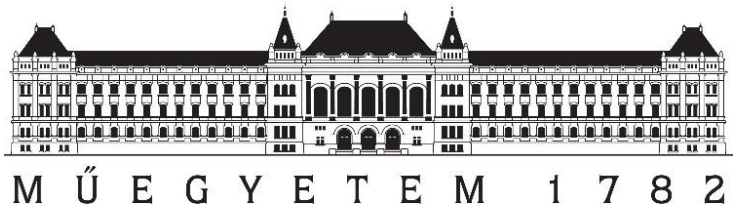


Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Építőmérnöki Kar

Építőanyagok és Magasépítés Tanszék

Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék

OTDK 2025

3D betonnyomtatott horizontális szerkezetek parametrikus vizsgálata numerikus és kísérleti módszerekkel

Szögi Tamás

Konzulensek:

Dr. Sólyom Sándor

Dr. Kapitány Kristóf

2024. 05. 24.

Absztrakt

Az elmúlt években a 3D betonnyomtatás jelentős figyelmet kapott a kutatók körében, ugyanis számos, jelenleg is széles körben alkalmazott építési folyamat automatizálására képes. Napjainkban a technológia korlátait elsősorban a nyomtatott anyag sajátosságai jelentik, amelynek korai – friss beton – tulajdonságai az építési sebességet nagyban befolyásolják. A mechanikai tulajdonságok részletes elemzésével igazolható az építés közbeni állapotra való megfelelőség, még komplex geometriájú elemek esetén is. Ennek következtében érdemes vizsgálni az innovatív technológia alkalmazhatóságát horizontális szerkezetek esetén is.

Kutatásom célja az elsődlegesen nyomó igénybevételekre tervezett, üreges födémelemek létrehozása, amelyek parametrizált tulajdonságokkal rendelkeznek, így könnyen alkalmazkodnak különböző projektspecifikus követelményekhez. Ennek megfelelően az elemek akkor is állékonyak maradnak, ha a függőlegestől eltérő irányban egymásra épülő rétegekből állnak.

A frissen nyomtatott elemek építhetősége számos tényezőtől függ, amelyek komplex rendszert alkotnak, ezért időfüggő numerikus szimulációkat alkalmaztam a rendszer teljeskörű elemzésére. Eltérő modellek vizsgálata érdekében olyan input fájlokat hoztam létre, amelyek már tartalmazzák a szükséges geometriai és anyagtani paramétereket. Ezt követően a valós nyomtatásokat végeztem robotkaros gép segítségével, nem síkbeli nyomtatási technikát alkalmazva, majd összehasonlítottam a numerikus és kísérleti eredményeket építhetőség szempontjából.

Munkám során a 3D betonnyomtatás új aspektusban történő alkalmazási lehetőségeit vizsgálom, amelyhez Rhino szoftver Grasshopper moduljának segítségével optimalizálom a geometriai paramétereket. Mindez mérföldkövet jelent az épületek betonnyomtatási technológiával történő megvalósításának szempontjából, beleértve a horizontális szerkezeteket is. Magasabb kihasználtságot és gazdaságosabb folyamatokat biztosít, ha a vertikális alkalmazás mellett a horizontális elemek is ilyen technológiával készülnek. Az új megközelítés további előnye, hogy a betonnyomtatással épülő szerkezetek megvalósítása a jelenleginél is gyorsabb lehet, valamint nagyobb geometriai szabadságot biztosít, amennyiben igazolható a szerkezeti megfelelőség.

Summary

In recent years, 3D concrete printing has garnered significant attention among researchers due to its potential for automating various, widely used construction processes. Currently, the primary limitations of this technology are associated with the characteristics of the printed material, especially the early age properties of fresh concrete, which significantly influence construction speed. Through a detailed analysis of mechanical properties, it can be confirmed that the compliance for in-progress construction state remains intact, even for complex geometric elements. As a result, it is worth to examine the applicability of this innovative technology for horizontal structures.

The aim of my research is to create hollow floor elements primarily designed for compressive loads. These elements come with parametric properties, allowing them to easily adapt to various project-specific requirements. Consequently, these elements remain stable even when constructed from layers oriented differently from vertical.

The buildability of freshly printed elements depends on numerous factors, constituting a complex system. Therefore, I employed time-dependent numerical simulations to comprehensively analyze the system. To examine different models, I generated input files that already contained the necessary geometrical and material parameters. Subsequently, I conducted real-life printing using a robotic arm, employing non-planar printing techniques, and compared the numerical and experimental results in terms of buildability.

Throughout my work, I examine new possibilities for the applications of 3D concrete printing in a novel context, utilizing Rhino software and its Grasshopper module to optimize geometric parameters. This represents a milestone in terms of implementing building construction by concrete printing, including horizontal structures. The new approach offers increased efficiency and cost-effectiveness, as it allows horizontal elements to be produced using this technology alongside vertical applications. Additionally, it enables faster construction of concrete printed structures, offering greater geometric freedom, provided structural compliance can be validated.

Tartalomjegyzék

Absztrakt 1

Summary 2

Tartalomjegyzék 3

1. Bevezetés 5

2. Kutatási irányzatok a 3D betonnyomtatásban – szakirodalmi áttekintés 6

2.1. Vasalásmentes, nyomott igénybevételű födémrendszerek kivitelezése - hagyományos építéstechnológiák 7

2.2. Parametrikus tervezés a 3D betonnyomtatásban 7

2.3. Nem síkbeli födémnyomtatás 8

2.4. A nyomtatott beton jellegzetességei 8

2.4.1. Korai szilárdulási képesség – a frissbeton mechanikai viselkedése 8

2.4.2. Tixotróp jellegből adódó látszólagos teherbírás 9

2.4.3. Tönkremeneteli módok 9

2.4.4. Numerikus szimuláció 9

3. Horizontális szerkezetek erőjátéka és hatása a szerkezetre 10

3.1. Nyomtatás közben ébredő igénybevételek 10

3.2. Potenciálisan 3D nyomtatható horizontális szerkezeti elemek 10

3.3. Modern héjszerkezetek 13

4. Parametrizált modellek és numerikus szimuláció - módszertan 13

4.1. Geometriai adatok, mint változtatható paraméterértékek 14

4.2. Input file generálása - Grasshopper VoxelPrint plugin 14

4.3. Végeselem szoftver a 3D betonnyomtatásban - ABAQUS 15

4.3.1. Időfüggő numerikus szimuláció 16

5. Kísérletek – összehasonlítás 17

5.1. Validálás 18

5.2. Rétegidők vizsgálata 24

5.3. Födémszerkezet nyomathatósági vizsgálata numerikus alapon 25

5.3.1. Vizsgált paraméterek 26

5.3.2. Numerikus szimulációk 27

5.4. Anyagkísérletek 29

5.5. A nyomtatható födém 35

6. Összegzés 37

6.1. Kutatási eredmények 37

6.2. Hatáselemzés – kiértékelés, elért eredmények kontextusba helyezése 37

Köszönetnyilvánítás 41

Felhasznált irodalom 42

Mellékletek 44

1. Bevezetés

Napjaink egyre inkább jellemző tendenciája, hogy minél rövidebb idő alatt szeretnénk realizálni a kész épületeket, mondhatni, hogy minél hamarabb tető alá hozzák a beruházást. Ugyanúgy igaz ez kis léptékű otthonok és lakópark méretű építkezések esetében. A gyors építésmódok egyik felfelé ívelő irányzata a 3D betonnyomtatás, amely a kísérleti fázisból kilépve az iparban is egyre nagyobb érdeklődést kelt. Alkalmazásával olyan geometriájú betonelemeket valósíthatunk meg, amire korábban nem volt példa. Ilyen részletességű modellezés esetén pedig fontos kiemelni a megvalósíthatóságot, ugyanis az anyagtechnológia sok esetben jelenleg még határt szab a kreativitásnak.

Gyakran felmerül a kérdés, hogy megvalósítható-e a tervezett geometriával egy adott szerkezet, vagy módosításokra van szükség, és ha igen, akkor a koncepció melyik paraméterén. Több lehetőség is adódik nagy igénybevétellel járó, komplex betonszerkezetek kivitelezésére, viszont mind közül talán a leggyorsabb és leghatékonyabb a 3D betonnyomtatás. Ez hatványozottan igaz olyan elemekre, ahol nem egyirányú a terhelés, vagyis a függőlegestől eltérően, külpontosan épülnek egymásra a rétegek.

A hibalehetőségek redukálása érdekében különösen fontos, hogy még a nyomtatás előtt minél jobban megismerjük a megvalósítani kívánt szerkezeti elem viselkedését, ugyanis a technológiából adódóan, megtámasztó zsaluzat hiányában, nincs védve a beton a környezeti hatásokkal szemben sem, továbbá önmagában kell megfelelő állékonysággal rendelkeznie. A tervezési gyakorlatban napi szinten alkalmazott végeselemes szimulációk elősegítik az állékonyság ellenőrzését. Ennek különösen nagy jelentősége van, ugyanis egy esetleges összeomlás, főleg épületek esetében nemcsak anyagi veszteséggel, hanem sérülésekkel is járhat. Ennek megfelelően kutatásom során egy olyan folyamat kidolgozását tűztem ki célként, aminek segítségével rövid időn belül ellenőrizhető a szerkezet állékonyságra való megfelelősége, akár többszöri módosítás esetén is. Mivel egy projekt során általában gyakori a tervmódosítás, ezért egy parametrikus modellt készítettem, elősegítve az egyes tulajdonságok változtatásának gyors lekövetését.

Kísérleti technológia révén az innovatív ipari szegmensekre jellemző a *learning-by-doing*, azaz a folyamat során történő állandó tanulás. A betonnyomtatás esetén is ezt lehet megfigyelni, ugyanis komplex technológiáról beszélhetünk, ahol a kész szerkezetig számos részegységnek kell összhangban működnie. Ennek tekintetében elsősorban a szerkezet nyomtatás közbeni tönkremenetelének és a szerkezeti hibák elkerülése a cél.

1. ábra: 3D betonnyomtatott épület födémrendszere kéregpaneles technológiával

A jelenlegi bevett eljárás alapján 3D betonnyomtatott épületek esetén a födémeket még hagyományos technológiával, jellemzően kéregpaneles megoldással építik (1. ábra). Ez nemcsak megszakítja az automatizált építésfolyamatot, de az élőmunkaigénye is nagyobb, mint a nyomtatott falak esetében. Továbbá nyomtatott épületek esetén monolit födémek kialakítása csökkenti a költséghatékonyságot, ugyanis a meglévő helyszíni technológia mellé további zsaluanyagot és munkaerőt kell allokálni a feladat teljesítéséhez.

2. Kutatási irányzatok a 3D betonnyomtatásban – szakirodalmi áttekintés

A 3D betonnyomtatás egy komplex folyamatnak tekinthető, ahol több anyagtechnológiai, vezérléstechnikai és 3D modellezési paramétert kell egymással összehangolni és optimalizálni. Ehhez hozzájárulhatnak az anyagfejlesztések, a geometria optimalizálása és a vezérlőrendszer megfelelő programozása is, így értelemszerűen a kutatási terület is igen szerteágazó lehet. Jelen kutatás szempontjából fontos kiemelni a szakirodalomban taglalt frissbeton vizsgálatokat, a reológiai tulajdonságokat, valamint a rétegek állékonyságát (Balázs et al., 2020.).

2.1. Vasalásmentes, nyomott igénybevételű födémrendszerek kivitelezése - hagyományos építéstechnológiák

A hazai építőiparban a XX. század elején kezdett elterjedni a vasbetonépítés (Polgár, 2018.), így ezt megelőzően a hagyományos horizontális szerkezetek esetében még nem terjedt el a vasbeton födém alkalmazása. Jellemzően ilyen esetben nyomott ívet alakítottak ki, kihasználva a boltíves szerkezetek erőjátékát. Hátránya azonban, hogy általában nagy szerkezeti magassággal rendelkeztek, valamint csak kisebb teret tudtak lefedni. Az ipar felgyorsulásával és a hatékonyság növelésével egyre inkább a síkfödémek irányába tolódtak el az igények, így megjelentek a hajlításra és nyírásra is méretezett síkfödémek.

A kihasználtság szempontjából leghatékonyabbnak mondható, topológiailag optimált födémszerkezetek megvalósításához a komplex geometria miatt jelenleg még szinte minden esetben egyedi zsaluzatra van szükség. Bizonyos geometriáknál 3D nyomtatás is alkalmazható, azonban csak alátámasztott felületen, ami magával vonja az elkészítés utáni emelési és összeszerelési élőmunkaigényt. A redukált anyagmennyiség mellett párhuzamosan megnövekszik a komplexitás is, és nem összefüggő nyomtatási útvonalak alakulhatnak ki. A nyomtatás folytonosságának megszakítása nehezíti a folyamatot, különösen robotkaros nyomtató esetében, ahol jellemzően nincs puffertartály a fej fellett és az anyag könnyen beleköthet a pumpacsőbe, ennek eredményeképp a teljes geometriát nem lehet lekövetni megszakítás nélkül. A modellek nyomtatási útvonalának kialakításánál egy folytonos görbét határoztam meg és úgy alakítottam a geometriát, hogy az összefüggő vonalláncot (poliline) eredményezzen.

2.2. Parametrikus tervezés a 3D betonnyomtatásban

A 3D betonnyomtatás előkészítési és tervezési szakaszában gyakran előfordul, hogy szükség van a modell változtatására, a megvalósíthatóságra fókuszálva. Ennek megfelelően kritikus tényező a nyomtatás közbeni állékonyság, továbbá az igénybevételek alapján a megfelelő anyagtípus kiválasztása. 3D nyomtatáshoz szükséges optimális geometria iteratív meghatározásához a parametrikus tervezés elengedhetetlen folyamat – felgyorsítva a modellalkotást - amelyet elsősorban változó keresztmetszetű elemek, egy bizonyos minta alapján történő tervezésénél használnak. Ennek segítségével a módosítások adaptálása a modellben nem igényel sok időt.

2.3. Nem síkbeli födémnyomtatás

Olyan nyomtatási útvonal esetén beszélünk nem síkbeli nyomtatásról (*Non-Planar Printing*), amikor a nyomtatófej egy réteg nyomtatása során nem kizárólag a Descartes-féle koordináta-rendszer XY síkja mentén mozog, hanem a Z tengely mentén is képes haladni. Ezt a mozgást általában csak a robotkaros 3D betonnyomtatók tudják megvalósítani, a 6 tengely mentén történő elfordulás miatt. A portálnyomtatók előnye a nagyobb léptékű alkalmazás, így a nyomtatófejet egy nagyobb keretvázas nyomtatórendszerre szerelve lehet a leghatékonyabb eredményt elérni (Hawkins et al., 2020), amelyet már ötvöztek is a robotkarral (Cybe, 2023.) így még bonyolultabb geometriák valósíthatók meg nagy léptékben. Ez a fajta ötvözés kifejezetten előnyös a födémnyomtatás szempontjából is.

2.4. A nyomtatott beton jellegzetességei

A szakirodalomban a 3D betonnyomtatott anyagra jellemző Mohr-Coulomb anyagmodellt alkalmaztam a vizsgálatok során, amely figyelembe veszi mind az elasztikus, mind pedig a képlékeny anyagviselkedést. (Wolfs et al., 2019.) (Shahzad et al., 2023.).

