



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Építőmérnöki kar

Hidak és Szerkezetek Tanszék

Tudományos Diákköri Konferencia

2021

Innovatív, betonnal kitöltött acél csövek
numerikus vizsgálata

Készítette:

Horváth András

Szerkezet-építőmérnök mesterszak (MSc)

Konzulensek:

Dr. Kollár Dénes, adjunktus

Dr. Kövesdi Balázs, egyetemi docens

Budapest, 2021

Összefoglaló

A betonnal kitöltött acél csövek versenyképes alternatívát jelentenek a hagyományos tisztán acél vagy vasbeton oszlopokkal szemben, így alkalmazásuk egyre inkább előtérbe kerül a hazai szerkezetépítésben. Ehhez azonban elengedhetetlen ezen oszlopok viselkedésének pontos megismerése, a megfelelő numerikus modellezési módszer kialakítása, és a teherbírás meghatározására alkalmazott méretezési módszerek finomhangolása. Betonnal kitöltött acélcsövek teherbírásának meghatározása a keresztmetszeti elemek kölcsönhatása miatt azonban számos kérdést vet fel, melyeket a tervezői gyakorlat számára meg kell válaszolni a széleskörben való alkalmazás előtt. Numerikus modell alapú teherbírásvizsgálatuk napjainkban még nem teljesen kidolgozott, aktív kutatási terület.

A TDK dolgozatom célja a betonnal kitöltött acélcsövek (concrete filled steel tube - CFST) szerkezeti viselkedésének vizsgálata, alkalmazási példáinak, jellemző kialakításainak, a témával foglalkozó teherbírasi kísérleteknek és numerikus modellezési lehetőségeinek az áttekintése. Célom továbbá korábbi publikációk alapján validált numerikus modell kidolgozása, mellyel a szerkezet teherbírása nagy pontossággal meghatározható. A numerikus modell segítségével központosan nyomott CFST elem tönkremenetelét és teherbírását vizsgálom. Az elem teherbírásának numerikus meghatározása után az eredményt összehasonlítom az Eurocode által javasolt összefüggések eredményével, mely összevetés alapján célom a szabványos méretezési módszer alkalmazhatóságának vizsgálata, esetleges pontosítása az általam vizsgált keresztmetszeti kialakítás és kapcsolóelem típusok esetére. Az öszvérszerkezetek numerikus modellezése során sok esetben a kidolgozott numerikus modellek kizárólag a validált keresztmetszeti kialakításra és a vizsgált igénybevétel típusra működik megfelelően, a modellparaméterek erre vonatkozóan kerülnek meghatározásra. A kutatómunkám hosszútávú célja olyan numerikus modell kidolgozása, mely nem csak a vizsgált geometriájú és igénybevétel eloszlású betonnal kitöltött csőre lesz alkalmazható, hanem általánosan, öszvér oszlopokra.

Abstract

Concrete-filled steel tubes are a competitive alternative to traditional pure steel or reinforced concrete columns; thus, their application is becoming increasingly prominent in domestic construction. Nevertheless, the exact knowledge of the behaviour of the columns, the development of an appropriate numerical analysis method and the fine-tuning of design methods used to determine the load capacity are all essential. However, the determination of the load-bearing capacity of steel tubes filled with concrete raises a number of questions due to the interaction of the cross-sectional elements, which questions have to be answered for design practice before they can be widely applied. Numerical model-based load-bearing test of CFST elements is not yet fully developed, it is an active research area.

The purpose of this paper is to examine the structural behaviour of concrete-filled steel tubes and to give an overview of their application examples, typical designs, load-bearing experiments and numerical modelling possibilities. My further goal is to develop a numerical model validated on the basis of previous publications, wherewith the load-bearing capacity of the structure can be determined with high accuracy. With the help of the numerical model, I plan to investigate the failure mode and load-bearing capacity of CFST elements subjected to pure axial load. After numerically determining the load-bearing capacity of the element, I compare the numerical results with Eurocode-based formulae. On the basis of the comparison, my aim is to examine the applicability of the standardized design method, its possible improvement in the case of the cross-sectional design and types of coupling elements I have examined. In numerical analysis of composite structures, in many cases, the developed numerical models only work properly for the validated cross-sectional design and the examined type of loads. Model parameters are determined in this manner. In my research work, my future goal is to develop a numerical model that will be applicable not only to the concrete-filled steel with the examined geometries and loads, but in general, on composite columns.

Tartalomjegyzék

1 Bevezetés	6
2 Szakirodalom kutatás	7
2.1 Alkalmazási példák betonnal kitöltött acélszelvények esetére	7
2.1.1 Magasépítési szerkezetek alkalmazási példái	7
2.1.2 Betonnal kitöltött acél szelvények a hídépítésben	9
2.1.3 Egyéb alkalmazási területek	11
2.2 Alkalmazott kialakítások	12
2.2.1 Keresztmetszeti alak	12
2.2.2 Keresztmetszet megerősítésének lehetőségei	14
2.2.3 Anyaghasználat	15
2.3 Betonnal kitöltött acél szelvények teherbírásvizsgálata	17
2.3.1 CFST elem nyomási teherbírása	18
2.3.1.1 Nyomási teherbírás kísérleti vizsgálata	18
2.3.1.2 Nyomási teherbírás numerikus vizsgálata	21
2.3.1.3 Szabványos vizsgálat és képletfejlesztés	24
2.3.2 CFST elem húzási ellenállás	26
2.3.2.1 Húzási ellenállás kísérleti vizsgálata	26
2.3.2.2 Húzási teherbírás numerikus vizsgálata	28
2.3.2.3 Szabványos vizsgálat és képletfejlesztés	29
2.3.3 CFST elem hajlítási teherbírás	29
2.3.3.1 Hajlítási teherbírás kísérleti vizsgálata	29
2.3.3.2 Hajlítási teherbírás numerikus vizsgálata	32
2.3.3.3 Szabványos méretezési módszer és képletfejlesztés	36
2.3.4 CFST elem csavarási teherbírás	38
2.3.4.1 Csavarási teherbírás kísérleti vizsgálata	38
2.3.4.2 Csavarási teherbírás numerikus vizsgálata	39
2.3.4.3 Szabványos méretezés és képletfejlesztés	40
2.3.5 CFST elem teherbírása nyomás-hajlítás interakcióra	41
2.3.5.1 Interakciós teherbírás kísérleti vizsgálata	41
2.3.5.2 Interakciós teherbírás numerikus vizsgálata	42
2.3.5.3 Szabványos vizsgálat és képletfejlesztés	44
3. Numerikus modell bemutatása	48
3.1 Vizsgált geometria	48

3.2 Alkalmazott elemtípusok	49
3.3 Alkalmazott anyagmodellek	50
3.4 Végeselemes háló	56
3.5 Megtámasztások, terhek modellje	58
3.6 Analízis beállításai	59
4. Numerikus eredmények bemutatása	59
5 Konklúziók	68
Hivatkozások	69

1 Bevezetés

Az elmúlt két évtizedben a betonnal kitöltött acélcsövek építőmérnöki alkalmazásai komoly fejlődésen mentek keresztül. A világ egyes részein a magasépítésben, hídépítésben is meghatározó szerepet vívtak ki maguknak, ebből adódóan exponenciális növekedést tapasztalhatunk az elmúlt évtizedben az alkalmazási kör és a különböző szerkezeti kialakításokat tekintetében. A betonnal kitöltött acél csövek versenyképes alternatívát jelentenek a hagyományos tisztán acél vagy vasbeton oszlopokkal szemben, így alkalmazásuk egyre inkább előtérbe kerül a hazai szerkezetépítésben is.

A betonnal kitöltött acélcsövek teherbírásának meghatározása a keresztmetszeti elemek kölcsönhatása miatt számos kérdést vet fel. A CFST elemek teherbírásában megjelenő egyik legfontosabb tulajdonság az acélcsővel körbezárt beton mag szilárdságnövekedése. Ennek a hatásnak a figyelembevétele vagy elhanyagolása jelentős különbségeket eredményez a CFST elem teherbírásában, fontos kérdés tehát a hatás figyelembevételének módja a méretezési eljárásokban és a numerikus szimulációkban.

Numerikus modell alapú teherbírásvizsgálatok napjainkban még nem teljesen kidolgozott, aktív kutatási terület. A numerikus modellezés bővülő lehetőségei új utakat nyitnak meg a CFST elemek viselkedésének pontosabb követése előtt. A dolgozat fókusza a betonnal kitöltött acélcsövek szerkezeti viselkedésének vizsgálata, alkalmazási példáinak, jellemző kialakításainak, a témával foglalkozó teherbírasi kísérleteknek és numerikus modellezési lehetőségeinek az áttekintése. Cél továbbá korábbi publikációk alapján validált numerikus modell kidolgozása, mellyel a szerkezet teherbírása nagy pontossággal meghatározható. A numerikus modell segítségével központosan nyomott CFST elem tönkremenetelét és teherbírását tervezem vizsgálni, majd a kapott eredményeket szabványos méretezési formulákkal és szakirodalmi ajánlásokkal is összehasonlítom.

2 Szakirodalom kutatás

2.1 Alkalmazási példák betonnal kitöltött acélszelvények esetére

Az elmúlt 20 évben a betonnal kitöltött acélprofilok komoly fejlődésen mentek át, melynek mozgatórugója Kína. A gazdasági fejlődés szinte kényszerként generálta az egyre magasabb épületeket Kína regionális központjaiban. A betonnal kitöltött acélcsövek megjelenésének elsődleges oka az oszlopok keresztmetszeti méretének csökkentése volt, a teherbírás növelésével párhuzamosan [1].

2.1.1 Magasépítési szerkezetek alkalmazási példái

A magasépítési szerkezetekben a CFST (concrete filled steel tube) elemek általában nyomott oszlopként vesznek részt a teherviselésben, valamilyen nem kompozit (acél vagy vasbeton) elemhez csatlakozva. A gyakorlati alkalmazások többségében a toronyházakba beépülő CFST elemek nyírt vasbeton, vagy acél elemekkel közösen alkotják a magasépítési tartószerkezetet hibrid rendszerét. A toronyházak területén jelent meg a fejlődés következő lépése is, melyek a megerősítéssel ellátott betonnal kitöltött acéltartók. [1]



1. ábra: Shenzhen SEG Pláza [36]

A 291,6 méter magas shenzeni SEG Pláza (1. ábra) tartószerkezete a CFST oszlopok alkalmazásának egyik első példája volt szupermagas toronyháza esetén. A toronyház $\varnothing 1600 \times 28$ jelölésű kibetonozott acélcsövek felhasználásával készült. A felhőkarcoló acél anyag felhasználása a betonnal kitöltött acélcsövek segítségével közel a felére csökkent, és lehetővé vált az acél lemezek falvastagságnövekedésének gátat szabni a tartószerkezetben. [1]

A Ruifeng Nemzetközi Kereskedelmi Épület (2. ábra) hibrid tartószerkezetű toronyház. A hibrid tartószerkezetében megjelennek betonnal kitöltött négyzet keresztmetszetű acélprofilok is. A négyszögletes acélprofilok maximális oldalhossza 600 mm volt, a profil falvastagsága pedig a teljes épületen belül 16 és 28 milliméter között változott [1].



2. ábra – Ruifeng Nemzetközi Kereskedelmi Épület Kínában [37]

A Guangzhouban található, 454 méter magas, Cantoni torony (3. ábra) a CFST oszlopok felhasználási módjának egy különleges esete. A torony tartószerkezetének vizuálisan is igen hangsúlyos része az építéshez felhasznált 24 darab, ferde, betonnal kiinjektált acélcső, melyek átmérője 2000 milliméter, falvastagságuk pedig 50 milliméter [1].



3. ábra –Cantoni torony Guangzhouban [38]

Igen komplex keresztmetszeti kialakítással épült a kínai Z15 torony (4. ábra). A toronyház betonnal kitöltött hatszögletű, merevített acél profilok alkalmazásával valósult meg. A 108 szintes torony magassága 528 méter, ezzel ez Peking legmagasabb épülete, mely egy földrengés által sűrűn sújtott térség. A tartószerkezetben használt többcellás CFST elem a torony teljes magasságán végigfut. A „megaoszlop” keresztmetszete az épület alsó szintjein sokszög alakú, a magasság növekedésével téglalap alakra vált [2].



4. ábra – Z15 torony Pekingben [39].

2.1.2 Betonnal kitöltött acél szelvények a hídépítésben

Betonnal kitöltött acélprofilok megjelenése a hídépítésben több tartószerkezeti rendszer esetén is megfigyelhető. CFST elemekre bukkanhatunk ferdekábeles és függőhidak pilonjait vizsgálva, vagy rácsos szerkezetű hidak tartószerkezetében, mégis a CFST elemek betörése a hídépítésbe ívhidak esetén a legdrasztikusabb. Csak Kínában az elmúlt 20 évben több mint 400 ilyen technológiával épült hídszerkezet valósult meg. A tíz legnagyobb fesztávval rendelkező ívhíd közül négy híd tartószerkezete betonnal kitöltött acél profilokat tartalmaz, továbbá a lista első helyét is CFST elemekből épült Pingnan Third Bridge foglalja el [1,3].

Wushan térségbeli Yangtze folyó hídja (5. ábra) 460 méteres fesztávú, 2005-ben elkészült, süllyesztett pályás ívhíd. A híd főtartója két, egyenként 4 darab betonnal kitöltött rácsozott csövet tartalmaz [1].



5. ábra – Wushang Yangtze folyó hídja [40]

Hurongxi Zhijing folyó hídja (6. ábra), szintén a Kína ívhidak sorába tartozik. A 2009-ben átadott szerkezet fesztávja 430 méter. Szerkezeti rendszerét tekintve felsőpályás ívhíd. Az ív négy rácsos szerkezetbe fogott betonnal kitöltött acélsőből áll [1].



6. ábra – Hurongxi Zhijing folyó hídja [41]

A spanyolországi La Vicaria ívhíd (7. ábra) 260 méteres teljes hosszával, és 168 méteres fesztájával 2007-ben nyílt meg a forgalom előtt. A híd speciális, sokszög keresztmetszetű főtartóval épült, melyben az acél-beton kapcsolatát együttdolgoztató fejes csapok segítik. A híd a betonnal kitöltött acélprofilok kevés európai alkalmazásának egyike [3].



7. ábra – La Vicaria ívhíd Spanyolországban [42]

2.1.3 Egyéb alkalmazási területek

Betonnal kitöltött acélcsövek alkalmazásában a hídszerkezetek és a toronyházak közel sem fedik le a teljes spektrumot, CFST oszlopok alkalmazási körébe eshetnek metróállomások oszlopai, villanyvezeték tartóoszlopok, adótornyok és szélerőművek tartóoszlopai is [1].

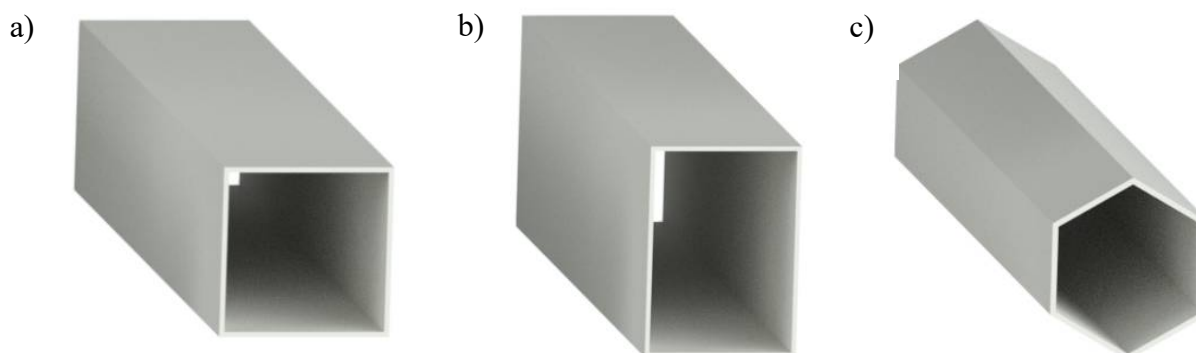
A kínai, Zhoushanban található villanyvezeték tartó oszlop 370 méteres magasságával egyike a világ legmagasabb ilyen típusú építményeinek. A rácsszerkezet négy darab betonnal kitöltött acélcsőből és az azokat összekötő rácsrudakból áll. A CFST oszlopok átmérője 2000 milliméter [1].

2.2 Alkalmazott kialakítások

A tanulmány megvalósult példákat tárgyaló része ugyan érintett különböző keresztmetszeti alakokat és megerősített CFST elemeket említés szintjén, de közel sem mutatta be azt a sokszínűséget, amely a betonnal kitöltött acélszelvények rendelkeznek.

2.2.1 Keresztmetszeti alak

A legelterjedtebb és legrégebb óta alkalmazott kialakítás a kör keresztmetszet. A betonnal kitöltött acélcsöveket gyakorlati felhasználása széles, ezért ennek a kialakításnak a legszélesebb a kutatási háttere is, ugyanakkor a technológia elterjedése új típusú keresztmetszetek használatát is ösztönözte. Sok tudományos munka az egyéb típusú keresztmetszeti alakok vizsgálatakor összehasonlítási, kiindulási pontként kezeli a betonnal kitöltött csövek viselkedését [4,7]. A négyzet és téglalap keresztmetszetű betonnal kitöltött acélszelvények felhasználása az építőiparban egyre gyakoribb (8. ábra), köszönhetően az egyszerűbb oszloperenda kapcsolatok kialakításának, a keresztmetszet jelentős hajlítási ellenállásának, valamint egyes esztétikai szempontok érvényesítésének. Hátránya ugyanakkor, hogy a keresztmetszet lokális kihajlási ellenállása alulmarad a csövekhez képest, és az acélszelvény betonra gyakorolt szilárdságnövelő bezáró hatása is kevésbé érvényesül [7].

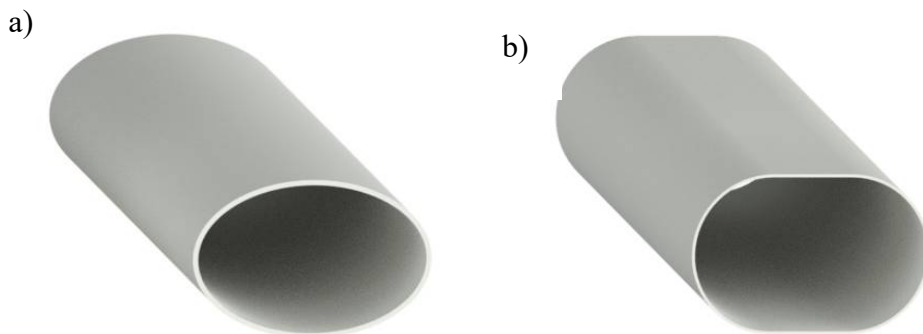


8. ábra – a) Négyzet profil, b) téglalap profil és c) sokszög profil

A kör és a négyszögletes keresztmetszet egyfajta átmenetének tekinthetők a sokszög keresztmetszetű betonnal kitöltött profilok (8. ábra). A kutatások és alkalmazás fókuszában a hatszög, illetve nyolcszög keresztmetszetek állnak. Az ilyen típusú betonnal kitöltött acél profilokról a kutatási eredmények azt mutatták, hogy teherbírásuk alatta marad a kör keresztmetszetű kialakításhoz képest. A kör és négyszög keresztmetszet közti átmenet elképzelését alátámasztja az is, hogy a betonra gyakorolt szilárdságnövelő abroncs hatás sokszög keresztmetszetek esetén a kör és a négyszög profilok közé esik [4].

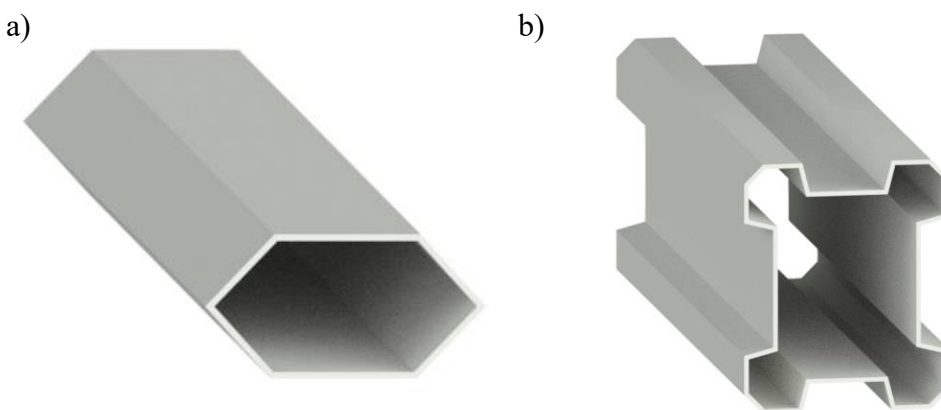
Építészeti és esztétikai igények teljesülése érdekében használnak ellipszis keresztmetszeteket is, betonnal kitöltött acél profiloknál. Az elliptikus CFST gerendák és oszlopok teljesítménye ugyanakkor eltérhet a hagyományos CFST oszlopokétól a keresztmetszeti alak jelentős

különbsége miatt. Az elliptikus keresztmetszet hatása a teherbírásra csekély szakirodalmi háttérrel rendelkezik [5].



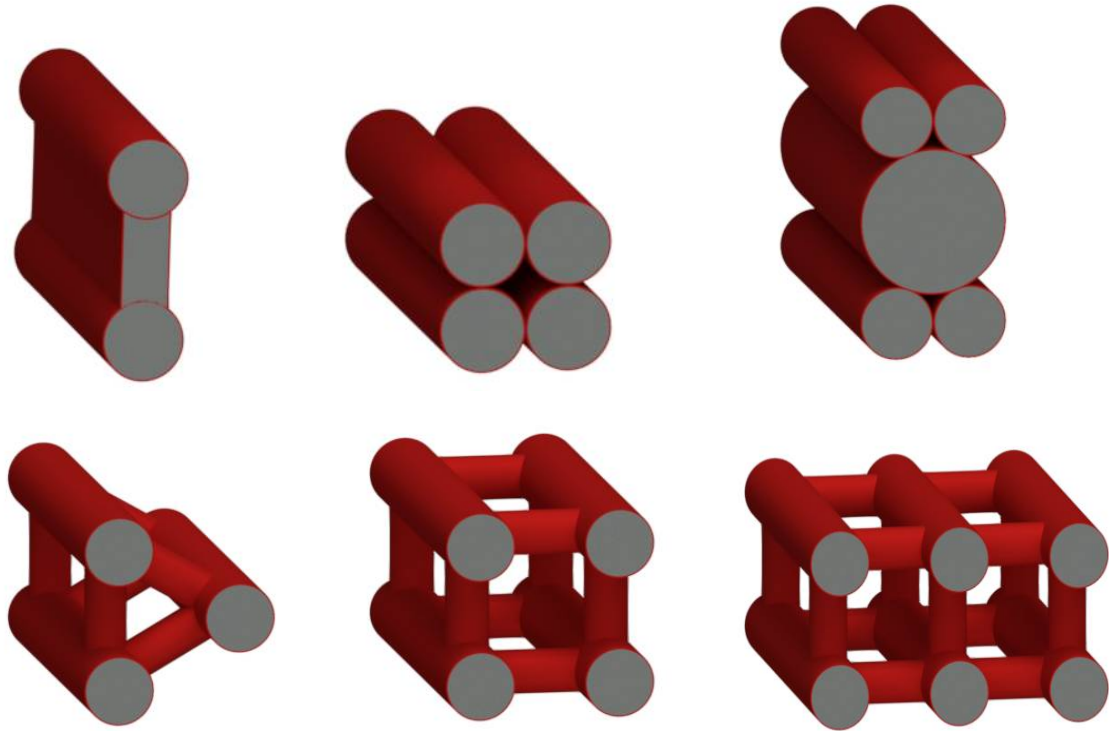
9. ábra – a) Elliptikus acél profil és b) lekerekített sarkú profil

A szerkezetekkel szemben támasztott különleges igények, melyeket a teherbírástól az esztétikán át, az újító szándékig számos folyamat generálhat, igen változatos, akár a bemutatott keresztmetszetektől jelentősen eltérő formákat is eredményezhet. Ilyen az általános alaktól komoly eltérést mutató keresztmetszeteket jelenít meg a 10. ábra. [3] [6]



10. ábra – a) Egyszeresen tükrös hatszög keresztmetszet és b) különleges acél profil

A betonnal kitöltött acélprofilok alkalmazására találhatunk olyan példákat is, ahol a keresztmetszetek kombinációit használják. Ilyen keresztmetszet a két acéllemezzel összekapcsolt kibetonozott cső, amelynél az összekötő szakaszt is betonnal töltik fel. Ilyen típusú összetett keresztmetszetekre láthatók további példák a 11. ábrán [1].



