

A szivacsos csontszerkezeten alapuló tartószerkezet

Borbás Anna

2024

Pécsi Tudományegyetem Műszaki és Informatikai kar
Épületszerkezetek-Energiadesign Tanszék

A szivacsos csontszerkezeten alapuló tartószerkezet

Készítette: Borbás Anna
Évfolyam: 4. évfolyam

Belső konzulens: Dr. Kokas Balázs DLA Beosztása: adjunktus

Pécs

2024.

1. Bevezetés és célkitűzések	1
2. Irodalmi áttekintés	5
Biomimetikus építészet.....	5
Csontszerkezet.....	7
Csontszerkezeten alapuló projektek	10
3. Módszerek	14
Voronoi-cellák.....	14
Parametrikus tervezés.....	16
Projekt.....	16
4. Eredmények	18
Parametrikus tervezés a gyakorlatban.....	18
Fejlesztési és vizsgálati lehetőségek.....	26
5. Értékelés és következtetések	28
6. Összegzés	30
7. Köszönetnyilvánítás	31
8. Irodalomjegyzék	32

1. Bevezetés és célkitűzések

Korunk egyik legsürgetőbb kihívása a fenntartható fejlődés megvalósítása, különös tekintettel az építőipar hatalmas környezetterhelésére. A modern városok és infrastruktúrák építése során a vasbeton és az acél meghatározó szerepet játszik, ám ezek előállítása és feldolgozása rendkívül energiaigényes, amely nemcsak jelentős széndioxid-kibocsátással jár, hanem a természeti erőforrásokat is súlyosan megterheli. Ezek az anyagok nemcsak a gyártási folyamat során szennyeznek, hanem nehezen újrahasznosíthatók, és hosszú távon jelentős mennyiségű hulladékot termelnek. A globális éghajlati válság közepette egyre nagyobb az igény az olyan innovatív megoldásokra, amelyek csökkentik az iparág környezetkárosító hatásait, miközben fenntartják az épületek és infrastruktúrák biztonságát és tartósságát. A jelenlegi építési gyakorlatok a természeti erőforrások kimerüléséhez, valamint a levegő, víz és talaj szennyezéséhez vezetnek, miközben hozzájárulnak az éghajlatváltozáshoz. Az építőipar fenntarthatósági problémái tehát nem csupán technológiai kérdéseket vetnek fel, hanem etikai és gazdasági dilemmákat is, amelyek sürgős megoldásokat követelnek.

Ezen problémák megoldására ígéretes lehetőségeket rejt a biomimikri, azaz a természetben megfigyelt struktúrák és folyamatok inspirációként való felhasználása. A természet évmilliók óta működő, hatékony mechanizmusokat kínál, amelyek adaptálásával az építőipar fenntarthatóbbá válhat.

A tanulmány témája a szivacsos csontszerkezeten alapuló tartószerkezetek vizsgálata. A szivacsos csontállomány olyan természetes szerkezet, amely optimális szilárdságot és rugalmasságot biztosít minimális anyagfelhasználással, ezzel kiváló alapot kínálva a modern építészeti megoldásokhoz. A Voronoi-cellák matematikai modellje segítségével leképezett szivacsos szerkezet nemcsak a természetes csontstruktúrák könnyedségét és teherbírását emeli át az építészetbe, hanem esztétikai szempontból is új lehetőségeket kínál.

A kutatás során különböző vizsgálati módszerek kerülnek alkalmazásra. A természetes csontszerkezet biomechanikai jellemzőit szakirodalmi elemzések és digitális oktatóanyagok segítségével tanulmányoztam. A Voronoi-cellás struktúrák tervezése és szimulációja parametrikus modellezési szoftverek, például a Rhino és Grasshopper használatával történik. Az optimalizált modellek tesztelését számítógépes szimulációk és anyagspecifikus analízisek teszik lehetővé, míg a prototípusok gyártásához a 3D nyomtatás legújabb technológiai szolgálnak alapul.

A dolgozat célja, hogy megvizsgálja, hogyan járulhatnak hozzá ezek az új tartószerkezetek a modern építészet fenntarthatóbb és innovatívabb megoldásainak kialakításához. A természetes csontstruktúrák modellezése és analógiáinak építészeti alkalmazása lehetővé teszi könnyű, ugyanakkor rendkívül teherbíró szerkezetek létrehozását. A kutatás célja, hogy ezek a szerkezetek ne csupán esztétikai, hanem funkcionális szempontból is versenyképesek legyenek a hagyományos építőanyagokkal és technológiákkal. A Voronoi-cellák matematikai modelljének adaptálása útján olyan

digitális modellek létrehozása, amelyek képesek a szivacsos csontstruktúra pontos leképezésére és vizsgálatára. Parametrikus eszközök használatával egy olyan építészeti tartószerkezeti elem megtervezése, amely statikai és anyagfelhasználási szempontból optimalizált. Olyan parametrikus tervezési eszközök hozhatók létre, amelyek lehetővé teszik a biomimetikus struktúrák gyors és hatékony variálhatóságát. Ezek az eszközök elősegítik, hogy a tervezők az építészeti elemeket az adott projekt specifikus igényeihez igazíthassák, miközben biztosítják a szerkezeti optimalizációt.

2. Irodalmi áttekintés

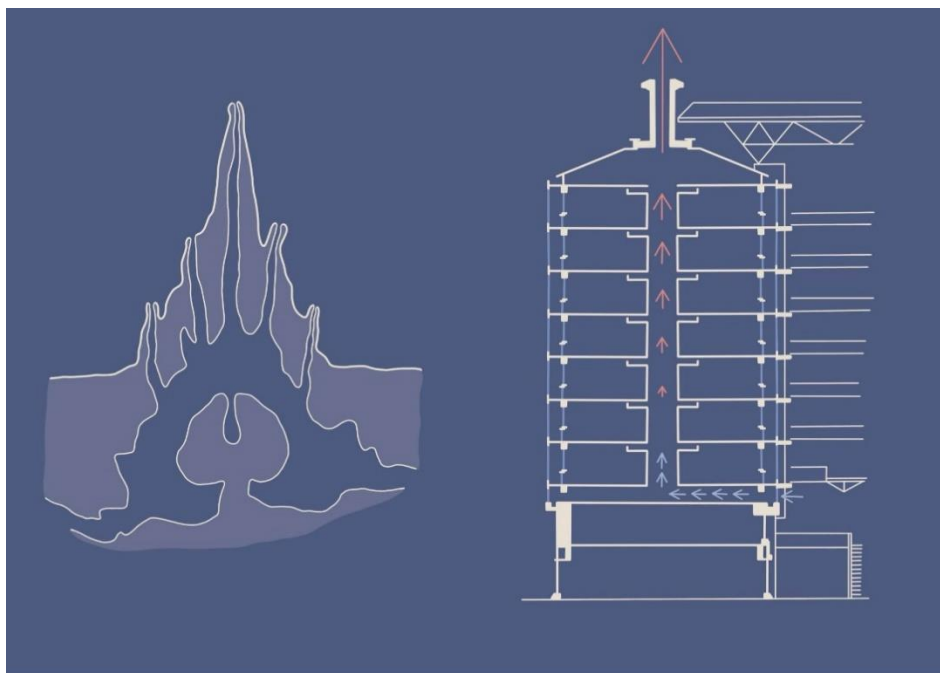
Biomimetikus építészet

A biomimetika tudománya ötvözi a mérnöki, kémiai és biológiai szaktudást, ezáltal interdiszciplináris területnek mondható. A biomimetika két görög szóból származik; a "bio" jelentése a természet a "mimézis" kifejezés pedig az utánzásra utal, vagyis a természeti folyamatok és képződmények fizikai és kémiai alapjait az emberiség javára fordítják.

Az építészet vonatkozásában a természetből ihletet merítő, akár azt konkrétan lemásoló építészeti irányzatról beszélhetünk, amely világszerte növekvő népszerűségnek örvend.

A másolás célja lehet egy fenntarthatóbb környezet teremtése, a komfort növelése egy építményben, de akár pusztán esztétikai célokat is szolgálhat. A megoldások kombinálhatóak, így mind funkcionalitásban, mind látványban úttörő épületek jöhetnek létre. Napjainkban egyre fontosabb és tárgyaltabb a fenntarthatóság kérdése, legyen szó a hétköznapi életről, divatról, élelmiszerekről, építészetről. A természet évmilliók óta old meg komplex problémákat, ezért érdekes lehet, hogy a többmillió éve hatékonyan működő megoldásokból inspirálódva hogyan tudjuk saját környezetünket élhetőbbé, fenntarthatóbbá tenni. Lehet utánozni az anyagot, a szerkezetet, a formát, a viselkedést, vagyis a növekedést, vagy a környezethez való alkalmazkodást. [1]

A természetben megtalálható struktúrák, például a csontvázak vagy a pókhálók, inspirációként szolgálnak az épületek szilárdságának és stabilitásának növeléséhez. A tervezők tanulhatnak a természetes hűtési és szellőzési rendszerekből, mint például termeszdombok szellőzési mechanizmusából. (1.ábra) Az élő organizmusok rendelkeznek adaptív képességekkel, amelyeket az építészeti rendszerekbe is megpróbálnak beépíteni, például olyan intelligens rendszereket tervezhetnek, amelyek alkalmazkodnak az időjárási változásokhoz vagy az energiaigényhez. A fotoszintézis folyamatának megértése segíthet az energetikai struktúrák kialakításában, például napenergia-hasznosító szerkezeteknél vagy energiatakarékos épületeknél.



2.1 ábra

Az anyagok és a szerkezetek gyakran nehezen különíthetők el, mert sokszor maga az anyag szerkezete határozza meg a formát (például kristályos anyagoknál), de az anyag leképezését érthetjük úgy is, hogy próbálunk teljesen lebomló anyagokat létrehozni, mint a természetben. Az új építőanyagok létrehozásánál már gyakran figyelembe veszik azt is, hogy van-e lehetőség a 3D nyomtatásra, hiszen az előregyárthatóság miatt ez egy fontos szempont lehet.

A Plant Biomechanics Group kinyitható árnyékolást tervezett az alapján, ahogy a papagájvirág megváltoztatja a geometriáját, amikor rovar landol rajta, így olyan árnyékolószerkezetet hoztak létre, amely nem jelenik meg markánsan az épületen, amikor épp nincs rá szükség, azonban amikor erős napsütés van teljes védelmet tud nyújtani.



