

Primljen / Received: 25.6.2025.

Ispravljen / Corrected: 13.10.2025.

Prihvaćen / Accepted: 13.11.2025.

Dostupno online / Available online: 10.2.2026.

Razvoj prototipa stambenog objekta primjenom 3D tiskanih elemenata

Autori:



¹Prof.dr.sc. **Rodrigo García-Alvarado**
rgarcia@ubiobio.cl
Autor za korespondenciju



²Prof.dr.sc. **Claudia Muñoz-Sanguinetti**
clmunoz@ubiobio.cl



¹Doc.dr.sc. **Paula Ulloa-Aguayo**
pulloa@ubiobio.cl



²Doc.dr.sc. **Aracely Rocha-Rubilar**
arocha@ubiobio.cl



³Izv.prof.dr.sc. **Alexander Opazo-Vega**
aopazove@ubiobio.cl



¹Doc.dr.sc. **Paulina Wegertseder-Martínez**
pwegertseder@ubiobio.cl

¹ Sveučilište Universidad del Bío-Bío, Čile
Odjel za arhitektonsko projektiranje i teoriju

² Sveučilište Universidad del Bío-Bío, Čile
Odjel za građevinske znanosti

³ Sveučilište Universidad del Bío-Bío, Čile
Odjel za građevinarstvo i zaštitu okoliša

Stručni rad

Rodrigo García-Alvarado, Claudia Muñoz-Sanguinetti, Paula Ulloa-Aguayo, Aracely Rocha-Rubilar, Alexander Opazo-Vega, Paulina Wegertseder-Martínez

Razvoj prototipa stambenog objekta primjenom 3D tiskanih elemenata

U radu prikazana su projektna rješenja i izvedba prototipa stambene građevine primjenom 3D tiskanih elemenata, izvedenog na području Čilea. Rad donosi nov pristup analizi postupka koji je obuhvatio interdisciplinarno planiranje, konstrukcijske i okolišne analize, parametarsko oblikovanje te izradu elemenata 3D tiskom u sveučilišnome laboratoriju, nakon čega su uslijedili montaža na gradilištu i cjelokupna izvedba građevine. Također su ispitani usklađenost s lokalnim standardima i optimiranje aktivnosti. Istraživanje potvrđuje izvedivost razvoja stambenih građevina primjenom 3D tiskanih elemenata u zemlji, uz mogućnost arhitektonske raznolikosti, prilagodbe lokalnim uvjetima i kontinuiranog unaprjeđenja.

Ključne riječi:

3D tiskane zgrade, parametarsko oblikovanje, konstrukcijska analiza, analiza okoliša, organizacija građenja, arhitektonska raznolikost, stanovanje

Professional paper

Rodrigo García-Alvarado, Claudia Muñoz-Sanguinetti, Paula Ulloa-Aguayo, Aracely Rocha-Rubilar, Alexander Opazo-Vega, Paulina Wegertseder-Martínez

Development of a residential prototype using 3D-printed elements

This paper presents the design and construction of a home prototype incorporating 3D-printed elements built in Chile. It provides a novel review of the process, which involved multidisciplinary planning, structural and environmental analysis, parametric design, and the printing of elements in a university laboratory, followed by on-site assembly and full construction. Compliance with local standards and the optimisation of activities is also examined. The study demonstrates the feasibility of developing housing with 3D-printed elements in the country, enabling architectural variety, local adaptation, and continuous improvement.

Key words:

3d-printed construction, parametric design, structural analysis, environmental analysis, construction management, architectural variety, housing

1. Uvod

1.1. Primjena tehnologije 3D tiskanja u stanogradnji

Tehnologija 3D tiskanja pokazuje velik potencijal u stanogradnji zbog mogućnosti skraćivanja potrebnog vremena i smanjenja utroška resursa, čime se povećavaju produktivnost i održivost [1-3]. Ispitivani su različiti postupci i materijali, što je rezultiralo nizom eksperimentalnih građevina. Do danas je diljem svijeta izgrađeno više od stotinu primjera kuća koje uključuju 3D tiskane elemente [4-6], no uvjeti njihove izvedbe još nisu jasno definirani, osobito u pogledu gradnje u seizmički aktivnim područjima i u različitim klimatskim uvjetima. U radu donosi se suvremeni pregled projektiranja i izvedbe prototipa stambene građevine s 3D tiskanim elementima u Čileu, pri čemu se razmatra njegova prilagodba lokalnim konstrukcijskim i okolišnim zahtjevima uz istodobno uvažavanje arhitektonske raznolikosti, na temelju rada interdisciplinarnog tima.

1.2. Građenje primjenom 3D tiskanja

Gradnja 3D tiskanim elementima provodi se uporabom velikih dizalica s nogarima ili robotskih ruku, uz potporu miješalica i crpnih sustava koji odlažu brzosušeću smjesu omogućujući aditivnu izradu građevnih elemenata do uporabne visine [7, 8]. Nanošenjem smjese upravlja se digitalnim sustavom, pri čemu se cjeloviti elementi formiraju *postupnim nanošenjem smjese u slojevima*. Takav postupak tiska razlikuje se od tradicionalnih načina građenja u kojima se elementi, u pravilu, izvedu sklapanjem većeg broja sastavnica, uz sudjelovanje različitih skupina radnika i alata, upotrebu dodatnih ambalažnih materijala, provedbu raznovrsnih radnih operacija te primjenu pomoćne opreme. Posljedično, takav postupak omogućuje smanjenje broja i trajanja aktivnosti te potrošnju materijala, uz istodobno smanjenje ručnog rukovanja, rizika od nezgoda, količine otpada i potrebe za transportom. Osim toga povećava se razina detaljnosti i digitalnog protoka informacija, čime se olakšava upravljanje projektom. Međutim, i dalje postoje određeni nedostaci i neizvjesnosti [8]:

- neizvjesnost u pogledu mogućnosti masovne proizvodnje te svojstava smjese za tisak na različitim lokacijama
- potreba za kombiniranjem tiskanih dijelova s armaturom radi osiguranja bočne nosivosti konstrukcije te ostvarivanja spojeva između tiskanih i ostalih elemenata
- provjera utjecaja primjene 3D tiskanih elemenata na troškove izvedbe i prodajne cijene građevina
- procjena utjecaja na okoliš građevina koje uključuju 3D tiskane elemente.

