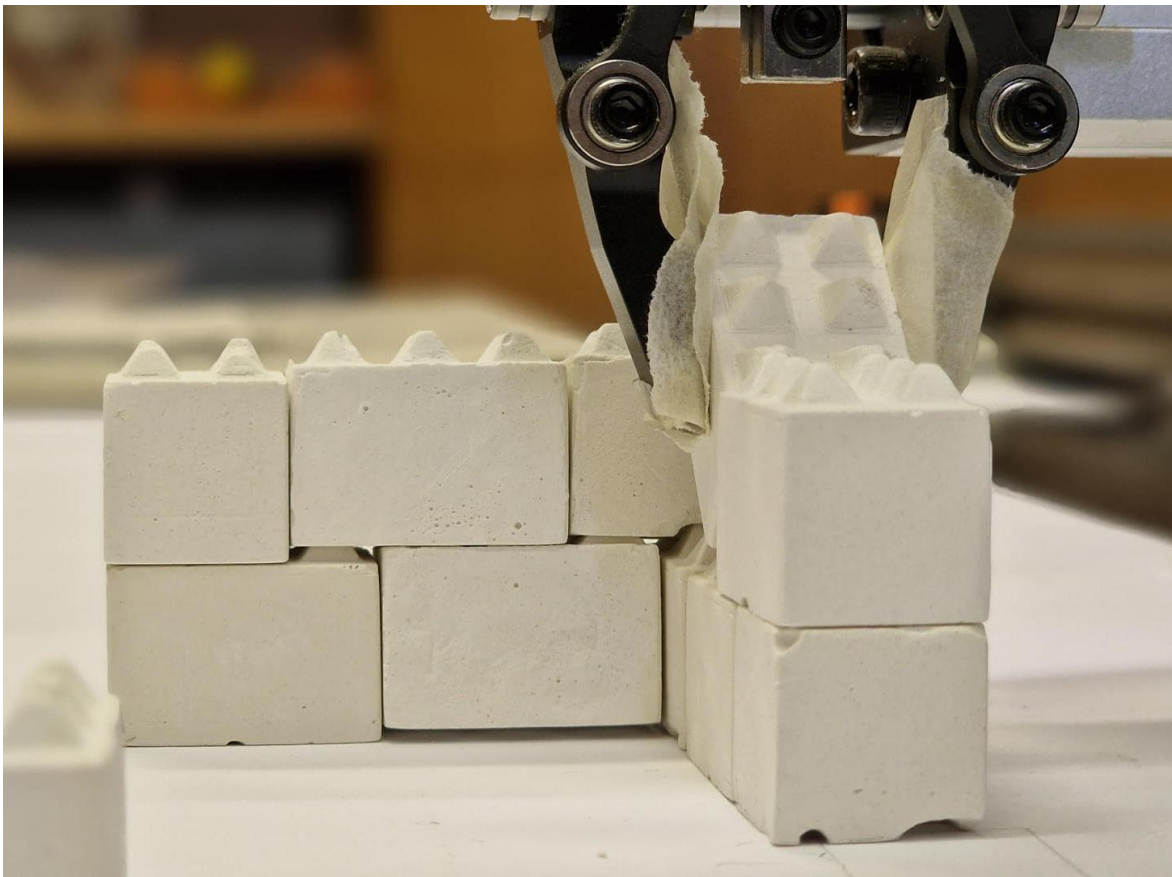


## Falazóelemek kialakítása Robot Oriented Design személete alapján



BME Építészmérnöki Kar, Építéstechnológia és Építésmenedzsment Tanszék

2023. TDK konferencia

Szerző: Koczkás János

Konzulens: Dr. Vidovszky István János

# Tartalomjegyzék

<u>Absztrakt</u> .....	<u>2</u>
1. <u>Bevezetés</u> .....	<u>3</u>
2. <u>Hipotézis</u> .....	<u>6</u>
3. <u>Módszertan</u> .....	<u>6</u>
4. <u>Elemzés</u> .....	<u>16</u>
<u>4.1 Robot pontatlanság</u> .....	<u>16</u>
<u>4.2 Hibák illesztő elem független javítási lehetőségei</u> .....	<u>19</u>
5. <u>Összegzés</u> .....	<u>21</u>
<u>5.1 Kialakított elemek</u> .....	<u>22</u>
<u>5.2 Fejlesztési javaslatok</u> .....	<u>24</u>
<u>Források</u> .....	<u>25</u>
<u>Irodalomjegyzék</u> .....	<u>25</u>
<u>Képek</u> .....	<u>25</u>

## Absztrakt

Az automatizáció az elmúlt évtizedek során világszerte megváltoztatta a legtöbb iparágat. Ennek a folyamatnak a segítségével csökkenthető az emberi munkaigény, precízebbé válhat a gyártás, valamint csökkenthető a selejt, és a hulladék mennyisége. Összességében olcsóbbá és gyorsabbá válhat a gyártás folyamata. Az építőiparban mindezen előnyök ellenére sem sikerült széleskörben elterjeszteni ezeket a technológiákat, feltételezhetően az építőipar sajátosságaink, egyedi kihívásainak köszönhetően. Az is belátható, hogy az építőipar mai legnagyobb kihívásai a munkaerőhiány, magas baleseti kockázat és részben ezek következtében végbemenő folyamatos drágulás szükségessé teszik az automatizálást.

A „Robot Oriented Design” elmélete a lehető legjobb eredmények elérése érdekében azzal a céllal jött létre, hogy az automatizált ipari folyamatok (és ezek termékeinek) tervezése során a gyártáshoz alkalmazott eszközök (robotok) működési jellege a lehető legnagyobb mértékben kerüljön figyelembevételre.

Ennek a kutatásnak célja olyan, a Robot Oriented Design elmélete szerint kialakított falazó elemek előnyeinek vizsgálata, amely a robotkarral történő falazás során nagyobb elhelyezési pontosságot tesz lehetővé. Ez megalapozhatja az ilyen építőelem rendszerekkel kapcsolatos további kutatásokat. A kevés fellelhető szakirodalom okán ezt a vizsgálatot a jelenleg piacon lévő elemek tanulmányozásával és több kis mértékben eltérő geometriájú elem tesztelésével hajtom végre. Összehasonlítási alapként szolgál majd egy ugyanolyan méretekkel rendelkező, de passzív pozicionáló elemeket nem tartalmazó falazó elem.

A vizsgálatok laboratóriumi körülmények között, 1:15-ös méretarányú falazó elemekkel zajlanak. A kísérletek végzéséhez sínnel ellátott Dobot Magician asztali robotkar és az ehhez tartozó programozási környezet szolgál eszközzel.

# 1. Bevezetés

A ROD azaz a Robot Oriented Design alapjait 1988 június 6-8. között Tokióban megtartott 5. Nemzetközi robotikai konferencián határozták meg. A konferenciának és a témának egyik legnagyobb alakja Thomas Alexander Bock (Bock, 1998). A ROD magyarul a robotika által meghatározott tervezés. Egy olyan átfogó ipari módszer, melyhez alapjában szükséges újra alkotnunk a ma alkalmazott gyártási/építési és ezzel párhuzamosan a tervezési logikát. Ma a piacon kétféle építési rendszer dominál. A hagyományos, kiselemes építés, mely rugalmas így sok felmerülő problémát képes áthidalni, de nagy élőmunka igényvel rendelkezik. Illetve a gépesített építés, mely nagyelemes, paneles megoldás révén csökkenti a helyszíni élőmunkaigényt, de kevésbé rugalmas. A két technológia előnyét ötvözheti a helyszíni robotizálás bevezetése az építőiparban. Kiselemes ezáltal moduláris rendszer biztosíthatja a gyors és rugalmas építést. A gyors és rugalmas építést a robotizált rendszerek közel 24 órás munkavégzésével kombinálva kiemelkedő termelékenységet biztosít, miközben minimálisra csökkenni az élőmunka igényt. A módszer a munkaerő igény csökkentő hatását mind az előregyártó üzemekben, mind a helyszíni munkavégzés során kifejti, ezzel olcsóbbá, gyorsabbá és biztonságosabbá téve az építkezést.

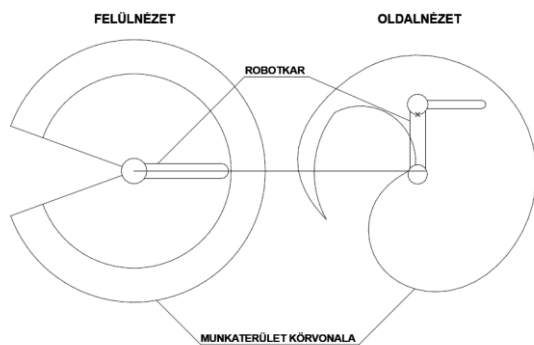
A fenti előnyök eléréséhez viszont az alapoktól szükséges újragondolni az építőipart. A robotika kihívásaihoz illeszkedő építőanyag rendszereket kell kifejleszteni, melyek segítik a robotok munkáját. Az emberekre szabott organizációt is át kell alakítanunk ezen rendszerek számára. A kivitelezés logikájának megváltoztatása mellett fontos, hogy az építészeti gondolkodásba is be kell ágyazni a technológiához szükséges tudást. Mivel az épület tervezése nem csak az épület megjelenését, hanem a megépítésének és fenntartásának költségeit, építési rendszerét és környezeti lábnyomát is meghatározza.