11. ábra – Összetett betonnal kitöltött keresztmetszetek

2.2.2 Keresztmetszet megerősítésének lehetőségei

A betonnal kitöltött acél profilok alkalmazásának terjedésével fokozatosan jelenik meg az igény a nagyobb teherbírású, hajlékonyabb, valamint a betonnal jobban együttműködő keresztmetszeti kialakításokra [1,7]. Megerősített CFST elemek tipikus kialakításait és azok hatását vizsgálta a Pekingi Műszaki Egyetem négy kutatója egy 2018-as kutatásában. A megerősítési módok a 12. ábrán láthatók, melyek: hosszirányú és sugárirányú merevítés, dupla héjú csövek, illetve dupla héjú csövek hosszirányú bordákkal [7].



12. ábra – Keresztmetszet tipikus megerősítési módjai

A megerősített keresztmetszetek vizsgálata az alábbi eredményekre vezetett az egyes megerősítési módok esetén. A betonnal kitöltött acélcső sugárirányú merevítései jelentősen korlátozzák az acélcső külső felületének deformációját, és fokozzák az acélcső által a betonra gyakorolt szilárdságnövelő hatást. A keresztmetszet hosszirányú merevítései javítják az elem

hajlítási ellenállását és az elem kezdeti merevségét. A beton mag vasalása nincs jelentős hatással a CFST elem terherbírására, da annak hajlékonyságát növeli. A keresztmetszetbe ágyazott dupla cső lényegesen növeli a betonra gyakorolt szilárdságnövelő hatást, így a teherbírást is jelentősen javítja az elem hajlékonyságával együtt [7].



13. ábra – Kettős acél profilok elhelyezése betonnal kitöltött csöveknél

A megerősített betonnal kitöltött keresztmetszetek fejlődésének egy különálló iránya a már részben érintett kettős acél profilok elhelyezése a keresztmetszetben (13. ábra). Az ilyen típusú kialakítások fő mozgatórugója a szerkezeti elemek tűzállóságának javítása. A kettős héjú és dupla csöves kialakítások bizonyítottan előnyösen hatnak a keresztmetszet tűzállóságára, hiszen a belső profilt az azt körülvevő betonréteg védi a termikus hatásoktól. Kettős héj esetén a belső acélcső nincs ellátva beton maggal, dupla csöves megoldás esetén mindkét acélcső rendelkezik beton maggal. A kialakítás kombinálhatóságát javítja, hogy a dupla cső esetén azok anyagminősége eltérhet egymástól, esztétikailag előnyös megoldás lehet a rozsdamentes külső burkolócső [1,8].

2.2.3 Anyaghasználat

A betonnal kitöltött acél profilok anyaghasználatát, a keresztmetszeti kialakításhoz hasonló változatosság jellemzi. A keresztmetszetben alkalmazott normálszilárdságú anyagok mellett megjelennek nagyszilárdságú, ultra nagyszilárdságú és egyéb különleges mechanikai tulajdonságokkal rendelkező anyagok is. A nagyszilárdságú acélok (360 MPa folyáshatár felett ISO TR 15608 alapján) és ultra nagyszilárdságú acélok (690 MPa folyáshatár felett) alkalmazásával csökkenthető az acél profilok falvastagsága, és minimalizálható az anyagfelhasználás. Az ilyen betonnal kitöltött emelt szilárdságú acélprofilok helytakarékosága és esztétikus megjelenése komoly alkalmazási előnyökhöz juttatja a kialakítást. A megnövelt folyáshatár a vázolt előnyökön túl, a falvastagság csökkenés miatt, növeli az acélcső lokális kihajlásának veszélyét [9].

Szintén a modern anyaghasználat témakörébe tartoznak a rozsdamentes acél profilokkal kialakított CFST elemek. A rozsdamentes anyagok fellendülésüket, a CFST szerkezet területén, több kedvező tulajdonságnak és körülménynek együttesen köszönhetik. Egyrészt a betonnal kitöltött rozsdamentes csövek használata újabb utakat nyit meg az offshore szerkezetek terén és egyéb tengeri környezethez kapcsolódó alkalmazásoknál, de a terjedés egyik oka lehet az elemek esztétikus megjelenése is. A kedvező anyagi viselkedésen túl a terjedést támogató körülmény a rozsdamentes acél anyag fenntarthatósága a hosszú élettartamuk, és a kiváló újrahasznosíthatósági arányuknak köszönhetően [10,11].

A nagyszilárdságú és ultra nagyszilárdságú betonok használatát sok esetben hasonló célok motiválják, mint a már tárgyalt nagyszilárdságú acélok alkalmazását. Segítségükkel csökkenthető az elem keresztmetszeti területe és súlya, minimalizálható az anyagfelhasználás. Ugyanakkor a nagyszilárdságú beton eltolja a keresztmetszet acél-beton arányát a kompozit elembe, és egy merevebb szerkezeti viselkedést eredményez, a terhelési csúcs utáni meredek leszálló ággal. Ahhoz, hogy a CFST elem viselkedés kedvezőbb, duktilisabb lehessen, célszerű nagyszilárdságú acélt alkalmazni a keresztmetszetben, vagy a CFST elem D/t arányát minimalizálni. Esetenként ugyanakkor az említett megoldások nem megvalósíthatóak, és nem gazdaságosak. A vázolt probléma reális megoldása lehet a beton acélszál erősítése. A beton szálerősítése javíthatja a repedés utáni viselkedést, javítják a hajlítási és húzási teherbírást, és kevésbé rideg viselkedést eredményeznek. Az ultra nagyszilárdságú betonnal kitöltött CFST oszlopok és a szálerősítés hatását vizsgáló tanulmányok megállapították, hogy a szálerősítés nagyobb duktilitással és nyomószilárdsággal rendelkező próbatestek hozhatóak létre. Ez a szilárdságnövekedés már 1% acélszál mennyiséggel is érhető el. Az acél szálerősítés egyfajta megoldást nyújthat a CFST elemek tűzállóságának fokozására is. A témával foglalkozó kutatások eredményei alapján megállapítható, hogy a betonba kevert acélszálak hatása a hőmérséklet növekedésével felértékelődik, az ilyen módon megerősített beton hővezető képességének változása miatt [12,13].

A CFST elem túlságosan merev és rideg viselkedésének mérséklésére vannak kevésbé elterjedt, különleges megoldások is. Ilyen megoldás a beton kiegészítése gumi adalékkal, mely kedvező lehet magas szeizmicitású területeken. Az ilyen adalékszereknél minden esetben számolni kell a nyomószilárdság csökkenésével, mely hatás a hőmérséklet emelkedésével tovább növekszik. Normál hőmérsékleti körülmények között 10% gumitörmelék betonhoz adása, közelítőleg 12%-os nyomószilárdság csökkenést eredményez [13].

Az öntömörödő betonok alkalmazása szintén (self-compacting concrete - SCC), jó példája lehet a CFST építéssel kiválóan együttműködő modern anyaghasználatra. Az SCC vibráció nélkül képes az acélcsövek megfelelő kitöltésére, akár bonyolult keresztmetszeti formák, többszörösen felosztott és vasalt acél keresztmetszetek esetén is. Egy az öntömörödő betonnal kapcsolatos probléma CFST elemek esetén a beton zsugorodása miatti acélcső-beton felület elválás, mely fokozott figyelmet igényel SCC beton felhasználása esetén. A vázolt probléma megoldása lehet az öntömörödő beton alkalmazása táguló cementtel, vagy zsugorodáscsökkentő adalékszerrel. A táguló cementek hatását vizsgáló tanulmányok azt mutatják, hogy alkalmazásuk CFST elemekben hatékonyan megakadályozhatják a betonmag és az acélcső közötti elválását, és tágulás gerjesztette bezáró hatás javítja a betonmag mechanikai tulajdonságait [14].

Az utóbbi évtizedben komoly figyelem fordult a fenntartható építési módok és építőanyagok alkalmazására. A folyamat egyik elágazása az építési és bontási hulladékok nyersanyagként való újra felhasználása, ezzel csökkentve a természetes nyersanyag függést. Az újrahasznosított beton egy fenntartható beton típus, amelyet az építési és bontási hulladékokból készült durva adalékanyagok felhasználásával állítanak elő. Az ilyen típusú adalékanyagok mechanikai tulajdonságai az újrahasznosítás okozta mechanikai, kémiai hatások miatt kevésbé kedvező, mint természetes társaiké. Éppen a minőségkülönbség miatt az újrahasznosított adalékanyagot általában nem teherviselő szerkezeti elemekben használnak fel. Ezt az

alkalmazási hátrányt mérsékelheti CFST elemekben való hasznosítás, ugyanis megfelelő keresztmetszeti kialakítás esetén a kedvező acél-beton kölcsönhatás a beton szilárdságának növekedését idézi elő, ezzel megnyitva a gyengébb minőségű újrahasznosított adalékanyagok előtt az utat a teherviselő elemekben való alkalmazásra [15].

2.3 Betonnal kitöltött acél szelvények teherbírásvizsgálata

A betonnal kitöltött acélcsövek teherbírási viselkedésének megismeréséhez elengedhetetlenek a kísérleti vizsgálatok. Az ilyen laboratóriumi kísérletek célja lehet az elérhető kísérleti eredmények bővítése, a méretezési képletek értékelése, új méretezési képletek fejlesztése vagy megfelelő mennyiségű adat szolgáltatása numerikus módszerek kidolgozásához [16,17]. A laboratóriumi vizsgálatokon túl numerikus módszerek is segítik a kutatókat, melyek segítségével kiterjeszthetjük a kísérleti eredményeket, modellezhetünk olyan geometriai tulajdonságokat és egyéb körülményeket, melyeket kísérleti úton vizsgálni hosszadalmas, nehéz, vagy akár lehetetlen lenne [16]. A mindennapi tervezési feladatok elvégzéséhez segítséget nyújtanak a tervezési szabványok, valamint a különböző szakirodalmi ajánlások és olyan képletfejlesztéssel foglalkozó tanulmányok, melyek a tervezési szabványok finomítására tesznek javaslatokat. A következőkben a tanulmány a megerősítés nélküli betonnal kitöltött acélcső viselkedését tárgyalja különböző igénybevételek hatására, ezen belül is kiemelten foglalkozik a tiszta nyomással mint a dolgozatban szereplő terhelési esettel, valamint kitér a tiszta hajlítás, illetve a nyomaték-normálerő interakció eseteire is mint a jövőbeni kutatás témájára.

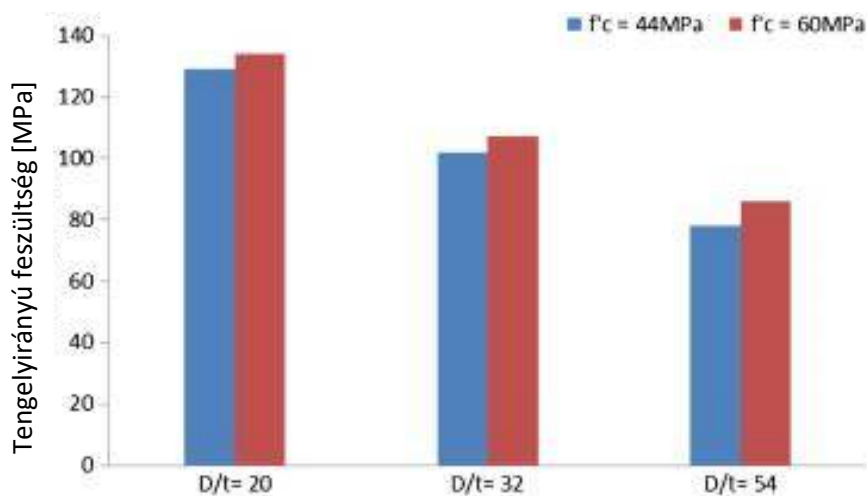
2.3.1 CFST elem nyomási teherbírása

Betonnal kitöltött acél profilokat a gyakorlatban legtöbb esetben nyomott elemként alkalmazzák. Mivel az alkalmazás köre igen széles, ezért nagy számú publikáció érhető el a témában.

2.3.1.1 Nyomási teherbírás kísérleti vizsgálata

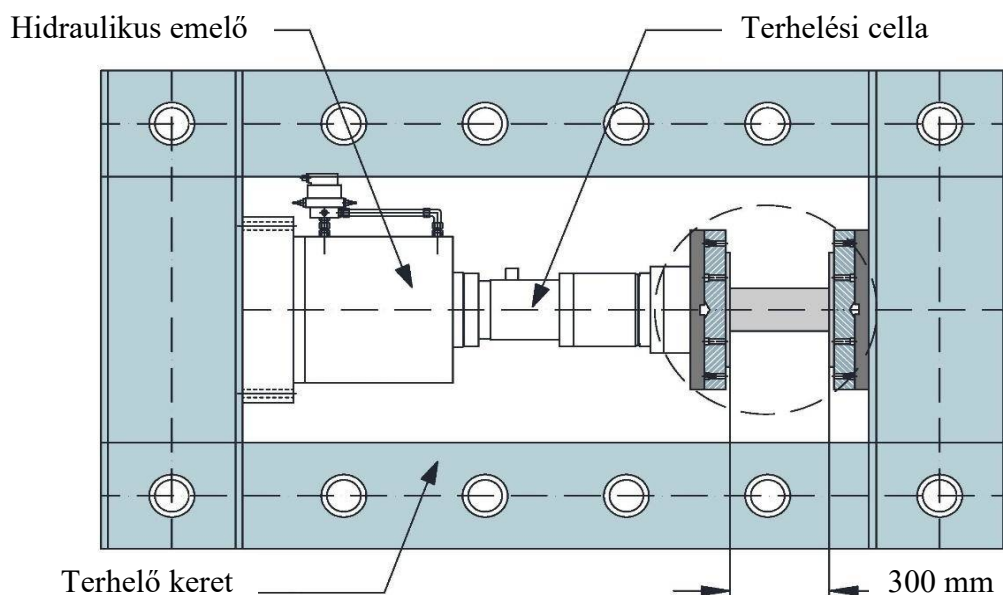
Betonnal kitöltött acélcsövek viselkedését vizsgálták axiális nyomó terhelés hatására a Sardzsai Amerikai Egyetemen 2013-ban. A publikált tanulmány Abed, Hamaydeh, Abdalla kutatók nevéhez fűződik, melynek célja egy olyan adatbázis létrehozása volt, amely alkalmazható végeeselemes modell validálásához. A kísérleti program CFST próbatestek és acélcsövek laboratóriumi vizsgálatát foglalta magába. A CFST próbatestek kialakításához normál- és nagyszilárdságú betont használtak, normálszilárdságú acél csövek felhasználásával. A próbatestek hossz/átmérő aránya minden esetben $D/L=2$, a csőátmérő-falvastagság arány 20, 32 és 54 értékek között változott. A kísérleti program része volt acélcsövek laboratóriumi vizsgálata is. A laboratóriumi vizsgálatokat 3000 kN terhelési kapacitású univerzális tesztgéppel hajtották végre. A tengelyirányú és kerület menti hosszváltozások követése érdekében nyúlásmérő bélyegeket helyeztek el a próbatesten. A kutatók a kísérleti eredményeket összegezték és publikációjukban összefoglalták következtetéseiket. A 14. ábra az axiális nyomóteherbírásokat mutatja oszlop diagram formájában, D/t arányonként csoportokba foglalva a próbatesteket. A diagramon látható, hogy a nagyobb betonszilárdság

mind a három csoportban szignifikánsan nagyobb axiális nyomóteherbírást eredményezett, valamint a D/t arány növekedése a CFST elem axiális szilárdságát csökkentette. Ez a szilárdságcsökkenés elsődlegesen az acél szelvény által a betonra gyakorolt szilárdságnövelő hatás csökkenésének tudható be. [16]



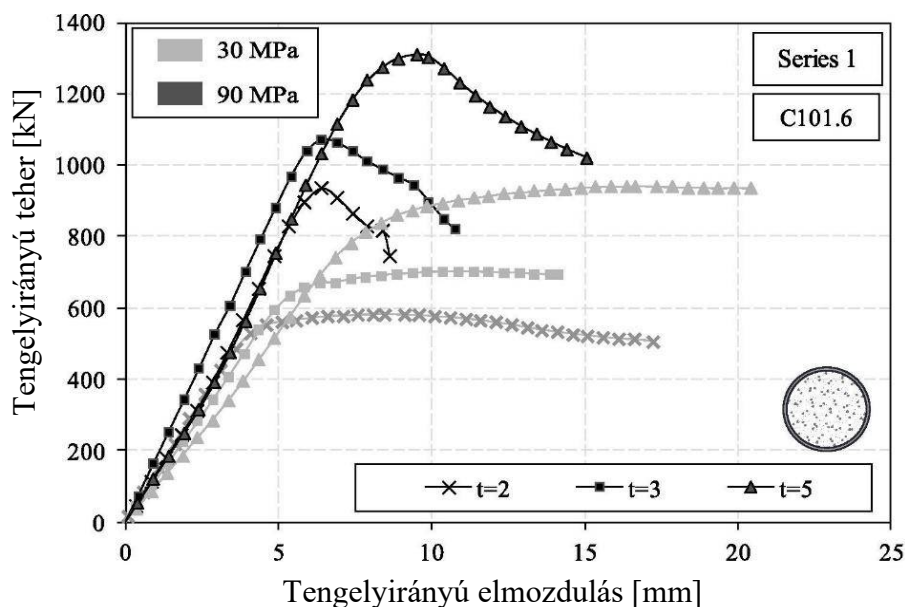
14. ábra – CFST próbatestek axiális szilárdsága D/t arányonként [16]

Szintén betonnal kitöltött acél profilok viselkedését vizsgálta az Ibanez, Hernandez-Figueirido, Piquer kutatóhármas, axiális nyomó terhelés hatására [17]. A publikáció írói komoly hiányt véltek felfedezni a nagyszilárdságú betonok felhasználásával készült CFST elemek kutatási eredményeiben, ezért céljuk a rendelkezésre álló kísérleti adatok bővítése volt. 18 darab CFST oszlop kísérleti vizsgálatát mutatták be axiális nyomása hatására. A próbadarabokból 4 sorozatot készítettek. A kísérlet változói az acél szelvény falvastagsága, illetve a keresztmetszeti alak volt. A felhasznált beton anyagminősége C30 és C90. Az kísérlethez használt acélcsövek anyagminősége S275 és S355, gyártástechnológiai szempontjából hidegen alakított szénacél csövek. [17]



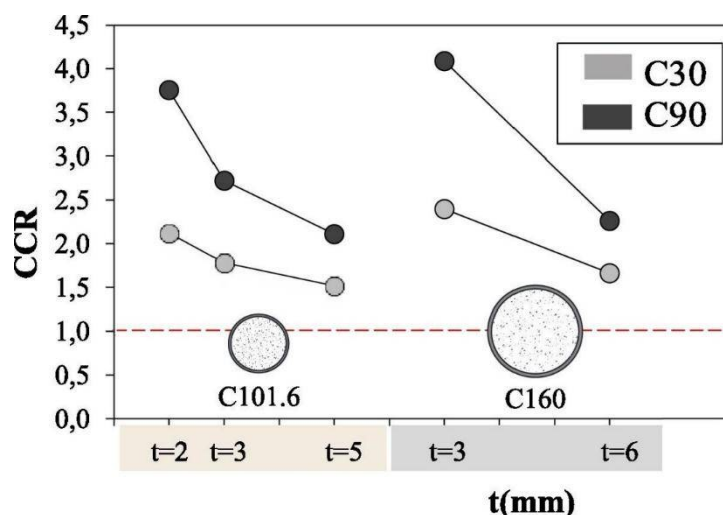
15. ábra – Kísérleti összeállítás [17]

A laboratóriumi terhelés során a próbadarabokat vízszintes keretbe helyezték (15. ábra), ügyelve a pontos geometriai kialakításra és elhelyezésre, a központos nyomás állapotának elérése érdekében. A vizsgálat befejeztével eltávolították a terhelő keretből a mintákat és azokat eltárolták. Minden egyes próbadarab esetén a terhelést és a terheléshez tartozó elmozdulást regisztrálták és ábrázolták. [17]



16. ábra – A kör keresztmetszetű próbatestek összesített terhelés-rövidülés diagramjai [17]

A vizsgálatok összesített teher-elmozdulás diagramjait mutatja a 16. ábra kör keresztmetszet esetén. A minták diagramjait vizsgálva megállapítható, hogy a nagy szilárdságú betonnal kitöltött és a vékonyabb csövekkel ellátott próbatestek viselkedése kevésbé volt rugalmas. A tanulmány a szilárdsági indexet (SI - Strength Index) használta a beton és az acél közötti szinergia bemutatására. A szilárdsági index nem más, mint az elméleti keresztmetszeti teherbírás és a tényleges végső terhelés hányadosa ($SI = N_{exp} / (f_y A_s f_c A_c)$). A tanulmány legfontosabb a szilárdsági indexet érintő megállapítása, hogy kör alakú CFST oszlopokban, még alacsony falvastagság mellett is egynél nagyobb szilárdsági index (SI) érhető el. Ezt elsősorban a már említett acélszelvény által a betonra gyakorolt abroncs hatás okozza. A szilárdsági indexen túl az oszlop viselkedését jellemző fogalom a beton hozzájárulási arány (concrete contribution ratio - CCR). Ez a tényező a betonkitöltés teherviseléshez való hozzájárulását írja le. A beton hozzájárulási arányt az alábbi képlet adja meg: $CCR = N_{exp} / (f_y A_{s,eff})$, ahol $A_{s,eff}$ az acél keresztmetszet effektív keresztmetszeti területe az Eurocode szerint. A 17. ábra a kör keresztmetszetű mintadarabok CCR értékeit foglalja össze. [17]

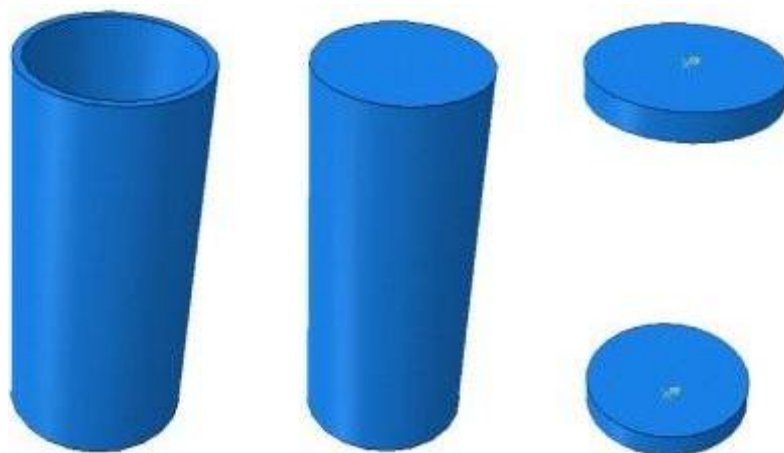


17. ábra – A kör keresztmetszetű próbatestek beton hozzájárulási arányai [17]

A kísérlet a várakozásoknak megfelelően megerősítette, hogy a nagyszilárdságú beton alkalmazása és az acélcső falvastagságának csökkentése jelentősen növelte a beton hozzájárulási arányt. [17]