1.3. Materijali i tehnički propisi za 3D tiskanu gradnju

Dosad se gradnja 3D tiskanim elementima pretežno oslanjala na cementne smjese, koje omogućuju opskrbu u većim količinama te posjeduju reološka svojstva potrebna

za ekstruziju i rano očvršćivanje. Takve smjese osiguravaju odgovarajuću obradivost, dobro prijanjanje i brz porast tlačne čvrstoće, što omogućuje oblikovanje punih ili šupljih volumena sa samonosivim obodnim stijenkama [9]. Uspostavljen je niz međunarodnih norma za gradnju 3D tiskanim elementima [10-13], kojima se razvrstavaju sustavi i definiraju njihova opća obilježja, dok su dodatne norme koje se odnose na postupke i sustave građenja još u fazi izrade [8]. Znanstvena istraživanja u tome području uglavnom su usmjerena na svojstva materijala, postupke tiska i moguće primjene. Različite tvrtke i akademske inicijative razvijaju specijalizirane strategije građenja, a pojedine građevine već uključuju 3D tiskane elemente [14, 5].

1.4. Primjena u stanogradnji

Gradnja 3D tiskanim elementima dosad se ponajprije usmjeravala na izvedbu zidova, jer su zidovi složeni i vremenski zahtjevni za izgradnju te imaju ključnu ulogu u definiranju prostora i izgrađenih volumena [14]. Nasuprot tome, podne i temeljne konstrukcije u pravilu su masivnije te se jednostavnije izvedu upotrebom jeftinije opreme i materijala, zbog čega primjena 3D tiska u tim slučajevima donosi manju prednost. Slično tome, krovni ili konstrukcijski elementi izloženi bočnim djelovanjima poput stupova ili greda zahtijevaju veću nosivost na savijanje nego što je trenutačno moguće postići dostupnim smjesama. Zbog toga su potrebna dodatna ojačanja poput metalnih šipki ili traka. Nadalje, potrebno je ugraditi instalacije i završne obloge, zbog čega 3D tiskani elementi čine tek dio građevine, iako znatan s obzirom na vrijeme izvedbe i arhitektonsku koncepciju [6].

Građenje stanova jedna je od najizraženijih globalnih djelatnosti graditeljstva. Velik broj manjih jedinica prilagođeno prihvaća stanovnike različitih zanimanja i u različitim prostornim okolnostima. Stambena izgradnja obuhvaća raspon od pojedinačno građenih kuća do velikih stambenih kompleksa i višekatnih zgrada s velikim brojem sličnih jedinica [15]. U mnogim zemljama stanogradnja ne zadovoljava potražnju zbog financijskih ograničenja, raznolikih uvjeta, visokih troškova te kašnjenja u građenju. Taj stalni nedostatak stambenog prostora potaknuo je uvođenje novih postupaka poput 3D tiska kako bi se ubrzala stambena izgradnja [16]. Osim toga raste potražnja za ekološki održivim stanovanjem koje umanjuje utjecaj klimatskih promjena. Zato su tehnologije koje omogućuju veći stupanj upravljanja i učinkovitiju upotrebu resursa osobito prikladne za smanjenje ekoloških utjecaja [1, 2].

To ujedno zahtijeva prilagodbu stambenih građevina različitim klimatskim uvjetima, načinima korištenja prostora te prirodnim ugrozama. Naprimjer, Čile s gotovo 20 milijuna stanovnika izgradi približno 150.000 stambenih jedinica na godinu, koje moraju odgovoriti na raznolike društvene potrebe te se prilagoditi čak 25 različitih klimatskih zona prema Köppenovoj klasifikaciji. Sve se te regije nalaze u seizmički aktivnim područjima, što uvjetuje stroge konstrukcijske zahtjeve, uz istodobno različite zahtjeve vezane uz energetska učinkovitost i obrasce primjene [17, 18].

1.5. Stanje primjene 3D tiskanih elemenata u stanogradnji na globalnoj razini

Tijekom posljednjeg desetljeća u svijetu je izgrađeno približno stotinu eksperimentalnih stambenih građevina s 3D tiskanim elementima, uglavnom prizemnih, uz manji broj katnih primjera te tek nekoliko stambenih kompleksa [6]. Većina tih projekata izvedena je kao demonstracija tehnoloških rješenja, dok su podaci o njihovom razvoju dostupni u ograničenome opsegu [4, 5, 19-22]. Nekoliko dobavljača poput tvrtki *COBOD*, *Cybe*, *Bemore-3D*, *WASP* i *3D-Constructions* u Europi nudi standardiziranu opremu velikog formata za tisak građevnih elemenata [14, 23]. Osim toga globalni dobavljači poput *Lafargea* i *SIKE* osiguravaju gotove smjese namijenjene gradnji primjenom 3D tiska [8, 24]. Pojedini investitori, među kojima su *WinSun* u Kini i *ICON* u Sjedinjenim Američkim Državama, predlažu različita projektna rješenja te u određenim slučajevima komercijaliziraju izvedene građevine [14].

Među realiziranim stambenim prototipovima neki su tiskani izravno na gradilištu, pri čemu su uređaji za taloženje materijala, miješalice i crpke bili postavljeni na samoj lokaciji, što je omogućilo kontinuirani zidova na prethodno izvedenim međukatnim konstrukcijama, ponekad uz ugradnju čeličnih armatura. U drugim se slučajevima komponente tiskaju u tvornicama, pri čemu su oprema, miješalice i crpke smješteni u zaštićenim skladištima, što omogućuje nadzor proizvodnog procesa. Te se komponente zatim prevoze na gradilište radi montaže, zajedno s temeljima, armaturom i spojevima. U oba pristupa gradnja je završena završnim obradama, krovovima i instalacijama. Izgrađeni su pojedini stambeni kompleksi, no postupci masovne proizvodnje još nisu uspostavljeni.

Primjenom pisača *Bemore*, sličnih onome primijenjenome u ovome istraživanju, realizirano je približno deset eksperimentalnih građevina s 3D tiskanim elementima, uključujući početni prototip izgrađen 2018. u Valenciji (sjedištu tvrtke) i objekt izveden u Maroku za natjecanje *Solar Decathlon 2019*, uz nekoliko projekata na južnoj obali Španjolske [25, 26]. Međutim, ukupna proizvodnja stambenih građevina s 3D tiskanim elementima i dalje je ograničena i raspršena. Većina primjera izgrađena je u toplim klimatskim područjima koja nisu

izložena seizmičkome djelovanju, uz ograničenu arhitektonsku raznolikost i s minimalnim detaljima [4, 5, 27].

