

Primljen / Received: 22.1.2018.

Ispravljen / Corrected: 31.10.2018.

Prihvaćen / Accepted: 20.12.2018.

Dostupno online / Available online: 10.5.2020.

Analiza primjenjivosti metoda aditivne proizvodnje u građevinskim projektima

Autori:

Izv.prof.dr.sc. **Fahriye Hilal Halicioglu**, dipl.ing.arh.

Sveučilište Dokuz Eylul, Turska

Arhitektonski fakultet

Odjel za arhitekturu

hilal.halicioglu@deu.edu.tr

Autor za korespondenciju

Mr.sc. **Seckin Koralay**, dipl.ing.arh.

Sveučilište Dokuz Eylul, Turska

Fakultet prirodnih i primijenjenih znanosti

Odjel za arhitekturu

seckinkoralay@gmail.com

Pregledni rad

Fahriye Hilal Halicioglu, Seckin Koralay

Analiza primjenjivosti metoda aditivne proizvodnje u građevinskim projektima

Tehnologije aditivne proizvodnje (AM), poznate i kao sustavi 3D-ispisa, brzo dobivaju na popularnosti u građevinarstvu. Razvoj tehnologija aditivne proizvodnje u novije vrijeme pokazuje da veliki sustavi 3D-ispisa imaju značajan potencijal za potpuno automatizirano građenje. U radu se analizira primjenjivost 3D-ispisa u građevinarstvu iz aspekta primjenjivosti tehnologija aditivne proizvodnje i materijala.

Ključne riječi:

3D ispis, tehnologija aditivne proizvodnje, aditivne metode gradnje, automatizacija, građevinski projekti

Subject review

Fahriye Hilal Halicioglu, Seckin Koralay

Applicability analysis of additive manufacturing methods on construction projects

Additive manufacturing (AM) technologies, also known as 3D-printing systems, have been rapidly gaining popularity in the construction industry. Recent developments in additive manufacturing technologies indicate that large-scale 3D printing systems have significant potential for providing a fully automated construction. The applicability of 3D printing on the construction scale is analysed in the paper in terms of AM methods and materials.

Key words:

3D printing, additive manufacturing technology, additive construction methods, automation, construction projects

Übersichtsarbeit

Fahriye Hilal Halicioglu, Seckin Koralay

Analyse der Anwendbarkeit additiver Fertigungsmethoden bei Bauprojekten

Die additiven Fertigungstechnologien (AM), bekannt auch als 3-D-Druck-Systeme, werden in der Bauindustrie immer beliebter. Die Entwicklung von additiven Fertigungstechnologien zeigt in jüngster Zeit, dass große 3-D-Druck-Systeme ein erhebliches Potenzial für eine vollständige automatisierte Konstruktion haben. In der Abhandlung wird die Anwendbarkeit von 3-D-Drucken in der Bauindustrie unter dem Gesichtspunkt der Anwendbarkeit additiver Fertigungs- und Materialtechnologien analysiert.

Schlüsselwörter:

3D-Druck, additive Fertigungstechnologie, additive Baumethode, Automatisierung, Bauprojekte

1. Uvod

Izraz "automatizacija" potječe od grčke riječi "auto", što znači samodjelujući. Kad se govori o "automatizaciji građenja", to logično znači da građenje nastaje samo od sebe bez ljudske intervencije. Kako bi to opširnije opisao, Castro-Lacouture [1] "automatizaciju građenja" definira kao "tehnološki potaknutu metodu pojednostavljenja građevinskih procesa s namjerom poboljšanja sigurnosti, produktivnosti, konstrukcije, planiranja ili kontrole, koja istovremeno dionicima u projektu daje alat za brzo i točno odlučivanje."

Tehnologije automatizacije iz drugih velikih proizvodnih industrija (automobilska, zrakoplovna, brodogradnja itd.) počele su se okretati prema građevinskoj industriji početkom 20. stoljeća pojavom sustava masovne proizvodnje [2]. U početku se proizvodnja građevinskih elemenata usmjerila na predgotovljene komponente koje se montiraju na gradilištu. Međutim, u tom je pristupu razina automatizacije ostala ograničena na proizvodnju izvan gradilišta, a postupak montaže i dalje su izvodili uglavnom ljudi. Automatizacija građenja na gradilištu prvi put se pojavila primjenom robotike u Japanu 1970-ih godina, s ulaganjima skupine velikih građevinskih tvrtki nazvanih "Big Five"/Velika petorka/ (Shimizu, Taisei, Kajima, Obayashi i Takenaka). Napredak je uglavnom započeo zbog starenja stanovništva, a potom zbog činjenice što su mlađe generacije građevinske radove smatrale neprivačnima, teškima, prljavim i opasnim [3]. Iz tih su se razloga razvila dva glavna pristupa. Prvo, razvijeni su "roboti specijalizirani za pojedinačne građevinske radove" kako bi zamijenili radnike na gradilištu izvršavajući vrlo specifične zadatke poput bojanja, gletanja i postavljanja keramičkih pločica. Drugo, robotski sustavi su dodatno poboljšani kroz "sustave automatizacije u gradnji" kojima je cilj potpuna automatizacija procesa na način da koordiniraju različite podsustave robota specijaliziranih za pojedinačne građevinske radove. Glavni fokus ovih dvaju koncepata je automatizirano sastavljanje predgotovljenih građevinskih elemenata na gradilištu. Bez obzira na navedeno, čitav robotski proces još uvijek predstavlja repliku uobičajenog kompliciranog ljudskog radnog lanca. Osim toga, ovisnost o predgotovljenim elementima donosi i svoje nedostatke, poput potrebe za specijaliziranom proizvodnom mrežom izvan gradilišta za standardizirane (jednolike) elemente [4]. U ovom trenutku, aditivna proizvodnja (eng. *additive manufacturing* - AM) ima određene dodatne aspekte i potencijal da bude podrška automatizaciji građenja s obzirom na to što aditivna proizvodnja može na učinkovit način omogućiti robotsku proizvodnju prilagođenih građevinskih elemenata izravno iz sirovina [5].

AM tehnologije pojavile su se 1980-ih [6]. Charles Hull [7] je razvio prvi AM stroj nazvan stereolitografija kao zamjenu za tehniku injekcijskog lijevanja (metoda izrade pomoću kalupa), koju je primijenio za izradu metalnih dijelova. Ta je tehnika oblikovanja bila skupa i dugotrajna jer je zahtijevala oblikovanje novog kalupa za svaki drugačiji dio [8]. Njegov novi sustav oslanjao se na automatizirano očvršćivanje tekućine osjetljive

na UV, koja oblikuje 3D predmet gradeći svaki poprečni presjek geometrije sloj po sloj, tako da je mogao proizvesti dijelove bez potrebe za kalupom. Godine 1984. Hull je patentirao svoj izum pod nazivom "Uređaj za proizvodnju trodimenzionalnih predmeta stereolitografijom" i tehnologiju opisao kao "brzu, pouzdanu, preciznu i ekonomičnu" [7]. Nakon toga, s razvojem naprednijih sustava, AM tehnologija sve je više obećavala i postala je poželjnija u odnosu na druge tehnike. Campbell i sur. [9] naveli su nekoliko razloga zbog kojih treba primjenjivati AM tehnologiju: sposobnost ispunjavanja zahtjeva prilagođenih korisniku, poboljšana funkcionalnost, integracija dijelova i estetika. Osim toga, ona ima širok spektar mogućih materijala za korištenje [10] i ne stvara otpadne materijale, poput suptraktivnih metoda koje predmete oblikuju rezanjem, savijanjem, bušenjem itd. [11]. Noviji razvoj AM tehnologija pokazuje da veliki sustavi 3D-ispisa imaju veliki potencijal pružanja potpuno automatizirane izgradnje. U ovom radu istražena je mogućnost primjene 3D-ispisa u građevinskim projektima u smislu primjene AM metoda i materijala.

2. Aditivna proizvodnja: definicija i svojstva procesa

Od izuma prvih sustava za proizvodnju tehnikom "sloj po sloj" korišteni su različiti nazivi za njih, a neki stariji pojmovi koji se upotrebljavaju za imenovanje tehnologije jesu aditivna izrada, aditivni postupci, aditivne tehnike, aditivna proizvodnja slojeva, proizvodnja slojeva, izrada čvrstih slobodnih formi i izrada slobodnih formi. Međutim, "trodimenzionalni ispis (3D-ispis)" i "aditivna proizvodnja (AM)" zasad su najprihvaćeniji i koriste se kao sinonimi. Dok se izraz "3D-ispis" komercijalno popularizira i koristi u široj javnosti, "aditivna proizvodnja" je prije tehnički izraz koji su prihvatile prerađivačke industrije i organizacije za standardizaciju, kao što su ISO i ASTM [9, 12].

Za objašnjenje o tome što je točno AM tehnologija, u literaturi se mogu pronaći različite definicije. One se uglavnom temelje na općem postupku koji bi mogao uključivati sve vrste sadašnjih metoda ispisa. Može se očekivati da će današnje definicije biti ponešto promijenjene u skoroj budućnosti kad se razvijaju novi pristupi.

Prema definiciji koju je dao Bogue [10], "tehnologija 3D-ispisa je automatizirani, aditivni proces proizvodnje za proizvodnju 3D čvrstih predmeta iz digitalnog (tj. CAD) modela". Izraz "3D-ispis" odnosi se na način stvaranja stvrdnutog materijala, sukcesivno sloj po sloj, čime se omogućava ispis predmeta izvan dvodimenzionalnih primjena [6].