Általában kétféle tönkremeneteli mód jelentkezhet a frissen nyomtatott betonelemeknél. Elasztikus kihajlás (*Elastic buckling*) – „Rugalmas tönkremenetel” olyan esetben fordul elő, amikor az anyagmodell kis merevséggel, de jó kohéziós tulajdonságokkal rendelkezik pl.: $E = 0.012 * t + 0.02$, $c = 0.0024 * t + 0.004$. Plasztikus deformáció (*Plastic collapse*) – „Képlékeny tönkremenetel” esetén jellemzően az alsóbb rétegek nyomtatás közben elérik a folyáshatárt, így nem képesek elviselni a ránehezedő rétegek súlyát. Ez magasabb kezdeti merevséggel és kis kohézióval rendelkező anyagmodelleknél fordul elő pl.: $E = 0.024 * t + 0.04$, $c = 0.0006 * t + 0.001$. (Vantyghem et al., 2021.)

2.4.1. Korai szilárdulási képesség – a frissbeton mechanikai viselkedése

Szakirodalmi adatok alapján a beton korai mechanikai tulajdonságainak vizsgálata fontos tényező, kifejezetten a plasztikus és képlékeny alakváltozás során tapasztalt viselkedés megismerése. A nyomtatás szempontjából is fontos azt megvizsgálni, hogy egy keverék mennyit képes alakváltozni, mielőtt megszűnne az anyagi folytonossága, és hogyan képes nagy deformációt is elviselni még összeomlás nélkül.

A nyomtatási kísérletek során felhasznált SIKACrete 751 3D anyagot alkalmaztam. Ezen anyag korai szilárdsági paramétereit előzetesen már vizsgáltam, egyirányú nyomóerő-elmozdulás tekintetében. Megállapítható volt, hogy az így kapott eredmények korreálnak a szakirodalomban feltüntetett rugalmassági modulus és kohéziós erő értékével, illetve azok pontossága egybevág a korábbi kutatásom során mért értékekkel (Vantyghem et al., 2021.). Anyagfelhasználás szempontjából a SIKA nem a leggazdaságosabb, feltehetőleg Magyországon hasonló teljesítményű, de lényegesen kevesebb anyagi ráfordítással előállítható anyagot lenne érdemes gyártani.

2.4.2. Tixotróp jellegből adódó látszólagos teherbírás

Dinamikus terhelésre történő konzisztenciaváltozás – tixotróp viselkedést elősegítő anyagok – dinamikus hatásra növekszik a konzisztencia, míg statikus állapotban rövid időn belül csökken. Több anyaggyártó is kifejezetten tixotróp tulajdonságot javító adalékszert kínál (pl..: MAPEI, SIKA), melyet érdemes alkalmazni nyomtatható beton esetén.

2.4.3. Tönkremeneteli módok

Elasztikus kiborulás, plasztikus összeomlás, vagy ezek együttes jelenléte eredményezi általában a nyomtatott anyag tönkremenetelét. A geometriai imperfekciók figyelembevételével – megfelelő részletezettségű modell esetén is - előfordul, hogy a nyomtatás során valamelyest eltérő lesz a tényleges modell a szimulálthoz képeset. Ennek figyelembevétele a valósághoz jobban közelítő modelleket eredményez.

2.4.4. Numerikus szimuláció

3D betonnyomtatott anyagok esetén az időfüggő korai szilárdsági paramétereknek nagy jelentősége, valamint kritikus szerepe van a horizontális szerkezetek nyomtatásának szempontjából. Az anyagfejlesztéshez nagyban hozzájárulnak a numerikus szimulációs eljárások is, amely segítségével egy nyomtatható anyag fejlesztésekor elegendő csupán az adott keverék mechanikai paramétereit a kívánt értékre beállítani és nem szükséges elvégezni egy teljesen új kísérletsorozatot módosított receptúrák esetében az állékonyság igazolásához. Ezen felül a maga a zsalumentes technológia a statikai méretezésre is hatással van, hiszen a keresztmetszeteknek itt nemcsak a végállapotban kell megfelelnie. A szimuláció eredményeként lekérdezhető maximális igénybevételeket rögtön összevethetjük az anyag korai szilárdsági és teherbírási értékeivel, így a legnagyobb igénybevételt figyelembe véve

gazdaságosan választhatunk a piacon lévő jelenlegi anyagok közül. Amennyiben anyagfejlesztésre is lehetőségünk van, akkor akár egy adott geometriához is igazíthatjuk az anyagot olyan célzott receptúra alkalmazásával, ami éppen eleget tesz a szilárdsági követelményeknek (*inverse material characterization*).

3. Horizontális szerkezetek erőjátéka és hatása a szerkezetre

3.1.Nyomtatás közben ébredő igénybevételek

A nyomtatás során elsősorban az önsúly és az önsúly okozta külpontos erő jelenik meg terhelésként. Mivel általában a frissbeton legjobban a nyomó igénybevételt képes elviselni egységnyi deformáció mellett, ezért a külpontosságnak még nagyobb jelentősége van, mint az anyag sűrűségének vagy a nyomtatott sáv keresztmetszeti területének. Legtöbb esetben vasalásmentes szerkezetként szilárdulás után is legjobban a nyomást képes felvenni az anyag, így megfelelő geometria kialakításával mindkét állapotban előnyös erőjáték alakítható ki.

3.2. Potenciálisan 3D nyomtatható horizontális szerkezeti elemek

Olyan szerkezeti elemek kialakítására érdemes törekedni, amelyek valamilyen módon képesek minimalizálni a hajlító és húzó igénybevételeket, vagy szilárdságuknál fogva képesek elviselni a ránehezedő rétegek súlyát. Az alábbi pontokban részletezett szerkezeti formák megoldást jelenthetnek erre a horizontális szerkezetek 3D nyomtatással történő megvalósíthatóságának kérdésre.

3.2.1. Félnyeregetető:

Ebben az esetben a két végén az oromfalak támasztanák meg a nyomtatott tetőszerkezetet és ferde, eltolt nyomtatás formájában lehetne megvalósítani a használt terület lefedését (2. ábra).

2. ábra: Példa vasbeton tetőszerkezetre

3.2.2. Erkély (konzolos nyomtatás)

Kellően hosszú nyomtatási útvonal esetén a konzolos nyomtatás is megvalósítható lehet, megfelelő ívben történő alátámasztással (3. ábra), szintén törekedve nyomtatás közben is a minimális túlnyúlásokra.

3. ábra: Példa íves alátámasztású erkélyekre

3.2.3. Gombafödém jellegű kialakítás, íves felületekkel

A gombafödémekhez hasonlóan kiszélesedő pillérekre (4. ábra) nyomtatott rétegek azonos terhelést adnak mindegyik oldalon, így kiborulás és stabilitásvesztés helyett itt a felfutás ívének van döntő szerepe a szerkezeti kialakításban. Az ilyen jellegű kialakítás során tömör oszlopszerkezet is létrehozható, így növelve meg a nyomtatási útvonalat.

4. ábra: Példa gombafödém jellegű szerkezetekre

3.2.4. Boltívek, kupolás szerkezetek

A boltívek elsősorban nyomott igénybevételnek vannak kitéve, ami a vasalásmentes kialakítás szempontjából előnyös, azonban helykihasználás szempontjából nem gazdaságos. Az alábbi képen egy kisléptékű, nem síkbeli nyomtatási technikával készülő modellt láthatunk, amely a gyorskötésű anyagot ötvözi a speciális nyomtatási technikával egy boltív nyomtatása közben. Ilyen esetben nagy előnyt jelent a nyomtatófejben hozzáadott, szabályozott mennyiségű kötésgyorsító, amely szabadabb nyomtatást tesz lehetővé. Ahogy az a későbbi anyagvizsgálatok esetén be is igazolódott, a szilárdulási időnek döntő szerepe van nagy igénybevételeknek kitett modellek nyomtatása során. A BME-n található robotkaros nyomtató szintén a holland VERTICO által forgalmazott gép (5. ábra), viszont a kiegészítő adalékszer hozzáadására alkalmas fej hiányában már a keverő egységben hozzá kell adni minden összetevőt, ami a pumpálhatóságot nehezítheti.

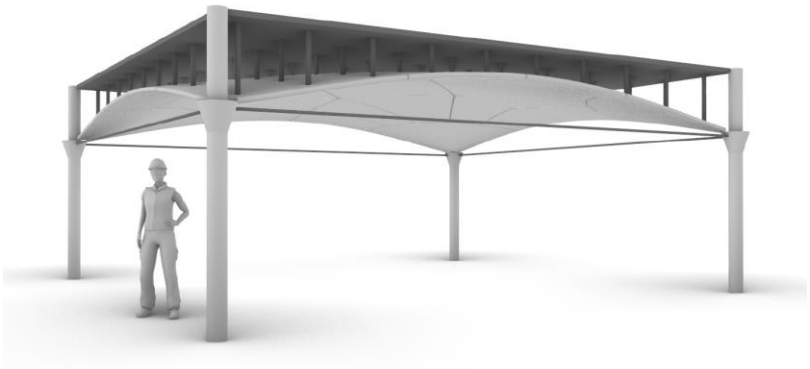
5. ábra: Kis boltíves elem nem síkbeli betonnyomtatása (Forrás: VERTICO)

Ugyanez a geometria akár épület létékben is megvalósítható lehet, teljes boltívek kinyomtatása esetén. Mivel a fenti szerkezetek ipari szempontból nem alkalmazhatóak

gazdaságosan többszintes épület esetén, valamint jelent kutatásban szerettem volna egy típust részletesebben megvizsgálni, így a továbbiakban a leggyakrabban alkalmazott födémtípus, a síkfödém vizsgálatára helyeztem a hangsúlyt.

3.3. Modern héjszerkezetek

Az ACORON (Automated Construction) projekt keretein belül az Egyesült Királyságban már 2020 óta foglalkoznak íves geometriájú héjszerkezetek optimálásán automatizált építéstechnológia segítésével (6. ábra). A projektben részvevő kutatócsapat kisebb, íves elemekből állít össze egy átlagos szoba lefedésére is alkalmas födémszerkezetet. Az íves kialakítást egy állítható magasságú hálóra szórt anyaggal készítik. A folyamat nagy előnye, hogy laborkörülmények között megvalósítható az összes szükséges betonelem, azonban szállítást és helyszíni emelést, majd beállítást igényel, ami lassítja a folyamatot.



6. ábra: Íves héjszerkezet, nyomott igénybevételű födém (Forrás: ACORN)

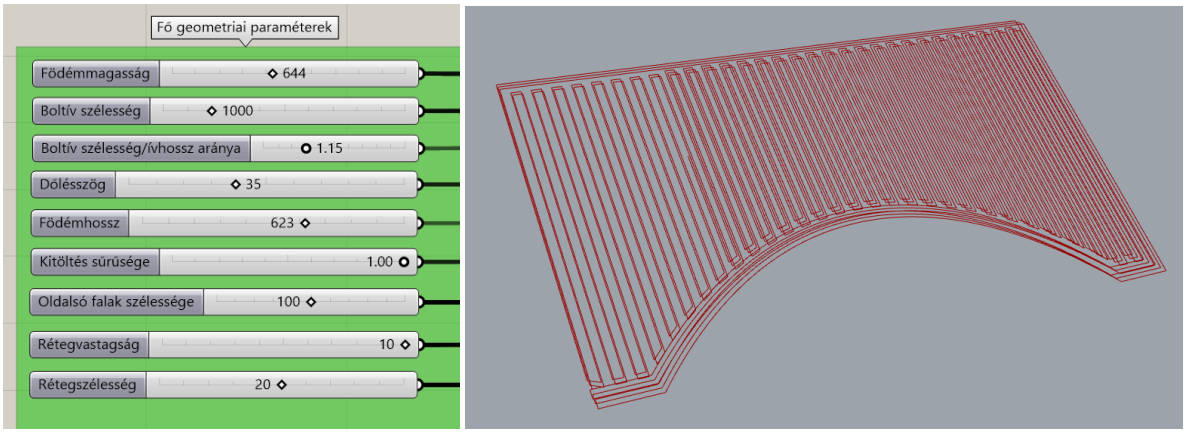
Geometriáját tekintve ezt a héjszerkezetet értékelem a legalkalmasabbnak, hogy modern eljárásokkal kiegészítve, gazdaságos födémszerkezetként helyt álljon az iparban is. Ebből kiindulva a kutatásomban az általuk alkalmazott technológiához hasonlóan, a hátrányokat kiküszöbölve, a beépítési helyén szeretném létrehozni a teherbíró horizontális betonelemeket, minden további utómunka nélkül (Costa et al., 2020.).

4. Parametrizált modellek és numerikus szimuláció - módszertan

A szakirodalmi kutatás alapján az enyhén boltíves síkfödémek tekinthetők a nyomtatásra legalkalmasabb, kedvezőbb erőjátékkal rendelkező geometriának ipari felhasználási szempontból is. Ezek kialakítása téglalap alakú mező esetén lehet 3 vagy 4 él mentén megtámasztott, de akár íves födémszélhez is igazítható.

4.1. Geometriai adatok, mint változtatható paraméterértékek

A Rhino szoftver Grasshopper modulját számos építőmérnöki feladatban használják ismétlődő feladatok automatizálására és elemkiosztások megtervezésére akár homlokzatok vagy acél rácsostartók esetén. A beépített modul tulajdonképpen vizuális programozást tesz lehetővé, így sokoldalúan alkalmazható. Ezt kihasználva olyan felépítést dolgoztam ki, amely az alábbi fő paramétereket fogadja input adatként (7. ábra), és kimenetként a numerikus szimuláció futtatására alkalmas fájlt generál a paraméterekből (9.ábra).

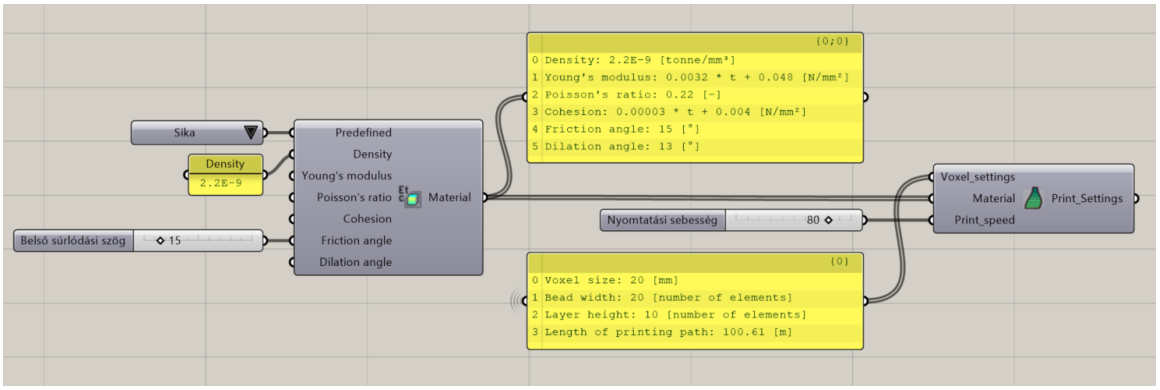


7. ábra: Bemenő geometriai paraméterek és a nyomtatási útvonal

4.2. Input file generálása - Grasshopper VoxelPrint plugin

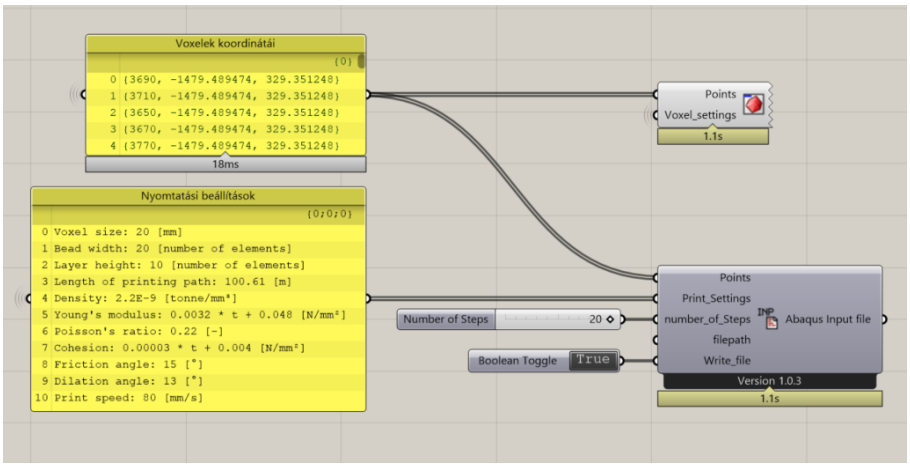
A VoxelPrint plugin célja, az ABAQUS szoftver által importálható .inp kiterjesztésű fájl generálása. Ehhez először a kívánt geometriát voxelekre, azaz egy 3D-s elem legkisebb meghatározó egységére kell bontantani. Több opció közül is választhatunk, hogy milyen térbeli kiterjedésű modellel definiáljuk a nyomatandó geometriát, az esetek többségében ez felületelem vagy vonallánc segítségével történik. Én a nyomtatási útvonal (*curve*) által elmetszett, illetve a vonalhoz képest meghatározott távolságon belül elhelyezkedő voxelek centroidjait határoztam meg. Ezen koordináták és a nyomtatási paraméterek beállításnak segítségével már a modul képes legenerálni az input fájlt a végeselem szoftver számára.

