BELSŐ TARTÓSZERKEZETEK OPTIMALIZÁLÁSA TÉRBELI VORONOJ-CELLÁK SEGÍTSÉGÉVEL

OPTIMISING INTERNAL SUPPORT STRUCTURES WITH 3D VORONOI LATTICES

Piros Attila, Dr. – Solti Márton

ÖSSZEFOGLALÁS. Az additív gyártás lehetővé teszi tetszőleges tulajdonságú tartószerkezetek előállítását. Az alkalmazott rácsoptimálási eljárások matematikai és konstrukciós aggályokat is felvetnek. Kutatásunk analitikus módszerek helyett nem-hagyományos optimalizációs eljárások alkalmazását vizsgálja. Összehasonlítással igazoltuk, hogy a Voronoj-diagrammal képzett hálógeometria hatékonyabb lehet az eddigieknél.

ABSTRACT. Additive Manufacturing enables us to make support structures with custom properties. Analytic lattice optimization methods used so far raise mathematical and design concerns as well. Our research approaches this subject with unconventional optimisation techniques instead. By comparison, we proved that our Voronoi diagram based support structure preform better than the ones used until now.

1. BEVEZETÉS

Életünk minden területére bejutott már a számítógép. Legyen szó ipari vagy fogyasztói felhasználásról – az egyre olcsóbb technológiának köszönhetően – napról napra újabb helyzetekben találkozhatunk okos eszközökkel, automatizált megoldásokkal. Néhányan hajlamosak az informatika térnyerését szakmánk elhalványulásának értelmezni, ám a számítógép nem több mint egy eszköz, amellyel újabb lehetőségek nyílnak meg előttünk.

Az additív gyártás sem jöhetett volna létre számítógépek nélkül: segítségével gyorsan, olcsón, szerszámköltségek nélkül próbálhatunk ki érdekes új formákat. A technológia eleinte csak a nagy ipari szereplők privilégiuma volt – ám az egyre olcsóbb számítógépeknek és elektronikai komponenseknek hála – mára már sokkal szélesebb körben elterjedt. Szabadúszó tervezők, művészek és hobbisták körében nagyon népszerű lett az elmúlt években. [1]

Tervezéskor – az eljárás nagy geometriai szabadságának köszönhetően – sokkal kevesebb technológiai korláttal kell számolnunk, ez azonban még bonyolultabbá teszi a számításokat, ha a technológia teljes körű kihasználására törekszünk. Vannak módszerek az additív gyártástechnológiához való optimalizálásra, ám a lehetőségek még nincsenek teljes körűen feltárva.

Előadásunkban additív gyártással készülő alkatrészek belső tartószerkezetei optimalizálásának egy szakirodalomban még nem tárgyalt, újszerű megközelítését mutatom be.

2. ADDITÍV GYÁRTÁSSAL KÉSZÜLŐ TARTÓSZERKEZETEK

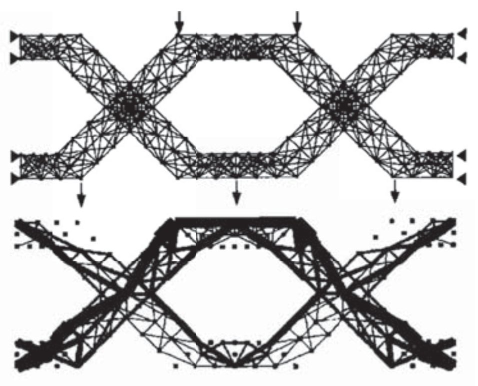
A 3D nyomtatás egyik nagy előnye, hogy az alkatrészek külső héja alatt nem feltétlenül kell homogén anyagnak lennie. Használhatunk olyan *rácsos vagy cellás belső tartószerkezetet*, amely sokkal kisebb tömeg mellett nyújt közel ugyanolyan jó teljesítményt, mintha az eredeti tömör anyagot használnánk.

