

A Voronoi-szerkezetek építészeti felhasználása

Architectural Applications of Voronoi Structures

BOROS Eszter PhD hallgató

Győr-Moson-Sopron Vármegye Kormányhivatal – Építésügyi és Örökségvédelmi Főosztály, Építésügyi Osztály 3., 9400 Sopron, Kis János u. 4., Telefon: +36 99 795 042, epites.sopron@gyor.gov.hu, www.kormanyhivatalok.hu

Architectural Applications of Voronoi Structures

This paper explores the architectural applications of Voronoi structures, focusing on their aesthetic, structural, and sustainability benefits. Inspired by natural patterns, Voronoi-based designs improve light distribution, reduce material use, and enable innovative architectural solutions..

Keywords: voronoi, aesthetics, natural patterns, material efficiency, architectural innovation

A Voronoi-szerkezetek építészeti felhasználása

Jelen publikáció a Voronoi-szerkezetek építészeti alkalmazásait vizsgálja, különös tekintettel azok esztétikai, szerkezeti és fenntarthatósági előnyeire. A természetes mintázatokból inspirálódó Voronoi-formák hozzájárulnak a fényoptimalizáláshoz, az anyaghasználat csökkentéséhez és az innovatív építészeti megoldásokhoz.

Kulcsszavak: voronoi, esztétika, természetes mintázatok, anyagfelhasználás, építészeti innováció

1. BEVEZETÉS

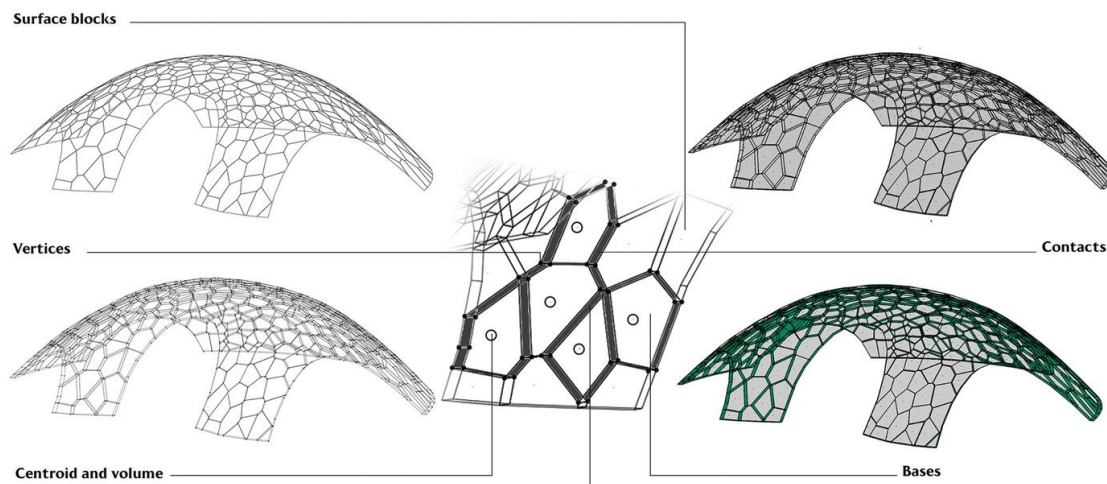
A Voronoi-diagramok olyan matematikai struktúrák, amelyek a tér felosztását végzik el adott pontkészletek alapján, úgy, hogy minden régióhoz az a pont tartozik, amelyhez a legközelebb esik. Az építészetben a Voronoi-szerkezetek alkalmazása különösen a parametrikus tervezésben és a fenntartható építészetben vált népszerűvé. E struktúrák lehetővé teszik az organikus formák kialakítását, a szerkezeti optimalizálást és az anyaghasználat hatékonyságának növelését. A Voronoi-szerkezetek különösen alkalmasak összetett, természetes formák modellezésére. Mivel a Voronoi-régiók a természetes struktúrák geometriáját tükrözik, mint például a méhsejtek vagy a kristályos szerkezetek, az építészek számára lehetőséget kínálnak természetes, mégis hatékony szerkezeti megoldások kialakítására. A geometriai alapú szerkezetek tervezésére használható algoritmusok folyamatosan fejlődnek, és az építészeti alkalmazások számos izgalmas új irányba mutatnak.