1.6. Primjena 3D tiskane gradnje u Južnoj Americi

U Južnoj Americi, u Kolumbiji 2016. izgrađen je manji prototip; u Brazilu je 2022. počela gradnja kuće s 3D tiskanim elementima, iako njezin dovršetak nije dokumentiran; u Gvatemali je 2023. dovršen paviljon s jednom prostorijom; u sjevernome Meksiku je 2021. izgrađeno nekoliko kuća u izvedbi američke tvrtke *ICON*; dok je u Peruu 2024. izgrađena jednostavna građevina [6, 28].

U Čileu Sveučilište *Bío-Bío* od 2018. provodi istraživanja te tehnologije u sklopu interdisciplinarnog tima i uz potporu lokalnih poduzeća. Njihov rad obuhvaća razvoj smjese za 3D tiskanje, ugradnju opreme velikih razmjera, osobito robota *Kuka KR120 R2500* te, u novije vrijeme, portalnog pisača *Bemore Pro*, i izradu više elemenata, što je 2023. rezultiralo montažom natkrivene kabine (slika 1.). Inicijativa je proizišla iz nacionalnih potreba za industrijalizacijom gradnje, većom produktivnosti i održivosti sektora, uz istodobno prisutan manjak stambenog prostora.

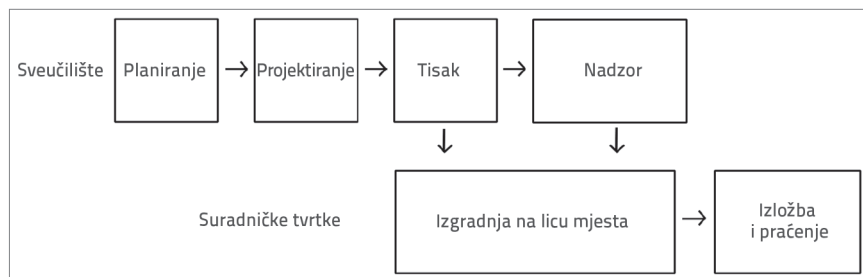
Kao sljedeći korak u tome razvoju izrađen je prototip stambene građevine s 3D tiskanim elementima, uz sudjelovanje privatnih poduzeća i potporu državnih projekata, pri čemu su razmatrani izazovi arhitektonske raznolikosti, seizmičke otpornosti i okolišne prilagodbe specifične za Čile. Cilj tog nastojanja bio je unaprijediti nove mogućnosti stanogradnje u zemlji, što je dovelo do inicijative pod nazivom *Casa Semilla* (Kuća sjemena), koja je u ovome radu prikazana kroz pregled iskustava i obilježja prilagođenih lokalnim uvjetima.

2. Metodologija

Radi razvoja prototipa stambene građevine s 3D tiskanim elementima, usmjerenog na širenje primjene i procjenu stambenog potencijala te tehnologije u Čileu, proveden je niz uzastopnih aktivnosti (slika 2.). Prvo su definirani i planirani zadaci te projektni zahtjevi. Nakon toga su u sveučilišnome laboratoriju elementi projektirani, programirani i tiskani, dok su se građevinski radovi izvodili na gradilištu uz potporu



Slika 1. Oprema i prvi radovi 3D tiskane gradnje na Sveučilištu del Bío-Bío u Čileu



Slika 2. Slijed aktivnosti

partnerskih tvrtki. Postupak je zaključen javnim predstavljanjem prototipa, nakon čega je uspostavljen kontinuirani nadzor koji će se provoditi tijekom jedne godine.

Postupak je započeo sklapanjem sporazuma između Sveučilišta i tvrtke koja posluje u sektoru izgradnje nekretnina. Tvrtka je pristala osigurati lokaciju za izgradnju, dovršiti građevinske aktivnosti prototipa i podržati njegovu izložbu. Sveučilište je pak osiguralo opremu, osoblje i tehničke procese, ponajprije one usmjerene na upravljanje gradnjom i tiskom elemenata, primjenom raspoloživih kapaciteta, osoblja i aktivnosti financiranih nacionalnim istraživačkim projektima. Također je uspostavljena suradnja s više dobavljača iz građevinskog sektora, koji su osigurali materijale, proizvode i tehničku podršku. Nakon toga izrađen je detaljan plan zadataka, resursa i dinamike izvođenja, kojim su definirane uloge pojedinih sudionika te potrebni kadrovi, oprema i materijali.

Potom su definirana opća obilježja prototipa u cilju promicanja tehnologije i procjene njezine izvedivosti u pogledu seizmičkog ponašanja, okolišne prilagodljivosti i arhitektonske raznolikosti. Odabrana je jednokatna konstrukcija, s koncentracijom tiska na zidove kako bi se iskoristile prednosti aditivne proizvodnje u postavljanju vertikalnih pregrada i oblikovanju glavnih arhitektonskih obilježja građevine. Primijenjen je sustav nosivih zidova s laganim krovom radi smanjenja konstrukcijskih zahtjeva u seizmički aktivnome okružju, a unutarnja površina optimira se kako bi ostala unutar geometrijskih mogućnosti pisača. Izrađeno je idejno rješenje koje objedinjuje ravne i zakrivljene elemente radi prikaza formalne svestranosti tehnologije 3D tiska, uz smještaj na lokaciji koja je pogodna za javno predstavljanje i prihvata sunčeva zračenja radi poticanja održivih svojstava građevine. Unutarnji raspored organiziran je u tri osnovna prostora (dnevni boravak s kuhinjom, kupaoonica i spavaća soba), pri čemu su izvedeni šuplji vertikalni zidovi radi ugradnje toplinske izolacije prilagođene klimatskim uvjetima, konstrukcijskih ojačanja i instalacija, uz zadržavanje tiskane površine kao vidljive završne obrade.

Početno rješenje dodatno je razrađeno na temelju konstrukcijskih i okolišnih analiza, a izvedbeni detalji razvijeni su u suradnji s partnerskim poduzećima. Arhitektonski oblik parametarski je modeliran radi istraživanja glavnih varijanti rješenja, uz paralelno programiranje putanja tiska, pri čemu je primijenjen softver *Rhinoceros-Grasshopper* te je upravljanje pisačem ostvareno izvozom podataka u G-kod. U postupku

projektiranja primijenjeni su programi *SketchUp*, *AutoCAD* i *Autodesk Revit*, dok je seizmička analiza provedena primjenom metode konačnih elemenata u softveru *ETABS*. Okolišna analiza izvedena je pomoću alata *Insight*, a vizualizacija je izrađena u programima *3ds Max* i *Corona Render*. Elementi su tiskani upotrebom industrijskoga portalnog sustava *Bemore-3D Pro* s geometrijskim radnim obuhvatom od $3,5 \times 6 \times 9$ m (visina,

širina i duljina), uz primjenu crpno-miješnog uređaja PFZ 3,5 Kp, pri čemu su upotrijebljeni prethodno pripremljeni cementni materijal i dodaci koje su osigurala partnerska poduzeća. Gradilište se nalazi u umjereno vlažnoj sezonskoj klimi, s godišnjim rasponom temperatura od 5 do 25 °C te relativnom vlagom zraka od 70 do 90 %.