Belső tartószerkezeteket már a 3D nyomtatás megjelenése előtt is használtak az iparban. Méhsejtrácsos szendvicsszerkezeteket és fémhabokat is előszeretettel alkalmaznak olyan területeken, ahol az alkatrészeknek a lehető legkisebb tömeg mellett nagy terheléseknek kell megfelelniük. Az ilyen szerkezetek egyik fontos jellemzője a *relatív sűrűség*. Ez a tartószerkezet térfogatának és a szerkezetet befoglaló térfogatnak a hányadosa [2].

Additív gyártással egyszerűen hozhatunk létre pontosan megszabott mechanikai, optikai, hőtani vagy épp akusztikai tulajdonságokkal rendelkező térbeli rácsos és cellás tartószerkezeteket. Az ilyen struktúrák rudakból vagy lapokból álló *egységcellákból* épülnek fel. Ahhoz, hogy megtaláljuk azt a tartószerkezet elrendezést, amely az általunk meghatározott jellemzőkkel fog bírni, valamilyen optimalizálási módszerhez kell folyamodnunk.

3. RÁCSOS ÉS CELLÁS TARTÓSZERKEZETEK OPTIMALIZÁLÁSA

A leghatékonyabb anyagkihasználást eredményező geometria keresésével a szerkezetoptimalizálás foglalkozik. A belső tartószerkezetek optimalizálása szinte kivétel nélkül a rácsos tartószerkezetek optimalizálásán alapszik *(1. ábra)*. Ez olyan paraméter-optimalizálási módszer, mellyel meghatározott terhelések, követelmények mellett elemi cellákból felépített szerkezet alkotóelemei méretének az optimumát keressük [3]. Ezt az eljárást főként építőmérnökök használták eddig pl. hidak és egyéb teherviselő szerkezetek méretezésére.



1. ábra - Rácsos tartószerkezetek optimalizációja

3.1 Az elterjedt többváltozós optimalizálási eljárások korlátai

Sok mai optimalizálási feladathoz hasonlóan itt is a változók igen magas száma okozza a legtöbb fejtörést. A módszer legfőbb problémája, hogy minden egyes rúdelem átmérőjét külön optimalizálandó változóként kezeli. Ez nagyobb teherviselő elem esetén többezres nagyságrendű is lehet.

A legtöbbször használt többváltozós optimalizálási módszerek számítási ideje gyakran exponenciálisan nő a keresett értékek számával. Egy ilyen bonyolult függvénynek igen sok megoldása lehet, amely tovább nehezíti a keresést. Ha az eredmény egyáltalán konvergál valamilyen numerikus értékhez, még akkor sem biztos, hogy a globális szélsőértékét találtuk meg. [4]

Léteznek viszont olyan nem-hagyományos keresési és optimalizációs eljárások, amelyek éppen az ilyen – analitikus módszerekkel nem vagy csak részben megoldható – problémákra adnak választ.

3.2 Optimalizáció nem-hagyományos módszerekkel

Az információ korát éljük, felfoghatatlan méretű adathalmazok irányítják mindennapjainkat. Az elmúlt években az ilyen méretű adatállományok feldolgozása ok-okozati összefüggéseik feltérképezése vált az egyik legfontosabb szakmává. Ez az ún. adatbányászat, amely nagy mértékben járult hozzá a nem-hagyományos optimalizálási módszerek fejlődéséhez.

Az adattudósok által is alkalmazott optimalizációs algoritmusok a *konkrét, analitikus megoldás helyett véletlenszerű mintavételezéssel és a korábban megszerzett tapasztalatok felhasználásával jutnak általában kielégítően pontos, közelítő eredményre.*

Kutatásunk ezzel a szemlélettel közelíti meg a belső tartószerkezetek optimalizálását.

3.3 Konstrukciós aggályok

Konstrukciós szempontból is vannak bizonytalan részei az eddig alkalmazott rácsoptimálási módszernek. Az alkalmazott egységcellák általában valamilyen szimmetrikus terhelési esetre lettek optimalizálva, amellyel valóságban ritkán találkozhatunk. Az elemi cellatípust és a rácsozat sűrűségét még a számítás megkezdése előtt definiálni kell, ezért könnyen lehet, hogy nem is abban a halmazban keressük a megoldást, ahol az optimális opció van.