2. A VORONOI-DIAGRAMOK MATEMATIKAI ALAPJAI ÉS TERMÉSZETES ELŐFORDULÁSAI

A Voronoi-diagramok matematikai alapja az, hogy a tér adott pontok alapján régiókra oszlik, ahol minden régióban a pontok a hozzájuk legközelebbi generáló ponthoz tartoznak. A Voronoi-diagram olyan elosztást eredményez, ahol a pontok körül olyan területet határoznak meg, amely az adott pont legközelebbi szomszédságát jelöli [4]. E szerkezetek számos természetes rendszerben megfigyelhetők, például méhsejtekben, kristályos szerkezetekben és növényi sejtfalakban [3]. A matematikai alapok alkalmazása az építészetben lehetővé teszi a szimmetria és aszimmetria kombinálását, valamint a strukturális szilárdság és az esztétikai eszközök integrálását. A Voronoi-diagramok természetes előfordulásainak megértése segít a tervezők számára a bonyolultabb rendszerek modellezésében, amelyek a fenntarthatóságot és a funkcionalitást is szem előtt tartják.

3. VIZUÁLIS ALKALMAZÁSOK AZ ÉPÍTÉSZETBEN

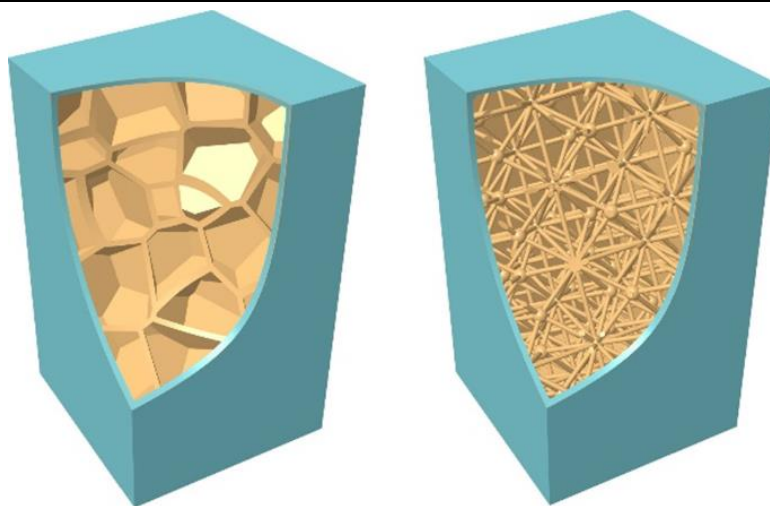
A Voronoi-szerkezetek egyik legnagyobb előnye az esztétikai sokoldalúság. Az organikus, természetes formák inspirációjaként a Voronoi-mintázatok felhasználhatók homlokzatok, belső terek és díszítőelemek kialakítására. A parametrikus építészetben a Voronoi-alapú tervezés különösen népszerű, ahol a formák algoritmusokkal generálhatók [4]. A rendszer rugalmasságának köszönhetően az építészek számos különböző típusú építészeti szerkezetet hozhatnak létre. Egy 2023-as kutatás kimutatta, hogy Voronoi-alapú homlokzatok alkalmazásával akár 20%-kal nőhet a természetes fény bejutása az épületbe, miközben a vizuális komfort is javul. A mexikói Biomuseo homlokzata például Voronoi-mintázatot követ, amely nemcsak esztétikus, hanem funkcionális is, mivel szabályozza a beáramló fényt és árnyékolást biztosít. A megfelelő fényeloszlás nemcsak a látványt javítja, hanem az épület energiahatékonyságát is növeli, mivel kevesebb mesterséges világításra van szükség. A különböző szinteken alkalmazott Voronoi-mintázatok lehetővé teszik a homlokzatok, tetők, valamint kültéri és beltéri elemek formálását, miközben a tervezők maximalizálják a tér és a fény közötti kölcsönhatást. Ahogy az alábbi ábrán is látszik:



1. ábra: *Distribution and detail of adjacent Voronoi blocks, showing contact faces, edges and vertices, [2]*

4. TARTÓSZERKEZETI ALKALMAZÁSOK

A Voronoi-szerkezetek alkalmazása az építészeti struktúrákban jelentős előnyöket kínál. A Voronoi-alapú szerkezetek könnyűek, de nagy teherbírásúak. A geometriai optimalizálás révén a struktúrákban kevesebb anyagot kell felhasználni, miközben megmarad a stabilitás és a szilárdság. Egy 2025-ös kutatás kimutatta, hogy Voronoi-alapú rácsszerkezetekkel akár 25%-kal csökkenthető az anyaghasználat a hagyományos szerkezetekhez képest, miközben a teherbírás változatlan marad [5]. A Vorogrid rendszer, amely Voronoi-mintázatot alkalmaz felhőkarcolók héjszerkezeteinél, akár 22%-os súlycsökkenést is elért [6]. A szerkezeti megoldások a fémek, betonok és más anyagok kombinációját használják, amely még nagyobb stabilitást biztosít a szerkezetek számára. A Voronoi-mintázatok alkalmazása különösen alkalmas nagy fesztávú tetőszerkezetekhez, hidakhoz és könnyű, de merev térbeli struktúrákhoz. Az építészeti projektek során a kisebb anyagmennyiség fenntartható építési megoldásokat kínál, miközben jelentős költségmegtakarítást is eredményezhet.



2. ábra: *Geometry comparison of Voronoi scaffold base geometry and regular beam lattice. This picture represents the geometric differences well (on one side, cellular-based walls, on the other side, connected beam structure) [4]*

5. GYAKORLATI ALKALMAZÁSOK ÉS ESETTANULMÁNYOK

Számos kortárs építészeti projekt alkalmazza a Voronoi-szerkezeteket. A mexikói Biomuseo homlokzata Voronoi-mintázatot követ, amely maximálja a természetes fény bejutását és csökkenti az energiafelhasználást [2]. A rendszer rugalmasságának köszönhetően a homlokzat szép és praktikus, miközben minimalizálja az energiapazarlást. Egy másik figyelemre méltó példa a Pekingi Nemzeti Uszoda, ahol Voronoi-alapú cellás szerkezetet alkalmaztak, amely egyszerre biztosít könnyűséget és szerkezeti stabilitást [3]. A struktúra kifejezetten a fenntartható tervezési elveket követi, ahol a természetes szellőzés és a hőmérséklet-szabályozás szempontjából is jelentős előnyöket kínál. A kutatások és esettanulmányok alapján a jövőben a Voronoi-alapú struktúrák még szélesebb körben alkalmazhatóak lesznek a fenntartható építkezés és a környezetbarát tervezés jegyében. Építészeti alkalmazása mellett már a bútortiparban is megjelentek ezek a szerkezetek, hasonló okok miatt, mint a már korábban említett anyagfelhasználás optimalizálása, esztétikum és stabil szerkezeti megoldások [1].

6. A VORONOI-SZERKEZETEK ÉPÍTÉSZETI KIHÍVÁSAI

A Voronoi-alapú formák különleges esztétikai és szerkezeti lehetőségeket kínálnak, de alkalmazásuk során számos gyakorlati nehézséggel is számolni kell. A legfőbb kihívás a geometriák bonyolultságából adódik, amely speciális tervezői gondolkodást, fejlett digitális eszközöket és sok esetben egyedi gyártástechnológiákat igényel [1],[2]. Mivel ezek a mintázatok gyakran távol állnak a hagyományos építészeti moduloktól, a kivitelezés költségei megnövekedhetnek, és a megvalósítás is időigényesebbé válhat [6]. Szerkezeti szempontból a teherelosztás modellezése, valamint a csomópontok fizikai viselkedése is komoly mérnöki feladat, különösen nagyléptékű struktúrák esetében [5]. Bár a Voronoi-struktúrák vonzó lehetőségeket rejtenek, alkalmazásuk során a funkcionalitás, az esztétika és a gazdaságosság közötti egyensúly megteremtése továbbra is komoly szakmai kihívást jelent.