Prototip je izgrađen približno 5 km od sveučilišnoga kampusa u Concepciónu (geografska širina 36°46'22", geografska dužina 73°03'47"), na lokaciji unutar stambenog naselja. Gradnja je planirana u skladu s nacionalnim propisima [29], koji zahtijevaju ishođenje dozvole uz priloženu detaljnu projektnu dokumentaciju te ispunjavanje zahtjeva u pogledu upotrebljivosti, univerzalne pristupačnosti i seizmičkog ponašanja, s posebnim naglaskom na bočnu krutost konstrukcije, kako je to propisano normama NCh433-2009 i DS61-2011 [30, 31]. Nacionalno zakonodavstvo također propisuje zahtjeve u pogledu toplinske izolacije stambenih zgrada, dok grad, u sklopu plana smanjenja onečišćenja zraka, nameće dodatne odredbe vezane uz toplinsku vodljivost, ventilaciju i prozore [32]. Redoslijed radova na gradilištu obuhvaćao je obilježavanje tlocrtnih osi na terenu, izvedbu kontinuiranih temelja te pripremu armature i podnih ploča, nakon čega je uslijedila montaža tiskanih elemenata s integriranim armaturom i ispunom betonom. Nakon toga izvedena je krovna konstrukcija, dovršene su instalacije te ugrađena vrata, prozori, sanitarna oprema i namještaj te su izvedeni radovi brtvljenja i završne obrade, uključujući pokrov, odvodnju oborinskih voda i uređenje vanjskog prostora. Dodatno su razmotrene varijante arhitektonskog rješenja primjenom parametarskog programiranja i drugih projektantskih alata, pri čemu su analizirani gabariti, površine, prostorna organizacija, duljine zidova te oblikovni i prostorni izražaj. Provjerena je usklađenost s nacionalnim propisima za stanogradnju te konstrukcijskim i okolišnim normama, a rezultat gradnje dokumentiran je i dan na uvid.

3. Rezultati

3.1. Organizacija rada i priprema osoblja

Suradnja između Sveučilišta i društva za poslovanje nekretninama na izradi prototipa stambene građevine s 3D tiskanim elementima formalizirana je sklapanjem međuinstitucijskog sporazuma. Društvo za poslovanje

nekretninama imenovalo je lokalnog voditelja projekta radi koordinacije aktivnosti sa Sveučilištem i uključenim građevinskim poduzećem. Potom je uspostavljena radna skupina koju su činili stručnjaci iz partnerskih poduzeća, nastavnici i istraživači iz područja arhitekture, i građevinarstva, laboratorijski tehničari, projektno osoblje, studenti na stručnoj praksi te dodatni radnici.

Osoblje je organizirano u timove prema ključnim zadacima, pri čemu su timovi u pravilu uključivali sudionike sa Sveučilišta i vanjske suradnike. Opći upravljački tim predvodio je sveučilišni nastavnik zajedno s lokalnim voditeljem projekta društva za poslovanje nekretninama, uz potporu stručnog suradnika. Arhitektonsko-konstruktivski projekt tim osiguravao je integraciju projektnih rješenja i nadzirao radove, uključujući više specijaliziranih funkcija. Osim toga bili su formirani timovi za rad na gradilištu i u laboratoriju, sudjelovali su predstavnici partnerskih poduzeća te povremeno angažirani radnici. Takva organizacijska struktura pokazala se učinkovitom, no tijekom provedbe trebalo je dodatno precizirati raspodjelu zadataka, komunikacijske kanale i razmjenu informacija zbog specifične prirode aktivnosti.

Utvrđen je početni raspored aktivnosti, kojim su definirani uvjeti provedbe te potrebni materijali i oprema. Prototipovi su izrađeni u laboratorijima. Društvo za poslovanje nekretninama osiguralo je lokaciju gradnje te omogućilo primjenu obližnjih prostora za sastanke, radove na gradilištu i skladištenje materijala. Inicijativa je započela preliminarim ispitivanjima tiska zidova, pri čemu su bili provjeravani priprema smjese, debljina slojeva, stabilnost na projektiranoj visini i proces stvrdnjavanja, dimenzije i masa elemenata u cilju transporta te ugradnje armature, toplinske izolacije i instalacija.

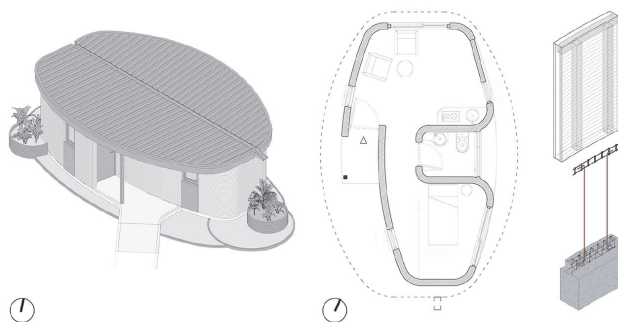
3.2. Arhitektonski projekt

Cilj izrade arhitektonskog projekta prototipa bio je prikazati samostojeću obiteljsku kuću, stambenu tipologiju raširenu na nacionalnoj i globalnoj razini. Definiran je osnovni oblik koji omogućuje razmatranje alternativnih tlocrtnih rješenja odnosno konfiguracija za različite lokacije. S obzirom na eksperimentalnu prirodu projekta, usvojen je minimalni prizemni volumen koji obuhvaća tri prostorije raspoređene linearno, čime se demonstrira mogućnost stanovanja jednog ili dvaju korisnika. Kuća je orijentirana uzdužno paralelno s glavnom vanjskom ulicom radi povećanja prepoznatljivost u javnosti.

Projektno rješenje objedinjuje ravne dijelove, uobičajene u stambenoj gradnji i pogodne za ugradnju konvencionalnih proizvoda, sa zakrivljenim dijelovima, koji su zbog veće stabilnosti, brzine izvedbe i izražajnog potencijala prikladniji za 3D tiskanje. Takvim se pristupom nastojalo istodobno prikazati prilagodljivost tehnologije 3D tiska konvencionalnim oblicima te njezin inovacijski potencijal. Kao rezultat toga definiran je izduženi tlocrtni oblik, s duljom osi u smjeru istok-zapad i ukupnom bruto površinom od 29,38 m², od čega korisna unutarnja površina iznosi 24,58 m².

