

Primljen / Received: 1.8.2022.

Ispravljen / Corrected: 28.12.2022.

Prihvaćen / Accepted: 9.2.2023.

Dostupno online / Available online: 10.6.2023.

Organizacija građevinskog projekta za tehnologiju 3D ispisa

Autori:



Nikola Špiček, MBA

BMW Group, Njemačka / Alma Mater Europaea ECM
nspicek11@hotmail.com

Autor za korespondenciju



Prof.dr.sc. **Mladen Radujković**, dipl.ing.građ.

Alma Mater Europaea ECM, Slovenija
mladen.radujkovic@almamater.si



Prof.dr.sc. **Mirosław J. Skibniewski**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Maryland, College Park, SAD
mirek@umd.edu

Pregledni rad

Nikola Špiček, Mladen Radujković, Mirosław J. Skibniewski

Organizacija građevinskog projekta za tehnologiju 3D ispisa

Integracija tehnologije trodimenzionalnog (3D) ispisa u građevinske projekte potencijalno donosi mnoge prednosti kao što su smanjeni zahtjevi za radnom snagom na gradilištu, sigurnije upravljanje projektnim rokovima i budžetom te učinkovitije gospodarenje otpadom. Međutim, zamah tehnologije još uvijek nije prema očekivanjima zbog nedostatka standardiziranih procesa i metodologija, ali i zbog izazova koje nameće nova tehnologija. Organizacijsku strukturu takvih projekata potrebno je sveobuhvatno proučavati. Ova studija nudi pregled postojećih studija i triju različitih studija slučaja u Njemačkoj, Ujedinjenome Kraljevstvu i Sjedinjenim Američkim Državama u cilju istraživanja primarne razlike između uloga, odgovornosti i interakcija ključnih sudionika projekta unutar organizacijske strukture građevinskih projekata u sklopu kojih se primjenjuje tehnologija 3D ispisa. Razmatraju se uloge i odgovornosti klijenata/investitora, voditelja projekta/voditelja izgradnje, arhitekata, građevinskih inženjera, nadzornog inženjera i izvođača/glavnih izvođača. Dakle, moraju se uskladiti sva obilježja uloge ključnih sudionika i odgovornosti stvorenih tom tehnologijom u nastajanju. U suprotnome će kombinacija nove tehnologije i konvencionalne organizacije smanjiti vrijednost koju pruža nova tehnologija.

Ključne riječi:

tehnologija 3D ispisa, organizacijska struktura projekta

Subject review

Nikola Špiček, Mladen Radujković, Mirosław J. Skibniewski

Construction project organisation for 3D printing technology

The integration of three-dimensional (3D) printing technology into construction projects potentially yields many benefits, such as reduced site labour requirements, safer manoeuvring of project deadlines and budgets, and more effective waste management. However, the momentum of technology is not as expected owing to the lack of standardised processes and methodologies, and challenges imposed by the new technology. The organisational structure of such projects must be comprehensively studied. Studies on construction projects using the 3D printing technology are lacking. This study reviews the existing studies and three different case studies in Germany, United Kingdom, and United States of America to explore the primary differences between the roles, responsibilities, and interactions of key project participants within the organisational structure of construction projects using the 3D printing technology. The roles and responsibilities of clients/investors, project manager/construction managers, architects, structural engineers, quantity surveyor/project supervisor, and contractors/main contractors have been considered. Therefore, all features of the role of key participants and responsibilities to the new momentum created by this emerging technology must be aligned; otherwise, the combination of new technology and conventional organisation will reduce the value created by the new technology.

Key words:

3D printing technology, project organisation structure

1. Uvod

Nedavne su studije dokazale da primjena tehnologije trodimenzionalnog (3D) ispisa nudi mnoge prednosti, uključujući smanjenu količinu materijala i smanjenu potrošnju energije [1-4], proizvodnju na licu mjesta s manje zahtjeva za resursima i niže emisije CO₂ tijekom cijelog vijeka trajanja proizvoda [5] u odnosu na one iz konvencionalnih tehnika. Osim toga potiče pozitivne promjene u strukturama rada, uključujući sigurnije radno okruženje, te pomaže u postizanju većeg broja digitalnih i lokaliziranih opskrbnih lanaca [6]. S gledišta arhitekta, tehnologija 3D ispisa može skratiti cikluse dizajna i razvoja te omogućiti klijentima zajednički dizajn proizvoda koji besprijekorno mogu odgovarati njihovim zahtjevima i ambicijama, potičući realizaciju složenih dizajna i brzo upravljanje promjenama dizajna [1-4, 6].

Tehnologija 3D ispisa automatizirana je proizvodna tehnika popraćena kontrolom "sloj po sloj", koja je posljednjih godina poboljšana. Ta se tehnologija već desetljećima primjenjuje u proizvodnoj industriji, a nedavno je primijenjena i u građevinskoj industriji za ispis kuća i vila [7]. Sustavni pregled pokazuje da se poboljšana tehnologija 3D ispisa može primjenjivati za ispis velikih arhitektonskih modela i zgrada [7], no kapacitet te tehnologije ograničen je zbog nemogućnosti izvedbe velikih razmjera, razvoja informacijskog modeliranja zgrade, potrebe za masovnom prilagodbom i troškova vijeka trajanja ispisanih projekata [7].

Iako tehnologija 3D ispisa ima ogroman potencijal, još nije dovoljno usvojena na tržištu [8]. Usprkos tome 3D ispisivanje može se izvanredno primijeniti u građevinskom sektoru jer nudi određene prednosti u odnosu na konvencionalne građevinske tehnologije. Nadalje, preduvjeti su standardizacija procesa, klasifikacija materijala te edukacija gradske uprave i stručnjaka uključenih u izradu dokumentacije za građevinsku dozvolu [9]. Štoviše, primjena tehnologije 3D ispisa mogla bi pozitivno utjecati na neke od ključnih značajki u građevinarstvu kao što su troškovi i vrijeme trajanja projekta [10], opseg troška rada [11-13] te gospodarenje građevnim otpadom i otpadom od rušenja [14]. Naravno, nova tehnologija gradnje ne bi trebala samo unaprijediti procese gradnje, već i pomoći graditeljstvu da se približi aktualnoj paradigmi usklađivanja komponenata ljudi, planeta i dobiti za održivi razvoj.

Mogući je odgovor uključivanje novih tehnologija i rješenja za upravljanje građevinskim projektima. Tehnološka spremnost (TR) očituje se u težnji potrošača da usvoje i primjenjuju inovativne tehnologije za postizanje svojih dnevnih/poslovnih ciljeva [15]. Prihvaćanje nove tehnologije zahtijeva postizanje načela modela prihvaćanja tehnologije, koja pretpostavljaju da na prihvaćanje informacijskog sustava od strane pojedinca snažno utječu percipirana korisnost i percipirana lakoća korištenja [16]. Međutim, s obzirom na to da je građevinarstvo u cijelosti projektno orijentiran sektor, nameću se pitanja kakav je *status quo* u prihvaćanju inovativne tehnologije u organizacijskoj strukturi projekta i na koji to način mijenja samu strukturu, uloge, odgovornosti te interakcije ključnih sudionika takvih projekata.

Pitanje koje ostaje neistraženo jest kako izbjeći scenarije s novom tehnologijom 3D ispisa i postojećom starom organizacijom. Naime, prethodna su iskustva otkrila da velike promjene ili napredak tehnologije zahtijevaju napredak ili prilagodbu organizacije i upravljanja kako bi se iskoristile sve njezine prednosti.

Prema Međunarodnoj organizaciji za normizaciju (ISO), organizacija je privremena struktura koja definira uloge, odgovornosti i ovlasti projekata. Pojedincima se dodjeljuju radna mjesta za specifične uloge u organizaciji projekta. Organizacija projekta treba uspostaviti jasne linije upravljanja i biti odobrena i priopćena svim dionicima projekta [17]. Organizacija projekta treba biti definirana dovoljno detaljno kako bi svatko mogao razumjeti svoju ulogu i odgovornosti te uloge i odgovornosti ostalih kolega. Odgovornosti trebaju biti dosljedne i razumljive tijekom cijelog projekta [17]. Propuštanje bilo kojih pojedinosti može uzrokovati situacije i scenarije koji negativno utječu na projekt i dobivene rezultate. Zato službena metodologija upravljanja projektima koju je izdala Europska komisija (PM²) predlaže jasnu i transparentnu organizaciju projekta s dogovorenim i odobrenom strukturom, ulogama te odgovornostima precizno određenima RASCI matricom [18].

Međutim, uz globalne PM standarde ključni sudionici i njihove uloge, odgovornosti i interakcije unutar građevinskog projekta definirani su u svakoj zemlji nacionalnim/lokalnim zakonodavstvom i/ili propisom. Zahvaljujući specifičnim povijesnim putevima i ekonomskim okvirima postoje velike razlike u propisima i praksama diljem regija i zemalja, a stručnjaci upravljaju svojim ulogama poštujući nacionalne propise i uključujući dokazano globalno znanje. Tijekom provedbe brojnih građevinskih projekata potvrđeno je da to funkcionira, no potrebno je istražiti učinke promjena u građevinskim tehnologijama, tj. učinke 3D ispisa na uloge, odgovornosti i interakcije ključnih sudionika unutar strukture organizacije projekta.