1.2 ábra

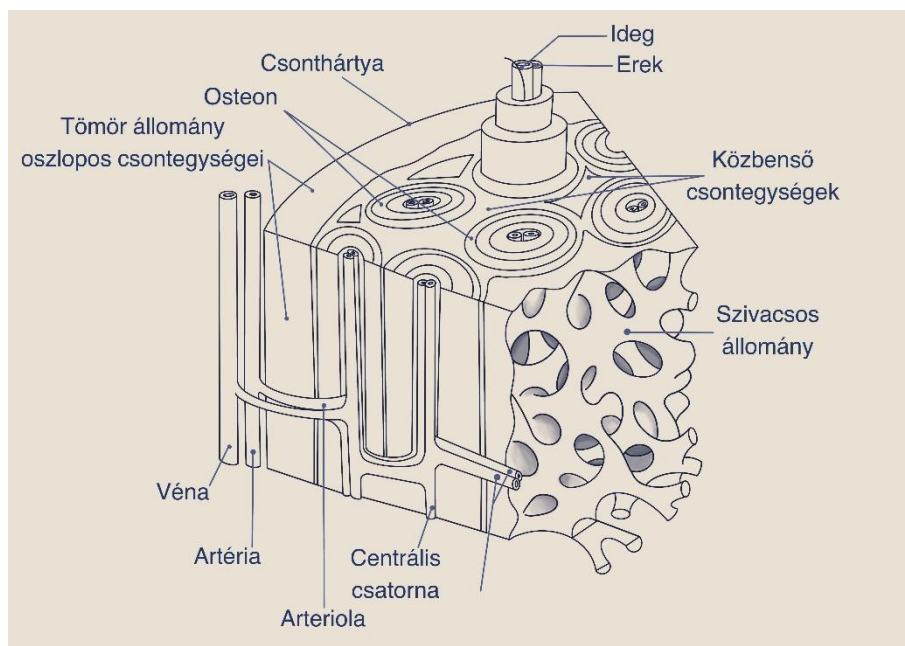
A növekedés leképezését tűzte ki céljául az Exploration építéstudió Biorock Pavilion nevű projektje keretében, melyben Thomas J. Goreau tengerbiológus és Wolf Hilbertz építész/mérnök úttörő technológiáját alkalmazták. (2.ábra) Elektrodézpozíció segítségével a tengervízben található ásványi anyagokat felhasználva hoztak létre egy növekvő

szerkezetet. A vízbe süllyesztettek egy előre elkészített acél vázat, majd gyenge elektromos impulzusokat küldtek át rajta (elég gyengét ahhoz, hogy ne roncsolja a tengeri élővilágot), melynek hatására az ásványi anyagok az acélszerkezetre váltak ki. A növekedés elérheti az 50 millimétert évente és a kiválás sebességétől függően a nyomószilárdsága elérheti a vasbetonét is.

Érdemes megvizsgálni a természetben előforduló, tartószerkezetként funkcionáló elemeket, melyek közül a legismertebb a csontszerkezet. Kis önsúlya mellett rendkívüli a teherbírása és alkalmazkodási, átalakulási képessége. A következő fejezetben a csontszerkezet fizikai jellemzőit és működési elveit mutatom be, hogy megértsük hogyan szolgálhat inspirációként az építészet számára, illetve hogyan lehetséges műszakilag leképezni ezt a bonyolult organikus elemet.

Csontszerkezet

A csöves csont külső felületét egy rostos hártya fedi, ezt hívjuk csonthártyának. A csont középső, csőszerű részét, amely kompakt (tömött) csontállományból épül fel, diafizisnek nevezzük, a két vastagabb végdarabja az epifízis. A törzshöz közelebbi végét proximális epifízisnek, a távolabbat disztális epifízisnek nevezik. A tömör közepdarabok legnagyobb részét a kerek vagy ovális alakú csontegységek (osteon) alkotják, közepükben a Havers-csatorna található, mely vérereket tartalmaz, ezt pedig koncentrikusan körülveszik a Havers-lemezek. A lemezek kollagén rostokat tartalmaznak, a közöttük lévő csonttüregecskében ovális magvú csontsejtek (osteocyták) találhatóak, melyek szilvماغ alakúak. A Havers-csatornára helyenként merőlegesen csatlakoznak a Volkmann-csatornák. Az epifízis (ízületi vég) üvegporccal (hyalinnal) borított, amely különböző vastagságú lehet. Mindkét epifízis belsejét szivacsos csontállomány tölti ki, amely fiatal korban vörös csontvelőt tartalmaz, ám ez az évek során visszahúzódik, és helyét sárga csontvelő, vagyis zsírszövet veszi át. Ezzel az átalakulással a vörösvérsejtképző funkcióját elveszti, azonban, ha nagyobb trauma éri a szerkezetet, például nagy vérvesztés, képes újra aktiválódni. A csont középső ürege a velőüreg, ez felnőtt korban sárga csontvelőt tartalmaz. [2]



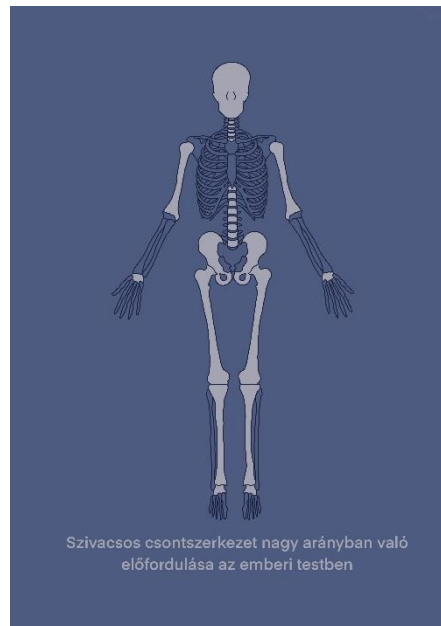
2.2 ábra

A csont sejtes állományát oszteociták és oszteoblasztok alkotják, melyek egyfajta biomechanikus szenzorként képesek a helyi terhek érzékelésére, és komplex rendszerként azok felvételére is.

A csontszerkezet kalcium-foszfát és kollagén molekulák hierarchikus rendszere szálas, lemezes, szemcsés és porózus formában. Ez a hierarchikus rendszer segíti elő, hogy a szerkezetek minél kevesebb anyag felhasználásával, a lehető legoptimálisabb szilárdságot és rugalmasságot érjék el, funkciójuktól függően. (3.ábra) A szivacsos csontszerkezet rendkívül fontos szerepet játszik a csontok könnyűségének és erősségének egyensúlyában. [3]

A szivacsos csontállomány, más néven trabekuláris vagy cancelláris csontállomány, a csontok belső részében található. Nevét a szivacshoz hasonló, porózus szerkezetéről kapta, mivel a benne lévő csontgerendák (trabekulák) hálózatként rendeződnek el, üregeket képezve maguk között. Ezek a csontgerendák nem véletlenszerűen helyezkednek el, hanem a terhelés irányához igazodnak, így biztosítva a csont szilárdságát és rugalmasságát. Ha az erőhatás megváltozik a trajektoriumok átépülnek.

Szivacsos csontállomány olyan helyeken fordul elő, ahol több irányból érkezik a terhelés, pl.: csöves csontok vége, koponya, medence, a lapos csontok teljes belső terét kitölti. (4.ábra) Gyengébb, de hajlékonyabb, mint a kortikális csont, szerkezete a Wolff-törvény szerint alakul, vagyis a csontok a rájuk ható erők és követelmények alapján alkalmazkodnak. [4]

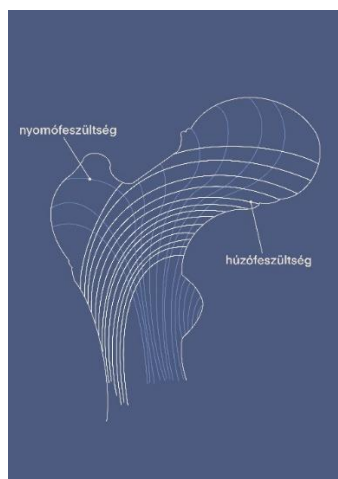


2.3 ábra

A csontátalakítás során az oszteoklasztoknak nevezett speciális csontsejtek (csontbontásra specializálódott többmagvú óriássejtek) felszívják a régi vagy sérült csontszövetet, amely magában foglalja a kalciumot és a kollagént. Amint az oszteoklasztok elkészültek, egy másik típusú sejt, az oszteoblaszt (csontképző sejt) új csontszövetet rak le ott, ahol egykor régi szövet volt. A csontritkulásos betegségeket a csont szivacsos állományának csökkenése okozza. A szivacsos csontszerkezetben található az úgynevezett Ward háromszög, mely egy gyenge, "üres" háromszög a szivacsos részek között, nem visel vagy ad át terheket. Még kisebb sejtcsoportokra bontva a szövetet lapszerű és rúdszerű elemeket kapunk, melyek végeelem módszerrel kezelhetők, így lehetőség van átfogóbb számításokra, melyek eredményéből kiderül, hogy ez a kialakítás jól bírja a nyomó- és nyírófeszültséget is. (5.ábra)

A csontokon belüli erővonalak a terhelés irányát és eloszlását követik, egyfajta természetes statikai diagramként működve. Ezek az erővonalak határozzák meg, hogy a csontgerendák (trabekulák) hogyan helyezkednek el a szivacsos csontállományban, hogy a rájuk ható erőhatásokat a leghatékonyabban oszlassák el. A Wolff-törvény szerint a csontok struktúrája folyamatosan alkalmazkodik a rájuk ható mechanikai terhelésekhez, azaz az erővonalak mintázata dinamikusan változhat a környezeti hatások függvényében.

Az erővonalak tanulmányozása különösen fontos a mérnöki tervezés szempontjából, mivel a természet ezen elvei optimalizált tehereloszlást és anyagtakarékosságot biztosítanak. A végeelem-módszerek segítségével a csontokon belüli erővonalak pontosan leképezhetők, amely lehetővé teszi azok alkalmazását különböző tartószerkezeti elemek, például gerendák vagy pillérek tervezésében.



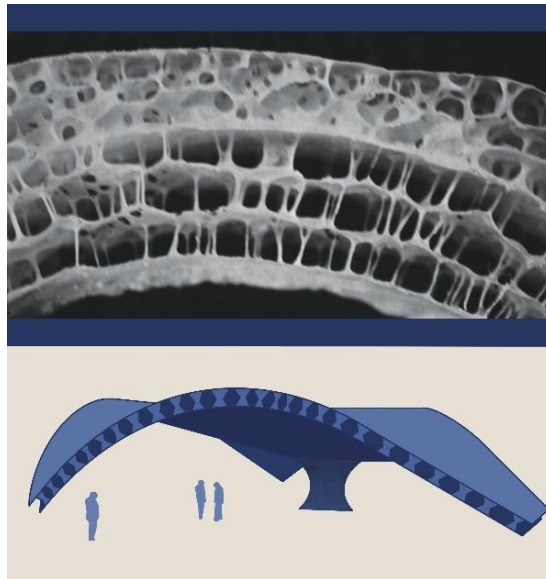
2.4 ábra

Miután megismertük a csontszövet bonyolult felépítését és adaptív mechanizmusait, lépünk tovább azon lehetőségek vizsgálatához, amelyek során ezek az elvek konkrétan alkalmazhatók az építészeti struktúrákban. A csontszerkezet szilárdsága és könnyedsége inspiráló példát nyújt egy olyan tartószerkezet megalkotásához, amely egyszerre felel meg a teherbírási és anyagtakarékossági szempontoknak.