Ulaz i prostori unutarnjega kretanja smješteni su uz javnu ulicu na južnoj strani, s manjim osunčanjem, dok su boravišni prostori

orijentirani prema sjeveru radi maksimalnog iskorištavanja sunčeva zračenja. Središnji jezgri dio namijenjen je sanitarnim sadržajima (kupaonici i kuhinjskim instalacijama), pri čemu je spavaća soba smještena na istočnome kraju, a prostor dnevnog boravka s blagovaonicom na zapadnome kraju, kako bi se iskoristila promjenjiva sunčeva svjetlost tijekom dana. Projektiran je krov sa strehama i pokrovom nagnutim prema unutrašnjosti, središnjim kanalom za prikupljanje oborinske vode koji se odvodi prema zapadu (slika 3.).



Slika 3. Arhitektonsko projektiranje (lijevo: pogled iz zraka; u sredini: tlocrt; desno: detalji zidova)

Opći prostorni raspored, s otvorenim prostorijama orijentiranim prema osunčanoj strani, središnjom sanitarnom jezgrom i uvučenim ulazom, definirao je četiri glavna zida koji čine obod građevine i razdvajaju unutarnje prostore. Na duljim vanjskim zidovima primijenjene su blage krivine velikog radijusa, dok su kraći i unutarnji zidovi izvedeni ravno, s oblikom kutovima malog radijusa. Takvo rješenje omogućilo je prostorije s ravnim stranicama radi lakšeg korištenja i smještaja namještaja, dok su zakrivljeni i konvergentni rubovi oblikovali ugodnu prostornu ovojnicu, stvarajući kontinuiranu mekoću linija i prepoznatljiv vanjski izgled građevine. Na osunčanoj strani smješteni su veliki otvori pune visine radi maksimalnog iskorištavanja sunčeva zračenja, uz ugradnju zaštitnih streha za smanjenje pregrijavanja tijekom ljetnih vršnih sati. Ti otvori osigurali su stalnu prirodnu rasvjetu, a sunčeva svjetlost ulazila je iz različitih kutova tijekom dana. Manji otvori ugrađeni su na južnoj strani, zajedno s bočnim otvorom u blizini kuhinjskog pulta, kako bi se dopunila rasvjeta i omogućila unakrsna ventilacija.

Krov se protezao iznad ulaza kako bi pružio zaštitu od kiše. Projektirane su vanjske žardinjere i popločane površine radi unaprjeđenja vanjskog prostora i omogućavanja boravka na otvorenome. Svi su ti elementi primjenjivali kružne ili zakrivljene oblike koji su dopunjavali cjelokupni arhitektonski izraz kuće. U sklopu rješenja predviđena je i rampa za korisnike invalidskih kolica te spremnik za prikupljanje oborinske vode.

3.3. Građevinski projekt

Izrada građevinskog projekta konstrukcije prototipa provedena je radi postizanja otpornosti na potres u skladu s čileanskim propisima. To je ostvareno primjenom armiranih nosivih

zidova s neprekidnim temeljima, gornjim poveznicama te laganom krovnom konstrukcijom radi smanjenja vertikalnih opterećenja. Mehaničko ponašanje tiskanih zidova razmatrano je kao ekvivalent ponašanju omeđenih zidova od betonskih blokova s unutarnjim armiranobetonskim stupovima i gredama, usidrenima u temelje, u skladu s pristupom koji su opisali Delavar i sur. [33] te prema normi ACI 318-19 [34]. Zidovi su izvedeni s dvostrukom tiskanom oplatom, debljine po 4,5 cm, razdvojenom šupljinom širine 12 cm, pri čemu su svakih 60 cm povezani dvostrukim segmentima koji tvore ispunjeni stup presjeka 20×20 cm te nadvojni gredu presjeka 20×30 cm. Svi konstrukcijski elementi izrađeni su od cementne smjese tlačne čvrstoće $f_c \geq 49,03$ MPa i izotropnog modula elastičnosti 3500 MPa u starosti od 28 dana.

Za temelje, stupove i gornje grede upotrijebljen je beton razreda tlačne čvrstoće C20, tlačne čvrstoće $f_c \geq 19,613$ MPa u starosti od 28 dana, uz dopušteni udio nesavršenosti od 10 %. Temelji su armirani četirima šipkama promjera 10 mm, stupovi jednom šipkom promjera 12 mm, a gornje grede dvjema šipkama promjera 10 mm uz poprečnu armaturu. Dodatne armaturne šipke ugrađene su u zonama sidrenja, a sve su izrađene od čelika razreda A630-420H.

Dodatno je predviđena ugradnja nadvoja izrađenih od šupljih čeličnih kvadratnih profila dimenzija $40 \times 80 \times 3$ mm, granice razvlačenja (f_y) od 264,8 MPa, radi poboljšanja povezanosti zidova. Krov je projektiran kao metalna konstrukcija izrađena od pocinčanih profila debljine 1 mm i širine 60 mm, proizvedenih od čelika ASTM A 653 SQ Gr40 s granicom razvlačenja $f_y = 275,76$ MPa. Krovna konstrukcija obuhvaća rešetkaste nosače male visine u poprečnoj smjeru te rešetkaste grede u uzdužnoj smjeru, obje s poprečnim potpornjima. Krov je oblikovan s dvostrukim nagibom prema središnjoj osi te produženim strehama. Na ulazu je proširenje krova bilo poduprto dodatnim metalnim stupom dimenzija $40 \times 40 \times 3$ mm.

Analiza je uzela u obzir tlo s dopuštenom statičkom nosivošću od 0,098 MPa i dopuštenom dinamičkom nosivošću od 0,127 MPa. Primijenjena opterećenja uključivala su vlastitu težinu (beton: 2400 kg/m³; čelik: 7850 kg/m³), korisno opterećenje od 200 kg/m², opterećenje vjetrom te seizmičko opterećenje s efektivnim ubrzanjem tla od 0,4 g. Budući da je riječ o netradicionalnome sustavu gradnje, usvojen je faktor smanjenja odziva $R = 2$, u skladu s čileanskim propisima za potresno projektiranje [33]. Najnepovoljniji seizmički koeficijent odgovarao je vrijednosti C_{max} pri čemu su osnovna posmična sila i seizmička težina određene u skladu s važećom normom.