Postojeće studije nisu pružile nikakve relevantne podatke o organizaciji projekta izgradnje za tehnologiju 3D ispisa i zato su u ovoj studiji postojeće studije u cijelosti revidirane, a uspoređeni su i rezultati istraživanja u drugim sektorima koji su prethodno primjenjivali novu tehnologiju. Nadalje, istražene su tri različite opisne, deskriptivne studije slučaja iz Njemačke (3D ispis oplate stuba), Ujedinjenoga Kraljevstva (proizvodnja dijelova zida) i Sjedinjenih Američkih Država (stambena zgrada) te je povučena paralela s pozadinom i zadaćom organizacijske strukture projekta u građevinskim projektima izrađenima konvencionalnom metodom. Cilj je bio istražiti učinak te promjene na članove projektnog tima te njezin učinak na uloge, odgovornosti te interakcije ključnih sudionika građevinskih projekata koji primjenjuju tehnologiju 3D ispisa. Zato je glavno istraživačko pitanje definirano na sljedeći način: na koji se način uloge, odgovornosti i interakcije ključnih sudionika u projektima koji primjenjuju tehnologiju 3D ispisa mijenjaju u odnosu na konvencionalni model. Kako bi se dobio odgovor na to pitanje, navedena su sljedeća tri potpitanja:

1. Što je prethodno utvrđeno u vezi s ulogama, odgovornostima i interakcijama ključnih sudionika u građevinskim projektima u sklopu kojih se primjenjuje tehnologija 3D ispisa?
2. Koji se zaključci o ulogama, odgovornostima i interakcijama ključnih sudionika u projektima u sklopu kojih se primjenjuje tehnologija 3D ispisa mogu izvući u usporedbi s konvencionalnim modelima gradnje?
3. Je li postojeće metode upravljanja projektima/organizacijske strukture projekta potrebno prilagoditi toj novoj tehnologiji?

Rezultati su otkrili da uloge (klijent, voditelj projekta, nadzorni inženjer, statičar, izvođač) znatno utječu na projekte u sklopu kojih se primjenjuje nova tehnologija. Osim toga nova će tehnologija utjecati na povezane poslove, odgovornosti i nadležnosti.

2. Metodologija

Na slici 1. prikazano je da ova studija prvo daje pregled postojećih studija i njihovih ključnih nalaza. Budući da postoji mali broj studija o organizacijskoj strukturi građevinskih projekata u sklopu kojih se primjenjuje tehnologija 3D ispisa, razmatrani su primjeri iz drugih industrija poput informatičke industrije i javnog sektora. Osim toga istraženi su drugi odabrani elementi organizacijske strukture građevinskih projekata kao što su faktori uspjeha, dinamika projektnog tima, radni uvjeti unutar projektnog tima i stres. Ti se nalazi mogu primijeniti na građevinske projekte u sklopu kojih se primjenjuje tehnologija 3D ispisa.

Drugi dio ove studije jesu tri različite studije slučaja temeljene na projektima izvedenim u Njemačkoj (3D ispis oplate za stube), Ujedinjenome Kraljevstvu (proizvodnja dijelova zida) i Sjedinjenim Američkim Državama (stambena zgrada, proučavani su samo na vanjski i unutarnji zidovi). Obavljeni su intervjui s različitim sudionicima projekta, a zaključci su sažeti kombiniranjem projektne dokumentacije kao što su osobna zapažanja nakon razgovora s članovima projektnog

tima i voditeljima. Također, u nekoliko projekata koji su bili u početnoj fazi primjenjivala se tehnologija 3D ispisa. Sjedinjene Američke Države i Kina vodeće su zemlje u kojima se mogu vidjeti slični projekti, a Velika Britanija, Njemačka, Francuska i Italija u Europi te Indija, Japan i Koreja u Aziji djelomično slijede razvijenije zemlje [35].

Ciljani projekti za ovu studiju odabrani su na temelju sličnosti njihove organizacijske strukture primjerene utjecajima različitim praksi i propisa. Svi su nedavno provedeni u razvijenim zemljama kao nositelji trenda, dok je u svim slučajevima tehnologija 3D ispisa prepoznata kao potencijalna alternativa problemima konvencionalnih građevinskih projekata. Posebno su prikazani pregled literature i nalazi, nakon čega su raspravljani rezultati. Na kraju su iznesene pretpostavke, ograničenja i upute za daljnja istraživanja te zaključci.

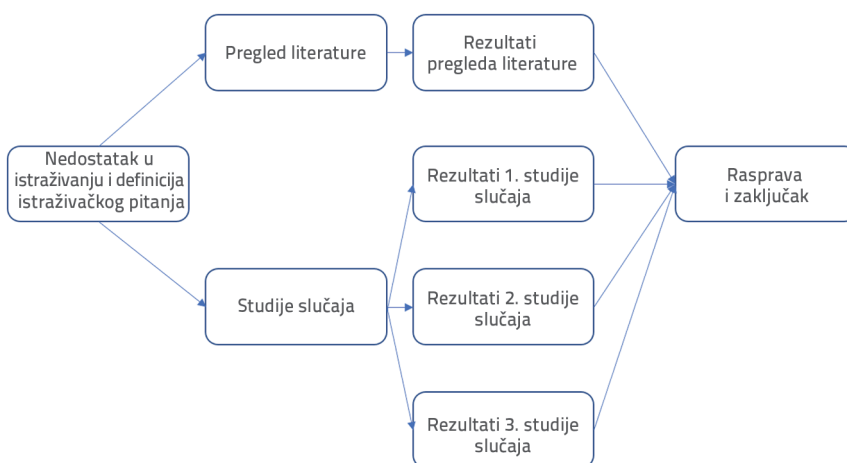
3. Građevinski projekti u sklopu kojih se primjenjuje tehnologija 3D ispisa

3.1. Prednosti, nedostaci, izazovi i ključni čimbenici uspjeha

Tijekom razvoja tehnologije gradnje korištenje montažnih građevina bila je jedna od prekretnica koja je nudila znatna poboljšanja, no ne postoje odgovarajući kriteriji za ocjenu primjenjivosti za određene građevinske projekte [19]. Odluke o korištenju montažnih konstrukcija još uvijek se temelje uglavnom na anegdotskim dokazima ili samo na procjeni koja se temelji na troškovima kada se uspoređuju različite metode gradnje [19]. Ipak, to bi mogao biti važan izvor naučenih lekcija za postojeću tehnologiju 3D ispisa kao što je nedostatak standardizacije, okosnica te referentnih primjera uspješnih građevinskih projekata u sklopu kojih se primjenjivala tehnologija 3D ispisa. Štoviše, tehnologija 3D ispisa se zadnjih godina brzo razvija. Osim toga implementirana je u projekte izgradnje prototipova i mostova [20]. Međutim, nekoliko rješenja koja se temelje na 3D ispisu u fazi su laboratorijskih eksperimenata i zato se mora

ispitati uspješna prilagodba 3D ispisa građevinskoj industriji [20]. Prijavljeno je devet potencijalnih čimbenika i trideset i dva eksperimenta za usvajanje tehnologije 3D ispisa u građevinskim projektima, pri čemu su ključni čimbenici koji jamče uspješnu primjenu tehnologije 3D ispisa u građevinarstvu "kompatibilnost tehnologije", "koristi na strani opskrbe" i "složenost" [20].

Nadalje, potencijalno blisko područje o "aditivnoj proizvodnji" referencira tehnologije koje izrađuju 3D objekte na temelju jednog po jednog superfinog sloja, pri čemu se svaki sljedeći sloj veže za prethodni sloj otopljenog ili djelomično otopljenog materijala.



Slika 1. Dijagram metodologije istraživanja

Postojeće studije primarno razmatraju implementaciju procesa aditivne proizvodnje jer nedostaju sociotehničke studije u tome području [21]. Usredotočuje se na potrebu postojećih i potencijalnih budućih voditelja projekata aditivne proizvodnje da razviju implementacijski okvir koji će usmjeravati njihove napore da usvoje tu novu i potencijalno disruptivnu tehnologiju [21]. Sonar i sur. [22] također su pridonijeli identificiranju čimbenika aditivne proizvodnje iz generičke perspektive, dok čimbenici specifični za kontekst zahtijevaju daljnje istraživanje [22]. Rezultati objavljeni u [21, 22] otkrivaju da je tema uloga, odgovornosti i interakcija ključnih sudionika u građevinskim projektima koji primjenjuju tehnologiju 3D ispisa relativno nova tema.

