

Digitalna transformacija u građevinarstvu

Farkas, Katarina

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:

University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:123:692740>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-06**



Repository / Repozitorij:

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

**SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

ZAVRŠNI RAD

Katarina Farkas

Split, 2024.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Katarina Farkas

**Digitalna transformacija u
građevinarstvu**

Završni rad

Split, 2024.



SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA,
ARHITEKTURE I GEODEZIJE

UNIVERSITY OF SPLIT
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING,
ARCHITECTURE AND GEODESY

STUDIJ: SVEUČILIŠNI PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ GRAĐEVINARSTVO
KANDIDAT: Katarina Farkas
MATIČNI BROJ: 0083227482
KATEDRA: Katedra za organizaciju i ekonomiku građenja
KOLEGIJ: Organizacija građenja

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Tema: Digitalna transformacija u građevinarstvu

Opis zadatka: U radu je potrebno analizirati procese digitalne transformacije u građevinskoj industriji, s naglaskom na ključne tehnologije koje oblikuju modernu gradnju.

U Splitu, rujan 2024.

Mentor:

prof. dr. sc. Nives Ostojić-Škomrlj

Digitalna transformacija u građevinarstvu

Sažetak:

Cilj ovog rada je bio je istražiti o digitalnoj transformaciji u građevinarstvu. Istraživanje je provedeno u šest točaka. U prvom dijelu opisana je BIM tehnologija i njezina primjena u građevinarstvu. Zatim je prikazana automatizacija gradnje uz pomoć građevinskih robota i 3D printanja. Rad pruža uvid u trenutni status i buduće smjernice digitalne transformacije u građevinarstvu te ističe važnost kontinuiranog usvajanja novih tehnologija i prilagodbe industrije kako bi se osigurala konkurentnost i održivost u sve zahtjevnijem globalnom okruženju.

Ključne riječi:

Digitalna transformacija, građevinarstvo, BIM tehnologija, građevinski roboti, 3D printanje

Digital transformation in construction industry

Abstract:

The aim of this paper was to explore digital transformation in the construction industry. The research was conducted in six parts. The first section describes BIM technology and its application in construction. Then, the automation of construction with the help of construction robots and 3D printing is presented. The paper provides insight into the current status and future directions of digital transformation in construction, emphasizing the importance of continuously adopting new technologies and adapting the industry to ensure competitiveness and sustainability in an increasingly demanding global environment.

Keywords:

Digital transformation, construction industry, BIM technology, construction robots, 3D printing

Sadržaj

1. UVOD	1
2. BIM TEHNOLOGIJA	2
2.1. Upotreba BIM-a u građevinarstvu.....	3
3. GRAĐEVINSKI ROBOTI	6
3.1. Podjela radova	8
3.2. Implementacija u građevinarstvu.....	10
3.3 Dronovi.....	12
3.3.1 Primjena u građevinarstvu	14
3.4. Izazovi i moguća rješenja	16
4. 3D PRINTANJE	18
4.1. Postupak dobivanja 3D printa.....	19
4.2. Prednosti i nedostaci 3D printanja.....	20
4.3. Usporedba izgradnje kuće 3D printanjem i tradicionalnom gradnjom.....	23
5. BUDUĆNOST DIGITALNE TRANSFORMACIJE U GRAĐEVINARSTVU	25
6. ZAKLJUČAK	27
7. LITERATURA	28

1. UVOD

Građevinska industrija proizvodi veliku količinu podataka i informacija tijekom svog rada. Ovi podaci nastaju već pri izradi crteža u fazi projektiranja, a zatim se prikupljaju kroz razne izvještaje tijekom gradnje, od početne ideje do završetka projekta. Zato je važno prikupljati i organizirati te podatke jer su korisni građevinskim tvrtkama. Za prikupljanje tako velikih količina podataka potrebna su skladišta podataka i odgovarajući softveri za pretraživanje. Procjenjuje se da građevinska industrija zapošljava oko 7% radno sposobnog stanovništva na svijetu, što je čini jednim od najvećih sektora po broju zaposlenih. [1] Međutim, unatoč velikom broju zaposlenih, produktivnost u građevinskoj industriji je vrlo niska. Druge industrije su se modernizirale i automatizirale, čime su značajno povećale produktivnost, dok građevinska industrija zaostaje u digitalizaciji. Prema istraživanjima, produktivnost radnika u građevinskoj industriji raste samo 1% godišnje, dok produktivnost u cjelokupnoj ekonomiji raste po stopi od 2,8% godišnje, a u proizvodnji čak 3,6% godišnje.[1] Razvojem novih tehnologija taj problem se polako počinje rješavati. Udaljenost između sjedišta tvrtke i gradilišta također često predstavlja značajan izazov. Ova udaljenost otežava efikasnu i brzu komunikaciju među svim sudionicima, što dodatno komplicira upravljanje projektima i međusobnu suradnju. Kako bi se prevladale ove prepreke, uvođenje 5G mobilnih mreža postaje ključno. Osim što omogućuju bržu i pouzdaniju komunikaciju, 5G mreže pružaju mogućnost povezivanja velikog broja uređaja, stvari i mašina, čime se potiče integracija i poboljšava upravljanje u realnom vremenu. Uvođenje informacijsko-komunikacijskih tehnologija u građevinska poduzeća ima za cilj pružiti podršku i olakšati rad onima koji sudjeluju u projektima, kao i donositeljima odluka. Unatoč napretku u tehnologiji, integracija IT alata u praksu zahtijeva još veliku količinu istraživanja. [1]

2. BIM TEHNOLOGIJA

Krajem 1970-ih i početkom 1980-ih razvija se prvi koncept BIM-a, no zbog visokih troškova ranih aplikacija i potrebnog hardvera, softveri za modeliranje zgrada bili su ograničeni. 1987. izdana je aplikacija ArchiCAD što se smatra pretečom BIM-a jer je omogućavala izradu 3D i 2D geometrije i korištenje na osobnim računalima. [2] No, tek 2002. Autodesk objavljuje dokument pod nazivom "Building Information Modeling". [2]

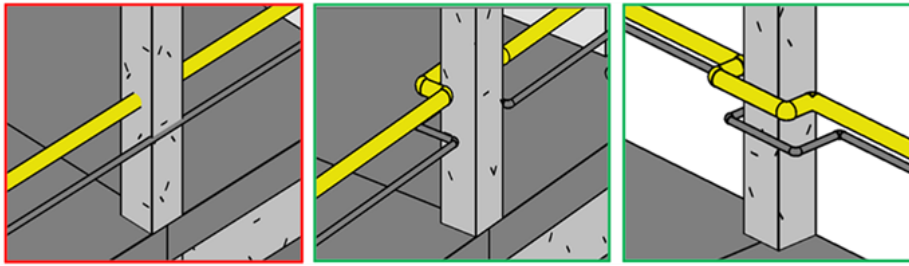
BIM označava Building Information Modeling, tehnologiju koja omogućava digitalnu vizualizaciju podataka koje se unesu u program. To podrazumijeva izradu 3D modela i odgovarajućih 2D modela za prikaz planova i presjeka. Time je ova tehnologija puno naprednija od 2D paketa za crtanje, poput AutoCAD-a, jer se kod njih svaki crtež mora pojedinačno crtati, koordinirati i mijenjati, dok se kod BIM-a unosom podataka u program izradi 3D model od kojeg možemo dobiti odgovarajuće planove i presjeke. Kada dođe do promjene tog 3D modela, sve povezane slike se automatski ažuriraju. BIM se definira u idejnom projektu, te daljnjim nadograđivanjem postaje osnova za izvođenje. Tijekom izvođenja se prilagođava stvarnoj situaciji i na kraju predstavlja osnovni model za uporabu i održavanje izgrađenog objekta. Drugim riječima, BIM omogućuje stvaranje digitalnog modela građevine koji integrira sve relevantne informacije o njoj kroz njen cijeli životni ciklus, od projektiranja i izgradnje do održavanja i upravljanja. Uz 3D prikaz uključuje i informacije o vremenu, troškovima, održivosti itd. BIM model se dijeli između svih stručnih sudionika projekta od kojih svatko daje podatke za svoje odgovarajuće područje čime se kreira jedinstveni najbolji mogući model. To omogućuje bolju koordinaciju zbog čega se smanjuje količina sukoba i dolazi do učinkovitijeg upravljanja vremenom i financijama. [3]