Csontszerkezeten alapuló projektek

A bálna gerincoszlopa majdnem csak szivacsos csontállományból áll, a madarak koponyája is javarészt ilyen szerkezetű, emiatt gyakran szolgálnak különböző szerkezet könnyítését megcélzó projektek alapjául, mint például egy pavilon, egy drón vagy egy bukósisak készítése. [6]

Andre Harris a Biomimetic 1.0 című cikkében arról ír, hogyan inspirálódott a paradox módon könnyű, mégis extrém teherbírásáról ismert madárkoponya szerkezetéből, hogy egy biomimetikus módon optimalizált felületet hozzon létre. Fő célja egy olyan rezponzív szerkezet megalkotása volt, amely képes kezelni a különböző terheket, miközben a lehető leghatékonyabb anyagfelhasználással készül. Úgy találta, hogy a madarak koponyacsontja egyetlen anyagból épül fel (amennyiben a csontot egy anyagnak tekintjük és nem bontjuk kisebb alkotóelemekre), mégis differenciált szerkezet, hiszen ahol nagyobb terhelésnek van kitéve, ott jóval sűrűbb a szövet, ahol pedig kevesebb külső feszültség éri, ritkább. Ezen alakító elvek mentén készült el 'Desert Pavilion' vagy 'Bone Inspired Pavilion' néven ismert koncepcióterv, ahol a csontszerkezethez hasonlóan a belső és külső felületet középen elkeskenyedő elemek kötik össze, melyek között szabadon járhat a levegő, ezzel is könnyítve a szerkezeten. (6.ábra)



2.5 ábra

Clément Audibert, Julien Chaves-Jacob, Jean-Marc Linares és Quentin-Alexis Lopez kutatásukban különböző csontszerkezeten alapuló gerendák szilárdságát és törésképét vizsgálták. (7.ábra) A teszthez létrehoztak szárazföldi emlős csontszerkezetén alapuló, erővonalak által kirajzolt, illetve madárcsonton alapuló szerkezetet. A gerendákat Selective Laser Melting (SLM) eljárással készítették el, mely során fémport terítenek el egy felületen, majd egy programozott lézersugár a kívánt részeket hő segítségével szilárdra teszi, ezután újabb réteg por következik. Ezt az algoritmust ismételve az egymásra rétegződő szilárd részek háromdimenziós szerkezetet hoznak létre, az „üres részekről” pedig könnyedén eltávolítható a meg nem szilárdult por. A gerendák anyaga 17-4-PH rozsdamentes acél. [7]

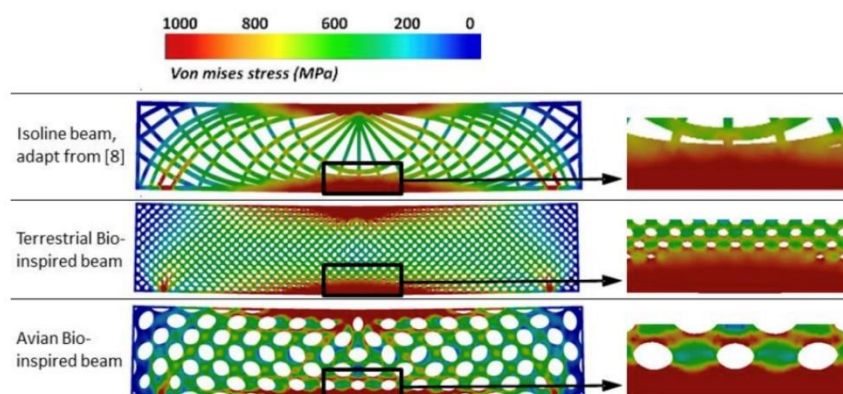


Fig. 12. Von Mises stress field in the three samples under three-point bending

2.6 ábra

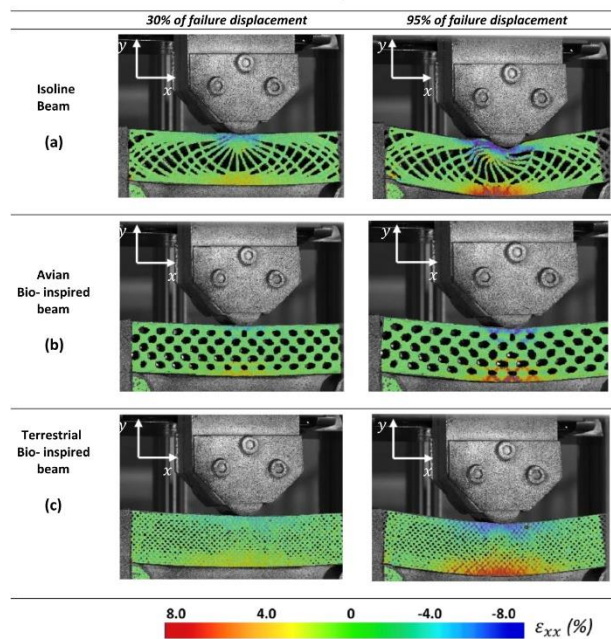
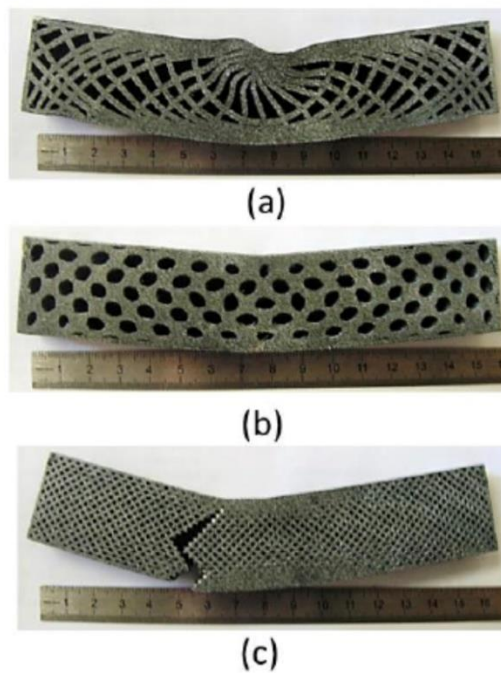


Fig. 14. Strain field evolution during bending test of: (a) Isostatic line optimized beam; (b) Avian bio-inspired beam; (c) Terrestrial bio-inspired beam

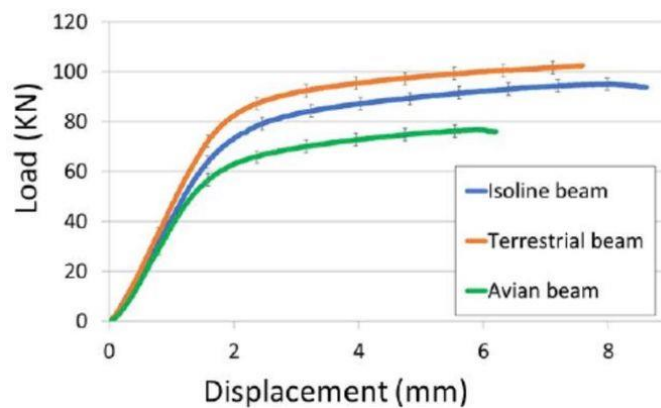
2.7 ábra

A kész gerendákat két ponton megtámasztva, középén terhelték, közben folyamatosan mérve a bennük ébredő feszültségeket és a teher mértékét. (8-10.ábra) Az elemek jelölése: a, erővonalakon alapuló szerkezet b, madárcsonton alapuló szerkezet c, szárazföldi emlőscsonton alapuló szerkezet.



2.8 ábra

A kísérlet során a szárazföldi emlős csontszerkezetén alapuló gerenda mutatta a legnagyobb szilárdságot, 100 kN feletti terhelés után tört el. A madárcsonton alapuló szerkezet 80 kN, az erővonalakon alapuló 100 kN alatt mutatott jelentős mértékű állapotromlást. A tesztben használt színkódolás a következő: kék – erővonal alapú szerkezet, narancssárga – szárazföldi emlőscsonton alapuló szerkezet, zöld – madárcsonton alapuló szerkezet. Ezen vizsgálat alapján született meg a döntés, hogy a továbbiakban a legnagyobb terhelhetőséget mutató elosztást, vagyis a szárazföldi emlős csontszerkezetét veszem alapul a modell létrehozásához.



2.9 ábra

Szivacsos csont utánzásával könnyebb szerkezetet hozhatnánk létre, mint egy tömör gerenda, jóval kisebb lenne az anyagszükséglet. A rácsos szerkezetű gerendákhoz viszonyítva azonban még vizsgálatokra szorul a projekt, egyelőre nem ismert a felhasznált anyagmennyiségek pontos különbsége, illetve a teherbírás béli eltérések sem, a két szempont összefüggései tovább bonyolítják a helyzetet, de a kutatás folytatásával ezen kérdések is megválaszolhatók.

