

# Tehnologija 3D printanja betona

---

**Boljkovac, Marko**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:615675>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-23**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,  
University of Zagreb](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**

**GRAĐEVINSKI FAKULTET**

# **ZAVRŠNI RAD**

**TEHNOLOGIJA 3D PRINTANJA BETONA**

**Marko Boljkovac**

**Zagreb, 2023.**



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GRAĐEVINSKI FAKULTET ZAGREB**

# **ZAVRŠNI RAD**

**TEHNOLOGIJA 3D PRINTANJA BETONA**

Mentorica:  
Prof.dr.sc. Ivana Banjad Pečur

Student:  
Marko Boljkovac

Zagreb, 2023.



## TEMA ZAVRŠNOG ISPITA

Ime i prezime studenta: **MARKO BOLJKOVAC**

JMBAG: **0082062513**

Završni ispit iz predmeta: **Gradiva**

Naslov teme  
završnog ispita:

HR	<b>TEHNOLOGIJA 3D PRINTANJA BETONA</b>
ENG	<b>3D PRINTING CONCRETE TECHNOLOGY</b>

Opis teme završnog ispita:

U radu treba opisati dostupne tehnologije 3D printanja betona. Na koji način se predgotovljeni 3D elementi spajaju te koja su ograničenja printanja na licu mjesta. Navesti tehničke karakteristike strojeva koji se koriste za 3D printanje betona.

Datum: **12. travnja 2023.**

Komentor:

(Ime i prezime komentora)

Mentor: **prof. dr. sc. Ivana Banjad Pečur**

(Ime i prezime mentora)

*I. Banjad Pečur*

(Potpis mentora)

## SAŽETAK

Tema ovog završnog rada je tehnologija 3D printanja betona. Cilj rada je bio objasniti što je 3D printanje betona te koji načini 3D printanja betona postoje i koja tehnologija se koristi. 3D printanje betona je proces građenja posebnom smjesom betona, koji se temelji na ispisu slojeva sloj po sloj sve dok željena konstrukcija nije u potpunosti isprintana. Načini to jest metode 3D printanja betona koje su dosad razvijene temelje se na postupku istiskivanja, prostiranja, injektiranja materijala. Neke od najpoznatijih metoda su Contour Crafting, Concrete Printing i D – Shape. Tehnologija i oprema koja se koristi pri postupku 3D printanja betona sastoji se od tri bitna sustava: sustava za transport materijala, sustava za istiskivanje materijala i sustava za kontrolu pokreta. U ovom radu navedene su i tehničke karakteristike 3D printera nekih od najpoznatijih proizvođača kao što su : COBOD, Total Kustom, CyBe, BetAbram. Postupak 3D printanja betona ima svoje prednosti i mane, ali neovisno o tome možemo reći da 3D printanje betona ima veliki potencijal u svijetu građevinarstva.

**Ključne riječi:** 3D printanje betona, metode 3D printanja betona, dijelovi 3D printera, tehničke karakteristike 3D printera

## ABSTRACT

The topic of this final project is technology of 3D concrete printing. The goal was to explain what is 3D concrete printing and what methods and technologies are used. 3D concrete printing is process of construction with special mixture of concrete, which is based on process of printing layer by layer until desired construction is not completely printed. Methods of 3D concrete printing which have been developed so far, are based on extrusion, binder jetting and injection of material. Some of the most famous methods are Contour Crafting, Concrete Printing and D - Shape. Technology and equipment which is used at procedure of 3D concrete printing consists of three main systems: material transport system, material extrusion system and motion control system. In this project are also listed technical specifications of 3D printers owned by some of most famous companies like: COBOD, Total Kustom, CyBe, BetAbram. The process of 3D concrete printing has its own advantages and disadvantages, but regardless of that we can say that 3D concrete printing has big potential in the world of construction.

**Key words:** 3D concrete printing, methods of 3D concrete printing, parts of 3D printer, 3D printer technical specifications

## SADRŽAJ

UVOD .....	1
3D PRINTANJE .....	1
3D PRINTANJE BETONA .....	1
POSTUPAK PRINTANJA BETONA .....	2
METODE 3D PRINTANJA BETONA .....	3
CONTOUR CRAFTING .....	3
CONCRETE PRINTING .....	6
D-SHAPE .....	7
3D PRINTANJE BETONA INJEKTIRANJEM .....	10
YINGCHUANG .....	13
TOTAL KUSTOM .....	14
CyBe ADDITIVE INDUSTRIES .....	15
BETABRAM .....	15
METODE SPAJANJA 3D BETONSKIH PREDGOTOVLJENIH ELEMENATA .....	16
TEHNOLOGIJA I OPREMA ZA 3D PRINTANJE BETONA .....	18
DIJELOVI 3D PRINTERA .....	18
SUSTAV ZA TRANSPORT MATERIJALA .....	18
SUSTAV ZA ISTISKIVANJE MATERIJALA .....	20
SUSTAV ZA KONTROLU POKRETA .....	24
TEHNIČKE KARAKTERISTIKE 3D PRINTERA ZA BETON .....	28
PREDNOSTI I MANE TEHNOLOGIJE 3D PRINTANJA BETONA .....	36
ZAKLJUČAK .....	39
POPIS SLIKA .....	40
POPIS TABLICA .....	41
LITERATURA .....	42

## UVOD

### 3D PRINTANJE

„3D printanje ili aditivna proizvodnja je dio proizvodnoga strojarstva koji se bavi izradbom predmeta nanošenjem čestica u tankim slojevima. Proizvodni proces započinje konstruiranjem trodimenzionalnoga modela računalnim CAD programima za modeliranje, ili digitaliziranjem prostornoga oblika već postojećega objekta trodimenzionalnim skenerima. Zatim se model pretvara u niz horizontalnih poprečnih presjeka koji se strojem za proizvodnju tvorevina otiskuju sloj po sloj do konačnog proizvoda. Tim se postupcima jednako uspješno mogu izraditi prototipovi, kalupi i alati velike preciznosti te funkcionalni dijelovi spremni za upotrebu.“ [1]

Danas 3D printanje ima široku primjenu u svijetu i koristi se u raznim industrijama i područjima kao što su medicina, vojska, elektrotehnika, auto industrije i građevinarstvo.

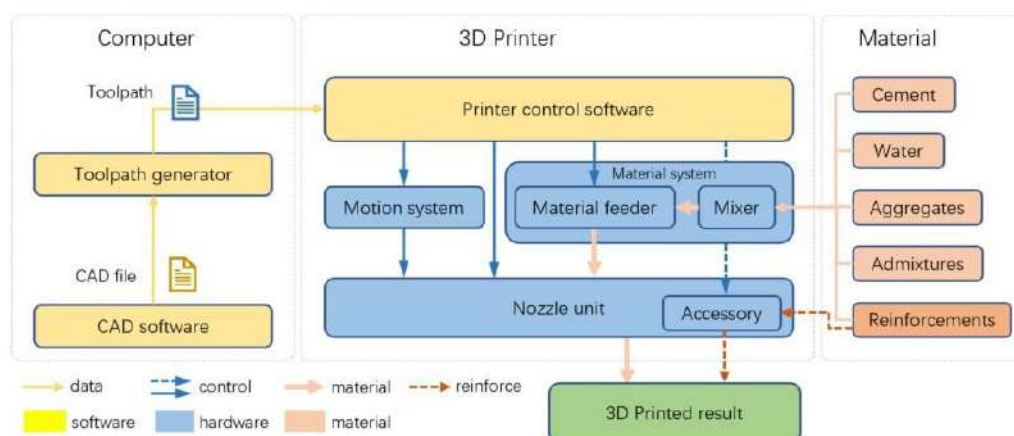
### 3D PRINTANJE BETONA

Građevinarstvo je danas jedna od najtraženijih i najpotrebnijih industrija, u svijetu se jako puno gradi novih građevina i obnavljaju se stare građevine. Zbog velike količine radova i potrebe za što bržim i jeftinijim građenjem, klasično građenje će se manje koristiti zbog pojave 3D printanog betona. Razlog tomu je što klasična izgradnja zahtijeva puno radnika, korištenje oplata te veću potrošnju novca i vremena. Stoga možemo zaključiti da je 3D printanje betona brži način izgradnje i jeftiniji u odnosu na klasičnu izgradnju, cijela konstrukcija može se isprintati u samo nekoliko sati i to uz minimalan broj radnika i bez korištenja oplata. 3D printanje betona možemo definirati kao građenje posebnom mješavinom vode, cementa i agregata (pijeska) kako bi se osiguralo jednostavno printanje i prolazak betona kroz mlaznicu. Proces se temelji na ispisu slojeva sloj po sloj sve dok željena konstrukcija nije u potpunosti isprintana. Proces printanja betona može se izvoditi kontinuiranim printanjem cijelih građevina na licu mjesta ili printanjem predgotovljenih elemenata u tvornicama koje se naknadno spajaju na licu mjesta.[2]



## POSTUPAK PRINTANJA BETONA

1. Konstrukcija ili predgotovljeni element koji se planira izgraditi 3D printerom prvo mora biti dizajniran pomoću CAD (Computer–Aided Design) računalnih programa koji služe za crtanje i proračun objekta sa velikom preciznošću. Prije početka printanja modeli konstrukcijskih elemenata se testiraju različitim opterećenjima koja simuliraju stvarna opterećenja koja se mogu dogoditi, kako bi se spriječilo otkazivanje materijala kod konačne verzije isprintane konstrukcije.
2. Model konstrukcije se pretvara u niz horizontalnih slojeva jer 3D printer ne može oblikovati 3D model nego printa u 2D. Nakon što se u računalnom programu model konstrukcije u potpunosti razlomi na slojeve i podaci se šalju u 3D printer.
3. Priprema 3D printera i njegovih komponenti te punjenje spremnika betonom. Završno se prekontroliraju svi dijelovi sustava za printanje i može se početi s izgradnjom.
4. Sami proces 3D printanja betona je vrlo sličan kao kod klasičnih printera. Beton se nalazi u spremniku koji pomoću pumpe odlazi u cijev koja je spojena sa gumenim crijevom i mlaznicom. Ovisno o metodi printanja beton se kroz mlaznicu istiskuje ili prostire i kada je sloj završen, mlaznica se podiže za određenu visinu i printa se novi sloj.
5. Na samom kraju procesa printanja potrebno je isprintanu konstrukciju ili element konstrukcije provjeriti i testirati prije uporabe kako bi se zadovoljili zahtjevi sigurnosti.[3]



