált csomópont [8]

8. ábra: a Xue és csapata által vizsgált Minpu híd

Zhou és He [9] az előző példához nagyon hasonló rácsos tartó csomópontot vizsgált. Esetükben az extra különlegességet az jelentette, hogy ez a felső öv végén helyezkedett el, így a bonyolult kapcsolati kialakítás mellett a vasalás lehorgonyzását is biztosítani kellett. A csomópontba a kutatók nem helyeztek el fejes csapokat, a ferde rácsrudak két párhuzamos csomólemezen keresztül, csavarozott kapcsolattal csatlakoznak egymáshoz.

A kapcsolatot ez esetben is külön megépítették és fizikai kísérlettel meghatározták a teherbírását, emellett pedig numerikus számítást is végeztek, amely kellően pontos volt. A kísérleti összeállítást a 9. ábra szemlélteti.



a) kísérleti elrendezés [9]

b) a csomólemez [9]

9. ábra: Zhou és He kísérlete

Mint e hídszerkezeti példák bevezetésekor jeleztem, a céлом nem feltétlenül az eredmények nyers közlése, hanem sokkal inkább a szerkezeti kialakítás rövid ismertetése. Az elv, miszerint a beton az öszvér rácsos tartó erőjátékában önmagában felel a nyomatéki ellenállás biztosításához szükséges nyomóerő felvételéért, saját kutatásomban is előbb vagy utóbb szerepet fog kapni. A dolgozat témája, a csapok csomópontok feletti tömbösítése előrevetíti, hogy a köztes szakaszon megfelelő nyírt kapcsolat nélkül a laposacél felső öv akár elképesztően kis teherszinten is ki fog hajolni.

Amennyiben ez a hipotézis bizonyítást nyer, úgy az említett tartományon ezt el is lehet hagyni: ezzel a lépéssel az ebben a pontban bemutatott hídszerkezeti megoldások felé tesz egy nagy lépést a rácsos öszvérfödém kialakítása, hiszen a vasbetonlemez teljesen „magára marad” a nyomott oldalon. Ez természetesen nem probléma, sőt erőtani és gazdasági szempontból kifejezetten kedvező. A betont arra használjuk, amire való, a módosítással pedig egy teljes acél felső övet meg lehet spórolni, ami első sorban anyagi szempontból okoz pozitív változást.

Ezzel a rácsos öszvér lemezekkel kapcsolatos, külső források elemzésével foglalkozó szakirodalmi áttekintést lezárom. Ebben a fejezetben számos olyan cikket tekintettem át, amelyek kutatásom szempontjából fontos és releváns információt tartalmaznak. Az előkészítő tanulmány következő részében a dolgozat témáját megalapozó korábbi kutatásaimat ismertetem részletesen.

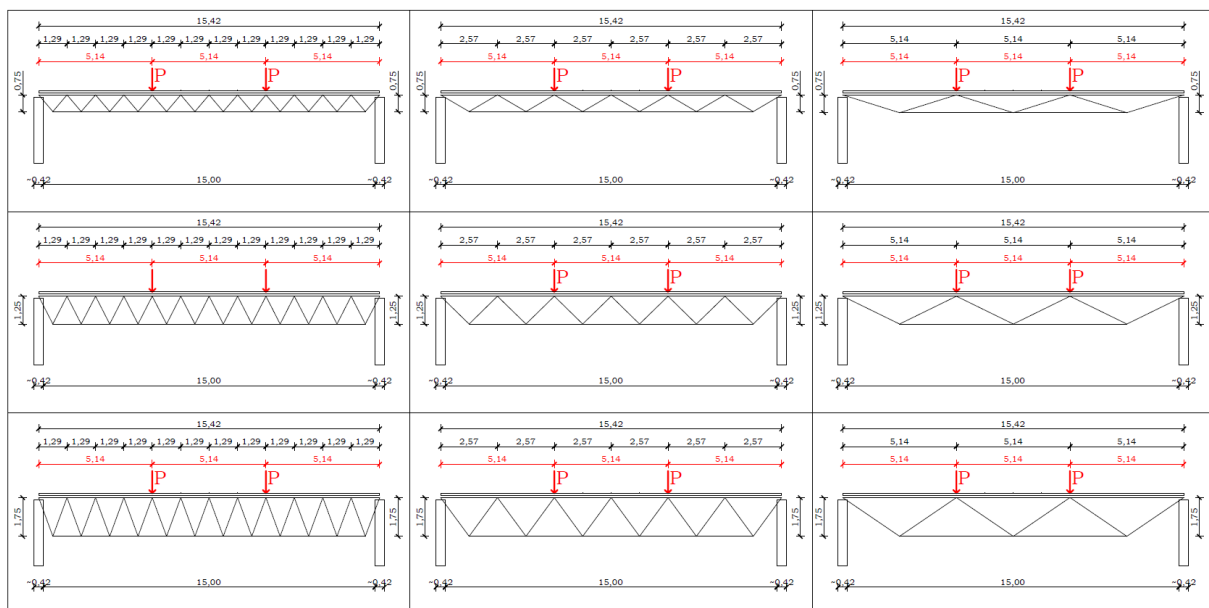
II.2 Korábbi kutatási eredményeim

II.2.1 Rácstopológia hatásának vizsgálata

Az öszvér rácsos tartók viselkedését elemző első kutatási rész [2] nagy jelentőséggel bír a később feldolgozott témák – köztük e dolgozat – kidolgozása szempontjából. Ez a vizsgálat alapozta meg a későbbi globális geometriát, amelynek egy része logikai megfontolások alapján felvett állandó paraméter, másik része kutatási eredmény formájában megfogalmazott igény az ideális rácstopológiára.

Ez utóbbi a tömbösítés szempontjából sem elhanyagolható tény, hiszen nem mindegy, hogy a fejes csapokat hány acélszerkezeti csomópont felett kell elosztani. Mint azt már e korábbi kutatásban is megfogalmaztam: „[...] ahhoz ugyanis, hogy csoportosítani lehessen a nyírt kapcsolóelemeket, először meg kell határozni az acélrács topológiáját.” [2] E tényeket figyelembe véve egyértelműen kijelenthető, hogy ez a forrás megalapozza, összehasonlíthatóvá teszi, és további – szélesebb körű – vizsgálatok esetén akár egy további dimenziót ad későbbi kutatásaimnak.

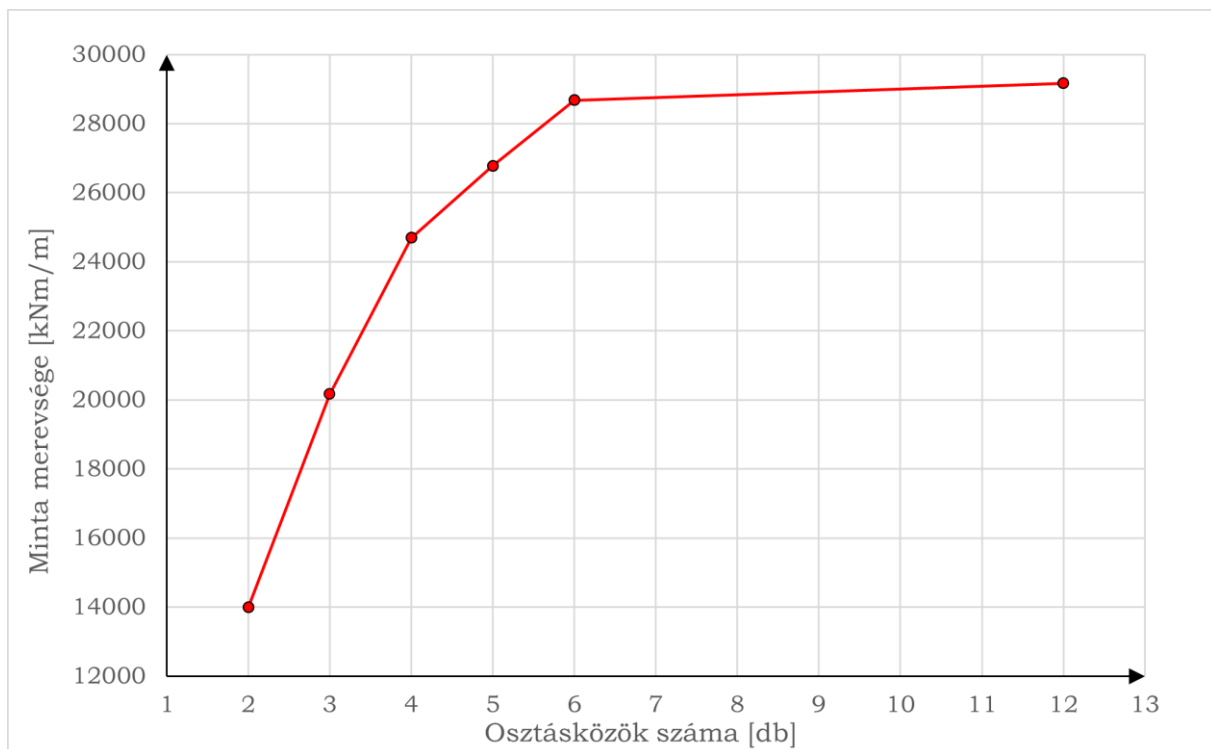
A végeselemes vizsgálatban a különböző rácskialakítások esetén vizsgáltam a tartó teherbírását és merevségét. (10. ábra) Teljes nyírt kapcsolatot alkalmaztam, így a globális teherbírásban csak a ritkább kiosztások miatt hosszabb nyomott rácsrudak stabilitási tönkremenetele okozott csökkenést. Ez



20. ábra: a rácstopológia vizsgálatára felvett vizsgálati spektrum [2]

önmagában orvosolható a szelvény növelésével, vagyis a nyomatéki teherbírás az adott statikai váz mellett nem függ a rácsstopológiától. Itt fontos megjegyezni, hogy a nyíróerő és nyomaték interakciója szempontjából elképzelhető, hogy van hatása, ez azonban egy későbbi kutatás témája lehet, ebben a vizsgálatban erre nem tértem ki.

A 11. ábra szemlélteti az 10. ábra második sorában található szerkezetek merevsége vonatkozó eredményt, amely az osztásközök számának függvényében közel bilineáris alakot ölt. A közbenső pontokat a rácskiosztás változtatásával és teljes felületen megoszló teher segítségével iktattam be, a tendencia pontosabb feltérképezésének érdekében. A függvény alakja azt jelenti, hogy a rácsrudak sűrítése egy bizonyos pontig jelentősen meredekebb lineárisan rugalmas szakaszt biztosít a nyomaték-lehajlás görbén, ezután azonban a további beépített diagonális elemek érdemben nem befolyásolják e statikai jellemzőt.



11. ábra: öszvérszerkezetű rácsos tartó merevsége a rácsstopológia osztásközeinek számától függően [2]

Ez az eredmény azért is nagyon fontos, mert a nagy fesztávú szerkezeteknél kiemelten fontos a használhatósági követelmények kielégítése, elsősorban természetesen a lehajlás megfelelő korláton belüli értékének biztosítása. Mivel a mezőközepi függőleges elmozdulás a hajlítási merevséggel fordítottan arányos, az osztásközök számának a 11. ábra szerinti megválasztásával lehet

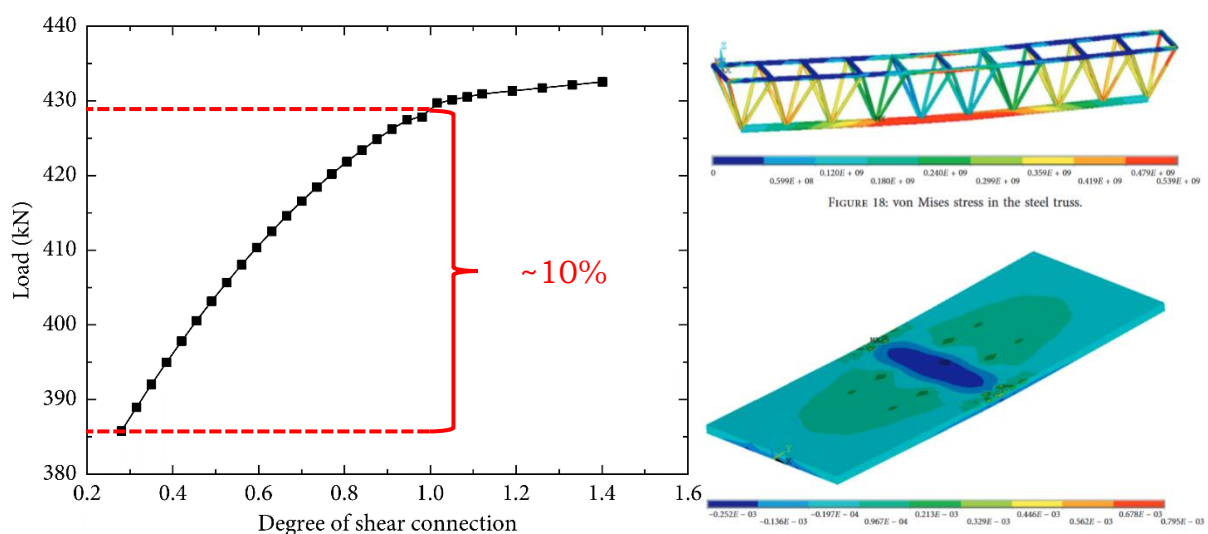
optimalizálni a szerkezetet, nem csak az említett feltétel kielégítésére, hanem a takarékos anyagfelhasználásra.

Fontos megjegyezni, hogy ezen összefüggés értékei erre a diszkrét esetre, állandó fesztáv és szerkezeti magasság mellett érvényesek, de a vizsgálatban modellezett spektrumon (0,75 méteres és 1,75 méteres tartómagasság esetén is) hasonló karakterisztika volt megfigyelhető. Ebből kifolyólag egyértelmű, hogy a 11. ábrát alapul vevő paraméteres görbe meghatározásának van létjogosultsága, azonban a kutatási program más irányt vett, így ennek kidolgozására még nem volt lehetőségem.

II.2.2 Részleges kapcsolatok vizsgálata

Az öszvér rácsos tartók viselkedését tanulmányozó kutatássorozatomban második állomásaként a szerkezetípus részleges nyírt kapcsolatok alkalmazása esetén mutatott viselkedését vizsgáltam. Ez az előző fejezettel ellentétben nem egyedülálló vizsgálat, hiszen korábban például *Lisheng Luo és Xiaofeng Zhang* [10] is végzett kísérleteket, valamint numerikus szimulációkat a nyírt kapcsolat fokszámának szerkezetre gyakorolt hatásának megállapítására.

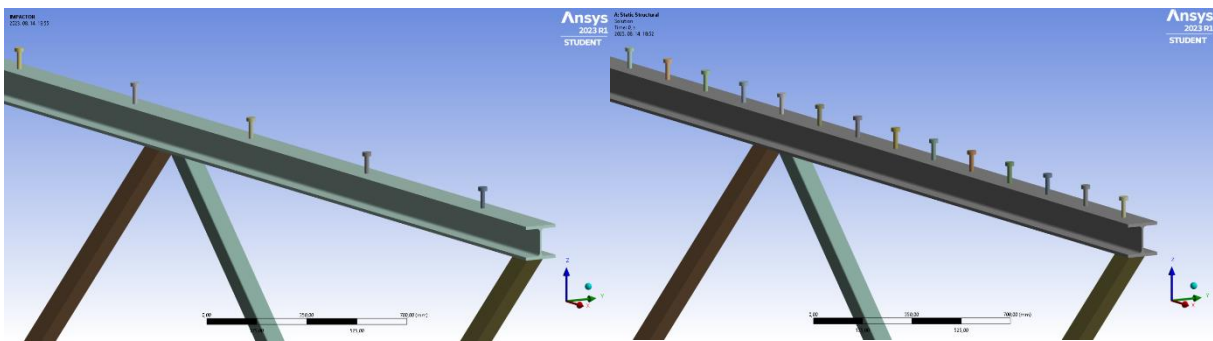
A 12. ábra ismerteti a validált végeelemes modell alapján számos különböző csapsűrűség esetén elvégzett numerikus vizsgálatok eredményét. A szerzők konklúziója az volt, hogy a részlegesen nyírt tartományban ($\eta < 1$) kialakított kapcsolatok esetében a csapozás hatása jelentősen nagyobb, mint a „túlcsapozott” ($\eta > 1$) esetekben.



12. ábra: *Lisheng Luo és Xiaofeng Zhang* kutatásának kialakítása (háromötvű rács és vasbeton lemez külön ábrázolva) és eredménye [10] (a piros kiegészítéseket Rozgonyi Dániel készítette)

Ez az állítás valóban igaz, azonban 0,2 és 1 fokszámok között a többlet-teherbírás mindössze 10% mértékű, vagyis a nagyon kis mennyiségű csapot tartalmazó szerkezet teherbírása is eléri a teljesen nyírt kapcsolattal potenciálisan igazolható ellenállás 90%-át. Az, hogy a csúszatóerő mindössze 20 százaléknak felvétele ($\eta = 0,2$) ellenére is ilyen nagy hajlítónyomatékot fel tud venni a szerkezet, arra enged következtetni, hogy az acélrács önmagában is nagyon erős. Ez esetükben annak köszönhető, hogy háromövű rácsos tartón végezték a kísérleteket. (12. ábra)

E felismerést követően vizsgálataimat kiterjesztettem, nem csak a beépített csapok számát (13. ábra) tekintettem a paramétervizsgálat változójának, hanem az acélrács önmagában értelmezett teherbírásának fokozatos csökkentése céljából a felső acélöv keresztmetszetét is. Az első vizsgálatban felvett HEB160-as szelvény mellett megállapítottam a szerkezet ellenállását, HEB120, HEA120, valamint 160/13 laposacél felső öv esetén is. A szelvényválasztás a keresztmetszeti terület fokozatos csökkentésén alapult; az utóbbi kettő ilyen szempontból közel azonos, de a stabilitásvesztési érzékenységükben jelentkező differencia természetesen jelentős hatással van a globális viselkedésre.

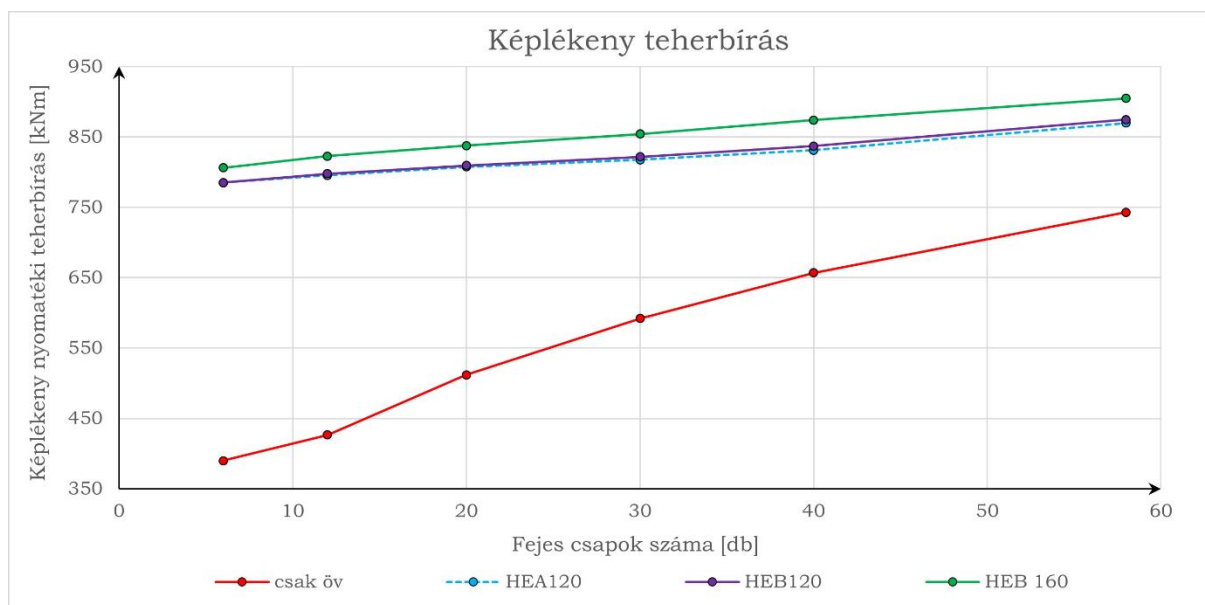


13. ábra: különböző sűrűségű, képlékeny csapkiosztások erős (HEB 160) felső öv esetén [1]

A 14. ábrán bemutatott grafikon az ismertetett vizsgálati spektrum alapján futtatott numerikus számításokból kapott képlékeny teherbírásokat tartalmazza. Mivel más keresztmetszeti területű szelvények esetén definíció szerint más a csapok mennyiségének fokszámában kifejezett értéke, ezért az összehasonlíthatóság biztosítása érdekében nem az utóbbival jellemzem a nyírt kapcsolatot, hanem kapcsolóelemek számával.