7. JÖVŐBELI KILÁTÁSOK ÉS KUTATÁSI IRÁNYOK

A Voronoi-szerkezetek alkalmazása az építészetben még számos kiaknázatlan lehetőséget rejt. A jövőbeni kutatások fókuszálhatnak az adaptív Voronoi-alapú homlokzatokra, amelyek képesek reagálni a környezeti változásokra, például a napfény erősségére vagy a szél sebességére, így automatikusan optimalizálhatják a belső tér fényviszonyait és hőmérsékletét. A jövőbeli megoldások

során egyre inkább előtérbe kerülnek az olyan intelligens anyagok, amelyek képesek alkalmazkodni a környezeti hatásokhoz. Egy másik potenciális irány a Voronoi-alapú szerkezetek kombinálása új anyagokkal, például 3D nyomtatott bio-kompozitokkal, amelyek tovább növelhetik a szerkezeti hatékonyságot [4]. A jövőbeli kutatásoknak és technológiai fejlesztéseknek köszönhetően az építészek képesek lesznek egyre bonyolultabb formák és struktúrák megvalósítására, miközben csökkenthetik az energiafelhasználást és növelhetik az anyagok élettartamát.



3. kép: Saját terv alapján létrehozott kép, Tengr.ai [1]

8. KÖVETKEZTETÉS

Véleményem szerint a Voronoi-szerkezetek alkalmazása az építészetben egyre növekvő érdeklődést vált ki a tervezők körében. Esetében megkérdőjelezhetetlen előny az esztétikai vonzerő és a szerkezeti hatékonyság, melyek kombinációja lehetővé teszi a fenntarthatóbb és innovatívabb építészeti megoldások kialakítását. A jövőben várhatóan még több előrelépés lesz ezen a területen, ahogy a technológiai fejlődés és az új anyagok lehetőségei egyre inkább kinyitják a teret az újabb, hatékonyabb alkalmazások számára.

KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS

Köszönettel tartozom Dr. Tárkányi Sándor kollégámnak, hogy felhívta a lehetőséget erre a nagyszerű publikálási lehetőségre.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Boros E. *A Voronoi-szerkezetek bútoripari felhasználása*, In: *Wood 4 Sustainability : Processing, Construction, Products and Design*, University of Sopron Press, 2024, 254-258. <https://doi.org/10.35511/978-963-334-541-2-26>
- [2] Capone M., et al. *Digital Form Finding Using Voronoi Pattern*, *Nexus Network Journal* 23, 2021, 959–975. <https://doi.org/10.1007/s00004-021-00566-9>
- [3] Habib, F, et al. *D⁴G framework: a novel Voronoi diagram classification for decoding natural geometrics to enhance the built environment.*, *Architectural Science Review*, 2024, 67(5), 437-464. <https://doi.org/10.1080/00038628.2024.2321584>
- [4] Piros A., & Trautmann L. *Creating interior support structures with Lightweight Voronoi Scaffold*. *Int J Interact Des Manuf* 17, 2023, 93-101. <https://doi.org/10.1007/s12008-022-01182-8>
- [5] Zhou H., et al. *Stress-Responsive Spatial Voronoi Optimization for Lightweight Architectural Shell Structures*, *Buildings*, 2025, 15(9), 1547. <https://doi.org/10.3390/buildings15091547>
- [6] Mashhadiali M., & Krawinkler H. *Vorogrid: A static-aware variable-density Voronoi mesh to design the tube structure tessellation of tall buildings*, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering: Volume 38, Issue 6*, 2023, 681-817. <https://doi.org/10.1111/mice.12912>