Az üreges alkatrész külső héja a terhelést a rudakkal való kapcsolódási pontjain adja át a belső tartószerkezetnek, így ezeknek a kapcsolódási pontoknak a minősége is kulcsfontosságú. Mivel a rács minden esetben szabályos alakú elemi cellákból épül fel, nagy a valószínűsége – különösképpen szabadformájú felületek esetén – hogy ezek a kapcsolódási pontok nem a lehető leghatékonyabban helyezkednek el.

3.4 Inspiráció a természetből

A természetben fellelhető szerkezeti kialakítások mindig is remek inspirációt nyújtottak az ember alkotta struktúrák tervezésekor. A természet minden nagyságrendben „törekszik” olyan rugalmas, adaptív szerkezetek létrehozására, amelyek az anyagi erőforrásokat és az energiafelhasználást minimalizálják [5].

Környezetünkben sok helyen találkozhatunk üreges anyagokkal. Ezek különböző méretű és alakú cellákat tartalmaznak, amelyek biztosítják az optimális anyageloszlást, hogy szerkezetünk adott terhelésnek ellenálljon. A természetben található üreges anyagok jellegzetes geometriájának matematikai leírása legtöbbször Voronoj-diagrammal történik.

Térbeli Voronoj-diagram alatt egy metrikus tér konvex, térbeli alakzatokká való egyenletes felosztását értjük – a lehető legkevesebb geometriai elemet alkalmazva – véges, diszkrét mennyiségű pont segítségével. Minden térbeli alakzatnak – ezeket nevezzük Voronoj-celláknak – van egy „generáló” pontja, és az adott alakzat minden pontja közelebb áll a „generáló” pontjához, mint bármelyik másikhoz [6].

4. SZABADFORMÁJÚ GEOMETRIÁK BELSŐ TARTÓSZERKEZETÉNEK OPTIMALIZÁLÁSA VORONOJ-DIAGRAMM SEGÍTSÉGÉVEL

Tetszőleges, szabadformájú geometria és komplex terhelések esetén az eddig használt tartószerkezet optimalizálási módszerek nagyon bonyolultnak, időigényesnek bizonyultak, és a lehetséges megoldások halmazának csak egy részét vizsgálták.

A Voronoj-diagram ezzel szemben tetszőleges számú dimenzióban bármilyen eloszlású pontfelhővel elkészíthető: a térben véletlenszerűen elszórt pontok körül kialakuló Voronoj-cellák a pontok számának növelésével hatszögletű alakzathoz tartanak, így egyszerűen készíthetők vele méhsejtrács jellegű tartószerkezetek. Az ilyen jellegű struktúrák kiváló szilárdság-tömeg viszonyukról ismertek [7].

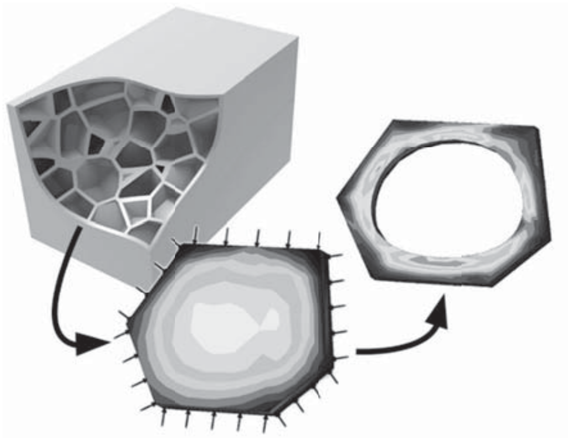
Azt feltételezzük, hogy az eddig használt analitikus rácsoptimalizálási eljárásoknál hatékonyabb lehet a Voronoj-diagrammal készített adaptív hálógeometria alkalmazása.

