



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

# Szétszerelhető öszvérfödém oldható nyírt kapcsolatának numerikus vizsgálata

TDK Dolgozat

## **Készítette:**

Borsi Levente

Építőmérnöki Hallgató – MSc - II.Évfolyam

## **Konzulens:**

Király Krisztián – PhD Hallgató

Dr. Kovács Nauzika – Egyetemi docens

BME Hidak és Szerkezetek Tanszék

## Tartalomjegyzék

Összefoglaló .....	3
Abstract .....	4
1. Bevezetés .....	5
2. Szétszerelhető öszvérszerkezetek áttekintése .....	5
2.1. A fenntartható építőipar törekvései .....	5
2.2. Hagyományos öszvérfödémek.....	7
2.3. Szétszerelhető öszvérfödémek.....	9
2.4. Szerkezeti viselkedés.....	12
3. Oldható nyírt kapcsolóelemek szerkezeti viselkedése – szakirodalmi áttekintés .....	13
3.1. Kinyomókísérletek feszített csavaros kapcsolatokra .....	13
3.2. Kinyomókísérlet beágyazott csavarokkal ellátott trapézlemezes öszvérfödémre .....	15
3.4. Numerikus vizsgálat kinyomókísérletre .....	16
4. A kinyomókísérletek bemutatása .....	17
4.1. A kutatási program áttekintése .....	17
4.2. A kinyomókísérletek próbatestei .....	18
4.3. A kísérlet terhelési és mérési részletei.....	20
4.4. Kísérleti eredmények.....	22
4.5. A kinyomókísérletek következtetések .....	23
5. Numerikus modell építése Atenában .....	23
5.1. A modell geometriai felépítése.....	23
5.2. Anyagmodellek és köztük lévő kapcsolatok definiálása .....	24
5.3. Modell hálózása .....	26
6. Eredmények .....	27
6.1 Eredmények bevezetése a futtatás bemutatásával .....	27
6.2. Modell kalibrálása .....	29
6.3. Az eredmények kiértékelése.....	30
6.4. Kapcsolóelemek tönkremenetele.....	33
6.5. Összefoglalás .....	34
6.6. Következtetések.....	34
7. Irodalomjegyzék .....	35

## Összefoglaló

Napjaink kiemelt fontosságú feladata a fenntartható építőipar megvalósítása, annak körkörös gazdasági modellre való áttérése. A meglévő építőanyagok újrahasznosítása, valamint meglévő szerkezeti elemek újrafelhasználása mellett a tervezetten szétszerelhető szerkezetek alkalmazásával hatékonyan lehet csökkenteni az ipar szén-dioxid-kibocsátását. A TDK dolgozat része a KÉSZ Csoport, bim.GROUP Kft. és a BME Hidak és Szerkezetek Tanszék együttműködésével folyamatban lévő KFI programnak, melynek célja egy olyan fenntartható, szétszerelhető öszvérfödém kifejlesztése, amely követi a nemzetközi trendeket, valamint alkalmazkodik a hazai építőipar sajátosságaihoz. 2023 tavaszán a kutatócsoport kinyomókísérleti programot hajtott végre, melynek eredményei kiindulási alapját képezi a jelen munkának. A kutatómunka részletes tanulmánnyal kezdődik, amelyben szakirodalmi áttekintés mellett bemutatásra kerül a program jelenleg kifejlesztett szerkezeti koncepciója. A TDK dolgozat elsődleges célja egy fejlett numerikus modell felépítése, verifikálás, valamint validálása az Atena végeleemes szoftverben, amely követi a kinyomókísérlet eredményeit. A pontosított modell segítségével többféle anyagminőséget és geometriát, mint változó paramétereket vizsgálunk. A dolgozatban megjelennek a numerikus modell eredményei, azok kiértékelése, valamint a kísérleti eredményekkel való összehasonlítása. Az elemzés elsősorban a vizsgált kapcsolóelem kezdeti merevségére, annak teherbírására és duktilitására irányul. A dolgozat eredményeképpen megfogalmazott következtetések megfelelő alapját képezik a vizsgált szerkezeti rendszer továbbfejlesztésének, továbbá előkészíti a kutatás későbbi fázisában esedékes laboratóriumi és numerikus ciklikus terhelésű kinyomókísérleti programot.

## Abstract

The most important task of our days is to adapt the sustainability in the building construction industry by reaching the circular economy. In addition to the recycling of building materials and the reuse of existing structural elements, the carbon dioxide emissions of the industry can be effectively reduced by using designed demountable structures. The TDK thesis is part of the ongoing R&D&I program in the cooperation of Budapest University of Technology and Economics, Department of Structural Engineering, and the KÉSZ Group, bim.GROUP Ltd., aims to develop a demountable – sustainable – steel-concrete composite structural slab and frame system for buildings which follows international trends and adapts the Hungarian conditions. In the spring of 2023, the research group executed the push-out test program. For the present achievements, the results of the program serve as the initial data. The research work begins with a detailed study, and then the currently developed structural concept of the program is presented in addition to a literature overview. The primary objective of the TDK thesis is the development, verification, and validation of an advanced numerical model in the finite element software Atena, which follows the results of the push-out test. With the help of the refined model, multiple material properties and different geometries are going to be examined as variable parameters. The thesis presents the results of the numerical model, their evaluation, and the comparison with the experimental results. The analysis is primarily focused on the initial stiffness, resistance, and ductility of the tested shear connector. The presented conclusions as the result of the thesis form an appropriate basis for the further development of the examined structural system, and it also prepares the laboratory and numerical cyclic loading push-out test program due in the later phase of the research program.

## 1. Bevezetés

Napjaink kiemelt fontosságú kérdése a fenntarthatóság, valamint a körkörös gazdasági modellre való áttérés. Ennek következtében mind az építőipar, mind a technológia tudományágai is igyekeznek olyan megoldásokkal szolgálni, amik lehetővé teszik ezek elérését. A fenntartható építőipar kiemelt irányelve a szétszerelhető szerkezetek alkalmazása, erre egy lehetséges megoldás a fenntartható öszvérfödém, melynek alapja az oldható nyírt kapcsolatok jelenléte a szerkezeti elemek között, így biztosítva a szerkezeti elemek újrafelhasználását, ami jóval hatékonyabb az újrahasznosításhoz képest.

A TDK dolgozat Király Krisztián doktori kutatási témájára épül, amely része a KÉSZ Csoport, bim.GROUP Kft. és a BME Hidak és Szerkezetek Tanszék együttműködésével folyamatban lévő KFI programnak, melynek célja egy olyan fenntartható, szétszerelhető öszvérfödém kifejlesztése, amely követi a nemzetközi trendeket, valamint alkalmazkodik a hazai építőipar sajátosságaihoz. A jelen munka célkitűzése, hogy a már elvégzett kinyomókísérletekre numerikus modell készüljön és ez validálva legyen, hogy a vizsgálatokat a későbbiekben ezek alapján lehessen folytatni.

A dolgozatban szakirodalmi áttekintés keretein belül részletesen bemutatom az egyik legelterjedtebb szétszerelhető öszvérfödém konstrukció kialakítását, összehasonlítom a hagyományos, nem oldható kapcsolatos kialakítással, majd az oldható kapcsolóelemek kísérleteit vizsgálom részletesebben. Az áttekintés után bemutatom a doktori kutatási program és a kinyomókísérletek eredményeit, majd az erre a célra felépített numerikus modellt az eredményekkel és a kiértékeléssel.

## 2. Szétszerelhető öszvérszerkezetek áttekintése

### 2.1. A fenntartható építőipar törekvései

Manapság a fenntartható építőipar egyre nagyobb szerepet tölt be a piacon, ugyanis nemcsak az újrahasznosítás kapott nagyobb hangsúlyt az elmúlt években, hanem az újrafelhasználás is megjelent és ezzel együtt a szétszerelhető szerkezetek igénye is nőni kezdett.

Általános példa ilyen szerkezetekre a szétszerelhető parkolóház. Ezen a projekteken a modularitás kapja a legnagyobb szerepet, így majdnem minden része a szerkezetnek nagyobb elemekből épült fel, jelentős helyszíni kivitelezési időt spórolva így. Egy általános szétszerelhető parkolóházat a 2.1. ábrán mutatom be. [11]



2.1. ábra: Szétszerelhető parkolóház [11]

További megvalósult példa a Katarban található Stadium 974, ahol teljesen szét- és összeszerelhető szerkezetekben gondolkodtak a tervezők így elérve a legkompaktabb és egyik legkisebb alapterületű stadion megvalósítását, amely teljes mértékben szétszerelhető. A stadion a 2.2. ábrán látható.

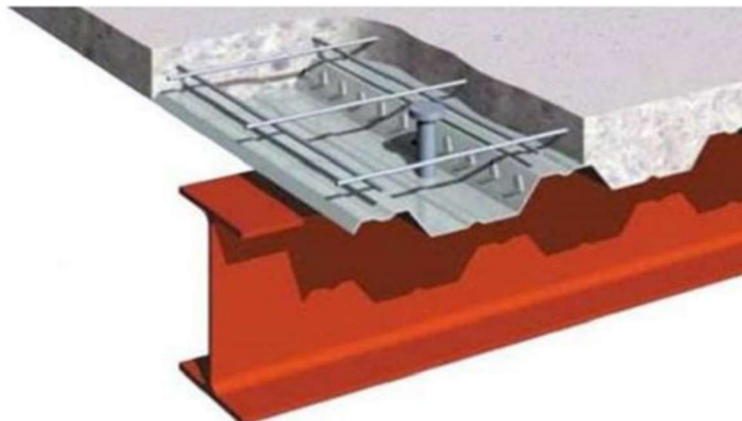


2.2. ábra: Katari Stadium 974 [10]

Király (2021) [14] összefoglalójában részletezi az aktuális, fenntartható építőiparral kapcsolatos nemzetközi trendeket, továbbá bemutatja a fenntartható, vagyis a szétszerelhető öszvérszerkezetek lehetséges kialakításait az oldható nyírt kapcsolatokkal.

## 2.2. Hagyományos öszvérfödémek

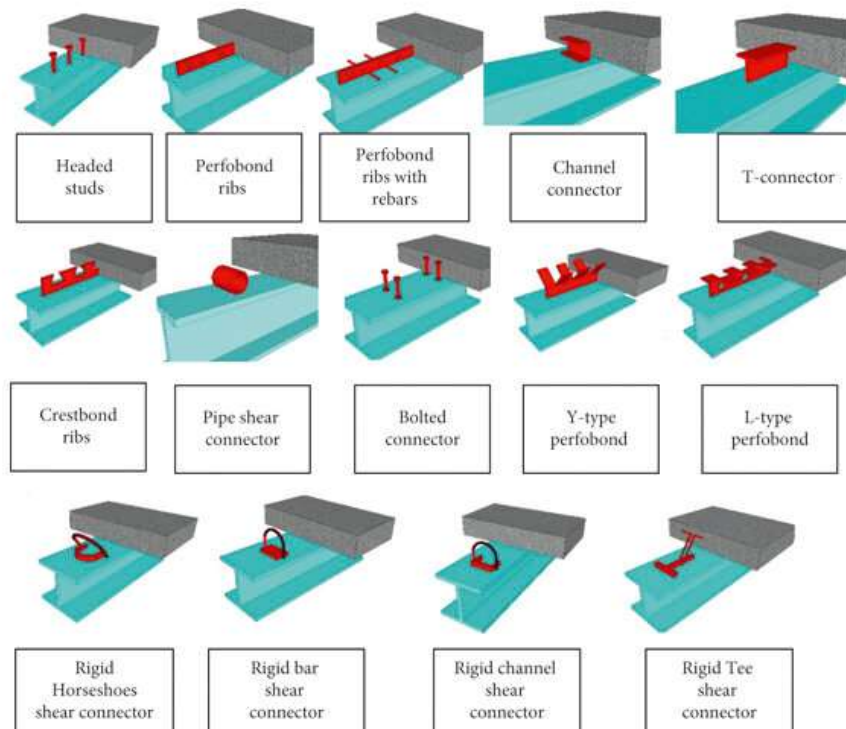
Az öszvérszerkezeteket manapság már széleskörben használják többszintes irodaépületeknél, hidaknál, valamint csarnokszerkezetek nagy fesztávú közbenső födemeinek kialakítására. Az így kialakított szerkezetek fő előnye, hogy a beton és az acél együttdolgoztatásával azok kedvező mechanikai tulajdonságait használja ki, azonban ezek megfelelő kombinálása rendkívül hatékony tervezést, gyártást és kivitelezést igényel. A két anyag összekapcsolását nyírt kapcsolóelemek teszik lehetővé. Eddig javarészt ezeket a kapcsolatokat fejes csapok övre történő ráhegesztésével kivitelezték és jelenleg csak erre van Eurocode alapú méretezési eljárás, azonban az így kialakított fejes csapok betonba ágyazását követően a kapcsolat oldása és az elemek újrafelhasználása nem lehetséges, továbbá a bontása is nehézkes. Az így létrehozott szerkezeteknél a bennmaradó zsaluzatként alkalmazott trapézlemezek szerves részét és előnyét képezik az öszvérfödémeknél, ami jelentősen hozzájárult a konstrukció elterjedéséhez, mert a hagyományos zsaluzat elhagyásával sok időt és költséget lehet megtakarítani, valamint lehetőség van a födémmel együttdolgozó trapézlemez alkalmazására is, ami további merevségi és teherbírási előnyökkel szolgál. Hagyományos öszvérfödémre láthatunk példát a 2.3. ábrán.



