

**VIŠJA STROKOVNA ŠOLA ACADEMIA
MARIBOR**

**PREDNOSTI IN POMANJKLJIVOSTI 3D TISKA
V GRADBENIŠTVU NA PRIMERU IZGRADNJE
INDIVIDUALNE HIŠE**

Kandidat : Gregor Šket

Vrsta študija: študent izrednega študija

Študijski program: Gradbeništvo

Mentor predavatelj: Dr. Ksenija Golob

Somentor predavatelj: Bojan Dapčević, univ. dipl. inž. grad

Mentor v podjetju: Smiljan Novak, inž. gradbeništva

Lektor: »Vpišite ime in priimek ter naziv«

Maribor, 2019

IZJAVA O AVTORSTVU DIPLOMSKEGA DELA

Podpisani Gregor Šket, sem avtor diplomskega dela z naslovom »Prednosti in pomanjkljivosti 3D tiska v gradbeništvu na primeru izgradnje individualne hiše«, ki sem ga napisal pod mentorstvom Novak Smiljana, inž. grad. ter dr. Ksenije Golob in Dapčević Bojana univ.dipl. inž.grad.

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- je predloženo delo izključno rezultat mojega dela,
- sem poskrbel, da so dela in mnenja drugih avtorjev, ki jih uporabljam v predloženi nalogi, navedena oz. citirana skladno s pravili Višje strokovne šole Academia Maribor,
- se zavedam, da je plagiatorstvo – predstavljanje tujih del oz. misli, kot moje lastne kaznivo po Zakonu o avtorski in sorodnih pravicah (Ur. l. RS 16/07 – uradno prečiščeno besedilo, 68/08, 110/2013 in 56/2015); (v nadaljevanju ZASP), prekršek pa podleže tudi ukrepom Višje strokovne šole Academia Maribor skladno z njenimi pravili,
- skladno z 32.a členom ZASP dovoljujem Višji strokovni šoli Academia Maribor objavo diplomskega dela na spletnem portalu šole.

Maribor, april 2019

Podpis študenta:

ZAHVALA

Za pomoč pri razvijanju ideje in nastanek diplome se zahvaljujem mentorjema na Akademiji, Bojanu Dapčeviču, univ. dipl. inž. grad. in dr. Kseniji Golob.

Zahvala gre seveda tudi mojemu mentorju v podjetju, Novak Smiljanu.

Za pomoč pri prikazu 3D tiskalnika se zahvaljujem Abram Jožetu, direktorju podjetja BetAbram.

Hvala tudi Igorju in Moniki, ki sta mi veliko pomagala z nasveti in vzpodbudo.

Še posebna zahvala pa gre ženi Jasmini in hčeri Lii za potrpljenje med mojih študijem ter mojima staršema, da sta mi omogočila dokončanje študija.

POVZETEK

V drugi polovici 20.stoletja so začeli širom sveta razmišljati o tehnologiji 3D tiskanja. Iz preproste ideje so se razvili visokotehnološki aparati, stroji, ki so zmožni natisniti prav vse kar bi si človek zaželel, stvari, za katere je prej bilo več priprav, kot dejanskega samega ustvarjanja. Natisnemo lahko na primer zobnik za palični mešalnik, ki se je pokvaril. S 3D tiskom namreč lahko natisnemo nek prototip, za katerega bi prej morali izdelati model, kalup in šele nato prototip. Poznamo več tehnologij, katere so namenjene različnim stvarjem, predvsem gre za razliko v gradivu, in sicer plastični polimeri ali kovina.

Iz sveta strojništva, oblikovanja, tudi medicine, se je ideja o 3D tiskanju prenesla tudi v gradbeno sfero oz. ljudi, ki razvijajo ideje za gradbeništvo. Prvi pravi sodobni začetki 3D tiska v gradbeništvu so stari okoli 30 let. V tem času so se tehnike izpopolnile, izboljšali so se materiali, uvedli so se primernejši materiali, modernizirali so se stroji, postali bolj sofisticirani, natančnejši, večji. Vzporedno se razvijajo nove tehnologije, novi pristopi. Vizionarji, pionirji 3D tiska vidijo potenciale, ki jih nudi 3D tisk (StudyLink, 2019).

Cilj mojega diplomskega dela je prikazati uporabo 3D-tiska v gradbeništvu, njegove prednosti in pomanjkljivosti v primerjavo s klasično uveljavljenim načinom gradnje. Na začetku bom prikazal kratko zgodovino 3D-tiska, različne metode 3D-tiska, področja uporabe 3D-tiska ter predstavil najbolj znane dosežke 3D-tiska. Kasneje se bom osredotočil na razvoj 3D-tiskalnikov v gradbeništvu. Predstavil bom slovenske pionirje 3D-tiska v gradbeništvu, podjetje BetAbram, ki je kot prvo na svetu ponudilo gradbene 3D-tiskalnike za prodajo. Predstavil bom še druge pomembnejše predstavnike v svetu gradbenega 3D-tiska in način, kako nameravajo podjetja s pomočjo 3D-tiska rešiti bivanjske razmere milijonom ljudem po svetu.

Poglavitni del diplomskega dela je primerjava klasične gradnje individualne hiše z gradnjo s pomočjo 3D-tiskalnika. V bližnji okolici ni investitorja, ki bi gradil s pomočjo 3D tiskalnika, zato bom zgolj teoretično naredil primerjavo, pregled in izračune, katera gradnja je boljša, katera cenejša, s katero hitreje zgradimo hišo, za katero potrebujemo manj delovne sile ter prednosti in pomanjkljivosti enega in drugega načina gradnje. V sklepu bom predstavil svoje ugotovitve.

Ključne besede: 3D-tisk, sodobna tehnologija, prihodnost, dostopnost, potencial

ABSTRACT

ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF 3D PRINTING IN CIVIL ENGINEERING ON A CASE OF INDIVIDUAL HOUSE

In the second half of the 20th century, all around the world thinking about 3D printing technology began. High-tech appliances, machines that are capable of printing exactly what a person would like, things for which there were more preparations than the actual creation themselves, were developed from a simple idea. With 3D printing, printing a prototype is more convenient, because earlier we would have to design a model, a mold, and then a prototype. Several technologies that are designed for different things are known. From the world of a mechanical engineering, design and medicine, the idea of 3D printing has been applied also to civil engineering where new ideas for construction are developed. The first beginnings of 3D printing in the construction industry are about 30 years old. During this time, the techniques and materials were improved, more adequate materials were introduced, machines were modernized, they became more sophisticated, precise and larger. New technologies and approaches are developed in parallel. The goal of my graduation thesis is to demonstrate the use of 3D printing in the civil engineering and to show its advantages and disadvantages in comparison with the classically established construction method. At the beginning we will present the short history of 3D printing, various 3D printing methods, the fields of 3D printing, and present the best-known achievements of 3D printing. Next, we will concentrate on the development of 3D printers in the civil engineering. Presented will be company BetAbram- the Slovenian pioneers of the 3D printing in civil engineering. They are the world's first company that offered for sale 3D printers for use in civil engineering. We will also present other important representatives of 3D printing from the field of civil engineering and the ways companies intend to solve the housing problems of millions of people around the world with help of 3D printing. The main part of the thesis is the comparison of the classical construction of an individual house with the construction of a house with a 3D printer. Since there is no investor to build a house with 3D printer in the near vicinity, we will make a comparison only theoretically. An overview and calculations comparing both construction types will be presented. We compare quality, costs, time and labor needed for the construction. The advantages and disadvantages of both constructions type will be made. In conclusion we will present our findings.

Key words: 3D printing, modern technology, future, accessibility, potential

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	9
1.1	OPIS PODROČJA IN OPREDELITEV PROBLEMA	9
1.2	NAMEN, CILJI IN OSNOVNE TRDITVE	10
1.3	PREDPOSTAVKE IN OMEJITVE	10
1.4	UPORABLJENE RAZISKOVALNE METODE	10
2	DELO V PROJEKTNi SKUPINI	11
3	ZGODOVINA IN PRESTAVITEV 3D TISKA.....	14
3.1	ZGODOVINA IN UPORABA 3D TISKA.....	14
3.2	RAZVOJ 3D TISKALNIKOV V GRADBENiŠTVU	15
3.3	MOŽNOSTI UPORABE 3D TISKA, NJGOV POTENCIAL	19
3.4	DOSEDANJI GRADBENI DOSEŽKI NA PODROČJU 3D TISKA	20
4	KRATEK PREGLED GRADBENIH 3D TISKALNIKOV	23
5	KLASIČNA GRADNJA	29
6	GRADNJA S 3D TISKOM	31
7	PREDNOSTI IN POMANJKLJIVOSTI 3D TISKA NA PRIMERU IZGRADNJE INDIVIDUALNE HIŠE	33
7.1	PRIMERJAVA KLASIČNE GRADNJE S 3D TISKOM	33
7.1.1	Prednosti	33
7.1.2	Pomanjkljivosti	34
7.2	OCENA STROŠKOV GRADNJE	35
8	SKLEP	43
9	LITERATURA IN VIRI	46
10	PRILOGE.....	48

KAZALO SLIK

SLIKA 1: STANOVANJSKA HIŠA Z RAVNO NEPOHODNO STREHO.....	11
SLIKA 2: PRIMER ZIDU S CIKCAK NOTRANJO OPORO.....	12
SLIKA 3: PRIMER OSNUTKA PROJEKTA GRADNJE TIPSКИH HIŠ PODJETJA ICON	13
SLIKA 4: 3D PISALO	14
SLIKA 5: MENDEL PRUSA	15
SLIKA 6: PRIMERJAVA OPAŽA (A) IN TISKANEGA ZIDU (B)	16
SLIKA 7: RADIOLARIA	17
SLIKA 8: TISKALNIK BETABRAM P1.....	18
SLIKA 9: STROJ HADRIAN X, FASTBRICK ROBOTICS.....	19
SLIKA 10: BETONSKI MOST V MADRIDU	20
SLIKA 11: JEKLEN MOST V AMSTERDAMU, KI JE BIL NATISNJEN S TEHNOLOGIJO VARJENJA.....	20
SLIKA 12: 3D NATISNJENA PISARNA V DUBAJU	21
SLIKA 13: 5 NADSTROPNA STAVBA V KITAJSKI.....	21
SLIKA 14: 3D NATISNJENA VILA, PODJETJE WINSUN	22
SLIKA 15: TAKŠNIH 10 HIŠ BI NAJ PODJETJE WINSUN NATISNILO V ZGOLJ 24 URAH, KAR PA JIM NEKATERI OPOREKAJO	22
SLIKA 16: PRVA NASELJENA TISKANA HIŠA	22
SLIKA 17: 3D TISKALNIK PODJETJA WINSUN.....	24
SLIKA 18: ANIMACIJA GRADNJE SISTEMA CONTOUR CRAFTING	24
SLIKA 19: APIS COR MED TISKANJEM VZORČNE HIŠE.....	25
SLIKA 20: TISKALNIK BIG DELTA 3D TISKA Z MEŠANICO BLATA IN SLAME.....	26
SLIKA 21: ANIMACIJA 3D TISKALNIKA WASP BIG DELTA.....	26
SLIKA 22: LEVO CAZZO X1, PODJETJA CAZZA CONSTRUCTION, DESNO CYBE RC 3DP PODJETJA CYBE CONSTRUCTION.....	27
SLIKA 23: D-SHAPE TISKALNIK.....	27
SLIKA 24: NAČRT TŁORISA TEMELJEV	30
SLIKA 25: PRIMER TISKANJA STEN S TISKALNIKOM BETABRAM P1	32
SLIKA 26: TISKANJE TEMELJEV S TISKALNIKOM APIS COR	38

KAZALO TABEL

TABELA 1: 3D TISK TEMELJEV	37
TABELA 2: 3D TISK STEN KLETI	38
TABELA 3: 3D TISK STEN PRITLIČJA	39
TABELA 4: 3D TISK STREŠNEGA VENCA	40
TABELA 5: DOLŽINA NATISNJENEGA SLOJA	41
TABELA 6: CENOVNA PRIMERJAVA KLASIČNE GRADNJE IN 3D TISKA	42

1 UVOD

Skozi zgodovino smo spoznali veliko načinov gradnje. V antiki so bili zelo napredni gradbeniki, veliko objektov iz takratnega časa ponosno stoji še danes. V srednjem veku so gradbeniki nekoliko stagnirali, ponovno se je razvoj gradbeništva pospešil v 19.stoletju, predvsem z uporabo jekla in armiranega betona. Pred nami je morebitna nova gradbena revolucija. V zadnjem času je vedno večje zanimanje za velike 3D tiskalnice, ki so zmožni natisniti celotne gradbene strukture, hiše, mostove, skulpture (Asprone, Auricchio, Menna, & Mercuri, 2018). V diplomskem delu bom poskušal pokazati, ali je ta revolucija v gradbeništvu resnično mogoča tudi pri gradnji individualne hiše. Predvsem je najbolj glasna trditev, da si bo s 3D tiskalnikom lahko vsak z minimalnimi stroški natisnil svojo hišo, katere si zaradi previsokih stroškov s klasično gradnjo ne bi mogel. Je res takšna razlika v ceni? Obenem pomeni 3D tiskalnik manj ljudi na gradbišču, saj povprečno nadomesti vsaj tri ljudi naenkrat, zidarja, pomočnika in mešalca. Vsekakor je vredno omembe dejstvo, da je gradnja z 3D tiskalnikom hitrejša od klasične gradnje, ker imam namen v diplomskem delu dokazati (GIPOSS, 1984). V diplomskem delu bom predstavil kratko zgodovino razvoja 3D tiskalnikov, njihovo delovanje. Posvetil se bom tudi predstavitvi gradbenih 3D tiskalnikov, njihove tehnologije ter njihove dosedanje dosežke in predvsem potencial. Bistvo mojega diplomskega dela je primerjava klasične gradnje in gradnje s 3D tiskom. Predstavil bom izračune za primer gradnje individualne hiše na klasičen način, to je z betonom in opeko ter izračune gradnje s 3D tiskom, vključno s pripravo 3D tiskalnika in njegovim obratovanjem. Naredil bom primerjavo obeh in predstavil rezultate.