ISO / ASTM 52900: 2015 [12], razvijen kao zajednički skup normi za AM, spajanjem ISO / TC 261 i ASTM F42, opisuje opća načela AM i pripadajuću terminologiju. Prema ovom obrascu, AM je "proces spajanja materijala za izradu dijelova iz trodimenzionalnog računalnog dizajna, obično sloj po sloj, za razliku od metodologija suptraktivnog (oduzimanog) oblikovanja i oblikovanja pomoću kalupa." 3D-ispis ne smije se miješati sa suptraktivnim proizvodima i proizvodima oblikovanim pomoću



Slika 1. Shematska usporedba (lijevo) suptraktivnih, (sredina) lijevanih i (desno) aditivnih metoda proizvodnje [13]

kalupa koji su također metode za stvaranje trodimenzionalnog fizičkog predmeta (slika 1.). U suptraktivnoj metodi, predmet se stvara uklanjanjem materijala bušenjem, mljevenjem, brušenjem za razliku od aditivne proizvodnje. U proizvodnji pomoću kalupa predmet se stvara lijevanjem materijala u odljev ili kalup. Na temelju navedenih definicija, glavne karakteristike AM procesa mogu se navesti kako slijedi:

Faza I: Svojstva vezana za fazu virtualne proizvodnje

- *Svojstvo I (digitalno kreirani podaci instruktivnog virtualnog modela):* svi podaci koji se odnose na krajnji proizvod u početku se pohranjuju kao virtualni prikaz u obliku niza primarnih jedinica koje stvaraju jezik informacija. Za digitalnu datoteku te primarne jedinice su binarni brojevi, 0 i 1. Informacije u osnovi sadrže podatke o 3D geometriji. Dodatno, oni mogu sadržavati i informacije o materijalima, bojama, proizvodnom procesu itd.
- *Svojstvo II (generirano računalnim uređajima):* računala mogu automatizirati neke korake procesa poput generiranja parametarske geometrije, stvaranja teksture, postavljanja uputa. Unatoč tomu, za sada je uglavnom ljudski um taj koji odlučuje, oblikuje i kontrolira model. Dakle, automatizacija cijelog procesa je ograničena i malo je vjerojatno da će biti u potpunosti automatizirana sve dok ne postane moguće korištenje napredne umjetne inteligencije umjesto ljudskog rasuđivanja.

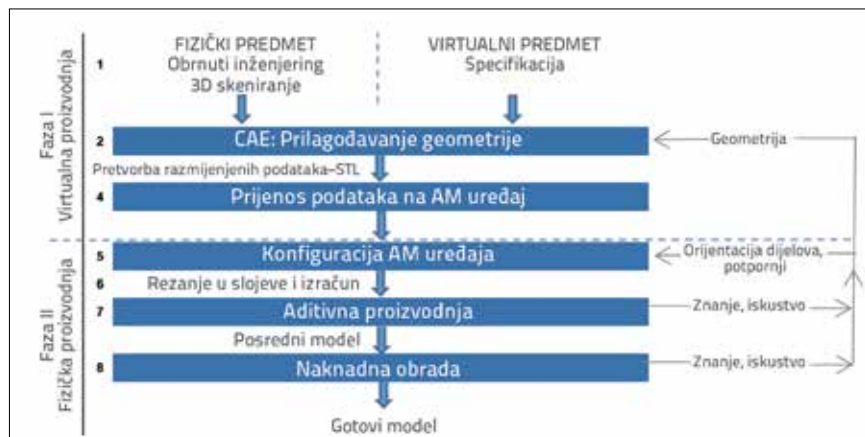
Faza II: Svojstva vezana za fazu fizičke proizvodnje

- *Svojstvo III (aditivno proizveden fizički proizvod):* fizički proizvod nastaje na aditivan način slijedeći unaprijed određeni obrazac za izradu 3D predmeta. Može se koristiti jedna ili više vrsta materijala, s različitim mogućim oblicima i fazama, dodavanjem određene količine svaki put tijekom postupka.
- *Svojstvo IV (automatizirano robotskim vozilima):* proces aditivne proizvodnje provodi oprema koja djeluje samostalno i zahtijeva minimalnu ili nikakvu ljudsku intervenciju. Roboti za ispis uglavnom slijede upute definirane u virtualnim podacima.

Iako se AM tehnologije razlikuju prema različitim namjenama i potrebama, osnovne značajke postupka vrlo su slične. Gardan [14] opisuje generički AM proces nazvan "AM inženjering i

proizvodni ciklus", uključujući osam glavnih koraka (također prikazano na slici 2.):

- *Stvaranje geometrije virtualnog modela:* model je dizajniran ili u CAD računalnom programu ili je dobiven 3D skeniranjem fizičkog modela (obrnuti inženjering). Neki od mogućih formata datoteka su dwg, 3ds, c4d, blend i skp. Navedene datoteke sadrže podatke o 3D geometriji.
- *Prilagođavanje geometrije virtualnog modela:* analiziranje, modificiranje i optimiranje početnog virtualnog modela kako bi se prilagodio za proizvodnju. Virtualna geometrija trebala bi biti usklađena sa zakonima fizike u stvarnom svijetu te udovoljavati zahtjevima učinkovitosti.
- *Stvaranje posrednog (intermedijarnog) virtualnog modela:* virtualna geometrija pretvara se u format datoteke 3D-ispisa koji se može koristiti na bilo kojem uređaju i metodi. Neki od mogućih formata datoteka su STL (datoteka stereolitografije), VRML (jezik za modeliranje virtualne stvarnosti) i AMF (datoteka za aditivnu proizvodnju) [15]. STL je najučestaliji format, ali omogućuje samo jednoboje proizvode i ima ograničene mogućnosti. Stoga je format AMF uglavnom međunarodni standard jer sadrži dimenzijske jedinice, materijale, boje i neke druge značajke [16]. AMF je također prihvaćen od strane ISO / ASTM.
- *Prijenos podataka posrednog modela:* datoteka 3D-ispisa prenosi se u integrirani računalni program AM uređaja.
- *Priprema AM uređaja za ispis:* stroj se konfigurira, provjeravaju se materijali i pozicioniranje opreme. Postavljaju se potpornji i skele kako bi se izbjeglo urušavanje geometrije tijekom procesa 3D-ispisa.
- *Generiranje virtualnog modela proizvodnje:* integrirani računalni program uređaja za 3D-ispis pretvara posrednu datoteku u vlastiti specifični format datoteke koji obično patentira proizvođač pisaača. Ova nova datoteka sadrži sve podatke o tome kako će se postupak izvoditi, poput "koji su slojevi i njihove debljine", "u kojem će trenutku pisaač početi proizvoditi" i "koji će put ispisa slijediti pisaač".
- *Proizvodnja:* virtualni model proizvodi se fizički, sloj po sloj prateći put naveden u podacima modela. Ovaj je postupak obično u potpunosti automatiziran.
- *Naknadna obrada:* Ako je potrebno, proizvod se može dalje obrađivati. Neke od mogućih obrada su otvrdnjavanje, infiltracija, bojanje i poliranje.



Slika 2. Osam glavnih koraka AM procesa prilagođeno iz Gardanova AM inženjerskog i proizvodnog ciklusa [14]

2.1. Metode primjenjene u aditivnoj proizvodnji (AM)

AM tehnologije uglavnom su namijenjene automatiziranom "krojenju" i proizvodnji malih količina, gdje je masovna proizvodnja nedostatna. Bivši sustavi bili su veličine stolnog računala i uglavnom su se koristili u svrhe kao što su izrada modela (koncepta), brza izrada prototipova, brza strojna obrada i proizvodnja zamjenskih dijelova. Od pojave ranih sustava ispisa u 1980-ima [15] nastale su brojne AM metode. Kao što je poznato, patenti daju vrijedne informacije o tehnološkom razvoju. Stoga je u ovom radu dan pregled sadašnjih patenata vezanih uz AM kako bi se bolje razumjele AM metode. Važniji patenti koji se odnose na AM tehnologije daju se ovdje kronološkim redoslijedom:

- 1984. godine Charles Hull, osnivač tvrtke 3D Systems, patentirao je stereolitografiju (pojam 'stereolitografija' potječe od grčke riječi stereos (čvrsto), lithos (kamen) i graphia (pisanje), što znači 'pisanje čvrstim kamenom'), stroj koji koristi tekući fotoosjetljivi polimer u komori. Tekući polimer očvršćuje se pod utjecajem snopa UV zraka koji skenira svaki presjek željenog proizvoda [7].
- 1986. godine drugu AM tehniku patentirao je Carl Deckard pod nazivom "uređaj za proizvodnju dijelova selektivnim sinteriranjem". Ova metoda temelji se na selektivnom sinteriranju slojeva praha laserskim snopom. Za svaki sloj, praškasti materijal (metalni, polimerni, keramički ili kompozitni prah) raspoređuje se u tankom sloju, a zatim se skenira laserom [17].
- 1988. godine metodu "proizvodnje laminiranih objekata" patentirala je tvrtka Helisys Corp. Za ovaj sustav tanki se listovi materijala (folije) dovode na stol, a laserskim snopom se izrezuje kontura presjeka [18]. Unutarnji dio kontura presjeka se slaže i spaja ljepilom, a vanjski dijelovi se ostavljaju kao otpad. Druga metoda nazvana "ultrazvučno očvršćivanje predmeta", koju je patentirao Solidica 1999. godine, također koristi materijal u listovima. U toj se metodi listovi režu raznim alatima (noževi, strojevi za bušenje ili glodanje, laserski rezni snopovi ili ultrazvučni alat za rezanje) ovisno o odabranom materijalu (metali i plastika), a zatim se lijepe ultrazvučnim vibracijama i tlakom [19].

- 1989. godine Scott Crump je patentirao tehniku taložnog očvršćivanja (eng. *fused deposition modelling* - FDM) u tvrtki Stratasys Company. Pomična glava služi za nanošenje i taloženje/slaganje materijala u viskoznom stanju (bilo kojeg materijala koji ima sposobnost samoočvršćivanja i samovezivanja na prethodni sloj, poput samoočvršćujućih voskova, termoplastičnih smola, rastaljenih metala, dvodijelnih epoksida, pjenaste plastike i stakla) na unaprijed definiranu visinu i debljinu [20]. Jedinstvena je značajka ove metode u tome što ona nije ograničena na planarne presjeke, jer može ispisivati u bilo kojem smjeru.

- 1989. godine na Tehnološkom institutu Massachusetts (eng.

Massachusetts Institute of Technology, MIT) patentirana je još jedna tehnika. Ona primjenjuje sustav unosa praškastog materijala sličan selektivnom sinteriranju. Međutim, ovdje se prah (keramika, metal, polimer ili kompozit) veže tekućim vezivom koje se selektivno nanosi/taloži pomoću *ink-jet* mlaznica [21]. Na temelju MIT-ove tehnologije, ZCorp je dalje razvila ovu metodu i plasirala AM strojeve koji su označeni kao "3D-pisači" [22, 23]. Komercijalni uspjeh proizvoda razlog je zašto je "3D-ispis" sinonim za AM.

