

# GÉP

## A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET

műszaki, vállalkozási, befektetési, értékesítési, kutatás-fejlesztési, piaci információs folyóirata

### SZERKESZTŐBIZOTTSÁG

Dr. Döbröczeni Ádám

**elnök**

Vesza József

**főszerkesztő**

Dr. Jármai Károly

Dr. Péter József

Dr. Szabó Szilárd

**főszerkesztő-helyettesek**

Dr. Barkóczi István

Bányai Zoltán

Dr. Beke János

Dr. Bercsey Tibor

Dr. Bukoveczky György

Dr. Czitán Gábor

Dr. Danyi József

Dr. Dudás Illés

Dr. Gáti József

Dr. Horváth Sándor

Dr. Illés Béla

Kármán Antal

Dr. Kulcsár Béla

Dr. Kalmár Ferenc

Dr. Orbán Ferenc

Dr. Pálincás István

Dr. Patkó Gyula

Dr. Péter László

Dr. Penninger Antal

Dr. Rittinger János

Dr. Szabó István

Dr. Szántó Jenő

Dr. Tímár Imre

Dr. Tóth László

Dr. Varga Emilné Dr. Szűcs Edit

A szerkesztésben közreműködött:

Dr. Jármai Károly

### KEDVES OLVASÓ!

A Gép folyóirat második számában folytatjuk a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt keretében az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával megvalósuló azon kutatásokat ismertetését, melyek a 4-es Kiválósági Központ keretében Innovációs Gépészeti Tervezés és Technológiák címmel folynak a Miskolci Egyetemen. A Kiválósági Központ a kutatás, a fejlesztés, az innováció és az oktatás szolgálatában áll. A központ célja a kutatási potenciál fejlesztése olyan kutatásokkal, amelyek innovatív modellezést, tervezést és technológiai folyamatokat valósítanak meg. Ez összhangban van az Európai Unió azon törekvésével, amely az innováció serkentésére, a leg-hatékonyabb környezetbarát technológiák alkalmazására, fejlesztésére irányul.

A Kiválósági Központ hét tudományos műhelyre tagozódik, melyek egy-egy tanszék köré szerveződnek. Ezek a következők: Mechanikai Technológiai, Gépgyártástechnológiai, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek, Vegyipari Gépek, Mechanikai, Gép- és Terméktervezési, valamint az Anyagmozgatási és Logisztikai Tanszék. Az itt dolgozó oktatók BSc, MSc és doktorandusz hallgatókat is bevonnak a kutatásokba, amelyek így jó lehetőséget biztosítanak arra, hogy a fiatalok megismerkedjenek a tudományos munkával. A háromnegyed éve működő központ programjához kapcsolódva nem egy hallgató nyújtott már kiemelkedő teljesítményt, illetve készített színvonalas TDK dolgozatot.

Felvetődik az, hogy hol jelennek meg az eredmények, az eddigi eredmények alkalmazása hol történhet? A Tudományos Műhelyeken belül működő húsz K+F téma nagyon szerteágazó. Néhány közülük az alapkutatásokhoz közelít, míg mások inkább a gyakorlatban alkalmazhatók, egyesek már most látványos eredményt hoztak, mások távlati eredményekkel kecsegtetnek. Annak érdekében, hogy ezeket az eredményeket a szakmai közönség is megismerhesse, a műhely kutatói jelentős számú publikációt készítettek el és jelentettek meg hazai és külföldi konferenciákon, hazai és külföldi szakmai folyóiratokban. Természetesen az oktatásba is beépítésre kerülnek az eredmények. Ez a cikkgyűjtemény is ezt a célt szolgálja, bemutatva a Kiválósági Központ Tudományos Műhelyeinek leg-újabb tudományos eredményeit.

*Prof. Dr. Jármai Károly*

egyetemi tanár, a Kiválósági Központ vezetője

A szerkesztésért felelős: Vesza József. A szerkesztőség címe: 3534 Miskolc, Szervezet utca 67.

Telefon/fax: +36-46/379-530, +36-30/9-450-270 • e-mail: mail@gepujsag.hu

Kiadja a Gépipari Tudományos Egyesület, 1027 Budapest, Fő u. 68. Levélcím: 1371 Bp. Pf.: 433.

Telefon: 202-0656, fax: 202-0252, e-mail: a.gaby@gteportal.eu, internet: www.gte.mtesz.hu

A GÉP folyóirat internetcíme: <http://www.gepujsag.hu>

Kereskedelmi és Hitelbank: 10200830-32310236-00000000

Felelős kiadó: Dr. Igaz Jenő ügyvezető igazgató.

Gazdász Nyomda Kft. 3534 Miskolc, Szervezet u. 67. Tel.: (46) 379-530, e-mail: gazdasz@chello.hu.

Előfizetésben terjeszti a Magyar Posta Rt. Hírlap Üzletága 1008 Budapest, Orczy tér 1.

Előfizethető valamennyi postán, kézbesítőknél, e-mailen: [hirlapelofizetes@posta.hu](mailto:hirlapelofizetes@posta.hu), faxon: 303-3440. További információ: 06 80/444-444

Egy szám ára: 1260 Ft. Dupla szám ára: 2520 Ft.

Külföldön terjeszti a Kultúra Könyv és Hírlap Külkereskedelmi Vállalat,  
H-1389 Budapest, Pf. 149. és a Magyar Média, H-1392 Budapest, Pf. 272.

Előfizethető még közvetlenül a szerkesztőségben is.

INDEX: 25 343 ISSN 0016-8572

**A megjelent cikkek lektoráltak.**

# TARTALOM

## 1. Kamondi L.

**Innovatív gépészeti termékfejlesztés..... 3**  
A műszaki termékek számos olyan alapfunkciókkal rendelkeznek, melyeket tervezési szempontból újra kell gondolni ahhoz, hogy a termék-megfelelőséget a kor pillanatnyi követelményeinek biztosítani tudják. A cikk a fejlesztési módszertannal és a funkció-megoldással foglalkozik, melyek lehetőséget nyújtanak az alkalmazásra és a fejlesztők orientálására.