1.1 Opis področja in opredelitev problema

3D tisk je relativno mlada tehnologija, v gradbeništvo si pa pot utira šele v zadnjih nekaj letih. Osnovna ideja inovatorjev na tem področju je poenostaviti, pospešiti ter s tem znižati ceno gradnje raznih objektov, predvsem stanovanjskih hiš. Zanimivo pri tem je, koliko različnih smeri v smislu tehnologije in materialov so ubrali inovatorji na tem področju, rezultat pa je zelo podoben. Velika verjetnost je, da se bo 3D-tisk v prihodnosti še razširil (Hager, Golonka, & Putanowicz, 2016).

1.2 Namen, cilji in osnovne trditve

V tem diplomskem delu nameravam raziskati, ali je 3D tisk prihodnost gradbeništva. Razvijalci oz. inovatorji 3D tiska trdijo, da se bo svet drastično spremenil, predvsem zaradi nizke cene izgradnje hiše s pomočjo 3D tiska. Ameriško podjetje Icon namreč trdi, da bodo lahko v bližnji prihodnosti iz 10000\$ na bivanjsko enoto znižali ceno na 4000\$ na enoto (The Verge, 2019). Ena izmed večjih prednosti 3D tiska v primerjavi s klasično gradnjo je, da je potrebno manj delovne sile. A vprašanje je, kakšno je zaupanje ljudi v hiše, zgrajene s tehnologijo 3D-gradnje. Do zdaj še ni preteklo dovolj časa, da bi se do zdaj zgrajene hiše lahko dokazale s svojo odpornostjo na vremenske pogoje.

H1 Glede na splošni razmah in napovedi vedno novih izdelovalcev 3D-tiskalnikov je za pričakovati, da je 3D-tisk prihodnost gradbeništva.

H2 3D tisk v gradbeništvu bo pocenil gradnjo individualne hiše in omogočil več investitorjem streho nad glavo.

H3 S pomočjo 3D tiska bo 30% manj delovne sile potrebne za izgradnjo individualne hiše do 4. gradbene faze.

H4 S 3D tiskom je 4. gradbena faza časovno prej zaključena

1.3 Predpostavke in omejitve

Pri raziskovanju za to diplomsko delo sem bil omejen z literaturo, saj je ni prav veliko s to tematiko. Druga omejitev je pa omejitev poslovne skrivnosti, saj je to nova tehnologija.

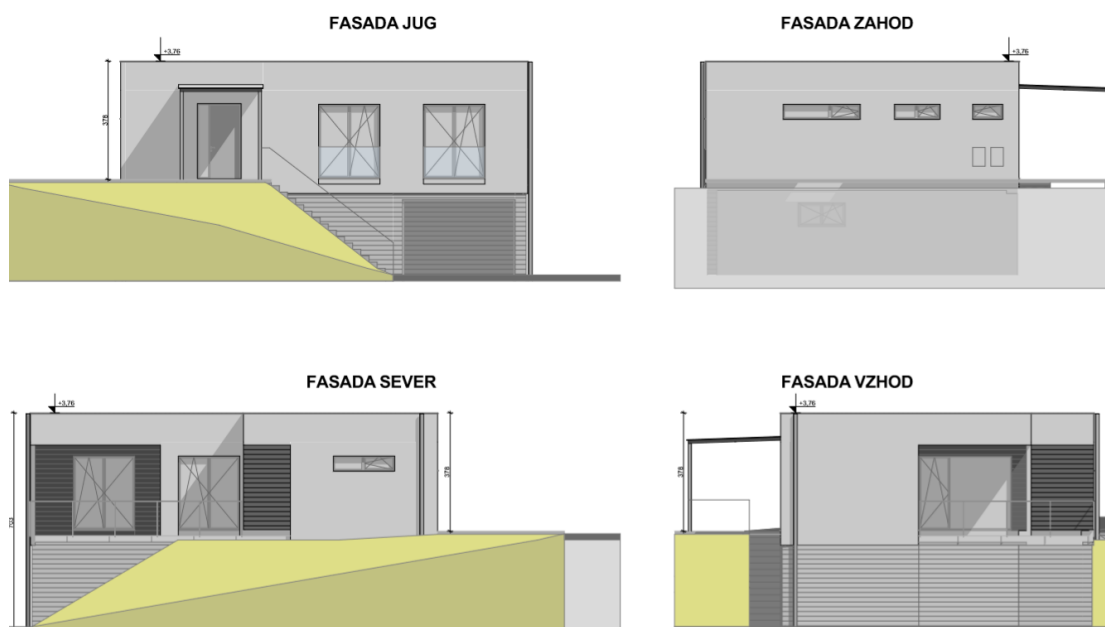
1.4 Uporabljene raziskovalne metode

- iskanje informacij v literaturi in na svetovnem spletu,
- raziskovanje na terenu,
- poizvedovanje pri strokovnjakih na različnih institucijah,
- fotografiranje surovin, materialov in objektov,
- analiziranje rezultatov
- deskriptivna metoda
- komparativna metoda

2 DELO V PROJEKTNI SKUPINI

V okviru zaključevanja študija smo imeli v prostorih Academie skupno srečanje, kjer smo se pogovorili o izdelavi diplomskega dela in obenem rešili Myers-Brisgsov test osebnosti ter Belbinov popis tima. S podatki slednjih smo sestavili projektne skupine, v katerih smo si razdelili naloge glede na naše rezultate. Vsako skupino so sestavljali vodja projekta, projektant, komercialist, kalkulant in oseba, zadolžena za pripravo dela. Sam sem bil slednje, glede na Belbinov popis tima, kjer sem bil označen kot »izvajalec« in »zaključevalec«.

Naš projekt je bil izgradnja individualne stanovanjske hiše. Naročnik investitor je želel preprosto enostanovanjsko hišo s kletjo in garažo ter ravno, nepohodno streho.



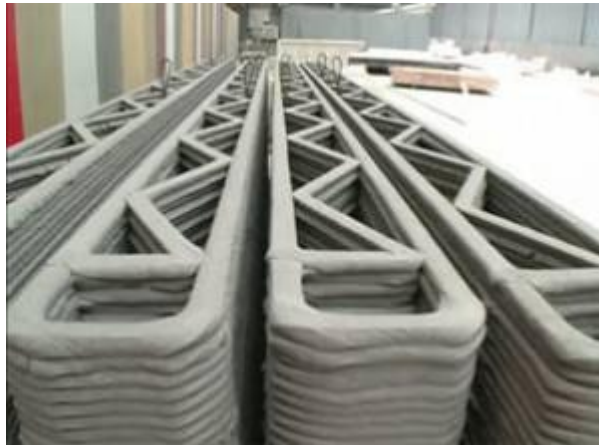
Slika 1: Stanovanjska hiša z ravno nepohodno streho

Vir: lastni(iz projektne dokumentacije)

Ekipi sem predstavil projekt in glede na geodetski posnetek terena in dimenzij same parcele smo določili lego hiše. Teren je pod naklonom, zato je hiša delno podkletena. Na jugozahodni in severozahodni strani je od parcelnega roba oddaljena 4 m, na severovzhodni strani 5,6 m, na jugovzhodni strani pa 10 m. Na jugozahodni strani parcela meji na cesto.

Moje diplomsko delo je primerjava klasične gradnje in 3D tiskane gradnje. Na podlagi načrtov sem ekipi predstavil način gradnje, ki je do zdaj še precejšnja neznanka večini gradbenikov. S pomočjo posnetkov z interneta sem jim prikazal, kako nameravam izgraditi hišo s 3D tiskalnikom od temeljev navzgor. Po pregledu situacije smo skupaj določili najoptimalnejši

položaj tiskalnika za gradnjo. Tega je bilo potrebno postaviti na ravno, utrjeno podlago, katero smo zagotovili z dvema pasovnima temeljema. 3D tiskalnik je sestavljen iz varjenih aluminijastih profilov v mostni obliki. Tiskalnik se vzdolžno premika po tirnicah, ki so na temeljih, most, na katerem je tiskalna glava, se premika navpično, na mostu pritrjena tiskalna glava ima gibanje levo in desno. Najprej na utrjeno podlago natisnemo robove temeljev in temeljne plošče z betonom trdnostnega razreda MB30, katerega so nam zemeljsko vlažnega dostavili na gradbišče. Te robove uporabimo namesto opažev, znotraj položimo betonsko železo in temeljno ploščo zalijemo z betonom. Naslednji korak je tiskanje kletnih sten in AB stebrov. Princip postavljanja sten s 3D tiskom temelji na tem, da natisnemo zunanji in notranji obod stene, zidu. Debelino stene, zidu določimo z odmikom notranjega oboda od zunanjega. Vmesni prostor lahko zapolnimo z armaturo in betonom, izolacijo, pustimo prazno, lahko pa tudi natisnemo vmesno povezovalno steno v cikcak obliki.



Slika 2: Primer zidu s cikcak notranjo oporo

Vir: (<https://3dprintheq.com/wp-content/uploads/2014/05/3d-printed-wall-infill-300x221.jpg>)

Na zgornji sliki prikazani primerki zidu so prefabricirani zidni elementi, namenjeni za sestavo zidu, natisnjeni pa so s FDM (tehnologija ciljnega nalaganja) 3D tiskalnikom. Tako natisnjeni zidni elementi se lahko postavijo eden na drugega ali eden ob drugem, saj s cikcak natisnjenimi veznimi elementi zunanji in notranji obod stene dobita zadostno oporo in stabilnost. Ob robovih je lepo razviden prostor, ki ga v primeru postavitve elementov enega na drugega, uporabimo za vertikalno ojačitev, v katero le vstavimo betonsko železo ter vgradimo beton.

V našem primeru so predvidene AB stene, zato smo v vmesne prostore sprotno vstavljali armaturo, da smo jo lahko vezali, nakar smo vmesne prostore zalili z betonom. Sledila je etažna plošča, nakar se princip 3D tiskanja sten pritličja ponovi, kakor tudi na vencu ravne strehe. V primeru sten pritličja in strehe smo kot polnilo vmesnih prostorov predvideli betonsko mešanico

izolativnega glinopora in cementa. Pojavilo se je vprašanje, kaj pa s prekladami okenskih in vratnih odprtin. Preklade pa se vnaprej natisnejo, vmes med posameznimi sloji dodamo betonsko železo, ko pa jih potrebujemo, jih s pomočjo 3D tiskalnika, ki v tem primeru deluje kot mostno dvigalo, dvignemo in postavimo na predvideno mesto. Za vnos načrtov v tiskalnik uporabimo program Sketchup, shranimo v G-kodo in spremenimo v .STL končnico.

Odločili smo se, da bo del ekipe delal na projektu klasične gradnje, moj del projekta pa je teoretična ocenitev in izračun glede na znane podatke, kako bi se obneslo, če bi to isto hišo zgradili s tehnologijo 3D tiska, saj zaenkrat v Sloveniji žal še ni investitorja, ki bi se podal v projekt gradbenega 3D tiskanja.



Slika 3: Primer osnutka projekta gradnje tipskih hiš podjetja Icon

Vir: (<https://cdr.cz/clanek/novy-dum-si-dnes-uz-vytisknete-hotovy-je-za-24-hodin-stoji-200-tisic/diskuseNovinkyOstatn>)

Računalniška grafika z zgornje slike prikazuje projekt gradnje tipskih hiš podjetja Icon (ZDA), ki uporabljajo FDM 3D tiskalnik, ki je enake idejne zasnove, kot tiskalnik BetAbram P1.

Delo v skupini je potekalo sproščeno, veliko zapletov, predvsem v zvezi s postavitvijo tiskalnika, smo rešili v kratkem času, skupaj razvijali nove rešitve in ideje za 3D tisk na terenu.

3 ZGODOVINA IN PRESTAVITEV 3D TISKA

3.1 Zgodovina in uporaba 3D tiska

Začetki 3D tiskanja segajo v 60. leta 20. stoletja. Ampak šele v 80.-ih letih se je začel resni razvoj 3D tiskalnikov. Leta 1981 so na Japonskem razvili dve metodi za proizvodnjo 3D modelov s toplotno občutljivim fotopolimerom, ki je ga je z matrico ciljno obsevalo z UV svetlobo, da je pridobil obliko (ALL3DP, 2019).