2.3. ábra: Hagyományos öszvérfödém szerkezeti kialakítása [12]

Létrejött még számos kialakítás a nyírt kapcsolatok megoldására (2.4. ábra), ilyen funkciók ellátására használják a prefobondnak nevezett megoldást is, ahol egy acéllemez hegesztenek az acélszelvény felső övére, amelyen nyílásokat vagy az egyik felén bevágásokat hoznak létre, amelyen átvezetik a betonacélokat. Ezeket a lemezeket bizonyos esetekben széthajtogatnak. A fejes csapokkal, vagy a prefobond kapcsolatokkal kialakított öszvérszerkezeteket nem lehet roncsolásmentesen szétszerelni, így a bontási folyamat is nehézkes. Először a betont távolítják el, majd vágni a nyírt kapcsolatot a szerkezet többi részével, ami igen nehézkes feladat. Ezt követően a megmaradt acélszerkezet kapcsolatait bontják és szállítják el az elemeket, ezen

szerkezetek azonban legtöbbször már nem használhatók újra, így ez a szerkezeti rendszer kevésbé illeszkedik a fenntartható építőipar elveihez és a körkörös gazdasági modellhez.



2.4. ábra: Acél és beton közötti nyírt kapcsolatok kialakítása [3]

A hagyományos öszvérfödémek építése jelentős élőmunkaigénnyel rendelkezik, ugyanis mind az acélgerendák mechanikus kapcsolatait, mind a trapézlemezen áthegesztett és az acélszelvényhez rögzített fejes csapokat a helyszínen kell létrehozni, valamint a monolit beton öntését is. A trapézlemezt bizonyos esetekben ideiglenesen alá kell támasztani építési állapotban. A rendszernek nagy előnye viszont, hogy az esetleges gyártási hibák korrigálhatóak az építés során. A legnagyobb hátránya viszont, hogy a monolit kapcsolatok nehezen bonthatóak és a bontást követően a szerkezeti elemek nem használhatók újra, esetleg az elemek újra hasznosítására van lehetőség.

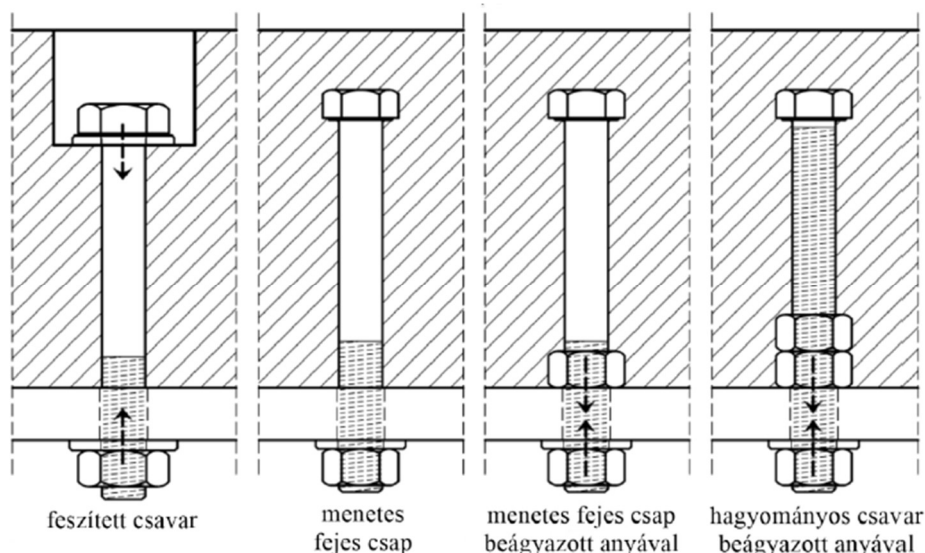
A hagyományos öszvérfödém kivitelezési fázisai a következők:

- Acélgerenda gyártása, szállítása és beemelése
- Acélgerenda kapcsolatainak létrehozása
- Trapézlemezek elhelyezése és rögzítése, valamint alátámasztása
- Fejes csapok hegesztése és vasalás elhelyezése
- Helyszíni betonozás elkészítése



### 2.3. Szétszerelhető öszvérfödémek

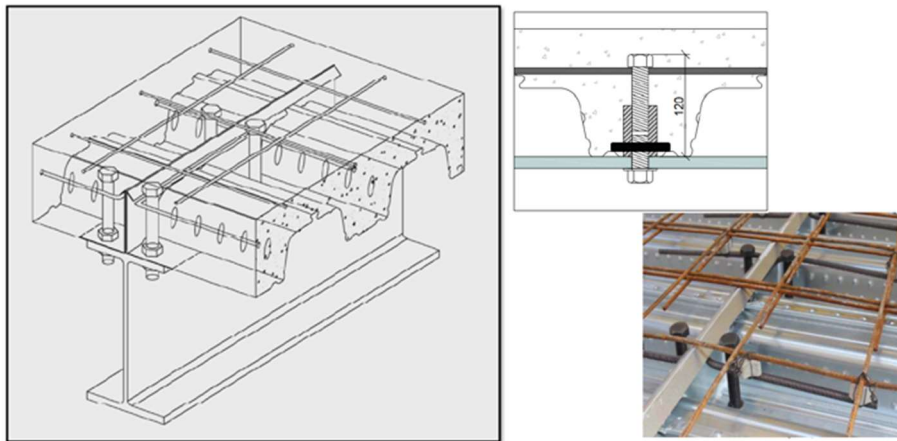
Az elmúlt évek során egyre nagyobb az érdeklődés az újrafelhasználható szerkezeti kialakítások iránt, amelyben az elemeket a szétszerelést követően fel lehet használni más projektek keretein belül akár többször is, így a hulladék és a károsanyag-kibocsátás mértéke jelentősen csökkenthető. Tovább mérsékelhető az energiaigény, mert nem kell a gyártási folyamatot megismételni, ezenkívül a kivitelezési idő is felgyorsul, amely által kedvező költségvetésű szerkezet érhető el. Ennek azonban olyan vonzatai keletkeznek, hogy külön tervezés szükséges a kivitelezési és bontási fázisokhoz, valamint a méretek következtében a szállítás nehézkes lehet, továbbá nem utolsó sorban az állagmegővásra is tekintettel kell lenni az újbóli felhasználás érdekében. Mindent összevetve nagyon sok gazdasági szereplő és tényező jelenik meg a megvalósítás és tervezés folyamán a hagyományos szerkezeti rendszerhez képest. A szereplők között általánosan, az ilyen szerkezeteknél összetett együttműködésnek kell létrejönnie a gördülékeny folyamatokhoz. Az elmúlt években több kutatást is végeztek az öszvérfödémek területén, hogy megfelelő kialakításokat találjanak a szétszerelhetőség elérése érdekében a szükséges merevség, teherbírás és duktilitás biztosítása mellett. A szétszerelhető öszvérszerkezetek legfontosabb eleme az oldható nyírt kapcsolóelem, amely a legegyszerűbb esetekben csavarokkal valósulhat meg. Néhány példa látható ilyen kapcsolatokra a 2.5. ábrán.



2.5. ábra: Oldható csapos kialakítási példák [2]

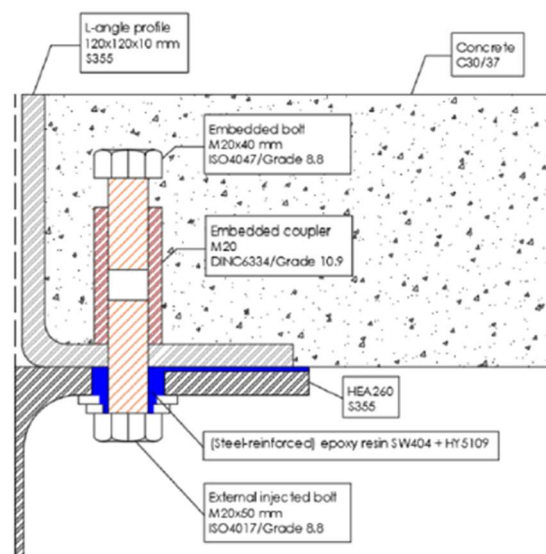
Lam és társai (2017) publikáltak egy lehetséges megoldást, aminek lényege a szétszerelhetőség felé irányult. Alapját egy csavaros kapcsolat képezte, így oldható nyírtkapcsolat jött létre a szerkezetben. A födémrendszerben a betonnal együttdolgozó trapézlemezt, helyszíni vasszerelést és betonozást feltételeztek – mint az ipari gyakorlat legelterjedtebb rendszere. A

csavarokat a helyszínen pozícionálták, majd a betonba ágyzták. A szerkezet többi része hasonló a hagyományos öszvérfödémhez, kivéve azt, hogy az acélgerenda tengelyével párhuzamosan egy acél elválasztóprofil helyeztek el, elhatárolva ezzel a monolit vasbetonbeton födém egyes részeit, hogy szétszerelés esetén könnyen szétvághatóak legyenek a szerkezeti elemek. A konstrukciót a 2.6. ábrán szemléltetem [4].



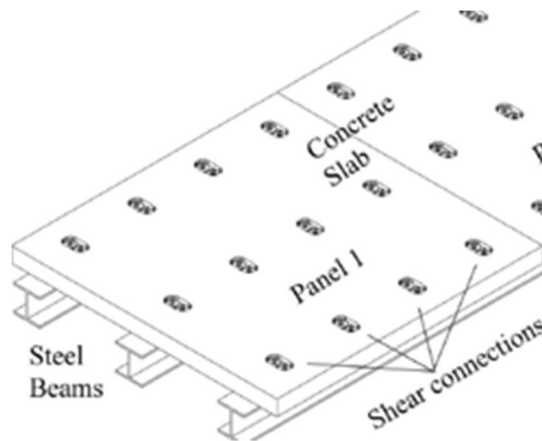
2.6. ábra: Lam és társai által kidolgozott szétszerelhető öszvérfödém [4]

Sarri és társai (2019) egy olyan előregyártott paneles konstrukciót vizsgáltak, ahol a csavar két különböző részből áll, amelyeket egy hevedernek megfelelő toldóelem fogja őket össze (coupler system). Jelen esetben furatinjektálást is alkalmaztak a rögzítéshez, mivel a furatok az előregyártás toleranciái miatt nagyobbak. Ebben az esetben is beágyazottak a csavarok, viszont a paneleket a helyszínen szerelik össze, ahogyan az az 2.7. ábrán is látható. A toldóelem és a csavar fele már a panel felhelyezésénél is jelen volt, a helyszínen az alsó csavart rögzítik.[5]



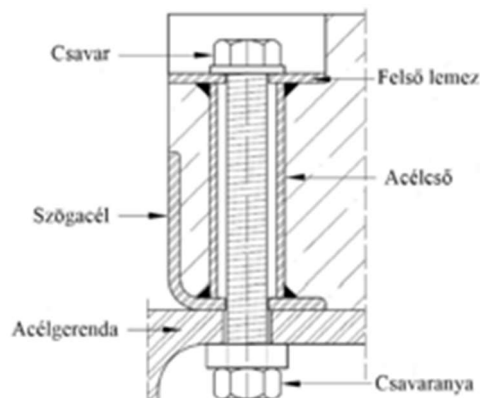
2.7. ábra: Sarri és társai által vizsgált szétszerelhető öszvérfödém [4]

Suwaed és társai (2018) egy olyan konstrukciót dolgoztak ki, ahol a csavarokat helyszíni habarcskiöntéssel töltötték ki a furatlyukakat a panel elhelyezését követően. Jelen esetben már megjelentek a toleranciák, azaz a különböző furatlyukak létrehozásával a szerkezetben holtjátékok keletkeztek, ahol a rögzítés előtt a kapcsolóelemeknek lehetőségük volt még mozgásra és ez szükséges is a nem teljes pontosság végett. A konstrukció a 2.8. ábrán látható.



2.8. ábra: Suwaed és társai által létrehozott szétszerelhető öszvérfödém [9]

Kozma és társai (2019) egy előregyártott panelos megoldást vizsgáltak feszített csavarokkal, a 2.9. ábra szerint



2.9. ábra: Kozma és társai által létrehozott szétszerelhető feszített csavaros öszvérfödém [6]

A szétszerelhető öszvérszerkezetek javarészt a gyárban készülnek és a helyszínen nagyrészt csak a mechanikus kapcsolatokat kell létrehozni. Ebből kifolyólag szállításuk és beemelésük speciális gépek felvonultatását is igényelhetik. A mechanikus kapcsolatok oldhatóak, az elemek a vágást követően is képesek olyan állapotot megőrizni, hogy azok újbóli felhasználása lehetséges legyen. A gyártási és szerelési toleranciáknak ezen szerkezetek esetében nagy szerepük van, a túlméretes furatokat minimalizálni szükséges a hatékony nyírt kapcsolat biztosítása érdekében.