Alapvetően a VoxelPrint plugin vízszintes sík mentén történő szeletelésre fejlesztették ki, azonban a nem síkbeli nyomtatás szimulálása érdekében ezt úgy módosítottam, hogy alkalmazható legyen bármilyen dőlésszögű nyomtatási sík esetén. A plugin részét képzik az alábbi komponensek, amelyeknél megadhatjuk többek között az anyagtulajdonságokat, a nyomatási sebességet, és a voxelek méretét is (9. ábra).



8. ábra: A szimuláció során alkalmazott anyagparaméterek

A 8. ábrán látható alapbeállítások mellett azt is a Grasshopperen belül kell megadnunk, hogy a modellt hány lépésben (*Step*) építse fel a numerikus szoftver. Minél magasabb ez a szám, annál inkább közelít a valós nyomtatáshoz a szimulált modell, viszont arányosan megnő a számítási igény is.



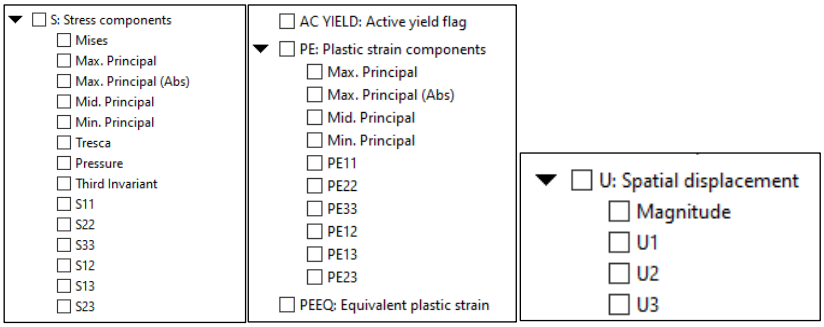
9. ábra: Az input fájl generálásához tartozó bemeneti paraméterek

A nyomtatott rétegek, így a voxelek közötti kapcsolatot is tökéletesnek feltételezi a VoxelPrint plugin, azonban a valóságban ez eltérő lehet. Ennek szimulálására használható a CobraPrint plugin, ami már képes kezelni az ilyen jellegű feltételezéseket (Vantyghem et al., 2021). Azonban a CobraPrint felületmodellből (*brep*) készít nyomtatási útvonalat, aminél nem tudtam volna úgy módosítani a bemenő adatokat, hogy a nem síkbeli nyomtatás során alkalmazott ferde anyaglerakást szimulálni tudjam.

4.3. Végeselem szoftver a 3D betonnyomtatásban - ABAQUS

Számos tervezőszoftver kínál végeselemes szimulációs lehetőséget a felhasználók számára, azonban egyelőre csak néhány olyan van, amely alkalmas időfüggő numerikus

szimulációk futtatására, valamint közvetetten vagy aktív kapcsolattal parametrikus szoftverrel is összeköthető a bemeneti adatok iteratív kezelése érdekében. A 3D betonnyomtatás vizsgálatakor a szakirodalomban leggyakrabban alkalmazott numerikus szoftver az ABAQUS, mely képes input fájlt is (.inp kiterjesztésben) fogadni (Vantyghem et al., 2021.), így nem szükséges manuálisan a szoftveren belül modellezni a szerkezetet. Ez megkönnyíti a számításokat, és lehetőséget ad arra, hogy könnyedén módosítsunk az elemek tulajdonságán, illetve a bemeneti adatokon. Maga az input fájl 4 fő részből épül fel, melyek rendre a csomópontok koordinátái, a 8 csomópont együttese által meghatározott elem, ezek egymáshoz viszonyított pozíciója, az egyes lépésekben hozzáadott elemek azonosítója, végül pedig az anyagtulajdonságok és a lekérdezett paraméterek.



10. ábra: Az input fájlban meghatározott, lekérdezett paraméterek

A VoxelPrint a komponenseken belül alapvetően definiálja a lekérdezendő adatokat (10. ábra), ezért azt csak manuálisan az input fájl átírásával vagy az ABAQUS-on belül tudtam volna módosítani. Mivel azonban a jelen kutatáshoz szükséges legfontosabb paramétereket tartalmazta, ezért ezt nem módosítottam. Eredmények típusai, fontos kimutatási lehetőségek.

4.3.1. Időfüggő numerikus szimuláció

A szimuláció során a nyomtatási sebességet 80 mm/s értékben határoztam meg, míg a rétegvastagág 10 mm, a rétegszélesség pedig 20 mm volt. Korábban vizsgáltam a SIKA anyag testsűrűségét is, amit átlagosan 2200 kg/m^3 volt. VoxelPrint-ben alapvetően definiált paraméterek közül nem módosítottam a következőket:

- Poisson-tényező: 0.22
- Belső súrlódási szög: 15 °
- Dilatációs szög: 13 °

Ezen felül további két paramétert tekintettem validnak, összevetve a korábban kapott eredményekkel. Így a szakirodalomban vizsgált frissbeton esetében így alakult ez az értékpár (Vantyghem et al., 2021.):

$$E\,(t\ [min]) = 0{,}0032 \times t + 0{,}048\ [MPa]$$

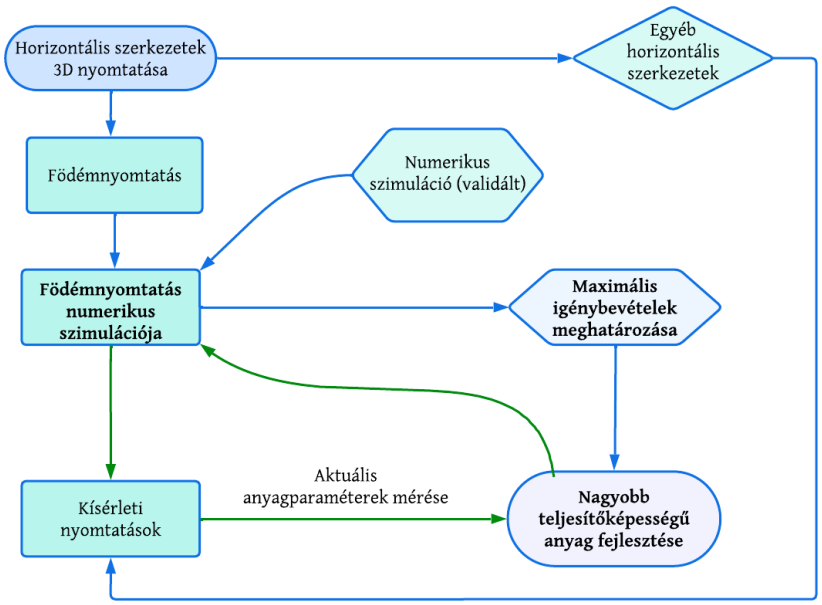
$$c\,(t\ [min]) = 0{,}00003 \times t + 0{,}004\ [MPa]$$

Ezek a valóságban keverésenként eltérőek lehetnek a vízadagolás mértékétől, valamint az inhomogenitástól függően. A fenti paraméterek pontosításával a valós elmozdulások becslése numerikus szimulációval még pontosabb lehet.

A parametrikus modellnek köszönhetően egy-egy paraméter módosítása után rövid idő alatt le tudtam generálni a következő INP fájlt a numerikus szimulációhoz. Ennek azért van jelentősége, mert így több paraméter hatását is vizsgálni tudtam, valamint a kutatás folytatásában a meglévő kódot felhasználva további elemzéseket tudok végezni.

5. Kísérletek – összehasonlítás

A tervezett kutatási folyamatot az alábbi ábra szemlélteti, melyen megfigyelhetjük az anyagfejlesztés iteratív jellegét adott geometriára vonatkozóan (11. ábra).



11. ábra: A födémnyomtatás folyamata

5.1. Validálás

A nyomtatott modellek megfelelő szimulálásához külön nyomtatásokat végeztem a numerikus modell validálásának céljából. A plugin fejlesztői a publikációban jelezték, hogy a modell még további tesztelésre és pontosításra szorul komplex geometriák esetén, ezért elsődlegesen megvizsgáltam ennek pontosságát. Ebből kiindulva összehasonlítottam a numerikus szimuláció során kapott állékonyságot a valós kísérletek során tapasztaltakkal. A kiértékelés során figyelembe vettem az összeomlási rétegszámot és deformációk mértékét is, továbbá javaslatot teszek a bemenő adatok és paraméterek változtatásával a pontosításra is.

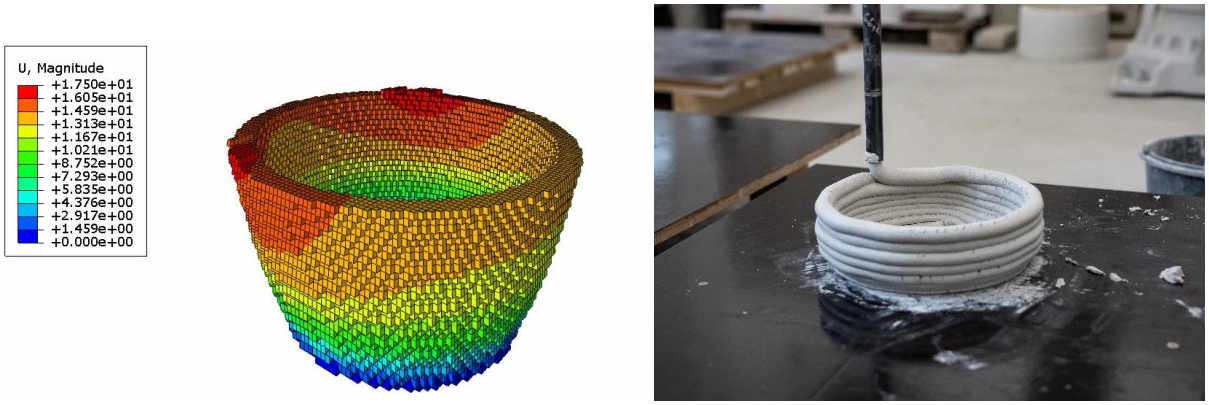
Különböző – mértékadónak tekinthető – szcenáriókat hoztam létre eltérő nyomtatási iránnyal és léptékben, ugyanis a szakirodalomban kizárólag kisebb henger és kónusz alakú modelleken keresztül vizsgáltak egy-egy numerikus módszer pontosságát. Komplex modellek, mint például hidak nyomtatáskakor a fókusz inkább a topológiai optimáláson volt a validálás helyett. A 3D betonnyomtatás összetett folyamat, így a teljes és pontos modellezés során rengeteg tényezőt kell figyelembe venni, ezért általában egy elfogadható pontosságú szint felett már nem célszerű további erőforrást fordítani a pontosság növelésére, illetve egyetlen beállítás nagypontoságú leképezésére, tekintettel arra, hogy számos külső tényező lehet még, ami befolyásolja a nyomtatás sikerességét.

A valós nyomtatás és a numerikus szimuláció összehasonlítása során kritériumként a tönkremenetel pillanatában meglévő rétegek számát és a tönkremeneteli módot jelöltem meg. A szimuláció pontosságát jelentősen eltérő modellek segítségével vizsgáltam egy esetleges tendencia kimutatásának érdekében. Mivel a szimuláción belüli anyagmodell sajátosságából adódóan igen nagy elmozdulások esetén is folytatódik a szimuláció, ezért az objektív összehasonlítás érdekében meghatároztam egy 20 mm-es maximum elmozdulásra vonatkozó peremfeltételt, mint összeomlást kiváltó kritérium. Ezt empirikus adatok alapján határoztam meg, ugyanis ilyen mértékű elmozdulásnál már nem lesz alkalmas használatra a vizsgált szerkezet. A szimuláció és a valós nyomatások eredményeit az I. Melléklet tartalmazza.

5.1.1. 25°-os dőlésszögű kónusz

Az első vizsgált modell esetében a szimuláció során 15. rétegig állékony maradt a modell, ezzel szemben a 25°-os dőlésszög okozta külpontosság elegendőnek bizonyult ahhoz, hogy a valós nyomtatáskor már a 9 réteg nyomtatása után összedőljön a modell. Itt a rétegek összedolgozása és a külpontosság mértéke volt meghatározó, amit erősen befolyásol a

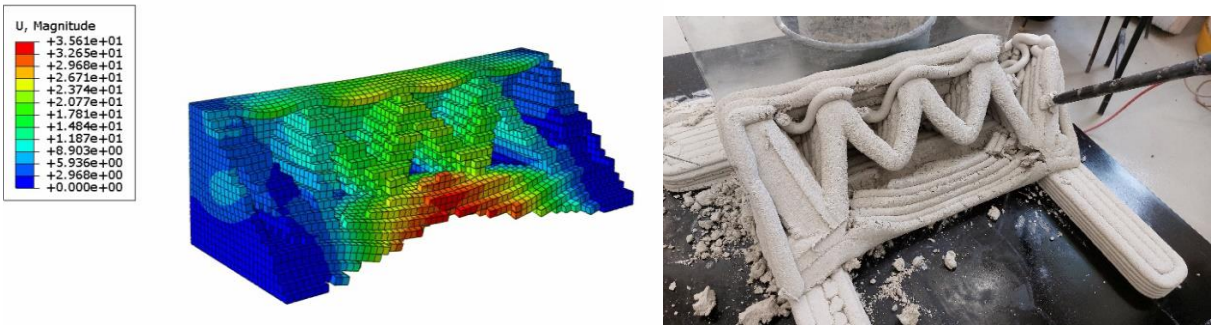
konzisztencia. Ezen paraméterekben való változás valószínűleg negatívan befolyásolta a modell építhetőségét (12. ábra).