Julija 1984 so trije Francozi patentirali stereolitografski (STA) proces, a njihovega dela oz. pomena njihovega dela niso prepoznali pri dveh velikih korporacijah in jih niso finančno podprli. Istega leta je v ZDA je za enako metodo (STA) vložil patent Chuck Hull, po katerem se še danes izvaja STA metoda 3D tiskanja. STA metoda 3D tiskanja deluje tako, da 3D tiskalnik najprej naloži plast tekoče fotopolimerne plastike-smole v plasteh debeline 0,05-0,15 mm. To tekočo plastiko nato ciljno po načrtu 3D tiskalnik osvetli z laserjem z UV žarki, da se na teh mestih strdi. Preko tega se nanese nov sloj smole, se ga osvetli z laserjem itd. plast za plastjo, dokler 3D model ni natisnjen. Ker pa ta model vsebuje še veliko nestrjene smole, se ga potopi v kemično raztopino, kjer se nestrjena smoli stopi, model pa se osuši v UV-pečici (ALL3DP, 2019).

Leta 1989 je podjetje Stratasys razvilo metodo 3D tiska, ki se povečini uporablja danes, t.j. metoda plastične ekstruzije oz. metodo ciljnega nalaganja (FDM). Najpreprostejši predstavnik teh 3D tiskalnikov je 3D pisalo. Prvi komercialni model 3D tiskalnika so lansirali na trg leta 1992 (Stratasys, 2019).



Slika 4: 3D pisalo

Vir: (<https://unic-3d.com/en/3d-pens/158-3d-pen.html>)

Leta 1995 je dr. Carl Deckard razvil metodo selektivnega laserskega taljenja (SLS). Ta metoda je nadgradnja SLA metode, pri čemer SLS uporablja materiale v prahu (Muck & Križanovskij,

2015). Te praškaste materiale 3D tiskalnik nanaša v plasteh v inertni atmosferi, nato pa jih laserski žarek tali po načrtu. Po taljenju se material strdi, ostali prah pa kasneje služi za podporo višjim slojem. Sloj po sloj se postopek ponavlja, dokler model ni končan. Višek praškastega materiala se preprosto strese iz modela in se ga lahko ponovno uporabi (Aniwa, 2019).

V Veliki Britaniji so v letu 2005 začeli odprtokodni projekt RepRap (RepRap, 2019), s katerim so omogočili, da se 3D tiskalnik natisne samega sebe oz. svoje sestavne dele, ki se jih nato sestavi v delujoč 3D tiskalnik.



Slika 5: Mendel Prusa

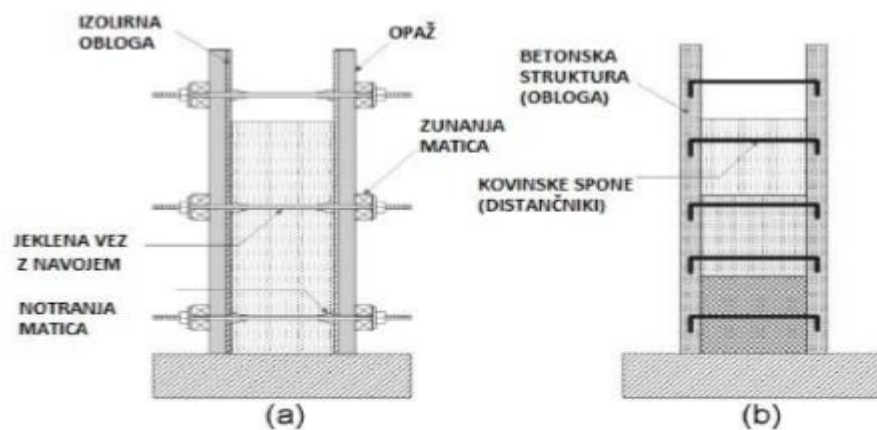
Vir: (<https://www.3dhubs.com/3d-printers/mendel-prusa>)

Leta 2013 so pri agenciji NASA ustvarili prvi prototip velikega formata dostopnega 3D tiskalnika, imenovanega Gigabot in obenem ustanovili podjetje re:3D. To podjetje je v letu 2018 razvilo sistem, ki uporablja plastične pelete iz mlete odpadne plastike (ALL3DP, 2019).

3.2 Razvoj 3D tiskalnikov v gradbeništvu

Prve začetke avtomatizirane gradnje, na nek način predhodnika 3D tiskanja, datiramo v 50. in 60. leta 20. stoletja. Takrat so razvijali robotizirano »zidanje«. Dejansko je šlo za avtomatizirano polaganje zidakov, ki so jih polnili z betonom in izolacijsko peno. V 80. in 90. letih so na japonskem razvijali drseče opaže, predvsem zaradi naraščajočih potreb po hitri gradnji. Resnejši razvoj 3D tiskalnikov za gradbeništvo se je začel s prvo tehniko, ki jo je razvijal Joseph Pegna, ki bi naj cementno-peščeno mešanico oblikovala in združevala plast s plastjo s pomočjo pare. Ta metoda sicer nikoli ni bila prikazana (Autodesk BIM 360, 2019).

Naslednjo resnejšo tehniko je pred dobrimi 20 leti začel razvijati dr. Behrohk Khoshnevis s kalifornijske univerze (USC). Imenuje se CCS (Contour Crafting System). Gre za sistem ciljnega nalaganja materiala (FDM) z ekstruzijo s sprotim oblikovanjem ter armiranjem in možnostjo hkratnega polaganja instalacijskih vodov. Princip delovanja je podoben plastični ekstruziji, le da v tem primeru ne poteka ekstruzija plastike, temveč ekstruzija betonske mešanice, ki mora biti prave konsistence, da jo lahko šoba nanaša. Ponavadi 3D tiskalniki te tehnologije natisnejo zunanji in notranji obod stene, nato pa še vezne elemente med temi. 3D tiskanje te tehnologije je postavljeno pred preizkušnjo, ko pride do kakšnega previsa in premostitve odprtine v zidu. Te ponavadi rešimo tako, da vstavljamo prefabricirane preklade, ki jih pa tudi lahko natisnemo na gradbišču in jih s tiskalnikom dvignemo in postavimo na željeno mesto. Prav tako lahko vstavljamo razne druge podpore in ojačitve. A tehnologija ima zaradi hitrosti gradnje velik potencial pri izgradnji in obnovi naselij po kakšnih naravnih katastrofah(potres, tornado...) Še ena velika prednost Contour Crafting sistema je ta, da za postavitev betonskega zidu ne potrebujemo opaža, saj s 3D tiskalnikom natisnemo zunanji in notranji obod zidu, ga ojačamo s vstavljanjem spon v še mehko steno in zalijemo z betonom (Gorše, 2014) (Autodesk BIM 360, 2019).



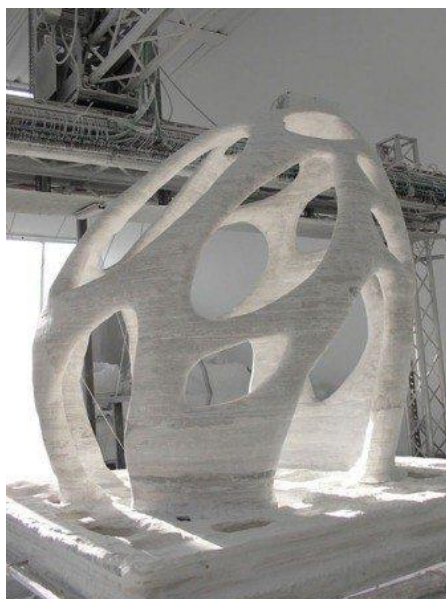
Slika 6: Primerjava opaža (a) in tiskanega zidu (b)

Vir: (Pavletič, 2016)

Leta 2005 je Italijan Enrico Dini patentiral »D-SHAPE« tehnologijo tiskanja (D-SHAPE, 2019). Tehnologijo, ki je prvotno bila mišljena kot »jetting/bonding« za delovanje z epoksijem, je bila prilagojena za uporabo z anorganskimi veznimi elementi. V bistvu je to stereolitografija, le da je v precej večjem merilu in uporablja druge materiale namesto plastike. »D-SHAPE« je registrirana blagovna znamka in obenem predstavlja tehnologijo, s katero lahko hišo natisnemo od temeljev navzgor do zaključnih del. Princip delovanja D-SHAPE 3D tiskalnika je sledeč.

Sam tiskalnik stoji, glede na njegovo dimenzijo, na najmanj štirih podpornih stebrih, na katere je vpeta tiskalni most oz. ploščad, ki se v procesu 3D tiskanja sloj po sloj dviguje. Projekt, načrtovan z uporabo CAD-3D računalniške tehnologije prenesemo v .STL datoteko (stereolitography). To uvozimo v računalniški program, ki nadzoruje tiskalnik. Ko je načrt vnesen v program, 3D tiskalnik nasuje v sloju, debeline 5-10 mm, peščen material, preko katerega v naslednjem koraku ciljno preko cevk, ki so razporejene po celotni širini ploščadi doda vezivo, ki strdi peščenjak in tako nastane oblika. Peščenjak ostaja v vsakem sloju in tako služi kot podporna struktura vsaki naslednji plasti. Na ta način se lahko tiska kompleksne oblike z odprtinami in previsi, ustvarijo se lahko konveksne in konkavne oblike, stopnice in stropovi, itd. Ko je tiskan objekt končan, se višek peščenjaka odstrani. V teoriji lahko »D-SHAPE« 3D tiskalnik natisne hišo od temeljev, plošče, zidov, keramike, strehe, previse... v bistvu lahko hišo teoretično že skoraj naselimo (D-SHAPE, 2019).

Lep primer zmogljivosti te tehnologije je »Radiolaria«, skulptura, ki jo je oblikoval arhitekt Andrea Morgante na osnovi mikroorganizma. Zanimiv je predvsem strošek za material, ki je znašal le 60 £ (D-SHAPE, 2019).



Slika 7:Radiolaria

Vir: (<https://www.dezeen.com/2009/06/22/radiolaria-pavilion-by-shiro-studio>)

Leta 2013 je slovenski podjetnik Jože Abram na trg v prodajo kot prvi ponudil 3D tiskalnik. Njegovo podjetje BetAbram ponuja tri velikosti tiskalnika, s katerim lahko natisnemo hišo od temeljev navzgor (BetAbram, 2019). Prednost njegove tehnologije je predvsem v tem, da lahko uporablja beton z agregatom granulacije do 16 mm, česar drugi 3D tiskalniki niso zmožni.

Njihov 3D tiskalnik je sestavljen iz aluminijastih profilov v obliki paličja, pomeni da je lahek. Dimenzioniran je, da se ga pospravi v navaden 20ft oziroma 6m zabojnik. Trenutno za delovanje potrebuje 5 oseb, saj je treba ročno nalagati betonsko mešanico v korito, s katerim se dovaja betonska mešanica v tiskalno glavo, pripravljajo pa se na posodobitev, ki bo omogočila, da tiskalnik upravljata 2-3 osebi.



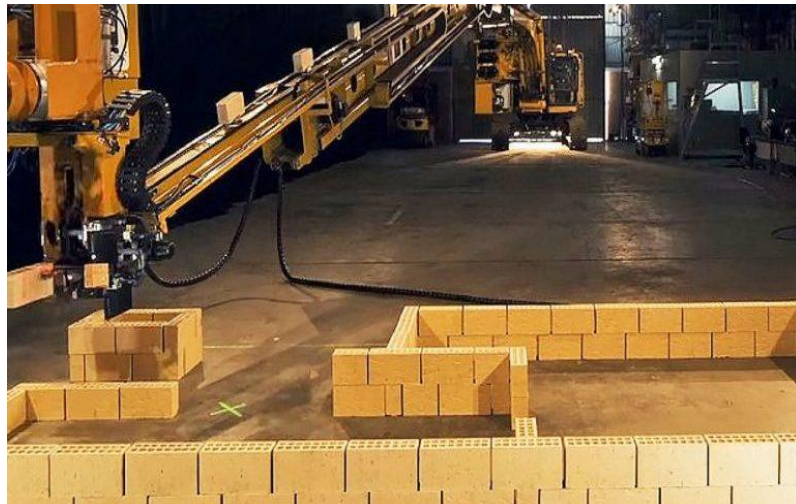
Slika 8: Tiskalnik BetAbram P1

Vir: (lastni)

Leta 2013 je bila patentirana tehnologija FreeFab Wax, ki je v bistvu kombinacija 3D tiska in rezkanja. Dejansko deluje tako, da natisne modele, opaže oz. kalupe iz voska, jih po potrebi še izreza, nato nanje nabrizga beton, okrepljen s steklenimi vlakni. S tem se lahko ustvarijo kompleksni odlitki. Uporabljen vosek se odlušči ali stali z odlitka in se lahko kasneje ponovno uporabi (Freefab, 2019).

Podjetje MX3D Metal je razvilo dva 6-osna robotska tiskalna sistema. Eden deluje na ekstruzijski način, drugi pa vari. S tem sistemom so natisnili oz. zvarili most za pešce v Amsterdamu (MX3D, 2019).

Podjetje iz Perth, Avstralije, Fastbrick Robotics (Robotics, 2019), razvija svoj koncept avtomatizirane gradnje, 3D tiska, gradbeni stroj Hadrian X. Njihov sistem se razlikuje od ostalih v tem, da preko dolge robotske roke stroj polaga zidak za zidakom. Sistem je opremljen z laserskimi merilniki, zato natančno polaga zidake po vnesenih podatkih, načrtih in v točno določenih gabaritih. V robotski roki je tekoči trak, po katerem potujejo zidaki, katere sistem na koncu roke namaže z gradbenim lepilom, jih po potrebi zmanjša in položi na točno določeno mesto.