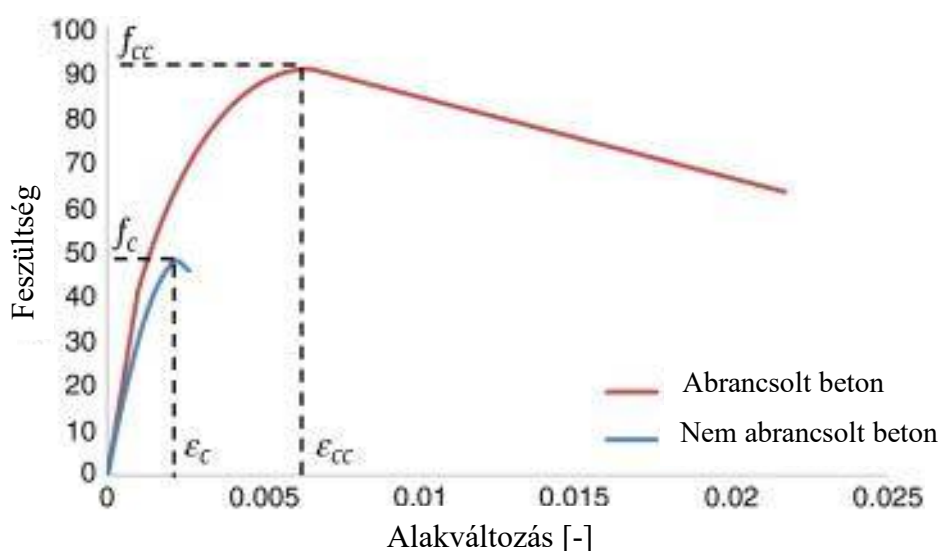
2.3.1.2 Nyomási teherbírás numerikus vizsgálata

A 4.1.1 fejezetben már hivatkozott 2013-as sardzsai kutatás útmutatást adott nyomásnak kitett CFST elem numerikus modellezésére ABAQUS szoftverben. A kutatók bemutatják a numerikus modell geometriáját, anyagmodelljét, a keresztmetszeti elemek közötti kapcsolat modellezését, a megtámasztási és terhelési modellt, valamint a végeselemes hálót. A tanulmány lezárásaként kísérleti eredmények segítségével validálják a numerikus modellt. A CFST keresztmetszeti részeit külön modellezték (18. ábra). Az acélcső modellezését elvégezték héjelemként, és szilárd testként definiálva is, azonban a regisztrált eredményeltérés nem volt jelentős. Az egyszerűbb modellezésre törekedve, a végleges szimulációban az acélcsövet és a betont is nyolc csomópontú testelemként vitték be a végeselemes szoftverbe. A próbadarabokat lezáró lemezeket merev testként modellezték. A geometriai nemlinearitást (nagy elmozdulások elve) is figyelembe vették és modellezték az acél-beton kapcsolatát. A keresztmetszeti elemek kölcsönhatását felület-felület típusú interakcióként modellezték, mely egy normálirányú és egy tangenciális, sugárirányú tagból állt. A sugárirány jellemzésére tangenciális súrlódási viselkedést határoztak meg, míg a normál irány jellemzésére úgynevezett 'hard contact' módszert használtak. [16]

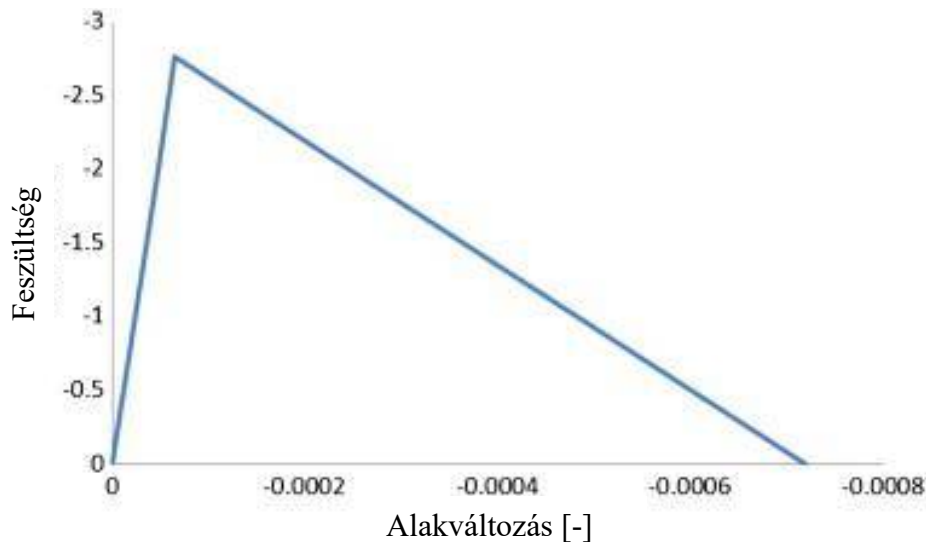


18. ábra – Modellezett CFST minta elemei ABAQUS szoftverben [16]

Ahogy az már bemutatásra került a beton nyomó viselkedését nagymértékben befolyásolja az úgynevezett abroncs hatás, melyet CFST oszlopok esetén az acél gyakorol a betonmagra. Az egyes modellek az abroncs hatás figyelembevételére érdekében a betonfeltöltés definiálásához az alábbi diagramokon bemutatott egyenértékű feszültség-alakváltozás görbét használták (19-20. ábrák). A diagramok szemléletesen mutatják a korlátozott és nem korlátozott beton terhelés-alakváltozás függvényét [16].

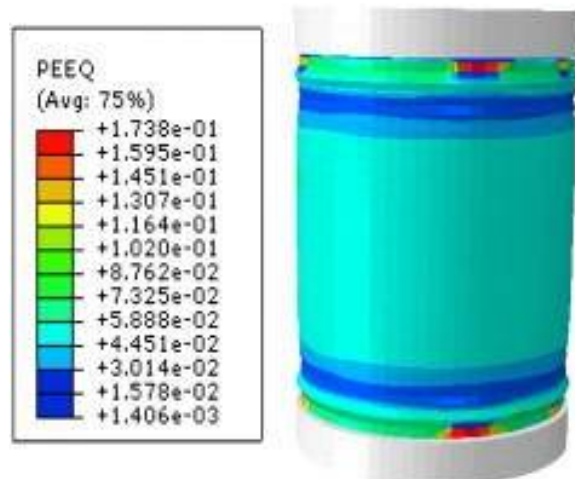


19. ábra – Abrancsolt és nem abrancsolt beton nyomás-alakváltozás diagramja [16]

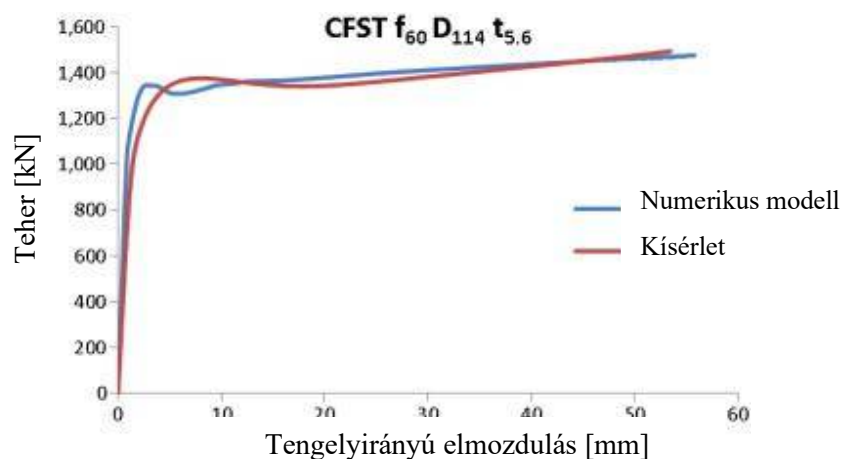


20. ábra – Abroncsolt beton egyenértékű feszültség-alakváltozás diagramja húzásra [16]

A kutatók által létrehozott végeselemes modellben úgynevezett CDP (concrete damaged plasticity) modellt javasoltak a betonkitöltés szimulációjára. A CDP modell kezdeti és alapvető felhasználása a vasalással ellátott vasbeton elemek modellezése volt, azonban alkalmas az abroncsolt betonmag szimulációjára is. A modell megtámasztási viszonyait a csövet lezáró véglemezen definiálták. Az alsó lemez középpontja minden elmozdulási szabadságfokkal szemben rögzítették, a felső lemez függőleges irányban elmozdulhatott. Mindkét véglezáró lemez szabadon elfordulhat. A terhelést adó tengelyirányú elmozdulást a felső véglezáró lemezen helyezték el. A geometriai, az interakciók, az anyagmodellek, valamint a megtámasztási és terhelési viszonyok definiálása után a kutatók hálózérezékenységi vizsgálatot végeztek. A vizsgálat célja a megfelelő végelelem méret kiválasztása volt, három típusú végeselemes háló alkalmazásával. A kutatók a végeselemes modellt laboratóriumi vizsgálati eredmények segítségével validálták. A validálás során összehasonlították a numerikus modell és a kísérleti mintadarab tönkremeneteli módját, valamint teher-elmozdulás görbéit. Megállapították, hogy a definiált ABAQUS modell megfelelően követi a CFST elem valós viselkedését, jó egyezés figyelhető meg a kísérleti adatok és a modell eredménye között, mind az axiális teherbírás (22. ábra), mind a tönkremeneteli mód tekintetében (21. ábra), habár a kezdeti merevségben, illetve a teherbíráshoz tartozó elmozdulás értékében volt eltérés. [16]



21. ábra – CFST elem képlékeny alakváltozásai és tönkremeneteli módja ABAQUS szoftverben [16]



22. ábra – Numerikus modell és kísérleti eredmények összehasonlítása [16]

2.3.1.3 Szabványos vizsgálat és képletfejlesztés

Az Eurocode, kompozit elemek címszó alatt, útmutatást ad nyomott CFST elemek ellenőrzéséhez, ugyanakkor a számítás nem specifikusan a betonnal kitöltött acélcsövekre vonatkozik, használható betonnal részben és egészben burkolt acél elemekre, betonnal kitöltött téglalap és egyéb keresztmetszetű szelvényekre is. Az Eurocode két tervezési módszert mutat be, az általános módszert, mely lehetőséget nyújt nem szimmetrikus keresztmetszetű és a hossz mentén változó keresztmetszetű elemek számítására, valamint az egyszerűsített módszert a kétszeresen szimmetrikus keresztmetszetek számítására, hossz mentén állandó keresztmetszettel. [18]

Mivel jelen tanulmány fő témája betonnal kitöltött szabályos kör keresztmetszetű csövek vizsgálata, ezért a tanulmány a továbbiakban az egyszerűsített módszer bemutatására koncentrál. Az egyszerűsített módszer plasztikus nyomási ellenállása az (I)-es összefüggés segítségével határozható meg, ahol a képletben szereplő A_s és A_c , az acél és beton

keresztmetszeti területe, f_y és f_c , az acél folyási feszültsége, illetve a beton szilárdsága. D és t a geometriát leíró külső átmérő és falvastagság. [18]

$$N_{pl,Rd} = \eta_a A_s f_y + \left(1 + \eta_c \frac{t}{D} \frac{f_y}{f_c}\right) A_c f_c' \quad (1)$$

Központos terhelés esetén η_a és η_c tényezők a (2)-es és (3)-as összefüggés szerint határozható meg a viszonyított karcsúság segítségével :

$$\eta_a = 0,25(3 + 2\lambda) \quad (2)$$

$$\eta_c = 4,9 - 18,5\lambda + 17\lambda^2 \quad (3)$$

A tervezési szabványok vizsgálatát és javítását célzó, Giakoumelis és Lam által publikált tanulmány [19] a (4)-es összefüggést javasolja CFST elem nyomási teherbírásának számításához. A tanulmány kiindulási pontja az ACI (The American Concrete Institute) és AS (Australian Standards) tervezési szabványok előírásai voltak. A kísérleti eredmények elemzésével készült képlet nem veszi figyelembe a geometriai különbségeket – erre utal a képletben az alsó index is – az egyes CFST elemek között. A képletben szereplő f_c' a betonmag szilárdsága, A_c a beton keresztmetszeti területe, f_y az acélcső folyási szilárdsága, A_s pedig az acél keresztmetszeti területe. [16]

$$N_{Geo} = 1.3f_c' A_c + f_y A_s \quad (4)$$

Azonos témában publikáltak szakirodalmi cikket Mander és kollégái [20]. A kutatók által javasolt képlet szintén a betonmag és az acélcső nyomási teherbírásának összegzésével határozza meg a CFST keresztmetszet nyomási teherbírását. A javasolt képlet az (5)-ös összefüggés, melyben a beton szilárdság növekedését f_{cc}' tényezővel veszik figyelembe. [16]

$$N_{Man} = f_{cc}' A_c + f_y A_s \quad (5)$$

$$f_{cc}' = f_c' \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94f_l}{f_c'} - 2 \frac{f_l}{f_c'}} \right) \quad (6)$$

$$f_l = \frac{2\sigma_\theta t}{D} \quad (7)$$

$$\sigma_\theta = 0.1f_y \quad (8)$$

2.3.2 CFST elem húzási ellenállás

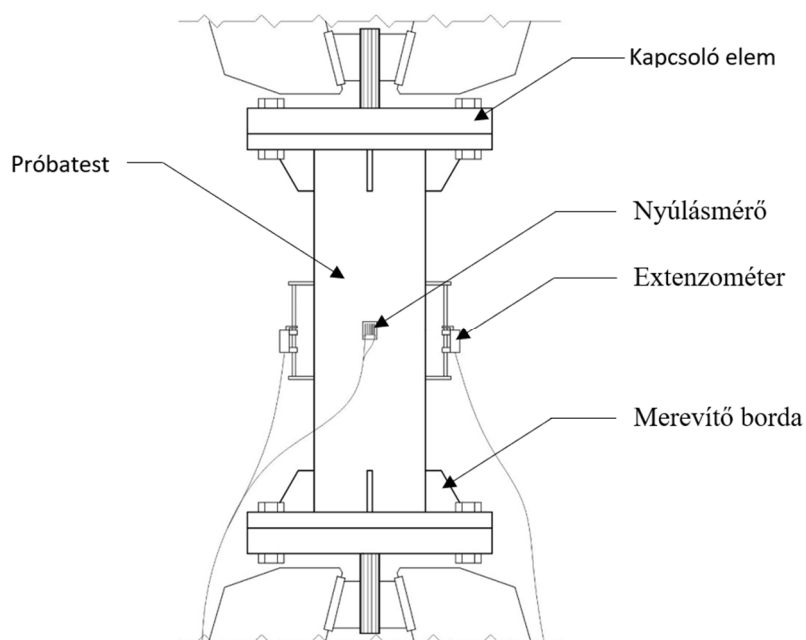
CFST elemek nyomó teherbírása széles körben ismert, mellyel számos kutatás foglalkozott kísérleti és numerikus modellezési oldaláról is. A felhasználási kör bővülésével, betonnal kitöltött acél profilok egyre gyakrabban jelennek meg húzott szerkezeti elemként, ráirányítva a figyelmet a téma limitált kutatási eredményeire. [11]

2.3.2.1 Húzási ellenállás kísérleti vizsgálata

Han, He és Liao kínai kutatók 2011-ben betonnal kitöltött acélcsövek szakítószilárdságát vizsgálták kísérleti úton. A pekingi Tsinghua Egyetemen publikált dolgozat célja a

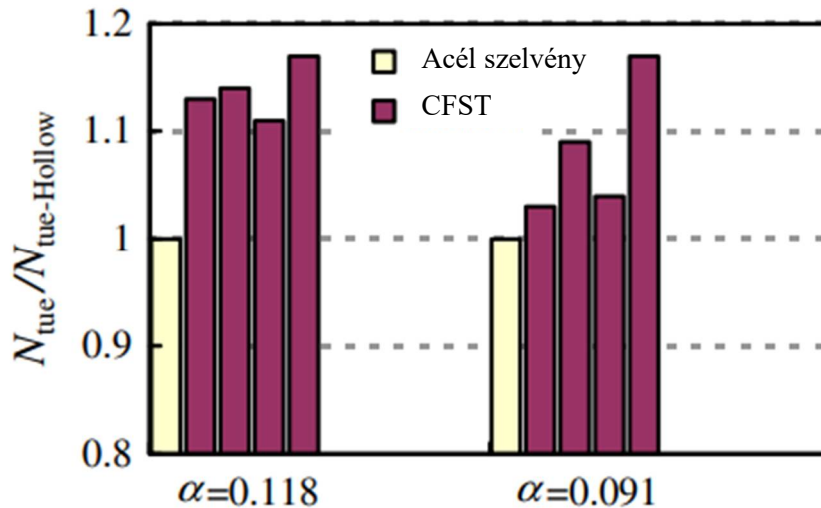
szakítószilárdságot vizsgáló kutatások kísérleti eredményeinek bővítése volt, melyek felhasználhatók numerikus modell validálására. [21]

A tesztsorozat fő változói a keresztmetszet acél aránya, valamint a beton típusa volt. A kísérleti program 18 próbatest vizsgálatát tartalmazta. Minden minta kör keresztmetszetű acél profillal készült. Az acél csöveket 25 mm vastag acéllemezzel zárták le, és 4 darab 12 mm vastag acéllemez merevítéssel látták el a cső-talplemez csatlakozásnál. Az acél arány 0.118, és 0.091 értékek között mozgott. A kísérletekben használt beton típusa öntömörödő beton (self-compacting concrete - SCC) és acélszálerősítésű beton (steel fibre reinforced concrete - SFRC) volt. A véglezáró lemezt furatokkal rögzítették egy a vizsgálathoz tervezett nagyszilárdságú acélból készült kapcsoló elemhez. Ez a kapcsoló elem egy szintén furatolt lemezből és egy a lemezhez hegesztett nagyszilárdságú acél rúdból állt. Az így elhelyezett kapcsolóelemet fogták be a terhelést biztosító tesztgépbe. Mivel a vizsgálat során teher-elmozdulás diagramok előállítása volt a cél, a próbadarabon elmozdulás, és nyúlásmérő műszereket helyeztek el. A kísérleti összeállítás vázlata az alábbi képen látható (23. ábra). [21]



23. ábra – Kísérleti összeállítás [21]

A kutatók a vizsgálati eredmények alapján több következtetést megfogalmaztak a húzott CFST elem viselkedéséről. Az üreges acélcsőhöz képest a CFST minta szakítószilárdsága általánosságban körülbelül 11%-kal nőtt a betonfeltöltés miatt. A tanulmány ezen állítását a 24. ábra szemlélteti, melyen a függőleges tengely a vizsgált minták szakítószilárdságának és a referencia cső mért szakítószilárdságának hányadosát, a vízszintes tengely pedig a próbatestek keresztmetszetének acél hányadát mutatja. [21]



24. ábra - A szakítószilárdságok összehasonlítása a referencia csövek szilárdságával [21]

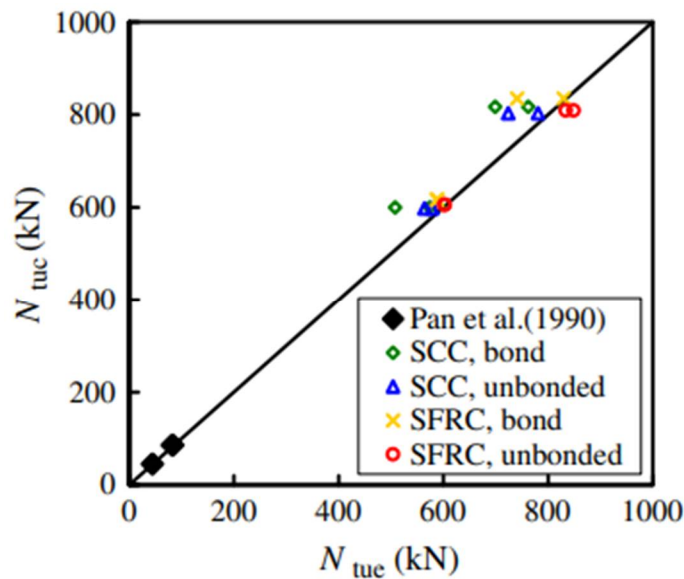
2.3.2.2 Húzási teherbírás numerikus vizsgálata

A 2.3.2.1 fejezetben bemutatott kutatás része volt, a húzott CFST elem viselkedését megfelelően követő numerikus modell létrehozása is, a kísérleti vizsgálatokon túl. A publikáció numerikus modellje ABAQUS szoftverben készült.

A modellezési szintek tekintetében az acélsövet 4 csomópontú héjelemek felhasználásával szimulálták, míg a mag betont, a merevítőt és a merev véglemezt 8 csomópontú szilárd testekkel. A keresztmetszet acél csövének anyagmodelljéhez a kutatók Han és kollégái által kidolgozott ötlépcsős feszültség-alakváltozás diagramját [22] használták. Az acél rugalmassági modulusát $206\,000\text{ N/mm}^2$ -nek, a Poisson tényezőt 0.3-nak feltételezték. A beton feltöltés anyagmodelljéhez az ABAQUS sérült plaszticitású beton modelljét használták. A beton húzásra bekövetkező törési feszültségét a Shen [23] által felírt (9) összefüggés alapján számították, ahol f'_c a beton hengerszilárdsága. [21]

$$\sigma_{crack} = 0.26(1.25f'_c)^{\frac{2}{3}} \quad (9)$$

A beton berepedés utáni viselkedésének leírásához Hillerborg és kollégái által kidolgozott törési energiamodellt [24] használták. Bár a CFST elemet húzás terheli a beton mag helyenként mégis szenved nyomást, az acélső kontrahálása miatt. A nyomott beton viselkedéséhez szintén Han feszültség alakváltozás modelljét használták. Az acélső és beton mag közti kapcsolat modellezéséhez az ABAQUS ún. 'contact pressure' modelljét használták normális irányba és Coulomb-féle súrlódási modellt tangenciális irányba. A kötési feszültséget Han és kollégái módszerével határozták meg, a súrlódási tényezőt szakirodalmi ajánlások alapján 0.6-nak vették fel. Az axiális terhelés elhelyezése előtt megadták a modell megtámasztási viszonyait. A CFST modell alsó lezáró lemezét minden elmozdulási szabadságfokra rögzítették, majd hasonlóan jártak el a felső lezárással is, azzal a különbséggel, hogy ezen a ponton megengedték a függőleges elmozdulást. A numerikus modell validációját kísérleti eredmények alapján végezték el. Mind a kísérleti szakítószilárdságot (N_{tue}), mind a numerikus modell által meghatározott szakítószilárdságot (N_{tue}) koordináta rendszerben ábrázolták (25. ábra). A számított és kísérlet alapján meghatározott teherbírások jó egyezést mutattak. [21]



25. ábra – Kísérleti és numerikus teherbírás összehasonlítása [21]

2.3.2.3 Szabványos vizsgálat és képletfejlesztés

Az Eurocode [18] általános tervezési elvei közt kimondja, hogy a számítás során a beton szakítószilárdságát figyelmen kívül kell hagyni. Han és tsai. 2011-es publikációjukban egyszerűsített képletet (a (10) jelű összefüggést) dolgoztak ki CFST elemek tengelyirányú szakítószilárdságára. [21]

$$N_{tu} = (1.1 - 0.4\alpha)f_y A_s \quad (10)$$

A képletben szereplő A_s az acél keresztmetszeti területe, α a keresztmetszeti acélarány, f_y az acél folyási szilárdsága. A megadott képlet érvényességi határa $\alpha = 0.04 - 0.2$, $f_y = 235 - 420 \text{ MPa}$ és $f_c = 30 - 80 \text{ MPa}$. [21]

2.3.3 CFST elem hajlítási teherbírás

2.3.3.1 Hajlítási teherbírás kísérleti vizsgálata

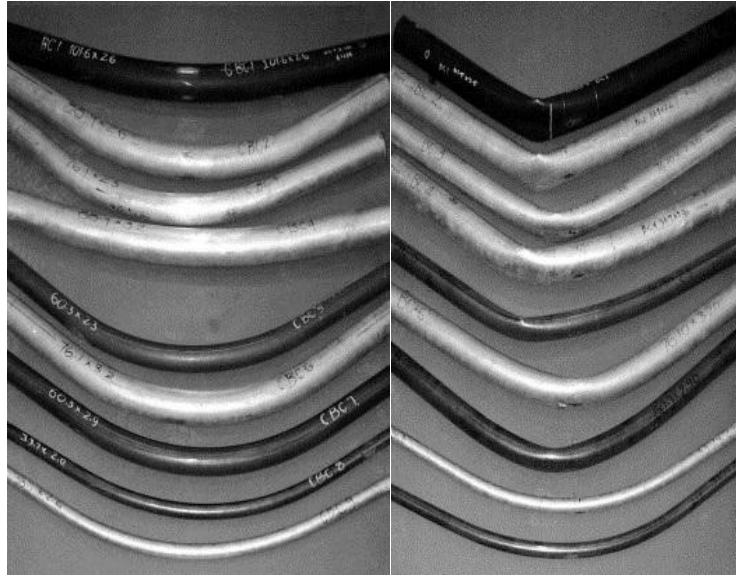
A Melbourne-i Monash Egyetemen végzett kutatás vizsgálta a tiszta hajlítással terhelt CFST elemek viselkedését. Elchalakani, Zhao, Grzebieta kutatóhármas által jegyzett publikáció [25] 12 próbatestet vizsgálatát tartalmazta, melyek tulajdonságait a 1. táblázat foglalja össze. A minták gyártásához használt acélszelvények C350 osztályú, hidegen alakított acélsövek, 350 MPa névleges folyási feszültséggel. A csövek acél anyagát laboratóriumi kísérletnek vetették alá, hogy meghatározzák az anyag rugalmassági modulusát, folyási feszültségét, szakítószilárdságát és szakadó nyúlását. Anyagvizsgálatokat végeztek a beton szilárdsági tulajdonságainak meghatározásához is, ehhez összesen nyolc beton hengeret teszteltek. A betonhenger átlagos nyomószilárdsága $f_c = 23.4 \text{ MPa}$, sűrűsége 2440 kg/m^3 volt. [25]

1. táblázat – Vizsgált próbatestek tulajdonságai [25].