- 1991. godine Solidscape je patentirao "3-D izrađivač modela" koji djeluje na način vrlo sličan 2D sustavu ispisa. Materijal u tekućoj fazi se nanosi iz *ink-jet* mlaznica kap po kap na dvodimenzionalnu ravninu. Sloj se zagrijava za brzo očvršćivanje, a zatim se na njega slaže drugi sloj [24]. Ova je tehnika slična ranijoj metodi koja se naziva balističko oblikovanje [25], a koja je postigla slab komercijalni uspjeh.
- 1993. godine Arcam je patentirao metodu "taljenje elektronskim snopom". Kao poboljšana inačica selektivnog sinteriranja, ova metoda u potpunosti tali metalni prah pomoću elektronskog snopa kako bi se stvorile visokokvalitetne, izdržljive metalne komponente [26]. 1996. godine sličan sustav, koji radi s visokoenergetskim laserskim snopom, razvili su Meiners i sur. [27] pod nazivom patenta "selektivno lasersko sinteriranje na temperaturi taljenja".
- 1999. godine Nacionalno vijeće za istraživanje u Kanadi (eng. *National Research Council of Canada*) patentiralo je metodu laserskog učvršćivanja. Ova metoda kombinira dozator praškastog materijala s visokoenergetskim laserskim snopom. Prah se tali laserom kako bi se stvorili slojevi [28]. Slične metode kasnije su izumili Frank Carbone: sustav "taloženje usmjerenim izvorom energije" 2004. godine [29], a Scott Stecker je 2009. izumio "proizvodnju slojeva elektronskim snopom" [30].
- 2013. godine Carbon Inc. patentirala je metodu "kontinuirani tekući međufazni ispis". Ta metoda koristi fotopolimerizaciju kao u stereolitografiji. Veliko je poboljšanje to što je namijenjena masovnoj proizvodnji jer slojevito i kontinuirano skenira presjeke [31].

Prema dostupnoj literaturi nekoliko je klasifikacija AM metoda. Klasifikacije se uglavnom temelje na "koraku 7 - proizvodnji fizičkog predmeta sloj po sloj" spomenutog općenitog AM postupka, koji je prikazan na slici 2. Treba napomenuti da pravilna klasifikacija svih sadašnjih AM tehnologija može biti vrlo izazovan zadatak, jer se one mogu razlikovati i preklapati u različitim aspektima. Kako je prikazano u tablici 1., u literaturi postoje tri glavne klasifikacije AM tehnologija:

- Guo & Leu klasifikacija zasnovana na materijalima
- klasifikacija temeljena na Gardanovoj metodi
- klasifikacija prema normi ISO/ASTM 52900: 2015.

U ovom istraživanju, AM metode ispitane su prema klasifikaciji predstavljenoj u ISO / ASTM normi, kako je prikazano u tablici 1. U nastavku su dana objašnjenja sedam AM metoda:

- laminiranje listova (eng. *sheet lamination* - SL)
- foto-polimerizacija u komori (eng. *vat photo-polymerization* - VP)
- spajanje (srašćivanje) praškastog materijala u slojevima (eng. *powder bed fusion* - PBF)
- raspršivanje veziva (eng. *binder jetting* - BJ)
- raspršivanje materijala (eng. *material jetting* - MJ)
- ekstrudiranje materijala (eng. *material extrusion* - ME)

- taloženje usmjerenim izvorom energije (eng. *directed energy deposition* - DED).

Ilustracije procesa za svaku od ovih sedam metoda prikazane su na slikama 3., 4. i 5. Prednosti i nedostaci navedenih AM metoda dani su u tablici 2., a njihova je usporedba prema osnovnim resursima i proizvodnom postupku prikazana u tablici 3.

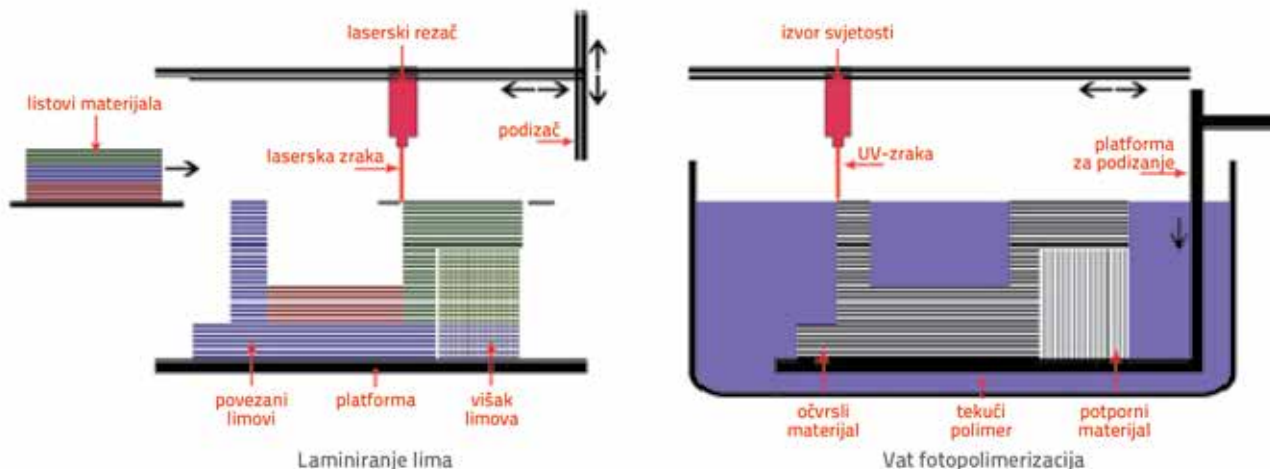
Laminiranje listova (SL) (slika 3.): ova metoda koristi čvrste ravne materijale (najčešće papir, metal i plastiku) [33]. Listovi se selektivno (laserom ili oštrim nožem) izrezuju prema zadanoj konturi i povezuju sloj po sloj (lijepljenjem, ultrazvučnim zavarivanjem itd.) [12, 16].

Fotopolimerizacija u komori (VP) (slika 3.): ova metoda koristi tekuće fotoosjetljive polimere nazvane fotopolimeri koji se očvršćuju pod utjecajem elektromagnetskog zračenja (npr. gama-zraka, X-zraka, elektronskog snopa, UV zračenja, a ponekad i vidljivog svjetla) [16, 33]. Drugi sinonim za tehniku je "fotoočvršćivanje", jer je to postupak fotopolimerizacije sloj-po-sloj. Postupak se izvodi selektivnim skeniranjem tekućine u komori izvorom elektromagnetskog zračenja (eng. *electromagnetic radiation* - EMR) kako bi se stvorio pojedini presjek [12].

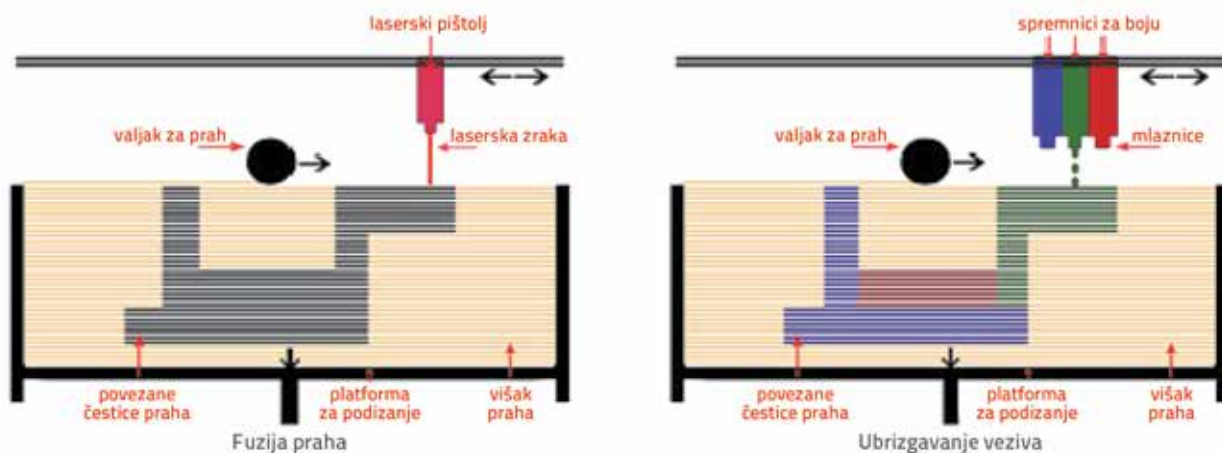
Spajanje (srašćivanje) praškastog materijala u slojevima (PBF) (slika 4.): ova metoda može koristiti bilo koje vrste granuliranog materijala, poput praha metala, plastike,

Tablica 1. Klasifikacija AM metoda primjenjenih u AM tehnologijama

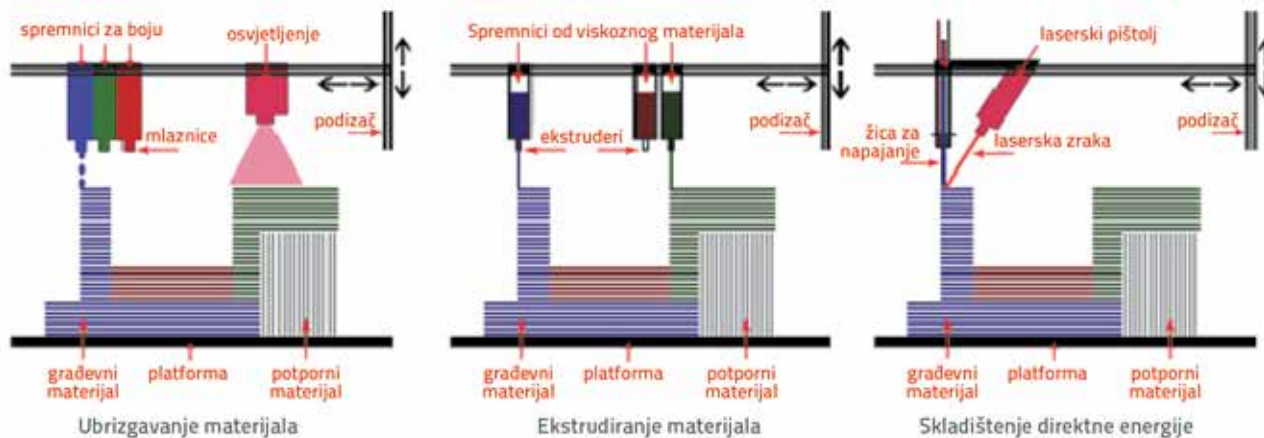
AM TEHNOLOGIJE	KLASIFIKACIJA		
	Guo & Leu klasifikacija na bazi materijala [32]: Klasificira AM tehnike prema početnom stanju izvornog materijala i razvrstava ih u četiri kategorije.	Klasifikacija bazirana na Gardanovoj metodi [14]: Klasificira tehnike prema tome kako se izvorni materijal obrađuje u pet kategorija.	Klasifikacija prema međunarodnoj normi ISO/ASTM 52900: 2015 [12]: Klasificira i izvorni materijal i proces u sedam kategorija
Izrada laminiranih predmeta, ultrazvučno očvršćivanje predmeta	Kruti list	Tehnika laminiranja - rezanja	Laminiranje listova
Snimanje prijenosom filma (digitalna obrada svjetla), proizvodnja kontinuiranim tekućim povezivanjem, očvršćivanje na krutoj površini	Tekućina	Tehnika bljeska	Fotopolimerizacija u komori
Stereolitografija	Tekućina	Laserska tehnika	Fotopolimerizacija u komori
Selektivno lasersko sinteriranje, SL taljenje, taljenje elektronskim snopovima, izravno lasersko sinteriranje metala	Prah	Laserska tehnika	Fuzija sloja praha
Trodimenzionalni ispis, Prometal	Prah	Tehnika mlaza	Raspršivanje veziva
Višemlazno modeliranje, izrada prototipa brzog smrzavanja, raspršivanje tekućih metala, balističko oblikovanje	Prah	Tehnika mlaza	Raspršivanje materijala
Taložno očvršćivanje, robotizirano lijevanje, ekstruzijska proizvodnja u obliku zamrzavanja, taložno očvršćivanje gustih masa, 3D-ispis stakla	Niti/Pasta	Tehnika ekstrudiranja	Ekstrudiranje materijala
Lasersko taloženje metala, lasersko mrežno oblikovanje, izrada slobodnih formi elektronskom zrakom, lasersko očvršćivanje	Prah	Tehnika ekstrudiranja	Taloženje usmjerenim izvorom energije