Slika 9: Stroj Hadrian X, Fastbrick Robotics

Vir: (<https://www.hexapolis.com/2016/07/30/hadrian-x-powerful-robot-build-a-house-in-2-days/>)

3.3 Možnosti uporabe 3D tiska, njegov potencial

Možnosti za uporabo 3D tiska so tako rekoč brezmejne. Že zdaj so konstruktorji dokazali, da je možno natisniti praktično vsako poljubno obliko. Največje upanje v dostopnejšo tehnologijo polagajo v revnejših deželah, kjer bi lahko s serijsko proizvodnjo, gradnjo hiš rešili marsikateri stanovanjski, bivanjski problem (The Verge, 2019).

Futuristi že ustvarjajo kolonije na Luni, kamor bi samo prenesli 3D tiskalnike, ti pa bi s tam prevladujočim materialom, peskom, lahko natisnili stavbe poljubnih oblik (SSERVI, 2019).

NASA že načrtuje kolonizacijo Lune in Marsa. 3D tiskalniki bi lahko bili v veliko pomoč pri gradnji zatočišč, saj je klasična gradnja v okolju na Luni in Marsu praktično nemogoča, s strokovnjaki s kalifornijske univerze pa so delijo mnenje, da bi lahko uporabljali lokalne materiale (SSERVI, 2019).

Potenciala je še zelo veliko v razvoju 3D tiskalnikov, večja težava je zaupanje ljudi v to tehnologijo. Vsekakor pa bo v razvoju in širitvi 3D tiskalnikov v gradbeništvu pomagal BIM, informacijsko gradbeno modeliranje. Informacijsko modeliranje v dobi računalniškega projektiranja in razvijanja uporabljamo vedno bolj, saj s tem prihranimo čas in s tem denar.

3.4 Dosedanji gradbeni dosežki na področju 3D tiska

V parku v Madridu stoji prvi betonski natisnjen most za pešce, ki ga je v sodelovanju z s podjetjem Enrica Dinija leta 2016 oblikoval in natisnil Inštitut za napredno arhitekturo Katalonije (IAAC). Most so natisnili z D-shape 3D tiskalnikom. Uporabili so mikroarmirano betonsko mešanico. Dolg je 12 m in širok 1,75 m (IAAC, 2019).



Slika 10: Betonski most v Madridu

Vir:(<https://iaac.net/project/3d-printed-bridge/>)



Slika 11: Jeklen most v Amsterdamu, ki je bil natisnjen s tehnologijo varjenja.

Vir:(<https://www.dezeen.com/2018/10/22/worlds-first-3d-printed-steel-bridge-completed-mx3d-technology/>)

Most za pešce na zgornji sliki je dejansko var iz nerjavečega jekla. Robot, tiskalnik je postopoma dodajal material z varjenjem in oblikoval most, katerega so najprej postavili na trgu kot predstavitev, šele nato ga bodo postavili na mesto, kjer bodo ljudje lahko prečkali kanal in občudovali stvaritev nove tehnologije.



Slika 12: 3D natisnjena pisarna v Dubaju

Vir: (<https://www.engadget.com/2016/05/24/worlds-first-3d-printed-office-dubai/?guccounter=1>)

3D natisnjena pisarna je del muzeja prihodnosti, v letu 2016 jo je natisnilo podjetje WinSun na Kitajskem, pripeljali so jo po kosih v Dubaj in jo sestavili (WinSun, 2019).



Slika 13: 5 nadstropna stavba v Kitajski

Vir: (<https://3dprintingindustry.com/news/winsun-3d-printing-building-40316/>)

Stavbo na zgornji sliki je kitajsko podjetje WinSun natisnilo v tovarni, na lokaciji so jo sestavili v 5 nadstropno zgradbo.



Slika 14: 3D natisnjena vila, podjetje WinSun

Vir: (<https://www.archdaily.com/591331/chinese-company-creates-the-world-s-tallest-3d-printed-building>)



Slika 15: Takšnih 10 hiš bi naj podjetje WinSun natisnilo v zgolj 24 urah, kar pa jim nekateri oporekajo

Vir: (<https://newatlas.com/china-winsun-3d-printed-house/31757/>)



Slika 16: Prva naseljena tiskana hiša

Vir: (<https://www.3dprintingmedia.network/first-3d-printed-live-building-europe-unveiled-yaroslav-amt-specavia/>)

Podjetje Specavia iz Rusije je hišo z zgornje slike natisnilo v tovarni po segmentih, ki so jih kasneje na lokaciji sestavili (Specavia, 2019). Hiša slovi kot prva 3D natisnjena hiša, v kateri živijo ljudje.

4 KRATEK PREGLED GRADBENIH 3D TISKALNIKOV

Gradbeni 3D tisk se razvija že dovolj dolgo, da vedno znova pritegne kakšnega posameznika, podjetje, univerzo k temu, da razvije svoj 3D tiskalnik za gradnjo stavb. Tehnologije se razvijajo vedno nove, izboljšujejo se materiali, kljub temu pa je najosnovnejši princip gradbenega 3D tiska tisti, kateremu se posveča večina. Gre za tako imenovani FDM (Fused Deposition Modeling) oziroma slovensko Tehnologija ciljnega nalaganja. Drugi pomembnejši princip je t.i. »powder bonding«. Poenostavljeno prevedeno pomeni praškasto vezanje. Ta princip izkorišča za svoje delovanje tiskalnik »D-shape«. V osnovi deluje sistem tako, da stroj v določeni debelini po delovni površini posuje nek praškast material, preko tega pa naliže ali nabrizga vezivo na s programom tiskanja določena mesta, kjer se vežeta praškast material in vezivo v trdno strukturo. Tretji pomembnejši princip gradbenega 3D tiska je »additive welding« oziroma dodajalno varjenje. Ta princip uporablja podjetje MX3D, ki je razvilo robot tiskalnik, s katerim so natisnili most za pešce v Amsterdamu (MX3D, 2019).

Večina gradbenih 3D tiskalnikov deluje s principom tehnologije ciljnega nalaganja (FDM). Kje pa so potem razlike med posameznimi 3D tiskalniki? Glavni del oziroma eden izmed glavnih delov 3D tiskalnika je tiskalna glava, bolj natančno, tiskalna šoba. Bolj ali manj je razvoj usmerjen v ta element, saj je ravno od tega elementa odvisno, kako bo potekalo tiskanje. Namizni 3D tiskalniki uporabljajo plastično nit za tiskanje. Ta se odvija s koluta in teče skozi tiskalno glavo, kjer so grelci, da se plastika stali in steče skozi šobo. Betonske mešanice pa se v tiskalno glavo dovajajo zmešane in ravno tu raziskovalcem, inovatorjem povzroča največje preglavice. Beton mora biti prave konsistence, da ne teče oziroma, da se ne ustavlja in maši tiskalno šobo. Večina gradbenih 3D tiskalnikov zato uporablja drobno zrnato betonsko mešanico, saj je mešanico, ki dejansko izgleda kot pasta, najlažje dovajati do tiskalne šobe. Tiskalnik P1 podjetja BetAbram pa ima poseben sistem vijaka v tiskalni glavi, da omogoča tiskanje z granulacijo agregata tudi do 16 mm. A teh detajlov mi opazovalci v bistvu ne vidimo, vidimo pa različne koncepte 3D tiskalnikov. Predstavil bom nekatere izmed najbolj znanih.

Predstavil sem že tiskalnik BetAbram P1. Tiskalnik je osnovne oblike mostnega dvigala, zgrajen iz pravokotnih aluminijastih profilov v obliki paličja, ki se ga načeloma uporablja za prenašanje bremen znotraj vnaprej določenega prostora. Giblje se v treh smereh, vzdolžno po tirnicah, prečno na mostu in navpično po stebrih. Tako ima tiskalna glava dostop do vsake točke znotraj določenega prostora, ki je omejen z velikostjo, ta pa je 16 x 8,2 x 3 m. Zgrajen je modularno, pomeni da ga lahko po potrebi razširimo oz. dvignemo. To obliko 3D tiskalnika

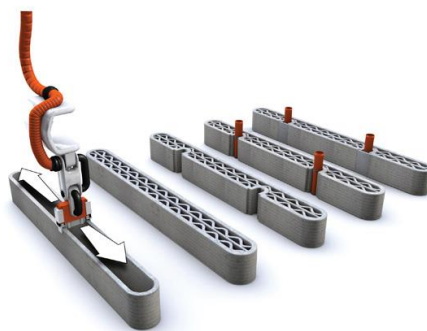
uporablja tudi ameriško podjetje Icon, le da imajo konstrukcijo samega mostnega dvigala drugače izvedeno, namreč iz železnih profilov. Podjetje WinSun, Kitajska, ima tak tiskalnik postavljen v tovarni, kjer tiskajo segmente stavb, ki jih sestavljajo kasneje na lokaciji. Njihov tiskalnik je dimenzij 32 x 10 x 6,6 m., kar je dejansko dvojna velikost slovenskega 3D tiskalnika.



Slika 17: 3D tiskalnik podjetja WinSun

Vir: (<https://siliconangle.com/2015/01/20/china-super-sizes-3d-printing-with-worlds-first-printed-apartment-building/>)

Na zgornji sliki je 3D tiskalnik kitajskega podjetja WinSun. Njihov koncept 3D tiskanja hiš temelji na tiskanju segmentov, modulov v tovarni, kasneje pa jih sestavijo v celoto. Kot se vidi na sliki, je tiskalnik ogromen, zato tudi neprimeren za transport. V ZDA, natančneje v Kaliforniji, je dr.Knozhnevis razvil Contour Crafting System (CCS), ga tudi registriral in ustanovil podjetje Contour Crafting Corporation. Bistvo tega sistema je tiskalnik tehnologije FDM, ki pa je nadgrajen do te mere, da sproti avtomatizirano vstavlja vse potrebno za gradnjo, to je armatura, elektro in vodovodne instalacije, odtočne in ventilacijske cevi. Ko 3D tiskalnik natisne najvišji sloj zidu, je le-ta zaključen (Corporation, 2019).



Slika 18: Animacija gradnje sistema Contour Crafting

Vir: (<http://stevengoetzdesign.blogspot.com/2012/05/contour-crafting.html>)

Na zgornji animirani sliki je prikazan potek dela sistema Contour Crafting. Najprej natisne zunanji obod zidu, nato vmesne podporne elemente, vmes se vstavijo instalacije in se zid zaključi. Pri tem sistemu deluje 3D tiskalnik popolnoma avtomatizirano v vseh elementih gradnje.

Oblika CCS 3D tiskalnika je konceptualno enaka kot pri tiskalniku slovenske in kitajske izdelave, torej v obliki mostnega dvigala.

V drugo smer razvoja so šli pri ruskem podjetju Apis Cor, ki so se odločili, da bo njihov 3D tiskalnik nameščen v centru gradnje (Apis COR, 2019).



Slika 19: Apis Cor med tiskanjem vzorčne hiše

Vir: (<https://www.3dnatives.com/en/3d-printed-house-companies-120220184/>)

3D tiskalnik podjetja Apis Cor je nameščen na nosilnem stebru, ki ima možnost rotacije 360 stopinj in se tekom gradnje sloj za slojem dviguje. Na koncu teleskopske roke je nameščena tiskalna šoba, ki natančno po vnesenem programu nanaša pasti podobno betonsko mešanico. Dimenzije tega 3D tiskalnika so 4,5 dolžine in 1,5 višine, na mesto gradnje ga pripelje manjši tovornjak in se ga lahko postavi ter usposobi za delo v 30 minutah. Njegova trenutna največja površina dosega in tiskanja je 132 m². Podoben tiskalnik so razvili pri francoskem podjetju Constructions-3D. Njihov cilj je izgradnja hiš iz lokalnih recikliranih materialov (Apis COR, 2019).

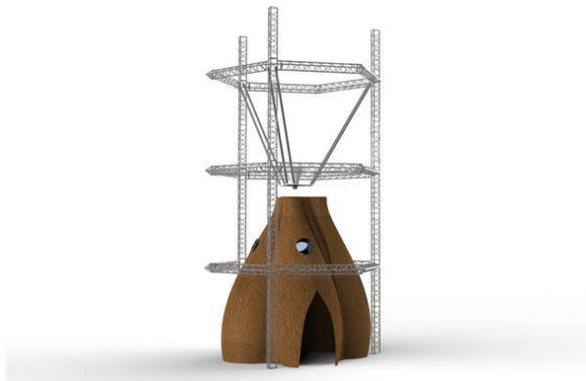
Italijansko podjetje WASP je razvilo 3D tiskalnik, namenjen za dežele v razvoju, kjer lahko gradi oziroma tiska z naravnimi materiali kot so blato in slama v kolikor bi bil dostop do betona otežen. Njegove dimenzije so 12 m višine ter 7 m širine. Teleskopske roke so dolge do 6 m (3Ders, 2019).



Slika 20: Tiskalnik Big Delta 3D tiska z mešanico blata in slame

Vir: (<https://www.3ders.org/articles/20160719-wasp-invites-makers-to-help-build-3d-printed-house-using-12-meter-big-delta-3d-printer.html>)

Prednost tega koncepta tiskalnika je, da ga je konstrukcijsko preprosto sestaviti na mestu gradnje. Koncept nam tudi omogoča gradnjo višjih zgradb, kar je redkost pri premičnih 3D tiskalnikih.