12. ábra: Kónusz numerikus szimuláció és kísérlet

5.1.2. Előkísérlet – „kis" boltíves födém

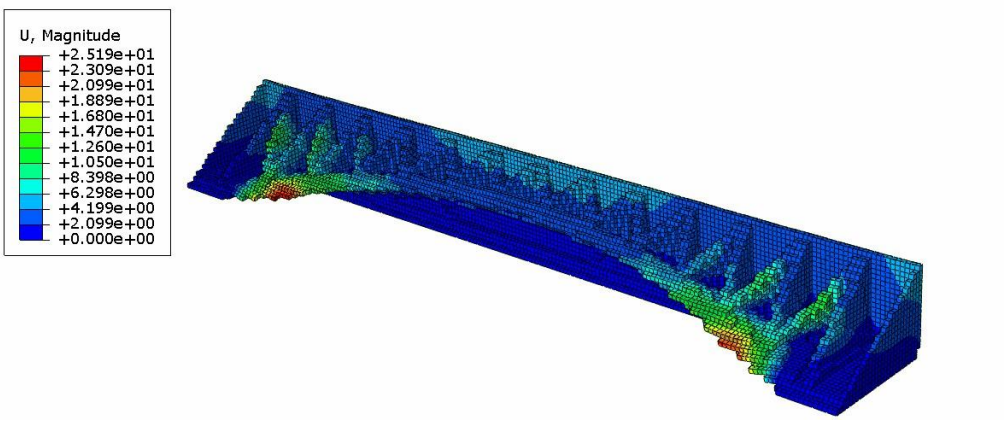
Az első födémnyomtatás kísérlet során megközelítőleg azonos rétegszámnál volt a tönkremenetel a gyakorlati és a szimulált esetben. A legfontosabb tapasztalat ennél a modellnél szeletelési sík dőlésszögének beállítása volt, ugyanis ezt a modellt a vízszintes síktól mérve 45°-os szögben nyomtattam, viszont mivel az alsó sík rész szinte egyben leesett kellő megtámasztás hiányában, ezért a továbbiakban csökkentettem ezt 35°-ra, majd 30°-os szögre (13. ábra). Ezen felül a modell is pontosításra szorult, hogy az alsó ív jobban kapcsolódjon a rácsos tartó alsó pontjaihoz.



13. ábra: Kis boltíves födém numerikus szimuláció és kísérlet

5.1.3. „Széles" födém

A széles födém modell volt a legnagyobb méretű, amit a kísérletek során nyomtattam, ugyanis itt a boltív által áthidalandó távolság 2000 mm volt (14. ábra). A nyomtatás sikeresnek tekinthető ugyanis a szimulált 20 mm-es elmozduláshoz tartozó összeomlási rétegszám 26, míg a valós tönkremenetelhez tartozó 24 réteg volt.



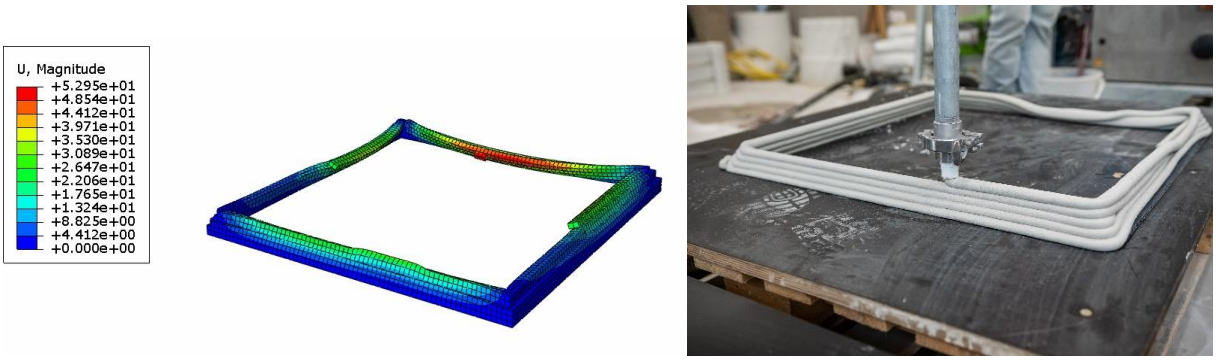
14. ábra: Széles födém numerikus szimuláció

Ezzel szemben beigazolódott, hogy a jelenlegi anyagtulajdonságokkal nem lehet megfelelő állékonyságot biztosítani a külpontosan épülő rétegekhez. Továbbá a szintén fontos tapasztalat volt, hogy a rácsos tartó jellegű kialakítás miatt a horizontális részeken hamar elérte az anyag teherbírási képessége határát (15. ábra) és fokozatosan kívülről a boltív csúcspontja felé haladva leomlott.

15. ábra: Széles födém kísérleti nyomtatás

5.1.4. „Nagy” piramis modell

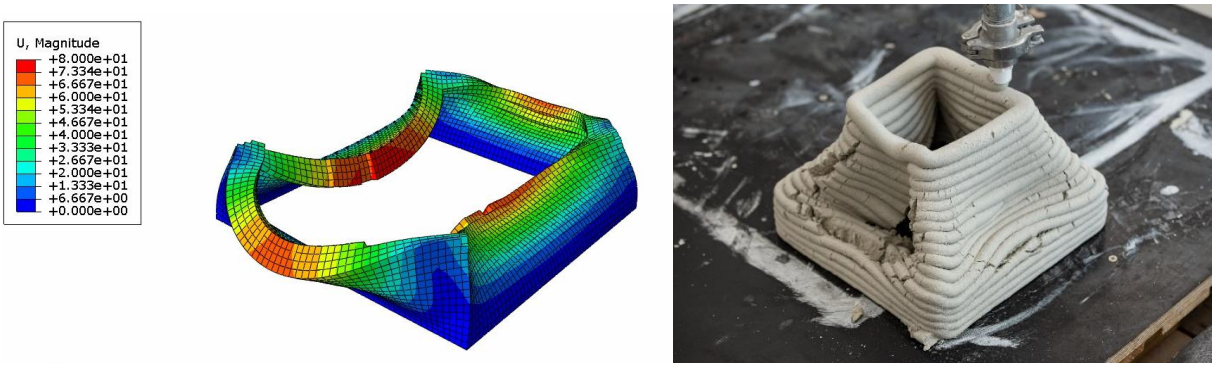
A nagy piramis modell esetében egy 690 mm élhosszúságú, négyzet alapú mintát határoztam meg alapnak. Minden réteg 5 mm eltolással került nyomtatásra az előzőhöz képest, így épült volna fel piramis alakban a nyomtatás. Viszonylag hamar, már a 4. réteg nyomtatásakor tönkrement az anyag a modell az egyik éle mentén, majd az 5. réteg közben pedig mind a négy él mentén, pontosan úgy, ahogy azt a szimulációban is látni (16. ábra). Ebben az esetben tehát egyezett a szimulált és a valós építhetőség.



16. ábra: Nagy piramis numerikus szimuláció és kísérlet

5.1.5. „Kis” piramis modell

Mivel a nagyobb téglalap alapú modell néhány réteg után elvesztette stabilitását és összedőlt, ezért egy jóval kisebb modellt is megvizsgáltam, amelynek alap élhosszúsága 260 mm volt. Itt a szimuláció alapján 5 rétegből álló függőleges szakaszt követően, amint a következő, 5 mm-rel eltolt réteg rákerült volna, szintén a stabilitásvesztés miatt egy elasztikus deformáció következtében kialakuló rugalmas tönkremenetel alakult ki, éppen úgy, ahogy a nagyobb piramis esetében.



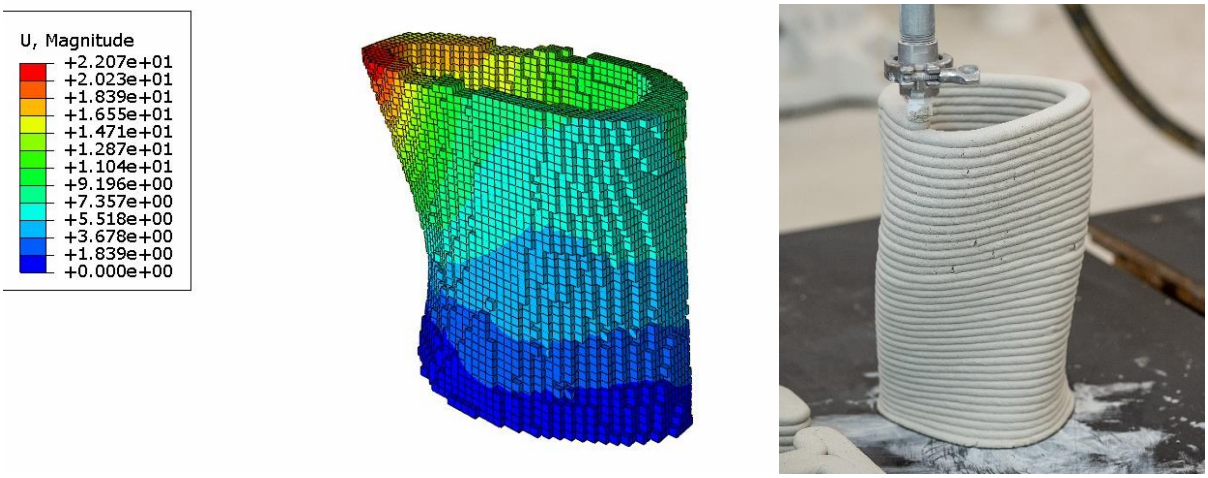
17. ábra: Kis piramis numerikus szimuláció és kísérlet

Ebben az esetben a valós nyomtatás nagy eltérést mutatott pozitív irányba a szimulálthoz képest, ugyanis a 40-50 mm-es deformációk ellenére sem fordult ki annyira a réteg, hogy összedőljön a teljes struktúra (17. ábra). Ehelyett - ahogy a képen is látható - a sarkok merevítő hatása miatt csak néhány réteggel a teljes modell vége előtt szűnt meg az anyagfolytonosság.

5.1.6. Váza

A váza esetében egy igen részletes, 5 mm élhosszúságú voxeleket tartalmazó modellt tudtam generálni, ami még nem igényelt túl hosszú számítási időt és nagy gépigényt. A váza modellnél még a rövid, átlagosan 9 mp-es rétegidő ellenére is a valós nyomtatás során 25

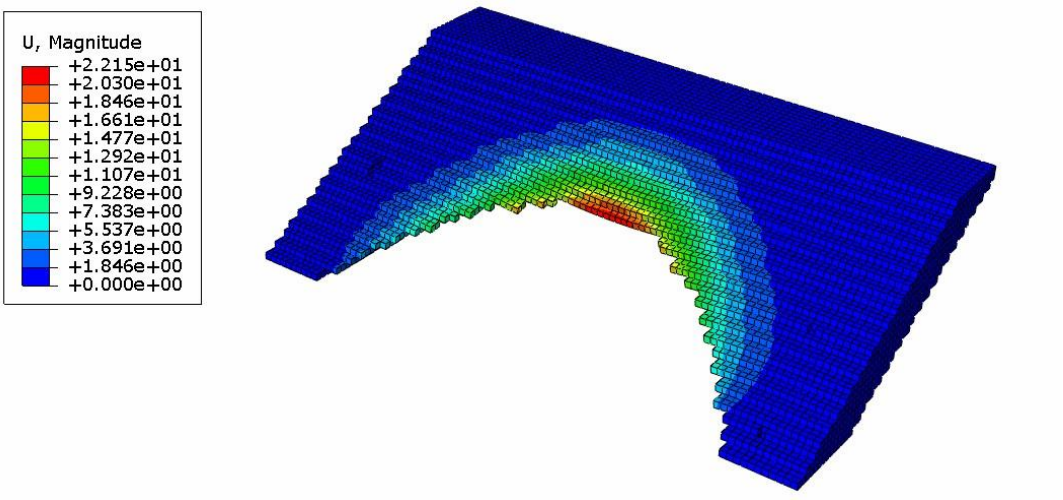
réteggel tovább bírta az anyag összeomlás nélkül, mint a szimulációban. Ez valószínűleg a szimulált értékeknél jobb konzisztenciának, valamint esetlegesen a tervezettnél lassabb nyomtatásnak köszönhető, ugyanis azonos anyagáramlás mellett valamivel szélesebb rétegek alakulhattak ki. Látható volt, hogy a tönkremenetel során az alsóbb rétegek elérték a folyáshatárt és nem tudtak több erőt felvenni nagyobb alakváltozás nélkül (18. ábra).



18. ábra: Váza numerikus szimuláció és kísérlet

5.1.7. Teljesen kitöltött keresztmetszetű födém

Ennél a modellnél kifejezetten a boltíves részre fókuszálva végeztem a nyomtatást, így az alsó megtámasztó rész elmozdulásainak kiküszöbölésével már a második réteg befejezésekor volt olyan rész, ami nem támaszkodott fel az előzőre teljesen. Itt a korábbiakhoz képest nem üreges födémszakaszt vizsgáltam, ugyanis a teljesen kitöltött födém esetén lényegesen megnő egy réteg nyomtatási úthossza, vagyis a szilárduláshoz rendelkezésre álló idő is (19. ábra). Ennek megfelelően azonos rétegidővel rendelkező nyomtatási képet hoztam létre, ami ebben az esetben 4 perc 42 mp volt.



19. ábra: Teljesen kitöltött födém numerikus szimuláció

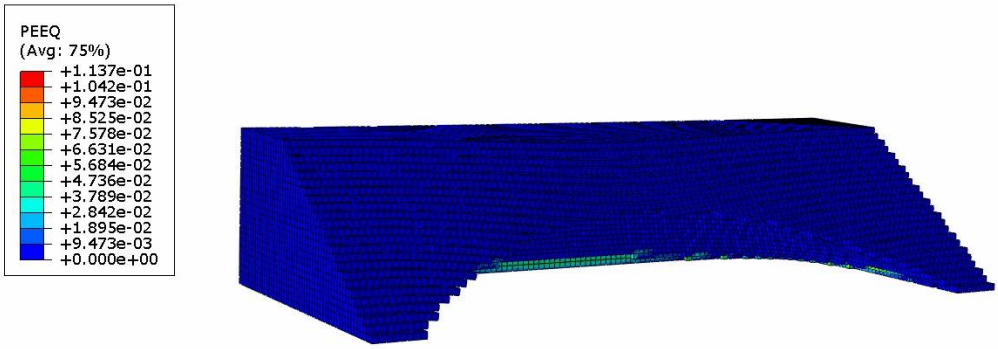
A fenti ábrán a numerikus szimuláció alapján a nyomtatás közbeni állapot elmozdulás (U) értékei láthatóak a 20 mm-es kritérium értéknél. Az alsó ábrán pedig a valós nyomtatás pillanatképe látható, amint a boltív tetején lévő kb. 5 cm magas, 20 széles sáv leválik húzási igénybevétel hatására. Ez a tönkremeneteli mód megegyezik a szimuláció által előre jelzett típussal (20. ábra).

20. ábra: Teljesen kitöltött födém kísérlet

Az eredmények tekintetében nem tudtam meghatározni mintázatot az eltérésekben. A modellek léptékét és túlnyúlást tekintve, azt figyelhetjük meg, hogy ugyanúgy túlbecsülte a szimuláció a „kis” piramis esetében, mint a váza modellnél, pedig a piramis alakú modellnél nagyobb túlnyúlás volt, míg a váza közel kétszer akkora befoglaló méretekkel rendelkezett. Hasonlóképpen alábecsülte a kis léptékű kónuszt, mint a lényegesen nagyobb teli födémet. A jelenleg vizsgált beállításokkal a szimuláció jelentős szórással rendelkezik, a 20 mm-es elmozdulási kritériumot tekintve az eltérések átlaga azonban mindössze 1 %, ha figyelembe

vesszük az eltérés jellegét is (túl- vagy alulbecsült érték). Azonban érdemesebb ilyenkor az abszolút értéket tekinteni, ami **34 %**. Ez szinte azonos azzal az értékkel, amit Khan et al. által írt 2023-as tanulmányban határoztak meg. Ők 29-32 % -os eltérést tapasztaltak a kísérleti és a szimulált értékek között. Feltételezhető, hogy modellenként eltérő az tönkremenetelhez tartozó elmozdulási érték, amit szintén figyelembe lehet venni a deformációk aktív monitorozásával nyomatás közben így pontosítható a teljes folyamat. A nagy szórás miatt tehát fontos nagyobb számú strukturált vizsgálatot végezni a továbbiakban.

