

Bükkösi Raymond¹, Papp Ferenc², Merczel Dániel³

A SZABAD FORMÁJÚ ACÉLSZERKEZETI TÉRLEFEDÉSEK ROBUSZTUSSÁG VIZSGÁLATA ÉS DÖNTÉSTÁMOGATÓ OPCIÓS MÁTRIXA

(ON THE ROBUSTNESS OF FREEFORM TRIANGULATED STEEL DOMES WITH OPTIONS ANALYSIS)

A cikk a szabadformájú acél tartószerkezeti térlefedések robusztusság vizsgálatával foglalkozik. A vizsgálatot ma még szűk körben alkalmazzák. A vizsgálat alapelveit már lefektették, de a ténylegesen vizsgált szerkezeti rendszer esetén figyelemmel kell lenni az adott szerkezetre elvégzett kockázatelemzés eredményeire. A cikkben egy lehetséges vizsgálati módszer kerül bemutatásra, ami releváns képet ad a tartószerkezet várható viselkedéséről roncsolás hatására. A vizsgálat számítási eredményeihez használt módszerek a következők voltak: végeselemes, véges héjelemes és véges test elemes numerikus modellek. Ezen eredményeket felhasználva lehet döntést hozni a robusztusság vizsgálat módjára vonatkozóan. Cél, hogy a vizsgálatok megbízható képet adjanak a tartószerkezet várható viselkedéséről, szándékos károkozás, nem várt baleseti esemény bekövetkezésénél, illetve a szerkezet élettartama alatt szükséges karbantartási munkálatok tekintetében. A döntéstámogató opciós mátrix a sok szempontot felölelő és szabadon alakítható értékelési és döntést támogató módszer lényegi része. A cikk egy ilyen döntéstámogató mátrix gyakorlati alkalmazhatóságát is bemutatja.

Kulcsszavak: szabadformájú acélszerkezeti térlefedés, progresszív tönkremenetel, robusztusság, döntéstámogató

The article focuses on the robustness analysis of freeform steel gridshell domes. This type of study does not have a widespread application. Although the principles of the analysis are well established, the practical application to a specific structural design project needs to rely on the risk assessment carried out for the project. In the article a possible method of analysis is presented that gives an insight into the behaviour of the damaged structure. The methods adopted for the study were beam, shell and solid-element finite element analysis. The results of the above investigations determine the need and method of the robustness analysis. The objective of the analysis is to obtain a comprehensive understanding of the expected behaviour of the structure in terms of effects such as vandalism, accidental effects and maintenance. The options matrix, resulted by the risk assessment, is an adaptable and fundamental tool used in the decision making process. The article presents the practical application of such a matrix.

Keywords: freeform steel roof, progressive collapse, robustness, decision making support

¹ Bükkösi Raymond: Széchenyi István Egyetem, Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola, PhD. hallgató, E-mail: raymond.bukkosi@arcs.hu ORCID: 0000-0001-5359-4074

² Dr. Habil Papp Ferenc: Széchenyi István Egyetem, Szerkezetépítési és Geotechnikai Tanszék, egyetemi tanár, tanszékvezető E-mail cím: papp.ferenc@sze.hu ORCID: 0000-0001-5862-9651

³ Dr. Merczel Dániel PhD: Arup Fejlett Technológiák és Kutatás csoport London, Egyesült Királyság, kutatómérnök, E-mail cím: daniel.merczel@arcs.hu ORCID: 0000-0002-0770-759X

BEVEZETÉS

A szabadon formált („free form”) acélszerkezeti építészet egyre szélesebb körben kezd terjedni világszerte, beleértve hazánkat is. A térforma szabad tervezésének sokáig korlátot szabtak az egyes tervezési módszerek és az azokat alkalmazó tervező programok. A tervező szoftverek az elmúlt évtizedben jelentős fejlődésen mentek át. A folyamatos fejlesztésnek köszönhetően a szerkezeti modellek tervezési paramétereinek variálhatósági intervallumai egyre bővülnek. A szakirodalom egyik kiemelt témája a térforma parametrikus modelljének létrehozása, ami biztosítja az automatizált formagenerálást. Az ilyen típusú formagenerálás komplexen képes kezelni a „free form” építészetben leggyakoribb héjszerkezeti alakokat, és azon túlmenően a teljes szerkezeti struktúrát. A héjszerkezetet alkotó hálózati topológia fontos szerepet játszik a szerkezet erőjátékának alakulásában, és az azt alkotó csomóponti kialakítások meghatározásában is [4], [5], [6], [8].

A szabad formájú térlefedések variálhatóságuk, kis helyigényük és gyors kivitelezhetőségük végett ideális megoldást jelentenek a kihelyezett támaszpontok létesítésénél, illetve a felderítést végző radar állomások fejegységeinek építésénél. A szerkezeti rendszerek kis fajlagos tömegük és standardizált voltuk miatt ideálisan és gyorsan szállíthatók és kézi erővel telepíthetők.

A szabad forma megalkotása mellett kiemelt szerepe van a csomópontok kialakításának, gazdaságos gyári megvalósíthatóságának is. Egy átlagos szabad formájú acélszerkezetben nem ritka, hogy ezernél is több, egymástól kisebb-nagyobb mértékben eltérő csomópontot kell kialakítani. Sok tanulmány foglalkozik a szerkezetek optimalizálásának kérdéskörével. A létrehozott módszerek az optimális szerkezeti rendszer automatikus felvételére törekszenek, minél több szerkezeti paraméter figyelembevételével. A paraméterek köre kiterjed az anyagfelhasználás minimalizálására, illetve a szilárdsági kihasználtság maximalizálására, de a használhatósági kritériumokra is. A módszerek használata és továbbfejlesztése megkönnyíti és felgyorsítja a bonyolult „free form” szerkezetek rendeltetésszerű működését biztosító számítások végrehajtását, de sok esetben nem veszik figyelembe a megvalósíthatóság és gyárthatóság kérdését. Az utóbbi szempontokat érvényre juttató paraméterek beépítése az alkalmazott módszerekbe további kutatást és fejlesztést igényel [4], [7], [8].

Az előbbi szempontokon túlmenően fontos szempont a szerkezet optimális alakjának és hálózatának megválasztásánál a szerkezet robusztussága is [1], [2], [3], [9].

A TARTÓSZERKEZETEK ROBUSZTUSSÁG VIZSGÁLATA

A tartószervezetek robusztusságának vizsgálata a szándékos károkozásnak és a baleseti haváriának a szerkezetre gyakorolt hatását vizsgálja. Ide tartozik még a szerkezet élettartama során elvégzett fenntartási, javítási tevékenységek lokális hatásának a globális viselkedésre gyakorolt hatásai is. A robusztusság vizsgálat az alábbi kérdésekre ad választ [1], [2], [3], [9]:

- Hogyan viselkedik a szerkezet szándékos károkozás, baleseti havária bekövetkezés esetén?
- Hogyan alakul a szerkezet tönkremenetele a nem kívánt hatásokra?

- Mennyire érzékeny a szerkezet egy adott tönkremeneteli módra?
- Milyen alternatív statikai teherviselési képessége (redundanciája) van a szerkezetnek?
- Mekkora és milyen a lokális tönkremenetel hatása a globális szerkezetre?

A robusztusság vizsgálat módszerei a szabadon formált („free form”) szerkezetek esetében.

A „free form” szerkezetek azon körét vizsgáljuk, amelyek egyhéjú rúdszerkezeti modellel írhatóak le. Alapvetően két módszert különböztetünk meg:

- A szerkezet egyes rúdjaait és/vagy csomópontjait véletlenszerű kijelölés (véletlen szám generálással) egyesével, vagy valószínűségi alapon csoportosan, eltávolítjuk. Az így eltávolított elemek, vagy szerkezeti részek már nem vesznek részt a teherviselésben. A modelleken elvégzett analízist kiértékeljük, és összehasonlítjuk a roncsolásmentes szerkezeten végzett analízis eredményeivel. A szerkezet „robusztussági érzékenységet” az összehasonlítás alapján állapítjuk meg.
- Az eredeti szerkezeti modell analízisét követően a szerkezet legérzékenyebb pontjain eltávolítjuk az egyes szerkezeti elemeket, vagy szerkezeti részeket. Az így előállt roncsolásos modelleken elvégezzük az analízist, majd az összehasonlító elemzést [2]. A módszer az előbbi általános módszer szűkített változata.

