

Országos Tudományos Diákköri Konferencia

Térbeli rácsos tartók súly szerinti optimalizálása

Készítette: Godinek Márton

II. évfolyam, Szerkezet-építőmérnök M.Sc.

Pécsi Tudományegyetem

Szilárdságtan és Tartószerkezetek Tanszék

Pollack Mihály Műszaki és Informatikai Kar

Témavezető: Dr. Csébfalvi Anikó Borbála

Főiskolai tanár

Szilárdságtan és Tartószerkezetek Tanszék

Pécsi Tudományegyetem

Pollack Mihály Műszaki és Informatikai Kar

Pécs, 2014.04.20.

Tartalomjegyzék

1.	BEVEZETÉS.....	3
2.	OPTIMÁLIS TERVEZÉSI FELADAT ÁLTALÁNOS ISMERTETÉSE.....	6
2.1.	OPTIMALIZÁLÁSI FELADAT MATEMATIKAI MEGFOGALMAZÁSA.....	6
2.2.	TERVEZÉSI TÉR ÉRTELMEZÉSE	7
2.3.	MEGOLDÁSI MÓDSZEREK.....	8
2.3.1.	Matematikai programozás	8
2.3.2.	Iteratív módszerek.....	9
2.3.3.	Heurisztikus módszerek	10
2.3.3.1.	Hangyaboly algoritmus	10
2.3.3.2.	Genetikus algoritmus	11
2.3.3.3.	ANGEL algoritmus.....	12
3.	TÉRBELI RÁCSOS TARTÓ STATIKAI MODELLJE.....	13
4.	TÉRBELI RÁCSOS SZERKEZETEK FOLYTONOS KERESZTMETSZETI VÁLTOZÓS SÚLY SZERINTI OPTIMALIZÁLÁSI PROGRAMJÁNAK ELKÉSZÍTÉSE	14
4.1.	SZÁMÍTÁSI PROGRAM FELÉPÍTÉSE.....	15
4.2.	KAPOTT EREDMÉNYEK FORMÁJA	24
5.	GROUPOK SZERKEZET SÚLYÁRA GYAKOROLT HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA.....	25
5.1.	TERVEZÉSI ÉS ÁLLAPOTVÁLTOZÓKRA VONATKOZÓ KORLÁTOK	26
5.2.	GROUPOK DEFINIÁLÁSA.....	26
5.3.	MODELLEKBEN ALKALMAZOTT TERHELÉSEK.....	28
5.4.	SZERKEZETI MODELL ALAKVÁLTOZÁSI ÁBRÁI	29
5.5.	VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK ISMERTETÉSE.....	30
5.6.	TESTÁTLÓKKAL ELLÁTOTT MODELL VIZSGÁLATA.....	35
6.	PROGRAM TESZTELÉSE ÖSSZETETTEBB GEOMETRIÁJÚ TERVEZÉSI PÉLDÁKON, STABILITÁSI FELTÉTEL MEGADÁSA MEGKÖTÉSEKKEL.....	36
6.1.	TÁVVEZETÉKTARTÓ OSZLOP MODELL	36
6.2.	ADÓTORONY MODELL.....	37
6.3.	LOKÁLIS STABILITÁSI FELTÉTEL PROGRAMBA VALÓ BEÉPÍTÉSE	38
6.4.	TOVÁBBLÉPÉSI LEHETŐSÉGEK MEGFONTOLÁSA.....	40
7.	DISZKRÉT KERESZTMETSZETI VÁLTOZÓS SÚLY SZERINTI OPTIMALIZÁLÁS A FOLYTONOS MEGOLDÁSRA ÉPÜLVE	41
7.1.	ÖKÖLSZABÁLY	42
7.2.	LOKÁLIS-BINÁRIS LINEARIZÁCIÓ	43
7.3.	MÓDSZEREK FUNKCIONÁLÁSÁNAK ÉS HATÉKONYSÁGÁNAK TESZTELÉSE	47
7.3.1.	Ökölszabály tesztelése	49
7.3.2.	Lokális-bináris linearizáció tesztelése.....	50
7.3.3.	Módszerek tesztelésének értékelése.....	51
7.4.	EULER-FÉLE LOKÁLIS STABILITÁS MEGFELELŐSÉG ELLENŐRZÉSE.....	52
7.4.1.	Euler-féle lokális stabilitási ellenőrzés programba való beépítése	52
7.4.2.	Stabilitási ellenőrzés funkcionálásának tesztelése	55
7.4.3.	Stabilitási ellenőrzés tesztelésének értékelése	57
8.	ÖSSZEGZÉS.....	58
9.	IRODALOMJEGYZÉK.....	60

1. Bevezetés

A következőkben bemutatandó dolgozat az optimális szerkezettervezés kérdéskörét hivatott tárgyalni, ezen belül részletesebben taglalva annak egyik alapfeladatát, a szerkezetek súly szerinti optimalizálását, melyet, mint gyakorlati alkalmazást, térbeli rácsos tartókon keresztül kíván bemutatni. A választott téma oka, annak állandó aktualitása, legyen szó bármely építőmérnöki szerkezettervezési feladról, melynek következményeként a jövőre nézve is ezen módszerek általános alkalmazásának elterjedése, és az adott témában való, további hatékony eljárások kidolgozása, az építőmérnöki tudományok egyik fő irányvonalát kell hogy képezzék.

A szerkezet optimalizálás bár úgy tűnik, permanens célokat reprezentál, ennek ellenére részleteiben szemlélve még is kissé megfoghatatlan feladat, hisz a követelményrendszerek, körülmények, melyekhez viszonyítunk, valamint az optimalizálás általánosságban fő célját képező gazdaságossági szempontok alappilléreket alkotó megfontolások, mint a piaci árak, egyaránt folyton változó tényezők. Ettől elvonatkoztatva, azonban rendelkezésünkre állnak, a szerkezetekkel szemben támasztott, állandó megkerülhetetlen követelmények is, mint az építmény élettartama alatt az állékonyság állandó biztosítása, rendeltetésszerű funkciójának való megfelelés, melyek figyelembe vételével kitűzhetünk jól megvalósítható célokat, mint egy legkedvezőbb hálózati kialakítás, és vagy minimális keresztmetszet felhasználási megoldás megkeresését, melyek általában maguk után vonják gazdaságossági szempontok teljesülését is.

A dolgozat témakör választásának okát nem csupán a szerkezet optimalizálás elméleti hátterével való megismerkedés igénye vezérelte, hanem gyakorlat orientált módon az új ismeretek gyakorlati alkalmazásba való átültetése is, ezért az adott téma elméleti hátterének áttekintése mellett a dolgozat egy térbeli rúdszerkezetek súly szerinti optimalizálására szolgáló program létrehozását is feladatként fogalmazta meg.

Az optimalizálás egészében való tárgyalásának érdekében, a dolgozat sematikusán kitér az optimalizálási feladatok általános ismertetésére, azok általános eszközeire, megoldási módszereire. Röviden ismerteti a súly szerinti optimalizálás vizsgálati szerkezetének, tehát a térbeli rácsos tartók statikai modelljének felvétele során tett feltételezéseket. Az általános optimalizálási probléma fellelhető irodalmakon keresztül áttanulmányozásán kívül, nagy mennyiségű irodalomkutatás irányult specifikusan, az elkészítendő optimalizálási program felépítésének elméleti hátterére, annak lehetséges irányvonalaira.

Az elkészítendő programmal kapcsolatban előzetesen elvárásként jelent meg:

- a lehető legmagasabb szinten alkalmassá váljon tervezési feladatok végrehajtására, tehát a szerkezetekre vonatkozó szilárdsági, alakváltozási, valamint stabilitási feltételek lehetőség szerint jelenjenek meg, mint kritérium az optimalizálás során
- az optimalizálás során magasabb rendű statikai feltételek folyamatos kielégítése
- a különböző szerkezetek vizsgálata során azok a programba történő definiálásához a lehető legkevesebb manuálisan megadandó input változóra legyen szükség, tehát lehetséges elérhető szintig automatizáltan működjön
- az alkalmazott keresési eljárások a lehető legnagyobb valószínűséggel globális megoldást szolgáltatassanak
- a program grafikusan legyen képes megjeleníteni a vizsgált szerkezet deformálatlan, valamint deformált alakját, hogy visszajelzést kapjunk a geometria helyes megadásáról, valamint meggyőződhessünk, hogy a szerkezet csomópontjai a terheléseknek elvártan mozdultak-e el eredeti pozíciójukból
- az eredmények megjelenítését illetően, az optimalizálás befejeztével a szerkezet grafikus kirajzolása mellett, jelenjen még meg a keresés célját képező szerkezeti tömeg, az egyes keresztmetszeti változók eredményei, ezen felül a szerkezet csomóponti elmozdulásai, valamint a rúdelemeiben ébredő feszültség értékek.

A program kialakítása során a tárgyalandó súly szerinti optimalizálási feladatból adódóan a térbeli rúdszerkezeteken belül egy olyan szerkezettípus keresésének szándéka vált szükségessé, melyek terén egy tényleges rendszer tervezését képező beruházás esetén a keresztmetszetek minimalizálásával önmagában jelentős javulás érhető el gazdaságossági szempontból, így szemléltetve a módszer, akár önmagában való alkalmazási területének gyakorlati szerepét. Így esett a választás a rácsos tornyokra, mint konkrét szemléltetési eszköz, mely köré felépítésre került az applikáció.

A rácsos tornyok reális kezelésének érdekében a dolgozatban a rájuk vonatkozó Eurocode szabványok figyelembevételével számított terhelések kerültek alkalmazásra, valamint a vizsgálati körülmények helyes megválasztásának érdekében a rácsos tornyok szerkezeti kialakítását illetően jelentős mennyiségű megvalósult példa került áttanulmányozásra.

A térbeli rácsos tartók súly szerinti optimalizálására szolgáló program kezdeti irányvonalában a keresztmetszeti változókat, mint folytonos mennyiségeket fogja kezelni. Ezt követően kerül sor a folytonos megoldásokat szolgáltató program továbbfejlesztésére, mely célja az előzetes elvárásoknak megfelelően, hogy a keresztmetszeteket diszkrét mennyiségként, tehát azok lehetséges értékeinek szelvénykatalógus általi behatárolását is képes legyen kezelni.

A dolgozat általános célként tűzte ki, hogy az elkészített programokon keresztül elvégzendő vizsgálatok alapján, megfelelő következtetéseket tudjon levonni annak tárgyára vonatkozóan, hogy a rácsos torony szerkezetek keresztmetszeti változóinak, mely módon való csoportosítása vezet legjobb eredményre kivitelezési szempontokat is megfontolva. Ezen felül térjen ki a különböző állapot tényezőkre tett korlátok, különböző szinteken való alkalmazására, állapítsa meg azok a szerkezet súlyára gyakorolt hatását.

A vizsgálatok végrehajtása a térbeli rácsszerkezetek viselkedésének megismerése mellett, a kialakítandó program egyes állapotaiban való tesztelését is hivatott szolgálni. Így felmérve a program éppen aktuális állapotának alkalmazhatóságát, annak korlátait, lehetőségeit, minden lépést követően számbavételre kerülnek a lehetséges továbblépési irányok szem előtt tartva az előzetesen kitűzött célokat, majd lehetőség szerint azok megvalósításra is kerülnek.

Az program felépítésének szemléltetését illetően, a dolgozat jól átláthatóságának érdekében, igyekszik a lehetőségekhez mérten, annak lépéseit minden egyes újabb szinten röviden, egy általános ismertetésben közölni. A vizsgálatok felépítése során futtatott programok teljes formájukban a korlátozott rendelkezésre álló tárhelynek köszönhetően nem kerülnek közlésre, csupán azok eredményei.

2. Optimális tervezési feladat általános ismertetése

A dolgozat témájánál fogva elengedhetetlennek tűnt, az optimalizálási feladatok elméleti alapjainak áttekintése, a konkrét témakörre való specifikálódást megelőzően, így az alábbi pontban az optimalizálási feladatok problémájának általános ismertetésére, és annak megoldási módszereinek általános tárgyalására kerül sor a teljesség igénye nélkül, a témában fellelhető irodalmak alapján [1],[2],[3].

Az optimalizálási feladatok alkalmazása a tudományágak minden szekciójában megtalálható, a maguk saját problémáinak kezelése céljából. A dolgozat témáját képező építőmérnöki tudományokban felmerülő szerkezet optimalizálás alapvető kiindulás gondolata, a szerkezet kialakítására valamilyen tulajdonság, vagy tulajdonságok szerinti legoptimálisabb megoldás megkeresése. Az optimalizálási szempont lehet például az adott geometriájú szerkezet legkisebb súlyú kialakítása, mely a keresztmetszeti méretek minimalizálásával érhető el. A tervezési változók azonban más igényeket is reprezentálhatnak, mint például anyagtulajdonságok, ekkor a többféle anyagból készítendő szerkezet egyes részeihez a legoptimálisabb anyag tulajdonságot kívánjuk alkalmazni. Ezeken felül még a legalapvetőbb építőmérnöki optimalizált tervezési feladatok közé tartoznak a geometriai optimalizálás, mely során a legmegfelelőbb szerkezeti geometria megkeresése, valamint topológiai, ahol egy adott hálózatu szerkezet optimális kialakítása a cél, a megkötéseknek megfelelően szerkezeti elemek elhagyásával, vagy hozzáadásával. Természetesen az ismertetett feladat típusok nem csak parciális módon külön-külön, hanem együttes kérdésként is kezelhetőek, a feladat ily módon való komplexitása miatt, azonban érdemes a hatékonyságot szem előtt tartva, azok részletekben való kezelésének megfontolása, ha az kellő mértékben biztosítja így is a kitűzött cél eredményességét. Az optimalizálás során természetesen alapvető követelmény a szerkezet állapotegyenleteinek teljesülése, amihez kritériumként a tervezési változókra, és az állapot változókra felírt egyenlőtlenségi követelmények csatlakoznak.

2.1. Optimalizálási feladat matematikai megfogalmazása:

A feladat matematikai megfogalmazása szerint tehát nem más, mint egy szélsőérték feladat, melyben a szerkezeti kialakítás, tervezési változókra nézve minimális vagy maximális megoldását keressük, mely a következő alakot ölti:

$$\left. \begin{aligned} [c_1(x, y), c_2(x, y), \dots, c_n(x, y)] &= \min! \\ g_j(x, y) &\leq 0; (j = 1, 2, \dots, k) \\ h_j(x, y) &= 0; (j = 1, 2, \dots, l) \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

ahol:

- x a tervezési változók, y az állapot változók
- $c_{1,2,\dots,n}(x,y) = \min!$ cél függvények, a szerkezet optimalizálásra irányuló tulajdonságait fejezik ki, a tervezési és állapotváltozók függvényében
- $g_j(x,y) \leq 0$; ($j = 1,2,\dots,k$) a tervezési és állapotváltozókra felírt egyenlőtlenségi követelmények
- $h_j(x,y) = 0$; ($j = 1,2,\dots,l$) a szerkezet állapot egyenleteinek egyenlőségi követelményei

2.2. Tervezési tér értelmezése

A feladat megoldása során célszerű a tervezési és állapot változókra vonatkozó követelményeket, valamint az állapotegyenleteket, tervezési változók függvényében felírni, így az optimalizálási feladat egy darab alkalmazott célfüggvény esetén az alábbi alakot ölti:

$$\left. \begin{array}{l} c(x) = \min! \\ h_j(x) = 0; (j = 1,2,\dots,k) \\ g_j(x) \leq 0; (j = 1,2,\dots,l) \end{array} \right\} \quad (2.2)$$

A megoldások értelmezése egy az $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ismeretlen tervezési változók számának függvényében, egy n dimenziós hipertérben történhet, melyben a megoldások egy-egy pontot jelölnek. A lehetséges megoldások halmazát, azon pontok jelölik, melyek a $g_j(x) \leq 0$; ($j=1,2,\dots,l$) tervezési és állapotváltozókra felírt, mind a $g_{1,2,\dots,l}(x) \leq 0$ egyenlőtlenségi követelményt, valamint az állapotegyenleteket kielégítik. Ennek megfelelően a hipertér felbontható egy lehetséges és egy nem lehetséges megoldások tartományára, melynek határoló felületét a $g_j(x)=0$; ($j=1,2,\dots,l$), valamint a $h_j(x)=0$; ($j=1,2,\dots,k$) állapotegyenletek által kirajzolt hiperfelületek adják. Tehát a lehetséges megoldások halmazát a megoldás tér azon pontjai adják, melyek $g_j(x) \leq 0$; ($j=1,2,\dots,l$) és $h_j(x)=0$; ($j=1,2,\dots,k$) hiperfelületek közös tartományába esnek.

Az optimális megoldást a célfüggvénynek az a minimális értéke fogja szolgáltatni, mely esetén a célfüggvényt ábrázolva annak hiperfelületének van a lehetséges megoldások halmazának határoló felületén pontja. Ez a pont adja az optimális megoldást, a hozzá tartozó $x_1, x_2, \dots, x_n$ értékek pedig, az optimális tervezési értékeket.

2.3. Megoldási módszerek

2.3.1. Matematikai programozás

Az optimalizálási feladatok általában a célfüggvény, és az állapot egyenleteken kívül, a tervezési változóra vonatkozó $g_j(x) \leq 0$; ($j=1,2, \dots, m$) egyenlőtlenségi feltételeket is tartalmaz, az ilyen jellegű szélsőérték problémák, matematikai programozási feladatok.

Rúdszerkezetek általános optimalizálási formulája (2.2) általánosan nemlineáris programozási feladatra vezet. Néhány egyszerűbb esetben azonban a $h_j(x)=0$ egyenletek a $g_j(x) \leq 0$ egyenlőtlenségi egyenletekbe behelyettesítve kiküszöbölhetőek, így a feladat az alábbi egyszerűbb formában fogalmazható meg:

$$\left. \begin{array}{l} c(x) = \min! \\ g_j(x) \leq 0; (j = 1,2,\dots,l) \end{array} \right\} \quad (2.3)$$

Ebben az esetben a feladat a Kuhn-Tucker feltétel alkalmazásával oldható meg.

Amennyiben a célfüggvény, az állapotegyenletek és a kényszerek lineárisak, az optimális tervezési feladat lineáris programozásként oldható meg, és a feladat általános formája a következő képen írható fel:

$$\left. \begin{array}{l} c(x) = \sum_{i=1}^n c_i x_i = \min! \\ h_j(x) = \sum_{i=1}^n b_{ji} x_i + b_{j0} = 0; (j = 1,2, \dots, k) \\ g_j(x) = \sum_{i=1}^n a_{ji} x_i + a_{j0} \leq 0; (j = 1,2,\dots,l) \end{array} \right\} \quad (2.4)$$

ahol $c_i, a_{ij}, a_{j0}, b_{ji}, b_{j0}$ állandókat jelölnek.

Az lineáris programozás során alkalmazott eljárásokról (Lagrange-függvény, Kuhn-Tucker feltétel) részletesebben számos szakirodalomban tájékozódhatunk [1],[2].

2.3.2. Iteratív módszerek

Ezen eljárások során a célfüggvény minimumát keresve nem az előírt tervezési és állapot követelmények, valamint az állapotegyenletek folyamatos kielégítésével keressük a megoldást, hanem a minimum feltétel kielégülését biztosítjuk, és a tervezési változók folyamatos próbálgatásával fokozatosan kielégítjük az előírt feltételeket. A kiértékelés szempontjából megkülönböztethetők aszerint, hogy a Hesse-mátrixot, gradienseket, vagy csak függvényértékeket értékelnek-e ki. A deriváltak kiértékelése javítja konvergenciát, azonban ezzel együtt a feladat bonyolultsága is egyre nagyobb, gyakran exponenciális lefutási idejű optimális megoldást eredményez. A megfelelő algoritmus kiválasztása minden esetben az adott feladattól függ.

Optimális szerkezettervezésben alkalmazott gyakori iteratív módszerek:

- Kihasznált feszültségek módszere: alkalmazásával a szerkezet súly optimalizálását abból a szemszögből közelítjük meg, hogy a legkisebb súlyú szerkezet esetén minden rúd maximálisan ki van használva, azaz $\sigma_{rúd} = \sigma_{megengedett}$.
- Optimum feltételre alapuló általános módszer: ezen módszer során egy előírt optimum feltétel folyamatos kielégítését biztosítjuk.
- Büntető függvények alkalmazása:

$$\left. \begin{array}{l} c(x) = \min! \\ g_j(x) \leq 0; (j = 1, 2, \dots, l) \end{array} \right\} \text{kötött szélsőérték feladatok megoldása}$$

$$\psi(x, r_k) = c(x) + r_k \sum_{j=1}^m G_j[g_j(x)] = \min! \quad (2.5)$$

szabad szélsőérték feladat ismételt megoldására vezethető vissza, melyben r_k ; ($k=1, 2, \dots, s$) a büntető paraméter, amit a $k=1, 2, \dots, s$ iterációs lépések során kell alkalmasan megválasztani, $G_j[g_j(x)]$ a büntető fv. ami az indító pont lehetséges tartományon belüli vagy azon kívüli elhelyezkedésétől függően lehet külső vagy belső.

2.3.3. Heurisztikus módszerek

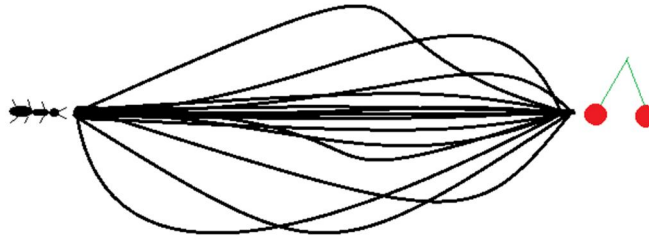
Ezen módszerek az optimalizálási feladatok megoldásának keresésére kifejlesztett olyan eljárások, melyek az optimalizációs problémára egy közelítő megoldást adnak. A heurisztikus valószínűségi számításra alapuló eljárások célja, hogy a keresést bizonyos megkötésekkel a globális optimumhoz közeli, egzakt megoldás irányába terelik. A módszerek nagy előnye, hogy a nemlineáris, nem konvex feladatok megoldásának keresésére, megfelelő algoritmusok alkalmazásával, egy időigény és kielégítő megoldás értékrendben jó arányhoz juthatunk.