Az előregyártott panelekből készített szétszerelhető öszvérfödém kivitelezési és szétszerelési lépései a következők:

- Acélgerenda mechanikus kapcsolatainak létrehozása
- Előregyártott panelek elhelyezése
- Csavaros kapcsolatok létesítése
  - Nyírt kapcsolatok oldása
  - Elemek kiemelése

A trapézlemezzel és helyszíni betonozással készített szétszerelhető öszvérfödém kivitelezési és szétszerelési lépései a következők:

- Acélgerenda mechanikus kapcsolatainak létrehozása
- Trapézlemezek elhelyezése
- Csavaros kapcsolatok létesítése
- Vasalás elkészítése
- Betonozás
  - Nyírt kapcsolatok oldása
  - Vasbeton lemez vágása acélgerenda tengelye felett
  - Vasalás vágása acélgerenda tengelye felett
  - Elemek kiemelése

#### 2.4. Szerkezeti viselkedés

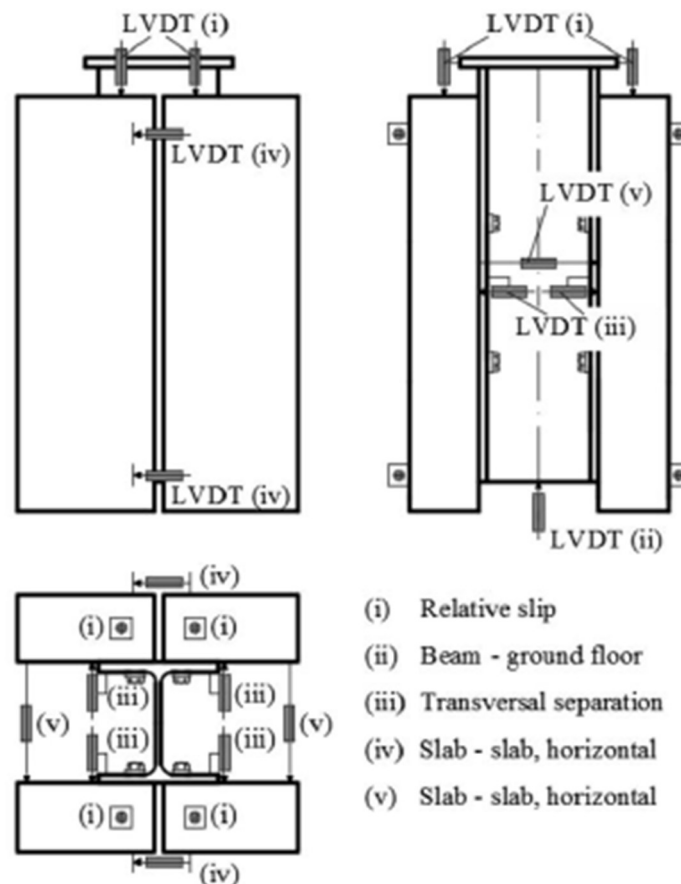
A szerkezeti viselkedés a két a hagyományos és a szétszerelhető rendszerben hasonló, mindkét szerkezet típus méretezésénél érdemes megfontolni a képlékeny méretezés alkalmazását, ugyanis képlékeny mechanizmusú tönkremenetek is megfigyelhetők mindkét esetben. A tönkremenetek javarészt a beton morzsolódásának a csap körül és a beton felső részénél, valamint a csapon végbemenő nyírás és nyomtérk interakciója által jönnek létre. Jellege szerint tehát mind az oldható és mind a hagyományos kialakítás hasonlóan viselkedik, mint az 1994-1-1 Eurocode 4 alapú fejes csapos méretezésnél megfigyelhető. Az oldható kapcsolatokat azonban befolyásolja még az acélgerenda övében lévő furat palástnyomás ellenállásának kimerülése. Az egyik legfontosabb szerkezeti viselkedés a nyírt kapcsolóelemek kezdeti relatív elmozdulása, amely az öszvérgerenda merevségcsökkenését vonja maga után. A csavar a furatokban ellenállás nélkül elmozdulnak, így a kapcsolóelemek megfelelő feltámaszkodásáig nem jön létre az együttlő az acélgerenda és a vasbeton lemez között. Ezt a hatást elsősorban a furatok nagysága, vagyis a toleranciák határozzák meg. A legfőbb törekvés, hogy

minimalizálni tudjuk ezen kedvezőtlen hatást megfelelő toleranciák és technológiák alkalmazásával. Erre lehetséges megoldás feszített csavarok alkalmazása, valamint a furatok injektálása. [14-16].

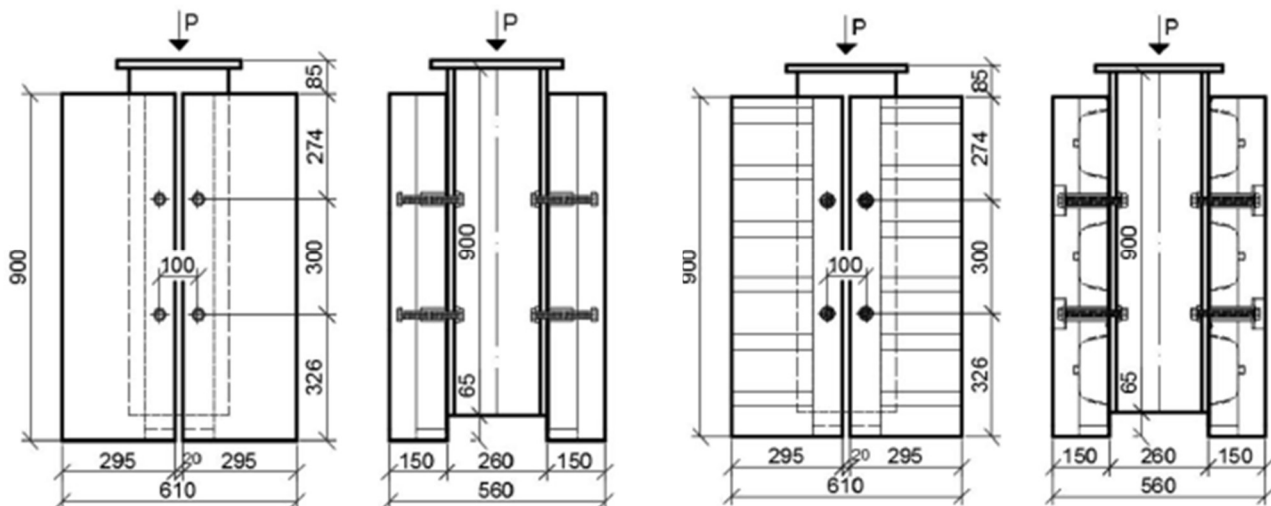
### 3. Oldható nyírt kapcsolóelemek szerkezeti viselkedése – szakirodalmi áttekintés

#### 3.1. Kinyomókísérletek feszített csavaros kapcsolatokra

Az egyik ilyen kinyomókísérletet a Kozma és társai (2019) alapján mutatom be. Összesen 15 próbatestet készítettek különböző geometriákkal, amit az 3.2. ábrán szemléltettek. A próbatestek sajátossága a furatok gyantával való kikenése vagy pedig az L-profilok alkalmazása volt. A csavarokat az EN 1090 szabvány alapján méretezték és kiviteleztek. A próbatestek trapézlemez alkalmazásával készültek, hogy minél gyakorlatiasabb eredményeket kapjanak. A teszt során 15 helyen mérték az elmozdulásokat, mind vízszintes, mind függőleges irányban relatív és abszolút mozgásokat is figyeltek. (lásd 3.1. ábra) [6]

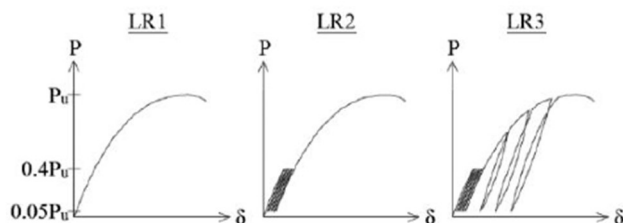


3.1. ábra: LVDT-k elhelyezkedése a próbatesten [6]



3.2. ábra: Próbatetek geometriája [6]

A teszt során 25 terhelési ciklust végeztek és 20 kN/perc sebességgel történt a terhelés (lásd 3.3. ábra). A várható tönkremenetel a terhelés 5-40 % között volt várható, tehát 50-400 kN között. A teszt során két ciklus között volt, hogy csavart távolítottak el a csavar tönkremenetelének vizsgálata érdekében, hogy nagyobb teher intenzitás jusson egy csavarra és összeségében kisebb feszültség jusson a szerkezet többi részére. [6]



3.3. ábra: Próbatetek terhelési tervei [6]

Kezdetben a feszített csavarok végett nagy kezdeti merevséggel rendelkezett a szerkezet, azonban a megcsúszást követően jelentősen lecsökkent a merevség, amíg a szerkezetben lévő toleranciák (furat hézag) be nem álltak, ezt követően egy újabb merevség növekedés jött létre a teszt során. Végül a tönkremenetel rideg módon következett be általában a csavar tiszta nyírásával (lásd 3.4. ábra), ami a csavar nagy szilárdságának köszönhető, mert a nagy szilárdság végett, valamint az előfeszítés eredményeképpen nem rendelkezik megfelelő duktilitással a képlékeny viselkedéshez. Ezenfelül a szögacélokon is találtak sérüléseket, de javarészt csak felületi sérüléseket. (lásd 3.4. ábra) [6]



3.4. ábra: Próbatetek tönkremenetelének képei [6]

A tesztek követően vizsgálták a szétszerelhetőséget, ami az esetek nagyrésztében sikeres volt és sikerült újrateherelni a próbateteket. A tesztek végén arra a következtetésekre jutottak, hogy megfelelő módon újrahasználatos az így összerakott szerkezet és nagyobb csavarok alkalmazásával növelhető a robusztussága a szerkezetnek, valamint a teherbírás is növelhető. [6]

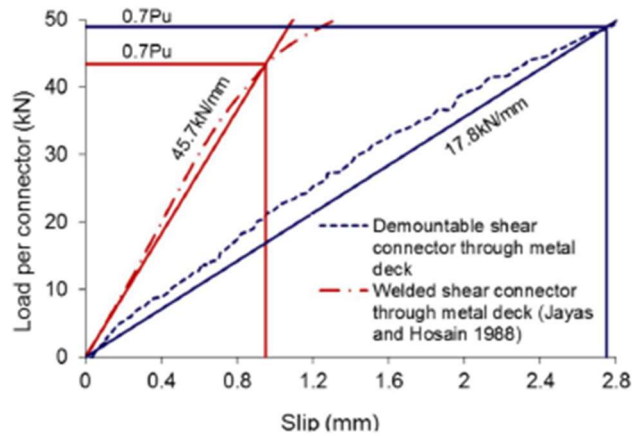
3.2. Kinyomókísérlet beágyazott csavarokkal ellátott trapézlemezes öszvérfödémre  
 Lam és társai (2017) a lokális viselkedést és az együttlőzést vizsgálták a nyírt kapcsolaton keresztül. A teszt terhelése nagyban megegyezett a korábbiakkal. Azonban a geometriába és a tönkremenetelben kis eltérés volt tapasztalható, ugyanis nem minden esetben a nyírt kapcsolat (fejes csap) hanem volt, ahol a beton adta meg magát a trapézlemez bordáinak mentén szintén nyírásra. (lásd 3.5. ábra) Azonban ezeknél a próbateteknél is szintén fellelhető a fejescsap tiszta nyírásának tönkremenetele. [7][4]



3.5. ábra: Próbatetek tönkremenetele beton nyírásával [7] [4]

A konklúziók hasonlóan alakultak az előzőekben tárgyalt kísérletekkel, viszont a trapézlemez teherbírásának csökkenését okozott a konstrukcióban, valamint tönkremeneteli mechanizmusok is

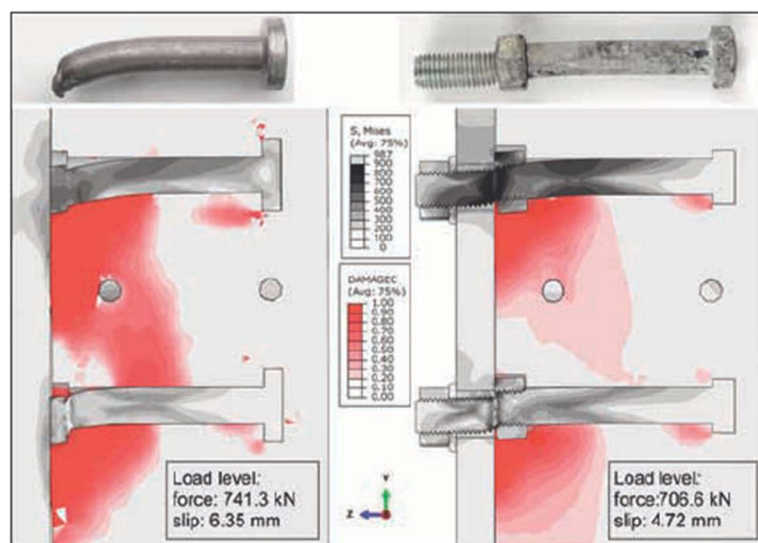
változtak, ugyanis új tönkremeneteli módok jelentkeztek, mint a beton nyírása és beton kiszakadás. A hegesztett és szétszerelhető nyírási csapok merevségének alakulását foglalja össze a 3.6. ábra.