Slika 3. Prikazi oglednih postupaka: SL - laminiranje listova (lijevo), VP - fotopolimerizacija u komori (desno)



Slika 4. Prikazi oglednih postupaka: PBF - spajanje praškastog materijala u slojevima (lijevo), BJ - raspršivanje veziva (desno)



Slika 5. Prikazi oglednih postupaka: MJ - raspršivanje materijala (lijevo), ME - ekstrudiranje materijala (sredina), DED - taloženje usmjerenim izvorom energije (desno)

Tablica 2. Prednosti i nedostaci AM metoda [12, 16, 33]

AM metode	Prednosti	Nedostaci
SL	Postupak ispisa je relativno brz jer se poprečni presjeci stvaraju rezanjem kontura. Materijali su jeftini i jednostavni za rukovanje.	Raspon materijala je ograničen jer koristi samo materijale u listovima. Strukturna svojstva mogu biti loša ovisno o načinu lijepljenja.
VP	Rezolucija proizvoda je vrlo velika što omogućuje glatke površine. Proces je relativno brz.	Materijali su vrlo ograničeni i skupi, što proces čini relativno skupim. Tijekom proizvodnje mogu biti potrebni potporni elementi.
PBF	Na raspolaganju je širok spektar materijala. Tijekom postupka nisu potrebni nikakvi potporni elementi jer okolni prah podržava ispisane slojeve. Kako je postupak samopotporan, lako se mogu kreirati složene geometrije.	Rezolucija proizvoda može biti loša, ovisno o veličini zrna praha. Proces troši dosta energije i relativno je spor.
BJ	Može se koristiti širok spektar materijala (metali, plastika, keramika, kompoziti). Proces je relativno brz i isplativ. Nisu potrebni potporni elementi, a lako se mogu kreirati složene geometrije. Tekuće vezivo povećava raznolikost, jer različite kombinacije praha i veziva mogu pružiti različite vrste sastava, različitih boja i svojstava. Također, mlaznica za ispis je podesiva.	Rezolucija proizvoda može biti loša, ovisno o veličini zrna praha. Važan nedostatak je to što spajanje tekućim vezivom stvara porozan sastav s lošim strukturnim svojstvima, pa je potrebna dodatna naknadna obrada za poboljšanje čvrstoće što zahtijeva više vremena i novca.
MJ	Postupak ispisa je brz i jeftin. Preciznost ispisa je dobra, ali niža od laserskih metoda, posebno za velike ispise. Također su mogući različiti sastavi za ispis pomoću više mlaznica i materijala. Mlaznica za ispis je podesiva.	Raspon materijala zasada je vrlo ograničen, jer se koriste samo polimeri i voskovi. Obično su potrebni potporni elementi.
ME	Postupak je jeftin. Raspon materijala je vrlo širok. Mlaznica za ispis je podesiva.	Ograničavajući faktor je polumjer mlaznice. Ako je polumjer veći, rezolucija je manja. Ako je polumjer manji, brzina ispisa je manja. Za složene geometrije potrebni su potporni elementi.
DED	Mogućnost kontrole mikrostrukture područja ispisa vrlo je velika. Također, ispis nije ograničen na homogeni rezultat; različiti sastavi mogu se dobiti promjenom materijala i parametara snopa.	Raspon materijala je ograničen. Također, polumjer snopa je ograničavajući faktor. Ako je polumjer veći, rezolucija je manja. Ako je polumjer manji, brzina ispisa je manja. Proces troši puno energije.

Tablica 3. Usporedba AM metoda prema "osnovnim resursima" i "proizvodnom procesu"

AM metode	Osnovni resurs (Stanje materijala i karakteristični materijali)	Proizvodni proces (Način polaganja slojeva i vezivna sredstva)
SL	Čvrsti listovi papira, metala, plastike itd.	Umetanje lista i oblikovanje (laser/nož) i laminiranje (ljepilo/zavarivanje)
VP	Tekućine fotoosjetljivih polimera	Fotopolimerizacija s EMR skeniranjem
PBF	Prah metala, keramike, polimera, kompozita	Polaganje materijala u slojeve valjkom s prahom i sraščivanje/taljene pomoću EMR grijača ili glave za grijanje
BJ	Prah metala, keramike, polimera, kompozita	Polaganje materijala u slojeve valjkom s prahom i taloženje ljepila <i>ink-jet</i> mlaznicama
MJ	Svaka tekućina koja se lako očvršćuje (obično smole i voskovi)	Taloženje materijala <i>ink-jet</i> mlaznicama i očvršćivanje
ME	Svaki samoočvršćujući viskozni ili rastaljeni materijali	Taloženje materijala mlaznicama za ekstrudiranje
DED	Svaki praškasti materijal ili žica (obično metali)	Taloženje materijala dozatorom i sinteriranje/taljenje pomoću EMR grijača

keramike i kompozita. Postupak se izvodi unutar praškastog sloja [16]. Za svaki poprečni presjek, materijal se nanosi na podložak u tankom sloju, a zatim se selektivno sinterira ili topi visokoenergetskim izvorom EMR-a (uglavnom laserom ili elektronskim snopom) koji osigurava toplinsku energiju potrebnu za spajanje granula [12, 33].

Raspršivanje veziva (BJ) (slika 4.): ova je metoda slična PBF metodi. Postupak se izvodi unutar praškastog sloja te se i ovdje može koristiti bilo koja vrsta praha. Razlika je u tome što BJ spaja granulirani materijal kemijskim vezivnim sredstvom [12]. Kapi tekućega veziva selektivno se nanose pomoću *ink-jet* mlaznica na sloj praha kako bi se oblikovao poprečni presjek [16, 33].

Raspršivanje materijala (M) (slika 5.): ova metoda upotrebljava tekuće tvari koje lako očvršćuju (obično smole i voskove) na način sličan *ink-jet* 2D ispisu [16]. Postupak se izvodi selektivnim taloženjem kapljica iz mlaznica sloj na sloj [12, 33]. Nakon taloženja kapljica, može se primijeniti dodatna faza (poput hlađenja ili foto-polimerizacije) za brže i kontrolirano očvršćivanje.

Ekstrudiranje materijala (ME) (slika 5.): ova metoda može koristiti bilo koji materijal u viskoznom stanju ili koji je rastaljen u viskozno stanje [16]. Postupak se izvodi selektivnim taloženjem

samo-očvršćivog viskoznog materijala kroz kalup pod stalnim tlakom [12, 33].

Taloženje usmjerenim izvorom energije (DED) (slika 5.): ova metoda koristi granulirane materijale ili vlakna (obično metalni prah i žice) koji se lako zagrijevaju i kontroliraju [16]. Postupak se izvodi selektivnim srašćivanjem materijala odmah nakon njegova taloženja taljenjem "usmjerenom toplinskom energijom" npr. laserom, elektronskim snopom ili lukom plazme [12, 33]. Metoda se uglavnom primjenjuje na postojećem predmetu u svrhu njegova popravka ili poboljšanja [16].