3. Módszerek

Voronoj-cellák

A természetes csontszerkezet adaptív mintázatait gyakran matematikai modellekkel írjuk le, hogy jobban megértsük azok statikai előnyeit. A következő fejezet a Voronoj-cellák matematikai elvét mutatja be, hiszen ezek a modellek rendkívül hasznosak az olyan komplex rendszerek megértésében, mint a csontstruktúra, és gyakorlati alapot nyújtanak a biomimetikus tervezésben. Az organikus formák matematikai leírása és számolhatóvá tétele kulcsfontosságú a mérnöki munka tekintetében, hiszen pontos adatok nélkül nem végezhetőek megfelelő vizsgálatok és szimulációk. [5]

A Voronoj-cellák létrehozása során minden pontot egy területi központként kezelünk. A síkon egy pont Voronoj-celláját a ponthalmaz többi elemével vett felező merőlegesek által határolt tartományként kaphatjuk meg, térben pedig a felező merőleges síkok által határolt konvex tartományként. [8]

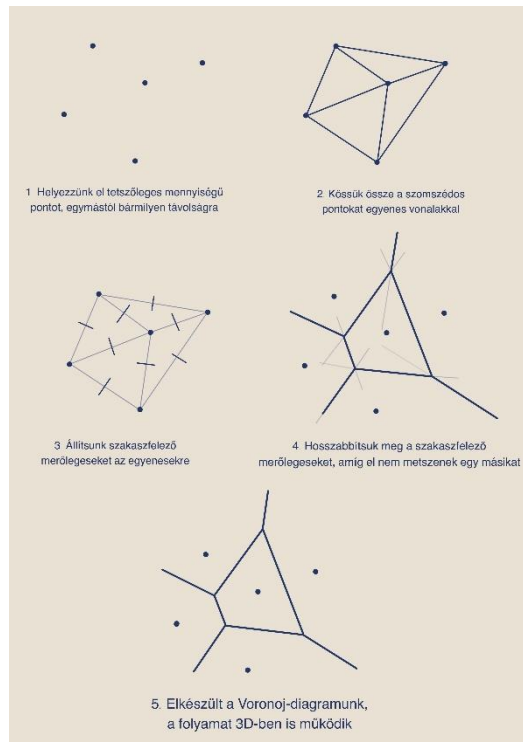
A természetben gyakran előforduló forma, ezen a matematikai képletben alapul például a zsiráf mintája, a szikes talaj repedezése, a méhsejtek, a levél felépítése és a teknősök páncélja is. A környezetünkben való gyakorisága miatt előszeretettel használják a szabály által létrehozható hálót épületek díszítésére, hiszen az emberi szem számára kellemes, ugyanakkor izgalmas látványt nyújt, absztrakt, de mégis rendezett hatást kelt.

Az orvosok is ezt a formát használják leggyakrabban a szivacsos csont modellezésére, mivel a protézisek készítéséhez komplex statikai szimulációkat kell végezniük, ezekhez pedig túl szabálytalan, nehezen kezelhető volna a rendes szivacsos csontszerkezet, illetve azt 3D nyomtatóval is jóval költségesebb és bonyolultabb lenne kivitelezni. [9]

Voronoj-cellák matematikai definíciója: Legyen egy X metrikus térben d a távolságfüggvény, és legyen K egy indexhalmaz. A $\{P_k\}_{k \in K}$ halmaz minden eleme legyen X -beli azaz $\forall k \in K$ -ra a P_k -hoz tartozó R_k Voronoj-cella a következő:

$$R_k = \{x \in X \mid d(x, P_k) \leq d(x, P_j) \text{ minden } j \in K, j \neq k \text{ esetében}\}$$

A cellák konvex zárt halmazok, de nem feltétlenül korlátosak. Korlátos esetben a síkban konvex sokszögek, a térben konvex poliéderek, korlátlan esetben a síkban végtelenbe nyúló, félegyenesekkel és szakaszokkal határolt konvex síkrészek, a térben pedig végtelenbe nyúló, végtelen síkdarabokkal és konvex poliéderekkel határolt konvex térrészek. A ponthalmaz egy pontjának akkor és csak akkor végtelen a Voronoj-cellája, ha a pont a ponthalmaz konvex burkának a határára esik. (BME) [10]



3.1 ábra

Voronoi-cellák széles körben alkalmazhatók tervezésben, térinformatikában, biológiában, fizikában és egyéb tudományágakban, akár rendszerek optimalizálására, kristálystruktúrák elemzésére, vagy számítógépes játékok tervezésére, de a csapadék eloszlása is modellezhető velük, sőt annak idején a kolera terjedését is a módszer segítségével igyekeztek megállítani. A Voronoi-cellák moduláris tervezési megközelítésre is ösztönöznek, ahol az egységek vagy részek könnyen sokszorozhatók és alkalmazkodhatnak az adott terület vagy projekt feltételeihez.

A parametrikus építészet egy olyan tervezési megközelítés, amely speciális paraméterek vagy változók használatával hozza létre az építészeti formákat és struktúrákat. Ezt a módszertant számítógépes modellezés és algoritmikus tervezés segítségével valósítják meg, amely lehetővé teszi az építész számára, hogy könnyen manipulálhassa és változtassa az épületek tervezését a paraméterek változtatásával. Ezek a paraméterek lehetnek méretek, alakok, térbeli viszonyok vagy más építészeti jellemzők, használják például a Voronoi-cellákat is. A cellák segíthetnek az anyagoptimalizációban is, mivel az építészek célzottan alkalmazhatják a strukturális elemeket csak azokon a területeken, ahol a legnagyobb igény van rájuk. [11]

A Voronoi-cellák modelljei és a csontok inspirálta mintázatok után most a parametrikus tervezés eszközeit és módszereit tekintjük át, amelyek révén a természetes struktúrákat digitális térben is képesek vagyunk megalkotni, még hozzá könnyen és dinamikusan változtatható módon. Ezzel a tervezési megközelítéssel számos variációt hozhatunk létre és optimalizálhatjuk a szerkezeteket, anélkül, hogy újra és újra meg kellene modellezni azokat változás esetén.

Parametrikus tervezés

A parametrikus tervezés egyértelműen leírható matematikai összefüggéseken alapul. Olyan algoritmusokat használ, melyek elemei a tervezési folyamat bármely pontján megváltoztathatóak, a tervezett objektum pedig képes azonnal lekövetni a módosítást, így nincs szükség teljes újra modellezésre egyetlen paraméter változása esetén. A tömegforma létrehozásán túl, napjainkban egyre gyakrabban hoznak létre parametrikus módszerrel szimulációkat, például épületenergetika vagy tartószerkezettervezés terén. Gyors adaptációja miatt lehetővé teszi, egy probléma megoldására irányuló sok variáció tesztelését rövid idő alatt. A megszokott formák mellett lehetőség van új alakzatok létrehozására is, amiket megszokott módszereinkkel és eszköztárunkkal lehetetlen lenne.

Az egyik leggyakrabban használt parametrikus tervezésre alkalmas CAD szoftver a Rhino3D, beépülő modulja a Grasshopper saját vizuális programozási módszerével segíti a munkát. Kifejezetten építészeti felhasználásra szánt szoftver a Digital Project és a Generative Components, míg a Pro/Engineer inkább a gépészet vonalán mozog. Kutatásom során én is a Rhino3D és Grasshopper kombinációt használtam rugalmassága és kezelhetősége miatt. [19]

A csontszerkezet modellezése

Célom egy szivacsos csontszerkezet által inspirált szerkezeti elem létrehozása volt, illetve a későbbiekben tesztelése, és összehasonlítása a hagyományos gerendákkal és hasonló tartókkal. Ehhez a szivacsos csontállományt Voronoi-cellákként képeztem le, hogy a végeredmény kezelhetőbb és vizsgálhatóbb legyen statikailag és matematikailag. [11]

Voronoi-cellák létrehozására és kezelésére napjainkban már számos digitális program képes, az én választásom a Rhino 6-ra esett, Grasshopper pluginnel, mivel ezt egy meglehetősen könnyen tanulható rendszernek gondoltam. A programnak saját Voronoi funkciója van, mellyel síkbeli és térbeli alakzatok hozhatók létre, lehet állítani a kiindulási pontok számát, egymástól való távolságukat, illetve a formát, amelyen belül elhelyezkednek. [12] [14]

A Grasshopper plugin vizuális programozásra szolgál, az itt létrehozott kódsor eredménye a síkbeli vagy térbeli forma, a kódsor módosításával pedig az alakzat is módosul, így ideális kísérletezésre, tesztelésre, hiszen minden változtatás a szerkezetben könnyedén eszközölhető és lekövethető. A kódsorokba jellemzően több mennyiséget állító csúszka kerül, ezekkel még könnyebb a különféle variációk létrehozása.

A programban a kis dobozok egy-egy parancsot vagy tulajdonságot jelölnek. Külön doboz például a téglatest létrehozása, illetve a Voronoi-cellákkal való feltöltése, de láthatóak a mennyiségeket és méreteket szabályozó csúszkák is. A parancsok és tulajdonságok csak összekapcsolva működnek együtt, a megfelelő kapcsolásnak is kulcsfontosságú szerepe van a kívánt eredmény elérésében.

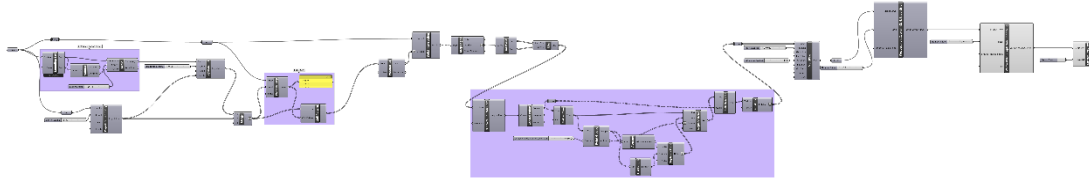
A gerenda anyagát tekintve egyelőre nem jutottam határozott döntésre, érdekes lehet megvizsgálni, hogy ugyanaz a kialakítás mennyire lenne megvalósítható acélból, vasbetonból, 3D nyomtatott biopolimerből, vagy más anyagból, illetve, hogy melyik mutatná a legoptimálisabb nyomó- és húzószilárdságot, melyik lenne a legnyomatékbíróbb.

A javított teherbírású és anyagszükségletű gerendán túl létrehozható lenne egy tervezés támogató programsor, melynek segítségével a már meglévő szerkezeti elemeket az általam létrehozott Voronoi-cella alapú szerkezetekké lehetne alakítani, hogy már a tervezés korai szakaszában alkalmazhatóak legyenek. Magyarországon az ArchiCAD a legelterjedtebb építészeti tervezőszoftver, viszont a CAD fájlok Rhino kompatibilisek, illetve a Rhinoból is lehet CAD fájlokat kimenteni, így ez a nagy többség számára használható lenne a szerkezetek alkalmazására, hiszen a Rhino csak egy köztes állomás lenne, és a megszokott munkakörnyezetben dolgozhatnának a módosított tartószerkezeti elemekkel. [15] [16]

Megfelelő támogatással akár lehetőség lenne arra is, hogy 3D nyomtatásra optimalizált szerkezetet hozzunk létre, és a kari 3D laborban elkészítsünk egy prototípust, melyet élesben is tesztelhetünk, nem csak szimulációk segítségével. Sok 3D nyomtató típus nem képes például vízszintes elemek nyomtatására, emiatt szükség lehet a szerkezet felülvizsgálatára a megvalósíthatóság érdekében.