A grafikonon a „csak öv” a laposacélt alkalmazó kialakításra utal. A HEB160-as felső övvel készült öszvér rácsos tartó teherbírása jól láthatóan a

kiindulási pontként vett kutatáshoz [10] hasonló arányban (a végérték nagyjából 10 százalékkal) változik a megfelelő csapozás alkalmazásával. A görbék bár nem tökéletesen lineárisak, de minimális hibával tekinthetők annak, pontosan úgy, mint *Luo és Zhang* [3] függvénye az azonos értelmű értelmezési tartományon (12. ábra).



14. ábra: felső öv keresztmetszetére és nyírt kapcsolóelemek számára vonatkozó vizsgálat eredményeit ismertető grafikon. A „csak öv” a laposacélt alkalmazó kialakításra utal. [1]

Ezzel szemben a laposacél 47% többletteherbírást lehet elérni ugyanannyi csap beépítésével. Ez azt jelenti, hogy ezesetben már jelentős szerepet játszik a globális ellenállás javításában, mindezt úgy, hogy a teherbírás nem sokkal (mintegy 15 százalékkal) marad el az egyébként sokkal erősebb felső övvel rendelkező variánstól.

A 14. ábra TDK-dolgozatom későbbi részében is fontos szerepet kap, hiszen a csomópontok felett csoportosított fejes csapok által biztosított képlékeny teherbírást e görbékhez viszonyítva fogom tudni a lehető legszemléletesebben ábrázolni.

II.3 Problémafelvetés és célkitűzés

Dolgozatom célját részleteiben már ismertettem a szakirodalmi áttekintésben, utalások formájában, most az összkép teljességének kedvéért ezt egy helyen ismertetem. A vizsgálandó probléma szorosan követi a *II.2.2 pontban* leírt előző kutatási szakaszt: választ keresek arra a kérdésre, hogy a fejes csapok tömbösített elhelyezése az azonos mennyiségű kapcsolóelemet tartalmazó

egyenletes kiosztáshoz képest hogyan befolyásolja a teherbírást és a merevséget.

A szerkezet – mint komplex rendszer – viselkedésének megfigyelése, értelmezése és leírása mellett a lokális jelenségek elemzése is fontos. Az eredeti vizsgálathoz képest megváltozott globális válasz különbségei kizárólag a csapok új kiosztásából fakadó kedvezőbb – vagy adott esetben kedvezőtlenebb – lokális hatásoknak köszönhetően alakulhatnak ki. Itt különösen fontos a húzó- és nyírófeszültségek arányának és viszonyának vizsgálata, hiszen a húzott rácsrudak jelenléte a csoportosításnak köszönhetően akár több kapcsolóelemet is érinthet.

III. A vizsgálat leírása

A vizsgálatot a megelőző kutatásrészhez hasonlóan kizárólag numerikus környezetben, végeselemes szoftver segítségével kiviteleztem. A modell működését a *III.4.1 pontban* részletezett módon validáltam, az eredmények kellő pontosságát pedig hálózérezékenység-vizsgálat alapján igazoltam. Ebben a fejezetben részletesen leírom ezeket, valamint a vizsgálat körülményeinek minden további fontos jellemzőjét is.

III.1 A vizsgálati modelljének leírása

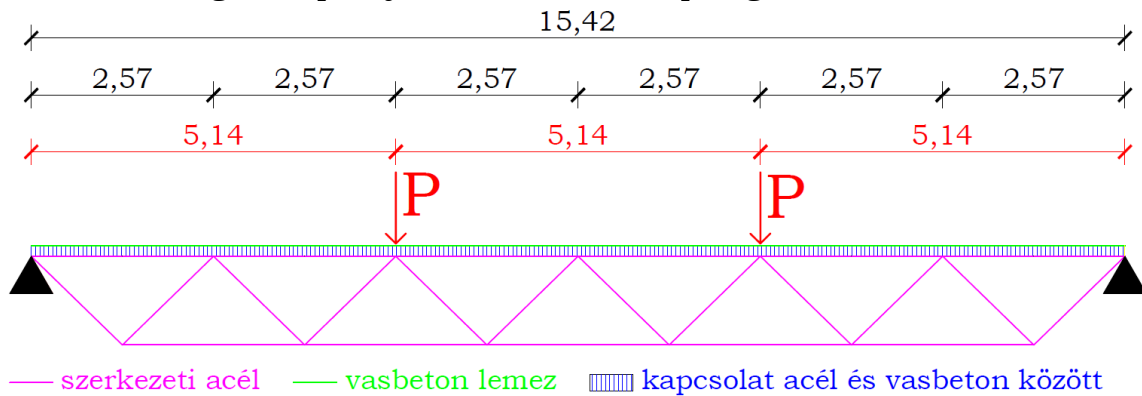
III.1.1 Statikai váz és megtámasztási modell

Az öszvér rácsos födécek az egyszerű gerendatartós öszvérszerkezetekhez hasonlóan ortotrop lemezként viselkednek, két főirányban jelentősen eltérő merevséggel rendelkeznek. Mivel párhuzamosan elhelyezett acélszerkezetek definiálják a fő teherhordási irányt, ezért a szerkezet egy diszkrét szekciójának gerendaként való vizsgálata érdemben jellemzi a teljes rendszer viselkedését.

Jelen esetben ugyanezt a protokollt követtem. Az acélrácsok tengelytávolságát úgy feltételeztem, hogy az effektív szélesség számítására ne legyen szükség: a vasbeton által keresztirányban áthidalt fesztáv a teljes mértékadó hasznos szélesség, a tartó teljes hossza mentén.

A szerkezetet csuklós-csuklós kéttámaszú tartóként modelleztem. A statikai vázat a 15. ábra mutatja be. A kutatássorozat részeredményeinek

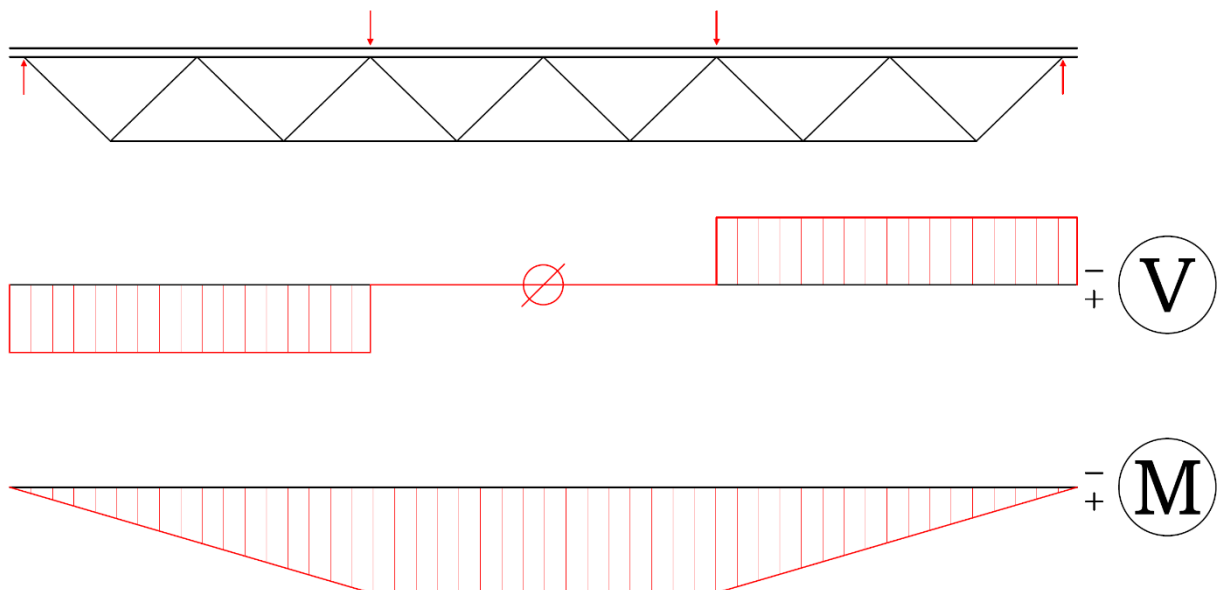
összehasonlíthatósága érdekében ez megegyezik az első részben [2] meghatározott, merevség szempontjából ideális rácsstopológiát tartalmazó variánssal.



15. ábra: a vizsgálati modell kótázott statikai váza [2]

A 16. ábra a terhelési mód megválasztását indokolja. A négypontos hajlítóvizsgálat a ideális módja a tiszta nyomatéki teherbírás vizsgálatának, hiszen a két erőbevezetés között a hajlítónyomaték maximális, míg a nyíróerő közel zérus (pontatlanságok és egyéb imperfekciók következtében a valóságban értelemszerűen a teljes nyírásmentesség egyáltalán nem garantált).

A statikai váz és megtámasztási modell egyszerű magyarázata a gyakorlati kialakításból fakad: a negatív nyomaték helyén a nyomott és a húzott öv ellentétes oldalon van a mezőközepi állapothoz képest, a szerkezet kialakításával pedig elképesztően nehéz ezt a váltást lekövetni. A gyakorlatban a folytonos többtámaszú rácsos tartók konstruálására nincs is példa, a befogás pedig pontosan ugyanezekkel a problémákkal állítaná szembe a tervezőt.

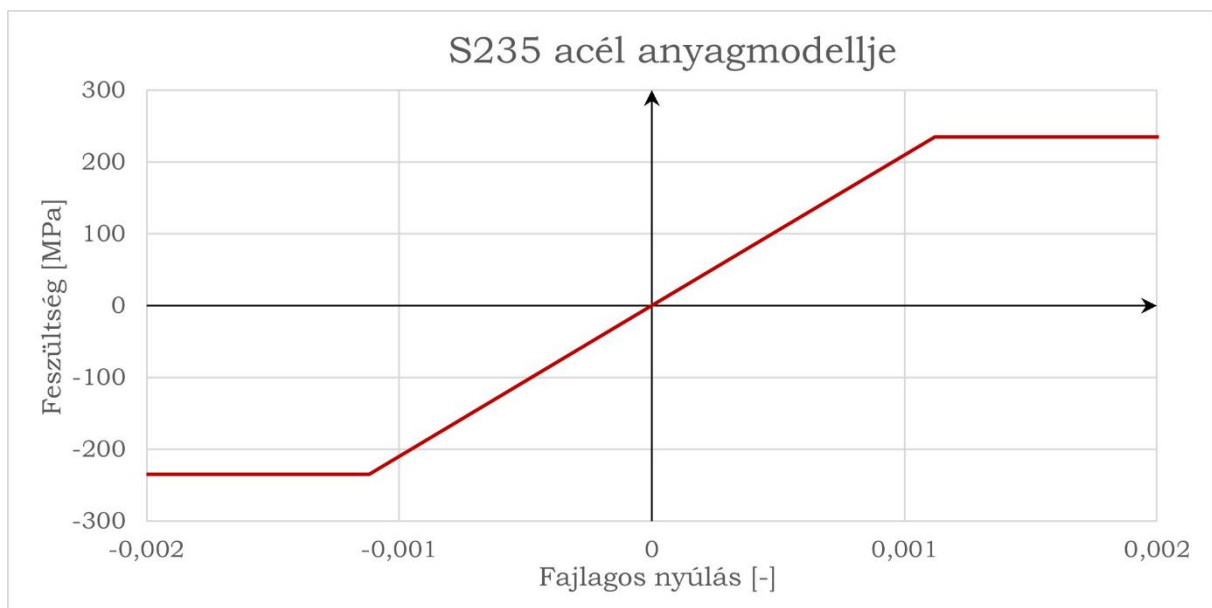


16. ábra: a vizsgálati modell kótázott statikai vázából adódó elméleti igénybevételek [1]

III.1.2 Anyagmodellek

A valóságot a lehető legpontosabban reprezentáló nemlineáris analízis egyik alappillére az anyagi nemlinearitás. Az acél és a beton anyagi viselkedésének jellemzésére is bilineáris anyagmodellt kell alkalmazni, pozitív és negatív értelmű fajlagos nyúlás esetén egyaránt. Mivel a végeselemes számításhoz nem tartozik valódi anyagkísérlet, így köteles vagyok az egyes anyagminőségeket karakterisztikus értékükkel megadni.

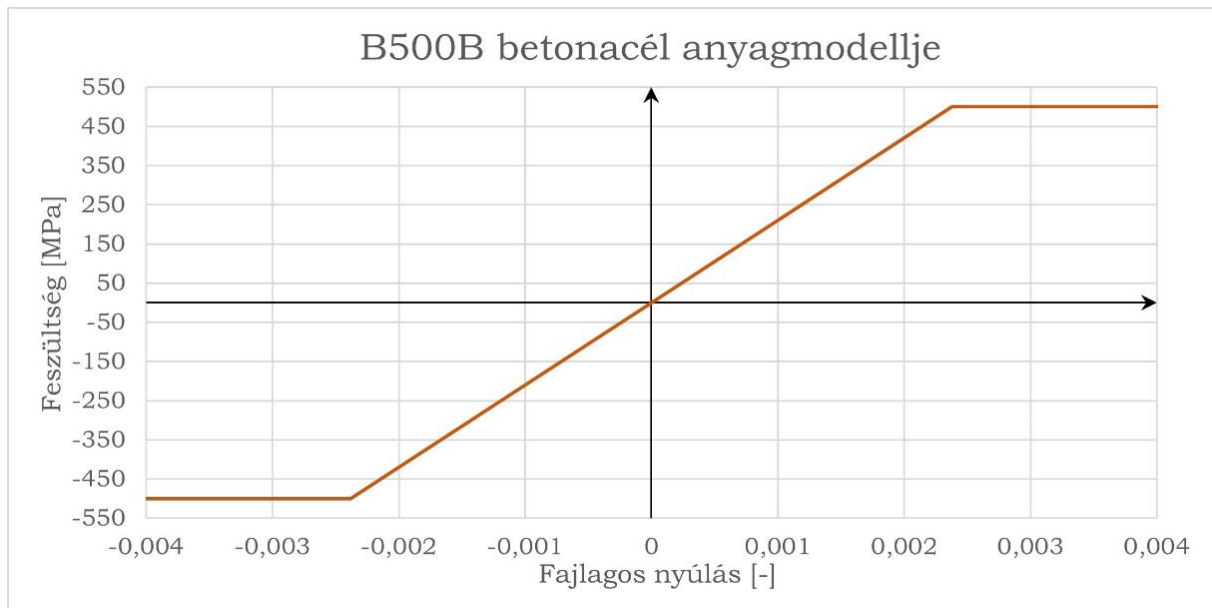
A szerkezeti acélok anyagi viselkedését a 17. ábrán látható általános σ - ϵ diagram jellemzi. Ez a gyűjtőnév most érvényes az acélrács összes elemére, valamint a fejes csapokra egyaránt. A választásom azért esett a 235 MPa-os folyáshatárral rendelkező acélra, mert a kísérlet végén egy olyan alaptézis felállítása a cél, ahol a rendkívül nagy teherbírás és merevség vonatkozásában nem merül fel az a kétség, hogy ez a kiválasztott anyagminőségeknek köszönhető-e. Az S235 ilyen szempontból a helyes választás, ezt követően pedig további kutatások során lehet az anyagminőség hatását tanulmányozni.



8. ábra: szerkezeti acél anyagmodellje

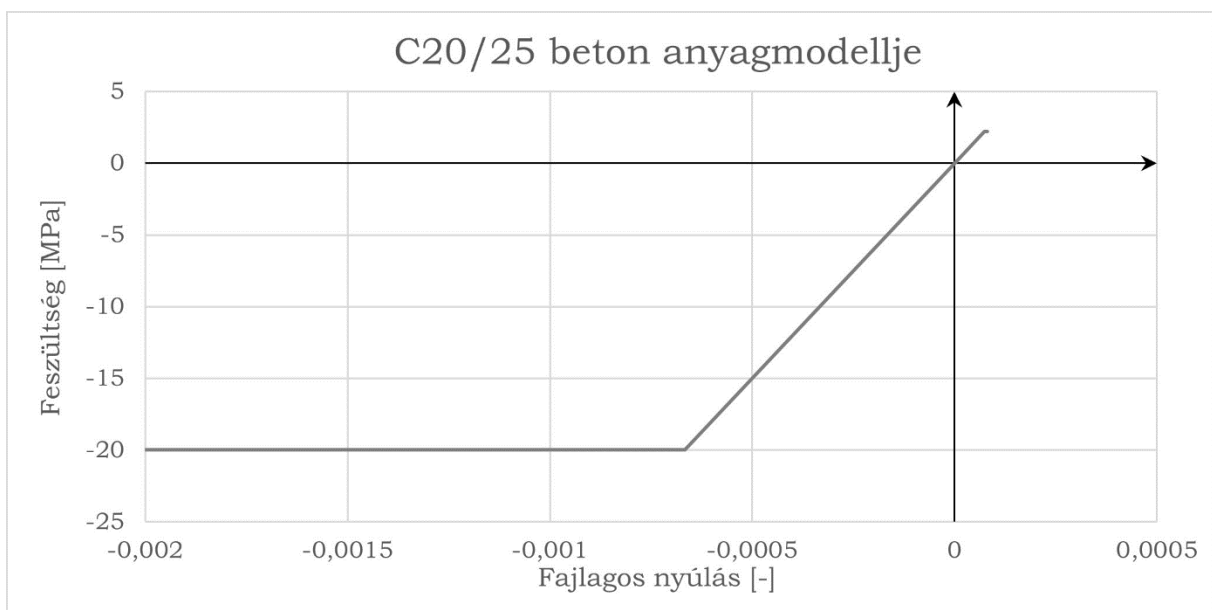
A betonacél esetében az egyértelmű opció a csavarbordás B500B, ez a standard minőség a hétköznapi forgalomban. Az acélrács síkjában ható igénybevételekre adott szerkezeti válaszban egyébként ennek nincs kifejezetten nagy szerepe, hiszen az acélszerkezet sokkal nagyobb eredő húzóerőt vesz fel. A keresztirányú hajlítónyomatékok felvétele és a repedések korlátozása az alsó

és a felső betonacélháló feladata. A σ - ε diagramot a megszokott formában mutatom be a 18. ábra segítségével.



18. ábra: betonacél anyagmodellje

Az acél anyagok tárgyalását követően a 19. ábra szemlélteti a C20/25 anyagminőségű betonban kialakuló feszültségeket a fajlagos nyúlás függvényében. Természetesen negatív értelmezési tartományban (nyomás esetén) kiváló az ellenállása, húzásra azonban már minimális relatív hosszváltozás esetén bekövetkezik a rideg tönkremenetel, a képlékenyedés képessége elhanyagolható. A relative alacsony szilárdsági osztályra az S235-ös acél esetében említett praktikus okok szolgálnak magyarázatként.

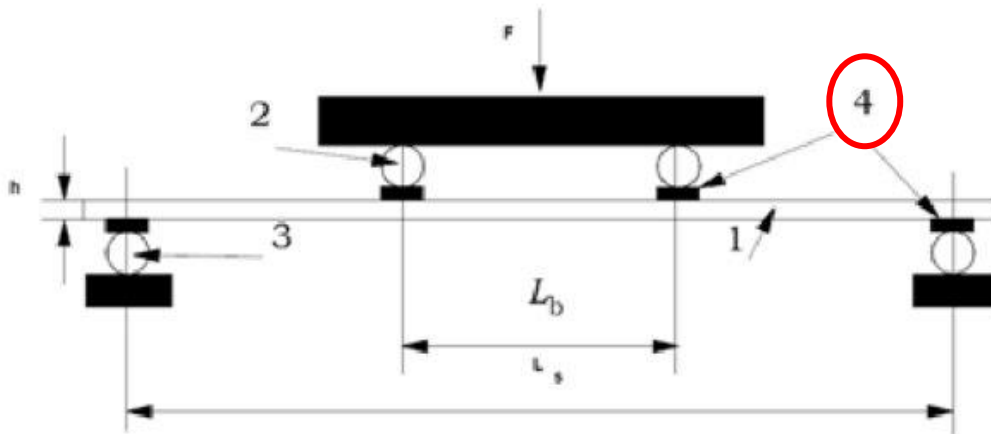


19. ábra: C20/25 beton anyagmodellje

III.1.3 Tehermodell

Egy valós négypontos hajlítóvizsgálat esetén a terhelő sajtók elmozdulás-kényszer formájában fejtenek ki erőt a szerkezetre. Ez természetesen kifejezhető koncentrált erőként is, de mint azt később a végeselemes implementálás során is bemutatom, sokkal könnyebben kezelhető az elmozdulás-vezérelt analízis.