Tablica 4. Neke bitne primjene AC u građevinskoj industriji

Primjene AC	Definicija
Minibuilders (Španjolska)	Mini mobilni roboti za ekstrudiranje betona koji su razvijeni u Institutu za primijenjenu arhitekturu Katalonije (eng. <i>Institute of Advanced Architecture of Catalonia</i>) 2013. godine.
3D Concrete Printing (Nizozemska)	Sustav nosača za ekstrudiranje betona koji je adaptiran s „izradom kontura“ (eng. <i>contour crafting</i>) u Sveučilištu Eindhoven.
Totalkustom (SAD)	Sustav nosača za ekstrudiranje betona Stroybot kojim je ispisan mali dvorac (2014.) i hotelski apartman od 130 m ² na Filipinima (2015.)
Winsun (Kina)	Sustav nosača za ekstrudiranje betona kojim je ispisan 10 malih kuća 2014. godine, palača i peterokatnica u Kini (2015.), kao i uredska zgrada u Dubaiju (2016.)
Apis Cor (Rusija)	Polarna robotska ruka za ekstruziju betona kojom je ispisan kuća od 38 m ² u Moskvi (2017.)
XtreeE (Francuska)	Robotska ruka za ekstruziju betona kojom su 2017. godine ispisan neki elementi (zidovi i stupovi) YRYS Concept House.
3DPrinthuset (Danska)	Sustav nosača za ekstrudiranje betona nazvan „gradnja na zahtjev“ (eng. <i>building on demand</i> , BOD) kojim je ispisan mali uredski hotel u Kopenhagenu (2017.)
CyBe Construction (Nizozemska, Italija)	Mobilna robotska ruka (na kotačima) za ekstrudiranje betona kojom je ispisan laboratorij R & Drone u Dubaiju (2017.), kuća od 100 m ² u Milanu (2018.) i nogostup u Nizozemskoj (2018.)
Cazza Construction (SAD)	Mobilna robotska ruka za ekstrudiranje betona (na kotačima).
Betabram (Slovenija)	Sustav nosača za istiskivanje betona
Batiprint (Francuska)	Batiprint3D robotska ruka koja istiskuje tri sloja zida (dva sloja izolacijskog poliuretana kao oplata i betonski sloj u sredini). Ovim sustavom ispisan je kuća od 95 m ² u Nantesu (2018.)
Imprimere AC (Švicarska)	Sustav nosača za istiskivanje betona
WASP (Italija)	Sustav nosača za ekstrudiranje betona nazvan BigDelta koji je dizajniran za ispis s lokalnim materijalima (poput mješavina gline i slame) i cementima.
Constructions-3D (Francuska)	Mobilna (na kotačima) robotska ruka za ekstrudiranje betona.
DUS Architects (Nizozemska)	Kabinski pisač za ekstrudiranje plastike pod nazivom KamerMaker kojim je ispisan Canal House (kuća na kanalu) u Amsterdamu.
MX3D (Nizozemska)	Mobilna (na kotačima) robotska ruka za aditivno zavarivanje koja koristi metale poput čelika, nehrđajućeg čelika, aluminija, bronce ili bakra. Ovim sustavom je ispisan most u Amsterdamu.
ETH 3D Sand Printer (Švicarska)	Veliki sustav za raspršivanje veziva koji ispisuje kalupe iz pješčanog materijala. Potom se kalupi pune prskanjem cementnog materijala. Sustavom su ispisan dijelovi stropa DFAB kuće u 2018. godini.
FreeFAB Wax (Australija)	Robotska ruka koja ekstrudira plastični vosak kako bi se izradili kalupi za betonske panele. Vosak se može rastaliti i ponovo upotrijebiti za drugi ispis.
Emerging Objects	Neovisna istraživačka skupina koja eksperimentira s različitim praškastim materijalima poput gline, soli, cementa i plastike. Sustavom za raspršivanje veziva praškasti se materijali vezuju za izradu arhitektonskih objekata.
Branch Technology/C-Fab (SAD)	Robotska ruka koja ekstrudira plastičnu mrežu, a koja se može koristiti kao samostalna konstrukcija ili kao armaturna mreža betonske konstrukcije. Ovim sustavom ispisan je 6,1 m visoka konstrukcija paviljona u Nashvilleu.
Digital Construction Platform (SAD)	Robotska ruka na kotačima koja može ekstrudirati izolacijske oplate od polimera.
Arup slučaj	Prilagođeni jedinstveni čelični čvor razvijen je i ispisan PBF sustavom na nosaču.
Skanska slučaj (UK)	Polimerni element obloge složene geometrije ispisan PBF sustavom na nosaču za zgradu Bevis Marks.

2.2. Metode aditivne proizvodnje (AM) u graditeljstvu

S vremenom su se početne primitivne AM metode razvile u pouzdane tehnologije koje mogu proizvesti potpuno funkcionalne komponente od više različitih materijala. Osim poboljšanja u preciznosti, brzini i kvaliteti ispisa, veličina ispisa još je jedan aspekt napretka. Metode ispisa velikih razmjera u osnovi su povećane verzije metoda ispisa stolnog računala, a to povećavanje veličine nužno je za industrije poput graditeljstva. Za područje graditeljstva u literaturi se nalaze različiti izrazi koji se odnose na AM. Ispis predmeta obujma većeg od otprilike jednog kubičnog metra naziva se "AM velikih razmjera" [18] ili popularno kao "3D-ispis velikih razmjera".

Graditeljstvo je ustvari proces izgradnje velikih građevina i stoga se može povezati s AM velikih razmjera. Štoviše, neki se pojmovi upotrebljavaju posebno za graditeljstvo. Neki od njih su aditivna izgradnja, 3D-ispis građevinskih razmjera, 3D-ispis građevina i aditivna proizvodnja na razini građevinskog projekta. Iako ne postoji konsenzus o tome koji od njih treba koristiti, u ovom radu preferira se izraz "aditivna izgradnja (eng. *additive construction, AC*)" kad se odnosi na područje graditeljstva. Glavni patenti za AC i njihove glavne značajke prikazuju se ovdje [34, 35]:

- 1995. godine Behrokh Khoshnevis patentirao je prvu AM metodu na razini građevinskog projekta nazvanu "izrada

kontura" (eng. *contour crafting - CC*) na Sveučilištu Južna Kalifornija. Sustav je ovješten na nosač/kran i istiskuje viskozni materijal (po mogućnosti cementni) kroz mlaznicu za nanošenje nakon čega se lopaticom (špahtlom) oblikuje sloj [36]. Taj sustav može vrlo brzo ispisati vertikalne elemente velikih dimenzija. Sustav je financirala NASA za ispis izvanzemaljskih baza.

- 2005. godine Enrico Dini, osnivač tvrtke D-Shape, patentirao je metodu sličnu onoj koju je predložio ZCorps. Granulirani materijal se raspršuje u zatvorenoj strukturi i svaki se sloj selektivno veže epoksidnim vezivom koje se nanosi mlaznicama ovještenima na nosač [37]. 2007. godine Dini je patentirao metodu u kojoj je iz ekoloških i mehaničkih razloga zamijenio epoksidno vezivo anorganskim vezivima na bazi magnezija [38]. Metoda D-Shape može oblikovati monolitne konstrukcije bilo koje složene geometrije slične kamenu. Sustav je predstavljen 2008. godine ispisom paviljona Radiolaria. Također, ispisan je pješački most za Madrid u 2016. godini. D-Shape je testirala Europska svemirska agencija za ispis lunarnih baza.
- 2011. godine skupina istraživača na čelu s Richardom Buswellom sa Sveučilišta Loughborough, patentirala je sustav "ispis betonom" (eng. *concrete printing*) koji je vrlo sličan FDM-u čiji je patent istekao 2009. Ova metoda podrazumijeva

Tablica 5. Glavne karakteristike primjena AC u građevinskoj industriji s aspekta AM metoda, materijala za ispis, mehanizma ispisa i vrste proizvoda [41-46]

AM metoda	AC primjene	Materijal za ispis	Mehanizam ispisa	Uobičajeni proizvodi ispisa
SL	-	-	-	-
VP	-	-	-	-
PBF	Arup slučaj	Metalni prah	kran/nosač	Konstrukcijski dijelovi
	Skanska slučaj	Polimerni prah		Dijelovi obloga
BJ	ETH 3D Sand Printer	Prah lokalnog terena	kran/nosač	Kalupi za betonske konstrukcijske komponente
	Emerging Objects	Eksperimentalni materijali		Ukrasne i eksperimentalne konstrukcije
MJ	-	-	-	-
ME	3D Concrete Printing, Totalkustom Winsun, Betabram, WASP, Imprimere AG, 3DPrintHuset	Obradene mješavine s terena (agregati, glina, cementi, keramika, itd.)	kran/nosač	Velike konstrukcijske površine
	CyBe Construction, Cazza Construction, Constructions-3D		robotaska ruka na kotačima	
	Apis Cor, XtreeE		mobilna robotska ruka	
	Minibuilders		mobilni mini-roboti	
	KamerMaker/ DUS Arch.	Polimeri	polimeri	Konstrukcije i pregrade
	Branch Technology		mobilna robotska ruka	Mreže
	Batiprint			Izolacijske oplata
	FreeFAB Wax			Kalupi za beton
Digital Cons Platform		robotaska ruka na kotačima	Izolacijske oplata	
DED	MX3D	Metali	mobilna robotska ruka	Građevine i sustavi

istiskivanje cementnog materijala pomoću robotske ruke. Za razliku od CC, ovaj sustav ispisuje i potporni element i na taj način može kreirati strukture slobodne forme [39].

Bos i suradnici [40] navode da je 2012. godina prekretnica za građevinsku industriju, s obzirom na to da dolazi do procvata brojnih novih dostignuća u području AC.

Neke istaknute primjene AC-a prikazane su u tablici 4. Glavne značajke ovih primjena u građevinarstvu s aspekta AM metoda, materijala za ispis, mehanizma za ispis vrste proizvoda opisane su u tablici 5.

3. Rasprava o primjenjivosti tehnologija aditivne gradnje (AC) u smislu uporabe AM metoda i materijala

Kao što je prikazano na slici 6, na temelju sedam prije spomenutih metoda AM, aditivna izgradnja (AC) može se podijeliti u tri glavne skupine:

- AC s doziranjem materijala
- AC s komorom za materijal
- AC s polagačem materijala.

Aditivna izgradnja s doziranjem materijala (slika 6.): SL (laminiranje lista) jedina je AC metoda koja se uklapa u ovu skupinu. Glavni joj je nedostatak taj što se složenost postupka povećava sa svakom dodatnom komponentom. Postupak ispisa temeljen na ovoj metodi može biti vrlo neekonomičan na građevinskoj razini. Također, ispis cijele zgrade s velikim poprečnim presjecima slojeva bilo bi teško izvesti. Čak i ako je napravljen u komponentama, upravljanje procesom ispisa postalo bi složeno i dugotrajno, jer se broj elemenata povećava sa svakim dodatnim rezanjem na slojeve. Štoviše, tehnike laminiranja kad se koristi ljepilo nisu prikladne za konstrukcijske svrhe jer obično rezultira komponentama slabe konstrukcijske čvrstoće. Ipak, ultrazvučno zavarivanje može biti opcija za ispis metalnih konstrukcijskih komponenti.