3.6. ábra: Nyírási kapcsolatok merevségének alakulása [7] [4]

### 3.4. Numerikus vizsgálat kinyomókísérletre

Pavlovics és társai (2013) numerikusan is vizsgálták a szerkezeti viselkedést, valamint össze is hasonlították a hegesztett fejes csapos megoldást a szétszerelhető konstrukcióban alkalmazott oldható kapcsolatokkal. A kísérlet során egy kinyomókísérletet végeztek, majd ezt bemodelllezték egy vége-selemes szoftverbe. A várható teherbírást számolták és  $F_d=960$  kN értéket kaptak. Azonban a kísérlet során csupán 700 kN-os teherbírást értek el, amit a toleranciák és a csavarok nem egyszerre történő terhelése okozhatott. A csavarok viselkedése nagyon hasonló volt a hegesztett csapokéhoz, amit a 3.7. ábrán szemléltetnek. [13]



3.7. ábra: Kapcsolatok numerikus vizsgálatainak eredménye [13]

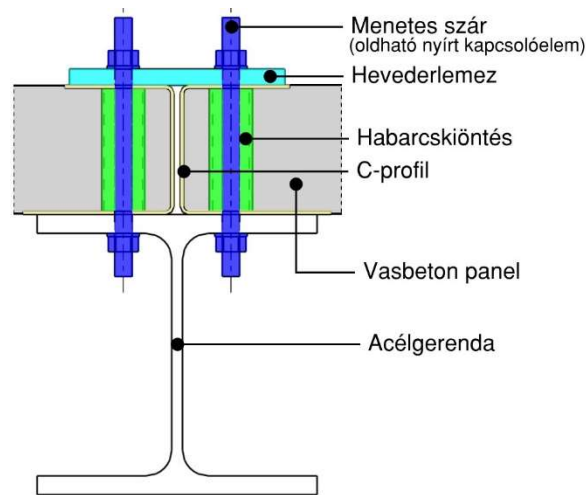


## 4. A kinyomókísérletek bemutatása

### 4.1. A kutatási program áttekintése

A jelen fejezet a kutatási és kísérleti program jegyzőkönyve [16], az eddig megjelent publikációk [14], [15], továbbá a személyes konzultációk alapján készült. A kiértékelt kísérleti eredményeket, az azok alapján megfogalmazott következtetéseket a rendelkezésemre bocsátották. A jelen dolgozat célja, hogy ezen eredményeket és konklúziókat megfelelő numerikus modellel támasszam alá.

A szerkezeti kialakítás folyamán figyelembe vették a nemzetközi trendeket, a korszerűséget és magyar tervezési és technológiai feltételeket. A fő cél az új szerkezet szerkezeti viselkedésének vizsgálata numerikus és kísérleti elemzések alapján egy Eurocode alapú tervezési módszer kidolgozása érdekében. Az így kapott szerkezeti rendszer melegen hengerelt acélgerendákkal és teljesen előregyártott vasbeton panelekkel, valamint a széleken beágyazott L- és C-profilokkal készül. Ezen szerelvények a gyárban kerülnek elhelyezésre, segítik az öntési folyamatot, javítják a gyártási és szerelési toleranciákat, továbbá biztosítják a nyírt kapcsolatok pontos elhelyezkedését. Ezek a szerelvények a födém alsó síkján túlméretes furatokat tartalmaznak a nyírt kapcsolatok számára, hogy megakadályozzák a csavar és a lyuk közötti acél-acél közvetlen érintkezést. A nyírt kapcsolatok biztosítják a szétszerelhetőséget, amik lehetnek beágyazott csavarok vagy menetes szárak. Ahol C-profil alkalmaztak ott a C-profilok felső részén normál furatok helyezkednek el, amelyek növelik a csavarok pozicionálási tűrését. Az így kialakított szerkezetek lehetővé teszik a 4 mm-es lyukhézagot. A másik lehetőség, hogy a csatlakozókat az építkezésen szerelik fel és körülöttük habarcsbetétet alkalmaznak a kedvező, 2 mm tűrés biztosítása érdekében. Ehhez a kialakításhoz a bordázott acélcsöveket helyeznek a betonpanelbe, majd a felállítás során, a helyszínen, ezeket a csöveket habarccsal fel kell tölteni. Ez a technológia egyszerű és széles körben elterjedt az előregyártott vasbeton gerenda-oszlop csatlakozásoknál. A szétszerelhető födémrendszer globális merevségének biztosítása érdekében hevederlemezekkel kapcsolják össze a nyírt kapcsolóelemeket a panelek felső síkján. Az így kialakított szerkezeti rendszer az 4.1. ábrán látható [14].



4.1. ábra: Egy újrafelhasználható öszvérfödém szerkezeti részlete [14]

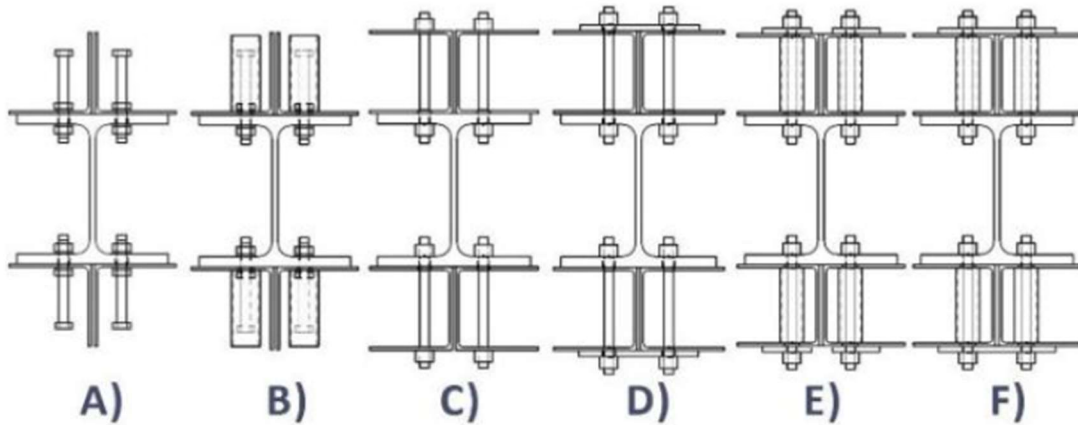
Ez a fajta konstrukció egyedi viselkedést mutat abban az esetben, ha a kezdeti merevségcsökkenést és kezdeti csúszást vizsgáljuk. A fentiekben javasolt szerkezeti kialakítás különböző beágyazott csavarokkal és menetes szárakkal, mint nyírt kapcsolatokkal vannak ellátva. A helyszíni hézagkitöltés habarccsal készült.

A javasolt rendszer tervezési módszerének kidolgozásához a speciális viselkedést és a nyírási kapcsolatokat sokféleképpen kell vizsgálni. Elsősorban az oldható nyírt kapcsolat teherbíró képességét, merevségét és alakváltozó képességét szükséges vizsgálni lokálisan kinyomókísérletekkel, majd ezeket kibővítve, a globális viselkedést és legfőképpen a kezdeti megcsúszás hatását kell elemezni gerendakísérletekkel [14].

#### 4.2. A kinyomókísérletek próbatestei

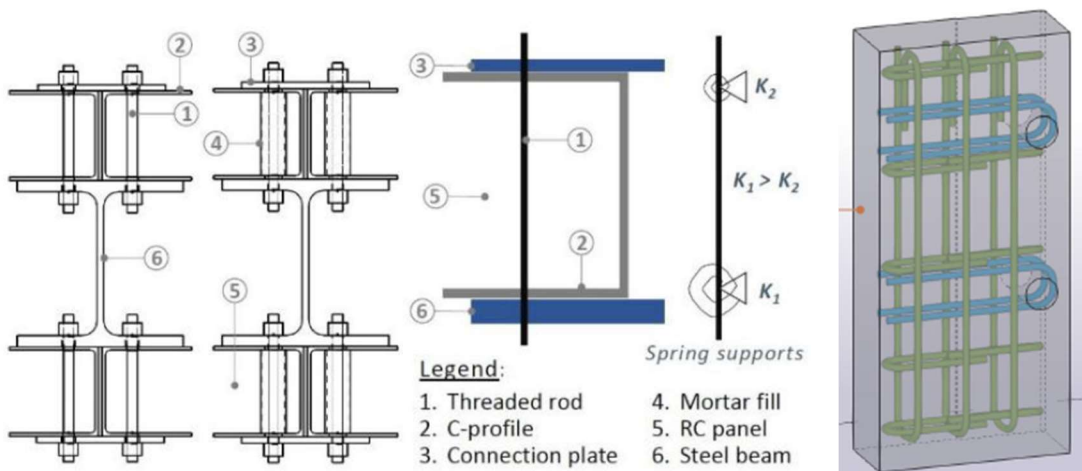
A kutatás során hat különböző konstrukciót terveztek meg, minden konstrukcióból három próbatestet készítettek, összesen 18-at. A kísérletek végrehajtása 2023 márciusában kezdődtek és májusában fejezték be. A vizsgálat során az Eurocode 4 szabványos kinyomókísérletek alapszanak [8] és két kutatási program adatai is felhasználásra kerültek [5] és [2] [14]. A kinyomókísérlet próbatestei az 4.2. ábrán láthatók, az egyes típusok a következők:

- A) Beágyazott csavar
- B) Beágyazott csavar habarcskiöntéssel
- C) Átmenő csavar
- D) Átmenő csavar, csatlakozó hevederlemezzel
- E) Átmenő csavar habarcskiöntéssel
- F) Átmenő csavar, csatlakozó lemezzel és tömítéssel



4.2. ábra: A tervezett hat konstrukció kinyomókísérletekhez [14]

A próbatestek HEB260 S235 acélgerendából és négy független C50/60 szilárdságú előregyártott vasbeton panelből épülnek fel (lásd 4.3. ábra). Minden esetben M16 8.8-as beágyazott csavart, vagy menetes szárat alkalmaztak, amely összesen nyolc nyírt kapcsolatot jelent próbatestenként. A kialakítás újdonságai közé tartozik, hogy nincs beágyazott anyaga a betonban, ami egy új szerkezeti viselkedést eredményez. A C-profil és az elsősorban globális viselkedést elősegítő hevederlemez nagyobb merevséget ad a kapcsolóelemnek a hagyományos kialakításokkal szemben. A képlékeny viselkedés biztosítására a túlméretes furatok helyett téglalap alakú nyílásokat hoztak létre a C-profilokban, hogy a közvetlen kontakt ne jöjjön létre és a deformáció szabadabban bekövetkezzen a beton repedésekkel együtt. A próbatest részleteit, valamint az elméleti erőjátékot láthatjuk a 4.3. ábrán. A kinyomókísérletek során a nyírt kapcsolatok viselkedését és a tönkremenetelek módjait vizsgálták a különböző konstrukciójú probatesteknél. [14-16]



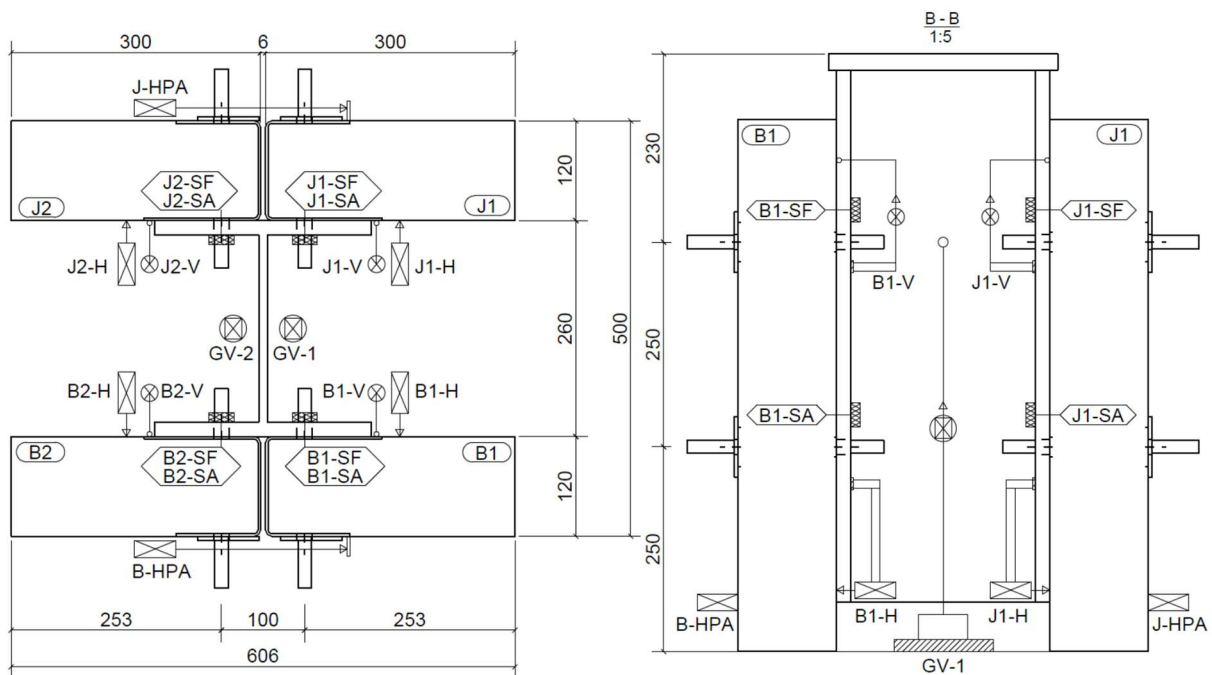
4.3. ábra: Az újszerű szerkezeti elrendezés és elméleti modell részletei [14]

#### 4.3. A kísérlet terhelési és mérési részletei

A terhelés során 25 kezdeti ciklust hajtanak végre a súrlódás megszüntetésére és a csavarok teherhordó helyzetbe pozícionálásának érdekében. Ennek a fázisnak a terhelési szintje nagyjából a várható teherbírási érték 5-40%-a. A próbatestet a várható teherbírási érték  $F_{Ek}=600$  kN, a ciklusok végrehajtása tehát 30-240 kN teherszinten történt. A kezdeti ciklusok után visszaengedik a terhelést kezdeti állapotba, majd a szenzorokat nullára állították. A következő ciklust tönkremenetelig terhelik, de oly módon, hogy az legalább 15 percig ne menjen tönkre [15-16].