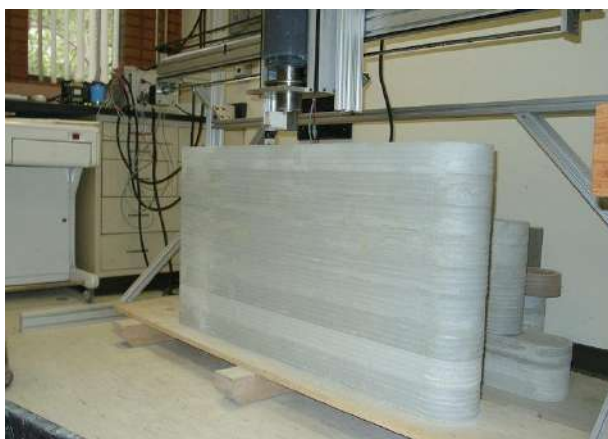
Slika 1. Postupak 3D printanja betona

## METODE 3D PRINTANJA BETONA

Danas je u svijetu razvijeno nekoliko metoda 3D printanja betona, a najpoznatije su Contour Crafting (CC) i Concrete Printing (CP) koje se temelje na postupku istiskivanja, D-Shape (Binder jetting) koja se temelji na postupku prostiranja materijala te metoda printanja injektiranjem. Ostale metode koje ćemo spomenuti su osmišljene kao kombinacija i nadogradnja gore navedenih metoda. [4]

### CONTOUR CRAFTING

Contour Crafting (*Izrada kontura*) jedna je od najstarijih 3D metoda printanja betona, koju je osmislio Dr. Behrokh Khoshnevis na Sveučilištu Južne Kalifornije 1988. godine. [4] Contour Crafting je aditivna tehnologija izrade što znači da stvara predmete istiskivanjem tankih slojeva betona kroz mlaznicu sloj po sloj. Ova metoda se temelji na procesu istiskivanja i taloženja (punjenja) 3D printanog betona. Procesom istiskivanja prvo se formiraju rubovi to jest vanjske površine kako bi dobili okvir. Nakon što je proces izrade kontura završen, beton se taloži u prethodno isprintan okvir.[8]

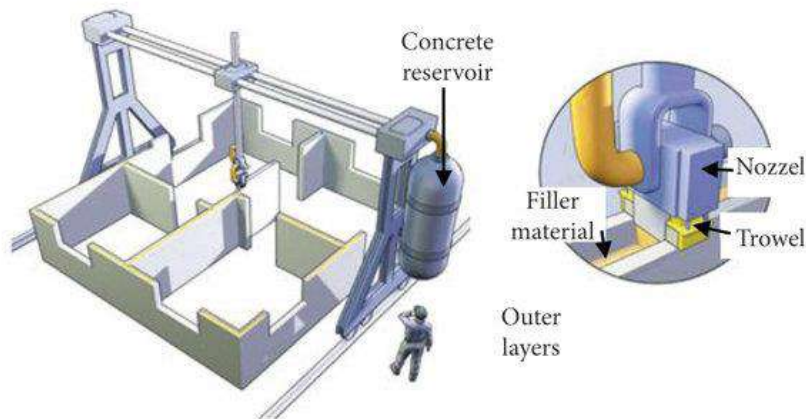


Slika 2. Proces printanja rubova/okvira



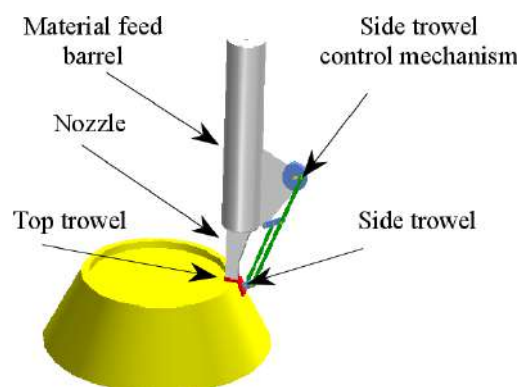
Slika 3. Proces punjenja okvira

Sustav 3D printera koji se u ovoj metodi koristi sastoji se od: robotskog sustava za istiskivanje materijala sa mlaznicom koji se kreće po dvije metalne vodilice, spremnika za materijal i portalnog okvira.[2] Materijal koji se koristi za izradu betona razlikuje se od klasičnog betona po veličini agregata kako bi se mogao istisnuti kroz mlaznicu. Sastav betona je pijesak (41%), cement (37%), voda (19%) i plastifikatori (3%). [4]



Slika 4. Sustav 3D printera Contour Crafting metode

Contour Crafting metoda koristi mlaznicu sa lopaticama kako bi bila osigurana vrhunska sposobnost istiskivanja i istodobnog oblikovanja površine gletanjem tako da krajnji produkt procesa bude stvaranje glatkih površina. Glatke površine se postižu korištenjem gornje i bočne lopatice koje ograničavaju istiskanje betona u okomitom i vodoravnom smjeru. Kontroliranjem lopatica na mlaznici omogućuje se printanje pod određenim nagibom, što kao posljedicu ima mogućnost izrade ne samo ravnih već i zaobljenih površina. Mlaznica se kreće prema definiranim koordinatama u XY ravnini, a istiskivanjem jednog sloja betona podiže se za 25,4 mm po Z osi te ispisiuje novi sloj betona. [4][6][7]



Slika 5. Dijelovi sustava za istiskivanje CC metode

Contour Crafting je metoda slojevite proizvodnje koja je odlična za građenje građevina velikih dimenzija. Pomoću ove metode moguće je izgraditi konstrukcije u nekoliko sati, umjesto nekoliko mjeseci i godina. U budućnosti se planira pomoću ove metode printati visoke zgrade i čitava naselja, a zbog mogućnosti printanja ravnih i zaobljenih površina, možemo očekivati raznolike oblike kuća i naselja.[5][6]



Slika 6. Proces printanja cijele zgrade

Ova tehnologija će svoju primjenu naći u zemljama trećeg svijeta i u svemiru gdje NASA planira izgraditi naselja na Mjesecu i planetima kao što je Mars. Contour Crafting metoda je velik napredak u odnosu na klasičnu gradnju zbog toga što je jeftinija, brža, sigurnija i jednostavnija metoda izgradnje, ali ima i neke nedostatke u odnosu na ostale metode 3D printanja kao što su spora brzina printanja i slabo prijanjanje između slojeva betona.[5][6]



Slika 7. Izgradnja naselja na Mjesecu

## CONCRETE PRINTING

Concrete Printing je metoda koja se temelji na procesu istiskivanja betona sloj po sloj, po čemu je vrlo slična metodi Contour Crafting, ali ima i neke razlike koje ćemo kasnije spomenuti. Sustavi koji se mogu koristiti su portalni sustav i robotska ruka, a koji sustav treba odabrati ovisi o veličini objekta koji želimo isprintati. Portalni sustav se većinom koristi za printanje građevina u cjelini, dok se robotska ruka koristi za printanje predgotovljenih elemenata koji se onda spajaju na licu mjesta. Za printanje objekta prvo se mora napraviti smjesa za beton koji se sastoji od pijeska, cementa, letećih pepela, vode, te se ta smjesa stavlja u spremnik iz kojeg pomoću pumpe, sustava za transport materijala i robotskog sustava za istiskivanje materijala printamo beton na željenu poziciju. Razlika u odnosu na metodu Contour Crafting je u tome što printer može isprintati cijelu geometriju sloja, to jest sloj može biti isprintan u punoj širini bez prethodnog printanja vanjskih rubova i većom brzinom printanja. Još jedna razlika ove metode u odnosu na Contour Crafting je i nepravilna, rebrasta površina zbog toga što nema lopatica na mlaznici koje bi zagladile površinu. Prednosti ove metode u odnosu na ostale metode 3D printanja su veća brzina printanja i čvrstoća betona, a nedostaci su visoki zahtjevi za svojstva betona.[4][8]



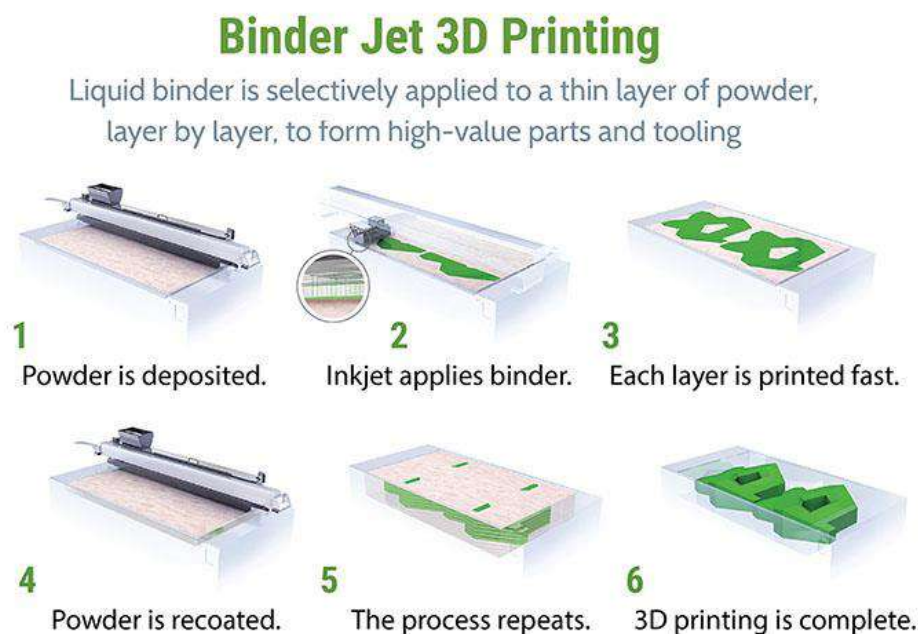
*Slika 8. Nepravilna površina zida i 3D printer bez lopatica za gletanje na mlaznici*



## D-SHAPE

D-Shape je metoda koju je osmislio Enrico Dini 2004. godine. Metoda se temelji na procesu stereolitografije koja je jedna od postupaka aditivne proizvodnje i možemo reći da je postupak gradnje sličan ispisu kao kod običnog printera.