2.1. Upotreba BIM-a u građevinarstvu

Za pomoć planiranja građevinskih aktivnosti stvara se 4D model pomoću BIM alata. Prvo se koristi Revit softver za stvaranje 3D modela koji obuhvaća arhitektonske i infrastrukturne detalje projekta. Zatim se taj 3D model proširuje dodavanjem vremenskog aspekta, što omogućuje da se aktivnosti izgradnje prikažu u kontekstu vremena. Za integraciju vremenskog rasporeda s 3D modelom koristi se Navisworks softver, koji omogućuje povezivanje skupova 3D elemenata modela s planiranim zadacima definiranim u MS Projectu. Kako bi se olakšala organizacija, elementi 3D modela grupiraju se u setove prema određenim zadacima, a svaki set se povezuje s odgovarajućim zadatkom i njegovim kategorijama kao što su izgradnja, rušenje ili privremeni radovi. Pokretanjem četverodimenzionalnog BIM modela moguće je prikazati simulaciju planiranja. Simulacija vjerojatno nikada neće biti potpuno istovjetna stvarnosti, no to potiče razvoj tehnologija za vizualizaciju s ciljem smanjenja razlike između digitalnog svijeta i stvarnog svijeta. Tehnologija virtualne stvarnosti (VR) za simulaciju gradnje omogućuje interaktivnost i detaljno proučavanje složenih scenarija, poboljšavajući tako razumijevanje projekta i komunikaciju među timovima. BIM modeliranje predstavlja još napredniju metodologiju jer se modelima može upravljati direktno u BIM preglednicima, poput Navisworks softvera, što donosi brojne prednosti u odnosu na 4D/VR modele bazirane na AutoCAD-u. Navisworks softver omogućuje bolju koordinaciju timova projekta, integraciju kvantiteta projekta s rasporedom i pruža alate za simulaciju, kvantifikaciju, te analizu vremena i troškova. Također, omogućuje detekciju i rješavanje sukoba među različitim disciplinama unutar projekta. BIM modeliranjem detaljno se obrađuju i integriraju elementi mreža (kao što su cijevi za vodu ili struju). Softver poput Revita koristi se za detekciju sukoba između različitih objekata u modelu. [4] Njegova uloga u projektiranju sastoji se u omogućavanju integriranog 3D modeliranja, gdje svi sudionici projekta mogu surađivati u stvarnom vremenu, dijeleći i ažurirajući podatke na jednom digitalnom modelu. Promjene na modelu automatski se reflektiraju u svim prikazima, čime se smanjuje mogućnost pogrešaka i ubrzava proces projektiranja. Revit također omogućuje izradu precizne tehničke dokumentacije, kao što su nacrti, specifikacije i troškovnici, te omogućuje provođenje različitih simulacija i analiza čime se optimizira dizajn i planiranje. Na taj način Revit poboljšava koordinaciju, preciznost i učinkovitost u svim fazama projekta, od ideje do realizacije. [16] .

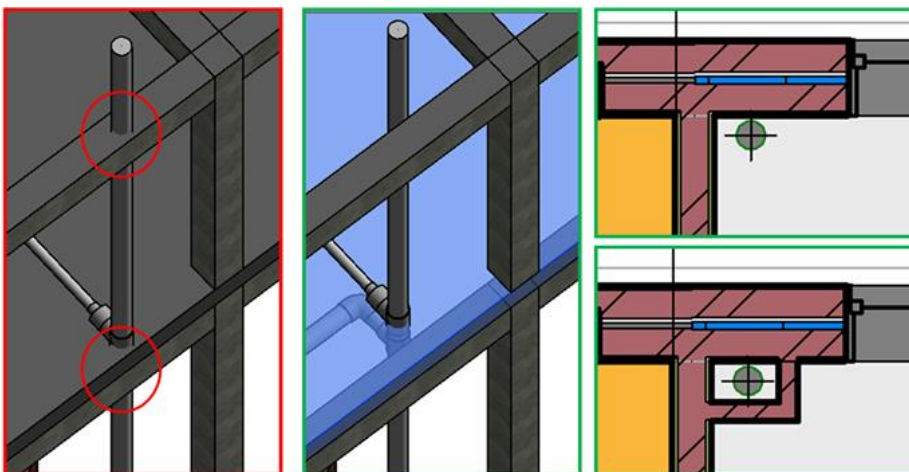
U tradicionalnoj metodologiji građevinskih radova često se odvijaju dizajnerske greške koje utječu na izvođenje. BIM model omogućuje rješavanje ovih problema pružanjem mogućnosti

za paralelni rad. Trodimenzionalna vizualizacija omogućuje cjelovit pregled cijelog gradilišta, što olakšava trenutno prikazivanje različitih presjeka zgrada, elevacija i planova. Ovo pomaže u boljoj koordinaciji između različitih timova i bržem otkrivanju potencijalnih grešaka ili neusklađenosti prije nego što dođe do faze izvedbe. Koordinacija mehaničkih, elektro i vodovodnih (MEP) sustava predstavlja izazov u tehničkim projektima. Pronalaženje konflikata ključan je dio dizajnerskog procesa. Pri modeliranju, nije prisutan samo jedan, već više modela koji se integriraju kako bi se stvorio potpun digitalni prikaz projekta. Svaka specijalizacija (strukturno inženjerstvo, MEP inženjerstvo, zaštita okoliša itd.) ima svoju 3D komponentu koja se mora precizno uklopiti kako bi se formirao cjelovit digitalni model projekta. Za primjer je uzeta zgrada na dva kata. Prvo je stvoren arhitektonski 3D/BIM model korištenjem Revita, uz podršku AutoCAD crteža. Zatim je dodana strukturna komponenta modela. Treći korak obuhvaća dodavanje MEP komponente, što je bilo moguće zahvaljujući arhitektonskom modelu kao osnovi. Međutim, strukturna komponenta nije bila vidljiva prilikom modeliranja MEP sustava. Nakon što su se preklapale MEP i strukturne komponente, korisnik je mogao uočiti sukobe i pronaći odgovarajuća rješenja koristeći Revit. Konflikti se mogu podijeliti na fizičke konflikte i konflikte pravila. Fizički predstavljaju geometrijska preklapanja između 3D objekata, primjerice, kada se ventilacijski kanal sudara s gredom. Konflikti pravila su složeniji jer ovise o specifičnim zahtjevima i pravnim standardima. Riječ je o konfliktu koji se javlja kada objekti i njihova pravila nisu u skladu s propisima. Na primjer, hodnik koji je preuzak ne zadovoljava standarde za pristup osobama s invaliditetom. Ti konflikti se mogu otkriti pomoću BIM alata za modeliranje i BIM alata za integraciju. U prvom slučaju provjera je ograničena jer, kada se u 3D modelu integriraju različite komponente, to možda neće biti uspješno zbog ograničene kompatibilnosti većine BIM softvera ili složenosti različitih dijelova modela. U drugom slučaju, provjera konflikta obavlja se koristeći BIM vizualizacijske alate poput Navisworks Manage iz Autodesk, Solibri Model Checkera i Tekla BIM sighta. Ovi softveri omogućuju korisnicima da uvezu 3D modele iz različitih izvora i analiziraju sukobe unutar cijelog integriranog modela. U ovom primjeru analiziran je konflikt između cijevi za distribuciju vode i konstrukcijskog stupa. Većina pronađenih konflikata odnosi se na ovaj tip sudara između cijevi i stupova. [4]



Slika 1: Konflikt stupa i cijevi za vodoopskrbu (izvor: *Alcínia Zita Sampaio, BIM as a Computer-Aided Design Methodology in Civil Engineering, Journal of Software Engineering and Applications, 2017.*)

Na slici se primjećuje cijev za toplu vodu kako prelazi preko stupa. Za rješavanje ovog problema, početni MEP model je prilagođen. Slično tome, cijev za hladnu vodu također predstavlja težak sukob jer prelazi preko stupa dijelom svoje trase. Nakon što je problem identificiran, korisnik treba izvršiti ispravak u Revitu, tako što će okrenuti stup iznutra. Drugi konflikt odnosi se na ventilacijski otvor i gredu. Kako bi se riješio ovaj problem, cijeli cijevovod je pomaknut, a oko okomite cijevi je napravljen tanak zid kako bi se sakrila. [4]



Slika 2: Konflikt između cijevi i grede (izvor: *Alcínia Zita Sampaio, BIM as a Computer-Aided Design Methodology in Civil Engineering, Journal of Software Engineering and Applications, 2017.*)

3. GRAĐEVINSKI ROBOTI

Automatizacija i primjena robotike u građevinarstvu sve više zanimaju građevinsku zajednicu posljednjih godina jer se time može povećati produktivnost i smanjiti broj ozljeda ili smrtnih slučajeva na gradilištima. Zadaće koje se često ponavljaju i zahtijevaju puno fizičkog rada, poput zidanja, bojanja, utovara, skidanja i ravnjanja tla ili drugih materijala, mogu se automatizirati, pri čemu se smanjuje potreba za radnom snagom i povećava sigurnost. Za razliku od robotskih sustava koji se koriste u tvornicama ili proizvodnji, građevinski roboti se suočavaju s puno složenijim uvjetima. Dok su tvornice obično kontrolirana i stabilna okruženja, gradilišta su dinamična i nepredvidiva, što znači da unaprijed definirane radnje možda neće uvijek biti primjenjive. Gradilišta se stalno mijenjaju, pa roboti moraju biti sposobni prepoznati promjene u okolini i prilagoditi se tim promjenama. Uz to, građevinski zadaci uključuju mnogo različitih varijabli, kao što su različiti materijali i različiti redosljedi izvođenja radova, što dodatno komplicira kontrolu robota. Upravljanje građevinskim robotima zahtijeva puno ručnog rada za programiranje njihovih pokreta i putanja. Zbog tih izazova teško je implementirati potpuno autonomni robotski sustav u građevinarstvu. Kako bi se razvili autonomni robotski sustavi koji mogu obavljati specifične zadatke, potrebne su napredne tehnologije poput prikupljanja podataka i strojnog učenja, čime se smanjuje potreba za ljudskim uputama i intervencijama. Da bi robot uspješno obavio građevinske zadatke, mora biti sposoban prepoznati i identificirati materijale na različitim dijelovima gradilišta jer se građevinski materijali ne donose robotima već ih oni moraju pronaći. Ovo uključuje i sposobnost prilagodbe stvarnom obliku i položaju obradaka, tj. komada materijala kojima je potrebna daljnja obrada za dobivanje finalnog proizvoda. To zahtijeva da robot bude sposoban manevrirati gradilištem i pronaći točne materijale na temelju njihove lokacije. Građevinski materijali često imaju nepravilnosti i deformacije zbog svoje veličine i svojstava. Ove nepravilnosti mogu otežati prepoznavanje i obradu materijala. U proizvodnji se često koristi registracija kompletnih 3D CAD modela kako bi se odredio točan položaj materijala koji se obrađuje. To znači da se stvarni objekt uspoređuje s njegovim digitalnim modelom kako bi se odredila njegova pozicija u prostoru. Ovaj pristup nije uvijek učinkovit u građevinskim zadacima jer materijali na gradilištu često odstupaju od svojih originalnih dizajniranih oblika. Unatoč izazovima, postoje metode koje koriste podatke i informacije o stvarnom stanju obratka i uspoređuju ih s registriranim modelima. Ove tehnike pomažu u određivanju točnog položaja materijala u odnosu na ono kako je dizajnirano. Za složenije zadatke, gdje su materijali nepravilni ili komplicirani, razvijeni su sustavi koji koriste