Slika 21: Animacija 3D tiskalnika WASP Big Delta

Vir: (<https://www.3ders.org/articles/20160719-wasp-invites-makers-to-help-build-3d-printed-house-using-12-meter-big-delta-3d-printer.html>)

3D tiskalnik WASP zaradi svoje zasnove omogoča gradnjo v višino, saj se lahko navpične nosilce podaljša in se lahko teleskopske roke, na katerih je tiskalna glava dvignejo višje.

CyBe Construction in Cazza Construction sta podjetji iz Nizozemske in ZDA, ki stavita na koncept premičnih samohodnih 3D tiskalnikov. 3D tiskalniki teh podjetij so na gosenicah, tiskalno šobo pa imata na koncu v več oseh gibljive in z gibne roke (3D Natives, 2019).



Slika 22: Levo Cazzo X1, podjetja Cazza Construction, desno CyBe RC 3Dp podjetja CyBe Construction

Vir: (<https://www.3dnatives.com/en/3d-printed-house-companies-120220184/>)

Pomemben predstavnik 3D tiskalnikov je tudi tiskalnik »D-shape«, podjetja italijana Enrica Dinija, ki je ta tiskalnik ustvaril leta 2006 in ga kot proces tudi zaščitil, patentiral. Proces, s katerim »D-shape« natisne obliko, predmet, zgradbo se od prejšnjih razlikuje v tem, da ne nalaga materiala ciljno kot 3D tiskalniki tehnologije FDM. Tiskalnik je dimenzij 6 x 6 m. Tiskalna ploščad je vpeta na štiri vertikalne aluminijaste stebre, po katerih se pomika navzgor. Proces poteka tako, da 3D tiskalnik nasuje peščen material z primešanim magnezijevim oksidom v debelini 5-10 mm. V naslednjem koraku 3D tiskalnik preko 300 cevčic po načrtu, ustvarjenim s CAD programom, nabrizga raztopino morske vode in magnezijevega klorida. Poteče kemična reakcija, material postane podoben kamnu. S tem 3D tiskalnikom je možno natisniti tudi prewise, preklade, celo strop, saj nasut peščen material deluje kot podporna struktura, katero pa na koncu tiskanja odstranimo (D-SHAPE, 2019).



Slika 23: D-shape tiskalnik

Vir: (https://news.softpedia.com/news/The-Architecture-of-Tomorrow-3D-Printed-Bridges-Hospitals-and-Military-Bunkers-467912.shtml#sgal_0)

Zadnji princip 3D tiska je aditivno oz. dodajalno varjenje, katerega sem že omenil. Sistem je primeren za razne premostitvene strukture in morebitne umetniške dodatke k zgradbam, za samo gradnjo hiš pa ni primeren.

Glede na različne principe 3D tiska in različne koncepte prikazanih 3D tiskalnikov različnih proizvajalcev, je za treba vsak projekt izbrati najprimernejšega, ki še najbolj ustreza danim kriterijem. Po pregledu vseh podatkov bi se tudi v bodoče pri gradnji stanovanjske hiše tega tipa odločil za gradnjo s 3D tiskalnikom BetAbram, saj ima ta edini sposobnost tiskati z agregatom granulacije do 16 mm, kar pa veliko pripomore k trdnosti zgrajenih oziroma natisnjenih sten in s tem trdnosti ter trajnosti same zgradbe. Tudi 3D tiskalnik podjetja Apis-Cor je po mojem mnenju tudi zelo dober koncept, saj omogoča hitro postavitev in odstranitev z gradbišča. Njegova šibka točka oziroma bolj pomanjkljivost je ta, da lahko tiska samo z zelo fino granulacijo agregata, kar pa za trdnost same zgradbe ni optimalno.

5 KLASIČNA GRADNJA

Iz priloženega popisa del (priloga 1) in načrta za gradnjo individualne hiše (priloga 2) je razviden potek del do tretje gradbene faze. V zaporedju si sledijo zemeljska dela, betonska dela, tesarska dela, zidarska dela ter obrtniška dela.

Zemeljska dela vključujejo površinski izkop humosne plasti, širok izkop za gradbeno jamo z odvozom na deponijo, izkop za zmrzlini klin v globini 1 m, planiranje tal z nabijanjem, sledi naprava tamponskega nasipa, kasneje v procesu gradnje zasip za zidovi, izvedba kompletne drenaže z izkopom in zasipom ter polaganjem cevi in zaključno razstiranje zemljine za ureditev okolja.

Betonska dela vključujejo vgrajevanje nearmiranega podbetona pod tlaki in temelji, vgrajevanje betona MB30 za pasovne temelje stopnišča in zmrzlinkega klina, vgrajevanje betona v temeljno ploščo, stene kleti, ploščo, vertikalne vezi in stebre, vgraditev betona zunanjih stopnic, horizontalnih vezi na vencu na strehi, vgradnja betona v nosilce in preklade ter steno ob zunanjih stopnicah. Betonska dela vključujejo prav tako dobavo, krivljenje in polaganje betonskega železa.

Tesarska dela so dejansko pripravljala dela za betonska dela. Tesarska dela vključujejo postavitev in odstranitev opažev, začnši s temelji, temeljno ploščo, ravnih sten kleti, plošče, vertikalnih vezi in horizontalnega venca na strehi. Tesarska dela vključujejo tudi montažo in demontažo fasadnih odrov višine do 10 m ter montažo in demontažo premičnih odrov na kozah do višine 3m.

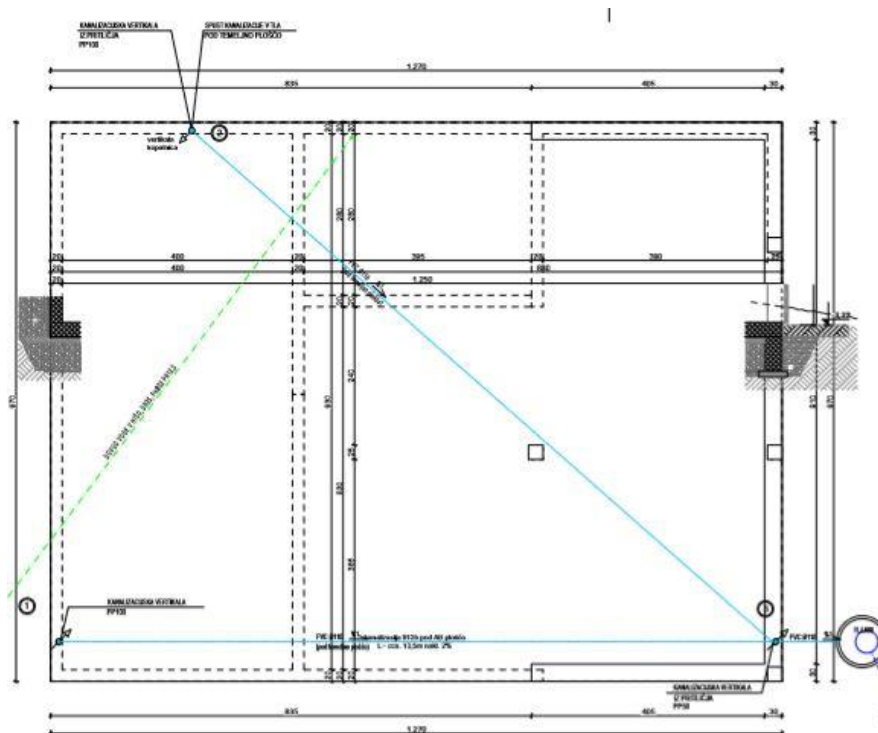
Zidarska dela vključujejo napravo horizontalne izolacije pod talno ploščo, napravo vertikalne izolacije, oblaganje kletnih sten v zemlji in temeljev s toplotno in hidro izolacijo ter zaščito le-te z gumbasto folijo.

Zidanje obodnih zidov z modularno opeke širine 25 cm, zidanje notranjih zidov z opeko širine 25 cm, zidanje venca na strehi z opeko debeline 20 cm ter zidanje predelnih zidov debeline 12 cm.

V zidarska dela je vključena tudi dobava in montaža opečnih prednapetih preklad, naprava izolacijskih fasad na stenah, kletnih stenah, stropu nad teraso ter polaganje zaključnega sloja plus razna manjša nepredvidena dela in zidarska pomoč.

Obrtniška dela vključujejo krovsko-kleparska dela z izvedbo hidro- in toplotne izolacije na ravni nepohodni strehi, napravo vertikalnega zaključka na vencu med streho in atiko, prekritje

Obrtniška dela vključujejo tudi ključavničarsko delo, in sicer dobavo in montažo kovinskega stebra premera 150 mm, zapolnjenega z betonom, s finalno obdelavo po detajlu.



Vir: (lastni iz projektne dokumentacije)

Zgornja slika je izsek iz načrtov, in sicer gre za tloris temeljev z dodanima detajloma naprave pasovnega temelja in temeljne plošče (priloga2). Ker je klet delno podkletena, ne potrebujemo pasovnih temeljev po celotnem tlorisu, le na izpostavljenih delih, kjer klet ne bo pod zemljo, moramo narediti pasovne temelje pod koto zmrzovanja. Podane so vse mere, ki jih potrebujemo za postavitev opažev oz. v primeru 3D tiska za programiranje 3D tiskalnika.

6 GRADNJA S 3D TISKOM

Popis del za gradnjo individualne hiše s tehnologijo 3D tiska se v nekaterih detajlih razlikuje od popisa del gradnje na klasičen način.

Zemeljska dela vključujejo površinski izkop humosne plasti, širok izkop za gradbeno jamo z odvozom na deponijo, izkop za zmrzliški klin v globini 1 m, planiranje tal z nabijanjem, sledi naprava tamponskega nasipa, kasneje v procesu gradnje zasip za zidovi, izvedba kompletne drenaže z izkopom in zasipom ter polaganjem cevi in zaključno razstiranje zemljin za ureditev okolja.

Betonska dela vključujejo vgrajevanje nearmiranega podbetona pod tlaki in temelji, vgrajevanje betona za pasovne temelje stopnišča in zmrzlinkega klina, vgrajevanje betona v temeljno ploščo, stene kleti, ploščo, vertikalne vezi in stebre, vgraditev betona zunanjih stopnic, horizontalnih vezi na vencu na strehi, vgradnja betona v nosilce in preklade ter steno ob zunanjih stopnicah. Betonska dela vključujejo prav tako dobavo, krivljenje in polaganje betonskega železa. V načinu gradnje s 3D tiskom vključujejo betonska dela tudi vgrajevanje betona v pasovne temelje za 3D tiskalnik.

Tesarska dela so dejansko pripravljala dela za betonska dela. Postavitev opažev za 2 pasovna temelja za 3D tiskalnik in postavitev le-tega. Postavitev in odstranitev opažev za etažno ploščo. Tesarska dela vključujejo tudi montažo in demontažo fasadnih odrov višine do 10 m ter montažo in demontažo premičnih odrov na kozah do višine 3m.

Postavitev 3D tiskalnika časovno sovpada z vgrajevanjem podbetona, v tem času se tudi izdelata pasovna temelja za 3D tiskalnik in se ga postavi. S 3D tiskalnikom nato natisnemo obode temeljev in temeljne plošče. Sledi tiskanje kletnih sten, v katere se vgradi armatura in se zalije z betonom. Sledi zidanje-tiskanje zunanjih zidov, širine 25 cm, tiskanje notranjih zidov širine 25 cm, tiskanje predelnih zidov širine 12 cm ter tiskanje venca na strehi širine 20 cm.

Zidarska dela vključujejo napravo horizontalne izolacije pod talno ploščo, napravo vertikalne izolacije, oblaganje kletnih sten v zemlji in temeljev s toplotno in hidro izolacijo ter zaščito le-te z gumbasto folijo.

V zidarska dela je vključena tudi naprava izolacijskih fasad na stenah, kletnih stenah, stropu nad teraso ter polaganje zaključnega sloja plus razna manjša nepredvidena dela in zidarska pomoč.

Obrtniška dela vključujejo krovsko-kleparska dela z izvedbo hidro- in toplotne izolacije na ravni nepohodni strehi, napravo vertikalnega zaključka na vencu med streho in atiko, prekritje venca z barvano alu pločevino, izdelava in montaža tipskega vtočnega kotlička z izvedbo odtoka meteorne vode skozi venec ter pripadajočih okroglih odtočnih cevi.

Obrtniška dela vključujejo tudi ključavničarsko delo, in sicer dobavo in montažo kovinskega stebra premera 150 mm, zapolnjenega z betonom, s finalno obdelavo po detajlu.



Slika 25: Primer tiskanja sten s tiskalnikom BetAbram P1

Vir: (lastni)

Zgornja slika je nastala v Krškem, kjer je sedež podjetja BetAbram. Ta model hiše je nastal oz. še nastaja, ko g. Abram potencialnim kupcem tiskalnika prikaže delovanje in zmogljivosti njihovega največjega tiskalnika P1. V ozadju desno stoji tudi model »ribe«, ki so ga natisnili s tem tiskalnikom.