Proces printanja počinje tako da je 3D model u softveru podijeljen na slojeve željene debljine čije se veličine kreću od 5 do 10 milimetara. Prvo se ispisuje sloj suhog, praškastog materijala koji se sastoji od pijeska i cementa sa magnezijem. Nakon toga se ispisuje to jest nanosi sloj tekućeg vezivnog materijala na sloj suhog pijeska pomiješanog sa cementom. Nakon što se vezivni materijal nanese on prolazi kroz sloj praškastog materijala sve dok ne dođe do sljedećeg sloja i u kontaktu sa slojem od pijeska i cementa odmah započinje proces očvršćavanja te dobivamo čvrstu strukturu. Vezivo se ispisuje samo na području sloja gdje je predviđena struktura koju treba isprintati i na tom dijelu počinje proces očvršćivanja, a ostatak praškastog materijala ostaje nepovezan i služi kao potpora za sljedeći sloj koji će se ispisati. [9]



Slika 9. Proces printanja konstrukcije D-shape metodom



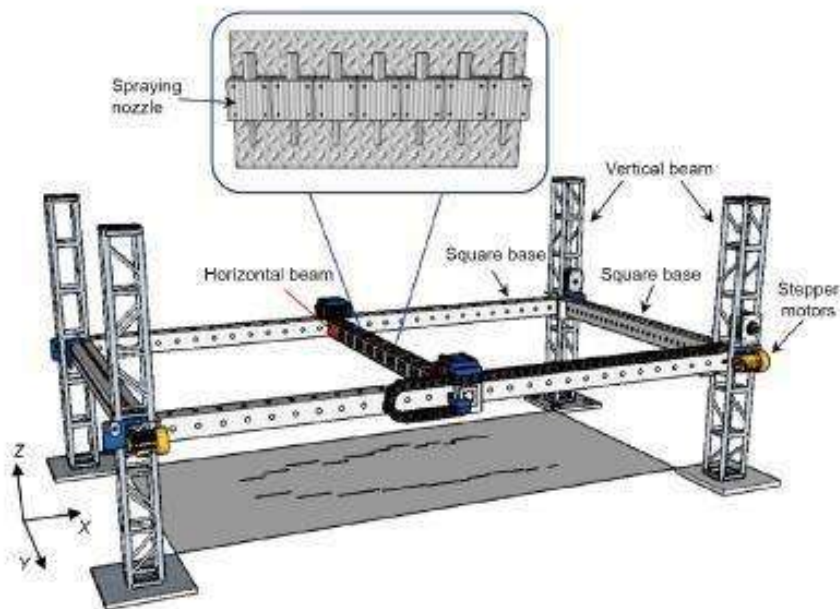
Slika 10. Nanošenje tekućeg vezivnog materijala na sloj pijeska i cementa

Nepovezani dijelovi slojeva koji služe kao potpora, omogućuju velik stupanj slobode printanja u sve 3 dimenzije. Zbog toga je D-Shape metoda odličan izbor za printanje raznovrsnih kompliciranih oblika, što je sa tradicionalnom ugradnjom betona, a i ostalim metodama 3D printanja betona vrlo teško izvedivo. Nakon što je proces printanja gotov i struktura je u potpunosti očvršnula potrebno je ukloniti nevezani materijal. Uklanjanje nevezanog materijala može biti vrlo teško i dugotrajno, ovisno o obliku predmeta koji je isprintan. Problem koji se može pojaviti nakon čišćenja je problem očvršćivanja materijala u području u kojem to nismo željeli, onda se pomoću alata ukloni taj očvršnuli dio sa isprintanog predmeta. [9]



Slika 11. Proces uklanjanja nevezanog materijala

Konstrukcija za 3D printer D-Shape metode sastoji se od 4 stupa visine 3 metra s elektromotorom koji omogućuje vertikalno pomicanje i od grede duljine 6 metara na kojoj se nalaze mlaznice između kojih je razmak 20 milimetara, kako bi se pokrila što veća površina. Područje printanja je dimenzija 5m x 5m x 3m, ali te dimenzije se mogu i povećati ovisno o veličini predmeta koji želimo isprintati. Prednost D-shape metode je velika čvrstoća betona i mogućnost printanja raznovrsnih oblika u sve 3 dimenzije, ali naravno ova metoda ima i nedostataka. Nedostaci su brzina printanja, ograničene veličine printanja i velike količine praškastog materijala koji nije očvrstnuo. Veći dio praškastog materijala je otpad, ali jedan dio se može ponovno iskoristiti. [9]



Slika 12. Konstrukcija 3D printera D-Shape metode



### 3D PRINTANJE BETONA INJEKTIRANJEM

Dosadašnje metode koje smo spomenuli, kao što su istiskivanje materijala ( Contour Crafting, Concrete Printing) i prostiranje materijala ( D – Shape) omogućuju printanje izričito horizontalnih slojeva betona, ali uz pomoć nove metode 3D printanja injektiranjem betona će se moći nadići i ta ograničenja jer proces printanja nije ograničen gravitacijskim silama.

3D printanje betona injektiranjem je nova metoda razvijena u Njemačkoj na Tehničkom sveučilištu Braunschweig, pomoću koje će se moći printati kompleksniji oblici u građevinarstvu. Metoda injektiranja temelji se na postupku kod kojeg se materijal u fluidnom stanju injektira u drugi materijal specifičnog reološkog svojstva, što omogućuje fluidnom materijalu da zadrži stabilan oblik unutar drugog materijala. Razlika u odnosu na prethodne metode koje printaju horizontalne slojeve je ta da se kod metode injektiranja komplicirane betonske strukture mogu stvoriti tiskanjem prostorno slobodnih putanja, koje nisu ograničene gravitacijskim silama jer se istisnuti materijal nalazi u drugom materijalu. [12]

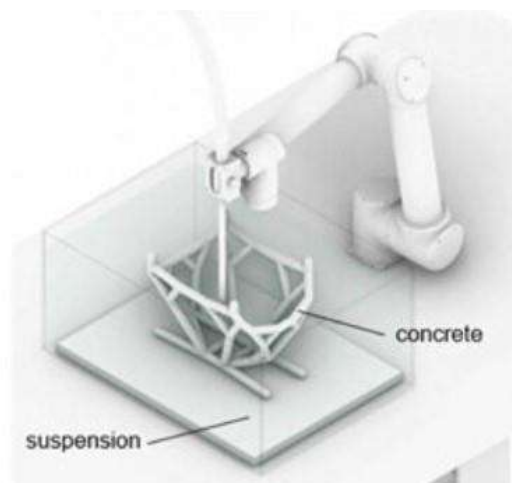
Kod 3D printanja betona injektiranjem postoje 3 metode:

- Injektiranje sitnozrnatog betona u nestvrdnjavajuću suspenziju
- Injektiranje nestvrdnjavajuće suspenzije u sitnozni beton
- Injektiranje sitnozrnog betona određenih svojstava u beton sa različitim svojstvima u odnosu na prvi sastav betona

#### **Injektiranje betona u suspenziju**

Sitnozni beton se injektira u nestvrdnjavajuću suspenziju. Pomoću ove tehnike mnoge rešetkaste strukture i betonski okviri mogu se proizvesti, što bi inače bilo teško, gotovo nemoguće za proizvesti ostalim metodama. Postupak počinje tako da se sitnozrni beton injektira u posudu ispunjenu gelom (suspenzija). U dosadašnjim istraživanjima se pokazalo da već par sati nakon ubrizgavanja betona pojavljuje se gusta bijela ovojnica gela oko betonske strukture, a u isto vrijeme voda se istisne na površinu gela, čime možemo zaključiti da se promijenila i pozicija betonske strukture u gelu. U dodiru gela i betonske strukture

dolazi do djelomične razgradnje gela te se oko 5% gela ne može reciklirati. Kako bi se spriječila razgradnja gela i pojava ovojnica oko betonske strukture razvijene su nove vrste suspenzije: suspenzija od pijeska i vapnenca, suspenzija gela i kvarcnog pijeska. Nakon 48 sati injektiranu strukturu možemo maknuti iz gela. [12]



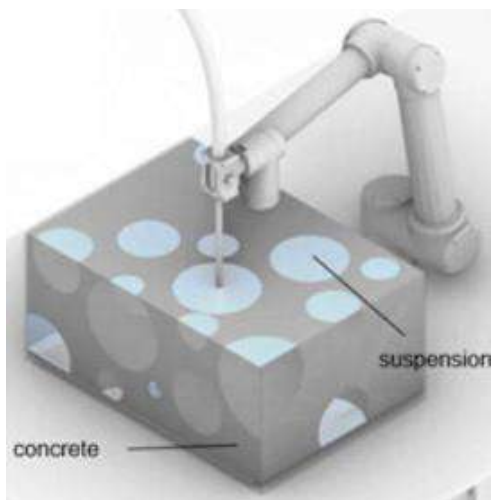
Slika 13. Skica procesa injektiranja betona u suspenziju



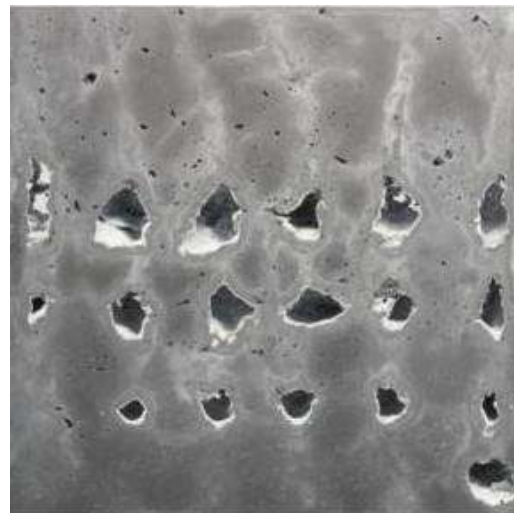
Slika 14. Stvarni prikaz postupka injektiranja betona u suspenziju

### Injektiranje suspenzije u beton

Kod ove metode nestvrđnjavajuća suspenzija se injektira u posudu punu svježeg betona. Nakon nekog vremena suspenzija se uklanja i u betonu ostaju rupe i kanali na mjestima gdje se ubrizgala suspenzija. Za suspenziju se koristi mješavina gela i pijeska, jer dobivamo bolje rezultate printanja nego kod korištenja čistog gela. [12]



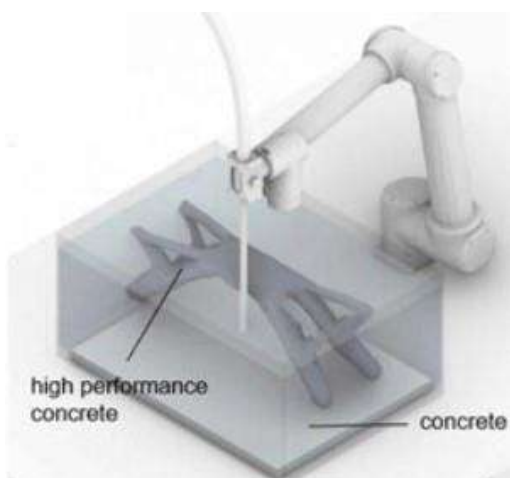
Slika 15. Skica procesa injektiranja suspenzije u beton



Slika 16. Stvarni prikaz rezultata printanja

### Injektiranje betona u beton

Kod ove metode injektiranja betona u beton, beton visoke čvrstoće se injektira u beton lošije kvalitete, kao naprimjer reciklirani beton.