## 14. Ecsedi I., Baksa A.

**Egy egydimenziós állandósult állapotú hővezetési feladat analitikus megoldása ..... 9**  
Egy egydimenziós, állandósult állapotú hővezetési feladat analitikus megoldását ismerteti a tanulmány. A vizsgálat tárgyát képező szerkezeti elem egyenes és körív középvonalú rudak láncszerű, elágazás mentes összekapcsolásával van kialakítva. Villamos ellenállás fűtés következtében beálló stationárius hővezetést vizsgálunk. A fajlagos ellenállás hőfok függésével is számol a tanulmány.

## 3. Daróczy L., Jármai K.

**Acélvázak szerkezetek tervezésének automatizálása topológiai optimalizálással ..... 13**  
Az új megközelítés alapötlete az, hogy a topológiai optimalizálás eredményét kizárólag az optimális topológia meghatározásához használjuk fel. A program automatikusan detektálja szerkezetet, és a végeredményt egy méretezési feladathoz használja fel bemenetként. Az alábbi megközelítés kifejezetten a nagyméretű acélvázak szerkezetekre fókuszál. A cikkben javasolt eljárás nem csak gyors és megbízható, de viszonylag egyszerűen implementálható, a 2D-s és 3D-s tesztek során gyorsnak is bizonyult.

## 4. Dül R., Palotás Á.B., Jármai K., Barkóczy P.

**Égési levegőt előmelegítő hőcserélő fejlesztése kandallóhoz ..... 19**  
A kutatás célja, hogy egy házi használatú, fatüzelésű, hegesztett acél szerkezetű kandalló hatásfokát növelik meg a kandalló kilépő füstcsonkjára helyezhető hőcserélő segítségével. Az általuk kifejlesztett berendezés feladata az, hogy a primer és szekunder égési levegőt is előmelegítve növeljük a kandalló hatásfokát. A fejlesztési folyamathoz áramlástan szimulációt (CFD) használtunk.

## 5. Farkas J., Jármai K.

**Csőszelvényű rácsos tartó térfogat- és költség minimálása elmozdulás-korlát esetén ..... 23**  
Az optimalizációs probléma a következő: megtalálni az optimális geometriát és a rudak keresztmetszeti területeit, amelyek minimalizálják a szerkezet térfogatát vagy költségét egy kéttámaszú rácsos csőszelvényű, nem-párhuzamos övek és szigorú lehajlási feltétel esetén.

## 6. Jármai K., Farkas J.

**Egyirányú nyomással terhelt cellalemez tervezése költségminimumra..... 29**  
A cellaszerkezetű lemezek két fedőlemezről és a köztük hegesztett bordarácsból állnak. Kettévágott I-szelvényeket használunk merevítőül gyártási okokból. A cellák nagyon merevek csavarás szempontjából. Az egyirányú nyomás kihaj-

lási hatását a Huber-egyenlet megoldásából határozhatjuk meg. Két optimáló algoritmust alkalmaztunk, a Részecskecsoport módszert és a Válaszfelületek módszerét.

## 7. Kota L.

**Genetikus programozás és tabu keresés összehasonlítása műszaki felügyeleti és karbantartó rendszerek optimalizációs feladatainál ..... 33**  
Ebben a cikkben bemutatásra kerül a már előzőleg publikált, a fix végpontú több körjáratos többszörös utazó ügynökös probléma megoldására (mmTSP) kifejlesztett egyfázisú genetikus programozási algoritmus valamint a tabu keresés algoritmusának összehasonlítása. A cikk számos tesztproblémán keresztül mutatja be a genetikus programozási algoritmus előnyét a tabukereséshez képest

## 8. Kovács Gy.

**Kompozit szendvicsszerkezet optimális tervezése ..... 37**  
Egy új szerkezeti modell szerkezet-optimalizációs módszere került bemutatásra. A szerkezet laminált karbonszál-erősítéses fedőlemezekből (CFRP) és különböző típusú polisztirol szigetelő rétegekből (EPS) ragasztással lett összeállítva. A tervezés során az ideális rétegszámú CFRP fedőlemezekből, valamint az ideális típusú és vastagságú EPS belső rétegből összeállított optimális szendvicsszerkezet került meghatározásra, mely szerkezet biztosítja a minimális költséget és minimális tömeget.

## 9. Virág Z., Jármai K.

**Bordázott lemezek fáradás vizsgálata különböző bordatípusokra..... 41**  
A cikkben az egyirányban nyomott bordázott lemezek vizsgálatát mutatják be különböző merevítők alkalmazásával költségszámítás mellett. A Nemzetközi Hegesztési Intézet ajánlásai alapján vizsgálják a nyomott lemezt. Az optimalizálásnál a merevítők száma ismeretlen. A trapézbordás merevítők bizonyultak a legjobbnak.

## 10. Mannheim V.

**Komplex modell bevezetése pop tartalmú hulladékok termikus ártalmatlanítási technológiáinak mérlegetésére ..... 45**  
Vannak „zöld kémia” módszerek és más kezelési módszerek a szerves ipari hulladék mennyiségének csökkentésére, de jelenleg termikus kezelési eljárás a legnépszerűbb alternatíva. Ez a cikk összefoglalja a termikus kezelési eljárásokat, összehasonlítja a különböző technológiákat, hangsúlyozva a befolyásoló tényezőket az alkalmazhatóság és működési megbízhatóság szempontjából.