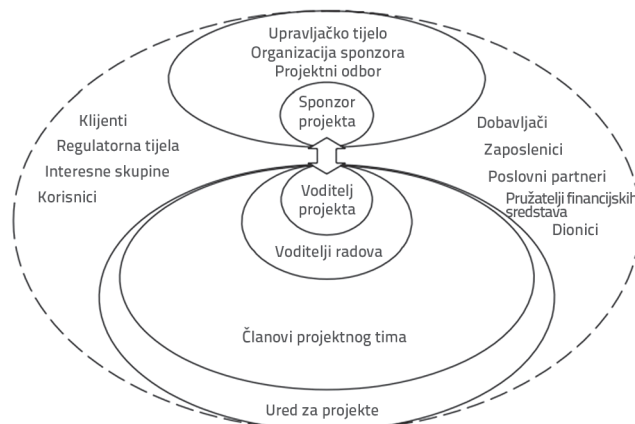
3.2. Suradnja ključnih sudionika građevinskog projekta

Suradnja sudionika projekta u projektima konvencionalne gradnje može se potencijalno prenijeti na projekte u sklopu kojih se primjenjuje tehnologija 3D ispisa. Na primjer, jedna studija identificirala je pokretače, tj. vladajuće čimbenike suradnje [23]. Druga studija istraživala je procese kroz koje su uspostavljene i operacionalizirane vrijednosti koje se odnose na građevinske projekte s obzirom na održivost. [24]. Projektna privremena višestruka organizacija (TMO), kao promjenjiva koalicija s više ciljeva, koja se temelji na moći, potiče fluktuacije u vrijednostima koje se primjenjuju za pokretanje projekta dok se razvija i čini procjenu učinka vrlo izazovnom [24]. S obzirom na to da su vrijednosti definirali ljudi, one su utemeljene u kulturi [24]. Štoviše, razumijevanje kulture kao operativnog konstrukta u sustavu vrijednosti projekta pomaže u istraživanju i razvoju koncepata i praksi povezanih s održivošću građevinskih projekata [24].

Iako učink napredovanja članstva i strukture moći projektnog TMO-a treba ispitati u projektima u sklopu kojih se primjenjuje tehnologija 3D ispisa, kulturni faktori moraju biti uzeti u obzir u sklopu održivosti građevinskih projekata. Osim TMO-a učinak vrijednosti sudionika na održivost izgradnje treba istražiti u projektima u sklopu kojih se primjenjuje tehnologija 3D ispisa. Tehnologija je jedna od ključnih komponenti uspjeha u građevinskim projektima, no čak i posljednje visoke tehnologije ne mogu jamčiti uspjeh. Mnogi praktični dokazi dokazuju da različiti korisnici postižu različite rezultate dok primjenjuju istu tehnologiju koja se bavi ulogom ljudi, njihovim kompetencijama te njihovom organizacijom u projektu. Jedino u scenariju u kojemu moderne tehnologije obuhvaćaju odgovarajuću organizaciju i upravljanje dolazi se do uspjeha na visokoj razini.

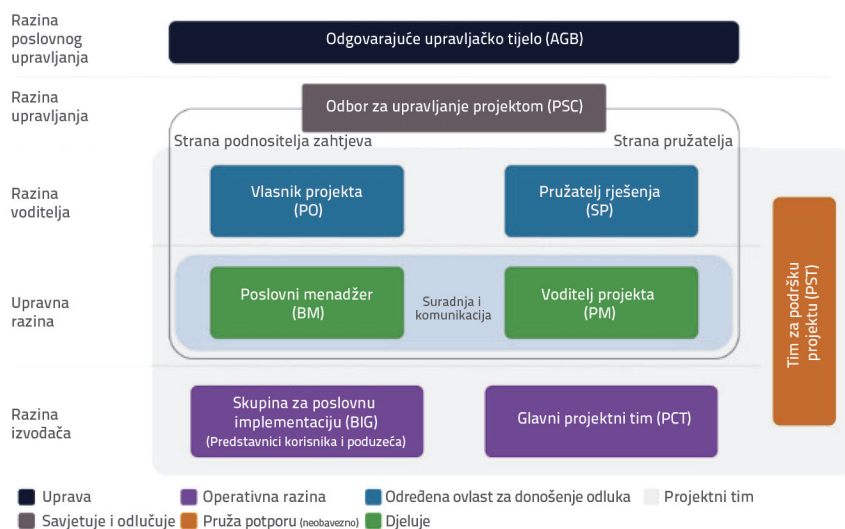
3.3. Uloge, odgovornosti i interakcije ključnih sudionika u organizacijskoj strukturi projekata

Mnogi standardi ili metodologije upravljanja projektima kao što su ISO i PM², odnosno zakoni i propisi zemalja u kojima su se provodile studije slučaja te različiti aspekti postojećih studija analizirani su kako bi se definirale uloge, odgovornosti te interakcije ključnih sudionika u organizacijskoj strukturi građevinskih projekata. Prema ISO-u, jedna osoba ne može preuzeti više od jedne uloge, pri čemu su njezine odgovornosti detaljno opisane [17]. ISO21502:2020 opisuje globalno poznat primjer za organiziranje uloga i odgovornosti sponzora projekta, menadžera, službenika i dionika kao što je to prikazano na slici 2. [17].



Slika 2. Primjer potencijalnih dionika projekta [17]

PM² navodi da postoji jedan projektni tim koji je sastavljen od ljudi koji preuzimaju uloge definirane u izvođenju, upravljanju i usmjeravanju razina, koji moraju raditi skladno kao tim kako bi projekt bio uspješan (PM², 2018). Slika 3. ilustrira organizacijske razine i uloge projekta prema PM²-u. Bliska suradnja i komunikacija između voditelja poslovanja (BM) i voditelja projekta (PM) najvažniji su za uspjeh projekta (PM², 2018).



Slika 3. Organizacija projekta: slojevi i uloge [18]

Organizacijska struktura te ključne uloge i odgovornosti prepoznati su kao ključni element uspješnog upravljanja projektima. Unatoč varijacijama strukturalnoga grafa (na slikama 2. i 3.) detaljnija analiza može potvrditi usklađenost u ključnim konceptima i načinu razmišljanja, dok se detalji mogu prilagoditi u odnosu na značajke projekta i okruže.

Što se tiče zakona pojedinih zemalja, njemački zakon može se podijeliti na privatno i javno pravo, koja se razlikuju u pravnim načelima i ovlastima, pri čemu pravo uređuje pravne odnose između ravnopravnih pravnih subjekata i ima zadaću štiti pravne interese pojedinca [25]. To čini Građanski zakonik (BGB), u kojemu se navodi da su osim arhitekata i inženjera u izgradnju uključeni mnogi drugi sudionici [25]. Među ostalim dionicima u građevinskim projektima sudjeluju vlasnik/klijent, arhitekt i razni inženjeri specijalisti, uključujući statičare, inženjere za tehničku opremu zgrada, inženjere za zvučnu izolaciju i akustiku prostorija, inženjere za građevinske i prometne sustave, inženjere za geotehniku i geodete [25].

Za razliku od Njemačke, gdje je pravo kodificirano i zato postoji jedinstveno i opće pravo o ugovorima o gradnji koje je regulirano zakonom u BGB-u i konkretizirano uz pomoć VOB/B-a, usporediva pravna osnova za ugovore u građevinskoj industriji u cijelosti nedostaje u Engleskoj [25]. Ipak, naručitelji, projektanti, izvođači i drugi uključeni u građevinske radove imaju dužnosti prema Uredbi o gradnji (projektiranju i upravljanju) (CDM 2015.) [26]. Dionici navedeni u CDM propisima jesu klijent kao osoba za koju se projekt izvodi, glavni projektant kao projektant koji kontrolira fazu prije izrade projekta (imenuje ga naručitelj), projektantska organizacija ili pojedinac koji priprema ili modificira nacrt za građevinski projekt ili angažira ili upućuje drugoga da to učini, glavni izvođač, odnosno organizacija ili pojedinac koji koordinira rad u fazi izgradnje projekta koji uključuje više od jednog izvođača tako da se obavlja na način koji jamči zdravlje i sigurnost, te izvođač radova, odnosno svaka osoba koja neposredno zapošljava ili angažira građevinske radnike ili upravlja gradnjom [26].

Sjedinjene Američke Države imaju tri grane vlasti: sudsku, zakonodavnu i izvršnu. Svaka grana doprinosi zakonima koji reguliraju ugovore o projektiranju i izgradnji [27]. Građevinski projekt može podlijegati različitim zakonima, ovisno o tome je li projekt privatni ili javni, o zemlji u kojoj se projekt nalazi i o vrsti projekta [27]. Građevinsko pravo u Sjedinjenim Američkim Državama područje je prava koje se bavi propisima, smjernicama i zahtjevima u građevinskoj industriji i uključuje elemente ugovornog prava, imovinskog prava, trgovačkog prava, radnog prava i mnogih drugih, gdje

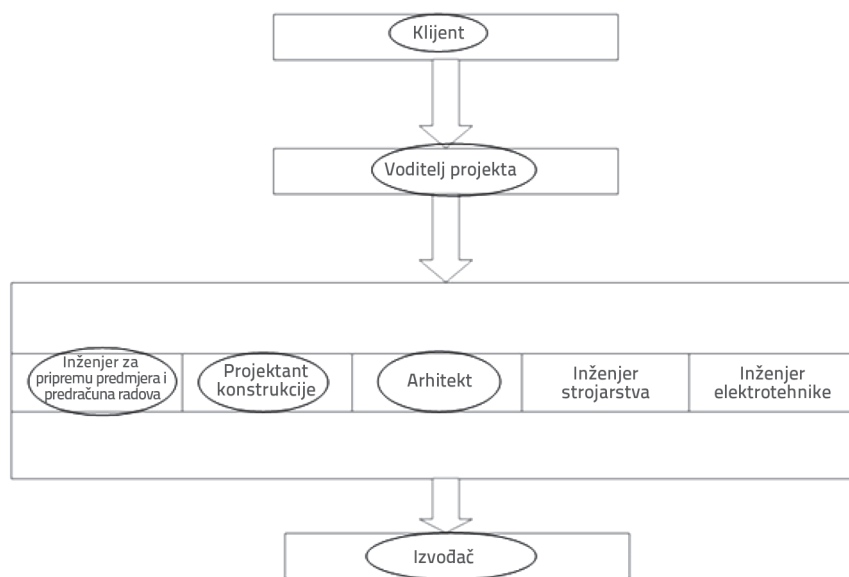
je građevinsko pravo u biti knjižnica propisa koji reguliraju na koji se način građevinski projekt mora izvesti i tko je odgovoran ako nešto pođe po zlu [28]. Prema tumačenju ugovora o izgradnji, sudionici građevinskog projekta jesu vlasnici, arhitekti/inženjeri, voditelji izgradnje, izvođači, podizvođači i dobavljači [29], čije odgovornosti i područja djelovanja ne odstupaju znatno od uloga i odgovornosti opisanih u Njemačkoj i Ujedinjenome Kraljevstvu.