A ROD egy olyan tervezési elvrendszer, amely az építést annak alapjaitól kell, hogy átszöje az épület létrejöttének segítségével, egyszerűbbé, gyorsabbá, olcsóbbá és biztonságosabbá téve a kivitelezést. A jelenlegi építőiparnak három kulcsfontosságú lépést kell megtennie az automatizálás bevezetésének érdekében

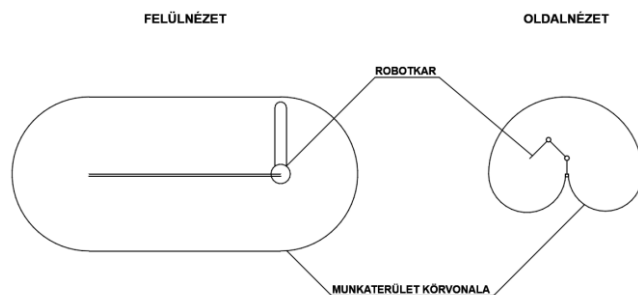
- Egy vagy több minimális emberi beavatkozással működő rendszert kell létrehozni, ami lehetővé teszi, hogy ne csak kísérleti projektek kutatói és befektetői tudják alkalmazni a rendszert, hanem az ipar hagyományos szereplői is.

- Ezeknek a megbízható rendszereknek a költségeit olyan szintre kell mérsékelni, hogy szélesebb kör számára is megtérülő befektetéssé váljon.
- Végül szükséges olyan építési rendszerek kifejlesztése és piacra vitele, amelyek a forgalomban lévő rendszerek mellett is versenyképesek, és a versenyképesség mellett az automatizált építés technológia adottságainak megfelelő kialakításúak, ezekkel az építőelem rendszerekkel szabványosítva a piacra kerülő egymástól függetlenül kialakított automatizált rendszereket, és megkönnyítve az azokkal való tervezést.

A robotizált gyártásban kétfajta jellemző kapcsolat van. Az úgynevezett prizmatikus és a csuklós kapcsolat. A prizmatikus kapcsolatok egyenes mentén elmozduló kapcsolatok, ezek egyik típusa a sínes kapcsolat. A prizmatikus kapcsolatoknak előnye a nagy terhelhetőség és a pontosság, hátránya pedig a nagy helyigény és a rugalmatlanság. A csuklós kapcsolatok előnye a kis méret és a rugalmas alkalmazhatóság, hátránya pedig az, hogy nagy terhelés esetén pontatlanná válhat az elmozdulás. Az építőiparban mozgatott nagy tömegek miatt sokszor előnyösebbnek tekinthetők a prizmatikus kapcsolatok, a csuklóssal szemben.



1. ábra Csuklós kapcsolat mozgáskép



2. ábra Kombinált prizmatikus és csuklós kapcsolat mozgáster

A tanulmány megírásakor már léteznek a ROD elméletén alapuló rendszerek. Ezek közül a rendszerek közül a leginkább előrehaladott állapotban a 3D nyomtatáson alapuló rendszerek vannak. Ezeknek a rendszereknek fejlesztési szempontból előnyt jelent a felhasznált beton képlékeny állapota. A képlékeny anyag helyrejuttatása során sok, az elemes rendszereknél jelentkező probléma nem áll fent. Ilyen rendszerek például az Iconbuild által fejlesztett Vulcan 2, az Apis Cor által fejlesztett Frank, és a Constructio 3D által fejlesztett Maxiprinter. Az amerikai Vulcan 2 portál rendszeren alapul, mely kihasználja a prizmatikus kapcsolatok előnyeit, de ezzel nagy mértékben korlátozza az építhető épület kiterjedését. A másik két rendszer (az amerikai Frank és a francia Maxiprinter) kisebb rendszerek, melyek nem magukban, hanem maguk körül építik az épületet így rugalmasabbak méret és forma

szempontjából. Mind a két rendszer ötvözi a prizmatikus és csuklós kapcsolatokat, így növelik a rugalmasságukat, de a hibák esélyét is. A fejlesztés kevésbé előrehaladott fázisában ugyan, de létezik kiselemes módszeren alapuló automatizált rendszer is. A falazási munkákat tekintve a legfejlettebb ezek közül a Hadrian X, amely közvetlenül a CAD modellből képes falazni. Ehhez speciális sima oldalú falazóelemet használ. Ez a rendszer egy teherautóra épített adagoló rendszerből és egy az elem elhelyezésért felelős robotkarból áll. Ezeken kívül is léteznek az építőipar számos területén projektek, melyek a szerkezetépítéstől a szárazépítésen keresztül a befejező munkálatokig szinte teljesen lefedik azt.



1. kép Vulcan 2 Iconbuild



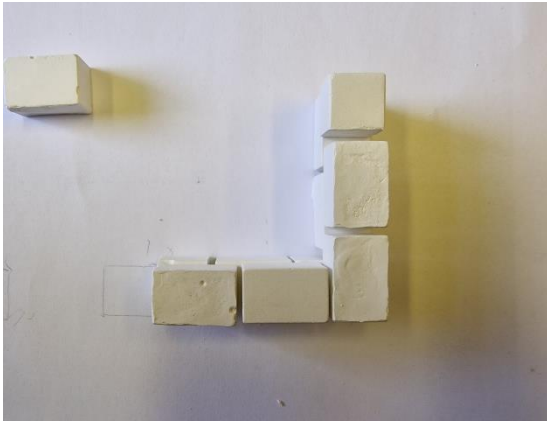
2. kép HADRIAN X, FBR Ltd

Ennek a TDK kutatásnak a témája ezen a nagy, átfogó és sokszor sokféleképpen vizsgált tudomány területen belül egy apró szegmens: az építőanyag rendszer fejlesztés.

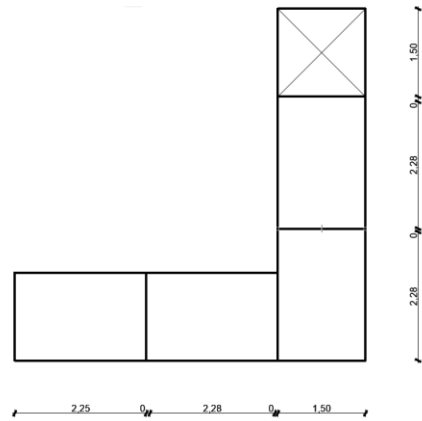
A választás ennek a témakörnek is csak egy kis részére esett, a kiselemes falazó elemek vizsgálatára. Mint azt már a bevezetésben korábban említettem a terület alapműve is a kiselemes rendszerek mellett tette le a voksát. A rendszerek rugalmasságának, könnyű és gyors mozgatásának és kisebb mennyiségben keletkező hulladék miatt. A falazóelem rendszerek jó kiindulási pontot nyújtanak egy teljes építőelem rendszer létrehozásához. Mivel ezek az elemek egy monolit technológiával készült aljzatról indulnak, így ezekhez a legegyszerűbb igazítani a később elhelyezésre kerülő elemeket (Pl. áthidaló, lépcső, földem rendszerek stb.). Emellett könnyen vizsgálhatók rajta a robotizált rendszerek hibái.

Ezek a hibák alapvetően a programozás során megalkotott ideális világ és a valóság közti eltérésekből származnak. A robotok a kódnak megfelelően, elméletileg mindig tökéletesen, pontosan végzik a feladatot. Kisebb pufferezónáktól eltekintve az eszközt irányító kód ebben a tökéletes világban létezik, de a fizikai környezetben több előre nem látható hatás érheti az

eszközöket. Ezek a káros tényezők lehetnek környezeti hatások például a szél, a hőtágulás, a falazó elem hibái vagy a programozás során figyelembe nem vett tereptárgyak, de lehetnek belső hatások is például a léptető motorok kihagyott lépései. Ezek a hibák egy hosszú, sok elem elhelyezéséből álló munka során halmozódnak, akár nagy eltéréseket is létrehozva ezáltal az elméleti pozíció és falazó elem valós helye között. Ez szerencsés esetben csak esztétikai, de súlyosabb esetben akár szerkezeti hibákat is jelenthet.



3. kép Valós falazat



3 ábra Falazat a virtuális térben

## 2. Hipotézis

A virtuális és a fizikai környezet eltéréseiből adódó problémák kiküszöbölésére alkalmazható legegyszerűbb és alacsony költségvonzatú módszer az építő elem megfelelően kialakított passzív pozicionáló elemek elhelyezése javítja az elhelyezési pontosságot.