Aditivna izgradnja s komorom za materijal (slika 6.): u ovu skupinu uklapaju se VP (foto-polimerizacija u komori), PBF

(spajanje praškastog materijala u slojevima) i BJ (raspršivanje veziva). Korištenje komore s materijalom za proizvodnju u građevinarstvu je zahtjevna metoda u smislu povećanja dimenzija ispisa, jer je veličina komore ograničavajući faktor. Ova skupina AC metoda može se koristiti za proizvodnju prilagođenih komponenti. No, izrada komponenata može biti problematična u slučajevima kada postupak montaže postane složen. Čini se da je VP metoda najmanje pogodna jer zahtijeva komoru za materijal napunjenu tekućom sirovinom kojom bi bilo teško rukovati na razini izgradnje. Zbog velike preciznosti i relativno dobre brzine postupka, drugi bitan nedostatak VP-a može biti visoka cijena fotopolimera koji i nisu dovoljno trajni za gradnju. Prema istraživanjima autora te Labonnote i suradnika [47], za ovu vrstu ispisa nisu dosad napravljena unaprjeđenja vezana za primjenu. PBF i BJ metode imaju slične prednosti i nedostatke. Ove AM metode također zahtijevaju zalihe materijala, ali spremnik napunjen prahom lakši je za rukovanje nego onaj s tekućinom. Unatoč tome, potrebna velika komora za prah i dalje ostaje glavni problem. S druge strane, komora za prah predstavlja nosač za ispisanu strukturu sve dok se struktura ne ukloni. Navedeno ima prednosti prilikom ispisa struktura slobodnih oblika kojima bi možda trebali potporniji pri ispisu s drugim metodama. I PBF i BJ metode mogu koristiti širok raspon praškastih materijala različitih cijena, trajnosti, gustoća, veličina zrna itd. U usporedbi s tekućinama kao sirovinama, upotreba praha rezultira manjom preciznošću izrade. Preciznost je čak značajno niža pri većim veličinama zrna, ali je pozitivno to da se povećava brzina izrade. PBF stvara homogene i izdržljive strukture pogodne za konstrukcijske komponente, iako proces može rezultirati velikim troškovima jer troši puno energije. BJ postupak je relativno jeftin, ali daje porozni sastav, lošijih mehaničkih svojstava. Također ima mogućnost ispisa s različitim sastavima materijala korištenjem različitih veziva.

Aditivna izgradnja s polagačem materijala (slika 6.): MJ (raspršivanje materijala), ME (ekstrudiranje materijala) i DED (taloženje usmjerenim izvorom energije) pripadaju ovoj grupi. Ovdje je povećanje veličine ispisa manje problematično jer ne zahtijeva sloj materijala koji bi bio ograničavajući za velike konstrukcije. Kod ovih metoda postoji tendencija prelaska



Slika 6. Aditivna gradnja (AC): AC s doziranjem materijala (lijevo); AC s komorom za materijal (sredina); AC s polagačem materijala (desno)

sa sustava teških nosača s fiksnim položajem na pokretne ili prijenosne pisaače budući ove vrste robota mogu ispisati strukture veće od njih samih. Stoga su ove AM metode prikladne za ispis velikih elemenata zgrade poput zidova, podova, stupova i greda. Osim toga, one mogu biti primijenjene i na površinama slobodnih oblika, npr. na potpornim ljuskama, a ne samo na ravnim površinama. ME metoda primjenjiva je gotovo sa svakim materijalom u viskoznom stanju ili bilo kojim materijalom u čvrstom stanju koji se može rastaliti u viskozno stanje. Stoga pruža širok spektar materijala za ispis građevine. Mlaznica je također promjenjiva što pridonosi mogućnosti povećanja veličine ispisa. Povećavanje veličine ekstruzijske mlaznice daje grublje (hrapavije) površine slojeva, ali proces postaje brži. MJ tehnologija koristi tekući materijal koji je teško kontrolirati u velikim građevinama. Također, uobičajeni materijali poput voska i fotoosjetljivih polimera relativno su skupi i osjetljivi za izgradnju građevina temeljenih na ovoj tehnici. DED metoda se u početku smatrala prikladnijom za oblaganje postojeće građevine, nego za samu njenu izgradnju. Ta metoda nije ograničena na horizontalno slaganje slojeva i ispis se može provoditi po bilo kojoj osi. Navedeno je značajno za stvaranje struktura slobodnih oblika, ali se postupak odvija sporije. Štoviše, proces potpunog taljenja materijala može proizvesti trajne sastave, ali uz velike troškove energije.

Wu i sur. [41] navode da su veličina proizvoda i raznolikost prikladnog materijala za ispis glavni izazovi koje treba svladati kako bi se osigurala veća dostupnost AM tehnologije za građevinske projekte. Eksperimentirajući u građevinskim razmjerima s robotima pogonjenim kabelima, Barnett & Gosselin [48] navode da bi materijal za 3D-ispis trebao biti "jeftin, lagan i s mogućnošću skladištenja u stanju spremnosti za nanošenje." Eksperimentirajući sa zračnim 3D-ispisom, odnosno ekstrudiranjem materijala pomoću "letećih" robota, Hunt i sur. [49] ističu da bi osnovne karakteristike materijala za ispis trebale biti "gustoća materijala za ispis, vrijeme očvršćivanja, čvrstoća materijala nakon očvršćivanja, ekspanzija materijala nakon očvršćivanja i cijena". Isti mehanizmi i materijali koji se koriste za ispis na razini stolnog pisaača ne mogu se izravno primijeniti na ispis velikih razmjera. Slijede detaljniji opisi materijala koji se koriste u AC.

Materijali iz lokalnog tla (koji se nazivaju i zemljanim materijalima ili regolit u slučaju izvanzemaljske izgradnje), poput gline, pijeska i stijena, od najveće su važnosti za 3D-ispis velikih razmjera. Tlo se može dobavljati kao sirovina u velikim komadima, ili može biti grubo izdvojeno u obliku zrnatog materijala. Materijal se potom može izravno sinterirati / rastaljivati ili sinterirati / rastaljivati u spremniku za ekstrudiranje (poput aditivne proizvodnje s regolitom) ili kemijski povezati (kao u sustavu D-Shape). Materijali iz tla mogu se dalje preraditi u keramiku, staklo ili cement. Keramika i staklo zasad nisu uobičajeni u primjeni kod velikih ispisa, no jedinstvene mogućnosti AM-a mogu evoluirati do te mjere da se ovi materijali u budućnosti budu mogli koristiti učinkovitije od tradicionalnih metoda. Cementni materijali su najpoželjniji resurs u AC, jer su cementi globalno dostupni, a

mogu imati i zadovoljavajuća strukturalna svojstva [40, 47]. Nadalje, cementi su već dobro istraženi u industriji, a mogu se pripremiti kao sastav koji se može ekstrudirati u viskoznom stanju sadržavajući pritom dodatke poput vlakana i izolatora. Portland cement je također tipičan materijal za AC pa postoji tendencija da se prednost daje geopolimerima koji sadrže leteći pepeo i šljaku, jer su oni održivija opcija s nižim ugljikovim otiskom [44]. U većini slučajeva materijali se iz tla (uglavnom cementi) na samom gradilištu ekstrudiraju kako bi se ispisale unutarnje i vanjske površine zgrade. Alternativno, te se površine u nekim slučajevima ispisuju izvan gradilišta kao komponente, raspršivanjem veziva i praha lokalnog terena. Dok se prva opcija čini boljom za ispis monolitnih objekata velikih razmjera (poput Apis Cora ili CyBea), druga je opcija bolja za ispis komponenata s vrlo učinkovitim složenim geometrijama (poput ETH 3D Sand Printer). Tvrde površine, koje služe kao konstrukcijska jezgra, ispisane su tako da sadrže praznine za unutarnje strojarske i električne sustave. Nakon ispisa, površine se dalje obrađuju izoliranjem, oblaganjem i integriranjem ostalih komponenti (poput servisnih sustava, cijevi i otvora). Postoje i neki nedostaci ovih materijala iz tla / terena. Unatoč svojoj robusnosti i dobroj tlačnoj čvrstoći, obično loše reagiraju na vlačne sile, zbog čega ih se mora ojačati. Za ojačanja se obično koriste armaturne šipke. Također, vodoravni elementi se mogu ispisati ili kao samo-potporne geometrije (poput lančanica) ili kao geometrije poduprte drugim elementima (poput privremene oplata ili viška praha u sloju praha). Što se tiče drugih nedostataka, ovih materijala su relativno gusti materijali što rezultira teškim konstrukcijama i teškoćama u transportu. Velika gustoća također je problem pri ispisu, jer se materijal ne bi smio srušiti pod vlastitom težinom dok ne očvrstne i stekne očekivana mehanička svojstva [48]. Još jedan nedostatak je i to što nisu homogeni ako nisu dobro obrađeni. Uz to, ne mogu dugo trajati u viskoznom stanju spremnom za uporabu zbog očvršćivanja, koje traje samo nekoliko sati.

Nasuprot korištenju zemljanih materijala, Barnett i Gosselin [48] i Hunt i sur. [49] kao dobru opciju preporučuju upotrebu sintetičkog materijala (oboje su koristili poliuretansku pjenu koja se nakon puštanja može proširiti). Polimeri se mogu oblikovati tako da pokazuju različita specifična svojstva poput plastičnosti, neprozirnosti, čvrstoće ili otpornosti na kemikalije. Mogu se koristiti u razne svrhe. Prvo, može ih se ispisati kao glavni proizvod, bilo da se radi o komponenti ili cijelom sustavu. U tom smislu, polimeri se obično ne koriste kao glavna konstrukcija, osim na nekim izložbenim projektima (poput Kamermakera kod kojeg je konstrukcija ispisana ekstrudiranjem polipropilena). Polimeri se mnogo češće koriste za nenosive elemente poput ukrasnih zidova i stropova. Drugo, polimeri se mogu ispisati kao dodatak drugim proizvodima. Na primjer, mogu poslužiti kao armaturna mreža (kao što je kod Branch Techa), kao kalup za druge materijale (poput onog u FreeFAB Waxu) ili kao trajna oplata koja također djeluje kao izolacija (poput one kod Batiprinta). Izolacijski polimeri također se koriste kao izolacija za popunjavanje praznina drugih konstrukcija (poput izolacijskog

razmaka od betonske školjke kreirane 3D-ispisom). Polimeri se mogu koristiti u različitim oblicima. U većini slučajeva preferiraju se polimeri u viskoznom stanju za ekstrudiranje, jer ih je zbog plastičnosti lako oblikovati te ne zahtijevaju velike količine energije da bi se rastalili u viskozno stanje. Polimeri se mogu koristiti i kao prah (kao u slučaju Emerging Objects and Skanska) za kreiranje komponenti. Čvrsti listovi su također opcija, premda se zbog stvaranja otpada ne preferiraju za AC. Iako još nema primjene, polimeri u tekućem stanju imaju potencijala u primjeni s MJ jer bi se mogli koristiti za ispis različitih vrsta unutarnjih i vanjskih obloga (na primjer, prozirne površine). Može se očekivati da će se u budućnosti razviti različite vrste polimera za ovu namjenu.