A szerkezet optimalizálási eljárások hatékonyságát a feladat implicit jellege, a változók nagy száma és eltérő típusa az egzakt megoldás megtalálására való esélyt jelentősen lecsökkenti. A szerkezet terhelésre adott válaszát leíró változók, a tervezési változók implicit függvényei, így a szerkezeti válasz megismeréséhez a tervezési változóknak megfelelő pontban egy potenciális energiára vonatkozó szélsőérték feladatát kell megoldanunk, mely az amúgy is szélsőérték feladat megoldási lehetőségeit erősen leszűkíti. Az így kialakuló közel azonos lokális optimum megoldások között, a globális optimum megtalálásának lehetősége rendkívül megnehezedik.

A szerkezet optimalizálási eljárásokban a megoldandó feladat jellegétől függően számos heurisztikus módszer elterjedt, melyek az informatika, a közgazdaságtan és még számos más tudományágban felmerülő optimalizálási feladataihoz egyaránt alkalmaznak, ezen eljárások közül kerül a következőkben ismertetésre néhány legelterjedtebb az optimális szerkezettervezés során is használatos metódus.

2.3.3.1. Hangyaboly algoritmus

A módszert, elsőként Dorigo [4] publikálta, mint heurisztikus megoldási eljárást optimalizálási feladatok kezelésére. Az algoritmust a hangya kolóniák viselkedése ihletette. A hangyák élelemszerzés közben megtalálják a legrövidebb, leghatékosabb utat az élelmük és lakhelyük között. Eleinte az élelem és a boly közötti minden út egy lehetséges megoldás, mely közül a hangyák random választanak. Az élelemszerzés közben a hangyák feromont bocsátanak ki, amelyet a kolónia többi tagja érzékel, és a feromon által megjelölt útvonalakat nagyobb valószínűséggel választják a hatékonyság javítása érdekében, és így javítják a jobb utak feromon szintjét, azonban lehetséges marad, hogy bizonyos tagok a kevésbé kedvező utat választják, így lehetőséget hagyva egy még optimálisabb út megkereséséhez. A kedvező útvonalakon felgyülemlik a feromon, míg a már nem használt ösvényeken egy idő után megszűnik annak értéke. Végül a hangyák ösvénye az étel és a boly közötti legrövidebb úthoz konvergál. Ezen iterációs megoldások fontos tulajdonsága, hogy a lehetséges utak bejárásával a problémák valódi megértése nélkül könnyebben juthatunk a megoldáshoz.



Az algoritmus által tett specifikációk:

- megfelelő számú probléma reprezentálása
- lehetséges megoldások halmazának megfogalmazása
- megoldás minőségét (jóság) mérő funkció bevezetése
- szabály megfogalmazása a „feromon nyomok” frissítésére
- valószínűségi modulációs szabály bevezetése

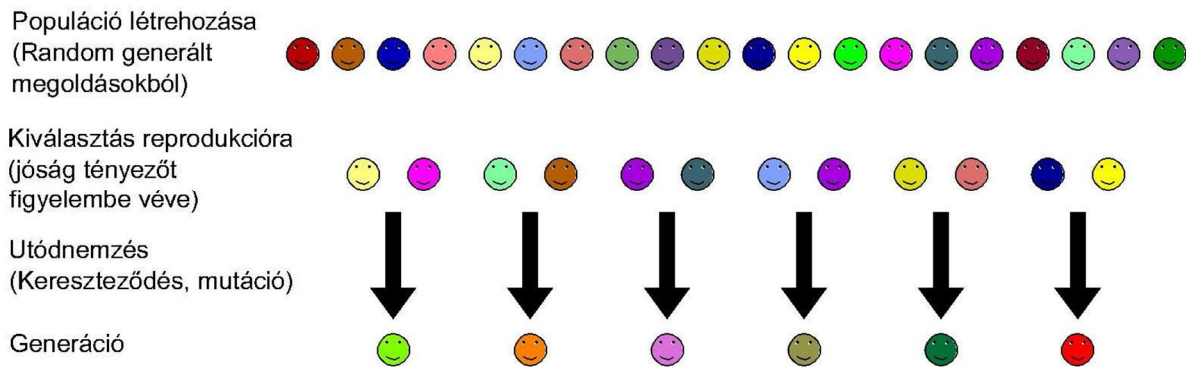
A hangyaboly algoritmus különböző tudományterületeken való alkalmazásáról Helio J.C. Barbosa által szerkesztett antológiában [5] bővebben tájékozódhatunk.

2.3.3.2. Genetikus algoritmus

Egy olyan sztochasztikus megoldás keresési módszer, mely alapötletét az evolúciós fejlődés, a természetes kiválasztódásból merítette. A módszert elsőként Goldberg [6] publikálta, melynek az óta számos változata napvilágot látott, elsősorban a használt operátorok működésének különböző válfajaival. A módszer fontos tulajdonsága, hogy egy megoldás folytonos javítása helyett, lehetséges megoldások halmazaival dolgozik, azokat egyre javítva, és a tradicionális keresési módszerekkel ellentétben nem használ deriváltakat a megoldás kereséséhez. Az algoritmus fontos eszköze a jóságtényező, ezért annak jól funkcionáló definiálása a probléma megoldás szempontjából rendkívül mérvadó.

A módszer öt fázisa:

- Populáció létrehozása: random generált állapotok, melyek kielégítik a problémát. Az egyes állapotokhoz egy előredefiniált jóságfunkció jóságértékeket rendel.
- Reprodukció: az utódnemzésre való kiválasztódás a jóságtényező alapján történik.
- Kiválasztódás: két pár a jóságtényezőnek megfelelően véletlenszerűen kerül kiválasztásra, a reprodukcióra, melyre egy-egy állapot többször is kiválasztódhat, míg egyes állapotok egyszer sem fognak
- Kereszteződés: a párok házasítására egy keresztezési pont kerül kiválasztásra véletlenszerűen, az utódok kreálása a szülők közti cserék által jönnek létre. A folyamat elején a populáció rendkívül sokféle, ez azonban a jövőbeli generációknál már lecsöndesedik.
- Mutáció: minden egyes utód mutálódik egy kis valószínűséggel.



A folyamat ismétlődését egy előredefiniált feltétel szabja meg, amely általában egy kívánt generáció szám elérése, vagy a jóságtényezőre alapul, mely bizonyos generáció után már nem javul jelentős mértékben a legjobb egyednél.

2.3.3.3. ANGEL algoritmus

Az előbbi két ismertetett módszeren kívül még számos a szerkezettervezés területén alkalmazott optimalizáló algoritmus fellelhető a szakirodalomban, mint például az ANGEL hibrid meta-heurisztikus optimális megoldás keresési módszer, melyet Csébfalvi Anikó [7] fejlesztett ki, majd számos változatban bizonyította annak a szerkezettervezés terén való hatékonyságát [8],[9],[10]. A módszer nevét az öt felépítő hangyaboly algoritmus (ACO), genetikus algoritmus (GA), és egy lokális iterációs keresési eljárás (LS) kombinációjáról kapta. A tervezési tér generációkba, azon belül a populációkba szervezett pontjai alkotják a keresési eljárás alapelemeit. Megoldási menete a következő lépésekből áll. Elsőként az ACO random generál egy kezdő populációt, amely tartalmaz egy legkisebb értékű megoldást. A populációgenerálás befejezte után a jóság tényező aktiválódik. Ezután GA végrehajtása következik és a jóság szintek ACO-ban felülíródnak, amint GA elér egy jobb megoldást. Mikor GA művelet bejeződik, az ACO algoritmus újra keresésbe kezd az új jóságszintekkel. ACO és GA váltakozva és egymást segítve keres a megoldás térben. Ezenfelül a módszer tartalmaz egy lokális keresési eljárást, amely az ACO és a GA heurisztikus elemekkel kapott megoldások jóságát egy determinisztikus elemekből álló algoritmussá javítja.

3. Térbeli rácsos tartó statikai modellje

A térbeli rácsos tartók statikai modellje, a síkbeli rácsos tartó modellekhez hasonlóan a következő feltételezéseket teszi, a szerkezetet alkotó rudak egymáshoz súrlódásmentes csuklókkal kapcsolódnak, külső támaszként pedig csak csomóponti eltolódást gátló támaszok biztosítják a megtámasztást. A szerkezet csak csomópontjain terhelt. A vizsgálat során a szerkezetet alkotó rúdelemekre a következő feltevések kerültek alkalmazásra:

- homogén
- izotrop
- anyaga lineárisan rugalmas
- állandó keresztmetszetű geometriailag tökéletes.

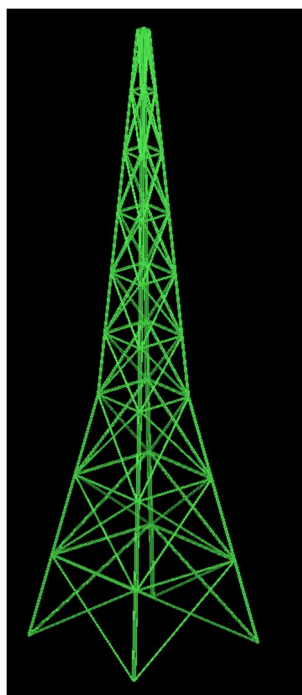
A rácsos tartó kialakítása során elsődleges szempont az alaktartósság biztosítása, valamint a csomópontok oly módon történő kialakítása, hogy annak kapcsolatai minél inkább megközelítsék a csuklószerű viselkedést. Mint ismert a rácsos tartók tényleges kialakítása során a számítási modellben figyelembe vett súrlódásmentes csuklók alkalmazása helyett, merev vagy fél-merev kapcsolatok kerülnek kialakításra, azonban mivel a tényleges terhelés során, a rúdszerű teherviselés dominál, ezért a mellék igénybevételek vagy elhanyagolhatóak, vagy utólagosan különböző módszerekkel figyelembe vehetőek. Ez az egyszerűsített modellfelvétel rendkívül leegyszerűsíti a számításokat, a számítási módszer alkalmazása esetén azonban törekedni kell arra, hogy a kialakított szerkezet valóban minél jobban közelítse meg a feltételezett modell viselkedését.

4. Térbeli rácsos szerkezetek folytonos keresztmetszeti változós súly szerinti optimalizálási programjának elkészítése

Ezen pontban egy térbeli rácsos tartók súly szerinti, a keresztmetszeti változókat folytonosként, a szerkezetet diszkrét módon kezelő optimalizáló program felépítésének bemutatásra kerül sor. **A modell optimalizálására szolgáló program elkészítéséhez és futtatásához, a Wolfram Mathematica programcsomag került használatra.**

A program felépítése egy kiindulási alapmodellen keresztül történt. A vizsgálati alapmodell megválasztásakor feltétel volt, egy a rúdelemek statikai viselkedéséből adódó jó csoportosítási megoldásokat lehetővé tevő szerkezet alkalmazása, a rácsos toronyszerkezetek tekintélyes méreteit figyelembe véve az elmozdulási szabadsági fok kellően nagyra való megválasztása, tehát ha a program a kiindulási modell esetén előálló egyenletrendszerek és minimalizálási eljárások megoldására alkalmas, akkor más geometriájú rácsos toronyszerkezetek esetén is működés képes lesz.

Az előzőekben tett megfontolásoknak megfelelően került alkalmazásra egy 20m magas, 5x5m-es négyzetből, 2x2m-es négyszögbe átmenő 8m magas, és egy ráépülő 2x2m-es négyzetből, 0,5x0,5m-es négyzetbe átmenő 12m magas csonka kúp befoglaló térfogatú, változó keresztmetszetű, felfelé a tengely mentén ferde dőlésszögben haladó, kétszintes rácsos szerkezet. Az alkalmazott szerkezet a gyakorlatban alkalmazott távvezeték tartó oszlopok, valamint adótornyok viselkedését hivatott szemléltetni, a funkciótól eltekintve, de lehetőséget adva a keresztmetszeti változók hierarchikus módon való csoportosítására.



← Vizsgálati alapmodell

A vizsgálati alapmodell kiindulás adatai:

Anyagtulajdonságok:	
Sűrűség: 7850 kg/m ³	
Rugalmassági modulus: 21000 kN/cm ²	
Szerkezet geometriája	
Csomópontok száma: 40	
Elmozdulási szabadságfok: 108	
Elemek száma: 108	
Elemek hossza(szimetriának megfelelően értelmezve felfelé haladva):	{2,76;5,26;4,2,76;4,43;3,2,76;3,69;2,2,74;1,75;2,2,58;1,5;2,2,43;1,25;2,2,298;1,2,2,19;0,75;2,2,1,0,5}
Tervezési változók	
Vizsgált group eset: G7	
Különböző keresztmetszeti változók száma: 108	
Tervezési korlát	
Keresztmetszeti méret korlát: $A_{\min}=1 \text{ cm}^2 \leq A_i \leq A_{\max}=24 \text{ cm}^2$	
Állapottényezőkre vonatkozó korlátok	
Feszültségkorlát:	
$S(S235)_{\min}=-23,5 \text{ kN/cm}^2 \leq S_i \leq S(S235)_{\max}=23,5 \text{ kN/cm}^2$	
Elmozduláskorlát:	
$U(S235)_{\min}=-10 \text{ cm} \leq U_i \leq U(S235)_{\max}=10 \text{ cm}$	
Célfüggvény $\rightarrow \min f(w)=\rho \Sigma A(\text{grop}(i))*L(i), \{i,1,108\}$	

4.1. Számítási program felépítése

A számítási program felépítésének bemutatása során, az egyes lépések szöveges magyarázata mellett minden esetben közlésre kerül a folyamat Wolfram Mathematica programban való megfogalmazása is, néhol csupán rövidebb formában.

Szerkezet geometriáját és anyagjellemzőit leíró input változók definiálása:

Első lépésként a szerkezet legfőbb kiindulási input adatait szükséges rögzíteni, melyek kiindulási alapként szolgálnak a program felépítésében. Ilyen a szerkezet térbeli dimenziójának száma, a szerkezetet alkotó rúdelemek száma, a külső és belső csomópontok száma, az elmozduló csomópontok kezdő sorszáma, a szerkezet elmozdulási szabadságfoka, a keresztmetszeti „group”-ok száma, valamint a szerkezet anyagának legfőbb adatai a rugalmassági modulus és a sűrűség. Megadásuk minden egyes új szerkezeti modell esetén kiindulási lépés kell, hogy legyen.

```

density = 0.00785;
modulus = 20 600;

d = 3;
e = 108;
cs = 40;
bcs = 36;
kcs = (cs - bcs) + 1;
n = 108;
g = e;

```

Keresztmetszeti adatok definiálása:

Mivel a valós életben a szerkezet egyes elemei, nem mind különböző keresztmetszetű szelvényből épülnek meg, hanem azok bizonyos szintű csoportosításával, az azonos funkciójú és igénybevételű rudakra alkalmazott azonos méretű szelvényekkel, ezért a program felépítése során is biztosítani kell ennek megadási lehetőségét, melyet a programban a „group”-ok reprezentálnak. Minden egyes elemhez hozzárendelünk egy „group” számot és az azonos „group” számot kapott elemek egy keresztmetszeti változót fognak az optimalizálás során képviselni. Tehát az i -edik elem keresett keresztmetszetét $a[\text{goup}[i]]$ formában írhatjuk fel. A bemutatott példában minden rúdelem különböző keresztmetszetet képvisel.

Az optimális keresztmetszetek hatékony keresésének érdekében, meg kell határoznunk a lehetséges megoldások határait, melyet egy minimális és maximális keresztmetszeti méret megadásával tehetünk meg, mely kritérium a később ismertetendő szélsőérték keresés során is megjelenik, mint feltétel. Mivel a feladatban a „group”-ok számának megfelelő g db ismeretlen szelvény keresztmetszetet keresünk, ezért ennyi esetre szükséges a keresztmetszeti határok definiálása is. A keresztmetszeti adatok mértékegysége minden esetben cm^2 -ben értendő.

```

A = Array[a, g]; Do[a[i] = ., {i, 1, g}];

amins = Array[amin, {g}]; Do[amax[i] = 1, {i, 1, g}];

amaxes = Array[amax, {g}]; Do[amax[i] = 24, {i, 1, g}];

groups = Array[group, {e}]; Do[group[i] = i, {i, 1, e}];

```

Geometria adatok bevitele:

A geometriai adatok bevitele a csomóponti adatok megadásával történik egy rögzített origóhoz képest a háromdimenziós térben /points/, tehát csomópontonként három koordinátával ($1 \mapsto x$, $2 \mapsto y$, $3 \mapsto z$), ezután a szerkezetet alkotó rúdelemek a kezdő és vég csomópontjaik koordinátaival megadhatóak /elements/. Ezt követően megfelelő lépésekkel

felépíthető a bevitt adatokból a szerkezet geometriáját leíró koordináták mátrixa /mast/, melyet grafikus megjelenítéssel ki is rajzoltathatunk, hogy meggyőződjünk annak helyességéről. A geometriai adatok minden esetben cm-ben értendők. A program a felépített formában kettő és háromdimenziós szerkezet kezelésére egyaránt alkalmas.

```
points = Array[point, {cs, d}];
```

```
elements = Array[element, {e, 2}];
```

```
mast = {};
```

```
If[d == 3,
```

```
Do[
```

```
  b = element[i, 1]; j = element[i, 2];
```

```
  x1 = point[b, 1]; y1 = point[b, 2]; z1 = point[b, 3];
```

```
  x2 = point[j, 1]; y2 = point[j, 2]; z2 = point[j, 3];
```

```
  AppendTo[mast, Graphics3D[{AbsoluteThickness
    [a[group[i]] / amax[group[i]]], RGBColor[0, 0, 0],
    Line[{{x1, y1, z1}, {x2, y2, z2}}]}]];
  , {i, 1, e}];
```

```
,
```

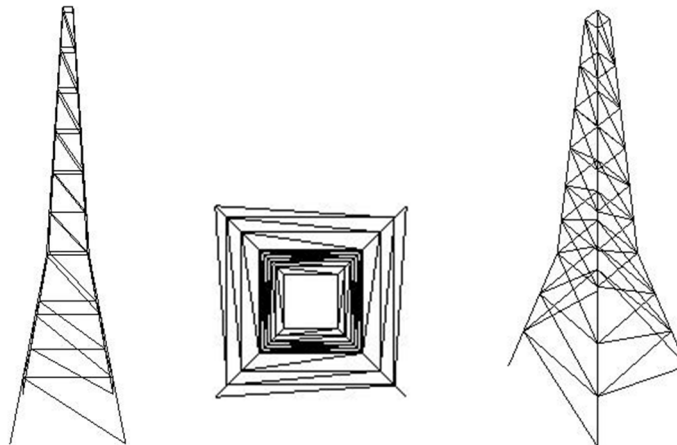
```
Do[
```

```
  bb = element[i, 1]; jj = element[i, 2];
```

```
  x1 = point[bb, 1]; y1 = point[bb, 2];
```

```
  x2 = point[jj, 1]; y2 = point[jj, 2];
```

```
  AppendTo[mast, Graphics[{RGBColor[0, 0], Line[{{x1, y1}, {x2, y2}}]}]];
  , {i, 1, e}];];
```



A szerkezetet alkotó deformálatlan rúdelem hosszak a kezdő pontból a végpontba mutató vektor hosszával számolhatóak, melyet a rudak kezdő és végpontjának koordinátaiból könnyedén származtathatunk /ElementLenght/.

```

ElementLenght = Array[LO, e];

Do[
  left = element[i, 1]; right = element[i, 2];
  LO[i] = 0;
  Do[
    LO[i] = LO[i] + (point[left, j] - point[right, j])^2;
    , {j, 1, 3}];

  LO[i] = Sqrt[LO[i]];
  , {i, 1, e}];

```

A későbbi számításokhoz szükség volt még a deformált rúd hosszak paraméteres definiálására is. Ezek meghatározásához először a szerkezet geometriáját leíró elmozdult csomópontokat /deformedpoints/ kell definiálni, mely oly módon valósul, meg hogy az elmozduló csomópontok koordináta értékeihez hozzárendelünk egy előre ismeretlen $x[k]$ értéket, ezt követően az elmozdult csomópontokból felépíthető az elmozdult szerkezet geometriáját leíró koordináták mátrixa /deformedmast/, majd a deformált rúd hosszak a deformálatlanokhoz hasonlóan származtathatóak /DeformedElementLenght/.

```

deformedpoints = Array[deformedpoint, {cs, d}];

Do[deformedpoint[i, j] = point[i, j], {j, 1, d}, {i, 1, cs}];

k = 0; Do[k = k + 1; deformedpoint[i, j] = deformedpoint[i, j] + x[k], {j, 1, d},
  {i, kcs, cs}];

deformedmast = {};

If[d == 3,
  Do[
    bb = element[i, 1]; jj = element[i, 2];
    x1 = deformedpoint[bb, 1]; y1 = deformedpoint[bb, 2]; z1 = deformedpoint[bb, 3];
    x2 = deformedpoint[jj, 1]; y2 = deformedpoint[jj, 2]; z2 = deformedpoint[jj, 3];

    AppendTo[deformedmast, Graphics3D[{RGBColor[1, 0, 0],
      Line[{{x1, y1, z1}, {x2, y2, z2}}]}]];
    , {i, 1, e}];
  ,

  Do[
    bb = element[i, 1]; jj = element[i, 2];
    x1 = deformedpoint[bb, 1]; y1 = deformedpoint[bb, 2];
    x2 = deformedpoint[jj, 1]; y2 = deformedpoint[jj, 2];

    AppendTo[deformedmast, Graphics[{RGBColor[0, 0],
      Line[{{x1, y1}, {x2, y2}}]}]];
    , {i, 1, e}];];

```

```

DeformedElementLenght = Array[LD, e];

Do[
  left = element[i, 1]; right = element[i, 2];
  LD[i] = 0;
  Do[
    LD[i] = LD[i] + (deformedpoint[left, j] - deformedpoint[right, j])^2;
    , {j, 1, 3}];

  LD[i] = Sqrt[LD[i]];
  , {i, 1, e}];

```

Csomóponti terhelések bevitele:

A csomóponti terhek megadása az elmozduló csomópontokhoz, a teher irányának megfelelően való hozzárendelésével történt. A csomóponti terhek indexe az ismeretlen csomóponti elmozdulások index számozásával azonos.

```

loads = Array[load, n];

load[1] = 5; load[2] = 5; load[3] = 5; load[4] = 5; load[5] = 5; load[6] = 5;
load[7] = 5; load[8] = 5; load[9] = 5; load[10] = 5; load[11] = 5; load[12] = 5;
load[13] = 5; load[14] = 5; load[15] = 5; load[16] = 5; load[17] = 5; load[18] = 5;
load[19] = 5; load[20] = 5; load[21] = 5; load[22] = 5; load[23] = 5; load[24] = 5;
load[25] = 5; load[26] = 5; load[27] = 5; load[28] = 5; load[29] = 5; load[30] = 5;
load[31] = 5; load[32] = 5; load[33] = 5; load[34] = 5; load[35] = 5; load[36] = 5;
load[37] = 0; load[38] = 0; load[39] = 0; load[40] = 0; load[41] = 0; load[42] = 0;
load[43] = 0; load[44] = 0; load[45] = 0; load[46] = 0; load[47] = 0; load[48] = 0;
load[49] = 0; load[50] = 0; load[51] = 0; load[52] = 0; load[53] = 0; load[54] = 0;
load[55] = 0; load[56] = 0; load[57] = 0; load[58] = 0; load[59] = 0; load[60] = 0;
load[61] = 0; load[62] = 0; load[63] = 0; load[64] = 0; load[65] = 0; load[66] = 0;
load[67] = 0; load[68] = 0; load[69] = 0; load[70] = 0; load[71] = 0; load[72] = 0;
load[73] = -2; load[74] = -2; load[75] = -2; load[76] = -2; load[77] = -2; load[78] = -2;
load[79] = -2; load[80] = -2; load[81] = -2; load[82] = -2; load[83] = -2; load[84] = -2;
load[85] = -2; load[86] = -2; load[87] = -2; load[88] = -2; load[89] = -2; load[90] = -2;
load[91] = -2; load[92] = -2; load[93] = -2; load[94] = -2; load[95] = -2; load[96] = -2;
load[97] = -2; load[98] = -2; load[99] = -2; load[100] = -2; load[101] = -2; load[102] = -2;
load[103] = -2; load[104] = -2; load[105] = -2; load[106] = -2; load[107] = -2; load[108] = -2;

```

Kinematikai terhek megadása:

Természetesen az optimalizálás során kinematikai terhek megadása is lehetséges, ez esetben a deformált és deformálatlan rúdhossz különbségekből adódó alakváltozást ki kell egészítenünk a kinematikai teherből adódó alakváltozással is, mely a következő alakot ölti például hőmérsékletváltozásból adódó teher esetén:

$$\Delta l_{\text{rúd}} = (l_{\text{deformed}} - l_0) + t = (l_{\text{deformed}} - l_0) + \alpha \times l_0 \times \Delta T \quad (4.1)$$

Egyensúlyi feltétel biztosítása:

Az optimalizálási feladat elvégzése során az egyensúlyi feltétel kielégítése a potenciális energia stacionaritási tétele alapján történik. Lineárisan rugalmas szerkezetek esetén az alábbi általános formában írhatjuk fel mátrix alakban:

$$\Pi(X, D) = \Pi_{\text{belső}}(X, D) - D^T F \quad (4.2)$$

ahol $\Pi(X, D)$ a geometriailag lineáris, illetve nemlineáris alakváltozási energia függvény, amelyet a tervezési változók és a csomóponti elmozdulások függvényében írunk fel. $D \in \mathbb{R}^N$ az általánosított elmozdulások vektora, $F \in \mathbb{R}^N$ pedig a külső erők vektora, ahol N az elmozdulási szabadságfok.