Slika 17. Skica procesa injektiranja betona u beton



Slika 18. Stvarni prikaz rezultata printanja

## YINGCHUANG

Yingchuang je Kineska tvrtka koja za 3D printanje betona koristi metodu sličnu metodi Contour Crafting. Yingchuang koristi printer koji printa velikom brzinom i ispisuje vanjske konture elementa, a kao ispuna se printa rešetka. Ova metoda služi za printanje velikih predgotovljenih elemenata u tvornici koji se naknado spajaju na gradilištu i po tome se razlikuje od Contour Craftinga kod kojeg se nastoji isprintati cijelu građevinu na licu mjesta.

[4]



*Slika 20. Prikaz rešetkaste ispune*



*Slika 19. Spajanje predgotovljenih elemenata na gradilištu*

## TOTAL KUSTOM

Total Kustom je metoda 3D printanja betona koju je osmislio Andrey Rudenko u Minnesoti. Rudenkova metoda je jako slična Contour Crafting metodi, razlika je u tome što je debljina sloja puno manja nego kod Contour Craftinga. Debljina sloja kod Contour Crafting metode je 25,4 milimetra, a kod Total Kustom metode je debljina samo 5 milimetara. Ova metoda teži što većoj kvaliteti printanja, iako to znači duže vrijeme printanja i skuplju cijenu. Pomoću Total Kustom metode u budućnosti se planira printati naselja od 3d printanih građevina, printati replike povijesnih građevina, te čak razviti printer kojim će se graditi na Mjesecu. [4]



*Slika 22. Printanje tankih slojeva betona*



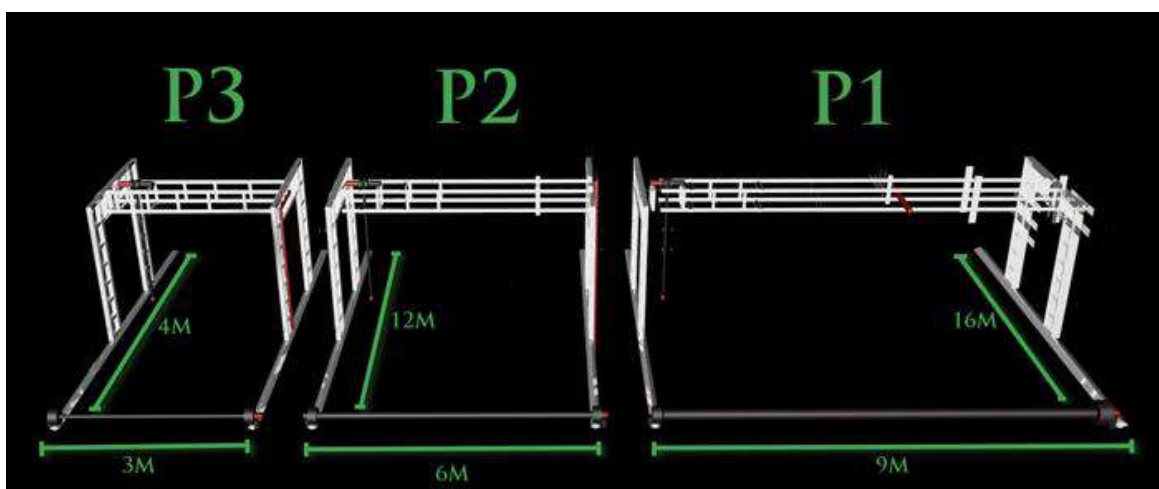
*Slika 21. Prikaz replike povijesne građevine isprintan metodom Total Kustom*

## CyBe ADDITIVE INDUSTRIES

CyBe je kompanija iz Nizozemske koja za 3D printanje betona koristi Contour Crafting metodu. Razlika u odnosu na Contour Crafting je što CyBe koristi drugaciju smjesu za mort koja unutar sat vremena doseže visoku čvrstoću i time se omogućuje brzo i efikasno printanje. Za printanje se koristi portalni sustav ili robotska ruka koji u kombinaciji sa betonom koji brzo očvršćava, tvore jednu od najbržih metoda 3d printanja na tržištu. Brzina printanja je 600 mm/s, a debljina slojeva koji se printaju je od 10 mm do 50 mm. [10]

## BETABRAM

BetAbram je kompanija iz Slovenije koja za printanje koristi metodu istiskivanja betona kao kod Concrete Printing i Contour crafting metode. Postupak printanja i tehnologija koja se koristi je portalni sustav opremljen elektromotorima kako bi bilo omogućeno printanje u sve 3 dimenzije. Mješavina materijala se nalazi u spremniku koji pomoću pumpe odlazi u cijev koja je spojena sa gumenim crijevom i mlaznicom te se beton istiskuje sloj po sloj. Glavni cilj kompanije BetAbram je razviti 3D printere za širu uporabu, što postižu pristupačnom cijenom i 3 modela printera koji se razlikuju po veličini. [11]



Slika 23. Tri modela 3D printera kompanije BetAbram



## METODE SPAJANJA 3D BETONSKIH PREDGOTOVLJENIH ELEMENATA

Proces 3D printanja betona može se izvoditi kontinuiranim printanjem cijelih građevina na licu mjesta ili printanjem predgotovljenih elemenata u tvornicama koje se naknadno spajaju na licu mjesta. Za povezivanje predgotovljenih betonskih elemenata izgrađenih 3D printanjem koristi se nekoliko metoda spajanja koje se primjenjuju i kod povezivanja klasičnih betonskih predgotovljenih elemenata:

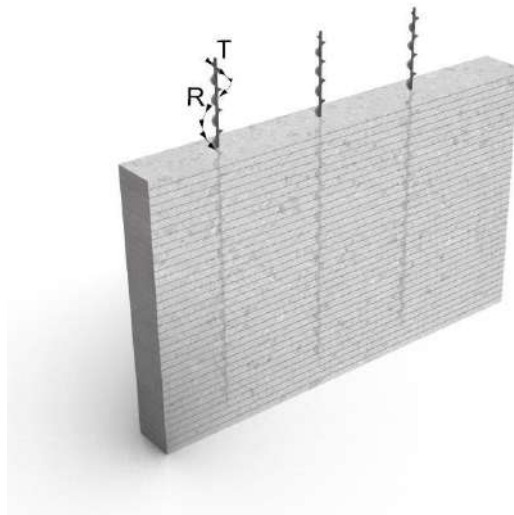
**Ljepljenje** je jedna od metoda kod koje se koristi posebno epoksidno ljepilo dizajnirano za spajanje betonskih površina. Ljepilo se nanosi na površine koje se trebaju spojiti, a zatim se dijelovi pritisnu zajedno i ostave da se osuše. Ljepilo u kratkom vremenu stvara snažnu vezu između elemenata, osiguravajući njihovu stabilnost.



Slika 24. Spoj elemenata ljepljenjem

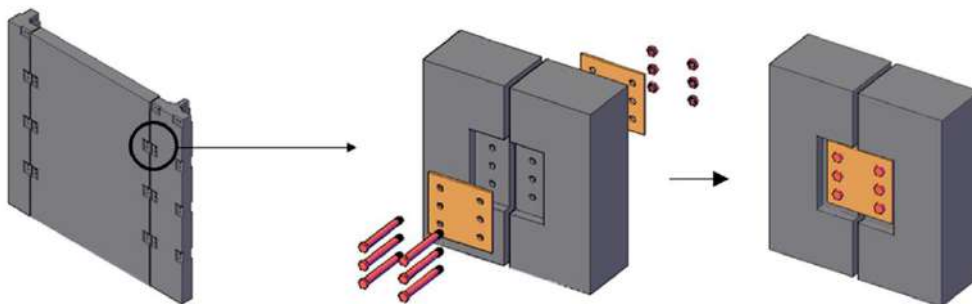
**Armatura** se koristi kako bi se osigurala dodatna čvrstoća i stabilnost spoja betonskih dijelova. Armatura se može umetnuti u 3D ispisane dijelove prije i nakon ispisivanja, krajevi armature moraju biti izvan ispisane konstrukcije kako bi se predgotovljeni elementi mogli povezati i taj spoj se onda zalije betonom. Jedna od metoda spajanja elemenata je da

armaturne šipke jednog elementa umetnemo u prethodno napravljene kanale to jest utore u drugom elementu. U nekim slučajevima se betonski dijelovi s armaturom mogu spojiti korištenjem postupka zavarivanja.



Slika 25. Vijčana armatura u predgotovljenom elementu

**Mehanički spoj** predgotovljenih elemenata postiže se korištenjem vijaka, matica, spojnica, sidara. Ovi mehanizmi se ugrađuju u dijelove prije ili nakon ispisivanja, a zatim se koriste za sigurno spajanje na licu mjesta.



