

**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem**  
**Építészmérnöki Kar**  
**Építéstechnológia és Építésmenedzsment Tanszék**

**TDK 2020**



**A 3D beton nyomtatási technológia összehasonlítása a monolit  
vasbeton építési móddal gazdaságossági szempontból**

Készítette: Szögi Tamás

Konzulens: Vidovszky István PhD.

## **Absztrakt**

*Mindennapjaink során egyre inkább törekszünk megtalálni az egyszerűbb, olcsóbb, gyorsabb megoldásokat minden téren, így az építőiparban is. Fejlődő világunkban a digitalizáció egy kiemelten fontos szegmenst képez, ennek megfelelően az építőipari szektor is átalakulásokon megy keresztül. Ma már számos folyamatot képesek vagyunk jelentősen meggyorsítani automatizálással, amellyel növekedés érhető el a piacon. Egy napjainkban kibontakozó innováció lehetőséget ad arra, hogy elérhető áron egyénre szabott épületeket alkossunk, ez pedig a beton nyomtatás. Kutatásom során a szakterület gazdasági előnye mellett a szabadabb formavilágú épületek kivitelezhetőségét is szem előtt tartottam, hiszen így bonyolultabb építészeti elképzelések is valóra válhatnak.*

*Dolgozatomban a technológia hatékonyságát és lehetőségeit részletesen vizsgálom, majd összehasonlítom ezeket a hagyományos monolit építéssel. Míg az utóbbihoz számottevő élőmunka szükséges, addig a nyomtatás lényegesen kevesebb emberi beavatkozást igényel. Ennek következménye, hogy gyorsabban és pontosabban lehet vele dolgozni, valamint, hogy kevesebb hulladékot is termel. Ezt továbbgondolva az építkezés hatékonyságát is növelhetjük, már csak az a kérdés, hogy mennyivel. Egy íves fal vagy egy pillér kivitelezése az egyeneshez képest extra költséget jelenthet a zsaluzat szempontjából, viszont az új, innovatív módszernél nem mutatkozik ilyen különbség. A technológia bemutatása után részletesen kifejtem, majd összevetem az idő- és költségelemeket mindkét technikánál, melyekhez az aktuális normákat és az iparban jellemző árakat használom fel.*

*Talán az egyik legfontosabb kérdés megválaszolását tűztem ki célul, amit a mai piac figyelembe vesz egy új technológiánál: megéri-e alkalmazni? A probléma összetett, hiszen egy nagyobb összeget kell befektetni kezdetben az eszköz beszerzéséhez, ez azonban idővel többszörösen megtérülhet, ha megfelelő körülmények között alkalmazzuk a beton nyomtatást.*

## Summary

*In our daily lives, we are increasingly striving to find simpler, cheaper, faster solutions in all fields, which tendencies can be observed in the in the construction industry too. In our developing world, digitalisation is a particularly important segment, and the construction sector is undergoing transformation as well. Today, we can significantly accelerate many processes with automation to achieve growth in the market. An innovation that is unfolding nowadays offers the opportunity to create customized buildings at an affordable price, and that is concrete printing. During my research, in addition to the economic advantages of the field, I also considered the feasibility of buildings with free shaping, hence more complex architectural ideas can be realised too.*

*In this work I examine the efficiency and possibilities of the technology in detail, and then compare these with traditional monolithic construction methods. While the latter requires considerable live labour, printing requires significantly less human intervention. As a result, we can work faster and more accurately, moreover it produces less waste. Furthermore, we also can increase the efficiency of the construction, the question is how much. The construction of an curved wall or a pillar can be an extra cost in terms of the formwork compared to a straight wall section, but there is no such difference at this new innovative method. After introducing the technology, I explain in detail and then compare the time and cost elements for both techniques, using current standards and industry-specific prices.*

*Perhaps I set out to answer one of the most important questions that today's market considers for a new technology: is it worth applying? The problem is complex, as the initial investment cost of the device is considerable, but this can be refunded over time if we use concrete printing under the right conditions.*

## **Tartalomjegyzék**

<b>Absztrakt .....</b>	<b>1</b>
<b>Summary.....</b>	<b>2</b>
<b>Tartalomjegyzék .....</b>	<b>3</b>
<b>1. Bevezetés .....</b>	<b>4</b>
<b>2. A 3D beton nyomtatás .....</b>	<b>6</b>
2.1. A technológia kialakulása és irányzatai .....	6
2.2. Jelenlegi, beton nyomtatással foglalkozó cégek a piacon.....	13
<b>3. A 3D beton nyomtatás magyar viszonylatban .....</b>	<b>14</b>
3.1. A hazai úttörő .....	14
3.2. A nemzetközi befektető itthon .....	15
3.3. Innovatív kutatási lehetőség az oktatásban .....	17
<b>4. Költségelemzés .....</b>	<b>18</b>
4.1. A vizsgálat módszere .....	18
4.2. A monolit vasbeton házak építési költségei.....	19
4.3. A 3D nyomtatott technológiával kapcsolatos költségelemzések.....	22
4.3.1. <i>A Contour Crafting technikával nyomtatott házak költségei</i> .....	24
4.3.2. <i>A teljes falszélességben nyomtatott házak költségei</i> .....	26
<b>5. Összegzés.....</b>	<b>27</b>
5.1. Kutatási eredmények.....	27
5.2. A beton nyomtatásban rejlő potenciálok, jövőkép.....	32
<b>6. Köszönetnyilvánítás.....</b>	<b>33</b>
<b>7. Felhasznált irodalom .....</b>	<b>34</b>
<b>8. Ábrák jegyzéke és forrásai .....</b>	<b>36</b>
<b>Mellékletek .....</b>	<b>37</b>

## 1. Bevezetés

Az építőipari szektor az utóbbi években rengeteget változott és fejlődött a mai igényekhez igazodva, azonban a legtöbb iparághoz képest lemaradást mutat mind a digitalizáció, mind pedig az automatizálás terén. Ez az alacsony hatékonysági mutatókkal rendelkező szakág gazdasági teljesítményén is megmutatkozik, hiszen az az elmúlt 20 évben szinte alig változott. A közelmúltban indult meg lassan a termelékenység növekedése a digitalizációnak köszönhetően, azonban ez még mindig jelentősen elmarad más ipari ágazatokhoz képest. Az is elmondható, hogy manapság egyre nagyobb kihívássá válik a növekvő piaci elvárások kielégítése profitorientált gazdaságunkban. Ennek érdekében a folyamatos teljesítménynövekedés elengedhetetlen, ráadásul a szoros határidők tovább nehezítik a kivitelezők munkáját. Az építési fázisban számos tényező befolyásolja a megvalósítás ütemét, így nem ritkák a késedelmes teljesítések és pontatlanságok ezen a területen. Egyes esetekben ezek a hibák rendkívül nagy többletköltséget eredményezhetnek, aminek következményeként hamar túlléphetjük az építésre szánt költségkeretet. A hagyományos építési technológiákat alkalmazva számos, komoly problémával szembesülhetünk a kivitelezés során.

Jellemzően az építkezések egyik kulcsfontosságú anyaga a beton, mivel ez egy elérhető árú, jó tulajdonságokkal rendelkező anyag, amely gyakorlatilag bármilyen formát képes felvenni. Ehhez a magasépítésben zsaluzatra van szükség, ami biztosítja a keretet a szilárdulás alatt azonban a legtöbb esetben a szerkezet építési költségeinek 35-54%-át, valamint a teljes betonozásra fordított idő 50-75%-át teszik ki a zsaluzási munkák (Paul et al., 2018). Továbbá olyan típus is létezik, amit egyedi kialakítású épülethez készítettek, és csak egy konkrét építkezésen használhatók fel.

Így tehát egy olyan folyamat bevezetésével, amelyben a megvalósítás már automatizált, nemcsak elkerülhetőek a hibák, hanem sokkal nagyobb lehet a produktivitás mértéke is. A fizikai munkát ma már számos területen háttérbe szorította a robotizáció: a nagyobb pontosság és gyorsaság két olyan tényező, ami arra ösztönözheti a kivitelezőt, hogy olyan új technológia alkalmazása mellett döntsön, amely helyettesíti az élőmunkát, és ezáltal megnöveli a építési folyamat hatékonyságát is.

A magyar építőipar továbbra is küzd a munkaerőhiánnyal és az ágazat helyzetét nehezíti, hogy a szakképzésre jelentkezők száma sem növekszik. Az 1. ábrán az látható, hogy az építőipari cégek 60 százaléka a szakemberhiányt tartja üzleti tevékenysége legfőbb akadályának.

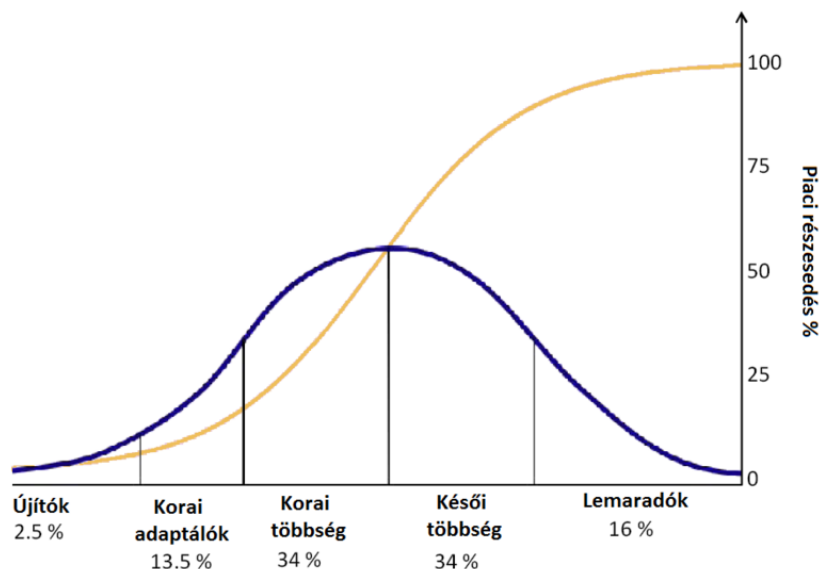


1. ábra: Az üzleti tevékenységet akadályozó tényezők 2020-ban (Forrás: ÉVOSZ)

Ezen felül megfigyelhető az építőipari kereslet jelentős ingadozása is, köszönhetően piaci szektor gyors változásainak és az állami megrendelések számának, amelyek közvetlenül kihatnak a foglalkoztatásra is. A kereslet kielégítéséhez elengedhetetlen a termelékenység fokozása, ezt azonban kellő munkaerő hiányában feltehetően további digitalizációval és technológiai újításokkal tudjuk majd elérni (Magyar építéstechnika weblap, 2020).

A 3D nyomtatás egy rendkívül sokoldalú technológia, amely már számos területen bizonyított. Ez alól az építőipar sem kivétel, hiszen egy különleges technikával az ún. 3D beton nyomtatással már házak is megvalósíthatók rétegről rétegre. Egy ilyen gépezet egyedülálló módon képes geometriailag komplex és egyedi építményeket létrehozni meglepően rövid idő alatt. Továbbá olyan problémákra jelenthet tartós megoldást, mint például lakhatási gondok, építési anyagveszteségek, nagymértékű építési hulladék keletkezése. Feltételezhető, hogy ez a technológia egy kiváló eszköze lehet az évek óta fennálló építőipari munkaerőhiányra való reflektálásnak is. Az iskolarendszertől frissen kilépő, szakképzett munkaerő csökkenő létszáma, a jelenleg is tapasztalható bérnövekedés ellenére a közeljövőben komoly humán erőforrás hiányt eredményezhet az építőipari piacon.

A beton nyomtatás technológiája még kezdetleges fázisban van, 2. ábra fogyasztói csoportjai közül, napjainkban szinte csak újítók foglalkoznak ezzel a területtel és jelenleg nagyon kis piaci szegmensről beszélünk. A termékbevezetés fázisában igen magasak még a fejlesztési és gépköltségek, azonban ahogy haladunk előre a termék életciklusában a tendencia várhatóan csökkenni fog. Ez pedig azt vetíti előre, hogy előbb-utóbb megéri majd házakat nyomtatni kevesebb munkaerővel, mint vasbetonból építkezni nagyobb élőkommunikációval.



2. ábra: A Rogers-féle adaptációs modell (Forrás: Wikipédia)

Az additív építési technológiák gazdasági hatékonysága azonban a mai napig vitatott (Zhang et al. 2019), ezért a kutatásom során arra keresem a választ, hogy a 3D beton nyomtatással gazdaságosabban és gyorsabban lehet-e építkezni, mint a hagyományos technikák alkalmazásával.

Dolgozatom elején röviden bemutatom a technológia sajátosságait, valamint előnyeit és lehetőségeit SWOT analízis segítségével. A szakirodalmi áttekintésben pedig a legfontosabb nyomtató típusokra térek ki, valamint konkrét megvalósult épületeket is említék. Ezután részletesen, költségelemenként megvizsgálom a hagyományos építéssel és a 3D beton nyomtatással készülő házakat, különböző modelleken keresztül, hogy végül átfogó képet kaphassak a technológia hatékonyságáról.

## 2. A 3D beton nyomtatás

### 2.1. A technológia kialakulása és irányzatai

Tény, hogy az építőiparban az árbevételeknek átlagosan csak 1-2 %-át költik digitalizációra (Agarwal, 2016). Várhatóan ez a szám emelkedni fog a közeljövőben, tekintve, hogy az általános életszínvonal emelkedésével és a populáció növekedésével számolva napi több, mint 11 000 épületet kellene építenünk világszerte (Bertollini, 2018), hogy lépést tudjunk tartani az emelkedett igényekkel. Ez a hazai keretek között is megoldatlan probléma, hiszen az igények már meghaladják a magyar építőipar kapacitását. Mindezek mellett, a projektek 80 %-ban meghaladják az építés tervezett keretösszegét, valamint a 20 %-ban a határidőt is túllépik a

kivitelezők. (McKinsey weblap, 2016) A termelékenység növekedés ezért elvárás lett a szektorral szemben, egyszóval ez kiemelt fontosságú a cégek számára is.

Manapság a vállalatok versengenek a piacon a jól képzett, tapasztalt szakemberekért, ugyanis nincs elég emberi erőforrás egy-egy építkezésre. A helyszíni munka kiváltására rövid távon kétféle megoldás mutatkozik: az előregyártás és az automatizálás. Míg előbbinél ez az építőelemek tipizálásával, modularizációjával jár, addig az utóbbinál megmarad a lehetőség egyedi elemek készítésére is. Érezhető, hogy szükség is van erre, hiszen a mai világban megvan a társadalmi igény az egyediségre, például annak tekintetében, hogy egy személyre szabott és a saját igényeinknek megfelelő házban éljünk.