Egy rúdelemre vonatkozó alakváltozási (belső potenciális) energia függvény a lineárisan rugalmas anyagtörvényt figyelembe véve az alábbi formában írható.

$$\Pi_{\text{belső}} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M \frac{E_i A_i}{L_i} \Delta L_i^2 \quad (4.3)$$

ahol $E_i A_i (i = 1, 2, \dots, M)$ a rúd irányú merevség, E_i a rugalmassági modulus, A_i a rúd keresztmetszeti területe, M a rúdelemek száma. L_i a rúd hossza, ΔL_i pedig a rúd megnyúlását, illetve összenyomódását jelöli.

A rúd megnyúlását, illetve összenyomódását a csomóponti koordináták és a csomóponti elmozdulások függvényeként kapjuk.

$$\Delta L_i = \sqrt{(\Delta x_i + e_{i,x})^2 + (\Delta y_i + e_{i,y})^2 + (\Delta z_i + e_{i,z})^2} - \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2 + \Delta z_i^2} \quad (4.4)$$

ahol $\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i$ a rúdelem x, y, z irányú vetületét jelöli és a rúdvégi elmozdulások $e_{i,x}, e_{i,y}, e_{i,z}$ alapján határozzuk meg a háromdimenziós térben.

Az 4.4 elemi csomóponti elmozdulások függvényében felírt rúd alakváltozások az 4.3 alakváltozási energia függvénybe való behelyettesítésével, a belső potenciális energia a következő alakra módosul.

$$\Pi_{\text{belső}} = \frac{1}{2} E_i A_i \left(\sqrt{(\Delta x_i + \Delta x_{i,x})^2 + (\Delta y_i + \Delta u_{i,y})^2 + (\Delta z_i + \Delta u_{i,z})^2} - \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2 + \Delta z_i^2} \right)^2 \quad (4.5)$$

A külső potenciális energia a csomóponti erők munkájának ellentétjeként definiálható, tehát az erők és a vetületi irányukba eső elmozdulás szorzataként.

$$\Pi_{\text{külső}} = - \sum_{i=1}^N F_{i,d} \times e_{i,d} \quad (4.6)$$

A teljes potenciális energia a külső és a belső potenciális energia összege.

$$\Pi = \Pi_{\text{külső}} + \Pi_{\text{belső}} \quad (4.7)$$

A teljes potenciális energia függvény stacionaritási tétele alapján, az energia függvény szélsőértékét az elmozdulások szerinti parciális deriválással határozzuk meg, azaz a rendelkezésre álló egyenletek száma megegyezik az ismeretlen csomóponti elmozdulások számával.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Pi(e_1, e_2, \dots, e_n)}{\partial e_1} &= 0 \\ \frac{\partial \Pi(e_1, e_2, \dots, e_n)}{\partial e_1} &= 0 \\ &\vdots \\ \frac{\partial \Pi(e_1, e_2, \dots, e_n)}{\partial e_n} &= 0 \end{aligned} \quad (4.8)$$

Az 4.8 egyenletek kielégítésével a keresés során a magasabb rendű egyensúlyi feltételek teljesülése mindvégig biztosítható.

```
A = Array[a, g];

X = Array[x, n];

BM = 0;

Do[BM = BM + ((0.5 * modulus) / LO[i]) * a[group[i]] *
  (LD[i] - LO[i]) ^ 2, {i, 1, e}];

KM = 0;

Do[KM = KM + load[k] * x[k], {k, 1, n}];

EM = BM - KM;

Quiet[Do[a[i] = ., {i, 1, g}]];

Quiet[Do[x[i] = ., {i, 1, n}]];

eqns = Array[eqn, {n}];

Do[eqn[i] = D[EM, x[i]], {i, n}];

EQ = {}; Do[AppendTo[EQ, Quiet[eqn[i] == 0, Set::write]], {i, 1, n}];
```

Célfüggvény megfogalmazása:

Mint hogy az optimalizálás célja a szerkezet súlyának minimalizálása, így az előre ismeretlen keresztmetszeti területek és az ismert rúd hosszak, valamint az anyagsűrűség függvényében a szerkezet tömege a következők szerint fogalmazható meg.

$$w = \sum_{i=1}^M L_i \times A_i \times \rho_i, \quad \text{ahol } M \text{ az elemek száma} \quad (4.9)$$

```
w = 0; Do[w = w + a[group[i]] * LO[i], {i, 1, e}]; w = density * w;
```

A felírtaknak megfelelően kerül a szerkezet tömege a szélsőérték keresés közben a keresési eljárásba beépítésre, mint a minimalizálás célja.

Tervezési és állapot változókra vonatkozó korlátok:

A program során a célfüggvényben megfogalmazott súlyra irányuló minimalizálás, kiegészül a csomóponti elmozdulásokra és feszültségekre tett korlátokkal, valamint a keresztmetszeti adatok megadásánál bemutatott, a lehetséges keresztmetszeti megoldás alsó és felső határával. Az egyes rúdelemekben keletkező feszültségek a lineárisan rugalmas anyagtörvénynek megfelelően a rugalmassági modulus, és az ismeretlen csomóponti eltolódások függvényében felírhatóak, ahol az egyes rudak alakváltozását a már korábban megfogalmazott deformált és deformálatlan rúd hosszak különbségének segítségével felírhatjuk. Legegyszerűbb esetben a csomóponti elmozdulásokra és a feszültségekre egyaránt konstans határokat adunk meg. Későbbiekben bemutatásra kerül lokális Euler-féle stabilitás veszteségi feltétel beépítésének lehetősége is.

```
S = Array[s, e];
Do[s[i] = ((LD[i] - LO[i]) / LO[i]) * modulus, {i, 1, e}];

X = Array[x, n];
Do[x[i] = ., {i, 1, n}];

Do[smin[i] = -23.5, {i, 1, e}];

Do[smax[i] = 23.5, {i, 1, e}];

xmin = -10; xmax = 10;

AX = {}; Do[AppendTo[AX, a[i]], {i, 1, g}]; Do[AppendTo[AX, x[i]], {i, 1, n}];

FA = {}; Do[AppendTo[FA, amin[i] ≤ a[i] ≤ amax[i]], {i, 1, g}];

FX = {}; Do[AppendTo[FX, xmin ≤ x[i] ≤ xmax], {i, 1, n}];

FS = {}; Do[AppendTo[FS, smin[i] ≤ s[i] ≤ smax[i]], {i, 1, e}];
```

Alkalmazott megoldás keresési eljárások:

A megoldáskereséshez a Wolfram Mathematica programba beépített eljárások kerültek használatra, egy lokális, valamint egy globális minimumkeresési eljárás keretében. Mivel a keresési eljárások hatékonysága döntően befolyásolja az optimális eredmények hatékonyságát, ezért a kiválasztott keresési eljárások megválasztását gondos mérlegelés és kísérletezés előzte meg.

„FindMinimum” eljárás: egy lokális minimumkeresési eljárás. A keresés kezdete előtt meghatározható a keresési metódus kezdési pontja, valamint a keresést kiegészíthetjük a célfüggvényhez kapcsolódó megkötésekkel, melyek jelen feladat során a keresztmetszeti és állapot változókra tett korlátokat jelentették. Az eljárás alkalmas többváltozós lokális minimum keresésére. A keresés futtatásakor a módszer először lokalizálja a változók értékét, ezt követően kiszámolja a célfüggvény értékét a változókkal szimbolikus módon, majd a folyamatot ismételve numerikus úton számolja a függvényértékeket. A keresés az esetben áll le, ha változó kilép az előre meghatározott korlátaik közül, vagy ha eléri az előredefiniálható iterációk számát. Az eljárás kiegészíthető a keresést segítő metódusokkal is: "ConjugateGradient"; "PrincipalAxis"; "LevenbergMarquardt"; "Newton"; "QuasiNewton"; "InteriorPoint"; "LinearProgramming". A feladat során segédmetódusként az „InteriorPoint” simplex algoritmus került alkalmazásra. A segédmetódussal kiegészítve a keresés nem áll meg egy lokális minimum megtalálása esetén, hanem folytatja a keresést újabb megoldások után, majd a találatok kiértékelése után szolgáltatja a megoldást.

```
Quiet[Do[a[i] = ., {i, 1, g}]];

Quiet[Do[x[i] = ., {i, 1, n}]];

X0 = {}; Do[AppendTo[X0, {x[i], 0}], {i, 1, n}];

AX0 = {}; Do[AppendTo[AX0, {a[i], amax[i]}], {i, 1, g}];
Do[AppendTo[AX0, {x[i], 0}], {i, 1, n}];

SOLUTION = Quiet[FindMinimum[{w, {EQ, FA, FX, FS}},
    AX0, Method -> "InteriorPoint", MaxIterations -> 1000]];

Print["FindMinimum -> SOLUTION", SOLUTION];

Do[a[i] = Replace[a[i], SOLUTION[[2]]], {i, 1, g}];
Print["w = ", w]; Print["A = ", A];
Do[x[i] = Replace[x[i], SOLUTION[[2]]], {i, 1, n}];
Print["X = ", Chop[X, 0.00001]]; Print["S = ", S];

plot2 = Show[{mast, deformedmast}, Boxed -> False, ImageSize -> 300] Print[plot2];
```

„NMinimize” eljárás: numerikus úton minimalizálja a célfüggvényt a megadott változó, vagy változók szerint. A keresés a lokális keresési eljáráshoz hasonlóan kiegészíthető, a változókra vonatkozó megkötésekkel, melyek kifejezhetnek egyenlőséget, egyenlőtlenséget, vagy logikai megkötéseket. A módszer a hatékonyság javításának érdekében, kiegészíthető különböző metódusokkal. Az eljárás minden esetben a célfüggvény korlátokra vonatkozó globális minimumát szolgáltatja. A keresés addig folytatódik, amíg minimum helyre és a függvényértékre tett előzetes pontosság is kielégül. A lehetséges kiegészítő metódusok a következők lehetnek: „NelderMead” ; „DifferentialEvolution” ; „SimulatedAnnealing” ; „RandomSearch”. A feladat során segédmetódusként a „RandomSearch” algoritmus lett segítségül hívva a hatékonyság javítására.

A programok mindkét eljárással futatásra kerültek, a „FindMinimum” eljárás a feladat jellegéből adódóan, az „NMinimize”-hoz hasonlóan globális optimum megoldás biztosítására alkalmasnak bizonyult. A futási időben a két módszer között jelentős eltérések jelentkeztek, a numerikus NMinimize eljárás végrehajtása 5-6 órát is igénybe vett.

```
Quiet[Do[a[i] = ., {i, 1, g}]];

Quiet[Do[x[i] = ., {i, 1, n}]];

SOLUTION = Quiet[NMinimize[{w, {EQ, FA, FX, FS}}, AX,
  Method -> {"RandomSearch", Method -> "InteriorPoint",
    "SearchPoints" -> 1, "RandomSeed" -> 1989}];];

Print["NMinimize -> SOLUTION"];

Do[a[i] = Replace[a[i], SOLUTION[[2]]], {i, 1, g}];
Print["w = ", w]; Print["A = ", A];
Do[x[i] = Replace[x[i], SOLUTION[[2]]], {i, 1, n}];
Print["X = ", Chop[X, 0.0001]]; Print["S = ", S];

plot3 = Show[{mast, deformedmast}, Boxed -> False, ImageSize -> 300] Print[plot2];
```

4.2. Kapott eredmények formája

A program futtatását követően a beállítottaknak megfelelően a Wolfram Mathematica megoldásként a célfüggvény értékét, és annak változóinak értékét, tehát a minimális szerkezet tömegét, a keresztmetszeti méreteket, a szabad csomópontok elmozdulási értékeit, valamint a rudakban keletkező feszültségek listáját adja, így a program lefutását követően rögtön meg lehetett győződni a korlátok működésének helyességéről. A szemléltetés látványosabbá tételének érdekében végül a programmal ki lett rajzoltatva a terheletlen szerkezet, valamint a deformált szerkezet hálózata /mast and deformedmast/.

5. Groupok szerkezet súlyára gyakorolt hatásának vizsgálata

A folytonos keresztmetszeti változós program elkészítésével kapcsolatban feltétel volt az 4.1 pontban megfogalmazott módon a rúdelemek keresztmetszeti változóinak csoportokban való kezelésének előteremtése, ami meg is valósult. A program felépítését követően így lehetőség nyílt annak felderítésére, hogy a térbeli rácsos torony szerkezetek, milyen értékű súlycsökkenése érhető el, a rúdelemek különböző szinteken való azonos keresztmetszetű szelvénycsoportba való beosztásával. Vizsgált szerkezetként a program felépítéséhez is felhasznált lecsupaszított rácsos torony szerkezet került alkalmazásra, mivel általánosságban magában hordozza a rácsos tornyok jellemzőit, azok törzsének felépítését jól szemlélteti, és bár például távvezetéktartó oszlopok esetén gyakran kiegészül konzolokkal is, a szerkezet súlyának túlnyomó részét azonban minden esetben a törzs teszi ki.

A vizsgálat célja az eredményekből a szerkezetek kivitelezési folyamatát is figyelembe véve megállapítani, hogy mely group szint az, ameddig érdemes elmenni a szerkezet súlycsökkentésének érdekében. Ezen felül megállapítható, hogy a vizsgálat a nagyszámú futtatási változatok eredményeképpen (különböző csoportosítások, valamint állapot és tervezési változókra tett korlátok) hatékony mellékhatásként a program teszteléseként is felfogható.

Kiindulási adatok:

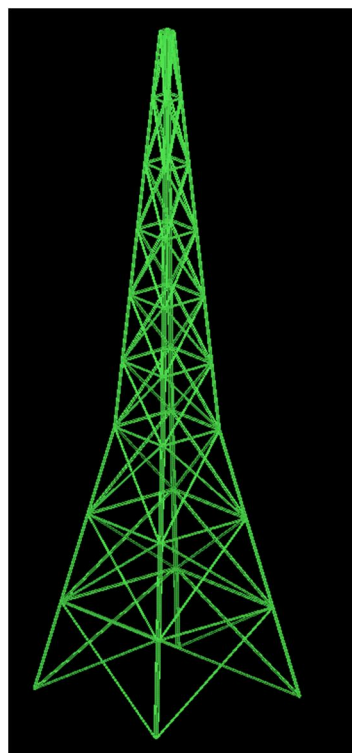
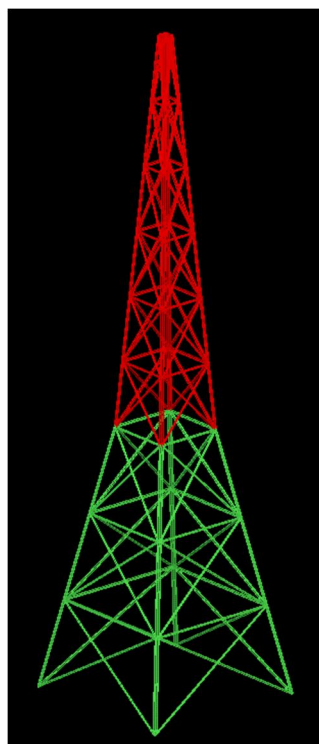
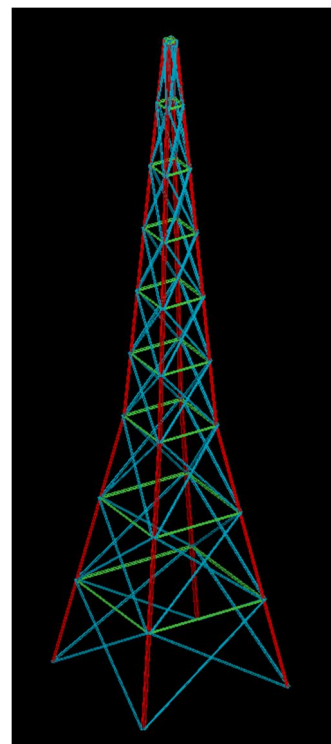
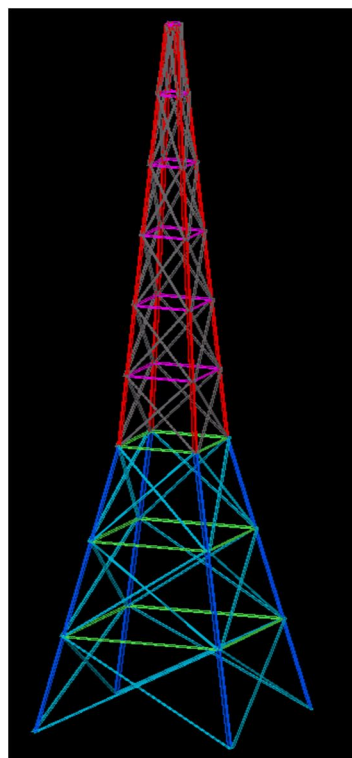
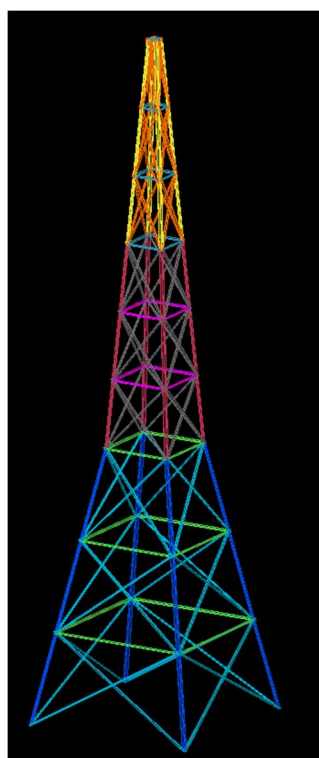
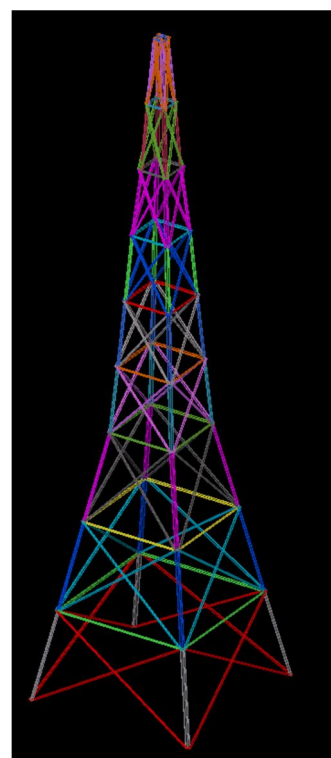
Anyagtulajdonságok:	
Sűrűség: 7850 kg/m^3	
Rugalmassági modulus: 21000 kN/cm^2	
Szerkezet geometriája	
Csomópontok száma: 40	
Elmozdulási szabadságfok: 108	
Elemek száma: 108	
Elemek hossza (szimetriának megfelelően értelmezve felfelé haladva):	$\{2,76;5,26;4;2,76;4,43;3;2,76;3,69;2;2;2,74;1,75;2;2,58;1,5;2;2,43;1,25;2;2,298;1;2;2,19;0,75;2;2,1;0,5\}$
Tervezési változók	
Vizsgált group esetek: G1 ; G2 ; G3 ; G4 ; G5 ; G6 ; G7	
Különböző keresztmetszeti változók száma: 1 ; 2 ; 3 ; 6 ; 9 ; 27 ; 108	
Tervezési korlát	
Keresztmetszeti méret korlát: $A_{\min}=1 \text{ cm}^2 \leq A_i \leq A_{\max}=24 \text{ cm}^2$	
Állapot tényezőkre vonatkozó korlátok	
Feszültséghorlát:	
1. eset: $S(S235)_{\min}=-23,5 \text{ kN/cm}^2 \leq S_i \leq S(S235)_{\max}=23,5 \text{ kN/cm}^2$	
2. eset: $S(S355)_{\min}=-35,5 \text{ kN/cm}^2 \leq S_i \leq S(S355)_{\max}=35,5 \text{ kN/cm}^2$	
Elmozduláshorlát:	
1. eset: $U(S235)_{\min}=-10 \text{ cm} \leq U_i \leq U(S235)_{\max}=10 \text{ cm}$	
2. eset: $U(S355)_{\min}=-10 \text{ cm} \leq U_i \leq U(S355)_{\max}=10 \text{ cm}$	
3. eset: $U(S235)_{\min}=-15 \text{ cm} \leq U_i \leq U(S235)_{\max}=15 \text{ cm}$	
4. eset: $U(S355)_{\min}=-15 \text{ cm} \leq U_i \leq U(S355)_{\max}=15 \text{ cm}$	
Célfüggvény $\rightarrow \min f(w) = \rho \Sigma A(\text{grop}(i)) * L(i), \{i, 1, 108\}$	

5.1. Tervezési és állapotváltozókra vonatkozó korlátok

A vizsgálat végrehajtása során a különböző groupok alkalmazása mellett, a számítások S235 és S355 anyagminőségű szerkezetekre is el lettek végezve, valamint az anyagminőségek változtatása mellett kiindulási pont volt még, a különböző állapottényezőkre vonatkozó korlátok a megoldásokra gyakorolt hatásának megfigyelése. Az alkalmazott esetek az állapottényezőkre vonatkozóan a következők voltak: csak feszültségkorlátok alkalmazása, feszültség és elmozdulás korlátok alkalmazása. Stabilitási feltétel megadását a szelvények alak nélkülisége nem teszi lehetővé, azonban a 6. pontban egy gyakorlati példán keresztül csőszelvényt feltételezve az előzőeket kiegészítve stabilitási korlátok megkötésének lehetősége is bemutatásra kerül a folytonos keresztmetszeti változós programban. Az elmozdulásokra tett határok értékmegválasztása vizsgálhatósági szempontokat szolgált, ennek megfelelően két darab konstans határérték esete került megválasztásra. A tervezési változókra vonatkozóan a keresések során a keresztmetszeti méretek minimum és maximum értéke lettek megszabva, a határok megállapításának célja a várható megoldások halmazának ésszerű korlátok közé való szorítása. A megoldáshalmaz várható maximum és minimum keresztmetszeti értékei pár darab próba programfuttatás után egyértelműen kirajzolódnak. A tervezési és állapotváltozókra tett korlátok számszerű adatait a kiindulási adatok táblázata tartalmazza.