## 11. Venczel G., Szepesi G., Siménfalvi Z.

**Hőátadási tényezők közvetett meghatározása duplikatúrás készülékek köpenyterében ..... 49**  
A hőátviteli folyamatok számítása során a hőátadási tényezők kritériális egyenletekből határozhatók meg, amennyiben a szükséges geometriai és műveleti adatok, valamint az anyagtulajdonsági jellemzők rendelkezésre állnak. A cikkben egy olyan számítási eljárást ismertetünk, amely segítségével a mért üzemi adatokból meghatározhatóak a hőátadási tényezők.

# ACÉLVÁZAS SZERKEZETEK TERVEZÉSÉNEK AUTOMATIZÁLÁSA TOPOLOGIAI OPTIMÁLÁSSAL

## AUTOMATIZATION OF DESIGN OF FRAME AND TRUSS STRUCTURES USING TOPOLOGY OPTIMIZATION

Daróczy László\*, Dr. Jármai Károly\*\*

### ABSTRACT

*Although the field of topology optimization is a well-researched and advanced area, using topology optimization is still only the starting phase for a design process as almost no manufacturing constraints can be taken into account. The current article proposes a method to fully automatize the design of truss and frame structures using topology optimization, image interpretation and finally through a sizing problem, and focuses especially on the image interpretation part by introducing a flexible and fast method to extract the cross-section and number of joints, and the number, location and type of connections between them. Finally, some examples are presented in 2D and 3D for the image interpretation.*

### 1. BEVEZETÉS

A számítógépek fejlődésével, a rendelkezésre álló számítási kapacitásoknak és a növekvő teljesítményeknek hála, valamint a véges-elem modellek (a továbbiakban VEM) fejlődésének és elterjedésének hála a rácsos tartók tervezése topológiai optimalás segítségével (a továbbiakban TO) egy megvalósítható tervezési alternatívává vált. A manapság elterjedt topológiai optimaló szoftverek képesek egyszerre több peremfeltétellel és akár több célfüggvényre vonatkozó megszorítással dolgozni egyszerre [1,2]. Ennek ellenére a topológiai optimalás eredményei nem használhatóak fel rögtön közvetlenül, hanem csupán egy kezdőpontként fog szolgálni a tervezést végző mérnök számára, mivel a topológiai optimalás végeredménye pl. nem szabványos profilú, de sokszor akár nem is állandó keresztmetszetű gerendákból van összeállítva, illetve a kötések vagy kihajlásra típusára is nehézkes

megkötéseket megadni. Bár több módszer is létezik optimális rácsos szerkezetek létrehozására, de a legtöbb ezek közül kötött számú rudat alkalmaz, amelyek csak előre meghatározott módon kapcsolódhatnak egymáshoz [3,4], és a CAD rendszerek és TO-rendszerek megfelelő integrációja még mindig hiányzik.

### 2. TERVEZÉSI FOLYAMAT AUTOMATIZÁLÁSA

Az új megközelítés alapötlete az, hogy a topológiai optimalás eredményét kizárólag az optimális topológia meghatározásához (azaz a szerkezeti elemek száma és típusa, valamint a közöttük lévő kötések) használjuk fel. A program automatikusan detektálja szerkezetet, és a végeredményt egy méretezési feladathoz használja fel bemenetként. A hasonló többlépcsős feldolgozások az az utóbbi időben egyre több helyen jelentek meg, ezek egy része azonban az alakoptimalás segítségével lép tovább [5,6,7], vagy egy szűk gyártási területre fókuszál, jellemzően kis méretű alkatrészekre szűkítve a kört [8]. Az alábbi megközelítés kifejezetten a nagyméretű acélvázak szerkezetekre fókuszál.

Azaz a feltételezéssel élve, hogy a topológia maga optimális, a méretezés célja pl. rácsos szerkezetek esetén a csomópontok pontos helyzetének és a rudak keresztmetszetének meghatározására egyszerűsödik. Ez utóbbi terület egy széles körben elterjedt eljárás a mérnöki tervezésben [9].

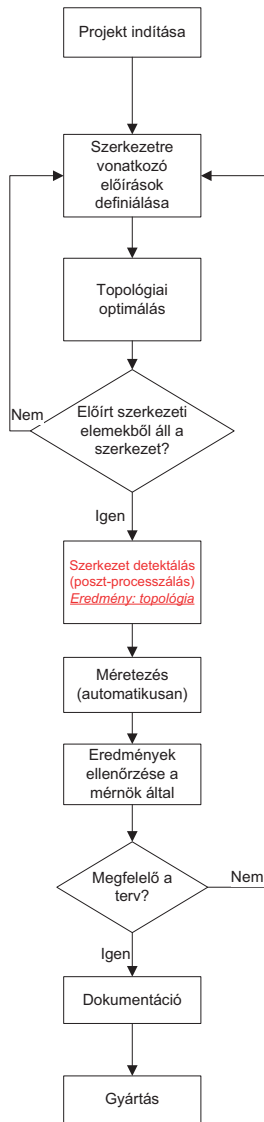
Mivel a méretezési feladat során a változók száma jelentősen kisebb, mint a topológiai optimalás folyamán, ezért ez gyorsan és pontosan végrehajtható, illetve például figyelembe vehetőek az EUROCODE szabvány által meghatározott, kihajlása és horpadásra vonatkozó feltételek is, valamint a cég különböző gyártástechnológiára és gyárthatóságra vonatkozó korlátait egyaránt.

Bár sok vázvonala- vagy „sontváz” detektáló algoritmus létezik, azonban ezek nem kifejezetten az optimalási feladatok végeredményének feldolgozására lettek kifejlesztve, ezért az alábbiakban ismertetésre kerül egy bitminta-primitív szűrők segítségével működő

\* gépészmérnök MSc hallgató, Miskolci Egyetem

\*\* egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Anyagmozgatási és Logisztikai Tanszék

detektáló algoritmus (ld. 1. ábra), mely a tesztek folyamán 100%-os megbízhatóságot mutatott.