Slika 26. Spoj predgotovljenih elemenata vijcima



## TEHNOLOGIJA I OPREMA ZA 3D PRINTANJE BETONA

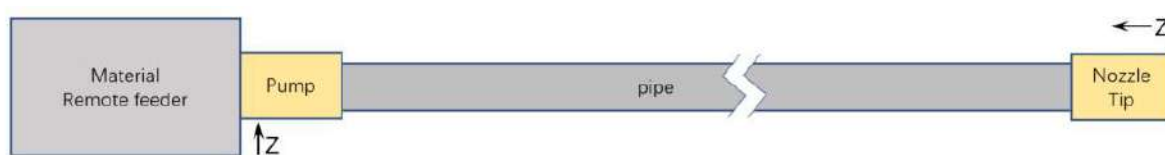
### DIJELOVI 3D PRINTERA

3D printer za beton sastoji se od sustava za kontrolu pokreta, sustava za transport materijala i sustava za istiskivanje materijala. Sustav za transport materijala je odgovoran za dovođenje betona do mlaznice, a mlaznica spada pod sustav za istiskivanje materijala. Sustav za kontrolu pokreta sastoji se od okvira i motora kojima se kontrolira kretanje mlaznica, kako bi se osiguralo printanje sa velikom preciznošću.

### SUSTAV ZA TRANSPORT MATERIJALA

Postoje 4 vrste sustava za transport materijala:

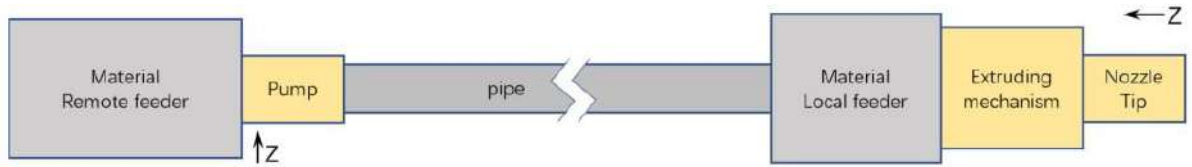
1. Prva vrsta sustava za transport betona ima samo jedan spremnik u koji za printanje velikih razmjera stane 10 do 100 kilograma betona. U spremniku se nalaze rotirajuće lopatice koje miksaju smjesu betona kako ne bi došlo do segregacije i očvršćivanja betona. Materijal se iz spremnika pomoću pumpe pod tlakom transportira kroz dugačku cijev sve do mlaznice i na kraju se ističe na podlogu. [14]



Slika 27. Prva vrsta sustava za transport materijala

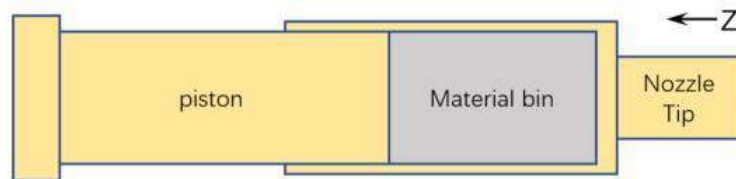
2. Druga vrsta sustava za transport ima dva spremnika, pumpu i cijev. Prvi spremnik ima ulogu kao kod prethodnog primjera, u njemu se nalazi većina materijala. Drugi spremnik se nalazi na drugom kraju cijevi i direktno je povezan sa sustavom za istiskivanje materijala. Također ima rotirajuće lopatice kojima miksa beton i u njega stane od 1 do 4 kilograma betona. Uloga drugog spremnika je osiguravanje

kontinuiranog printanja bez stanke i usporavanja. U slučaju da se nešto pokvari kod prvog spremnika ili pumpe, uvijek će betona biti u drugom spremniku i moći će se nastaviti printati jedan period dok ne ponestane materijala i u tom spremniku.[14]



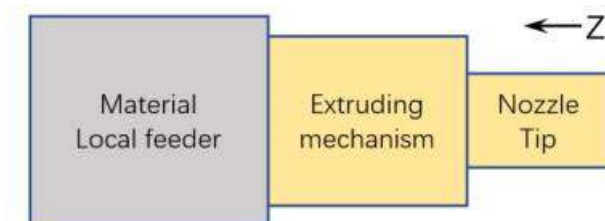
Slika 28. Druga vrsta sustava za transport materijala

3. Treća vrsta sustava za transport materijala nema spremnika za beton i cijevi kroz koju bi se materijal transportirao, stoga bi bilo bolje gledati ovaj sustav kao osnovni sustav za istiskivanje materijala koji funkcionira na temelju ekstruzije pomoću klipa.[14]



Slika 29. Treća vrsta sustava za transport materijala

4. Četvrta vrsta sustava za transport materijala sastoji se od jednog lokalnog spremnika koji je direktno povezan sa sustavom za istiskivanje materijala. Unutar spremnika se nalaze rotirajuće lopatice koje miješaju materijal kako ne bi došlo do očvršćivanja i segregacije materijala. [14]



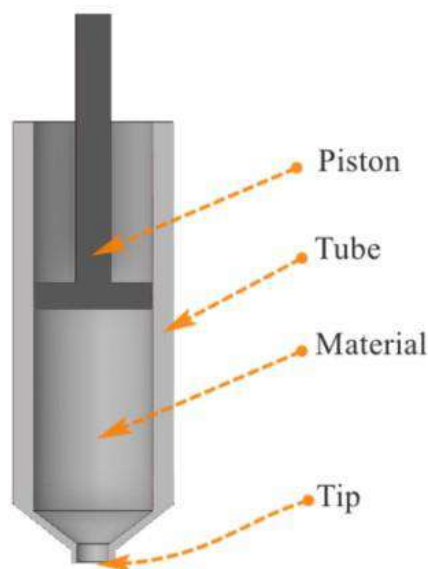
Slika 30. Četvrta vrsta sustava za transport materijala

## SUSTAV ZA ISTISKIVANJE MATERIJALA

Glavni dio sustava za istiskivanje materijala je mlaznica koja služi za kontinuirano taloženje betona u 3 dimenzije sloj po sloj, a drugi bitan dio je vrh mlaznice kroz koji prolazi materijal. Prvo ćemo objasniti funkciju mlaznica, a kasnije ćemo reći nešto i o vrhovima tih istih mlaznica i koja je njihova uloga u 3D printanju.

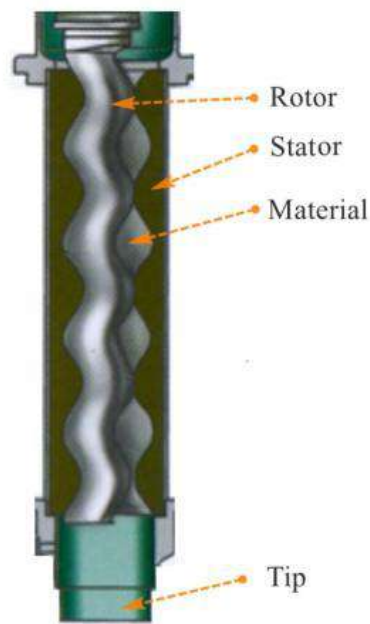
Postoje tri tipa mlaznica koje su do danas razvijene, a temelje se na ekstruziji klipom i ekstruziji vijkom.

1. Ekstruzija klipnom pumpom funkcionira na način da se materijal pod tlakom direktno istiskuje kroz vrh mlaznice pomoću klipa s motorom ili hidrauličkog klipa. Problem kod ovog tipa mlaznice je što nije moguće dodati materijal za vrijeme printanja jer klip u potpunosti zatvara prostor mlaznice u kojem se nalazi materijal. U slučaju da se baš mora dodati materijal proces printanja treba privremeno prekinuti, što nije najbolja opcija jer narušava kvalitetu printanja i kvalitetu konačne konstrukcije koja je isprintana. Kod mlaznice sa klipom nailazimo na još jedan problem, a to je mogućnost pojave segregacije materijala jer nema lopatica koje bi miješale smjesu materijala prije istiskivanja na podlogu. [14]

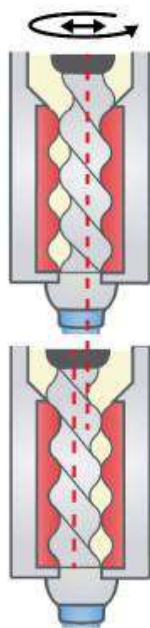


Slika 31. Mlaznica sa klipnom pumpom

2. Ekstruzija ekscentrično vijčanom pumpom funkcionira na način da se materijal istiskuje kroz vrh mlaznice pomoću vijčane pumpe koju pokreće motor velike snage. Ekscentrično vijčana pumpa je samousisavajući rotacijski uređaj koji se sastoji od rotora i statora. Rotor je metalni vijak zaobljenog navoja, velikog koraka i velike ekscentričnosti u odnosu na promjer jezgre. Stator je fiksni dio pumpe od gumenog materijala, koji se nalazi na metalnoj cijevi mlaznice i ima dvostruko više navoja u odnosu na vijak. Vijak rotira unutar gumenog statora i kreće se rotacijsko translacijskim pomacima, čime ostvaruje dodirnu liniju duž profila koja ostvaruje brtvljenje između njih. Posljedica ovakvog kretanja vijka u odnosu na stator je stvaranje tlačne komore koja rotacijskim pomicanjem istiskuje materijal od usisnog dijela do dijela istiskivanja materijala kroz mlaznicu pod utjecajem tlaka. Materijal koji se istiskuje mora biti velike fluidnosti zbog lakšeg printanja, što dovodi do slijeganja nakon ispisa i teškog održavanja geometrije. Za vrijeme istiskivanja materijala dolazi do stvaranja velike topline uzrokovane trenjem između metalnog vijka i gumenog statora, što ubrzava hidrataciju cementa i skraćuje vrijeme povezivanja materijala. Kako bi se smanjila toplina koriste se vrhovi mlaznice većeg promjera 30 mm do 60 mm i materijal velike fluidnosti. [14]

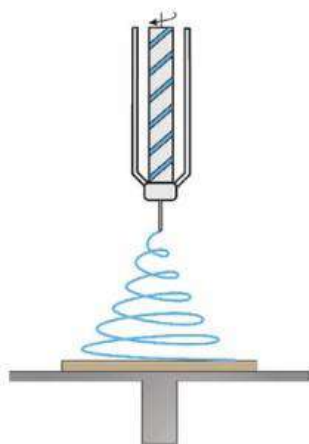


Slika 32. Mlaznica sa ekscentrično vijčanom pumpom



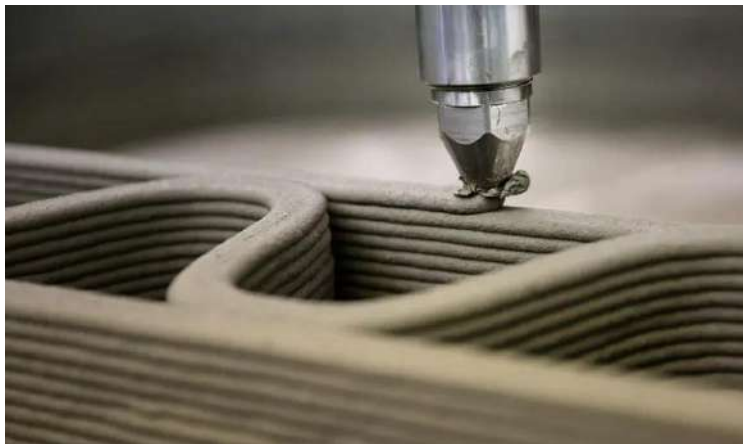
Slika 33. Kretanje vijka unutar mlaznice