A kiértékelés és összehasonlítási paraméterei

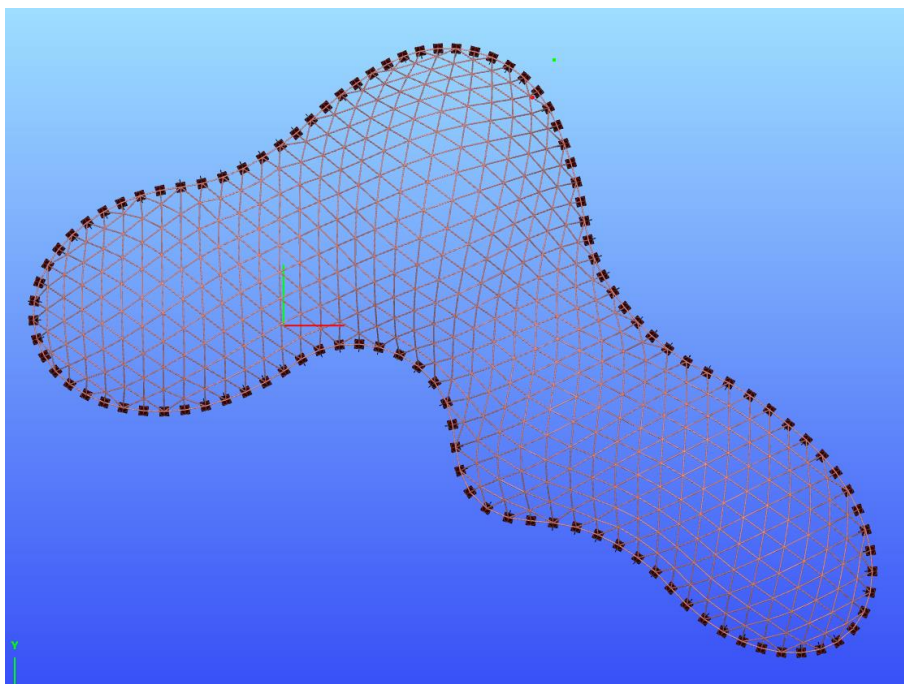
A szerkezeti modell analízisének kiértékelését a rudak *kihasználtsága*, a bennük felhalmozott *alakváltozási energia* és a releváns *kritikus teherszorzó*, illetve relatív vagy abszolút *elmozdulások* vizsgálatával célszerű elvégezni [1]. A felsorolt paramétereken felül több paramétert is fel lehet venni, de azok már alacsonyabb reprezentatív indexszel fognak rendelkezni. Az állítás a cikk keretein belül bemutatott „free form” típusú szerkezeti rendszerre vonatkozik. Az így kapott kiértékelési módszert célszerű hozzárendelni az előbbieken említett optimálási módszerekhez, és a különböző módon meghatározott szerkezeti paramétereket egy döntés támogató opciós mátrixba célszerű elrendezni. A mátrix segítségével dönthető el az optimális szerkezeti kialakítás. Ezzel előáll egy döntés-támogató módszer, amely magas megbízhatósági indexszel rendelkezik.

EGY „FREE FORM” SZERKEZET ROBUSZTUSSÁG VIZSGÁLATA

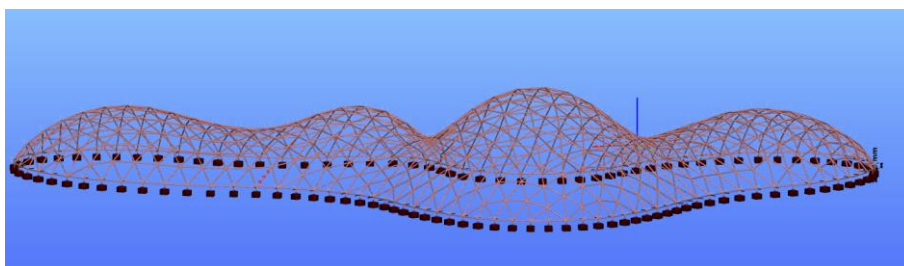
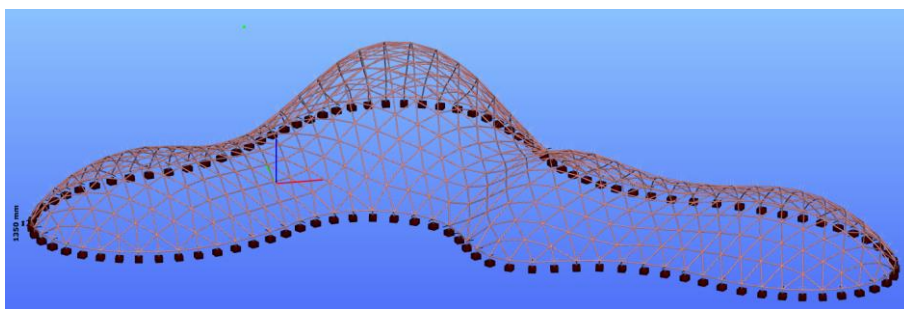
A cikkben vizsgált szerkezeti térlefedés egy általános alaprajzi elrendezésű, kétszer görbült és egyrétegű héjszerkezet, amely tartalmaz négy magas pontot („kupola” részt) és három mélypontot („vápa” részt). A szerkezet legnagyobb magassága 36 méter, legnagyobb fesztávolsága 190 méter.

Az adott méretekkel két különböző hálózati rendszerű tartószerkezetet vizsgálunk. A két kialakítás több iterációs folyamaton keresztül nyerte el a végleges szerkezeti rendszerét. Ezen iterációs folyamatok bemutatása nem képezi a cikk témáját [4], [7], [8].

Az „A” jelű szerkezeti kialakítást (háromszöges struktúra) az **1-2. ábrák**,

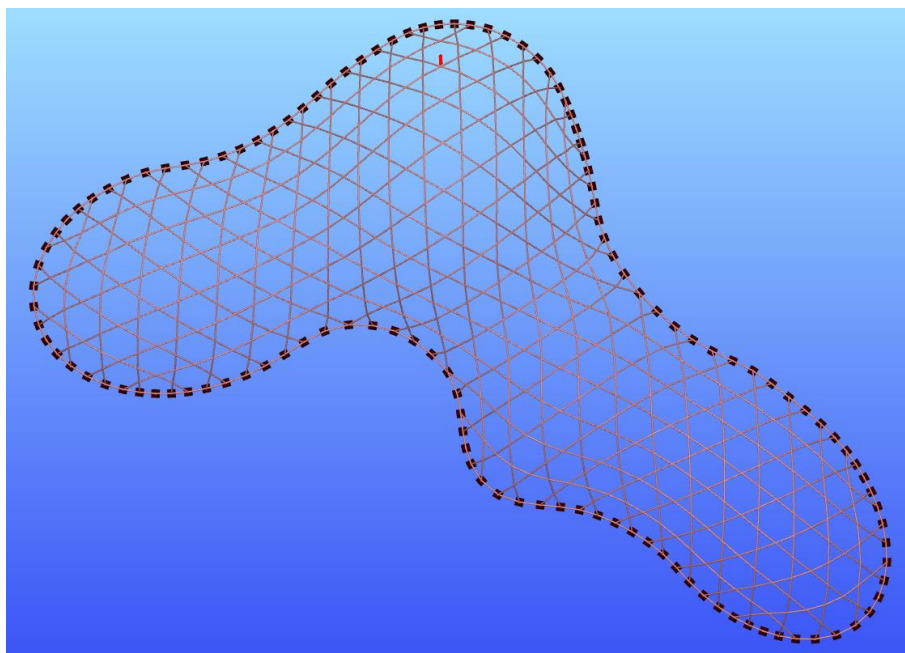


1. ábra: Az "A" jelű szerkezeti topológia, felülnézete.
Forrás: a szerző 1, Készítette: a szerző 1



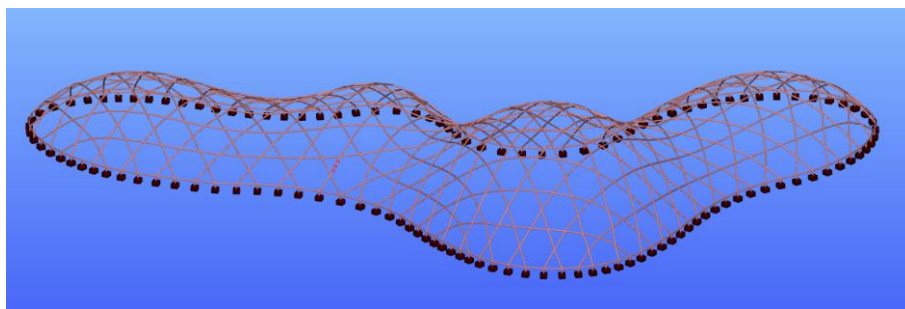
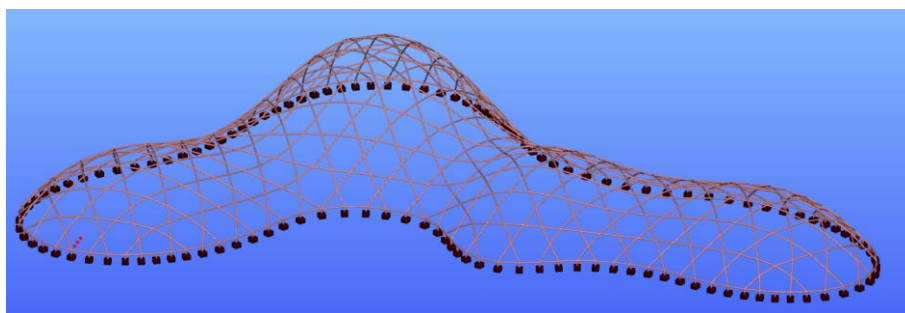
2. ábra: Az "A" jelű szerkezeti topológia izometria nézetei.
Forrás: a szerző 1, Készítette: a szerző 1

a „B” jelű kialakítást (három-hatszöges struktúra) a **3-4. ábrák** mutatják.