1. ábra. Tervezés folyamata

**Átmeneti csomópont:** Pontosán két rúd közötti kapcsolódási pont. Ez a csomópont jelenthet egy átmeneti kapcsolatot a detektálás folyamatában, vagy egy végleges csomópontot amennyiben a rudak szögét bezáróan kapcsolódnak.



2. ábra. SIMP megoldása (TD: 160x40)



3. ábra. RTD (TD: 960x160)

Az alábbiakban néhány, a későbbiekben alkalmazásra kerülő fogalmat definiálunk.

**Topológiai szerkezet (TD – Topology Design):** A topológiai optimalítás végeredménye, ami tervezési tartományon belül értelmezett sűrűségértékekből áll (azaz az optimalt változók értékeiből; SIMP esetén ezek a  $[0,1]$  vagy  $[x_{\min},1]$  tartományban található értékek  $[10,11]$ ; ESO/BESO esetén ezek a diszkrét  $0.0/1.0$  vagy  $x_{\min}/1$  értékek hard- illetve soft-kill eljárás esetén  $[12,13,14]$ ). A diszkrétizáció történhet strukturált vagy strukturálatlan véges-elemes hálón, esetleg egyéb eljárásokkal is.

**Csomópont:** Két vagy több rúd találkozási pontja.

**Végleges csomópont:** Olyan rudak kapcsolódási pontja, amelynek a végleges topológiában is léteznie kell.

**Evidens csomópont:** Három vagy több rúd közötti csatlakozási pont. Egyben végleges csomópont is.

### 3. DETEKTÁLÓ ALGORITMUS FELÉPÍTÉSE

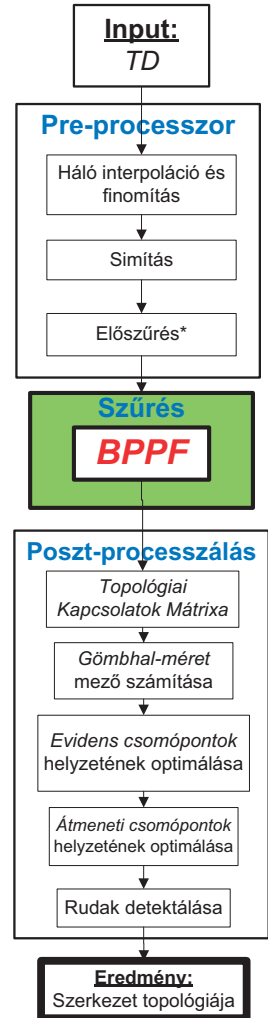
A detektáló algoritmus többszintű, bemeneti adata egy TD, és az alábbi lépésekre osztható fel (ld. 4. ábra):

1. lépés: A véges-elemes hálón alapuló TD alapján a BPPF számára is értelmezhető adat létrehozása.

a, **Háló interpoláció és simítás:** Ezen lépés célja az RTD létrehozása, mely az alábbiak szerint lesz definiálva:

**Finomított Topológiai Szerkezet (RTD – Refined Topology Design):** Strukturált diszkrétizált négyzetes (3D esetén kocka alapú) háló, mely a sűrűségértékeket tárolja. A TD értékeinek interpolációjával állítható elő. Amennyiben az eredeti TD is ilyen hálóval került kiszámításra, akkor az RTD megegyezhet a TD-vel, ellenkező esetben két eljárás használata javasolt az interpolációhoz.

Az első esetében a nagyon finom strukturált négyzetes (2D)/kocka alapú (3D) hálót az eredeti hálón belül, megfelelő nagyszámú pont esetén történő mintavételezéssel, míg a második esetben a cellánkénti sűrűségértékek történő átszámításával, majd ezek alapján az eredeti véges-elem háló alakfüggvényeivel történő interpolációval állítható elő.



4. ábra. Algoritmus felépítése

b, **Simítás:** Mivel a hálóinterpoláció eredményeként egyes esetekben az eredeti cellák különálló szerkezeti elemekként, blokkonként jelennek meg, ezért ajánlott a TO-ban alkalmazott hálófüggetlenségi szűrőhöz  $[10,14,15]$  hasonló szűrőt alkalmazni a szerkezetre  $r_s = (0.5 - 1.0)r_{\min}$  sugárral, ahol  $r_{\min}$  a TO-ban alkalmazott szűrő sugara.

A hálófinomítási tényező jelölése  $Ref_{mesh}$ , ami azt mutatja meg, hogy hányszor finomabb az interpolált háló az eredetinél. Ajánlott értékei 2-4.

$$Ref_{mesh} = \sqrt[x]{\frac{\text{új háló elemeinek száma}}{\text{rég háló elemeinek száma}}}, \text{ ahol } \begin{matrix} x = 2 & \text{2D-re} \\ x = 3 & \text{3D-re} \end{matrix} \quad (1)$$

c, **Előszűrés:** Az előszűrés egy meghatározott BPPF alkalmazását jelenti, amely tovább finomítja az RTD

egyes részleteit, így a kapott nagyfelbontású, jó minőségű kép akár más algoritmusokhoz is alkalmazható (ld. 5. ábra).



5. ábra. RTD (simítással)

#### 4. BPPF ÁLTALÁNOS MEGFOGALMAZÁSA

Az alábbiakban ismertetésre kerül a BPPF felépítése és legfontosabb fogalmai 3D-ra. A 2D-s megközelítés nem kerül ismertetésre, azonban minden ismertetett képlet alkalmazható 2D-re is gond nélkül, amennyiben a 3. dimenziót mindenütt figyelmen kívül hagyjuk benne. Bár hasonló középvonal-detektáló algoritmusok léteznek [16], azonban ezek eltérő matematikai feltételekkel közelítik meg a feladatot, és nem tartalmaznak kiegészítő algoritmusokat az eredmények további javítására, illetve a szűrés nem szabályozható akár futásidőben. Az alábbiakban a BPPF-hez szükséges további definíciók következnek.