4. Eredmények

Parametrikus tervezés a gyakorlatban



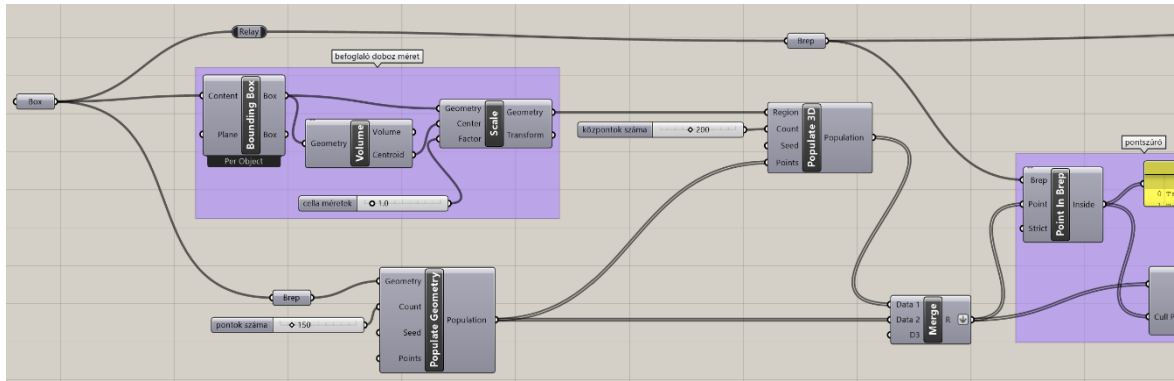
4.1 ábra

Az interneten már találhatók 3D Voronoi-cellákat alkalmazó modell elkészítésére szolgáló algoritmusok, oktatóvideók, sokan pusztán esztétikai okok miatt használják, de vannak, akik az előnyös szerkezeti elosztást szem előtt tartva alkotják meg az elemeket. Több videót, kódsort, megközelítési módot vizsgálva kiválasztottam azt, amelyik a legoptimálisabb a kutatásom céljából, a későbbiekben ezt használtam.

A 12. ábrán látható algoritmus segítségével bármilyen bemeneti alakzathoz Voronoi-cellákkal átszőtt testet hozhatunk létre. A bemeneti test lehet szabályos, síkfelületekkel határolt, vagy torzult, hajlított felületekből álló, a programsor mindkét esetet kezelni tudja, így semmi nem szab határt a kreativitásnak. Egyszerűbb formák esetében használhatjuk a Rhinoban található testek parancsait (box, sphere, stb.), organikus felületek bemenetként alakításához viszont a Subdivision Surface, vagyis osztott felület parancsra van szükség, ez lesz az algoritmus kiindulási pontja. Természetesen mindkét esetben lehetőség van másik programban létrehozott alakzatok beemelésére, majd a parancsba töltésére, így nem kötelező a Rhino modellezési környezetéhez alkalmazkodni tervezéskor, a generált test pedig szintén átemelhető másik programba, bár a finom állíthatósága úgy megszűnik. Ezáltal a Rhino és Grasshopper tekinthetőek közbelső állomásnak, az algoritmus használatához nincs szükség mélyreható ismeretükre, a vizuális programozási mód miatt felhasználóbarát módon, különböző csúszkákkal történik az értékek módosítása, optimalizálása.

Általánosságban bevett eljárás, hogy összetett, vagy organikus forma esetén először egy befoglaló téglatestet hozunk létre, amit Voronoi-cellákkal osztunk fel, majd ebből metsszük ki az eredeti testet. [17]

A kutatás és az esetleges további felhasználás céljából fontos megértenünk és elemeznünk az algoritmust, hiszen ennek segítségével fejleszthető a szerkezet. A kódsorban már találhatók olyan elemek, amelyek elsősorban a számítás időtartamát csökkentik, hogy végeredményében felhasználóbarátabb, biztosabb működésű (kisebb összeomlási kockázatú) programot kapjunk. Az ilyesfajta gyorsítások további lehetőségeit is érdemes vizsgálni, mivel egy túlnyújtott teljesítési idővel rendelkező elem rontja a felhasználhatóságot.



4.2 ábra

Box: Az első doboz a Voronoi-cellákkal átszőni kívánt alakzat geometriáját határozza meg. Jelen esetben egy téglatest alakú elemről van szó, mely 30x30x300 cm méretű. A méret és forma kiindulási alapját az építőipar gyakran használt tartószerkezeti elemei, egy szintmagas pillér és a nyílásáthidak, gerendák méretei, arányai adták.

Befoglaló doboz mérete:

Bounding Box: Egy meghatározott objektum köré illeszkedő legkisebb térfogatú téglatestet hozza létre, amely teljesen körülveszi az adott testet. Ez a komponens azért fontos az algoritmusba, mert így lehetőség van szabadabb vonalvezetésű, görbült felületekből álló formát is lekövetni és alkalmazni rá a Voronoi-cellás szerkezetet.

Volume: Egy 3D-s szilárd test vagy zárt felület térfogatát számolja ki. Ahhoz, hogy a Volume parancs működjön, a geometria teljesen zárt kell, hogy legyen. Ha a bemenetként megadott alakzat nyitott felület vagy görbe, a parancs nem tud térfogatot számolni.

Scale: Egy előre létrehozott tárgy méretének arányos nagyítására vagy kicsinyítésére szolgál. Ezzel az eszközzel lehetőség van egy geometria átméretezésére egy adott középpontból, egy vagy több skálázási tényező alapján. Ebben az esetben a test köré írt téglatest méretét határozza meg, ehhez szorosan kapcsolódva pedig a téglatestben létrehozott Voronoi-cellák méretét.

Cella méretek: A Scale parancsba kötött Cella méretek csúszka felel a később létrehozott Voronoi-cellák méretének meghatározására.

Populate Geometry: Egy előre meghatározott terület (amely lehet felület vagy térfogat) belsejében véletlenszerűen generál pontokat. Lehetőség van megadni a pontokkal benépesítendő geometriai formát, a pontok számát, meghatározott kezdőértékét (seed), ezekből jelen esetben csak az első két bemenetet használtam.

Pontok száma: A Populate Geometry parancsba kötve egy csúszka segítségével állítható a létrehozandó pontok száma.

Populate 3D: A Populate Geometry parancs háromdimenziós változata, a pontokat előre meghatározott testek belsejében szórja szét, szintén lehetőség van ugyanazon értékek állítására. Ebben az esetben az első két bemenet felhasználása mellett összekötésre került a Populate Geometry pontjaival, a pontok számát meghatározó mutató pedig a központok száma nevet kapta.

Központok száma: Ezen generált pontok adják majd a Voronoi-cellák központjait, ezért a könnyebb átláthatóság érdekében ezt a nevet kapta a 0 és 500 között állítható érték.

Voronoi 3D: A parancs térbeli Voronoi-cellákat generál, melyek kitöltik és felosztják a bemenetként használt testet. A cellákat meghatározott középpontok köré hozza létre, melyek mennyisége és helyzete állítható, így lehetőség van szabályos Voronoi-diagram (méhsejt minta) megalkotására is, de a pontok elhelyezkedése gyakrabban véletlenszerű.

Brep: Másnéven Boundary Representation egy geometriai forma, amelyet felületek és azok határai alkotnak, bármilyen térbeli objektumot leírhat. Többek között felületek deformálására, vágásra, nyújtásra használhatjuk, nagyon precíz modellezést tesz lehetővé, mivel pontos matematikai meghatározást ad a testek határait. Egyszerűbb testeknél nincs különösebb jelentősége, azonban ha Subdivision Surface parancssal importálunk egy organikus formát, a program így tudja megfelelően felületként kezelni, hiszen matematikailag határozza meg a testet.

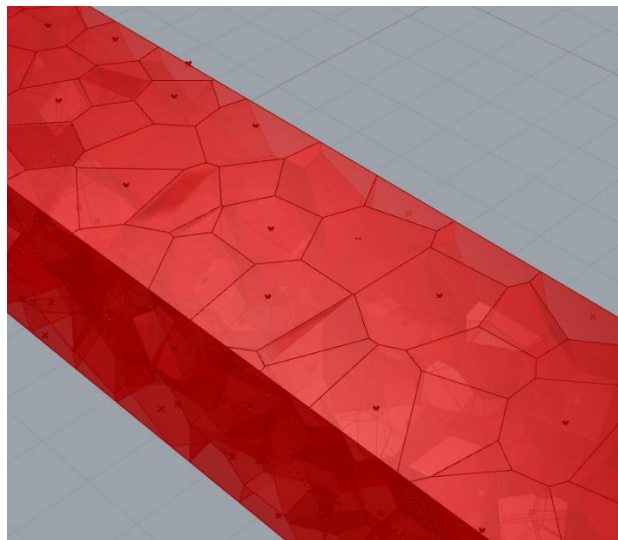
Solid Intersection: Háromdimenziós testek metszéspontjait számítja ki, jelen esetben a Voronoi-cellák által felosztott befoglaló dobozt metszi a kiindulási testtel. Egyszerű téglatest alakzat esetén szintén nincs szerepe, azonban egy görbült felületnél szükség van a cellák kerekítésére, a pontos élek és felületek visszanyerésére.

Ezen parancsok összekötésével már egy Voronoi-cellák által osztott testet kapunk, azonban a cellák mérete aránytalan, némelyik egészen hatalmas, míg vannak köztük irreálisan kicsik is. Ezt további pontok hozzáadásával tudjuk legegyszerűbben orvosolni, melyeket a test külső felületén oszlatunk el, így az eloszlás a testhez lesz optimalizálva, nem pedig a befoglaló dobozhoz.



4.3 ábra

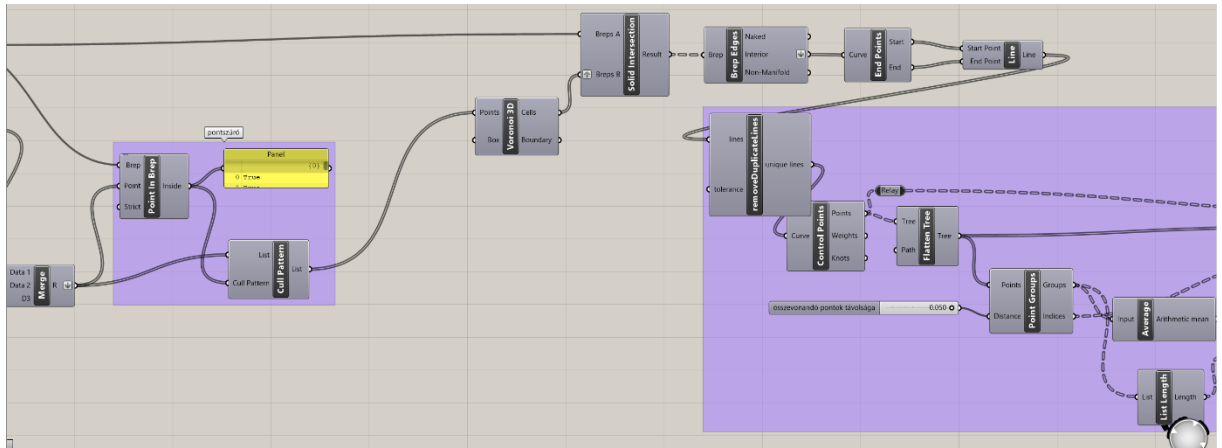
Merge: Különböző adatfolyamokat egyesít egyetlen kimenetbe. Amikor több különböző forrásból származó adatokat kell összefűzni egy egységes listába, a Merge komponens lehetővé teszi, hogy ezeket az adatokat egyetlen csatornába tereljük. Jelen esetben a felületen eloszlalt pontokat (Brep+Populate Geometry) fűzi egybe a testben elszórt pontokkal, így a Voronoi 3D parancs már együtt tudja kezelni a pontfelhőt, és a közös értékek alapján generálja az eloszlást.