A terheléshez kapcsolódóan fontos vizsgálati elemek a terhelő lemezek. Ezek segítenek a sajtó által kis felületen átadott terhelés szétszétlásáért, ezáltal elkerülhető lokális repedések kialakulása, adott esetben a beton tönkremenetele. (20. ábra) Ez természetesen nem csak a valóságban, hanem a numerikus analízis hibamentes végrehajtásakor is fontos szempont.



20. ábra: egy általános négypontos hajlítóvizsgálat és terhelő lemezek helyzete [K1]
(a rossz minőség a forrásból ered)

II.1.4 Állandó és változó paraméterek

A vizsgálat elvégzése során a megfelelő összevethetőség érdekében számos paramétert már korábban rögzítettem. Ez jelen esetben magában foglalja a különböző anyagminőségeket, globális szerkezeti méreteket, a keresztmetszeteket, a csapok geometriai méreteit, valamint a vasalást is. Az előbbieken ismertetett állandó mennyiségeket az 1. táblázatban foglalom össze.

A paramétervizsgálat spektruma a korábbi vizsgálatokkal ellentétben nem többdimenziós, hiszen most kifejezetten a különböző csoportosítási módszerek alkalmazásának hatását vizsgálom: a soronként két, illetve három csap elhelyezése ilyen szempontból (az alapeseteket vizsgálva legalábbis) egymást kizáró paraméterek. A nyírt kapcsolóelemek távolságát az *Eurocode 4* [8] szabvány alapján az irányonként előírt minimális értékre vettem fel.

szabad nyílás	15 m	csapok feje (d/h)	32/13
teljes hossz	15,84 m	csap teljes magassága	75 mm
acél anyagminőség	S235	beton anyagminősége	C20/25
alsó öv szelvény	SHS120x6	lemez vastagsága	10 cm
rácsrudak szelvénye	SHS70x5	betontakarás	20 mm
acél felső öv szelvénye	160/13	vasalat anyagminősége	B500
csapok törzse (d/h)	16/62	vasalat szál-átmérője	Ø8

1. táblázat: vizsgálat állandó paramétereit [2]

Ezzel ismertettem a vizsgálat általános ismérveit az összes modellrészen végig haladva, a következő fejezetben pedig a bemutatott részmodellek vége-selemes implementálását részletezem.

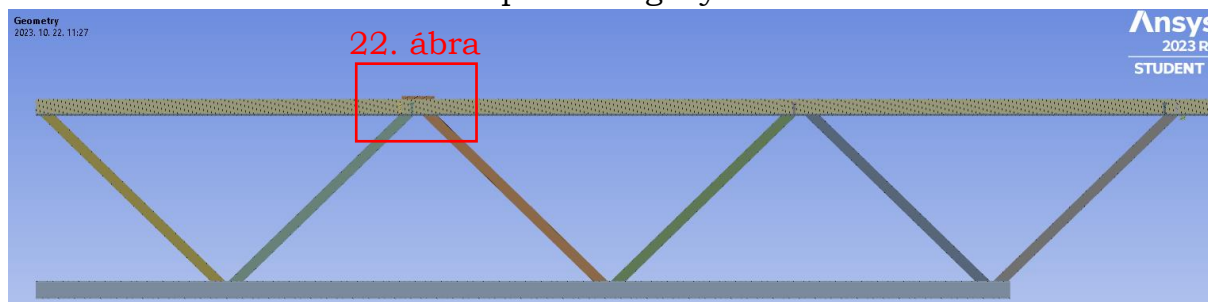
II.3 A vizsgálati modell vége-selemes implementálása

A vége-selemes vizsgálatot az *ANSYS 2023 R1* verziójú program segítségével végeztem; használatához az ingyenes diákklicenc révén szereztem jogosultságot. A számításhoz a *Workbench* alapú *DesignModeler* és *Mechanical* modulok voltak segítségemre. Előbbi a 3D geometria létrehozásában, utóbbi a nem-lineáris analízis végrehajtásában.

II.3.1 Geometria

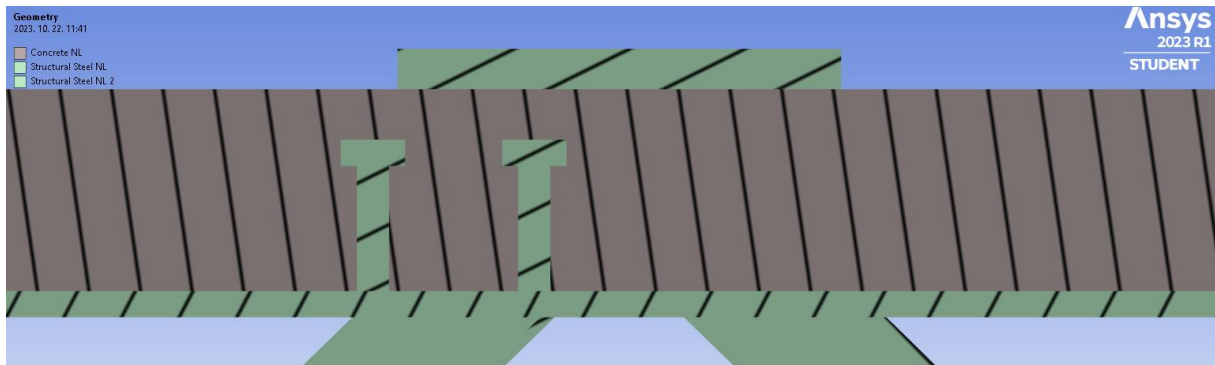
A vége-selemes modell teljes egészében testelemekből áll (kivéve a vasalást), ez kulcsfontosságú a valós viselkedés reprezentálása szempontjából, leginkább a nyírt kapcsolóelemek szegmensében, hiszen ezt a kapcsolatot a beton és az acél között nagyon komplikált helyettesítő modellel felvenni.

A 21. ábrán a vizsgálati modell geometriájának vége-selemes implementációja látható hosszirányú metszetben. Megfigyelhető, hogy ez csak a valóságban tesztelendő próbatest fele: teljesen (geometria, terhelés és megtámasztás esetén egyaránt) szimmetrikus tartók esetében ez bevett gyakorlat, hiszen fél modell fele akkora számítási kapacitást igényel.



21. ábra: a vizsgálati modell metszete a vége-selemes programkörnyezetben

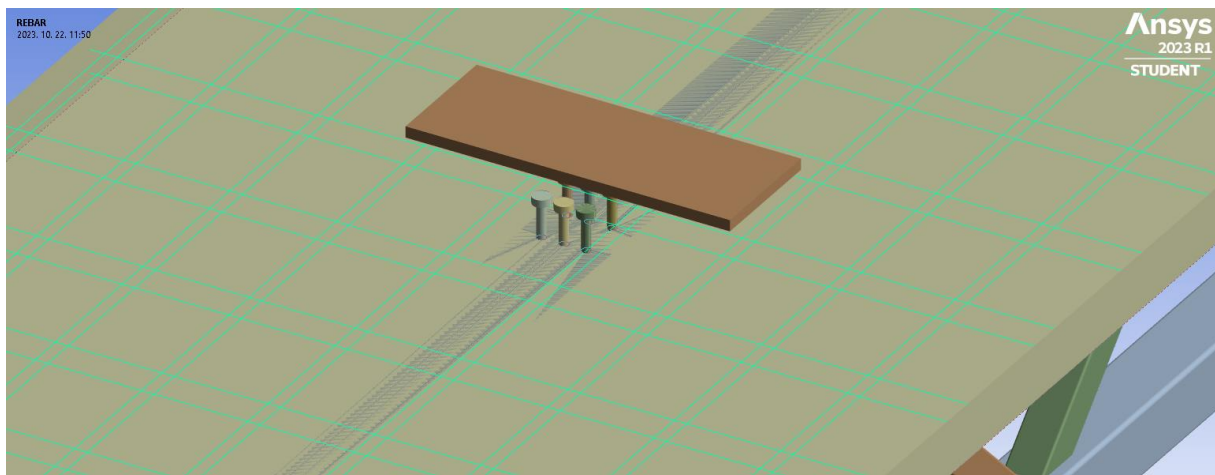
Az metszeten piros téglalappal jelölt részletet azért emeltem ki, hogy a lokális modellkialakítások is érhetően bemutatathatók legyenek. A csomópont geometriáját a 22. ábra szemlélteti.



22. ábra: a vizsgálati modell metszetének részlete a végesselemes programkörnyezetben

A metszeten megfigyelhető a csapok elhelyezkedése, valamint a beton te-
tején elhelyezett terhelő lemez, amely segít a koncentrált elmozdulás-kény-
szerből keletkező lokális igénybevételek okozta tönkremenetel elkerülésében,
azáltal, hogy elosztja a terhelést a felülete mentén.

A 23. ábra ugyanazt a csomópontot szemlélteti, most 3D nézetben. Ezzel
elsősorban a vonalelemként kezelt, „Reinforcement” modell típussal rendelkező
vasalat elhelyezkedését szemléltetem. Mivel ez egy 1D leképezése a valós be-
tonacélszálnak, így a végesselemes számításhoz paraméterként kell definiálni a
keresztmetszetét, amely jelen esetben egy 8 milliméter átmérőjű kör.



23. ábra: a 22. ábrán bemutatott részlet 3D nézete, a betonacélháló kijelölésével

II.3.2 Az anyagok definiálása

A vizsgálat elvégzéséhez a II.1.2 pontban ismertetett anyagmodelleket kel-
lett implementálni. A valóságot nemlineáris analízis segítségével lehet a leg-
jobban közelíteni, ennek egyik fontos része az anyagi nemlinearitás. Ez azt

jelenti, hogy a rugalmassági modulussal és a Poisson-tényezővel egyértelműen definiálható lineáris szakaszt a teherbírás (acélnál folyáshatár, betonnál nyomó/húzószilárdság) elérésekor korlátozni kell. Ezt a későbbiekben ismerttetett validációs modellen ellenőriztem, és szinte tökéletesen követték a valós anyagi viselkedést. A 24. ábrán az ANSYS számára megadott anyagi paraméterek olvashatók.

	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	2300	kg m...
4	Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Youn...	
6	Young's Modulus	30000	MPa
7	Poisson's Ratio	0,18	
8	Bulk Modulus	1,5625E+10	Pa
9	Shear Modulus	1,2712E+10	Pa
10	Drucker-Prager		
11	Drucker-Prager Base		
12	Uniaxial Compressive Strength	20	MPa
13	Uniaxial Tensile Strength	2,2	MPa
14	Biaxial Compressive Strength	24	MPa

a) Concrete NL

	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	7850	kg m...
4	Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Youn...	
6	Young's Modulus	2E+05	MPa
7	Poisson's Ratio	0,3	
8	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa
9	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa
10	Bilinear Isotropic Hardening		
11	Active Table	Total	
12	Yield Strength	235	MPa
13	Tangent Modulus	0	MPa

b) Structural Steel NL

	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	7850	kg m...
4	Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Youn...	
6	Young's Modulus	2E+05	MPa
7	Poisson's Ratio	0,3	
8	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa
9	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa
10	Bilinear Isotropic Hardening		
11	Active Table	Total	
12	Yield Strength	500	MPa
13	Tangent Modulus	0	MPa

c) Structural Steel NL 2

24. ábra: anyagmodellek implementálása az ANSYS szoftverben az alábbi anyagok esetén: a) beton b) szerkezeti acél c) betonacél

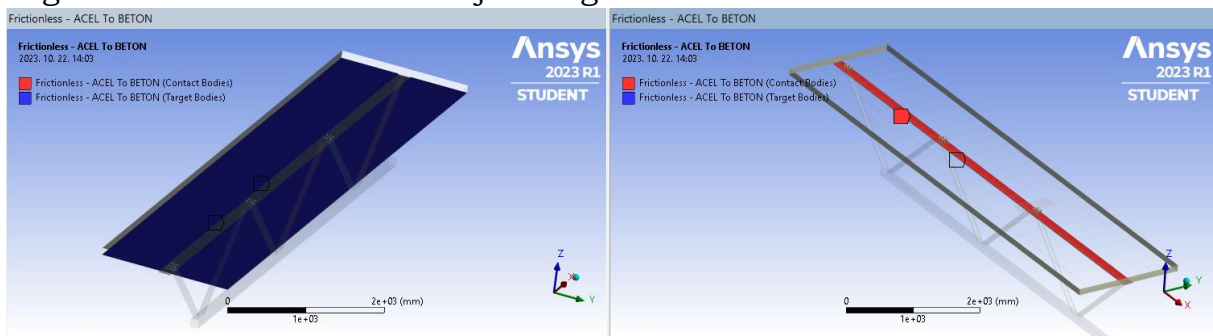
A beton esetében a Drucker–Prager-modellt alkalmaztam törési/képlékenyedési feltételként. Vizsgálataim elején igyekeztem a lehető legjobban működő beállításokat megtalálni, kutatásom során pedig számos forrást találtam, amik klasszikus betonacél alkalmazása esetén [11] és FRP-betétek felhasználásával készült szerkezetekre [12] is igazolta a Drucker–Prager-modell alkalmazásának helyességét. Ezt követően a validáció során magam is meggyőződtem arról, hogy a szerkezetek globális viselkedésének közelítésében kiváló pontosságot lehet elérni segítségével, mindezt úgy, hogy definiálása mindössze 3 paramétert igényel.

II.3.3 Felületi kapcsolati modellek

A különböző anyagok közötti kapcsolatot kontaktokkal definiáltam. Az ANSYS automatikusan felismeri az érintkező felületeket, a felhasználónak csupán annyi a dolga, hogy a valós fizikai viselkedésnek megfelelően adja meg a szükséges paramétereket. Az összehegesztett elemeket (alsó öv – rácsrudak, rácsrudak – felső öv, valamint felső öv – fejes csapok) „Bonded” módon csatlakoztattam. Ez magyarul azt jelenti „összeragasztva”, a kapcsolt felületek között nem jöhet létre elcsúszás és eltávolodás sem. Az egyszerűség kedvéért a terhelő lemezeket és a támaszelemeket is hasonlóan kapcsoltam össze. Azt

feltételeztem, hogy a síkra merőleges hatalmas koncentrált erők mellett elcsúszás nagyon kis valószínűséggel, eltávolodás pedig szinte biztosan nem alakulhat ki.

Automatikusan felismeri a közös határfelületet az acél felső öv és a beton között is. Itt „Frictionless” kapcsolatot definiáltam, mivel a felületen kialakuló súrlódás olyan többletterherbírást eredményezhet a vizsgálat során, amely a valóságban nem feltétlenül reális. (25. ábra) Ráadásul laboratóriumi környezetben az acél felső síkját betonozás előtt még zsírozni is szokták, hogy a csúsztatóerő felvétele kizárólag a nyírt kapcsolóelemek mechanikai tulajdonságainak köszönhetően történjen meg.



25. ábra: kapcsolati modell a laposacél felső öv és a beton között

A fejes csapok és a betonlemez határfelületi viselkedésének definiálása a vizsgálat egyik sarkalatos pontja, ez ugyanis nagymértékben befolyásolhatja a teherbírást. Mivel az acél és beton közötti súrlódási viszony feltételezése elsősorban nem magától értetődő, így a validáció segítségével határoztam meg a szóba kerülő opciók közül a legalkalmasabbat. A lineárisan rugalmas tartományban lényegi eltérés nem mutatkozott a „Bonded”, a „No separation” és „Frictional” kapcsolatok között, azonban a képlékeny platót már 10 százalékos tartományban közelítik; a három lehetőség közül azonban az utolsó követte le azt a legpontosabban, így erre esett a választás a modell felépítésekor. (26. ábra)

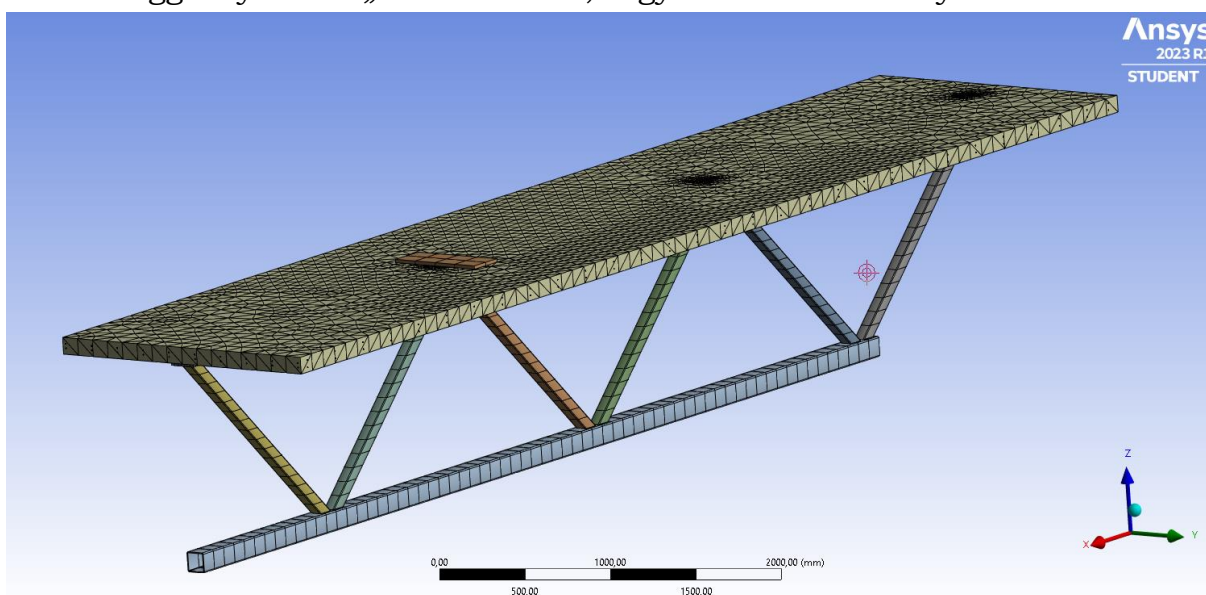


26. ábra: kapcsolati modell a fejes csapok és a beton határfelületén

A súrlódási tényezőt *Rabbat és Russell* [13] 1985-ös kutatása nyomán vettem fel, az általuk javasolt 0,57–0,7 tartományon belül. Maga az intervallum nem tág, így kismértékű hiba a teljes szerkezeti válasz szempontjából elhanyagolható változásokat okoz. A kapcsolati viselkedés validálására szolgáló modell alapján 0,7 érték felvételével szinte tökéletesen pontosan közelíti a valóságot, így a vizsgálati modellbe is ezt az értéket tápláltam be.

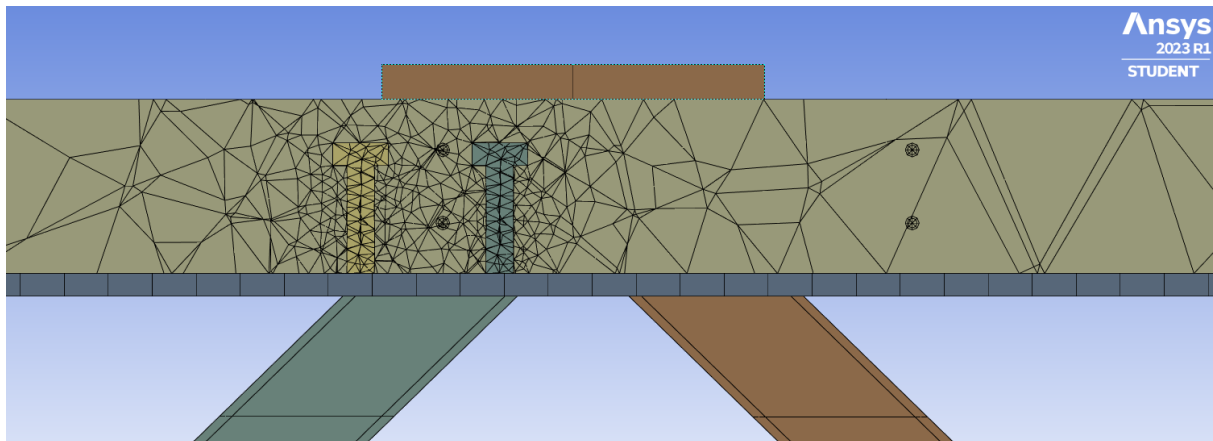
II.3.4 Végeelem-háló

A végeelemes számítás előkészítésének utolsó előtti lépése a hálózás. (27. ábra) Az ANSYS szoftverben lehetőség van „*Nonlinear Mechanical*” hálótípus kiválasztására. A nemlineáris háló fajlagosan több csomópontot és elemet hoz létre, valamint a testek görbületeinek lekövetése is a lehetséges beállítások között szerepel. Ez utóbbi a hengeres fejes csapok és az ezeket pontosan ugyanilyen határfelülettel körülölelő beton közti megfelelő erőátadás (palástnyomás) szempontjából elengedhetetlenül fontos. A hálótípus további előnye, hogy egyszerűen személyre szabható és kezelhető a háló lokális sűrítése a geometria függvényében a „*Growth Rate*”, vagyis növekedési tényező beállításával.