Az építőipar egyre inkább a digitalizáció irányába halad, ennek hatására pedig néhány éven belül felértékelődik majd a robotizáció szerepe a szektorban. A 3D nyomtatás, vagy additív gyártástechnológiaként is ismert folyamat során a tárgyakat rétegről rétegre építik fel és egy digitális modellből kiindulva térbeli objektumokat kapunk eredményül. Ennek előnyeit az ipar számos területén kihasználják már: elterjedt a gyártásban, az építészeti tervezésben, az egészségügyben és a művészetben is (Hager et al., 2016). Az 1980-as években szabadalmaztatott első ilyen eljárás Chuck Hull nevéhez fűződik (Hull, 1986). Azóta megannyi fejlesztés és technológiai újítás hatására ma már képesek vagyunk olyan anyagokból is nyomtatni, mint a műanyag, kerámia, fém, fa, kő vagy beton.

Ennek megfelelően a kivitelezési területen az egyik legtöbb előnnyel rendelkező automatizált építéstechnológia a 3D beton nyomtatás, amely egy alternatív építési mód lehet, és képes megoldani számos problémát a fent említettek közül. Az automatizált és pontos építési folyamat eredményeképpen jelentős produktivitás, és növekedés érhető el az emberi munkaerő és a veszteségek redukálásának köszönhetően. A technikából adódóan az építészek nagyobb tervezési szabadságot kaphatnak és jó eséllyel csökkenthető az építés során keletkező károsanyag-kibocsátás is. Az eddigi tapasztalatok, internetes források, (Cherdo, 2020) és szakirodalmak (Sobotka & Pacewicz, 2016) alapján egy SWOT analízist készítettem a 3D beton nyomtatásról, melyet a következő ábra mutat be:



<b>Erősségek</b>	<b>Gyengeségek</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• kis helyszíni élőmunkaigény</li><li>• gyorsaság, hatékonyság</li><li>• pontosság</li><li>• biztonság</li><li>• minimális szállítási költség</li><li>• kevesebb építési hulladékot termel</li><li>• komplex geometriájú épületek megvalósítása</li><li>• tűzállóság</li><li>• könnyen ellenőrizhető építési folyamat</li><li>• fokozott hang-, és hőszigetelési képesség</li><li>• egyszerűbb logisztika, kevesebb nehéz gép alkalmazása szükséges</li><li>• zsaluzatmentes építkezés</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• magas kezdeti beruházási költség</li><li>• csak a falazat nyomtatása megoldott teljes mértékig, további kiegészítő munkák szükségesek az épület befejezéséhez</li><li>• magasan képzett munkaerő szükséges a működtetéshez</li><li>• még nem áll rendelkezésre elegendő adat az optimális betonösszetétellel kapcsolatban</li><li>• magasabb az alapanyagköltség a megemelt minőségi és szilárdsági követelmények miatt</li><li>• szabványok hiánya</li><li>• nagy volumenű építmények kivitelezése</li><li>• a nyomtató robotok hosszabb telepítési ideje</li></ul>
<b>Lehetőségek</b>	<b>Veszélyek</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• BIM integráció</li><li>• ipari hulladékok és újrahasznosított anyagok felhasználása a betonhoz</li><li>• passzívház követelmények kielégítése</li><li>• építkezés kivételesen nehéz körülmények között (katasztrófa sújtotta terület), illetve a jövőben esetleg más bolygókon</li><li>• kivitelezési költségek csökkentése</li><li>• automatizált helyszíni építés</li><li>• generatív tervezés által előállított épületrészek, modellek megvalósítása</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• sokkal kevesebb munkalehetőség a helyi munkavállalók számára</li><li>• saját terveket kell létrehozni a gyártáshoz, nincsenek kidolgozott szabványok a technológiára</li><li>• a nem megfelelő anyagminőség miatt nyomtatás utáni deformáció, zsugorodási repedés alakulhat ki</li><li>• az időjárás könnyen megrongálhatja a frissen nyomtatott épületfalat</li><li>• ismeretlen a nyomtatott épületek életciklusa</li></ul>

3. ábra: a 3D beton nyomtatás SWOT analízise

Érdemes megjegyezni, hogy a technológia veszélyeinek nagy része rövid időn belül megszűnik, hiszen a jelenlegi munkaerőhiány miatt a kereslet csökkentésével kedvező hatást érhetünk el a lokális piacon. Ezen felül várhatóan egyfajta szabványosítás is végbemegy, amint megnövekszik az igény ilyen típusú építmények kivitelezésére. Nem utolsó sorban pedig helyszíni betonminőség-ellenőrzéssel és a megfelelő nyomtatási körülmények megteremtésével (fedett helyen nyomtatva) az alapanyag és az időjárás okozta problémák is megelőzhetőek.

A technológia olyan körülmények között is helytálló, amikor elérhető épületek létrehozását tűzik ki célul a lehető leggyorsabban és viszonylag alacsony költségekkel, rászoruló családok otthonának megteremtése érdekében. A lakhatás, mint globális probléma megoldására lehet egy példa az a Mexikóban épülő falu, melyet kizárólag 3D nyomtatott házakból kívánunk felépíteni a helyi lakosok számára. A 4. ábrán látható ház a 2019-ben bemutatott épületek egyike, mely a Vulcan II névre keresztelt nyomtatóval készült. (Bodnár, 2019)



4. ábra: Egy 3D beton nyomtatott ház előtere (Forrás: Qubit)

A nyomtatáson belül számos tényező variálható: a beton összetételét, a nyomtató típusát, a fal struktúráját mind megválaszthatjuk a folyamat során. A nyomtatható betonnal szemben támasztott legfontosabb követelmények:

- pumpálhatóság → alacsony viszkozitás, azaz nagy folyóképesség lenne előnyös
- extrudálhatóság → optimális megmunkálhatóság szükséges
- építhetőség → kellő állékonyság nyomtatáskor, melyhez nagy viszkozitás lenne előnyös

Számos kutatás zajlik az ilyen típusú beton optimális összetételének meghatározására, mivel megannyi követelménynek kell, hogy eleget tegyen. Az alkotórészek között szerepelhetnek újrahasznosított anyagok is, melyek építési törmelékek, ipari melléktermékek, illetve bányászati melléktermékek lehetnek. Ilyen tekintetben a környezettudatos építkezés sem elérhetetlen cél, hiszen a beton nyomtatással a fenntartható fejlődés is megvalósítható folyamattá válik. Az összetételt legtöbbször még a levegő páratartalma is befolyásolja, tehát nyomtatás közben is változtatnak rajta, amennyiben szükséges.

A szakirodalom több fejlesztési fázisát, típusát is említi a 3D beton nyomtatásnak, ezek a következők:

**Contour Crafting beton nyomtatás:** Az additív építési technológiával kapcsolatban már az 1990-es évek közepén elkezdtek kísérletezni, ekkor a kutatást Behrokh Khoshnevis professzor vezette a Dél-Kaliforniai Egyetemen (B. Khoshnevis, 2004). Egy speciális állványzaton mozogva az általa kifejlesztett gépezet képes igen nagy területek lefedésére és komplett épületek létrehozására is. A folyamat során a nem ortogonális felületek létrehozása sem okoz gondot, köszönhetően a változtatható dőlésű, oldalsó simítókanalaknak. Legfontosabb jellemzője, hogy egyenletes felületet ad, azonban különösen figyelni kell a rétegek közti megfelelő összedolgozás és kapcsolat biztosítására (Lim et al., 2012).

**D-Shape:** Enrico Dini 2006-ban kezdte meg első vizsgálatait a technológia kifejlesztésével kapcsolatban. Ebben az esetben a nyomtatófejből klorid alapú kötőanyagot juttatnak a kő- vagy homokszemcsés, porszerű anyagra, így ragasztva a nyomtató által felvitt rétegeket egymáshoz egy térbeli alakzat megalkotása során (Sobotka & Pacewicz, 2016). Ezen eljárásnál a késztermék nem igényel acél megerősítést sem, köszönhetően a nagy szilárdságának. Hátránya azonban, hogy a felesleges anyagot le kell takarítani nyomtatás után az elemről, valamint a limitált méretek és a nagy anyagfelhasználás mellett sok hulladék is keletkezik (D-Shape weblap).

**3D beton nyomtatás:** A Loughborough-i Egyetemen 2010-től kezdve foglalkoztak az eljárással és az ahhoz szükséges nagyszilárdságú beton kifejlesztésével. Ez a típus még kevésbé volt hatékony, mint a későbbi változat, azonban a limitált nyomtatási méretek itt is korlátot szabtak a késztermékek méretében. Technikailag fontos megjegyezni, hogy ez a berendezés 6-25 mm rétegvastagságban képes nyomtatni, szemben a Contour Crafting-ban alkalmazott 13 mm-rel. 2012 fordulópont volt a technológia fejlődésének szempontjából, ugyanis ekkortól kezdve közel exponenciálisan nőtt az új tanulmányok száma. A 3D beton nyomtató 2015-ben nyerte el mai formáját, az Eindhoveni Műszaki Egyetem által kutatási célokra tervezett eszköznek köszönhetően. A projekt holland építőipari vállalatok támogatásával jött létre. A nyomtató az adott munkaterületen 9 méter hosszú, 4,5 méter széles és 2,8 méter magas tárgyakat képes megformálni. A 3 tengely mentén történő elmozdulás, valamint a nyomtatófej forgathatósága miatt nagyobb 3 dimenziós szabadságot tudunk biztosítani vele a Contour Crafting-hoz képest (Bos et al., 2016).

A folyamat során először a kívánt elem 3 dimenziós modelljét alkotjuk meg, amit aztán exportálunk a nyomtató szoftvere számára is értelmezhető formátumba, majd ezt egy szeletelő program a megadott vastagságú rétegekre felosztja melyet végül a nyomtató az előre beprogramozott utasítások alapján térbeli alakzatként is létrehoz.

Szerkezeti kialakítás szerint különböző 3D beton nyomtatók érhetők el a piacon: lehet egy fix pozíciójú robotkar, amelyet az új épület középpontjában helyeznek el, illetve a másik kialakítás, amikor egy állványzatra szerelt nyomtatófej az adott terület felett 3 tengely mentén mozogva dolgozik. Mindkét típusnak megvannak az előnyei és hátrányai, melyek alapján eldönthetjük, melyik alkalmasabb a megvalósítandó projekthez.

A robotkarral felszerelt nyomtató olyan részletgazdag, komplex modulokat is képes előállítani, amely az állványon futó típusnak nehézséget okozna. Általában azonban limitált a terület mérete, amelyre még elér a kar, így ezzel a technológiával egyelőre csak kisebb elemek nyomtatása lehetséges, amelyek között utólag kell esetlegesen kapcsolatot biztosítani. Méreteket tekintve ez azt jelenti, hogy a legnagyobb forgalomban lévő fix robotkar sem képes lefedni azt a térrészt, ami egy kisméretű ház megvalósításához szükséges. Erre a problémára a közeljövőben lehet már megoldás: az FBR (Fastbrick Robotics) által fejlesztett Hadrian X-hez hasonló mobil daru-jellegű rendszer alkalmas lenne a feladatra, azonban ez a berendezés egyelőre téglablokkokból építkezik, beton nyomtatásra még nem használták. A robotok esetében további kihívást jelent a nyomtatófej programozása is, mivel a fej és a robotkar külön-külön is képes mozogni és összesen egy 6-tengelyű mozgás vezérlését kell összehangolni. Ezzel szemben az állványon futó nyomtatónak sokkal nagyobb mozgástere van, és egyénileg, a projekt méretéhez igazodva kialakítható a mérete. A legtöbb esetben elhelyeznek egy kisebb puffer-tartályt is a szerkezetre, amely lehetőséget ad az egyenletes nyomtatásra azáltal, hogy befogadja a pumpából általában változó intenzitással érkező betont és egyenletesen továbbítja az extruder felé. Nyílászárók helyének kialakításakor szükség lehet a beton nyomtatás szüneteltetésére is, amelyre az eszköz szintén alkalmas. Ellenben a robotkarnál ez a technikai lépés általában nem megoldható, így csak végtelenített pályán, megállás nélkül mozogva képes nyomtatni a folyamatos anyagáramlás miatt. A nyomtatási sebesség változtatása sem okoz gondot az állványra szerelt nyomtatónak, míg a robotnál általában anyagfelesleg keletkezik lassabb mozgás hatására, főként kis sugarú íveknél. Mindezek mellett a keret összeszerelése és felállítása egy új helyszínen több időt vesz igénybe, mint a robot esetében. Ezzel szemben általában a robotkar nem elég nagy ahhoz, hogy egy teljes épületet egyetlen állásból kinyomtasson, ezért a kivitelezéshez többszöri áthelyezés szükséges, hosszas kalibrációs

idővel, amit szintén számításba kell venni a mérlegelés során. A jövőben elképzelhető, hogy egyesítik ezen technikák előnyeit és egy keretre szerelt nyomtatófejet fognak alkalmazni, amennyiben kifejlesztik és megalkotják ennek technológiai hátterét (COBOD weblap, 2020).

A nyomtatási folyamat során is felmerülnek olyan, jelenleg még nem megoldott problémák, melyek határt szabnak a technológiának. Az egyik ilyen kihívás a vízszintes szerkezetek alátámasztás nélküli nyomtatása, mint például födémek vagy gerendák. Ezeket elő tudjuk állítani nyomtatással is, azonban vagy utólag kell a helyükre emelni ezeket az elemeket (akárcsak egy nagyobb előregyártott vasbeton elemet), vagy zsaluzást kell alkalmazni ideiglenes alátámasztásként a nyomtatáshoz. Ilyen tekintetben összehasonlíthatjuk az előregyártást és a helyszíni építést is, mivel a technológia egyrészt ötvözi a két építési mód előnyeit, másrészt mindkét területen kiválóan alkalmazható. Az előbbiek közül ebben a dolgozatban a helyszíni építési folyamatokat vizsgálom és hasonlítom össze.