7 PREDNOSTI IN POMANJKLJIVOSTI 3D TISKA NA PRIMERU IZGRADNJE INDIVIDUALNE HIŠE

7.1 Primerjava klasične gradnje s 3D tiskom

S 3D tiskom se odpira nova era v gradbeništvu. Cilj konstruktorjev 3D tiskalnikov po vsem svetu je avtomatizacija tiskanja, gradnje stavb, mostov, tudi umetniških skulptur.

Ko primerjamo klasično gradnjo s 3D tiskom v našem primeru individualne hiše, lahko hitro opazimo razlike v samem poteku dela. Zemeljska dela so v obeh primerih enaka. Že pri betonskih in tesarskih delih pa začenja prihajati do odstopanj. Namesto, da bi opazili temelje in temeljno ploščo, opazimo temelje oz. podstavke za 3D tiskalnik ob izkopu zmrzlinkega klina. Ko imamo podstavke, na njih postavimo tirnice, na katerih je naš 3D tiskalnik. V tem primeru je to BetAbram P1. Pri klasični gradnji bi zdaj postavili opaže za temelje in temeljno ploščo, položili armaturo in vgradili beton. S 3D tiskalnikom se izognemo postavljanju opažev. V program vnesemo načrt in tiskalnik nam natisne zunanje robove temeljev in temeljne plošče. V vmesne prostore vstavimo armaturo in vgradimo beton. Kletne stene vstavimo v program in tiskalnik jih natisne, nakar jih zalijemo z betonom. S 3D tiskalnikom natisnjen zid je v prerezu sestavljen iz zunanjega dela, vmesnega prostora ter notranjega dela. Zunanji in notranji del sta natisnjena, vmesni del pa lahko zapolnimo z betonom ali izolacijo. V kletnih stenah je to beton. Vmesno ploščo moramo zgraditi klasično s postavitvijo opažev, saj tehnologija za tiskanje vmesnih plošč še ni dovolj razvita. Zidove pritličja vnesemo po načrtu v tiskalnik in jih natisne. Klasično pa bi zidali ročno z opečnimi zidaki. Sledi še opaženje in betoniranje zgornje plošče, nakar še natisnemo oz. pozidamo še venec na strehi.

7.1.1 Prednosti

Glavna prednost 3D tiska je hitrost gradnje. Tiskalnik tiska zidove v povprečju 30 cm/s, odvisno od betonske mešanice. V primeru naše hiše bi samo tiskanje vseh zidov in temeljev trajalo približno 17 ur, v primeru klasične gradnje pa bi po gradbenih normah samo za pozidavo pritličja z opeko potrebovali približno 18 ur dela.

Druga prednost je natančnost. 3D tiskalnik postavi ravni, navpični zid tudi na neravno podlago, edini pogoj je, da sam stoji na ravnem, vodoravnem podstavku, nato sproti z vgrajenimi senzorji prilagaja višino in odklon.

V stene lahko sproti, med tiskanjem vstavljamo armaturo, električne in vodovodne inštalacije, v vmesne prostore med tiskanimi zidovi pa lahko vstavimo tudi odtočne, kanalizacijske cevi.

Vmesne prostore med tiskanimi zidovi lahko zapolnimo z armiranim betonom, z izolativno betonsko mešanico (glinopor) ali preprosto z izolacijo.

Za gradnjo je potrebne manj delovne sile. Odvisno od izvedbe tiskalnika je za njegovo obratovanje potrebnih 3- 5 ljudi.

7.1.2 Pomanjkljivosti

Prva in hkrati največja pomanjkljivost 3D tiskalnika je njegova nabavna cena. V primeru tiskalnika BetAbram P1 je ta s prištetim transportom in postavitvijo okoli 280 000 € (BetAbram, 2019).

Trenutno je velika pomanjkljivost tudi majhna prepoznavnost tehnologije in hkrati s tem povezano nezaupanje ljudi v to tehnologijo.

Težava oz. pomanjkljivost je tudi ta, da večinoma za temi 3D tiskalniki stojijo ljudje raznih strok, gradbenikov pa je v tem poslu malo, morda bi se spremenilo splošno mnenje stroke glede 3D tiskanih stavb. Program oz. načrt za tiskanje je treba 3D tiskalniku vnesti v sistem iz projektne dokumentacije, pomeni, da moramo za takšen način gradnje imeti primerno usposobljen kader, ki je več del z računalnikom.

Naslednja pomanjkljivost so patenti. Veliko posameznikov in podjetij razvija 3D tiskalnike, med samim razvojem prijavijo veliko patentov. 3D tiskalniki so si v principu delovanja zelo podobni, zato seveda prihaja do podvojevanja idej, hote ali nehote, s čimer se sprožijo razne tožbe. Zaradi varovanja določenih skrivnosti 3D tiskalnikov, se le-ti ne pojavljajo na trgu, sploh pa ne cenovno ugodni.

Začetki razvoja 3D tiskalnikov segajo v sredino 90. let prejšnjega stoletja, a šele od leta 2014 lahko občudujemo tako zgrajene zgradbe, objekte (Autodesk BIM 360, 2019). Pomeni, da do zdaj še te zgradbe niso preizkušene s časom, niso še preizkušene z vsakodnevno »obrabo«, niso še morale dokazati pred naravnimi pojavi, kot so orkanski veter, stoletna deževja, potres. Slednji je najbolj pereča težava, predvsem zaradi slojevite gradnje, katera je verjetno najšibkejši člen pri 3D tiskani stavbi. A vse to še je treba dokazati in potrditi ali ovreči. Prav tako je večina oz. skoraj vse, kar je do zdaj bilo natisnjeno, bolj ali manj reprezentativne narave, pomeni, da so jih razvijalci strojev natisnili, da so videli, kaj lahko z svojimi stroji ustvarijo ter da nam pokažejo, kaj vse nam lahko ti stroji natisnejo, kakšne so njihove zmožnosti. V evropskem

prostoru so to večinoma umetniške skulpture z izjemo dveh mostov in vzorčnih hiš, Kitajci pa nenehno gradijo vedno nove in nove hiše, vile, za katere pa še ni jasno, ali jih bodo tržili ali pa je njihov namen trženje 3D tiskalnikov in tehnologije.

7.2 Ocena stroškov gradnje

Ocena oz. izračun stroškov klasične gradnje je podan v popisu del, ki je priložen (priloga 1). Predvidena cena na ključ dokončanega objekta je dobrih 125 000€ + DDV. Koliko se ta cena spremeni zaradi tehnologije 3D tiska, pa je podatek, ki ga je treba izračunati.

Da se sestavim izračun, moram najprej po načrtih pregledati, kaj od klasične gradnje lahko nadomestim s 3D tiskanjem. Začnem pri temeljih. Ko vgrajujemo podbeton, hkrati zalijemo tudi oba pasovna temelja oz. podstavka za 3D tiskalnik. Glede na gabarite hiše in mase samega tiskalnika sem predvidel podstavka dimenzij 15m * 0,5m * 0,5m. Predviden strošek je v tem primeru skupaj s postavitvijo opažev za postavka približno 700€. Konstrukcija 3D tiskalnika BetAbram P1 je sestavljena iz aluminijastih profilov, ki so varjeni in vijačeni po sistemu paličja v obliki mostnega dvigala za večjo nosilnost in togost, saj je le tako lahko tisk sten natančen. Spodaj je na kolesih s pomočjo katerih se pomika po x osi. S pomočjo vgrajenega škripčevja se prečni most pomika na nosilnih stebrih po y osi. Sama tiskalna glava pa se na prečnem mostu premika po z osi. Tiskalnik postavimo na temelje, pri čemer moramo biti pozorni, da ga natančno postavimo v vodoravno lego.

Ko je tiskalnik na mestu, lahko začnemo tiskati. Podbeton ponavadi ni popolnoma raven, a to tiskalnik kompenzira. S senzorji sproti zaznava odmike od tal, zato na začetku tiska na najnižje ležečih delih, kasneje pa po celotnem tlorisu sloj po sloj. Odločil sem se, da bom temelje, namesto z opaži, omejil s tiskano steno. Ta je širine 5 cm. Natisnemo robove pasovnih temeljev, zunanje višine 85 cm in notranje višine 60 cm v razmiku, merjenem na zunanjem robu, 20 cm ter rob temeljne plošče v višini 25 cm. Med oba oboda natisnjenega temelja sproti vstavljamo železne sponke (*slika 6*) (Pavletič, 2016) za medsebojno povezavo zunanjega in notranjega oboda pasovnega temelja. Zdaj se gradnja nadaljuje klasično, polaganje betonskega železa po načrtu ter vgrajevanje betona v pasovne temelje in temeljno ploščo.

Na temeljno ploščo položimo hidroizolacijo na mestih, kjer bomo tiskali stene, kot pri klasični gradnji. Najprej si pripravimo podlago, najbolje kar polivinilasto folijo za tiskanje preklad, ki jih potrebujemo za vrata in in svetlobni jašek. Preklade natisnemo v štirih slojih višinsko in štirih vzporedno. Med prvim in drugim ter med drugim in tretjim slojem vstavimo betonsko

železo za ojačitev preklad. Preklade pustimo, da se posušijo in strdijo, na mesto vgradnje jih vstavimo s pomočjo 3D tiskalnika, ko natisnemo stene do prave višine. Zdaj lahko začnemo tiskati kletne stene v širini 20 cm ter obode AB stebre 25 x 25 cm, v katere vstavimo betonsko železo in vgradimo beton. Med oba oboda kletnih sten sproti vstavljamo železne spones za ojačitev zidu, sproti pa vežemo tudi betonsko železo, saj so kletne stene po projektu armirane betonske. Železne spones vstavljamo z medsebojnim razmikom 50- 70 cm. Ko imamo stene natisnjene in betonsko železo vezano, v stene vgradimo beton. Sledi postavitve opažev za etažno ploščo, položitev in vezava betonskega železa ter vgrajevanje betona v etažno ploščo.

Ko je tudi ta plošča suha, lahko začnemo postavljati zidove. A najprej si na tleh natisnemo preklade za vrata in okna, v katere med posameznimi tiskanimi sloji vstavljamo betonsko železo. Preklade za večje premostitvene razmike temu primerno ojačamo z betonskim železom in dodatnim slojem betona. Te preklade kasneje v procesu gradnje s pomočjo tiskalnika postavimo na pravo mesto. Ponovno v program vnesemo načrt hiše, pritlično etažo v celoti in začnemo tiskati. V procesu tiskanja moramo biti zelo pozorni, da je betonska mešanica konstantne gostote. V program vnesemo tudi lokacije vertikalnih vezi, v katere vstavimo betonsko železo in jih kasneje tudi zalijemo z betonom, ki jih 3D tiskalnik zaključí, pomeni, da ne potrebujemo opaža, da lahko v njih vgradimo beton. Tiskalnik samodejno natisne zidove z vsemi odprtini, ki so v načrtu, se pravi z okni in vrati. Zidovi, tiskani s 3D tiskalnikom, so sestavljeni iz notranjega in zunanjega oboda, vsak je širok 5 cm. Vmesni prostor izkoristimo za vgradnjo inštalacij, katere pa lahko vstavljamo tudi med samim tiskanjem neposredno v natisnjen sloj stene. Pri širini zidu 25 cm lahko vmesni prostor širine 15 cm zapolnimo z izolacijo, z betonom ali kot sem se jaz odločil, z mešanico glinopora in cementa. V tem primeru pridobi zid na trdnosti, obenem pa je boljša izolacija. Med tiskom lahko vstavljamo železne spones (slika 6), s katerimi povežemo zunanji in notranji obod zidu, s tem pridobimo na trdnosti. Po zaključenem tiskanju pritličnih zidov in zapolnitvijo le-teh, lahko ponovno postavimo opaže za stropno ploščo.

Na suho stropno ploščo natisnemo še zadnje zidove, 70 cm visok venec, ki ga tudi zalijemo z mešanico glinopora in cementa, predvsem zaradi zmanjšanja možnosti nastanka toplotnega mostu. S tem je zaključeno tiskanje stavbe, sledijo razna obrtniška dela, ki pa nas pri tem ne zanimajo in tudi na ceno v tej primerjavi ne vplivajo.

Izračuni temeljijo na načrtih (priloga 2), iz katerih sem vzel podatke od gabaritih hiše.

Temelji: Obod temeljne plošče in obode pasovnih temeljev natisnem na neposredno na izolacijo, ki je položena na podbeton. Na delu, kjer so pasovni temelji, natisnem zunanji obod

v višini 85 cm in notranji obod v višini 60 cm. Vmes vstavljam železne spone za ojačitev. Na te spone lahko vežemo tudi betonsko železo za armiranje pasovnih temeljev. Na delu temeljne plošče, kjer pa ni pasovnih temeljev, pa natisnemo le zunanji obod v višini 25 cm, kolikor je debelina temeljne plošče. Dokler čakamo, da se natisnjene stene posušijo in strdijo, lahko v temeljno ploščo položimo betonsko železo, nakar zalijemo z betonom. V izračunu moramo odbiti beton, ki so ga že zavzele tiskane stene.