## 3. Módszertan

A virtuális és a fizikai környezet eltéréseiből adódó problémák elméletben több módszerrel is kiküszöbölhetők. Aktív módszerrel, tehát a rendszeren elhelyezett érzékelőkkel. Ilyen érzékelők lehetnek például távolságmérő szenzorok, vagy mesterséges intelligenciával támogatott kamera rendszerek. Ezek az érzékelők drágítják és bonyolítják a rendszereket így több lehetőséget adva a hibáknak és csökkentve annak piacképességét. Ezzel szemben passzív rendszerekkel is lehetséges, melyek az építőelemen elhelyezett az automatizált technológia számára kialakított pozicionáló eszközök. Ezek a pozicionáló elemek az érzékelő rendszerek nélkül is képesek növelni a rendszer pontosságát, azaz kiküszöbölni hibákat. Ennek a

kutatásnak célja egy ilyen rendszer létrehozása, és ennek a rendszernek laboratóriumi körülmények között való tanulmányozása.

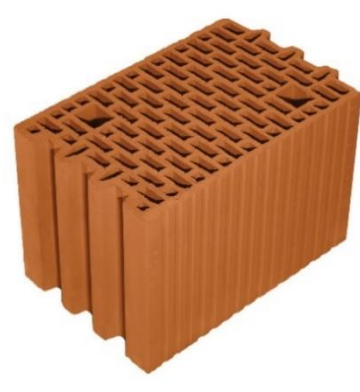
A falazóelem kiválasztásának első lépése volt a piacon jelenlévő különböző gyártók különböző falazási módszerekhez kialakított gyártmányainak vizsgálata. A vizsgálat során több szempontot is figyelembe vettem. Ezek az elem fizikai méretei, tömege, anyaga mellett a mozgatás módszere, az illesztőelem típusa, hogy ez az illesztőelem a tér hány irányában képes a feladatát elvégezni. Az első három szempont az elemek fizikai valóját rögzíti, így lehetővé teszi a valós összehasonlítást. A mozgatás típusa szerint kettő kategóriába sorolhatók ezek a kézzel mozgatható és a gépi segítséget igénylő elemek. Illesztés típusa szerint is kettő, a kutatásban releváns módszer van jelen a piacon. A legelterjedtebb az elem függőleges oldalán elhelyezett csap-hornyos és a kevésbé népszerű pozicionáló gúlás. Az összehasonlításban nem vettem figyelembe a nagyelemes, paneles építésmód elemeit, mivel az nem nyújtott felhasználható információt a kutatásban kívánt kiselemes falazatok számára. A pozicionáló gúlás elem az elmélet szerint pontosabb illesztést tesz lehetővé a több irányú pozicionálással ezzel szemben csökkenti a falazat geometriai rugalmasságát és bonyolítja a gyártást. A függőlegesen kialakított vízszintes csap-hornyos kapcsolat kisebb pontossága az emberi falazáskor nem jelent olyan jelentős hátrányt. Az előzetes kutatás eredményeit az alábbi táblázatban összegeztem a könnyebb használhatóság érdekében.



4. kép Beton falazó blokk



5. kép Ytong Classic NF 250

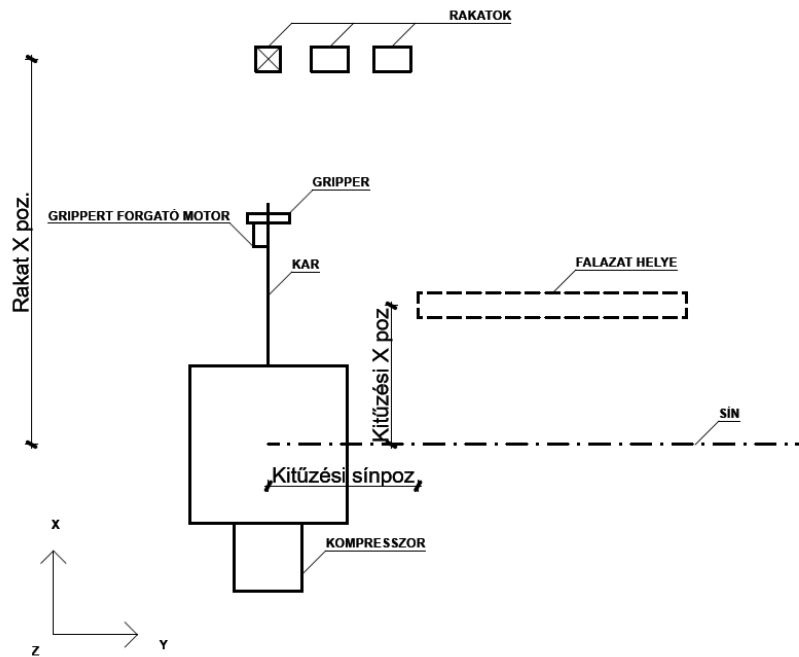


6. kép Porotherm NF 25



	Méret (m×h×sz)	Tömeg (Kg)	Anyaga	Mozgatás Típusa	Illesztés típusa	Pozicionálás irányai
Kisméretű tégla	6,5×12×25	~2,9- 3,5	Kerámia	Kézi	-	-
B30	30×14×17,5	~6,87	Kerámia	Kézi	-	-
Habarcstáskás	25×23,8×(Vált)	~17,50	Kerámia	Kézi	-	-
Nútféderes	25×23,8×(Vált)	16,70	Kerámia	Kézi	Csap-hornyos	2
Ytong	62×20×(Vált.)	~20	Pórusbeton	Kézi	Csap-hornyos	2
Beton blokk	80×60×(Vált.)	~450	Beton	Gépi	Pozicionáló gúlás	3

A vizsgálataimhoz használt elemek kiválasztása és tervezése során elsőként olyan elem került sorra, mely egy segédelem nélküli sima falazóelem. Ez a falazóelem típus, az építés során jól bemutatja a robotkar pontatlanságait, így jó összehasonlítási alapot nyújt a további elemek vizsgálatához. A második elem egy az elterjedtebb függőleges oldalán elhelyezett nút-féderes kapcsolaton alapul, mely bemutatná a mai modern falazóelemek hiányosságait egy robotizált építés során. A harmadik típusú falazóelem egy a pozicionáló gúlás megoldáson alapuló, kifejezetten a robotika problémáihoz igazodó megoldás volt. A vizsgálatok során figyelembe kellett venni az alkalmazott Dobot Magician robotkar és sín párosításának korlátait is. A kisméretű asztali robot nem volt alkalmas az 1:1-es léptékű tesztelésre, így az 1:15-ös lépték mellett döntöttem. Ebben a léptékben viszont az elem függőleges oldalán elhelyezett csap-hornyos kapcsolat nem adott volna releváns információt, így lemondtam ennek a vizsgálatnak az elvégzéséről. Végül a pozicionáló gúlás megoldásból két verzió készült, egy kisebb és egy nagyobb pozicionáló elemes, ezzel megtartva az eredetileg tervezett három vizsgálandó elemet.



4. ábra Modell környezet főbb paraméterei

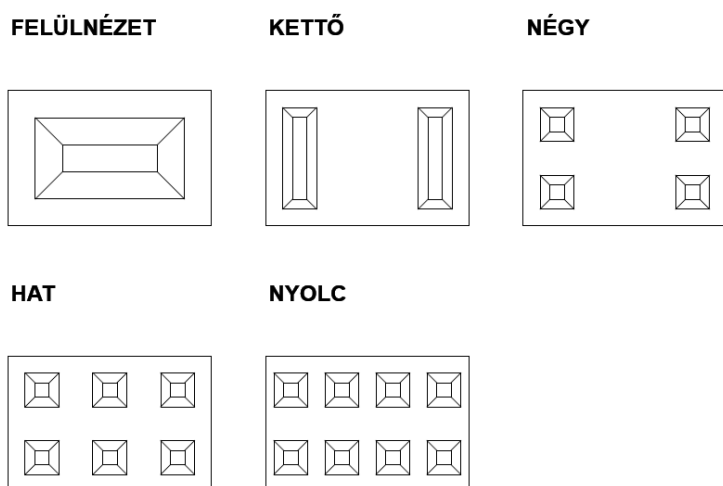
Az elemek fizikai kiterjedését is az előzetes kutatás határozta meg. A  $25 \times 25 \times 38$  cm-es valós méret az ipar számára egy jól ismert a meglévő kerámia rendszerekbe illeszkedő blokkméret. Ennek előnye, hogy könnyen, vágott elem nélkül alakíthatók ki belőle csomópontok. Ezek a falkapcsolatok jól ismertek, katalógusokban megtalálhatók. Így abban az esetben, ha ez a termékfejlesztés szintjén egy valós rendszerre alakulna, egy ismert, könnyen elfogadtatható rendszerre válhatna, amely könnyíti az elterjedést. Az egész elem mellett készült kétharamdos méretű elem is, amely a vizsgálat során szükséges volt a kötés kialakításához, ennek valós mérete  $25 \times 25 \times 25$  cm

A csomagulák kialakítása során a nagyobb gúla oldalhossza 0,51 cm, magassága pedig 0,33 cm, a vízszintessel bezárt szöge hatvan fok. Az oldalszélessége úgy alakult ki, hogy a 1,50 cm elem két oldalán 0,12-0,12 cm perem készült, ezzel növelve a nyomott felületet, a peremek dupláját (0,24 cm) középen elhagyva lehetővé vált a két elem egymás mellé helyezése, az így megmaradt 1,02 cm lett szétosztva 2 részre (0,51 cm). A kisebb csomagúla oldalhossza 0,37 cm, magassága pedig 0,18 cm, a vízszintessel bezárt szöge pedig negyvenöt fok. A gúla oldalhossza az előzőekhez hasonlóan alakult ki azzal a különbséggel, hogy a hosszát az elem oldalhosszához a negyedelésével alakítottam ki ( $1,50 \text{ cm} / 4$ ). Az így megkapott négy szakaszt a szakasz felével (0,185 cm) eltoltam, ezzel a kialakítva a szélső két vékonyabb és a középső duplavastag vízszintes felületet.