A 3D beton nyomtatás a generatív tervezés szempontjából is releváns technika, hiszen a különböző szempontok alapján, végeselem módszerrel topológiailag optimalizált csomópontok, oszlopok vagy épületrészek szabálytalan alakot is felvehetnek. Ezek kivitelezése egy beton nyomtató számára nem jelent nagy kihívást, ráadásul ezzel a technikával dolgozva átlagosan 40% anyagot spórolhatunk meg (Zhang et al. 2019), és még erősebb szerkezeteket kapunk a hagyományos módszerhez képest.

Tovább redukálhatjuk a projekttel kapcsolatos költségeket, ha egy adott helyszínen telepített nyomtatóval nemcsak a tervezett épületet alkotjuk meg, hanem a beruházáshoz köthető egyéb kisebb műtárgyakat, építményelemeket is. A technológia sokoldalúságának köszönhető, hogy szinte bármilyen



5. ábra: Nyomtatott beton kerítés (Forrás: Baumit)

vasalásmentes betontermék legyártható vele. Utóbbira láthatunk egy példát a 6. ábrán, ahol már egy ilyen, additív technológiával gyártott közműakna telepítése látható. Így az előre gyártott termékhez képest legalább a szállítási költséggel csökken a projekt végösszege, valamint rövidebb idő alatt megtérül a berendezés költsége, ha ezekkel a lehetőségekkel is számolunk.



6. ábra: 3D nyomtatott beton akna (Forrás: Leolane)

A technológia sajátosságai mellett kiemelném a környezeti hatását is. A nyomtatáshoz használt beton előállításánál, építési törmelék és üvegszál hozzáadásával nemcsak újrahasznosítják a már meglévő hulladékot, de erősebb lesz a végtermék is. Párhuzamba helyezhető a nyomtatott épület a környezetbarát, könnyűszerkezetes házakkal is, hiszen mindkettőre igaz, hogy gyorsan megvalósíthatók, fenntarthatók, és nem keletkezik hulladék sem a helyszínen.

Hagyományos megközelítésben a beton zsaluzatba öntése korlátozza az építészek által létrehozható geometriákat, hacsak nem fordítanak rá jelentős összegeket. Ezek alapján, kutatásom kezdetén azt a hipotézist fogalmaztam meg, hogy a 3D beton nyomtatással nemcsak jóval gyorsabban, de alacsonyabb költséggel is meg tudjuk valósítani elképzelt épületeinket. A technológia egyre népszerűbb lesz az építőiparban és már számos előnyét ismerjük, azonban kutatásom során szerettem volna képet alkotni az innováció gazdasági kérdéseiről is.

## 2.2. Jelenlegi, beton nyomtatással foglalkozó cégek a piacon

Mivel ez a típusú építés még a fejlesztés és a terjeszkedés fázisában van, ezért még csak kevés cég foglalkozik ilyen termékek gyártásával. Ezek közül néhányat mutatok be a dolgozat keretein belül:

**Apis Cor:** Az oroszországi székhelyű gyártó egyik legkiemelkedőbb munkája a Dubai-ban nyomtatott kétszintes, 640m<sup>2</sup> alapterületű épület, melynek falazatát teljes egészében nyomtatták, a kritikus helyeken betonacél megerősítést alkalmazva. Robotkaros nyomtatójuk előnye, hogy gyorsan, akár 30 perc alatt is felállítható a helyszínen. A különleges kialakítású gépezet szintről szintre emelkedve képes vertikálisan haladni az épület kivitelezésével. A cég továbbá olyan területeken lát potenciált a technológiában, mint a megfizethető lakhatás, a horizontális nyomtatás vagy más bolygókon történő építkezés. (Apis Cor weblap)

**Cybe:** A hollandiai vállalat kínálatában található többek között mobil nyomtató robotot is, mely alkalmas arra, hogy egy az előre beprogramozott pozícióban a hidraulikus stabilizáló talpak segítségével a kívánt magasságban nyomtasson terepi viszonyoktól függetlenül, ezzel kiterjesztve ez eszköz térbeli korlátait. A sokoldalú berendezés különböző szélességben és

vastagságban képes megalkotni egy réteget. Ha pedig ilyen technológiával szeretnénk kinyomtatni otthonunk falazatait, akkor a cég 4-6 hónapos kiszállítást vállalva eladásra is gyárt az említett eszközökből (Cybe weblap). Több hasonló típusú mobilizálható berendezést egyidejűleg összehangolva talán nagyobb szerkezeteket is alkothatunk a jövőben (Zhang et al., 2018).

**Constructions 3D:** Franciaországban is már fejlett technikával rendelkeznek a 3D beton nyomtatás terén, hiszen a cég a piacon elérhető legnagyobb robotkaros nyomtatót kínálja minden hozzá tartozó rendszerével együtt. A vállalat alapelvei közé tartozik az egyszerűség, robusztusság, hozzáférhetőség és mobilitás is, melyekhez társul még a környezettudatosság is. Többek között olyan 3D beton nyomtatott referencia munkákkal rendelkeznek, mint egy mesterséges zátony, városi pad, virágcserep vagy egy 57 m<sup>2</sup>-es pavilon épület (Constructions 3D weblap).

### 3. A 3D beton nyomtatás magyar viszonylatban

Jogosan merülhet fel a kérdés, hogy ezek alapján, hogyan áll hazánk a technológia adaptálásának szempontjából, ezért felmérést végeztem a témával kapcsolatban a magyar piacon. Ezen felül a nyomtatás jövőjének, gazdasági helyzetének és valós piaci terjedésének felvázolása volt a célom az elemzéssel.

#### 3.1. A hazai úttörő

Az idei év őszen, Magyarországon elsőként, a Délmagyarországi Vasbetonipari Kft. egy kísérleti 3D beton nyomtatót helyez üzembe szegedi telephelyén (7. ábra). Ezzel egy technológiai ugrás kapujába érkezett hazánk is, hiszen a teljesen egyedi konstrukcióval és a saját fejlesztéssel úgy tudták alakítani a nyomtató tulajdonságait, hogy az különböző termékek készítésére is alkalmas legyen. Elmondták azt is, hogy a beruházásnál nem a pénzügyi megtérülés volt a motiváló a cég számára, hanem a piac változásaira történő reagálás miatt kezdtek fejlesztésbe. Véleményük szerint az ilyen technológiákba azért kell befektetni, hogy 5-10 év múlva már csak minimális létszámú szakemberre legyen szükség egy-egy építkezésen.

A gép elsődlegesen egyedi vasalatlan beton elemek, mint például vizsgálólépcső, hídépítésnél használt árokelem vagy közműakna gyártásában, illetve a vasbeton termékek zsaluzatának elkészítésében is segíti majd a céget. Ezen a piaci területen az alkalmazhatóság tekintetében a nagyfokú rugalmasság versenyelőnyt, ennek következtében pedig az innovatív technológia több új megbízást és versenyképes terméket jelent a cég számára. A berendezés

jelenleg egy 2 m × 1,5 m × 1 m-es munkatérrel rendelkezik, amely ebben a fázisban elegendő a megfelelő betonösszetétel kikísérletezéséhez és nyomtatási technológia elemzéséhez. Ehhez egy olyan nyomtatófejet szereltek az eszközre, amely mind az acél-, mind pedig a műanyag szálerősítésű betont képes extrudálással nyomtatni. Hozzáadték, hogy jelenleg anyagköltség tekintetében a monolit vasbeton építéssel közel azonos nyomtatott beton árral számolnak.



7.ábra: Az első magyar fejlesztésű 3D beton nyomtató (Fotó: DVB Kft.)

2021-ben a fejlesztési szakaszban megszerzett tudás alkalmazásaként egy nagyobb nyomtatót is terveznek munkába állítani, mellyel akár komplett családi házak kivitelezését is megvalósíthatják. Mindemellett a fejlesztő cég, a KÉSZ Csoport és az IQ Kecskemét Kft. stratégiai partnereként szeretné a magyar piacon azokat a vállalatokat is kiszolgálni, amelyek a 3D beton nyomtató vásárlást fontolgatják, ezért eladásra is kínálnak a későbbiekben hasonló berendezéseket. Emellett a cég nyitott a kutatóhelyekkel, egyetemekkel való együttműködésre is, amelynek köszönhetően hazai intézményeknek megéri majd magyar berendezést üzemeltetniük, hiszen bármilyen kérdéskör vagy nehézség esetén elérhető közelségben lesz a fejlesztő cég is hozzá.

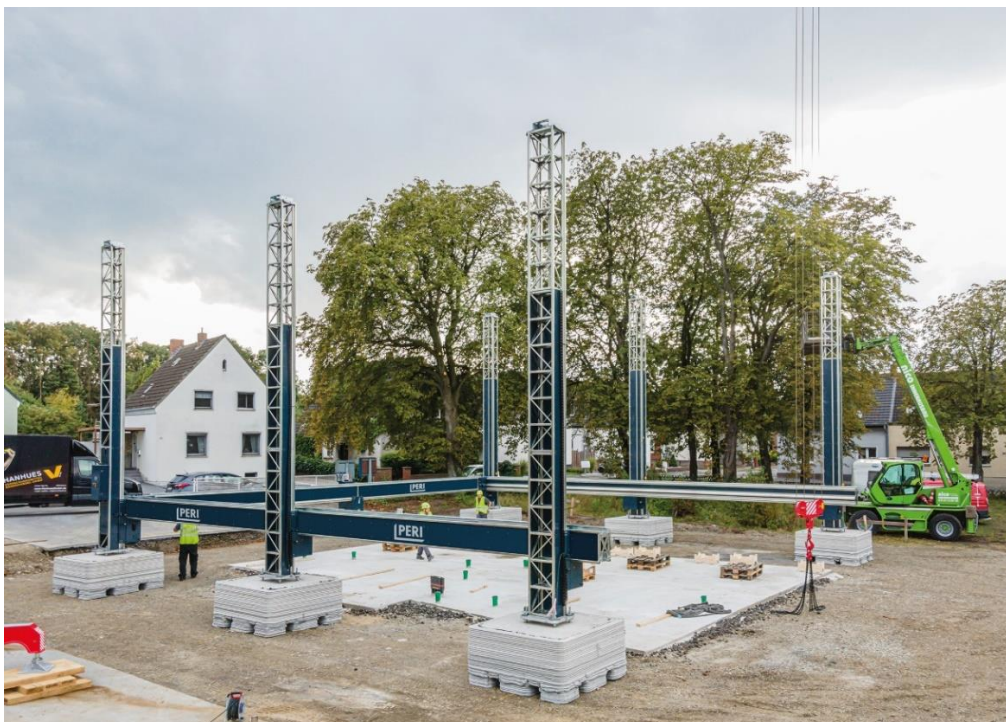
### **3.2. A nemzetközi befektető itthon**

Az építőiparban tapasztalható munkaerő- és szakemberhiány kezeléséről általánosságban elmondható, hogy egyre nagyobb kihívássá válik. Ennek köszönhetően a cégek egyre inkább



invesztálnak az olyan technológiákba, amit viszonylag kevés létszámú emberrel is lehet működtetni. A világviszonylatban is élen járó állvány- és zsaluzatgyártó cég általában követi a trendeket és próbál minden piaci szegmenst lefedni, legtöbbször valamilyen technológiai segítséggel együtt. Az egyik ilyen stratégiai döntés volt, hogy 2018-ban a PERI befektetett és kisebbségi részesedést szerzett a 3D beton nyomtatással foglalkozó, dániai COBOD vállalatban (PERI weblap). Ebből is látható, hogy a komoly építőipari cég jelentős előrelépési területként tekint az új technológiára, amely alapjaiban formálja újra a lakóház építési módszereket.

A beton nyomtatás a legújabb kor terméke, már van is olyan valós beruházás, amit a multinacionális cég beton nyomtatójával építenek. Az első ilyen projekt egy 160 m<sup>2</sup>-es családi ház Németországban, melynek várható befejezése 2021 március. Kiemelték, hogy a technológia fő előnye a gyorsaság, hiszen a BOD2 nyomtató akár 1 m/s sebességgel is képes nyomtatni, továbbá a berendezés működtetéséhez elegendő 2 ember, ugyanis a nyomtatófejet és a nyomtatási eredményeket is kamera figyeli. Számításom során ugyanilyen nyomtatót terveztem a költségvetésbe, melynek paramétereit részletesen a 4.3. fejezetben fejtem ki. Az új technológiák terjedésénél megfigyelhető, hogy először egy szűk réteg kezdi használni, majd aztán válik csak populárisabbá. Ugyanez igaz a 3D beton nyomtatásra is, mivel a Németországban már működő technológia adaptálására fel kell készülnie a magyar leányvállalatnak, de terveik közt szerepel ezt az építési lehetőséget felkínálni magyar ügyfeleiknek is.



8. ábra: Helyszínen felállított nyomtató (Forrás: PERI)

Elmondták, hogy eleinte valószínűleg a nyomtatott ház tervezése és engedélyeztetése hosszabb folyamat lesz, hiszen annyira új még ez a terület, hogy szabványosítási kérdések is felmerülnek. A PERI-nek, világcég révén, olyan szabályozást kell alkalmaznia, ami egyaránt helytálló Észak- és Dél-Amerikában, valamint Európában vagy Ázsiában. Külön figyelmet kell majd fordítani a különböző típusú nyomtatók, a speciális követelményeknek is megfelelő beton minőségének szabályozására, továbbá az egyes országokban eltérő munkavédelmi előírásoknak való mindenkor megfelelőzésre. A különleges építéstechnika újfajta gondolkodást igényel mind a beruházó, mind pedig a kivitelező szintjén, hiszen a beton nyomtatáshoz kapcsolódó technológiák fejlesztése is még csak most zajlik. A cég egyébként már régóta rendelkezik a tisztán íves falak készítéséhez szükséges RUNDIFLEX zsaluzattal, mellyel kapcsolatban megemlézték, hogy ezek használata nem ritka. Tekintettel arra, hogy manapság is használatos a silók, támfalak, rámpák és aquaparkok esetében, ennek ellenére általában ezen épületek, építmények tervezői megállnak egyetlen fal vagy elem ívesítésénél. Várhatóan a 3D beton nyomtatás egyik erősségévé válhat a görbült térelemek költséghatékony nyomtatása, ennek alkalmazási gyakorisága viszont már építészeti kérdés lesz. Elképzelhető, hogy néhány évtizeden belül valamilyen külső hatásra a hagyományos zsaluval történő építést ki fogja szorítani a nyomtatás, azonban addig még egy elég hosszú átmeneti időszak következhet, amikor a két technológiát párhuzamosan fogják alkalmazni az építőiparban. Elmondták, hogy nincs kétségük afelől, hogy a jövőben egy napi szinten használt technológia lesz, már csak a megfelelő alkalmazási területet kell megtalálni hozzá.