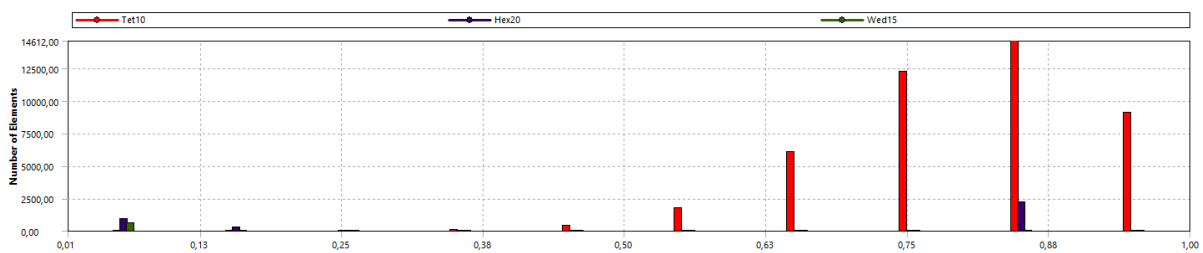
27. ábra: a teljes végeelemes modell hálója

A helyenként sűrűbb háló alkalmazása a fejes csapok környezetében, leginkább a betonban szükséges. (28. ábra) Ezzel számottevően lehet csökkenteni az elemek és csomópontok számát, ezáltal pedig a számítási igényt, ugyanis a geometriai „zavarástól” távolabb a szerkezeti válasz elfogadhatóan pontos meghatározásához bőven elegendő a háromszor-ötször akkora élhossz.



29. ábra: a végelem-háló lokális sűrítése a csapok környezetében

A 28. ábrán bemutatott részlet hálózása elég zavarosnak tűnik, ez azonban kizárólag azért van így, mert metszetben látszik. A végelemek geometriai szabályossága a szerkezet teljes egészét tekintve kielégítő. Ezt a megállapítást statisztikai kiértékelés segítségével is alá lehet támasztani. Az ábrákon példaként bemutatott hálóban a csomópontként 3×2 csap jelentős mértékű zavarást jelent. Az elemek geometriai szabályosságát jellemző mérőszám eloszlását jellemző oszlopdiagram [0;1] tartományon értelmezett horizontális elhelyezkedése, az opcionálisan erre illeszthető (lognormális eloszlásra utaló) sűrűségfüggvény várható értéke (0,82517) és szórása (0,18237) egyértelműen bizonyítja az alkalmazott hálóparaméterek megfelelőségét. (29. ábra) Az eloszlás paramétereit a szoftver automatikusan meghatározta.



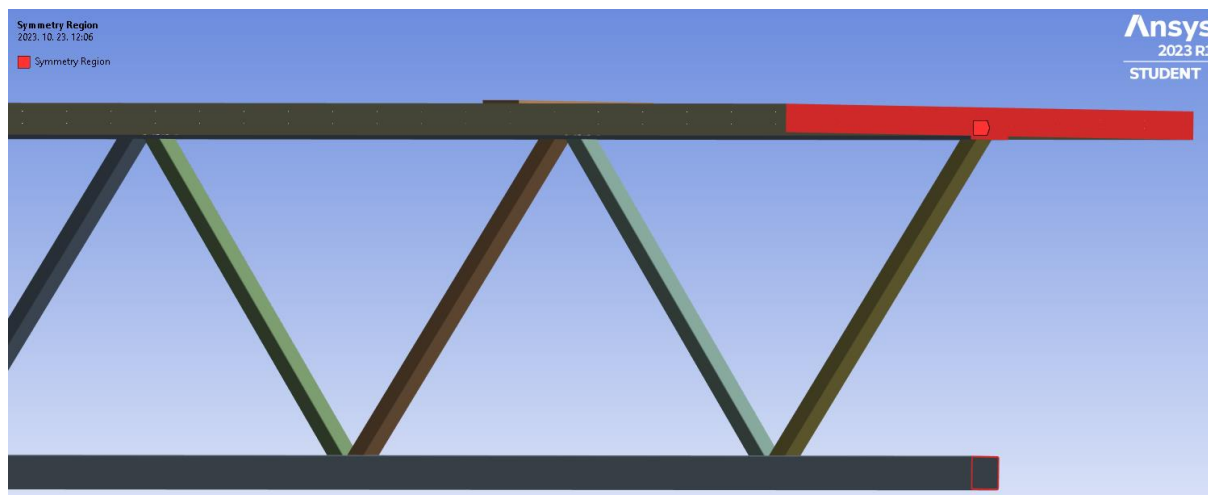
28. ábra: a végelemek geometriai szabályosságát jellemző oszlopdiagram

A végelem-háló egyes szerkezeti egységekre vonatkozó szükséges sűrűségét a verifikációs eljárás során határoztam meg; a vizsgálat eredményét a II.4.2 Verifikáció pontban részletezem.

II.3.5 Terhek és támaszkényszerek

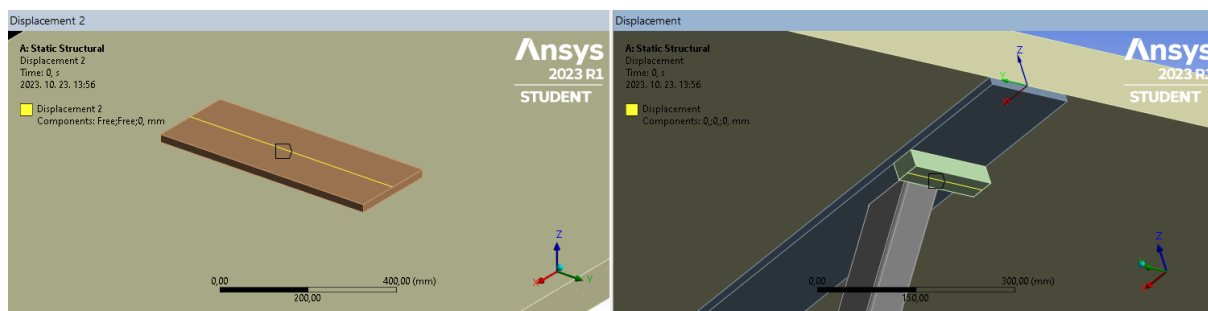
Végül, de nem utolsósorban a megtámasztási, illetve terhelési viszonyokat kell definiálni. Előbbi két különálló részből áll: a tartóvégi csuklós támasz, valamint a szimmetria megadásából. Mint azt korábban ismertettem, és az ábrákon látható is, a számítási kapacitás optimalizálásának érdekében csak

a valós öszvér gerenda felét vizsgáltam. A szimmetria alkalmazása a véges elemes szoftverek esetében egy további támaszkényszeret jelent. E peremfeltételt a felhasználó az elvárt szerkezeti válasznak megfelelően kalibrálhatja; jelen esetben ez a metszősík normálisának irányába eső (vízszintes, hossztengeley-irányú) zérus elmozdulás esetén teljesül. (30. ábra)



30. ábra: a szimmetriasík felületeit kell „Symmetry Region” kényszerrel ellátni (piros)

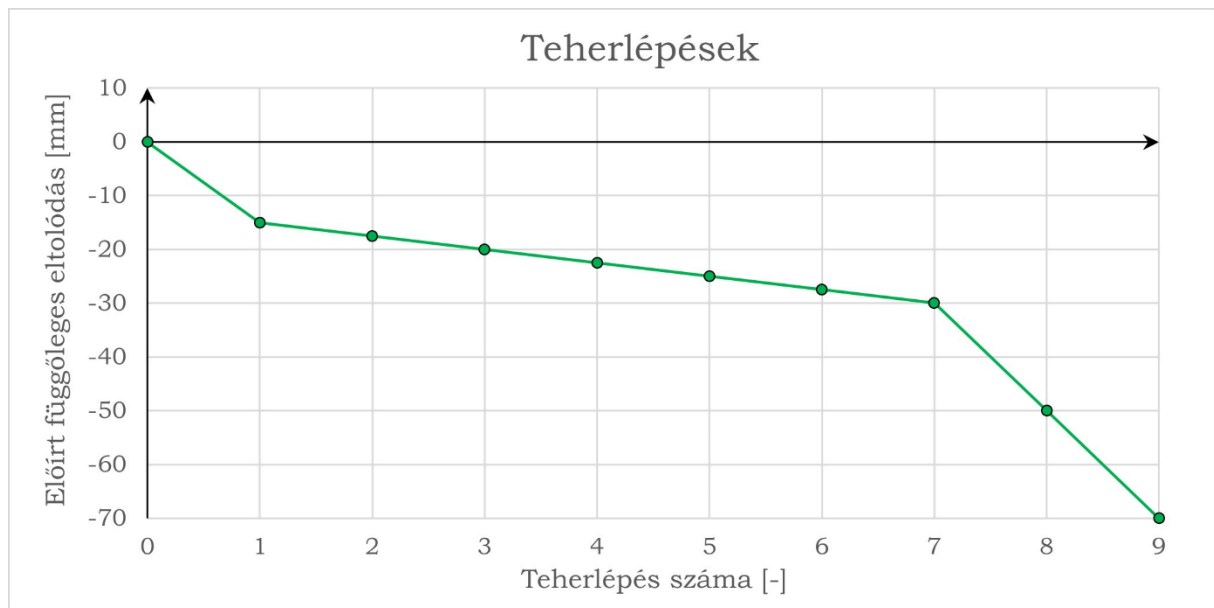
A tartóvégi támaszt szintén előírt (zérus) eltolódással lehet megadni, ezt a modell stabilitásának érdekében mind a három globális irányban megtettem. (31. ábra) A korábbiakban részleteztem, hogy a terhelést akár lehet koncentrált erőként, akár elmozdulás-kényszerként is értelmezni. Személyes véleményem szerint utóbbi sokkal univerzálisabban kezelhető, hiszen így nem kell minden szerkezeti változást követően újra megbecsülni a teherbíráshoz tartozó erőszintet.



31. ábra: a tartó elmozduláskényszereinek (támasz, teher) és a terhelő lemezek geometriai elhelyezkedése a gerenda harmadában és végén

Az terhelő keret által kényszerített elmozdulást fokozatosan, 9 lépésben helyeztem el a modellen. A rugalmas-képlékeny átmenet becsült tartományában kisebb mértékben növeltem az előírt függőleges eltolódást. A képlékenyedés lezajlását követően még 2–3 nagyobb teherlépést programoztam, azért, hogy adott esetben az egyes – szigorúbb és engedékenyebb – lehajlási korlátok

elérésekor lehessen lokális állapotokat (például feszültséget, nyúlást vagy repedést) vizsgálni. (32. ábra)

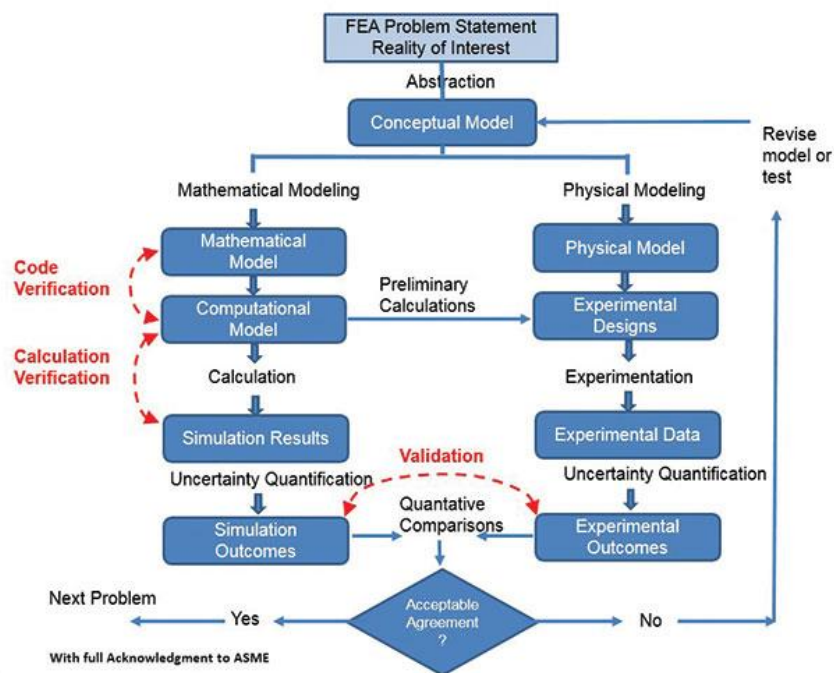


32. ábra: a terhelő lemez felső síkján definiált előírt elmozdulás

Az analízis nemlineáris, ehhez az ANSYS kezelőfelületén aktiválni kell a geometriai nemlinearitást („Large deflection”). A súrlódásos kontakt miatt a szoftver ajánlása szerint a megfelelő konvergencia biztosítása érdekében az „Unsymmetric” Newton–Raphson-módszert alkalmaztam a számítás vezérlésére.

III.4 Validáció és verifikáció

A modern technológia fejlődésével és hangsúlyossá válásával költség- és anyagtakarékosan lehet nagy mennyiségű „kísérletet” végezni vége-selemes környezetben. E vizsgálatok esetében két dolog kiemelten fontos. Először is a modell hálósűrűsége – a vége-selemes számítás közelítő mivoltából adódóan – jelentősen befolyásolhatja az eredményeket. Másodsor pedig minden modellezett szerkezet viselkedését lehetőség szerint össze kell vetni egy valós kísérlet során adott valós válasszal. A vége-selemes számítás validációja és verifikációja elengedhetetlen a levont következtetések, tanulságok helyességének igazolásához. Ebben a fejezetben a vizsgálatom tárgyát képező öszvér rácsos tartók esetében elvégzett hálóérzékenység-vizsgálatot és a viselkedést döntően befolyásoló sarkalatos modell-elemeket valós kísérleti eredményekkel történő összehasonlítását részletezem. A 33. ábra a validáció és verifikáció vége-selemes kutatásban elfoglalt helyét és összefüggéseit ismerteti.



33. ábra: a végeselemes tervezés és vizsgálat folyamatábrája, kiemelve a verifikáció és a validáció fontosságát, és a folyamatban való strukturális elhelyezkedését [K2]

Megjegyzem, hogy a *részleges kapcsolatok és különböző felső övek hatását vizsgáló kutatásomtól* [1] a jelenlegi csak a csapok geometriai kiosztásában tér el, ezért a verifikáció és validáció érvényes mindkét részprojektre.

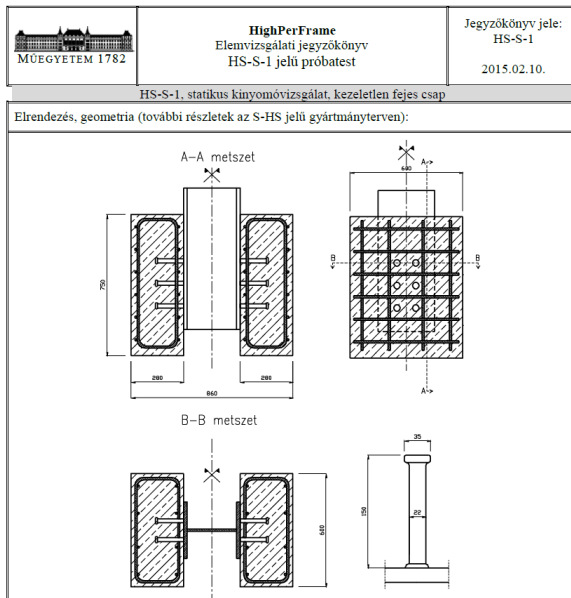
III.4.1 Validáció

Vizsgálatom esetében a validáció nem egyszerű, hiszen a korábbiakban valós körülmények között sosem tesztelt kísérleti összeállításról van szó, a 15 méteres fesztáv jelentette hatalmas lépték pedig nem is tette lehetővé a kutatássorozathoz dedikált laboratóriumi mérések elvégzését. Mivel ez az ellenőrzés kritikusan fontos az eredmények igazolásához, így alternatív lehetőségeket kerestem.

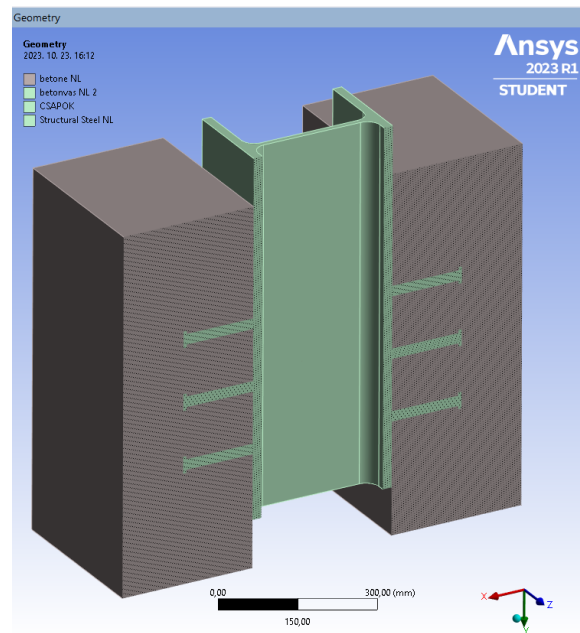
A *Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem* kutatói és a *Rutin Kft. szakemberei* [14] a nagy teljesítményű acélszerkezeteket vizsgáló kutatási program keretében számos nyírt kapcsolóelem teherbírását vizsgálták az *Eurocode 4* [15] szabvány előírásainak megfelelő kinyomókísérletekkel. A kísérletekhez részletes anyagvizsgálati jelentést is csatoltak.

A vizsgálatok közül az egyszerű, bevonat nélküli fejes csapos kialakítást a korábban ismertetett elveknek (törési és folyási feltételek, geometria, kapcsolatok, hálózás stb.) megfelelően, a szerzők által meghatározott anyagparaméterek figyelembevételével modelleztem végeselemes környezetben. A

kísérleti összeállítást a felépített végeselemes modell mellett a *kutatás részjelentésének 6A mellékletében* [16] közölt jegyzőkönyv-részlet segítségével a 34. ábrán szemléltettem.



a) kísérleti geometria [16]



b) végeselemes modell metszete

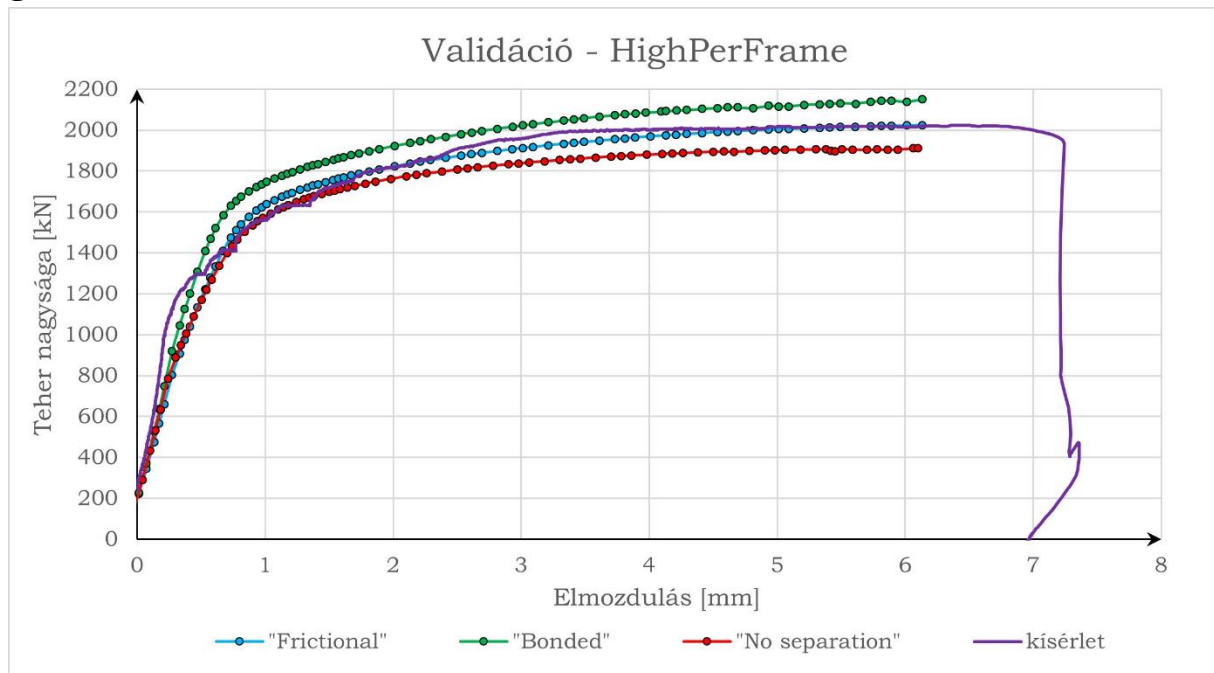
34. ábra: a validációs vizsgálat geometriája és modellje

A kinyomókísérletek validációs alapnak választása jelen esetben egy kiegészítő előnnyel is jár: a vizsgálatot eleve nyírt síkonként 6–6 csoportosított csappal végezték, így a kapcsolóelem egyedi viselkedése mellett a csoportos válasza is igazolást nyer.