A vizsgálatok során a globális függőleges elmozdulást, az acél és a beton közötti függőleges relatív elmozdulást, valamint a csavarok környezetében feszültséget mértek.

A műszerek elhelyezését az 4.4. ábra szemlélteti [15-16].



4.4. ábra: A mérési műszerek elhelyezkedése a próbatesteken [15-16]

A próbatestek gyártásának és előkészítésének néhány lépését a 4.5. ábra mutatja be.



4.5. ábra: Kivitelezés munkálatai [16]

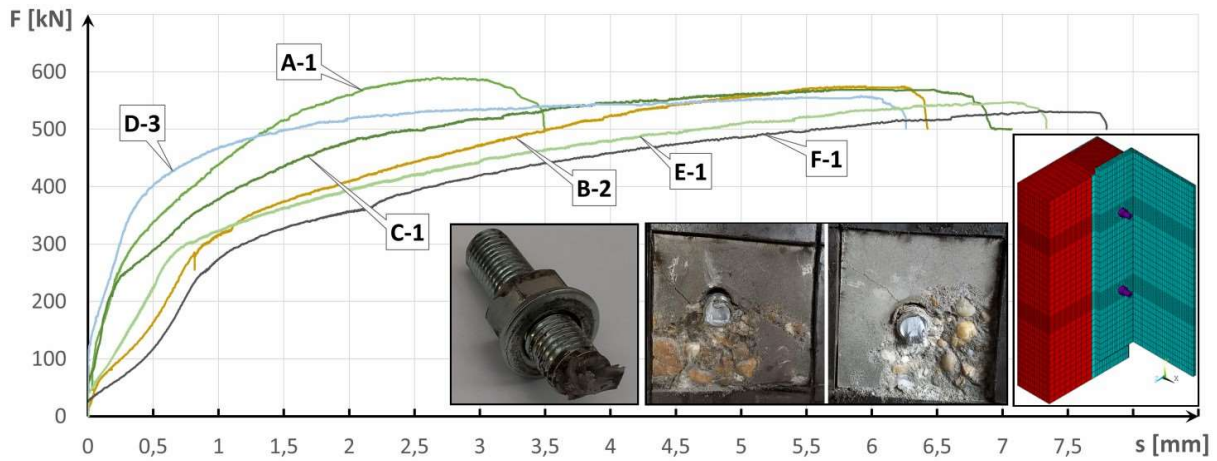
A kísérlet végrehajtását és a próbatestek pozícionálását az alábbi 4.6. ábra szemlélteti.



4.6. ábra: Kísérlet pozícionálása [15]

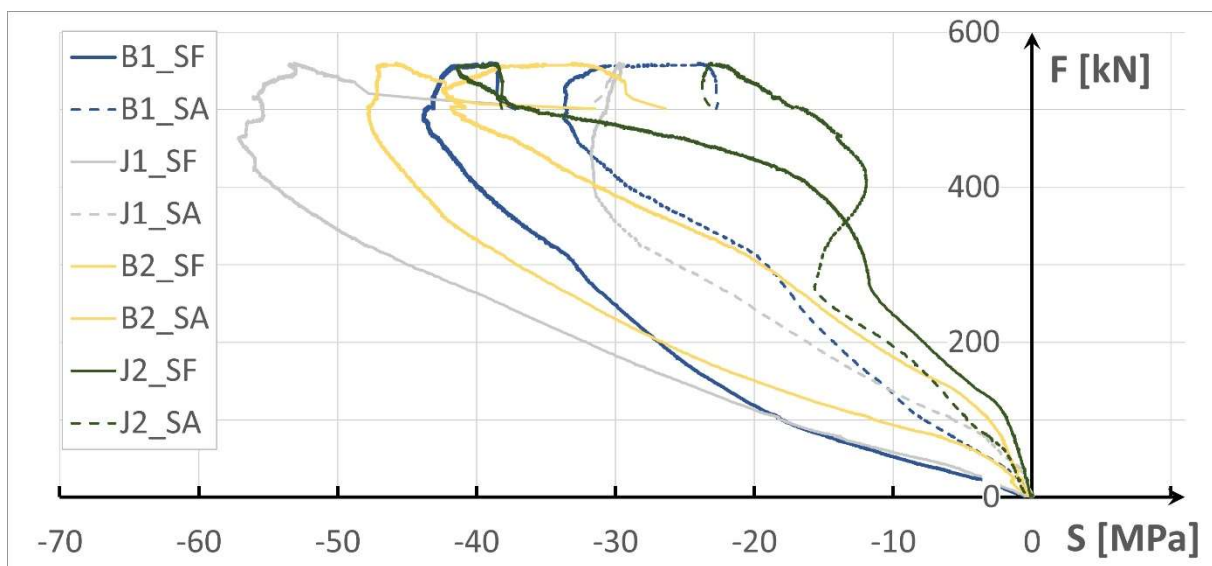
#### 4.4. Kísérleti eredmények

A kísérletek legfontosabb eredményeit, az erő-relatív elmozdulás diagramjait az 4.7. ábra szemlélteti minden egyes típusra.



4.7. ábra: Kísérletek eredményeinek diagrammjai [15-16]

A különböző kialakítású kapcsolatok nagy hatással vannak a kezdeti merevségre és a duktilitásra is. Az erő-feszítés diagramokat elemezve megfigyelték, hogy a csavarokban keletkező erő egy próbatesten belül eltér, vagyis nincs egyenletes erőeloszlás a kapcsolóelemek között. Az egyenletlen erőeloszlás következménye a progresszív tönkremenetel, vagyis a csavarok nem egyszerre, hanem egymás után mennek tönkre a várható teherbírási szint alatt. A C típusú próbatest erő-feszítés diagramjára mutat példát az 4.8. ábra.



4.8. ábra: Erő-feszítés diagram [16]

A csavarok képlékenyen, hajlítás és nyírás interakciójával mentek tönkre. A kapcsolóelemek képlékenyen tudtak deformálódni, a beton a csavarok környezetében megrepedtek. A csavarok és a beton tönkremenetele a 4.9. ábrán látható.



4.9. ábra: Kapcsolóelemek és a beton tönkremenetele [16]

#### 4.5. A kinyomókísérletek következtetések

A kinyomókísérlet konklúzióit összegezve elmondható, hogy nincs egyenletes erőeloszlás a csavarokban, amit a túlméretes furat és a csavarpozíciók bizonytalanságának hatása okozza. Ebből kifolyólag progresszív tönkremenetel tapasztalható a terhelés folyamán, viszont a csavarok tönkremenetelénél kellő duktilitást tapasztaltak, hogy további fejlesztéssel eleget tegyen az Eurocode követelményeinek. A továbbiakban a C jelű próbatestjének, mint a kifejlesztett oldható nyírt kapcsolóelem alapjának numerikus modelljének megépítésével folytatom munkámat [16] [15].

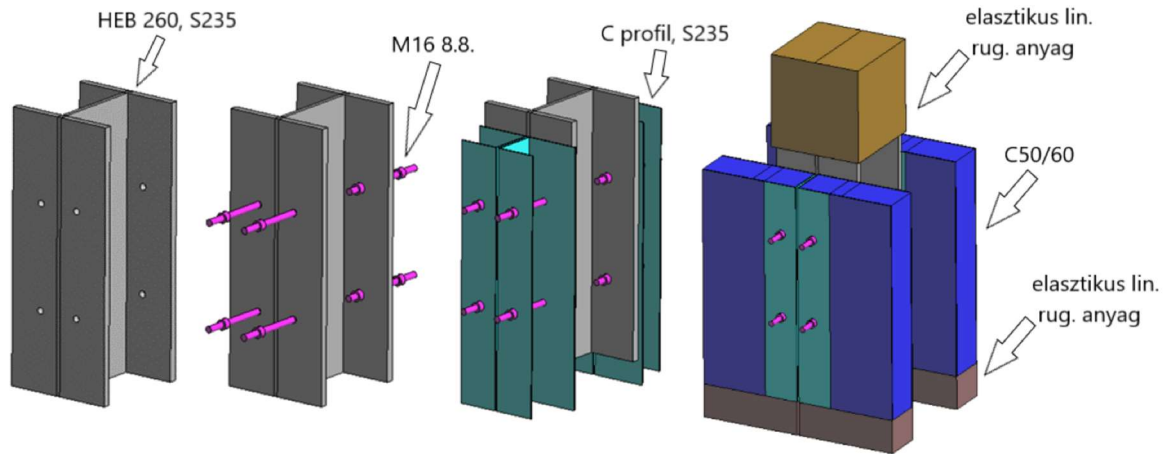
## 5. Numerikus modell építése Atenában

### 5.1. A modell geometriai felépítése

A numerikus modell felépítése öszvérszerkezeteknél egy soktényezős feladat, ugyanis figyelembe kell vennünk mind az acél, mind a beton viselkedését a terhelés során, valamint ezek egymásra hatását. Célszerű olyan programot választani, ami kifejezetten erre a feladatra készült. Az Atena ezek közé a szoftverek közé tartozik, így az ebben történő modellezés lehetővé teszi a legtöbb olyan kritérium alkalmazását, ami az eredményességet befolyásolja.

Kezdetben a programban pont, vonal, felület és térfogat elemekből, hierarchikusan építettem fel a geometriát, figyelve arra, hogy a szerkezeti elemek teljesen pontosan, kisebb részekből készüljenek. Az azonos anyagból felépülő darabokat a *collapse* paranccsal kapcsoltam össze. Az így létrejött modell térfogatelemekből tevődik össze. Két különböző anyag közötti felületek összekapcsolását *master-slave* kontakt elemmel definiáltam, amely tökéletes együttműködést biztosít a két anyag között. Az így kapott geometria egy tökéletes próbatest felépítését

reprezentálja. A terhelés végrehajtására szükség van egy további elasztikus anyagmodellre, ami lineárisan rugalmasan viselkedik limitek nélkül. A modell geometriai felépítését a 5.1. ábra szemlélteti.



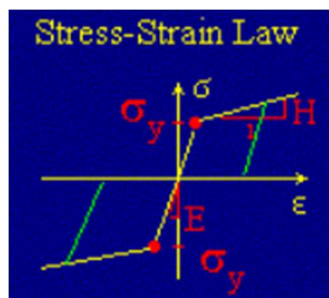
5.1. ábra: Geometria felépítésének szemléltetése

5.1. Táblázat: Anyagminőségek összefoglalása

Elem	Anyagminőség	Szilárdság [MPa]	Rugalmassági modulus [MPa]	Anyagmodell típusa
HEB 260	S235	235	210 000	lin. rug., lin. felkeményedő
Menetes csavar	M16 8.8	640	210 000	lin. rug., lin. felkeményedő
C profil	S235	235	210 000	lin. rug., lin. felkeményedő
Beton	C50/60	52,76	37795	non. lin.

## 5.2. Anyagmodellek és köztük lévő kapcsolatok definiálása

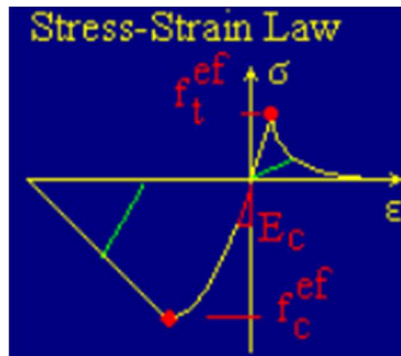
Az anyagok definiálását négy nagyobb részre lehet bontani a jelen modellnél. Az első részhez tartoznak a szerkezeti acélból készült elemek, amik S235 anyagtulajdonságokkal rendelkeznek. A második részhez egy M16 8.8-as csavar anyagtulajdonságai tartoznak. Az első két részben azonos jellegű, azonban eltérő folyáshatárú, lineárisan rugalmas, lineárisan felkeményedő anyagmodell alkalmaztam a 5.2. ábra szerint.



5.2. ábra: Alkalmazott acélelem és csavar anyagmodellje

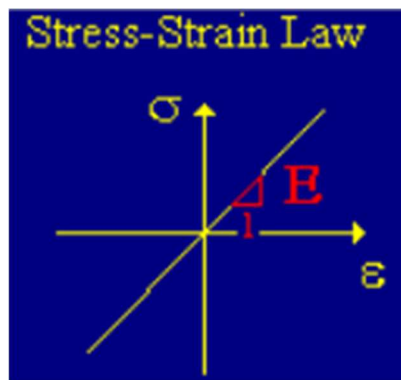


A harmadik rész a beton anyagmodelljének definiálása. Egy C50/60 betonszilárdságnak megfelelő, a repedés szimulálására szintén alkalmas anyagmodellt alkalmaztam. A modell paramétereit a beton próbakockákon végzett anyagvizsgálatok eredményeivel módosítottam. A vizsgált típushoz tartozó kockaszilárdság 52,762 MPa, amelyhez a rugalmassági modulust az EN 1992-1-1: Eurocode 2 szabványos anyagminőségekre vonatkozó táblázatából interpolálva határoztam, amelynek értéke 37795 MPa. A betonhoz tartozó anyagmodell a 5.3. ábrán látható.