3. ábra: A "B" jelű szerkezeti topológia felülnézete.

Forrás: a szerző 1, Készítette: a szerző 1



4. ábra: Az "B" jelű szerkezeti topológia izometria nézetei.

Forrás: a szerző 1, Készítette: a szerző 1

A szerkezet robusztusság vizsgálatának és eredményeinek bemutatása

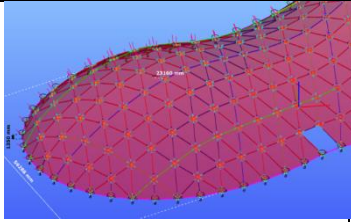
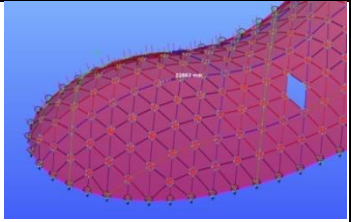
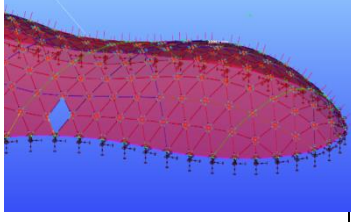
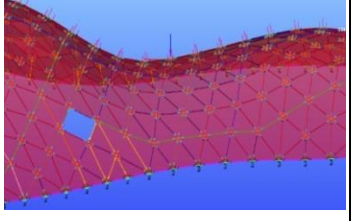
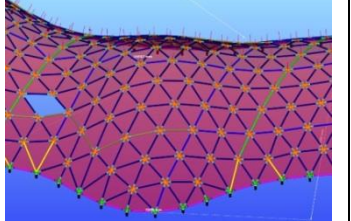
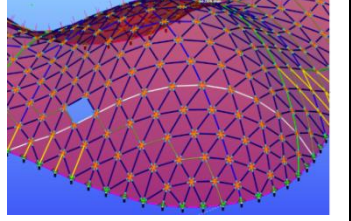
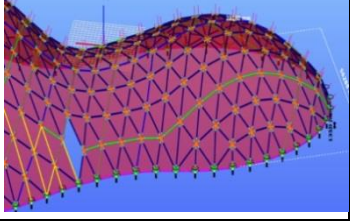
Jelen cikkben az egyszerűsített robusztusság vizsgálatot alkalmazzuk. A két szerkezeti kialakítás összehasonlíthatóságát szem előtt tartva, a robusztussági vizsgálat során azonos területekről, a szerkezet *érzékeny* helyeiről kerültek eltávolításra az egyes elemek és a szerkezeti csomópontok. A helyeket a szerkezeti elemek *szilárdsági* és *stabilitásvesztési*

kihasználtsága határozta meg. A kihasználtságon túlmenően figyelembe vettük a *rugalmas belső energia* eloszlását is.

Az „A” jelű szerkezeti kialakítás vizsgálata

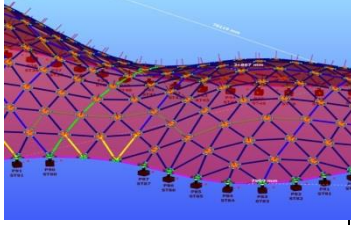
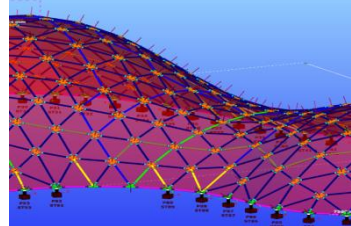
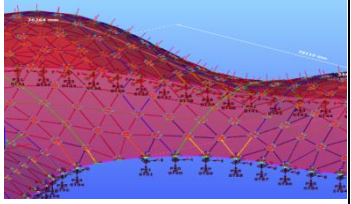
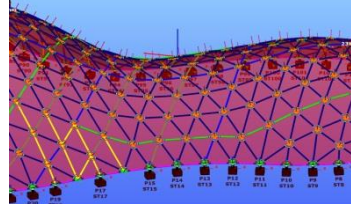
Az érzékeny helyek vizsgálata alapján az eltávolításra kiválasztott rudakat és az így előállított roncsolt szerkezeti modelleket az **1. táblázat** mutatja. A **2. táblázat** az eltávolított támaszokat, míg a **3. táblázat** az eltávolított csomópontokat és rudakat szemlélteti.

Rudak eltávolítása:

kiválasztott rúd jele	roncsolt szerkezeti modell	kiválasztott rúd jele	roncsolt szerkezeti modell
R1		R2	
R3		R4	
R5		R6	
R7			

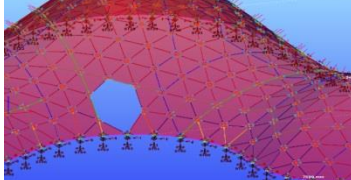
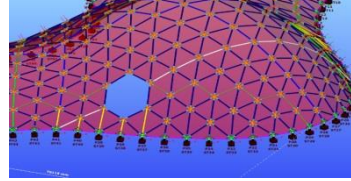
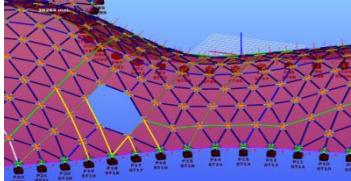
1. Táblázat: Rudak eltávolítása, Forrás: a szerző 1, Készítette: a szerző 1

Támaszok eltávolítása:

kiválasztott támasz jele	roncsolt szerkezeti modell	kiválasztott támasz jele	roncsolt szerkezeti modell
T1		T2	
T3		T4	

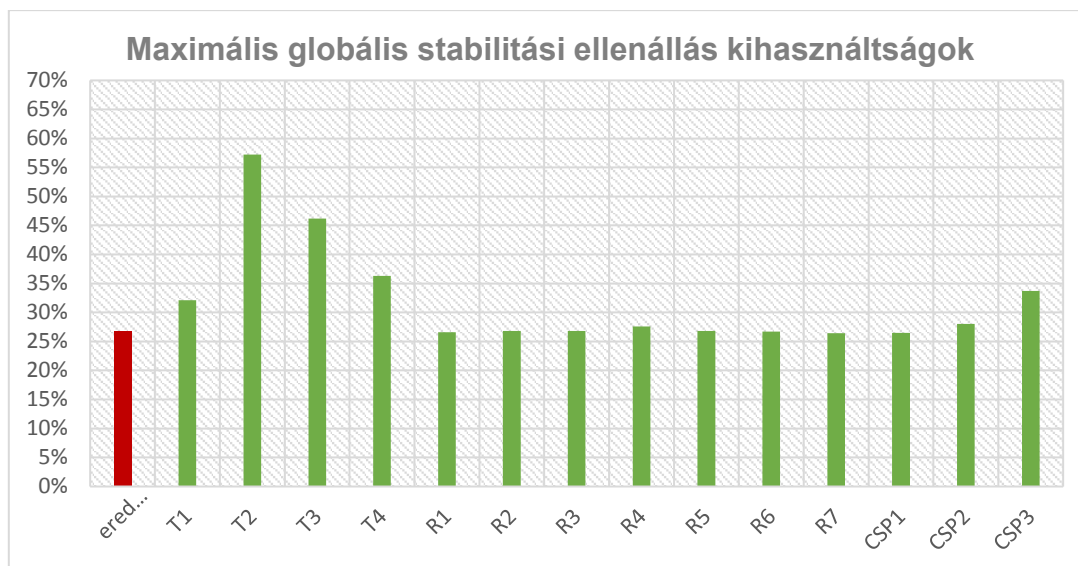
**2. Táblázat: Támaszok eltávolítása,
Forrás: a szerző 1, Készítette: a szerző 1**

Csomópontok és kapcsolódó rudak eltávolítása:

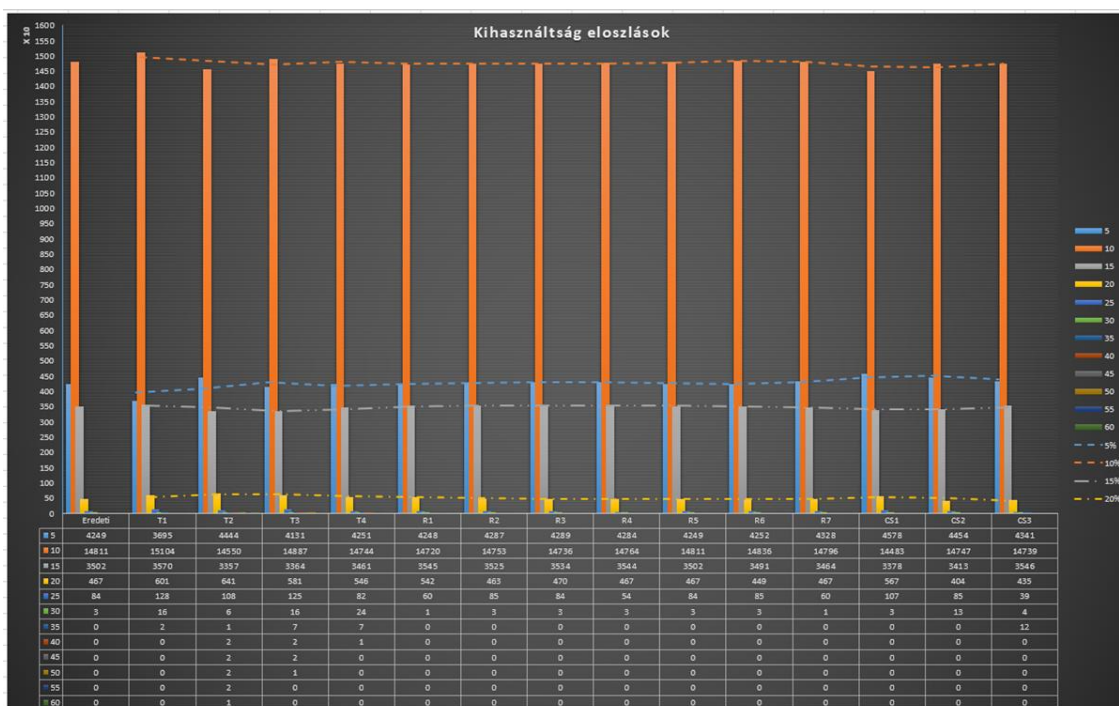
kiválasztott cs.p. jele	roncsolt szerkezeti modell	kiválasztott cs.p. jele	roncsolt szerkezeti modell
CSP1		CSP2	
CSP3			

**3. Táblázat: Csomópontok és kapcsolódó rudak eltávolítása,
Forrás: a szerző 1, Készítette: a szerző 1**

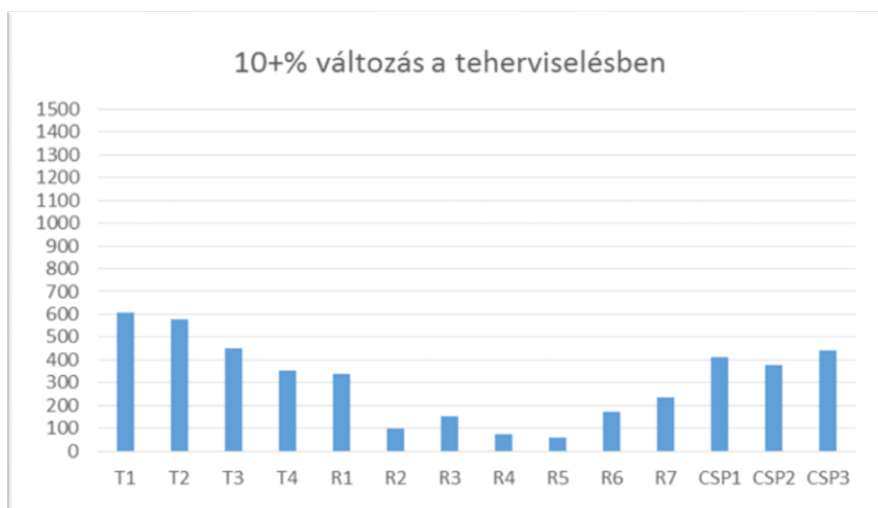
Az 1-3. táblázatokban szemléltetett roncsolt modelleken elvégeztük a szerkezeti analízist és a globális stabilitási ellenállás kihasználtságok számítását az MSZ EN 1993-1-1 szabvány szerint. A mértékadó maximum globális stabilitási ellenállás kihasználtságokat az **5. ábra** mutatja. Megfigyelhető, hogy az eredeti károsodásmentes szerkezet kihasználtsága a megfelelő rudak, támaszok és csomópontok eltávolítása után nem változik jelentősen. (Az eredeti kialakítás alacsony kihasználtsága a rendkívüli tervezési helyzet következménye). Említésre méltó kihasználtság növekményt csak az egyes támaszok megszüntetése okozott, azonban tönkremenetel ezen esetekben sem következik be. A **6. ábra** a globális stabilitási ellenállás kihasználtságok eloszlását mutatja. Az ábra megmutatja a kihasználtság tartományokba eső végeelem számok változását az egyes roncsolásos esetekben a roncsolás mentes szerkezethez képest.



5. ábra: Az „A” jelű szerkezeti kialakítás maximális globális stabilitási ellenállás kihasználtságai. Forrás: a szerző 1, Készítette: a szerző 1

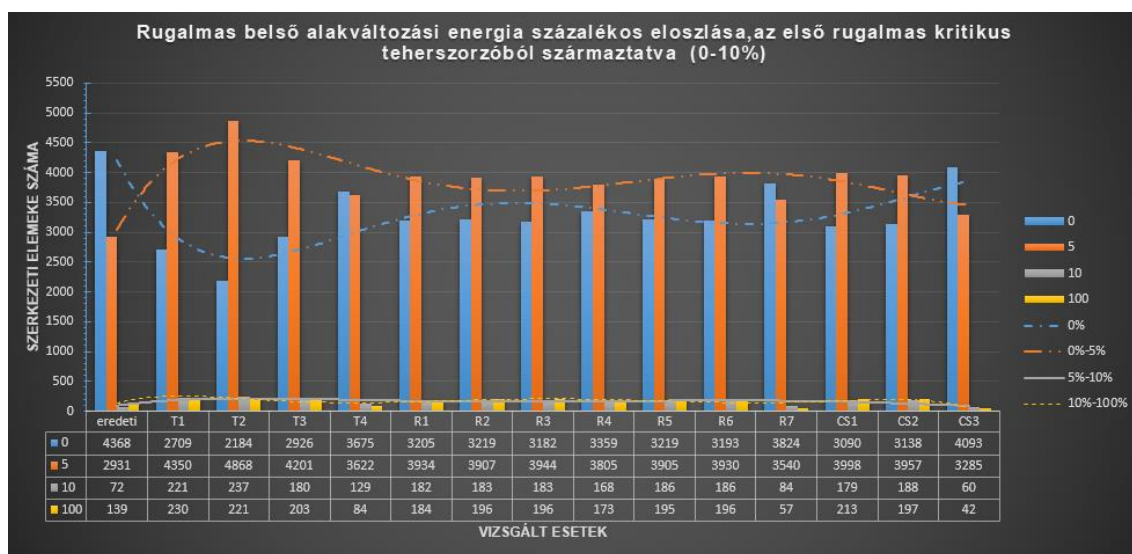


6. ábra: "A" jelű szerkezet globális stabilitási ellenállás kihasználtságának eloszlása. Forrás: a szerző 1, Készítette: a szerző 1



7. ábra: Az „A” jelű szerkezet belső rugalmas alakváltozási energia változása roncsolás hatására. Forrás: a szerző 3. Készítette: a szerző 3

Az igénybevételek változása a roncsolás következtében nem azonos mértékben befolyásolja a kihasználtságot, ezért a kihasználtság nem ad teljes mértékben reális képet a teherviselés átrendeződésének mértékéről. A **7. ábra** azon rudak számát mutatja, melyekben a belső rugalmas alakváltozási energia több (mértékadó teherkombinációból származtatott), mint 10%-ot változik a károsodásmentes állapothoz képest. A diagramon a vertikális tengely jelöli a rudak számát (maximum 1502 db), így az oszlopok hivatottak reprezentálni a 10%-os hatás teljes szerkezethez viszonyított kiterjedését. Látható, hogy egyes esetekben több, mint a szerkezet egyharmada jelentősen, 10%-nál nagyobb kiterjedésben érintett a teherviselés átrendeződésében. Legkevésbé az egyes rudak eltávolítása zavarja meg az eredeti erőjátékot, bár ezen esetekben is több rúd érintett. Itt meg kell jegyezni, hogy az eltávolított rudak és csomópontok többnyire perem közeliek. A **8. ábra** a vizsgált szerkezeti modellek első rugalmas kritikus tehereszorójából származtatott belső rugalmas alakváltozási energia százalékos elosztását mutatja (azonos teherkombináció alatt vizsgálva), oly módon, hogy a mértékadó sajátértékhez tartozó kritikus alaknál a „legérzékenyebb” szerkezeti elem belső alakváltozási energiájával (mint kritikus alakhoz tartozó maximális belső alakváltozási energia) normálja a többi szerkezeti elem belső alakváltozási energiáját („MRF”= Member Relevance Factor) [10]. Az ordinátán a szerkezeti elemek száma látható, míg az abszcisszán a vizsgált esetek azonosítója és a százalékos részesedés számszerűsítése. Jól megfigyelhető, hogy a roncsolásmentes állapothoz képest a roncsolt állapotoknál az első rugalmas kritikus tehereszoróhoz tartozó belső rugalmas alakváltozási energia eloszlások százalékos elem részesedése átrendeződött, tehát több szerkezeti elem magasabb belső rugalmas alakváltozási energiával rendelkezik a viszonyítási maximális kritikus belső alakváltozási energiájú elemhez képest. A fentebb bemutatott két vizsgálati módszer jól leírja a szerkezet viselkedését teherbírási és stabilitás veszteségi oldalról.