U svim odabranim zemljama ključni sudionici te njihove uloge i odgovornosti okvirno su definirani unutar propisa uz manje varijacije.

4. Studije slučaja

4.1. Istraživački pristup

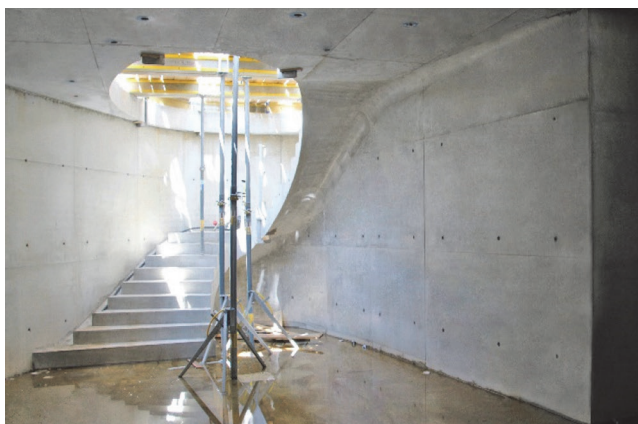
Ključni sudionici građevinskih projekata definirani su onako kako je to prikazano u [30], jer su navedene definicije najbolje odgovarale ključnim sudionicima promatranima u trima studijama slučaja i najbolje su odgovarale konsenzusu za odabrane zemlje i analizirane metodologije. Međutim, promatrani su samo odabrani sudionici prema sljedećemu redosljedu: naručitelj (u daljnjemu tekstu: investitor), voditelj projekta (vođenje građenja), arhitekt, građevinski inženjeri, nadzorni inženjer i izvođač (glavni izvođač) kao što je to prikazano na slici 4. Izostavljeni su inženjeri strojarstva i elektrotehnike jer je njihov rad izveden prema konvencionalnoj metodi gradnje u svima trima studijama slučaja, a njihove uloge, odgovornosti i interakcije s drugim ključnim sudionicima ocijenjene su kao nepromijenjene. Odabir ključnih sudionika projekta na koje se treba usredotočiti primjetan je i u skladu s propisima svake zemlje te procijenjen prema ISO standardima i PM² metodologiji kao što je to opisano u potpoglavlju 3.3.



Slika 4. Tipična struktura tima za konvencionalne građevinske projekte [30]



Slika 5. 3D ispisana oplata stubišta [31]



Slika 6. Izgled stubišta nakon skidanja 3D ispisane oplata [31]

4.2. Opis studija slučaja

4.2.1. Studija slučaja 1: 3D ispisana oplata za stube – Leipzig, Njemačka

Prva studija slučaja razmatra 3D ispis oplata za stube u sklopu izgradnje nove zgrade banke u Leipzigu, u Njemačkoj. Radi se o složenome projektu koji je savršeno prilagođen za integraciju 3D ispisane oplata, čija je krajnja namjena zamišljena kao zakrivljeni luk stubišta predvorja. To je jednoslojna oplata (monolitna konstrukcija).

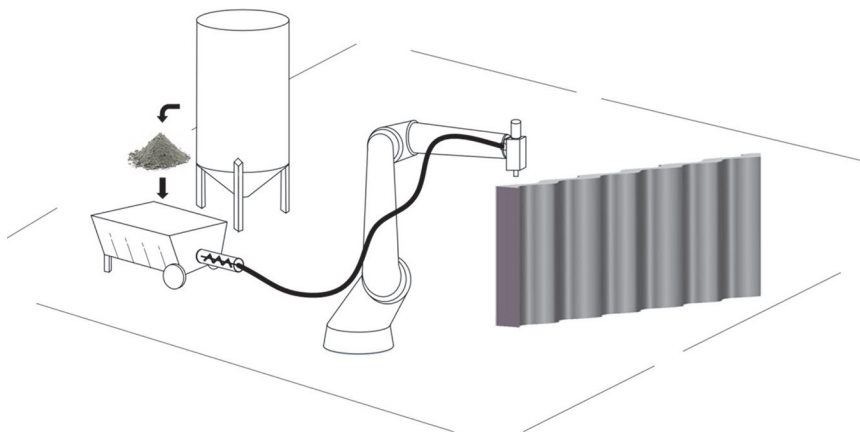
Odlučeno je da će se primjenjivati 3D ispis jer je bila potrebna visokoprecizna oplata kako bi stubište imalo glatku i ravnomjernu krivulju. Budući da dizajn stubišta zahtijeva trostruku zakrivljenost, 3D ispis bio je očiti izbor jer bi konvencionalna proizvodnja takve oplata bila nevjerojatno skupa. Osim toga vjerojatno bi bila postignuta niska razina preciznosti. Alternativan/konvencionalan pristup provedbi projekta bio bi korištenje konvencionalne konstrukcije oplata.

To bi zahtijevalo trake koje je potrebno zalijepiti. S obzirom na vremenske utjecaje, dodatno osiguranje kvalitete omogućio je homogeni sastav materijala. Sedam dijelova obloge izrađeno je od pijeska te s debljinom stjenke od samo 21 mm, postupkom mlaznog praškastog veziva.

Nakon toga su brušeni i obloženi dimenzijama za modeliranje. Također, elementi oplata obojeni su kako bi se zabrtvila površina. Stručnjak tvrtke za 3D ispis kreirao je CAD podatke kao interne podatke. Ispisano je ukupno sedam komponenti, a kao materijal za tiskanje za ispis tih komponenti korišten je pijesak (FDB). Epoksidna smola, brušenje i bojenje primjenjivali su se za završnu obradu. Doradom je povećana dimenzijska stabilnost te omogućena glatka površina. Vizualni prikaz 3DP oplata i proizvod nakon uklanjanja 3DP oplata prikazani su na slikama 5. i 6.

4.2.2. Studija slučaja 2: izrada dijelova zida – Ujedinjeno Kraljevstvo

Druga studija slučaja prikazuje 3D ispis (proizvodnju) dijelova zida koji će biti sastavljeni u stambenu strukturu u Ujedinjenome Kraljevstvu. Dizajnirali su ga vodeći industrijski dizajneri sa željom da stvore funkcionalnu, ali jeftinu strukturu slobodnoga oblika bez korištenja kalupa. Jasno je da je alternativa bila proizvodnja tih komponenti uz pomoć kalupa. Crteži/modeli zgrade izrađeni su uz pomoć softvera za 3D modeliranje (može biti parametarski zasnovan) kao što su Rhino i Solidworks. Izvođač projekta organizirao je građevinski tim koji je sastavljen od pružatelja usluga 3D ispisa i pružatelja građevinskih usluga. U procesu izgradnje primjenjivane su metode ispisa na gradilištu i izvan njega. Materijal za tiskanje ekstrudiran je, što je proces koji se sastoji od prisiljavanja materijala koji se može oblikovati da prođe kroz matricu koja ima presjek dijela koji se želi dobiti [32] i taloženja cementne žbuke za ispis ukupno šest dijelova zida različitih vanjskih oblika i šupljina, što je bilo u skladu sa sustavom 3D ispisa, materijalom i ispisanim dijelom zida kao što je to prikazano na slici 7. Nakon ispisa primijenjen je potreban tretman kako bi se zajamčila planirana integracija ispisanih komponenti.