4.1 Dobozszerkezetű felépítés

A belső teherviselő elemek elrendezése mellett a cellák geometriáját is máshogy közelítjük meg. Ahelyett, hogy a Voronoj-hálót felépítő térbeli egyeneseket rudakként értelmeznénk, a cellák falai fogják felvenni a terhelést, így kvázi dobozszerkezetként tekinthetünk rá. A dobozszerkezetek az élek mentén is fel tudják venni a feszültséget, ami jobb terheléseloszlást eredményez [8]. Ez különösen a külső héjhoz való kapcsolódás tekintetében előnyös, hiszen az erőbevezetés mindenképpen azon keresztül történik.

4.2 A „kikönnyítések”

A szerkezetből az egyik cella falát kiemelve felületi nyomással szimulálhatjuk a kapcsolódó élek mentén átadódó terhelést. (2. ábra)



2. ábra – Voronoj-diagrammal képzett dobozszerkezet és a kikönnyítésének szemléltetése

Jól megfigyelhető, hogy a keletkező feszültség elhal a keresztmetszet mentén. A falak középső részének feszültségelvezető hatása elhanyagolható, ezért azok eltávolításra kerülhetnek.

Vannak olyan rétegenkénti felépítési módszerek (pl. SLS), amelyek működésükből fakadóan nem alkalmasak teljesen zárt üregek nyomtatására. Az alkalmazott „kikönnyítések” – még jobb szilárdság-tömeg arány mellett – technológiai szempontból is kedvezőbb tartószerkezetet eredményeznek.

5. ALGORTIMIKUS MODELLEZÉS A GRASSHOPPERREL

A nem-hagyományos optimalizálási eljárások alkalmazásához egy olyan algoritmust kell kidolgoznunk, amely egy adott pontfelhő köré *generál* tartószerkezetet. A probléma megoldásához ki kell lépnünk a jól ismert CAD rendszereink komfortzónájából, és *számítógépes grafikai problémaként kell tekintenünk rá.*

Az ilyen feladatok megoldásához biztosítanak megfelelő eszközt az algoritmikus modellezési keretrendszerek. Ilyen például az általunk is használt Rhino NURBS-modellező program Grasshopper beépülő modulja.

5.1 Grasshopper bemutatása

A Grasshopper vizuális programnyelvével módosíthatjuk a geometriát vagy kipróbálhatunk új, izgalmas formákat. A legtöbb ilyen jellegű nyelvhez hasonlóan itt is „dobozokat” kell összekötnünk „kábelekkel”: a dobozok jelképezik az entitásokat, a kábelek pedig a köztük lévő kapcsolatokat.

A program felépítése folyamatábrára emlékeztethet, ezért jól átláthatóak az elkészült algoritmusok, még programozási alapismeretekre sincs szükség a használatához. A Grasshopper mindazt tudja, amit a „hagyományos” programozási nyelvek: végezhetünk matematikai, logikai vagy vektoralgebrai műveleteket, mátrix transzformációkat, listákat és adatfákat kezelhetünk vele, sőt, beépített genetikus algoritmust is tartalmaz. Minden Rhinoval elvégezhető feladathoz (pl. geometriai analízisek) tartozik egy entitás, a műveleteket kombinálva a lehetőségeink száma szinte végtelen. Még szabadabbá teszi az alkotást, hogy az ingyenesen elérhető plug-inok mellett C# és Python nyelvekkel is szkriptelhető a program.

A Rhino remekül kezeli az importált geometriákat, a Grasshopperrel emiatt sok hasznos adatot tudunk kinyerni a modellekből. Elemeire bonthatjuk azokat, majd az élek, csomópontok, felületek felhasználásával hozhatunk létre újabb formákat. Ez adja a legnagyobb szabadságot, mivel így a kész algoritmust tetszőleges geometriával lefuttathatjuk.