napredne senzore i algoritme. Ovi sustavi uspoređuju podatke prikupljene sensorima s modelima kako bi se osigurala preciznost pri obavljanju zadataka. Za precizno prepoznavanje položaja i geometrije obrataka, koriste se i različite vizijske tehnike. To uključuje metode poput fiducijalnih markera, stereo slika, detekcije rubova i laserskog skeniranja. Fiducijalni markeri su vizualne oznake postavljene u okruženju koje omogućuju robotima da postave točne putanje i manevriraju oko objekta. Međutim, ovaj pristup zahtijeva da se okolina opremi markerima, što može biti nepraktično u stvarnim građevinskim uvjetima. Stereo slike mogu pomoći u 3D rekonstrukciji objekata jer ta tehnika koristi dvije kamere za dobivanje 3D prikaza, no učinkovitost i točnost algoritma ograničavaju mogućnost prepoznavanja različitih oblika i materijala. Detekcija rubova može identificirati jednostavne oblike, kao što su žice, međutim nije dovoljno precizna za složenije geometrije objekata. Lasersko skeniranje podrazumijeva korištenje laserskih senzora za prikupljanje podataka o oblaku točaka koji predstavljaju oblik objekta. Robotski bager može prilagoditi svoje planove prema topologiji tla i položaju kamiona koristeći laserske daljinomjere. Slično tome, robot može prilagoditi izgradnju zida od blokova prema visini zida pomoću 2D laserskog skeniranja. Međutim, podaci dobiveni laserskim skeniranjem mogu biti masivni i nisu uvijek lako klasificirani. Nakon što su materijali pripremljeni, sljedeći korak u robotskoj operaciji je izraditi plan kako će robot izvršiti zadatak. To uključuje definiranje putanje i pokreta koje robot treba slijediti. Umjesto da se manualno programira svaki detalj plana i putanje, što može biti dugotrajno i komplicirano, mogu se koristiti tehnike strojnog učenja. Ove tehnike omogućuju robotu da autonomno nauči kako najbolje izvršiti zadatke. Među različitim metodama strojnog učenja, učenje kroz pojačanje (RL) je posebno relevantno za robotske pokrete i kontrolu. Time robot isprobava različite pristupe, uči iz rezultata svojih akcija i postupno poboljšava svoje ponašanje kako bi pronašao najbolji način za postizanje ciljeva. Iako je učenje kroz pojačanje značajno unaprijedilo razne aspekte robotike, primjena za građevinske robote još uvijek je ograničena i uglavnom se koristi za jednostavne radnje poput hvatanja objekata, manipulacije objekata u ruci, otvaranje vrata i gradnje jednostavnih struktura. [5]

3.1. Podjela radova

Rad s robotima u građevinarstvu može se podijeliti na radove na gradilištu, proizvodnju izvan gradilišta i aditivnu proizvodnju. Robotska tehnologija koristi se za zamjenu ljudskog rada na gradilištu u zadacima koji su fizički zahtjevni, opasni i koji se ponavljaju, kao što su zidanje, inspekcija infrastrukture i čišćenje visokih zgrada. Robotska tehnologija se koristi za zidanje još od 1990-ih godina. Ovi roboti mogu obavljati zadatke kao što su podizanje cigli, nanošenje vezivnog materijala i izgradnja zidova. Nedavno su ovi sustavi postigli visok stupanj automatizacije, što znači da roboti sada mogu samostalno obavljati cijeli proces zidanja. Inspekcija strukturne stabilnosti infrastrukture, kao što su mostovi, tuneli ceste i sl., važan je, ali naporan i potencijalno opasan zadatak za ljude. Robotske tehnologije su stoga široko prihvaćene za obavljanje ovih inspekcija. Razvijeni su razni roboti, uključujući podvodne robote i robote na kotačima, koji su specijalizirani za inspekciju mostova i drugih građevina. Ovi roboti mogu raditi na različitim površinama, uključujući čelik, i omogućavaju pregled i procjenu bez potrebe za ljudskom intervencijom. Nadalje, čišćenje visokih zgrada opasan je za radnike i pješake pa su razvijeni roboti kao rješenje za ove probleme, pružajući sigurniju alternativu. Primjerice, postoje roboti koji su specijalizirani za čišćenje fasada, prozora visokih zgrada i solarnih panela. Iako su roboti postali dovoljno napredni da obavljaju ove zadatke, većina ih je još uvijek dizajnirana za obavljanje samo jednog specifičnog zadatka. To znači da su trenutni robotski sustavi relativno ograničeni kada je riječ o rješavanju složenih operacija na gradilištu koje zahtijevaju obavljanje više različitih zadataka u istom okruženju. Proizvodnja van gradilišta odvija se u tvornicama gdje se građevinski dijelovi proizvode i sastavljaju prije nego što se dopreme na gradilište. U takvim uvjetima primjena robotike povećava učinkovitost i kvalitetu te smanjuje rizike za radnike. Primjena robotike u betonskoj proizvodnji uključuje razne procese, kao što su čišćenje i iscertavanje, postavljanje i uklanjanje oplata, proizvodnja armature, izolacija, širenje betona i oblaganje. [6] Garg i Kamat su radili na razvoju tehnologije koja omogućava virtualno prototipiranje u procesu proizvodnje betonskih struktura. To znači da prije nego što se fizički izrade čelične rešetke koje se koriste za ojačavanje betona, stvaraju se digitalni modeli tih kaveza u računalnom okruženju. Ti modeli pomažu inženjerima da unaprijede dizajn i identificiraju potencijalne probleme prije nego što započnu fizičku proizvodnju. Kavezi od armature se zatim izrađuju pomoću robota koji precizno postavlja čelične šipke prema dizajnu. Ova metoda omogućava veću preciznost i učinkovitost u usporedbi s tradicionalnim metodama. [17] Reichenback i Kromoser [18] su se bavili implementacijom robotike u

cijelom procesu proizvodnje betona. To može uključivati razne zadatke, kao što su precizno miješanje betona, automatsko lijevanje u kalupe, ili čak automatsko skidanje kalupa i obrada površine betona što povećava učinkovitost, dosljednost i sigurnost u proizvodnji. Robotika u montaži čeličnih konstrukcija također nudi brojne prednosti. Liang i njegov tim [19] razvili su robotizirani sustav za montažu koji koristi robotske ruke za postavljanje i sastavljanje čeličnih konstrukcija u tvornici. Proces montaže uključuje rotaciju, poravnanje, pričvršćivanje vijcima i istovar. Robotske ruke rotiraju čelične komponente kako bi ih pravilno postavile za montažu i poravnavaju te komponente kako bi bile u ispravnom položaju za pričvršćivanje. Nakon poravnanja, roboti pričvršćuju dijelove zajedno pomoću vijaka. Na kraju, sastavljeni dijelovi se istovaruju s linije montaže, spremni za transport na gradilište. Drvene komponente su lagane i lako se manipuliraju pomoću robota, a istraživanja su pokazala da robotska ruka može obaviti niz različitih zadataka, poput zakivanja lameliranog drva. Robotska ruka može koristiti različite alate, kao što su hvataljka, vakuum i zakivač, što joj omogućava obavljanje niza različitih proizvodnih zadataka s drvenim konstrukcijama. Ova fleksibilnost omogućava robotu da preuzme više funkcija i smanji potrebu za ljudskom intervencijom. Razvijen je i postupak koji obuhvaća cijeli proces montaže drvenih konstrukcija, počevši od dizajna i simulacije pa sve do stvarne robotske montaže reverzibilne drvene konstrukcije. To su konstrukcije koje se mogu lako rastaviti i ponovno sastaviti, što omogućava fleksibilnost u upotrebi i recikliranju materijala. Unatoč svim prednostima, glavni izazov izvan-lokacijske proizvodnje leži u činjenici da se proizvedene komponente moraju transportirati na gradilište. Budući razvoj u ovom području mogao bi uključivati postavljanje robotskih platformi za proizvodnju u blizini gradilišta kako bi se smanjila potreba za transportom i poboljšala učinkovitost cijelog procesa. Aditivna proizvodnja omogućuje izradu 3D objekata izravno iz digitalnih modela bez potrebe za međukoracima, što optimizira dizajn i smanjuje otpad. Koristi za izradu građevinskih komponenti od betona, metala i drugih materijala, kako na gradilištima tako i u kontroliranim tvornicama. Međutim, suočava se s izazovima poput ograničene veličine ispisanih objekata, nedostatka regulativa i potrebe za dodatnim vještinama radnika. [6]