Slika 7. Nacrtno prema opisu izvođača

4.2.3. Studija slučaja 3: stambena zgrada – Arizona, Sjedinjene Američke Države

Treća studija slučaja opisuje projekt pod nazivom "Habitat for Humanity". Riječ je o 3D ispisanoj kući u Arizoni koja se nalazi pokraj triju sličnih kuća izgrađenih konvencionalnim metodama gradnje. Fokus te studije slučaja bio je na vanjskim i unutarnjim zidovima, koji su ispisani u jednome potezu. To je kuća s jasnom funkcijom da u budućnosti u njoj netko živi i zato se nije razlikovala od konvencionalnih konstrukcija. To je učinjeno korištenjem COBOD pisača (sjedište u Danskoj). Europske su tvrtke dale i druge upute i zato su strategija i poslovanje bili slični onima primijenjenima u projektima izgrađenima na europskome tlu. Razlika je bila u "svakodnevnim" procesima tvrtke pri razvoju tehnologije. Međutim, taj je primjer pokazao da nitko ne može odrediti najbolji pristup / najbolje rješenje, a svaka tvrtka poboljšava razne aspekte tehnologije kao što su softver, materijali i hardver. Posljedično, ne postoji jedinstvena najbolja praksa, a tvrtke (klijenti) dobivaju kvalitetnu povratnu informaciju, najčešće samo od skupine od koje su kupile ili iznajmile 3D pisač. Zato je vrlo vjerojatno da će pisač iz COBOD-a primjenjivati COBOD tehnike. Tvrtka (klijent) istraživala je inovacije, a u opisanome slučaju oni su eksperimentirali s drugim projektima, što je rezultiralo odlukom o ispisu 3D tehnologijom ispisa. Opisani je slučaj uspoređen s trima sličnim susjednim kućama izgrađenima od betona konvencionalnim metodama gradnje. Opći opis procesa stvaranja CAD-a može se definirati kao postupak za precizno modeliranje dijela koji se izgrađuje, no trenutak je proces krajnje nezadovoljavajući, a cijela svrha nove tehnologije ponovno je razmišljanje o paradigmi gradnje od nule. Arhitekt sanja o dizajnu koji se pretvara u 3D model dijeljenjem modela u Step datoteku za velike pisače ili STL datoteku za 3D pisač Dot, koja se šalje pisaču prema uputama 5.5., sloj po sloj, i koristi za nanošenje betona. Što se tiče materijala za ispisivanje, ispisuje se uz pomoć betona. U praksi se radi o mortu, odnosno o agregatu manjemu od dva milimetra, no oznaka "beton", iako tehnički nije točna, čest je izraz. Također, smjesa morta i brzina ispisa moraju odgovarati vremenskim uvjetima [33].

Cijela kuća (unutarnji i vanjski zidovi) ispisana je sloj po sloj kao što je to prikazano na slici 7., u punome zamahu (model ekstrakcija). Samo su bojenje (iz estetskih razloga) i brtvljenje (iz tehničkih razloga) primjenjivani za završnu obradu, no na kraju je to bila monolitna struktura. Kao što je to prikazano na slici 8., većina betona bila je izložena, bez žbuke i nije bila glatka. Bilo je pukotina koje su zahtijevale naknadnu obradu i brtvljenje praznina iz estetskih i

tehničkih razloga. S obzirom na to da je beton istiskivan, pojavilo se nekoliko mrlja. Postupak nije bio visokoautomatiziran proces, no bio je to vrlo radno intenzivan proces koji je zahtijevao mnoge korake ljudske intervencije. Cilj je da ljudi nauče i automatiziraju postupak. Početak procesa je težak, no kada se cijeli proces shvati u cijelosti, potrebno je samo pritisnuti tipku.



Slika 8. 3D pisač ispisuje trokutnicu (vanjske i unutarnje zidove) [33]



Slika 9. Trodimenzionalni ispis vanjskih i unutarnjih zidova, ostavljeno u izvornim slojevima [33]

4.3. Studije slučaja – upitnik za proces 3D ispisa

Ova studija slučaja sastojala se od upitnika, projektne dokumentacije i upitnika koji se ispunjavao nakon procesa, a služi za komunikaciju s ključnim sudionicima projekta. U tablici 1. navedena su pitanja vezana uz korištenje 3D procesa. Štoviše, odgovori su sažeti u 5. poglavlju za svaku studiju slučaja zasebno.

Tablica 1. Studije slučaja – upitnik o procesu 3D ispisa

1.	Koje su prednosti i budući potencijal za 3D ispis na temelju zaključaka iz ove studije slučaja?
2.	Koji su mogući daljnji koraci u istraživanju i razvoju na temelju ove studije slučaja?
3.	Općenito, koji su bili najveći izazovi u ovome projektu?
4.	Za koja se područja primjene može preporučiti 3D ispis na temelju zaključaka iz ove studije slučaja?
5.	Koje su najveće prednosti, a koji najveći nedostaci 3D ispisa za betonsko lijevanje na temelju ove studije slučaja?

Tablica 2. Studije slučaja – upitnik o 3D ispisu organizacijske strukture

1.	Kako bi trebao izgledati primjer idealnoga projektnog tima za građevinske projekte u kojima se primjenjuje tehnologija 3D ispisa i kako izgleda idealan sastav članova projektnog tima?
2.	Koja je glavna razlika između uloge naručitelja/investitora u projektima u kojima se primjenjuje tehnologija 3D ispisa u odnosu na konvencionalnu metodu gradnje?
3.	Koja je glavna razlika između uloge voditelja projekta / voditelja izgradnje u projektima u kojima se primjenjuje tehnologija 3D ispisa u odnosu na konvencionalnu metodu gradnje?
4.	Koja je glavna razlika između uloge arhitekta u projektima u kojima se primjenjuje tehnologija 3D ispisa u odnosu na konvencionalni način gradnje?
5.	Koja je glavna razlika između uloge statičara u projektima u kojima se primjenjuje tehnologija 3D ispisa u usporedbi s konvencionalnim načinom gradnje?
6.	Koja je glavna razlika između uloge nadzornog inženjera u projektima u kojima se primjenjuje tehnologija 3D ispisa u odnosu na konvencionalnu metodu gradnje?
7.	Koja je glavna razlika između uloge izvođača / glavnog izvođača u projektima u kojima se primjenjuje tehnologija 3D ispisa u odnosu na konvencionalnu metodu gradnje?
8.	Bez obzira na projektni tim, kakav je učinak promjene metode gradnje sa standardne metode na projekte u kojima se primjenjuje tehnologija 3D ispisa u kontekstu potrebe za radnom snagom?
9.	Koja je razlika u pogledu troškova projektnog tima, troškova radne snage i troškova dobavljača u projektima u kojima se primjenjuje tehnologija 3D ispisa u usporedbi sa standardnom gradnjom?

4.4. Studije slučaja – upitnik za organizacijsku strukturu projekta, uloge i odgovornosti

U tablici 2. navedena su pitanja koja se tiču organizacijske strukture projekta, uloga i odgovornosti. Odgovori su sažeti u 5. poglavlju za svaku studiju slučaja zasebno.

5. Rezultati

5.1. Pregled literature

Provedena su mnoga istraživanja o primjerenoj organizacijskoj strukturi projekata, odnosno najboljoj ravnoteži uloga, odgovornosti i interakcije, koja su uzimala u obzir čimbenike uspjeha projekta [10], suradnju ključnih sudionika građevinskog projekta [23] i TMO [24], no te teme nisu dovoljno istražene u građevinskim projektima u kojima se primjenjuje tehnologija 3D ispisa, što se pripisuje njezinoj novosti. Također, organizacijska struktura građevinskih projekata u kojima se primjenjuje tehnologija 3D ispisa nije temeljito istražena [17, 18]. Ova studija preispitivanja potvrđuje da organizacijska struktura projekata i građevinski projekti u kojima se primjenjuje 3D ispis moraju biti odgovarajuće povezani. Štoviše, zakoni i propisi svake zemlje imaju definirane i klasificirane uloge i odgovornosti ključnih sudionika u građevinskim projektima te su one potvrđene i/ili dopunjene profesionalnim normama i standardima, kako u odabranim zemljama tako i na globalnoj razini. Međutim, u takvoj regulativi nisu pronađene novosti ili norme uvjetovane pojavom 3D ispisa. Ipak, to je ponajprije slučaj s konvencionalnim tehnologijama gradnje, gdje su nove i alternativne tehnologije, uključujući 3D ispis, uvelike zanemarene. Osim toga svi procesi tehnologije 3D ispisa pokušali su se standardizirati povlačenjem paralela s konvencionalnom gradnjom.

Zato bi u ovoj studiji, u sklopu njezina prvoga dijela, tijekom sistematizacije pregleda literature, mogli biti izvedeni povezani zaključci i moguće osnove za definiranje organizacijske strukture građevinskih projekata primjenom tehnologije 3D ispisa koje bi trebalo prilagoditi ponajprije prethodnim istraživanjima u konvencionalnoj gradnji, ali i studijama iz drugih industrija.

5.2. Studija slučaja 1: 3D ispisana oplata za stube – Leipzig, Njemačka

U sklopu prve studije slučaja analiziran je 3D ispis oplata stubišta u sklopu konstrukcije nove zgrade banke u Leipzigu. U osnovi se radilo o zakrivljenome luku stubišta predvorja i jednostrukoj oplati (monolitna konstrukcija). Zbog složenosti projekta bio je prikladan za integraciju 3D ispisane oplata jer je bila potrebna visokoprecizna oplata kako bi stubište dobilo glatku i ravnomjernu krivulju. Štoviše, 3D ispis bio je razuman izbor jer bi konvencionalna proizvodnja takve oplata zbog trostruke zakrivljenosti u dizajnu stubišta mogla biti nevjerovatno skupa. Rezultati lijevanja bili su zadovoljavajući i nije bilo uočljive razlike između konvencionalnih i ispisanih umetaka za oplatu. Primjena tehnologije 3D ispisa u projektu znatno je uštedjela novac i vrijeme. Trostruka zakrivljenost nije mogla biti postignuta s tom preciznošću na konvencionalan način. Osim toga ispisani elementi oplata otporni su na vremenske uvjete i mogu biti izloženi vjetru i vremenskim prilikama bez promjene svojih svojstava. Površina je bila otporna na ogrebotine i zato tijekom lijevanja/zbijanja betona nije došlo do deformacija.