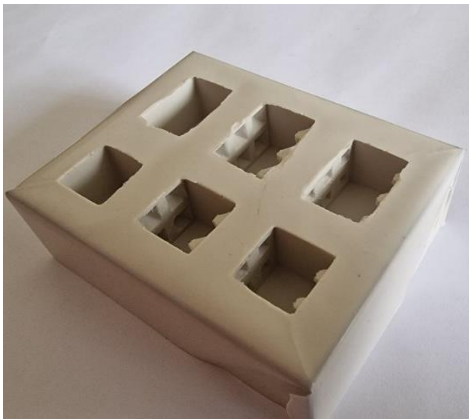
5. ábra Vizsgált elemek főbb méretei

A kötőelemek kiválasztása során több elhelyezés és kapcsolóelem típus is felmerült. A gúla elhelyezése során felmerült, az egy darab pozicionáló elem (egy sor és egy oszlopban elhelyezett elem), a két elem (két sorban és egy oszlopban elhelyezve), négy elem (két sorban és két oszlopban elhelyezve), a hat (két sorban és három oszlopban elhelyezve) végül nyolc elemes kivitel (két sorban és négy oszlopban elhelyezve). A forma egyszerűsége szempontjából a lehető legkevesebb gúla tűnt a leginkább megfelelőbbnek, emellett a több gúla csak kisebb méretben fért el. A kevés gúla hátránya a rugalmatlanság. Ennek a két szempontnak és a választott téglalap arányainak figyelembevételével alakult ki az egész elemen elhelyezett két sor és három oszlop, tehát hat darab csonkagúla.

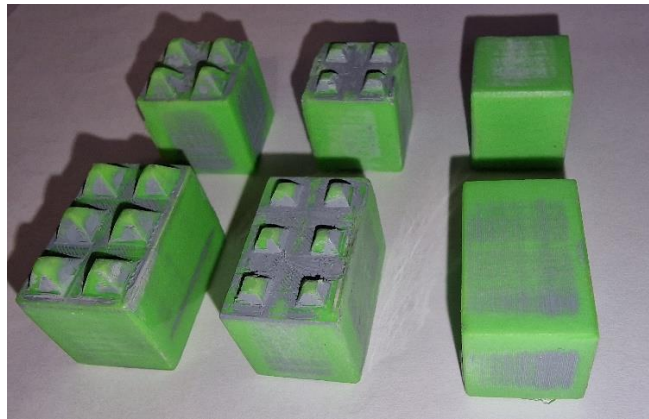


6. ábra Pozicionáló elemek lehetséges elrendezései

A vizsgálat során használt elemek modellgipszből készültek. Ezek kialakításának első lépéseként Fusion 360 programban készítettem el a valós méretű 3D modelleket. A megfelelőnek ítélt modelleket a tanszéken lévő 3D nyomtatóval PLA anyagból nyomtattam ki húsz százalékos kitöltéssel. A nyomtatást követően ezeket a mesterdarabokat utókezelttem. Az utókezelés csiszolásból és glettelésből állt, mellyel a nyomtatási hibákat, rétegeket és egyéb felületi egyenlőtlenségeket eltüntettem. A megfelelő felület kialakítását követően szilikon mintát készítettem a mesterdarabokról. Az öntőforma anyaga egy kétkomponensű önthető szilikon, melyet huszonnégy óra szilárdulást követően lehet használni. Ebben a szilikon formában könnyen sokszorosítható volt a falazóelem öntéses technológiával. Ezek az elemek tömörök, így a geometriai vizsgálatához megfelelnek, de a későbbi gyártás során sok egyéb szempontot kell figyelembe venni, így erre önmagában ez az elem alkalmatlan.



7. kép Szilikon öntőforma



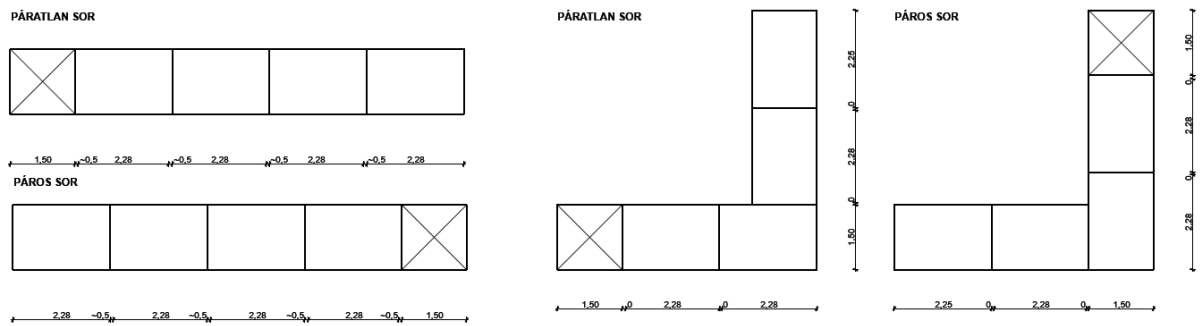
8. kép Mesterdarabok

A vizsgálatához két alapvető fal alakzatot választottam egy egyenes falszakasz és egy kilencven fokos sarok kapcsolatot. A kialakításuk során figyelembe vettem a téglakötés szabályait. Az elsőként vizsgált egyenes falszakasz, a páros és páratlan sorok egyik végén felváltva elhelyezett kisebbik (kétharmados) elemmel alakult ki. Ezen vizsgálhatók a rendszer pontatlanságából adódó hibák. A falsarok kialakítása során már figyelembe lehet venni az egyenes szakasz tanulságait és ennek megfelelően kialakítani az ehhez szükséges programegységet. A kötés kialakításához az egyenes falszakaszhoz hasonlóan a falvégek végén váltva elhelyezett kisebb elemet használtam fel. Ezen a formán vizsgálható az elem elhelyezés

sorrendjének

a

fontossága.

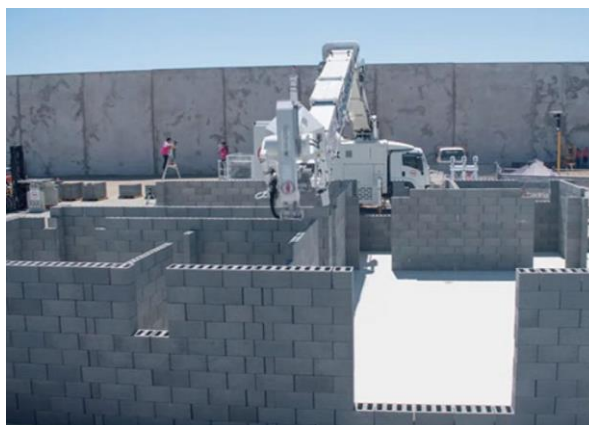


6. ábra Egyenes fal és falsarok téglakötése felülnézetből

A falazó elem vizsgálata mellett a falazás módszertanát is érdemes figyelembe venni. Hagyományos falazás módszere alapján az épület kitűzését és a megfelelő aljzat elkészítését követően a kőműves szakemberek elkészítik a falazat meghatározó pontjait. Ezek a pontok a sarkok, falcsatlakozások. Ezek elkészítése során a habarcshezag megfelelő megválasztásával képesek a betonaljzat vízszintes eltéréseit kiegyenlíteni. Ezt követően a már megépített sarokpontok között kifeszített zsinórral lehetséges ezt a javítást a teljes falhosszán egyenletesen elosztani. Ez a technika magába foglalja azt, hogy a falazó elemeket egy már meghatározott falhosszban kell elhelyezni így az utolsó elemet két másik elem közé kell behelyezni. Ez nagy pontosságot és a már elhelyezett elem helyének pontos ismeretét igényli. Erre a technikára a síktartás biztosításához és a nagy felületek gyors elkészítéséhez van szüksége a kőműveseknek. Egy jól beállított automatizált rendszernek erre nincs szüksége, viszont bonyolultabb geometriai kialakítások esetén előfordulhat a köztes elem problémája. A köztes elemekhez szükséges nagy pontosság miatt kérdéses, hogy az automatizált gyártás során alkalmazható-e ilyen akadályozó helyzetet magában rejtő logika, vagy egy új közteselem elhelyezéssel nem járó módszert kell kidolgozni.