*Közbenő Topológiai Szerkezet (ITD - Intermediate Topology Design):* Amennyiben bármilyen szűrő (sikeresen) alkalmazásra került az RTD-re, akkor az egy ITD lesz. Más néven ez lesz az alap voxelmező (mivel minden cella 0 vagy 1 értéket tárol benne).

*Voxel cella:* Az RTD vagy ITD egyetlen cellája. Egy voxel jelölése  $[l, m, n]$ , azaz ez az  $l$ -dik cella az  $x$  irányban, valamint az  $m$ -dik cella az  $y$  irányban illetve az  $n$ -dik cella az  $z$  irányban.

*Végleges Topológiai szerkezet (TDR - Topology Design Results):* A szűrési folyamat végeredménye, ahol minden egyes voxel csak és kizárólagosan két szomszédos voxelrel rendelkezik, amennyiben az nem egy *evidens csomópontot* képvisel.

*Érték operátor:* Egyetlen cella értékét mutatja meg:  $\hat{f}[l, m, n]$ . Üres cellák esetén ez  $\hat{f}[l, m, n]=0$ , míg tömör cellák esetén  $\hat{f}[l, m, n]=1$  értéket ad vissza a TDR vagy ITD egyetlen cellájára.

*Általános szűrő:* Bármely  $r_x \times r_y \times r_z$  méretű téglalap alakú terület.

*Szimmetrikus szűrő:* Bármely általános szűrő egyben szimmetrikus szűrő is, ha  $r_x = r_y = r_z$  teljesül.

*Szűrő cella:* Egy szűrő egyetlen celláját azonosítja:  $\langle i, j, k \rangle$ , ha  $1 \leq i \leq r_x$  és  $1 \leq j \leq r_y$ ,  $1 \leq k \leq r_z$ .

*Érték operátor (szűrő esetén):* Egyetlen szűrő cella értékét mutatja meg:  $\hat{f}\langle i, j, k \rangle$ . Az implementáció során egy három-értékű reprezentáció került megvalósításra, ahol egy általános szűrő bármely celláját üres szűrő cellának nevezzük, amennyiben  $\hat{f}\langle i, j, k \rangle = 0$ , tömör szűrő cellának, amennyiben

$\hat{f}\langle i, j, k \rangle = 1$  és detektor szűrő cellának, ha  $\hat{f}\langle i, j, k \rangle = -1$ .

*Egyfókuszú szűrő:* Bármely általános szűrő, amelyre teljesül, hogy  $\hat{f}\langle i_1, j_1, k_1 \rangle = \hat{f}\langle i_2, j_2, k_2 \rangle = -1$  akkor és csakis akkor, ha  $i_1 = i_2$ ,  $j_1 = j_2$ , és  $k_1 = k_2$  azaz egyetlen detektor szűrő cellát tartalmaz.

*Aktív szűrő:* Bármely szűrő aktív szűrő a  $[l, m, n]$  pozíciónál, ha  $\hat{f}[l+i, m+j, n+k] = 0$  akkor és csakis akkor igaz, ha  $\hat{f}\langle i, j, k \rangle = 0$ ,  $1 \leq i \leq r_x$ ,  $1 \leq j \leq r_y$ ,  $1 \leq k \leq r_z$ . Az aktív szűrőket az aktiválási operátor 1 értékkel jelzi:  $\hat{A}_{filter}[l, m, n] = 1$  (egyébként 0 értéket ad vissza). Amennyiben az aktiválási operátor feltétele teljesül, akkor a szűrő hatása az alap voxelmezőre  $\hat{f}[l+i, m+j, n+k] = 0$  lesz bármely szűrőcellára, ahol  $\hat{f}\langle i, j, k \rangle = -1$  teljesül.

*Szomszédossági operátor:* Bármely két szűrő cella szomszédos akkor és csakis akkor, ha van egy közös lapjuk. Ez gyakran lesz közvetlen kapcsolatként is megnevezve. Ezt az állapotot a szomszédossági operátor 1-es értékkel fogja jelezni:  $\hat{N}\langle i_1, j_1, k_1 \rangle \langle i_2, j_2, k_2 \rangle = 1$  (egyébként 0 értéket ad vissza).

*Kapcsolódási operátor:* Bármely két cella kapcsolatban áll egymással egy úton keresztül, ha olyan megfelelő indexpárokból álló sorozat létezik, melyben minden indexpár által reprezentált cella nem üres cella, és az egymás utáni indexek szomszédos cellákat jelölnek. A kapcsolódást a kapcsolódási operátor 1-es értékkel fogja jelezni:  $\hat{C}\langle i_1, j_1, k_1 \rangle \langle i_2, j_2, k_2 \rangle = 1$  (egyébként 0 értéket ad vissza).

*Érvényességi operátor:* Az érvényességi operátor 1-es értéke fogja jelezni  $\hat{V}[filename] = 1$  (egyébként 0 értéket ad vissza) annak a szükséges és elégséges feltételét, hogy ne csökkentjük a csomópontok és rudak számát a topológiában. Ennek megfelelően csak azok a szűrők megengedettek, amelyek nem tudnak letörölni egyetlen olyan pixelt sem, amelyek lehetnének az egyszerűsített szerkezet vázvonalaának részei (azaz a detektáló szűrő cella nem lehet a szűrő szélén, illetve csak olyan pixelek törölhetőek, amelyek tömör pixelek olyan csoportjait kötik össze, melyek a detektáló szűrő cellát nem tartalmazó úton is kapcsolódnak egymáshoz.

Ezek a feltételek azonban nem elégségek ahhoz, hogy az algoritmus ne hozzon létre lokális hibákat, hurkokat, azaz szükséges definiálni az ehhez szükséges feltételeket is.

*Konzisztens ITD:* Egy olyan ITD, amelyben nem léteznek olyan élek vagy csúcok, amelyek csak két olyan voxel cellához tartoznának, amelyek nem szomszédos cellák. Ezt az állapotot a konzisztens érvényességi operátor  $\hat{V}^c[filename] = 1$  értékkel jelzi. Azokat a szűrőket, amelyek kielégítik ezt a feltételt, konzisztens szűrőknek fogjuk nevezni.