Nosivost svakoga konstrukcijskog elementa provjerena je za najnepovoljnije kombinacije opterećenja, uključujući osna opterećenja, poprečne sile i savojne momente. Provjerena su ograničenja pomaka kako bi se osigurala usklađenost sa standardima NCh 433 i DS61. Izračuni su provedeni primjenom programa za metodu konačnih elemenata ETABS, uz dodatak proračunskih tablica u *MathCAD*-u i *Microsoft Excelu*. Također je uzeto u obzir da 3D tiskani beton ostvaruje tlačnu nosivost od približno 70 do 80 % u odnosu na konvencionalni beton, kako

navode Wolfs i suradnici [35]. Na temelju proračunskih izraza za omeđeno i armirano žiđe, preuzetih iz norme TMS 402/602, u proračunima prototipa primijenjen je redukcijski faktor 0,75. U analizi konstrukcije pretpostavljeno je da je građevina temeljena na tlu male gustoće, s dopuštenom statičkom nosivošću od 0,098 MPa i dopuštenom dinamičkom nosivošću od 0,127 MPa. Vertikalna opterećenja uključivala su vlastitu težinu materijala (beton: 2400 kg/m³; čelik: 7850 kg/m³) i korisno opterećenje od 200 kg/m². Bočna opterećenja obuhvaćala su djelovanje vjetra i potresa, pri čemu su seizmička opterećenja bila mjerodavna za dimenzioniranje. S obzirom na to da se kuća nalazi u području najveće seizmičke opasnosti u Čileu, usvojene su efektivne vrijednosti ubrzanja tla od približno 0,4 g.

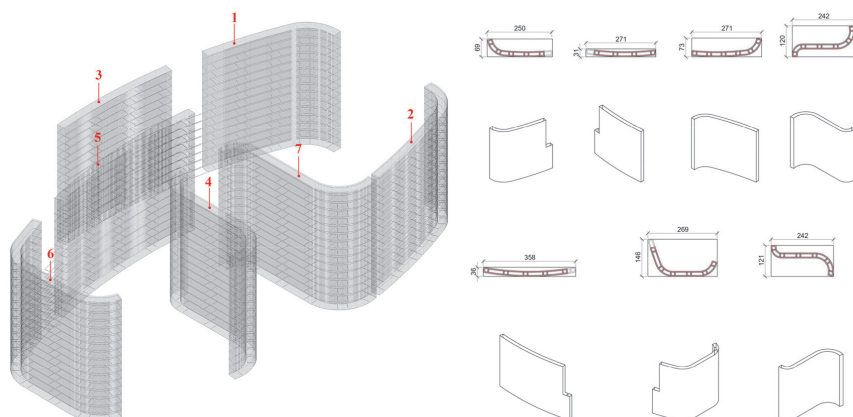
Budući da je riječ o netradicionalnome sustavu gradnje, čileanska norma za potresno projektiranje NCh 433 zahtijeva primjenu faktora smanjenja odziva $R = 2$ te usvajanje najkonzervativnijega seizmičkog koeficijenta (C_{max}). Otpornost konstrukcije provjerena je za svaki element pri najnepovoljnijim kombinacijama opterećenja, uz osiguranje sukladnosti s graničnim vrijednostima pomaka propisanim normama NCh 433 i DS61.

3.4. Planiranje gradnje

Tiskani zidovi projektirani su sa šupljim presjecima radi ugradnje konstrukcijske armature u stupove (usidrene u temeljnu gredu) i gornju zonu zida, dok su međuprostori predviđeni za dodatnu toplinsku izolaciju. Završne obrade usuglašene su s partnerskim poduzećima te su obuhvaćale gipsane ploče za stropove, toplinsku izolaciju od mineralne vune, valoviti lim za krovni pokrov, drvene obloge za stropove streha te vrata od drvenih ploča. Primijenjeni su i neki inovativni materijali poput epoksidne boje u spreju s usitnjenim plutom za premazivanje zidova (uz zadržavanje teksture tiska), drvenih podnih pločica, PVC prozora s dvostrukim ostakljenjem, površinski ugrađenih električnih dodataka, novih sanitarnih i kuhinjskih elemenata, zakrivljenih drvenih ploča i metalnih traka za rubove krova te raznih brtvi i ljepila.

Radi olakšavanja transporta, zidovi su podijeljeni na segmente na mjestima usklađenima s manjim otvorima, pri čemu masa pojedinog segmenta nije prelazila približno 1,5 t (slika 4.). Time je dobiveno ukupno sedam glavnih segmenata. Dodatno su tiskani manji elementi, uključujući niski zid na vanjskoj strani kupaonice te tri žardinjere. Tijekom tiska, zbog privremenog nedostatka materijala u jednoj fazi, trebalo je skratiti duljine dvaju zidnih segmenata (2 i 3).

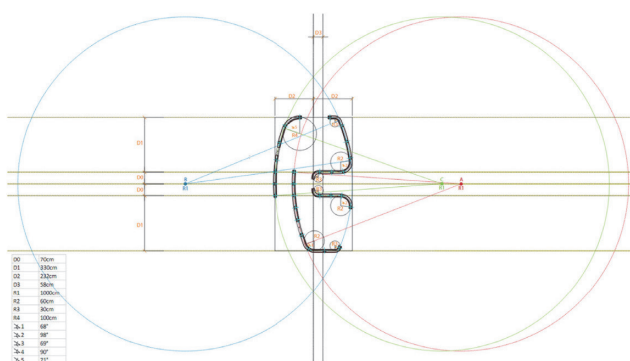
Svi dijelovi zidova, koji se mogu tiskati, imali su izduženi tlocrtni oblik s dijelovima zakrivljene geometrije, pri čemu su ukupne duljine varirale od 0,61 do 3,58 m, a širine od 0,25 do 1,46 m. Zidovi su zadržali ujednačenu debljinu od 20 cm, s osnim duljinama u rasponu od 0,85 do 3,76 m te kontinuiranom visinom od 2,3 m. Dodatno su izvedena tri manja završna zida visine 0,9 m, predviđena za ugradnju prozorskih otvora.