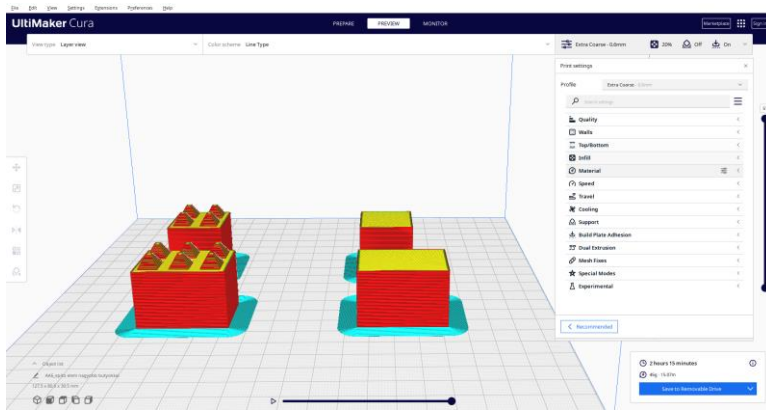


9. kép Hagyományos téglafalazat



10. kép Hadrian X falazás

A programozás logikáját is érdemes megvizsgálni. Többfajta megközelítéssel lehetséges felépíteni a programot. Az egyik megközelítés a 3D nyomtatásban is alkalmazott G-code elve. Amelyben minden elemnek a helyét, az ehhez vezető utat egyesével koordinátákkal megadva határozza meg ezt a létrehozó program. Emellett a robotkar egyéb mozdulatait is egy-egy egyedi paranccsal lehet megadni. Ezzel egy hosszú kódot létrehozva. Ennek hátrányai a nagy gépigény és az igen hosszadalmas előállítás. A későbbiekben azonban hasznossá válhat a nagyméretű összetett projektek esetén. Ahol már egyszerűbb lehet egy az építőipari termékcsoporthoz és az adott géphez konfigurált programot létrehozni a már említett 3D nyomtatók szeletelő (slicer) programjainak mintájára. Ezek a programok gyorsan emberi beavatkozás nélkül képesek a 3D geometriából egy útvonalat létrehozni, melyet a nyomtatófej lekövetve egy kész 3D-s terméket állít elő. Egy falazáshoz fejlesztett szeletelő segítségével a G-code programba beépíthetők olyan parancsok melyek, valamilyen szenzoros rendszerrel ellenőrzik a robotkar valós helyzetét ezzel kiküszöbölve a felhalmozódó apró hibák okozta fennakadást. A szeletelő programmal csökkenthető az építkezés előkészítéséhez szükséges mérnöki munkaórák száma és annak a szükséges tudástere. Ennek ellenére ez a megoldás a jelen kutatásban nem lenne előnyös, illetve az említett program kialakítása egy másik teljes kutatásnak is alapját képezheti.



11. kép -Szeletelő program kezelő felülete

```

12 M140 S60
13 M105
14 M190 S60
15 M104 S200
16 M105
17 M109 S200
18 M92 ;absolute extrusion mode
19 G28 ;Home
20 G1 Z15.0 F2000 ;Move the platform
21 G92 E0
22 G92 E0
23 G1 F1500 E=6.5
24 ;LAYER_COUNT:51
25 ;LAYER:0
26 M107
27 M204 S1000
28 G0 F7500 X39.312 Y65.003 Z0.3
29 ;TYPE:SKIRT
30 G1 F1500 E0
31 G1 X41.184 Y63.891 E0.10863
32 G1 X43.371 Y63.453 E0.21991
33 G1 X82.371 Y63.453 E2.16562
34 G1 X84.267 Y63.919 E2.26303
35 G1 X86.294 Y64.972 E2.37699
36 G1 X87.769 Y66.547 E2.48461
37 G1 X88.88 Y68.419 E2.59324
38 G1 X89.318 Y70.606 E2.70452
39 G1 X89.318 Y97.106 E4.02661
40 G1 X88.852 Y99.002 E4.12401
41 G1 X87.799 Y101.029 E4.23797
42 G1 X86.224 Y102.503 E4.34559

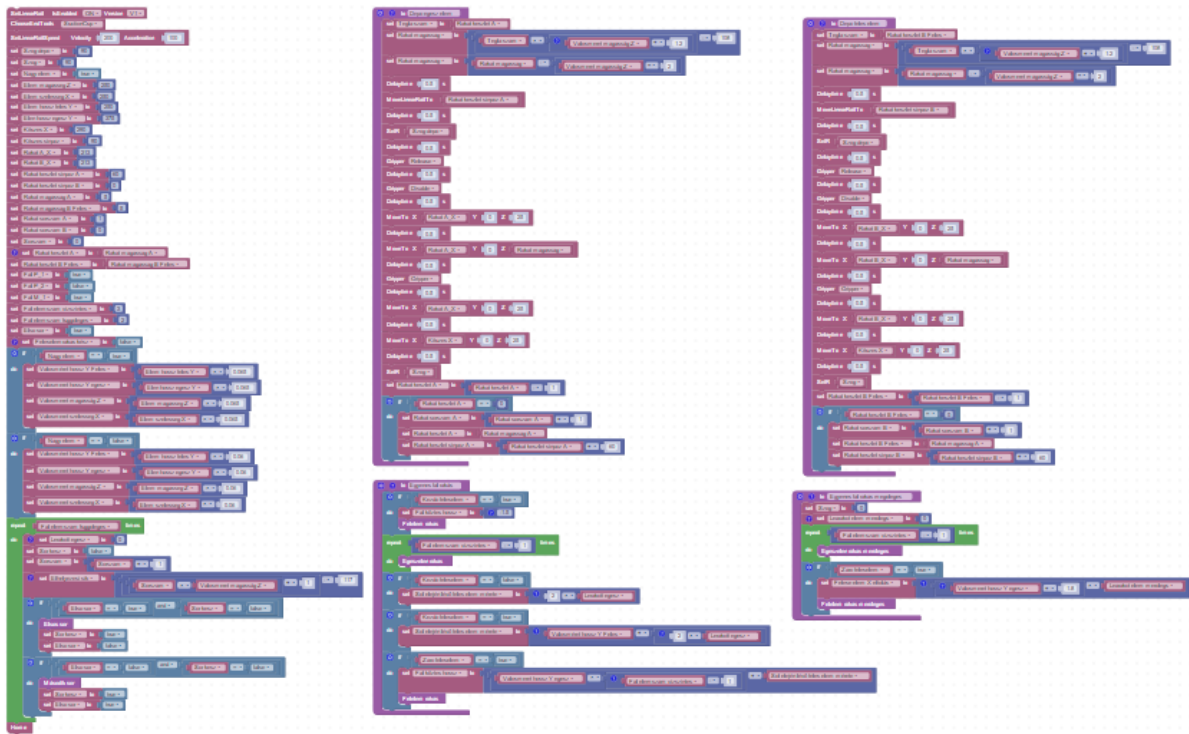
```

12. kép G-code részlet

A vizsgálatokhoz választott módszer alapját egy kompakt, ezáltal erőforrástakarékos és átlátható program létrehozása képezte. Ezt az azonos folyamatokat leíró, meghívható programrészek segítségével lehet elérni. A program első fő egységét a működéséhez szükséges alapadatok és beállítások alkotják, ilyen adatok például a lineáris sín sebességei, gyorsulása, az elemek méreteinek meghatározásához szükséges adatok, a rakatok méretei és pozíciói. Az adatok mellett meghatározásra kerültek kapcsolók, amelyekből három egy-egy falszakaszt határoz meg. Ezek a falszakaszok egy „T” alakú fal csatlakozás három szárát jelképezik. Ennek a kutatásnak a keretén belül nem került vizsgálatra a T alakú falkapcsolat, de a program megalkotás során figyelembe vettem a kutatás folytatásának lehetőségét. A második nagy egység felel a lerakott sorok számának számontartásáért, a sorok Z pozíciójának meghatározásáért, illetve annak megállapításáért, hogy kell-e több sor és ha igen akkor annak páros vagy páratlan sornak kell-e lennie. A páros és páratlan sorok egy hivatkozásként kerülnek ezen belül elhelyezve. A meghívott „elsősor” (a páratlan sorok) és „másodiksor” (páros sorok) az első blokkban meghatározott három kapcsoló kombinációjával határozza meg, hogy egyenes vagy L alakú falkapcsolatot kell-e kialakítani. Ezekben az (If) elágazásokon belül, melyek meghatározzák, hogy a T alakzat mely két ágát megépítve kapjuk meg a kívánt formát, meghatározásra kerül, hogy az adott szakasz kezdő, illetve záró eleme egész vagy feles. Az (If) elágazásba végül kerül egy hivatkozás. A hivatkozás az egyenes, merőleges falrakás nevű blokkokra mutat, melyek meghatározzák az előző adatok alapján, hogy milyen elemeket kell lerakni, ezeknek az elemeknek a pozícióját és végül, hogy hányszor kell ezt megismételni. A „falrakás” blokkok végül meghívják az egész és feles elem elhelyezésért felelős kódrészeket. Az „egészelem rakás” és „feleselem rakás” programrészek irányítják a robotkar tényleges mozgását, adják ki ez ehhez szükséges parancsot, emellett meghívják az utolsó programrészeket a depó (rakat) kezelő program sorokat. A rakatkezelő tárolja a rakat aktuális magasságát és



kiadja a rakat legfelső elemének elvételéhez szükséges programsorokat.