Što se tiče organizacijske strukture projekta, zaključeno je da bi glavina realizacije ovakvih projekata bila podijeljena između tehnologa za betonske radove te statičara i operatera pisača/proizvođača. Osim toga, oni definiraju granicu između 3D ispisa i konvencionalne gradnje. Tehnolog za betonske radove u smislu svojstava materijala, statičar u smislu zahtjeva/nosivosti komponente koja se ispisuje, a "pisač" u smislu onoga što može

realizirati u smislu građevinske logistike i strojne tehnologije. Oni čine glavni tim.

U smislu pojedinačnih uloga klijent ulaze u zgradu i u konačnici njegov glavni interes je u ekonomskom stvaranju proizvoda i dodanoj vrijednosti koja se time može postići.

Ispitanici su također naveli da voditelj projekta ima manje prostora za improvizaciju. Postoje jasno definirane procedure koje zahtijevaju složenije preliminarne planove. Također, naknadno planiranje tijekom izgradnje više neće biti moguće. Arhitekt će morati unaprijed provesti istraživanje koje će uključivati više od samog projektiranja i nacrti. Razina planiranja unaprijed značajno će se povećati. Rezultat mora postojati (uključujući izvedivost) prije nego što se natječaj objavi. U dizajn mora biti uključeno što više stručnosti o izvedivosti i stanju tehnike.

Statičari će morati provjeriti stabilnost, no u skladu s odgovorima, on/ona će trebati precizne vrijednosti od tehnologa za betonske radove i neće se moći pozvati na standardne vrijednosti. Eventualno će odrediti potrebne vrijednosti čvrstoće sloja, koje tehnolog za betonske radove mora postići u stvaranju aditiva.

Naučene lekcije potvrdile su da će to imati značajan utjecaj na logistiku i građevinske radove. Područja ponude i prometa koja su povezana s različitim komponentama, tj. što će se ispisivati i što će se graditi konvencionalno, zahtijevat će više planiranja građevinskih radova i građevinskih procesa. Što se tiče građevinskih radova, piša će utjecati na konvencionalne građevinske radove, blokirajući prometne pravce vlastitih potreba opskrbe materijalom itd. Stoga će biti teže mijenjati procese. Samim time, važnost nadzora projekta je puno veća nego u klasičnoj gradnji.

Stručnjaci su se složili da postoje dva područja aditivne proizvodnje koja su relevantna za izvođača, tj. ispis konstrukcija (3D ispis betona ili sličnih masa) te ispis građevinskih pomagala i montažnih dijelova. Ocjenjuje se da izvođač mora značajno proširiti svoje znanje i područje stručnosti ili to znanje kupiti iz vanjskih izvora. Postat će rukovatelj stroja i dodatno će obavljati djelomične zadatke (montaža nadvoja i sl.).

Klasični proces gradnje u vezi s gradilišnom logistikom bit će potpuno drugačiji. Bitan aspekt bit će da se vrijeme mora podijeliti na vrijeme ispisa i ručnu preinaku. Vrijeme ispisa, na primjer, može se s operaterom obavljati noću, a potrebna dorada tijekom dana. Također, više nema ograničenja na ono što se može izgraditi kada je u pitanju projektiranje geometrija. Stručnost prenosi s osobe koja obavlja posao na dizajnera koji konstruira predgotovljene dijelove u 3D-u. Razne zanatske vještine stoga više nisu važne u istoj mjeri.

Važne povratne informacije pokazale su da se mijenja kvalifikacija radne snage od stručnog građevinskog radnika / montera do rukovatelja strojem / servisnog mehaničara. Posljedično, troškovi će se prebaciti s dobavljanja radne snage na dobavljače i upravljanje projektom.

5.3. Studija slučaja 2: proizvodnja dijelova zida – Ujedinjeno Kraljevstvo

U drugoj studiji slučaja analizirani su dijelovi zida koji se sastavljaju u stambenu strukturu. 3D ispis odabran je kako

bi se postigao cilj stvaranja slobodnih i jeftinih oblika bez kalupa. Taj izbor predstavlja prednosti tehnologije 3D ispisa u masovnim prilagodabama građevinskih konstrukcija odnosno topološki optimiranih konstrukcija. Slobodni oblik, niska cijena i učinkovitost materijala otkriveni su kao najveća prednost, a površinska obrada, rano ulaganje u vrhunsku opremu te potreba za stručnjacima (operatorima) bili su najveći nedostaci primjene tehnologije 3D ispisa. Rezultati studije slučaja pokazali su da bi se dobar projektni tim trebao sastojati od stručnjaka različitih profila, uključujući materijale, konstrukcijsko inženjerstvo, CAD/CAM/robotiku, strojarstvo i proizvodno inženjerstvo, građevinske usluge, upravljanje izgradnjom itd. Za klijenta to može značiti manje podizvođača i lakše upravljanje projektom jer će tvrtka za 3D ispis vjerojatno obaviti sav posao. Ispitanici smatraju da uloga voditelja projekta ovisi o dva različita uvjeta lokacije, projektu ispisa na licu mjesta gdje će se više raditi o upravljanju strojevima i opremom nego o upravljanju ljudima te ispisu izvan lokacije + sklapanje na licu mjesta pri čemu će biti potreban veći fokus na lanac opskrbe i logistiku. Glavna razlika u ulozi arhitekta jest ta da će biti zadužen za "Dizajn za proizvodnju/ispis". Arhitekti zapravo mogu voditi cijeli projekt jer njegov/njezin dizajn već treba uzeti u obzir implementaciju procesa ispisivanja, odnosno arhitekt je djelomično proizvođač/građitelj. Uloga statičara vjerojatno se ne bi mijenjala. U svakome slučaju potrebno je ispuniti sve zahtjeve mehaničke otpornosti i stabilnosti konstrukcije. Više upravljanja strojevima i opremom nego upravljanja ljudima i više fokusiranja na opskrbni lanac i logistiku odrazit će se na zadatke kontrole projekta. Uloga glavnog izvođača radova neće se puno promijeniti – i dalje će to biti izgradnja projekta i upravljanje izgradnjom. Ali njegov opis posla može se promijeniti u pogledu angažiranja 3DP metoda, npr. podugovaranje s 3DP tvrtkom ili dobivanje (kupnja/iznajmljivanje) opreme ili usluga od profesionalne 3DP tvrtke za obavljanje posla. To će posljedično ubrzati transformaciju profesije i/ili zanimanja radnika na gradilištu, uz veće troškove u projektnom timu, ali niže troškove radne snage i dobavljača.

5.4. Studija slučaja 3: stambena zgrada – Arizona, Sjedinjene Američke Države

U sklopu treće studije slučaja analizirani su vanjski i unutarnji zidovi stambene kuće u izgradnji. Tvrtka koja je isporučila i održavala 3D pisac je iz Danske i zato su i norma i praksa preuzeti iz sličnih projekata dovršenih u Europi. Uočen je jaz ne samo u izradi CAD datoteka, nego i u svim drugim segmentima između nove tehnologije i postojeće paradigme, što je onemogućilo željeni uspjeh projekta. Projekt je osmišljen kao eksperiment klijenta koji je u automatizaciji vidio moguće rješenje problema nedostatka kvalificirane radne snage na tržištu. Ipak, zaključeno je da trenutna razina automatizacije ne odgovara željenoj i da je ovisnost o ljudskoj intervenciji još uvijek prevelika. Također se zaključuje da je potrebno istraživanje i razvoj u svim smjerovima i svim aspektima (softver, materijali, hardver, itd.). Prema iskustvu, sve je manje "korisnih" ljudi na gradilištu,

kako u radnim tako i u rukovodećim ulogama i aspektima. Bez sredstava automatizacije, nedostatak stambenog prostora postat će problem. Rješenje ovog problema je potencijal korištenja tehnologije 3D ispisa.

Glavni izazov bio je razmišljati izvan okvira, zahvaljujući klasičnom primjeru nove tehnologije i postojećih/starih paradigmi koje su uslijedile u rezultatu koji je bio slabiji od očekivanog. Međutim, 3D ispis mogao bi ponuditi rješenje za bilo koju jedinstvenu/složenu betonsku formu koja bi zahtijevala jednokratnu/prilagođenu oplatu te je potrebno razmotriti tiskani beton kao alternativu kako je to prikazano i u studiji slučaja. Zbog detalja svakog projekta i nedostatka referentnih primjera teško je donijeti opće zaključke o idealnome projektnom timu.

Razlika u pogledu investitora je u tome da u ovom slučaju investitor mora kupiti/iznajmiti 3D pisar, što je naravno i najvažnija stavka ovakvog projekta, no opisani slučaj nije bio projekt za profit. Dakle, njegov se cilj razlikovao od konvencionalnih građevinskih projekata.

Općenito, zadatak voditelja projekta je koordinirati, samo u ovom slučaju, zadatak je i koordinirati aspekte tehnologije koju neki podizvođači vjerojatno nikada prije nisu vidjeli. Također, gotovo svaka tvrtka sudionica na ovom gradilištu ima svog imenovanog voditelja projekta te je stoga zaključeno da je teško generalizirati njihovu ulogu.