5.2. Groupok definiálása

A vizsgálat céljának megfelelően az ismeretlen folytonos keresztmetszeti változókat groupokba csoportosítva történt az optimális szerkezeti súly keresése. A csoportosítás alapfeladatként abból indult ki, miszerint a szerkezetet alkotó összes rúd azonos keresztmetszettel rendelkezik, majd a keresztmetszeti változók száma folyamatosan növelve lett az egyes futtatott programokban, melynek másik szélső esetét az összes rúdelem különböző keresztmetszettel való definiálása jelentette. A köztes helyzetek statikai megfontolások, valamint megvalósítási lehetőségek mérlegelésének eredményeképpen álltak elő. Ennek megfelelően hét darab group került kialakításra, melyek a már ismertett korlátozó feltételek függvényében képezték a vizsgálat alapját. A kiindulási adatok táblázata tartalmazza az egyes groupok esetén az ismeretlen keresztmetszeti változók számát. Az egyes groupok sematikus szemléltetését a következő TeklaStructures programmal elkészített modellek mutatják, ahol az azonos színű rúdelemek képviseltek egy-egy keresztmetszeti változót.

**Group1****Group2****Group3****Group4****Group5****Group6**

Group7 esetén minden egyes rúd külön keresztmetszeti változóval rendelkezik.

5.3. Modellekben alkalmazott terhelések

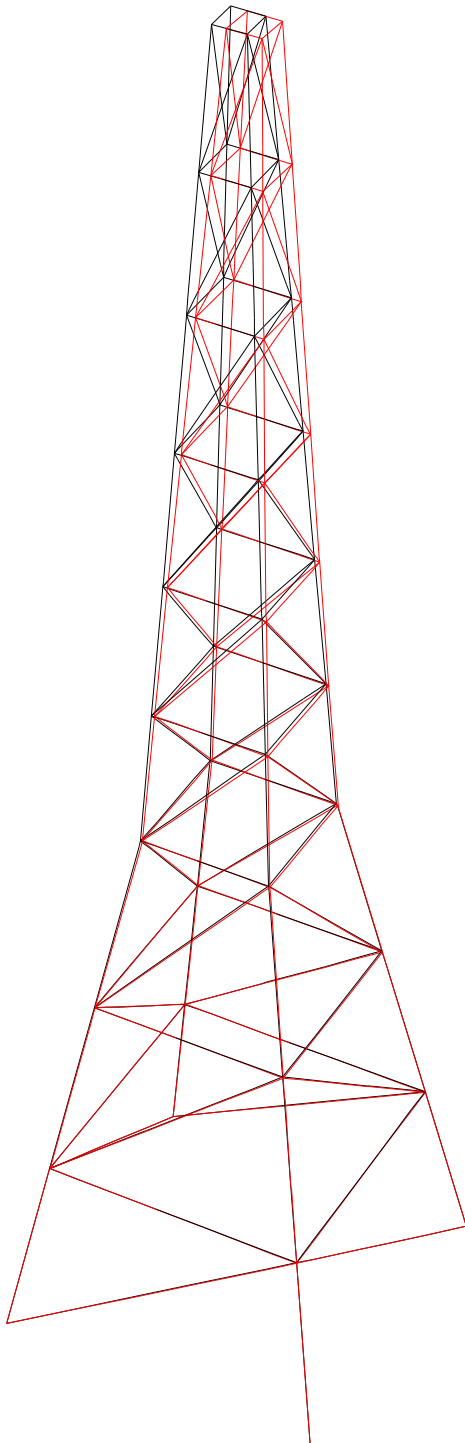
Mivel a vizsgálat tárgyát a gyakorlatban is alkalmazható, következtetések levonása vezérelte, ezért az alkalmazott terhek megállapítása, az előzőekben ismertetett tornyokra vonatkozó Eurocode szabványoknak megfelelően tett megfontolások alapján történt [11],[12],[13], melyeknek alkalmazott értékei szemléltetési okokat is figyelembe véve kerültek megállapításra. Az elővizsgálatok alapján, melyek során tényleges teherelemzési számítás is el lett végezve, cél volt, hogy a kialakuló igénybevételek lehetővé tegyék a különböző korlátok alkalmazása esetén kialakuló keresztmetszeti méretek különbségének megfigyelését, valamint hogy azok reális képet adjanak az alkalmazott szerkezet ténylegesen létrejövő terheléséről. Ezek alapján a számítási modellben, az első vizsgált teheresetben egy oldalirányú ($\theta=0^\circ$) állandóteherrel kiegészített szélőkéstehernak megfelelő csomóponti terhelések, míg a második teheresetben átlósirányú ($\theta=45^\circ$) állandóteherrel kiegészített szélőkéstehernak megfelelő csomóponti terhelések kerültek figyelembe vételre, melyek értékeit a következő táblázatok tartalmazzák. A vizsgálatok során kinematikai teher nem került alkalmazásra.

Csomóponti terhek - 1. Terhelési eset																				
Csomópont	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
X (kN)	0	0	0	0	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Y (kN)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Z (kN)	0	0	0	0	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
Csomópont	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
X (kN)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Y (kN)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Z (kN)	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2

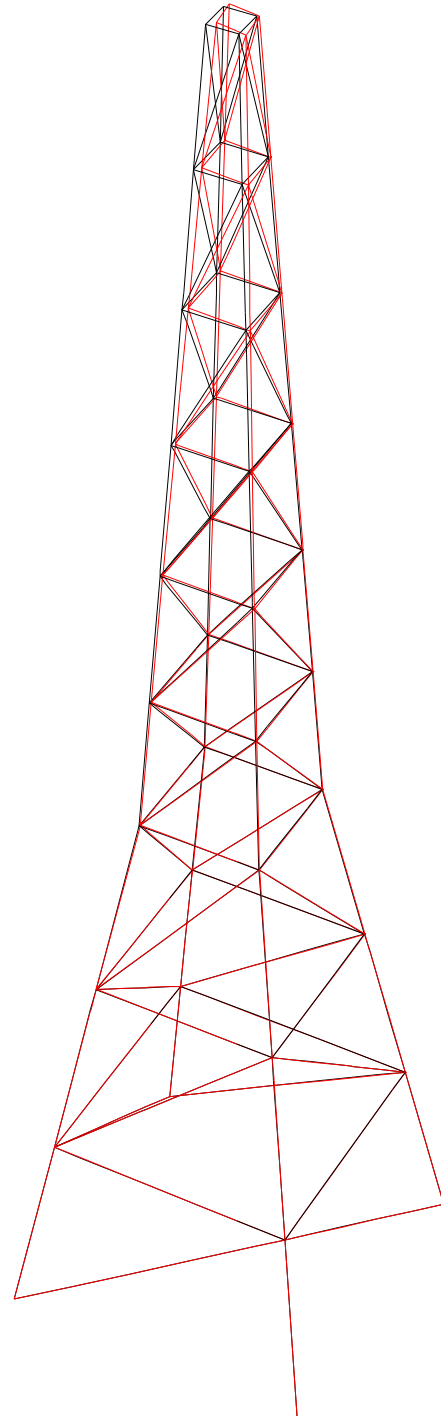
Csomóponti terhek - 2. Terhelési eset																				
Csomópont	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
X (kN)	0	0	0	0	3,5	3,5	0	3,5	3,5	3,5	0	3,5	3,5	3,5	0	3,5	3,5	3,5	0	3,5
Y (kN)	0	0	0	0	3,5	3,5	0	3,5	3,5	3,5	0	3,5	3,5	3,5	0	3,5	3,5	3,5	0	3,5
Z (kN)	0	0	0	0	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
Csomópont	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
X (kN)	3,5	3,5	0	3,5	3,5	3,5	0	3,5	3,5	3,5	0	3,5	3,5	3,5	0	3,5	3,5	3,5	0	3,5
Y (kN)	3,5	3,5	0	3,5	3,5	3,5	0	3,5	3,5	3,5	0	3,5	3,5	3,5	0	3,5	3,5	3,5	0	3,5
Z (kN)	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2

5.4. Szerkezeti modell alakváltozási ábrái

Alakváltozási ábra 1. Terhelési eset:



Alakváltozási ábra 2. Terhelési eset:



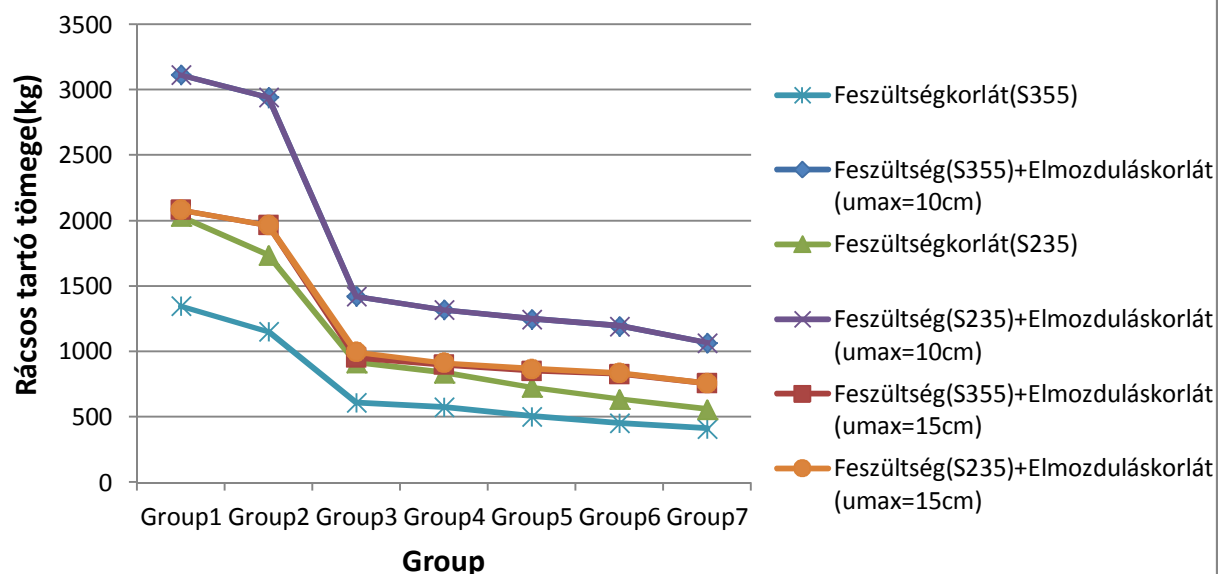
A továbbiakban a dolgozat nem szándékozik, a vizsgálat során futatott programok megoldásainak részletes közlésére, csupán az egyes esetekben előálló szerkezeti tömeg, valamint a keresztmetszeti méretek táblázatos formájában való közlésére. A részletes számítások megtekinthetők a Program mellékletben.

5.5. Vizsgálati eredmények ismertetése

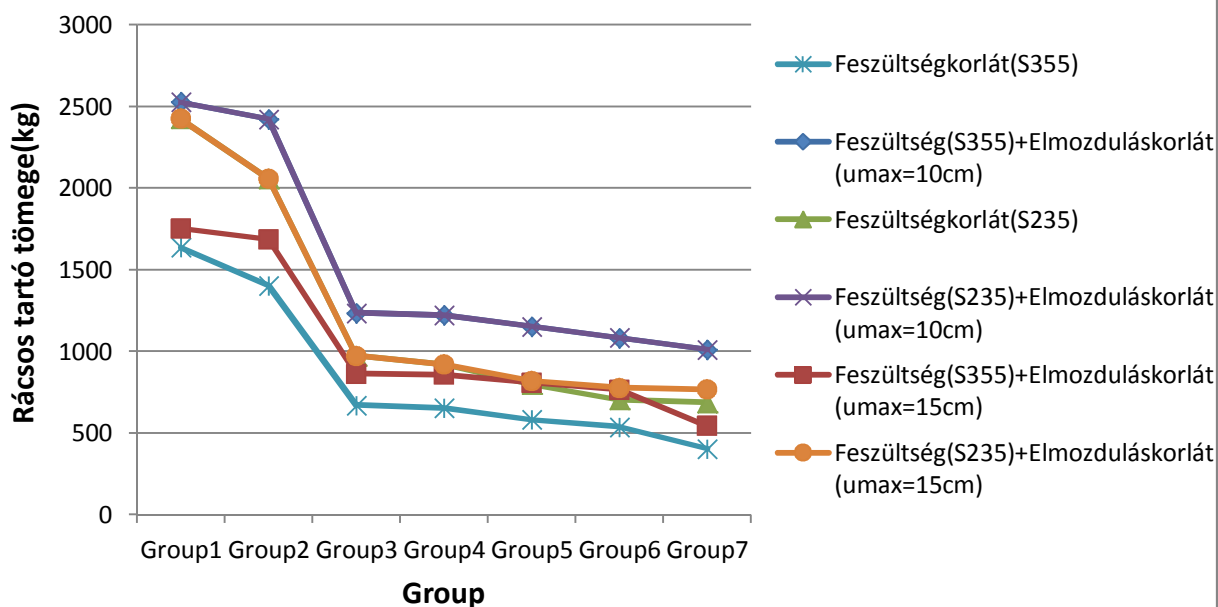
1. Terhelési eset					
S355 anyagminőség; csak feszültségkorlát			S355 anyagminőség; feszültség és elmozdulás korlát (u _{max} =10cm)		
	Szerkezet tömege(kg)	Keresztmetszetek (cm ²)		Szerkezet tömege(kg)	Keresztmetszetek (cm ²)
Group1	1347,87	{6,73}	Group1	3055,65	{15,26}
Group2	1152,65	{6,73;4,07}	Group2	2886,76	{17,07;9,82}
Group3	609,06	{6,73;1,49;1}	Group3	1392,6	{18,04;2,07;1,23}
Group4	575,83	{6,73;6,4;1;1,5;1;1}	Group4	1294,58	{20,8;14,04;1;2,72;1,08;1,32}
Group5	503,7	{6,73;6,39;2,95;1;1,5;1,18;1;1;1}	Group5	1224,83	{20,22;17,52;8,08;1;2,1;3,17;1,05;1,32;1,18}
Group6	453,05	{6,73;1;1;6,49;1,1;6,49;1;1;6,4;1,5;1,5,23;1,4;1,4,08;1,29;1,2,94;1,18;1;1,84;1,04;1;1;1;1}	Group6	1172,29	{17,84;1;1;18,79;1;1;21,09;1,7;2,39;19,21;1,82;1,27;16,69;2;1,26;13,88;2,2;1,24;10,22;2,5;1,21;7,15;2,95;1,14;3,53;3,58;1}
Group7	410,99	-	Group7	1050,06	-
S235 anyagminőség; csak feszültségkorlát			S235 anyagminőség; feszültség és elmozdulás korlát (u _{max} =10cm)		
	Szerkezet tömege(kg)	Keresztmetszetek (cm ²)		Szerkezet tömege(kg)	Keresztmetszetek (cm ²)
Group1	2033,59	{10,15}	Group1	3055,65	{15,26}
Group2	1737,07	{10,15;6,11}	Group2	2886,76	{17,07;8,82}
Group3	915,99	{10,15;2,26;1,45}	Group3	1395,91	{17,68;2,26;1,44}
Group4	836,88	{10,15;9,61;1;2,26;1,24;1,45}	Group4	1295,41	{20,69;13,97;1;2,71;1,23;1,44}
Group5	725,22	{10,15;9,6;4,42;1;2,26;1,78;1,24;1,45;1}	Group5	1226,1	{20,04;17,37;8;1;2,26;3,14;1,23;1,44;1,17}
Group6	636,95	{10,15;1;1;9,78;1;1;9,62;1;1,24;9,6;2,26;1,45;7,85;2,1;1,23;6,12;1,94;1;4,42;1,78;1;2,77;1,57;1;1,23;1,2;1}	Group6	1173,18	{17,77;1;1;18,71;1;1;21,16;9,2,38;19,12;2,25;1,44;16,61;2,1;1,26;13,82;2,19;1,24;10,68;2,49;1,21;7,12;2,94;1,13;3,51;3,57;1}
Group7	558,63	-	Group7	1056,06	-
S355 feszültség és elmozdulás korlát (u _{max} =15cm)		S235 feszültség és elmozdulás korlát (u _{max} =15cm)			
	Szerkezet tömege(kg)		Szerkezet tömege(kg)		
Group1	2041,48	Group1	2041,48		
Group2	1928,03	Group2	1928,03		
Group3	934,72	Group3	979,03		
Group4	882,83	Group4	898,74		
Group5	836,75	Group5	852,06		
Group6	812,09	Group6	820,59		
Group7	743,57	Group7	744,96		

2. Terhelési eset					
S355 anyagminőség; csak feszültségkorlát			S355 anyagminőség; feszültség és elmozdulás korlát (umax=10cm)		
	Szerkezet tömege(kg)	Keresztmetszetek (cm ²)		Szerkezet tömege(kg)	Keresztmetszetek (cm ²)
Group1	1634,99	{8,16}	Group1	2479,17	{12,38}
Group2	1399,88	{8,26;4,79}	Group2	2376,58	{13,74;8,62}
Group3	669,29	{8,27;1,06;1}	Group3	1212,15	{15,1;2,15;1,24}
Group4	651,78	{8,31;7,85;1;1,05;1;1}	Group4	1196,97	{16,96;13,46;2,03;2,24;1,41;1}
Group5	578,64	{8,46;8,04;3,63;1;1,06;1;1;1;1}	Group5	1129,83	{16,47;16,73;7,92;1,97;1,49;2,76;1,36;1;1}
Group6	533,31	{7,72;1;1;7,9;1;1;8,68;1,35;1,8,29;1,08;1;6,79;1;1,5,3;1;1;3,82;1;1;2,57;1;1;1,57;1,41;1}	Group6	1062,26	{13,67;1;1;15,06;1,48;1,6;18,32;3,19;1,57;18,31;1,27;1;16,05;1,4;1;13,52;1,63;1;10,61;1,96;1;7,17;2,49;1;3,12;3,38;1}
Group7	481,84	-	Group7	956,83	-
S235 anyagminőség; csak feszültségkorlát			S235 anyagminőség; feszültség és elmozdulás korlát (umax=10cm)		
	Szerkezet tömege(kg)	Keresztmetszetek (cm ²)		Szerkezet tömege(kg)	Keresztmetszetek (cm ²)
Group1	2423,27	{12,1}	Group1	2479,17	{12,38}
Group2	2055,67	{12,18;6,95}	Group2	2376,58	{13,74;8,62}
Group3	970,76	{12,16;1,59;1,14}	Group3	1212,15	{15,1;2,15;1,24}
Group4	918,28	{12,21;11,47;1;1,58;1,15;1}	Group4	1196,98	{16,96;13,46;2,03;2,24;1,41;1}
Group5	796,1	{12,32;11,59;5,02;1;1,59;1,31;1,16;1;1}	Group5	1129,96	{16,43;16,7;7,9;1,96;1,58;2,76;1,36;1;1}
Group6	702,43	{11,35;1;1;11,52;1;1;12,5;1;1,17;11,81;1,6;1,01;9,58;1,49;1;7,37;1,41;1;5,19;1,33;1;3,07;1,26;1;1,11;1,24;1}	Group6	1062,81	{13,63;1;1;15,02;1,48;1,6;18,27;3,19;1,56;18,26;1,58;1;16;1,47;1,13,48;1,63;1;10,58;1,96;1;7,15;2,48;1;3,11;3,37;1}
Group7	636,78	-	Group7	956,83	-
S355 feszültség és elmozdulás korlát (umax=15cm)		S235 feszültség és elmozdulás korlát (umax=15cm)			
	Szerkezet tömege(kg)		Szerkezet tömege(kg)		
Group1	1718,65	Group1	2423,27		
Group2	1654,33	Group2	2055,67		
Group3	862,76	Group3	970,76		
Group4	839,74	Group4	918,28		
Group5	793,01	Group5	808,34		
Group6	751,49	Group6	763,61		
Group7	535,35	Group7	710,93		

Vizsgált térbeli rácsos tartó optimális tömege Group-ok függvényében, az anyagminőség és vizsgált korlátok esetén
1. Terhelési eset



Vizsgált térbeli rácsos tartó optimális tömege Group-ok függvényében, az anyagminőség és vizsgált korlátok esetén
2. Terhelési eset



Kapott eredmények értékelése:

A diagramokból jól látszik, hogy a kiindulási állapothoz képest, ahol minden rúd azonos keresztmetszetet kapott, a group2 és group3 csoportosítás bevezetésével drasztikusan lecsökken a szerkezet tömege, majd a csoportosítások előre halad tával a csökkenés kezd mérséklődni a group3-tól kezdődően. Természetesen a csak feszültségkorlátot tartalmazó programok esetén a jobb anyagminőséggel, kisebb szerkezeti súly kapható. Az elmozdulás korlátok 10cm-re való megszabásával, a jelen példában jobb anyagminőség használatával már nem érhető el a szerkezet súlyának csökkentése, mivel az S355 anyagminőség esetén is az elmozdulások kordában tartásához, olyan méretű keresztmetszetek alkalmazása szükséges, melyekkel a rudakban keletkező feszültségek az S235 anyagminőség határfeszültsége alatt maradnak, így a két görbe minimális eltéréseket tartalmaz csupán. A megengedett elmozdulásokat 15cm-re növelve az első teheresetben a szerkezetek súlya, főként az S355 anyagminőségénél jelent nagyobb különbséget, hisz itt a jó anyagminőségnek köszönhetően a feszültség korlátok kisebb keresztmetszetekkel teljesülnek, mely nagyobb elmozdulásokat eredményez, így a korlát enyhülése szemmel láthatóan érzékelhető. Ezzel szemben az S235 esetén a nagyobb keresztmetszetek miatt az elmozdulások alig lépik át, a csak feszültség korlát esetén is a 15 cm-t. Az anyagminőség javulással az első teheresetben önmagában megint nem érhető el súlycsökkentés, csupán a saját korláthoz viszonyítva, nem úgy mint a második terhelési esetben, ahol az S355 anyagminőség esetén az elmozdulás korlát csökkenésével dominánsabbá válik a feszültségkorlát, a keresztmetszeti változók növekedésével azonban a differencia itt is hamar elcsendesedik.