### **3.3. Innovatív kutatási lehetőség az oktatásban**

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőanyagok és Magasépítés Tanszékén is érdeklődnek az innovatív technológia iránt, aminek köszönhetően tervek szerint a jövő évben beszerzésre kerül egy ilyen berendezés, kutatás-fejlesztési célból. Ehhez a 2018-1.3.1-VKE–Versenyképességi és Kiválósági Együttműködések pályázaton nyert támogatás nyújt lehetőséget, melyet a korszerű betonelemek anyagtudományi fejlesztésének céljából fognak felhasználni. Kiváló példa ez arra, hogy az iparban újonnan megjelenő trendekre és a piaci változásokra viszonylag rövid időn belül is képes reagálni az Egyetem. A hangsúlyos elméleti oktatás mellett rendkívül hasznos gyakorlati tapasztalatot is szerezhetnek egyetemi éveik alatt azon diákok, akik érdeklődnek a 3D beton nyomtatás iránt. Mindezt azért tartom fontosnak, mert hozzájárul ahhoz, hogy hallgatóként a későbbiekben lehetőségem legyen akár anyagtudományi, akár szerkezeti szempontól is tovább vizsgálódni és elmélyedni a témakörben.

## 4. Költségelemzés

Kutatásom során megvizsgálom különböző vállalkozók és cégek által beszerzett anyag- és munkaköltségek alapján a monolit vasbeton építéssel készült épületeket a 3D beton nyomtatóval előállított objektumokkal.

### 4.1. A vizsgálat módszere

A hagyományos és a 3D beton nyomtatással készült épületek költségkimutatásához 3 különböző virtuális modellt készítettem, amelyek tervezésekor törekedtem az egyenlő falhosszúságú épületek létrehozására, hiszen így az anyagmennyiség szempontjából nem mutatnak számottevő különbséget. Az első esetben csak egyenes, a második modellnél vegyes, míg a harmadiknál csak íves külső falú épületmodellt vettem fel, annak érdekében, hogy megvizsgáljam az íves zsaluzat használatából eredő többletköltség eshetőségét, és a beton nyomtatást különböző aspektusokban.

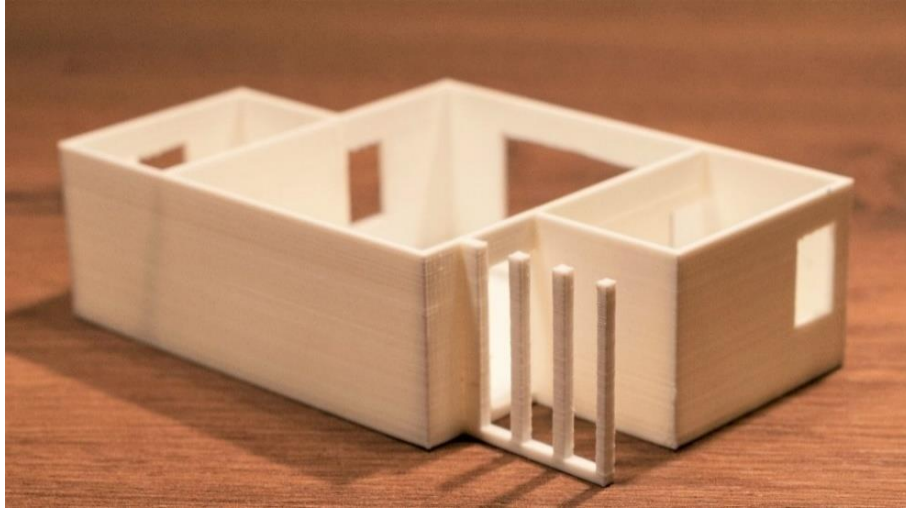
Számításaim során mindegyik modell megvalósítási költségeit a monolit vasbetonépítés és a Contour Crafting nyomtatási technikán felül a teljes falszélességű nyomtatás esetében is kiszámoltam. Modelljeimet műanyag 3D nyomtató segítségével, FDM technikát alkalmazva kézzelfoghatóvá tettem. (9. és 10. ábra). Ennek köszönhetően vizuális típusú emberként, sok esetben könnyebb volt átlátni a különböző geometriájú épületek sajátos elemeit, mint a digitális modellen keresztül.



9. ábra: Íves és vegyes külső falazatú 3D nyomtatott modellek (saját fotó)

A nyomtatás során PLA filamentet alkalmaztam, mellyel megfelelő részletezettségű valós eredményt kaptam az 1:100-as méretarányú modellek szemléltetésére. Az átláthatóság mellett a folyamatot is tanulmányoztam, valamint időt is mértem. Ezek alapján megállapítható, hogy

egy valós méretű épület nyomtatása és az analóg technikával készített kicsinyített másának létrehozása között csak néhány óra különbség van.



10. ábra: Kizárólag egyenes falazatból felépülő házmodell (saját fotó)

A 3D beton nyomtatás technikával készült épületek költségelei több részre bonthatók: élőmunka, anyagköltség a berendezés költségei és egyéb költségek, úgy, mint adminisztráció, falazat kitűzés, mérések, illetékek stb. Dolgozatomban a költséganalízis során a direkt és indirekt költségeket különválasztottam annak érdekében, hogy részletezni tudjam az esetleges költség-különbségeket a konklúzióban.

## 4.2. A monolit vasbeton házak építési költségei

Kutatásom kiindulópontja a hagyományos monolit vasbeton építési mód volt. Ennek tükrében mindhárom korábban bemutatott modell esetében részletekbe menően kiszámoltam a falazat építési költségeit a referencia adat érdekében.

Számításom során a geometriai értékeket az általam készített modelleknek megfelelően vettem fel, míg a különböző termékek költségértékeit az építőipari cégek piaci árai alapján határoztam meg, egyes esetekben pedig ezek átlagával számoltam tovább. A gyakorlati életben is találhatunk példát hasonló kialakítású egyenes és íves falakból álló monolit épületre, ezt mutatom be a 11. ábrán.

A modellezésem során alkalmazott beton anyagminőségét C20/25-ben határoztam meg, maximum 16 mm szemmagyságú adalékanyaggal és XC1-es környezeti kitételi osztállyal. Ezen felül feltételeztem, hogy az építési helyszín Budapest területén található, 5 km-en belül a betonüzemtől és a beszállítók telephelyétől. Vasalatként 2 réteg hegesztett síkhálót terveztem a falazatba, melyek közé négyzetméterenként 4 db S távtartóval számoltam. A nyílások

megfelelő biztonsággal történő áthidalásához elegendő volt a minimális gerendavasalással számolni, továbbá az oszlopok esetében is a minimális vasalás volt mértékadó. Ez a gerendák és az oszlopok esetében  $\phi 8$ -as hosszvasat, valamint  $\phi 6$ -os kengyelvasalást jelent tekintettel arra, hogy egyszintes épületről van szó, mely egy könnyűszerkezetes tetővel lesz fedve.



11. ábra: Gyakorlati példa egyenes és íves falszakaszokból álló monolit épületre  
(Forrás: PERI)

A monolit vasbetonépítésre vonatkozó kiindulási értékeket és költség adatokat a II/a mellékletben részleteztem. A zsaluzatokkal kapcsolatos adatokat a PERI cég szolgáltatotta (II/d melléklet), az általuk megadott árak közül az egyszerűbb épületnél kisebb, míg a bonyolultabb épületnél magasabb árral számoltam az átlagárhoz képest. Ehhez egy komplexitási tényezőt is felvettem, mely megmutatja, hogy a megadott tartományon belül milyen értékkel számoltam a napi bérleti díj és a kezelési költség esetén. A bérleti napok számának megadásakor a következő ütemezést feltételeztem:

- |   |       |
|---|-------|
| • zsaluzat építés és vasszerelés az első falszakaszhoz:             | 1 nap |
| • az első falszakasz betonozása:                                    | 1 nap |
| • az első szakaszba öntött beton szilárdulási fázisa a zsaluzatban: | 7 nap |
| • kizsaluzás és áthelyezés a következő pozícióba, majd betonozás:   | 1 nap |
| • a második szakasz szilárdulási fázisa a zsaluzatban:              | 7 nap |
| • zsaluzat elbontása, tisztítása:                                   | 1 nap |

---

Összesen: **18 nap**

Ezek alapján két ütemben történő építéssel kalkuláltam, ugyanis így több napot vesz igénybe a teljes folyamat, ellenben az egyszeri kezelési költségnek köszönhetően jelentős megtakarítást érhetünk el kevesebb zsaluanyag bérlésével. Az oszlopok esetében a kis elemszám miatt egyszerre történő betonozást feltételeztem, így csak 10 napos bérlési idővel számoltam.

Az íves RUNDIFLEX zsaluk építéséhez és bontásához a gyártó szerint elengedhetetlen a daru alkalmazása. Ebből következően egy daru bérlési díjával is számolnom kellett a szükséges napokra: a felállítás során teljes-, míg az áthelyezéskor és az elbontáskor fél-fél nap bérlési idővel kalkuláltam. A bérlést biztosító cég 2 óra kiszállási díjat is felszámol az üzemórákon felül, így összesen a 3 alkalommal történő kiszállás 6-tal növeli meg a fizetendő órák számát. Számításom során az is kiderült, hogy az íves zsaluzat beépítési ideje egységre vonatkoztatva fele annyi, mint az egyenes DOMINO zsaluk esetében és összességében a daruzásnak köszönhetően olcsóbb az íves elemek helyére illesztése és elbontása, mint az egyenes zsaluknál, amennyiben nem alkalmazunk darut az elhelyezéshez. Ennek eredményeképpen az utóbbiaknál is daru alkalmazása mellett döntöttem, így az építésre és elbontásra vonatkozóan ugyanakkora lett az egyenes elemek beépítési sebessége, mint az íveseké. Ez megmutatkozik daruzási többletköltség formájában is, ugyanakkor élő munkaerőt rövidebb ideig kell alkalmazni, ami lényegesen kedvezőbb zsaluzási árat eredményez, ezért választottam ezt az esetet a számításaimhoz. Az oszlopok szintén a PERI által gyártott LICO elemek segítségével öntötték formát.

A vasbetonszerkezet építéséhez tartozó anyag-, élőmunka-, és zsaluzási költségeket külön kezeltem. A becsült teljes építési költséget a számításomban is megjelenő, direkt (anyagköltség, élőmunka) és indirekt (bérlési díjak, gépköltség) tényezőkre bontva is értelmezhetjük. Az 1-es táblázat tartalmazza a számításom főbb lépéseit, amit a II/e mellékletben részletezem is. Ezen belül kitérnék az élőmunka költségre, melynek számításakor valós, az iparban is alkalmazott időtényezővel (12-15 óra) számoltam, amely megadja az egy köbméter vasbeton elkészítéséhez szükséges munkaórák számát. Ez magában foglalja a vasszerelést, a zsaluzat építést és bontást, valamint a betonozást is. Ezek alapján az élőmunkát a következőképpen áraztam be: az időtényezővel megszoroztam az épített falazat betonszükségletét köbméterben, majd az így kapott értéket a rezsioradíjjal is felszoroztam. Részsámításaim eredményeképp az alábbi táblázatot kaptam a monolit vasbeton modellek esetében:

Megnevezés	Modelltípus		
	Csak egyenes falak	Vegyes falak	Íves külső falak
Anyagköltség [Ft]	838 519	839 195	843 807
A zsaluzás anyagköltségei [Ft]	1 167 421	1 442 504	1 894 798
Élőmunka költség [Ft]	874 343	947 697	1 025 809
Falazat építési összeg [Ft]	<b>2 880 283</b>	<b>3 229 397</b>	<b>3 764 414</b>
Terület [m <sup>2</sup> ]	59,343	66,229	73,607
Egységár [Ft/m <sup>2</sup> ]	<b>48 536</b>	<b>48 761</b>	<b>51 142</b>

1. táblázat: A monolit építés költségelemeinek összefoglalása

Elemzésem alapján elmondható, hogy a legtöbb költséggel az íves falak építése jár, valamint ez, a komplexebb geometriából adódó dráguló tendencia megfigyelhető az épületek alapterületére vetített egységárak vizsgálatánál is.

### 4.3. A 3D nyomtatott technológiával kapcsolatos költségelemzések

Ha egy beton nyomtatót szeretnénk beszerezni, számos céggel találkozhatunk a piacon, amelyek a világon bárhová kiszállítják a megrendelt eszközt. Az egyik ilyen, európai viszonylatban is kiemelkedő cég a COBOD. Többek között ők készítették el Európa első 3D nyomtatott épületét 2017-ben, valamint a kontinensen egyedülálló módon, a cég által gyártott nyomtatóval Belgiumban elkészítették az első kétemeletes házat is 2020 júliusában. Én is ezt a nyomtatót választottam a költségszámításaimhoz, mivel a 4 hónapos gyártási idő után nemcsak kiszállítják az elkészült nyomtatót, hanem ezt követően megtanítanak a gép működtetésére is. A moduláris berendezés egyik legnagyobb előnye, hogy a piacon egyedülálló gyorsasággal képes nyomtatni cementkötésű alapanyagból 3 dimenziós termékeket. Gazdaságosságát pedig tovább fokozza, hogy megválaszthatjuk a számunkra szükséges nyomtató szerkezeti méreteit az adott projekt méreteihez igazodva, köszönhetően a 2,5 m-es egymáshoz illeszthető moduloknak, így elég a legkisebb, még éppen megfelelő eszközt megrendelnünk. Kutatásom alatt minden, a témával kapcsolatos kérdésemre készségesen válaszoltak, továbbá a cég informatív weboldala is segítségemre volt ([www.cobod.com](http://www.cobod.com)).