3.2. Implementacija robota u građevinarstvu

U građevinarstvu se sve više koriste autonomni strojevi, poput autonomnih bagera, koji mogu obavljati složene zadatke bez potrebe za stalnim nadzorom ljudi. Ovi strojevi koriste napredne senzore poput LiDAR-a, kamera i GPS-a kako bi razumjeli okolinu i manevrirali kroz teške terene. Zahvaljujući sposobnosti da stvore 3D karte gradilišta u stvarnom vremenu, autonomni bageri mogu brzo i precizno iskopavati rovove i postavljati temelje. To smanjuje pogreške i osigurava da iskopavanje bude precizno prema projektnim zahtjevima, što povećava kvalitetu gradnje i smanjuje potrebu za dodatnim radom, štedeći tako vrijeme i novac. Ovi autonomni strojevi mogu raditi u opasnim uvjetima, poput nestabilnih tla ili blizine drugih građevina, čime se smanjuje rizik za ljudske radnike. Bageri bez vozača već korišteni u velikim građevinskim projektima, gdje su dokazali svoju učinkovitost i sposobnost da brzo završe zadatke. Tvrtke poput Built Robotics razvile su ovu tehnologiju i pokazale njenu primjenjivost u stvarnim uvjetima. Iako autonomni bageri imaju veliki potencijal, postoji potreba za daljnjim istraživanjima kako bi se poboljšala njihova suradnja s drugim autonomnim strojevima na gradilištu i sposobnost prilagodbe složenim geološkim uvjetima. Uvođenje robota za automatizirano polaganje betona predstavlja značajan napredak u građevinarstvu. Ovi roboti koriste napredne senzore, poput laserskih skenera i kamera, kako bi precizno izlivali i distribuirali beton na gradilištu. Roboti mogu postići visoku razinu preciznosti i ujednačenosti pri postavljanju betona, osiguravajući da je beton pravilno raspoređen prema projektnim zahtjevima. Ovo smanjuje mogućnost pogrešaka, smanjuje otpad materijala, i time snižava troškove gradnje. Ovi roboti mogu raditi u teškim ili opasnim uvjetima, kao što su mala i nepristupačna gradilišta, gdje bi rad ljudskih radnika bio opasan ili nemoguć. To povećava sigurnost na gradilištu i omogućava gradnju na mjestima koja su inače teško dostupna. Roboti mogu raditi neprekidno bez umora, što omogućava brže postavljanje betona nego ručne metode. Njihovi precizni pokreti osiguravaju ujednačenu i glatku završnu obradu betona, smanjujući potrebu za dodatnim radom i ubrzavajući cjelokupan proces gradnje, čime se štedi na radnoj snazi. Automatizacija postavljanja betona također pomaže u rješavanju problema nedostatka kvalificirane radne snage u građevinskom sektoru. Roboti mogu preuzeti fizičke zadatke postavljanja betona, dok se ljudski radnici mogu fokusirati na nadzor i kontrolu kvalitete. Iako su ovi sustavi pokazali velik potencijal, još uvijek postoje izazovi koje treba riješiti. To uključuje poboljšanje koordinacije između više robota na gradilištu, prilagodbu promjenjivim uvjetima na terenu, i osiguranje da betonske mješavine budu kompatibilne s automatiziranim sustavima. Roboti za zavarivanje

postali su ključna tehnologija u proizvodnji čeličnih konstrukcija zbog svoje preciznosti i učinkovitosti. Ovi roboti koriste napredne senzore, poput vizijskih sustava i laserskog praćenja, kako bi precizno identificirali i pratili spojeve koje treba zavariti. To osigurava visoku kvalitetu zavora, što je važno za dugotrajnost i čvrstoću građevinskih konstrukcija. Korištenje ovih robotskih sustava smanjuje vrijeme potrebno za zavarivanje i troškove rada, jer roboti mogu raditi brže i preciznije od ljudi. Također, smanjuje se vjerojatnost grešaka, što znači manje potrebe za popravcima i povećava se ukupna učinkovitost gradnje. Zavarivanje može biti opasno zbog visokih temperatura i korištenja plinova. Roboti omogućuju da ljudski radnici budu udaljeni od tih opasnih uvjeta, smanjujući rizik od ozljeda. Iako su robotski sustavi već vrlo napredni, istraživanja se nastavljaju kako bi se dodatno poboljšale njihove mogućnosti. Cilj je razviti bolje algoritme za kontrolu i koristiti umjetnu inteligenciju kako bi roboti učili iz svojih prijašnjih iskustava, čime bi se još više poboljšala kvaliteta zavora i učinkovitost procesa. [7]

3.3 Dronovi

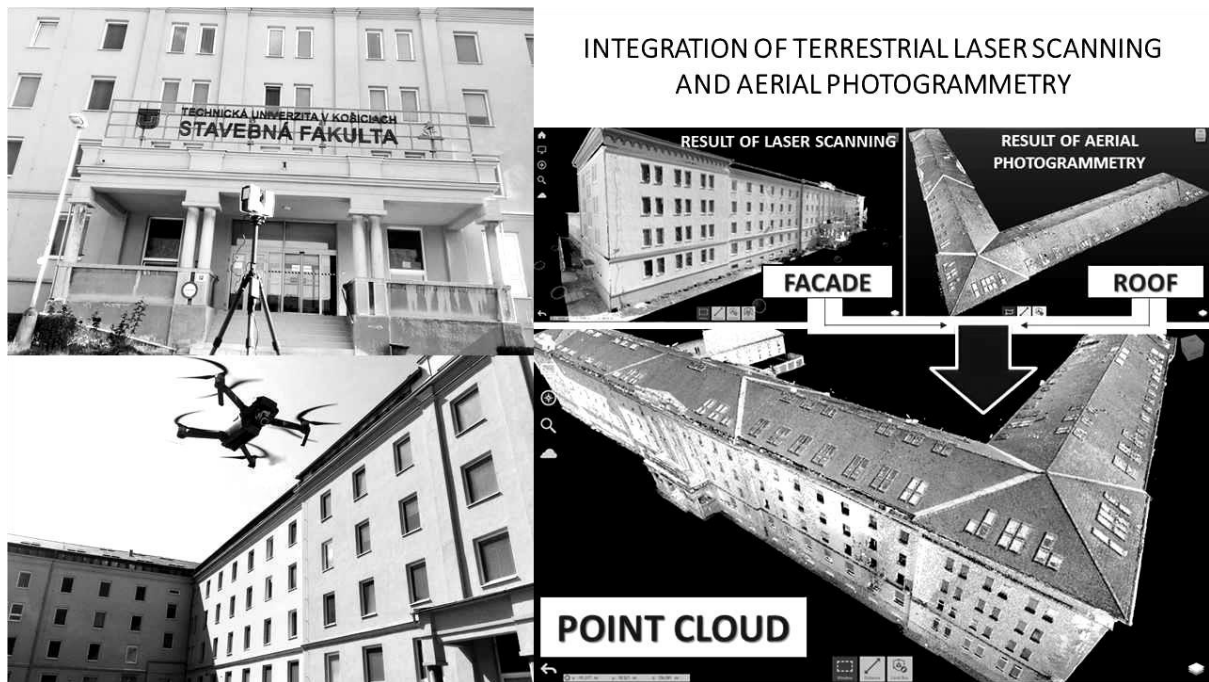
Dronovima ili bespilotnim letjelicama brzo i efikasno se snima gradilište s različitih visina pri čemu se prikupljaju podaci o građenju. Opremljeni kamerama i senzorima prikupljaju informacije o terenu i topografiji što olakšava stvaranje digitalnih modela terena nužnih za planiranje i projektiranje. Praćenje sigurnosti na gradilištu u stvarnom vremenu uz pomoć dronova omogućuje prepoznavanje mogućih opasnosti što pomaže u sprječavanju nesreća radnika. Pomoću njih mogu se istražiti opasna i nepristupačna mjesta. Zahvaljujući dronovima, praćenje inventara i materijala na gradilištima postaje preciznije, što dovodi do bolje kontrole zaliha i manjeg gubitka resursa. Dobiveni snimci mogu se koristiti za marketing, dokumentiranje projekta, prikazivanje napretka gradnje i privlačenje mogućih ulagača. [8]