3. Ekstruzija vijčanom pumpom ( bez gumenog statora) funkcioniра na sličan način kao prethodno opisana vijčana pumpa. Razlika je u tome što kod ove pumpe nema gumenog statora nego je na tom području mlaznice formirana šupljina koja se nalazi između navoja vijka i unutarnje stijenke mlaznice. Zbog toga se materijal ne istisće pod djelovanjem tlaka jer nema dodirne linije statora i rotora, pa ne može nastati tlačna komora, nego se istiskivanje temelji na snazi i rotaciji samog vijka. Materijal koji se istisće kroz ovaj tip mlaznice mora biti velike viskoznosti i manje fluidnosti kako bi se spriječilo deformiranje i slijeganje slojeva betona.[14]

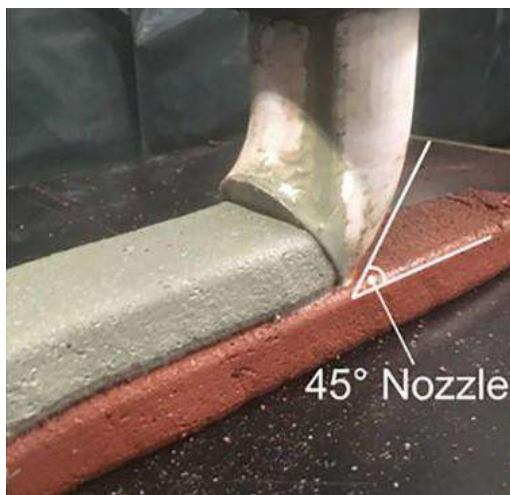


Slika 34. Mlaznica s vijčanom pumpom bez gumenog statora

Vrh mlaznice može biti različitih oblika kao što su kružni, pravokutni i trokutasti, a to sve ovisi o geometriji objekta koji želimo isprintati. Najviše se koristi vrh kružnog oblika jer je najjednostavniji i pokazao se kao pouzdan izbor. Promjer vrha mlaznice se kreće od 6 mm do 50 mm. Postoje 3 varijante položaja vrha mlaznice u odnosu na podlogu. Jedna je varijanta mlaznice okomite na smjer printanja ( $90^\circ$ ), a to je ujedno i najbolja varijanta jer se zbog izravnog okomitog istiskivanja betona stvara dodatani pritisak koji doprinosi boljem prijanjanju između slojeva. Ostale dvije varijante su mlaznica sa vrhom od  $45^\circ$  na smjer printanja i mlaznica sa vrhom pod kutem od  $0^\circ$  na smjer printanja betona. [14]



Slika 37, Vrh mlaznice pod  $90^\circ$  na smjer printanja



Slika 36. Vrh mlaznice pod  $45^\circ$  na smjer printanja

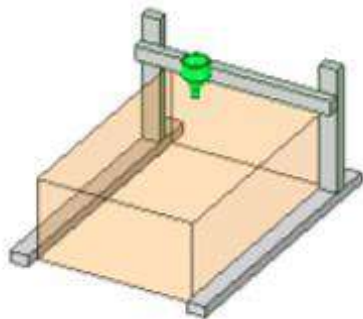


Slika 35. Vrh mlaznice pod  $0^\circ$  na smjer printanja

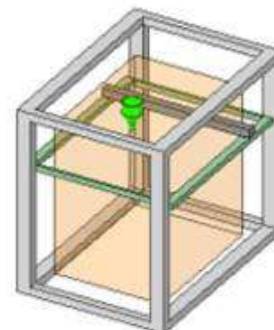
## SUSTAV ZA KONTROLU POKRETA

Kod 3D printanja betona veliku ulogu u kvaliteti printanja ima sustav za kontrolu pokreta, čija je uloga pomicanje mlaznice po prethodno određenim putanjama. Sustav za kretanje omogućuje pomicanje mlaznice po 3 koordinatne osi  $x$ ,  $y$  i  $z$ , a kod nekih sustava je moguće kretanje po 6 osi što omogućuje još veći stupanj slobode printanja. Postoji nekoliko sustava za kontrolu pokreta, a to su: portalni i okvirni sustav, robotska ruka, polarni sustav, delta sustav. Najčešće se koriste portalni, okvirni sustav i robotska ruka, dok polarni i delta sustavi nisu najbolji odabir za printanje betona zbog svog kompleksnog dizajna i upravljanja.

1. Portalni i okvirni sustavi 3D printera se najviše koriste za printanje betona i jako su slični po načinu kretanja. Portalni sustav ima dvije vodilice položene na podlozi, po kojima se pomoću motora kreću dva stupa po jednoj osi ( os  $x$ ). Horizontalna greda koja se nalazi na stupovima kreće se gore – dolje, to jest mijenja svoj visinski položaj ( os  $z$ ), a mlaznica koja se nalazi na toj horizontalnoj gredi ima mogućnost kretanja po osi okomitoj na os kretanja stupova ( os  $y$ ). Okvirni sustav se sastoji od nepokretnog okvira koji predstavlja noseću konstrukciju printera. Na okviru su ugrađene još četiri grede koje pomoću motora mijenjaju svoj visinski položaj (os  $z$ ). Na te četiri grede postavljena je još jedna greda koja se kreće po osi  $x$  (os  $x$ ), a na njoj se nalazi mlaznica koja se kreće po suprotnoj osi (os  $y$ ). Sličnost ova dva sustava je kretanje po 3 osi i to samo translacijskim pomacima. Prednosti ovih sustava su niska cijena, jednostavno održavanje, praktičnost, točnost i brzina printanja u odnosu na sustav sa robotskom rukom. [14][15][16]

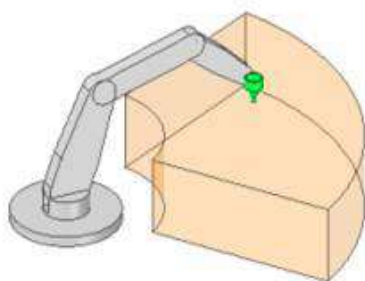


Slika 39. Portalni sustav



Slika 38. Okvirni sustav

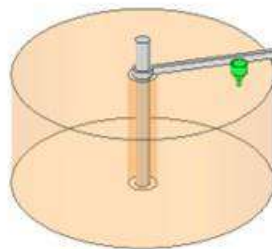
2. Robotska ruka je najčešća vrsta sustava za kontrolu pokreta nakon okvirnih i portalnih sustava. Robotska ruka za 3D printanje betona se sastoji od nekoliko međusobno povezanih segmenata i zglobova koji simuliraju kretanje ljudske ruke. Baš zbog tih zglobova ovaj sustav ima mogućnost rotacijskog i translacijskog kretanja po 6 osi što omogućava velik stupanj slobode pri printanju. Kako bi se omogućila precizna kontrola i kretanje, segmenti su opremljeni raznim sensorima, motorima i aktuatorima. Također robot može biti opremljen kamerama i laserima kako bi se kontrolirao proces printanja i osigurala točnost printanja te spriječilo pojavljivanje grešaka. Baza robotske ruke se montira na stabilnu podlogu ili pokretnu platformu što joj omogućuje doseg i kretanje po području na kojem se printa. Kraj robotske ruke je opremljen mlaznicom koja istišće materijal. Ruka je programirana da se kreće prethodno isprogramiranom putanjom koja se podudara sa digitalnim modelom konstrukcije koja će se printati. Neki od nedostataka ovog sustava su kompleksna montaža i održavanje, nejednaka rezolucija i visoka cijena, a najveća prednost je fleksibilnost robotske ruke. [14][15][16]



Slika 40. Sustav sa robotskom rukom



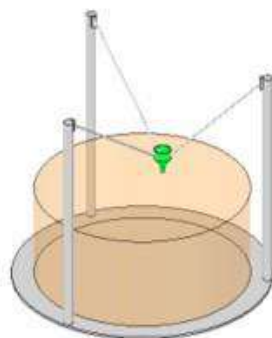
3. Polarni sustav je sustav 3D printera koji printa u polarnim koordinatama i razlikuje se od printera portalnog i okvirnog oblika po tome što se on nalazi u centru gradilišta i kreće se rotacijskim i translacijskim pokretima po čemu je sličan robotskoj ruci. Tijelo printera se montira na čvrstoj podlozi u centru gradilišta i ne može se kretati nego je statično. Ta statičnost i ravnoteža se osigurava balastom to jest utegom na suprotnoj strani sustava u odnosu na ruku na kojoj se nalazi mlaznica. Sličan princip postizanja ravnoteže možemo vidjeti na primjeru kranske dizalice za podizanje tereta. Ruka sustava je vrlo slična kao kod robotske ruke, ali razlika je što nema segmenata koji su povezani zglobovima, što smanjuje stupanj slobode kretanja. Nedostatci ovog sustava su nejednaka rezolucija ispisa materijala, kompleksno održavanje, dok su prednosti jednostavna uporaba i jednostavno povećanje volumena izgradnje. [14][17]



Slika 41. Polarni sustav

4. Delta printeri su strojevi koji koriste drugačiji sustav pokreta od prethodno opisanih. Umjesto kretanja po x, y, z osi, delta sustav nosi mlaznicu pomoću 3 šipke, koje su pričvršćene na tri vertikalna stupa. Svaka od 3 šipke se može kretati samo vertikalno gore – dolje, ali neovisno o ostalim šipkama. Takvo slobodno kretanje omogućuje kretanje mlaznice u svim smjerovima. Delta printer je po dijelovima vrlo sličan ostalim printerima koje smo spomenuli, razlika je jedino u rasporedu tih dijelova i obliku noseće konstrukcije. Jedna od negativnih stavki delta printera je što mlaznica nije stabilna zbog same konstrukcije printera, što se najviše osjeti kada je mlaznica

spojena sa dugačkom cijevi za transport materijala. Ostali nedostaci su kompleksna montaža i održavanje, te nejednaka rezolucija printanja, a prednost delta sustava je brzina printanja. [14][18]



Slika 42. Delta sustav

## TEHNIČKE KARAKTERISTIKE 3D PRINTERA ZA BETON

Danas na tržištu postoji velika ponuda 3D printera betona koji se koriste u građevinarstvu. 3D printanje betona postaje sve traženije, stoga u budućnosti možemo očekivati još veći broj proizvođača 3D printera. U ovom poglavlju navest ćemo tehničke karakteristike 3D printera nekih od najpoznatijih proizvođača kao što su: COBOD, Total Kustom, CyBe, BetAbram.