A vizsgálatból egyértelművé vált, hogy a keresztmetszeteket mindenféleképpen érdemes csoportokba szedni, valamint az is nyilvánvaló, hogy a kivitelezési szempontokat is előlátásba helyezve, nem érdemes a csoportosítással nagyon nagyszámú keresztmetszeti változót sem alkalmazni, hanem meg kell találni a két véglet közötti egyensúlyt. A groupok egy szintje után már nem érhető el nagyobb mértékű súlycsökkentés, a sok különféle szelvényből elkészített szerkezet előállítás, viszont nagyobb költségeket eredményez, mert a rudak méretre vágása nem lesz anyagtakarékos, nem is beszélve a kivitelezhetetlenségéről. Az is kiderül, hogy a helyes mérték megválasztása rendkívül szerkezet és terhelés függő. Jelen esetben a főszárak a fő teherviselő elemek, így azok elválasztása a többi keresztmetszettől, már jelentős anyagspórolással jár, ezután a különböző szerepű rudak szétválasztásával már csak finomabb méretékben javítható a megoldás jósága. Ezt a tényt támassza alá az is, hogy a második terhelési esetben, mivel nagyobb a maximális rúderő, mint az első terhelési esetben,

így ott a kezdeti súlycsökkenés csak feszültség korlát alkalmazása esetén meredekebben történt, mint az első esetben. Bár a vizsgálat el lett végezve a group6 és group7 esetekre is, kivitelezés szempontjából ezen megoldások nem jöhetnek szóba. Mivel a felső csonka kúp él hossza nagyobb mind 12 méter, így annak két részre való szétválasztása egy reális megoldás részét képezheti, így az optimális csoportosításként a group5 javasolható, de group4 és group3 is már hasonló eredményeket produkál. Érdekes megjegyezni az anyagminőséggel kapcsolatos észrevételeket, miszerint az elmozdulási korlátok esetén annak szerepe kevésbé fontos, így a térbeli rácsos tartóknál, ahol azok robosztus méreteiből adódóan az elmozdulások kordában tartása nagy feladatot jelent, átgondolandó, hogy érdemes-e a költségesebb jobb minőségi anyag használata.

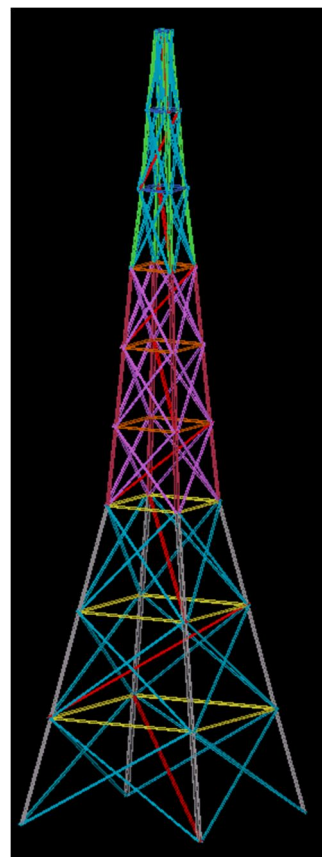
A vizsgálat melynek célja a keresztmetszetek csoportba rendezésével, a szerkezet optimális súlyának csökkentése volt, elérte célját. A kapott eredmények egy hasonló szerkezet esetén felhasználhatóak megfontolásként. A folytonos keresztmetszeti változókkal elvégzett kísérlet hiányossága azonban, hogy a keresztmetszetek folytonossága miatt stabilitási feltétel nem építhető a programba, mivel ahhoz a keresztmetszet alakjának definiálására is szükség van, így az elkészített programok tényleges tervezésre önmagukban nem alkalmasak.

Az eredményeket és a vizsgált szerkezet felépítését tekintve felmerült annak kérdése, hogy a szóban forgó szerkezet testátlókkal való merevebbé tétele, milyen hatást gyakorol a szerkezet optimális súlyára, nem-e érhető el vele javulás, hiszen a fő keresztmetszeti növekedést az elmozdulások okozzák, így a jobb alaktartósság biztosítása potenciális lehetőségként szolgálhat. Ennek vizsgálatára a kapott tanulságoknak megfelelően egy a testátlókkal kiegészített szerkezet egy group8-as csoportosítással futtatásra került, majd ezt követően a kiindulási szerkezet group5 esetén kapott eredményekkel történt az összehasonlítása.

5.6. Testátlókkal ellátott modell vizsgálata

Kiindulási adatok:

Anyagtulajdonságok:	
Sűrűség: 7850 kg/m ³	
Rugalmassági modulus: 21000 kN/cm ²	
Szerkezet geometriája	
Csomópontok száma: 40	
Elmozdulási szabadságfok: 108	
Elemek száma: 116	
Elemek hossza(szimmetriának megfelelően értelmezve felfelé haladva):	{2,76;5,26;4,6;9,2;76;4,43;3,5;62;2,76;3,6;9,2;4,43;2,2;74;1,75;3,32;2,2;58;1,5;3,05;2,2;43;1,25;2,79;2,2;298;1,2;56;2,2;19;0,7;5,2;35;2,2;1,0;5,2;19}
Tervezési változók	
Vizsgált group eset: G8	
Különböző keresztmetszeti változók száma: 10	
Tervezési korlát	
Keresztmetszeti méret korlát: $A_{\min}=1 \text{ cm}^2 \leq A_i \leq A_{\max}=24 \text{ cm}^2$	
Állapottényezőkre vonatkozó korlátok	
Feszültséghorlát:	
1. eset: $S(S235)_{\min}=-23,5 \text{ kN/cm}^2 \leq S_i \leq S(S235)_{\max}=23,5 \text{ kN/cm}^2$	
2. eset: $S(S355)_{\min}=-35,5 \text{ kN/cm}^2 \leq S_i \leq S(S355)_{\max}=35,5 \text{ kN/cm}^2$	
Elmozduláshorlát:	
1. eset: $U(S235)_{\min}=-10 \text{ cm} \leq U_i \leq U(S235)_{\max}=10 \text{ cm}$	
2. eset: $U(S355)_{\min}=-10 \text{ cm} \leq U_i \leq U(S355)_{\max}=10 \text{ cm}$	
Célfüggvény $\rightarrow \min f(w)=\rho \Sigma A(\text{grop}(i))*L(i), \{i,1,116\}$	



	1. Terhelési eset				2. Terhelési eset			
	S355		S235		S355		S235	
Testátló nélküli szerkezet	503,7	1224,83	725,22	1226,1	578,64	1129,83	796,1	1229,96
	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Testátlós szerkezet	535,35	1183,77	753,91	1186,75	495,6	704,56	674,44	707,23
Súlycsökkenés:	-6,28%	3,35%	-3,96%	3,21%	14,35%	37,64%	15,28%	42,50%

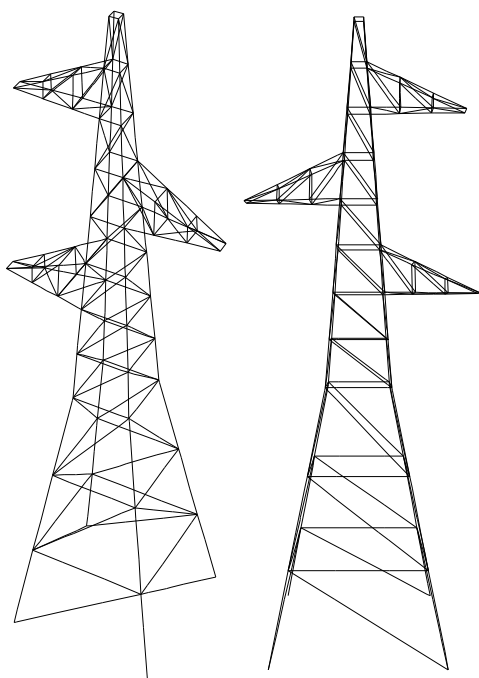
Az eredményekből megállapítható, hogy jelentős javulás csak a 2. tehereset figyelembe vételekor jelentkezik, sőt az 1. teheresetnél az elmozdulás korlát nélkül, még romlás is észlelhető, annak köszönhetően, hogy az átlók nem dolgoznak, tömegük azonban így is van. Mivel azonban a tervezés során mindkét teheresettel számolni kell, érdemes lehet a testátlók használata. Az elmozdulási korlátok beléptekor akár 42,5%-os súlycsökkenés is elérhető az alkalmazásukkal, valamint a jelenleg nem vizsgált stabilitási feltételek teljesülése szempontjából is érdemes lehet alkalmazásuk, melyet mindig az adott szerkezettől, annak funkciójától és terhelési eseteitől függően kell megfontolni.

6. Program tesztelése összetettebb geometriájú tervezési példákon, stabilitási feltétel megadása megköötésekkel

A következőben az elkészített folytonos keresztmetszeti változós program, ténylegesen előforduló tervezési feladatokra való alkalmazhatóságának tesztelése következik. Az eredmények közlése a kiinduló adatok függvényében a részletek mellőzve történik. A részletes számítások megtekinthetők a Program mellékletben. Megjegyzendő, hogy a végrehajtott tesztek a program alkalmazhatóságának vizsgálatát szolgálják, az ennek reprezentálására szolgáló szerkezetek tényleges tervezésekor részletes teherelemzés, valamint a valamennyi lehetséges terhelési esettel való futtatásra volna szükség, hogy minden egyes rúdelem a lehetséges ráható mértékadó terheknek megfelelő optimális mérettel rendelkezzen.

6.1. Távfűtőtor oszlop modell

A vizsgált távfűtőtor oszlop rúdelemeinek keresztmetszeti változói az előző tapasztalatoknak megfelelően lettek csoportosítva, 11 különböző keresztmetszeti változóba. Az oszlop magassága 20m, konzolok kinyúlása 2,5m, a főtartó befoglaló térfogata egy 5x5m-es négyzetből 2x2xm-es négyzetbe átmenő 8m magas, majd arra épülve egy 2x2m-es négyzetből 0,3x0,3m-es négyzetbe átmenő 12m magas csonka kúp. Az anyagminőség a tapasztaltaknak megfelelően S235-nek lett választva, mivel az előzőekben világossá vált, hogy szigorúnak mondható elmozdulás korlátok esetén a jobb anyagminőséggel nem érhető el súlycsökkenés.



Anyagtulajdonságok:	
Sűrűség:	7850 kg/m ³
Rugalmassági modulus:	21000 kN/cm ²
Szerkezet geometriája	
Csomópontok száma:	78
Elmozdulási szabadságfok:	222
Elemek száma:	225
Tervezési változók	
Vizsgált group eset:	G9
Különböző keresztmetszeti változók száma:	11
Tervezési korlát	
Keresztmetszeti méret korlát: $A_{\min}=1 \text{ cm}^2 \leq A_i \leq A_{\max}=100 \text{ cm}^2$	
Állapottényezőkre vonatkozó korlátok	
Feszültségkorlát:	
$S(S235)_{\min}=-23,5 \text{ kN/cm}^2 \leq S_i \leq S(S235)_{\max}=23,5 \text{ kN/cm}^2$	
Elmozduláskorlát:	
$U(S235)_{\min}=-5 \text{ cm} \leq U_i \leq U(S235)_{\max}=5 \text{ cm}$	
Célfüggvény	$\rightarrow \min f(w) = \rho \sum A(\text{grop}(i)) * L(i), \{i, 1, 225\}$

Alkalmazott tehereset (szélirány→szemből szél): (2,5kN Y irányú csomóponti terhek) + (-1,5kN Z irányú csomóponti terhek) + konzolvégeken koncentrált teher (-5kN Z irányú csomóponti teher)

Szerkezet optimális súlya a korlátozó feltételeknek megfelelően: 3776,79kg

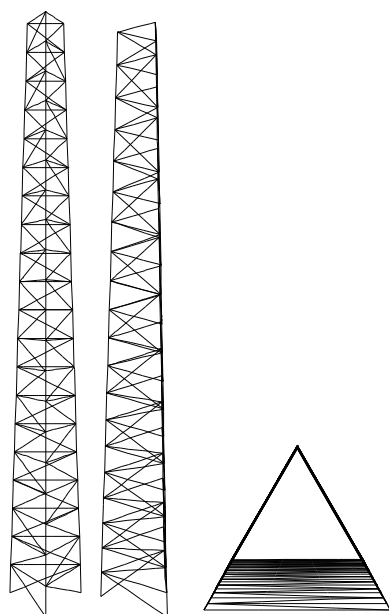
Optimális keresztmetszetek (cm²):

{A1=39,59;A2=35,14;A3=14,55;A4=4,84;A5=7,53;A6=18,78;A7=5,09;A8=6,46;A9=12,91;A10=12,72;A11=5,32}

Megjegyzendő, hogy a kapott eredményeket, stabilitási feltételek tartalma nélkül nem ildomos önmagukban tervezéshez való felhasználásra, de elővizsgálatok és a szerkezet viselkedésének megismeréséhez hasznos adatként szolgálnak.

6.2. Adótorony modell

A következő gyakorlatban előforduló példa egy tipikus adótorony kialakítás, melynek befoglaló térfogata egy 3m oldalhosszúságú egyenlőszárú háromszögből, 1,5m oldalhosszúságú egyenlőszárú háromszögbe átmenő hasáb, magassága 30m. Az adótorony rúdelemei 9 keresztmetszeti csoportot alkotnak, melyek a torony magasságilag három részre osztásával, és azon belül az elemtípusonként előálló három féle rúdelemekből adódtak.



Anyagtulajdonságok:
Sűrűség: 7850 kg/m ³
Rugalmassági modulus: 21000 kN/cm ²
Szerkezet geometriája
Csomópontok száma: 63
Elmozdulási szabadságfok: 180
Elemek száma: 180
Tervezési változók
Vizsgált group eset: G10
Különböző keresztmetszeti változók száma: 9
Tervezési korlát
Keresztmetszeti méret korlát: $A_{\min}=1 \text{ cm}^2 \leq A_i \leq A_{\max}=100 \text{ cm}^2$
Állapottényezőkre vonatkozó korlátok
Feszültséghorlát:
$S(S235)_{\min}=-23,5 \text{ kN/cm}^2 \leq S_i \leq S(S235)_{\max}=23,5 \text{ kN/cm}^2$
Elmozduláshorlát:
$U(S235)_{\min}=-5 \text{ cm} \leq U_i \leq U(S235)_{\max}=5 \text{ cm}$
Célfüggvény $\rightarrow \min f(w)=\rho \sum A(\text{grop}(i)) \cdot L(i), \{i,1,180\}$

Alkalmazott tehereset (szélirány→szemből szél): (1,5kN X irányú csomóponti terhek) + (-3kN Z irányú csomóponti terhek)

Szerkezet optimális súlya a korlátozó feltételeknek megfelelően: 4609,03kg

Optimális keresztmetszetek (cm²):

{A1=89,51;A2=50,54;A3=15,97;A4=1;A5=1;A6=1;A7=5,93;A8=5,65;A9=4,56}

6.3. Lokális stabilitási feltétel programba való beépítése

Az adótornyok készítése gyakran történik csőszelvényekből, melyek geometriájából adódóan bizonyos megkötéseket téve, a nyomott rúdelemekre vonatkozó Euler-féle kritikusfeszültség kifejezhető, csak a keresztmetszeti terület függvényében, így beépíthető a keresztmetszeti változók folytonossága ellenére stabilitási feltétel. A képlet az alábbi formában fogalmazható meg, ahol $\alpha=t/D$, azaz a falvastagság és a szelvény átmérőjének hányadosa, melyet a példában $\alpha=0,2$ -re megválasztva, a horpadási stabilitásvesztés vizsgálat elkerülhető, a kellően nagy falvastagság biztosítása által.

$$\sigma_{E,i} = -\frac{\pi \times E_i}{4 \times L_i^2} \times \frac{(0,5 - \alpha + \alpha^2)}{(\alpha \times (1 - \alpha))} \times A_i \leq \sigma_{S,i} \leq \sigma_H \quad (6.1)$$

```
Do[smin[i] = -((modulus * 3.14159) / (4 * LO[i]^2)) *  
  ((0.5 - alfa + alfa^2) / (alfa * (1 - alfa))) *  
  a[group[i]], {i, 1, e}];
```

A képletben a már ismertetett α értéken kívül, az E a rugalmassági modulus, A_i pedig az egyes rúdelemek keresztmetszeti területe.

Amennyiben α értéke nem teszi lehetővé a horpadási vizsgálat megkerülését, az erre vonatkozó stabilitásvesztési kritikus feszültség is kifejezhető a keresztmetszeti terület függvényében.

$$\sigma_{SB,i} = -\frac{\left[\frac{2 \times E_i}{(1 - v_i^2)} \times \alpha^3 \right]}{A_i} \leq \sigma_{S,i} \leq \sigma_H \quad (6.2)$$

```
Do[smin[i] = -(((2 * modulus) / (1 - v[i]^2)) * (alfa^3)) /  
  a[group[i]], {i, 1, e}];
```

A képletben $\alpha=t/D$ a csőszelvény falvastagságának és átmérőjének a hányadosa, E a rugalmassági modulus, v a Poisson tényező, A_i az adott rúdelem keresztmetszeti területe.

A horpadási kritikus feszültség beépítésével ellenőrizhető, hogy $\alpha=0,2$ esetén a horpadási stabilitási vesztes vizsgálat valóban figyelmen kívül hagyható-e. A kritériumnak azonban önmagában, mint a nyomott rudakra vonatkozó feszültségkorlát nincs értelme, hiszen az efféle stabilitás vesztes forma a nagyobb átmérőjű keresztmetszetek esetén válik jelentőssé, ezért vizsgálatára a lokális Euler-féle kihajlási korláttal egyidejűleg kerül sor. Mindkét stabilitásvesztési formát tartalmazó feszültségkorlát a következő alakban fogalmazható meg.

$$\text{MAX}[-\sigma_{SB,i}; -\sigma_{E,i}] \leq \sigma_{S,i} \leq \sigma_H \quad (6.3)$$

```

Do[smin[i] = Max[
  - ((2 * modulus) / (1 - v^2)) * (alfa^3) / a[group[i]],

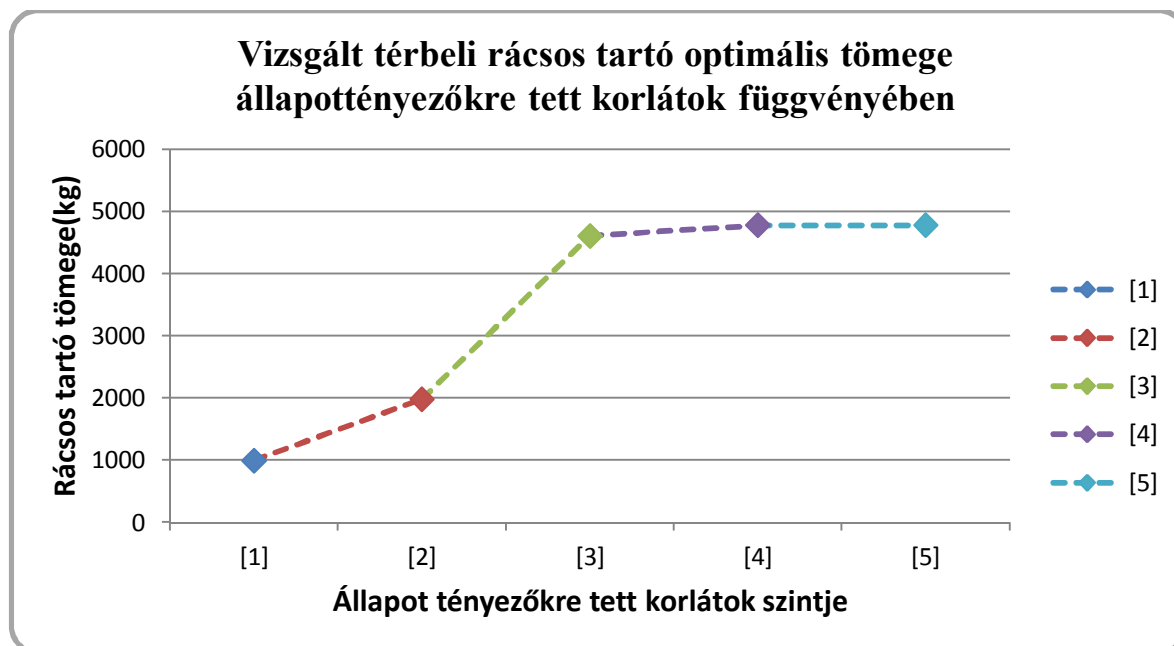
  - ((modulus * 3.14159) / (4 * LO[i]^2)) *
    ((0.5 - alfa + alfa^2) / (alfa * (1 - alfa))) * a[group[i]]],
  {i, 1, e}]

```

A kapott optimális megoldások a különböző korlátoktól függően a következő képen alakultak a futtatott programokban, az adótorony vizsgálata során.