Dronove možemo podijeliti po različitim kriterijima, kao što su namjena za fotografiranje, zračno mapiranje, nadzor itd. Međutim, najpreciznija podjela temelji se na vrsti zračne platforme koju koriste. Tom klasifikacijom prikazujemo 4 glavne vrste: dronovi s fiksnim krilima, višerotorski dronovi, jednokrillni dronovi i hibridni dronovi. Najčešći u upotrebi su višerotorski dronovi. Rotori dronovima omogućavaju njihovo letenje, upravljanje, stabilnost i sposobnost nošenja dodatne opreme. Razlikuju se prema broju rotora: trokraki, četverokraki, heksokraki i oktokraki. Imaju nedostatak u pogledu vremena leta i brzine, što ih čini manje prikladnima za obavljanje zračnog mapiranja velikih područja kao što su cjevovodi, ceste, dalekovodi, autoceste i sl. Mogu ostati u zraku samo između 20 i 30 min prije nego što moraju sletjeti zbog potrebe za ponovnim punjenjem ili zamjenom baterija. Dronovi s fiksnim krilima djeluju slično kao putnički avioni, koristeći fiksna krila za stvaranje uzgona. Za razliku od višerotorskih dronova, troše energiju samo za napredovanje, a ne za održavanje leta u zraku. Zbog toga su pogodni za topografsko mapiranje velikih područja i mogu pokriti velike udaljenosti. Međutim, njihov glavni nedostatak je što nisu sposobni za stacionarno lebdjenje na jednom mjestu, što ih ograničava u izvođenju detaljnog zračnog mapiranja. Jednokrillni dronovi mogu ostati duže u zraku od višerotorskih dronova jer su opremljeni benzinskim motorima. Ovi dronovi su idealni kada je potrebno nositi teži teret ili kada je potrebno kombinirati dugotrajnost leta s napredovanjem u letu. Njihov nedostatak je veća složenost, viši troškovi, vibriranje te zahtjevi za intenzivnijim mehaničkim održavanjem. Dronovi s fiksnim krilima su energetske efikasniji od četverokrillnih dronova te brže pokrivaju

velike udaljenosti. S druge strane, četverokrilni dronovi su manji i zahtijevaju manje prostora za uzlet i slijetanje. Kombiniranjem tih karakteristika nastali su hibridni dronovi koji mogu vertikalno poletjeti, a zatim preći u horizontalan let koristeći krila. Hibridni dron leti duž unaprijed određene rute na visini koju je korisnik odredio, sakupljajući informacije koristeći svoje senzore. Kada završi s misijom, dron će se vertikalno spustiti natrag na početnu lokaciju za slijetanje. [9]

3.3.1 Primjena u građevinarstvu

Pristup krovu zgrade često je složen i može zahtijevati postavljanje skele, ljestava ili drugih pomagala, što može biti opasno i zahtjevno po pitanju vremena i novca. Korištenje dronova u ovim situacijama može smanjiti troškove, povećati sigurnost i uštedjeti vrijeme. Zračno mapiranje zgrade mora snimiti vertikalne i kose zračne fotografije. Vertikalne snimke krova dobivaju se na način da dron leti u paralelnim linijama iznad krova. Svaka od tih linija, ili letnih traka, malo se preklapa s prethodnom kako bi se osiguralo da su svi dijelovi krova snimljeni bez praznina između snimaka što omogućuje detaljnu i cjelovitu zračnu fotografiju. Kose zračne snimke snimaju se pod kutom kako bi se jasno vidjela fasada zgrade. Za razliku od vertikalnih snimaka koje se često rade automatski, ove kose snimke su snimljene ručno. To znači da pilot upravlja dronom i kamerom ručno oslanjajući se na svoje vještine i iskustvo kako bi dobio željene snimke. Topografske karte su korisne za identifikaciju grešaka u građevinskom dizajnu koje se ne slažu s terenom. Njihovo izrađivanje je skupo i zahtijeva puno vremena, stoga je korištenje dronova u ovakvim situacijama efikasno; brzo prikupe velike količine podataka i smanjuju troškove. Također, od snimaka dronova mogu se kreirati 3D modeli površine i terena. Dronovi se koriste za česte inspekcije gradilišta, što omogućuje brzu integraciju podataka u projekte i precizno praćenje napretka gradnje s minimalnim zakašnjenjem. Ova tehnologija pomaže građevinskim tvrtkama da učinkovitije upravljaju vremenom i resursima, smanjujući potencijalne probleme i kašnjenja. Inspekcija dronovima omogućuje identifikaciju problema na gradilištu i osigurava da se projektni ciljevi ostvaruju prema planu. Osim što štedi vrijeme i novac, upotreba dronova smanjuje rizike za zdravlje i sigurnost, omogućujući detaljnu dokumentaciju i brzu razmjenu visokokvalitetnih podataka unutar tima projekta. Praćenje opreme i automatizacija predstavljaju izazov za svakog voditelja projekta na gradilištu zbog potrebe za upravljanjem raznovrsnim tablicama i dokumentima, što zahtijeva značajno vrijeme i pažnju. Korištenjem drona, isti upravitelj može odmah utvrditi je li oprema na pravom mjestu tijekom leta drona, što omogućuje brzu identifikaciju eventualnih nepravilnosti poput opreme koja je završila rad, ali još uvijek se nalazi na gradilištu, čime se sprječava nepotrebno produženje najma i dodatni troškovi. Fotografsko mjerenje dronom može se kombinirati s laserskim skeniranjem. Na idućoj slici prikazan je primjer integracije tih dviju tehnologija. [9]



Slika 3: Povezivanje laserskog skeniranja s tla i zračne fotogrametrije (izvor: Matúš Tkáč, Peter Mésároš, Utilizing drone technology in the civil engineering, Journal of civil engineering, 2019.)

Zadatak mjerenja zgrade podijeljen je u dva dijela. Prva faza predstavlja lasersko skeniranje cijele fasade zgrade s tla, a druga zračnu fotogrametriju cijelog krova zgrade. Fotogrametrija je znanstvena disciplina koja koristi fotografije za mjerenje i analizu objekata i prostora. Temelji se na načelu da se iz više fotografija snimljenih s različitih kutova može rekonstruirati trodimenzionalna informacija o predmetima ili terenima. Proces obrade podataka nakon mjerenja dijeli se na tri etape. Prvi dio obuhvaća stvaranje dva skupa točaka korištenjem različitih tehnologija putem odgovarajućih softverskih alata. Druga faza je usmjerena na integraciju lokalnih koordinatnih sustava iz tih skupova točaka u zajednički koordinatni sustav, što je ključno za spajanje i usklađivanje podataka. Posljednja faza uključuje konačno povezivanje oba skupa točaka na temelju zajedničkog koordinatnog sustava, kako bi se dobila cjelovita slika prostornih informacija o zgradi. Dobivene informacije o geometriji mogu se koristiti kao osnova za daljnje CAD ili BIM modeliranje u sklopu novih projekata prema izgrađenom stanju. Dronovi mogu biti korišteni za snimanje termografskih slika raznih dijelova zgrada kako bi se identificirala područja s gubitkom topline. Ove slike omogućuju inženjerima da otkriju hladne točke, tj. probleme s izolacijom ili druge građevinske nedostatke poput otkrivanja prodiranja vode, curenja, mjesta s plijesni i sl. Takve površine prikazuju se kao tamnoplave na termografskom zaslonu. [9]

3.4. Izazovi i moguća rješenja

U građevinskim projektima, radni uvjeti i okruženje mogu biti nepredvidivi. To znači da roboti često moraju donositi odluke u situacijama gdje stvari ne idu po planu. Trenutno postojeće metode planiranja za autonomne robote ne uzimaju dovoljno u obzir ove neizvjesnosti, što otežava robotu da se prilagodi promjenama i neočekivanim situacijama. Pouzdanost robotskih sustava predstavlja još jedan problem jer kada jedan robotski zadatak ne uspije, to može utjecati na sljedeće zadatke. Nadalje, građevinski zadaci zahtijevaju precizno pozicioniranje, što je lakše postići za robote koji su stacionarni. Međutim, mobilni roboti nemaju tu prednost jer se kreću, pa moraju koristiti vanjske sustave praćenja kao što su kamere ili GPS kako bi se točno pozicionirali. Korištenje vanjskih sustava praćenja dodatno povećava složenost i troškove te mogu biti podložni kvarovima ili smetnjama, što može dovesti do grešaka u pozicioniranju i, posljedično, do problema u građevinskim procesima. Napredak u umjetnoj inteligenciji za robote smanjio bi navedene probleme i značajno poboljšao njihove sposobnosti i učinkovitost. Roboti koji koriste AI mogu analizirati velike količine podataka i prilagoditi svoje aktivnosti u stvarnom vremenu. To im omogućuje da bolje obavljaju zadatke, budu precizniji i smanje pogreške. Također, mogu predvidjeti buduće probleme i izazove u građevinskim projektima. Ova sposobnost omogućava im da djeluju unaprijed, rješavajući potencijalne probleme prije nego što postanu ozbiljni, čime se smanjuje rizik od kašnjenja i poboljšava uspješnost projekta. AI roboti mogu poboljšati način na koji se koriste materijali, smanjiti količinu otpada i umanjiti štetne učinke građevinskih projekata na okoliš. Ovo pomaže u primjeni ekološki prihvatljivijih metoda i učinkovitijem korištenju resursa. Međutim, trenutna istraživanja ukazuju na nekoliko problema u primjeni AI tehnologije poput visokih početnih troškova za implementaciju AI-a, nedostatak stručnjaka koji razumiju i mogu raditi s AI tehnologijama, problemi povezani s sigurnošću podataka i mogućim kvarovima senzora zbog povezanosti u mreži i sl. U budućnosti, napredak u ovom području unaprijedit će robote u građevinarstvu, dovodeći do novih inovacija i poboljšanja u načinu na koji se građevinski projekti planiraju i izvode. Još jedan od izazova s kojim se robotu suočavaju je taj što različiti roboti imaju različite fizičke karakteristike koje ih ograničavaju u obavljanju svih faza građevinskog procesa. Zbog toga je potrebno poboljšati svestranost robota, koristiti više različitih robota za različite zadatke ili kombinirati rad robota i ljudi. No, zajednički rad više robota i rad robota i ljudi na gradilištu je još nedovoljno istraženo područje i izazov je kako optimalno organizirati taj rad. Zbog toga se razvija se koncept rojevske robotike, gdje bi mnogi roboti radili zajedno kao tim na građevinskim