Próbatest jele	Acél cső tulajdonságai					CFST elem tulajdonságai				
	$d \times t$ [mm]	d/t [-]	f_y [MPa]	f_u [MPa]	e_u [%]	E_s [GPa]	M_{pt} [kN m]	EI [10 ¹⁰ N mm ²]	k_{pt} [mm ⁻¹]	a/d [-]
CBC0-C	109.9×1.0	109.9	400	533	30	191	6.71	23.0	2.92	2.7
CBC0-B	110.4×1.25	88.3	400	533	30	191	8.61	25.5	3.38	2.7
CBC0-A	110.9×1.5	73.9	400	533	30	191	10.47	28.1	3.73	2.7
CBC1	101.83×2.53	40.2	365	469	30	200	9.96	28.0	3.56	3.0
CBC2	88.64×2.79	31.8	432	538	23	210	9.60	18.5	5.19	3.4
CBC3	76.32×2.45	31.2	415	534	24	218	6.00	10.4	5.77	3.9
CBC4	89.26×3.35	26.6	412	502	28	211	10.94	21.4	5.11	3.4
CBC5	60.65×2.44	24.9	433	508	24	211	3.82	4.8	8.05	5.0
CBC6	76.19×3.24	23.5	456	548	24	205	8.25	12.3	6.71	3.9
CBC7	60.67×3.01	20.2	408	503	28	204	4.33	5.5	7.90	5.0
CBC8	33.66×1.98	17.0	442	511	23	207	0.92	0.5	19.17	8.9
CBC9	33.78×2.63	12.8	460	568	22	209	1.21	0.7	18.11	8.9

A minták kísérleti vizsgálatához speciális berendezést használtak. A berendezés különlegessége, hogy képes tiszta hajlítónyomatékot kifejteni a vizsgálati mintára anélkül, hogy jelentős tengelyirányú erőt, vagy nyíróerőt indukálna a próbatestben. A nyomaték-görbület diagrammok előállításához terhelésmérőt és összesen 4 dőlésmérőt helyeztek el a kísérleti összeállításban. A próbatesten a már említett monitoring eszközökön túl nyúlásmérő bélyegeket is alkalmaztak. [25]

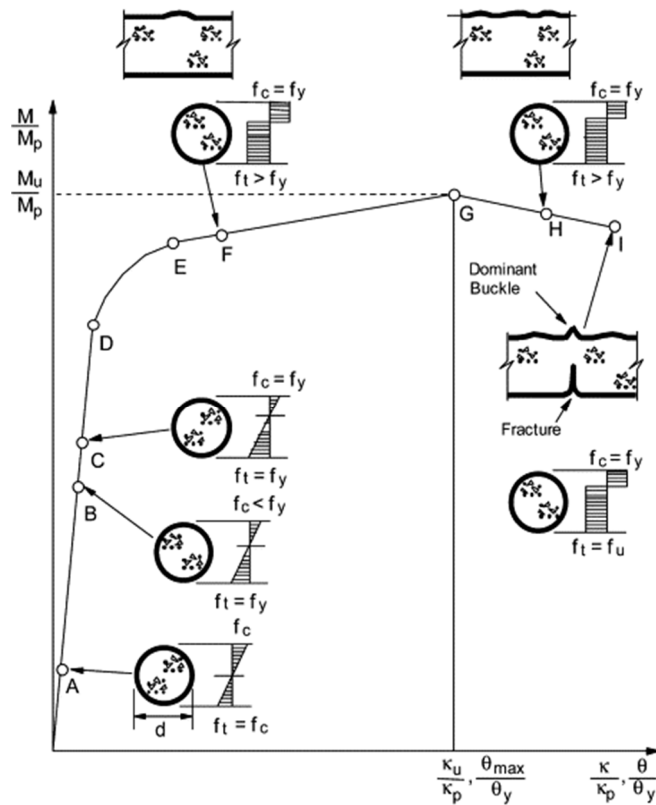
Ahogy az a tipikus tönkremeneteli módokon látható (26. ábra) az acélcsövek minden esetben megtörttek, míg a betonnal kitöltött csövek esetén ez a jelenség nem tapasztalható. [25]



26. ábra – Tönkrement próbatestek összehasonlítása [25]

A kutatók a tanulmány részeként idealizált diagrammot (27. ábra) állítottak össze, mely szemlélteti betonnal kitöltött csövek viselkedését, a $74 < D/t < 110$ tartományban. [25]

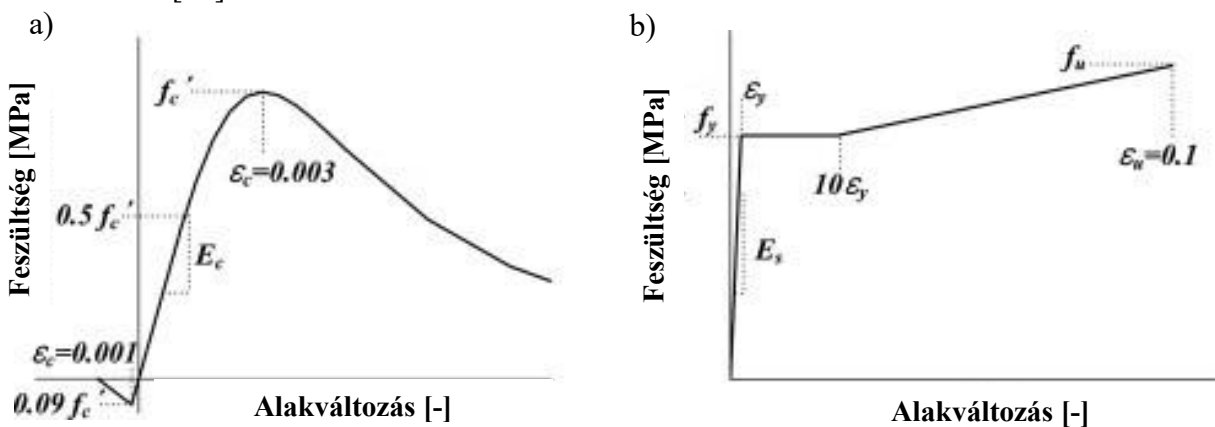
- A próbatest az első szakaszon lineárisan rugalmasan viselkedik, amíg a szélső acélszálnak ki nem alakul a folyási feszültség (B pont).
- C pontban a szélső nyomott szál eléri a folyáshatárt.
- D ponttól a diagram nemlineáris viselkedésre vált.
- Az F pontban kialakul az első lokális kihajlás az acélcsőben. A lokális kihajlás okozat hullámok száma a terheléssel párhuzamosan nő, eloszlásuk egyenletes. Az F és G pontok között a minta jelentős feszültségkeményedést mutat.
- A terhelő erő maximumát G pontban érjük el, ezután folyamatos csökkenés látható.
- A tönkremenetel az I pontban hirtelen következik be, amikor a próbatest acél csöve eléri a szakadó nyúlást.



27. ábra – CFST idealizált terhelés-alakváltozás diagramja a vizsgált D/t arány esetén [25]

2.3.3.2 Hajlítási teherbírás numerikus vizsgálata

A Washingtoni Egyetem négy kutatója, 2012-ben publikált tanulmányukban [26] a tiszta hajlítással terhelt CFST elem viselkedését kívánták szimulálni ABAQUS szoftver segítségével. A megfelelő modellezési eljárás kialakításához szakirodalmi ajánlások alapján felvették az anyagmodellt, a megtámasztási és terhelési viszonyokat, a keresztmetszeti elemek közti interakció modelljét, és a végeselemes hálót. Kísérleti adatok alapján validálták az acélső korlátozó hatását, és a tapasztalatok alapján állították össze a végleges nyomatóknak kitett ABAQUS modellt. A hajlítással terhelt próbatestek kísérleti adatait Thody publikációja [27] szolgáltatta. [26]

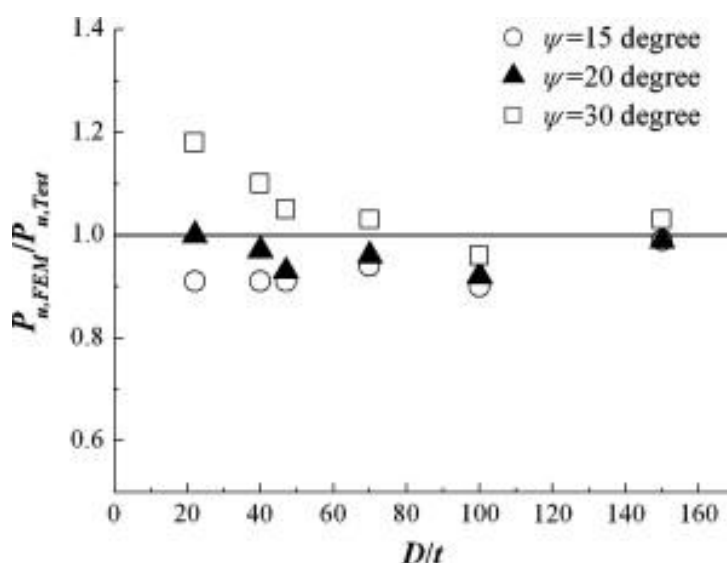


28. ábra – a) beton anyagmodell $\sigma - \varepsilon$ diagramja b) acél anyagmodell $\sigma - \varepsilon$ diagramja – [26]

A végelelemes modellezésben használt acél anyagmodell feszültség-alakváltozás diagramja a 28. ábrán látható. Az acél kezdeti rugalmassági modulusát 200000 MPa-nak, a Poisson-tényezőt 0.3-nek feltételezték. A beton modellezéséhez az ABAQUS betonmodelljét használták, az anyag idealizált $\sigma - \varepsilon$ diagramja szintén a 28. ábrán látható. [26]

A CFST válaszanak megfelelő modellezéséhez elengedhetetlen az acél abroncs hatásának, és a beton szilárdságnövekedésének figyelembevétele a végelelemes modellben. A hatás fontosságát jelzi, hogy a tárgyalt publikáció az abroncs hatást külön ellenőrizte a hajlítással terhelt modell összeállítás előtt. Az acélcső és beton mag közti elemek közti kapcsolatot ún. 'GAP' elemek segítségével modellezték. A kapcsolat ilyen típusú modellezésével összenyomáskor a GAP elemek képesek nyomást közvetíteni az összekapcsolt elemek között, ezzel lehetővé téve a bezáró hatás közvetlen modellezését. A kapcsolati beállítások része az elemek közti súrlódási együttható meghatározása, melyet szakirodalmi ajánlások alapján 0.47-ra vettek fel. Ezen GAP elemek képesek modellezni a betonra gyakorolt bezáró hatást. [26]

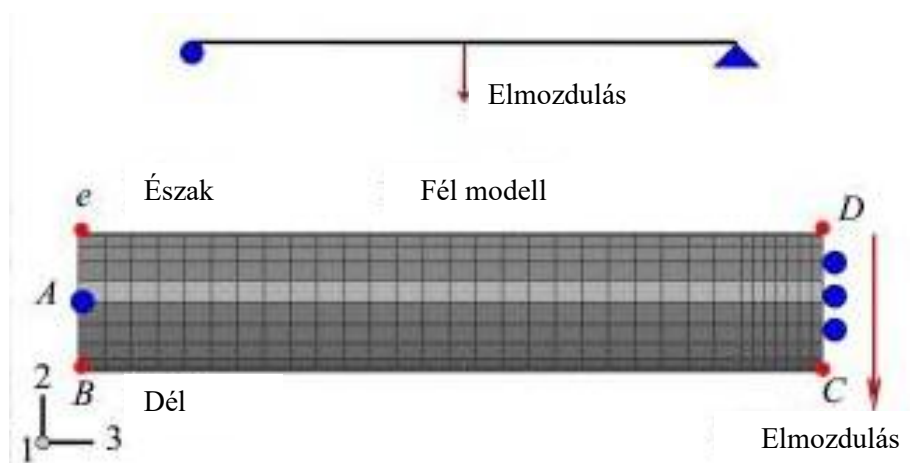
Az abroncs hatás másik lényeges tényezője a modellezésben, beton dilatációs szögének (jele: ψ) helyes megválasztása. A dilatációs szög nyíróterhelés során bekövetkező térfogatváltozás leírására szolgál. A kutatók különböző dilatációs szöggel és D/t aránnyal rendelkező CFST modellek eredményeit, független laboratóriumi kísérletek teherbírásaival hasonlították össze (29. ábra). Mivel a numerikus modell által becsült teherbírások és a kísérleti teherbírások, 20°-os dilatációs szög esetén mutatták a legnagyobb egyezést, kis és nagy D/t arányok esetén is, ezt az értéket használták fel a végleges modell definiálásakor. [26]



29. ábra - Axialis teherbírás aránya változó ψ és D/t arányok esetén [26]

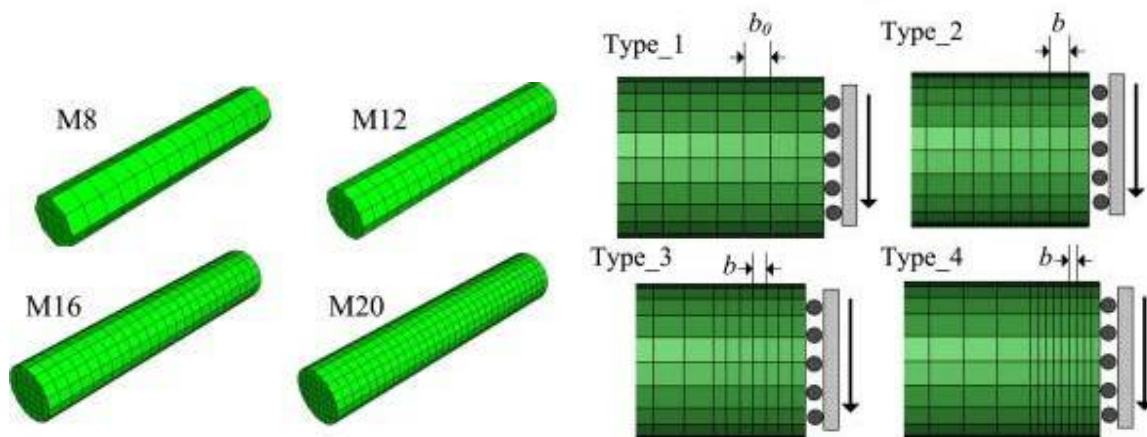
A hajlítási viselkedés validációjához modellezett próbatest csőátmérője 508 mm, falvastagsága 6.4 mm, hossza pedig 5490 mm. Az numerikus elemzés hatékonyságának érdekében a publikált ABAQUS modell kihasználta a kísérleti próbatest szimmetriáját, a modellezett CFST elem teljes hossza így 2740 mm volt. A kutatók numerikus modellje az acélcsövet négy csomópontú héjelemmel, a betonmagot nyolc csomópontú szilárd testként vitték be az ABAQUS szoftverbe. A modell megtámasztását úgy definiálták, hogy a modell jobb végén megakadályozzák a szimmetria tengely körüli forgás, a modell jobb végének eltolódását, és a teljes modell síkból

való kifordulását. A megfelelő terhelést létrehozó eltolódást a kísérleti próbatest szimmetria középpontjára írták fel. A kísérlet statikai váza és a numerikus modell oldalnézete a 30. ábrán látható. [26]



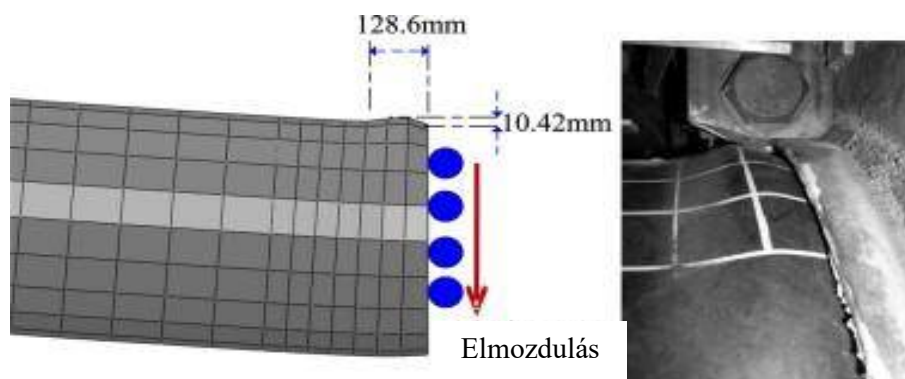
30. ábra – Kísérlet statikai váza és a modellezett félgerenda [26]

A végeleemeses háló elhelyezését a végleges modellen hálókongruencia vizsgálat előzte meg. A vizsgált négy típusú végeleemeses háló (M8, M12, M16, M20) közül az M20 jelű hálót választották ki. Az elem globális végeleemeses hálózásán túl a modell jobb végén hálósűrítést végeztek, a végelemek hosszának csökkentésével, melyen szintén elvégezték a kongruencia vizsgálatot. A sűrítés oka deformációk pontosabb követése volt. A hálókongruencia vizsgálatban résztvevő végeleemeses hálók a 31. ábrán láthatók. [26]

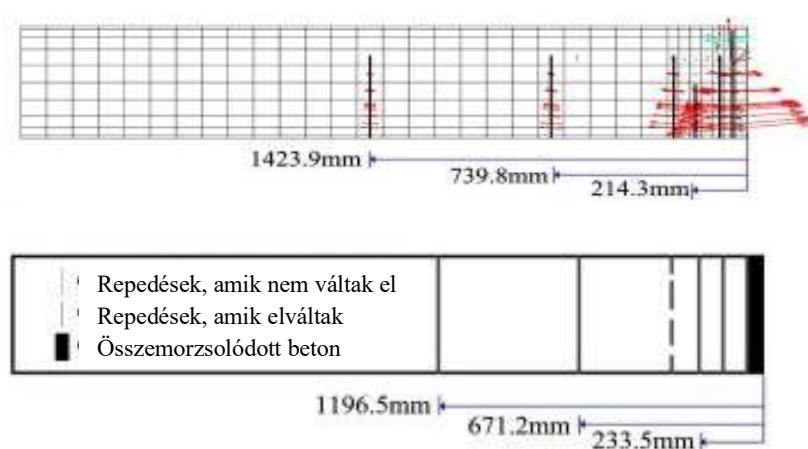


31. ábra – Kongruenciavizsgálat elemei [26]

A végleges ABAQUS modell kimeneti adatai közül a kutatók vizsgálták az acélcső lokális kihajlását és a betonmag repedésképét. Ahogy azt az alábbi két ábra mutatja, a tönkremeneteli módok jó egyezést mutattak a kísérleti eredményekkel (32-33. ábrák). [26]



32. ábra – A numerikus modell és a kísérleti próbatest deformációi [26]



33. ábra – A numerikus modell és a kísérleti próbatest repedésképe [26]

A validáció másik eleme a hajlítási teherbírás vizsgálata. A végeselemes szimulációt több CFST elemen is elvégezték. A vizsgált CFST elemek kísérleti és numerikus modellezéssel adódó teherbírásait az alábbi táblázat foglalja össze (2. táblázat), mely eredmények alapján kimondható, hogy a numerikus modell megfelelően szimulálja a CFST elemek hajlítási teherbírását. [26]

2. táblázat – Kísérleti eredmények és numerikus modell eredményeinek eltérése [26]

Modell		Végeselem/teszt eredmények	
		Nyomatéki teherbírás	$EI_{eff(0.9)}$
CFT1		1.07	0.98
CFT6		1.08	0.91
CFT7		1.04	0.85
CFT8		1.05	0.92
CFT9		1.06	0.98
Átlagos eltérés		1.06	0.93

2.3.3.3 Szabványos méretezési módszer és képletfejlesztés

Az Eurocode az alábbi képletet adja meg hajlított CFST keresztmetszetek számításához. A keresztmetszet részleges nyomás alatt van, axiális teher nem jelenik meg. A plasztikus nyomatéki ellenállás ebben az esetben (11) összefüggés szerint számítható. [18]

$$M_{pl,Rd} = (W_{pa} - W_{pa,n})f_{yd} + 0.5(W_{pc} - W_{pc,n})f_{cd} \quad (11)$$

A (11) összefüggésben szereplő keresztmetszeti tényezők az alábbiak szerint számíthatók.

$$W_{pc} = \frac{(d - 2t)^3}{6} \quad (12)$$

$$W_{pc,n} = (d - 2t)h_n^2 \quad (13)$$

$$W_{pa} = \frac{d^3}{6} - W_{pc} \quad (14)$$

$$W_{pa,n} = h_n^3 - W_{pc,n} \quad (15)$$

$$h_n = \frac{A_c f_{cd}}{2d f_{cd} + 4t(2f_{yd} - f_{cd})} \quad (16)$$

Az Elchalakani, Zhao és Grzebieta kutatóhármas az alábbi képletet (17) javasolta betonnal kitöltött acélcsövek hajlítási teherbírásának számításához, ahol a hajlítási teherbírás három nyomaték összegeként adódik: [25]

$$M_{theory} = M_{cc} + M_{st} + M_{sc} \quad (17)$$

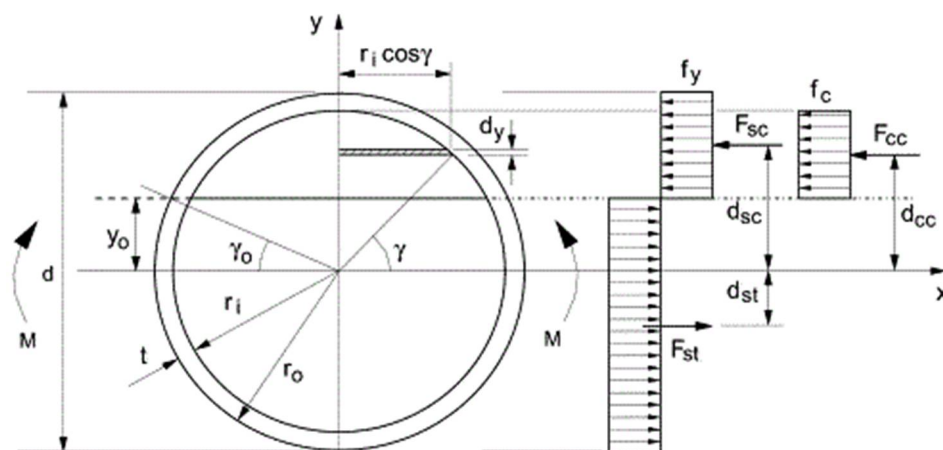
ahol M_{cc} , M_{st} , M_{sc} a keresztmetszetre ható feszültség blokkok nyomatéka a súlyponti tengelyre, a nyomott beton zónából, a húzott acél zónából és a nyomott acél zónából.