	Optimális szerkezeti tömege (kg)	Keresztmetszeti méretek (cm ²)
Feszültségkorlát [1]:	991,85	{17,91;9,58;2,99;1;1;1;1,32;1;1}
Feszültség és stabilitás korlát [2]:	1981,96	{16,41;12;6,72;2,1;1,75;1,35;9,57;7,17;4,31}
Feszültség és elmozdulás korlát [3]:	4609,03	{89,51;50,54;15,97;1;1;1;5,93;5,65;4,56}
Feszültség, elmozdulás, lokális kihajlási stabilitási korlát [4]:	4783,17	{85,81;48,46;15,31;2,07;1,73;1,34;9,61;7,14;4,37}
Feszültség, elmozdulás, lokális kihajlási+horpadási($\alpha=0,2$) stabilitási korlát [5]:	4783,17	{85,81;48,46;15,31;2,07;1,73;1,34;9,61;7,14;4,37}

A bemutatott példa jól szemlélteti a stabilitási probléma kezelésének fontosságát, valamint a korlátozó feltételek különböző szintjeinek hatását. Amint látható $\alpha=0,2$ értéket megválasztva a csőszelvényekre, a horpadási stabilitásvesztési forma valóban kihagyható a feltételrendszerből, tehát helyes volt a feltételezés. A program jelen formájában és az adott szelvénnel való vizsgálatra már kifejezetten alkalmas. A szerkezet globális stabilitás vesztese, azonban még mindig nem került vizsgálatba véve, annak kezelésére útkövető heurisztikus módszerek javasoltak, melyek lekövetik a szükséges szintig a szerkezet egyensúlyi útját.



6.4. Tovább lépési lehetőségek megfontolása

A tapasztaltakból egyértelműen kirajzolódik, hogy az eddigi vizsgálatokon túl a további eredmények eléréséhez, elkerülhetetlen a keresztmetszeti változók szelvény alakkal való felruházása, más néven a szerkezetek súly szerinti optimalizálásának diszkrét változókkal való kezelése. Ez volna a módja annak, hogy a szerkezetek globális és lokális stabilitásvesztési viselkedéseit is kezelni tudjuk, az ismertett elmozdulás és feszültségre vonatkozó korlátok mellett, valamint a konkrét gazdasági megfontolások is konkrét szelvény méreteket, és árkalkulációkat kívánának meg.

A következő lépésben a körvonalazódott iránynak megfelelően, az optimalizálási program diszkrét tervezési változók kezelésére való átalakításának folyamata következik. A folyamat első lépéseként az adott témában megjelent publikációk feltérképezésére és áttanulmányozására került sor, majd ezt követően kerültek vizsgálat alá a dolgozatban eddig bemutatott program átalakításának lehetséges megoldási lehetőségei.

7. Diszkrét keresztmetszeti változós súly szerinti optimalizálás a folytonos megoldásra épülve

A keresztmetszetek diszkrét módon való kezelése esetén, az adott szerkezet keresett szelvényméretei a szerkezet jellegének megfelelő szelvénytárból kerülnek kiválasztásra. Az így kapott megoldások közvetlenül felhasználhatóak a tervezési folyamatokban, valamint azonnali árkalkulációt, és mérlegelési lehetőségeket tesznek lehetővé. A keresztmetszetek alakkal való felruházását a stabilitási vizsgálatok mélyebben való kezelése is szükségessé teszi. A jelen pontban a folytonos megoldásra épülő diszkrét megoldás generálásának folyamata kerül bemutatásra két módszer segítségével, majd azok hatékonyságának összevetésével. A szemléltetés érdekében mindkét esetben a feltételrendszerek Mathematica programban megfogalmazott alakja is közlésre kerül.

A megoldás keresési lépések megadása előtt azonban szükség volt egy szelvénytár definiálására, mely a keresés alapját képezi. A programok alkalmazási területének megfelelően a futtatandó programokba egy egyenlőszárú szögacél, és egy csőszelvény keresztmetszeteket felsorakoztató szelvénytár egyike került beépítésére. A szerkezet súlyára természetesen kihatással van a szelvénytár „sűrűsége”, hiszen sokelemű, a szomszédos szelvények közötti kis differenciával rendelkező szelvénytár esetén nagy a választék, így az egyes groupokhoz a megszabott korlátoknak megfelelően a folytonos megoldáshoz közeli szelvény hozzárendelése lehetséges. Ritkább szelvénytár esetén azonban gyakran a szükségesnél jóval nagyobb szelvény alkalmazása is szükségessé válhat, ha a korlátok által megszabott folytonos keresztmetszeti terület épp két egymás között nagy differenciával rendelkező szelvény egyikének közelébe kerül.

A programok kialakításának tesztelése során, a folytonos megoldások határait figyelembe véve, az egymás közötti méretkülönbségeket tekintve aránylag sűrű szelvénytárak kerültek alkalmazásra. Egy valós tervezési feladat esetén azonban nem rendelkezünk a lehetséges felhasználás szempontjából a szabványban fellelhető valamennyi szelvénymérettel, hanem csupán a környező piaci kínálatnak, vagy a beruházás egyéb körülményeitől függően korlátozottabb méretlehetőségekkel. Ezen szelvénytár ritkulás hatását könnyedén szemléltethetjük a gyakorlati példák egyikét megvizsgálva, ha a beszerezhető szelvénylehetőségeket (szelvényméret, anyagminőség, költségvizsgálat esetén a szelvényárak mellett figyelembe veendő a szállítási költség, méretre vágási költség) illetően végrehajtunk egy rövid kutatást, kitérve az általában Magyarország területén, vagy ha pontosabbak akarunk lenni a beruházás lehetséges helyszínét számításba véve specifikusan egy kisebb területre összpontosítva a megvásárolható szelvényméreteket illetően.

7.1. Ökölszabály

Az ököl szabály alapvető gondolata, hogy megkeresi az adott group eredményeül kapott keresztmetszeti területhez legközelebbi azon, a katalógusban szereplő keretszelvényt, melynek területe éppen nagyobb, mint a folytonos megoldás. Legyen az adott i -edik elem keresztmetszetének folytonos eredménye $A_{[G[i]]}$, ahol $\{i, 1, e\}$ és $group[i]$ értékek a groupok számnak megfelelő $\{group[i], 1, G\}$ G számú különböző értéket vehetnek fel. A katalógus j -edik tagja pedig $C[j]$, ahol a katalógus elemek száma $\{j, 1, c\}$, ekkor a feltétel az alábbi egyszerű alakban fogalmazható meg:

$$\text{Ha } C_j \leq A_{[G[i]]} \text{ és } A_{[G[i]]} \leq C_{j+1}, \text{ akkor } A_{[G[i]]} = C_{j+1}, \text{ ahol } \{j, 1, c-1\} \text{ és } \{i, 1, e\} \quad (7.1)$$

Ezt követően szükség van még az új szelvény területekkel a csomóponti elmozdulások és feszültség értékek újra számolására az egyensúlyi egyenletek újbóli megoldásával, kritériumok megadása azonban már nem szükséges, hiszen a keresztmetszetek felfelé való kerekítésével az elmozdulás és feszültség korlátok automatikusan kielégülnek.

Ezt követően még beépítésre kerül egy második lépés is, ami szerint az újonnan kapott eredmények alapján a program kísérletet tesz a keresztmetszetek csökkentésére. Ezt oly módon teszi, hogy amennyiben egy elem feszültsége a feszültség határok között van, az alkalmazott szelvénynél egyel kisebb méretű katalógus érték behelyettesítésével is újra számolja a szerkezet feszültségeit, majd ellenőrzi, hogy a szerkezet elemei így is a megengedett korlátok között maradnak-e. A feltétel az előző jelölésekkel élve, valamint az egyes elemek feszültség értékeinek, és a feszültségkorlátok bevezetésével, ha az i -edik elem feszültsége $S[i]$, ahol $\{i, 1, e\}$ és a feszültség korlátok S_{min} és S_{max} konstans értékek, (stabilitás korlát esetén S_{min} az előzőekben ismertetett formára módosul) az alábbi módon írható fel:

$$\text{Ha } C_j = A_{[G[i]]} \text{ és } S_{min} \leq S_i \leq S_{max}, \text{ akkor } A_{[G[i]]} = C_{j-1}, \text{ ahol } \{j, 1, c\} \text{ és } \{i, 1, e\} \quad (7.2)$$

A második lépés természetesen nem mindig képes a feladat megoldásán javítani, hatékonysága függ a szerkezet statikai határozott vagy határozatlan voltától, valamint a groupok számától, és az alkalmazott korlátoktól és a katalógus „sűrűségétől”. A csökkentett keresztmetszetekkel a feszültség értékek ismét ellenőrzésre kerülnek, és a feszültségkorlátot így ki nem elégítő elemek keresztmetszeteinek ismét az az első lépésben megállapított katalógus értékek kerülnek alkalmazásra. A csomóponti elmozdulások és az elemek feszültség értékeinek újraszámolásához minden egyes lépés után ismételten szükség van.

```

If[discrete,
  echo = False;
  Do[
    Do[If[cat[j] ≤ a[group[i]] && a[group[i]] ≤ cat[j + 1], a[group[i]] = cat[j + 1]; Break[]],
      {j, 1, c - 1}];
    , {i, 1, e}];
  Print["w = ", w];

  XE = X;
  X0 = {};

  Quiet[Do[x[k] = .; AppendTo[X0, {x[k], XE[[k]]}], {k, 1, n}];
  SOLUTION = Quiet[FindMinimum[EM, X0, MaxIterations → 1000]];

  Do[x[k] = Replace[x[k], SOLUTION[[2]], {k, 1, n}];
  Print["A = ", A]; Print["X = ", Chop[X, 0.00001]]; Print["S = ", S];

  Do[
    Do[If[cat[j] = a[group[i]] && smin[i] ≤ s[i] ≤ smax[i], a[group[i]] = cat[j - 1];

      X0 = {}; Quiet[Do[x[l] = .; AppendTo[X0, {x[l], XE[[l]]}], {l, 1, n}];
      SOLUTION = Quiet[FindMinimum[EM, X0, MaxIterations → 1000]];

      Do[x[l] = Replace[x[l], SOLUTION[[2]], {l, 1, n}];

      If[Not[smin[i] ≤ s[i] && s[i] ≤ smax[i]], a[group[i]] = cat[j];

      X0 = {}; Quiet[Do[x[l] = .; AppendTo[X0, {x[l], XE[[l]]}], {l, 1, n}];
      SOLUTION = Quiet[FindMinimum[EM, X0, MaxIterations → 1000]];

      Do[x[l] = Replace[x[l], SOLUTION[[2]], {l, 1, n}];];
    Break[]],
    {j, 1, c}];
    , {i, 1, e}];

```

7.2. Lokális-bináris linearizáció

Ez esetben a folytonos megoldást követően, a szelvénytár alapján való diszkrét optimális megoldás keresésére egy lokális bináris-lineáris keresés [14] kerül alkalmazásra. A lokális-bináris lineáris mintaprogram azon az egyszerű feltételezésen alapul, hogy egy elem feszültségét elsősorban az elem keresztmetszete határozza meg, vagyis a többi elem hatása elhanyagolható ránézve. A lokális keresés egy rendelkezésre álló megoldáshalmazból próbál a kiindulásnál jobb megoldást keresni, alkalmazásának valószínűleg heurisztikus keresés esetén volna nagyobb jelentősége, mivel jelen esetben a folytonos programból adódó kiindulás is

valószínűsíthetően jó optimális megoldást szolgáltat. A lokális környezetet az éppen aktuális folytonos érték, valamint az őt meg előző, és őt követő katalógus érték adja. „Sűrű” katalógus esetén a probléma lineáris programozásként kezelhető, „ritka” katalógus esetén kvadratikus formulát kell alkalmazni a feszültségváltozások pontos leírására, vagyis a lineáris összefüggésre csonkított Taylor-soros közelítés nem alkalmas a feszültség-változás elfogadható pontosságú leírására.

Általános esetben egy elem a lokális környezetben három bináris változóval írható le, az előzőekben definiált lokális környezet fogalmából adódóan:

$$\begin{aligned}
 B_{g1}^{i-1} = 1 & \quad \bullet \text{---} \bullet \text{---} \cdots \text{---} | \\
 & \quad C_1 \quad C_2 \\
 B_{gk}^{i-1} = 1 & \quad | \text{---} \bullet \text{---} \bullet \text{---} \bullet \text{---} \cdots \text{---} | \quad 1 < k < C \\
 & \quad C_{k-1} \quad C_k \quad C_{k+1} \\
 B_{gC}^{i-1} = 1 & \quad | \text{---} \cdots \text{---} \bullet \text{---} \bullet \\
 & \quad C_{C-1} \quad C_C
 \end{aligned} \tag{7.3}$$

$$\text{if } \left\{ \begin{array}{l} B_{g1}^{i-1} = 1 \\ B_{gk}^{i-1} = 1 \\ B_{gC}^{i-1} = 1 \end{array} \right. \text{ then } \left\{ \begin{array}{l} B_{g1}^i + B_{g2}^i = 1 \\ A_g^i = C_1 B_{g1}^i + C_2 B_{g2}^i \\ S_g^i = S_g^{i-1} B_{g1}^i + \left(S_g^{i-1} + \frac{\partial S_g^{i-1}}{\partial A_g^{i-1}} (C_2 - C_1) \right) B_{g2}^i \\ \\ B_{gk-1}^i + B_{gk}^i + B_{gk+1}^i = 1 \\ A_g^i = C_{k-1} B_{gk-1}^i + C_k B_{gk}^i + C_{k+1} B_{gk+1}^i \\ S_g^i = S_g^{i-1} B_{gk}^i + \left(S_g^{i-1} + \frac{\partial S_g^{i-1}}{\partial A_g^{i-1}} (C_{k-1} - C_k) \right) B_{gk-1}^i + \left(S_g^{i-1} + \frac{\partial S_g^{i-1}}{\partial A_g^{i-1}} (C_{k+1} - C_k) \right) B_{gk+1}^i \\ \\ B_{gC-1}^i + B_{gC}^i = 1 \\ A_g^i = C_{C-1} B_{gC-1}^i + C_C B_{gC}^i \\ S_g^i = S_g^{i-1} B_{gC}^i + \left(S_g^{i-1} + \frac{\partial S_g^{i-1}}{\partial A_g^{i-1}} (C_{C-1} - C_C) \right) B_{gC-1}^i \end{array} \right. \tag{7.4}$$

A programba való bevitel során a BINLEFT folytonos bináris-lineáris változó képezi a minimalizálás változóját, az egyes elemek feszültségváltozásai a lehetséges katalógus értékek közötti lépések esetén rajta keresztül kerülnek megfogalmazásra, majd a feszültségkorlátokkal összehasonlításra. A kérdéses diszkrét keresztmetszeti területek meghatározása során ismeretlenként a V listába definiált az egyes elemek feszültségváltozását leíró BINLEFT[i], {i,1,e} bináris-változók szerepelnek, míg a megkötéseket az általa leírt feszültségkorlátok F listája reprezentálja. Ezen adatok előállítását követően a diszkrét keresztmetszetek számolhatóak. Végül az új keresztmetszetekkel szükséges még az egyensúlyi egyenletek újbóli megoldása, melyek az új csomóponti elmozdulásokat és feszültségértékeket szolgáltatják.

Szükséges deriváltak előállítása a kvadrátikus formulához:

```
Do[dsdx[j, i] = D[s[j], {x[i], 1}], {j, e}, {i, n}];

Do[d2sd2x[j, i] = D[s[j], {x[i], 2}], {j, e}, {i, n}];

jacm = Array[jac, {n, n}];

Do[jac[i, j] = D[eqn[i], x[j]], {i, 1, n}, {j, 1, n}];

dedam = Array[deda, {n, g}];

Do[deda[i, j] = -D[eqn[i], a[j]], {i, 1, n}, {j, 1, g}];

invn = Inverse[N[jacm]];

{eigenvalues, eigenvectors} = Eigensystem[N[jacm]];

dxdam = invn.dedam;

dsdam = dsdxm.dxdam;

d2sd2am = d2sd2xm.dxdam;

Print[Dimensions[dsdam]];
```

```

If[discrete,
  echo = True;

  catlefts = Array[catleft, {e}];
  smines = Array[smine, {e}];
  smaxes = Array[smaxe, {e}];
  Do[smine[i] = smin; smaxe[i] = smax, {i, 1, e}];

  F = {};
  V = {};

  Do[Do[If[cat[j] ≤ a[group[i]] && a[group[i]] ≤ cat[j + 1], catleft[i] = j; Break[]],
    {j, 1, c - 1}];

  Quiet[BINLEFT[i] = .];
  AppendTo[F, BINLEFT[i] ∈ Integers];
  AppendTo[F, 0 ≤ BINLEFT[i] ≤ 1]; AppendTo[V, BINLEFT[i]];
  AppendTo[F,
    smine[i] ≤
    s[i] + dsdam[[i, i]] * ((a[group[i]] - cat[catleft[i]]) * BINLEFT[i] +
      (cat[catleft[i] + 1] - a[group[i]]) * (1 - BINLEFT[i])) +
    d2sd2am[[i, i]] * ((a[group[i]] - cat[catleft[i]]) ^ 2 * BINLEFT[i] +
      (cat[catleft[i] + 1] - a[group[i]]) ^ 2 * (1 - BINLEFT[i]))];

  AppendTo[F,
    s[i] + dsdam[[i, i]] * ((a[group[i]] - cat[catleft[i]]) * BINLEFT[i] +
      (cat[catleft[i] + 1] - a[group[i]]) * (1 - BINLEFT[i])) +
    d2sd2am[[i, i]] * ((a[group[i]] - cat[catleft[i]]) ^ 2 * BINLEFT[i] +
      (cat[catleft[i] + 1] - a[group[i]]) ^ 2 * (1 - BINLEFT[i])) ≤ smaxe[i]];

  If[echo, Print[PaddedForm[{cat[catleft[i]], a[group[i]], cat[catleft[i] + 1]}, {10, 4}]]];

  Quiet[a[group[i]] = .]; AppendTo[V, a[group[i]]];
  AppendTo[F, a[group[i]] = cat[catleft[i]] * BINLEFT[i] + cat[catleft[i] + 1] * (1 - BINLEFT[i])];
  , {i, 1, e}];
  If[echo, Print[w, F, V]];

  SOLUTION = NMinimize[{w, F}, V];
  Do[a[i] = Replace[a[i], SOLUTION[[2]], {i, 1, g}]; Print["w = ", w];
  Print["A = ", A]; Print["SL = ", S];
  XE = X; Print["XE = ", Chop[X, 0.00001]];

  X0 = {};
  Quiet[Do[x[i] = .; AppendTo[X0, {x[i], XE[[i]]}], {i, 1, n}];
  SOLUTION = Quiet[FindMinimum[EM, X0, MaxIterations → 1000]];
  Do[x[i] = Replace[x[i], SOLUTION[[2]], {i, 1, n}]; Print["X = ", Chop[X, 0.00001]];
  Print["S = ", S];];

```

7.3. Módszerek funkcionálásának és hatékonyságának tesztelése

A szelvénytárból való választásra alkalmas keresési eljárások tesztelése a 6. pontban bemutatott gyakorlati példákon keresztül történt, tehát egy távvezetéktartó oszlop, valamint egy adótorony szerkezeten keresztül. A szerkezetek, valamint az optimalizálás kiindulási adatai, az összehasonlíthatóság érdekében változatlanok maradtak, így reális képet kaphatunk a szerkezetek súlyának változásáról, a szelvénytár beépítésének hatására. A folytonos keresztmetszeti változós programba elsőként a szelvénytár rögzítésére volt szükség, majd erre épülve került beépítésre a bemutatott diszkrét keresztmetszet keresési eljárás.

Távvezetéktartó oszlop esetén, azok leggyakrabban alkalmazott szelvényének megfelelően egy egyenlőszárú szögacél szelvénytár került rögzítésre. A szelvénytár 33 darab keresztmetszeti lehetőséget tartalmaz, a szelvények a szerint lettek megválasztva, hogy a szükséges tartományon belül aránylag folytonos választási lehetőséget nyújtsanak.

Mivel távvezetéktartó oszlop súly szerinti optimalizálása során csupán elmozdulás, valamint feszültségre vonatkozó korlátok kerültek megadásra, ennek megfelelően elegendő volt a szelvények keresztmetszeti területeit definiálni az egyes programokban. Az ökölszabály keresési eljárás logikai lépéseinek következtében szükség volt még egy a szelvénytár legkisebb eleménél kisebb érték rögzítése is, mivel a legkisebb elem sosem kerül kiválasztásra, ennek megfelelően módosult az ökölszabály keresési eljárást tartalmazó programban rögzített szelvény lista 34 eleműre.

```
Clear[cats, cat, c];

c = 34;

cats = Array[cat, c];

cats = {0.1, 1.12, 1.42, 1.74, 2.67, 3.08, 3.49, 4.3, 4.8, 5.69, 6.31, 6.91,
      8.13, 9.4, 11.9, 12.3, 13.9, 17.1, 19.2, 22.7, 27.5, 29.3, 34.8, 40.3, 43,
      46.1, 51.8, 55.4, 61.8, 69.1, 76.3, 83.5, 90.6, 96.4};

Do[cat[i] = cats[[i]], {i, 1, c}];
```

(L20x3; L25x3; L30x3; L40x4; L45x4; L45x5; L50x5; L50x6; L55x6; L60x6; L70x6; L70x7; L70x9; L80x8; L90x8; L90x10; L100x10; L100x12; L120x12; L150x10; L150x12; L150x14; L150x15; L160x15; L160x17; L180x16; L200x16; L200x18; L200x20; L200x22; L200x24; L250x20)

Az **adótorony** modell esetén annak szerkezetéből adódóan csőszelvény katalógus alapján történt az optimalizálás. A 6.3. pontban bemutatott módon a csőszelvény átmérőjének és falvastagságának arányának megkötésével lehetőség adódik stabilitás vizsgálat végrehajtására az elmozdulás, valamint feszültség korlátok mellett.