A végeselemes futtatást az *Eurocode 4* [15] terhelési protokolljának megfelelően a 25 előterhelési ciklus beiktatásával végeztem el. A valós kísérleti eredményeket és a különböző kapcsolati elemekkel ellátott numerikus szimulációkat összehasonlító grafikont a 34. ábra szemlélteti. Az előterhelési ciklusok feltüntetése fölösleges többletinformáció, ezért kizárólag a kinyomó szakasz görbéit tüntetem fel.

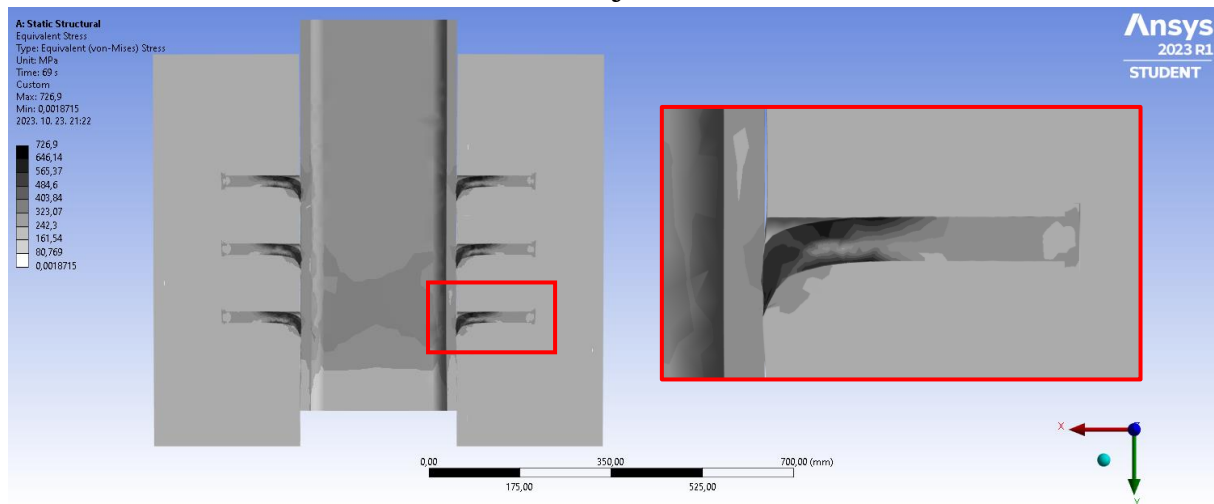
A lila görbe a fizikai kísérlet eredményét mutatja. A fejes csap és beton határfelületén definiált bármelyik kapcsolati modell tökéletesen közelíti a kezdeti merevséget, a képlékeny plató tartományában azonban már jelentkezik differencia köztük. A legpontosabb eredményt a valós súrlódást feltételező variáns adta; a plasztikus tartományban tized százalékban mérhető eltérést produkál. A súrlódási együttható értéke ez esetben 0,7; az eredmények realitása

pedig szemrevételezéssel is megállapítható: a tényező növekedésével („No separation” kapcsolatnál zérus, „Bonded” esetben pedig végtelen) nő a szerkezet globális teherbírása is.



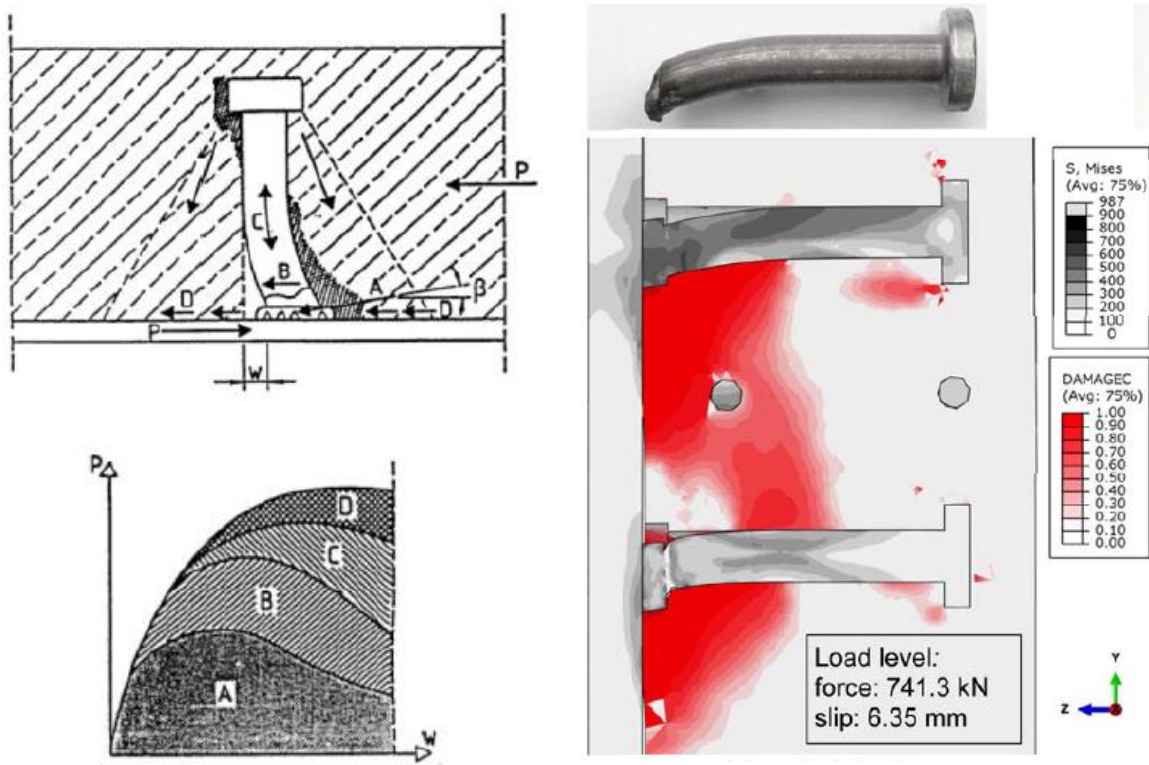
35. ábra: a validációs vizsgálat eredményei [1]

A másik lehetőség a viselkedés vizuális validálására a csapok deformált alakjának összevetése a kísérletről készült fényképekkel, vagy azok hiányában szakirodalmi forrásokkal. A 36. ábrán a kinyomókísérlet tönkremenetel-közeli állapotában jelenítettem meg a von-Mises feszültségeket. Ennek praktikus oka az, hogy az egyes pontok deformáció szerinti színezése nem jelezne vizuális különbséget a csapok és a beton elmozdulása között, mivel érintkezésük (a nyomott oldalon) a terhelés kezdetétől végéig folytonos. A feszültség megjelenítése a deformált alakon azonban kifejezetten szemléletessé teszi az ábrát.



36. ábra: a csapok deformációja a végeelemes validációs modellen

A 37. ábrán a csap tönkremeneteli állapotának egy klasszikus sematikus ábrázolása és egy valós kísérleti elem, valamint az azzal párhuzamosan futtatott végeselemes modell tekinthető meg.



a) fejes csap teherátadási módja és deformált alakjának sematikus rajza [17]

b) kísérleti csap deformált alakja és az adott kísérlettel párhuzamosan futtatott végeselemes eredmény [18]

37. ábra: a csapok deformációja szakirodalmi források alapján

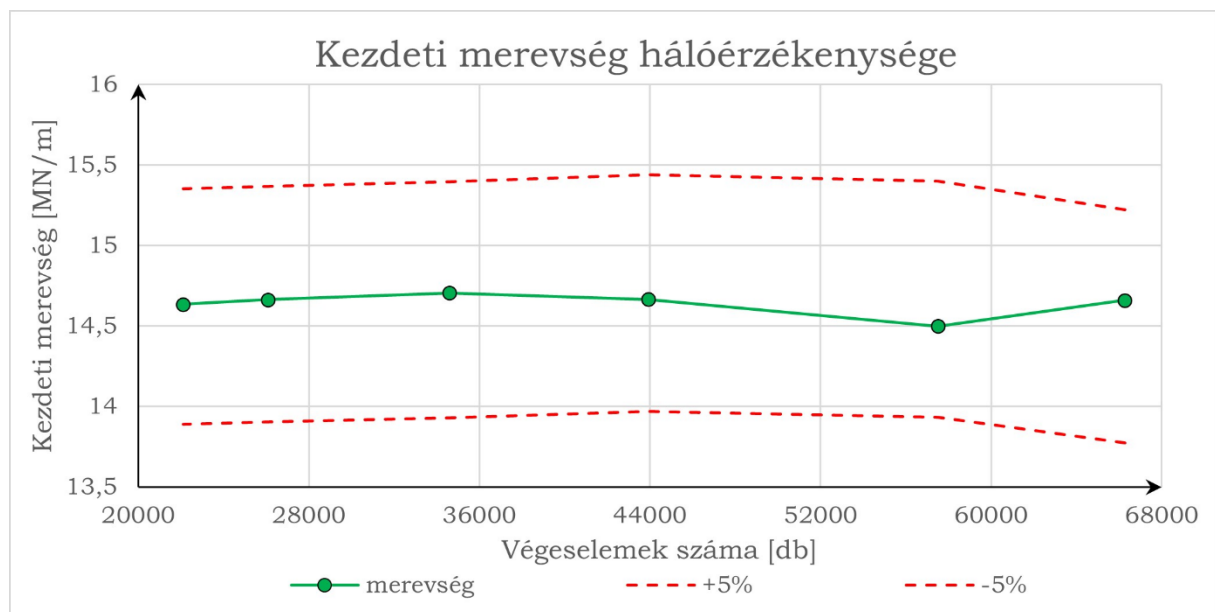
A két ábra összevetése során kiváló egyezést lehet felfedezni saját végeselemes validációs modellem és a szakirodalmi forrásokban feltüntetett elméleti és gyakorlati deformált alakok között. Ezzel a kutatásomban felhasznált modell legkritikusabb szegmensének viselkedését valósághoz hűnek, tehát megfelelőnek ítélem meg.

III.4.2 Verifikáció

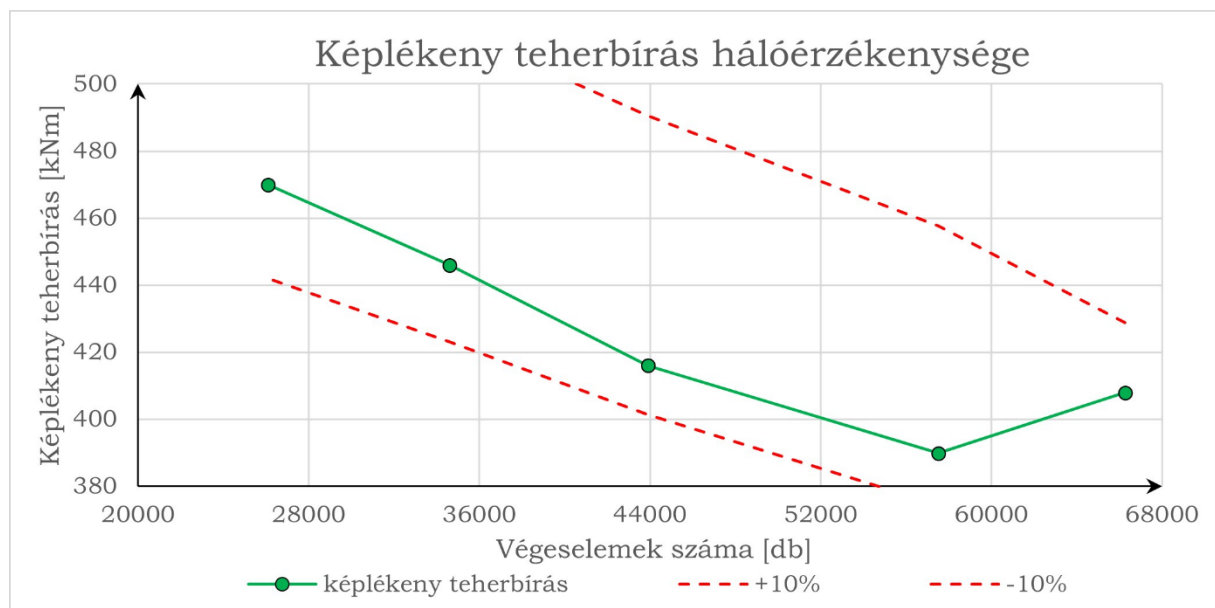
A legnagyobb alakváltozásokat tartalmazó variáns hálóérzékenység-vizsgálata tökéletesen kimeríti a végeselemes vizsgálat verifikációra vonatkozó követelményeit, hiszen az elégtelen hálósűrűség az ilyen esetekben okozhat nagyobb valószínűséggel az eredményeket jelentősen befolyásoló hibát. Ezt már korábban [1] is megtettem; mivel a legkevesebb csapot tartalmazó két

alapmodell szinte azonos, így a korábban verifikált hálóparaméterek jelen esetben is kellően pontos eredményre fognak vezetni.

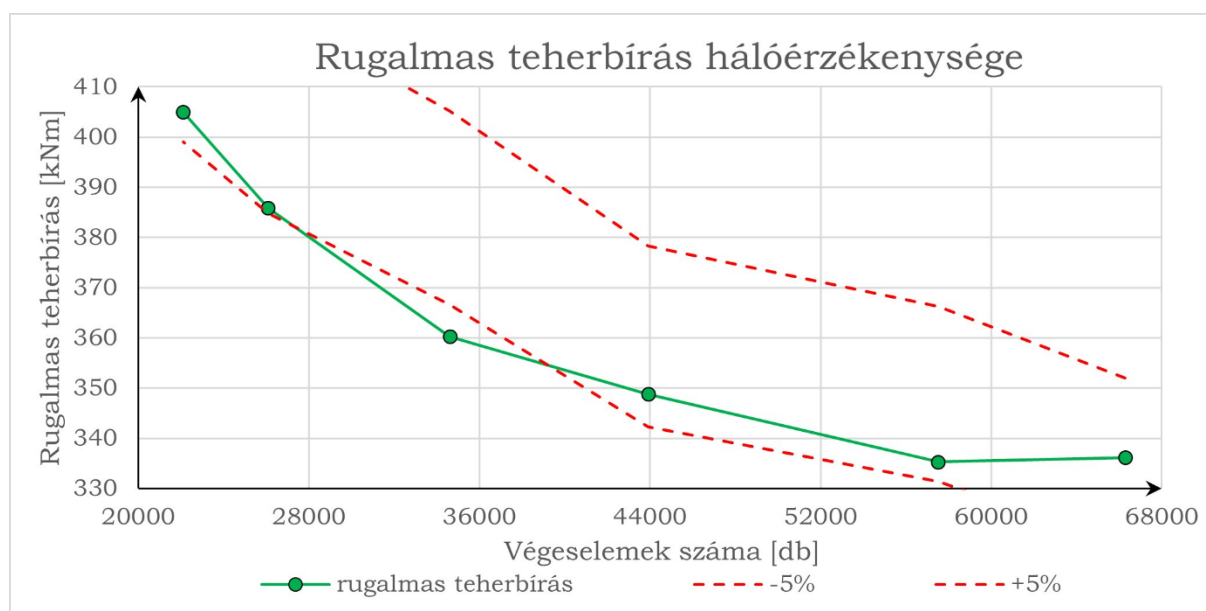
A 38–40. ábrák a konvergencia-vizsgálat eredményét közlik. A feltüntetett korlátok (5% és 10%), csak iránymutatásként szolgálnak, a grafikonok alapján szabad szemmel is megállapítható, hogy 57506 elem esetén további elemek hozzáadása (a háló sűrítése) az egyes paramétereket tekintve nem jár már számottevő változással. A hálóérzékenység-vizsgálat paramétereit a 2. táblázat ismerteti.



38. ábra: kezdeti merevség hálóérzékenysége [1]



39. ábra: képlékeny teherbírás hálóérzékenysége [1]



40. ábra: rugalmas teherbírás hálózérékenysége [1]

A tábla magyarázatot ad a képlékeny teherbírás konvergenciájának két némiképp szerencsétlen aspektusára. Az első ilyen, hogy nagyon kis elemszám esetén numerikus hiba miatt nem konvergált a modell, a rugalmas-képlékeny átmenet tartományában ezért a számítás megakadt. A másik ilyen, az első sorban dőlt betűvel jelölt két paraméter következménye: a háló fokozatos, mindegyik szegmensre kiterjedő sűrítése a szoftver diákklicencének elemszám-korlátja miatt ebben a lépésben már nem volt kivitelezhető, így a csapok és a beton estében alkalmazott kisebb élhosszra törekvésnek az acél elemek látták kárát. Ettől függetlenül ez a minimális „visszapattanás” nem jelent különösebb gondot, körülbelül 57000 elem alkalmazása kellően pontos eredményt kínál.

#	elem-szám [db]	eredmények			elemek átlagos élhossza			
		merevség [MNm/m]	rugalmas teherbírás [kNm]	képlékeny teherbírás [kNm]	beton [mm]	acél (AÖ+RR) [mm]	acél (FÖ) [mm]	csap [mm]
1	66268	14,66	336,1	407,9	60	120	35	8
2	57506	14,49	335,2	389,8	65	100	25	10
3	43911	14,66	348,7	416,3	75	110	45	15
4	34598	14,70	360,2	446,7	85	120	65	20
5	26080	14,66	385,8	470,2	95	140	85	25
6	22093	14,63	405,1	<i>*hiba*</i>	100	200	120	35

2. táblázat: hálózérékenység-vizsgálat paramétere

Ehhez kiegészítésképpen hozzáteszem, hogy a csapok számának növelésével a végeselemek száma is nő, erre leginkább a beton átlagos élhosszának

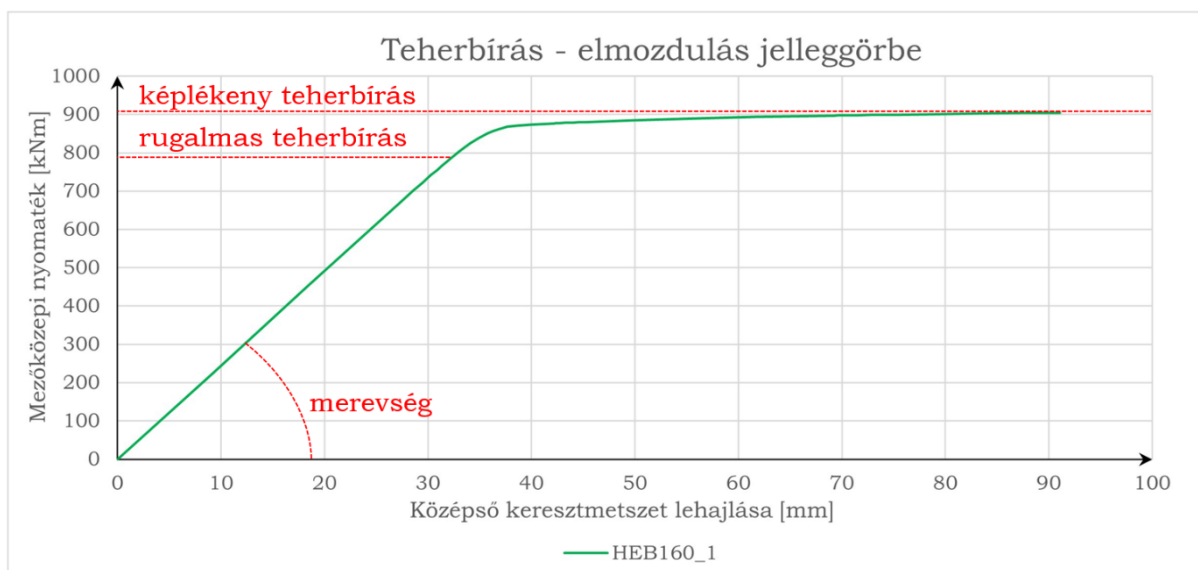
növelésével lehet lehetőséget biztosítani, ez azonban nem okoz kellemetlenséget, hiszen az ebből származó végelelemszám-nyereség a zavart zónáktól távol realizálódik (ezzel párhuzamosan a csapok közelében pedig sokkal több elem keletkezik, ami kifejezetten kedvező).