$$M_{theory} = 23f_c r_i^3 \cos^3 \gamma_0 + 4f_y r_m^2 t \cos \gamma_0 \quad (18)$$

γ_0 a semleges tengely helyzetét megadó egyenes vízszintes tengellyel bezárt szögét adja meg.

$$\gamma_0 = \pi/4 \quad (19)$$

A képletben szereplő egyéb tagok f_c a beton szilárdság, f_y acél folyási szilárdsága, t az acélcső falvastagsága, r_m az acélcső középvonalának távolsága a középponttól, r_i pedig az acélcső belső sugara. Az eredő erők és a képletben szereplő egyéb tényezők a 34. ábrán láthatók. [25]



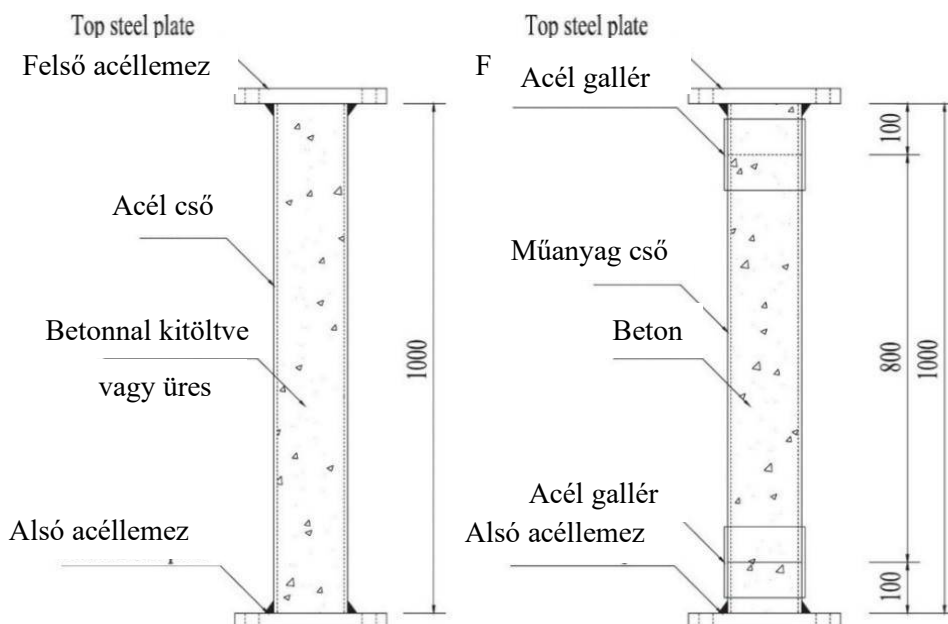
34. ábra – Keresztmetszet mértékadó feszültségeloszlása [25]

2.3.4 CFST elem csavarási teherbírás

2.3.4.1 Csavarási teherbírás kísérleti vizsgálata

Le, Cao és Cao kutatócsapata 2021-ben CFST próbatestek viselkedését vizsgálta kísérleti úton, tiszta csavarással terhelve [28]. A kísérleti próbatestek között a betonnal kitöltött csöveken túl megjelentek acélsövek és betonhengerek is, melyek összehasonlítási alapot biztosítottak az eredmények értékeléséhez. [28]

A minták teljes hossza 1000 milliméter, a felhasznált csövek átmérője 140 milliméter, falvastagságuk 2.3, 3.0 és 3.5 milliméter. A próbatestek acél anyagának jelölése SS400, karakterisztikus folyási feszültségük 245 MPa. A próbatestek beton kitöltése 24.2 MPa és 33.3 MPa nyomószilárdságú volt. [28]

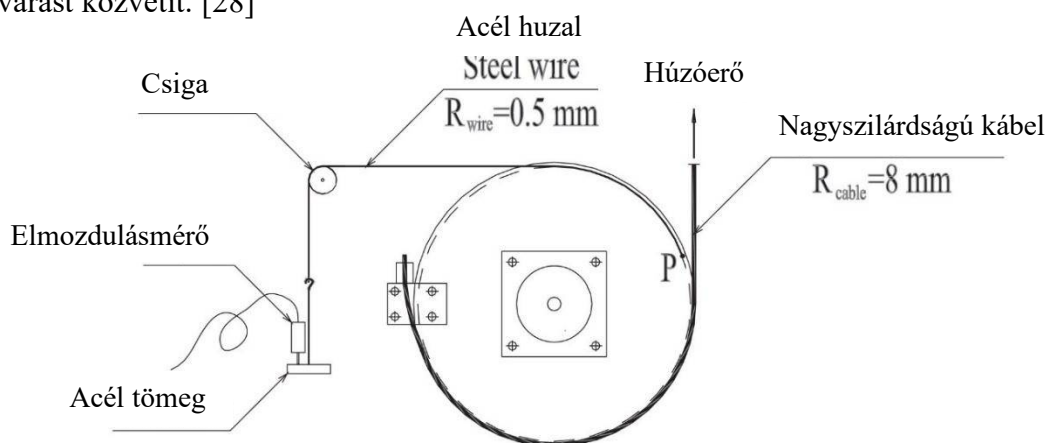


35. ábra – Vizsgált próbatestek vázlata [28]

A CFST minták, az acélsöves minták, valamint a betonhenger próbatestek kialakításának vázlatát mutatja a 35. ábra. Mindhárom típusú próbatest esetén alkalmaztak két 16 mm

vastagságú lezáró lemezt. A CFST és acélcső minták esetén a lezáró lemez közvetlenül a csőhöz hegesztették, melytől a beton hengerek kialakítása némileg eltért. A tisztán beton próbatestek kialakításához műanyag csövet használtak, melyet a befogás környezetében 100 mm hosszúságú acél gallér vált, a véglezáró lemezt ehhez a gallérhoz rögzítették. [28]

A kísérleti összeállítás vázlata a 36. ábrán látható. Az egyik végén befogott próbatest forgó tárcsához csatlakozik, melyet hidraulikus emelővel összekapcsolt acélpászma forgat el. A közvetített terhelés nagyságát a hidraulikus emelő alatt elhelyezett terhelésmérő cella segítségével dokumentálták. A vázolt kísérleti összeállításban a pászma által kifejtett nyíróerőt, és hajlító nyomatékot a forgó tárcsa viseli, így a forgótárcsa a próbatestre már csak tiszta csavarást közvetít. [28]



36. ábra – Kísérleti összeállítás vázlata [28]

A kutatók a kísérlet elvégzése előtt megállapították a terhelés megszüntetéséhez tartozó elcsavarodási szöget, melyet szakirodalmi javaslatok alapján 20°-ban határoztak meg. A tönkremenetel egyértelmű megállapítását megnehezítette, hogy a CFST próbatesten nagy elcsavarodási szögeknél sem látszott egyértelmű lokális kihajlás és a torziós nyomaték zuhanása sem volt tapasztalható. A kutatás végkövetkeztetésekként kimondta, hogy az acélcső és a beton együttműködése a CFST elemekben kölcsönösen előnyös, javuló torziós teherbírás jellemzi. Az egyes keresztmetszeti elemek teherbírásának szuperponálása, a teherbírás alulbecsléséhez vezet, hiszen így nem vesszük figyelembe az acél és a beton kölcsönösen előnyös egymásra hatását. [28]

2.3.4.2 Csavarási teherbírás numerikus vizsgálata

Han, Yao és Tao kutatóhármassal ABAQUS szoftver segítségével hozott létre olyan végelelemes modellt, amely megfelelően szimulálja a tiszta csavarásnak kitett CFST elemek válaszát [29]. Tanulmányukban mind az acélcső, mind a beton mag 8 csomópontú testelemek felhasználásával modellezték, három translációs szabadságfokkal. A publikáció több anyagmodellt is érint az acél megfelelő modellezéséhez. Szénacélok esetén Han, Zhao és Tao kutatók feszültség-alakváltozás diagramját [30], hidegen alakított acélcsövek esetére Abdel-Rahman és Sivakumaran kutatók anyagtulajdonsági modelljét javasolják [31]. A numerikus szimuláció beton mag anyagmodelljéhez definiálásához a már említett sérült plaszticitású beton modelljét javasolták. [29]

A CFST modell acél-beton kapcsolatát egy normális irányú és egy tangenciális irányú tagból állították össze. A normális irányban az ABAQUS 'contact pressure' modelljét használták, tangenciális irányban pedig az ún. Coulomb-féle súrlódási modellt. A Coulomb-féle súrlódási modell esetén az érintkező felületek képesek nyírófeszültséget közvetíteni, egy kritikus τ_{crit} határértékig. Az érintkező felületek megcsúszása után a nyíróerőt állandónak tekintjük, a maximális határértéken. A kritikus nyíróerő értéke a felületeket összeszorító erő illetve a súrlódási tényező függvénye, melyet a (20)-as összefüggés ad meg. [29]

$$\tau_{crit} = \mu p \geq \tau_{bond} \quad (20)$$

A kritikus nyíróerő értékének alsó határa τ_{bond} , mely CFST elemek esetén az (21)-es összefüggés alapján számítható. A képletben szereplő D az acélcső külső átmérője, t az acélcső falvastagsága. [29]

$$\tau_{bond} = 2.314 - 0.0195(D/t) \quad (21)$$

A numerikus modell megtámasztási viszonyait az alsó vég befogásával alakították ki, míg a modell ellentétes oldali végén semmilyen elmozdulásainak nem korlátoztak. A CFST elem elhelyezett terhelés tengely irányú csavarás volt. [29]

A numerikus modell validálásához független kutatások teszt eredményeit hasonlították össze a végelelemes modell által jósolt teherbírásokkal, melyek után kimondták, a numerikus modell megfelelően szimulálja a tiszta csavarásnak kitett CFST elem viselkedését. [29]

2.3.4.3 Szabványos méretezés és képletfejlesztés

Han, Yao és Tao kutatók által publikált tanulmány, a CFST csvarási teherbírásának számításra tesz javaslatot. Az ajánlás a (22)-es összefüggés alapján határozza meg a CFST elem teherbírását. [29]

$$T_u = \gamma_t \tau_{scy} W_{sct} \quad (22)$$

A teherbírás képletében szereplő τ_{scy} a csavarásnak kitett CFST elem névleges folyási szilárdsága, mely a keresztmetszeti acélhányad (α), a bezárási tényező (ξ), és a kompozit elem axiális összenyomásra kialakuló névleges folyási szilárdságának ismeretében, a (23)-as képlettel számítható. [29]

$$\tau_{scy} = (0.422 + 0.313\alpha^{2.33})\xi^{0.134}f_{scy} \quad (23)$$

Továbbá szükséges a teherbírás számításához a csavarási keresztmetszeti tényező (W_{sct}) és γ_t tényezőre, amely megadja a csavarási teherhez tartozó névleges folyáshatár és az axiális nyomás hatására kialakuló névleges folyáshatár arányát. A hivatkozott tényezők (24)-es és (25)-ös számú összefüggések segítségével számíthatóak. [29]

$$\gamma_t = \frac{\tau_{scy}}{f_{scy}} \quad (24)$$

$$W_{scy} = \frac{\pi D^3}{16} \quad (25)$$

A kutatók a képlethez alkalmazhatósági határokat fogalmaztak meg. A határok kitérnek a keresztmetszet acél hányadára $\alpha = 0.04 - 0.2$, az acél szilárdsági osztályára $f_y = 235 - 420$ MPa, valamint a beton törési szilárdságára $f_{cu} = 30 - 90$ MPa. [29]

2.3.5 CFST elem teherbírása nyomás-hajlítás interakcióra

Az egyes terhelés típusokhoz kapcsolódó szakirodalmi cikkeket áttekintve látható, hogy a legkisebb számú kutatás az összetett terhelésnek kitett CFST elemek esetén található a nemzetközi szakirodalomban. A megállapítás különösen igaz a nyomatékkel és normálerővel terhelt CFST oszlopok numerikus modellezését tárgyaló tanulmányokra.

2.3.5.1 Interakciós teherbírás kísérleti vizsgálata

Neogi, Sen, és Chapman kutatók nevével fémjelzett publikáció [32] egyike volt az első excentrikus terhelésnek kitett CFST elemek viselkedését vizsgáló, kísérlet alapú tanulmánynak. A publikáció 18 darab CFST minta kísérleti vizsgálatát tartalmazta, melyek gyártástechnológia szempontjából két csoportra oszthatóak, melegen hengerelt és hideg alakítással készült acélcsövekre. A próbatétek közt három csőátmérő jelent meg 168 mm, 140 mm és 127 mm. A melegen hengerelt acélcsöveket tartalmazó minták hossza 120'' (3048 mm) volt, a hideg alakítással készült csöveket tartalmazó próbatestek hossza 48'' (1219 mm), 60'' (1524 mm), 72'' (1829 mm) értékek közt változott. A csövek megfelelő feltöltését vibrációval segítették, mely után acéllemezzel zárták le a csövet. A terhelés során mérték az CFST oszlop oldalirányú kitérését és az acélcső nyúlásait a próbatest hosszmenti felező és negyedelő pontjain. Az acélcső nyúlásait mind tengelyirányba, mind sugárirányba rögzítették a mérési pontokon. A kísérleti eredményekből a kutatók tipizált σ - ε diagrammot állítottak össze, eredményeiket számos későbbi tanulmány használta fel számítási modellek és numerikus módszerek validálására. [32]

2.3.5.2 Interakciós teherbírás numerikus vizsgálata

Han és munkatársai 2016-ban publikálták tanulmányukat [34], melyben excentrikusan terhelt CFST elemek validált numerikus modelljét készítették el. Cai és kutatócsapata 2018-as dolgozatukban [33] ezt a modellezési eljárást kívánták pontosítani a beton modell fejlesztésével. Han és társai a modellépítés során figyelembe vették az beton szilárdságnövekedését, ugyanakkor nem számoltak az excentritás változásának hatásával. A tárgyalt Jingming Cai vezette kutatás újra alkotta a Han és társai által validált numerikus modellt, mely kutatásuk alapját képezte a későbbiekben. Az publikációk a CFST elem acélcsövét izotróp, rugalmas-plasztikus anyagként vitték be az ABAQUS szoftverbe, felhasználva Han és kollégái által kidolgozott [29] σ - ε modelljét. Az ötlépcsős σ - ε modell összefoglalását a (26)-os számú egyenlet mutatja meg. [33]

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \varepsilon_s, & \varepsilon_s < \varepsilon_e - A\varepsilon_s^2 + B\varepsilon_s^2 + C & \varepsilon_e < \varepsilon_s \\ \leq \varepsilon_{e1} & f_y & \varepsilon_{e1} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{e2} f_y [1 + 0,6 \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{e2}}{\varepsilon_{e3} - \varepsilon_{e2}}] & \varepsilon_{e2} < \varepsilon_s \\ \leq \varepsilon_{e3} & 1.6f_y & \varepsilon_s > \varepsilon_{e3} \end{cases} \quad (26)$$

A képletben szereplő ε hatérok a következőképpen alakulnak:

$$\varepsilon_e = 0.8f_y/E_s \quad (27)$$

$$\varepsilon_{e1} = 1.5\varepsilon_e \quad (28)$$

$$\varepsilon_{e2} = 10\varepsilon_{e1} \quad (29)$$

$$\varepsilon_{e3} = 100\varepsilon_{e1} \quad (30)$$

Továbbá a képletben szereplő A , B és C értékek:

$$A = 0.2f_y/(\varepsilon_{e1} - \varepsilon_e)^2 \quad (31)$$

$$B = 2A\varepsilon_{e1} \quad (32)$$

$$C = 0.8f_y + A\varepsilon_e^2 - B\varepsilon_e \quad (33)$$

A CFST elem mag beton anyagmodelljének alapja szintén Han és kollégái által publikált [29] módszer, melyet a (34)-es összefüggés foglal össze.

$$y = \begin{cases} 2x - x^2 & (x < 1) \\ \frac{x}{\beta_0(x-1)^2 + x} & (x \geq 1) \end{cases} \quad (34)$$

A (34)-es összefüggésben szereplő x , y és β_0 tényezők az alábbi módon számíthatók.

$$x = (\varepsilon/\varepsilon_0) \quad (35)$$

$$y = (\sigma/\sigma_0) \quad (36)$$

$$\beta_0 = (2.36 * 10^{-5})^{[0.25+(\xi_c-0.5)^7]} \quad (37)$$

(35)-(37)-es számú képletek kiszámításához szükséges további tényezők az alábbiak.

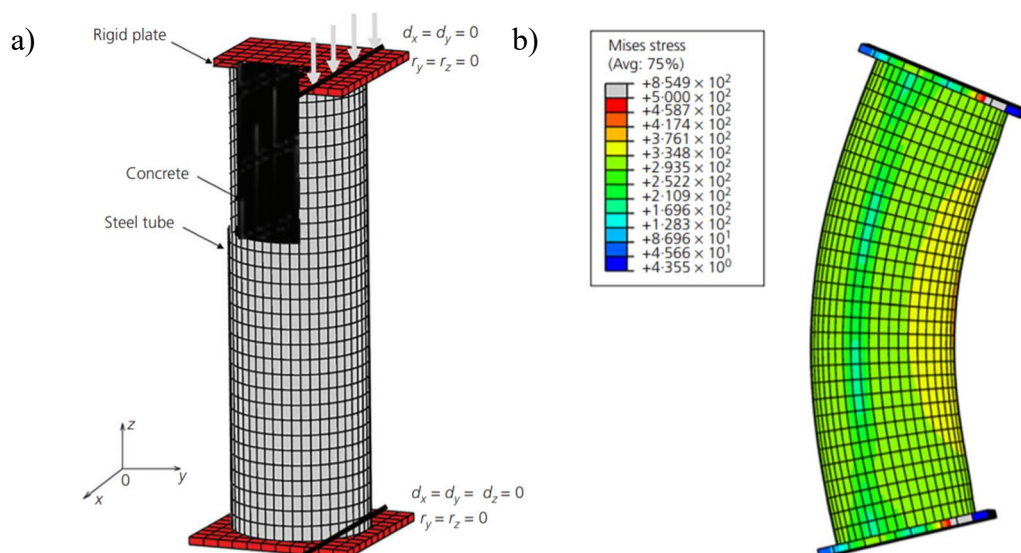
$$\sigma_0 = f_c' \quad (38)$$

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_c + 800\varepsilon^{0.2}10^{-6} \quad (39)$$

$$\varepsilon_c = (1300 + 12.5f_c')10^{-6} \quad (40)$$

$$\xi_c = \frac{A_s f_y^t}{A_c f_{ck}} \quad (41)$$

A modellezett elem geometriáját, megtámasztási és terhelési viszonyait a 37. ábra a, pontja foglalja össze. A keresztmetszet minden elemét nyolccsomópontú szilárd testként modellezték. A CFST elem acél csövét két végén végtelen merevségű lemezekkel zárták le. A megtámasztási és terhelési viszonyok megadásához elhelyeztek a két véglemezen egy-egy excentrikus terhelési vonalat. [33]

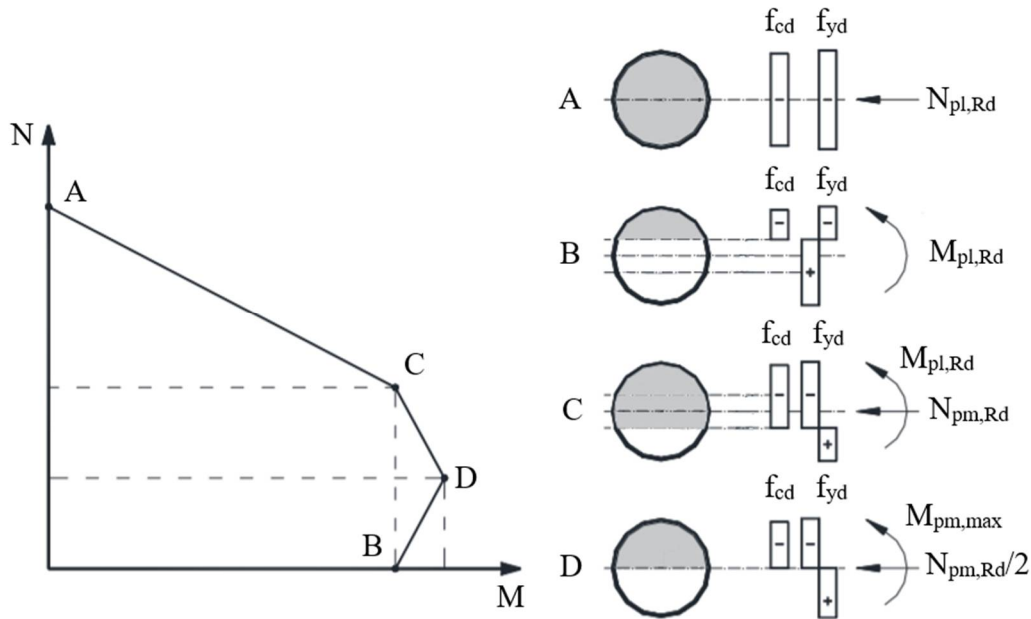


37. ábra – a) CFST numerikus modell és b) numerikus modell deformációja [33]

Az alsó lemez terhelési vonalán minden elmozdulást megakadályoztak az x irányú elfordulás kivételével. A felső lemez terhelési vonalán a z irányú elmozdulást és x irányú elfordulást kivételével minden szabadságfokot fixáltak. Az acélső és a betonmag kapcsolatának megadásához felület-felület interakciót használtak, a korábban már tárgyalt Coulomb-féle súrlódási modell és az ABAQUS 'hard contact' beállításával. A numerikus modell tipikus tönkremeneteli módja szintén a 37. ábrán látható. A tönkremeneteli ábra azt mutatja, hogy a CFST elem esetén a beton megtámasztó hatása miatt az acélsőben nem alakul ki lokális horpadás a nyomott oldalon. Bár Cai és kutatócsapata publikációjukban felhívják a figyelmet, hogy a bemutatott ABAQUS nem viszi figyelembe az excentritás minden területre kiterjedő hatását, Han és munkatársai mégis megfelelőnek ítélték a modell válaszát és kimondták, hogy az általuk javasolt modellezési eljárás megfelelően képes szimulálni a CFST elem tönkremenetelét. [33]

2.3.5.3 Szabványos vizsgálat és képletfejlesztés

Az Eurocode kombinált összenyomással és egytengelyű hajlítással terhelt betonnal kitöltött acélsövek keresztmetszeti ellenállásának ellenőrzéséhez interakciós görbe használatát javasolja. Az interakciós görbe egyszerűsíthető a 38. ábrán látható sokszög diagrammal. A görbe kitüntetett pontjainak számítása az alábbiak szerint hajtható végre. [18]



38. ábra – N - M interakciós sokszög diagram [18] alapján

A pont meghatározása ($0; N_{pl,Rd}$)

A teljes keresztmetszet nyomás alatt van, a terhelő központos, nem lép fel hajlítás a keresztmetszetben. A keresztmetszet plasztikus nyomási ellenállása a (26)-os összefüggés segítségével határozható meg, ahol a képletben szereplő A_s és A_c , az acél és beton keresztmetszeti területe, f_y és f_c , az acél folyási feszültsége, illetve a beton szilárdsága. D és t a geometriát leíró külső átmérő és falvastagság. [18]

$$N_{pl,Rd} = \eta_a A_s f_y + \left(1 + \eta_c \frac{t f_y}{D f_c} \right) A_c f_c' \quad (26)$$

Központos terhelés esetén η_a és η_c tényezők a (27)-es és (28)-as képletek szerint határozható meg a viszonyított karcsúság segítségével:

$$\eta_a = 0,25(3 + 2\lambda) \quad (27)$$

$$\eta_c = 4,9 - 18,5\lambda + 17\lambda^2 \quad (28)$$

B pont meghatározása ($M_{pl,Rd}; 0$)

A keresztmetszet részleges nyomás alatt van, axiális teher nem jelenik meg. A plasztikus nyomatéki ellenállás ebben az esetben (29)-es képlet szerint számítható.

$$M_{pl,Rd} = (W_{pa} - W_{pa,n}) f_{yd} + 0,5(W_{pc} - W_{pc,n}) f_{cd} \quad (29)$$

Ahol a képletben szereplő keresztmetszeti tényezők és a semleges tengely helye (h_n) az alábbiak szerint számítható.

$$W_{pc} = \frac{(d - 2t)^3}{6} \quad (30)$$

$$W_{pc,n} = (d - 2t)h_n^2 \quad (31)$$

$$W_{pa} = \frac{d^3}{6} - W_{pc} \quad (32)$$

$$W_{pa,n} = h_n^2 - W_{pc,n} \quad (33)$$

$$h_n = \frac{A_c f_{cd}}{2d f_{cd} + 4t(2f_{yd} - f_{cd})} \quad (34)$$

C pont meghatározása ($M_{pl,Rd}$; $N_{pm,Rd}$)

A keresztmetszetet hajlítás és központos nyomás terheli, mely megegyezik a beton nyomási teherbírásával. A keresztmetszet nyomási teherbírása a (35)-ös összefüggéssel adható meg.

$$N_{pm,Rd} = A_c f_{cd} \left(1 + \eta_c \frac{t}{d} \frac{f_y}{f_{ck}} \right) \quad (35)$$

D pont meghatározása ($M_{max,Rd}$; $N_{pm,Rd}/2$)

A keresztmetszet maximális hajlítási ellenállása (36), amikor a semleges tengely a súlyponti tengellyel esik egybe:

$$M_{pl,Rd} = W_{pa} f_{yd} + 0.5W_{pc} f_{cd} \quad (36)$$

A vázolt pontok kiszámításával megszerkeszthető az adott keresztmetszet N-M interakciós sokszögvonala, melyről leolvasható az adott nyomatéki igénybevételhez tartozó normál igénybevétel. [18]

Az Eurocode tervezési előírásain túl rendelkezésre állnak szakirodalmi publikációk is, melyek finomítani kívánják az egyes tervezési szabványok számítási metódusait. Hasonló képletfejlesztési céllal készült Trentadue, Marano, Quaranta kutatóhármass által jegyzett 2016-os kutatás is [35], melynek célja közelítő N-M interakciós görbe kidolgozása, és egy azt alapul vevő egyszerűsített tervezési eljárás kifejlesztése.