6. AZ ÖTLET MEGVALÓSÍTHATÓSÁGÁNAK BIZONYÍTÁSA

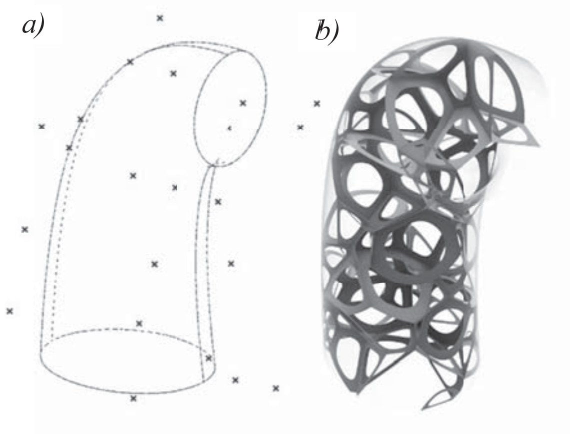
A Grasshopper tehát adaptív véletlen geometriák automatikus generálására kiválóan alkalmas. Az elkészült algoritmust egy néhány soros Python szkripttel automatizálhatjuk, amely egy adott pontfelhő köré generál tartószerkezetet.

6.1 Véletlenszerű mintavételezés

Első lépésben az ötlet megvalósíthatóságának bizonyítása volt a célunk. A pontfelhők meghatározására az egyszerű Monte-Carlo-módszer elve szerint véletlenszerű mintavételezéssel kerül sor. [9] A vizsgálathoz normál eloszlású véletlen ponthalmazokkal generáltunk lehetséges tartószerkezet geometriákat (3. ábra), a kész megoldásokat pedig egy szintén automatizált végeselemes számítással ellenőriztük.

6.2 Automatizált végeselemes vizsgálat

A számítási idő csökkentése érdekében kihasználtuk, hogy a szerkezet azonos falvastagságú tartószerkezet elemekből és egy külső héjból áll. Az ilyen alkatrészeket – a hálózáskor héjelemeket alkalmazva – a falaik



3. ábra – Bemenő pontfelhő (a) és az azzal generált tartószerkezet (b)

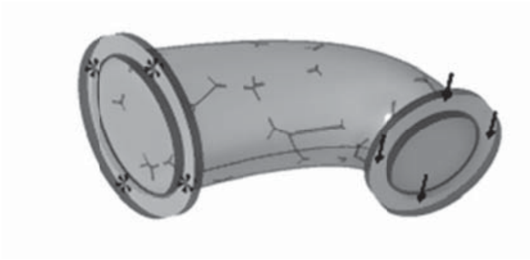
középfelületével modellezhetjük. A héjelemek ugyan valamelyest csökkentik a modell pontosságát, ugyanakkor nagyságrendekkel csökken a számítási igény is. [10]

Ahhoz, hogy minél több szimulációt el tudjunk végezni, vizsgálati paraméterként könnyen kiolvasható és összehasonlítható értéket kell megválasztanunk. A potenciális szingularitási, hálózási problémák és egyéb elhanyagolások miatt a maximális deformáció alapján hasonlítottuk össze a modelleket.

A vizsgálatokhoz Creo Simulate-et használtunk, melynek működése is kedvező feltételeket biztosít ehhez. A beépített szimulációs modul alacsony elemszámmal dolgozik, a háló sűrítése helyett az interpolációs függvény fokszámát növelve (P módszer) automatikusan iterál a megadott konvergencia vagy fokszám eléréséig. A fokszám növelésével a csomópontok száma is növekszik, így a másod- vagy magasabb rendű elemek konkáv alakot is felvehetnek, és sokkal egyenletesebben kapcsolódnak a görbült geometriákhoz.

6.3 A vizsgálat menete

A szimulációhoz a 4. ábrán látható mintafeladatot definiáltuk.



4. ábra – Mintafeladat definiálása

Számításaink utólagos ellenőrzését később szakítógéppel kívánjuk végezni. Ezt inzertek segítségével tudjuk megtenni: a minta két (terhelés felvételére kialakított) felülete köré karimákat helyeztünk a modellben. Az egyik karimának az összes szabadságfokát elvettük, a másikra pedig függőleges irányú, 1000 [N]-os terhelést helyeztünk.

A szimulációkkal célunk annak a – lehető legkönnyebb – tartószerkezet elrendezésnek a megtalálása, aminél a deformáció mértéke nem haladja meg a 0,09 [mm]-t. A vizsgálatok eredményeit egy táblázatba gyűjti a szkript, innen választhatjuk ki a céljainknak legmegfelelőbbet.