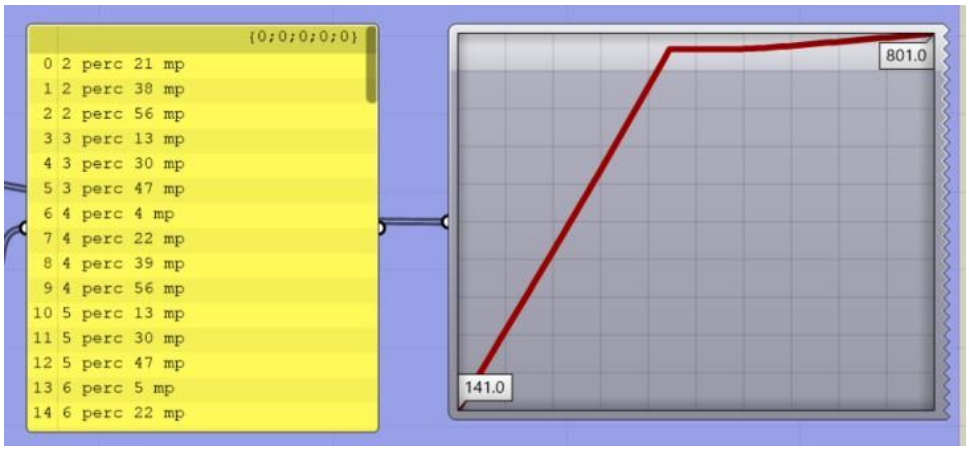
A tönkremeneteli módot egyértelműen meg lehetett határozni a PEEQ, azaz az *Equivalent plastic strain* ábrázolásával. Az alábbi ábrán jól látható, hogy a vizsgált modell esetében az alsóbb rétegek érik el először a folyáshatárt, így képlékeny állapotába kerülnek, ami végső soron nagy deformációk hatására külpontosságot előidézve a nyomtatott elem tönkremenetelét okozza (21. ábra).



21. ábra: Plasztikus alakváltozások vizsgálata

5.2. Rétegidők vizsgálata

A numerikus szimulációk mellett vizsgáltam továbbá, hogy milyen összefüggés van a rétegidők és a nyomtatás közbeni állékonyság között. A rétegidő megadja, hogy mennyi idő telik el egy adott réteg adott pontjának nyomtatása és a ránehezedő réteg azonos pontjának nyomtatása között. Ezt lehet úgy is definiálni, hogy meddig marad terheletlen egy adott pont extrudálás után. Lényegesnek tartom, hogy a jelenlegi anyagtulajdonságok esetén is kimutatható legyen, hogy inkább a geometriának vagy pedig a szilárdulási képességnek van nagyobb hatása az állékonyságra. Az alábbi ábrán megfigyelhetjük a födémnyomtatások során jellemző rétegidő-görbét, amely egy közel egyenletes felfutási szakasz követően kvázi konstans marad az állandó keresztmetszetnek köszönhetően (22. ábra).



22. ábra: Rétegidő változása a nyomtatás során

Az is kiszámolható, hogy kizárólag nyomás esetén mennyi időnek kellene eltelnie, hogy ne haladja meg a teherbírás növekedést az igénybevétel növekedése. Egységnyi hossz (1 mm) esetén például a SIKA anyag esetén mért 2200 kg/m^3 testsűrűséggel számolva, azonos rétegszélesség esetén ez az érték:

$$t\,[min] = \frac{r_m \cdot g \cdot \rho \cdot 10^{-6} - c_{konst}}{c_{vált}} = \frac{(20 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 2{,}2 * 10^{-6}) - 0{,}004}{0{,}00003} = 7{,}2\ perc$$

Ezek alapján csak a függőleges terhek viseléséhez szükséges minimális rétegidő 7,2 perc lenne, ami többtengelyű terhelés esetén tovább növekszik. Ez a későbbiekben taglalt továbbfejlesztett anyag esetében több, mint egy nagyságrenddel kisebb.

Födémszerkezeteknél kiemelném a rétegidő fontosságát, ugyanis vizsgáltam olyan méretű modellt is, ahol az áltagos rétegidő a valóságban 25 perc lenne. Fontos megfelelően beállítani és megmérni az anyag kötésidejét, mert minden receptúra rendelkezik egy *open time* időértékkel, amíg képes monolit módon hozzákötni a nyomtatott réteg az előzőhöz. A legtöbb, épület léptékű nyomtatás esetén az *open time* általában 20-40 perc, attól függően, hogy milyen hosszú pumparendszert alkalmazunk, amint keresztül eljuttatjuk a fejbe az anyagot.

5.3. Födémszerkezet nyomathatósági vizsgálata numerikus alapon

Mivel alapvetően megvalósíthatósági vizsgálatot végzek, elsődlegesen az automatizált folyamat megtartása és elősegítése a célom. Ennek megfelelően igen hosszú, nyomtatási idők is kialakulhatnak egyes modelleknél, ami a nyomtatott anyag ismeretében felülvizsgálatot igényel.

A vizsgált födémek megtámasztását úgy alakítottam ki, hogy három él mentén megtámasztott szerkezetként viselkedjenek, így nagyobb áthidalandó fesztáv esetén nagyobb igénybevételek keletkeznek és egyre inkább konzolos elemként viselkedik vizsgált elem a nyomtatás előrehaladtával, viszont ezzel szemben – a kitöltő mintázattól függően eltérő mértékben - a nyomtatási útvonalhossz is növekszik, így egyre több ideje lesz kötni az anyagnak, mielőtt a következő réteg rákerülne.

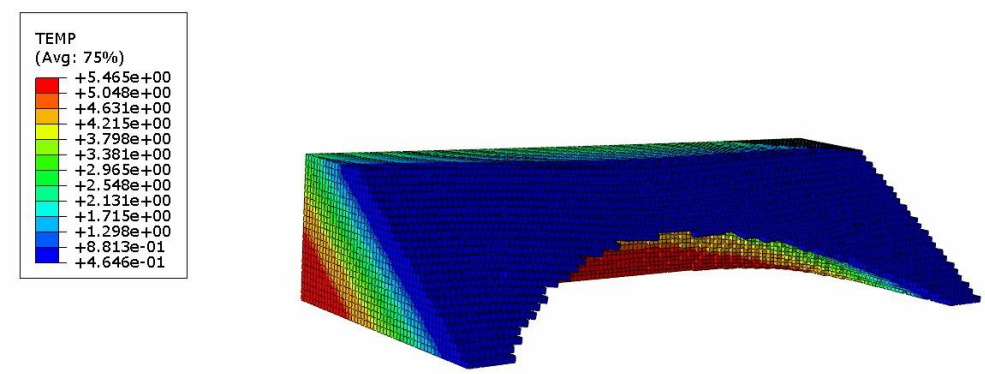
5.3.1. Vizsgált paraméterek

A parametrikus tervezés során kiemeltem öt olyan paramétert, ami leginkább meghatározza a geometriát modellt. Ezek a következők (III. Melléklet):

- **Födémmagasság:** elsősorban a végállapotban történő terhelés miatt nyomó igénybevételekre tervezett födém esetén minél nagyobb födémmagasság annál könnyebben biztosítható a boltíves átterhelés.
- **Boltív szélesség:** ebben az esetben megegyezik a szabad mezőszélességgel, így a rétegidő és az igénybevételek növekedésének egymásra hatását hivatott szemléltetni.
- **Boltív arány:** a boltív ívhosszának és a boltív szélességének aránya, azt feltételezve, hogy kedvezőbb erőjáték alakulhat ki nagyobb aránynál a mezőközépen lévő, kevésbé kihasznált részek csökkentésével.
- **Nyomtatási dőlésszög:** nem síkbeli nyomtatás esetén a szeletelési sík vízszintessel bezárt szögét mutatja meg, és feltehetően modellfüggő, hogy milyen dőlésszögben érdemes nyomtatni a jobb állékonyság érdekében.
- **Kitöltési minta sűrűsége:** talán az egyik legnagyobb szerepe van a rétegidő szempontjából, ugyanis képes a teljes nyomtatási időt is nagyságrendekkel befolyásolni; sűrűbb kiosztás esetén nagyobb stabilitás várható, ugyanakkor a nagyobb felhasznált anyagmennyiség miatt kevésbé gazdaságos szerkezet és nagyobb önsúly is adódik mellé.

A numerikus szimuláció során alkalmazott voxelek méretének szintén meghatározó szerepe van. Minél kisebbek, annál hosszabb ideig tart a számítási folyamat, viszont annál részletesebb is lesz. Nagyobb elemekkel történő modellezést a biztonság javára történő közelítésnek lehet tekinteni – ugyanez igaz a lépések (*step*-ek) számára is -, mert már korábbi fázisban megjelennek a képlékeny alakváltozások és rövid idő alatt kaphatunk visszajelzést arról, hogy az elképzelt modell nyomtatható-e ilyen formában.

Ezután minden paraméter esetében meghatároztam három alapértéket, hogy vizsgálható legyen a tendencia és kiderüljön, melyik paraméter változtatásával érthető el a legnagyobb pozitív irányú változás nyomtathatóság szempontjából. A szimulációban a voxelek sorrendjének meghatározásakor figyelembe vettem, hogy az anyaglerakás nem horizontális síkok mentén történik, hanem bizonyos dőlésszög mentén, általában 30-45°-os szög között. Így az egyes voxelek felépítési sorrendjét idejét egy adott, elforgatott síkhoz viszonyítva határoztam meg az alábbi ábra alapján (23. ábra).



23. ábra: A rétegek nyomtatása óta eltelt idő vizsgálata

5.3.2. Numerikus szimulációk

Mivel ebben az esetben nem csak a teljes modell tönkremenetele volt mérvadó, hanem egyéb paraméterek is, így a jelenlegi vizsgálatban 200 mm-es elmozdulásoknál állítottam le a szimulációt. Ezen szimulációk során elsődlegesen a 200 mm-es abszolút elmozdulás esetén az addig a pillanatig eltelt abszolút időt (*Total Time*) vizsgáltam, összesen 15 különböző modell esetében. Mivel a födémhossz állandó, 2200 mm volt, így a szimulációban az eltelt idő nagysága egyenesen arányos a megvalósult rétegek számával is, amit így számszerűsíteni tudtam. Ebben az esetben a teljes eltelt idő - a modell input fájlban rögzített beállításai alapján - egyenlő a virtuálisan kinyomtatott modell arányával, ugyanis a szoftver 1 lépéshez rendel 1 időegységet.

A kutatásom későbbi részében lesz fontos az, hogy a korábban felvett 20 mm helyett itt 200 mm-es elmozdulás esetén is vizsgáltam a modelleket és a feszültségeket, ugyanis az ekkor keletkező igénybevételt lehet a kohézió célértékének tekinteni nyomtatott anyag továbbfejlesztésekor. A szimulációk során minden modelltípus esetén az útvonal szélesség paramétert 15 mm-ben határoztam meg. Ennek eredményeként nem csak azok a voxelek kerülnek bele a szimulációs modellbe, amelyeken közvetlenül áthalad a nyomtatási útvonal,

hanem a 15 mm-es sugarú környezetében lévők is. Ezzel kompenzálható a különböző irányultságú útvonalszakaszok eltérése, mivel ez a paraméter mindhárom tengely irányában ennyivel növeli meg az útvonal virtuális kiterjedését.

A lépések számát úgy határoztam meg, hogy a teljes modellt 20 lépésben építette fel a szoftver. Ez alól csak a tendenciák ismeretében meghatározott, nagy födémmodell képez kivételt, aminél a részletesebb számítás miatt volt szükség több lépésre.

A födémkitöltés hatásának elemzése során a többi szimulációnál minimálisan kisebb, 20 mm-es élhosszúságú voxeleket alkalmaztam, de az eredményekben nem volt szignifikáns eltérés, mert a kitöltő nyomtatott sávok között kis üres rész volt csak, ami kevesebb, mint egy voxel távolságot jelent. Ebből kiindulva érdemes tovább finomítani a hálót és kisebb elemekkel is megvizsgálni az állékonyságot, amennyiben limit nélküli elemszám kezelésére is alkalmas licencet használunk.

A III. Mellékletben találhatók az egyes modellek paramétereinek pontos beállítása, illetve az igénybevételeket is feltüntettem két különböző időpillanatban. Ezek alapján megállapítható, hogy a födémmagasság növelésével javul az átboltozódási képesség, és a megfigyelhető tendencia szerint több réteget lehet nyomtatni magasabb födém esetén, ugyanis csökken az abszolút elmozdulás. A kísérletek, valamint a szimulációk során is bebizonyosodott, hogy nemcsak a kész szerkezeti, hanem az építés közbeni állapotban is előnyösebb vastagabb födémszerkezet kialakítása.

A boltív szélességnél nem határozható meg egyértelműen tendencia, ezért feltételezem, hogy kisebb modellek esetén a kedvezőbb erőjáték miatt maradt állékony a modell, míg a szélesség növelésével nő az igénybevétel is, keresztirányban viszont nem tud átboltozódni az önsúlyból keletkező erő sem. Ugyanakkor a megnövekedett rétegidő miatt a 200 mm-es elmozdulás esetében az 5 m széles födémmodell teljesített jobban.

A várakozásokkal ellentétes eredmény volt, hogy a kisebb boltív arány kisebb elmozdulásokat eredményezett, ezáltal pedig az a modell maradt tovább állékony, amely a legkisebb boltív aránnyal rendelkezett.

Hasonlóan érdekes eredmény, hogy 45°-os nyomtatási sík mellett kisebbek voltak a deformációk, mint a 35°-os vagy 25°-os nyomtatási sík mellett. Végül a kitöltés arányát tekintve a ritkább esetben nem tudták egymást megtámasztani a rácsos tartók, így stabilitásvesztés következett be és kiborultak. Ennek megfelelően a rácsos tartós kitöltés

helyett érdemesebb teli kitöltésben gondolkozni, vagy dupla réteg nyomtatásával csökkenteni az kihajlást és az instabilitást.

5.4. Anyagkísérletek

Mivel a szimulációk és a valós kísérletek alapján nem volt olyan modell, amit teljes egészében ki tudtam volna nyomtatni, ezért a jelenlegi SIKACrete 751 3D anyagot felhasználva szerettem volna olyan receptúrát összeállítani, ami képes teljesíteni a magas kezdeti szilárdsági követelményeket. Ennek megfelelően jelen kutatásban azt feltételeztem, hogy az anyagfejlesztésekkel olyan tulajdonságokkal rendelkező nyomtatható keverék is előállítható, ami gyorsabb megvalósítást tesz lehetővé. Ehhez - a fejlesztési idő redukálása érdekében - egy teljesen új receptúra helyett a meglévő szárazanyaghoz adagoltam por alapú kötésgyorsítót és folyósítószert a kívánt konzisztencia és kötés eléréséig. Korábbi kutatásaimnak köszönhetően saját adattal rendelkeztem a SIKA anyag frissbeton paramétereit tekintve, így ehhez tudtam hasonlítani a továbbfejlesztett anyagot. Az alábbi táblázatban található minden vizsgált keverék esetén az adagolási arány. A víztartalmat a szárazanyag tömegére vonatkoztatva 16 %-ban határoztam meg a korábban mért értékekkel való összehasonlíthatóság érdekében (1. Táblázat).