Metali su uobičajeni resurs korišten u izgradnji zgrada. Lagani su i karakterizira ih visoka čvrstoća konstrukcije. Kombinacijom nekoliko metala mogu se stvoriti različite legure različitih svojstava. Nadalje, metali se mogu upotrijebiti u gotovo bilo kojem obliku: u obliku praha, u rastaljenom obliku ili kao listovi. Ipak, metali se najviše koriste u građevinarstvu u masovnoj

proizvodnji predgotovljenih građevinskih dijelova. Općenito, AM metalom nije privukla veliko zanimanje u građevinskoj industriji u odnosu na druge industrije, posebno automobilsku i zrakoplovnu industriju. Za ispis velikih razmjera metali mogu biti skupi i mogu zahtijevati postupak koji troši mnogo energije zbog visoke temperature taljenja. Iz tog razloga, ekstrudiranje ili taloženje rastaljenog metala za gradnju na gradilištu bilo bi zahtjevnije u usporedbi s cementima i polimerima za koje se primjenjuje hladni postupak. Ako se koristi metalni prah, metode korištenja u praškastim slojevima (PBF ili BJ) ograničene su veličinom, iako se mogu koristiti za proizvodnju komponenata (kao što je slučaj u Arup-ovoj proizvodnji metalnih čvorova). Čini se da je DED (poput MX3D) solidna opcija za metale u građevinarstvu, jer može ispisati prah (ili žice), a također nije ograničen u smislu veličine. Ultrazvučno zavarivanje može biti opcija za kreiranje manjih izdržljivih komponenti od metalnih listova.

Osim spomenutih materijala, i neki su drugi istraženi, s njima su provedeni eksperimenti te su primijenjeni na razini AM stolnih

Tablica 6. Čimbenici koji utječu na primjenjivost AM metoda u građevinarstvu

Čimbenici	AC s doziranjem materijala	AC s komorom za materijal			AC s polagačem materijala		
	SL	VP	PBF	BJ	MJ	ME	DED
Mogućnost primjene metode na velikim dimenzijama	Moguće prijenosnim i mobilni robotima	Ograničeno prema veličini spremnika za materijal			Moguće prijenosnim i mobilni robotima		
Dostupnost jeftinih materijala	Različiti materijali u listovima	Ograničeno zbog skupih fotopolimera	Velika raznolikost praškastih materijala	Velika raznolikost praškastih materijala	Ograničeno na očvrstive tekućine	Velika raznolikost viskoznih materijala	Ograničeno na metale i keramiku
Troškovi obrade	Niski, ali puno otpada	Niski, ali zahtijevaju gradnju spremnika	Energetski zahtjevan + zahtijevaju gradnju spremnika	Niski, ali zahtijevaju gradnju spremnika	Niski, ali zahtijevaju rastaljeni materijal	Niski, ali zahtijevaju polu-rastaljeni materijal	Energetski zahtjevan proces
Dostupnost trajnih (otpornih) materijala	Različiti materijali u listovima	Ograničena na lomljive fotopolimere	Velika raznolikost praškastih materijala	Velika raznolikost praškastih materijala	Moguća, ali zahtijeva daljnja poboljšanja	Velika raznolikost viskoznih materijala	Moguć s metalima i keramikom
Trajnost strukture (sastava)	Loša kad je lijepljena, bolja kad je zavarena	Homogene, ali lomljive strukture	Visoko trajne strukture	Porozne strukture	Krte strukture	Anizotropne strukture	Visoko izdržljive strukture
Mogućnost kontrole materijala	Jednostavno rukovanje krutinama, ali moglo bi biti teže kad je u nestrukturiranom okruženju	Potrebna količina materijala predstavlja izazov, ipak je lakše rukovati kad je u strukturiranom okruženju.			Može biti izazovno s prahom i s rastaljenim materijalima, čak još i više kad se nalaze u nestrukturiranom okruženju.		
Samopotpora	Nije potrebna, ali je potrebno čišćenje otpada	Mogla bi biti potrebna	Nije potrebna		Mogla bi biti potrebna		Nije potrebna ako je dobra obrada

pisača. Neki od njih su materijali visokog učinka (poput aerogela, kompozita od nanovlakana, grafen), pametni i višefunkcionalni materijali (stvaranje energije, promjena neprozirnosti) i programabilne tvari (koje omogućuju 4D ispis). Za sada ove vrste materijala nisu uobičajene za AC, no moglo bi se očekivati da će se oni ubuduće koristiti za ispis funkcionalnijih i učinkovitijih građevinskih elemenata.

Na temelju opisane rasprave, kao čimbenici koji utječu na primjenu AM metoda na razini izgradnje može se navesti sljedeće (tablica 6.):

Mogućnost primjene metode na velikim dimenzijama: mogućnost uvećanja je uglavnom određena mehanizmom metode (sustavi s nosačima, sustavi na kotačima, prijenosni sustavi). Dok SL, MJ, ME i DED metode mogu graditi proizvode veće od samog mehanizma metode pomoću pokretnih i prijenosnih robova, VP, PBF i BJ su ograničene na veličinu spremnika materijala.

Dostupnost jeftinih materijala i troškovi obrade: SL, PBF, BJ i ME mogu koristiti širok raspon materijala. SL vodi u neekonomični proces u slučaju izrade velikih dimenzija. PBF i BJ imaju troškove za konstrukciju spremnika za materijal, a postupak PBF-a zahtijeva i puno energije. ME koristi polutaljene (viskozne) materijale koji mogu biti skupi za materijale s visokom točkom taljenja. VP koristi skupe fotopolimere, a također zahtijeva i spremnik za materijal. Za sada je MJ vrlo ograničen u rasponu materijala i zahtijeva potpuno rastaljene materijale. DED koristi materijale s vrlo visokom temperaturom taljenja, što dovodi do procesa koji troši puno energije.

Dostupnost trajnih materijala i trajnost sastava: PBF može koristiti širok raspon materijala te proizvoditi vrlo trajne sastave. BJ i ME su također širokog raspona materijala. BJ daje porozne sastave, ali se takav sastav može poboljšati naknadnom obradom. ME daje anizotropne pripravke koji se mogu poboljšati ojačanjem. DED je ograničen na metale i keramiku, ali iz njih se mogu stvoriti vrlo izdržljive kompozicije. VP i MJ stvaraju lomljive kompozicije; a i ograničeni su u pogledu raspona materijala. MJ ima perspektivu u budućnosti jer se njegov raspon materijala može proširiti. Također MJ metodom može se ispisivati s više materijala kako bi se poboljšala kompozicija. SL, ultrazvučno zavarivanje metala može biti opcija glede trajnosti.

Mogućnost kontrole materijala i mogućnost samopotpore: preciznost i brzina ovise o ova dva aspekta. Prvi utječe na jednostavnost upravljanja materijalom, a samopotpore ne zahtijevaju dodatni proces za potporu. Iako se montaža i SL provode s čvrstim elementima kojima se lako upravlja, nestrukturirano građevinsko okruženje može biti izazov. SL ne zahtijeva potpornje, ali je čišćenje otpada nužno. Nestrukturirano okruženje također može biti problematično za ME, MJ i DED. Nadalje, ove metode mogu zahtijevati potpurne zahtjevne geometrije i ispisuju polurastaljene ili potpuno rastaljene materijale koje je teže obraditi u odnosu na čvrste tvari. Za VP, PBF i BJ količina materijala za popunjavanje spremnika za materijal može biti izazov, ali se oni ipak obrađuju unutar potpornog strukturiranog sustava.

4. Zaključak

U ovom je istraživanju ispitana AC u smislu primjenjivosti AM metoda i materijala. Na temelju nalaza mogu se izvesti sljedeći zaključci:

- Za primjenu AC presudna je mogućnost primjene metode na velikim dimenzijama, a sklonost prelasku sa sustava nosača na pokretne i prijenosne sustave može se smatrati znakom toga. S ovog aspekta, metode "AC doziranjem materijala" i "AC s komorom za materijal" najperspektivnije su mogućnosti. Dok je prva metoda prikladna za montažu serijski proizvedenih predgotovljenih komponenti poput prozora, vrata i panela čija bi proizvodnja bila zahtjevna ili neizvodljiva na gradilištu, druga je bolja za izradu građevinskih elemenata građevine izrađenih na gradilištu ispisom materijala (poput konstrukcija, okomitih i vodoravnih površina). "AC s komorom za materijal" ograničena je u pogledu veličina te se češće koristi za ispis komponenata, a ne cijele građevine.
- Širi raspon dostupnih materijala znači da metoda može biti fleksibilnija u ispunjavanju niza zahtjeva. VP, MJ i DED u tom su smislu vrlo nefleksibilne metode, no ipak se mogu koristiti u posebne svrhe. Na primjer, DED je pogodan za ispis trajnih metalnih elemenata, a MJ može biti prikladna za ispis funkcionalnih obloga. Iako se razlikuju u načinu na koji se materijal obrađuje, SL, PBF, BJ i ME metode mogu se primjenjivati gotovo s bilo kojom vrstom materijala i na taj način omogućiti ispis s trajnim i ekonomičnim materijalima. PBF i BJ su ograničeni u mogućnosti primjene na velikim dimenzijama, no mogu se koristiti za proizvodnju komponenata. SL je moguća primijeniti za proizvodnju velikih dimenzija, ali postupak daje puno otpada. ME je dobra i u mogućnosti povećanja dimenzija ispisa i u mogućnosti kontrole materijala.
- U pogledu materijala, upotreba zemljanih materijala (uglavnom cementa za primjenu na Zemlji i regolita za izvanzemaljske misije) u prvom je planu zahvaljujući njihovoj lokalnoj dostupnosti, ekonomičnosti i trajnosti. Ova svojstva čine ih značajnim resursom za ispis strukturnih površina velikih dimenzija na gradilištu. Metali i polimeri do sada nisu bili toliko uobičajeni za AC kao što su to cementi, ali ovi materijali pokazuju obećavajuće mogućnosti koje se već široko koriste u tradicionalnim načinima. Mogu se koristiti ili samostalno, za ispis laganih konstrukcija, pregrada i površina ili za dopunu drugih konstrukcija (obično ispisanih jezgri) poput armiranja, potpornja i oblaganja. Štoviše, postoje neki napredni materijali za koje su provedeni eksperimenti na razini stolnog pisača, poput nanomaterijala i kompozita, koji će vrlo vjerojatno naći primjenu u AC.
- S obzirom na postojeće primjene, općenito se može ustvrditi da se AC uglavnom fokusira na ekstrudiranje cementnih materijala na gradilištu za stvaranje velikih strukturnih površina koje služe kao glavna jezgra zgrade i koje sadrže praznine za izolaciju i strojarske i električne sustave. Ovaj je pristup sasvim logičan jer je metoda podesiva za

velike dimenzije, a materijal je trajan, isplativ i lako se kontrolira. Postoje i početni znakovi upotrebe metala za ispis konstrukcijskih sustava i komponenti metodama PBF i DED, koje mogu u potpunosti iskoristiti mehanička svojstva materijala. Također, ekstrudiranje polimera se provodi radi ispisa izložbenih konstrukcija, građevinskih nenosivih elemenata, kao i dodatnih elemenata za izolaciju, kalupe i armaturne mreže.