IV. Eredmények

Az előző fejezetben részletesen tárgyaltam a végelelemes vizsgálat körülményeit, részleteit, valamint igazoltam a felépített modell konstrukciós elveit és bevitt paramétereit, így a következő szakaszban ismertetett eredmények a lehetőségekhez mérten a lehető legjobban tükrözik a valóságot.

IV.2 Globális viselkedés

Az eredmények közlésénél először az öszvér rácsos tartó – mint komplex egység – globális válaszát elemzem soronként kettő, illetve három elhelyezett csap alkalmazása esetén. Mielőtt a szerkezet viselkedésére rátérnék, az adott állandó paraméterek mellett általánosan kialakuló igénybevétel-lehajlás jelleggörbét mutatom be a 41. ábrán a három kitüntetett mennyiség megjelölésével.

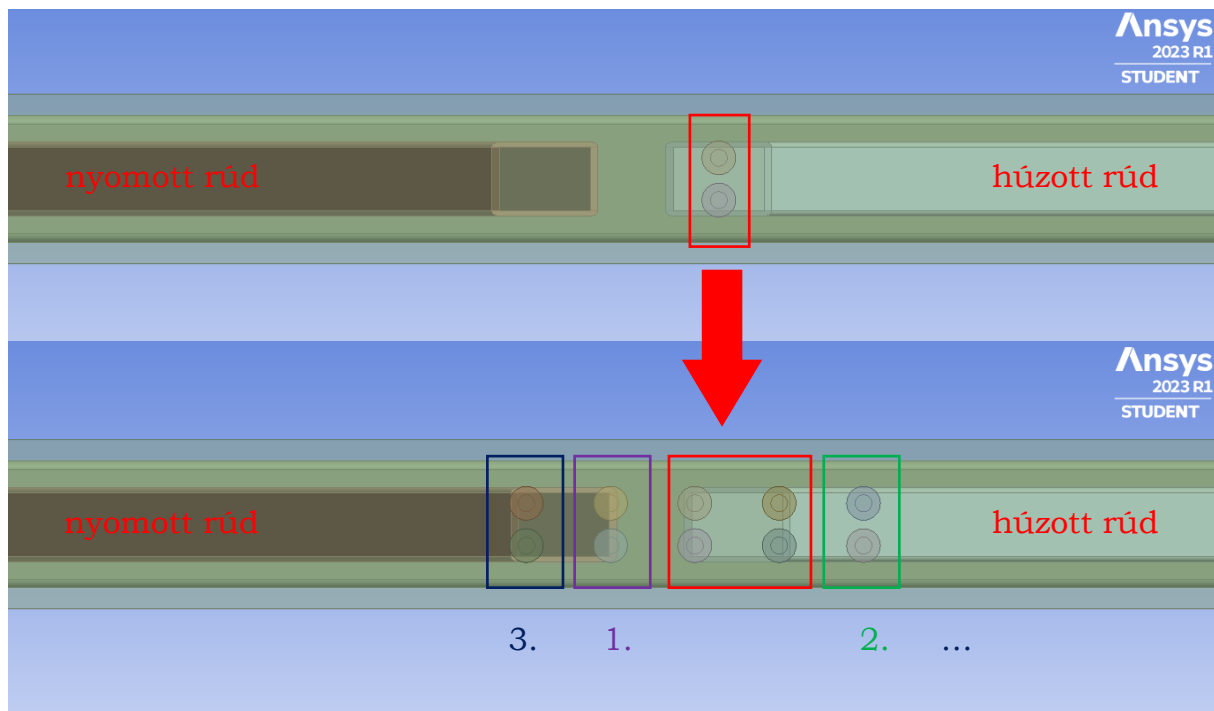


41. ábra: teherbírás-lehajlás jelleggörbe az állandó paraméterek által teremtett körülmények között vizsgált öszvér rácsos tartó esetén [1]

A rugalmas teherbírást a lineáris rugalmas szakasz végpontja, míg a képlékeny teherbírást a plasztikus tartományon egyre inkább vízszinteshez tartó görbe határértéke adja. A szerkezet kezdeti merevsége az elasztikus intervallum meredekségét jellemzi, kutatásaimban általában kNm/m vagy MNm/m mértékegységgel társítva. Ez kiválóan szemlélteti a definíció jelentését:

tökéletesen rugalmas szerkezet esetén 1 méter mezőközei lehajlás ekkora nyomatéki igénybevételt indukálna a szerkezetben. Mivel vizsgálatomban számos adatfelvételi modellt alkalmaztam, az igénybevétel-lehajlás görbék közlése helyett e három fő jellemzőt fogom ábrázolni a csapok számának és elrendezési módjának függvényében. Ez 1 darab 1-es, 6 darab 2-es és 5 darab 3-as elven tömbösített, összesen 12 darab modell eredményei alapján fog történni.

A nyírt kapcsolóelemek elhelyezésének és bővítésének módszerét a 42. ábrán felülnézetben ismertetem. Egy sor csap közvetlenül a csomópontba kapcsolódó húzott rácsrúd tengelye fölé kerül; kétszer ennyi elem esetén a csapkép központja kerül oda, ezt követően pedig minden további páros először a tartó hossz tengelye szerint értelmezett külső oldalra, majd a belső oldalra kerül és így tovább.

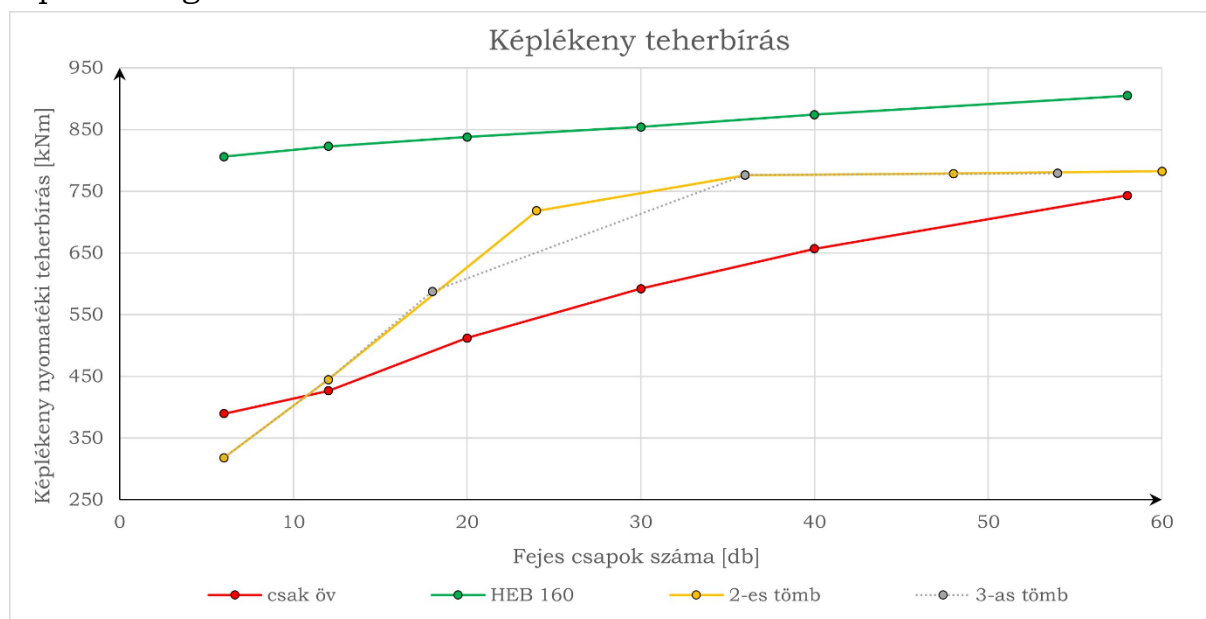


42. ábra: a csapok bővítésének módszere; az ábra alsó részén az 1, 2, 3 sorszámok a 2×2 tömbhöz további sorok rendelésének sorrendjét jelentik

A definíciók és a paraméterbővítési elvek ismertetését követően a 43. ábrán a leglátványosabb globális eredményt, a képlékeny teherbírás alakulását ábrázolom a nyírt kapcsolóelemek számának függvényében. Mint azt az előkészítő tanulmányban jeleztem, *korábbi kutatásom* [1] során létrejött, *II.2.2 pontban* bemutatott adatsorokat fogom összehasonlítási alapként felhasználni.

A grafikon a csoportosított geometria jelentős – bizonyos pontokon majdnem 200 kNm (~28%) mértékű – többlet-teherbírásáról tanúskodik. Az

összefüggés tulajdonképpen bilineáris, de ez csak annak köszönhető, hogy a tömbösített kialakítás teherbírás-csapszám függvénye meredekebb (de továbbra is lineáris), így sokkal hamarabb eléri a képlékeny állapotban fellépő csúsztatóerő felvételéhez szükséges nyírási kapacitást. Ekkor a két szerkezeti rész között a teljes együttdolgozás megvalósul, tehát a plasztikus teherbírás a teljes inhomogén keresztmetszetre jellemző nyomatéki ellenállás értékében állapodik meg.



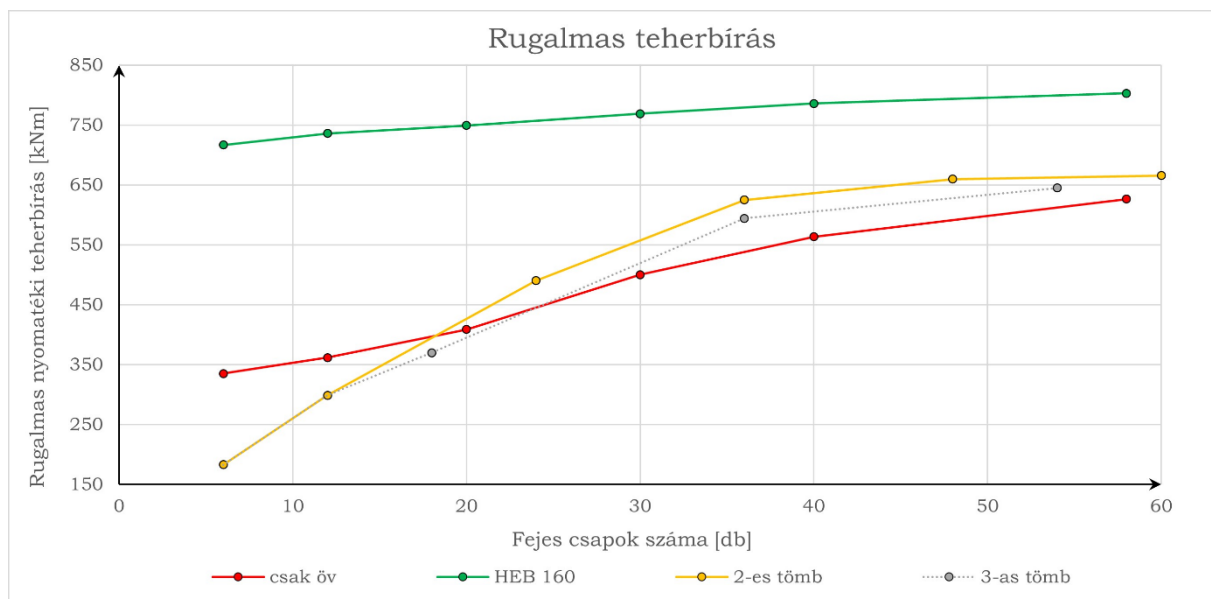
43. ábra: képlékeny teherbírás egyenletesen kiosztott és tömbösített csapozás esetén

Az adott csapszám mellett felvett extra hajlítónyomaték hatalmas fegyvertény, legfőképp amiatt, hogy mindezt pusztán a csapok kedvezőbb alaprajzi elhelyezésével értem el. A magyarázat a grafikon alapján természetesen nem magától értetődő, ehhez a lokális állapotokat is elemezni kell. További érdekes és kifejezetten fontos megállapítás, hogy a laposacél keresztmetszetű felső övvel szerelt acélrácsból készült, csoportosított kapcsolóelemekkel rendelkező öszvér rácsos tartó ellenállása megközelíti a HEB160 alkalmazása esetén potenciálisan felvehető maximális hajlítónyomatékot (zöld görbe).

Az ábra alapján egy dolog nyilvánvaló: a hossz tengely irányában egy vonalban kialakított kapcsolat esetén a teherbírás függ a húzott rácsrudakhoz viszonyított pozícióktól. A két görbe hat csaphoz tartozó pontja között kizárólag geometriai különbség lehet fel. A piros esetben egyenletesen osztottam el a nyírt kapcsolóelemeket, míg a sárga összefüggés első adatpontja a 42. ábra első része alapján célzottan a húzott rácsrudak felé helyezett kapcsolatokat

által befolyásolt globális viselkedést reprezentálja. Az utóbbihoz tartozó kisebb teherbírási érték egyértelműen alátámasztja, hogy a csapokban keletkező jelentősebb húzó igénybevétel csökkenti a csapkép által felvehető csúsztatóerőt, ezzel együtt pedig a teherbírást is. A jelenség leírására, a lokális hatások figyelembevételére a következő fejezetben térek ki.

A 44. ábra a hajlítónyomaték-lehajlás-diagramok lineárisan rugalmas szakaszának végértékeit veti össze. Az öszvér rácsok rugalmas méretezése értelemszerűen feszültségeloszlás-alapon történne, így ezeket az összefüggéseket leginkább csak szemléltetés céljából közlöm. Az öszvér rácsos tartók elasztikus tervezése egy teljesen külön felépített kutatás témájául szolgálhatna. Gyakorlati alkalmazására minden bizonnyal hídszerkezetek esetén lenne nagy igény, a speciális méretezési igények miatt kutatássorozatomban erre nem térek ki.

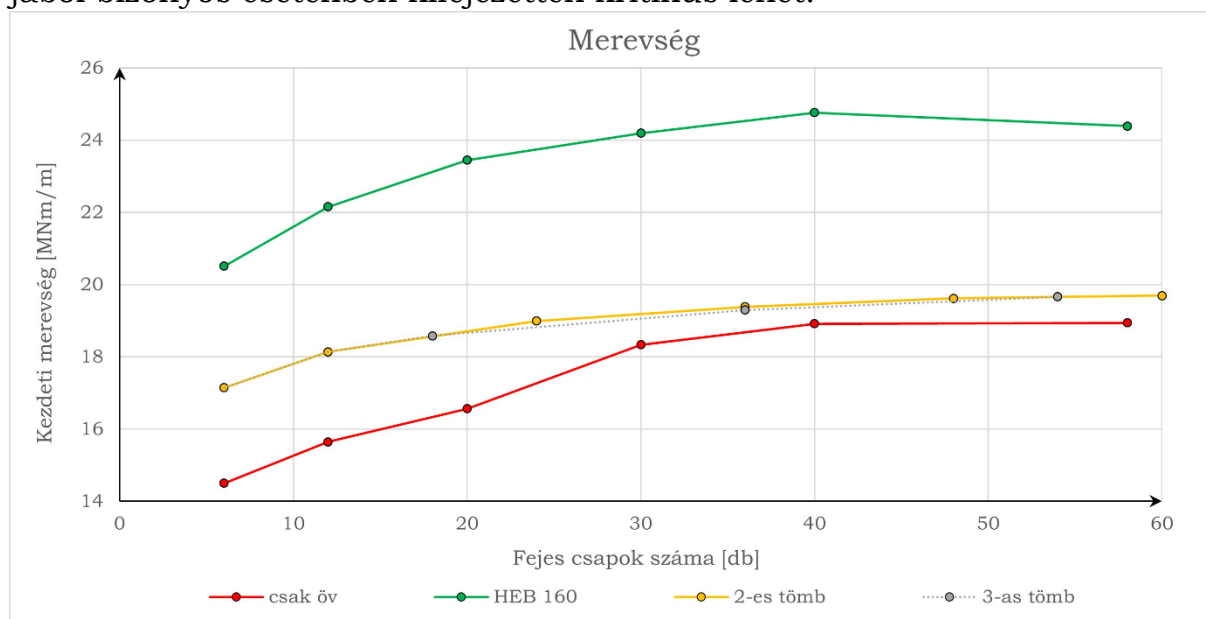


44. ábra: rugalmas teherbírás egyenletesen kiosztott és tömbösített csapozás esetén

Annyit mindenesetre ki lehet jelenteni, hogy ebben a szegmensben is jelentkezik szemmel látható, de a képlékeny teherbírás változásához nem viszonyítható többlet. Az igénybevétel-elmozdulás összefüggés szempontjából ez azt jelenti, hogy a terhelőerőből származtatott belső erő skáláján értelmezett átmenet nagyobb tartományt ölel fel.

A kezdeti merevség terén nem okoz számottevő különbséget a fejes csapok csoportosítása (maximum 12% differencia adódik). A 45. ábra ezt a tényt támasztja alá. Korábbi kutatásom [1] során már megállapítottam, hogy a lineáris szakasz meredeksége függ a kapcsolóelemek számától és a felső öv

kialakításától is. Előbbi függvényében közel egymásra illeszthető görbék alakulnak ki az egyes szelvények alkalmazása esetén, azonban a függőleges tengely irányában eltolva. Ez arra engedett következtetni, hogy a különbség kizárólag az acélrács merevségének változásából adódik. A 45. ábrán közölt grafikon alapján ez a tézis kiegészíthető: a csapok kedvezőbb elhelyezése javíthatja a szerkezet globális merevségét, amely a lehajlási korlát kielégítése szempontjából bizonyos esetekben kifejezetten kritikus lehet.



45. ábra: kezdeti egyenletesen kiosztott és tömbösített csapozás esetén

A globális viselkedést a fejezetben bemutatott három jellemző írja le, a vizsgálat e részét akár lezártnak is lehetne tekinteni, azonban egy fontos jelenségről még nem esett szó: ez a soronként kettő, illetve három elhelyezett csapra épülő szerkesztési elv közti különbség elemzése.

A hármas tömbösítést jellemző görbék áttetsző (szürke szín, szaggatott vonal) jelölésmódja a kettes csoportosítással közel azonos viselkedésre, az adatsorok egymásra illeszthetőségére utal. A képlékeny teherbírás esetében pontosan ugyanaz a kvázi-bilineáris összefüggés adódik. A „lecsípett sarok” magyarázata pusztán az, hogy csomópontonként ugyanannyi csapot tartalmazó tömbök esetén 18 és 36 közötti értelmezési tartományon nem keletkezik adatpont.

A rugalmas teherbírásban tapasztalható eltérés a két szervező elv alkalmazása között, de ez egyik ponton sem haladja meg az 5 százalékot, így ebben az összevetésben is körülbelül azonosnak tekinthetők. A 45. ábra tanúsága

szerint a merevség sem függ kifejezetten a csoportosítás milyenségétől, így öszszességben kijelenthető, hogy a vizsgálati környezet jelenlegi állandó paramétereit mellett számottevő előny nem származik a tömbök 3-as elvű kialakításából. Ez természetesen nem azt jelenti, hogy ne lenne elképzelhető olyan globális geometria, amelynél soronként kettőnél több fejes csap alkalmazása jelentősen kedvezőbb kialakítást eredményezne. Az öszvér rácsok esetében egyébként a csapok kiosztására nincs előírás az *Eurocode-ban* [15].

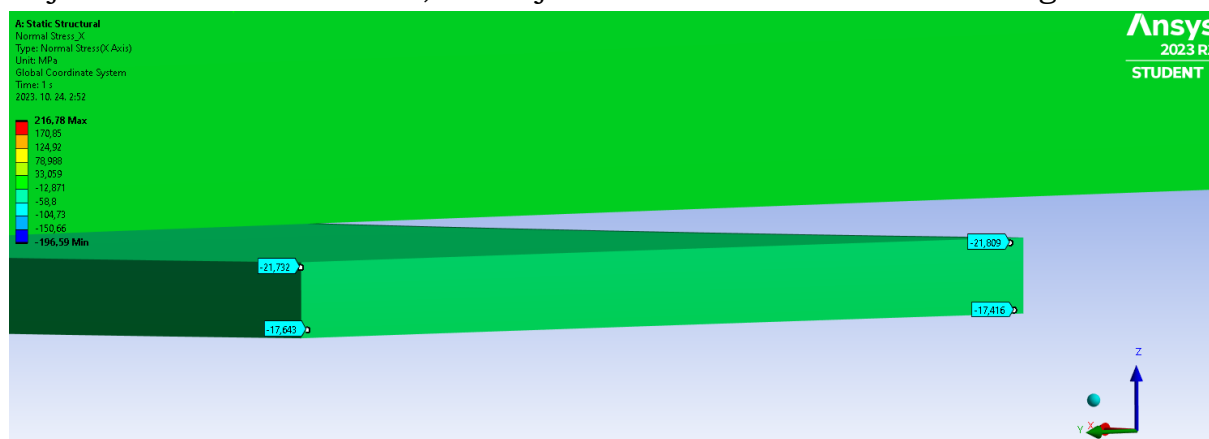
IV.2 Lokális jelenségek

A lokális viselkedések vizsgálatának keretében két kérdésre keresek választ. A laposacél öv csomópontok közti kihajlásának tulajdoníthatóan hamar kiszáll a teherviselésből. Ebből fakadóan érdemes lenne a tömbök között elhagyni, hiszen e kapcsolati kialakításban kizárólag a beton vesz fel hatékonyan nyomást. A másik kérdés a fejes csapok csoportosítása globális válaszra gyakorolt hatásának magyarázatára irányul.