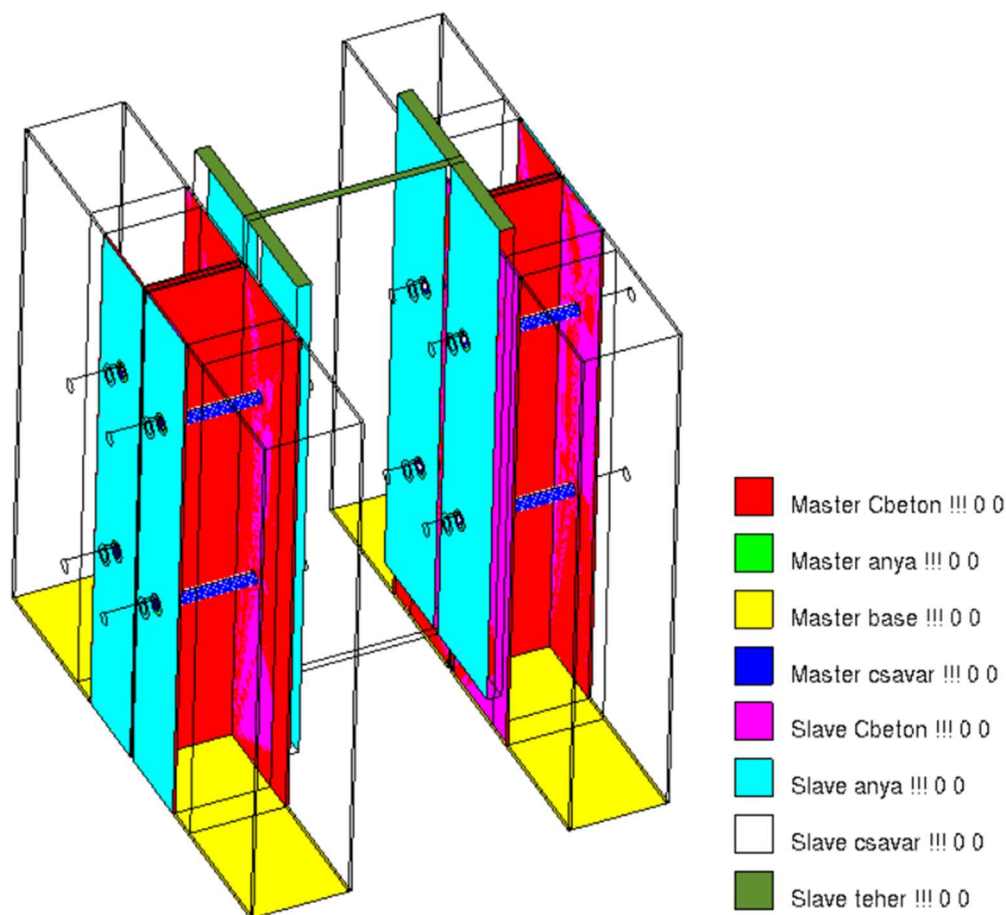
5.3. ábra: Alkalmazott beton anyagmodellje

Az utolsó, negyedik részhez tartozik egy fiktív a lineárisan rugalmas anyagmodell, melyet a modell terheléséhez alkalmaztam, hogy kellő pontossággal tudjam szimulálni a kinyomókísérlet valós terhelési fázisait. Ezen elemek tehát nem valósak, a megfelelő modellezés és eredmények érdekében kerültek definiálásra. Az ehhez tartozó anyagmodell a 5.4. ábrán látható.



5.4. ábra: A terhelések elasztikus anyagmodell feszültség-alakváltozás diagrammjának jellege

A különböző anyagok között az együttdolgozást, valamint a teherátadást *master-slave* kontaktelemekekkel biztosítottam. A kísérlet során a C-profil és a HEB260 övének érintkező felületeit kikenték zsírral, kizárva ezzel a súrlódást, annak érdekében, hogy csak a csavar teherbírását lehessen vizsgálni. A modell építésénél ezt a felületi súrlódást kizártam, hogy a modell a kísérleti eredményeket adja vissza. A kontaktfelületek a 5.5. ábrán láthatók.

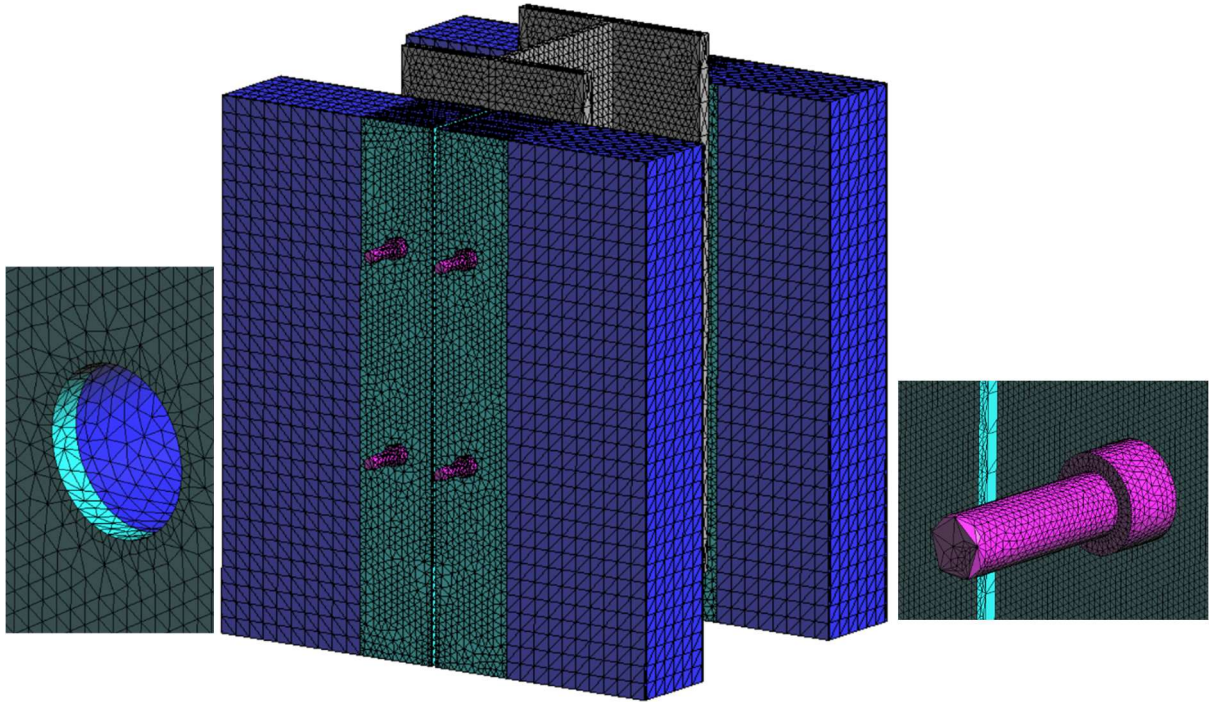


5.5. ábra: *Master-Slave* kontaktfelületek az egyes anyagok között

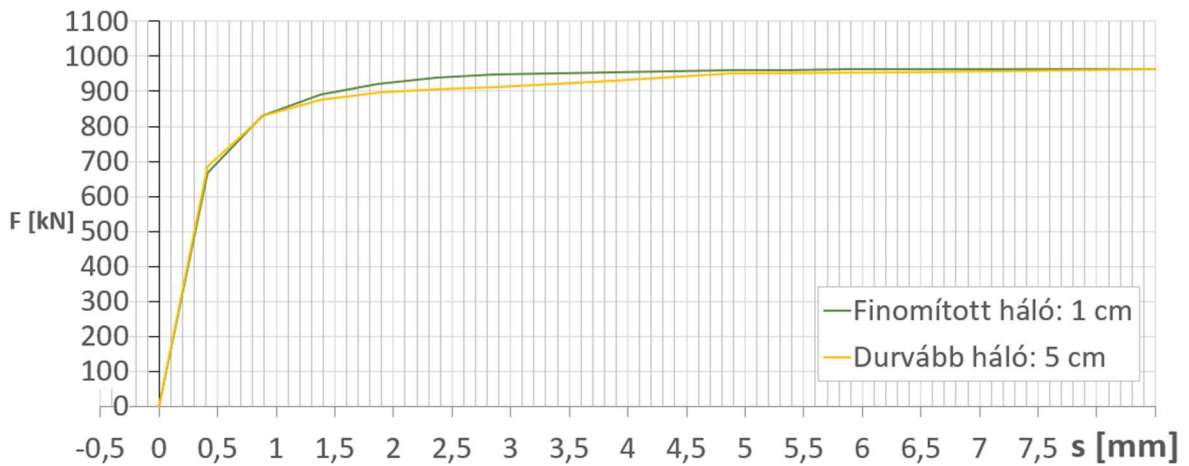
### 5.3. Modell hálózása

A modell hálózása során tetraéder végelemek alkalmaztam az összes szerkezeti elemhez. A háló generálása során kipróbáltam különböző méretű hálózásokat, azonban a modell teherbírását nem változtatta meg jelentősen, mivel az Atena program hozzárendeli az eredeti pontos geometria térfogati tulajdonságait az így létrehozott geometriához, ezzel biztosítva a pontos számításokat, valamint a kisebb elemeknél automatikusan sűríti a hálót megfelelő mértékig. Az eredmények kiértékeléséhez elengedhetetlen a kellő sűrűségű háló, hogy az alakváltozásokat és a feszültségcsúcsokat pontosan lehessen azonosítani.

A kapcsolóelemektől távol, általánosan 1 cm-es hálóméretet alkalmaztam a futtatásokhoz, míg a csavarok környezetében, az érzékeny tartományoknál nagyobb hálósűrűséggel, 0,1-0,3 mm-es elemméretet definiáltam az érzékenységtől függően. A vizsgált próbatest megfelelő hálóméretei a 5.6 ábrán láthatók és a különböző hálómérettekkel futtatott modell erő-elmozdulás diagramjait pedig a 5.7. ábra prezentálja.



5.6 ábra: Modell hálózásának bemutatása



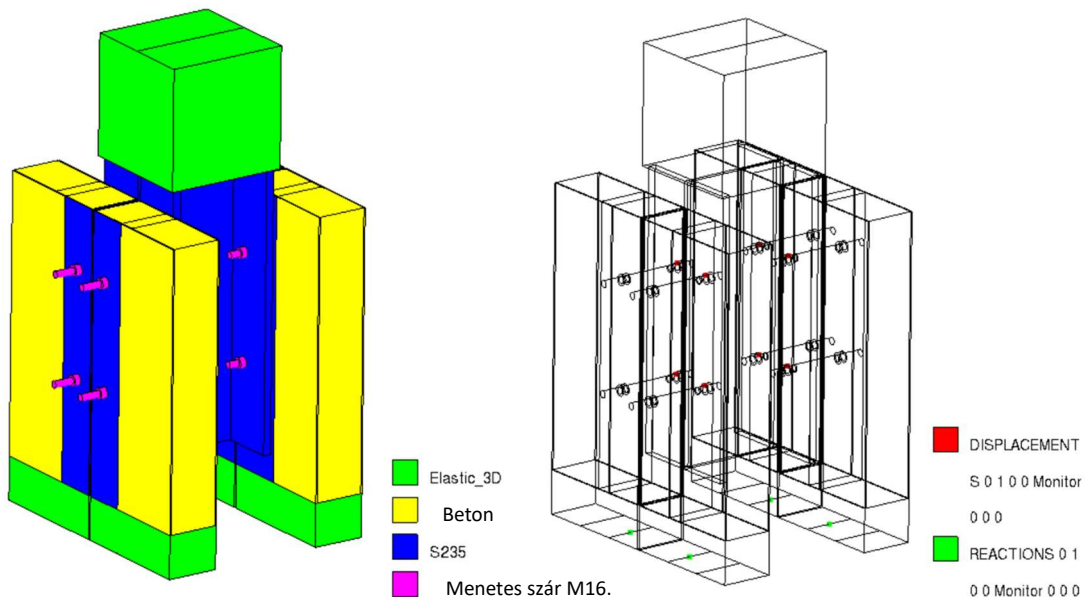
5.7 ábra: Különböző hálóméreték eredmény diagrammjai

## 6. Eredmények

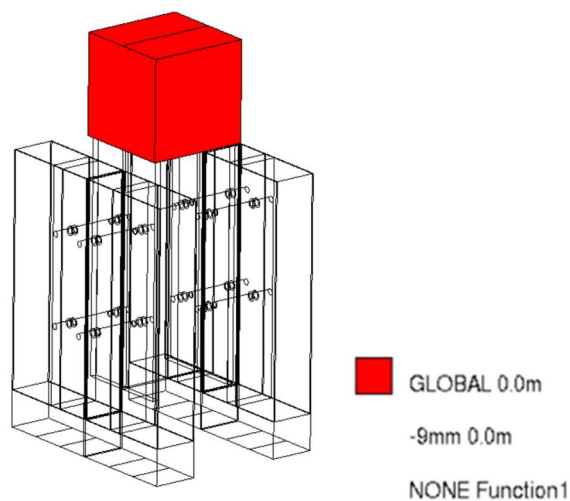
### 6.1 Eredmények bevezetése a futtatás bemutatásával

A kísérlet valós terhelési folyamatának reprodukciója a modellben módosításokat igényel, ugyanis három nagyon fontos tényező szükséges a mechanizmus vizsgálatához. Az első tényező a terhelés helyességének szimulációja, amit egy terhelő kockával oldottam meg. A hidraulikus szerkezethez hasonlóan elmozdulást definiáltam a kockához, ami a HEB szelvényt terheli, mint a valós esetben is. A második fontos dolog, hogyha a terhelés lényegében

milliméter dimenzióban történik akkor hogyan lehet kN-ban teherbírást mérni, ami a tönkremenetelt is igazolja. Ennek a problémának a megoldásához négy darab fiktív alaptestet alkalmaztam, amiken külön-külön tudtam mérni a reakcióerő mértékét, így igazolva azt is, hogy a csavarok a modell térben tényleg tökéletesen egyszerre terhelődnek, vagy esetleg eltérés van köztük. A harmadik megoldandó feltétel az Eurocode 4 minimum duktilitás feltétel teljesítésének igazolása a modellel. Erre a feladatra monitor pontokat helyeztem el a csavarokra különböző pontokon, ahogyan azt a kísérlet során is végrehajtották. Ezzel a három tényezővel már lehetséges olyan diagrammokat létrehozni a modell terhelése során, amivel verifikálni lehet a modell helyességét, majd konklúziókat fogalmazhatunk meg a szerkezeti viselkedéssel kapcsolatban. A módosításokat az alábbi 6.1 ábra szemlélteti.