7. ÖSSZEHASONLÍTÁS EGYSÉGCELLÁS ELJÁRÁSSAL

Sokan szeretnék kihasználni az additív gyártás lehetőségeit, és ezt az igényt a szoftverfejlesztők sem hagyják figyelmen kívül: több opciónk is van belső tartószerkezetek optimalizálására. A Creo 4.0-s verziójában is található beépített rácsoptimalizálási funkció (Creo Lattice feature), segítségével néhány kattintással elláthatjuk modellünket egységcellákból felépített belső tartószerkezettel.

7.1 Rácsoptimálás Creo-val

Összehasonlításképpen elkészítettük a Simulate paraméteroptimalizáló funkciójával egy ugyanakkora maximális deformációt megengedő tartószerkezetet. Az egységcella kiválasztása után az élhosszok lesznek az optimalizált paraméterek.

A cellák méretoptimalizálása még ilyen viszonylag egyszerű esetben is (amikor az algoritmus csak egy értéket változtat) igen nagy számítási kapacitást igényel. A cellák rúdelemeit gerenda-, határoló felületet pedig héjelemekkel helyettesítve végezhetjük el az optimalizálást. A két egyszerűsített modell így már jó közelítéssel összehasonlítható.

7.2 Numerikus eredmények összehasonlítása

A végső összehasonlítás a modellek solid-elemes verziójával történt, az eredmények az 1. táblázatban láthatóak. A vizsgálatot szintén Creo Simulate-ben végeztük.

Mindkét eljárás teljesítette a megszabott maximális deformáció követelményét. A Creo-s verzió az iteráció működésének köszönhetően nem tudott olyan közel kerülni a megcélzott legnagyobb megengedett deformációhoz, mint a véletlen mintavételezéssel készített. Ennek köszönhető, hogy az egységcellás változat legnagyobb elmozdulása kisebb volt, a *Voronoj-diagrammal készített verzió viszont **21,4%**-kal kisebb térfogattal rendelkezik.*

1. táblázat.
Eredmények összehasonlítása

Értékelési szempontok	Creo Lattice	Voronoj algoritmus
Megengedett max. deformáció [mm]	$7{,}5 \cdot 10^{-2}$	
Max. deformáció az egyszerűsített modellnél [mm]	$7{,}47 \cdot 10^{-2}$	$7{,}41 \cdot 10^{-2}$
Max. deformáció a solid-elemes verziónál [mm]	$6{,}88 \cdot 10^{-2}$	$6{,}98 \cdot 10^{-2}$
Térfogat [cm^3]	14,810	18,837
Térfogat különbség	100%	78,6%