1. Táblázat: Anyagkísérletek során alkalmazott receptúrák

	Megnevezés	Adagolás [g]				
		1.	2.	3.	4.	5.
1.	SIKACrete 751 3D	1000	1000	1000	1000	1000
2.	Víz	160	160	160	160	160
3.	SIKA Sigunit-39 AF	6,0	12,0	18,0	18,0	21,0
4.	SIKA ViscoCrete-225 P	0,0	0,0	1,0	1,5	2,0

A fenti receptúrákat terülésméréssel, valamint Vicat-készülék segítségével is vizsgáltam, hogy a nyomtatási kritériumoknak – pumpálhatóság, extrudálhatóság, építhetőség - megfelelő konzisztenciát és kötésidőt tudjak beállítani. Az alábbi táblázatban az egyes receptúrákhoz tartozó - szabványos habarcsok esetén alkalmazott - terülésvizsgálattal, valamint ugyanazon a kónusz formájú próbatesten roskadásvizsgálattal számszerűen is kimutatható konzisztencia változást mértem. A 2. receptúra esetén az anyag láthatóan túl száraz és darabos, inhomogén maradt még hosszabb keverés után is, a 3. esetében pedig túl

képlékeny, folyós állagú lett, így a tapasztalatok, valamint a mért paraméterek alapján az 5. receptúra felelt meg leginkább a nyomtathatósági követelményeknek (2. Táblázat).

2. Táblázat: Anyagkísérletek során mért tulajdonságok

	Idő	1.	2.	3.	4.	5.
Roskadás [mm]	10	43	59	48	39	-
	20	52	-	-	53	56
	30	58	-	-	54	-
Terülés [mm]	10	115	100	111	122	-
	20	102	-	-	107	104
	30	100	-	-	106	-

A vizsgálatok esetében a nulla időpillanatot a keverés végétől mértem, ahogy azt az ilyen jellegű vizsgálatoknál a szakirodalomban is jelölik. A mérések során legjobban teljesítő, 5-ös számú receptúrát minimálisan módosítottam, és az alábbi receptúrát alkalmazva egytengelyű nyomásvizsgálatokat is végezetem a próbatesteken.

A vizsgált összetételű keverék (6. receptúra) esetében valamennyivel több vizet és kevesebb folyósítószert alkalmaztam az 5. receptúrához képest. Ugyan a víz-cement tényező így magasabb lett, azonban korai szilárdságra tervezve a kötésgyorsító abszorbens tulajdonságát is figyelembe vettem. Ennek megfelelően ahogy a SIKA Sigunit-39 AF kötésgyorsító leírásában is szerepel, elősegítve az állékonyságot valamennyi vizet von el, így a dinamikus hatás megszűnése után a gyors konzisztenciacsökkenést eredményez. Ebben az esetben **17 %** víztartalom mellett kilogrammonként **1,5 g** folyósítószert és **21 g** kötésgyorsítót adagoltam a keverékhez az alábbi táblázatnak megfelelően (3. Táblázat).

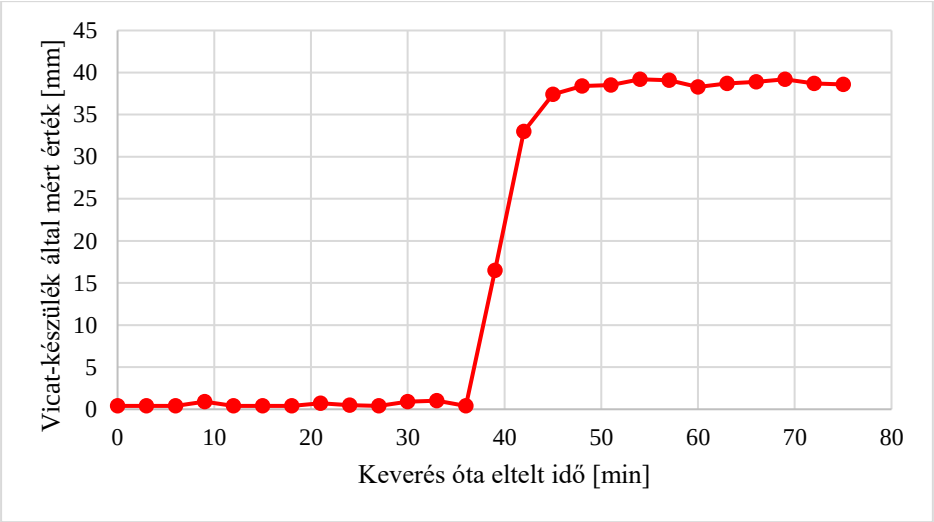
3. Táblázat: Anyagkísérletek során legjobbnak bizonyult receptúra

	Megnevezés	Adagolás [g]	Tömegarány	Névleges testsűrűség [kg/m^3]	Összetevők fajlagos tömege [kg/m^3]
1.	SIKACrete 751 3D	3000	83,9%	2140	1795
2.	Víz	510	14,3%	1000	143
3.	SIKA Sigunit-39 AF	63,0	1,8%	950	17
4.	SIKA ViscoCrete-225 P	4,5	0,1%	600	1
	Összesen	3578			**1955**

24. ábra: A 6. receptúra keverés és nyomóvizsgálat közben.

A nyomtatott betonnal szemben a lőttbetonhoz hasonló követelményeket támasztunk extrudálás utáni állapotban, azaz legyen kellően állékony és bírja el a ránehezedő további rétegek súlyát lényeges alakváltozás (lőttbeton esetén visszahullás) nélkül, a legjobb ilyen esetben az anyag ún. *zero slump material*, amely nem roskad az önsúlyától. Ennek megfelelően a szakirodalomban is hasonló mérési eljárásokkal vizsgálják a korai mechanikai paramétereket (24. ábra).

A kötésidő meghatározását Vicat-készülék segítségével mértem, amit általában cementpépek esetén alkalmaznak. A szabványos tömegű tű behatolási mélységét mutatja a készülék inverz módon a minta alá helyezett üveglaptól úgy, hogy a minta magassága 40 mm. A kötés kezdetének azt az időpontot tekintjük, amikor már a Vicat-tű 3-5 mm magasságban megáll a mintában és nem ér az üveglaphoz, a kötés végének pedig a maximum 1 mm-es behatolási mélységet vesszük.



25. ábra: Vicat készülékkel történő mérési eredmények

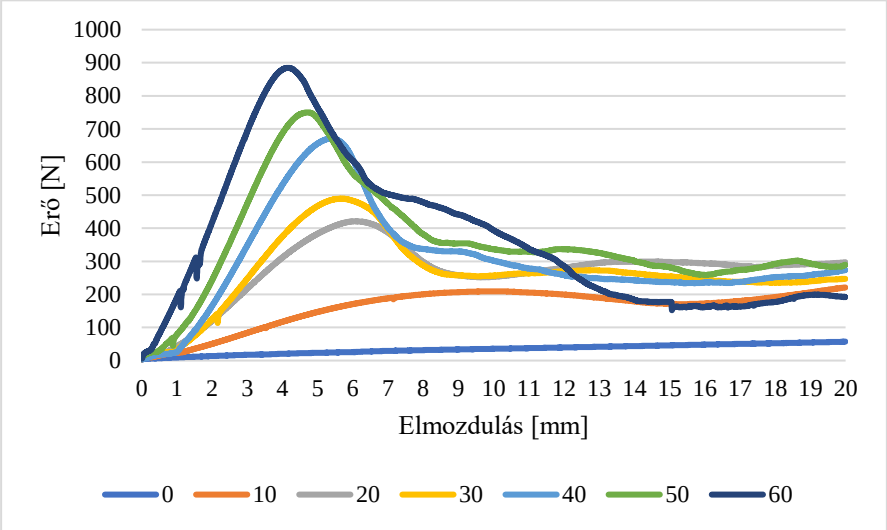
A 25. ábrán a Vicat-készülék által mért értékek láthatóak 3 perces gyakorisággal mérve, amely alapján egyértelműen megállapítható, hogy a kötés 37 perccel a keverés kezdete után kezdődött és nagyon gyorsan, 8 perc alatt le is zajlott, azaz 45 percnél figyelhető meg a vége. Ebből arra következtethetünk, hogy a kötésgyorsító és a folyósítószer (esetlegesen további adalékszerek) megfelelő arányával jól időzíthető a kötési folyamat. Így akár nagyobb, keretes rendszerű betonnyomtatókhoz is igazítható, ahol hosszabb időt tölt el a keverék a pumparendszerben, mint a robotkaros berendezés esetében.

Korábbi Tanszéki kutatás során Vicat-készülék segítségével 3,5 órában határozták meg a kötésidő végét SIKACrete 751 3D szárazkeveréket használva, 15 % víztartalom mellett a szárazanyag tömegére vonatkoztatva. Ezek alapján jelentősen sikerült javítani a kötésidőn és felgyorsítani a folyamatot.

26. ábra: Egytengelyű nyomóvizsgálat

A nyomóvizsgálatok alapján (26. ábra) az alábbi erő-elmozdulás görbéket tudtam kirajzolni, melyek lényegesen meghaladják az adalékszerek nélküli szilárdsági tulajdonságokat. Azonos vizsgálati módszerrel mérve, 16 %-os vízadagolás mellett, 30 perces

korban 53 N, míg 60 perces korban a normál SIKA anyag 123 N maximális erőt vett fel. Ezzel szemben a továbbfejlesztett anyag azonos idő elteltével ennek közel 8-szorosát, 885 N-t erőt viselt el (V. melléklet). Látható, hogy jelentős a teherbírás növekedés kiegészítő adalékszerek alkalmazásával (27. ábra).



27. ábra: Elmozdulás-erő diagram a 6. receptúra anyagával mérve

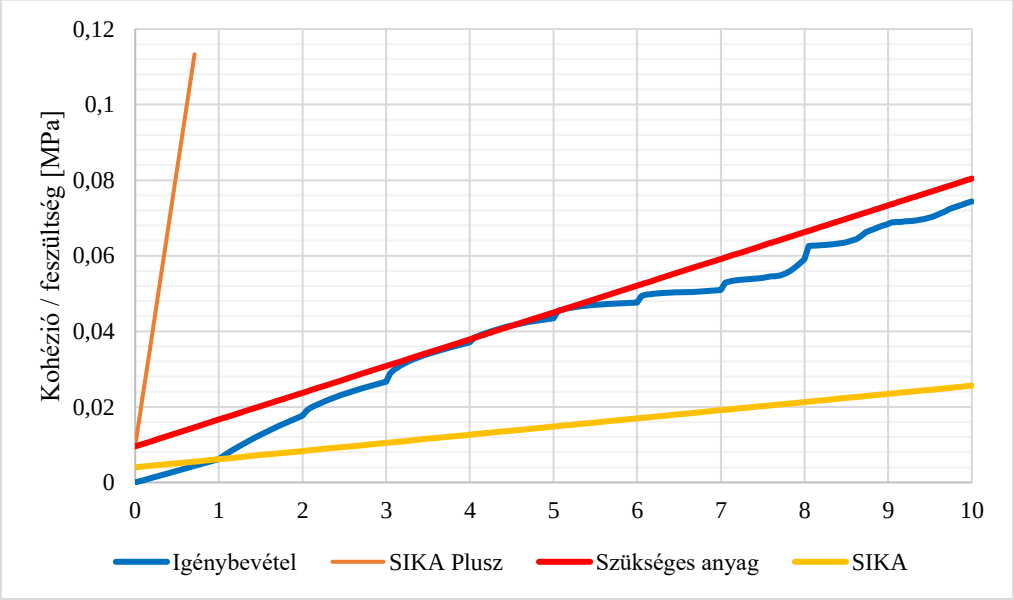
A nyomtatott anyag numerikus szimulációja során az anyag teherbírását két főbb paraméter jellemzi, melyek közül a rugalmassági modulust közvetlenül a nyomóvizsgálatból határoztam meg 3%-os elmozdulásnál. A kohézió értékét pedig jelen esetben közvetett módon becsültem Wolf et al. által meghatározott aránypár segítségével. Ők kutatásukkal igazolták, hogy a nyírószilárdsági értékből következő kohézió értéke az idő előrehaladtával a nyomószilárdsággal arányosan változik. Ugyanilyen szilárdság-növekedési arányt feltételezve és visszavezetve becsültem a kohéziós értékeket a IV. mellékletben található táblázatnak megfelelően. Mivel ez nem direkt mérési eredmény, csak közelítő érték, ezért ezt további vizsgálatokkal szükséges alátámasztani a későbbi kutatások során. Ilyen lehet például a nyírófeszültség – és ezáltal a kohézió - meghatározására alkalmas közvetlen nyíróvizsgálat (*Direct Shear Test*).

Az alábbi táblázatban foglaltam össze a mért értékek alapján számított, időben változó paraméterértékeket, összehasonlítva a szakirodalomban megtalálható értékekkel (4. Táblázat).

4. Táblázat: Rugalmassági modulus és kohézió értékek összehasonlítása

	Receptúra	Változó [t[min]]	Konstans
E [MPa]	SIKACrete 751 3D	0,003200 × t	0,048
	Wolf et al.	0,001200 × t	0,078
	Továbbfejlesztett SIKA	0,079620 × t	0,122
c [MPa]	SIKACrete 751 3D	0,000030 × t	0,004
	Wolf et al.	0,000058 × t	0,003
	Továbbfejlesztett SIKA	0,002028 × t	0,010

A szimuláció eredményeként az is meghatározható, hogy melyik csomóponton keletkezik a legnagyobb igénybevétel, melyik időpillanatban. Ennek segítségével gazdaságosan lehet optimalizálni az adalékszer felhasználást és az adott geometria megvalósításához éppen szükséges rugalmassági modulust és kohéziót elérni.



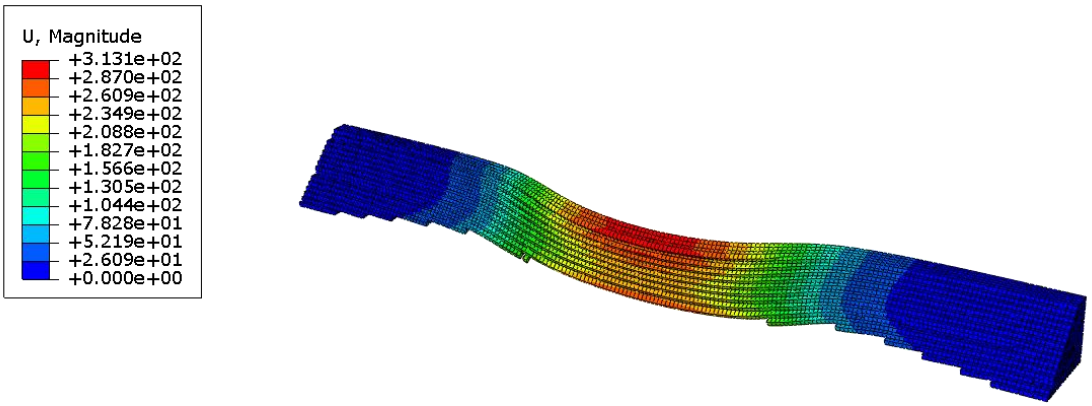
28. ábra: Kohézió és teherbírás értékek összehasonlítása

Az ABAQUS végeselem szimuláció segítségével meghatároztam a teljesen kitöltött keresztmetszetű födémmodell azon csomópontját, amelyen a legnagyobb egyenfeszültség (Mises) keletkezik. Ezt követően ezen csomópont igénybevételét meghatároztam az abszolút idő függvényében (*Total Time*). A diszkrét adatpontokra lineáris regressziót illesztettem, majd a feszültség tengely mentén eltoltam annyival, hogy a teherbírás (kohézió) minden pontban meghaladja az igénybevétel nagyságát. Így pontosan meg lehet határozni a teljes modell nyomtatásához szükséges anyagparamétereket (28. ábra). Ebben az esetben ez a **c [MPa] = 0,00522 × t + 0,09546**. Ezzel a módszerrel egy igen nagy kezdeti kohézióval rendelkező anyagot feltételezünk, azonban teljesíthető a nyomtatás kisebb konstans értékkel, gyorsabban emelkedő kohézióval is.