- Posljednje, ali ne manje bitno, treba napomenuti da razvoj AC ovisi o mogućnostima robotskih uređaja jer

su oni pokretači procesa i određuju kvalitetu rezultata. Stoga je napredak u robotizaciji i računalnim sustavima važan za postizanje značajnog napretka u primjenama AC-a.

Zahvala

Autori žele zahvaliti dvojici anonimnih recenzenata na njihovim vrijednim komentarima i konstruktivnim prijedlozima.

LITERATURA

- [1] Castro-Lacouture, D.: Construction Automation, In: Nof S. (eds) Springer Handbook of Automation, Berlin, Heidelberg, pp. 1063-1078, 2009.
- [2] Saidi, K.S., Bock, T., Georgoulas, C.: Robotics in Construction. In: Siciliano B., Khatib O. (eds), Springer Handbook of Robotic, Cham, pp. 1493-1520, 2016.
- [3] Cousineau, L., Miura, N.: Construction Robots: The Search for New Building Technology in Japan. ASCE Press, USA, 1998.
- [4] Pegna, J.: Exploratory investigation of solid freeform construction, Automation in Construction, 5 (1997) 5, pp. 427-437.
- [5] Buswell, R.A., Soar, R.C., Gibb, A.G., Thorpe, A.: Freeform construction: mega-scale rapid manufacturing for construction, Automation in Construction, 16 (2007) 2, pp. 224-231.
- [6] De Beer, N.: Advances in Three Dimensional Printing - State of the Art and Future Perspectives, Journal for New Generation Sciences, 4 (2006) 1, pp. 21-49.
- [7] Hull, C.W.: U.S. Patent No. 4,575,330, Patent and Trademark Office, Washington, DC: U.S., 1986.
- [8] Kietzmann, J., Pitt, L., Berthon, P.: Disruptions, Decisions, and Destinations: Enter the Age of 3-D Printing and Additive Manufacturing, Business Horizons, 58 (2015) 2, pp. 209-215.
- [9] Campbell, I., Bourell, D., Gibson, I.: Additive Manufacturing: Rapid Prototyping Comes of Age. Rapid Prototyping Journal, 18 (2012) 4, pp. 255-258.
- [10] Bogue, R.: 3D Printing: The Dawn of a New Era in Manufacturing? Assembly Automation, 33 (2013) 4, pp. 307-311.
- [11] Berman, B.: 3-D Printing: The New Industrial Revolution, Business Horizons, 55 (2012) 2, pp. 155-162.
- [12] International Standards Organization.: ISO/ASTM 52900:2015(en) - Additive Manufacturing - General Principles - Terminology, <https://www.iso.org/>
- [13] Nanosteel: Intro to Metal Additive Manufacturing, <https://nanosteelco.com/products/additive-manufacturing/>
- [14] Gardan, J.: Additive Manufacturing Technologies: State of the Art and Trends. International Journal of Production Research, 54 (2016) 10, pp. 3118-3132.
- [15] Wong, K.V., Hernandez, A.: A Review of Additive Manufacturing, International Scholarly Research Network, ISRN Mechanical Engineering, 2012, <https://www.hindawi.com/journals/isrn/2012/208760/>
- [16] Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B.: Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, Springer, New York, 2015.
- [17] Deckard, C.R.: Patent No.: US 5,597,589 A, Apparatus for producing parts by selective sintering, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 1997.
- [18] Feygin, M., Pak, S.S.: Patent No.: US 5,876,550 A, Laminated object manufacturing apparatus and method, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 1999.
- [19] White, D.: Patent No.: US 6,519,500 B1, Ultrasonic object consolidation, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 2003.
- [20] Crump, S.S.: Patent No.: US 5,340,433 A, Modeling apparatus for three-dimensional objects, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 1994.
- [21] Sachs, E.M., Haggerty, J.S., Cima, M.J., Williams, P.A.: Patent No.: US 5,204,055 A, Three-dimensional printing techniques, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 1993.
- [22] Bredt, J.F., Anderson, T.C., Russell, D.B.: Patent No.: US 6,610,429 B2, Three dimensional printing material system and method, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 2003.
- [23] Davidson, T., Phillips, R.A., Hernandez, A.T., Russell, D.B., Roche, K., Zengerle, W.H., III, Berlin, A., Kinsley, J.P., Benjamin D. Sweet-Block & Kisai, D.: Patent No.: US 7,037,382 B2, Three-dimensional printer, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 2006.
- [24] Sanders Jr, R.C., Forsyth, J.L., Philbrook, K.F.: Patent No.: US 5,506,607 A, 3-D model maker, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 1996.
- [25] Masters, W.E.: Patent No.: US 4,665,492 A, Computer automated manufacturing process and system, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 1987.
- [26] Larson, R.: Patent No.: US 5,786,562 A, Method and device for producing three-dimensional bodies, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 1998.
- [27] Meiners, W., Wissenbach, K., Gasser, A.: Patent No.: US 6,215,093 B1, Selective laser sintering at melting temperature, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 2001.
- [28] McGregor, G., Islam, M.U., Xue, L., Campbell, G.: Patent No.: US 6,504,127 B1, Laser consolidation methodology and apparatus for manufacturing precise structures, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 2003.

- [29] Carbone, F.L.: U.S. Patent Application Publication, Pub. No.: US 2005/0173380 A1, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 2005.
- [30] Stecker, S.: Patent No.: US 8,546,717 B2, Electron beam layer manufacturing, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 2013.
- [31] DeSimone, J.M., Ermoshkin, A., Ermoshkin, N., Samulski, E.T.: Patent No.: US 9,360,757 B2, Continuous liquid interphase printing, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 2016.
- [32] Guo, N., Leu, M.C.: Additive Manufacturing: Technology, Applications and Research Needs, *Frontiers of Mechanical Engineering*, 8 (2013) 3, pp. 215-243.
- [33] Loughborough University.: Additive Manufacturing Research Group. <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/>
- [34] Lim, S., Buswell, R.A., Le, T.T., Austin, S.A., Gibb, A.G., Thorpe, T.: Developments in construction-scale additive manufacturing processes, *Automation in Construction*, 21 (2012), pp. 262-268.
- [35] Perkins, I., Skitmore, M.: Three-dimensional printing in the construction industry: A review, *International Journal of Construction Management*, 15 (2015) 1, pp. 1-9.
- [36] Khoshevis, B.: Patent No.: US 5,529,471 A, Additive fabrication apparatus and method, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 1996.
- [37] Dini, E., Chiarugi, M., Nannini, R.: U.S. Patent Application Publication, Pub. No.: US 2008/0148683 A1, Method and Device for Building Automatically Conglomerate Structures, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 2008.
- [38] Dini, E.: Patent No.: US 8,337,736 B2, Method for automatically producing a conglomerate structure and apparatus therefor, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 2012.
- [39] Austin, S., Buswell, R. A., Lim, S., Webster, J.: U.S. Patent Application Publication, Pub. No.: US 2014/0252668A1, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 2014.
- [40] Bos, F., Wolfs, R., Ahmed, Z., Salet, T.: Additive Manufacturing of Concrete in Construction: Potentials and Challenges of 3D Concrete Printing, *Virtual and Physical Prototyping*, 11 (2016) 3, pp. 209-225.
- [41] Wu, P., Wang, J., Wang, X.: A Critical Review of the Use of 3-D Printing in the Construction Industry, *Automation in Construction*, 68 (2016), pp. 21-31.
- [42] Mueller, R.P., Howe, S., Kochmann, D., Ali, H., Andersen, C., Burgoyne, H., Chambers, W., Clinton, R., De Kestellier, X., Ebel, K., Gerner, S., Hofmann, D., Hogstrom, K., Ilves, E., Jerves, A., Keenan, R., Keravala, J., Khoshnevis, B., Lim, S., Metzger, P., Meza, L., Nakamura, T., Nelson, A., Partridge, H., Pettit, D., Pyle, R., Reiners, E., Shapiro, A., Singer, R., Tan, W., Vazquez, N., Wilcox, B. & Zelhofer, A.: Automated Additive Construction (AAC) for Earth and Space Using In-situ Resources, In: *Proceedings of the Fifteenth Biennial ASCE Aerospace Division International Conference on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments (Earth & Space 2016)*, American Society of Civil Engineers (ASCE), Reston, Virginia, USA, 2016.
- [43] Wilkinson, S., Musil, J., Dierckx, J., Gallou, I., De Kestelie, X.: Autonomous Additive Construction on Mars, *ASCE Earth and Space*, 2016.
- [44] Nematollahi, B., Xia, M., Sanjayan, J.: Current progress of 3D concrete printing technologies, In: *Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC*, Vol. 34, Vilnius Gediminas Technical University, Department of Construction Economics & Property, 2017.
- [45] Richardson, V.: 3D printing becomes concrete: exploring the structural potential of concrete 3D printing, *The Structural Engineer: Journal of the Institution of Structural Engineer*, 95 (2017) 10, pp. 10-17.
- [46] Camacho, D.D., Clayton, P., O'Brien, W. J., Seepersad, C., Juenger, M., Ferron, R., Salamone, S.: Applications of additive manufacturing in the construction industry - A forward-looking review, *Automation in Construction*, 89 (2018), pp. 110-119.
- [47] Labonnote, N., Rønquist, A., Manum, B., Rüther, P.: Additive Construction: State-of-the-Art, Challenges and Opportunities, *Automation in Construction*, 72 (2016), pp. 347-366.
- [48] Barnett, E., Gosselin, C.: Large-Scale 3D Printing with a Cable-Suspended Robot, *Additive Manufacturing*, 7 (2015), pp. 27-44.
- [49] Hunt, G., Mitzalis, F., Alhinai, T., Hooper, P. A., Kovac, M.: 3D Printing with Flying Robots, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Hong Kong, China, pp. 4493-4499, 2014.