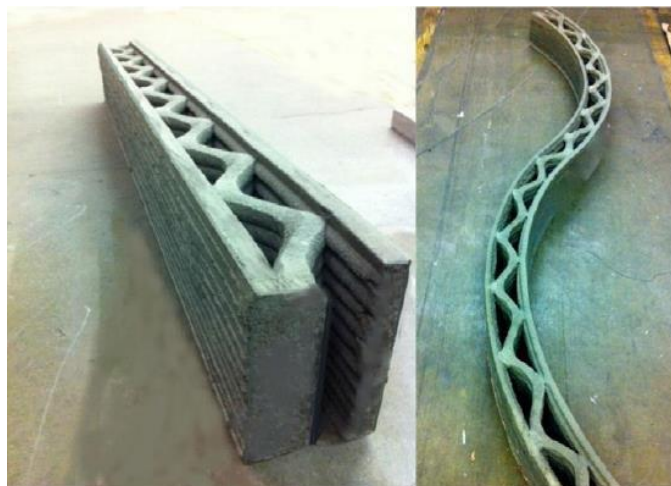
A folytatásban kiszámoltam a legnagyobb alapterületű modellem befoglaló méreteit, mely alapján a nyomtató vételárát is kalkuláltam. A végösszeg minden szükséges felszerelést tartalmaz, amely általában egy nyomtató üzemeltetéséhez szükséges, ezeket a III/a mellékletben részletezem. A helyszínre szállítás egy szabványos méretű tároló konténerben történik, ezután az összeszerelés általában 8 órát, míg a lebontás 4 órát vesz igénybe. A nyomtató elemeit daru segítségével tudják pontosan egymáshoz illeszteni, így összesen erre a

12 órára az emelőszerkezet bérleti díjával is kalkuláltam a gépköltségek részletezésekor. A berendezés áramfogyasztását a COBOD weboldalán elérhető kezelési útmutató segítségével határoztam meg, majd áraztam be a magyar energiadíjak szerint.

Jelen tanulmányban azt feltételeztem, hogy a beton nyomtatót 10 000 órás üzemidő után váltják le így amennyiben a beszerzési árat egyenletesen szeretnénk fedezni a bevételből, akkor a működése során óránként 16 589 Ft-os amortizációval kell számolnunk. A technológia kezdeti fázisának köszönhetően rövid időn belül elképzelhető, hogy fejlettebb gép kerül piacra és a versenyképesség fenntartása miatt érdemes lesz váltani az újabb verzióra. Tekintettel arra, hogy a 10 000 üzemórás működtetés általános építőipari gépekre igaz, várhatóan kevesebb ideig tudnak majd egy-egy eszközt működtetni gazdaságosan, ez pedig megnövekedett egyégárakat eredményezhet.

A falazat típusának kiválasztására meglehetősen sok lehetőségünk adódik, melyeket két fő csoportba lehet sorolni:

- Contour Crafting technikával nyomtatott falazat: általában több nyomtatott sávból álló, üreges falrendszer, elsősorban a hatékony anyagfelhasználás jellemzi, valamint a szerkezet sajátossága, hogy az extrudálással alkotott külső falrétegek közé akár még egy sávban nyomtathatunk szerkezeti megerősítést, ráadásul az üreges rész könnyen kitölthető hő- illetve hangszigetelő anyaggal.
- Teljes szerkezeti szélességű nyomtatás: ebben az esetben egyszer megy végig a nyomtató a fal mentén egy teljes szélességű réteg elkészítéséhez, előnye a rövidebb gyártási idő és a kisebb falszélesség ugyanakkora teherbírásnál, azonban jelenleg a nyomtatófej szélessége korlátot szab a kialakított elem vastagságának.



12. ábra: Contour Crafting technikával készült falszakasz (Forrás: Researchgate.net)



A nyílások feletti horizontális szakasz nyomtatására alátámasztás nélkül jelenleg nem képes a technológia. A vizsgált modellekben egyaránt találhatóak kisebb és nagyobb, akár 4 m-es nyílások is, melyek között ráadásul ívesek is vannak. Megfelelő szabványok hiányában és a nem szokványos kialakítások miatt a dolgozatban több bennmaradó acél zártszelvény egymás melletti elhelyezésével számoltam, mely elegendő ahhoz, hogy a nyomtatás utáni korai fázisban megtámassza a rákerülő beton rétegeket. A kézzel is elhelyezhető acél elemek nemcsak alátámasztást nyújtanak, de bennmaradó elemként az áthidaló teherbírásához is hozzájárulnak. Különböző helyzetekben többféle megoldás létezik erre, így alkalmazható bennmaradó előregyártott vasbeton áthidaló, fémlemez, fa palló, de ideiglenes alátámasztás is. Utóbbi elegendő lehet sok esetben a kisebb nyílásoknál, mivel a szilárdulás után a nyomtatott beton rendelkezhet kellő húzószilárdsággal a hajlítási erők felvételéhez. Vizsgálatom során anyagminőség szempontjából C50/60-as betont feltételeztem a nyomtatás során, azonban egyes esetekben nagyszilárdságú betonnal dolgozva a 100 MPa-t is elérheti a nyomtatott elem nyomószilárdsága 28 napos korban (Paul et al., 2018).

A nyomtatási idő nagymértékben függ az üresjárási időtől, ugyanis nem minden alakzatnál lehet egy folytonos vonallal végig járni az adott réteget és a gépezetnek meg kell szakítania a nyomtatást, míg a következő pozícióba nem kerül a fej. Ekkor beszélhetünk útvonal-optimalizálásról, amely a legtöbb nyomtatási stratégia alapját képezi. Általában a legrövidebb útvonal megkeresése a cél, de más szempontokat is figyelembe vehetünk a folyamat során (Zhang & Khoshnevis, 2013). Jelen esetben egy átlagos, 0,3 m/s sebességű nyomtatást feltételeztem, nem számoltam a nyomtatófej gyorsításához szükséges gyorsítási idővel és üresjárási idővel sem. A darupályán mozgó COBOD nyomtató ennél jóval nagyobb sebességre is képes lenne, azonban pont a fent említettek miatt alkalmaztam elemzésem során ezt, a cég által is javasolt alacsonyabb sebességet. A végleges kivitelezési idő több komponensből épül fel, melyek a következők: összeszerelési-, előkészítési- és tartalék-, nyomtatási- és elbontási idő. Az előkészítés a nyomtatófejek tisztítását, a helyszín és a gépezet ellenőrzését foglalja magába, melyre minden 7 óra nyomtatási idő után 1 órát kell számolni. A biztonsági idő általában a kezelő személyzet tapasztalatától és képességeitől függ, ezt egy +10%-os időtényezővel vettem számításba.

#### **4.3.1. A Contour Crafting technikával nyomtatott házak költségei**

A nyomtatott falazat gyártása során szinte bármilyen geometriai mintázat létrehozható belőle, ez ugyanúgy igaz a falazat belső részének megformázására is. (8. kép) Ezt az alakzatot

most egy szinuszgörbének feltételeztem, így a belső minta nyomtatási hosszát egy adott falszakaszon az alábbi képlet segítségével számoltam (Nerella et al., 2020):

$$L_{belső} = \int_0^L \sqrt{1 + \left( \left( \frac{\beta}{2} - b \right) \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \right) \cos^2 \frac{2\pi x}{\lambda}} dx$$

A fenti képletet a III/c mellékletben hossz-szoróként alkalmaztam, ami azt mutatja meg, hogy a belső nyomtatott sáv íves kialakítása miatt mennyivel hosszabb ahhoz képest, mintha a külső és a belső héjazat között egyenesen futna. A rétegvastagságot, a nyomtatott sáv szélességét és a nyomtatási sebességet a COBOD cég által ajánlott értékűre vettem fel.



13. ábra: Egy tartóoszlop nyomtatása (Forrás: worldarchitecture.org)

Az oszlopok esetében szintén különböző mintázatú és optimalizált változatokkal találkozhatunk, melyek nem szokványos megjelenést adnak a tartóelemnek (13. ábra).

Jelen számítás során egy négyzet alapú pillér méreteivel kalkuláltam, melynek középső magjában egy 90 fokkal elforgatott kisebb négyzet kerül nyomtatásra a merevség biztosítása érdekében. Ezzel a komplex mintával dolgozva megspórolhatunk valamennyi anyagot, viszont némileg több időt vesz igénybe a nyomtatás a teljes falszélességű technikához képest. Utóbbinál az oszlopok nyomtatási útvonalhossza rétegenként megegyezik az oszlop egyik oldalhosszával (20 cm). A teljes nyomtatási folyamat, valamint az előkészületek és a lebontás ideje alatt

alkalmazott munkaerő bérezését a 2020-as Építőipari Költségbecslési Segédlet mérnöki tevékenységre vonatkozó ajánlása alapján képeztem. Mivel a gép felállítása, elbontása, illetve annak üzemeltetése speciális technikai képességeket igénylő feladat, így a 3-szoros tevékenységszorítót alkalmaztam. A nyomtatási hossz meghatározásánál figyelembe vettem az áthidalók és a nyílások miatti úthossz-csökkenést is, valamint a kontúrnyomtatás sajátosságát is a falvégek lezárásánál. Számításaim alapján a teljes felhasznált anyagmennyiség kevesebb lett, mint a monolit vasbetonépítés esetében, köszönhetően a magasabb szilárdságú betonnak és a jobb teherelosztásnak.

Megnevezés	Modelltípus		
	Csak egyenes falak	Vegyes falak	Íves külső falak
Anyagköltség [Ft]	1 065 825	1 089 098	1 148 020
A 3D beton nyomtató költségei [Ft]	655 119	655 689	657 045
Élőmunka költség [Ft]	528 803	529 343	530 630
Falazat építési összeg [Ft]	<b>2 249 747</b>	<b>2 274 130</b>	<b>2 335 696</b>
Terület [m <sup>2</sup> ]	57,705	65,001	72,243
Egységár [Ft/m <sup>2</sup> ]	<b>38 987</b>	<b>34 986</b>	<b>32 331</b>

2. táblázat: A Contour Crafting nyomtatás költségelemeinek összefoglalása

#### 4.3.2. A teljes falszélességben nyomtatott házak költségei

Elmondható, hogy a legtöbb kiindulási adat egyezik a két nyomtatási technikánál, így a III. melléklet kapcsolódó táblázatai itt is érvényesek. Az érdemi különbség abból adódik, hogy ebben az esetben a nyomtató fejnek csak egyszer kell azon a falszakaszon végig mennie, ahol az előbb háromszor a több, kisebb szélességű nyomtatott sáv miatt. Ennek köszönhetően a nyomtatási idő és a munkaköltség is csökken az előző technikához képest, viszont a felhasznált anyagmennyiség nagyobb lesz, ez pedig a jelenleg még igen drága nyomtatható beton esetében meg tudja emelni a költségeket. Általánosságban elmondható, hogy ezt a nyomtatási technikát csak korlátozott szélességig lehet használni, továbbá az egyes vezetékek és csövek elhelyezése sem egyszerű feladat ilyen falazatba, utólagos munkálatokat igényel. Míg a szélesebb falvastagságú Contour Crafting nyomtatásnál 4 db, addig a keskenyebb, 15 cm-es falszélességben történő nyomtatásnál 3 db áthidaló zártszelvény elhelyezésével számoltam nyílásonként. A részletes költségek a III/f. mellékletben találhatóak, a különböző tényezők szerinti bontás pedig a 3. táblázatban található

Megnevezés	Modelltípus		
	Csak egyenes falak	Vegyes falak	Íves külső falak
Anyagköltség [Ft]	1 232 689	1 249 363	1 295 982
A 3D beton nyomtató költségei [Ft]	419 720	419 757	420 276
Élőmunka költség [Ft]	305 258	305 292	305 784
Falazat építési összeg [Ft]	<b>1 957 666</b>	<b>1 974 412</b>	<b>2 022 042</b>
Terület [m <sup>2</sup> ]	59,343	66,229	73,607
Egységár [Ft/m <sup>2</sup> ]	<b>32 989</b>	<b>29 812</b>	<b>27 471</b>

3. táblázat: A teljes falszélességű nyomtatás költségelemeinek összefoglalása

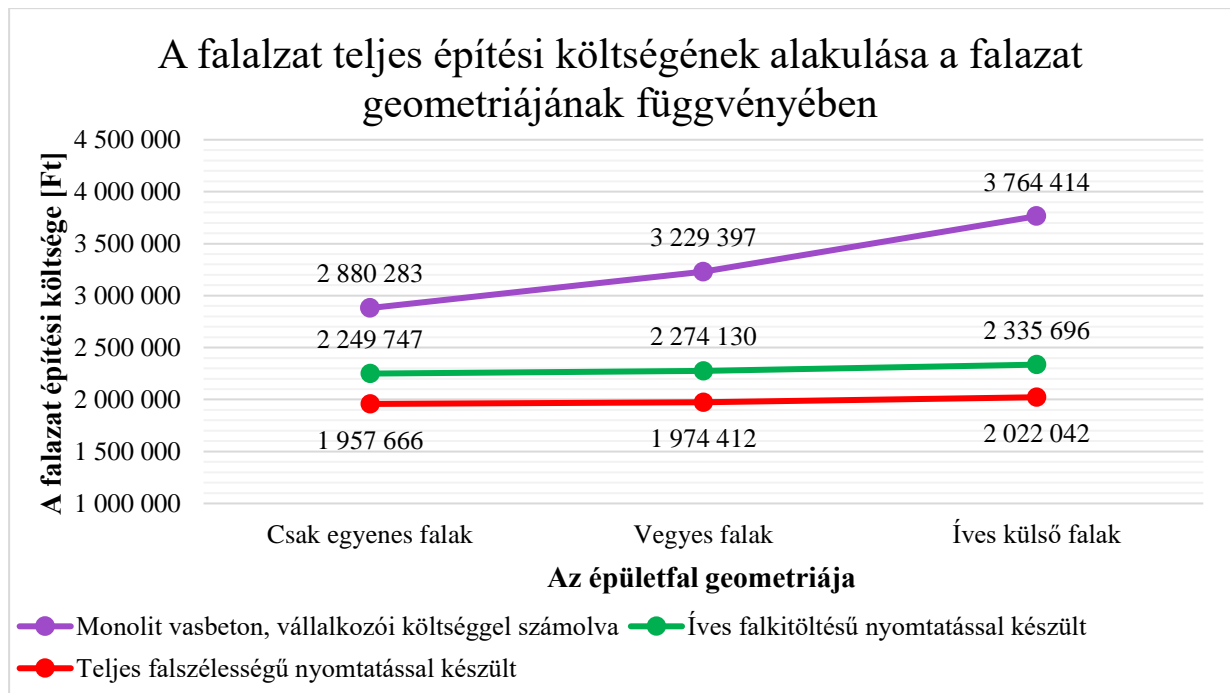
## 5. Összegzés

### 5.1. Kutatási eredmények

Dolgozatom megírásában az is motivált, hogy az egyes, 3D beton nyomtatással foglalkozó cégek tájékoztatási felületein eltérő, egymásnak sokszor ellentmondó mértékű költségmegtakarítást említenek. Arra kerestem választ, hogy az automatizált technológia alkalmazásával, a vizsgált épületmodellek viszonylatában milyen fokú költségmegtakarítás érhető el, esetleg többletköltség merül fel. Továbbá szem előtt tartottam, hogy a tömeges gyakorlati alkalmazásnak egyik kritikus tényezője a piacvezető cégek véleménye és hozzáállása az új technológiához, mert akkor fogják csak széles körben alkalmazni, ha súlyosbodik a munkaerőhiány, vagy ha kétséget kizáróan gazdaságosabb lesz. Felmerült számos tényező, amely jelenleg még hátráltatja a 3D beton nyomtatás széles körű elterjedését, ezek a következők (Zhang et al., 2019):