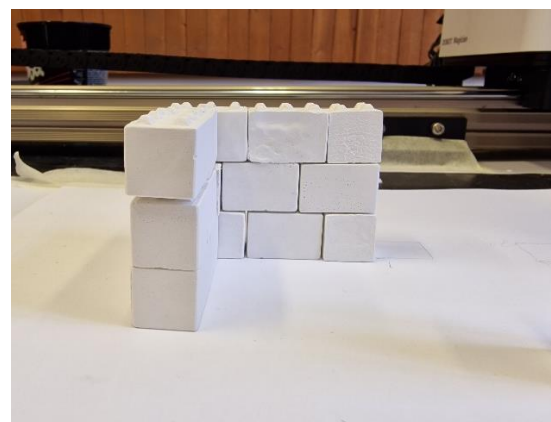


23. kép Robotkar vezérlő program

A hibák megállapításához alapvető módszer volt a szemrevételezés. A szemrevételezés a kísérletek léptékében megfelelő eszköz volt a következtetések levonásához, megállapítás tételhez. A rögzítéshez a kész falazatokról fotók, a falazás menetéről videók készültek. Egyes esetekben lehetséges volt méréseket végezni. Ezeket a méréseket egy hézagmérővel hajtottam végre. A hézagmérő 0,10 mm-től 0,40 mm vastagságú fémlapokból áll, 0,05 mm-es méretlépcsővel.



34. kép Hézagmérő



15. kép Hézagos falazat kis pozicionáló gúlás elemmel



## 4. Elemzés

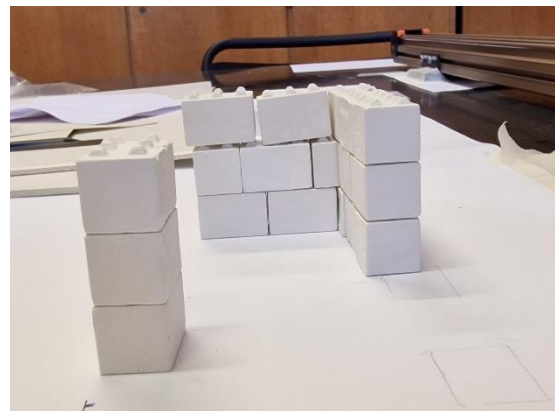
### 4.1 Robot pontatlansága

A vizsgálatok során többszörösen is beigazolódott a korábbi feltevés a robot pontosságáról. A laboratóriumi környezet a legtöbb zavaró tényezőt kizárta, mint a szél vagy a hőtágulás. Ennek ellenére is jelentős eltérések jelentkeztek. Ezek az eltérések nagyrészt a robot csuklós kapcsolataira és a modell környezetben a pozicionáló szenzorok hiányára vezethetők vissza.

Vízszintes mozgás esetén a falazó elemek illesztésénél az elméleti az az nulla elemközzel nem valósítható meg. A rendszer apróbb kitérései miatt az építőelemek gyakran megakadtak egymáson. A hibás helyre került elemek akadályozták a további elemek lehelyezését, így ezek a kísérletek nem tudtak végigfutni. A sínen történő mozgatás során a 350 mm/s sebesség feletti és 200 mm/s<sup>2</sup> gyorsulás értékeknél magasabb értékek megadása a rendszertelen, a programozás során a programba épített biztonsági elemekkel nem korrigálható hibákat okoz. Az építőelemek forgatása során előfordultak kisebb a projekt léptékének köszönhetően alig észrevehető hibák. Ezek a kilencven foktól való eltérések a fal létrejöttét nem befolyásoló problémák voltak és csak kevés esetben jelentkeztek. Ezeket legtöbb esetben a lerakott falazóelem elmozdulása okozta. Ez az elmozdulás akkor keletkezett mikor a befogó pofák elengedték az elemet.



46. kép Hibás falazat nagy pozicionáló gúlás elemmel

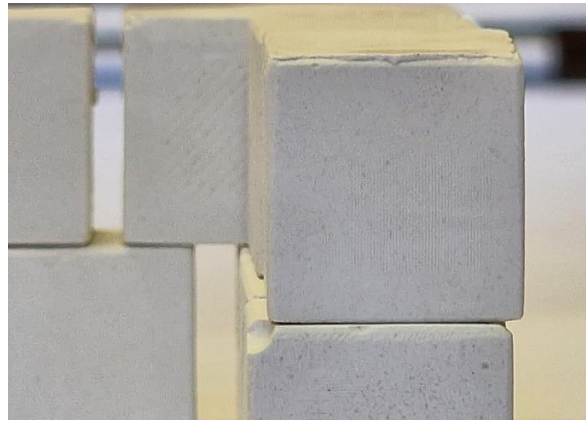
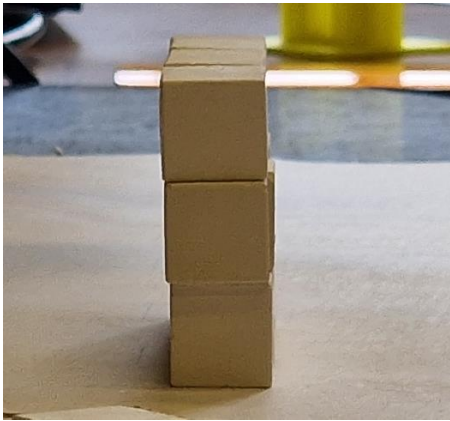


17. kép Hibás falazat kis pozicionáló gúlás elemmel

Jelentkeztek a gép forgatásának hibájából is. Ez a hiba az esetek többségében a fej beállításának hibájából fakadt. A többször előforduló apró elhelyezési pontatlanságokból fakadó erőhatás elégedő volt ahhoz, hogy összeadódva elforgassák a robotkaron elhelyezett fej mechanikát. Ez a jelenség egy nagyobb hiba esetén azonnal észrevehető eltérést eredményezett. Ez a hiba könnyen orvosolható volt a robotkar végén elhelyezett szervomotor tengelyét és a fej

rögzítésére szolgáló tengelyt összekötő hengeres fémlemez elhelyezett hernyócsavarok lazításával, majd a fej pozicionálását követően azok ismételt behajtásával.

A függőleges irányú kitérés kettőnél több sor esetén jelentkezett szemmel jól látható módon. A robotkar az elméletileg pontosan egymásra kerülő elemeket 1-1,5 mm-es kitéréssel helyezte el. Ez a kitérés minden esetben a kar középpontjától kifelé a pozitív „Y” irányban jelentkezik. Ezzel egy öt soros falazat esetén jól látható síkfogasságot hozva létre.



58. kép Síkfogasság

Az első sor elhelyezése során jelentkezett hiba, az elemek elmozdulása. A korábban az elemforgatásnál már említett hiba nem csak az elfordulást, de a vízszintes sík mindkét irányában történő elmozdulást is eredményezett. Ez a jelenség az egymásra helyezett gipszelemek esetében nem jelentkezett csak a papírra lehelyezett elemeknél. Az elhelyezés felületét egy szokványos (80 grammos) fénymásoló papír biztosította ez növelte az elem és a felület közti súrlódást az asztal felületéhez képest, de ez a felület sem bizonyult megfelelően érdesnek, mivel nem növelte eléggé az elem és a felület közti súrlódást. Az elmozdulások rendszertelen előfordulása miatt nem voltak jól mérhetőek.

Sok probléma jelentkezett az elemek rakatainak pontatlan elhelyezéséből is. Ezeknek pontatlansága befolyásolta a megfogás helyét, ezen keresztül pedig a lerakást. Ha a rakatok egymástól nem egyenlő, illetve nem megfelelő távolságra kerülnek elhelyezésre, ismét jelentkezhet az egymásra csúszó elemek hibája. Ha ezek a távolságok megfelelően lettek beállítva, de az első rakat nem megfelelően lett elhelyezve, akkor a fal megépül, de nem a megfelelő helyen, amely egy valós környezetben szintén problémát okozna. Ezek az elhelyezési eltérések ebben a léptékben nem haladják meg a két millimétert sem. A ROD elmélet alapvetése a rakat pontos elhelyezése, ezért a rakatok elhelyezését rendszer szinten kell megoldani.