Az adótorony súly szerinti optimalizálása során bár az elmozdulás és feszültségre vonatkozó korlátok megadása mellett a rúdelemekre lokális kihajlási, valamint horpadási stabilitásvesztési korlát is definiálásra került, ennek ellenére itt is elegendő volt a szelvények keresztmetszeti területeit megadni az egyes programokban, hiszen az összes feltétel csupán a keresztmetszeti terület függvényében kifejezhető volt. Az ökölszabály keresési eljárás logikai lépéseinek következtében ebben az esetben is szükség volt még egy a szelvénytár legkisebb eleménél kisebb érték rögzítése is. A szelvények száma a szögacél katalógushoz hasonlóan lett megválasztva. A katalógus szelvényeinek esetében $\alpha=0,2$ -re lett megválasztva, mely esetén a 6.3. pontban igazolást nyert a feltevés helyessége, miszerint α -nak ezen értéke esetén a horpadási vizsgálat elhagyható, így az a stabilitási feltétel beépítése során elhagyásra került. Amint látható a csőszelvény katalógus szelvényei a szögacél katalógus elmeivel szemben nem az Eurocode szabvány választékából kerültek kiválasztásra, melynek oka az imént taglalt stabilitás vizsgálatok megadási lehetőségének előteremtése volt. Amennyiben a folytonos keresztmetszeti változós optimalizálás, melyre a jelen pontban bemutatott keresések épülnek, nem tartalmaz a keresztmetszetekre tett megkötések által megfogalmazott stabilitási feltételeket, a szelvénykatalógus bármely akár Eurocode szabvány által is tartalmazott szelvénytár elemeit tartalmazhatja, melyek esetén az egyes szelvények falvastagságának és átmérőjének hányadosa nem állandó érték.

```
Clear[cats, cat, c];

c = 34;

cats = Array[cat, c];

cats = {0.1, 0.72, 1.29, 2.01, 2.89, 3.94, 5.14, 6.51, 8.04, 9.73, 11.58, 13.58,
        15.76, 18.09, 20.58, 23.23, 26.04, 29.02, 32.15, 35.45, 38.91, 42.52, 46.30,
        50.24, 54.34, 58.60, 63.02, 67.60, 72.35, 77.25, 82.31, 87.54, 92.92, 96.94};

Do[cat[i] = cats[[i]], {i, 1, c}];

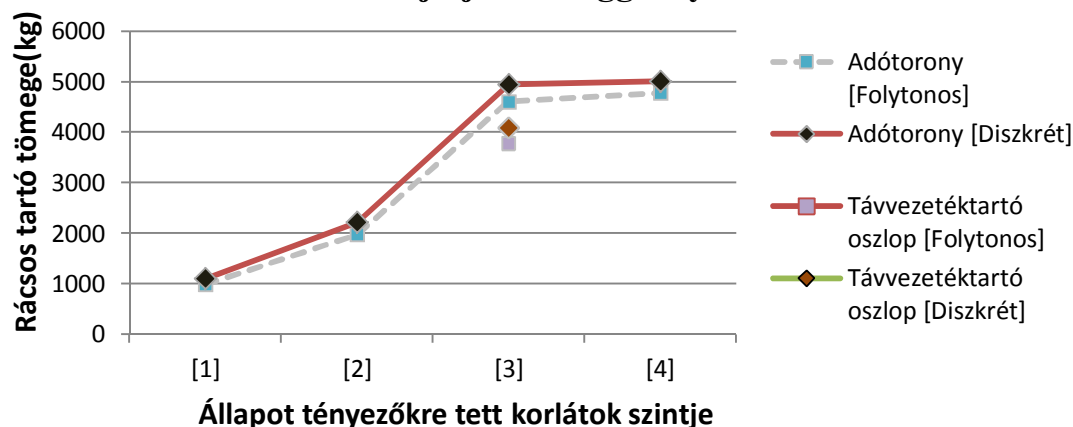
(⊙16x3,2; ⊙20x4; ⊙24x4,8; ⊙28x5,6; ⊙32x6,4; ⊙36x7,2; ⊙40x8; ⊙44x8,8; ⊙48x9,6;
⊙52x10,4; ⊙56x11,2; ⊙60x12; ⊙64x12,8; ⊙68x13,6; ⊙72x14,4; ⊙76x15,2; ⊙80x16;
⊙84x16,8; ⊙88x17,6; ⊙92x18,4; ⊙96x19,2; ⊙100x20; ⊙104x20,8; ⊙108x21,6;
⊙112x22,4; ⊙116x23,2; ⊙120x24; ⊙124x24,8; ⊙128x25,6; ⊙132x26,4; ⊙136x27,2;
⊙140x28; ⊙144x28,8)
```

7.3.1. Ökölszabály tesztelése

A folytonos keresztmetszeti változós optimalizáló program megoldására épülő ökölszabály keresési módszer tesztelése a 6. pontban ismertetett gyakorlati példákon keresztül történt. A program a szelvénytárból való keresztmetszet választást követően, az új szelvényekkel kiszámolja az elmozdulásokat, feszültségeket, valamint az optimalizálás célját képező szerkezet súlyát. Ennek megfelelően a már ismertetett folytonos megoldásokkal párhuzamban kerül ismertetésre az ökölszabály módszer által választott szelvényekkel nyert új diszkrét megoldás. A 6.1. pontnak megfelelően a távvezeték tartóra egy darab program került futtatásra, amely feszültség, valamint elmozdulás korlátokat tartalmaz. Az adótorony modell esetén pedig a 6.3-ban ismertetett feszültség korlátot, feszültség és stabilitás korlátot, feszültség és elmozdulás korlátot, valamint a feszültség, stabilitás és elmozdulás korlátot egyaránt tartalmazó programok kerültek futtatásra. Az eredmények közlése az eddigieknek megfelelően a szerkezetek optimális tömegére, valamint a keresztmetszeti tömegekre korlátozódik.

	Tervezési változókra tett korlát	Állapot változókra tett korlát	Folytonos megoldás		Diszkrét megoldás		Szerkezet súlyának növekedése
	[cm ²]		Keresztmetszetek [cm ²]	Szerkezet tömege [kg]	Keresztmetszetek [cm ²]	Szerkezet tömege [kg]	
Távvezeték tartó oszlop	$A_{\min}=1 \leq A_i \leq A_{\max}=100$	Feszültség + elmozdulás [3]	{39,59;35,14;14,55;4,84;7,53;18,78;5,09;6,46;12,91;12,72;5,32}	3776,79	{40,3;40,3;17,1;5,69;8,13;19,2;5,69;6,91;13,9;13,9;5,69}	4087,77	8,23%
Adótorony	$A_{\min}=1 \leq A_i \leq A_{\max}=100$	Feszültség [1]	{17,91;9,58;2,99;1;1;1,32;1;1}	991,85	{18,09;9,73;3,94;1,29;1,29;1,29;2,01;1,29;1,29}	1108,17	11,73%
	$A_{\min}=1 \leq A_i \leq A_{\max}=100$	Feszültség + stabilitás [2]	{16,41;12;6,72;2,1;1,75;1,35;9,57;7,17;4,31}	1981,96	{18,09;13,58;8,04;2,89;2,01;2,01;9,73;8,04;5,14}	2223,86	12,21%
	$A_{\min}=1 \leq A_i \leq A_{\max}=100$	Feszültség + elmozdulás [3]	{89,51;50,54;15,97;1;1;1,5,93;5,65;4,56}	4609,03	{92,92;53,34;18,09;1,29;1,29;1,29;6,51;6,51;5,14}	4949,06	7,38%
	$A_{\min}=1 \leq A_i \leq A_{\max}=100$	Feszültség + elmozdulás + stabilitás [4]	{85,81;48,46;15,31;2,07;1,73;1,34;9,61;7,14;4,37}	4783,17	{87,54;50,24;15,76;2,89;2,01;2,01;9,73;8,04;5,14}	5012,49	7,38%

Vizsgált térbeli rácsos tartók optimális tömege állapottenyezőkre tett korlátok, és keresztmetszeti változó fajtájának függvényében



Az eredmények és a katalógusok értékek összevetésével látható, hogy az ökölszabály keresési eljárás megfelelően működik. Minden esetben megtalálta a folytonos keresztmetszeti változós program által szolgáltatott optimális keresztmetszeti területekhez legközelebbi nála nagyobb szelvényeket a katalógus tartalmából, így természetesen a megoldással szemben támasztott kritériumok továbbra is kielégülnek. A diszkrét keresztmetszetekkel járó súlynövekedés mértéke a nagyobb szelvényterületekből adódóan általában 250kg körülire tehető, ez százalékos arányban átlagosan 10% körüli gyarapodást jelent. A katalógusok aránylag sűrű volta miatt a jelentkező súlynövekedés nem mondható nagy, megjegyzendő azonban hogy a valóságban általában nem áll rendelkezésünkre ilyen mértékű választási lehetőség, mely nagyobb súlynövekedést eredményezne.

7.3.2. Lokális-bináris linearizáció tesztelése

A folytonos keresztmetszeti változós optimalizáló program megoldására épülő lokális-bináris linearizált keresési módszer tesztelése a vizsgálati alapmodell G7-es group csoportosításán keresztül történt, S235-ös anyagminőséggel, mivel ebben az esetben a legkönnyebb a deriváltakat tartalmazó mátrixok kezelése, a futtatás során az állapotváltozókra vonatkozóan csak feszültségkorlátok lettek téve, a tervezési változók alsó és felső korlátjainak az alkalmazott szögacél katalógus legkisebb és legnagyobb értékei lettek megválasztva, terhelésként pedig az 1. Terhelési eset került alkalmazásra. A tesztelés fő szempontjai, meggyőződni a keresztmetszeti változó körül generált lokális környezetek helyességéről, ezt követően megvizsgálni, hogy a keresés által optimális keresztmetszetekként kihozott szelvények valóban katalógus értékek-e, valamint hogy a velük újraszámolt elmozdulások, feszültségek, valamint az optimalizálás célját képező szerkezet súlya miként alakul.

Amint az 5.5. pontban már ismertetésre kerültek, a folytonos keresztmetszeti változók optimális értékei a következőképpen alakultak:

```
A = {8.29264, 8.27579, 10.1949, 10.1731, 0.600853, 0.153126, 0.523874, 0.1, 0.1,
0.321205, 0.157522, 0.393645, 8.20631, 8.272, 9.92996, 9.69586, 0.26014, 0.191985,
0.167268, 0.1, 0.1, 0.100002, 0.164948, 0.1, 8.57843, 8.82451, 9.91753, 9.35219,
0.405179, 0.265103, 0.598314, 0.1, 1.05732, 0.679477, 1.28201, 0.671259, 6.74056,
7.02967, 9.8785, 9.1207, 2.2612, 0.118408, 2.26685, 0.1, 0.1, 1.45581, 0.1,
1.45108, 5.17206, 5.49631, 8.05388, 7.44987, 2.10028, 0.128575, 2.1068, 0.1, 0.1,
1.23225, 0.1, 1.22712, 3.63837, 3.98223, 6.25426, 5.81345, 1.93923, 0.111988,
1.94706, 0.1, 0.1, 1.00371, 0.1, 0.998406, 2.17158, 2.50391, 4.49318, 4.20439,
1.76892, 0.1, 1.77792, 0.1, 0.1, 0.766789, 0.1, 0.76174, 0.83529, 1.10468, 2.80244,
2.64579, 1.55996, 0.1, 1.56995, 0.1, 0.1, 0.513712, 0.1, 0.509473, 0.189689, 0.1,
1.23832, 1.18722, 1.2031, 0.1, 1.2142, 0.137374, 0.1, 0.223678, 0.1, 0.220415}
```

Ez követően a linearizált lokális keresés megkísérelte a folytonos megoldás javítását, melyet követően az új diszkrét katalógusból választott szelvénykeresztmetszetek a következők lettek:

```
A = {8.13, 8.13, 9.4, 9.4, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 8.13, 8.13, 9.4, 9.4,
0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 8.13, 8.13, 9.4, 8.13, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1,
0.1, 0.1, 1.12, 0.1, 6.31, 6.91, 9.4, 8.13, 1.74, 0.1, 1.74, 0.1, 0.1, 1.42, 0.1,
1.42, 4.8, 4.8, 6.91, 6.91, 1.74, 0.1, 1.74, 0.1, 0.1, 1.12, 0.1, 1.12, 3.49, 3.49,
5.69, 5.69, 1.74, 0.1, 1.74, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 1.74, 1.74, 4.3, 3.49, 1.74,
0.1, 1.74, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 2.67, 1.74, 1.42, 0.1, 1.42, 0.1,
0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 1.12, 1.12, 1.12, 0.1, 1.12, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1}
```

A lokális-bináris linearizált keresés a vártnak megfelelően helyesen generálta a lokális környezeteket, majd a feltételeknek megfelelően választott a katalógus értékei közül, azonban a feszültségkorlátok betartásával a megoldás javítását a vizsgált feladatban nem tudta elérni. Ennek fő okai lehetnek, hogy a folytonos megoldás melyre épült az újabb keresés, már önmagában a korlátokra nézve egy „pontos” megoldást szolgáltatott, így a keresztmetszetek lefelé való csökkentésével, mely a szerkezet súlycsökkenését eredményezné, az éppen aktív korlátok már nem teljesíthetőek, ezen felül a súlycsökkentés lehetőségét ellehetetlenítette a szerkezet statikai határozottsága is.

A lokális-bináris linearizáció tehát, mint diszkrét keresztmetszeti megoldás kereső eljárás, a jelen szerkezetek esetén, a súlyszerinti optimalizálásukra kialakított optimalizáló program felépítéséből adódóan nem nyújt megfelelő segítséget, a felírásához szükséges deriváltak előállítás pedig körülményessé válhat. Alkalmazásának hatékonysága vélhetőleg heurisztikus keresések megoldásának javításánál tenne jobb szolgálatot, ahol a kiindulási megoldás javítására valóban volna lehetőség.

7.3.3. Módszerek tesztelésének értékelése

A dolgozat során kialakított folytonos keresztmetszeti változós optimalizálási program továbbfejlesztését szolgáló lépésre, miszerint az képes legyen egy előredefiniált szelvénykatalógusból kiválasztani a folytonos megoldásra épülve a szerkezetek megvalósítására felhasználandó szelvényeket, **a bemutatott két eljárás közül az ökölszabály módszer bizonyult a hatékonyabbnak a jelen feladatban**, mivel a megoldás javítására a keresztmetszetek csökkentésével nem adódott lehetőség. Mivel az ökölszabály módszer azon egyszerű logikai lépéssel él, hogy a katalógusból kiválasztja a folytonos keresztmetszeti változókhoz legközelebbi náluk nagyobb keresztmetszetű szelvényt, ezért felhasználásának a folytonos megoldás keresés során tett korlátok nem szabnak határt, valamint a keresztmetszet növekedésből adódóan azok a választott diszkrét keresztmetszetekkel is minden esetben kielégülnek. A tapasztaltaknak megfelelően az ökölszabályba beépített keresztmetszet csökkentésre irányuló lépés általában kihagyható.

7.4. Euler-féle lokális stabilitás megfelelés ellenőrzése

7.4.1. Euler-féle lokális stabilitási ellenőrzés programba való beépítése

A szelvénytár rögzítésének és az ökölszabály keresési eljárás beépítésének köszönhetően a program már nem csupán egy folytonos keresztmetszeti területet szolgáltat megoldásként, hanem egy tényleges szelvényhez tartozó keresztmetszeti területet. Ezen folyamat megvalósításával magától adódik az ötlet, ha az adott alakkal rendelkező szelvények rendelkezésre álló tulajdonságaiból nem csupán azok területét, hanem kihajlással szembeni keresztmetszeti adottságaikat is rögzítenénk a programba, ez esetben tetszőleges alakú szelvények esetén megoldható volna egy lokális stabilitás ellenőrzés beépítése a programba. Tetszőleges szelvény esetén az Euler-féle kihajlási kritikus feszültség a következőképpen írható fel:

$$\sigma_{E,i} = \frac{\pi^2 \times E_i}{\lambda_i^2} \quad (7.5)$$

ahol, $\lambda_i = \frac{L_i}{i_i} = \frac{L_i}{\sqrt{\frac{I_i}{A_i}}}$

A képletekben L_i az adott rúdelem hossza, E a rugalmassági modulus, A_i az adott rúdelem keresztmetszeti területe, I_i az adott rúdelem keresztmetszetének tehetetlenségi nyomatéka, i_i az adott rúdelem keresztmetszetének inercia sugara.

A programba a szükséges számítások elvégzéséhez tehát csak a szelvények inercia sugarára van szükség, mint plusz információ. Az egyes szelvények inercia sugarát tehát a keresztmetszeti területükhöz hasonlóan, célszerűen azonos indexeléssel rögzítenünk kell a programba beépített katalógusba.

```
Clear[cats, cat, radgyrs, radgyr, c];
```

```
c = 30;
```

```
cats = Array[cat, c];
```

```
radgyrs = Array[radgyr, c];
```

```
cats = {0.1, 1.12, 1.74, 2.67, 3.08, 4.3, 4.8, 5.69, 6.31, 6.91, 8.13, 11.9, 12.3, 13.9, 17.1,
        19.2, 22.7, 25.1, 27.5, 29.3, 34.8, 46.1, 55.4, 61.8, 69.1, 76.3, 83.5, 90.6, 96.4, 106};
```

```
radgyrs = {0.1, 0.59, 0.899, 1.05, 1.21, 1.35, 1.51, 1.5, 1.66, 1.82, 2.13, 2.1, 2.43, 2.74,
           2.72, 3.04, 3.02, 3.32, 3.65, 4.62, 4.6, 4.88, 5.51, 6.16, 6.13, 6.11, 6.09, 6.06, 7.71, 7.69};
```

```
Do[cat[i] = cats[[i]], {i, 1, c}];
```

```
Do[radgyr[i] = radgyrs[[i]], {i, 1, c}];
```

Ahhoz, hogy a későbbiekben az inercia sugarat is a keresztmetszeti területhez hasonlóan tudjuk kezelni, szükség van egy lista létrehozására, melyben az egyes groupokhoz tartozó szelvény inercia sugarát rögzítjük.

```
GR = Array[gr, g];
```

Ezt követően az ökölszabály keresési eljárást felhasználva, annak szelvény keresztmetszet választási logikai lépését kihasználva, ahhoz hasonlóan definiáljuk a szelvény inercia sugarának kiválasztását. Ily módon megadott módszerrel elérjük, hogy ha a program kiválaszt egy adott keresztmetszetet a katalógusból egy grouphoz, akkor ehhez a grouphoz tartozó inercia sugárnak a kiválasztott keresztmetszetű szelvény inercia sugara tartozzon. Természetesen, minthogy végeredményként a 7.1. pontban közölt ökölszabály egy átalakított változatát állítjuk elő, most is szükség lesz a kiválasztott szelvényekkel az szerkezet csomóponti elmozdulásainak, valamint az egyes rúdelemekben ébredő feszültségek újraszámítására. Ezt követően felírható az egyes rúdelemek lokális Euler-féle kihajlási kritikus feszültsége, melyet, mint az újonnan kapott rúdelem feszültségekre vonatkozó minimum határértéket rögzítünk.

Miután rendelkezésünkre állnak a kiválasztott szelvények alkalmazásával, mind az egyes rúdelem feszültségek, mind pedig a rájuk vonatkozó feszültségkorlátok, végrehajthatunk egy feszültség ellenőrzést. Az ellenőrzés megkezdése előtt létrehozunk egy a rudak számával megegyező elemű segédlistát, majd az ellenőrzés során célszerűen, ha az adott rúdelem megfelel a rá vonatkozó feszültségkorlátoknak, akkor a létrehozott segédlista rúdelem indexű eleme 1, ha nem felel meg akkor pedig 0 értéket kap. Végül az ellenőrzés végrehajtását követően, amennyiben a segédlistánk elemeinek összege, megegyezik a szerkezetet alkotó rúdelemek számával, akkor a szerkezet megfelel a lokális Euler-féle stabilitási követelményeknek, amennyiben ez az összeg eltér az elemek számától a szerkezetünk nem felel meg.

A 6.3. pontban bemutatott csőszelvények esetén felírható lokális stabilitási feltétellel szemben, az így kapott eljárás bár nem jelenik meg, mint a folytonos keresztmetszeti változós súly szerinti optimalizálás eredményét befolyásoló aktív korlát, hiszen csak, mint ellenőrzés funkcionál, azonban nagy előnye, hogy ellenőrzésként bármely tetszőleges alakkal rendelkező szelvények esetén is alkalmazható.

```

If[discretestability,
  echo = False;

  Do[
    Do[If[cat[j] ≤ a[group[i]] && a[group[i]] ≤ cat[j + 1],
      a[group[i]] = cat[j + 1]; Break[]]
    , {j, 1, c - 1}];
    , {i, 1, e}];

  Do[
    Do[If[cat[j] ≤ a[group[i]] && a[group[i]] ≤ cat[j + 1],
      gr[group[i]] = radgyr[j + 1]; Break[]]
    , {j, 1, c - 1}];
    , {i, 1, e}];

  XE = X;
  X0 = {};

  Quiet[Do[x[k] = .; AppendTo[X0, {x[k], XE[[k]]}], {k, 1, n}];
  SOLUTION = Quiet[FindMinimum[EM, X0, MaxIterations → 1000]];

  Do[x[k] = Replace[x[k], SOLUTION[[2]]], {k, 1, n}];];

Print["w = ", w];
Print["A = ", A]; Print["X = ", Chop[X, 0.00001]]; Print["S = ", S];
Print["ssmins = ", ssmins]; Print["Elementlegnht = ", ElementLenght];
Print["GR = ", GR];

ssmins = Array[ssmin, {e}];
Do[ssmin[i] = -(3.14159^2 * modulus) / (LO[i] / gr[group[i]])^2, {i, 1, e}];

Ell = Array[ell, {e}];

Do[If[ssmin[i] ≤ s[i] ≤ smax[i], ell[i] = 1, ell[i] = 0], {i, 1, e}];

Print["Ell = ", Ell];

Ered = 0;

Do[Ered = Ered + ell[i], {i, 1, e}];

If[Ered == e, "Megfelel", "Nem felel meg"]

```

7.4.2. Stabilitási ellenőrzés funkcionálásának tesztelése

A lokális stabilitás megfelelés programba való beépítését követően, annak helyes működése az 6.1. pontban bemutatott távvezeték tartó modellen került vizsgálatra, mivel annak a súly szerinti optimalizálása során szögacél szelvények használata következtében a szerkezetre eddig stabilitási feltétel semmilyen formában nem került beépítésre. A szerkezet optimalizálásának kiindulási adatai az említett pontban megtalálhatóak, ezért újonnan nem kerülnek közlésre. Az optimalizálás során a programba a diszkrét keresztmetszeti megoldások kereséséhez, a 7.3. pontban közölt szögacél katalógus lett rögzítve.