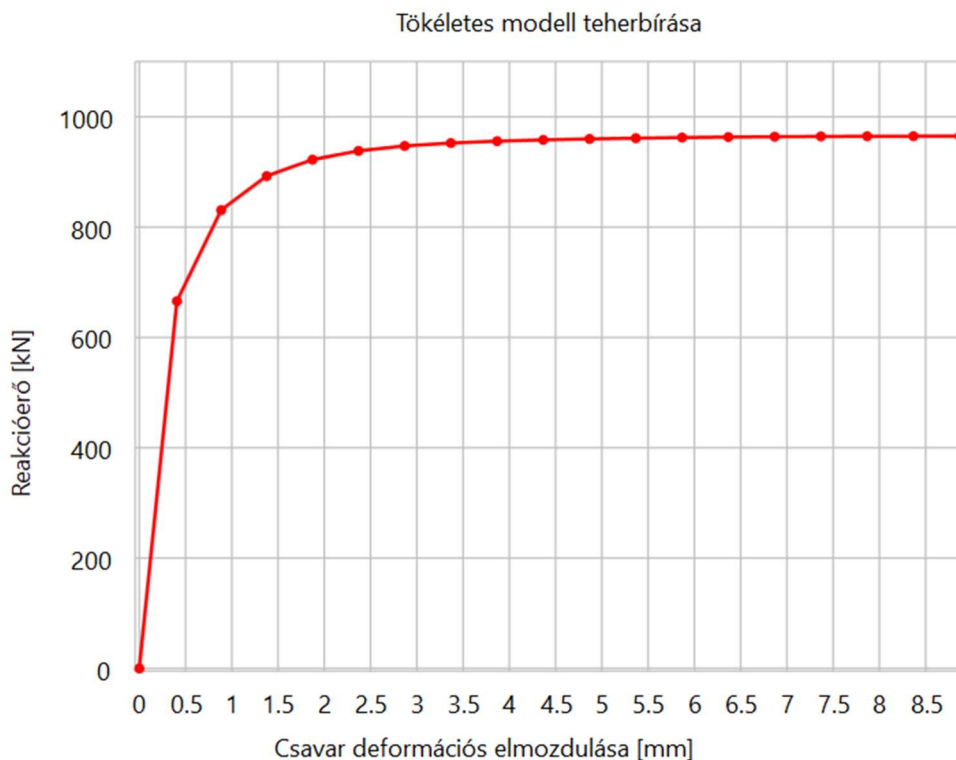
6.1. ábra: Modell terheléséhez végzett módosítások



6.2. ábra: Modell terhelése

## 6.2. Modell kalibrálása

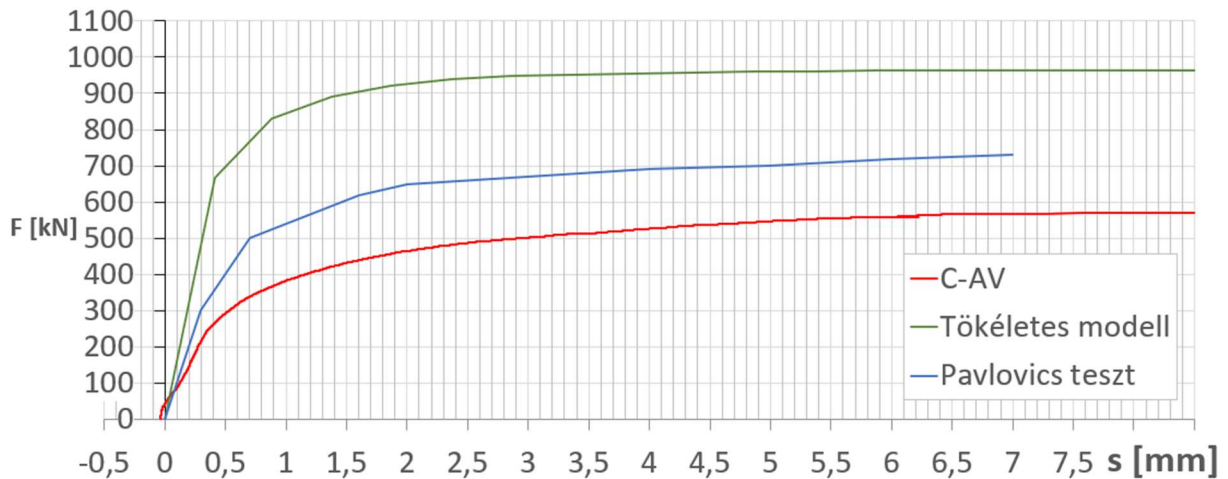
Mivel minden egyes kísérlet folyamán szükség van bizonyos kalibrálásokra, így jelen esetben is bizonyos tényezőket egységesíteni kell. Az első lépés, hogy tisztában legyünk milyen tényezők befolyásolhatják az eredményeket jelentősen. Jelen esetben az egyik legfontosabb tényező a terhelés gyorsasága, ugyanis egy M16 8.8-as menetes szár anyagtulajdonságai esetén, ha túl gyorsan terheljük, akkor általában kis alakváltozás mellett, viszonylag nagy teherbírás hatására rideg tönkremenetelt szenvedhet. Jelen állapotban ez egy tökéletes modell, így a várható számolt teherbírásra kell a tönkremenetelt elszenvednie. A modellt megfelelő gyorsasággal kell terhelni, hogy képes legyen helyesen reprezentálni mind az alakváltozást mind a teherbírást. Ehhez a terhelés gyorsaságát lassítottam míg a modell alakváltozási képessége meg nem egyezett a kísérleteken mért tönkremeneteli alakváltozásokkal, ekkor a teherbírás nagysága szintén a Pavlovics és társai által számolt  $F_d = 988,5$  kN várható teherbírással lett egyenlő. Valamint a háló méretét már az első próbálkozásoknál lecsökkentettem addig míg nem okozott szinte semmilyen változást sem a teherbírásban sem az alakváltozásban. Az így kapott diagrammot a 6.3 ábra szemlélteti.



6.3. ábra: Kalibrált modell erő-elmozdulás diagrammja

### 6.3. Az eredmények kiértékelése

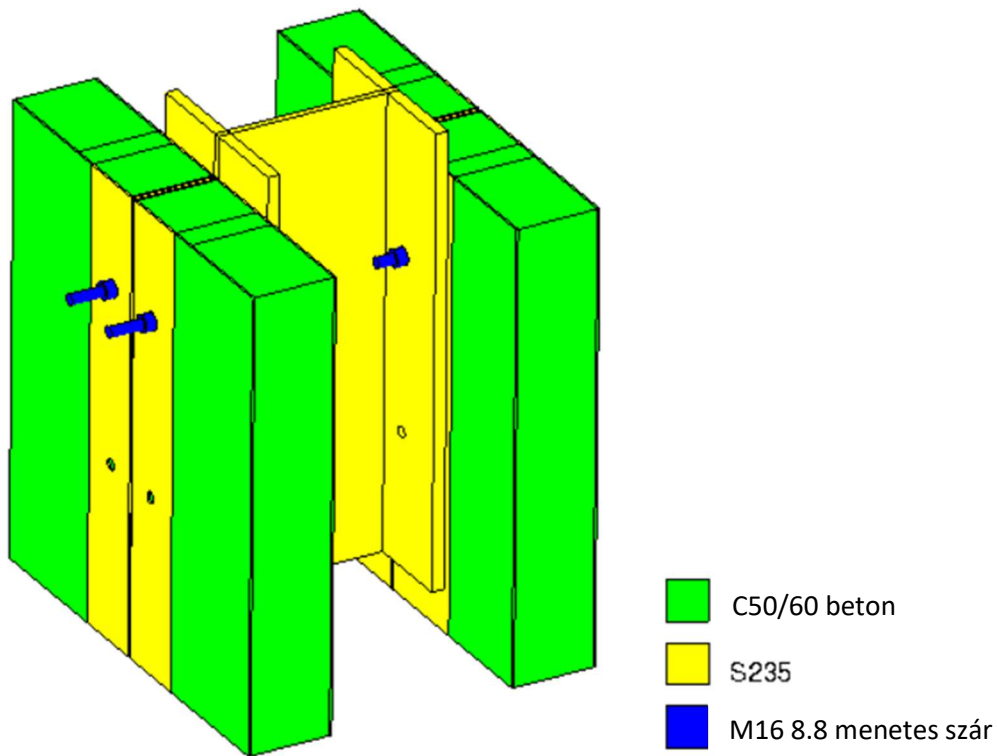
Jelen pontban a tökéletes modell kalibrált diagrammja, valamint az adott próbatesten végzett kísérletek által kapott diagrammok átlag diagrammja és a Pavlovics és társai által végzett kísérlet diagrammja lesz összehasonlítva. Az így kapott közös eredményt a 6.4. ábrán szemléltetem.



6.4. ábra: Kalibrált modell és kísérleti eredmények diagrammjai

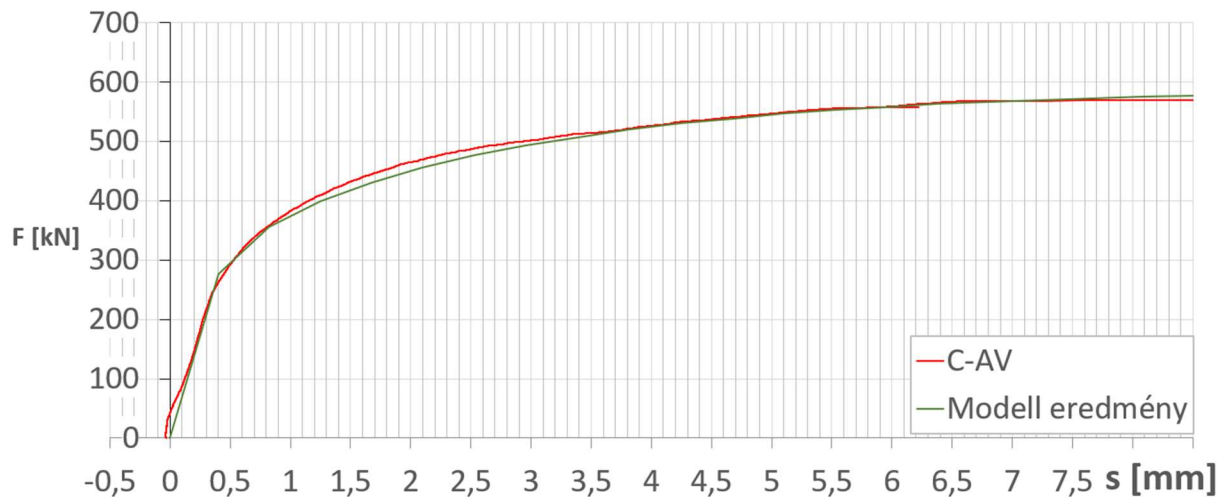
A diagrammokat megfigyelve azt lehet mondani, hogy jellegükben megegyeznek mivel hasonlóan van egy kezdeti merevség majd megindul a csavarokban a képlékenyedés és a diagramm ellaposodik. Azonban egy fontos következtetésre és konklúzióra világít rá, ugyanis míg a tökéletes modellnél biztosan tudjuk, hogy a 8 csavar egyszerre terhelődik úgy a kísérlet során számos csavarpozíció szóba jöhet a toleranciák végett, így nagy valószínűséggel nem dolgoznak együtt. Ha vesszük a korábban említett csavarpozíciók hatását és figyelembe vesszük, hogy minden egyes beton panelt 2 csavar tart, akkor arra lehet következtetni, hogy a toleranciák végett három panelnél 1 csavar legalább dolgozik, mivel ha egy beton panel teljesen nem dolgozna a terhelés során a három másik dolgozó csavar már meghatározna egy térbeli felületet amiben 3 csavarnak muszáj részt venni, máskülönben instabilitás lépne fel és a próbatest addig lenne mozgásban míg egy stabil terhelhető állapotba nem kerülne. Továbbá, ha csak 3 csavar dolgozik akkor külpontosság léphet fel a terhelés során a szerkezetben, ami többlet terhet okozhat bizonyos csavarokban. Így végül a többletterhelés végett nagyobb alakváltozást szenvednének azok a csavarok, amiknél ez a jelenség fennáll, így a negyedik csavar még a képlékenyedés előtt nagy valószínűséggel becsatlakozik a teherviselésbe, hogy a szerkezet stabil terhelhető állapotba kerüljön. Mindezt összegezve 4 csavar egyszerre kezdődő teherviselésére nagy esély van, azonban ezután képbe jönnek a csavarlyuk toleranciák, ami egy

M16-os csavarnál 2 mm különbséget is jelenthet, valamint a HEB szelvényben létrehozott csavarlyukak további akár több milliméteres eltérést jelenthetnek, ami így már elegendő lehet ahhoz, hogy az első 4 csavar elveszítse kezdeti merevségét és akár további teherviselési képességét a következő csavar teherviselésbe történő becsatlakozását megelőzően. Így előidézve azt a helyzetet, hogy a tönkremenetelt akár 4 csavar teherbírásának maximuma is okozhatja. A 6.4. ábrán látható, hogy a számolt várható teherbírás a tökéletes modellnél a kísérleti teherbírás csaknem kétszerese, így tehát ezek alapján készítettem egy olyan modellt is, ahol csak 4 csavar végzi a teherviselést ugyanazon próbatestnél, amit a 6.5. ábrán szemléltetek. A terhelés gyorsaságát a kalibrált modell alapján készítettem el, hogy összehasonlítható legyen a két eredmény.