projektima. Rad u rojevima omogućava bolju komunikaciju i raspodjelu poslova. Ovaj pristup ubrzava građevinske projekte jer roboti istovremeno rade na različitim zadacima, smanjujući zastoje i ubrzavajući radove. Omogućena je i veća prilagodljivost na gradilištu. Ukoliko dođe do nepredviđenih situacija, roboti u roju mogu brzo promijeniti plan rada i prilagoditi se novim uvjetima. Također, ova tehnologija smanjuje rizik od zastoja u projektu jer, ako jedan robot ima problem, drugi roboti mogu preuzeti njegov posao i osigurati da radovi idu dalje bez prekida. Osim toga, rojevska robotika omogućava bolju suradnju između robota i ljudi. Ljudi i roboti mogu raditi zajedno u timovima, koristeći svoje jedinstvene vještine kako bi se međusobno nadopunjavali. To rezultira većom produktivnošću i sigurnošću na gradilištu, te pokazuje kako napredna robotika može transformirati tradicionalne građevinske procese. [7] [10]

4. 3D PRINTANJE

3D printanje ili aditivna proizvodnja je tehnologija kojom se trodimenzionalni objekt stvara sloj po sloj na temelju digitalnog modela. Prvo se izradi traženi 3D objekt u AutoCAD-u . Potom softver reže taj model na 2D slojeve i preoblikuje ih u niz strojnih uputa da bi pisac mogao izvršiti ispis. Najčešće korišteni materijali kod građevinskih 3D printera su betonski materijali, no uz njih se koriste još i polimeri i metali. Smjesa betona za 3D printanje najčešće je na bazi cementa i ima nisku viskoznost i visoku granicu tečenja. Filament betona zagrijava i istiskuje se kroz mlaznicu printera sloj po sloj te tako nastaje 3D element. Polimeri su često korišteni materijali u printanju zbog toga što nisu skupi i lako su dostupni, no s njima se uglavnom izrađuju samo fasade i mehanički, električni sustavi zbog njihove lake zapaljivosti. Vatrootpornost im se može povećati stvaranjem pora unutar materijala i dodavanjem materijala koji sporije gore. 3D printanje metalnih materijala dijeli se na tehnologiju taloženja praha (PBF) i tehnologiju usmjerene deponacije energije (DED). PBF tehnologijom metalni prah se sinterira i povezuje laserom. Nakon što se svaki sloj skenira, posteljica praha se spušta za debljinu jednog sloja, a zatim se na vrh dodaje novi sloj pomoću valjka. DED tehnologija, kao i PBF, koristi laser za povezivanje metalnog praha, ali se razlikuje po tome što se prah dodaje na glavu za deponiranje na kojoj se nalazi laser. [11]

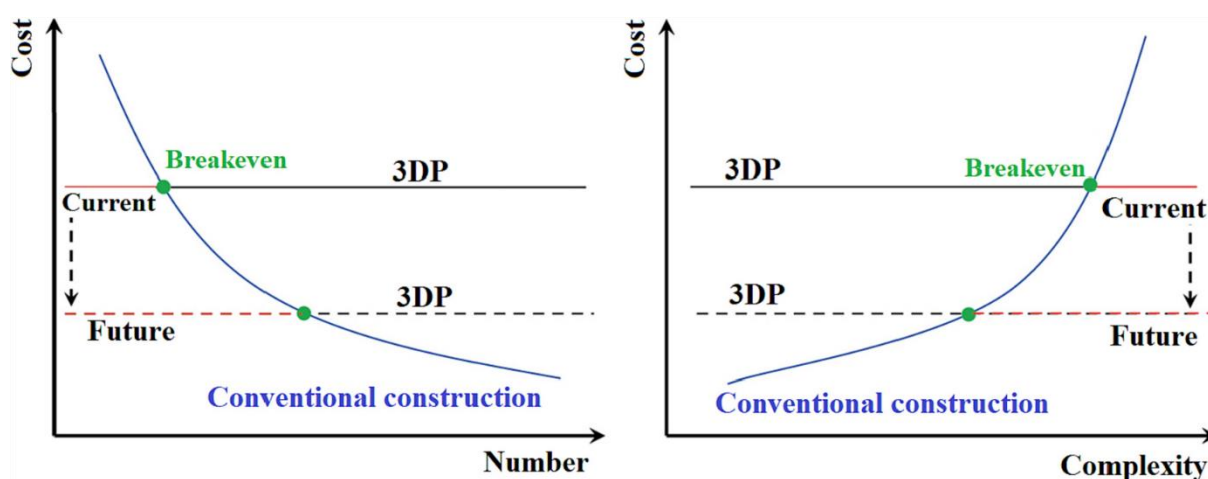
Prednost ove tehnologije je brže i produktivnija gradnja, dok je mana nemogućnost korištenja vertikalnih i punih armiranih šipki što uzrokuje smanjenu čvrstoću tih struktura. Prije se ova metoda koristila samo za hitnu gradnju, dok se danas 3D printanje koristi za izradu zgrada, a prvi veliki uspjesi zabilježeni su u Kini, gdje je tvrtka Shanghai WinSun izgradila petokatni stambeni blok i seosku vilu koristeći ovu tehnologiju. Koristeći mješavinu cementa, staklenih vlakana i drugih materijala, uspjeli su postići značajne uštede u materijalima i vremenu izgradnje, smanjujući broj potrebnih radnika i rizik od ozljeda. [12]

4.1. Postupak dobivanja 3D printa

Prvi korak je izrada trodimenzionalnog modela u BIM-u. Ti podaci se pretvaraju u odgovarajući kod za 3D ispis, najčešće uporabom STL formata. STL označava stereolitografiju, metodu 3D printanja. Taj format je odličan za ispis složenih oblika, aproksimirajući površine modela trokutima. Uglavnom se koristi za izradu prototipova, a ne finalnih proizvoda jer ima ograničene mogućnosti kada se radi o teksturi i boji. STL datoteka otvara se u softveru za pripremu modela za 3D printanje. Jedan od primjera tih računalnih programa je Ultimaker Cura. Tu se model postavlja unutar prostora 3D printera nakon čega dolazi do izrade G koda. G kod je programski jezik koji služi za upravljanje radom 3D pisača. Prije početka printanja, može se izvesti probno koristeći već postojeći G kod. Time unaprijed znamo vrijeme printanja i možemo ukloniti eventualne pogreške koje bi se možda pojavile. G kod se proizvodi postupkom horizontalnog rezanja slojeva modela koji se zatim ispunjavaju po stvorenoj putanji alata. Istovremeno, odgovarajući softver, u ovom slučaju navedeni Ultimaker Cura, računa potrebnu količinu materijala za printanje. G kod datoteka prenosi se na 3D pisac pomoću USB-a te kreće ispis. [13]

4.2. Prednosti i nedostaci 3D printanja

3D printanjem postiže se puno veća brzina gradnje nego kod tradicionalnih metoda. Ta prednost može biti iznimno važna kod slučajeva gdje je kratak vremenski rok gradnje i velika potražnja. 3D pisac proizvodi materijale točno kada su potrebni čime se smanjuju troškovi skladištenja i transporta materijala te nema čekanja njihove isporuke. Uz to su smanjeni i troškovi rada jer je za rukovođenje printerom uglavnom potrebna samo jedna osoba. S druge strane nabava i transport opreme za 3D printanje je poprilično skupa i materijali moraju ispunjavati određene kriterije pa problem može predstavljati njihova ograničena dostupnost. Ako se gradnja odvija u udaljenim područjima, a lokalni materijali ne ispunjavaju potrebne specifikacije, transport potrebnih materijala povećava troškove i smanjuje ekonomsku učinkovitost 3D printanja. Sljedećim grafovima prikazana je usporedba troškova konvencionalne proizvodnje i proizvodnje 3D printanjem.



Slika 4: Usporedba troškova tradicionalne proizvodnje i troškova proizvodnje 3D printanjem u odnosu na broj izvedbi odn složenost strukture (izvor: Milad Bazli, Hamed Ashrafi, Ali Rajabipour, Cat Kutay, *3D printing for remote housing: Benefits and challenges, Automation in Construction*, 2023.)