Slika 4. Zidovi predvideni za 3D tiskanje

3.5. Parametarsko programiranje

Nakon što je definirano opće projektno rješenje prototipa, geometrija zidova i manjih elemenata dodatno je razrađena parametarskim programiranjem, u cilju određivanja tlocrtnog rasporeda i generiranja putanje tiska za svaki element. Geometrija uzdužnih zidova i kutova oblikovana je primjenom lukova definiranih tetivama, uz unaprijed zadane položaje središta radijusa te početnih i završnih točaka, dok su poprečni zidovi smješteni unutar ortogonalne mreže osi, na razmacima određenima parametrima. Ukupna geometrijska shema standardizirana je primjenom dviju uzdužnih i dviju poprečnih udaljenosti, četiriju lukova i pet kutova, čime je definirano sedam zidnih segmenata, uz uvođenje jedanaest zakrivljenja koja su se na jednak način ponavljala u dvjema, četirima ili šest pojavnosti (slika 5.). Složenija zakrivljenja, promjene visine te raznolikije teksture nisu bile razmatrane u početnoj fazi eksperimentalnih istraživanja rješenja većih mjerila.



Slika 5. Parametarski dizajn prototipa kuće

Dodatno su mijenjani parametri udaljenosti, radijusa i kutova kako bi se generirale različite konfiguracije, ponajprije one s većim površinama, u cilju ispitivanja sposobnosti projektiranog sustava da se prilagodi različitim obilježjima stambenih jedinica, osobito većim dimenzijama. Unutarnje udaljenosti prostorija

i ukupne površine zabilježene su radi provjere funkcionalnosti, a dodavanjem novih zidnih segmenata ili manjim izmjenama postojećih omogućeno je formiranje većeg broja prostorija. Također su uključene komplementarne ravne konfiguracije odnosno rješenja s unutarnjim dvorištima. Za dio varijanti izrađeni su cjeloviti modeli građevina i umanjeni fizički modeli dobiveni 3D tiskom. Razvijen je i generativni sustav oblikovanja, opisan u ranijemu radu [34], usmjeren na početno definiranje arhitektonskog volumena.

Nadalje, geometrija zidnih segmenata i ostalih elemenata programski je obrađena radi generiranja putanje tiska sloj po

sloj, pri čemu su provedeni postupci rezanja modela na slojeve, definiranja obrisa te međusobnog povezivanja uz korekcije točaka u cilju izrade upravljačkih naredbi za stroj u G-kodu. Kod dvostrukih zidova primijenjeni su pomaknuti segmenti radi smještaja stupova, a takva su rješenja ispitana na tiskanim uzorcima kako bi se odredila putanja kojom se postiže najmanja potrošnja materijala za najveću brzinu izvođenja. Širina sajle iznosila je 4,5 cm, uz visinu sloja od 1,5 cm, pri čemu su za postizanje ukupne visine zida trebala 153 sloja s dvostrukom trakom. Programiranjem su obuhvaćeni i raspored te redoslijed izvođenja zidova unutar područja tiska za svaku radnu etapu, pri čemu su prilagodbe bile neophodne ovisno o raspoloživome prostoru, dostupnosti materijala, radnoj snazi i ograničenjima vezanima uz transport.

3.6. tisak zidova

Tiskani zidovi i manji elementi izrađeni su u sveučilišnome laboratoriju primjenom prethodno opisanog portalnog 3D pisaa i pripadajućih sustava za miješanje materijala. U postupku sudjelovao je tim djelomično angažiranih istraživača, koji su prvi put upotrebljavali navedenu tehnologiju (slika 6.).



Slika 6. tisak zidova u sveučilišnome laboratoriju

U početnoj fazi provedena su ispitivanja procesa tiska radi provjere postavki opreme, pripreme smjese, postupka pumpanja, brzine tiska i kvalitete izvedbe. Ispitivanja su obuhvatila tisak zidnih segmenata male visine, uz paralelnu analizu konstruktivno i arhitektonski različitih projektnih rješenja prototipa.

Sedam zidnih segmenata predviđenih za tisak izrađeno je u četiri radne etape, uz dodatnu etapu izrade manjih elemenata, pri čemu je raspored izvođenja bio uvjetovan dostupnošću materijala, kapacitetom opreme i raspoloživošću osoblja. Prve etape trajale su od tri do četiri dana, dok je završna etapa realizirana unutar jednoga radnog dana. Između pojedinih dnevnih radnih ciklusa unutar iste etape elementi i pisač zadržani su u izvornome položaju, uz zadržavanje učitana programa zapis, dok je na završni sloj svakog elementa nanesen adhezijski sloj kako bi se omogućio nastavak tiska u sljedećoj fazi. Po završetku treće etape došlo je do zastoja uzrokovanog čekanjem nove isporuke mješavine materijala, što je zahtijevalo prilagodbu oblikovanja zidova i pripadajućih programskih zapisa, pri čemu je trebalo umanjiti dimenzije pojedinih zidnih segmenata. Posljedično je dio bočnog zida dnevnog boravka u prototipu zamijenjen segmentom izvedenim kao čelični okvir s drvenom oblogom, a zbog smanjenja širine pročelnog zida ugrađen je i dodatni nosivi stup na ulazu. Dodatna etapa tiska niskog zida i žardinjera izvedena je naknadno, paralelno s radovima na samoj lokaciji, te je dovršena za dva dnevna radna ciklusa.

Svaki je dnevni ciklus tiska uključivao rad četiriju operatera: dvaju stručnih djelatnika i dvaju studentskih asistenata. Jedan je stručni djelatnik bio zadužen za upravljanje portalnim pisačem, praćenje napretka programskog izvođenja te nadzor toka i dobave mješavine putem kamerom snimljenih prikaza spremnika i tiskanog elementa. Drugi je stručni djelatnik nadzirao pripremu smjese i rad crpke miješalice, dok su asistenti bili odgovorni za dopremu materijala, podešavanje opreme i povremeni neposredni uvid u stanje tiskanog elementa.

Svakom je ciklusu tiska prethodila priprema opreme i materijala te programiranje stroja, a po završetku slijedili su čišćenje i demontaža pomoćnih sklopova. Svaki od tih postupaka

trajao je približno jedan sat. Postavljanje pisača obuhvaćalo je montažu crijeva, podešavanje spremnika, pozicioniranje crpke i materijala (u vrećama) te provođenje početnog ispitivanja mješavine i crpke do faze ekstruzije. Smjesa je ispitana pomoću uzorka za ispitivanje slijeganja kako bi se provjerila viskoznost prije potvrde postupka, posebno protoka vode. Prvi su slojevi tiska nadzirani u pogledu brzine, mogućnosti nadograđivanja i ujednačenosti visine, a u pojedinim je slučajevima trebalo privremeno zaustaviti tisak radi korekcije brzine ili dovoda vode, nakon čega se postupak ponovno pokretao od početka. Konzistencija smjese u spremniku te ugrađivost tiskanih slojeva neprestano su nadzirane kako bi se pravilno regulirali dotok vode i brzina tiska, uzimajući u obzir promjene temperature i relativne vlažnosti zraka u okolini. U nekoliko su se navrata pojavili djelomični lomovi u dužim pravocrtnih segmentima, zbog čega je trebalo privremeno prekinuti tiskanje, ukloniti oštećene dijelove te ponovno pokrenuti postupak.