A publikáció egyszerűsített tervezési eljárásának alapja közelítő N-M interakciós görbe, mely a valós viselkedést a (37)-es összefüggés alapján követi.

$$M_{Rd}(N_{Rd}) \approx \mu(N_{Rd})M_{Rd}^{max} \quad (37)$$

Az összefüggésben szereplő μ a (38)-as összefüggés alapján számítható.

$$\mu(N_{Rd}) = 1 - \left| \frac{2 * \left(\frac{N_{Rd}}{\pi R_c^2 f_{cd}} \right) + 1}{2\omega + 1} \right|^\alpha \quad (38)$$

Mivel a publikáció kör keresztmetszetű beton oszlopok és CFST elemek képletfejlesztését tartalmazta, egyes tényezők számítása a keresztmetszet típusától függően változik. $\mu(N_{Rd})$ képletének ω eleme, így CFST elem esetén (39)-es összefüggéssel számítható.

$$\omega = \frac{2R_{st}t_s f_{yd,st}}{R_c^2 f_{cd}} \quad (39)$$

Szintén betonnal kitöltött acélcső esetén M_{Rd}^{max} az alábbi módon határozható meg. (40)

$$M_{Rd}^{max} = \frac{2}{3} R_c^3 f_{cd} + 4R_{st}^2 t_{st} f_{yd,st} + 4R_s^2 t_s f_{yd} \quad (40)$$

A (41)-es összefüggés α értékének számítási módját adja meg ω értékének függvényében.

$$\alpha = \begin{cases} 2.0962, & \omega \leq 0.3342 \\ 1.7548 + \frac{0.1141}{\omega}, & \omega > 0.3342 \end{cases} \quad (41)$$

Trentadue, Marano, Quaranta kutatók végkövetkeztetések között kimondják, hogy a közölt egyszerűsített eljárás maximális közelítési hibája 1.59%, a nem konzervatív oldalon.

3. Numerikus modell bemutatása

A központos nyomással terhelt, betonnal kitöltött acélcső vizsgálatához numerikus modellt készítettem ABAQUS végeselemes szoftver alkalmazásával. A dolgozat ezen fejezetében tárgyalom a modellezésbe bevont próbatestek jellemzőit, a modellezés lépéseit, illetve a numerikus modell beállításait. Az ABAQUS szimuláció, valamint a modell validálásának alapját adó kísérleti eredmények Abed, AlHamaydeh, Abdalla kutatók publikációja [16] szolgáltatta.

3.1 Vizsgált geometria

Az alább közölt táblázatban (3. táblázat) összefoglalásra került egyfelől a numerikus szimuláció validálásához használt modell (a táblázatban CFST - f_y310 f_c60 jelű próbatest), másfelől a későbbi paraméteres vizsgálat részét képező, normál- és nagyszilárdságú anyagokat kombináló CFST elemek jellemző tulajdonságai. A próbatestek jelölésénél f_y az acélcső folyáshatárát, f_c pedig a beton hengeren értelmezett nyomószilárdságát jelölik.

3. táblázat – Végeselemes modellezésben szereplő próbatestek tulajdonságai

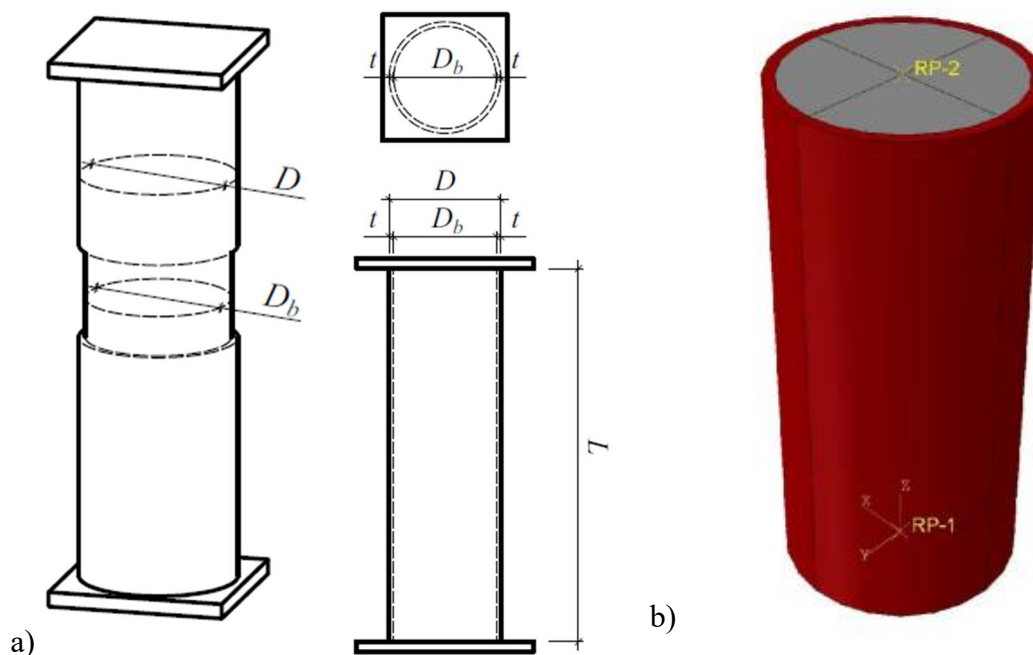
Vizsgálat célja	Próbatest jele	D [mm]	t [mm]	L [mm]	D/t [-]	f_y [MPa]	f_c [MPa]
Modell validálása	CFST - f_y310 f_c60	114	5.6	250	20.36	310	60
	CFST - f_y355 f_c30	114	5.6	250	20.36	355	30
	CFST - f_y500 f_c30	114	5.6	250	20.36	500	30
Paramétervizsgálat	CFST - f_y960 f_c30	114	5.6	250	20.36	960	30
	CFST - f_y355 f_c60	114	5.6	250	20.36	355	60
	CFST - f_y500 f_c60	114	5.6	250	20.36	500	60
	CFST - f_y960 f_c60	114	5.6	250	20.36	960	60

A numerikus modellek geometriájának főbb jellemzőit foglalja össze a 39. ábra. Ezek a geometriát leíró paraméterek a betonmagot határoló acélcső felvastagsága (t), az acélcső külső átmérője (D), valamint a CFST elem hossza (L). A modellépítés során megjelenő, illetve a vázlaton szereplő negyedik paraméter az acélcső belső átmérője (D_b), mely a falvastagság és a külső átmérő ismeretében számítható:

$$D_b = D - 2t \quad (42)$$

Lényegesek a numerikus modell anyagtulajdonságait meghatározó tényezők, a CFST elemek csoportosítására alkalmas jellemzők, a csőátmérő - falvastagság arány (D/t), valamint a hossz

– csőátmérő arány (L/D). A modellezett CFST elemek acélsövének külső átmérője minden esetben 114 mm, falvastagságuk 5.6 mm. A próbatestek hossza egységesen 250 mm.



39. ábra – Betonnal kitöltött acélső a) vázlata és b) modellezett geometriája

Modellépítés során a szimuláció későbbi lépéseinek megkönnyítése érdekében referenciapontokat tűztem ki a CFST elem két végének középpontján (39. ábra), ezek felhasználására a dolgozat a későbbiekben még kitér. A referenciapontok megadásával azonos céllal, a numerikus modell részeinek összeállítása után kitüntetett felületeket határoztam meg. Ilyen kitüntetett felület az acélső belső, illetve a betonmag külső felülete, melyeknek a két elem kapcsolatának megadásakor lesz szerepe.

3.2 Alkalmazott elemtípusok

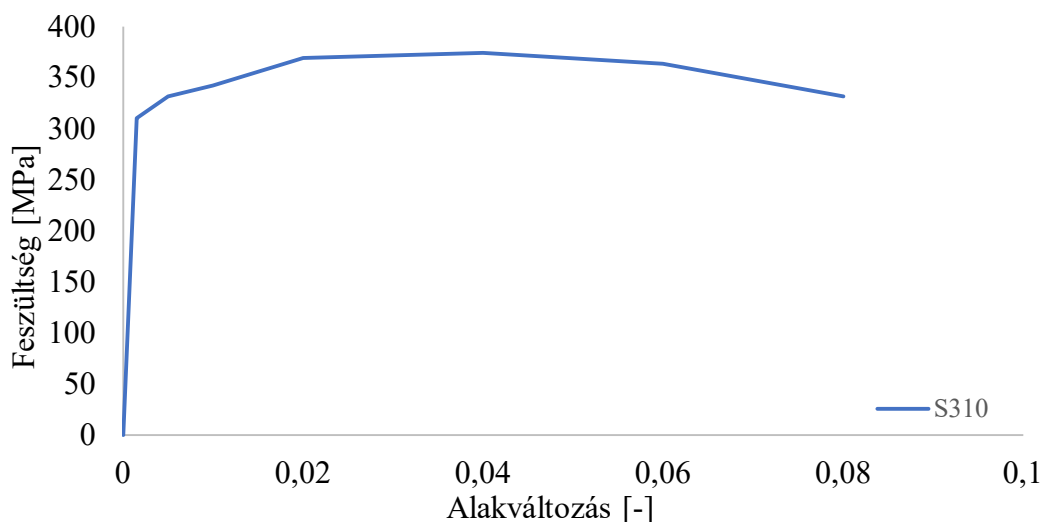
A betonmag és az acélső modellezése ABAQUS általános végesesemes szoftverben lineáris, nyolc csomópontú, háromdimenziós testelemekkel (a szoftverben C3D8R jelű végeselemtípus) történt redukált integrálás alkalmazásával. A testelem csomópontként három szabadságfokú. A modellezés lényeges lépése az acélső és betonmag kapcsolati elemeinek megfelelő megadása. Az interakció definiálásának alapja Abed és társai által jegyzett [16], valamint Tao [52] CFST modellezését érintő tanulmánya. A szakirodalmi útmutatással egybehangzóan egy érintő irányú és egy normálirányú viselkedést definiáltam. Az érintő irány súrlódási tényezője szakirodalmi ajánlás alapján 0.25, a normálirányú kapcsolat ún. „hard contact”.

3.3 Alkalmazott anyagmodellek

A valóságos viselkedést megfelelően követő végesesemes modell működéséhez elengedhetetlen a megfelelő anyagmodellek definiálása. A következőkben a dolgozat tárgyalja az egyes anyagtipusokhoz tartozó számítási háttér és az anyagmodell megfelelő beállításait a végesesemes szoftverben. A beton anyag modellezésekor megadtam egy normálszilárdságú ($f_c = 30$ MPa) és egy nagyszilárdságú anyagot ($f_c = 60$ MPa), míg az acél esetében két

normálszilárdságú ($f_y = 310 \text{ MPa}$, $f_y = 355 \text{ MPa}$) és két nagyszilárdságú ($f_y = 500 \text{ MPa}$, $f_y = 960 \text{ MPa}$) anyag tulajdonságait definiáltam. A vizsgált CFST próbatest anyagtulajdonságaitól függően a megfelelő szilárdságot tartalmazó anyagmodelleket aktiváltam, ezek a próbatestek jelölésükkel és anyagtulajdonságaikkal együtt áttekinthetők a már hivatkozott 3. táblázatban.

A CFST keresztmetszet acél anyaga rugalmas-képlékeny viselkedést követ. A modellezési módszer validálásához létrehozott szimuláció pontos acél anyagtulajdonságait (40. ábra) Abed, AlHamaydeh, és Abdalla kutatók tanulmánya [16] szolgáltatta. Az acél folyáshatára 310 MPa, rugalmassági modulusa 200 GPa, Poisson-tényezője 0.2.



40. ábra –Validációhoz használt modell acél anyagánál figyelembe vett σ - ε diagram

Mivel az érintett kutatás pontos laboratóriumi vizsgálatához tartozó feszültség-alakváltozás diagramot szolgáltat a keresztmetszet acélanyagáról, ezért ezt bemenő adatként felhasználtam az acél nemlineáris szakaszának leírására. Az anyagmodell tartalmazza mind a lineáris, mind a nemlineáris felkeményedő szakaszt a leszálló ággal együtt.

A paraméteres vizsgálatban a normál- és nagyszilárdságú acélok modellezéséhez Radwan, és Kövesdi [53] tanulmányát használtam fel. A tanulmány a normálszilárdságú acél modellezéséhez négylépcsős lineáris anyagmodellt javasol, melynek számítási módját a (43)-(48) összefüggések adják meg. Az anyagmodell paraméteres σ - ε diagramja a 41. ábrán látható.

$$\sigma(\varepsilon) = \begin{cases} E\varepsilon, & \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ f_y, & \varepsilon_y < \varepsilon \leq \varepsilon_{sh} \\ f_y + E_{sh}(\varepsilon - \varepsilon_{sh}), & \varepsilon_{sh} < \varepsilon \leq C_1 \varepsilon_u \\ f_y C_1 \varepsilon_u + \frac{f_u - f_y C_1 \varepsilon_u}{(\varepsilon_u - C_1 \varepsilon_u)} (\varepsilon - C_1 \varepsilon_u), & C_1 \varepsilon_u < \varepsilon \leq \varepsilon_u \end{cases} \quad (43) - (44)$$

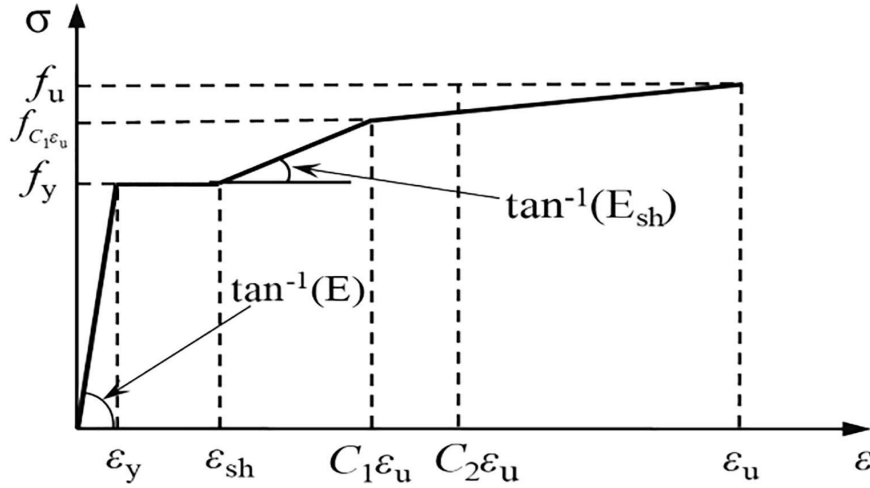
$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{C_2 \varepsilon_u - \varepsilon_{sh}} \quad (43) - (44)$$

$$\varepsilon_{sh} = 0.1 \frac{f_y}{f_u} - 0.055 \quad 0.01 \leq \varepsilon_{sh} \leq 0.03 \quad (45)$$

$$\varepsilon_u = 0.6 \left(1 - \frac{f_y}{f_u} \right) \quad 0.06 \leq \varepsilon_u < A \quad (46)$$

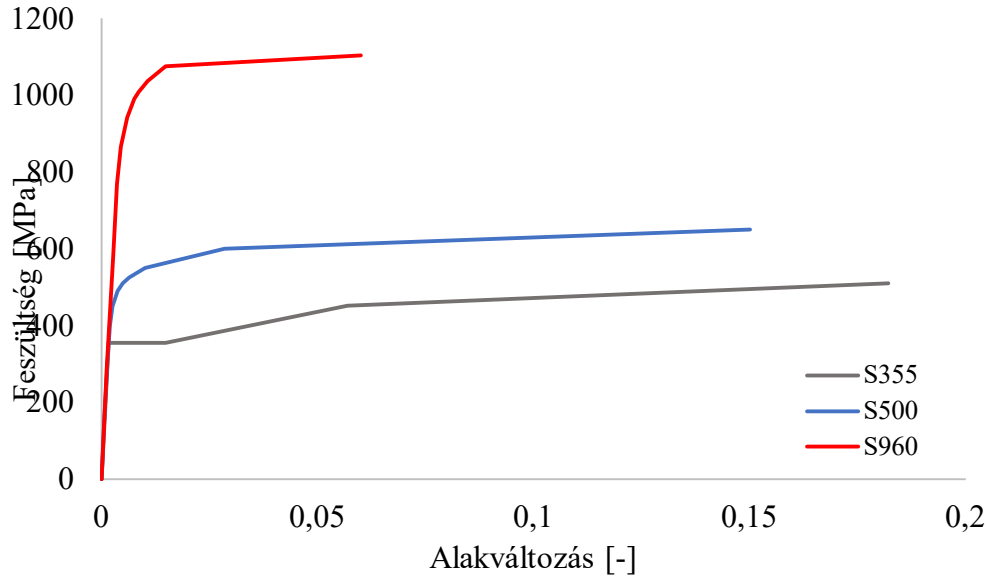
$$C_1 = \frac{\varepsilon_{sh} + 0.25(\varepsilon_u - \varepsilon_{sh})}{\varepsilon_u} \quad (47)$$

$$C_2 = \frac{\varepsilon_{sh} + 0.4(\varepsilon_u - \varepsilon_{sh})}{\varepsilon_u} \quad (48)$$



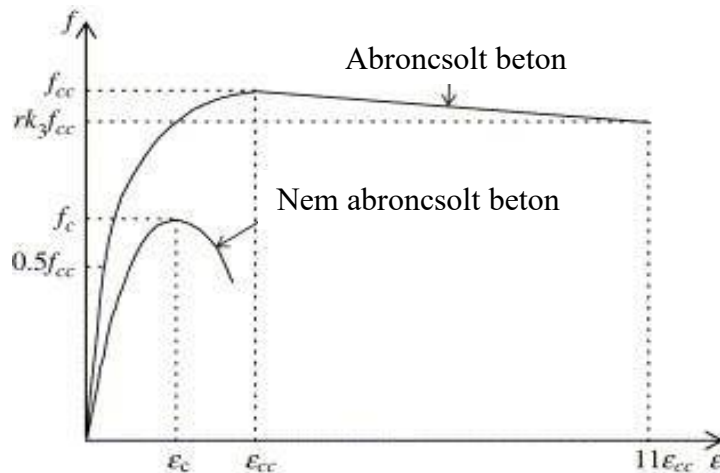
41. ábra – Normálszilárdságú acél anyagmodellje prEN 1993–1-14 alapján [53]

A nagyszilárdságú acél modellezéséhez Ramberg-Osgood anyagmodellt közelítettem multilinéárisan felkeményedő anyagmodellel, ehhez az alakváltozás és feszültség közötti kapcsolatot az $\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{f_y} \right)^n$ egyenlet alapján modelleztem, ahol f_y a szerkezeti acél jelölésében szereplő szilárdság a már említett [53] tanulmány alapján (habár kifejezett folyáshatárról nagyszilárdságú acéloknál nem beszélhetünk), míg E az acél rugalmassági modulusa. Somodi tanulmányának [54] anyagvizsgálatai alapján az n paraméter értéke 14-re vehető fel nagyszilárdságú acélok esetén. A paraméteres vizsgálat feszültség-alakváltozás diagramjait a 42. ábra foglalja össze.



42. ábra – Paraméteres vizsgálatban résztvevő, különböző szilárdságú szerkezeti acélok végeselemes modellben figyelembe vett σ - ε diagramjai

Az acél anyagmodelljéhez hasonlóan a betont szintén rugalmas-képlékeny viselkedéssel definiáltam, melyhez a következőkben tárgyalt anyagjellemzőket használtam fel. A beton anyagmodell megadásának első lépése az abroncsolt beton σ - ε diagramjának kiszámítása, mivel az jelentősen eltér a nem abroncsolt beton feszültség-alakváltozás diagramjától. A nyomott beton megváltozott viselkedésének számítására Ellobody és Young [44] adtak útmutatást. A beton σ - ε diagramjának változását a 43. ábra foglalja össze.



43. ábra – Nyomott beton σ - ε diagramjának megváltozása [44]

Az abroncsolt beton a betonszilárdságának 50%-áig ($0.5f_{cc}$) lineáris viselkedést mutat. A lineáris viselkedéshez tartozó megnövekedett rugalmassági modulus a (49)-es számú összefüggéssel számítható.

$$E_{cc} = 4700\sqrt{f_{cc}} \text{ MPa} \quad (49)$$

A képletben szereplő f_{cc} betonszilárdsági érték számítását Hu és kollégái [45] az alábbi módon javasolták.

$$f_{cc} = f_c + k_1 f_l \quad (50)$$

A képletben szereplő f_c a nem korlátozott beton hengeren értelmezett szilárdsága. Az f_l értékét a CFST acélcsővének folyási feszültsége (σ_0) és a csőátmérő (D) határozza meg.

$$f_l = \frac{2\sigma_0 t}{D} \quad (51)$$

A módosított σ - ε diagram csúcspontjához (f_{cc}) tartozó megnyúlás ε_{cc} a (52)-es számú összefüggéssel számítható. A képletben szereplő $\varepsilon_c = 0.003$ érték a beton hengeren mért nyomószilárdságához tartozó alakváltozás (egytengelyű nyomás hatására).