8. ábra: Az „A” jelű szerkezeti kialakítás rugalmas belső alakváltozási energia eloszlása, az első kritikus teherszorzból származtatva. Forrás: a szerző 1, Készítette: a szerző 1

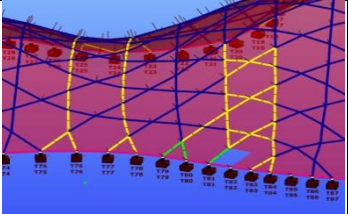
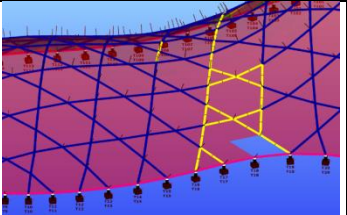
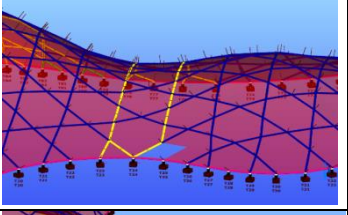
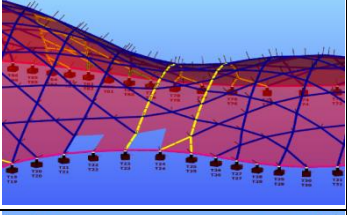
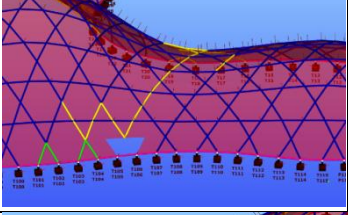
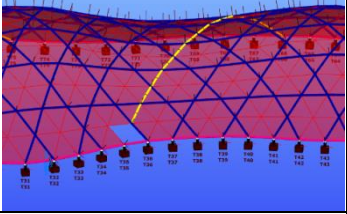
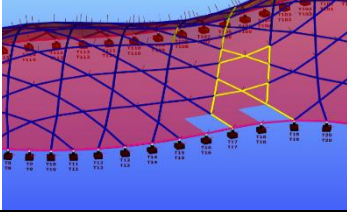
A fentiek alapján megállapítható, hogy a szerkezet nagyfokú teherbírási tartalékkal rendelkezik a rendkívüli és lokalizált károk bekövetkezésével szemben. A tartószerkezet magasfokú redundáns viselkedést mutat, aminek köszönhetően a teherviselési útnak nagyszámú alternatívája van az elsődleges károsodásmentes útvonal megszűnése esetén. Ez az oka annak, hogy lokalizált szerkezeti károk kiterjedése hatékonyan gátolt, további tönkremenetek nem következnek be.

A szerkezeti pontok elmozdulásának vizsgálata megerősítette a magas fokú redundáns viselkedést, valamint visszaigazolta, hogy a lokális hatásoknak nincs jelentős globális hatása.

A „B” jelű szerkezeti kialakítás vizsgálata

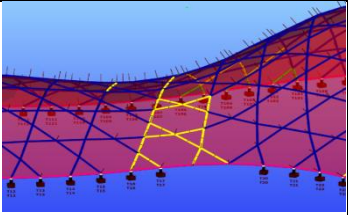
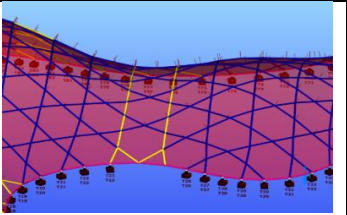
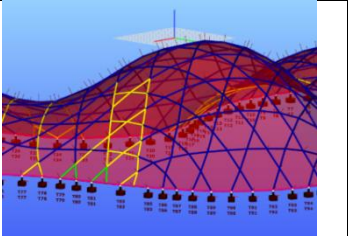
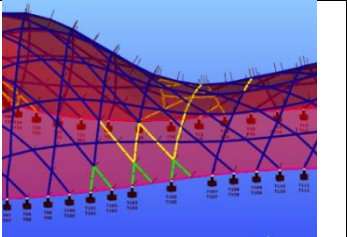
Az érzékeny helyek vizsgálata alapján az eltávolításra kiválasztott rudakat és az így előállított roncsolt szerkezeti modelleket az **4. táblázat** mutatja. A **5. táblázat** az eltávolított támaszokat, míg a **6. táblázat** az eltávolított csomópontokat és rudakat szemlélteti.

Rudak eltávolítása:

kiválasztott rúd jele	roncsolt szerkezeti modell	kiválasztott rúd jele	roncsolt szerkezeti modell
R1		R2	
R3		R4	
R5		R6	
R7			

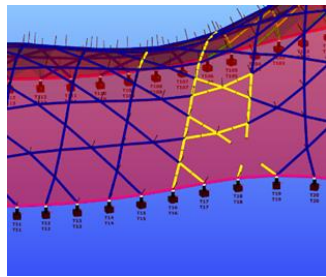
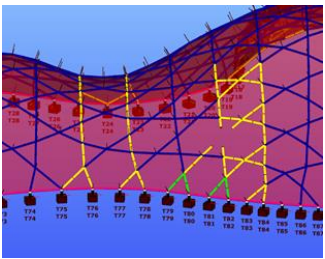
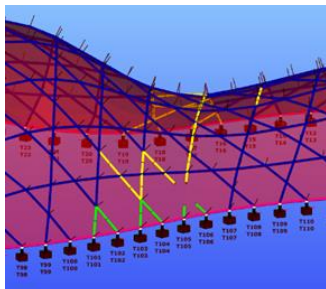
4. Táblázat: Rudak eltávolítása, Forrás: a szerző 1, Készítette: a szerző 1

Támaszok eltávolítása:

kiválasztott támasz jele	roncsolt szerkezeti modell	kiválasztott támasz jele	roncsolt szerkezeti modell
T1		T2	
T3		T4	

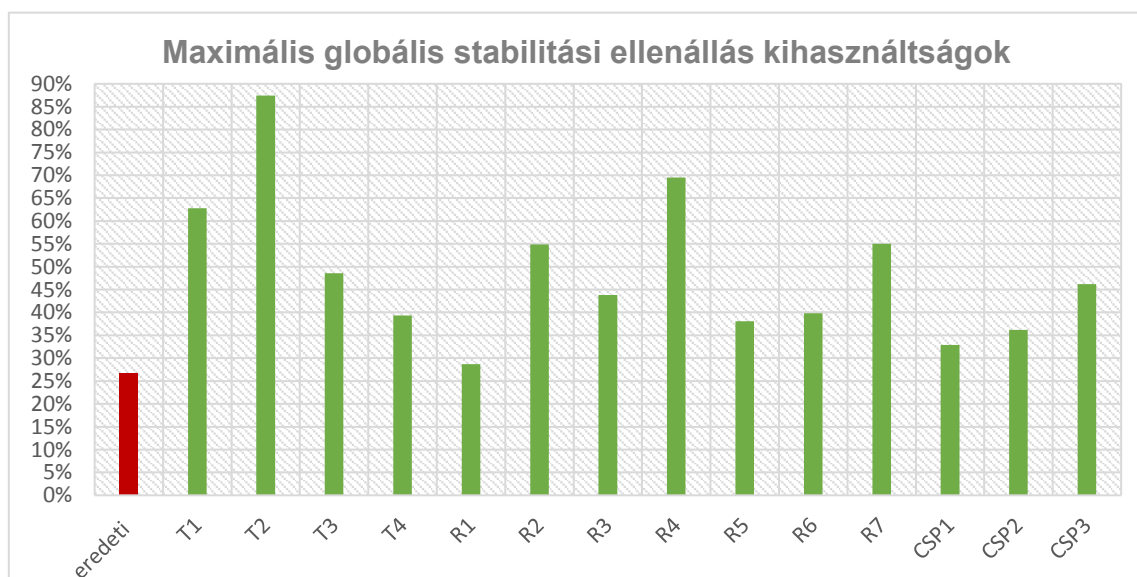
5. Táblázat: Támaszok eltávolítása, Forrás: a szerző 1, Készítette: a szerző 1