Bár a szerkezet immár konzisztens marad végig, de a csomópontok száma még mindig nőhet. Ennek elkerülése végett bevezetésre kerül az inverz szerkezet fogalma. Amikor a szerkezeten a szűrést hajtjuk végre,

valójában egy másik – rejtett – szerkezet is létezik, amely a mi szerkezetünk inverze (azaz az üres cellákból áll:  $\hat{f}(i, j, k) = 0$ ). Ha megvizsgáljuk ezt a szerkezetet, nyilvánvalóvá válik, hogy az inverz szerkezet topológiáját is sértetlenül kell hagynunk, akárcsak a konzisztenciáját. Azokat a szűrőket, amelyek kielégítik azt a feltételt, hogy az inverzük is konzisztens marad, inverzen konzisztens szűrőknek nevezzük, és ezt az állapotot az inverzen konzisztens érvényességi operátor:  $\vec{V}^{IC}[\text{filtername}] = 1$  jelöli.

Emellett belátható, hogy ha törölünk egy elemet a szerkezetből, akkor egy elemet hozzáadunk annak inverzéhez. Amennyiben ez az új elem két, korábban egymással nem kapcsolódó részét köti össze az inverz szerkezetnek, akkor abban egy új rúd jött létre, azaz a topológia sérült. Ez utóbbi feltételt kielégítő szűrőket fogjuk inverzen érvényes szűrőknek nevezni, melyeknek ki kell elégíteniük az inverz érvényességi operátort:  $\vec{V}^I[\text{filtername}] = 1$ . Matematikailag megfogalmazva  $\vec{V}^I[\text{filtername}] = 0$  bármely olyan szűrőre, amely két egymáshoz nem kapcsolódó üres régiót összekötne az aktiválás után.

Ha megpróbáljuk meghatározni az összes lehetséges érvényes detektáló szűrőt, akkor egy erősen korlátozott tagszámú csoportot kapunk – amelyek forgatással vagy tükrözéssel nem transzformálhatóak egymásba-, ezt a csoportot fogjuk bitminta-primitívnek nevezni. 2D esetén 9 primitív elegendő a szűrés elvégzéséhez, 3D esetében azonban jóval nagyobb számú létezik, ezért ebben az esetben bitminta-primitív csoportokat definiálunk, melyeket különböző tulajdonságaik alapján azonosíthatunk (pl. tömör cellák száma, stb.). Ezeket a csoportokat adhatjuk meg a programnak megfelelő szekvencia-operátorok segítségével, melyek azt határozzák meg, hogyan és milyen sorrendben kerülnek alkalmazásra az egyes szűrők (pl. az alábbi megvalósításban  $\tilde{Z}$ ,  $\tilde{B}$ ,  $\tilde{F}$ ,  $\tilde{M}$ ,  $\tilde{S}$ ,  $\tilde{D}$  operátorok).

## 5. POSZT-PROCESSZÁLÁS

A poszt-processzálás feladata nem más, mint a legkisebb olyan TCM (lásd később) megalkotása, mely megfelelően le tudja írni a szerkezet topológiáját. Bár a szerkezet 'csontváza' sikeresen detektálva van, de ennek ellenére az eredmények ebben a formában még nem használhatóak. Az evidens csomópontok azonnal felismerhetőek, de azok a végleges csomópontok, amelyek szög alatt csatlakozó rudakat kötnek össze, még nem, illetve a kötések típusa sem. Az alábbiakban röviden ismertetésre kerülnek az algoritmus egyes részei.

a, *Topológiai Kapcsolatok Mátrixának előállítása (a továbbiakban TCM - Topology Connectivity Matrix)*: Egy olyan mátrix, amely a csomópontok számát, és azok közötti kapcsolatokat (rudak) határozzák meg. Amennyiben a csomópontok számát  $n$ -nel jelöljük,

akkor ez egy  $n \times n$  méretű mátrix. Amennyiben az  $i$ -dik csomópont kapcsolódik a  $j$ -dik csomóponthoz, akkor ez fordítva is igaz, azaz  $t_{ij} = t_{ji} = 1$ , tehát a mátrix szimmetrikus:  $\mathbf{T} = \mathbf{T}^T$ .

Egyenes középvonalú tartók esetén  $t_{ij}$  nem nulla értéke jelzi a kapcsolatot, egyébként pedig ez az érték határozza meg a gerenda típusát.

Erősen ajánlott számítástechnikai okokból egy 'sparse' mátrixban tárolni az adatokat, mivel ez a mátrix egy ritka mátrix. Az egyes csomópontok pozícióját a  $\mathbf{p}$  –vel jelölt pozíció vektor fogja tárolni. Egyetlen csomópont pozíciója a  $\mathbf{p}_i$  helyen található, és az egyes komponenseket pedig  $p_{i,x}$ ,  $p_{i,y}$  jelöli.

Az előállítás során jellemzően  $Step_{mov} = (0.4 - 0.7) \cdot Ref_{mesh} \cdot r_{min}$  számú lépésenként a voxelekből álló csontváz alapján létrehozunk egy nagyfelbontású, nagy elemszámú TCM-et, későbbi feldolgozás céljából.

b, *Gömbhal operátor számítása*: A gömbhal operátor elnevezés egy egyszerű hasonlatból származik. A szerkezet minden egyes pontjába gömbhalakat helyezünk el, majd azok akkorára fúvódnak fel, amíg a szerkezet falához nem érnek. A gömbhal operátor értéke (ld. 6. ábra) tulajdonképpen egy adott pontba beírható legnagyobb olyan gömb térfogatát jelenti, melynek felszíne nem metszi a szerkezet határvonalát.