U tradicionalnoj metodi gradnje, što se više jedinica proizvode, troškovi po jedinici padaju, ali se zato povećavaju s većom složenošću proizvoda. Nasuprot tome, cijena 3D ispisa obično ostaje konstanta bez obzira na broj proizvedenih jedinica. U budućnosti se očekuje napredak u tehnologiji 3D printanja čime bi se smanjili troškovi čineći tu metodu još konkurentnijom u proizvodnji. Pri tome treba napomenuti da je to gruba procjena jer razni faktori mogu utjecati na troškove projekta poput vrste materijala, dostupnost, transport, složenost printera i sl.

3D ispis daje i veće mogućnost u geometriji i dizajnu od tradicionalnih metoda. Kompleksne, zakrivljene zgrade koje su zahtjevne za izgradnju drugim načinima mogu se jednostavno izraditi 3D ispisom. Jedan od primjera ove visoke geometrijske slobode 3D ispisom je kuća u Danskoj izgrađena bez pravih linija izuzev vrata i prozora. [14]



Slika 5: Kuća u Danskoj sa zakrivljenim 3D printanim zidovima (izvor: Milad Bazli, Hamed Ashrafi, Ali Rajabipour, Cat Kutay, 3D printing for remote housing: Benefits and challenges, Automation in Construction, 2023.)

Ispisane površine međutim nisu toliko glatke kao površine betona dobivene tradicionalnim kalupljenjem. Također veličina komore 3D printera značajno ograničava maksimalne dimenzije dizajna. Dodatni izazov predstavlja nedostatak pravila i standarda za korištenje 3D printanja. Trenutni arhitektonski sustavi nisu prikladni za 3D printanje jer ne udovoljavaju potrebnim građevinskim standardima zbog čega je potrebno razviti novi dizajnerski sustav koji će biti prilagođen specifičnostima 3D printanja. Građenje ovom tehnologijom je ekonomski prihvatljivije zbog manje količine otpada u odnosu na standardnu gradnju. Razlog tome je korištenje točno onoliko materijala koliko je potrebno za dobivanje određenog proizvoda. Također materijali koji se koriste kod 3D ispisa mogu biti reciklirani. Provedeno

istraživanje gdje se Portland cement zamijenio geopolimerima kao materijalom za ispis, time se pokazalo da se oslobodi za 80% manje stakleničkih plinova što rezultira manjim oslobađanjem ugljikovog dioksida. [14] Zbog toga je smanjena potrošnja energije, a povećana učinkovitost gradnje. Primjerice, prethodno navedena kuća u Danskoj ima zidove izolirane recikliranim celuloznim vlaknima, a betonska smjesa za gradnju sadržavala je reciklirane materijale poput keramičkih . Nekorištenje oplata u ovoj tehnologiji, također predstavlja ekološku korist. Zbog toga se smanjuje opasnost od nezgoda tijekom montaže i demontaže oplata, skraćuje se vrijeme i manji su troškovi gradnje vezani uz prijevoz oplata, te je potreban manji broj radnika na gradilištu. Eliminiranjem radnika s gradilišta iz rizičnih područja i automatizacijom određenih građevinskih zadataka, aditivna proizvodnja predstavlja sigurnije građenje od standardne. Izazov predstavlja i pronalaženje općeg pristupa za izradu strukturnih elemenata dovoljne čvrstoće i duktilnosti. Uzimajući u obzir postojeće materijale za printanje, trenutna tehnologija ne preporučuje se za izradu objekata velikih dimenzija zbog loše stabilnosti i čvrstoće. Stoga jedan od glavnih ciljeva predstavlja postizanje visoke čvrstoće na tlak, vlak i savijanje. Budući da se elementi izrađuju slobodno, bez kalupa, potrebno je nisko skupljanje jer bi u protivnom voda brže isparila iz betona i nastale bi pukotine. Što se tiče otpornosti, 3d printani beton je manje otporan na cikluse smrzavanja i otapanja te na prodiranje kloridnih iona u usporedbi s kalupljenim betonom, ali bolje podnosi napade sulfata i proces karbonizacije. Uzimajući u obzir sve navedenog, dugotrajna izdržljivost velikih 3D printanih konstrukcija u agresivnim uvjetima može biti izazovna i zahtjeva temeljito ispitivanje prije nego što se odluči za ovu tehnologiju gradnje.

[14]

4.3. Usporedba izgradnje kuće 3D printanjem i tradicionalnom gradnjom

Za primjer je uzeta prizemna kuća dimenzija 10x10 m, površine oko 100 m². Nisu uzeti u obzir troškovi za zemljane radove jer se u oba slučaja gradnje odvijaju isto te troškovi za postavljanje instalacija. Pri tome treba istaknuti kako 3D printer može ispisati zidove s otvorima za cijevi i ožičenje. Tradicionalnim načinom gradnje zidovi visine 3 m izgrađeni su od pravokutnih blokova od porobetona. Blokovi se povezuju ljepilom, a vanjski zidovi se izoliraju mineralnom vunom. Kao materijal za oblaganje koristi se keramički granit. Tlo je izravnavano i zbijeno, nakon čega se postavljaju trupci koji se oslanjaju na temelje, a na njih se postavljaju daske. Potom se provodi hidroizolacija i izolacija poda. Potkrovlje se prekriva lameliranim gredama nakon čega se izvodi izolacija za toplinu i zvuk. Pokrov krova izgrađen je od metala. Gradnjom 3D printerom zidovi se ispisuju sloj po sloj. Prvo se nanosi svaki sloj duž konture, a zatim se unutar šupljine nosivih zidova nanosi materijal u obliku cik-cak rešetke kako bi se pojačala čvrstoća i stabilnost konstrukcije. Uzdužna armature postavlja se kroz svakih 10-16 slojeva, a poprečna svakih 50 cm nakon svakih 40 cm visine. Najprije se ispisuju zidovi, nakon čega slijedi ugradnja montažnih podnih ploča, a krajnja faza je nanošenje brtvi. Ovakva gradnja zahtijeva samo 2 radnika, upravljača 3D printera i jednog pomoćnika. Za izračun troškova rada i vremena gradnje korištene su prosječne cijene na tržištu. Tablicom u nastavku prikazana je usporedba troškova i vremena gradnje konvencionalnom metodom i 3D ispisom. Prosječna cijena 3D printera je oko 20 400 €. Iz rezultata se vidi da se 3D printanjem štedi 3 774 € po objektu pa se može zaključiti da će se printer isplatiti nakon printanja 6 objekata. [12]

Tablica 1 Usporedba troškova i vremena gradnje tradicionalnom metodom i 3D ispisom (izvor: Alexandra Shatornaya, Maria Chislova, Marina Drozdetskaya, Irina Ptuhina, Efficiency of 3D printers in Civil Engineering, Construction of Unique Buildings and Structures, 2017.)

Faze izgradnje	Troškovi materijala, rub		Troškovi rada, rub		Trajanje izgradnje, dani	
	Porobetono	3D printer	Porobetono	3D printer	Porobetono	3D printer
Oplata	30.940	4.000	9.896	2.445	2,8	0,50
Zidovi	345.873	6.877	31.462	10.038	10,5	3
Temelj	111.419	76.965	44.184	4.202	14,07	8,42
Izolacija	200.191		120.000		10	
Pod	185.742		50.800		10	
Preklapanje	121.304		21.600		7	
Krov	180.645		204.880		22	
Zbroj	1.145.174	832.724	472.925	411.520	53,2	40,1
Ukupan trošak	Porobetono	1.618.099		Ukupno trajanje		
	3D printer	1.244.244				
Ušteda troškova, %	23,1		Ušteda vremena, %		24,6	

5. BUDUĆNOST DIGITALNE TRANSFORMACIJE U GRAĐEVINARSTVU

Budućnost digitalne transformacije u građevinarstvu može se protumačiti kroz tri vizije koje pružaju uvid u to kako bi se različiti tehnološki pristupi mogli primijeniti u stvaranju inovativnijih i učinkovitijih građevinskih rješenja. Iako su različitih fokusa, međusobno se nadopunjuju te ilustriraju kako budućnost građevinskog sektora može ovisiti o kombinaciji različitih digitalnih tehnologija. Vizija učinkovite gradnje usredotočena je na optimizaciju procesa izgradnje kroz korištenje naprednih tehnologija i standardizacije, čime se postiže brža i učinkovitija realizacija građevinskih projekata. U ovoj budućnosti, ključnu ulogu ima *Building Information Modeling* (BIM), koji omogućuje potpunu digitalizaciju informacija te olakšava suradnju među svim sudionicima. Osim toga, primjenom umjetne inteligencije i automatizacijom gradnje inženjeri bi brže analizirali različite opcije dizajna i rasporeda gradnje, čime se optimizira cijeli proces od početka do kraja. Također, modularnom gradnjom i prefabrikacijom elemenata izvan gradilišta dodatno se skraćuje vrijeme montaže i smanjuje potreba za fizičkim radom na licu mjesta, čime se poboljšava sigurnost radnika. U konačnici, ova vizija omogućuje građevinskim tvrtkama da kroz dugoročne modele suradnje i digitalne alate kontinuirano poboljšavaju učinkovitost ne samo na razini pojedinačnih projekata, već i na razini zbirke svih projekata na kojima tvrtka radi. Vizija izgrađenog okruženja vođenog korisničkim podacima donosi radikalnu promjenu u pristupu projektiranju i održavanju građevinskih objekata. Umjesto tradicionalnog oslanjanja na standardne građevinske propise, naglasak je stavljen na korištenje podataka prikupljenih iz stvarnog korištenja prostora. Integracija IoT senzora omogućuje kontinuirano prikupljanje informacija o obrascima ponašanja korisnika, kao i o uvjetima okoliša poput kvalitete zraka ili potrošnje energije. Prikupljeni podaci omogućuju preciznije i personalizirano projektiranje, čime se strukture optimiziraju prema specifičnim potrebama korisnika. Ovakav pristup dodatno podupire održivost, jer podaci omogućuju smanjenje energetske potrošnje te smanjenje negativnog utjecaja izgrađenih objekata na okoliš. Uz to, korištenje naprednih tehnologija poput virtualne i proširene stvarnosti doprinosi boljoj interakciji između projekatanta i korisnika, omogućujući im aktivno sudjelovanje u procesu dizajna kroz vizualizaciju projekata u ranoj fazi. Ova vizija naglašava kako će podaci i tehnologija igrati ključnu ulogu u budućnosti izgrađenih okruženja, čineći ih pametnijima i prilagođenima stvarnim potrebama ljudi. Vizija računalnog dizajna vođenog vrijednostima stavlja naglasak na