4.4 ábra

A beillesztett plusz parancsokkal megszüntethető az egyenlőtlen cellakiosztás, azonban a folyamat sok számítást vesz igénybe, célszerű optimalizálni, mert akár a számítógép, akár maga a program lefagyhat a felesleges folyamatok újra és újra lefuttatásában.

Ennek egy jó módja, ha megakadályozzuk, hogy a két test (az általunk meghatározott és a köré létrehozott befoglaló téglatest) metszetén kívül eső pontok már ne jussanak el a Voronoi-cellákat generáló parancsig, hiszen az rengeteg felesleges számítást okoz, ha egy paranccsal később ki kell őket törölni.



4.5 ábra

Pontszűrő (16.ábra):

Point in Brep: Meghatározza, hogy egy adott pont beletartozik-e egy zárt testbe, alakzatba (Brep). Három lehetséges eredményt adhat a parancs: a testen belül, a testen kívül, vagy a test felületén található a pont, ezeket az eredményeket egy információs pannellel jeleníthetjük meg a programban.

Cull Pattern: Egy listából vagy adathalmazból bizonyos elemek kiszűr és eltávolít, megadott logikai rendszer alapján. Jelen esetben a test és a befoglaló téglatest metszetén kívül eső pontokat szűri, ahogy azt korábban célként meghatároztuk. A szűrt pontokat a Voronoi 3D parancsba csatlakoztatva lényegesen kisebb teljesítményt igényel a hálózat létrehozása.

Most már rendelkezünk egy általunk meghatározott testtel, melyet javarészt egyenlő arányokban, véletlenszerűen felosztanak Voronoi-cellák. Ahhoz, hogy ebből valós elem lehessen, a vonalakkól rudakat kell generálnunk, így szabályozható lesz a vastagságuk, anyaguk, formájuk, illetve vizsgálhatóak lesznek a csomópontok, központok, ahol a rudak metszik egymást.

Brep Edges: Egy megadott objektum (Brep) élei kinyerésére szolgál. Mivel az utolsó elem az összemetszésért felelős Solid Intersection parancs, szükség van az így létrejövő (tulajdonképpen a kiindulási) test pontok éleire.

MultiPipe: Több, egymáshoz kapcsolódó görbe alapján egy komplex csőhálót hoz létre. Az egyszerű Pipe parancs vonalakkól generál csöveket, eleinte ezt használtam, azonban ahol egy pontban több cső találkozik (ami ebben az esetben gyakori) nem tudja

megfelelően kezelni a csomópontot, emiatt javasolt az újabb Rhino verziókban elérhető Multipipe parancsot használni, amit kifejezetten erre a problémára fejlesztettek.

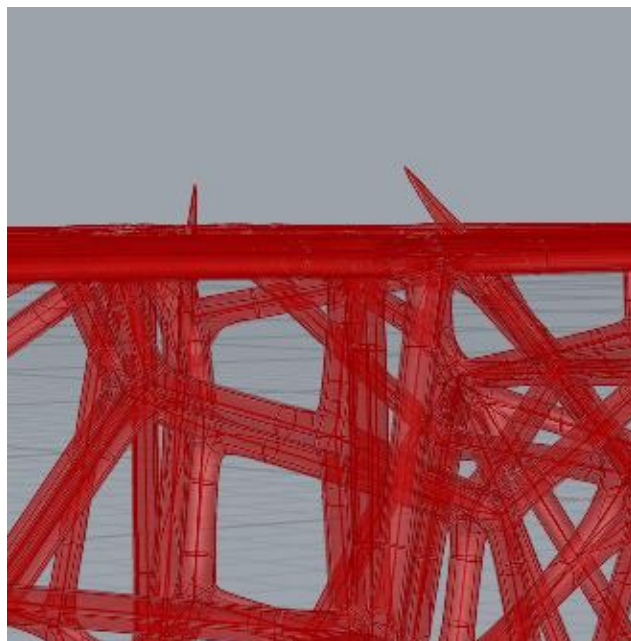
A két parancsot összekötve hibaüzenetbe ütközünk, melynek lehetséges oka, hogy az alakzatban duplikált vonalak vannak. Célszerű néhány parancsot beiktatni annak érdekében, hogy sehol ne történjen vonalkettőzés, hiszen ez az exportálás során is problémákat okozhat.

Remove Duplicate Lines: A megkettőzött vonalak kiszűrésére és eltávolítására szolgál. Fontos kiemelni, hogy kifejezetten egyenes vonalakon működik, azonban bizonyos kiindulási testeknél (organikus formák, torzfelületek) görbékkel dolgozunk, emiatt belekerül olyan parancs is az algoritmusba, mely a görbéket vonalakká alakítja, hogy a szűrőparancs kezelni tudja őket.

End Points: Egy meghatározott görbe kezdő és végpontjának meghatározásáért felel.

Line: Két pont közti egyenes vonal létrehozására szolgál.

Ha a fenti parancsokat beillesztjük a sorba, már működik a duplikált vonal eltávolító parancs, melyet a csőgeneráló paranccsal egybekötve meg is kapjuk a test első ténylegesen háromdimenziós csövekkel átszőtt változatát. Bizonyos nézőpontokból vizsgálva akár elégedettek is lehetnénk, azonban perspektivikus nézetben megforgatva a testet feltűnik, hogy néhol tüskeszerű csövek nyúlnak ki belőle, ami nyilván nem célunk és nem is megfelelő. A Multipipe parancs bemenetébe kötve a megfelelő csúszkákat, orvosolhatjuk a problémát.



4.6 ábra

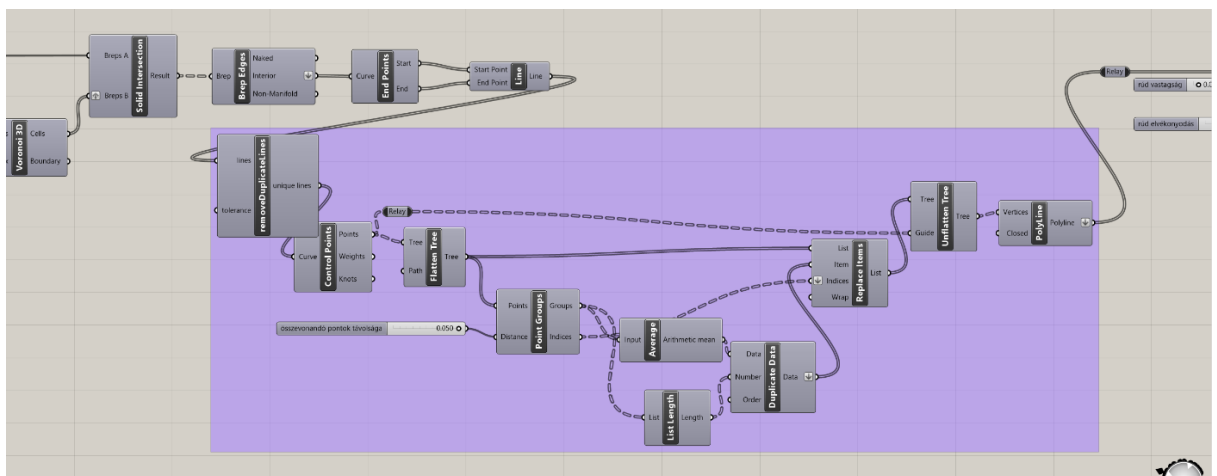
Rúd vastagság: A generált rudat átmérőjének állítására szolgál, megfelelő érték alkalmazása esetén a kiálló tüskék meg is szűnnek.

Rúd elvékonyodás: Lehetőség van a rudak keresztmetszetének nem egyenlő mértékű csökkentésére, amennyiben ez célunk készíthetünk középen elvékonyodó rudakat is.

Control Points: Megjeleníti egy geometriai elem, például görbe, vagy felület vezérlőpontjait, ezáltal közvetlenül módosítható az alakzat, lehetővé téve a finom igazításokat.

Flatten Tree: A Grasshopperben az adatok gyakran nem egy sima listában vannak tárolva, hanem egy fa struktúrában, ahol az adatok különböző ágakba csoportosítva jelennek meg. Egy több ágon futó adathalmaz tartalmát egyszerűsíti egyetlen listává, így a többi program könnyebben tudja kezelni.

Point Groups: Megadott kritériumok alapján rendez csoportba egy pontkészletben lévő pontokat. Lehetőség van például távolság alapján csoportosítani, amire jelen esetben is szükség volt. Esetünkben a csúszkán megadott távolságérték alapján csoportosít.



4.7 ábra

Összevonandó pontok távolsága:

Average: Átlagszámításra alkalmas parancs, ebben a programban a korábban csoportokba rendezett pontok általános elhelyezkedését számítja ki.

List Length: Adatlisták hosszúságát hasonlítja össze, esetünkben a sokszorozott pontok és a pontcsoportok azonos számáért felel.

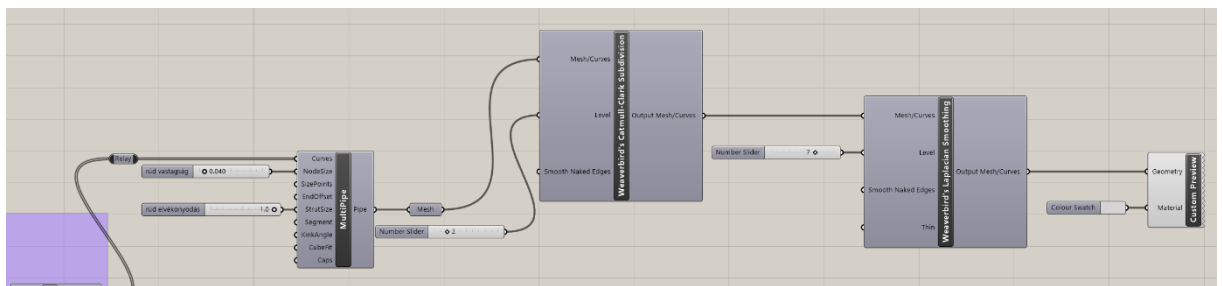
Duplicate Data: Adatsokszorozásra alkalmas parancs.