IV.2.1 A laposacél felső öv kihajlása

Az öszvér rácsos tartó acél felső övének redukálása eleinte a nyírt kapcsolat hangsúlyossá tételét célozta, de „mellékhatásként” lehetővé tette olyan kialakítási lehetőségek alkalmazását, amelyben a beton nyomással szembeni előnyös viselkedését úgy tudjuk kihasználni, hogy a vasbeton lemez önmagában felel a hajlításból származó nyomóerő felvételére. Ez a tény jelentősen elősegíheti az anyagtakarékosság irányába tett erőfeszítések realizálását. A laposacél elhanyagolható erőtani hatását a 46. ábra segítségével támasztom alá.

A stabilitásvesztés nagyon hamar, már 10–15 milliméter mezőközépi le-
hajlás esetén bekövetkezik; a kihajláshoz tartozó kritikus feszültség az ábráról



46. ábra: laposacél felső öv normál feszültségi értékei a kihajlás pillanatában

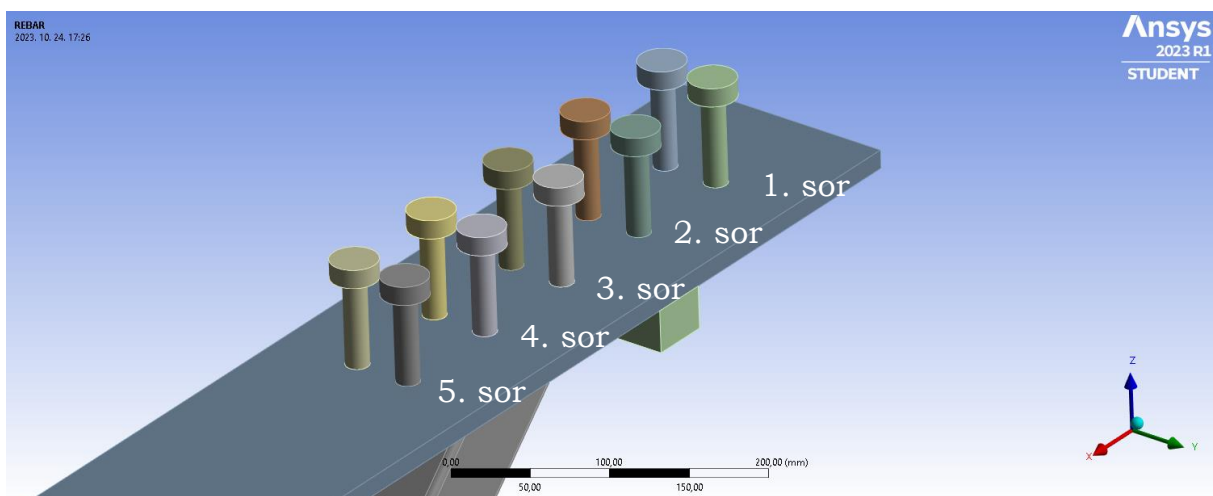
leolvasható értékek átlagolásával nagyjából 20 MPa-ra becsülhető. Ez a keresztmetszeti területre vetítve mindössze 40 kN nagyságú erőt jelent, ami a képlékeny semleges tengely közelségét is számításba véve a tartó nyomatéki teherbírása szempontjából valóban elhanyagolható hatást feltételez. E tézist igazolja továbbá az is, hogy semelyik igénybevétel-eltolódás összefüggésben nem következik be számottevő törés vagy ugrás.

IV.2.2 A csapok feszültségállapotának globális vonatkozásai

A Huber–Mises–Hencky-féle folyási feltételből következik, hogy a csapok talpfelületén a folyáshatár elérése jelentősen nagy húzófeszültség esetén minimális nyírófeszültség esetén is bekövetkezhet. Ennek alapján feltételezem, hogy a nyírt kapcsolóelemek lokális feszültségállapota és a globális szerkezeti válasz szoros kapcsolatban van, ezért ebben a fejezetben ezt a kölcsönhatást vizsgálom.

A hipotézis igazolásához először meg kellett vizsgálnom, hogy az adott erőtani állapotban elegendő-e csupán a húzó és a nyíró hatást számításba venni. Ehhez az ANSYS által a kiválasztott csapok talpmetszetében kiszámolt normál- (σ) és nyírófeszültségek (τ) mellett a von-Mises összehasonlító feszültséget is lekértem. Utóbbit a szoftver természetesen az összes komponens figyelembevételével kalkulálja. A síkbeli feszültségállapotra vonatkozó folyási feltételből (4.1) kiszámítottam az egyes teherlépésekre vonatkozó „közelítő” von-Mises feszültséget, és összehasonlítottam a szoftverből kinyert értékekkel.

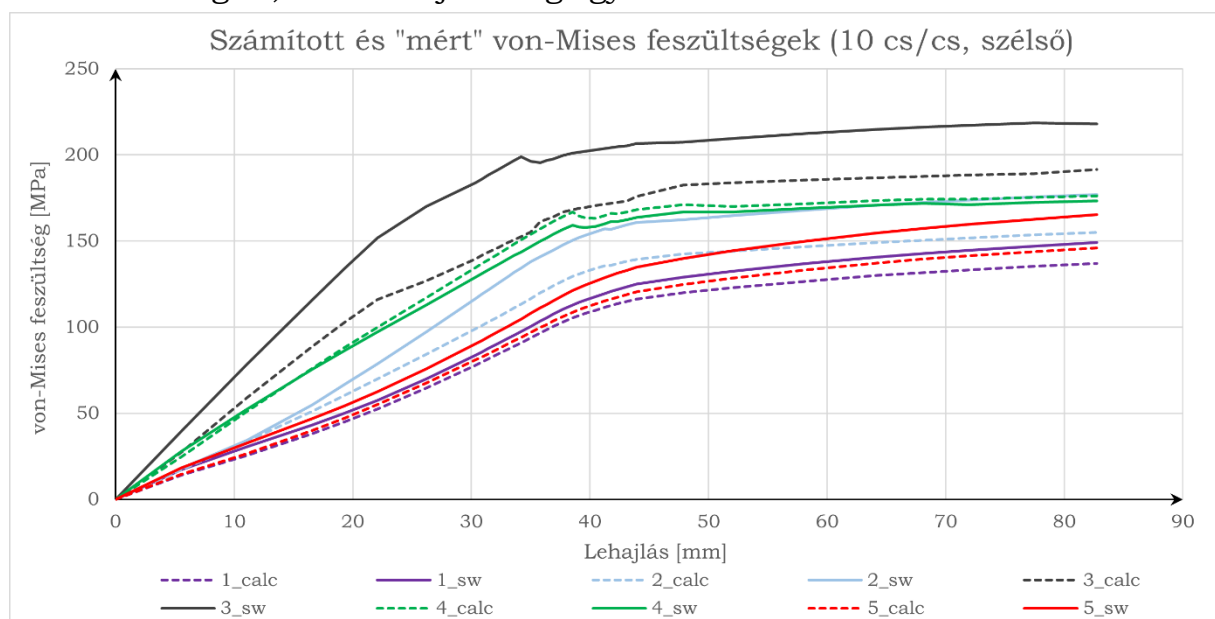
$$f_y = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2} \quad (4.1)$$



47. ábra: a vizsgált tömb csapsorainak számozása

A húzás és nyírás interakciója egyértelműen a tartóvégi csomópontban mértékadó, hiszen a csúsztatóerőből származó eltolódás itt a legnagyobb, valamint a szélső rácsrúdban ébredő normálerők is jelentősen nagyobbak, mint a beljebb helyezkedő rudak esetén. (47. ábra)

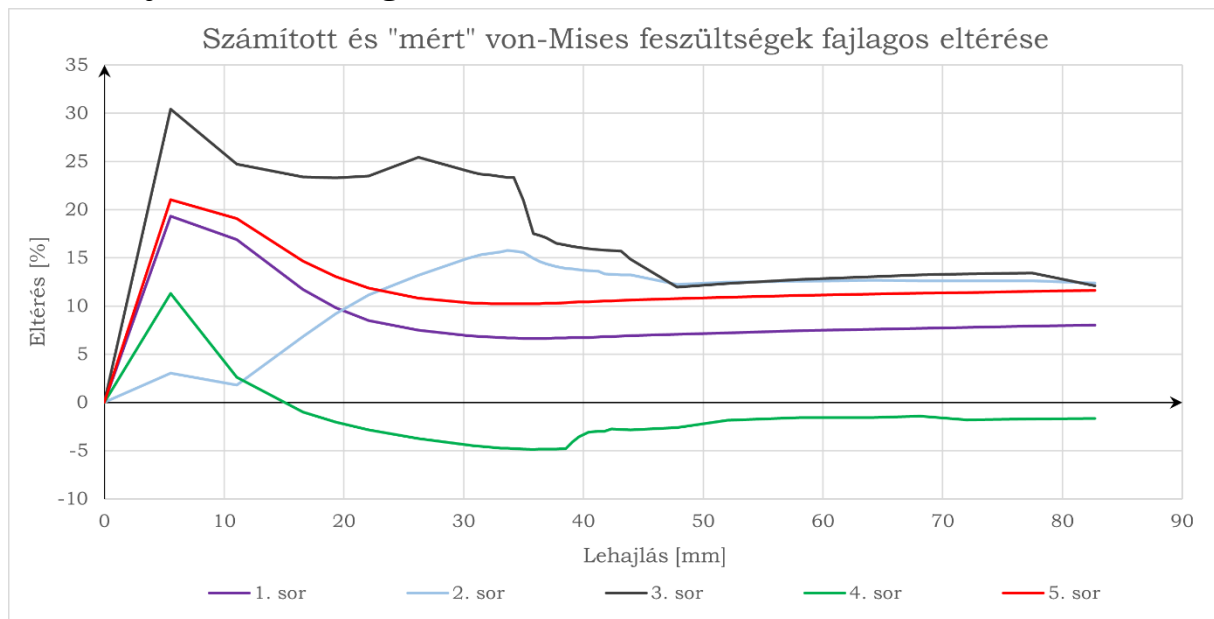
A kritikus tömb két komponensből kalkulált, valamint a végeelemes futtatásból lekért von-Mises feszültségeinek összehasonlítását a 48. ábrán szemléltetem. A grafikon a sok csapcsoport miatt némiképp zsúfolt, de kiválóan bemutatja, hogy egy csapcsoport esetében az eltérés e mennyiségek között akár a 35 százalékot is meghaladhatja. Az ábra elsődleges célja nem természetesen nem kizárólag ez, hanem a jelenség egyszerűsítésének validálása.



48. ábra: szélső tömb csapjainak talpfelületén kialakuló – „sw” – és két komponensből számolt – „calc” – von-Mises feszültségek, 5×2 elem esetén

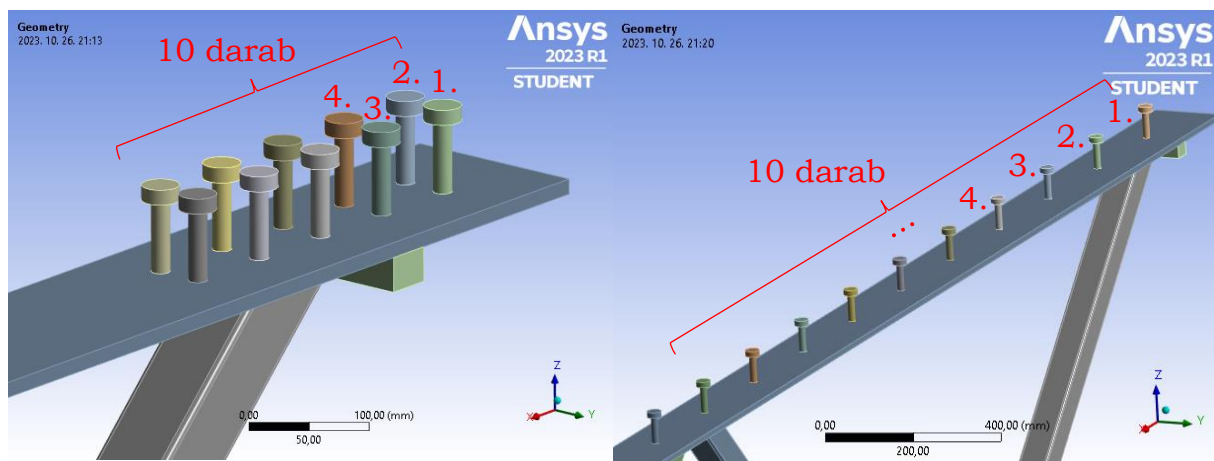
A szemléletesebb megjelenítéshez az egyes sorok esetében a lehajlás függvényében kiszámoltam a százalékos értéket a szoftver által „mért” („sw”) és a (4.1) képlet alapján meghatározott („calc”) érték között. Az összevetést a 49. ábra tartalmazza. Az eltérés eleinte zavaros, ingadozó az egyes csapok esetén, azonban körülbelül 45 milliméter lehajlást követően állandósul. A differencia ráadásul nem kirívó – a végérték mindegyik sor esetében 14% alatt marad. Ez a részfeladat célkitűzése és körülményei mellett elfogadható. A különbség a két módszer között négy további komponens figyelmen kívül hagyásából adódik; e feszültségi értékek közül némelyik akár drasztikus (30–50 százalékos) megváltozása minden valószínűség szerint 3–5 százalékpontnál nagyobb mértékben nem növelné az eltérést. Ez azt jelenti, hogy az egyszerűsítés messze

nem rontja annyival a pontosságot, mint amekkora könnyebbséget jelent; a differencia a viselkedés megértéséhez és leírásához, vagyis a feladat célkitűzésének teljesítéséhez elfogadható korlátok között marad.



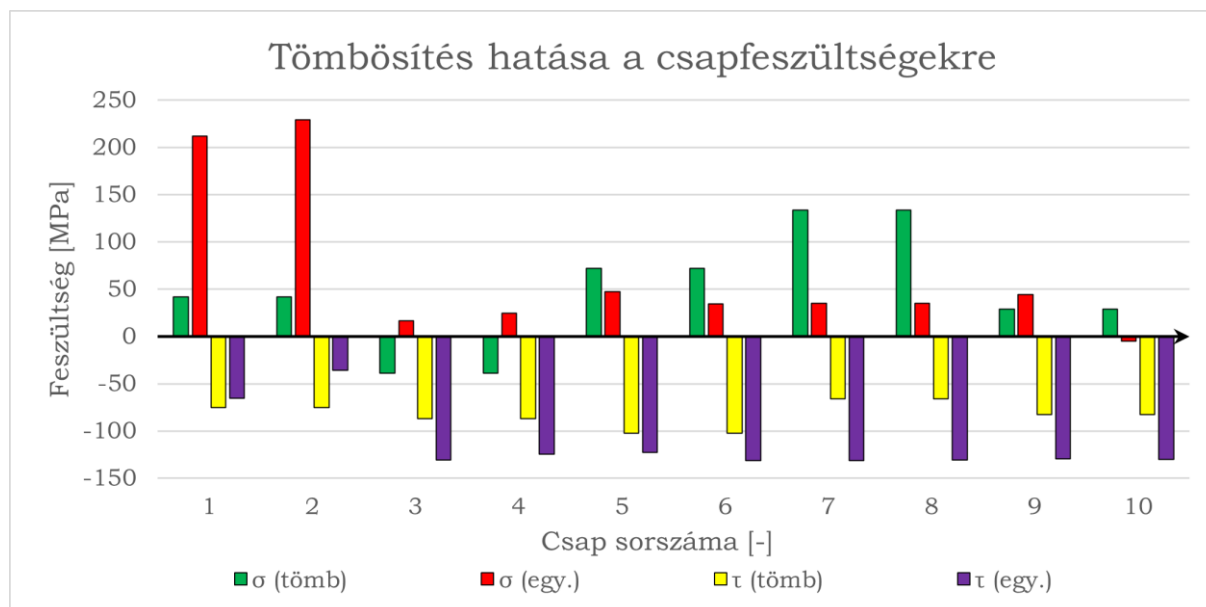
49. ábra: százalékos eltérés a két komponensből számolt eredmények és a modellből exportált feszültségek között az egyes csapsorok esetében

A lokális vizsgálat esetében is a tömbösített viselkedést vetem össze az egyenletes csapkiosztás által befolyásolt szerkezeti válasszal. Mint azt a fejezet elején említettem, a nyírás és húzás szempontjából egyaránt mértékadó tömb a tartóvégi. Vizsgálatomban e csoportot, valamint az azonos számú csapot tartalmazó, egyenletes kiosztással rendelkező variáns tartóvégtől számított azonos mennyiségű kapcsolóelem viselkedését hasonlítom össze. Tehát például az 5×2 -es szervezőelv által generált szélső tömböt (összesen 60 csap) esetén az 58 csapos egyenletes kiosztás támaszhoz legközelebb eső 10 elemével hasonlítom össze. (50. ábra)



50. ábra: a lokális vizsgálat során összevetett csapok a különböző kiosztások esetén

Utóbbi esetében ez nagyjából a rácsrudak által meghatározott első osztásközt foglalja magában, magyarul az eredményeket nem torzítja két helyen jelentkező lokális húzás. A 51. ábra a példaként felhozott esetben szemlélteti az egyes csapokban kialakuló feszültségeket.



51. ábra: a 10 összehasonlított csapban kialakuló nyíró- és húzófeszültségek

Az egy sorban lévő csapok esetében a feszültségek értelemszerűen meg-egyeznek. Bár az összehasonlított két esetben azonos számmal jelölt csapok akár távol is elhelyezkedhetnek egymástól, a grafikon kiválóan rávilágít a tömbösítés lokális szinten jelentkező előnyére: a húzott rácsrúd okozta lokális erő-bevezetés sokkal jobban eloszlik a csapok között; a csoportosított elrendezés esetében fellépő maximális átlag-húzófeszültség (#7 és #8) kétharmada a másik esetben kapott értéknek (#1 és #2). Ezzel párhuzamosan a zavarás helyén (tömb, #7 és #8) e kapcsolóelemek talpsíkján létrejövő nyírófeszültség sokkal kisebb mértékben csökken a szomszéd értékekhez képest, tehát ezzel bizonyítottnak tekinthető a feltételezés, ami szerint a húzás jelenléte befolyásolja a csúsztatóerő felvételét.

A fejezet és egyszersmind a dolgozat utolsó megválaszolatlan kérdése, hogy e dominánsan eltérő lokálisfeszültségállapot milyen összefüggésben van a szerkezet teljes egészének viselkedésével. A javaslatom szerinti összefüggés alapja a tíz csap alapján átlagolt nyírófeszültség (τ) és a von-Mises összehasonlító feszültség (σ_{VM} , 4.1) két komponensből kalkulált értékének összehasonlítása (4.2).

$$\eta = \frac{\tau}{\sigma_{VM}} \quad (4.2)$$

A két mennyiség arányszámát meghatároztam egyenletes csap kiosztás és tömbösített elrendezés esetén egyaránt. E hányados önmagában nem mechanikai szabályszerűségek alapján jött létre, de ha úgy tekintünk a von-Mises feszültség definícióját implementáljuk az adott helyzetre és a nyíró-, valamint húzófeszültségek interakciós mutatójaként értelmezzük, akkor ez az arány értelmezhető az általános nyírási viselkedés és a két különböző értelmű, ám összefüggő hatás okozta lokális jellemzéseként.

Ezt követően vettem górcső alá a példaként említett összevetést. Mindkét variánsra meghatároztam a (4.2) szerinti összefüggést, és azt tapasztaltam, hogy a nagyobb teherbírást biztosító (43. ábra) alternatíva esetében ez az érték nagyobb; a fajlagos eltérés a kettő között pedig közel azonos, mint a képlékeny teherbíráruk százalékos eltérése. Ha az egyenes arányosságot a nagyobb és kisebb értékek hányadosaként fejezzük ki a két szorzó között az eltérés mindössze 1,72%, amely kiváló egyezést jelent. A konkrét példára vonatkozó részeredményeket a bemenő paraméterekkel együtt a 3. táblázat tartalmazza.