korištenje naprednih računalnih alata i tehnologija u procesu projektiranja, omogućujući simulacije koje pomažu stručnjacima da donesu bolje odluke o dizajnu građevinskih objekata. Umjesto tradicionalnog pristupa, ova vizija predviđa potpunu digitalizaciju građevinskih projekata, uz pomoć alata temeljenih na umjetnoj inteligenciji. Strukture se projektiraju prilagođeno specifičnim potrebama, pri čemu se različite opcije mogu testirati u simulacijama prije nego što se započne s fizičkom gradnjom. Ovaj pristup također uključuje stvaranje digitalnih blizanaca koji omogućuju gotovo paralelno razvijanje digitalne i fizičke infrastrukture, omogućujući građevinskim tvrtkama da simuliraju različite scenarije, od transportnih uzoraka do evakuacijskih planova. Kroz ove alate moguće je precizno modelirati ponašanje korisnika, što dodatno smanjuje potrebu za njihovim uključivanjem u fazu projektiranja. Zahvaljujući ovim inovacijama, građevinski projekti mogu se lakše prilagoditi promjenjivim uvjetima, što omogućuje veću fleksibilnost u donošenju odluka sve do trenutka gradnje. Opisane vizije ne isključuju se međusobno i iako mogu funkcionirati samostalno, pojedini njihovi elementi mogu biti komplementarni. Na primjer, senzorski podaci iz druge opisane mogu obogatiti dizajnerske simulacije u treće opisanoj viziji. Teško je zamisliti realizaciju bilo koje vizije bez nekih aspekata drugih vizija, budući da su mnoge tehnološke inovacije međusobno povezane. Primjerice, korištenje virtualne stvarnosti opisano u gotovo je nezamislivo bez prethodnog stvaranja BIM modela. Također, stvaranje digitalnog blizanca grada zahtijeva ogromne količine podataka koje osigurava druga vizija. Iako bi se na prvi pogled činilo privlačnim objediniti ove tri vizije u jednu cjelovitu viziju budućnosti, važno je prepoznati da je svrha ovih vizija istražiti kako se različiti trendovi međusobno nadopunjuju ili sukobljavaju, uzimajući u obzir neizvjesnosti koje nosi budućnost. [15]

6. ZAKLJUČAK

Digitalna transformacija je ključni čimbenik u modernizaciji građevinske industrije, omogućujući poboljšanje efikasnosti, produktivnosti i održivosti. Uvođenje novih tehnologija poput BIM-a, umjetne inteligencije, 3D printanja i automatizacije značajno je promijenilo način na koji se planiraju, projektiraju i izvršavaju građevinski projekti. Ovi alati ne samo da olakšavaju suradnju između različitih sudionika u projektu, već i smanjuju mogućnost grešaka te doprinose smanjenju troškova i vremena izgradnje. Međutim, proces digitalne transformacije u građevinarstvu nije bez izazova. Najveći izazovi uključuju otpor prema promjenama, nedostatak potrebnih vještina među radnom snagom i visoke početne troškove implementacije novih tehnologija. Građevinske tvrtke moraju ulagati u edukaciju svojih zaposlenika kako bi osigurale učinkovitu upotrebu novih alata i tehnologija. Također, potrebna su veća ulaganja u istraživanje i razvoj kako bi se osigurala integracija različitih tehnologija i platformi. Unatoč ovim izazovima, digitalna transformacija dugoročno nudi brojne prednosti. Smanjenje troškova, povećanje produktivnosti, poboljšanje sigurnosti na gradilištu te smanjenje utjecaja na okoliš samo su neke prednosti koje donose digitalne tehnologije. Na globalnoj razini, građevinarstvo koje prihvati digitalizaciju bit će u boljoj poziciji da se prilagodi novim tržišnim uvjetima te odgovori na sve strože ekološke standarde. U konačnici, digitalna transformacija građevinarstva ima potencijal da značajno promijeni način na koji projektiramo, gradimo i održavamo objekte, čineći ih pametnijima, sigurnijima i održivijima. Kako se industrija bude dalje razvijala, bit će ključno osigurati da svi sudionici, od arhitekata i inženjera do izvođača radova i klijenata, u potpunosti razumiju i koriste prednosti koje digitalne tehnologije nude. Kroz učinkovitu implementaciju, digitalna transformacija može postati temelj budućih građevinskih projekata, osiguravajući bolji i održiviji životni prostor za generacije koje dolaze.

7. LITERATURA

- [1] Luka Raguž, Mladen Radivojević, Milica Tepšić, Negovan Stamenković, Cariša Bešić, Postizanje efikasnijeg rada građevinskih preduzeća uz primjenu inteligentnih informacionih sistema u realnom vremenu, Poslovne studije, 2022.
- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/Building_information_modeling
- [3] Filip Andabaka, Zlata Dolaček-Alduk, Anton Ecimović, Dražen Galić, Mirko Grošić, Martina Pavlović Cerinski, Denis Šimenić, Hrvoje Šolman, Smjernice za BIM pristup u infrastrukturnim projektima, Hrvatska komora inženjera građevinarstva, 2021.
- [4] Alcínia Zita Sampaio, BIM as a Computer-Aided Design Methodology in Civil Engineering, Journal of Software Engineering and Applications, 2017.
- [5] Borja García de Soto, Xinghui Xu, On-site Autonomous Construction Robots: A review of Research Areas, Technologies, and Suggestions for Advancement, Proceedings of the 37th ISARC, 2020.
- [6] Bo Xiao, Chen Chen, Xianfei Yin, Recent advancements of robotics in construction, Automation in Construction, 2022.
- [7] Yuming Liu, Alias A.H., Nuzul Azam Haron, Bakar N.A., Hao Wang, Robotics in the Construction Sector: Trends, Advances, and Challenges, Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2024.
- [8] Nikola Novaković, Davor Radivojević, Digitalizacijom do vještačke inteligencije u građevinskih preduzećima, Aktualnosti, 2024.
- [9] Matúš Tkáč, Peter Mésároš, Utilizing drone technology in the civil engineering, Journal of civil engineering, 2019.
- [10] Hadi Ardinya, Stefan John Witwickib, Francesco Mondadac, Are Autonomous Mobile Robots Able to Take Over Construction? , International Journal of Robotics, 2015.
- [11] Md. Hazrat Ali, Gani Issayev, Essam Shehab, Shoaib Sarfraz, A critical review of 3D printing and digital manufacturing in construction engineering, Rapid Prototyping Journal, 2022.
- [12] Alexandra Shatornaya, Maria Chislova, Marina Drozdetskaya, Irina Ptuhina, Efficiency of 3D printers in Civil Engineering, Construction of Unique Buildings and Structures, 2017.

- [13] Vjekoslav Vujanić, Zlata Dolaček-Alduk, Digitalna prezentacija modela građevine, SKEI-međunarodni interdisciplinarni časopis, 2023.
- [14] Milad Bazli, Hamed Ashrafi, Ali Rajabipour, Cat Kutay, 3D printing for remote housing: Benefits and challenges, Automation in Construction, 2023.
- [15] Sidsel Nymark Ernsten, Jennifer Whyte, Christian Thuesen, Anja Maier, How Innovation Champions Frame the Future: Three Visions for Digital Transformation of Construction, Journal of Construction Engineering and Management, 2020.
- [16] <https://www.autodesk.com/products/revit/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>
- [17] Akash Garg, Vineet R. Kamat, Virtual prototyping for robotic fabrication of rebar cages in manufactured concrete construction, Journal of Architectural Engineering, 2013.
- [18] Sara Reichenbach, Benjamin Kromoser, State of practice of automation in precast concrete production, Journal of Building Engineering, 2021.
- [19] Ci-Jyun Liang, Shih-Chung Kang, Meng-Hsueh Lee, RAS: a robotic assembly system for steel structure erection and assembly, International Journal of Intelligent Robotics and Applications, 2017.