Arhitekt mora biti svjestan mogućnosti pisara i primijeniti ih kako bi njegov nacrt postao stvarnost. Ne može se svaka os ispisati točno prema našoj mašti / dizajnu. Stoga, u ovom slučaju, arhitekt mora od samog početka biti svjestan fizičkih ograničenja 3D pisara.

Trenutačno nema razlike u tome na koji način statičar tretira 3D ispisanu kuću u usporedbi s konvencionalno izgrađenom kućom jer svi projekti uvijek zahtijevaju neku vrstu konvencionalnih strukturalnih mjerenja, odnosno vertikalno opterećenje, proračun nosivosti stupa itd. Zato građevinski inženjeri ne uzimaju u obzir strukturalnu sposobnost ispisanih zidova jer služe samo kao "oplatu" za sve ostalo u navedenom slučaju. Međutim, ta "oplatu" mora ispunjavati sve tehničke uvjete, jednako kao i beton u klasičnoj oplati zajedno s armaturom. Međutim, uloga bi se trebala prilagoditi i trebao bi postojati neki novi način testiranja strukturalnog integriteta, a samo osnovno ispitivanje koje građevinski inženjeri obično rade jednostavno nije dovoljno. U opisanome slučaju postoje mnoge promjene paradigme u osnovnim pretpostavkama događaja do kojih nije došlo.

Nije uočena posebna razlika u ulozi nadzornog inženjera. Osim toga potrebno je razmotriti sve ostale uočene rizike, mjere opreza i metode.

U većini slučajeva uloga izvođača radova slična je onoj voditelja projekta. Riječ je o specifičnoj i jedinstvenoj konstrukciji za koju izvođač, bez obzira na opće iskustvo, vjerojatno nema referentna znanja.

Puni potencijal 3D ispisa nije dovoljno definiran ili realiziran. Dakle, ono što će se dogoditi s potrebom za radnom snagom hipotetsko je razmišljanje. Namjera je automatizirati proces,

no taj je proces vrlo različit od praktične primjene. Također je nemoguće dobiti točan prikaz troškova jer se tvrtke u takvim slučajevima još uvijek bore s pronalaskom investitora. Nadalje, mnogi volonteri i radnici radili su besplatno, što kvari stvarnu sliku troškova prema mjerilu kakvo bi se primjenjivalo na konvencionalnome gradilištu. Ukratko, nema točnih izračuna troškova za 3D ispisanu kuću jer ne postoji mogućnost kupnje iste po točno određenoj cijeni od tvrtke prema standardnoj proceduri; one su uvijek dio jednokratnog eksperimenta. Osim toga cijena prodaje ili kupnje uvijek je znatno viša (od 30 do 40 posto) od cijene konvencionalnog građevinskog projekta.

6. Zaključak

U istraživanju je prvo odgovoreno na pitanje što je utvrđeno u pogledu uloga, odgovornosti te interakcija ključnih sudionika u građevinskim projektima u sklopu kojih se primjenjuje tehnologija 3D ispisa. Posljednja dostignuća u tehnologijama aditivne proizvodnje sugeriraju da sustavi 3D ispisa velikih razmjera imaju znatan kapacitet za isporuku potpuno automatiziranih građevinskih projekata [34]. Unatoč tome istraživanje je pokazalo da nedostaju studije o utjecaju tehnologije 3D ispisa na uloge i odgovornosti u organizacijskoj strukturi građevinskih projekata. Pregled literature otkrio je da je ta tema još uvijek nepoznata. Stručnjaci koji rade na 3D pilot-projektima prikupljaju prve nalaze koji potvrđuju nužnost paralelnog razvoja menadžmenta i organizacije s novom tehnologijom. Ova studija sugerira da u budućnosti moraju biti provedene mnoge studije o navedenim temama jer nove tehnologije zahtijevaju novu organizacijsku paradigmu ili barem usklađivanje ili prilagođavanje one postojeće. Studija pruža i znatan uvid u tri različite studije slučaja. Primjena pisara i eventualni prijenos dijela proizvodnje u pogon pozitivno će utjecati na građevinsku industriju koja se suočava s nedostatkom građevinskih radnika, no to će prenijeti dio troškova s traženja radne snage na dobavljače i upravljanje projektima. Novost je pojava stranaka (podizvođača) a 3D ispis, internih ili eksternih, te proširenje projektnog tima novim specijalizacijama. To će uvelike utjecati na arhitekta i voditelja projekta zbog promjena u proizvodnome procesu, kadrovske sastavu i organizaciji.

U okviru drugog pitanja razmatrane su odgovornosti i interakcije ključnih sudionika u projektima u sklopu kojih se primjenjuje tehnologija 3D ispisa u usporedbi s onima u konvencionalnim građevinskim projektima. Ključni sudionici projekta bili su isti kao i u konvencionalnim građevinskim projektima. Rezultati su potvrdili da su odabrane uloge, uključujući klijenta, voditelja projekta, nadzornog inženjera, građevinskog inženjera i izvođača, važne u projektima u sklopu kojih se primjenjuje nova tehnologija. Očekuje se da će nova tehnologija utjecati na njihove poslove, odgovornosti i kompetencije. Studije slučaja pokazale su da bi nove tehnologije imale glavni učinak na dizajn, lanac opskrbe i kvalitetu i zato treba uskladiti odgovornosti i procese integracije, opseg, nabavu, rizik i upravljanje dionicima. Osim toga nova bi tehnologija mogla pozitivno utjecati na poznati "željezni trokut" koji uključuje vrijeme,

cijenu i kvalitetu. Sve navedeno imat će učinak na upravljanje ljudskim resursima u projektima u projektima, ključno područje na koje se utječe, zahvaljujući činjenici da iza svake ljudske aktivnosti i rezultata uvijek stoje određeni ljudi i njihove kompetencije. Premještanje dijela aktivnosti s gradilišta u industrijske objekte pozitivno će utjecati na manjak građevinskih radnika, posebno u razvijenim zemljama.

Rezultati su potvrdili da će klijenti/investitori ostati usredotočeni na poslovni aspekt projekta i stvaranje vrijednosti, a nova će tehnologija biti prihvaćena uz razumnu podršku. Uloga arhitekta bit će suočena s težim procesom kasnijih potencijalnih promjena u dizajnu. Osim toga arhitekt će morati blisko surađivati s drugim stručnjacima poput tehnologa za betonske radove i građevinskih inženjera. Moglo bi se reći da će "određeni kvartet", koji čine arhitekt, tehnolog, staričar i operator/proizvođač pisača, formirati tim u procesu projektiranja. Poslovi nadzornog inženjera gradilišta mogu se znatno promijeniti zbog promjene bliže proizvodnji izvan lokacije. To znatno utječe na izvođače koji će biti suočeni s dilemom trebaju li kupiti pisač ili podgovoriti njegovo korištenje. Bez obzira na to, izvođač ili dobavljač morat će steći nova znanja i kompetencije te uvesti pozicije rukovatelja strojem. Općenito, tehnologija 3D ispisa dovest će do nove stvarnosti s manje ljudi i više vještina, što će uvelike utjecati na voditelja projekta. Obično voditelj projekta preuzima ulogu koordinatora, vođenog očekivanjima i realnošću, a okružen je sudionicima i procesima. Vjeruje se da će unutar takvog okvira složenost posla rasti, unatoč manjemu broju radne snage na licu mjesta. Procesi će se promijeniti, a skupina sudionika bit će proširena novim stručnjacima, što će dovesti do novih interakcija paralelnih aktivnosti na lokaciji i izvan nje. Pritisak upravljanja "željeznim trokutom" (vrijeme, novac, kvaliteta) povećat će se zbog očekivanja od nove tehnologije. To mora biti upravljano učinkovitijom organizacijom projekta, koja mora biti prilagođena kombinaciji proizvodnje na licu mjesta i industrijske proizvodnje. U sklopu rješavanja trećeg pitanja ispitivala se nužnost prilagodbe postojećih metoda upravljanja projektima i organizacijskih struktura projekta novoj tehnologiji. Buduća poboljšanja tehnologije 3D ispisa temeljit će se na kontroli

kvalitete proizvoda, uključujući reološku kontrolu materijala, geometrijsku i dimenzionalnu sukladnost i strukturnu izvedbu, kako bi se postigla masovna prilagodba s predvidljivom razinom kvalitete, kako bi se zajamčila geometrija i dimenzija svake komponente unutar tolerancije i dobio cijeli sklop. Štoviše, nova tehnologija pružit će provjerene prednosti i dobitke. Dok će se klijenti/investitori ponajprije fokusirati na učinak, na vrijednost koju treba stvoriti i na financijske pojedinosti, izvođači će se usredotočiti na lanac opskrbe i procese isporuke, dok će se stručnjaci za upravljanje suočiti s novim izazovima, posebno u područjima integracije, opsega, rizika i upravljanja dionicima. Također, model kompetencija i poboljšanja za sve ključne uloge u procesu pripreme i izgradnje mora se razmotriti u cijelosti. Zato će metodologije upravljanja projektima u građevinskoj industriji zahtijevati nove prilagodbe i nadogradnje te stoga treba poticati buduće studije usmjerene na istraživanje te predložene pod teme. Na kraju postavlja se ključno pitanje koji je od rezultata ovog istraživanja najžurniji i najvažniji za daljnje proučavanje? Očito organizacija i upravljanje moraju pratiti razvoj novih tehnologija. Autori vjeruju da u ovoj fazi arhitekt i voditelj projekta moraju uvidjeti prednosti 3D ispisa, uključiti nove stručnjake u projektni tim i modelirati procese i odnose kako bi doprinijeli uspjehu građevinskog projekta. U skladu s time dionici projekta i zajednica mogu utjecati na nove tehnologije.