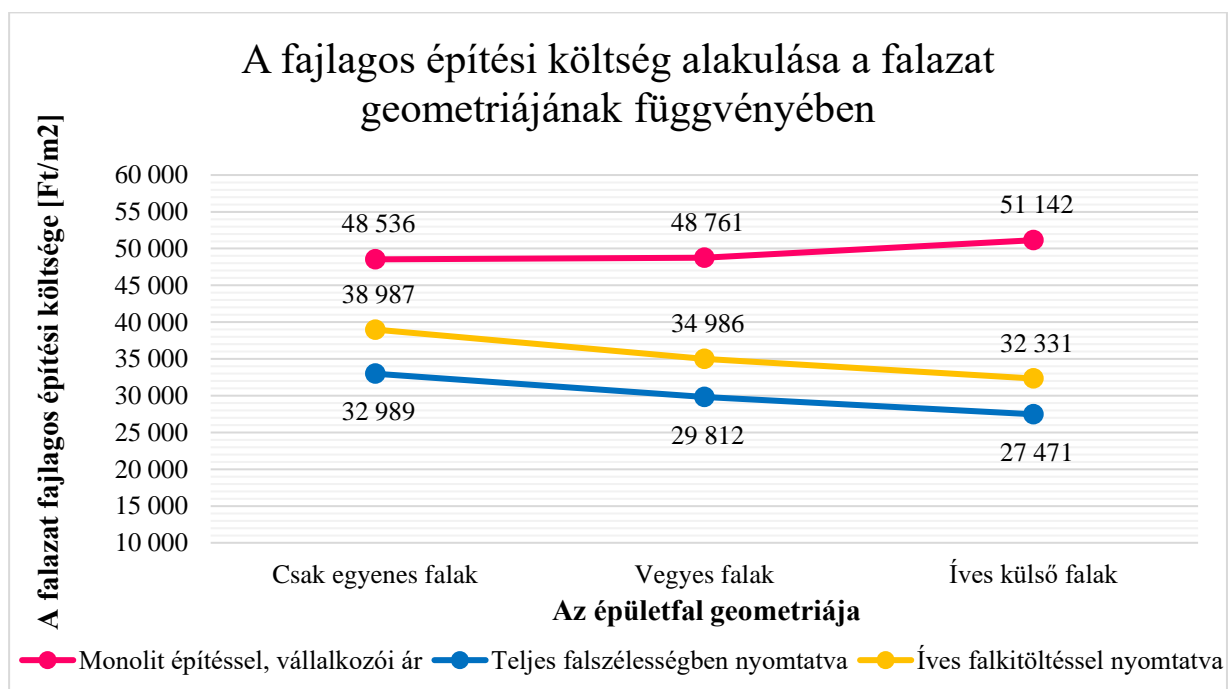
- a cégek még nem látják pontosan, hogy mire is tudnák használni a technológiát
- az ilyen építéstechnológiával megvalósult projektek minimális száma
- a 3D nyomtatással kapcsolatos szabványok hiánya
- a beruházási költségek pontos ismerete és monitorozása egy ilyen épületnél

Kevés az olyan tanulmány, ami részletesen lebontott költségelemekkel támasztja alá a 3D nyomtatás, mint gyártási folyamat hatékonyságát. Ilyen szempontból is hiánypótló ez a dolgozat, főként a hazai piac tekintetében, ugyanis egy családi ház vagy egy nyaraló esetében is helytálló a bemutatott számítás.



14. ábra: Becsült építési költségek a falazat geometriájának függvényében

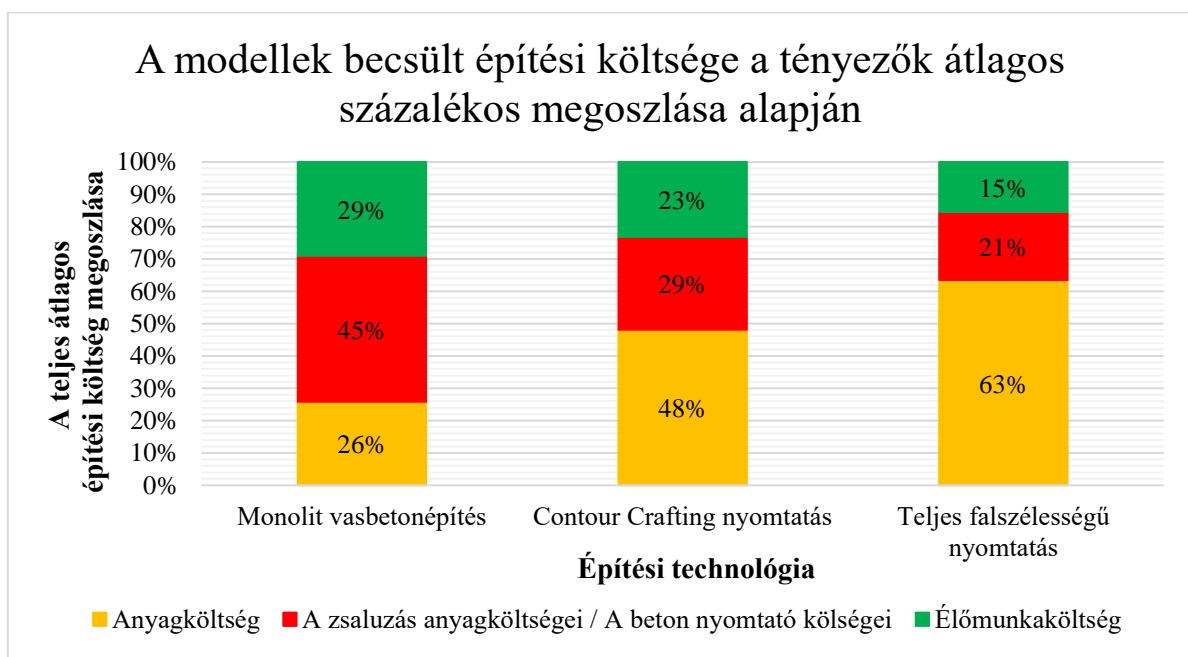
A kutatás eredményeként az is megállapítható, hogy esetemben az íves geometriával rendelkező házak közel azonos falhossz mellett nagyobb alapterülettel rendelkeznek, azzal szemben, mint ha csak egyenes falakat alkalmaznánk. Ezek alapján a 14. ábra prezentálja a teljes-, míg a 15. ábra az alapterületre vetített fajlagos költségeket.



15. ábra: A fajlagos építési költségek a falazat geometriájának függvényében

Jelen kutatás épületmodelljei alapján elmondható, hogy monolit vasbetonépítési technológiával és azonos betonmennyiséggel dolgozva az egyre több íves falazattal rendelkező

épületek kivitelezése arányosan megemeli a fajlagos négyzetméterárakat, ezzel szemben a nyomtatási technológiáknál fordított jelenség tapasztalható, azaz a közel azonos beruházási költség mellett nagyobb hasznos alapterületet vehetünk birtokba. A 16. és 17. ábrán az látható, hogy a monolit vasbetonépítéstől a Contour Crafting nyomtatáson keresztül a teljes falszélességű rétegenkénti kivitelezésig haladva egyre csökken az eszközök- és az előmunka költsége és százalékos aránya, köszönhetően a rendkívül gyors, zsaluzatmentes építkezésnek. Kiemelném, hogy bár a falazatot gazdaságosabb beton nyomtatással kivitelezni, azonban az innovatív technikával történő szerkezetépítésnél egyéb járulékos költségek is jelentkezhetnek a későbbi szakági munkálatokkal kapcsolatban, amely további vizsgálatokat igényel.

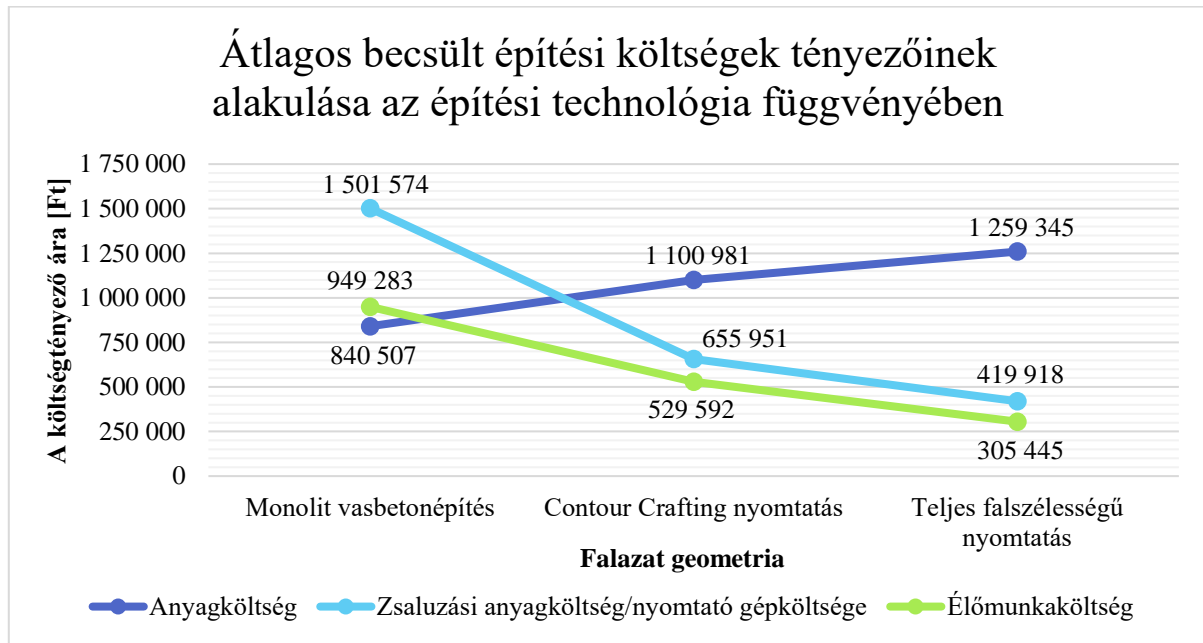


16. ábra: A becsült építési költségek átlagos, tényezők szerinti megoszlása

A hagyományos technológia esetében 18 nappal számoltam a falazat teljes építési időre vonatkozóan, ezzel szemben az innovatív, automatizált technológiával akár 2 nap alatt elvégezhető ugyanaz a művelet. Tehát kijelenthető, hogy ilyen körülmények között a beton nyomtatás közel tízszer gyorsabb megvalósítást tesz lehetővé, geometriától függetlenül. Megjegyzem, hogy a gyakorlat során az látható, hogy az íven való nyomtatás esetében valamennyivel lassabban mozog a nyomtatófej az egyenletes anyagáramlás biztosítása miatt. Ebből következően az építési időt is megnövelheti, azonban jelen dolgozatban egyenletes nyomtatási sebességet feltételeztem, mivel az előbbi feltevés gyakorlati igazolásához valós kísérletre lenne szükség.

A 17. ábra azon tendenciák felvázolására szolgál, miszerint a beton nyomtatás költségei a zsaluzás elhagyásának hatására és a kevesebb szükséges élőmunkának köszönhetően

csökkennek. Emelkedés tapasztalható viszont a felhasznált beton költségeiben az építőanyaggal szemben támasztott magas követelmények miatt. A későbbiekben tehát érdemes főként az anyagtechnológia ellátási rendszerét fejleszteni a fokozott hatékonyság érdekében. Ezen felül további teljesítmény növekedésérhetünk el azzal is, ha gyorsabb nyomtatókat tudunk kifejleszteni és alkalmazni a jövőben.

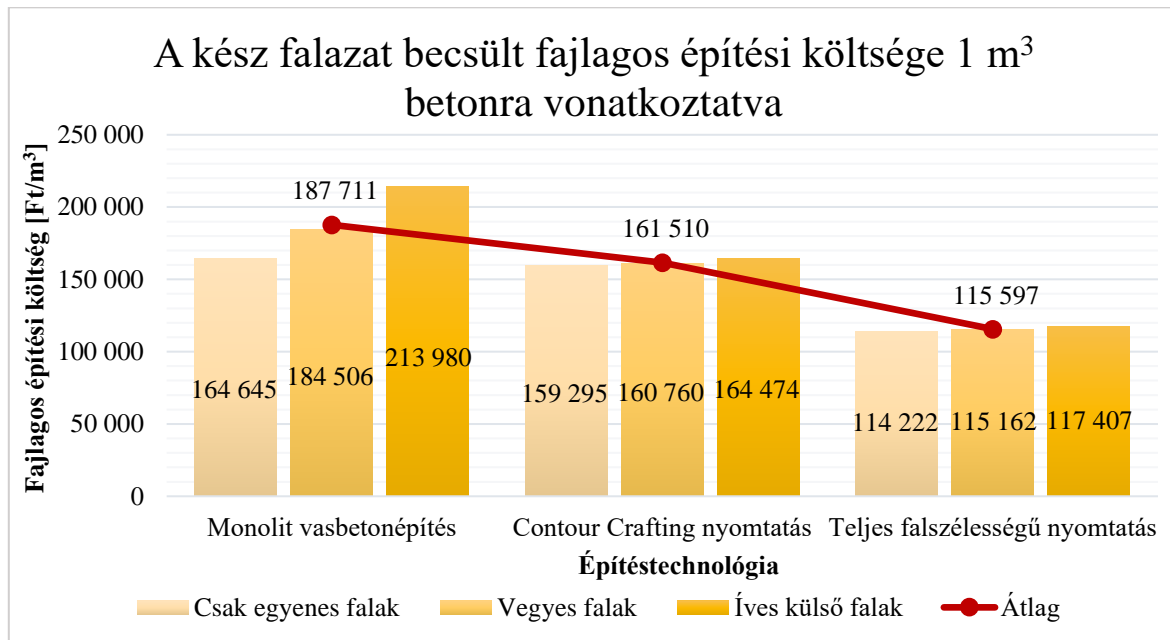


17. ábra: Átlagos becsült építési költségek tényezőinek alakulása az építési technológia függvényében

A 18. ábrán azt láthatjuk, hogy fajlagosan a legdrágább az íves külső falakból álló épület megépítése monolit vasbeton technológiával, míg a legolcsóbb az egyenes falazat kivitelezése teljes falszélességű beton nyomtatott technológiával. Ezt az ábrát azért is tartom fontosnak, mert a későbbiekben a 3D beton nyomtatással készülő építmények általános költségbecslésének kidolgozását is hasonló egységáras rendszerben lehet majd elvégezni, valamint a továbbiakban ilyen irányban is folytatódhat a kutatásom. Az aktuális, 2020-as kiadású Építőipari Költségbecslési Segédlet egy 114 600 Ft/m<sup>3</sup> – 118 100 Ft/m<sup>3</sup>-ig terjedő tartományban adja meg a C20/25-ös betonminőségű, maximum 4 méter magas falazatok építési költségét. Ezt összevetve az általam kapott eredményekkel általánosan elmondható, hogy a piaci árak sok esetben meghaladják a normakönyvben található adatok alapján becsült építési költségeket. A legtöbb helyzetben azonban a tényleges piaci ár realitásabb képet mutat az adott szektorról, ezért kalkuláltam ilyen módon a költségeket.