Csomópontok és kapcsolódó rudak eltávolítása:

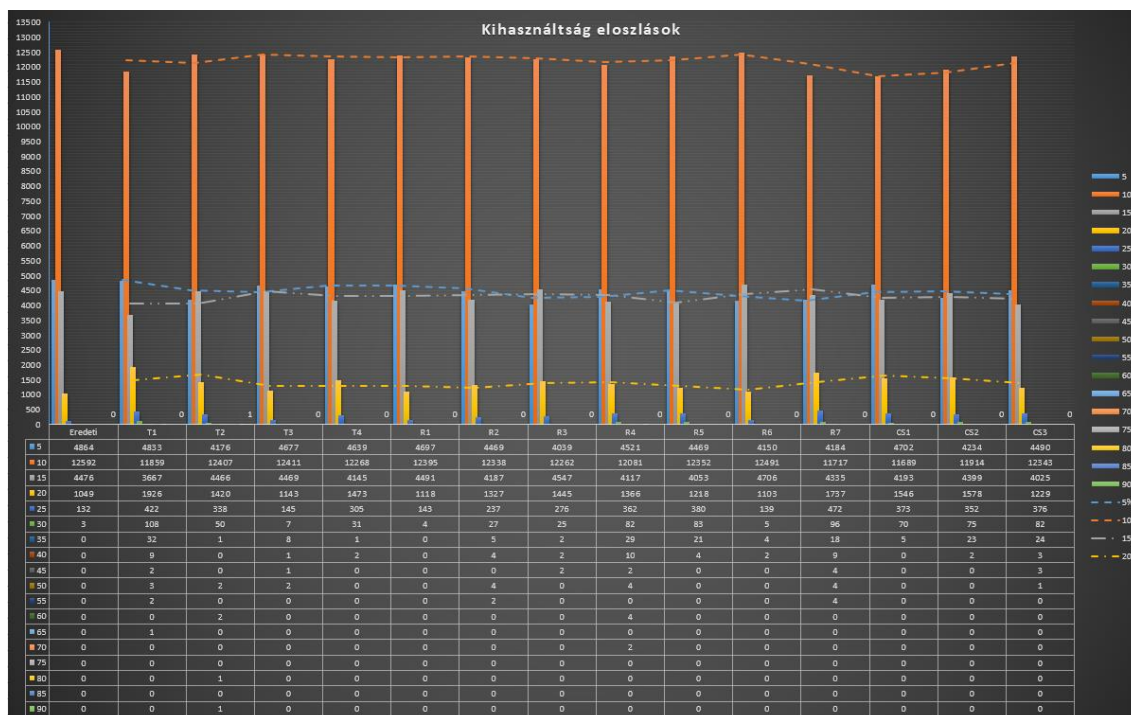
kiválasztott cs.p. jele	roncsolt szerkezeti modell	kiválasztott cs.p. jele	roncsolt szerkezeti modell
CSP1		CSP2	
CSP3			

6. Táblázat: Csomópontok és kapcsolódó rudak eltávolítása. Forrás: a szerző 1, Készítette: a szerző 1

A mértékadó maximum globális stabilitási ellenállás kihasználtságokat a **9. ábra** mutatja. Megállapítható, hogy a „B” szerkezeti kialakítás sokkal érzékenyebb a közbenső rudak, a csomópontok eltávolítására, illetve a kihasználtságok tekintetében, mint az „A” kialakítás. Az eredmények jól mutatják, a „B” jelű szerkezeti kialakítás alternatív teherviselési útvonalainak korlátozottságát. A teherbírási tartalék már önsúlyra is közel kimerül, ezért megállapítható, hogy a „B” jelű szerkezeti kialakítás a robusztusság szempontjából túlzottan érzékeny.

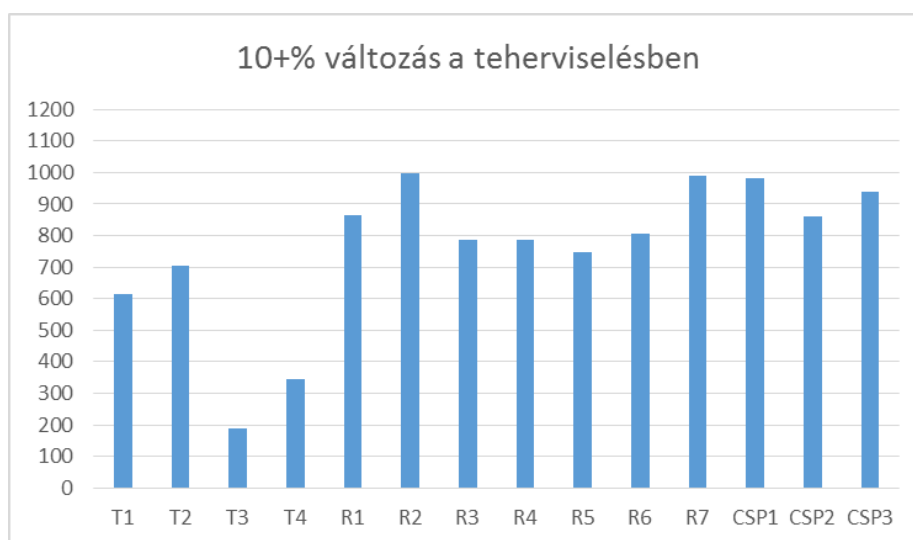


9. ábra: A „B” jelű szerkezeti kialakítás maximális globális stabilitási ellenállás kihasználtsági. Forrás: a szerző 1, Készítette: a szerző 1



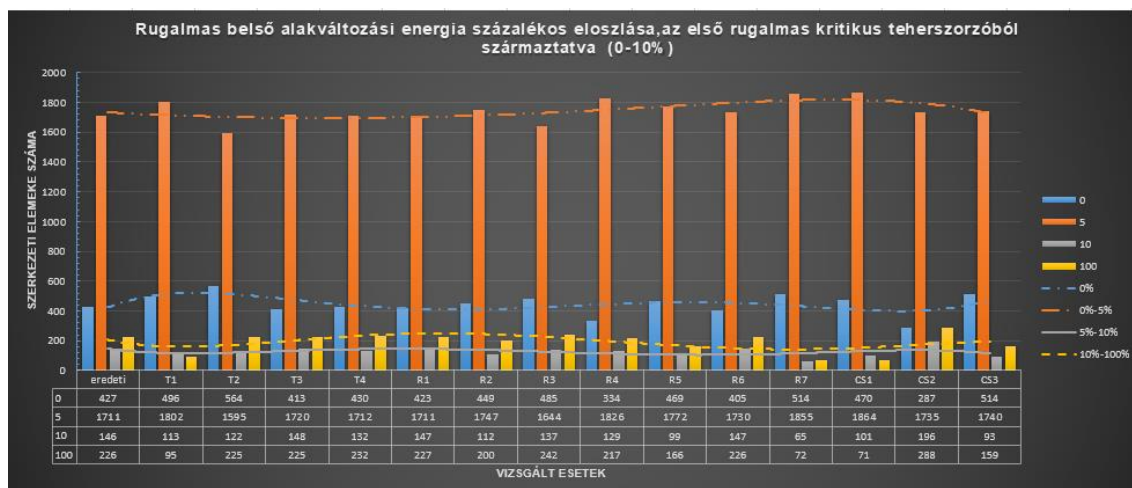
10. ábra: "B" jelű szerkezet globális stabilitási ellenállás kihasználtságának eloszlása. Forrás: a szerző 1, Készítette: a szerző 1

A 10. ábra a globális stabilitási ellenállás kihasználtságok eloszlását mutatja. Az ábra megmutatja a kihasználtság tartományokba eső végeelem számok változását az egyes roncsolásos esetekben a roncsolás mentes szerkezethez képest. A 11. ábra azon rúdelemek számát mutatja, melyekben a belső rugalmas alakváltozási energia több (mértékadó teherkombinációból származtatott), mint 10%-ot változik a károsodásmentes állapothoz képest. Látható, hogy egyes esetekben a lokális roncsolási hatás közel az egész szerkezetre kiterjed. A „B” jelű szerkezeti kialakítás redundanciája nagyságrenddel kisebb, mint az „A” kialakításé.