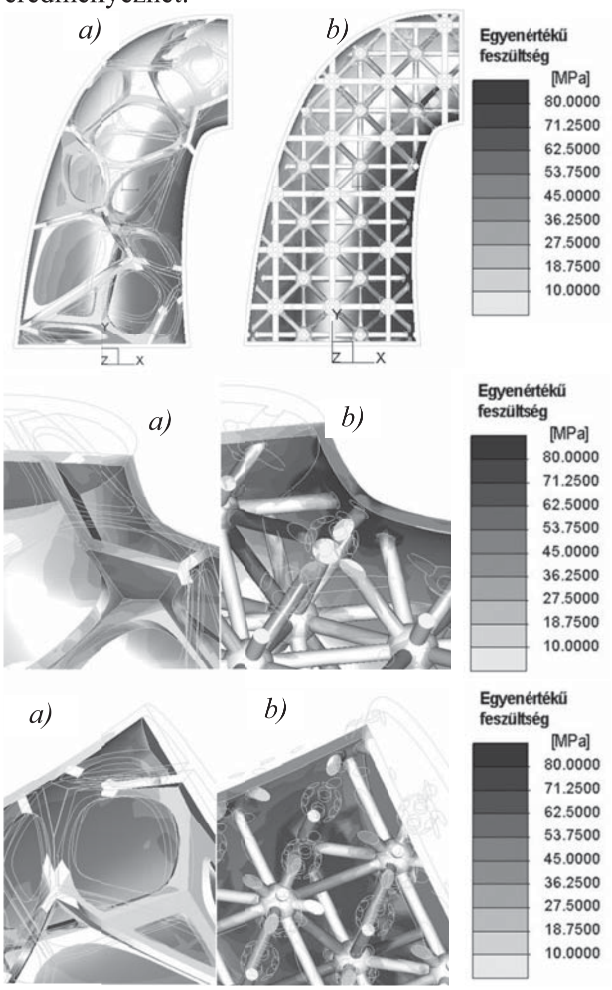
7.2 Feszültségképek összehasonlítása

A feszültségképek összehasonlítása a von Mises-féle egyenértékű feszültség alapján történt
(5. ábra), ezeknek a vizsgálatakor látszanak igazán az adaptív hálógeometria előnyei. Jól látható, hogy Voronoj-cellával készített tartószerkezet egészén sokkal egyenletesebb a feszültségeloszlás, kevesebb kihasználatlan elem található rajta.

A dobozszerkezetű tartók előnyeit a rácsszerkezetekkel szemben a külső paláshoz való kapcsolódás vizsgálatakor figyelhetjük meg. Az általunk generált verzió az élükben kapcsolódó dobozelemeknek köszönhetően kedvezőbb terhelésátadást biztosít a Creo-ban optimalizáltnál.

10. ÖSSZEFOGLALÁS

A szakítógépes validálás még várat magára, ám végeselemes vizsgálatokkal igazolni tudtuk feltevéseinket: véletlen mintavételezéssel készíthető olyan tetszőleges szabadformájú külső héjhoz adaptívan illeszkedő hálógeometria, amely jobban teljesít komplex terhelés esetén, mint az egységcellás verzió. Az is igazolódott, hogy a dobozszerkezetű cellastruktúra kedvezőbb feszültségeloszlást eredményezhet.



5. ábra – A Voronoj-diagrammal készített tartószerkezet (a) és a Creo-s verzió (b) feszültségképei egyes részeinek összehasonlítása.

10.1 Kitekintés a módszer továbbfejlesztési lehetőségeire

Primitívebb véletlen mintavételezésen alapuló optimalizálási eljárást aligha választhattunk volna, ennek ellenére a kiválasztott geometria jobban teljesített a paraméteroptimalizáláson átesett egységcellánál.

Az itt bemutatott keretrendszer jó alapot nyújthat szofisztikáltabb algoritmusokkal való kísérletezésre. Elsőként a cellák falvastagságának és a kivágások mértékének optimalizálásával lenne érdemes kiegészíteni az algoritmust. Hosszab távon elképzelhető genetikus algoritmusok és különböző mélytanulási módszerek alkalmazási lehetőségeinek feltérképezése is.

11. IRODALOM

[1] Jones, R., Haufe, P., Sells, E., Iravani, P., Olliver, V., Palmer, C., and Bowyer, A.: RepRap - The Replicating Rapid Prototyper. In: Robotica. 29. köt. (2011), 177–191 p.

[2] Chopra, P.: Effective Mechanical Properties of Lattice Materials (2009)

[3] Bendsøe, M. P., Sigmund, O.: Topology Optimization. Berlin: Springer (2002)

[4] Dr. Aradi, P., Gräff, J., Dr. Lipovszki, Gy.: Számítógépes szimuláció. Bp.: BME MOGI (2014)

[5] Pearce, P.: Structure in Nature Is a strategy for Design. Cambridge: MIT Press (1978)

[6] Bronstein, A., Bronstein, M., Kimmel, R.: Numerical geometry of non-rigid shapes. New York: Springer (2008)

[7] Gibson, L. J., Ashby, M. F.: Cellular solids. Cambridge: Cambridge Univ. Press (1997)

[8] Harth, P., Fülöp, T.: Klasszikus járműfelépítmény-tervezési módszerek. In: A jövő járműve. 2. köt. (2012), 119-125 p.

[9] Graham C., Talay D.: Stochastic Simulation and Monte Carlo Methods. Palaiseau: Springer (2013)

[10] Moharos, I., Oldal, I., Szekrényes, A.: Végeselem-módszer. Bp.: Typotex (2011)