A szerkezet folytonos keresztmetszeti változós optimális megoldása (szerkezet tömege, optimális keresztmetszeti területek, valamint a velük adódó feszültségek):

$$w = 3776.79$$

$$A = \{39.5888, 35.1436, 14.5488, 4.83847, 7.53216, 18.7822, 5.09261, 6.46112, 12.9078, 12.7226, 5.32008\}$$

$$S = \{1.67576, -3.72221, -4.37144, 2.92077, -0.0966991, 0.63786, 1.35169, -1.15047, 0.492103, -1.2807, -1.12562, 0.0308098, 1.6513, -3.7628, -4.37124, 2.99476, -0.133085, 1.65379, 1.90356, -0.854292, 0.184155, -1.6898, -1.97269, 0.054441, 1.64467, -3.97162, -4.52542, 3.14994, -0.210036, 3.70425, 3.18682, -0.472835, 1.24773, -6.19201, -0.356423, 3.17927, 2.0148, -4.04165, -4.17227, 3.83953, -1.64081, -3.12878, 2.43183, -4.37773, 3.81541, -2.35121, 2.60561, 1.56877, 1.75181, -3.73413, -3.34279, 3.24514, -1.94826, -3.22465, 2.86201, -4.70755, 3.92593, -2.64767, 2.57324, 1.78462, 1.46473, -2.71622, -2.36357, 2.54711, -2.24042, -3.42774, -3.46462, -2.88217, 1.41835, 3.01073, 2.5907, 1.9432, 1.34294, -1.81695, -2.22498, 1.71888, -0.0850758, -3.81005, -0.0465596, -2.93587, 1.97497, -1.5583, 3.11646, -3.50504, -0.306972, -3.96752, -3.39874, 2.70484, 2.33944, -1.77994, 1.03355, -1.33256, 1.02074, -2.17954, 0.464916, 1.5163, 1.1851, -5.96009, -1.95853, 5.25428, -2.47721, -0.505311, 3.51973, -1.66669, 1.0209, -2.8169, 0.202071, 1.95652, 0.520988, -1.75023, 2.67707, 1.9815, -0.932808, -0.45996, -2.83325, -0.597092, 0.033047, 1.83571, 0.0989713, 0.598878, 0.4042, -0.103626, -0.103301, 0.417454, -0.0102426, -0.406546, -0.000240093, -0.405926, -0.00796493, -0.00815803, -0.00781922, -0.00573356, 1.56497, -0.0365804, 0.203826, 0.275239, -0.813153, -3.04571, -3.29016, 0.180006, -0.0910604, 0.903081, 1.70078, 1.69983, 4.53861, -0.559755, -0.279246, -0.567168, -0.286466, -0.491629, -0.0230745, -0.0203456, -0.490887, 1.01982, 0.806181, 1.03045, 0.816457, -2.65025, 2.64812, -2.56714, -2.0304, 0.509548, 0.708024, -1.82179, -1.67518, -1.42649, -0.612533, -0.818928, -0.418088, -0.666012, 3.23882, 2.96751, 0.905487, -1.69299, -0.252382, -0.600393, -0.567292, -0.28875, -0.572024, -0.28415, -0.495474, -0.0221389, -0.0223406, -0.493881, 1.02993, 0.819157, 1.0394, 0.816935, 1.61829, -0.122744, -0.499275, 2.9976, -2.50711, 2.37953, 0.0564372, -0.397305, -0.149109, 0.29002, -0.828064, -2.15255, -2.40181, 0.68584, 0.41264, 0.912126, 1.50329, 1.42604, 3.41732, -0.565717, -0.283739, -0.568218, -0.288411, -0.492686, -0.0281238, -0.0201353, -0.494784, 1.03235, 0.818544, 1.03747, 0.823172, -1.84496, 1.29692, -1.27697, -1.36208, -0.0556418, 0.610785\}$$

A szerkezet folytonos keresztmetszeti változós optimális megoldásaira épülő, ökölszabály keresési eljárás által kiválasztott diszkrét keresztmetszeti változókkal adódó megoldása (szerkezet tömege, optimális katalógus szelvények keresztmetszeti területei és azok inercia sugara, valamint a kiválasztott szelvényekkel adódó feszültségek):

$w = 4087.77$

$A = \{40.3, 40.3, 17.1, 5.69, 8.13, 19.2, 5.69, 6.91, 13.9, 13.9, 5.69\}$

$GR = \{4.58, 4.58, 2.72, 1.5, 2.13, 3.04, 1.5, 1.82, 2.74, 2.74, 1.5\}$

$s = \{1.64383, -3.65311, -4.29587, 2.8701, -0.0712505, 0.550898, 1.13601, -0.989072, 0.450636, -1.13325, -1.01577, 0.017169, 1.61766, -3.68996, -4.29773, 2.94423, -0.0978138, 1.41833, 1.59959, -0.74181, 0.178644, -1.495, -1.7767, 0.0349379, 1.60714, -3.88891, -4.45305, 3.09909, -0.153475, 3.17056, 2.6769, -0.427493, 1.12914, -5.52452, -0.32557, 2.83376, 1.7458, -3.51163, -3.64924, 3.35752, -1.51763, -2.89764, 2.24795, -4.05661, 3.56854, -2.19457, 2.43606, 1.46404, 1.51588, -3.24282, -2.92666, 2.83963, -1.80145, -2.98647, 2.64725, -4.36204, 3.67158, -2.47257, 2.40545, 1.66532, 1.26484, -2.35483, -2.0735, 2.23154, -2.07157, -3.17437, -3.21263, -2.6696, 1.32646, 2.81757, 2.42139, 1.81322, 1.15798, -1.56998, -1.95335, 1.51008, -0.0743866, -3.52796, -0.0457856, -2.72111, 1.84784, -1.5163, 2.90599, -3.21925, -0.254748, -3.37896, -2.93873, 2.32983, 2.24768, -1.72466, 1.05261, -1.30453, 0.948376, -2.02205, 0.426222, 1.40628, 1.01048, -5.07055, -1.65969, 4.46096, -2.41999, -0.494018, 3.4404, -1.63152, 0.950118, -2.61352, 0.187268, 1.81442, 0.438894, -1.49014, 2.2825, 1.68009, -0.907408, -0.450585, -2.77611, -0.578365, 0.028442, 1.70745, 0.0921824, 0.553097, 0.343695, -0.0881657, -0.0879664, 0.354104, -0.00920536, -0.397559, -0.000165048, -0.396961, -0.00742688, -0.00759134, -0.00729312, -0.00551245, 1.43198, -0.033797, 0.186611, 0.252223, -0.744428, -2.78831, -3.01201, 0.162421, -0.0857156, 0.82664, 1.55801, 1.55716, 4.25152, -0.523942, -0.26144, -0.530177, -0.267721, -0.459614, -0.0214953, -0.0188008, -0.458928, 0.954428, 0.754445, 0.963296, 0.763357, -2.47879, 2.47623, -2.40067, -1.9016, 0.479082, 0.659478, -1.63655, -1.51454, -1.28699, -0.548817, -0.749699, -0.409464, -0.636268, 2.9287, 2.68023, 0.828802, -1.50547, -0.2073, -0.503471, -0.530251, -0.269739, -0.534429, -0.265663, -0.462864, -0.0206927, -0.0209906, -0.4616, 0.963136, 0.765947, 0.971282, 0.763745, 1.46229, -0.0902244, -0.481576, 2.7403, -2.30891, 2.20108, 0.0514579, -0.363756, -0.136441, 0.265605, -0.757986, -1.97045, -2.19857, 0.627229, 0.377164, 0.834874, 1.37652, 1.30565, 3.19607, -0.529155, -0.265425, -0.531264, -0.269524, -0.460659, -0.0262179, -0.0187857, -0.462617, 0.965572, 0.765581, 0.969893, 0.769657, -1.72539, 1.21268, -1.19406, -1.27451, -0.0517349, 0.570839\}$

Az egyes rúdelemekhez számolt kritikus feszültségek a következőképp alakultak:

$ssmins = \{-57.1084, -57.1084, -57.1084, -57.1084, -1.68884, -1.68884, -1.68884, -1.68884, -2.91461, -2.91461, -2.91461, -57.1084, -57.1084, -57.1084, -57.1084, -2.37771, -2.37771, -2.37771, -2.37771, -5.18153, -5.18153, -5.18153, -5.18153, -57.1484, -57.1484, -57.1484, -57.1484, -3.42705, -3.42705, -3.42705, -3.42705, -11.6585, -11.6585, -11.6585, -11.6585, -191.316, -191.316, -191.316, -191.316, -16.0781, -16.0781, -16.0781, -16.0781, -21.4746, -21.4746, -21.4746, -21.4746, -191.316, -191.316, -191.316, -191.316, -18.4726, -18.4726, -18.4726, -18.4726, -27.6407, -27.6407, -27.6407, -27.6407, -191.316, -191.316, -191.316, -191.316, -21.264, -21.264, -21.264, -21.264, -36.9005, -36.9005, -36.9005, -36.9005, -191.316, -191.316, -191.316, -191.316, -24.4634, -24.4634, -24.4634, -24.4634, -51.7316, -51.7316, -51.7316, -51.7316, -67.4773, -67.4773, -67.4773, -67.4773, -57.0857, -57.0857, -57.0857, -57.0857, -176.102, -176.102, -176.102, -176.102, -67.4773, -67.4773, -67.4773, -67.4773, -64.7806, -64.7806, -64.7806, -64.7806, -293.6, -293.6, -293.6, -293.6, -67.4773, -67.4516, -67.426, -67.4516, -72.4673, -72.308, -72.4436, -72.3316, -593.58, -593.58, -593.58, -593.58, -67.4773, -67.4773, -67.4773, -67.4773, -78.9518, -78.9518, -78.9518, -78.9518, -1728.93, -1728.93, -1728.93, -1728.93, -178.222, -145.098, -145.393, -972.522, -145.393, -145.378, -177.841, -117.74, -117.552, -117.74, -117.743, -117.559, -35.2872, -46.3791, -185.516, -46.3578, -185.461, -206.687, -244.196, -119.001, -177.894, -13.9934, -22.4446, -13.9828, -22.4434, -36.5748, -33.4792, -35.0942, -31.156, -30.4732, -29.793, -173.733, -144.13, -144.406, -972.522, -144.406, -144.13, -173.733, -117.055, -116.872, -117.055, -117.055, -116.872, -35.0808, -46.3472, -185.389, -46.3472, -185.389, -80.7372, -138.626, -55.5789, -107.708, -13.9532, -22.3526, -13.9532, -22.3526, -34.7821, -27.7198, -23.904, -29.8681, -26.3141, -22.818, -167.812, -141.769, -142.087, -972.522, -142.087, -141.769, -167.812, -115.506, -115.356, -115.506, -115.506, -115.356, -34.6167, -46.3106, -185.302, -46.3106, -185.302, -42.9502, -89.4595, -32.0632, -72.5024, -13.8756, -22.1608, -13.8756, -22.1608, -32.9351, -22.5851, -16.4906, -28.5057, -22.1937, -16.8448\}$

A feszültségek és feszültségkorlátok számolását követően a stabilitási ellenőrzés eredménye a segédlistát kiírva, valamint a szerkezet megfelelőségét, a következő alakot ölti:

[illegible]

Megfelel

A módszer működésének ellenőrzéseképp hajtsuk végre a vizsgálatot ugyanezen a szerkezeten annyi különbséggel, hogy a megengedett elmozdulásokat emeljük 15cm-re. ez esetben a megoldások a következőképp alakultak a részleteket mellőzve.

Folytonos megoldás:

$$W = 1289.19$$
$$A = \{13.4755, 11.9525, 5.17159, 1.67453, 2.59826, 6.32523, 1.75582, 2.18405, 4.3652, 4.31022, 1.79997\}$$

Diszkrét megoldás

$$w = 1430.13$$
$$A = \{13.9, 12.3, 5.69, 1.74, 2.67, 6.91, 2.67, 2.67, 4.8, 4.8, 2.67\}$$
$$GR = \{2.74, 2.43, 1.5, 0.899, 1.05, 1.82, 1.05, 1.05, 1.51, 1.51, 1.05\}$$

Stabilitás ellenőrzés:

[illegible]

Nem felel meg

7.4.3. Stabilitási ellenőrzés tesztelésének értékelése

A beépített Euler-féle stabilitási ellenőrzés a programban megfogalmazottaknak megfelelően végrehajtja a feladatát. Az adott vizsgálati példán megmutatta, hogy bár a folytonos keresztmetszeti változók optimális megoldásainak keresése során az állapotváltozókat illetően csupán feszültség, valamint elmozdulás korlátok voltak definiálva, bizonyos elmozdulás korlátok esetén az azok kielégítéséhez szükséges szögacél szelvények jó kihajlási ellenállásuknak köszönhetően a vizsgált lokális stabilitási feltételeknek is megfelelnek, nagyobb megengedett elmozdulás korlátok esetén azonban a szerkezet a stabilitási feltételeknek már nem tett eleget. Az ily módon kiegészült program jól alkalmazható bármely szelvénytípusok esetén a lokális stabilitási feltételek teljesülésének ellenőrzésére, alternatívát nyújtva így azok az optimalizálás során való hiányára, azonban a szerkezet globális stabilitás vizsgálata annak bonyolultsága miatt, továbbra sem kerül vizsgálat alá. A globális stabilitási probléma kezelésére, az egyensúlyi utat megfelelő szintig figyelemmel kísérő útkövető módszerek [15],[16] javasoltak. *A globális stabilitási problémától eltekintve azonban a program jelen formájában a szerkezetekre vonatkozó Eurocode szabványban fellelhető teherelemzési előírások vizsgálatba vételével, valamint korlátokként a szabványban fellelhető határokat beépítve, önmagában alkalmazható tervezési feladatok végrehajtására.*

8. Összegzés

A dolgozat a célkitűzéseinek megfelelően kezdetben megfelelő ismeretanyagot összegyűjtött az optimalizálás elméleti hátterét illetően, kitérve az általános formulákra, valamint a megoldási módszerek irányvonalaira és azok legfőbb eszközeire. Az elkészítendő súly szerinti optimalizáló program vizsgálati szerkezeteként szolgáló térbeli rácsos tornyokat illetően, feltérképezte a vizsgálandó terhelési eseteit és azok számítási menetét a vonatkozó szabványok alapján, ezen felül általános ismertette a szerkezetek statikai modelljét.

A súlyszerinti optimalizáló program kialakítását illetően egy folytonos keresztmetszeti változós, diszkrét szerkezeti rendszerű térbeli rácsos tartó optimalizálására alkalmas megoldásból kiindulva az elvártaknak megfelelően azt tovább fejlesztve sikerült egy a tervezési feladatok végrehajtására egyre magasabb szinten alkalmassá váló programot létrehozni. Az eredmények megjelenítésével kapcsolatos az előzetes elvárások teljes mértékben teljesültek. A program minden fejlődési szintjén tesztelésre került, ahol alkalmazhatósága, korlátai, valamint továbbfejlesztési lehetőségei megállapításra kerültek. Az állapotváltozókra tett korlátokat illetően bemutatásra került a folytonos keresztmetszeti változós megoldás esetére a csomóponti elmozdulásokra, valamint az elemekben ébredő feszültségekre megfogalmazható feltételek alkalmazása az optimalizálás során. Az is megállapításra került, hogy a keresztmetszeti változók folytonos, alaknélküliségéből adódóan, lokális stabilitási feltételek csak cső szelvények alkalmazását feltételezve, a szelvény keresztmetszetére tett megkötések útján fogalmazhatóak meg. A folytonos keresztmetszeti változó további problémájaként jelentkezett, hogy mivel a keresztmetszetek megoldásaként nem a szerkezet megépítésére használandó tényleges szelvényméreteket szolgáltatta, így az optimális szerkezet súlya gyakorlati szempontból nem volt ténylegesen értelmezhető.

A körvonalazódott irányvonalnak megfelelően az optimalizálás eredményekként jelentkező folytonos megoldásokra épülve beépítésre került a programba egy szelvénytárból való keresés, így végeredményként, a szerkezet jellegének megfelelő, a programba rögzített szelvénykatalógus tartalmából választott diszkrét keresztmetszeti változókat kaptunk eredményül. A szelvénykatalógus rögzítése továbbá lehetőséget nyújtott rá, hogy a szelvények keresztmetszeti méreteinek rögzítése mellett, az inercia sugaruk rögzítésével, végrehajtsunk egy lokális stabilitás ellenőrzést az optimalizálás eredményeként előálló szelvényekkel. Bár a stabilitási feltétel tetszőleges keresztmetszet esetén továbbra sem jelent meg, mint az optimalizálás során alkalmazott korlát, azonban a rácsos tornyok robosztus mérete mellett a csomóponti elmozdulások betartásához szükséges keresztmetszetek alkalmazása, mint ahogy azt a dolgozat során végrehajtott teszt is igazolta, gyakran a lokális

stabilitási feltételek teljesülését is maguk után vonják. Amennyiben a stabilitási feltételek nem teljesülnek, a beépített stabilitás ellenőrzés felépítésének köszönhetően segítséget nyújt a feltételnek nem megfelelő rúdelemek feltérképezéséről, tehát beépítése mindenképpen hasznosnak bizonyult a program tervezési feladatok végrehajtásához való alkalmasabbá tételében.

A program kialakítása során a vizsgálati szerkezetek, tehát a rácsos torony szerkezetek viselkedésére irányuló következtetések is megállapításra kerültek. A group szintek vizsgálata során kiderült, hogy mi az a keresztmetszeti változó szám, melyet egy rácsos torony, például adótorony, vagy távvezeték tartó oszlop esetén érdemes alkalmazni, a szerkezet súlyának lehető legalacsonyabban tartásával. Továbbá az is megállapításra került, hogy természetesen az alkalmazandó legkedvezőbb group szint minden esetben rendkívül szerkezeti alakfüggő, a bemutatott vizsgálatot azonban könnyedén végrehajthatjuk bármely szerkezeti geometria esetén. Az optimális szerkezet súlyokat illetően, az adótorony modellen keresztül megtekinthettük, hogy az állapot tényezőkre tett korlátok különböző szintjeinek milyen hatása van a szerkezet súlyára.

Végeredményként megállapítható, hogy a dolgozatban sikerült megvalósítani az előzetes célkitűzéseket, a kialakított súly szerinti optimalizáló program képes tervezési feladatok végrehajtására, az elindult irányvonalon sikerült az elérhető legmagasabb szintre való fejlesztése a dolgozat kereteihez mérten. Az is nyilvánvalóvá vált, hogy a stabilitási feltételek optimalizálásba való beépítése jelentette a legnagyobb kihívást a dolgozat során, ahol a szerkezet globális stabilitás vizsgálata nem került vizsgálat alá. A probléma kezelésére a súly szerinti optimalizálás más irányból való megközelítése, heurisztikus módszerek alkalmazás nyújthatna megoldást. Tovább lépési lehetőségként is egy az ezen irányvonalon felépített program felépítése jelölhető meg, mely alkalmasabb volna a stabilitás problémák kezelésére, a dolgozat során létrehozott programmal szemben, az alkalmazott állapotváltozókra tett korlátok mellett azonban, nem feltétlenül eredményezne jobb megoldásokat.

9. Irodalomjegyzék

- [1] Csébfalvi Anikó – Optimális szerkezettervezés jegyzet
- [2] Kaliszky Sándor, Lógó János, Nédli Péter – Rúdszerkezetek teherbírásának számítása és optimális tervezése
- [3] Dr. Kollár Lajos: Mérnöki szerkezetek tervezése
- [4] M. Dorigo, Optimization, Learning and Natural Algorithms, PhD thesis, Politecnico di Milano, Italie, 1992.
- [5] Antcolony optimization – Techniques and applications, Edited by Helio J.C. Barbosa
- [6] Goldberg D. E., Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning, Addison-Wesley, Reading, Mass., 1989.
- [7] Csébfalvi, A. (2007). Angel method for discrete optimization problems. Periodica Polytechnica Civil Eng, 51/2, 37-46, 10.3311/pp.ci.2007-2.06.
- [8] Csébfalvi, A. (2007). Optimal design of frame structures with semi-rigid joints. Periodica Polytechnica Civil Eng, 51/1, 9-15, 10.3311/pp.ci.2007-1.02.
- [9] Csébfalvi, A. (2009). A hybrid meta-heuristic method for continuous engineering optimization. Periodica Polytechnica, Ser Civ Eng, 53(2), 93-100, 10.3311/pp.ci.2009-2.05.
- [10] Csébfalvi, A. (2011). Multiple constrained sizing-shaping truss-optimization using ANGEL method. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 55/1, 81-6, 10.3311/pp.ci.2011-1.10.
- [11] MSZ EN 1993-3-1 Acélszerkezetek tervezése: 3-1.rész: Tornyok, árbocok, kémények.
- [12] MSZ EN 1991-1-4 A tartószerkezeteket érő hatások: 1-4.rész: Általános hatások. Szélhatás
- [13] ISO 12494 „Atmospheric Icing of Structures” and How to Use It
- [14] Csébfalvi, A. An Improved ANGEL Algorithm for the Optimal Design of Shallow Truss Structures with Discrete Size and Continuous Shape Variables and Stability Constraints. Erik Lund (ed) 9th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization: WCSMO-9. Shizuoka, Japan, Shizuoka:paper ID: 100_1, 1-8.
- [15] Hanahara, K., & Tada, Y. Global Buckling Has to be Taken into Account for Optimal Design of Large-Scale Truss Structure. Erik Lund (ed) 9th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization: WCSMO-9. Shizuoka, Japan, Shizuoka:paper ID: 142_1, 1-10.
- [16] Csébfalvi, A. (2010). A Higher-Order Path-Following Method for Stability-Constrained Optimization of Geometrically Nonlinear Shallow Trusses. O Allix, P Wriggers (ed) ECCM 2010, IV European Conference on Computational Mechanics, Palais des Congrès, Paris, France, May 16-21, 2010: European Committee on Computational Solids, 2010.05.16-2010.05.21. , 1-7.