Az ábráról leolvasható, hogy a normál SIKA anyag teherbírása már az első *step* után kimerül, és összeomlik az anyag. Ez egybevág azzal, amit a nyomtatás során is tapasztaltam. A diagramon ábrázoltam még az adalékszerekkel továbbfejlesztett SIKA anyagot is, amely jól látható módon kezdettől fogva magasan a kívánt küszöbérték felett teljesít. Így várhatóan a kohézió tekintetében nem haladja meg a geometria az anyag teherbírását és csak a rugalmassági modulustól függő alakváltozások okozhatnak tönkremenetelt, ha minden más tényező ideális. Kutatásom folytatásaként a fenti értékek, valamint a szimuláció pontosítása is a céljaim között szerepel.

5.5. A nyomtatható födém

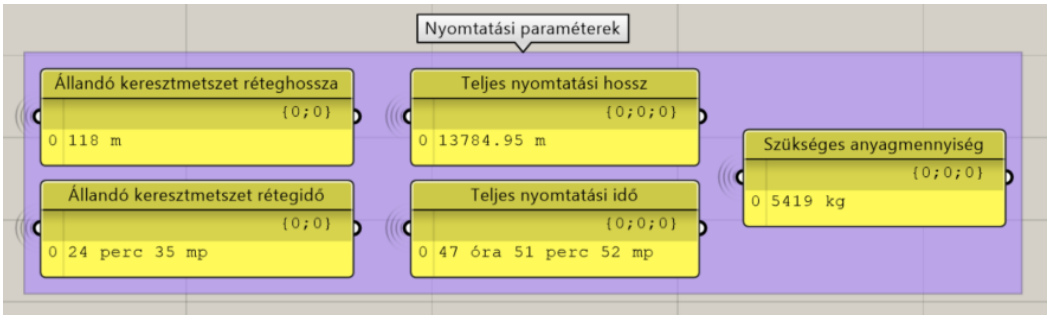
A numerikus szimulációk és az anyagkísérletek eredményeinek ismeretében - a tendenciáknak megfelelően - egy olyan modellt generáltam, ami potenciálisan a legalkalmasabb födémnyomtatásra, és nagyobb léptékű. A VII. mellékletben foglaltam össze a szimulációs eredmények alapján optimált födémszerkezet paramétereit. Ezt követően a modellt lefuttattam a többi futtatásnál kisebb voxelmérettel, (jelen esetben sűrűbb végeselem hálóval) a pontosabb eredmény érdekében. Így a maximálisan 250.000 csomópont futtatását biztosító egyetemi licencet igyekeztem minél jobban kihasználni és ehhez közeli csomópontszámmal dolgozni. Ezen felül a pontosság érdekében a lépések számát is megemeltem 30-ra (29. ábra).



29. ábra: Legnagyobb modell szimuláció

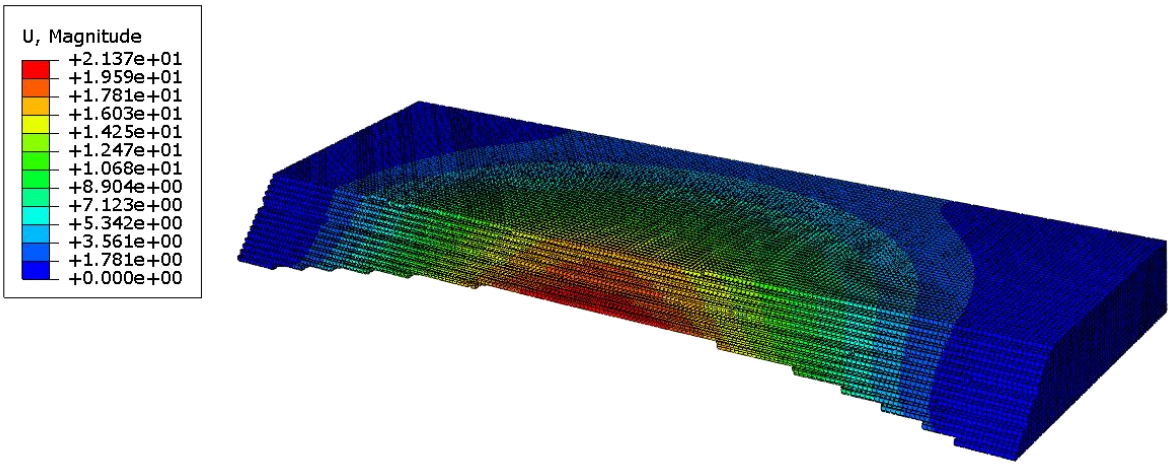
Fontos megjegyezni, hogy a továbbfejlesztett receptúra a termék adatlapok alapján számolt testsűrűsége 1955 kg/m^3 volt, ami kisebb, mint a szimulált érték, azonban a 2200 kg/m^3-es értékkel szerettem volna ugyanazon terhelés mellett megvizsgálni az elmozdulásokat

az összehasonlítás érdekében. Ilyen módon a teljes lefedett szabad mezőméret 2000 × 5000 mm.



30. ábra: Teljes nyomtatás paraméterei

A 30. ábrán láthatóak a teljes nyomtatásra vonatkozó adatok, mely alapján a valóságban 2 napot venne igénybe 80 mm/s sebességgel nyomtatva az egész modell létrehozása, azonban ez irreálisan sok lehet. Ilyen esetben érdemes nagyobb nyomtatási sebességet alkalmazni, ugyanis ahogy az a lenti ábrákon is látható, az elmozdulás itt nem haladta meg a 20 mm-t sem.



31. ábra: Legnagyobb modell szimuláció továbbfejlesztett SIKA anyaggal

Látható, hogy míg az első esetben a normál SIKA anyaggal dolgozva nagyon hamar összeomlik a modell, addig a második esetben végig állékony marad a kötésgyorsítóval továbbfejlesztett anyagtulajdonságokat használva és a szimuláció alapján a teljes födémmodell nyomtatható lenne (31. ábra).

6. Összegzés

6.1. Kutatási eredmények

A kutatás során elsősorban a horizontális szerkezetek, azon belül is alsó síkjukban boltíves kialakítású födémeket vizsgáltam parametrikus környezetben felépítve.

Az első modellek nyomtatásakor azt tapasztaltam, hogy az anyag nem a korábban feltételezett szilárdságot tudta biztosítani, hanem hosszabb idő alatt éri csak el a stabil építhetőséghez szükséges kisebb konzisztenciát. Megfigyelhető volt már kis túlnyúlások esetén is, hogy összeomlottak a nyomtatott elemek, főként a rácsos tartók instabilitásának következtében. Ezt a problémát az utolsó modellnél ki is küszöböltem és már tömör kitöltésű födémtestet nyomtattam. Ezzel a technikával újragondolt modelleket alkottam, aminek eredményeként akár egy 2 m fesztávú szerkezeten belül több, mint 60 m-es réteghosszt tudtam kialakítani.

A nyomtatási útvonalhossz növelése ellenére sem jutott tovább a nyomtatás néhány rétegnél, így kijelenthető volt, hogy az anyag nem érte el a geometriához szükséges szilárdságot. Ezután a meglévő anyag korai szilárdsági tulajdonságainak javítása érdekében végeztem vizsgálatokat, aminek eredményeként nagyságrendileg gyorsabb kötésű anyagot tudtam létrehozni, a kezdeti magasabb konzisztenciát megtartva. A kísérletek során meghatározott kötésidő, nyomószilárdsági értékek alapján rugalmassági modulust és kohéziót számoltam, majd a legnagyobb méretű modellt újrafuttattam a továbbfejlesztett anyagtulajdonságokkal. Végül a szimuláció eredményeként egy 5 × 2 m-es födémszerkezet nyomtatását szimuláltam sikeresen, 20 mm-nél kisebb elmozdulásokkal.

6.2. Hatáselemzés – kiértékelés, elért eredmények kontextusba helyezése

Egyelőre az adatok többségét manuálisan tudtam kiértékelni, azonban a továbbiakban nagy hangsúlyt szeretnék fektetni az automatizált folyamatok kidolgozására is, így egy Fortran Subroutine kóddal kiegészítve pontosabb kiértékelést kaphatunk közvetlenül az ABAQUS szoftverből.

A födémnyomtatás ipari léptékű megvalósításával nemcsak a jelenlegi 3D betonnyomtatással készülő épületek kivitelezését lehet gyorsítani, hanem olyan új szerkezeteket is létrehozhatunk *in-situ* módon, alátámasztás nélkül, amire eddig nem volt

példa. A kutatás hozzájárult, hogy megismerjük a horizontális szerkezetek 3D nyomtatásának jelenlegi korlátait, és részletesen bemutatja a megvalósíthatósághoz vezető folyamatokat is.

Az elért eredmények arra engednek következtetni, hogy megfelelő mennyiségű adat birtokában a numerikus szimuláció alkalmas eszköz a 3D betonnyomtatott szerkezetek nyomtatás közbeni állékonyságának vizsgálatára. Bár az adatok alapján igen nagy szórással rendelkezik az összeomlási rétegszám becslését tekintve, a tönkremeneteli mód az esetek túlnyomó többségében egyezett a valós nyomtatással. A deformációk pontos nyomon követesével érdemes összehasonlítani megvizsgálni már a folyamat során az eltéréseket a pontosabb szimuláció érdekében. Kisebb és nagyobb léptékű modelleket is nyomtatva nem volt megfigyelhető szabályos hiba a modell méretét tekintve. Ennek megfelelően feltételezhető, hogy a módszer jól skálázható és pontos modellezés esetén épület léptékű szerkezetek nyomatása esetén is helytálló.

6.3. A födémnyomtatásban rejlő potenciálok, további kutatási lehetőségek

A továbbiakban szeretnék egy kisebb léptékű födémmodellt nyomtatni a továbbfejlesztett anyag használatával és így igazolni egyrészről a numerikus modell helytállóságát, másrészről pedig a födémszerkezetek nyomathatóságát. Ezt követően szeretném a teljes egészében kinyomtatott elemeket töréstesztnek is alávetni, hogy igazolni tudjam az alkalmazhatóságát vasalás nélküli födémszerkezetként. Amennyiben nem felel meg ezeknek a használati követelményeknek építhetőség szempontjából egy adott modell lehetőségünk van fejleszteni a következő paraméterek valamelyikén vagy mindegyikén (Ooms et al., 2021):

- Anyagtulajdonság (anyagtípus)
- Nyomtatási beállítások (sebesség, rétegmagasság, stb.)
- Geometria (túlnyúlások)
- Vasalás elhelyezése (amennyiben eddig vasalásmentes szerkezet volt)

Mivel a numerikus szimulációval igazolható állékonyságvizsgálat skálázhatónak tekinthető, a kutatás folytatásaként szeretnék más geometriájú horizontális szerkezeteket, többek között a korábban említett potenciálisan betonnyomtatható szerkezeteket is megvizsgálni és numerikus eredményekkel alátámasztva kiértékelni a modellek erősségeit és gyengeségeit is gyakorlati példán keresztül.

A nyomtathatóság szempontjából nagy jelentősége van az elmozdulásoknak, ugyanis ha a kritikus mértéket meghaladja, összedől a modell. Azonban, ha a nyomtatni kívánt szerkezet nyomtatás közbeni deformációit pontosan előre tudjuk jelezni, akkor ezen elmozdulásokkal kompenzálva a modell geometriáját kiküszöbölhető a külpontosság és bizonyos esetekben továbbra is nyomtatható maradhat a modell. A geometria változtatása itt hasonló elven működne, mint a feszített födémek esetén, azaz a nyomtatás közben tervezett lejhajlás mértékével változtatnánk a modellen, így végül egy egyenletes felületet kaphatunk. Természetesen ezen feltevés további kutatást igényel, melyet szintén tervezek vizsgálni, többek között diplomamunkám során is. Ennek az eljárásnak az alapját képezi az eddig elvégzett kutatás.

A korai kísérletek tapasztalatait beépítve a kutatásba, a rácsos tartós szerkezetű kialakítás helyett a teli födémtest kialakításra fókuszáltam, ugyanis kisebb modellek esetében ez a legegyszerűbb módja a nyomtatási útvonal növelésének. Abban az esetben, ha a fokozott teljesítőképességű anyaggal dolgozunk, akkor vissza lehet térni az üreges felépítéshez, mert feltehetőleg így állékony marad a nyomatás során végig. Egy továbbfejlesztett anyag számos lehetőséget kínál, ugyanis így a kitöltési mintát szinte bárhogy megválaszthatjuk, ami pedig a topológiai optimálásban teljesedik ki. Köszönhetően a parametrikus környezetben történő modellgenerálásnak az eddig nyomtatott elemek, akár több paraméter egyidejű optimálásával hatékonyabbá tehetők. Ehhez segítségül szolgálnak a GenePool komponensek és a Galapagos optimalizáló a Grasshopperen belül.

A parametrikus felépítésből kiindulva, kellően nagy számú szimulációt lefuttatva viszonylag rövid idő alatt igen nagy adatmennyiséget tudunk generálni, ami alapul szolgálhat egy *deep learning* alapú rendszer kialakításához, ami megfelelő betanítás után (akár több ezer futtatás paraméterenként) valós időben képes lenne kimutatni, hogy a választott anyagtulajdonságok megfelnek-e az aktuális projekthez. Ennek alapjait végeztem el kis léptékben 5 paraméter szisztematikus változtatásával és a szimulációs eredmények feltüntetésével. Nagy potenciált látok ebben a kutatási irányzatban, végső soron minden adatot egy komplex rendszerként integrálva a mesterséges intelligencia által vezérelt nyomtatást és annak előkészítését is megvalósíthatónak tartom. Mivel a 3D betonnyomtatás egy komplex folyamat, ami magában foglalja az anyagtudományt, a robotok programozását és a 3D modellezést is, ezért egy átfogó mesterséges intelligencia alapú rendszer, jelentősen megkönnyítheti a munkát.

Összességében kijelenthetjük, hogy a 3D betonnyomtatás technológiája még rengeteg lehetőséget rejt magában, és ezek kihasználásával jelentősen növelhetjük az építkezéseink hatékonyságát.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani mindazoknak, akik segítetek és támogattak 2023-as TDK munkám elkészítésében.

Külön köszönöm:

- Konzulensemnek, Dr. Sólyom Sándornak, a szakdolgozat kivitelezési részének konzultációin és a 3D betonnyomtatás során nyújtott szakmai segítségét és hasznos tanácsait.
- Konzulensemnek, Dr. Kapitány Kristófnak, a szakdolgozat parametrikus tervezési részének konzultációin nyújtott szakmai segítségét és hasznos tanácsait.
- Burai Balázsnak, valamint minden kollégának, akik a kísérletek és a 3D betonnyomtatások során nyújtottak segítséget
- Dr. Kossa Attilának az ABAQUS CAE végeselem szoftverrel kapcsolatos segítséget és megbeszéléseket
- A dolgozat a Kulturális és Innovációs és Minisztérium **ÚNKP-23-2-I-BME-400** kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.”

Új Nemzeti Kiválóság Program

Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal

Kulturális és Innovációs Minisztérium

Végül szeretném megköszönni családom és párom támogatását a TDK elkészüléséhez.