6. ábra. Gömbhal operátor (nagyobb érték sötétebb)

c, *Lokális csomóponti pozíció optimalizálás (LPPO - Local point position optimization)*: Ezen optimalizálás alapötlete, hogy a BPPF eredményeként lehetséges, hogy a TCM csomópontjai nem optimális helyzetben (értsd nem pontosan a középvonalon) helyezkednek el, de közel vannak hozzá. Ebben az esetben egy kis korrekció elvégzésével egy sokkal pontosabb megoldást érhetünk el. Az optimális pozíciót a gömbhal operátor magasabb értékei jelzik. Az LPPO folyamat a csomópontok közvetlen környezetét fogja átvizsgálni olyan pozíciók után kutatva, ahol a gömbhal operátor értéke magasabb, azaz közelebb található a középvonalhoz. Amennyiben azonban több csomópont is a skalármező egyik maximumának közelében található, akkor előfordulhat, hogy az összes csomópont lépésről lépésre a maximumhoz közelítene, így hibás eredményt hozva létre. Ennek elkerülésére bevezethető egy további paraméter,  $\alpha_{max}$ , azaz a tiltott szögtartomány. Így egy optimalizálási feltétellel tesszük azt is, hogy egyik csomópont sem mozoghat olyan irányokba, ami közel van egy másik, létező kapcsolat

irányához, azaz megtiltunk minden olyan mozgást, amely egy már létező kötés irányában történne.

Maximáljuk:

$$\hat{P} [p_{i,x} + d_x, p_{i,y} + d_y, p_{i,z} + d_z] \rightarrow \max$$

Úgy, hogy  $\theta_j \leq \alpha_{\max}$ , ahol

$$\theta_j = \arccos \frac{(d_x \mathbf{e}_x + d_y \mathbf{e}_y + d_z \mathbf{e}_z) \cdot (\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j)}{|d_x \mathbf{e}_x + d_y \mathbf{e}_y + d_z \mathbf{e}_z| \cdot |\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j|}, \text{ ha } t_{ij} = 1.$$

(a lehetséges mozgás iránya és a csomópontot egy másik csomóponttal összekötő irány által bezárt szög) ahol,  $0 \leq d_x, d_y, d_z \leq D_{\max}$

Az új pozíció pedig  $\mathbf{p}_i^{\text{new}} = \mathbf{p}_i^{\text{old}} + d_x \mathbf{e}_x + d_y \mathbf{e}_y + d_z \mathbf{e}_z$ .

Általában  $D_{\max} = (0.8-1.1) \cdot Ref_{\text{mesh}}$  érték egy jó választás a folyamathoz. A javasolt paraméterek a szögekre  $\alpha_{\max} = 6^\circ$  az evidens csomópontokra, és  $\alpha_{\max} = 12^\circ$  az átmeneti csomópontokra. A teljes optimalizációs folyamatot addig ismételjük, amíg a pozíciók nem konvergálnak.

*d, Szerkezeti elemek detektálása:* Az algoritmus legutolsó része a konkrét szerkezeti elemek detektálása, mivel ahhoz, hogy egy szerkezetet pontosan detektálhassunk, szükséges információkkal rendelkezni annak céljáról, méreteiről, és gyártástechnológiájáról egyaránt.

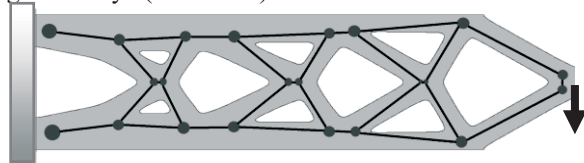
A szoftver egy adatbázisban tárolhatja a különféle rudakra és kötésekre vonatkozó feltételeket, és a tervező egyszerűen kiválaszthatja, mely szerkezeti elemekkel (egyenes vagy ívelt) szeretne dolgozni a poszt-processzálás folyamán. Az eredmények bemutatása során egy egyszerű, de meglepően hatékony eljárás került implementálásra egyenes rudak detektálására.

## 6. EREDMÉNYEK

Az alábbiakban bemutatásra kerül néhány optimalizációs feladat eredménye az algoritmus segítségével feldolgozva. A topológiák BESO [12,13,14], SIMP [3,10], illetve QSQF [17] algoritmus segítségével kerültek előállításra.

### 6.1 Egyik végén befalazott, másik végén hajlított rácsos tartó – 2D

Az alábbiakban a cikk folyamán már többször is bemutatott példán kerül ismertetésre az algoritmus végeredménye (ld. 7. ábra).



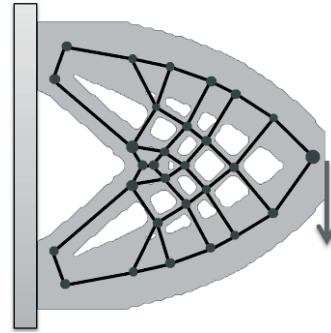
7. ábra. Rácsos tartó

A nagyobb pontok a megfogás helyét, a kisebbek az evidens csomópontokat, míg a sötét vonalak a rudakat

jelölik. A háttérben halvány szürkével még látható az eredeti szerkezet.

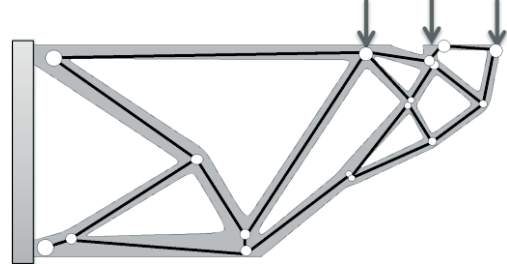
### 6.2 Egyik végén befalazott, másik végén hajlított rácsos tartó, eltérő méretarányokkal – 2D

Az alábbiakban az előzőhöz hasonló, azonban eltérő méretarányokkal rendelkező, és nagyobb térfogatarányú példa kerül bemutatásra (ld. 8. ábra).