11. ábra: A „B” jelű szerkezet belső rugalmas alakváltozási energia változása roncsolás hatására. Forrás: a szerző 3. Készítette: a szerző 3

A **12. ábra** a vizsgált szerkezeti modellek első rugalmas kritikus tehereszorójából származtatott belső rugalmas alakváltozási energia százalékos eloszlásait mutatja, melynek részletesen ismertetett elveit lásd a 8. ábránál. A módszer jellegéből adódóan a „stabilitás veszteségi” eloszlások nem mutatnak drasztikus változást, mivel a viszonyítási kritikus belső alakváltozási energia értéke magas, a roncsolásos eseteket követően a normálás magas belső energia értékkel történik így az eloszlások nem mutatnak nagy eltéréseket.



12. ábra: A „B” jelű szerkezeti kialakítás rugalmas belső alakváltozási energia eloszlása, az első kritikus tehereszoróból származtatva. Forrás: a szerző 1, Készítette: a szerző 1

A számított elmozdulások kiértékelése megerősítette a „B” kialakítás alacsony fokú redundáns viselkedését, és visszaigazolta, hogy a lokális hatások jelentős hatással vannak a globális viselkedésre.

Az elvégzett vizsgálatok igazolják, hogy a „B” szerkezeti kialakítás sokkal érzékenyebb a lokális roncsolási hatásokra, mint az „A” jelű szerkezeti kialakítás. Mind az elmozdulások, mind pedig a kihasználtságok növekedése két-háromszoros értéket mutatnak. A „B” jelű szerkezeti kialakítás állékonysága azon esetekben, ahol kisszámú rúdban nő meg a teherbírási részesedés (T2, T3 esetek), kiemelten romlik. Ennek nyilvánvaló oka a szerkezeti struktúrából adódó alternatív teherviselési útvonalak hiánya. A kiemelten érzékeny helyek a támaszok környezetében vannak. Összegezve, a „B” jelű szerkezet egyes lokális roncsolódásának hatása befolyással van a globális állékonyságra, a szerkezet alacsony redundancia fokkal rendelkezik, de progresszív tönkremenetel itt sem áll elő

A DÖNTÉSTÁMOGATÓ OPCIÓS MÁTRIX

A döntéstámogató opciós mátrix módszerének az ideális, illetve optimális szerkezet kiválasztásánál lehet fontos szerepe. A 3. fejezetben bemutatott robusztusság vizsgálat az opciós mátrix egyik sorát képezi. A mátrix összeállítását az alábbiakban mutatjuk be.

A következő lépés a kiértékelési és összehasonlítási szempontrendszer felállítása. A mátrix első oszlopába kerülnek az összehasonlítandó szempontok, az első sorba kerülnek a vizsgált szerkezeti típusok azonosítói. A mátrix többi eleme a részletes vizsgálati eredmények reprezentatív összefoglalóját tartalmazza. A mátrix első oszlopának és első sorának kivételével az összes további érték egy előre meghatározott osztályzási rendszer alapján

indexet kap. Az index lehet akár „színkód” vagy „osztályzat” is. Ennek megfelelően kidolgoztunk az ismertetett általános szabadformájú acélszerkezeti térlefedésekre alkalmazható döntéstámogató opciós mátrix struktúráját. Az általános szempontrendszer és az opciós mátrix bemutatásánál mellőztük a vizsgálatok részletes ismertetését.

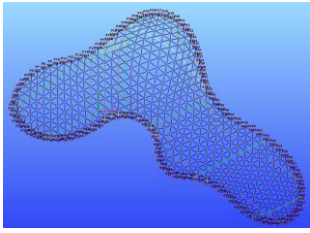
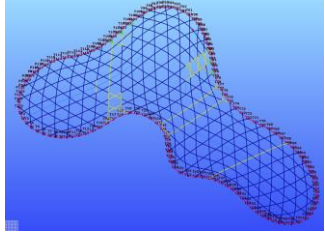


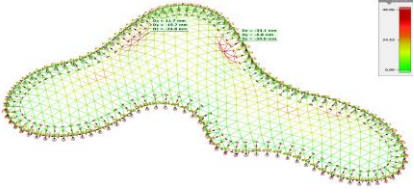
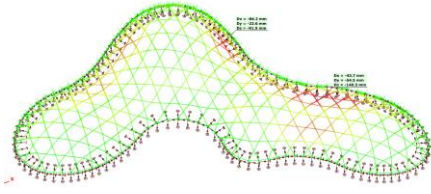
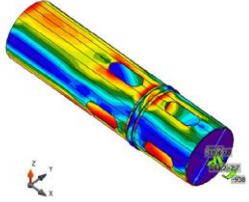
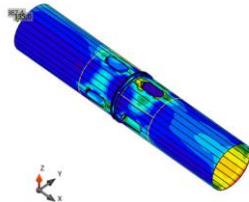
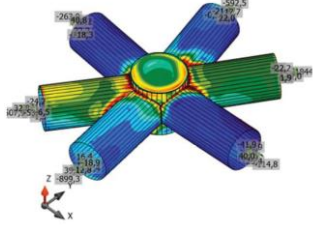
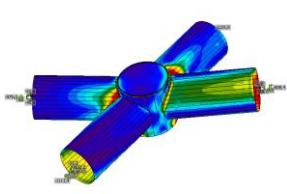
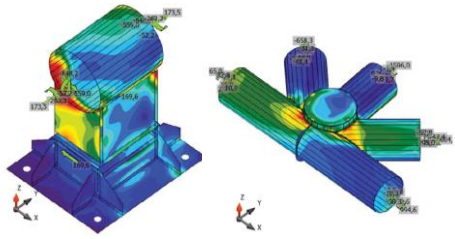
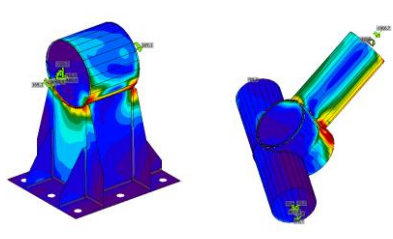
A mátrix indexelt részein „szín kódolást” alkalmaztunk. A három színhez megfelelőégi szinteket rendeltünk.

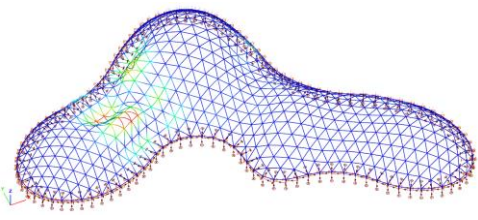
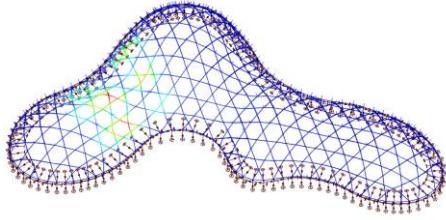
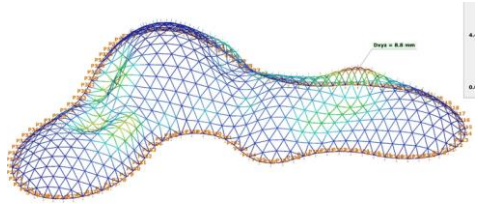
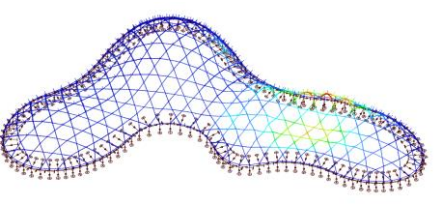
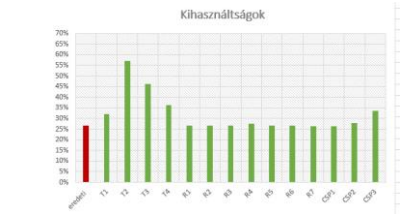

- zöld: jó, egyszerű, ideális,
- narancs: közepes, összetett, elfogadható,
- vörös: nem jó, komplikált, problémás,

A döntéstámogató opciós mátrix szempontrendszere a következő:

- A szerkezet teljesítőképességének szempontjai:
 - kihasználtságok,
 - elmozdulások,
 - kapcsolatok kihasználtsága (csavarozott és hegesztett kapcsolatok),
 - kapcsolatok kihasználtsága (támasz csomópontok),
 - rugalmas kritikus teherszorzó,
 - első saját-frekvencia,
 - vízfelhalmozódás,
 - robusztusság,
- Mennyiségi összehasonlítás:
 - anyagmennyiségek,
 - rudak és csavarozott kapcsolatok száma,
 - burkolati rendszer (etilén-tetrafluoroetilén anyagú fólia),
- Gyárthatóság és szerelhetőség:
 - csomópontok szerelhetősége és gyárthatósága,
 - szállíthatóság,
 - szerelési egységek,
 - támasz (vasbeton alszerkezet),

Az opciós mátrixot a **7. táblázat** mutatja. A bemutatott döntéstámogató opciós mátrix a szakmai vizsgálatok kiértékelését, vizuális eredményközlését szolgálja. A mátrix tetszőleges számú szempontot és szerkezeti verziót/kialakítást tartalmazhat. A magyarázó színkódok helyett súlyozott értékekkel ellátott pontozási struktúra is alkalmazható, ami pontosabb kimutatásokat tesz lehetővé, ahol a kimutatások összegezhetőek, egyszerűen összehasonlíthatóak. Az intervallum skálák segítségével a szerkezeti rendszereket osztályozni, rangsorolni tudjuk a fontosabb értékelési kritériumoknak megfelelően.