69. kép Elhelyezéshez megjelölt középvonalú elemek

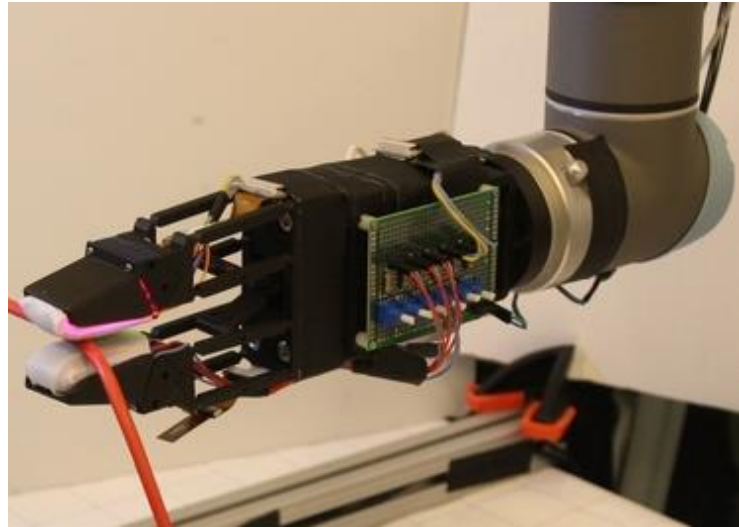
A tárolók maximális magasságát nem csak a robotkar korlátozta azzal, hogy elérte a „Z” felső határát, de a falazó elemek is meghatározták azt a stabilitásukkal. Pozicionáló elemmel nem rendelkező falazóelem esetén nem csak a rakatok egymáshoz viszonyított távolságát volt nehéz beállítani, de a különböző egymásra kerülő elemek precíz elhelyezése is nagy odafigyelést követelt meg. A gondos elhelyezés ellenére is sokkal instabilabb maradt, mint a másik két vizsgált típus.

A vizsgálatok során használt kisméretű elemek a nagy tömeg-súrlódás hányados miatt, a pozicionáló gúllak pontos magasság alkalmazása esetén nem húzta helyre az elemet. Ez fennáll abban az esetben is, ha az elemet ejtve próbáljuk meg letenni. Ennek a hibának megoldását jelentette az, hogyha az elemet a robotkarral az elméleti „Z” pozíciójának megfelelő mélységig vittük az elhelyezés során. Ezzel enyhe helyreigazító nyomást gyakorolva az elemekre. Az elem megfogásáért felelős pofákon elhelyezett maszkolószalag réteg miatt a pofa és az elem közti súrlódás nem volt maximális, így a befogás ezt az elhelyezést lehetővé tette. Nagyobb tömegű és azonos felületi minőséggel rendelkező elem esetén elképzelhető, hogy ez a probléma nem jelentkezne, azaz az elem súlyánál fogva a helyére csúszna. Az elemek ezen módon való pozicionálásához szükséges a robot rendszerének rugalmassága. Ezt a teszt során a robot

rendszerének gyengébb, rugalmasabb kapcsolatai és a befogott kapcsolat biztosították, valós környezetben tervezettnek, a rendszer kapcsolataitól független rugalmasságnak kell lennie.



20. kép Alkalmazott robotfej



21. kép Rugalmas robotfej

#### 4.2 Hibák illesztőelem független javítási lehetőségei

A falazóelemek hézagmentes elhelyezésével jelentkező hibák csökkenthetők és megszüntethetők azzal, ha egy megfelelő méretű az esetünkben 0,3 és 0,8 mm közötti biztonsági tényezőt építünk be elemenként a programba, ezzel eltartva az elemeket egymástól, így a robotkar negatív irányú tévedése esetén sem jelentkezik az elemek egymásra csúszása. Hátránya azonban, hogy amennyiben a robotkar nem vagy pozitív irányba téved az eltérés hézagként jelentkezik a falazatban. Ez a hézag befolyásolja a falazat hosszát, esztétikai akár strukturális szintű problémát is okozva, így kijelenthető, hogy ezzel a probléma csak egy részét lehet megoldani és a pozicionálóelemmel nem rendelkező blokkokat nem lehet teljes

pontossággal

elhelyezni

ezzel

a pontosságú

robotkarral.



22. kép Hézagos falazat sima elemmel

A sínen történő mozgáskor jelentkező hiba könnyen orvosolható a sebesség és a gyorsulás értékének csökkentésével. Ennek hátránya a hosszabb építési idő, ami egy jól működő program esetén a rakatok elhelyezésével és a fej mozgásának optimalizálásával mérsékelhető.

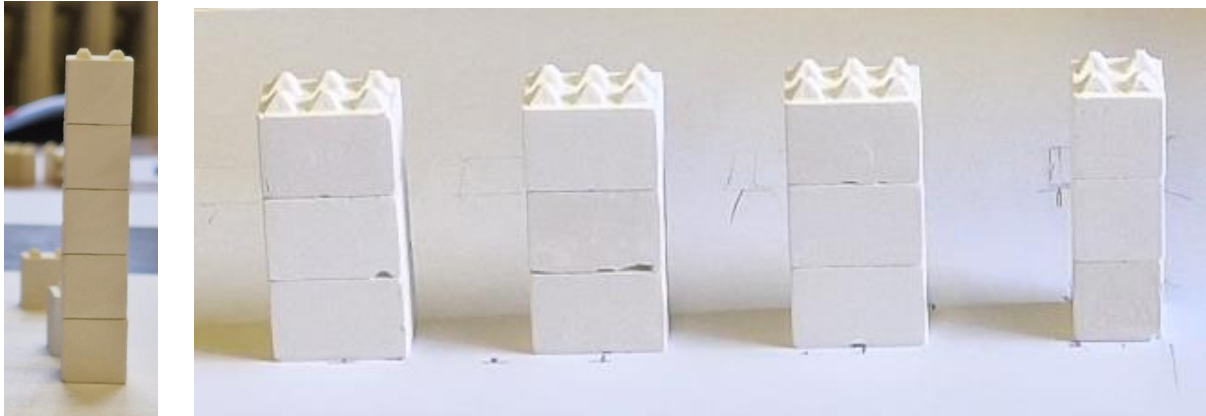
A függőleges síktól való eltérés jelentkezését követően több dolgot ellenőriztem a rendszeren, hogy ki lehessen zárni a rossz telepítésből származó hibát. Ez magába foglalta például annak ellenőrzését, hogy a robot talpa párhuzamos-e az asztallal, ezáltal annak elméleti függőleges tengelye merőleges-e arra. Miután ezek a hibák ki lettek zárva több teszt is igazolta, hogy a robotkar függőleges mozgása és nem az elrontott program a hiba. Ennek korrigálására a robot vezérlő programjának mélyebb tanulmányozására lenne szükség, ezért ez programozás útján nem lett korrigálva. Ugyanez tekinthető az adott gép hibájának is. Azonban nem elképzelhetetlen, hogy valós körülmények között is előforduljon ez a jelenség, így a rendszernek tudnia kell ezt kezelni.

Az első sor elmozdulásának kiküszöbölését a későbbi kutatások során érdemes lehet vizsgálni. Vizsgálni lehet valós környezetet (a valós méretű elem és a fogadó felület viszonyát). Abban az esetben, ha ez akkor is fennáll, akkor megoldási lehetőség lehet a felület érdességének növelése vagy valamilyen indító elemnek az elhelyezése (nulladik vagy első sorként kialakítva). Modell léptékben is megoldást jelenthet a felület érdességének a növelése.

A rakat elhelyezés problémájának a kutatás léptékében két megoldása vált lehetségessé. A pontos hely feljelölése egy minden elemen jól beazonosítható ponthoz viszonyítva. Ennél precízebb egy sablon létrehozása, melynek segítségével pozícionálhatóvá válik az oszlop akár a tér három irányában is. A kutatás során végül ez utóbbit nem próbáltam ki. Ipari környezetben



a ROD elméletnek megfelelően szükséges az automatizálás. Az építés helyszínén lehetséges az automatizált rendszerrel történő lehelyezés, szenzorral segített pozíció beállítás, vagy AI segítségével működő képfelismerésen alapuló pozíció beállítás.



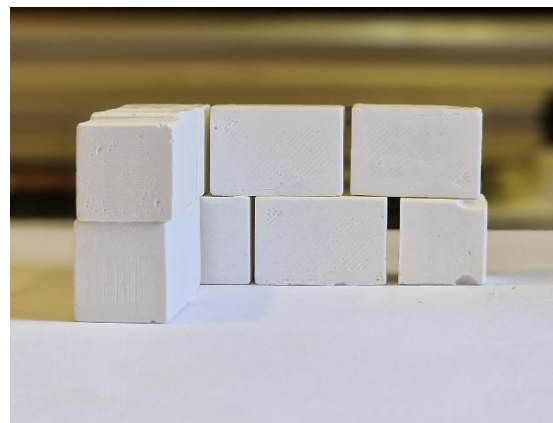
23. kép Rakatok

## 5. Összegzés

Az előzőekben ismertetett hibák jól megfigyelhetők a sima falazó elemen. A tér mindhárom síkjában történő kitérések és a biztonsági távolságoknak köszönhetően egy hézagos rajzolatú falazat jön létre. Ennek elemei egymáshoz képest gyakran elfordulnak kissé, azaz kilépnek a fal függőleges síkjából. Az ebből a típusú elemből készült elméletileg függőleges fal enyhe síkfogassággal rendelkezik.