Kalkulacija dolžine tiskanega sloja temeljev in oboda temeljne plošče:

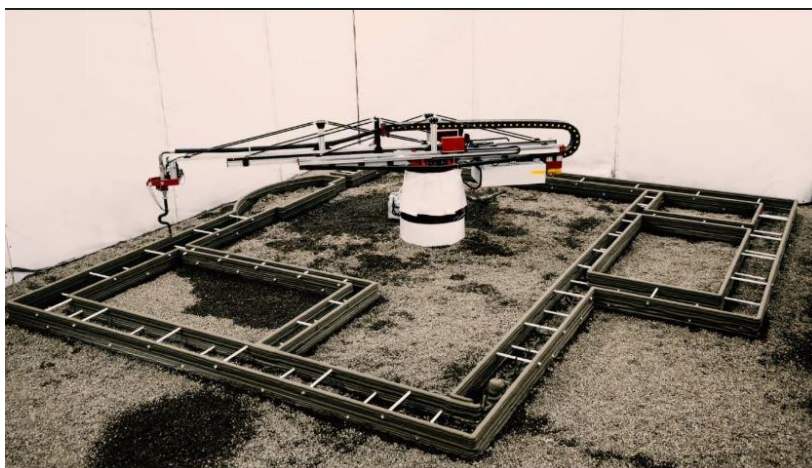
- $(8,35 \text{ m} + 8,35 \text{ m} + 9,7 \text{ m}) \times 0,25 \text{ m} \rightarrow$ zunanji obod temeljne plošče
- $(3,75 \text{ m} + 3,75 \text{ m} + 9,1 \text{ m} + 0,3 \text{ m} + 0,3 \text{ m}) \times 0,6 \text{ m} \rightarrow$ notranji obod pasovnih temeljev
- $(4,05 \text{ m} + 4,05 \text{ m} + 9,7 \text{ m}) \times 0,85 \text{ m} \rightarrow$ zunanji obod pasovnih temeljev in temeljne plošče

Tabela 1: 3D tisk temeljev

Notranji obod	Zunanji obod	Zunanji obod		DOLŽINA ZIDU(m)	VIŠINA ZIDU (m)	ŠIRINA TISKA (m)	KOLIČINA BETONA (m³)
3,75	4,05	8,35	ZUNANJI OBOD	26,4	0,25	0,05	0,33
3,75	4,05	8,35	ZUNANJI OBOD	17,8	0,85	0,05	0,76
9,1	9,7	9,7	NOTRANJI OBOD	17,2	0,6	0,05	0,52
0,3							1,60
0,3							

Vir: (lastni)

V zgornji tabeli so podatki in izračun porabljene količine betonske mešanice za tisk obodov temeljev in temeljne plošče. Podatki so povzeti iz načrtov. Tabela je v bistvu razdeljena na dva dela zaradi specifik, ki nastane zaradi pasovnih temeljev. Prvi stolpec je izračun dolžine notranjega oboda pasovnih temeljev, ki je seveda nižji od zunanjega za debelino temeljne plošče. Izračun potrebne količine betonske mešanice za notranji obod je v tretji vrstici. Drugi in tretji stolpec pomenita zunanji rob temeljev in temeljne plošče, razlikujeta se po višini, v kateri smo ju morali natisniti, sama količina potrebnega materiala pa je izračunana v prvi in drugi vrstici tabele.



Slika 26: Tiskanje temeljev s tiskalnikom Apis Cor

Vir: (<http://paris-singularity.fr/les-premieres-maisons-imprimees-en-3d-des-etats-unis>)

Kletne stene so po načrtu armirano betonske debeline 20 cm. S 3D tiskom ne potrebujemo opaža, le sproti moramo vstavljati železne sponse, ki obenem služijo kot armatura, katero pa tudi sproti vežemo v vmesni prostor. Natisnemo tudi obode AB stebrov, v katere vstavimo betonsko železo. Preklade za vrata in okno oz. svetlobni jašek natisnemo že prej in jih vstavimo s 3D tiskalnikom, ko natisnemo stene do prave višine. Vmesni prostor med notranjim in zunanjim obodom stene zalijemo z betonom, katerega porabimo polovico manj, kot bi ga pri klasični gradnji z opaži. Širina stene je namreč 20 cm, zunanji in notranji obod sta vsak širine 5 cm, torej ostane vmesnega prostora za beton 10 cm. Med fazo tiskanja lahko v stene vstavljamo tudi instalacijske vode, bodisi v vmesni prostor med zunanjim in notranjim obodom stene, bodisi s vtiskanjem v sam natisnjen sloj.

Tabela 2: 3D tisk sten kleti

Notranji obod	Zunanji obod		DOLŽINA ZIDU (m)	VIŠINA ZIDU (m)	ŠIRINA TISKA (m)	KOLIČINA BETONA (m ³)
9,3	13,02	ZUNANJI OBOD	50,37	2,9	0,05	7,30
4	2,25	NOTRANJI OBOD	49,45	2,9	0,05	7,17
3,95	8,85					14,47
3,9	9,7					
2,8	9,4					
2,8	4,15					
3,95	3		Odbijem vrata in okno 0,53 m ³			13,94 m ³
6,3						
4,45						
4						
4		AB stebri				

Vir: (lastni)

V tabeli 2 prvi stolpec pomeni podatke za dolžino sloja notranjega oboda, v drugem stolpcu pa podatke za dolžino zunanjega oboda tiska. Podatki so povzeti iz načrtov (priloga 1). V četrtem stolpcu sta seštevka podatkov iz prvih dveh stolpcev, in sicer v drugi vrstici za zunanji obod, v tretji pa za notranji obod. Dalje je izračun v vrsticah. V petem stolpcu je načrtovana višina

zidu, v šestem pa širina tiska. Količine, potrebne za tisk kletnih zidov, so izračunane v sedmem stolpcu, ki znašajo skoraj 14 m³. V prvem stolpcu sem dodal še potrebne količine za tiskanje obodov AB stebrov. Posebej, izven tabele pa sem odštel odprtine v zidu, dvojna vrata in okno oz. svetlobni jašek, ki pa znašajo malce več kot 0,5 m³ odbitka. Za preklade pa niso potrebni izračuni, saj je količina potrebnega materiala enaka, če natisnemo preklade vnaprej na tleh, ali bi jih natisnili neposredno na steno. Le da bi v slednjem primeru potrebovali opaž.

Naslednje so stene v pritličju. Zunanje so širine 25 cm, tudi centralna notranja, predelne pa so širine 12 cm. Najprej natisnemo preklade za okna in vrata, seveda v njih vstavimo tudi betonsko železo. Nato začnemo tiskati stene, vmes vstavljamo železne sponke, na pravi višini položimo preklade, tiskamo dalje do projektirane višine 3m. V vmesni prostor, ki ga je 15 cm, vgradimo izolativno mešanico glinopora in cementa.

Tabela 3: 3D tisk sten pritličja

Notranji obod	Zunanji obod		DOLŽINA ZIDU (m)	VIŠINA ZIDU (m)	ŠIRINA TISKA (m)	KOLIČINA BETONA (m ³)
9,2	9,7	ZUNANJI OBOD	58,75	3	0,05	8,81
3,9	4,4	NOTRANJI OBOD	57	3	0,05	8,55
2	2					17,36
4,15	4,15					
3,6	3,6					
3,85	4,1		Odbijem odprtine za okna in vrata 2,99 m ³ .			14,37 m ³
12,2	12,7					
1,8	1,8					
3,6	3,6					
12,7	12,7	notranje stene				

Vir: (lastni)

Tabela 3 se dejansko ne razlikuje od tabele 2, le da so številke druge, saj je tudi sam tloris pritličja bolj razgiban kot tloris kleti. V prvem stolpcu so podatki za izračun dolžine sloja notranjega oboda, ki je podan v četrtem stolpcu, tretja vrstica, v drugem stolpcu pa so podatki dolžine sloja zunanjega oboda, rezultat le-tega je podan v četrtem stolpcu, druga vrstica. Od tu sledi izračun potrebnega materiala za tisk, višina zidu v petem stolpcu ter širina tiskanega sloja, zmnožek znaša 17,4 m³, izven tabele pa je odbitek za okna in vrata, ki pa je v primeru sten pritličja neprimerno višji kot v primeru kletnih sten in znaša skoraj 3 m³. Skupna količina potrebnega materiala za tisk sten pritličja je torej 14,4 m³. Kot že na pojasnjeno na primeru kletnih sten, za preklade ni potreben izračun, saj se količina potrebnega materiala ne spremeni glede na pogoje vgradnje.

Na ravni, nepohodni strehi je treba še postaviti 70 cm visok zid, širine 20 cm, ki ga prav tako natisnemo. V vmesni prostor vgradimo mešanico glinopora in cementa.

Tabela 4: 3D tisk strešnega venca

Notranji obod	Zunanji obod		DOLŽINA ZIDU (m)	VIŠINA ZIDU (m)	ŠIRINA TISKA (m)	KOLIČINA BETONA (m ³)
9,6	10	ZUNANJI OBOD	46	0,7	0,05	1,61
12,6	6,2	NOTRANJI OBOD	44,4	0,7	0,05	1,554
7,6	6,8					3,16
6,8	2					
2	8					
5,8	13					

Vir: (lastni)

Tabela 4 sledi tabeli 2 in tabeli 3. V prvem in drugem stolpcu so dolžine, povzete iz načrtov, v četrtem seštevek le-teh, v petem višina tiskanja zidu, v šestem širina tiskanega sloja, v sedmem pa rezultat, dobre 3 m³ potrebnega materiala za tisk strešnega zidu.

Skupno porabljenega betona za tiskanje je $3,16 \text{ m}^3 + 14,37 \text{ m}^3 + 13,94 \text{ m}^3 + 1,60 \text{ m}^3 = 33,07 \text{ m}^3$

Načeloma je to vsa količina betona, ki je bila uporabljena za tiskanje, saj sem iz celotnih sten odštel odprtine za okna in vrata v dejanski višini, pomeni, da so preklade, ki smo jih natisnili ločeno, že vštete v to količino. Kljub vsemu bom količino zaokrožil na 33 m³.

Cena mikroarmiranega betona se giblje med 120 €/m³ in 140 €/m³. Pomeni, da je strošek samega tiskanja hiše s tem betonom okoli 4300 €. Za izračun sem vzel povprečno vrednost 130 €. Seveda, če ne uporabimo mikroarmiranega betona, je pa cena precej nižja, in sicer 75-80 €/m³. V tem primeru pa bi bil znesek tiskanja hiše okoli 2550 €.

To so grobe številke samega tiska hiše, k čemur pa moramo še prišteti izolativno mešanico glinopora in cementa za zapolnitev vmesnih prostorov med notranjim in zunanjim obodom sten v pritličju in na strehi. Podatkov o ceni takšne mešanice in betonarn nisem dobil, zato sem jo izračunal na podlagi prodajnega kataloga trgovskega podjetja Bauhaus, v katerem so za obdobje december 2018 oglaševali ceno glinopor kroglic znamke Liapor v višini 9,95€ za 50l, granulacije 8/16. Cena cementa v tem obdobju je oglaševana 2,79€/25 kg. Zapolniti je treba okoli 17 m³ vmesnih prostorov, kar izračunam na sledeč način: 1 m³ glinopora je 20 vreč po 50l. Na 1 m³ mešanice dodam 200 kg cementa, kar je 8 vreč po 25 kg. $20 \times 9,95€ + 8 \times 2,79€ = 199 € + 22,32 € = 221,32 €/\text{m}^3$.

Ta znesek pomnožim s 17 m³. $221,32 \times 17 = \underline{3762,44 €}$

Primerjavo stroškov pa moram narediti še na primeru kletnih sten, saj se z uporabo 3D tiska zmanjša količina betona, ki ga vgradimo v kletne stene. V popisu del je navedena količina 26,5 m³ betona za kletne stene. Kot sem navedel že prej, lahko to cifro prepolovim, kar pomeni, da za kletne stene porabimo okoli 13 m³ betona, kar bi znašalo približno 1380 €, oz. bi ta znesek prihranili.

Če se še dotaknemo časovnega okvirja.. Po podatkih g. Abram Jožeta je optimalna hitrost njegovega 3D tiskalnika P1 okoli 30 cm/s. Iz načrtov povzeti podatki mi dajo, da je skupna dolžina zidov, ki jih natisnemo 18186,29 m.

Tabela 5: Dolžina natisnjenega sloja

Višina tiska(cm)	Višina sloja (cm)	Število slojev	Temelji (m)	Kletne stene (m)	Pritličje (m)	Venec (m)	Skupaj (m)
25	4	6	26,4				158,4
60	4	15	16,6				249
85	4	21	17,8				373,8
290	4	72		99,82			7187,04
300	4	75			115,75		8681,25
70	4	17				90,4	1536,8
							18186,29

Vir: (lastni)

Čas tiskanja pri hitrost 30cm/s je:

$$t = 18186,29 \text{ m} : 0,3 \text{ m/s} = 60621 \text{ s} = 16 \text{ h } 50 \text{ min}$$

Čas samega tiskanja je slabih 17 ur. Teoretično je torej hiša natisnjena v enem dnevu, le da v našem primeru še izvajamo betoniranje temeljev in plošč, zato je čas same gradnje daljši.

V primerjavi ocene stroškov moram zajeti tiskanje zidov in preklad ter tiskanje opažev. Odšteti pa moram postavljanje opažev in nakup preklad. Cena betonskega železa je postavljena pavšalno, tako, da jo v tej primerjavi zanemarim.