Ova studija ponajprije pretpostavlja da je 3D ispis trend u nastajanju koji bi građevinska industrija prihvatila i koji bi donio očekivane koristi dionicima. Korist bi bila učinkovitiji rad, pri čemu će biti stvorena veća vrijednost. Ograničenja ove studije proizlaze iz činjenice da su istražena samo tri slučaja u kojima je 3D ispis proveden na sličan način kao pilot-projekti.

Zahvala

Autori zahvaljuju Tobiasu Kingu, direktoru marketinga i aplikacija u tvrtki *voxeljet AG*, Helmutu Hilligesu, višemu projektnom tehničaru u tvrtki *Doka GmbH* i Jarettu T. Grossu, novinaru tehnologije građenja u *Automate Constructionu* za sudjelovanje i pomoć u provedbi ovog istraživanja.

LITERATURA

- [1] Berman, B.: 3-D printing: The new industrial revolution, *Business Horizons*, Elsevier, 55 (2012), 2, pp. 155–162, <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003>
- [2] Khajavi, S.H., Partanen, J., Holmström, J.: Additive manufacturing in the spare parts supply chain, *Computers in Industry*, Elsevier, 65 (2014), 1, pp. 50–63, <https://doi.org/10.1016/j.compind.2013.07.008>
- [3] Labonnote, N., Rønquist, A., Manum, B., Rütger, P.: Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities, *Automation in Construction*, Elsevier, 72 (2016), 3, pp. 347–366, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.026>
- [4] Walter, M., Holmström, J., Tuomi, H., Yrjölä, H.: Rapid manufacturing and its impact on supply chain management, *Proceedings of the Logistics Research Network Annual Conference*, Dublin, pp. 9–10, 2004.
- [5] Gebler, M., Uiterkamp, A.J.M.S., Visser, C.: A global sustainability perspective on 3D printing technologies, *Energy Policy*, Elsevier, 74 (2014), issue C, pp. 158–167, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.08.033>
- [6] Ghaffar, S.H., Corker, J., Fan, M.: Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution, *Automation in Construction*, Elsevier, 93 (2018), September 2018, pp. 1–11, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.005>
- [7] Wu, P., Wang, J., Wang, X.: A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry, *Automation in Construction*, Elsevier, 68 (2016), August 2016, pp. 21–31, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.04.005>

- [8] Yeh, C.C., Chen, Y.F.: Critical success factors for adoption of 3D printing, *Technological Forecasting and Social Change*, Elsevier, 132 (2018), issue C, pp. 209–216, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.02.003>
- [9] Spicek, N.: Building regulation for 3D printing in construction – Case study legislation for a 3D printed house – Project “Cabana”, 8th Scientific Conference with International Participation – All about people, Maribor, pp. 66–78, 2020.
- [10] Radujkovic, M., Sjekavica, M.: Project Management Success Factors, *Procedia Engineering*, 196 (2017), pp. 607–615, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.048>
- [11] Guhathakurta S., Yates J.: International Labour Productivity, *Journal of Cost Engineering*, 35 (1993) 1, pp. 15–25.
- [12] McTague, B., Jergeas, G.: Productivity improvement on Alberta major Construction projects, Phase I-Back to Basics, Construction Productivity Improvement Report, Project Evaluation Tool, Alberta Economic Development Board, May 2002.
- [13] Soham, M., Rajiv, B.: Critical factors affecting labour productivity in construction projects: Case study of South Gujarat Region of India, *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, ISSN: 2249, 8958, 2 (2013) 4, pp. 35–40
- [14] Yuan, H.: Critical management measures contributing to construction waste management: Evidence from construction projects in China, *Project Management Journal*, 44 (2013) 4, <https://doi.org/10.1002/pmj.21349>
- [15] Parasuraman, A.: Technology readiness index (TRI) a multiple-item scale to measure readiness to embrace new technologies, *Journal of Service Research*, Sage Publications Sage CA: Thousand Oaks, CA, 2 (2000) 4, pp. 307–320, <https://doi.org/10.1177/109467050024001>
- [16] Lee, Y., Kozar, K., Larsen, K.: The Technology Acceptance Model: Past, Present, and Future, *Communications of the Association for Information systems*, (2003) 12, pp-pp, <https://doi.org/10.17705/1CAIS.01250>.
- [17] ISO 21502:2020(E) - International Standard: Project, programme, and portfolio management – Guidance on project Management, INTERNATIONAL STANDARD (2020), First edition.
- [18] European Commission Centre of Excellence in Project Management (CoEPM²): PM² Project Management Methodology Guide 3.0, Publications Office of The European Union, (2018), Luxembourg.
- [19] Chen, C-J., Huang, J-W., Hsiao, Y-C.: Knowledge management and innovativeness: The role of organizational climate and structure, *International Journal of Manpower*, 31 (2010) 8, pp. 848–870, <https://doi.org/10.1108/01437721011088548>
- [20] Besklubova, S., Skibniewski, M.J., Zhang, X.: Factors affecting 3D printing technology adaptation in construction, *Journal of Construction Engineering and Management*, 147 (2021), 5.
- [21] Mellor, S., Hao, L., Zhang, D.: Additive manufacturing: A framework for implementation, *International Journal of Production Economics*, Elsevier, 149 (2014), issue C, pp. 194–201, <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.07.008>
- [22] Sonar, H., Khanzode, V., Akarte, M.: Investigating additive manufacturing implementation factors using integrated ISM-MICMAC approach, *Rapid Prototyping Journal* (2020), ISSN: 1355-2546, pp. 1837–1851, <https://doi.org/10.1108/RPJ-02-2020-0038>
- [23] Deep, S., Gajendran, T. & Jefferies, M.: A systematic review of ‘enablers of collaboration’ among the participants in construction projects. *International Journal of Construction Management*, 21 (2019) 9, pp. 919–931, <https://doi.org/10.1080/15623599.2019.1596624>
- [24] Fellows, R., Liu, A.: Impact of participants’ values on construction sustainability, *Engineering Sustainability*, ISSN 1478-4629, E-ISSN 1751-7680, 161 (2008) 4, pp. 219–227, <https://doi.org/10.1680/ensu.2008.161.4.219>
- [25] Wirth, A., Würfele, F., Broocks, S.: *Rechtsgrundlagen des Architekten und Ingenieurs*, 2004. Edition, Vieweg+Teubner Verlag, 2004.
- [26] CDM: The Construction (Design and Management) Regulations 2015, Construction (Design and Management), Regulations 2015, [legislation.gov.uk](https://www.legislation.gov.uk), <https://www.legislation.gov.uk/uksi/2015/51/contents/made>, 10.04.2022.
- [27] DLA piper: General construction law, <https://www.dlapiperrealworld.com/law/index.html?t=construction&s=legal-framework&c=US>, 14.04.2022.
- [28] Budde, N.: Construction law: What contractors, subs, and suppliers must know, *LevelSet*, <https://www.levelset.com/blog/construction-law/>, 10.04.2022.
- [29] Caravella, J.: Understanding roles and relationships of construction project participants. Who does what? AIA contract document workshop, <https://www.liconstructionlaw.com/construction/understanding-roles-relationships-construction-project-participants1/>, 12.04.2022.
- [30] Adamu, M.: Quantity Surveyor’s Role in Public-Private Partnership Highway Concession, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, ISSN (Online):2278-0181, 5 (2016) 2, <https://doi.org/10.17577/IJERTV5IS020408>
- [31] Voxeljet: Mit 3D-Druck effizienter zur komplexen Betonschalung, <https://www.voxeljet.de/case-studies/architektur/mit-3d-druck-effizienter-zur-komplexen-betonschalung/>, 08.01.2022.
- [32] Perrot, A., Rangeard, D., Nerella, V.N., Mechtcherine, V.: Extrusion of cement-based materials – an overview, *Rilem Technical Letters*, 3 (2018), <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2018.75>
- [33] Kuchinskas, S.: Habitat for humanity builds faster and cheaper by 3D printing affordable homes, *Redshift by Autodesk* (2021), <https://redshift.autodesk.com/articles/3d-printing-affordable-homes>, Photos: Courtesy of Peri/3D Construction Inc, 14.04.2022.
- [34] Halicioğlu, F.H., Koralay, S.: Applicability analysis of additive manufacturing methods in construction projects, *GRAĐEVINAR*, 72 (2020) 4, pp. 335–379, <https://doi.org/10.14256/JCE.2334.201>
- [35] Chun, K.W., Kim, H., Lee, K.: A Study on Research Trends of Technologies for Industry 4.0, 3D Printing, Artificial Intelligence, Big Data, Cloud Computing, and Internet of Things: MUE/FutureTech 2018, *Advanced Multimedia and Ubiquitous Engineering*, pp.397–403, (2018), https://doi.org/10.1007/978-981-13-1328-8_51