24. kép Sima elem



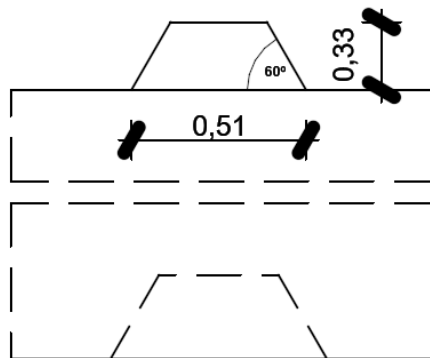
25. kép Falazat sima elemmel

## 5.1 Kialakított elemek

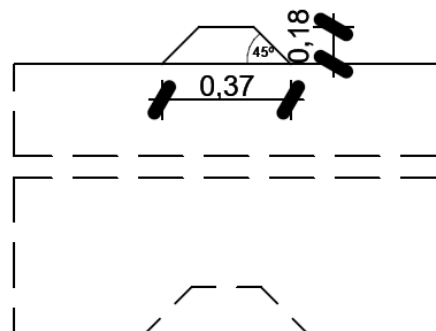
A pozicionáló gúlákkal ellátott falazóelemek a legtöbb kialakult problémát megoldották. A biztonsági távolságok ebben az esetben is szükségesek, de a megfelelő távolság esetén a gúlákat a megfelelő helyre igazították az érkező elemet, ezzel megszüntetve a hézagokat. Ugyanennek a mechanikának a fal függőleges síkból történő kitérése is megszűnik. Ezek a funkciók ugyanúgy működnek a csonka kúp (amelyet jól példáz Latteurcikke (Lateur, 2016)), mind a csonkagúla esetén. A csonkagúla kialakításának és hálós elhelyezésének köszönhetően megszűnnek a derékszögű rendszerből történő kitérések is. Az első sor elhelyezésekor jelentkező elmozdulás továbbra is jelen van. Azonban egy adott hiba mértékéig a második sor elhelyezésekor ezeket az elmozdult elemeket helyre húzza a felette elhelyezésre kerülő elem. Ez a módszer nem megfelelő huzamosabb használatra a robotra visszaható erők miatt. Meg kell oldani az első/nulladik sor pontos lehelyezését és ezekkel kell pozicionálni a későbbi elemeket.

A két pozicionáló gúla építőelem közötti különbség ennek a hibának a mértékében rejlik. A nagyobb (0,51 cm × 0,51 cm-es alappal 0,33 cm-es magassággal és 60° -os dőlésszöggel kialakított) 0,75 mm hibát tud korrigálni. A kisebb (0,375 cm × 0,375 cm-es alappal 0,18 cm-es magassággal és 45 -os dőlésszöggel kialakított) 0,40 mm hibát tud korrigálni. Ez jól mutatja, hogy a vizsgálat során a nagyobb pozicionáló gúlával rendelkező elem bizonyult jobbnak. A kisebb pozicionáló gúlákkal rendelkező elem a vizsgálat tapasztalatai alapján a várt hatás ellenkezőjét érték le. A kis hibahatár miatt az elemek az esetek többségében fennakadtak egymáson. A megakadt elemek hibás „Z” pozíció miatt a rákerülő elemeket is eltartották, ami a falazás elakadásához vezetett.

## NAGY POZICIONÁLÓ GÚLÁS ELEM

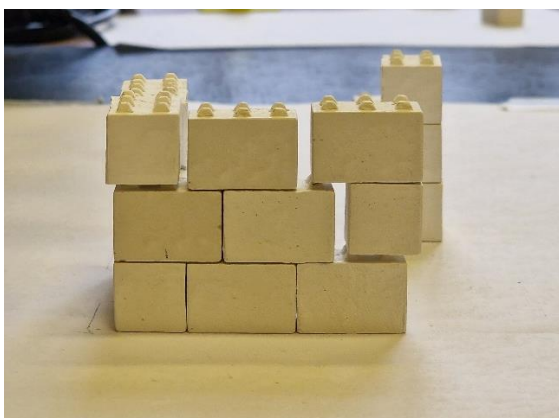


## KIS POZICIONÁLÓ GÚLÁS ELEM

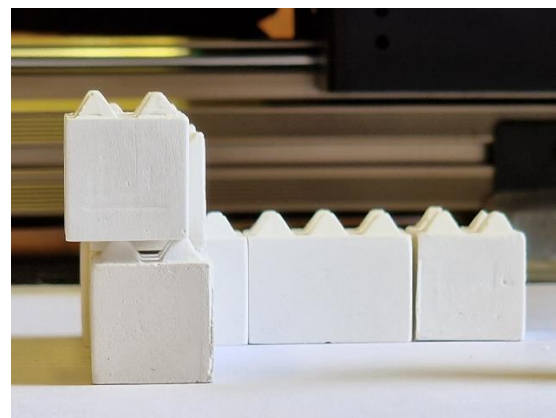


7. ábra Pozicionáló elemek

A hiba mértékétől függően a pozicionáló gúlával ellátott elemeknél is jelentkezhetnek az elemek közötti hézagok. Ezek jóval kisebbek a sima oldalú elemekhez képest. A hiba a sima elem esetén 0,80 és 1,30 mm között volt mérhető. A kis pozicionáló gúlás elem esetén 0,10-0,40 mm közé estek. Az ennél nagyobb hibák a már korábban leírt módon hiúsították meg a falazat elkészülését. A nagy pozicionáló gúlával ellátott elem esetén 0,1-0,75 mm közé esett. Ezzel szemben az utóbbi két esetben, ha a hiba nagyobb, mint a csonkagúla alapjának és tetejének vízszintes távolsága, illetve a fent említett maximális hiba értéke, akkor az érkező elem a lehelyezett elem csonkagúlainak tetején, az elem aljának vízszintes szakaszával támaszkodik fel.



26. kép Kis pozicionáló elemesfalazóblokk feltámaszkodása



27. kép Nagy pozicionáló elemesfalazóblokk feltámaszkodása



## 5.2 Fejlesztési javaslatok

Az előző fejezetek alapján a nagyobb pozicionáló gúlával rendelkező elem rendszerét érdemes tovább vizsgálni, továbbfejleszteni.

A rakat elhelyezéssel kapcsolatos probléma megoldására fejlesztési irány lehet egy az elem oldalában elhelyezett negatív csonkagúla és a robotkaron elhelyezett pozitív mása. Ezek kölcsönhatása az egymásra helyezett elemekhez hasonlóan biztosítanak a pontos megfogást.

Több gúla elhelyezésével növelhető a rendszer rugalmassága, ennek némileg ellentmond, hogy ez a megoldás kisebb méretű gúlákat eredményez.

## Források

### Irodalomjegyzék

- 1988 Bock Bock T 1988 Robot-Oriented Design. Proc. The 5th International Symposium on Robotics in Construction, June 6-8, Tokyo, Japan pp 135-144
- 1994 Andres J. Andres, T. Bock, F. Gebhart, W. Steck, First results of the development of the masonry robot system ROCCO: a fault tolerant assembly tool. 11th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC) pp 87-93 1994
- 1996 Pritschow G. Pritschow. et al. Technological aspects in the development of a mobile bricklaying robot. (Automation in Construction Vol 5) pp 3-13. 1996
- 2015 Bock T. Bock, T. Linner. Robot-oriented Design. Design and Management Tools for the Deployment of Automation and Robotics in Construction. Cambridge University Press, 2015.
- 2016 Latteur Pierre Latteur, Caitlin T. Mueller, Sebastien Goessens: Masonry construction with drones in “Spatial Structures in the 21st Century” 26–30 September, 2016, Tokyo, Japan

### Képjegyzék

- |         |  |                          |                        |
|---------|--|--------------------------|------------------------|
| 1.      | <a href="http://3Dnatives.com">3Dnatives.com</a>         | Vulcan 2                 | (letöltve: 2023.11.01) |
| 2.      | <a href="http://startupselfie.net">startupselfie.net</a> | HADRIAN X                | (letöltve: 2023.11.01) |
| 3.      | Saját  |                          |                        |
| 4.      | <a href="http://elsobeton.hu">elsobeton.hu</a>           | Beton falazó blokk       | (letöltve: 2023.11.01) |
| 5.      | <a href="http://xella.hu">xella.hu</a>                   | Ytong Classic NF 250     | (letöltve: 2023.11.01) |
| 5.      | <a href="http://wienerberger.hu">wienerberger.hu</a>     | Porotherm NF 25          | (letöltve: 2023.11.01) |
| 7.-8.   | Saját képek  |                          |                        |
| 9.      | <a href="http://beauvillebau.hu">beauvillebau.hu</a>     | Hagyományos téglafalazat | (letöltve: 2023.11.01) |
| 10.     | <a href="http://aminjumberi.com">aminjumberi.com</a>     | Hadrian X falazás        | (letöltve: 2023.11.01) |
| 11.-20. | Saját képek  |                          |                        |
| 21.     | <a href="http://news.mit.edu">news.mit.edu</a>           | Rugalmas robotfej        | (letöltve: 2023.11.01) |
| 22.-27. | Saját képek  |                          |                        |