### 1. BetAbram - P1

BetAbram P1	
Težina	520 kg
Dimenzije	18 m x 9 m x 3.5 m
Max brzina printanja	500 mm/s
Max duljina printanja	16 m
Max širina printanja	8.2 m
Max visina printanja	2.5 m
Promjer mlaznice	40 mm
Visina sloja	10 -20 mm

Tablica 1. Tehničke karakteristike printera BetAbram P1 [19]



Slika 43. BetAbram P1

## 2. COBOD - BOD2

BOD2	
Težina	5390 kg
Dimenzije printera	∞ m x 15 m x 10 m
Max brzina printanja (x os)	250 mm/s
Max brzina printanja (y os)	250 mm/s
Max brzina printanja (z os)	50 mm/s
Napajanje	380 V - 480 V ( 3 faze)
Jakost el. struje	32 A
Frekvencija	50/60 Hz
Glasnoća	<70 dB
Max potrošnja snage	8000 W
Normalna potrošnja snage	1000 W
Max duljina printanja	∞ m
Max širina printanja	14.6 m
Max visina printanja	8.1 m
Max brzina printanja	1000 mm/s
Visina isprintanog sloja	5 - 40 mm
Širina isprintanog sloja	30 -300 mm
Istiskanje materijala	7.2 m <sup>3</sup> /h
Max veličina agregata	10 mm

Tablica 2. Tehničke karakteristike printera BOD2 [20]



Slika 44. COBOD BOD2

### 3. TOTAL KUSTOM – StroyBot 6.2

StroyBot 6.2	
Težina	2500 kg
Dimenzije printera	20 m x 13 m x 7 m
Max brzina	40 m/min
Brzina printanja	1 - 15 m/min
Napajanje	110 V- 230 V
Potrošnja snage	500 W - 1600 W
Max duljina printanja	15 m
Max širina printanja	10 m
Max visina printanja	6 m
Promjer mlaznice	20 - 40 mm
Visina isprintanog sloja	10 - 30 mm
Širina isprintanog sloja	25 - 60 mm
Točnost printanja	± 2/2/1 mm

Tablica 3. Tehničke karakteristike printera StroyBot 6.2 [21]



Slika 45. StroyBot 6.2

## 4. CyBe – RC 3DP

CYBE RC 3DP	
Težina	3 500 kg
Dimenzije printera	2.5 m x 3 m x 4 m
Raspon robotske ruke	2.65 - 3.20 m
Brzina printanja	50 - 600 mm/s
Brzina kretanja	3 km/h
Točnost printanja	± 1/1/1 mm
Visina isprintanog sloja	10 - 50 mm
Promjer mlaznice	1" (25.4 mm)
Temp. Okoline	5 -50 °C
Glasnoća	70 - 80 dB
Napajanje	200 V - 600V
Max potrošnja snage	8000 W

Tablica 4. Tehničke karakteristike printera CyBe RC 3DP [22]

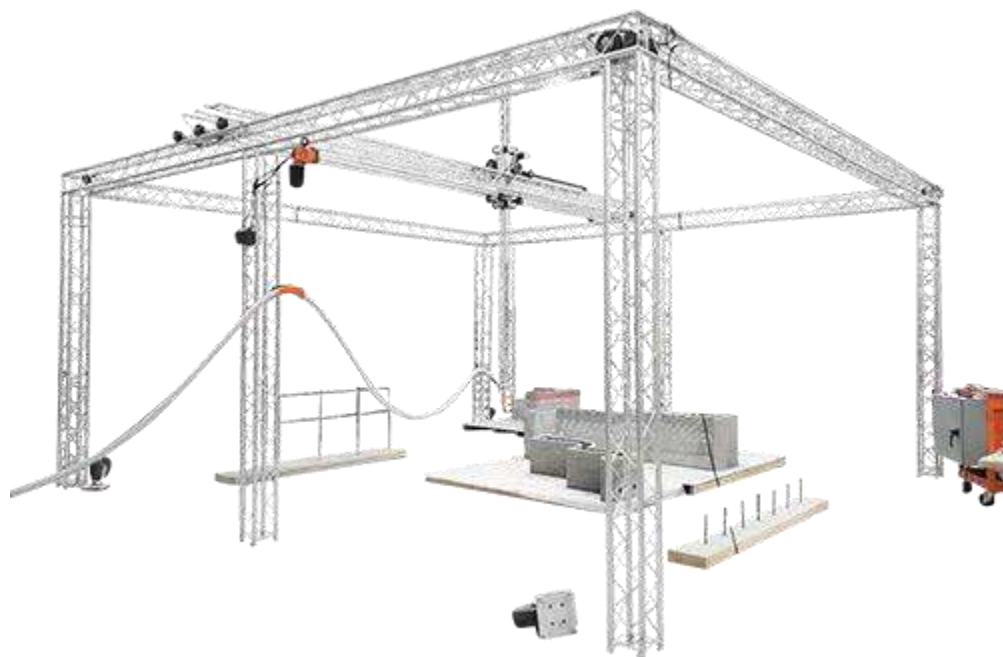


Slika 46. CyBe RC 3DP

## 5. MudBots

MudBots	
Težina	700 kg
Dimenzije printera	2.13 m x 2.03 m x 1.32 m
Max duljina printanja	1.82 m
Max širina printanja	1.82 m
Max visina printanja	1.22 m
Promjer mlaznice	25.4 - 50.8 mm
Brzina printanja	228.6 mm/s
Napajanje	220 V
Frekvencija	60 Hz
Potrošnja snage	1500 W

Tablica 5. Tehničke Karakteristike printera MudBots [23]



Slika 47. MudBots



## 6. CERAMBOT Tong

CERAMBOT Tong	
Težina	200 - 500 kg
Dimenzije printera	2.7 m x 2.7m x 2.7 m
Napajanje	100 V- 220 V
Frekvencija	50 / 60 Hz
Potrošnja snage	6000 W
Brzina printanja	10 - 200 mm/s
Max duljina printanja	1.65 m
Max širina printanja	1.65 m
Max visina printanja	1.65 m
Promjer mlaznice	30 mm
Točnost printanja	± 1 mm

Tablica 6. Tehničke karakteristike printera CERAMBOT Tong [24]



Slika 48. CERAMBOT Tong



## 7. DELTA WASP 3MT

DELTA WASP 3MT	
Težina	350 kg
Dimenzije printera	2.15 m x 2.35 m x 3.05 m
Max brzina printanja	200 mm/s
Ubrzanje	150 mm/s <sup>2</sup>
Promjer mlaznice	8 - 30 mm
Napajanje	220 V - 240 V
Frekvencija	50/60 Hz
Potrošnja snage	2200 W
Max veličina zrna	1 mm

Tablica 7. Tehničke karakteristike printera DELTA WASP 3MT [25]



Slika 49. DELTA WASP 3MT

## 8. MaxiPrinter 3D

3D MaxiPrinter	
Težina	3320 kg
Duljina ruke	7 m
Volumen gradnje	9.5 m x 9.5 m x 3.3 m
Brzina printanja	20 - 300 mm/s
Potrošnja snage	7000 W
Promjer mlaznice	20 - 50 mm
Min visina sloja	5 mm
Max visina printanja	7 m

Tablica 8. Tehničke karakteristike printera 3D MaxiPrinter [26]



Slika 50. MaxiPrinter 3D

## **PREDNOSTI I MANE TEHNOLOGIJE 3D PRINTANJA BETONA**

### **PREDNOSTI 3D PRINTANJA BETONA**

#### **BRZA IZGRADNJA**

Brza izgradnja znači uštedu vremena, što u današnje vrijeme u građevinarstvu igra vrlo bitnu ulogu. Klasičnom metodom betoniranja postupak izgradnje može trajati mjesecima, potrebno je puno radnika i postavljanje oplata što utječe na vrijeme građenja. 3D printanjem betona taj je problem riješen jer nije potrebno postavljanje oplata, printati se može bez prestanka što rezultira gotovom građevinom u jednom ili par dana. [27][28]

#### **JEFTINIJA IZGRADNJA**

3D printanje je jeftinija vrsta izgradnje otprilike oko 40% u odnosu na klasičnu izgradnju. Razlog tomu je što je u proces uključeno manje radnika. Umjesto da se zaposli čitav tim radnika kao u klasičnoj metodi, kod 3D printanja je potrebno par radnika da nadziru strojeve i sami proces printanja. [27][28]

#### **TOČNOST I SMANJENJE GREŠAKA PRI IZGRADNJI**

Kod tradicionalne metode betoniranja građevina, postoji mogućnost ljudske pogreške, jer je više ljudi uključeno u proces izgradnje. Postupak 3D printanja betona je po tom pitanju u prednosti, jer betoniranje se provodi pomoću printera, CAD računalnih programa i robotske tehnologije, što kao rezultat ima veliku preciznost printanja i smanjenje mogućnosti pojave grešaka pri printanju. [27][28]

#### **MANJE GRAĐEVINSKOG OTPADA ( ECO FRIENDLY)**

Zbog velike preciznosti printanja i rijetkih pojava grešaka pri printanju, stvara se i vrlo malo građevinskog otpada. Još jedan od razloga je i taj što kod 3D printanja betona stroj izračuna i dozira točnu količinu materijala koja je potrebna za proces printanja. Otpad koji se stvori može se reciklirati i ponovno iskoristiti. 3D printanjem betona smanjuje se i emisija CO<sub>2</sub> u atmosferu. [27][28]

## **VELIKI STUPANJ SLOBODE PRINTANJA**

Razvitkom 3D printera i sustava za kontrolu pokreta moguće je kretanje mlaznice po više osi koje omogućuje printanje raznolikih ravnih i krivuljnih oblika modernih građevina.