Felhasznált irodalom

1. Vantyghem, G., Ooms, T., & De Corte, W. (2021). VoxelPrint: A Grasshopper plug-in for voxel-based numerical simulation of concrete printing. Automation in Construction, 122, 103469.

2. Ooms, T., Vantyghem, G., Van Coile, R., & De Corte, W. (2021). A parametric modelling strategy for the numerical simulation of 3D concrete printing with complex geometries. Additive Manufacturing, 38, 101743.

3. Wolfs, R. J. M., Bos, F. P., & Salet, T. A. M. (2018). Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing. Cement and Concrete Research, 106, 103-116.

4. Hawkins, W., Orr, J., Ibell, T., & Shepherd, P. (2020). A design methodology to reduce the embodied carbon of concrete buildings using thin-shell floors. Engineering Structures, 207, 110195.

5. Costa, E., Oval, R., Shepherd, P., & Orr, J. (2023). Computational design exploration of a segmented concrete shell building floor system. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings, 1-12.

6. Khan, S. A., İlcan, H., Aminipour, E., Şahin, O., Al Rashid, A., Şahmaran, M., & Koç, M. (2023). Buildability analysis on effect of structural design in 3D concrete printing (3DCP): An experimental and numerical study. Case Studies in Construction Materials, 19, e02295.

7. Costa, E., Oval, R., Shepherd, P., & Orr, J. (2020, June). Fabrication-aware parametric design of segmented concrete shells. In Proceedings of IASS Annual Symposia (Vol. 2020, No. 17, pp. 1-10). International Association for Shell and Spatial Structures (IASS).

8. Mutale, L. (2021). Collaborative BIM-based workflows for a new sustainable compression-only structural block construction system (Doctoral dissertation).

9. Vantyghem, G., Ooms, T., & De Corte, W. (2020). FEM modelling techniques for simulation of 3D concrete printing. arXiv preprint arXiv:2009.06907.

10. Bhooshan, S., Bhooshan, V., Dell'Endice, A., Chu, J., Singer, P., Megens, J., ... & Block, P. (2022). The Striatus bridge: Computational design and robotic fabrication of an unreinforced, 3D-concrete-printed, masonry arch bridge. Architecture, Structures and Construction, 2(4), 521-543.

11. Wolfs, R. J. M., Bos, F. P., & Salet, T. A. M. (2019). Triaxial compression testing on early age concrete for numerical analysis of 3D concrete printing. Cement and Concrete Composites, 104, 103344.

12. Shahzad, Q., & Li, F. Y. (2023). An innovative method for buildability assessment of 3d printed concrete at early-ages. Construction and Building Materials, 403, 133167.

13. Cybe weboldal, https://cybe.eu/3d-concrete-printing/printers/cybe-gantry-robot/ 2023.11.05.

14. Balázs L. György, Nehme Salem, Lublóy Éva, Kopecskó Katalin, Balogh Tamás, Kasik Tamás, Sólyom Sándor, 3D betonnyomtatás – Korszerű betonelemek anyagtudományi fejlesztése a BME-n, Vasbetonépítés, 2020/4, pp. 113-118

15. Polgár László – Vasbeton födémek a 21. században, Beton szakmai lap, XXVI/III., 2018., 4-6.

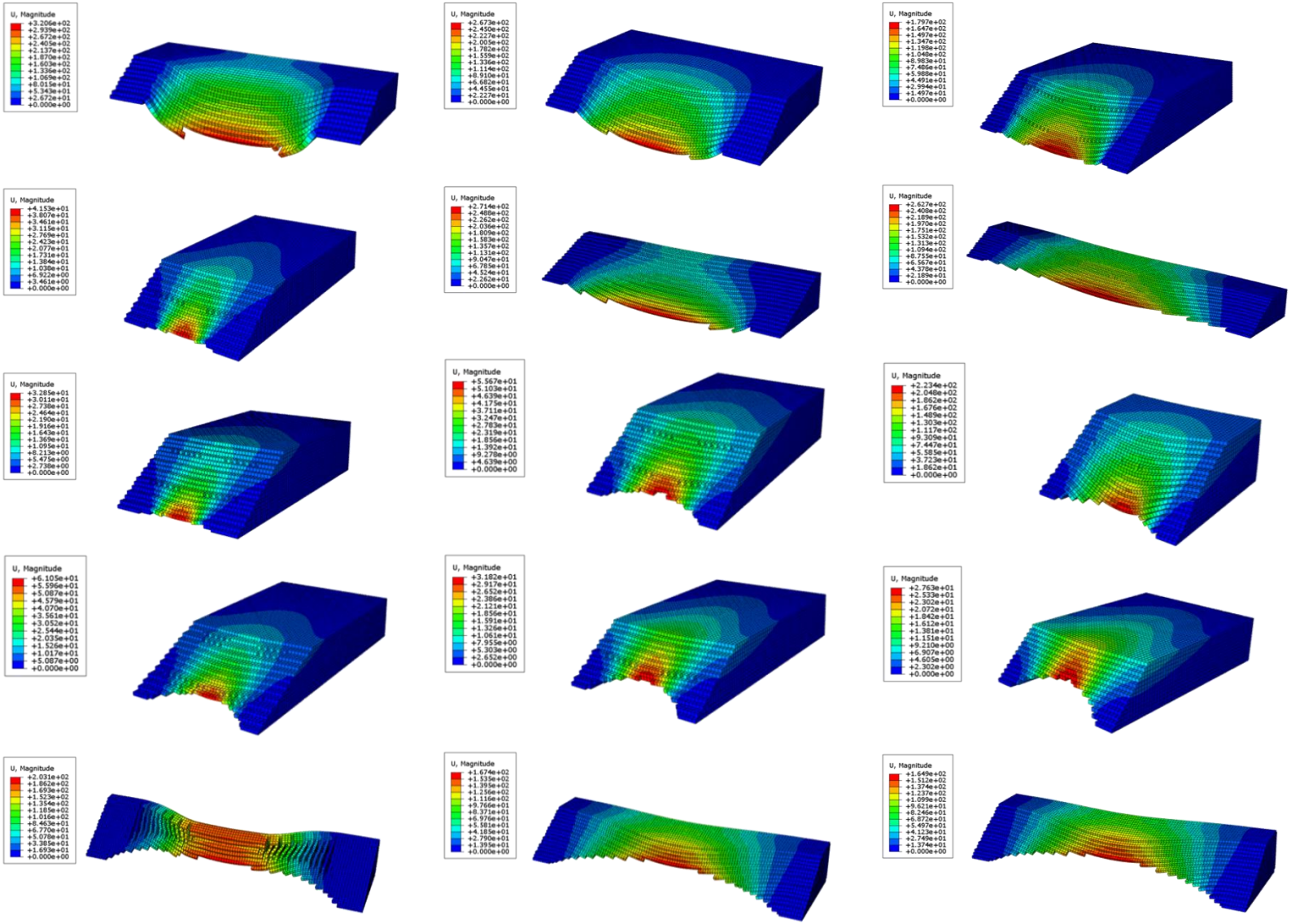
16. ACORN weboldal, https://automated.construction/, 2023.11.05.

Mellékletek

I. Melléklet

	Modell megnevezése	Nyomtatási szög [°]	Valós összeomlási rétegszám	Szimulált összeomlási rétegszám (U>20mm)	Pontatlanság	Voxel méret	Szumma voxel (element) szám	Step-ek száma	Útvonal szélesség beállítás - csak paraméterként	Rétegidő [s]		
										Min	Átlag	Max
1.	25°-os dőlésszögű kónusz	90	9	15	67%	5	30606	20	10	8	12	16
2.	„Kis” boltíves födém	45	13	12	-8%	10	25130	20	10	8	46	78
3.	Széles födém	35	24	26	8%	12	80918	20	12	55	217	254
4.	„Nagy” piramis	90	4	4	0%	10	17144	20	10	10	22	35
5.	„Kis” piramis	90	15	6	-60%	5	23760	20	10	4	9	13
6.	Váza	90	45	20	-56%	5	45221	20	10	7	9	11
7.	Teljesen kitöltött keresztmetszetű födém	30	7	10	43%	12	74905	20	12	282	282	282
				Átlag	-1%							
				Abszolút érték átlag	34%							

II. Melléklet



III. Melléklet

Szimuláció száma	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.
Födémmagasság [mm]	**300**	**400**	**500**	400	400	400	500	500	500	400	400	400	400	400	400
Boltív szélesség	2000	2000	2000	**1000**	**3000**	**5000**	1000	1000	1000	1000	1000	1000	2000	2000	2000
Boltív arány	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	**1,005**	**1,1**	**1,2**	1,15	1,15	1,15	1,1	1,1	1,1
Nyomtatási dőlésszög	35	35	35	35	35	35	35	35	35	**25**	**35**	**45**	35	35	35
Kitöltés aránya	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	**0,5**	**0,75**	**1**
Total Time 20 mm-es elmozdulásnál	1,10	1,10	1,29	2,29	2,00	1,05	2,29	1,71	1,05	1,46	1,29	2,71	2,46	2,46	2,46
Max fesztültség 20 mm-es elmozdulásnál [Mpa]	0,0051	0,0048	0,0067	0,0081	0,0360	0,0108	0,0097	0,0257	0,0136	0,0180	0,0146	0,0395	0,0274	0,027	2,677
Total Time 200 mm-es (vagy a maximum) elmozdulásnál	8,00	12,50	19,3	20,00	4,2300	7,08	20,00	20	8,05	20	20	20	3,13	5,59	5,89
Maximum elmozdulás [mm]	>321	>267	209	101	>271	>263	87	124	>223	163	138	129	>417	>169	>171
Max fesztültség 200 mm-es (vagy a maximum) elmozdulásnál [Mpa]	0,1136	0,1455	0,1641	0,05496	0,08078	0,2581	0,06594	0,079	0,04568	0,08847	0,07394	0,07626	0,04767	0,0618	0,0619
Voxel méret	30	30	30	30	25	30	30	30	30	30	30	30	20	20	20
Voxelek száma a modellben	36302	51062	69455	29382	125966	105244	39506	36428	34196	28938	25410	22270	78148	91390	91408

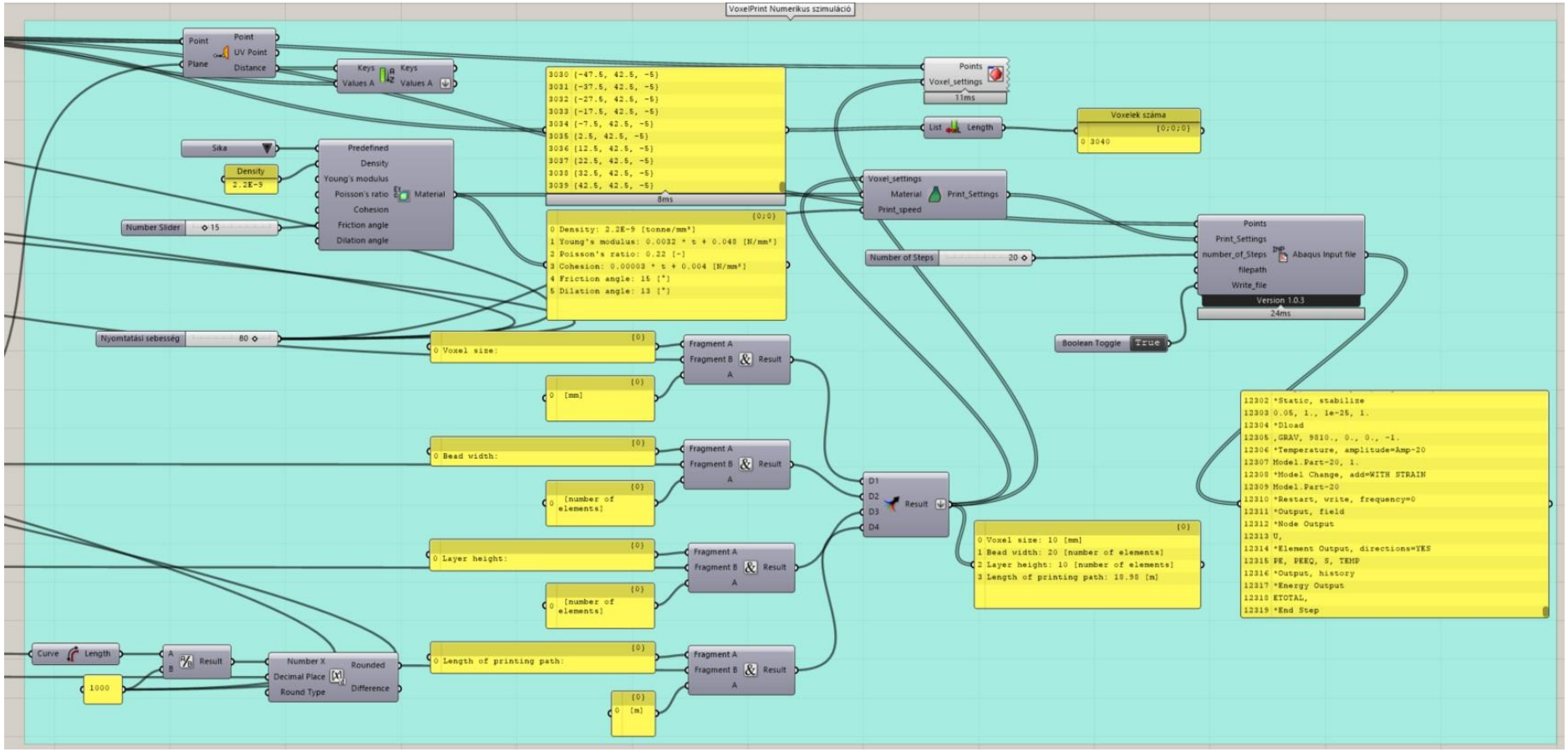
IV. Melléklet

	A keverék kora [min]	Nyírófeszültség [MPa]	Nyomófeszültség [MPa]	Arány
Wolf et al.	0	0,003050	0,006370	2,09
	90	0,008270	0,018930	2,29
	Lineárisan változó érték	0,000058	0,000140	2,41
Továbbfejlesztett SIKA	0	0,009653	0,020160	2,09
	60	0,136728	0,312969	2,29
	Lineárisan változó érték	0,002028	0,004880	2,41

V. Melléklet

	Továbbfejlesztett anyag				
A keverék kora [min]	Maximum Erő [N]	Nyomószilárdág [MPa]	Rugalmassági modulus 5 % elmozdulásnál [MPa]	Időfüggő lineáris rugalmassági modulus [MPa]	Arányosított kohézió [MPa]
0	57	0,020	0,122	0,122	0,0097
10	221,1	0,078	0,591	0,919	0,0299
20	420,9	0,149	1,536	1,715	0,0502
30	489,4	0,173	1,750	2,511	0,0705
40	671	0,237	2,459	3,307	0,0908
50	750,2	0,265	3,353	4,104	0,1111
60	884,9	0,313	4,900	4,900	0,1313

VI. Melléklet



VII. Melléklet

Paraméter	**Normál SIKA anyaggal**	**Továbbfejlesztett SIKA anyaggal**
Födémmagasság [mm]	500	
Boltív szélesség	5000	
Boltív arány	1,005	
Nyomtatási dőlésszög	45	
Kitöltés aránya	1	
Total Time 20 mm-es elmozdulásnál	3,71	25,3
Max fesztültség 20 mm-es elmozdulásnál [MPa]	0,05702	1,481
Total Time 200 mm-es (vagy a maximum) elmozdulásnál	5,11	30
Maximum elmozdulás [mm]	>526	237
Max fesztültség 200 mm-es (vagy a maximum) elmozdulásnál [MPa]	0,1311	1,559
Voxelek száma a modellben	214176	214176