8. ábra. Rácsos tartó

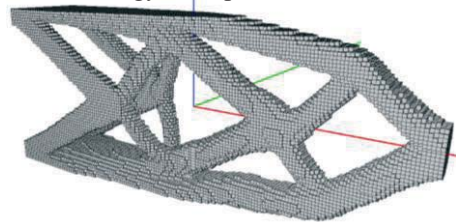
### 6.3 Egyik végén befalazott, három helyen terhelt rácsos tartó – 2D



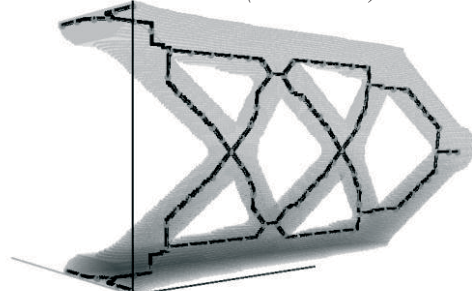
9. ábra. Rácsos tartó.

### 6.4 Egyik végén befalazott, másik végén hajlított rácsos tartó – 3D

Az alábbiakban egy 3D-s példa kerül bemutatásra.



10. ábra. TD (150x30x60).



11. ábra. Detektált középvonal (eltérő feladat).

## 7. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben javasolt eljárás nem csak gyors és megbízható, de viszonylag egyszerűen implementálható is, a tesztek során az eredeti *TD* méretétől függően 1-60 másodperc alatt elkészült a számítással (2D) egy Intel® Core i5™ 760 processzor egyetlen magján (3.2 GHz). Az algoritmus nagyon könnyen párhuzamosítható mind a CPU-n, mint a GPU-n a nagyszámú primitívnek hála.

A fejlesztés következő szakasza a méretoptimalási modul, az *LPPO* egy továbbfejlesztett változatának létrehozása, valamint végül, de nem utolsó sorban egy olyan adatbázis létrehozására fog irányulni, amely sok, mérnöki szempontból is jelentőséggel bíró kötés- és rúdtípus kritériumait fogja tartalmazni. Bár az alábbi munkában a *BPPF* kifejezetten a középvonalak detektálására került alkalmazásra, de a képességeinek és a lehetőségek széles tárházának hála (pl. szűrők, szűrő méret, *LPPO* paraméterek, stb.) az eljárás nagy valószínűséggel kiterjeszhető nem csak középvonal, de például lemezek, felületek, és egyéb mérnöki szempontból fontos „feature” csoportok detektálásra is, vagy akár a képfelismerés területeire is.

## 8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A bemutatott kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg, valamint az Országos Tudományos Kutatási Alap OTKA T 75678 támogatásával.

## 9. IRODALOM

- [1] Liu, Z. Gao, Q., Zhang, P., Xuan, M. and Wu, Y.: Topology optimization of fluid channels with flow rate equality constraints. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Volume 44, Number 1, 31-37. 2011.
- [2] Rozvany, G.I.N.: Domain augmentation and reduction in structural topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Volume 44, Number 4, 141-158. 2011.
- [3] Bendsoe, M. P., Sigmund, O.: *Topology Optimization – Theory, Methods and Applications*. Chapter 4, 16-68. Springer, 1995.
- [4] Bendsoe, M. P., Ben-Tal, A., and Zowe, J.: Optimization methods for truss geometry and topology design. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Volume 7, Number 3, 141-158. 1994.
- [5] Nursel Öztürk, Ali R. Yildiz, Necmettin Kaya, Ferruh Öztürk: Neuro-Genetic Design Optimization Framework to Support the Integrated Robust Design Optimization Process in CE. *Concurrent Engineering*, Volume 14, Number 1, 5-16, March 2006.
- [6] Yildiz, A.R., Öztürk, N., Kaya, N., Öztürk, F.: Integrated optimal topology design and shape optimization using neural networks. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Volume 25, Issue 4, 251-260, 2003.
- [7] William Robert Blattman: *Generating CAD Parametric Features based on Topology Optimizations*. Department of Mechanical Engineering, Brigham Young University, MSc Thesis. 2008.
- [8] Ulrich Bauer, Konrad Polthier: Detection of Planar Regions in Volume Data for Topology Optimization. *Advances in Geometric Modeling and Processing*, 119-126, 2008.
- [9] Farkas, J., Jármay, K.: *Design and optimization of metal structures*. 328 p. ISBN: 978-1-904275-29-9. Horwood Publishers, Chichester, UK, 2008.
- [10] Sigmund, O.: A 99 line topology optimization code written in Matlab. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. Volume 21, Number 2, 120-127. 2001.
- [11] Zhou, M., Rozvany, G.I.N.: The COC algorithm, part II: Topological, geometry and generalized shape optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 89. 1991.
- [12] Zhou, M., Rozvany, G. I., N.: On the validity of ESO type methods in topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Volume 21, Number 1, 80-83, 2001.
- [13] Querin, O.M., Steven G.P., Xie, Y. M.: Evolutionary structural optimisation (ESO) using a bidirectional algorithm. *Engineering Computations*, Volume 15, Number 8, 1031-1048. 1998.
- [14] Huang, X., Xie, Y. M.: *Evolutionary Topology Optimization of continuum Structures – Methods and Applications*. Wiley, 2010.
- [15] Sigmund, O., Petersson, J.: Numerical instabilities in topology optimization: A survey on procedures dealing with checkerboards, mesh independencies, and local minima. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Volume 16, Number 1, 68-75. 1998.
- [16] Louisa Lam, Seong-Whan Lee, Ching Y. Suen: Thinning Methodologies – A Comprehensive Survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Volume 14, Number 9, 869-885, September 1992.
- [17] Daróczy, L., Jármay K.: New method for topology optimization of truss structures. *GÉP folyóirat, LXII. évfolyam, I. Kötet*, 29-34. Miskolc, 2011. (in Hungarian)