		Színkód: Jó, egyszerű, ideális Közepes, összetett, elfogadható Nem jó, komplikált, problémás	
verzió		Háromszöges szerkezet 	V17-AB szerkezet "pók" szerelési egységekkel 
	szepon		
A szerkezet teljesítő képessége	Kihasználtságok	max 82% 	max 94% 
	Elmozdulások	Dx=33mm Dy=16mm DZ=35mm 	Dx=43mm Dy=55mm DZ=140mm 
A szerkezet teljesítő képessége	Kapcsolatok kihasználtsága - Csavarozott kapcsolat	A rüdvégeken vastagítás szükséges 	A rüdvégeken vastagítás nem szükséges 
	Kapcsolatok kihasználtsága - Hegesztett csomópont	6 csatlakozó rüdvég illesztése 	4 csatlakozó rüdvég illesztése 
	Kapcsolatok kihasználtsága - Támasz csomópont		

A szerkezet teljesítő képessége	Kritikus kihajlási teherorzó	<p>2,93</p> 	<p>3,16</p> 
	Első sajátfrekvencia	<p>1,59</p> 	<p>1,405</p> 
	Víz felhalmozódás	<p>Víz felhalmozódás nem jelentős és nem mértékadó A háromszögletű felületekben kevésbé áll meg a víz A dróttal megerősített háromszögek lehet, hogy nem szakadnak ki a vízteher alatt</p>	<p>A vízfelhalmozódás jelentősebb A hatszögletű elemekben jobban megáll a víz A hatszögletű elemek (az adott méretek mellett) biztosan kiszakadnak csillagalakú megerősítéssel is.</p>
Robosztusság	<p>Támaszok megszűnése jelentős kihasználtság növekedés eredményezhet, de az állékonyság nem veszélyeztetett, a tartalék bőven elégséges. Rudak és csomópontok izolált tönkremenetele nem befolyásolja a globális viselkedést jelentősen és a helyreállítás könnyen és biztonságosan végrehajtható.</p> 	<p>Támaszok megszűnése igen jelentős kihasználtság növekedést eredményezhet. Az állékonyság megmaradhat, de a teherbírási tartalék közel kimerülhet. Rudak és csomópontok tönkremenetele mérsékelt hatású. A helyreállítás nehezebb.</p> 	
Mennyiségi összehasonlítás	Anyagmennyiségek	<p>Statikai tömeg: 770t Teljes tömeg: 960t Összes rúd hossz: 9788m Csavarozott toldások száma: 2689</p>	<p>Statikai tömeg: 564t Teljes tömeg: 720t Összes rúd hossz: 6170m Csavarozott toldások száma: 1069</p>
	Rudak és csavarozott kapcsolatok száma	<p>Belső csomópontok száma: 539 Támasz csomópontok száma: 112 Rudak száma: 1502</p>	<p>Belső csomópontok száma: 505 Támasz csomópontok száma: 124 Rudak száma: 1193</p>
	ETFE Fólia	<p>964db háromszögletű fólia élek egy síkban drótos megerősítés szükséges lehet</p>	<p>194db hatszögletű fólia 376db háromszögletű fólia hatszögletű fólia élek nem egy síkban drótos megerősítés biztosan szükséges A hatszögletű panelek kivetelezhetősége kérdéses azok mérete miatt</p>

Gyáthatóság, szerelhetőség	Csomópontok szerelhetősége és gyárthatósága	A hat-rudas csomópontok gyártása nehezebb és több készül nagyobb mennyiségű helyszíni szerelt kapcsolat készül.	A négy-rudas csomópontok gyártása egyszerűbb lehet, de a rudak nem csupán csomók. Lényegesen kevesebb helyszíni csavarozott kapcsolat.
	Szállítás	Egyenes rudak és kompakt csomópontok szállítása és emelése.	Kiterjedtebb, térbeli, négy-lábú "pókok" szállítása szükséges, de becslések alapján az ürszelvénybe be lehet féni.
	Szerelési egységek	Rudak és csomópontok külön, vagy ezek előszerelt egységei. Nagy számú, könnyű emelés.	Nagyobb komponensek emelése. Lényegesen kevesebb emelés.
	Támasz - vasbeton interface	A kapcsolat alját előre be lehet állítani és a tetejét beemelve egy nagytérű csavart kell behelyezni.	A kapcsolat pozicionálást követően utólagos aláöntés szükséges, megnövekedett lehorgonyzó szerelvény.
	Állványzat szükség	A szerkezetben számos alternatív teherviselési út van és a szerkezet nyomatekbró kapcsolatok nélkül is bármely szerelési állapotban állékony. Kvází szabad szerelés esélye kevés állvány alkalmazással lehetséges.	A szerkezetben kevesebb a teherviselési út. A szerelési sorrend kötöttebb. Több csomópont ideiglenes megtámasztása lehet szükséges, de várhatóan csak a szerelés adott környezetében.

7. Táblázat: A vizsgált „free form” lefedő szerkezet döntéstámogató opciós mátrixa. Forrás: a szerző 1, Készítette: a szerző 1

ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk rávilágít a szabadformájú acélszerkezeti térlefedések komplex tervezésének bonyolultságára és szerteágazó problémaköreire. A problémák és a felvetett kérdések megválaszolásának érdekében folyamatos kutatásokat és fejlesztéseket végzünk. A részletesen bemutatott robusztusság vizsgálat viszonylag új kutatási terület, aminek vizsgálati módszerei folyamatosan finomodnak. A feldolgozott irodalmakban vizsgált többszintes épületek robusztusság vizsgálatait felhasználhatók a „free form” acélszerkezeti térlefedéseknél is. A „free form” szerkezetek egyedi tulajdonságai miatt a módszereket a sajátos szerkezeti viselkedéshez kell igazítani. Az ismertett vizsgálati módszer bemutatta a szabadformájú acélszerkezeti térlefedések egy lehetséges robusztusság vizsgálatát, továbbá ismertette, hogy milyen elvek és megfontolások alapján lehet azt hatékonyan és szemléletesen alkalmazni. A döntéstámogatást elsegítő és összehasonlító mátrix szemléletesen mutatja az egyes szerkezeti kialakítások tulajdonságait. Az elkészített mátrix jól szemlélteti annak rugalmas alakíthatóságát, ezzel is megfelelően a vele szemben támasztott követelményeknek. A módszer általánosítása további kutató munkát igényel.

Köszönetnyilvánítás

A jelen kutatást az **EFOP-3.6.1-16-2016-00017** projekt támogatta. Továbbá szeretnénk köszönetet nyilvánítani az ipari támogatásért a **KÉSZ Holding Zrt.**-nek,

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] B.A. Izzudin, A.G. Vlassis, A.Y. Elghazouli, D.A. Nethercot: „Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss Part I: Simplified assessment framework.”, *Engineering Structures* 30 (2008):1308-1318
- [2] A.G. Vlassis, B.A. Izzudin, A.Y. Elghazouli, D.A. Nethercot: „Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss Part II: Application.”, *Engineering Structures* 30 (2008):1424-1438
- [3] Feng Fu: „Progressive collapse analysis of high-rise building with 3-D finite element modeling method.”, *Journal of Constructional Steel Research* 65 (2009): 1269-1278
- [4] Gidófalvy Kitti: „Szabad formájú szerkezetek tervezése”, *Magész Acélszerkezetek*, Vol. 7, No. 2 (2010): 41-45
- [5] Mészáros Livia: „Nagy fesztávú centrális terek acélszerkezetes lefedése – rácsos héjszerkezet.”, *Magész Acélszerkezetek*, Vol. 7, No. 2 (2010): 46-51
- [6] Dr. Gilyén, Nándor: Szerkezet és forma az építészetben, Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1982
- [7] Maggie Kociecki, Hojjat Adeli: „Two-phase genetic algorithm for size optimization of free-form steel space-frame roof structures.”, *Journal of Constructional Steel Research* 90 (2013): 283-296
- [8] Romvári Péter: Parametrikus tervezés a gyakorlatban, Építészfórum, <http://epiteszforum.hu/parametrikus-tervezes-a-gyakorlatban>, 2011
- [9] SCI P391, Structural Robustness of Steel Framed Buildings, 2011
- [10] József Szalai: Use of Eigenvalue Analysis for Different Levels of Stability Design, SDSS’Rio 2010 Stability and Ductility of Steel Structures E. Batista, P. Vellasco, L. de Lima (Eds.), Rio de Janeiro, Brazil, September 8 - 10, 2010