## **MANE 3D PRINTANJA BETONA**

### **PROBLEMI PRI PRINTANJU NA OTVORENOM (VREMENSKI UVIJETI)**

Na 3D printanje betona uvelike utječe temperatura zraka, vlažnost zraka, jačina vjetra te oborine. Prilikom betoniranja dolazi do procesa koji zovemo hidratacija cementa pri kojem se oslobađa toplina, koja zajedno sa visokom vanjskom temperaturom negativno utječe na kvalitetu betona. Dolazi do isparavanja vode što uzrokuje skupljanje betona i pojavu pukotina. Stoga je bolja opcija printanje predgotovljenih elemenata u kontroliranim uvjetima. [27][28]

### **OGRANIČENJA OPREME I STROJEVA**

Prilikom printanja na terenu na licu mjesta može doći do raznih problema. Jedan od problema su ograničene dimenzije printera zbog kojih se trenutno ne mogu graditi visoki neboderi, nego se grade manje kuće i predgotovljeni elementi. Gradnja na neravnom terenu ili kosini je otežana jer konstrukcija 3D printera treba idealne uvijete terena. Jedan od problema je i transport printera sa jednog gradilišta na drugo gradilište te njegova montaža. Promjer mlaznice utječe na smjesu betona, stoga možemo reći da je jedna od mana 3D printanja betona i to što se ne koristi agregat veće granulacije nego pijesak, kako bi smjesa mogla proći kroz mlaznicu, što kao rezultat utječe na čvrstoću betona i ograničenost materijalima. Što se tiče robotizirane opreme, u slučaju kvara ili oštećenja opreme za vrijeme printanja, može doći do grešaka pri printanju koje uzrokuju neuspješan finalni proizvod. [27][28]

**NEDOSTATAK KVALIFICIRANE RADNE SNAGE**

Iako smo u prednostima 3D printanja betona naveli da treba malo radnika za proces printanja, moramo nadodati da to ne mogu biti klasični radnici nego moraju biti obrazovani i kvalificirani za rad sa 3D printerom. 3D printanje je još uvijek nova metoda gradnje stoga je problem što fali kvalificiranih radnika.

## ZAKLJUČAK

Tehnologija 3D printanja betona relativno je novi pojam u svijetu građevinarstva, ali bez obzira na to, dosadašnja istraživanja i iskustva pokazala su da 3D printanje u građevinarstvu ima veliki potencijal da u budućnosti postane glavna metoda izgradnje. Danas postoji nekoliko metoda printanja betona, koje se svakim danom sve više usavršavaju, počinju se koristiti nove smjese materijala, pronalaze se novi načini i tehnologije kako bi građevine izgrađene 3D printanjem bile vrhunske kvalitete. Stoga u budućnosti možemo očekivati sve više građevina izgrađenih 3D printanjem, ali sa sigurnošću možemo reći da 3D printanje betona jedan duži period neće moći u potpunosti zamijeniti klasičnu metodu gradnje.

## POPIS SLIKA

Slika 1. Postupak 3D printanja betona .....	2
Slika 2. Proces printanja rubova/okvira.....	3
Slika 3. Proces punjenja okvira.....	3
Slika 4. Sustav 3D printera Contour Crafting metode .....	4
Slika 5. Dijelovi sustava za istiskivanje CC metode.....	4
Slika 6. Proces printanja cijele zgrade .....	5
Slika 7. Izgradnja naselja na Mjesecu .....	5
Slika 8. Nepravilna površina zida i 3D printer bez lopatica za gletanje na mlaznici .....	6
Slika 9. Proces printanja konstrukcije D-shape metodom.....	7
Slika 10. Nanošenje tekućeg vezivnog materijala na sloj pijeska i cementa .....	8
Slika 11. Proces uklanjanja nevezanog materijala.....	8
Slika 12. Konstrukcija 3D printera D-Shape metode .....	9
Slika 13. Skica procesa injektiranja betona u suspenziju .....	11
Slika 14. Stvarni prikaz postupka injektiranja betona u suspenziju .....	11
Slika 15. Skica procesa injektiranja suspenzije u beton .....	12
Slika 16. Stvarni prikaz rezultata printanja .....	12
Slika 17. Skica procesa injektiranja betona u beton.....	12
Slika 18. Stvarni prikaz rezultata printanja .....	12
Slika 19. Spajanje predgotovljenih elemenata na gradilištu .....	13
Slika 20. Prikaz rešetkaste ispune.....	13
Slika 21. Prikaz replike povijesne građevine isprintan metodom Total Kustom .....	14
Slika 22. Printanje tankih slojeva betona .....	14
Slika 23. Tri modela 3D printera kompanije BetAbram .....	15
Slika 24. Spoj elemenata ljepljenjem .....	16
Slika 25. Vijčana armatura u predgotovljenom elementu .....	17
Slika 26. Spoj predgotovljenih elemenata vijcima .....	17
Slika 27. Prva vrsta sustava za transport materijala .....	18
Slika 28. Druga vrsta sustava za transport materijala .....	19
Slika 29. Treća vrsta sustava za transport materijala.....	19
Slika 30. Četvrta vrsta sustava za transport materijala .....	19
Slika 31. Mlaznica sa klipnom pumpom .....	20
Slika 32. Mlaznica sa ekscentrično vijčanom pumpom .....	21
Slika 33. Kretanje vijka unutar mlaznice.....	22
Slika 34. Mlaznica s vijčanom pumpom bez gumenog statora.....	22
Slika 35. Vrh mlaznice pod 0° na smjer printanja.....	23
Slika 36. Vrh mlaznice pod 45° na smjer printanja.....	23
Slika 37. Vrh mlaznice pod 90° na smjer printanja.....	23
Slika 38. Okvirni sustav.....	24
Slika 39. Portalni sustav.....	24
Slika 40. Sustav sa robotskom rukom.....	25
Slika 41. Polarni sustav .....	26
Slika 42. Delta sustav .....	27
Slika 43. BetAbram P1 .....	28
Slika 44. COBOD BOD2 .....	29
Slika 45. StroyBot 6.2 .....	30



Slika 46. CyBe RC 3DP.....	31
Slika 47. MudBots.....	32
Slika 48. CERAMBOT Tong .....	33
Slika 49. DELTA WASP 3MT.....	34
Slika 50. MaxiPrinter 3D .....	35

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Tehničke karakteristike printera BetAbram P1 [19].....	28
Tablica 2. Tehničke karakteristike printera BOD2 [20].....	29
Tablica 3. Tehničke karakteristike printera StroyBot 6.2 [21] .....	30
Tablica 4. Tehničke karakteristike printera CyBe RC 3DP [22] .....	31
Tablica 5. Tehničke Karakteristike printera MudBots [23] .....	32
Tablica 6. Tehničke karakteristike printera CERAMBOT Tong [24] .....	33
Tablica 7. Tehničke karakteristike printera DELTA WASP 3MT [25] .....	34
Tablica 8. Tehničke karakteristike printera 3D MaxiPrinter [26].....	35

## LITERATURA

- <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=69979> [1]
- <https://www.opengrowth.com/resources/what-is-concrete-3d-printing> [2]
- <https://www.sg.weber/blog/saint-gobain-blog/what-3d-concrete-printing-3dcp> [3]
- <https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/47026521/795000-1.pdf> [4]
- [https://www.researchgate.net/publication/265125098\\_The\\_Reduction\\_of\\_Construction\\_Duration\\_by\\_Implementing\\_Contour\\_Crafting\\_3D\\_Printing](https://www.researchgate.net/publication/265125098_The_Reduction_of_Construction_Duration_by_Implementing_Contour_Crafting_3D_Printing) [5]
- <https://madhavuniversity.edu.in/contour-crafting.html> [6]
- [http://www.casopis-gradjevinar.hr/assets/Uploads/JCE\\_67\\_2015\\_10\\_Zanimljivosti.pdf](http://www.casopis-gradjevinar.hr/assets/Uploads/JCE_67_2015_10_Zanimljivosti.pdf) [7]
- <https://www.engineeringcivil.com/3d-printed-concrete.html> [8]
- <http://3dprintetbyggeri.dk/pdf/bes%C3%B8gsrapporter/D-Shape.pdf> [9]
- <https://cybe.eu/3d-concrete-printing/> [10]
- <https://automate.construction/2020/03/29/betabram/> [11]
- <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7084790/> [12]
- <https://www.designboom.com/technology/researchers-develop-new-injection-3d-concrete-printing-method-08-27-2021/> [13]
- <https://www.mdpi.com/2075-5309/12/4/453> [14]
- <https://cobod.com/robotic-arm-vs-gantry-3d-concrete-printer/> [15]
- <https://ceadgroup.com/large-scale-3d-printing-robot-vs-gantry-systems/> [16]
- <https://patents.google.com/patent/US20160361834A1/en> [17]
- <https://all3dp.com/2/what-is-a-delta-3d-printer-simply-explained/> [18]
- <https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/betabram-p1/> [19]
- <https://cobod.com/wp-content/uploads/2020/09/BOD2-Specifications-1.pdf> [20]
- <http://www.totalkustom.com/3d-concrete-printers.html> [21]
- [https://lybrary.cybe.eu/wp-content/uploads/dlm\\_uploads/2021/07/3D-specifications-V3.6-NC.pdf](https://lybrary.cybe.eu/wp-content/uploads/dlm_uploads/2021/07/3D-specifications-V3.6-NC.pdf) [22]
- [https://www.mudbots.com/uploads/pdf/MB\\_664\\_3PH\\_Specifications.pdf](https://www.mudbots.com/uploads/pdf/MB_664_3PH_Specifications.pdf) [23]
- <https://www.cerambot.com/product/cerambot-tong-concrete-3d-printer-for-construction/> [24]
- <https://www.3dwasp.com/en/concrete-3d-printer-delta-wasp-3mt-concrete/> [25]
- <https://top3dshop.com/product/constructions-3d-maxiprinter-3d-printer> [26]
- <https://www.adrianflux.co.uk/blog/2022/11/3d-printed-homes-pros-cons/> [27]
- <https://www.opengrowth.com/resources/what-is-concrete-3d-printing> [28]