Replace Items: Elemek cseréjére szolgál és az összevont pontokkal helyettesíti a korábbi, egymáshoz túl közel lévő csoportokat.

Unflatten Tree: A korábban egy ágba összefésült információkat és adatokat ismét szétválasztja visszaállítva az eredeti hierarchiájukat. Esetünkben a új pontoknak ugyanazon ágon kell lenniük, mint a kontroll pontoknak, hogy a program képes legyen összeköttetéseket létrehozni köztük.

Poly Line: Törtvonalakból hoz létre vonalláncot a megadott pontok meghatározott sorrendben való összekötésével.

Mesh: A vonalakat háromszögekké vagy négyszögekké csoportosítva hoz létre hálót, melyet



4.8 ábra

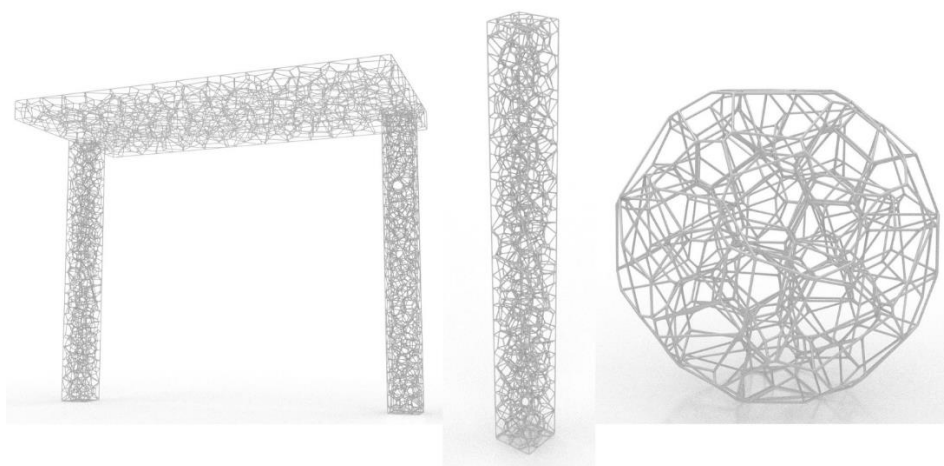
Weaverbird's Catmull – Clark Subdivision: Hálós geometria (mesh) finomítására szolgáló eszköz, amely a Catmull-Clark algoritmust alkalmazza, ez a 3D modellezésben egy bevett szubdivíziós eljárás.

Number Slider: A szubdivízió ismételt alkalmazása egyre simább és részletesebb felületeket hoz létre.

Weaverbird's Laplacian Smoothing: Szintén a hálós geometria simítására szolgál, a Laplace-egyenlet matematikai alapelveit alkalmazza.

A Catmull-Clark és a Laplace féle simítás eltérő megközelítést alkalmaz, így együttes alkalmazásukkal mindkettő pozitív tulajdonságai érvényesülnek, ezáltal finomítható az eredmény, különösen egy ilyen összetett 3D modell esetében. A Laplace-féle simítás mérsékelheti a Catmull-Clark által generált túlságosan lekerekített vagy eltorzított formákat.

Custom Preview: Vizualizációs eszköz, valós időben jeleníti meg a Grasshopper modellt a Rhino felületén, lehetőséget adva a prezentációra anélkül, hogy a modell ténylegesen a Rhino fájlba kerülne.



4.9 ábra

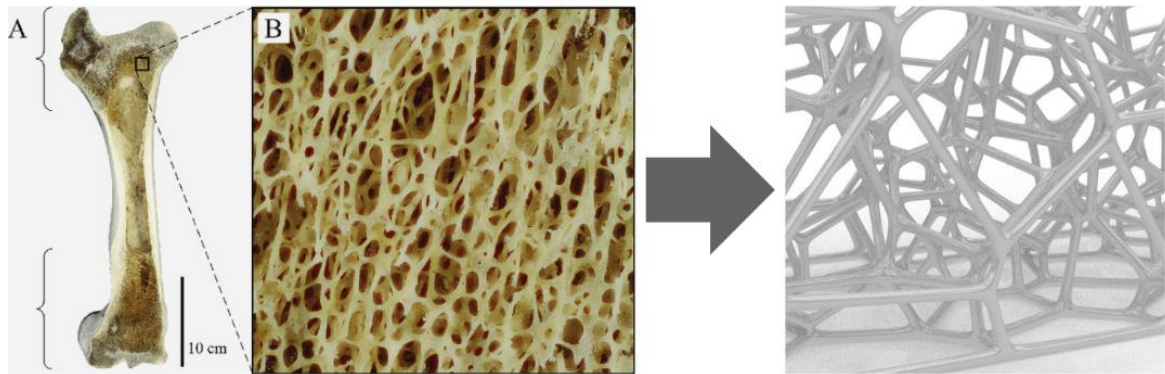
A programsort különböző geometriájú és összetettségű elemeken teszteltem, hogy ellenőrizsem a működését. Minden esetben képes volt az alapként megadott testet Voronoi-cellastruktúrára módosítani, a rudak átmérője, esetleges elvékonyodása állítható maradt. A cellasűrűség változtatható volt, ahogy a cellakiosztás is. Fontos szempont, hogy összefüggő végeredmény úgy érhető el, ha az alakzat zárt, vagy a különböző alakzatokat egy csoportba gyűjtjük.

Fejlesztési és vizsgálati lehetőségek

A parametrikus tervezés alkalmazásának bemutatása rámutat arra, hogy az innovatív építészeti és mérnöki megoldások mekkora szabadságot nyújtanak a formák és szerkezetek létrehozásában. A következő fejezetben a fejlesztési és vizsgálati lehetőségekre fókuszálok. Ezek a lépések elengedhetetlenek ahhoz, hogy a parametrikusan tervezett struktúrák ne csupán elméleti modellek maradjanak, hanem a valóságban is alkalmazható tartószerkezetekké váljanak. Az optimalizációs folyamatok, a statikai szimulációk és a különböző anyagok felhasználási potenciáljának elemzése mind hozzájárulnak a biomimetikus tervezés teljesebb megértéséhez és gyakorlati felhasználásához.

Elsősorban fontos volna statikai szimulációk segítségével meghatározni az optimális cellasűrűséget, illetve a megfelelő rúdvastagságot. Ezen faktorok ismeretében összehasonlító analízist készíthetünk a különböző véletlenszerű cellastruktúrákról, hogy feltérképezzük melyik térbeli elrendeződés a legideálisabb. Ha szeretnénk a véletlenszerűséget kizárni további komponenseket adhatunk a Grasshopper segítségével a kódsorhoz, melyekkel a szerkezetre ható erőket becsüljük meg. Lehetőség van ezen terhelések alapján átrendezni a cellákat, hogy hatékonyabban vegyék fel a meghatározott terhet, pontosabb mérésekkel akár tovább csökkenthető az anyagszükséglet is. Egy jól kialakított parancssorral kapcsolhatunk különböző szerkezeti elemekhez jellemző erőhatásokat (például nyomóerőt, nyíróerőt, nyomatékot), mivel egy pillérnek vagy egy födémpanelnek valószínűleg más lenne az ideális cellaelrendezése. [20]

Az anyag kiválasztásakor mindenképpen figyelembe kell vennünk a gyártási technológiát. Egy ilyen bonyolult forma esetében mindenképpen a lehető legnagyobb mértékben az előregyártás, azon belül is a 3D nyomtatás a legmegfelelőbb út. A klasszikus építőanyag közül az acél lehet a legmegfelelőbb erre, SLM (selective laser melting) technológiával nagy pontossággal nyomtatható. A biomimézist tovább vihetjük az anyagválasztás tekintetében is, akár biopolimerek alkalmazásával, akár új, csontszerkezet alapú anyag létrehozásával. Ezesetben további vizsgálatok szükségesek, hogy megállapítsuk anyagtakarékossági, költségvetési, statikai, környezetvédelmi szempontokból melyik anyag lenne a legjobb választás.



4.10 ábra

5. Értékelés és következtetések:

A dolgozat eredményei megerősítik, hogy a Voronoj-cellák matematikai modellje és a csontszerkezet fizikai elvei hasznos eszközök lehetnek a könnyű, mégis nagy teherbírású struktúrák tervezésében. A kutatás során létrehozott digitális modellek és algoritmusok demonstrálják a parametrikus tervezés alkalmazhatóságát a biomimetikus struktúrák fejlesztésében. Ugyanakkor a gyakorlati megvalósítás szempontjából további vizsgálatok és optimalizáció szükségesek, különösen az anyagválasztás, a gyártási technológia és a szerkezetek terhelhetőségének részletes elemzése terén.

A jövőre nézve számos izgalmas kutatási irány kínálkozik:

- Érdekes lenne tovább vizsgálni, hogy a Voronoj-cellás struktúrák hogyan reagálnak különböző dinamikus terhelésekre, és hogyan lehetne adaptív rendszereket fejleszteni ezen elvek alapján. Az ilyen alkalmazkodóképes szerkezetek több iparágat is érinthetnek, az építőipar mellett az autó- és repülőgépgyártás, illetve az orvostechnológia is nagy hasznát vehetné a fejlesztésnek.
- A 3D nyomtatási technológiák fejlődésével egyre inkább megvalósíthatóvá válnak az ilyen bonyolult szerkezetek, ami lehetőséget teremt új anyagok és nyomtatási módszerek behozatalára, így optimálisabb termék hozható létre.
- Prototípusok készítése és valós körülmények közötti tesztelése segíti az elméleti modellek gyakorlati tesztelését, további tervezési irányelvek megfogalmazására ösztönöz (például a gyártási technológia részletesebb figyelembevétele).
- Mesterséges Intelligencia (MI) integrálása gyorsabb, sokrétűbb tervezéstámogató szoftverek fejlesztését lendíti előre. Emellett a tesztelés, fejlesztés fázisában is segítséget nyújthat, hiszen képes valós időben elemezni a szerkezetre ható terheléseket, algoritmusok segítségével finomíthatja a cellaelosztást, a rúdvastagságot vagy az anyagmennyiséget. Ezzel lerövidíthető a prototípusfejlesztés ideje és a költségei.