A felismert empirikus összefüggés:

$$\frac{M_{pl,Rd,t}}{M_{pl,Rd,e}} \approx \frac{\eta_t}{\eta_e}, \quad (4.3)$$

ahol $M_{pl,Rd,t}$ és $M_{pl,Rd,e}$ az öszvér rácsos tartó képlékeny nyomatóki teherbírása tömbösített („t”) és egyenletes („e”) elrendezés esetén, az η pedig a (4.2) összefüggés szerinti arányszám, a hajlítónyomatóki ellenállással analóg indexeléssel.

A (4.3) képlet kapcsolatot teremt a lokális feszültségállapot és a globális viselkedés között; felhasználható két (közel) azonos mennyiségű csapot tartalmazó variáns összehasonlítására, a csapokban ébredő feszültségek és az egyenletes kiosztást tartalmazó szerkezeti kialakítás teherbírájának ismeretében pedig kellő pontossággal lehet becsülni a tömbösített csapozás által kínált többletteherbírási mértékét.

sorszám	tömbösített (1)			egyenletes elosztás (2)		
	σ [MPa]	τ [MPa]	σ_{vM} [MPa]	σ [MPa]	τ [MPa]	σ_{vM} [MPa]
1	41,75	-75,38	137,08	212,17	-65,122	240,28
2	41,75	-75,38	137,08	229,18	-35,625	237,34
3	-38,71	-86,64	154,97	16,56	-130,59	226,79
4	-38,71	-86,64	154,97	24,88	-124,77	217,53
5	71,99	-102,48	191,54	47,19	-122,92	218,07
6	71,99	-102,48	191,54	34,50	-131,46	230,29
7	133,84	-66,21	176,25	34,99	-131,05	229,66
8	133,84	-66,21	176,25	34,96	-130,6	228,89
9	28,75	-82,65	146,013	44,57	-129,54	228,75
10	28,75	-82,65	146,013	-5,03	-130,17	225,51
ÁTLAG:	47,53	-82,67	161,17	67,40	-113,18	228,32
$\eta=\tau/\sigma_{vM}$ [-]	-0,512944			-0,495738		
η_1/η_2 [-]	1,0347					
$M_{pl,Rd}$ [kNm]	782,36			743,09		
$M_{pl,Rd,1}/M_{pl,Rd,2}$ [-]	1,0528					
eltérés [%]	1,7227					

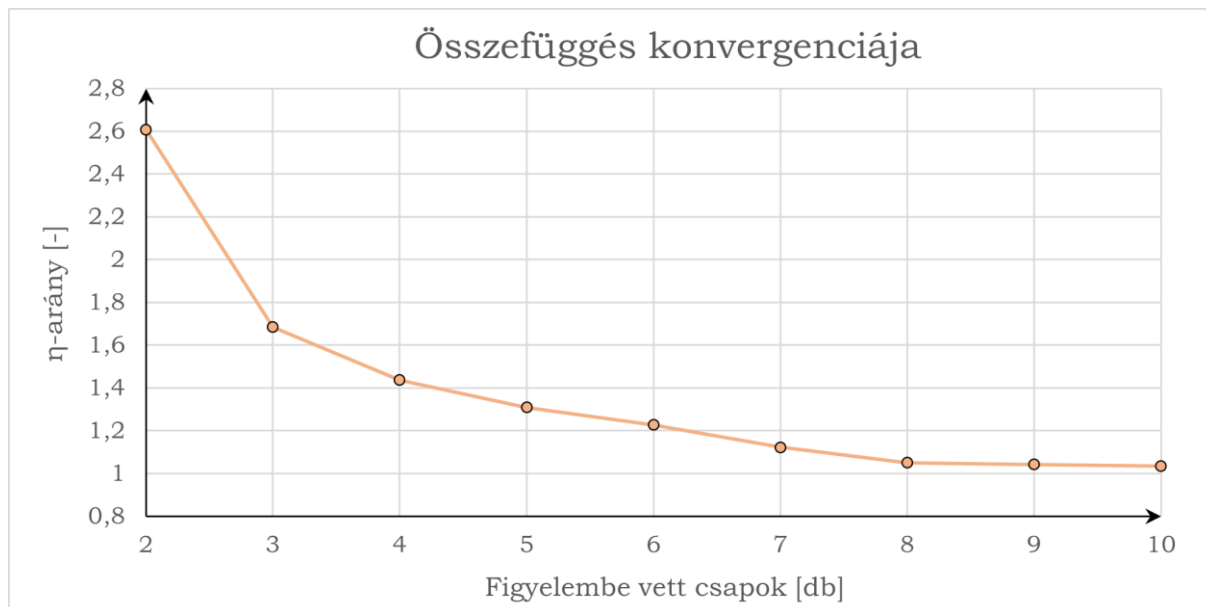
3. táblázat: empirikus összefüggés a feszültségi értékek és a globális viselkedés között

A módszer finomítható, hiszen a számítást akár minden egyes figyelembe vett csapot követően el lehet végezni. Az eredmény a kapcsolóelemek számának növekedésével pontosabb lesz, vagyis konvergál. (52. ábra) Ez a tulajdonság lehetővé teszi a szerkezeti paramétereiktől függő konvergencia-kritériumok megfogalmazását és kielégítését. Ezzel kapcsolatban két fontos dolgot kell szem előtt tartani: először is kritikus, hogy a mértékadó, vagyis a legszélső csaptól befelé haladjunk, másodsor pedig a tömbösített kialakítás miatt az összefüggés konvergenciájának vizsgálatát érdemes a második tagtól indítani.

A képlet ellenőrzésére egy további variáns-páron elvégeztem a műveleteket, és ugyan 2 százaléknál (~9%) nagyobb eltérést szolgáltatott a teherbírások arányának és az η -arány összevetésében, az egyezés így is elegendően pontos, ráadásul a biztonság javára téved, vagyis némileg alábecsüli a csapozás hatását.

Az eredmények közlésével foglalkozó szakasz lezárásaképpen fontosnak tartom hangsúlyozni, hogy az összefüggés az adott körülmények mellett

meglepően jól becsülte az ellenállások különbségét, gyakorlati jelentőségének növelése és mindennapi alkalmazhatósága érdekében a képlet továbbfejlesztése, pontosítása és számos nagymintás – fizikai és végeselemes – kutatás kivitelezése szükséges.



52. ábra: az összefüggés konvergenciája

V. Összefoglalás, konklúzió és továbblépési lehetőségek

Dolgozatomban az öszvér rácsos tartók viselkedésének elemzését céljaul kitűző kutatássorozatam harmadik részét ismertettem. A korábbi vizsgálatok során szerzett tapasztalatok és következtetések beépítésével eljutottam odáig, hogy az öszvérrácsok fejes csapok alkalmazásával történő tervezési és kivitelezési alapelvét egy diszkrét állandó paraméter által korlátozott feltételrendszerben kidolgozzam. Természetesen az általános gyakorlati alkalmazáshoz ez önmagában nem elegendő, de remélem, megfigyeléseim hozzájárulnak a jövőbeni tervezési előírások optimalizálásához.

Kutatásom e szakaszában a fejes csapokat az acélszerkezeti csomópontok felett csoportosítottam, és az új geometriai kialakítás hatását a korábbi, hossz-tengely mentén egy vonalban elhelyezett csapsor által biztosított statikai jellemzőkkel vettem össze. A szerkezet globális választát elemeztem, majd a látványos differenciát a lokális feszültségállapot milyenségével indokoltam, valamint mellékszálon bebizonyítottam, hogy a laposacél kihajlása a teherbírást semmilyen formában nem befolyásolja.

Dolgozatom végén az alábbi konklúziókat fogalmazom meg:

- A fejes csapok tömbösítése számottevő – akár 30 százalékos – képlékeny teherbírástöbbletet biztosít a vizsgált csapszám-tartomány jelentős részében.
- Ezzel a többlettel a laposacél felső övvel rendelkező kialakítás adott csapszám mellett értelmezett teherbírása megközelíti a sokkal erősebb – HEB160 szelvényű – variáns potenciális ellenállását.
- A csapok alaprajzi elrendezése befolyásolja a teherbírást: a tartó teljes hossza mentén elhelyezett hat elem két különböző (egyenletes, vagy húzott rácsrudak fölé hegesztett) kiosztása között szabad szemmel érzékelhető különbség van a globális viselkedés tekintetében.
- A kezdeti merevségre a kapcsolóelemek csoportosítása csak minimális hatással van – de a vizsgált intervallumon belül legfőképp kevés csap alkalmazása esetén.
- Az adott állandó paraméterek mellett soronként három csap elhelyezése semmilyen előnyt nem jelent a két csapos szervezési elvvel szemben. Ez azonban nem jelenti azt, hogy nagyobb rács-tengelytáv és ezáltal megnövekedett effektív szélesség esetén ne lenne másképp.
- A laposacél felső öv kihajlása nem befolyásolja a teherbírást, a fejes csapok csoportosítása esetén pedig kivitelezési szempontból sem szükséges, így a csomópontok között elhagyható.
- A csapok talpsíkjának térbeli feszültségállapota jó biztonsággal közelíthető kizárólag a húzófeszültség és a nyírófeszültség figyelembevételével.
- A húzófeszültség bizonyítottan csökkenti a csúsztatóerő felvételére való kapacitást, a fejes csapok csoportosított elhelyezése esetén a tengelyirányú normálfeszültség jobban eloszlik, ezáltal a csapkép nyírási teherbírása jelentősen növelhető.
- Az előző pontban alátámasztott jelenség jellemzésére empirikus összefüggést javasoltam, amely az adott körülmények és állandó paraméterek mellett kiválóan megadta a csapozás nyújtotta

többletterherbírás mértékét. A gyakorlati implementáláshoz számos további kísérlet és vizsgálat szükséges.

A kutatássorozat első három részében a szabványos fejes csapos kialakításokat vizsgáltam különböző szempontok szerint, az egyértelmű továbblépési lehetőség a korszerű nyírt kapcsolóelemek (pl. perfobond) tesztelésében rejlik.

VI. Ábra- és táblázatjegyzék

1. ábra: az öszvérszerkezetek fejes csapos kapcsolatainak kialakítási lehetőségei
2. ábra: a fejes csap elhelyezésének „erős” és „gyenge” módja
3. ábra: kinyomókísérletek eredményei „erős” és „gyenge” elrendezés esetén
4. ábra: „kedvező” és „kedvezőtlen” pozíciók megjelölése Konrad és társai kísérletében
5. ábra: klasszikus és módosított kinyomókísérlet összeállítása
6. ábra: klasszikus és módosított kinyomókísérlet eredményei
7. ábra: tönkremeneteli állapot és feszültségárány kapcsolata
8. ábra: a Xue és csapata által vizsgált Minpu híd
9. ábra: Zhou és He kísérlete
10. ábra: a rácestopológia vizsgálatára felvett vizsgálati spektrum
11. ábra: öszvérszerkezetű rácsos tartó merevsége a rácestopológia osztásközzeinek számától függően
12. ábra: Lisheng Luo és Xiaofeng Zhang kutatásának kialakítása (három-övíű rács és vasbeton lemez külön ábrázolva) és eredménye
13. ábra: különböző sűrűségű, képlékeny csapkiosztások erős (HEB 160) felső öv esetén
14. ábra: felső öv keresztmetszetére és nyírt kapcsolóelemek számára vonatkozó vizsgálat eredményeit ismertető grafikon. A „csak öv” a laposacélt alkalmazó kialakításra utal.
15. ábra: a vizsgálati modell kótázott statikai váza
16. ábra: a vizsgálati modell kótázott statikai vázából adódó elméleti igénybevételek
17. ábra: szerkezeti acél anyagmodellje
18. ábra: betonacél anyagmodellje
19. ábra: C20/25 beton anyagmodellje

20. ábra: egy általános négyponos hajlítóvizsgálat és terhelő lemezek helyzete
21. ábra: a vizsgálati modell metszete a végeelemes programkörnyezetben
22. ábra: a vizsgálati modell metszetének részlete a végeelemes programkörnyezetben
23. ábra: a 22. ábrán bemutatott részlet 3D nézete, a betonacélháló kijelölésével
24. ábra: anyagmodellek implementálása az ANSYS szoftverben az alábbi anyagok esetén: a) beton b) szerkezeti acél c) betonacél
25. ábra: kapcsolati modell a laposacél felső öv és a beton között
26. ábra: kapcsolati modell a fejes csapok és a beton határfelületén
27. ábra: a teljes végeelemes modell hálója
28. ábra: a végeelemháló lokális sűrítése a csapok környezetében
29. ábra: a végeelemek geometriai szabályosságát jellemző oszlopdiagram
30. ábra: a szimmetriasík felületeit kell „Symmetry Region” kényszerrel ellátni (piros)
31. ábra: a tartó elmozduláskényszereinek (támasz, teher) és a terhelő lemezek geometriai elhelyezkedése a gerenda harmadában és végén
32. ábra: a terhelő lemez felső síkján definiált előírt elmozdulás
33. ábra: a végeelemes tervezés és vizsgálat folyamatábrája, kiemelve a verifikáció és a validáció fontosságát, és a folyamatban való strukturális elhelyezkedését
34. ábra: a validációs vizsgálat geometriája és modellje
35. ábra: a validációs vizsgálat eredményei
36. ábra: a csapok deformációja a végeelemes validációs modellen
37. ábra: a csapok deformációja szakirodalmi források alapján
38. ábra: kezdeti merevség hálóérzékenysége
39. ábra: képlékeny teherbírás hálóérzékenysége
40. ábra: rugalmas teherbírás hálóérzékenysége
41. ábra: teherbírás-lehajlás jelleggörbe az állandó paraméterek által teremtetett körülmények között vizsgált öszvér rácsos tartó esetén
42. ábra: a csapok bővítésének módszere; az ábra alsó részén az 1, 2, 3 sor-számok a 2×2 tömbhöz további sorok rendelésének sorrendjét jelentik
43. ábra: képlékeny teherbírás egyenletesen kiosztott és tömbösített csapozás esetén
44. ábra: rugalmas teherbírás egyenletesen kiosztott és tömbösített csapozás esetén

45. ábra: kezdeti egyenletesen kiosztott és tömbösített csapozás esetén
46. ábra: laposacél felső öv normálfeszültségi értékei a kihajlás pillanatában
47. ábra: a vizsgált tömb csapsorainak számozása
48. ábra: szélső tömb csapjainak talpfelületén kialakuló – „sw” – és két komponensből származó – „calc” – von-Mises feszültségek, 5×2 elem esetén
49. ábra: százalékos eltérés a két komponensből számolt eredmények és a modellből exportált feszültségek között az egyes csapsorok esetében
50. ábra: a lokális vizsgálat során összevetett csapok a különböző kiosztások esetén
51. ábra: a 10 összehasonlított csapban kialakuló nyíró- és húzófeszültségek
52. ábra: az összefüggés konvergenciája
1. táblázat: vizsgálat állandó paramétere
2. táblázat: hálóérzékenység-vizsgálat paramétere
3. táblázat: empirikus összefüggés a feszültségi értékek és a globális viselkedés között

VII. Irodalomjegyzék

- [1] Rozgonyi Dániel, Kovács Nauzika, „Öszvér rácsos tartó viselkedésének numerikus vizsgálata”, konferenciaelőadás, XIV. Magyar Mechanikai Konferencia, Miskolc, 2023. augusztus 29.
- [2] Rozgonyi Dániel, Kovács Nauzika, „Öszvérszerkezetű rácsos tartó teherbírásának és merevségének vizsgálata különböző rács-topológiák esetén”, Tartószerkezetek projekt (BMEEOHSMS5P), Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2022/23 II. félév
- [3] Brian Uy, J.Y. Richard Liew, „Composite Steel–Concrete Structures”, 51. fejezet, Section VI., The Civil Engineering Handbook, Second edition, 2003, <https://www.uceb.eu/DATA/Books/THE%20CIVIL%20ENGINEERING%20HANDBOOK.pdf>
- [4] W. SAMUEL EASTERLING, DAVID R. GIBBINGS and THOMAS M. MURRAY, „Strength of Shear Studs in Steel Deck on Composite Beams and Joists”, SECOND QUARTER, ENGINEERING JOURNAL / AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION, pp. 41-55, 1993,

https://steeljoist.org/wp-content/uploads/2021/04/EJ-1993-WSEasterling_V30_2_044.pdf

- [5] M. Konrad, F. Eggert, U. Kuhlmann, J. Schorr, „New approach for the design shear resistance of headed studs in profiled steel sheeting with ribs transverse to supporting beam”, no. 4, Steel Construction 13, 2022, <https://doi.org/10.1002/stco.202000018>
- [6] Min-hui Shen, Kwok-Fai Chung, Ahmed Y. Elghazouli, „Performance of stud shear connections under combined shear and pull-out forces”, Structures, Volume 51, 2023, Pages 415-434, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.03.023>
- [7] Jingnan Ding, Jinsong Zhu, Teng Shi, "Performance of grouped stud connectors in precast steel-UHPC composite bridges under combined shear and tension loads", Engineering Structures, Volume 277, 2023, 115470, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115470>.
- [8] Dongyan Xue, Yuqing Liu, Jun He, Biao Ma, "Experimental study and numerical analysis of a composite truss joint", Journal of Constructi-onal Steel Research, Volume 67, Issue 6, 2011, Pages 957-964, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.01.013>.
- [9] Lingyu Zhou, Guichao He, „EXPERIMENTAL RESEARCH ON END JOINT OF STEEL-CONCRETE COMPOSITE TRUSS”, THE BALTIC JOURNAL OF ROAD AND BRIDGE ENGINEERING, vol. 7(4), pages 305-313, 2012, <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2012.40>
- [10] Lisheng Luo, Xiaofeng Zhang, „Flexural Response of Steel-Concrete Composite Truss Beams”, Haikou – Nanjing, China, 2019, www.doi.org/10.1155/2019/1502707
- [11] Walid A. Al-Kutti, „Parameters estimation of Drucker-Prager plasticity criteria for steel confined circular concrete columns in compression”, Dammam, Saudi Arabia, 2018, <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814901048>
- [12] Jiafei Jiang, Yufei Wu, Xuemei Zhao, Application of Drucker-Prager Plasticity Model for Stress-Strain Modeling of FRP Confined Concrete Columns, Procedia Engineering, Volume 14, 2011, Pages 687-694, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.088>

- [13] B. G. Rabbat and H. G. Russell, „Friction Coefficient of Steel on Concrete or Grout”, *Journal of Structural Engineering*, volume 111, no. 3, pages 505-515, 1985,
<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9445%281985%29111%3A3%28505%29>
- [14] Budaházy Viktor, Rózsás Árpád, Mayer Róbert, Vigh László Gergely, „ACÉL- ÉS ÖSZVÉRSZERKEZETI ELEMÉK CIKLIKUS VISELKEDÉSÉNEK KÍSÉRLETI VIZSGÁLATA”, *Acélszerkezetek folyóirat*, 2015/1. különszám, 21–31. oldal, 2015, <http://www.magesz.hu/wp-content/uploads/acelszerkezetek/aszerk1501kulonszam.pdf>
- [15] MSZ EN 1994-1-1:2010 Eurocode 4: Együtt dolgozó, acél-beton öszvérszerkezetek tervezése. 1-1. rész: Általános és az épületekre vonatkozó szabályok, 110. oldal, B melléklet, <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1994.1.1.2004.pdf> (eredeti EN1994)
- [16] Vigh László Gergely, Simon József, HighPerFrame pályázat, 2. feladat: Acél anyag és szerkezet földrengés-szimulációs vizsgálata, 6A melléklet, 2014
- [17] K. Roik, G. Hanswille, and A. Cunze-O. Lanna, "Hintergrundbericht zu EC4: 6.3.2-Bolzendübel." University of Bochum, 1988 (*Megjegyzés: a forrás online formában nyilvánosan nem elérhető, így a hivatkozást [9] forráson keresztül használtam fel.*)
- [18] Pavlović, Marko & Spremić, Milan & Marković, Zlatko & Veljkovic, Milan. (2013). Headed Shear Studs versus High-Strength Bolts in Prefabricated Composite Decks. 10.1061/9780784479735.052.

VIII. Képforrások

A szakirodalmi forrásoktól független képek és ábrák forrásjegyzéke.

- [K1] https://www.researchgate.net/publication/292348505_Experimental_and_numerical_study_of_impact_on_window_glass_fitted_with_safety_window_film/figures?lo=1
- [K2] <https://www.digitalengineering247.com/article/wp-content/uploads/2015/02/Figure-1-ASME-V-and-V-flowchart.jpg>

[K3] <https://www.trip.com/review/minpu-bridge-39484053-158355960>