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_c \left(1 + k_2 \frac{f_l}{f_c} \right) \quad (52)$$

Az (50) és (52) számú összefüggések k_1 és k_2 tényezőit Ellobody és Young tanulmányukban [44] 4.1-re és 20.5-re javasolták felvenni CFST elemek esetén.

A lineáris szakasz végét és a számított diagram csúcspontot nemlineáris szakasz köti össze. A nemlineáris szakasz pontjainak számítására Saenz kutatásában [46] ad számítási útmutatást. A numerikus modell beton anyagának definiálásakor a nemlineáris szakasz pontjainak számítása helyett, a $0.5f_{cc}$, és f_{cc} feszültségekhez tartozó pontokat lineáris szakasz kötöttem össze.

$$f(\varepsilon) = \frac{E_c \varepsilon}{1 + (R + R_E - 2) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}} \right) - (2R - 1) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}} \right)^2 + R \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}} \right)^3} \quad (53)$$

$$R = \frac{R_E(R_\sigma - 1)}{(R_E - 1)^2} - \frac{1}{R_E} \quad (54)$$

$$R = \frac{E_{cc} \varepsilon_{cc}}{f_{cc}} \quad (55)$$

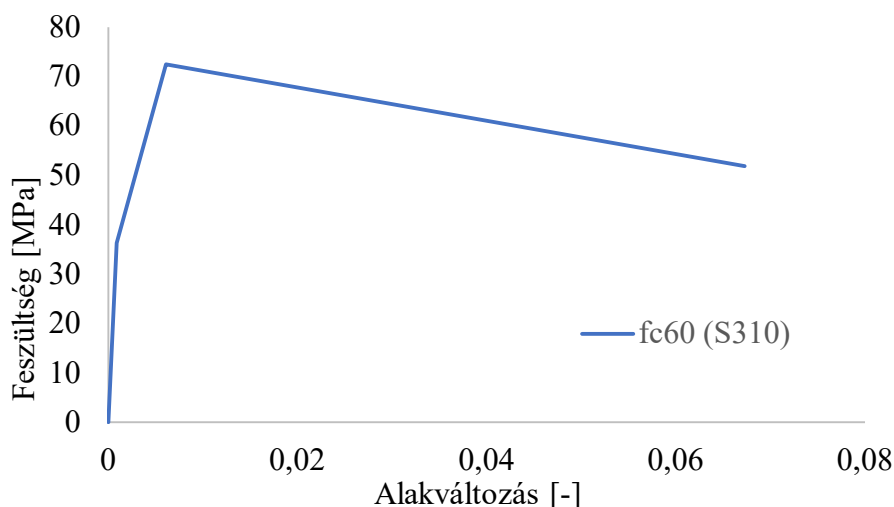
R_σ és R_E tényező értéke 4, Hu és Schnobrich [47] kutatók ajánlása alapján CFST elemek esetén. A (53)-as számú összefüggésbe f_{cc} és $f_{cc}/2$ feszültség értékekhez tartozó nyúlások közé eső értékek helyettesíthetők be a nemlineáris szakasz leírásához.

Mivel a tárgyalt képletek alapján megfelelően leírható a nyomott beton σ - ε diagramjának kezdeti lineáris szakasza, illetve a nemlineáris szakasz a feszültségi csúcspontig, a továbbiakban már csak a tönkremeneteli ponthoz tartozó nyúlásra és feszültségre van szükség. A tönkremenetelhez tartozó nyúlás a nem abroncsolt beton végső nyúlásának 11-szeresével közelíthető, ahogy az a 43. ábrán is látható. Ezen ponthoz tartozó feszültség az (56)-os számú összefüggéssel számítható.

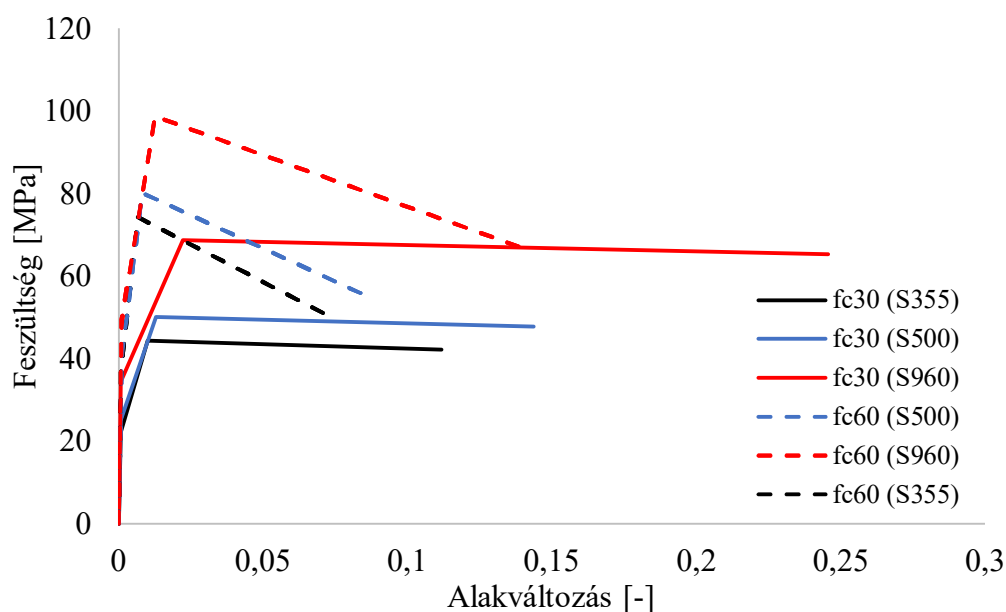
$$f_{\varepsilon,cc} = r k_3 f_{cc} \quad (56)$$

A képletben szerepelő k_3 tényező Ellobody és Young javaslata [44] alapján 1-nek vehető fel, az r tényező értéke Mursi és Uy tanulmánya alapján [43] 1-nek feltételezhető 30 MPa beton kockaszilárdság esetén, és 0.5-nek vehető fel 100 MPa beton kockaszilárdság esetén. Köztes betonszilárdság r tényezőjének számítása lineáris interpolációval számítható. A modellezett normálszilárdságú beton anyagok esetén a számított r érték 0.95, nagyszilárdságú beton esetén

0.741. A modellezett esetekhez tartozó feszültség-alakváltozás diagramok az 44. és 45. ábrán láthatók, zárójelben minden esetben feltüntetve a szerkezeti acél szilárdsági osztályát.



44. ábra – Validációhoz használt végelelemes modellnél figyelembe vett σ - ϵ diagram beton esetén



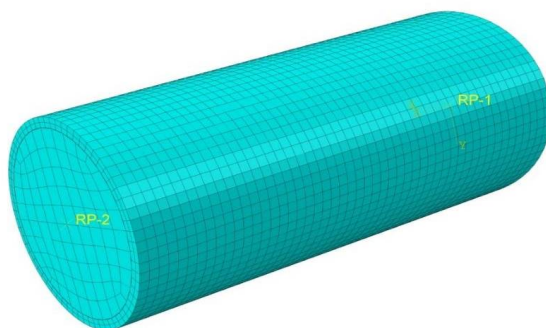
45. ábra –Paraméteres vizsgálat végelelemes modelljeinél figyelembe vett σ - ϵ diagramok normálszilárdságú és nagyszilárdságú beton esetén

A paraméteres vizsgálatban résztvevő végelelemes modellek beton σ - ϵ diagramjait vizsgálva, látható, hogy az egyes beton szilárdságokhoz tartozó görbék jellegükben is komoly eltéréseket mutatnak. A keresztmetszet beton anyagának szilárdságnövekedésével, valamint az acél anyag folyáshatárnövekedésével, az abroncsolt beton szilárdsága nő. A vizsgált párosítások közül a legnagyobb abroncsolt beton szilárdság a nagyszilárdságú beton (C60/75) és S960-es acél párosításával adódik. Jelentős különbség figyelhető meg az abroncsolt nagyszilárdságú és normálszilárdságú betonanyag feszültségcsúcs utáni viselkedésében. Míg a normálszilárdságú betont kis meredekségű leszálló ág jellemzi, addig a nagyszilárdságú beton esetén egy meredek

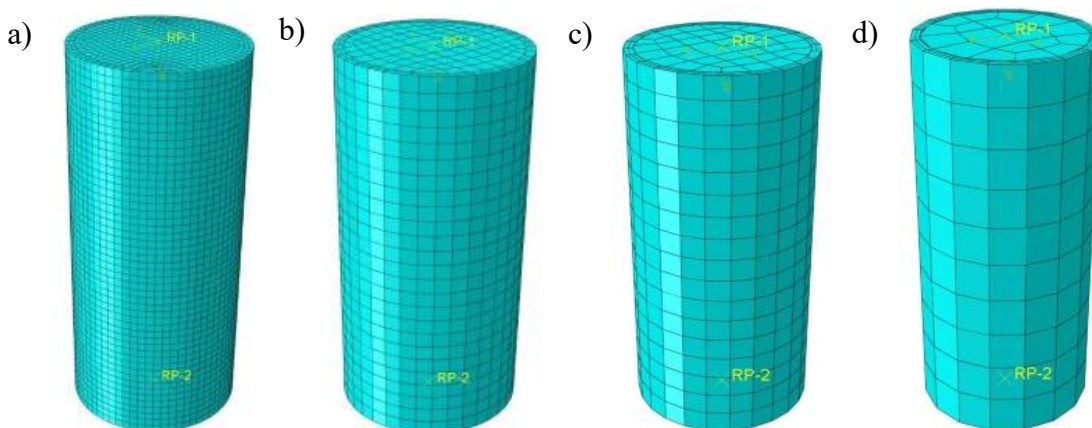
feszültség esés tapasztalható. A merekségek eltérésének elsődleges oka az (52)-es összefüggésben tárgyalt r csökkentő tényező, mely megadja a görbe végpontjának feszültségét a feszültségi csúcsponthoz képest. Az r tényező értéke normálszilárdságú beton anyag ($f_c = 30$ MPa, $f_{c,cube} = 37$ MPa) esetén 0.95, amely kis merekségű leszálló ágat eredményez. Ugyanakkor nagyszilárdságú beton anyag ($f_c = 60$ MPa, $f_{c,cube} = 70$ MPa) esetén értéke 0.741, mely egy nagyobb merekségű leszálló ágat eredményez a terhelési csúcs után.

3.4 Végeselemes háló

A következőkben a dolgozat a végeselemes háló kiemelt fontosságú tulajdonságait és az elvégzett hálózékenységi vizsgálat eredményit mutatja be. A keresztmetszet négy részre tagolását követően megadtam a hálófelosztást az acélcső térfogati elemének vastagsága mentén, mely így falvastagság mentén két végeselemet tartalmaz, tengelyirányában 5 mm-es hálóméretet alkalmaztam. A betonmag tengelyirányában ugyancsak 5 mm-es elemekből áll, keresztmetszeti értelemben azonban átlagosan 10 mm-es végeselemes háló került definiálásra. Az végeselemes hálóval ellátott elem a 46. ábrán látható. A megfelelő végeselemes háló megválasztáshoz hálózékenységi vizsgálatot végeztem tiszta nyomásnak kitett CFST elemen, ötféle hálóméret felhasználásával. Minden esetben igaz, hogy az acélcső és a betonmag azonos tengelyirányú hálófelosztással került a numerikus modellbe. A futtatások után, az eredményként adódó teherbírásokat diagramon ábrázoltam a modell átlagos hálóméretének függvényében. A vizsgált tengelyirányú végeselemes hálófelosztások sorban a következők: a) 5 mm, b) 10 mm, c) 15 mm és d) 25 mm. Az alkalmazott végeselemes hálók az 47. ábrán láthatóak.

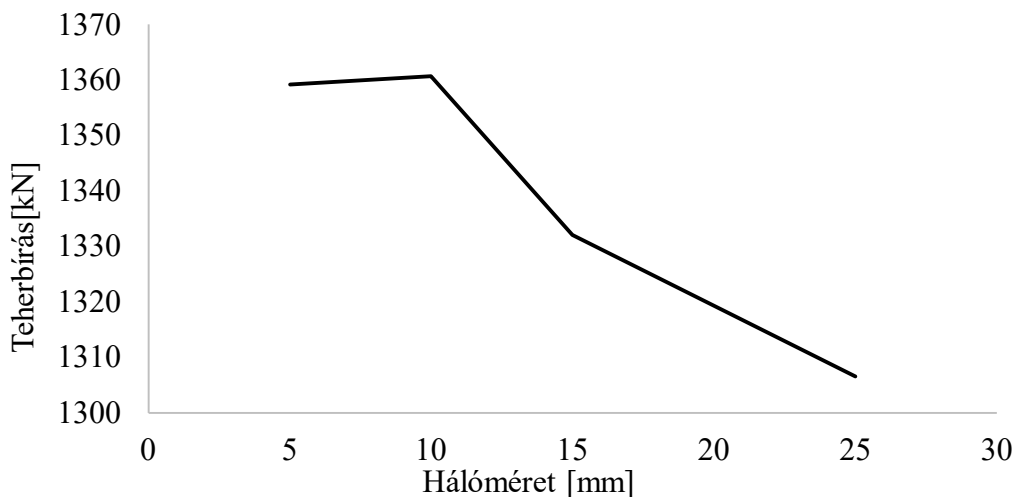


46. ábra –CFST elem végeselemes hálója



47. ábra – Hálózékenységi vizsgálat numerikus modelljei

A hálóérzékenységi vizsgálat végeredménye az 48. ábrán látható. Amíg a *c)* és *d)* jelű modell maximális terheit meredek egyenes köti össze, addig az *a)* és *b)* jelű modell esetén a diagram meredeksége jelentősen lecsökken. A vizsgálat konzekvenciájaként levonható, hogy az *a)* és *b)* jelű modell végeselemes hálója megfelelő a végleges numerikus modellben való felhasználásra. A hálóérzékenységi vizsgálat eredményeiből kiindulva, a modellvalidálás, illetve a paraméteres vizsgálat numerikus modelljében a betonmag és acélső esetén is 5 milliméter az elemméret tengelyirányban, míg keresztmetszeti értelemben a betonmagnál 10 milliméteres halót definiáltam, az acélső vastagsága mentén két végeselem jelenik meg.



48. ábra – Hálóérzékenységi vizsgálat eredményei

3.5 Megtámasztások, terhek modellje

A megtámasztások és terhelések megadása előtt szükséges a CFST elem két végét egy-egy merev testtel összekötni. Ez a megoldás lehetővé teszi, hogy a szükséges megtámasztásokat, illetve a tengelyirányú terhet a végeken közvetlenül egy-egy csomópontra definiáljuk, majd a szoftver ezt a merevségek arányában a végkeresztmetszetre szétossza. Az alsó megtámasztás megakadályozza a végkeresztmetszet keresztirányú eltolódásait, és a keresztmetszet elfordulását minden irányban. Tengelyirányban nem egy végtelenül merev, hanem egy 1000 kN/m rugóállandóval rendelkező rugalmas megtámasztás került definiálásra, mely a valós kísérleti elrendezésre és a terhelőberendezésre jellemző szerkezeti merevséget modellezi. A numerikus modell terhelése a szimulációban elmozdulásvezérelt, melyet a felső végkeresztmetszetben lévő előírt, 60 mm nagyságú tengelyirányú eltolódás biztosít. A megtámasztáshoz hasonlóan az eltolódás is a keresztmetszet középpontjában hat, melyet a már érintett merev végkeresztmetszet oszt szét a teljes elemre.



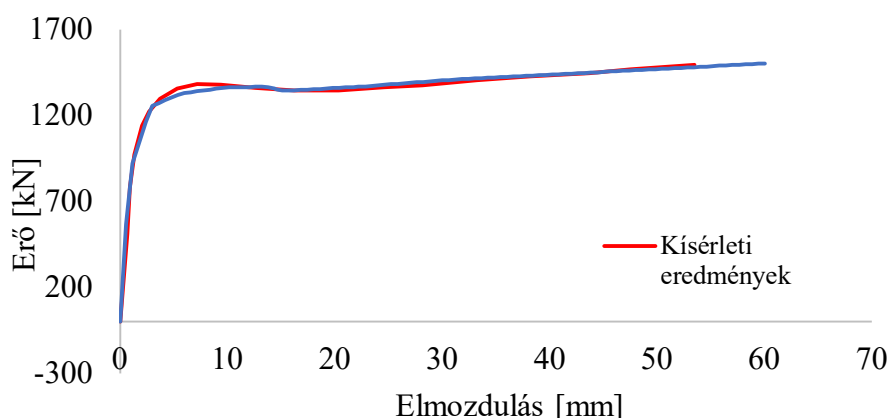
49. ábra – Numerikus modell megtámasztási viszonyai

3.6 Analízis beállításai

A modell nemlineáris analízise figyelembe veszi az anyagi nemlinearitást, valamint a nagy elmozdulások elvét is. A numerikus modell terherlépcsőjének beállítása érinti a maximális számú terherlépcsőt, a terherlépcső növekményének kezdeti, minimális és maximális méret, és a megoldó ('solver') típusát is. A terherlépcsők maximális száma a numerikus szoftver által engedélyezett maximum, 10^8 . A terherlépcső kezdeti és maximális növekménye 0.1, minimális értéke 10^{-5} . A numerikus modell mátrix egyenletrendszerének megoldása 'direct solver' segítségével történik.

4. Numerikus eredmények bemutatása

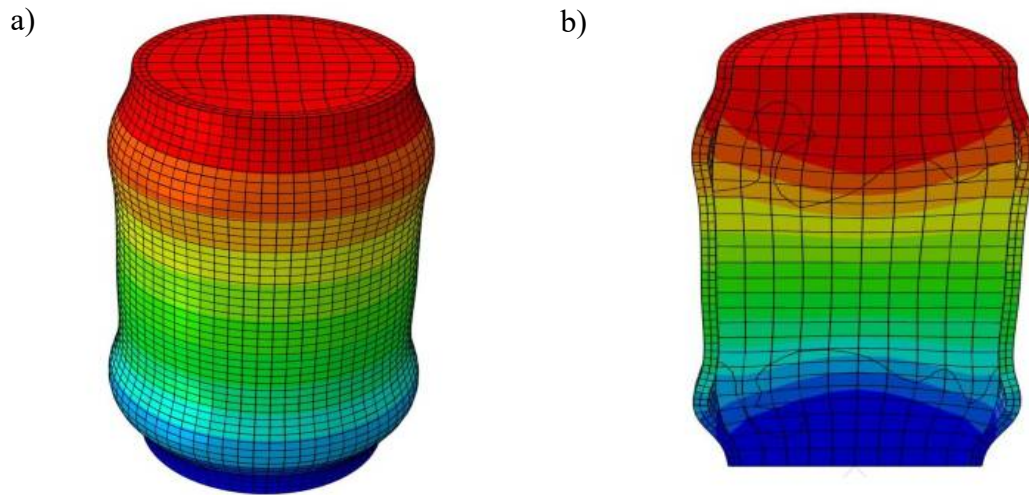
A dolgozat ezen fejezete a bemutatott numerikus modell eredményeit, a tönkremeneteli módokat és az elvégzett paraméteres vizsgálatot tárgyalja. A fejezet első részében a modellezési eljárás validálásához létrehozott numerikus modell (CFST - $f_y 310$ $f_c 60$) eredményeit mutatom be. A modell validációját Abed, AlHamaydeh, Abdalla kutatók kísérletei [16] alapján végeztem el. A dolgozatban bemutatott végeselemes modell tengelyirányú terhelés-összenyomódás diagramját mutatja a 50. ábra, közös diagramban Abed és kollégái által [16] szolgáltatott kísérleti adatokkal. A kutatók által vizsgált központosan nyomott CFST elem geometriai és anyagjellemzői megegyeznek a numerikus modellbe bevitt jellemzőkkel.



50. ábra – Numerikus modell és kísérleti eredmények erő-elmozdulás diagramja - CFST - $f_y 310$ $f_c 60$

A kezdeti merevség a kísérleti görbe esetén 729 kN/mm a numerikus modell esetén 943 kN/mm. A kísérleti görbe rugalmas szakaszt követő terhelési csúcsa 1380 kN, a numerikus modell esetén a terhelési csúcs 1364 kN, amely 1.15%-os hibát jelent. A kísérleti eredményhez tartozó teherbírás 7.17 mm elmozdulásnál, a numerikus modell esetén 12.6 mm-es elmozdulásnál található. A CFST elem teherbírását EN 1993-1-5 szabványnak megfelelően az acélszelvény 5%-os képlékeny alakváltozásához tartozó teherszint szerint értelmeztem. Ezek alapján a kísérleti és a numerikus modell teherbírása 1357 kN és 1360 kN, amely 0.22%-os eltérés.

A numerikus modell által jósolt tönkremeneteli alak látható az 51. ábrán külső nézetben, valamint metszetben. Az 52. ábrán a kísérleti úton vizsgált CFST elemek tönkremeneteli módja látható. A kísérleteknél jellemzően az alsó és felső harmadban megjelent az acélső gyűrűirányú képlékeny horpadása, mely a numerikus modell esetén is kirajzolódik. Egyes próbatestek esetén a kísérleti tönkremeneteli alakokon a szélső gyűrűirányú horpadáson túl, a próbatest közepén is megfigyelhető képlékeny horpadás. Többletinformációt nyújt a végeselemes modell metszete a tönkremenetel jelenségéről, melyen jól látszik, hogy a betonmagtól a horpadás során elválik az acélső. A 49. ábra erő-elmozdulás diagramot, valamint az 50. és 51. ábra tönkremeneteli alakjait szemlélve megállapítható, hogy a bemutatott numerikus modell megfelelő pontossággal képes szimulálni a betonnal kitöltött acélső választ tiszta nyomás hatására.



51. ábra – Numerikus modell tönkremeneteli módja: a) külső nézet és b) metszet



52. ábra –Kísérleti CFST próbatestek tönkremeneteli módja

A tanulmányom célja volt, a validált numerikus modell előállításán túl, a nagyszilárdságú anyagok hatásának vizsgálata CFST elem nyomási teherbírására. A vizsgálat fókuszában az egyes esetek erő-elmozdulás diagramjai, teherbírásuk, és tönkremeneteli alakjuk áll.