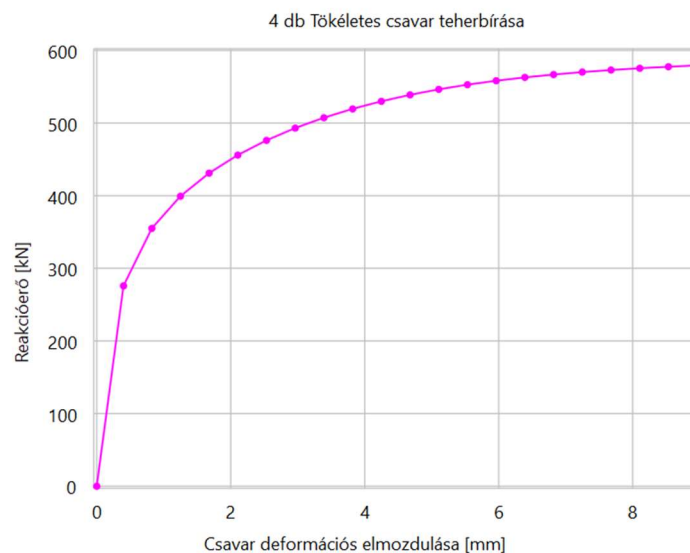


6.5. ábra: Módosított modell geometriája

A modell futtatását követően bebizonyosodott, hogy a feltételezések helyesnek bizonyosodtak ugyanis a két terhelés-alakváltozás görbe csaknem teljesen egymást követi. Tehát a kísérletek során is hasonló mechanizmusok játszódhattak le, ami azt eredményezte, hogy a várható teherbírás majdnem felénél a teherviselés kimerült. A két eredményt a 6.6. ábrán szemléltetem. A módosított modell diagrammját külön is szemléltetem a 6.7. ábrán.



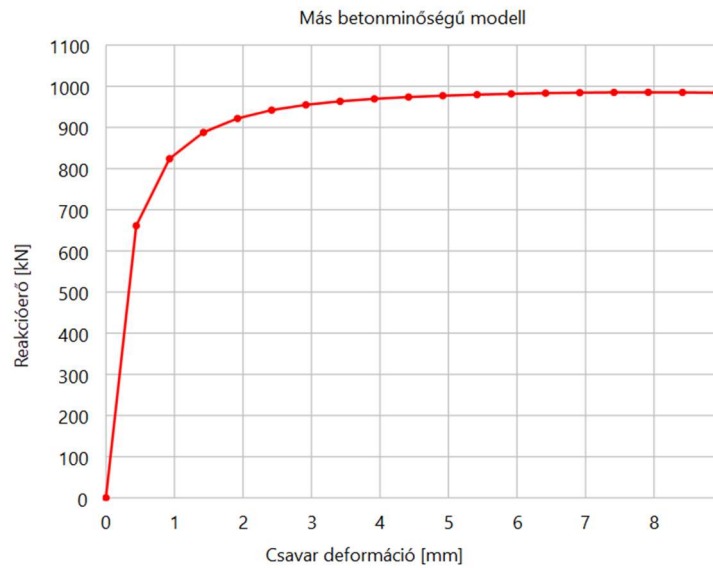
6.6. ábra: Módosított modell és kísérleti eredmény összehasonlításának diagrammja



6.7. ábra: Módosított modell terhelés-deformációs diagrammja

A beton minőségének tényezőjét is figyelembe kell vennünk, ugyanis befolyásolhatja a próbatestünk teherbírását. Ennek érdekében készítettem egy futtatást különböző anyagminőségű betonnal is. Azonban a teherbírást egy közel fele olyan jó minőségű beton, mint amit alkalmaztak a kísérlet során csak 2-4%-ban változtatta meg a teherbírást. Viszont mivel a csavar hajlítási alakváltozásai némileg jobban érvényesültek, aminek természetesen jobb a teherbírás tulajdonságai a tiszta nyírással szemben jelen esetben, ezért teherbírásnövekedés volt tapasztalható. Azonban ez nem feltétlenül vonatkozik minden eshetőségre, ezért ezt még vizsgálni kell a pontos konklúzió levonása érdekében a továbbiakban. A megváltoztatott betonminőségű modell diagrammját a 6.8. ábra szemlélteti.

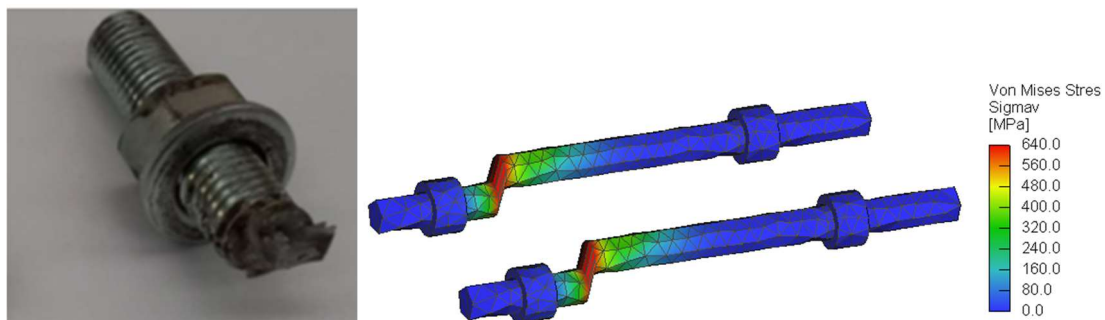




6.8. ábra: Módosított betonnal rendelkező modell diagrammja

#### 6.4. Kapcsolóelemek tönkremenetele

Ebben a pontban összehasonlítom a modell alakváltozásait a valós kísérlet során tapasztalt alakváltozásokkal. A csavar alakváltozása és tönkremenetele teljesen megegyezett a modellben tapasztaltakkal. Mindkét esetben főképp a tiszta nyírás képlékeny alakváltozási jelensége lelehető fel némi azonban nem jelentős hajlítási interakcióval. A két alakváltozást a 6.9. ábrán szemléltetem.



6.9. ábra: Csavar tönkremenetelének és alakváltozásainak összehasonlítása

A beton alakváltozásai is szinte teljesen megegyeztek. Mindkét esetben fellelhető némi morzsolódás a palástnyomás feszültségkoncentrációs helyein. Valamint a csavar palástján létrejövő nagy feszültségkoncentráció hatására a beton leválása a csavar képlékeny deformációja és betonrepedezettségre is észrevehető a csavar körül. A beton összehasonlítását a 6.10. ábra szemlélteti.



6.10. ábra: Beton alakváltozásainak és morzsolódásainak összehasonlítása

## 6.5. Összefoglalás

A munkám célja a kinyomókísérletek működő végeleemes modelljének létrehozása és a szerkezet terhelés alatt történő viselkedésének és tönkremenetelének validálása numerikus analízissel. Ehhez egy átfogó tanulmányt készítettem a szétszerelhető ösvérszerkezetekről, az oldható nyírt kapcsolóelemek jellegzetes viselkedéséről, továbbá néhány szakirodalomban fellelhető kísérletekről. Bemutattam a KFI program keretein belül végrehajtott kinyomókísérletek eredményeit és konklúzióit, amelyek legfőbb kiindulásai voltak a jelen munkámnak. A numerikus analízis sikeresen reprezentálta a kinyomókísérlet során tapasztalt teherbírást, tönkremeneteli módokat és alakváltozó képességeket. A numerikus modell segítségével lehetőség adódik a többi típusú, jelen munkában nem vizsgált próbatestek elemzésére, az egyes alkotóelemek anyagtulajdonságainak tanulmányozására, továbbá a későbbiekben ciklikus vizsgálatokra is alkalmazható. A jelenleg bemutatott modell tehát megfelelő alapot adja a teljes kísérleti program elemzésének, továbbá a nyírt kapcsolóelemek továbbfejlesztésének.

## 6.6. Következtetések

A tökéletes numerikus modell összhangban van a szakirodalmi eredményekkel és követi az oldható nyírt kapcsolóelemekre jellemző szerkezeti viselkedést. A kinyomókísérletek egyik legnagyobb következtetése, hogy a vizsgált konstrukcióban a kapcsolóelemek között nincs egyenletes erőeloszlás, vagyis nem dolgozik egyszerre az összes csavar, emiatt a kapcsolat

teherbírása is csökken. Ezt a megállapítást sikeresen igazoltam a numerikus modell eredményeivel. A konstrukcióban valóban csak néhány csavar dolgozik, ugyanis, ha a tökéletes modellt módosítottam, hogy ne dolgozzon minden csavar egyidőben, akkor visszakaptam a kísérlet során keletkezett erő-elmozdulás diagrammot a modelltől. A csavarok tönkremenetele a modellben is kellő duktilitással következett be, igazolva ezzel a kísérlet és a modell működőképességét. A beton tönkremenetele a modellben is csak lokálisan, a csavar környezetében következik be, ezért a modell eredményei jól visszaadják a kísérlet során megfigyelt jelenséget. A betonminőség hatásának vizsgálatát ezeken a feladatokon felül végeztem, hogy további következtetéseket lehessen vonni a későbbi feladatokhoz. A legfőbb konklúzió azonban az, hogy a modell validálva van a kísérletekkel és a modell visszaadja a szerkezet viselkedését.

## 7. Irodalomjegyzék

- [1] Mahmoud A. M., Finite element modelling of steel concrete beam considering double composite action, *Ain Shams Engineering Journal* 7, p.73-88, 2016
- [2] Pavlovic M., Resistance of bolted shear connectors in prefabricated steel-concrete composite decks, Doctoral Dissertation, University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering, Serbia, 2013
- [3] Mohamed S.Majdub, Shahrizan Baharom, Ahmed W. Al Zand, Azrul A. Mutalib, and Emad Hosseinpour Innovation of Shear Connectors in Slim Floor Beam Construction
- [4] Lam, D., Dai, X., Ashour, A.F., Rehman, N. (2017). Recent research on composite beams with demountable shear connectors. *Steel Construction: Design and Research*, 10(2): 125-134.
- [5] Sarri, A. (2019). Assessment of steel-concrete shear connector system with resin injected bolts. Doctoral dissertation, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- [6] Kozma, A., Odenbreit, C., Braun, M.V., Veljkovic M., Nijgh, M.P. (2018). Push-out tests on demountable shear connectors of steel-concrete composite structures. 12th International Conference on Advances in Steel-Concrete Composite Structures (ASCCS 2018), Universitat Politècnica de Valencia, Valencia, Spain, June 27-29, 2018.
- [7] Lam, D., Yang, J., Dai, X., Sheehan, T., Zhou, K. (2018). Designing composite structures for reuse. Proceedings of the 9th International Conference on Advances in Steel Structures (ICASS2018). December 5-7, 2018, Hong Kong, China.
- [8] EN 1994-1-1, Eurocode 4, Öszvér acél- és betonszerkezetek tervezése -1-1. rész: Általános szabályok, CEN, Bruxelles, 2004.
- [9] Suwaed, A. (2017). Development of novel demountable shear connectors for precast steel-concrete composite bridges. PhD thesis, University of Warwick.

- [10] MEP Staff Sustainability at the core of FIFA Stadium 974, elérhető:  
<https://www.mepmiddleeast.com/business/sustainability-stadium-974-qatar-fifa-world-cup>
- [11] Park up Groupe Briand, Parking demountable, elérhető:  
<https://www.parkup-systems.com/en/>
- [12] Dr. Kovács Nauzika, Öszvérszerkezetek új tervezési irányai, Slim-floor födémek, Profillemezés öszvérfödémek, Tartóbetétes öszvérszerkezetek, elérhető:  
<https://docplayer.hu/116127935-Oszverszerkezetek-uj-tervezesi-iranyai-slim-floor-fodemek-profillemezes-oszverfodemek-tartobetetes-oszverszerkezetek.html>
- [13] Pavlović, M., Spremić, M., Marković, Z., Veljković, M. (2013). Headed Shear Studs versus High-Strength Bolts in Prefabricated Composite Decks. Composite Construction in Steel and Concrete VII, Palm Cove, Australia 10.1061/9780784479735.052.
- [14] Király, K. (2022). Fenntartható öszvérszerkezetek. MAGÉSZ Acélszerkezetek, 2022(1), 38-43.
- [15] Király, K., Dunai, L., Calado, L. és Kocsis, A.B. (2023), Demountable shear connectors – constructional details and push-out tests. ce/papers, 6: 53-58. <https://doi.org/10.1002/cepa.2416>
- [16] Király, K., Dunai, L. (2023), Kinyomókísérleti program jegyzőkönyve, Budapesti Műszaki és gazdaságtudományi Egyetem Hidak és Szerkezetek Tanszék, Budapest