A mostani trendeket figyelembe véve a 3D beton nyomtatás egy egységre jutó fejlesztési és amortizációs költsége a jövőben várhatóan egyre kevesebb lesz, míg a munkaerő egyre

drágább. Ebből következően a későbbiekben az emberi erőforrás hiányát is képesek lehetünk a 3D beton nyomtatás alkalmazásával kompenzálni. Kutatásomból az is kiderült, hogy ehhez közel harmadannyi élőmunka költség társul, mint a monolit vasbetonépítéshez (16. ábra), a kész termék pedig ugyanolyan, vagy jobb minőségű is lehet.



18. ábra: 1 m<sup>3</sup> betontermék fajlagos előállítási költsége technológiák szerint

Az elemzés során bebizonyosodott, hogy egy kisléptékű épület esetében automatizált technológia alkalmazásával a monolit vasbeton építési módhoz képest számottevően kevesebb idő és költség ráfordításával is felépíthető a falazat (14. ábra). A jövőt ma már az építőipar digitalizációjának felgyorsulása és a gyors építési technológiák jelentik, amelyek a hatékonyság fokozásával is társulnak. Ennek megfelelően a 3D nyomtatás, az anyagok és az energia rövid ellátási láncával párosulva, teljes mértékben összhangban áll a harmadik ipari forradalom főbb jellemzőivel.

Kutatásom során nemcsak egy általános költségmodellt készítettem a kisléptékű 3D beton nyomtatott épületekhez, hanem több különböző modell segítségével igazolni is tudtam a technológia gazdaságosságát. A számításaim és a költségelemzésem alapján igazolást nyert a hipotézisem, miszerint gazdaságosabb a beton nyomtatással megépíteni az épületek falazatát. Míg az egyenes falaknál ez 22-32 %-os megtakarítást jelent, addig az íves geometria esetében már akár 38-47 %-os költségcsökkenést is realizálhatunk. A korábbi feltevessel összhangban a 14. ábrából az is kiderül, hogy a nyomtatás során gyakorlatilag nem jelent többletköltséget az íves elemek megalkotása, így egy közel állandó végösszeget láthatunk a különböző geometriájú, de azonos technikával készült nyomtatott épületek esetében.



## 5.2. A beton nyomtatásban rejlő potenciálok, jövőkép

Ahhoz, hogy a nagyobb léptékű beruházások esetében hatékony legyen a beton nyomtatás, még számos fejlesztés és kutatás szükséges ezen a területen, a folyamatnak rengeteg próbát kell kiállnia, amíg egy olyan elfogadott eljárássá válik, amely a világ építőiparát átformálhatja. Valószínűleg a nagyobb vízépítési műtárgyak és tornyok esetében korlátozottan, acél megerősítéssel alkalmazható majd a technológia, így a közeljövőben a legnagyobb felvevőpiaca a lakó- és középület-építés területe lehet. Ilyen tekintetben jelenleg az okozza a problémát, hogy adott helyszínen nem tudunk teljes házakat kinyomtatni, azok minden tartozékával együtt, mivel a technológia egyelőre csak a falazat építésére kínál megbízható alternatívát. A vízszintes szerkezetek, mint például födémek és áthidalók beépítési helyükön történő nyomtatása is nyitott kérdés. Olyan terület, ami sok kutató érdeklődését felkeltette, jelenleg is számos kísérlet tárgyát képezi (Buswell et al., 2018) és amivel mindenképpen érdemes foglalkozni a közeljövőben.

Ha a jövőben képesek leszünk BIM rendszerbe integrálni a 3D beton nyomtatást, feltételezhetően további javulás érhető el az építési költséghatékonyság tekintetében. Számos utómunka elhagyható, ha előre tudjuk tervezni a gépészeti és elektromos vezetékek pontos helyzetét a falazatokban. Számatalan különböző típusú egyenes vagy íves szakaszokból álló üreges falkitöltéssel lehet találkozni a szakirodalomban, emiatt viszont felmerül a kérdés, hogy melyik lehet az optimális megoldás egy adott feladatra. A nyomtatott technológiga egyik fő erőssége a zsaluzott vasbetonnal szemben, hogy kevesebb anyagfelhasználással is elérhető a kívánt szilárdság annak köszönhetően, hogy csak oda nyomtatnak betont, ahol arra statikailag vagy egyéb szempontból szükség van. Ugyanis, ha ismerjük egy elem belső feszültség eloszlását, akkor a tervezés során elhanyagolhatjuk azokat a szerkezeti részeket, ahol nagyon kis feszültség keletkezik, ilyen elven alapul a generatív tervezés is. Ebből következően a későbbi kutatások során a különböző falazat kitöltési minták szilárdsági és anyagfelhasználási arányának kísérleti vizsgálatával és optimalizálásával is célszerű foglalkozni.

Többek között az előregyártás is történhet az építkezés helyszínén a 3D beton nyomtató segítségével, amennyiben képesek vagyunk megfelelő és közel állandó körülményeket teremteni a folyamat során. Ilyen technika alkalmazása akkor válhat szükségessé, amikor csak kis organizációs terület áll rendelkezésre az építkezés helyszínén, és kevés hely van az előregyártott elemek tárolására. Következésképpen moduláris építkezés is megvalósítható 3D nyomtatott elemekből, melynek hatékonyságát szintén érdemes megvizsgálni a továbbiakban.

## 6. Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani mindazoknak, akik segítettek és támogatták munkámat.

Külön köszönöm:

- konzulensemnek, Dr. Vidovszky Istvánnak, a TDK dolgozat elkészítésében nyújtott szakmai segítségét és hasznos tanácsait
- Krepler Benedek fejlesztőmérnöknek és Török Mihály ügyvezető igazgatónak a Délmagyarországi Vasbetonipari Kft. részéről az interjúban elmondott hasznos információkat
- Boros Bálint belső értékesítő mérnöknek, Hegedűs Zoltán belső értékesítési vezetőnek és Szarka András tervezőmérnöknek (zsaluzat) a PERI részéről az interjúban elmondott hasznos információkat
- Dr. Balázs L. György egyetemi tanárnak, a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszékén történő 3D beton nyomtató beszerzésével kapcsolatos információkat

Végül szeretném megköszönni családom és barátaim támogatását a tanulmány elkészüléséhez.

## 7. Felhasznált irodalom

- Agarwal, R. – Sridhar, M. – Chandrasekaran, S.: *Imagining construction's digital future*, 2016.06.24. <https://www.mckinsey.com/industries/capital-projects-and-infrastructure/our-insights/imagining-constructions-digital-future> (2020.11.02.)
- Apis Cor weblap, <https://www.apis-cor.com> (2020.11.02.)
- Bertollini, V.: *Here's What Building the Future Looks Like for a 10-Billion-Person Planet*. 2018.08.24. <https://www.redshift.autodesk.com/building-the-future> (2020.11.02.)
- Bodnár Zsolt: *Bemutatták a világ első faluját, amely kizárólag 3D-ben nyomtatott házakból áll*. 2019.12.12. <https://www.qubit.hu/2019/12/12/bemutattak-a-vilag-elso-falujat-amely-kizarolag-3d-ben-nyomtatott-hazakbol-all> (2020.11.02.)
- Bos, F. – Wolfs, R. – Ahmed, Z. – Salet, T., 2016, *Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing*
- Buswell, R. A. – Leal de Silva, W. R. – Jones, S. Z. – Dirrenberger, J., 2018, *3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research*.
- Cherdo, L.: *The 23 Best Construction Printers in 2020.*, 2020.04.24., <https://www.aniwaa.com/buyers-guide/3d-printers/house-3d-printer-construction> (2020.11.02.)
- Cobod weblap, *Gantry Versus Robotic Arm Based 3D Construction Printers*. <https://www.cobod.com/gantry-versus-robotic-arm-systems> (2020.11.02.)
- Constructions 3D weblap, <https://www.constructions-3d.com> (2020.11.02.)
- Cybe weblap, <https://www.cybe.eu> (2020.11.02.)
- D-Shape weblap, <https://www.d-shape.com> (2020.11.02.)
- Hager, I. – Golonka, A. – Putanowicz, R., 2016, *3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction*.
- Hull, C. W., 1986, *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*. US4575330 A
- Khoshnevis, B., 2004 *Automated construction by contour crafting-related robotics and information technologies*.
- Lim, S. – Buswell, R. A. – Le, T. T. – Austin, S. A. – Gibb, A. G. F. – Thorpe, T., 2012, *Developments in construction-scale additive manufacturing processes*

- Magyar építéstechnika weblap, *ÉVOSZ: Az építőipari munkaerőpiacról.*, 2020.09.28., <https://www.magyarepitestechika.hu/index.php/iparagi-hirek/evosz-az-epitoipari-munkaeropiacrol> (2020.11.02.)
- McKinsey weblap, *The Construction Industry is Ripe for Disruption Infographic.*, 2016, <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Capital%20Projects%20and%20Infrastructure/Our%20Insights/Imagining%20constructions%20digital%20future/The-construction-industry-is-ripe-for-disruption-infographic.ashx> (2020.11.02.)
- Nerella, V. N. – Krause, M. – Mechtecherine, V., 2020, *Direct printing test for buildability of 3D-printable concrete considering economic viability.*
- Paul, S. C. - van Zijl, G. P. A. G. – Tan, M. J. – Gibson, I., 2018, *A review of 3D concrete printing systems and material properties: current status and future research prospects.*
- PERI weblap, <https://www.peri.com/en/media/press-releases/peri-group-acquires-stake-in-cobod.html> (2020.11.02.)
- Sobotka, A. – Pacewicz, K., 2016, *Building Site Organization with 3D Technology in Use.*, Procedia Engineering 161 407-413
- Yang, H. – Chung, J.K.H. – Chen, Y. – Li, Y., 2018, *The cost calculation method of construction 3D printing aligned with internet of things.*
- Zhang, J. – Khoshnevis B., 2013, *Optimal machine operation planning for construction by Contour Crafting*
- Zhang, X. – Li, M. – Lim, J. H. – Weng, Y. – Tay, Y. W. – Pham, H. – Pham, Q. C., 2018, *Large-scale 3D printing by a team of mobile robots.*
- Zhang, X. – Flood, I. – Zhang, Y. – Moud, H. I. – Hatami, M., 2019, *A Cost Model to Evaluate the Economic Performance of Contour Crafting.*

## 8. Ábrák jegyzéke és forrásai

Címlapon szereplő kép: COBOD weblap, <https://www.cobod.com/kampc>

1. ábra: ÉVOSZ, <https://magyarepitessteknika.hu/index.php/iparagi-hirek/evosz-havi-osszefoglalo-a-koronavirus-jarvany-masodik-szakaszanak-epitoiparra-gyakorolt-hatasa>
2. ábra: [https://hu.wikipedia.org/wiki/Everett\\_Rogers](https://hu.wikipedia.org/wiki/Everett_Rogers)
3. ábra: SWOT analízis
4. ábra: Qubit, <https://www.qubit.hu/2019/12/12/bemutattak-a-vilag-első-faluját-amely-kizarólag-3d-ben-nyomtatott-hazakból-all>
5. ábra: Baumit, <https://www.baumit.at/bauminator>
6. ábra: Leolane, <http://www.leolane.com/blog/3d-printing-in-construction-building-more-than-buildings>
7. ábra: Délmagyarországi Vasbetonipari Kft. saját fotó
8. ábra: PERI, <https://www.peri.com/en/media/press-releases/peri-builds-the-first-3d-printed-residential-building-in-germany.html>
9. ábra: Saját fotó, Íves és vegyes külső falazatú 3D nyomtatott modellek
10. ábra: Saját fotó, Csak egyenes falazatból felépülő házmodell
11. ábra: PERI, <https://www.peri.hu/termek/zsaluzatok/falzaluzatok/rundflex-ives-falzaluzat.html>
12. ábra: Researchgate.net, [https://www.researchgate.net/figure/A-section-of-wall-constructed-using-Contour-Crafting-Image-adopted-from-8\\_fig1\\_323863227](https://www.researchgate.net/figure/A-section-of-wall-constructed-using-Contour-Crafting-Image-adopted-from-8_fig1_323863227)
13. ábra: Worldarchitecture.org, <https://worldarchitecture.org/article-links/ecgcf>
14. ábra: Becsült építési költségek a falazat geometriájának függvényében
15. ábra: A fajlagos építési költségek a falazat geometriájának függvényében
16. ábra: A becsült építési költségek átlagos, tényezők szerinti megoszlása
17. ábra: Átlagos becsült építési költségek tényezőinek alakulása az építési technológia függvényében
18. ábra: 1 m<sup>3</sup> betontermék fajlagos előállítási költsége technológiák szerint

A dolgozatban szereplő összes táblázat saját szerkesztés eredménye.