Vizsgálom továbbá az egyes szakirodalmi képletek és az Eurocode 4 szabvány viszonyulását, a numerikus modellek által jósolt teherbíráshoz, melyhez a következő számítási módszereket használok fel:

Az öszvértartók elmélete alapján [16], (57)-es számú összefüggéssel:

$$N_{the} = f'_c A_c + f_y A_s \quad (57)$$

AIC (American Concrete Institute) és AS (Australian Standards) tervezési szabvány előírása szerint [16], (58)-as számú összefüggéssel:

$$N_{AIC/AS} = 0.85 f'_c A_c + f_y A_s \quad (58)$$

Giakoumelis and Lam egyenletével [19], (59)-es számú összefüggéssel:

$$N_{Geo} = 1.3 f'_c A_c + f_y A_s \quad (59)$$

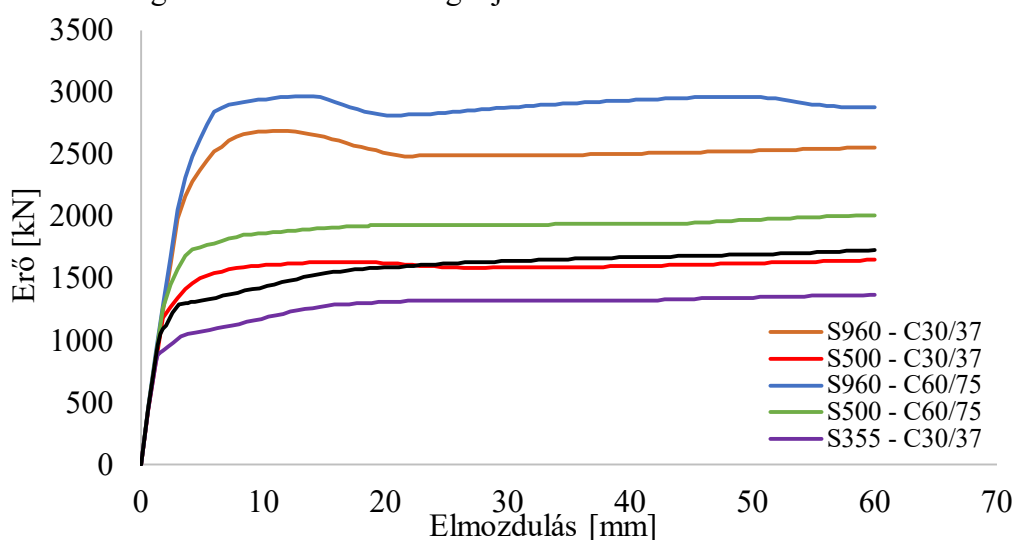
Mander és kollégái által kidolgozott képlettel [20], (60)-as számú összefüggéssel:

$$N_{Man} = f'_{cc} A_c + f_y A_s \quad (60)$$

Eurocode 4 [18] alapján, (61)-es számú összefüggéssel:

$$N_{EC} = \eta_a A_s f_y + \left(1 + \eta_c \frac{t}{D} \frac{f_y}{f_c}\right) A_c f_c \quad (61)$$

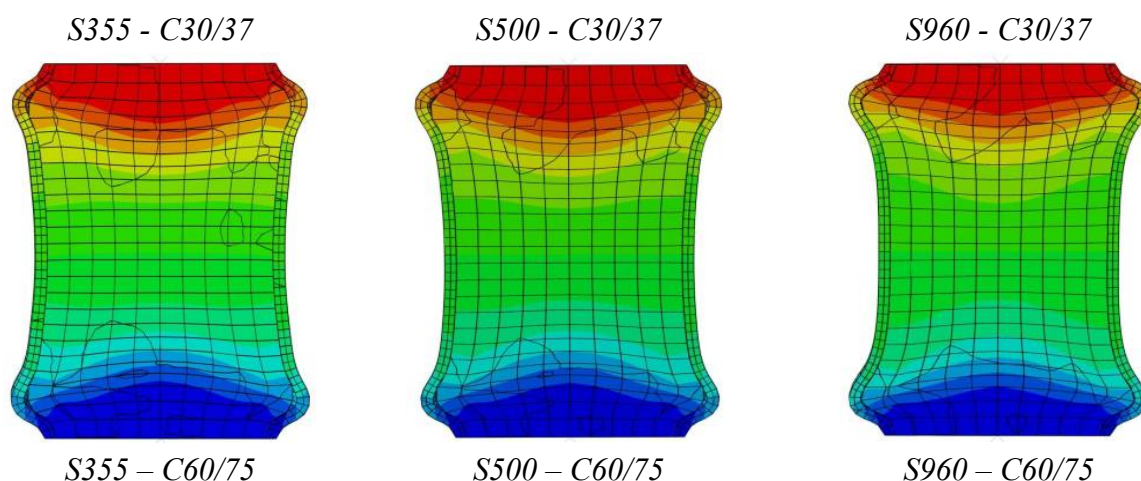
A paraméteres vizsgálat alapját a validált numerikus modell szolgáltatta. A vizsgálat tárgyát képező modellek tulajdonságait a 3. táblázat, a paraméteres vizsgálat eredményeként adódó erő-elmozdulás diagramokat a 53. ábra foglalja össze.

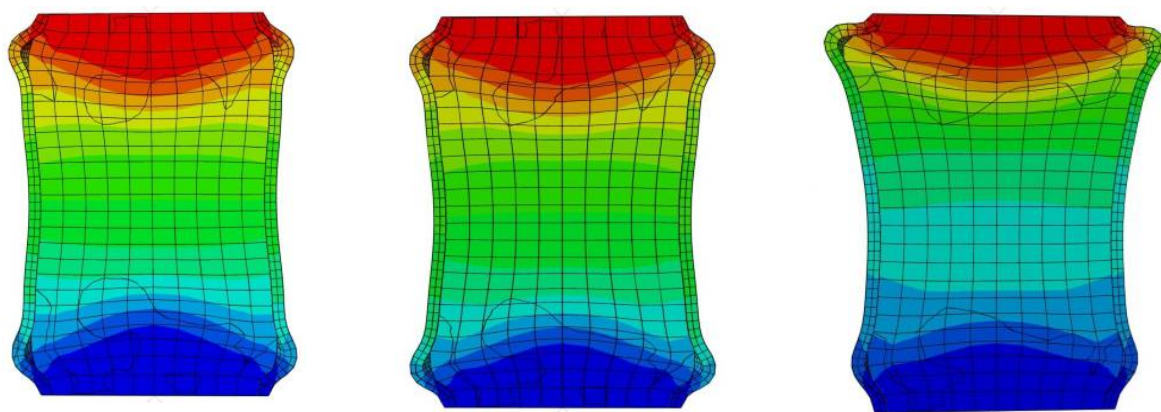


53. ábra – Paraméteres vizsgálat erő-elmozdulás diagramja – acél falvastagság 5.6 mm

A diagramok alapján megállapítható, hogy a betonszilárdság növekedése, valamint a keresztmetszet acél anyagának folyáshatár növelése a CFST elem teherbírását növeli az összes vizsgált esetben. A numerikus modellek tönkremeneteli alakjait az 54. ábra foglalja össze.

A tönkremeneteli alakok nem mutatnak jelentős eltéréseket az egyes anyagjellemzők változtatásával, a leghangsúlyosabb különbség az S960-as szerkezeti acélt és C60/75 szilárdságú beton esetén figyelhető meg. Ebben az esetben hangsúlyosabb lokális horpadási gyűrű alakul ki a CFST elem végének környékén.





54. ábra – Paraméteres vizsgálat tönkremeneteli alakjai – acél szelvény falvastagsága 5.6 mm

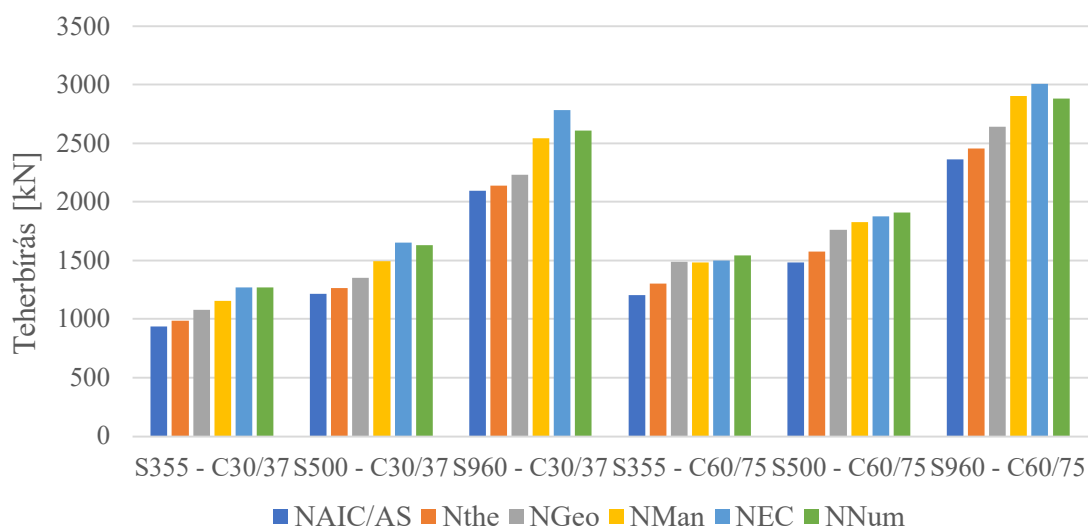
Az egyes szakirodalmi képletekkel és Eurocode 4 ajánlásával számított teherbírásokat, a numerikus modell eredményeivel (N_{Num}) együtt ábrázolja a 4. táblázat minden vizsgált CFST elem esetén. A különböző módon számított teherbírások egymáshoz viszonyított arányait foglalja össze az 55. ábra. A CFST elemek táblázatban szereplő és ábrázolt értékeit EN 1993-1-5 szabványnak megfelelően az 5%-os képlékeny alakváltozáshoz tartozó teherszinttel határoztam meg.

A tárgyalt szakirodalmi képletek közül minden vizsgált esetben a legkisebb pontossággal az AIC/AS ajánlása rendelkeztek. Százalékos eltérésük a numerikus modell eredményeitől 22-35.4%. A legpontosabb szakirodalmi ajánlást, egy kivételtől eltekintve, Mander képlete szolgáltatta. Százalékos eltérésük a numerikus modell eredményeitől 0.8-9.8%. A javasolt képlet egy esetben, S960-as acél és C60/70-es anyagminőségű beton esetén túlbecsüli a numerikus modell által jósolt teherbírását, a hiba 0.8%. Az 55. ábrát szemlélve megállapítható továbbá, hogy az Eurocode 4 módszerével számított teherbírás, normálszilárdságú és nagyszilárdságú beton, valamint S355 és S500 acélminőségek esetén is jó közelítéssel képes megjósolni a teherbírást. Ezekben a kategóriákban a hiba százalékos értéke 0.15% és 2.8% között mozog. Ugyanakkor az S960 jelű nagyszilárdságú acél tartalmazó CFST elemek teherbírásának becslésekor az EC képletével jóval nagyobb különbséget kapunk. Mindkét vizsgált esetben az Eurocode 4 képlete túlbecsüli a teherbírást, a hiba százalékos értéke 4.2-6.2% volt.

4. táblázat – Numerikus modell és szakirodalmi képletek teherbírásai – acél szelvény falvastagsága 5.6 mm

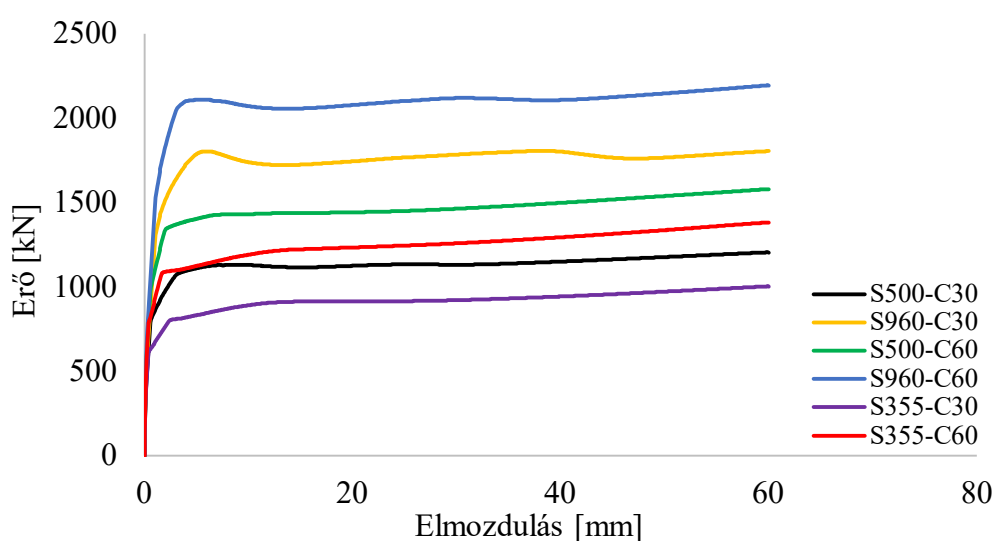
Próbatest jele	$N_{AIC/AS}$ [kN]	N_{the} [kN]	N_{Geo} [kN]	N_{Man} [kN]	N_{EC} [kN]	N_{Num} [kN]
S355 – C30/37	938	984	1076	1156	1268	1270
S500 – C30/37	1215	1261	1353	1494	1650	1630
S960 – C30/37	2092	2138	2230	2543	2782	2610

S355 – C60/75	1206	1300	1486	1481	1498	1540
S500 – C60/75	1483	1576	1763	1827	1877	1910
S960 – C60/75	2360	2453	2640	2905	3005	2880



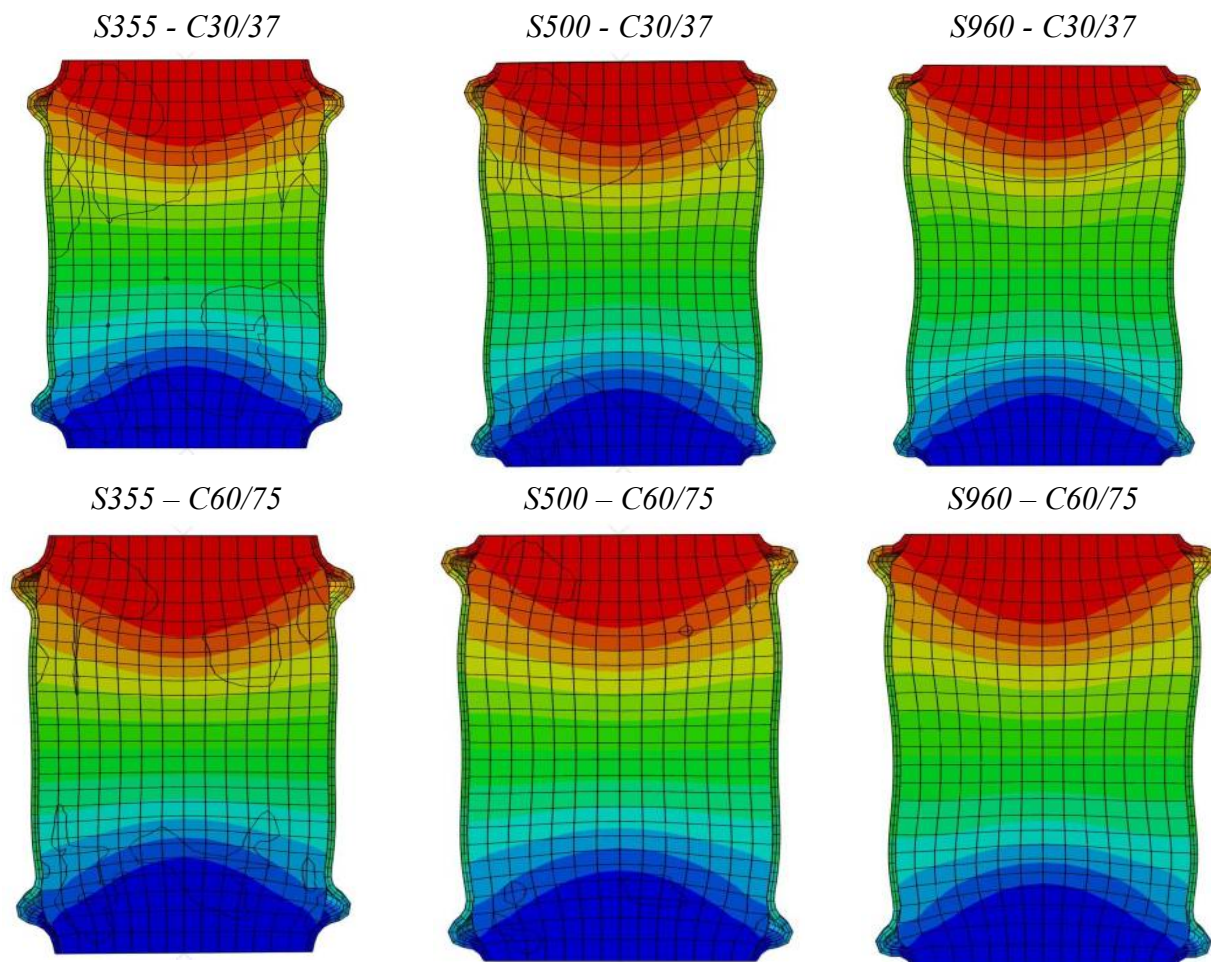
55. ábra – Vizsgálatban résztvevő CFST elemek teherbírásai – acél szelvény falvastagsága 5.6 mm

A paraméteres vizsgálatot elvégeztem egy vékonyabb, más geometriai adatokkal rendelkező CFST elemen is. A modell acél falvastagsága az eddigiektől eltérően 3 mm. A módosított geometriával elvégzett paraméteres vizsgálat esetén szintén erő-elmozdulás diagrammot (56. ábra), tönkremeneteli alakokat összefoglaló ábrát (57. ábra), valamint teherbírást célzó képleteket összefoglaló táblázatot (5. táblázat) és ábrát (58. ábra) készítettem.



56. ábra – Paraméteres vizsgálat erő-elmozdulás diagramja – acél szelvény falvastagsága 3 mm

A vékonyabb falvastagság esetén is tapasztalható a tönkremeneteli alakok esetén az acélső horpadási gyűrűje. Ugyanakkor megjelenik egy kevésbé hangsúlyos újabb gyűrű a tönkremeneteli alakban a belső negyedelőpontok környékén. Kimondható, hogy a vékonyabb acélszelvény hangsúlyosabb elválást okoz a beton magtól, a beton kevésbé követi az acélső deformációját.



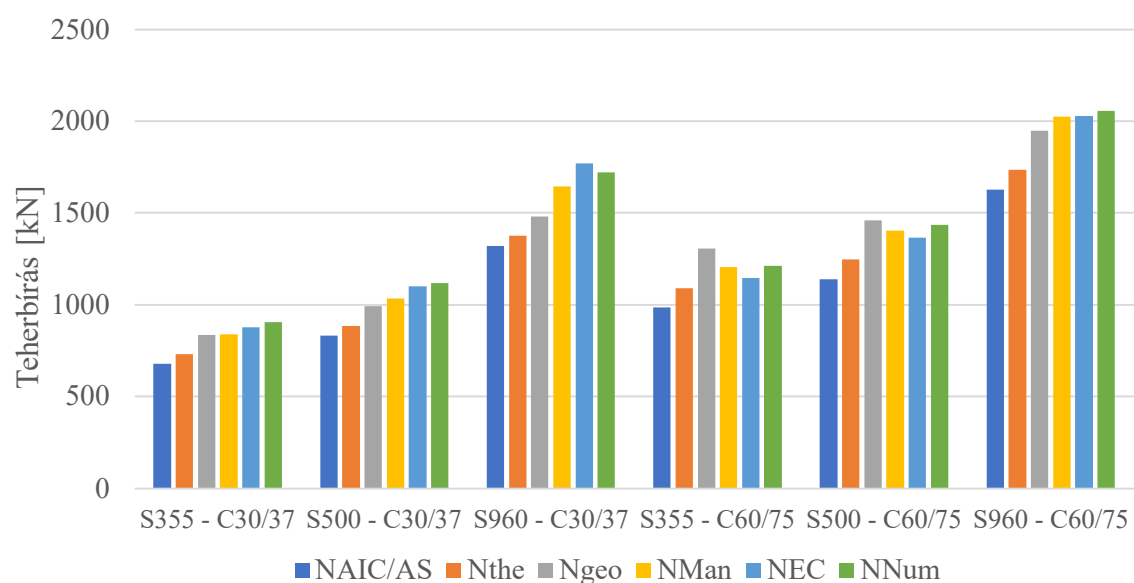
57. ábra – Paraméteres vizsgálat. tönkremeneteli alakjai – acél szelvény falvastagsága 3 mm

A paraméteres vizsgálat első geometriai kialakításánál tett, szakirodalmi képletekkel kapcsolatos megállapítások, többségében vékonyabb falvastagság esetén is teljesülnek. Legkisebb pontossággal ebben az esetben is az AIC/AS képlete rendelkezik. A vizsgált esetek mindegyikében Mander képlete bizonyult a legpontosabbnak a szakirodalmi ajánlások közül, százalékos eltérésük a numerikus modell eredményeitől 0.58-7.93%.

5. táblázat - Numerikus modell és szakirodalmi képletek teherbírásai – acél szelvény falvastagsága 3 mm

Próbatest jele	$N_{AIC/AS}$ [kN]	N_{the} [kN]	N_{Geo} [kN]	N_{Man} [kN]	N_{EC} [kN]	N_{Num} [kN]
S355 – C30/37	677	730	835	839	875	905

S500 – C30/37	831	884	990	1034	1100	1116
S960 – C30/37	1321	1374	1480	1644	1769	1720
S355 - C60/75	984	1091	1305	1204	1144	1211
S500 - C60/75	1138	1245	1459	1402	1365	1434
S960 - C60/75	1628	1735	1949	2025	2029	2054



58. ábra – – Vizsgálatban résztvevő CFST elemek teherbírásai – acél falvastagság 3 mm

Az Eurocode 4 javasolt képletei egy esetben a vékonyabb falvastagság esetén is túlbecsülik a CFST teherbírását, ugyanakkor a hiba mértéke sokkal kisebb, és az említett teherbírás túlbecslését már csak az S960 – C30/37 elem esetében tapasztaltam. Az EC 4 eredményeinek százalékos eltérése a numerikus modell eredményeitől 1.2-5.8%.

5 Konklúziók

A dolgozat szakirodalmi áttekintése többek közt, kitért a CFST elemek változatos megjelenésére, a leggyakrabban megjelenő terhelési típusokra. A tanulmány érintette az egyes terheléstípusokhoz tartozó végeselemes modellezési eljárásokat, melyek egy része megjelenik a dolgozat végeselemes modellezést tárgyaló fejezeteiben. A szakirodalmi áttekintés érinti a különböző terheléseknek kitett CFST elemek teherbírásának számítását, szakirodalmi ajánlások és tervezési szabványok alapján.

A dolgozat bemutatja az általam fejlesztett nemlineáris numerikus modellt, amelyet ABAQUS végeselemes szoftverben dolgoztam ki. Az acél és beton anyagi nemlinearitását is figyelembe vevő modell verifikációja után kísérleti eredmények segítségével validáltam a numerikus modellt, mely kiterjedt a vizsgált elem erő-elmozdulás diagramjára, az elem teherbírására, és a tönkremeneteli alakra. A validált numerikus modellt paraméteres vizsgálatok elvégzésére használtam fel, amely a CFST elem különböző szilárdságú acél és beton anyagának hatására, ezen eltérő szilárdságok kombinálására fókuszált. A paraméteres vizsgálat középpontjában a teherbírás és tönkremeneteli alak állt. Ez egyes numerikus teherbírásokat szakirodalmi képletek és az Eurocode 4 ajánlásainak számítási képleteivel hasonlítottam össze. A szakirodalmi ajánlások és a numerikus modellek eredményei alapján kimondható, hogy a szakirodalmi képletek többsége konzervatív becslést ad a CFST elem teherbírására. Kivételt képez ez alól Mander képlete. A Mander által javasolt képlet kisebb acél falvastagság esetén minden vizsgált szilárdsági csoportban 8% alatti hibával tudta megbecsülni a teherbírást, a teherbírás túlbecsülése nélkül, ugyanakkor nagyobb acél falvastagság esetén, S960-as szerkezeti acél és C60/75-ös beton anyag esetén azonban túlbecsülte a teherbírást. Az Eurocode 4 által javasolt egyszerűsített módszer nagyobb falvastagság esetén is túlbecsülte a CFST teherbírását (S500 – C30/37, S960 – C30/37, S960 - C60/75). A kisebb acél falvastagság esetén az Eurocode már csupán egy esetben becsülte túl a teherbírást, az S960-as nagyszilárdságú acél tartalmazó CFST elem esetén (S960 – C30/37).

A dolgozat megfelelő alapja lehet olyan jövőbeli kutatásoknak, melyek a szakirodalmi áttekintésben érintett tiszta hajlítással, valamint nyomaték-normálerő interakcióval történő valós kísérleti és numerikus modellezési feladatokkal kívánnak foglalkozni. A CFST elemek alkalmazásának terjedésével a tervezőknek szükséges a teherbírasi viselkedés megfelelő megismerése az említett igénybevételekre, a szűkös szakirodalmi és szabványi háttér mellett is.