Véleményem szerint a biomimetikus építészet egy kifejezetten előremutató irányzat, amely több figyelmet érdemelne, hiszen rengeteg lehetőség rejlik benne, melyek alkalmazásával fenntarthatóbb, hatékonyabb, kényelmesebb és nem mellesleg újszerű épületeket hozhatunk létre. A különböző tudományterületek összefogásával még átfogóbb kutatások jöhetnek létre azokról természetben fellelhető megoldásokról. Jó iránynak tűnik a törekvés arra, hogy a természetet egy kicsit visszahozzuk az építészetbe, mert az elmúlt évtizedekben épületeink nagy mértékben függetlenedtek környezetüktől, ennek pedig sokszor több a negatív hatása, mint a pozitív. A szivacsos csontállományon és a Voronoj-cellákon alapuló struktúra egy érdekes iránya a tartószerkezetek fejlesztésének, több helyzetben akár csak az izgalmas formavilága miatt is megállhatja a helyét látszó szerkezetként, plusz jelentősréteget adva például egy természettudományos kutatóközpont épületének.

A kutatás eredményei olyan új módszertanokat népszerűsítene a mérnöki tervezésben, amelyek javíthatják a tervezési hatékonyságot, hozzájárulhatnak a fenntartható építészet tervezés fejlődéséhez, ami lehetőséget ad az iparágak közötti innovatív együttműködésre. Az építészet, a mérnöki tudományok, a biológia és az anyagtudomány közötti együttműködés előmozdításával új lehetőségek nyílnak.

Az itt bemutatott eredmények és módszerek segíthetik, hogy a biomimetika a mérnöki és építészeti gyakorlat szerves részévé váljon. Ez az irányzat nemcsak a jövő építészeti kihívásainak megoldásában segíthet, hanem új inspirációforrást is nyújthat a kreatív tervezés számára.

6. Összegzés:

A dolgozat célja a fenntartható építészet fejlesztéséhez való hozzájárulás a biomimetikus elvek alkalmazásával, a szivacsos csontszerkezet inspirációjára építve. A kutatás során feltárt eredmények megerősítik, hogy a természetben megfigyelhető szerkezeti mintázatok, különösen a Voronoi-cellák által modellezett porózus struktúrák, jelentős potenciállal rendelkeznek a modern építészeti és mérnöki gyakorlatok innovációja szempontjából. Ezek a szerkezetek lehetőséget kínálnak a teherbírás, az anyagtakarékosság és a fenntarthatóság összehangolására, miközben új esztétikai dimenziókat nyitnak meg.

A kutatás során parametrikus tervezési eszközök, például a Rhino és Grasshopper alkalmazásával sikerült digitális modelleket létrehozni, amelyek a szivacsos csontszerkezet geometriáját és teherbírási elveit leképezik. Az optimalizált struktúrák számítógépes szimulációja rámutathat, hogy a szivacsos csontszerkezeten alapuló tartószerkezetek képesek megfelelni a modern építészeti elvárásoknak, miközben jelentősen csökkentik az anyagfelhasználásból eredő környezeti terhelést, elsősorban ezt szükséges vizsgálni. A kutatás ezen túlmutató célja, hogy a természet inspirálta struktúrákat az építészeti gyakorlatba is integrálhatóvá tegye, a prototípusok gyártási lehetőségeinek vizsgálatával és a 3D nyomtatás által kínált előnyök kihasználásával.

A kutatás számos kérdést vetett fel, amelyek mélyebb vizsgálata elengedhetetlen a biomimetikus építészeti megoldások teljes körű alkalmazhatóságához. Például további szimulációk szükségesek a Voronoi-cellás struktúrák dinamikus és ciklikus terhelésre adott válaszainak tanulmányozására. Az anyaghasználat szempontjából a biomimetikus elvek alapján kialakított új típusú kompozitok és biopolimerek fejlesztése lehet az egyik legígéretesebb irány. A prototípusok valós körülmények közötti tesztelése szintén fontos lépés a gyakorlati alkalmazhatóság biztosítása érdekében.

Hosszú távon az ilyen kutatások hozzájárulhatnak az építészeti gyakorlat átalakulásához, ahol a természet inspirálta szerkezetek nemcsak az épületek fizikai jellemzőit javítják, hanem az emberi környezetet is élhetőbbé, fenntarthatóbbá és esztétikusabbá teszik. Az építészet, a mérnöki tudományok, az anyagtudomány és a biológia közötti együttműködés továbbra is kulcsfontosságú a biomimetikus elvek széles körű alkalmazásában. A dolgozat eredményei azt mutatják, hogy a természet inspirációja nemcsak technológiai előnyöket kínál, hanem etikai és filozófiai szempontból is új utakat nyit, ahol az emberi alkotások és a természet közötti harmónia megteremtése az egyik legfontosabb cél.

7. Köszönetnyilvánítás

Szeretném kifejezni hálámat és köszönetemet mindazoknak, akik hozzájárultak a dolgozat elkészítéséhez.

Külön köszönettel tartozom Kokas Balázs konzulensemnek a kutatás során nyújtott szakmai útmutatásért, a dolgozat megírásában adott értékes tanácsokért és a folyamatos támogatásért, amely nagyban segítette munkám előrehaladását.

Hálásan köszönöm továbbá Katona Ádám László, Máder Patrik és Rácz Viktor Norbert tanár uraknak a kutatás során tanúsított segítségüket, értékes javaslataikat és építő kritikáikat, amelyek sokat hoztattak a dolgozat eredményességéhez.

Végül, de nem utolsósorban, szeretnék köszönetet mondani családomnak, barátaimnak és háziállataimnak a türelmükért és támogatásukért, amely nélkül nem valósulhatott volna meg ez a munka.

Pécs, 2024.

Borbás Anna

8. Irodalomjegyzék:

Ábrajegyzék:

2.1 ábra: Termeszvár alapján készült irodaház természetes szellőztetése, saját készítésű illusztráció

2.2 ábra: Exploration Architecture - Biorock Pavilion koncepcionális metszetei

2.3 ábra: A csont szerkezeti felépítése, saját készítésű illusztráció

2.4 ábra: A szivacsos csont főbb előfordulásai az emberi csontvázban, saját készítésű illusztráció

2.5 ábra: Erővonalak egy csövescsont végén, saját készítésű illusztráció

2.6 ábra: Bone Inspired Pavilion Forrás: Andre Harris a Biomimetic 1.0

2.7 ábra: Erővonalakon, szárazföldi emlős csonton és madárcsonton alapuló gerendák, a teszt során bennük ébredő feszültség feltüntetésével. Forrás: Bio-inspired method based on bone architecture to optimize the structure of mechanical workpieces

2.8 ábra: A terhelés teszt Forrás: Bio-inspired method based on bone architecture to optimize the structure of mechanical workpieces

2.9 ábra: A gerendák törésképe Forrás: Bio-inspired method based on bone architecture to optimize the structure of mechanical workpieces

2.10 ábra: A teszt során a gerendákra ható erők mértéke Forrás: Bio-inspired method based on bone architecture to optimize the structure of mechanical workpieces

3.1 ábra: A Voronoi-cellák kialakításának lépései, saját készítésű illusztráció

4.1 ábra: Grasshopper parancssor, saját ábra

4.2 ábra: Parancssor 1.részlet, saját ábra

4.3 ábra: Aránytalan cellaméret a modellen, saját ábra

4.4 ábra: Optimálisabb cellakiosztás, saját ábra

4.5 ábra: Parancssor 2.részlet, saját ábra

4.6 ábra: A modellen fellépő hiba, saját ábra

4.7 ábra: Parancssor 3.részlet, saját ábra

4.8 ábra: Parancssor 4.részlet, saját ábra

4.9 ábra: A programsor tesztelése különböző geometriájú elemeken, saját ábra

4.10 ábra: A csontszerkezet 3D modell leképezése, saját ábra

Források:

1. PAWLYN, M. (2011): *Biomimicry in architecture*. RIBA Publishing, London
2. DEVELOPMENTAL JUVENILE OSTEOLOGY (Second Edition) (2016): Academic Press, Cambridge. pp. 1–360.
3. WARHAM, J. (1996): *The behaviour, population biology and physiology of the petrels*. Academic Press, London. pp. 1–613.
4. BILEZIKIAN, J. P., RAISZ, L. G., MARTIN, T. J. (2008): *Principles of bone biology*. Academic Press, San Diego. pp. 1–2000.
5. GIBSON, L. (2012): Trabecular bone, osteoporosis and evolution. In: *MIT OpenCourseWare-12*.
6. BUCCINO, F., AIAZZI, I., CASTO, A., LIU, B., SBARRA, M. C., ZIARELLI, G., VERGANI, L. M., BAGHERIFARD, S. (2018): Down to the bone: A novel bio-inspired design concept. *Journal of Biomimetics and Bioinspired Materials*, 7(4): 123–138.
7. AUDIBERT, C., CHAVES-JACOB, J., LINARES, J. M., LOPEZ, Q.-A. (2017): Bio-inspired method based on bone architecture to optimize the structure of mechanical workpieces. *Biomimetic Engineering Studies*, 5(2): 45–56.
8. ROKICKI, W., GAWELL, E. (2019): Voronoi diagrams – Architectural and structural rod structure research model optimization. *Architectural Science Review*, 62(3): 215–229.
9. MIU, A. (2007): 6.838 computational geometry lecture 7: Voronoi diagrams. MIT Press, Cambridge.

10. COXETER, H. S. M. (1973): *A geometriák alapjai*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest. pp. 1–240.
11. ELEKES, GY. (1990): *Kombinatorikus algoritmusok*. Egyetemi jegyzet, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest. pp. 1–125.
12. ZYARATI, D. N. (2015): Voronoi curve attractor. *Parametric Design Innovations*, 4(3): 75–85.
13. FOLCH, A., MEZZOUR, S., DURING, M., HURTADO, O. (2016): Stacks of microfabricated structures as scaffolds for cell culture and tissue engineering. *Journal of Tissue Engineering and Regenerative Medicine*, 10(8): 567–578.
14. NEGM, R. I. T. A. M. (2020): The concept of "Voronoi diagram" and its impact on the formation of scenic design. *International Design Journal*, 9(2): 115–123.
15. BURKARDT, J. (2013): Voronoi clustering. *ARC/ICAM Technical Reports*, 4(7): 12–18.
16. PARAMETRICHOUSE. (2021): Rhino Grasshopper tutorials & scripts. link: www.parametrichouse.com
17. R CHARTS. (2020): Voronoi diagram with deldir. link: www.r-charts.com
18. INTERNATIONAL OSTEOPOROSIS FOUNDATION. (2015): Bone biology. IOF Publications, Geneva
19. JAIN, P. (2018): Biomimicry and contemporary parametricism. *Parametric Architecture Journal*, 5(2): 89–101
20. KIS, Á. (2019): Szerkezetek tervezése parametrikus környezetben. In: *XXV. Nemzetközi Építéstudományi Konferencia – ÉPKO*, pp. 231–238. Budapest
21. ABD KHALID, F. Q. (2020): Parametric design for Voronoi applications. *Studio Air Journal*, University of Melbourne, pp. 63–68.