V račun vzamem količino betona in opaženje dveh temeljev za tiskalnik, količino betona za tiskanje temeljev in sten. Dodati moram tudi polnitev pritličnih sten in venca z izolativno mešanico glinopora in cementa. Seveda se strošek gradnje zmanjša z manj potrebnih opažev in manjšo količino betona, potrebnega za temelje in temeljno ploščo. Cene betonov za tiskanje so okvirne, povzete s cenikov s spletnih strani GIC gradnje d.o.o. in Gokop d.o.o., cene klasične gradnje so povzete iz popisa del (priloga 1).

Tabela 6: Cenovna primerjava klasične gradnje in 3D tiska

	Klasična gradnja (€)	3D tiskana gradnja (€)	Razlika (€)
Temelji tiskalnika	0	700	-700
Opaži temeljev	452	0	452
Temelji, temeljna plošča (beton)	3921	3750	171
Kletni opaži	5193	0	5193
Kletne stene	2815	1380	1435
Pritlične stene(zidovi, vertikalne vezi, preklade)	6544	1870	4674
Venec	700	415	285
Vgradnja izolativne mešanice	0	3760	-3760
	19625	11875	7750

Vir: (lastni)

Iz preglednice je razvidno, da lahko strošek gradnje s 3D tiskalnikom v tej fazi zmanjšamo za slabih 8000 €, kar v primeru te gradnje znaša 40%. Velik del stroškov predstavljajo opaži, je pa iz preglednice razvidno, da je tudi opeka eden izmed večjih stroškov klasične gradnje v tej fazi. V kolikor bi vmesne prostore pustili prazne oz. votle, bi bil prihranek še večji. Kljub dragi izolativni mešanici za polnilo sten pritličja, so stene pritličja, grajene s 3D tiskom še vedno za okoli 900 € cenejše, kar še predstavlja približno 14 % prihranka. Seveda, če ne računamo stroška nakupa 3D tiskalnika, takrat pa ta matematika prihranka poruši in nastopi ravno obratno, gradnja individualne hiše se podraži za več kot 300 %.

8 SKLEP

Med stikom z različnimi ljudmi, ko jim poskušam med vsakodnevnim pogovorom obrazložiti princip gradnje s 3D tiskom opažam, da jih le malo verjame v prihodnost tega načina gradnje. Zakaj? Verjetno je odgovor v tem, da smo v našem okolju tradicionalisti, opeka in malta sta več kot dovolj... Širom sveta poskušajo raziskovalci različnih podjetij, univerz, tudi zasebniki, prenesti v svet gradbeništva, lahko rečem, že dokaj uveljavljene 3D tiskalnice. Seveda je merilo v svetu gradbeništva precej večje. Tako kot raziskovalci prihajajo iz različnih okolij, tako tudi razvijajo različne 3D tiskalnice, ki uporabljajo različne materiale, različne tehnike 3D tiskanja. A vse veže skupna stvar... kako ustvariti 3D tiskalnik za gradbeništvo, ki bo poenostavil in pocenil gradnjo različnih objektov, od mostov, hiš, tudi stolpnic.

Moje diplomsko delo je primerjava klasične gradnje s 3D tiskom gradbeno tehniko. Ker trenutno v Sloveniji ni takšne gradnje, sem moral del diplomske naloge, ki obravnava 3D tisk, opraviti zgolj teoretično. Osnovne podatke o delovanju 3D tiskalnika, sem dobil pri proizvajalcu le-tega, Abram Jožetu. Iz podatkov, kot so hitrost tiska, višina in širina natisnjene sloja ter maksimalno granulacijo agregata za tiskan beton sem izračunal količine vgrajenega materiala ter čas tiskanja. Sam projekt, načrte, popis del za klasično gradnjo sem vključil v izračune stroškov gradnje, določene dele tega projekta pa sem spremenil, priredil v način gradnje s 3D tiskom. Tako sem v načinu 3D tiska najprej moral postaviti 3D tiskalnik, za katerega sem zgradil dva pasovna temelja z dovolj nosilnosti za tiskalnik. Vse vertikalne opaže sem nadomestil s tiskanjem dveh vzporednih sten, med katere sem vgradil beton, v primeru temeljne plošče je bila natisnjena le zunanja stena. Ko je bila temeljna plošča gotova, se je lahko začel 3D tisk kletnih sten. Tiskalnik je programiran, da po načrtu natisne po en sloj na celotnem tlorisu, pri čemer pri odprtinah za vrata ali okna zaokroži in s tem preide iz ene stene v drugo vzporedno steno, vmes pa ostaja odprti prostor, katerega kasneje zapolnimo z betonom. Potrebne preklade za vrata in okna predhodno natisnemo na tleh, med posameznimi sloji dodamo betonsko železo, ko pa se posušijo, jih s tiskalnikom, katerega lahko uporabimo kot mostno dvigalo, postavimo na predvideno mesto. Tudi AB stebre natisnemo, v vmesni prazni prostor pa vstavimo betonsko železo in vgradimo beton. Ko so stene zaključene, se postavi opaž za medetažno ploščo, v tem času pa 3D tiskalnik dvignemo za dodatne 3m, da lahko natisnemo stene pritličja in strehe. Postopek tiskanja sten z dvema vzporednima zidoma ponovimo, enako s tiskanjem preklad za vrata in okna. Širina sten je v pritlični etaži večja, kar pomeni tudi več vmesnega prostora, katerega pa v tem primeru napolnimo z izolativno

mešanico glinopora in cementa, za boljšo toplotno izolacijo in obenem trdnost. Sledi postavitve strešne nepohodne plošče in tiskanje 70 cm visokih sten na ravni strehi. Ves čas gradnje lahko 3D tiskalnik tudi uporabljamo kot mostno dvigalo za dviganje in prenašanje bremen na gradbišču oz. na samem objektu.

Dejstvo, da v Sloveniji ni investitorja, ki bi gradil s tehnologijo 3D gradnje, me je postavilo pred težko dejstvo, kako realno dokončati zastavljene cilje mojega diplomskega dela, katere sem lahko zgolj teoretično predvidel in izračunal na podlagi danih podatkov. G. Abram ima natisnjenih nekaj slojev, s katerimi demonstrira potencialnim kupcem 3D tiskalnika njegove zmožnosti in samo delovanje, a za pravo gradnjo so v Sloveniji še birokratski zastoji, saj tudi za vzorčno hišo nastopi težava z gradbenimi dovoljenji. Moje mnenje je, da bi na enostavnem terenu s postavitvijo tipskih hiš, kot je to primer v El Salvadorju, kjer nameravajo natisniti celo naselje enostavnih bivališč, lahko ta tehnologija gradnje izkazala za zelo učinkovito in ugodno.

H1 Glede na splošni razmah in napovedi vedno novih izdelovalcev 3D-tiskalnikov je za pričakovati, da je 3D-tisk prihodnost gradbeništva.

Lahko potrdim to hipotezo, da je to prihodnost gradbeništva, moram pa jo ovreči, kar se tiče časovnega obdobja. Veliko preveč je nezaupanja v to tehnologijo s strani uporabnikov, da bi lahko doživela pravi razmah v kratkem času.

H2 3D tisk v gradbeništvu bo pocenil gradnjo individualne hiše in omogočil več investitorjem streho nad glavo.

Dejansko je možno s 3D tiskanjem ceneje natisniti stanovanjsko hišo, a ker samo natisniti hišo ni dovolj, je zaenkrat 3D tisk še precej dražji od klasične gradnje. Teoretično bi lahko hipotezo potrdil v primeru investitorja, ki bi nekje na področju blage klime gradil celo stanovanjsko sosesko, a ker v gradbeništvu ne moremo izbirati idealnih pogojev, moram to hipotezo ovreči.

H3 S pomočjo 3D tiska bo potrebne 30% manj delovne sile potrebne za izgradnjo individualne hiše do 4. gradbene faze.

Z nadaljnjim razvojem 3D tiskalnikov, z vnosom izboljšanih tehnologij, se bo število operaterjev 3D tiskalnikov zmanjšalo, a že zdaj 3D tiskalniki ne potrebujejo več kot 3-5 oseb, ki upravljajo 3D tiskalnik. To hipotezo potrdim, saj je že zdaj manj ljudi potrebnih, da zgradijo natisnjene stene hiš kot pa s klasično gradnjo.

H4 S 3D tiskom je 4. gradbena faza časovno prej zaključena.

To hipotezo potrdim, saj glede na hitrost tiskanja sten, debelino sloja, ki ga natisne 3D tiskalnik v enem obhodu, je dejanski čas gradnje neprimerno hitrejši. V našem primeru bi namreč bila hiša natisnjena v dobrih dveh delovnih dneh. V enakem času bi po gradbenih normah uspeli postaviti le opečne zidove pritličja.

Po skrbnem preučevanju in preračunavanju podatkov, sem ugotovil, da so rezultati zastavljenih hipotez v bistvu pozitivno presenetili. Ugotovitev, da je gradnja s 3D tiskom do 4. gradbene faze cenejša od klasične gradnje pomeni, da se lahko nadejamo širitev 3D tiska med gradbeniki. Moje mnenje je, da je gradnja s 3D tiskom priporočljiva do 4. gradbene faze, smatram, da je 3D tisk lahko prihodnost gradbeništva. Dober primer je načrtovana gradnja celega naselja bivanjskih enot ameriškega podjetja Icon, saj z gradnjo naselja ni potrebno transportirati tiskalnik, saj se le-ta premika po tirnicah od objekta do objekta. S tem pa se lahko veliko prihrani časa in denarja.

9 LITERATURA IN VIRI

3D Natives. (27. marec 2019). Pridobljeno iz <https://www.3dnatives.com/technologies-3d/>

3Ders. (26. marec 2019). *3Ders*. Pridobljeno iz <https://www.3ders.org/articles/20160719-wasp-invites-makers-to-help-build-3d-printed-house-using-12-meter-big-delta-3d-printer.html>

ALL3DP. (26. marec 2019). *ALL3DP*. Pridobljeno iz <https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/>

Aniwaa. (27. marec 2019). Pridobljeno iz <https://www.aniwaa.com/3d-printing-technologies/>

Apis COR. (24. marec 2019). Pridobljeno iz <http://apis-cor.com/>

Asprone, D., Auricchio, F., Menna, C., & Mercuri, V. (2018). 3D printing of reinforced concrete elements: Technology and design approach. *Construction and Building Materials*, 218 - 231.

Autodesk BIM 360. (26. marec 2019). Pridobljeno iz <https://connect.bim360.autodesk.com/3d-printing-in-construction>

BetAbram. (24. marec 2019). Pridobljeno iz <http://betabram.com/index.html>

Corporation, C. C. (27. marec 2019). *Contour Crafting*. Pridobljeno iz <http://contourcrafting.com/building-construction/>

D-SHAPE. (27. marec 2019). *D-shape*. Pridobljeno iz <https://d-shape.com/the-technology/>

Freefab. (26. marec 2019). Pridobljeno iz <https://www.freefab.com/>

GIPOSS. (1984). *Gradbene norme GNG*. Ljubljana: SOZD ZGP GIPOSS.

Gorše, L. (2014). *Uporaba 3D tiskalnikov v gradbeništvu*. Ljubljana: Univerza v Ljubljani.

Hager, I., Golonka, A., & Putanowicz, R. (2016). 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction? *Procedia Engineering*, 292-299.

IAAC. (26. marec 2019). *IAAC*. Pridobljeno iz <https://iaac.net/project/3d-printed-bridge/>

Muck, D., & Križanovskij, I. (2015). *3D - tisk*. Ljubljana: Pasadena.

MX3D. (27. marec 2019). *MX3D*. Pridobljeno iz <https://mx3d.com/projects/bridge-2/>

Pavletič, I. (2016). *3D tiskalniki - tehnologija gradnje in uporaba v gradbeništvu*. Maribor: Univerza v Mariboru.

RepRap. (26. marec 2019). Pridobljeno iz https://reprap.org/wiki/Prusa_i3

Robotics, F. (27. marec 2019). *FBR*. Pridobljeno iz <https://www.fbr.com.au/view/hadrian-x>

Specavia. (27. marec 2019). Pridobljeno iz <https://specavia.pro/articles/tass-kak-yaroslavskij-inzhener-napechatal-na-printere-dom-dlya-svoej-semi/>

SSERVI. (26. marec 2019). *SSERVI NASA*. Pridobljeno iz <https://sservi.nasa.gov/articles/building-a-lunar-base-with-3d-printing/>

Stratasys. (27. marec 2019). *Stratasys*. Pridobljeno iz <https://www.stratasys.com/resources/search?technologies=4f8883b949ed4e43885cd295d737378a&sortIndex=0>

StudyLink. (24. marec 2019). *How 3D Printing Will Change Your Engineering Degree*. Pridobljeno iz StudyLink: <https://studylink.com/articles/3d-printing-will-change-engineering-degree/>

The Verge. (26. marec 2019). Pridobljeno iz <https://www.theverge.com/2018/3/12/17101856/3d-printed-housing-icon-shelter-housing-crisis>

WinSun. (27. marec 2019). *WinSun 3D*. Pridobljeno iz http://www.winsun3d.com/En/Product/pro_inner_2

10 PRILOGE

Priloga 1: Popis del za gradnjo stanovanjske (individualne) hiše v Šentilju

Priloga 2: Situacija in načrt za stanovanjsko (individualno) hišo v Šentilju