## **Mellékletek**

I. Melléklet: a költségbecsléshez készített modellek adatai:

**A különböző modellek geometriai adatai:**

Geometriai adat	A modellek külső falzatának geometriája		
	Egyenes	Egyenes és íves	Íves
Teljes falhossz <sup>1</sup> [m]	44,718 (44,568)	44,900 (44,800)	45,614 (45,429)
Falvastagság <sup>1</sup> [m]	0,150 (0,200)	0,150 (0,200)	0,150 (0,200)
Egyenes falhossz <sup>1</sup> [m]	44,718 (44,568)	31,390 (31,290)	9,973 (9,873)
Íves falhossz <sup>1</sup> [m]	0	13,510	35,641 (35,616)
Alapterület [m <sup>2</sup> ]	59,343 (57,705)	66,229 (65,001)	73,607 (72,243)
Falmagasság [m]	3,000	3,000	3,000
Oszlopok száma [db]	3	3	3
Négyzet alapú oszlopok oldalhossza [m]	0,200	0,200	0,200
Ablak- és ajtónyílások teljes hossza [m]	10,236	10,470	11,179
Ablak- és ajtónyílások kerülete [m]	47,472	47,940	49,358
Ablak- és ajtónyílások összterülete [m <sup>2</sup> ]	21,083	21,569	23,121
Összes ajtómagasság [m]	6,600	6,600	6,600
Összes ablakmagasság [m]	6,900	6,900	6,900

<sup>1</sup> A zárójelben lévő értékek a Contour Crafting technikával történő nyomtatásra vonatkoznak az eltérő falvastagság miatt

II. Melléklet: a monolit vasbetonépítéssel kapcsolatos költség számítások

**a) Monolit építés költség számítása során felvett adatok:**

Megnevezés	Érték
Veszteségtényező	1,01
Vasszerelés veszteségtényezője	1,04
Egyenes falú ház komplexitási tényező	0,25
Vegyes falú ház komplexitási tényező	0,5
Íves falú ház komplexitási tényező	0,75
Zsalu bérleti napok száma	18
Gerenda vasalás túlnyúlás [m]	0,15

**b) A monolit építéshez tartozó költségelemek forrásmegjelöléssel**

Költségadat	Nettó ár	Forrás
Beton ár [Ft/m <sup>3</sup> ]	29 200	Frissbeton Kft. (budapesti ár)
Pumpálás ár [Ft/óra]	23 000	Frissbeton Kft. (budapesti ár)
Kiszállítás [Ft/m <sup>3</sup> ]	4 500	Frissbeton Kft. (budapesti ár)
Behajtási engedély [Ft/m <sup>3</sup> ]	1 000	Frissbeton Kft. (budapesti ár)
Hegesztett síkháló ár [Ft/m <sup>2</sup> ]	446	Euronorm Group Builder Kft.
S110 távtartó ár [Ft/db]	300	Vas-Fémker Kft.
ϕ 8-as betonacél ár [Ft/fm]	75	Euronorm Group Builder Kft.
ϕ 6-os betonacél ár [Ft/fm]	48	Euronorm Group Builder Kft.
Zsaludeszka ár [Ft/fm]	223	Székely fatelep
Rezsióradíj [Ft]	4165	ÉVOSZ
8 tonnás autódaru bérleti díja [Ft/óra]	13 000	Győrfi Daru Építőipari Gépesítő Kft.
Acél zártszelvény kiszállítási díj [Ft]	15 000	Jellemző ár több internetes forrás alapján, Budapest területén

**c) A vasbetonépítés élőmunka költségének számításához szükséges adatok**

Megnevezés	Külső falazat típusa	Érték	Forrás
Teljes munkaórák száma a vasbetonépítésnél (vasszerelés, zsaluzás, betonozás)	Egyenes	12	Az egyik legnagyobb magyarországi építőipari cég szerkezetépítő vezetőjének információja alapján.
	Egyenes és íves	13	
	Íves	14	

**d) PERI által megadott zsalu bérleti árak**

		Egyenes zsaluzat ár [Ft/m <sup>2</sup> ]	Íves zsaluzat ár [Ft/m <sup>2</sup> ]	Pillérzsaluzat ár [Ft/készlet]
Napi bérleti díj	Minimum	190	360	1 900
	Maximum	270	520	2 500
Kezelési költség	Minimum	1 700	3 000	16 000
	Maximum	2 100	3 300	18 000



e) A monolit vasbeton modellek részletes költség számítása

Költségelem	Megnevezés	A külső falazat geometriája		
		Egyenes	Egyenes és íves	Íves
<b>Beton anyagköltség</b>	Faltérfogat nyílások nélkül [m <sup>3</sup> ]	20,123	20,205	20,526
	Nyílások térfogata [m <sup>3</sup> ]	3,162	3,235	3,468
	Oszlopok térfogata [m <sup>3</sup> ]	0,360	0,360	0,360
	Teljes beton szükséglet [m <sup>3</sup> ]	17,494	17,503	17,592
	Pumpálás ára [Ft]	92 000	92 000	92 000
	A nyersanyag és a helyszínrre szállítás költsége [Ft]	607 037	607 352	610 454
	<b>Beton anyagköltség [Ft]</b>	<b>699 037</b>	<b>699 352</b>	<b>702 454</b>
<b>Vasalás anyagár</b>	Falvasalás [kg]	539,9	541,3	547,2
	Falvasalás [Ft]	115 873	116 154	117 421
	Oszlopvasalás [kg]	22,4	22,4	22,4
	Oszlopvasalás [Ft]	4 695	4 695	4 695
	Gerendavasalás [kg]	17,2	17,6	18,7
	Gerendavasalás [Ft]	3 914	3 994	4 237
	<b>Összes vasalás anyagár [Ft]</b>	<b>139 482</b>	<b>139 843</b>	<b>141 353</b>
<b>Zsaluzás anyagköltség</b>	Egyenes zsaluzat [Ft]	748 579	568 787	194 474
	Íves zsaluzat [Ft]	0	448 667	1 268 641
	Pillérzsaluzat [Ft]	111 000	117 000	123 000
	Szükséges zsaludeszkázat [fm]	98	99	102
	Zsaludeszka ár [Ft]	21 842	22 050	22 683
	Íves zsaluzat építési, áthelyezési és bontási idő [óra]	16	16	16
	<b>Összesen a darubérlés díja [Ft]</b>	<b>286 000</b>	<b>286 000</b>	<b>286 000</b>
Bérleti díjak és deszkázat összesen [Ft]	<b>1 167 421</b>	<b>1 442 504</b>	<b>1 894 798</b>	
<b>Élőmunka költség</b>	A zsaluzás, betonozás és vasszerelés élőmunka költségei összesen.	<b>874 343</b>	<b>947 697</b>	<b>1 025 809</b>

III. Melléklet: a 3D beton nyomtatással kapcsolatos költség számítások

a) A 3D beton nyomtató részletes beszerzési költségei:

Megnevezés	Ár (EUR)	Ár (Ft)*
9,57 m * 14,65 m * 3,09 m nyomtatási térrel rendelkező nyomtató (12,50 m * 15,16 m * 5,05 m-es felállításhoz szükséges térrel)	346 000	126 290 000
Duomix Connect pumpa 20 m csőhosszal	48 000	17 520 000
A nyomtatófej tangenciális vezérlése	24 000	8 760 000
3 m <sup>3</sup> -es beton siló	18 000	6 570 000
Összeszerelő- és karbantartó készlet	6 000	2 190 000
1 heti oktatás a nyomtató használatával kapcsolatban	6 000	2 190 000
Nyomtató készlet	3 500	1 277 500
Összeszerelés a megrendelő területén	3 000	1 095 000
<b>Összesen:</b>	<b>454 500</b>	<b>165 892 500</b>

\*365,00 HUF/EUR árfolyamon számolva.

**b) A nyomtatáshoz használható beton részletezése:**

Nyomtatható betonhoz szükséges alkotók	Ára [Ft/m <sup>3</sup> ]
C 50/60 szilárdságú beton	45 000
Adalékanyag szemmagyság $d_{\max}$ 24-ről $d_{\max}$ 8-ra történő változtatása	1 000
Száladagolás munkadíj	3 000
Szálkeverék alapanyagdíj (Forrás: SIKA)	2 000
Adalékszer (8 kg/m <sup>3</sup> )	9 600
Összesen:	<b>60 600</b>

**c) A beton nyomtatás költségszámítása során felvett értékek**

Megnevezés	Érték
Veszteségtényező	1,01
Rétegvastagság [m]	0,02
Nyomatott sáv szélessége [m]	0,04
Áthidaló felfekvési hossz [m]	0,15
Zártszelvény (100*50*4) tömege folyóméterenként [kg/m]	8,65
Nyomatási sebesség [m/s]	0,3
Felállítási idő [h]	8
Elbontási idő [h]	4
Biztonsági tényező	10%
Alkalmazott emberek száma [fő]	2
A berendezés áramfogyasztása [kWh]	22,17
Lambda (a kitöltő ív hullámhossza) [m]	0,5
A belső sáv hossz-szorzója a Contour Crafting nyomtatásnál	1,058
Egy réteg nyomtatási útvonalának hossza az oszlopok esetében, Contour Crafting technikával nyomtatva [m]	0,819

**d) A beton nyomtatáshoz tartozó költségelemek forrásmegjelöléssel**

Költségadatok	Nettó ár	Forrás
Nyomtatható beton ár [Ft/m <sup>3</sup> ]	60 600	Frissbeton Kft. (budapesti ár)
Kiszállítási díj [Ft/m <sup>3</sup> ]	4 500	Frissbeton Kft. (budapesti ár)
Behajtási engedély [Ft/m <sup>3</sup> ]	1 000	Frissbeton Kft. (budapesti ár)
Acél zártszelvény (100*50*4) egységár S355-ös anyagminőségben [Ft/kg]	245	Jellemző piaci átlagár több forrás alapján
Ívesre hajlított zártszelvény (100*50*4) egységár S355-ös anyagminőségben gyártva [Ft/kg]	395	Jellemző piaci átlagár alvállalkozói forrás alapján
Munkadíj [Ft/h]	8 233	ÉKS 2020 - ajánlott mérnökóradíj
Áramfogyasztás díj [Ft/kWh]	43	ELMŰ
Darubérlés díja [Ft/óra]	13 000	Györfi Daru Építőipari Gépesítő Kft.
Konténerszállítás díja [Ft/alkalom]	49 000	Konténer Hungária Kft.
Acél termékek kiszállítási díja [Ft]	15 000	Jellemző piaci átlagár Budapest területén

## e) A Contour Crafting nyomtatás költségelemei

Költségelem	Megnevezés	A külső falazat geometriája		
		Egyenes	Egyenes és íves	Íves
Beton anyagköltség	Teljes falazat nyomtatási hossza [m]	20 647	20 754	21 070
	A nyílások és az áthidalók miatti nyomtatási hossz-csökkenés [m]	-3 537	-3 615	-3 863
	Oszlopok nyomtatási hossza összesen [m]	369	369	369
	Tényleges nyomtatási hossz [m]	17 479	17 508	17 576
	Teljes beton szükséglet [m <sup>3</sup> ]	14,123	14,146	14,201
	<b>Beton anyagköltség [Ft]</b>	<b>933 538</b>	<b>935 061</b>	<b>938 688</b>
Áthidalók költsége	Egyenes mennyiség [m]	55,34	41,08	6,00
	Hajlított mennyiség [m]	0,00	15,20	53,12
	<b>Összes zártszelvény ára [Ft]</b>	<b>132 288</b>	<b>154 037</b>	<b>209 332</b>
A 3D beton nyomtató költségei	A nyomtató konténerben történő szállítási költségei [Ft]	98 000	98 000	98 000
	Összesen a darubérlés díja [Ft]	208 000	208 000	208 000
	Áramfogyasztás [kW]	359	359	361
	Áramfogyasztás díja [Ft]	15 429	15 454	15 514
	Amortizálódás [Ft]	333 690	334 235	335 531
	<b>Összes gépköltség [Ft]</b>	<b>655 119</b>	<b>655 689</b>	<b>657 045</b>
Élőmunka költség	Valós nyomtatási idő [h]	16,18	16,21	16,27
	Biztonsági idő és előkészületek [h]	3,93	3,94	3,95
	Felállítás és elbontás ideje [h]	12,00	12,00	12,00
	Összes munkaóra	32,11	32,15	32,23
	<b>Összes munkaköltség [Ft]</b>	<b>528 803</b>	<b>529 343</b>	<b>530 630</b>

## f) A teljes falszélességű nyomtatás költségelei

Költségelem	Megnevezés	A külső falazat geometriája		
		Egyenes	Egyenes és íves	Íves
Beton anyagköltség	Teljes falazat nyomtatási hossza [m]	6 708	6 735	6 842
	A nyílások és az áthidalók miatti nyomtatási hosszcsökkenés [m]	-1 116	-1 141	-1 222
	Öszlopok nyomtatási hossza összesen [m]	90	90	90
	Tényleges nyomtatási hossz [m]	5 682	5 684	5 710
	Teljes beton szükséglet [m <sup>3</sup> ]	17,139	17,145	17,223
	Beton anyagköltség [Ft]	<b>1 132 902</b>	<b>1 133 265</b>	<b>1 138 412</b>
Áthidalók költsége	Egyenes mennyiség [m]	40,0	29,3	3,0
	Hajlított mennyiség [m]	0,0	11,4	39,8
	Összes zártszelvény ára [Ft]	<b>99 787</b>	<b>116 099</b>	<b>157 570</b>
A 3D beton nyomtató költségei	A nyomtató konténerben történő szállítási költségei [Ft]	98 000	98 000	98 000
	Összesen a darubérlés díja [Ft]	208 000	208 000	208 000
	Áramfogyasztás [kW]	116,6	116,7	117,2
	Áramfogyasztás díja [Ft]	5 249	5 250	5 274
	Amortizálódás [Ft]	108 471	108 506	109 002
	Összes gépköltség [Ft]	<b>419 720</b>	<b>419 757</b>	<b>420 276</b>
Élőmunka Fköltség	Valós nyomtatási idő [h]	5,26	5,26	5,29
	Biztonsági idő és előkészületek [h]	1,28	1,28	1,28
	Felállítás és elbontás ideje [h]	12	12	12
	Összes munkaóra	18,54	18,54	18,57
	Összes munkaköltség [Ft]	<b>305 258</b>	<b>305 292</b>	<b>305 784</b>

A dolgozatomban nettó árakkal számoltam, vagyis az árak az Általános Forgalmi Adót (ÁFA) nem tartalmazzák.