Pojedini radni ciklusi trajali su od 0,83 h do 9,42 h, ovisno o programiranim elementima i raspoloživim kapacitetima (tablica 1.). Ukupno operativno vrijeme za pet serija tiska zidnih elemenata iznosilo je 55,05 h tijekom 12 dana, uključujući stanke i uklanjanje pojedinih segmenata. Brzina ekstrudiranih slojeva varirala je zbog kretanja motora pisača duž različitih osi, u skladu s programiranim putanjama. Kako je to prikazano u tablici 1., brzine tiska kretale su se od 5,9 cm/s do 12,2 cm/s, što je rezultiralo brzinama izvedbe zidnih segmenata između 0,3 m/h i 1,2 m/h. Ukupno je ostvareno 21,5 sati neposrednog vremena tiska, dok su vremena prelaska između pojedinih segmenata iznosila ukupno 29 sati.

Za sloj zida čije je vrijeme izrade približno prosječnom (tablica 2.) brzina tiska kretala se od 4 cm/s u potpornim segmentima unutarnjih zidova, gdje je bilo potrebno dodatno pomicanje mlaznice te njezino podizanje i spuštanje na oba kraja, do 16 cm/s u pravocrtnim dionicama ili dijelovima s većim radiusima zakrivljenosti. Kraći završeci zidova ostvarivali su brzine tiska od 6,7 cm/s. tiskani su slojevi imali približno 4,5 cm širine i 1,5 cm visine, uz manja odstupanja. Radni su ciklusi izvođeni pri temperaturama okoline između 12 °C i 20 °C, uz relativnu vlažnost zraka od 70 % do 80 %.

Tablica 1. Vrijeme i brzina tiska po zidnim segmentima

Zid br.	Vrijeme po sloju [s]	Duljina sloja [cm]	Brzina tiska po sloju [cm/s]	Ukupno vrijeme (153 sloja)		Duljina zida [m]	Brzina tiska po metru zida [m/h]
				[s]	[h]		
1	70,0	690,0	9,9	10710,0	3,0	2,7	0,9
2	48,0	348,0	7,3	7344,0	2,0	0,9	0,5
3	60,0	354,0	5,9	9180,0	2,6	0,8	0,3
4	77,0	936,0	12,2	11781,0	3,3	3,8	1,2
5	85,0	853,0	10,0	13005,0	3,6	3,4	0,9
6	90,0	800,0	8,9	13770,0	3,8	3,0	0,8
7	77,0	936,0	12,2	11781,0	3,3	3,8	1,2
Prosjek	72,4	702,4	9,5	11081,6	3,1	2,6	0,8
Ukupno		4917,0		77571,0	21,5	20,9	

Tablica 2. Segmenti jednog sloja zida

Segment	Duljina [cm]	Vrijeme [s]	Brzina tiska	
			mm/s	cm/s
Unutrašnja strana	288	18	160,00	2,67
Sjeverni kraj	20	3	66,67	1,11
Vanjska strana	316	27	117,04	1,95
Južna strana	20	3	66,67	1,11
Stupovi	156	39	40,00	0,67
UKUPNO	800	90		

3.7. Izvedba na gradilištu

Izvedba na gradilištu započela je paralelno s tiskom zidova u laboratoriju Sveučilišta, najprije izvedbom temelja, a potom montažom tiskanih zidova i ugradnjom konstrukcijskih armatura (slika 7.). Potom je nastavljena montažom krovišta, instalacijskih sustava i dodatnih elemenata, a završena radovima na završnim oblogama i uređenjem vanjskog prostora, uz specifične doprinose dobavljača gotovih betonskih mješavina, dodataka, stolarije, premaza i namještaja. Istraživači i asistenti Sveučilišta osigurali su dokumentaciju i stručni nadzor, dok su radove na gradilištu izvodili radnici građevinske tvrtke. Zbog zakrivljenih geometrija objekta ti su radovi zahtijevali nešto veći angažman od uobičajenog, jer je za temelje trebalo izraditi oplatu od šperploče rezanu po mjeri te savijati armaturu prema prilagođenim oblicima.

Doprema i ugradnja tiskanih elemenata zahtijevale su oslobađanje okolnog prostora za prihvata dizaličnog vozila te poravnavanje elemenata s vertikalnim armaturom ugrađenom u temelje. Na spojnu površinu nanesen je vezni most radi povezivanja tiskanih

elemenata s betonskim temeljima, uz stalne provjere nivelacije i poravnanja. Suprotno početnim očekivanjima, privremene konstrukcije i dodatno osoblje bili su potrebni u vrlo ograničenome opsegu. Dopremu i ugradnju betona za temelje, stupove i grede izvodio je vanjski dobavljač gotovog betona. Planirana toplinska izolacija, koja se u početku namjeravala injektirati u zidove, prilagođena je primjenom kugličastog polistirena kako bi se osiguralo potpuno i neprekidno ispunjavanje.

Krovnna konstrukcija i pokrov sastojali su se od niza prefabriciranih elemenata različitih dimenzija, potrebnih za oblikovanje cjelovitog ovoidnog profila s dvostrukim gornjim nagibom i donjim udubljenjem te spojnih gredica iznad otvora i pristupnih točaka. Ti su elementi izrađeni u obližnjoj radionici te ugrađeni na gradilištu, čime su ostvarene precizno izvedene nakošene plohe i zakrivljeni rubovi.

Ugradnja električnih mreža, vodovodnih instalacija i nadzorne opreme zahtijevala je preciznu koordinaciju između različitih izvođača radova i dobavljača. Neki elementi bili su montirani površinski, dok su drugi bili ugrađeni u specijalizirane brtve. Ugradnja vrata i prozora zahtijevala je posebnu pažnju zbog nepravilnih rubova.

Zidni su premazi naneseni u više slojeva i različitih tonova, što je zahtijevalo pozorno planiranje i zaštitu okolnih površina kako bi se osigurao pravilan slijed izvođenja. Izvedba stropnih i podnih završnih obloga također je zahtijevala dodatni angažman zbog zakrivljenih rubova. U sklopu projekta izvedene su i pristupne površine, terase te krajobrazno oblikovani prostori s oblim završecima.

Radovi na gradilištu izvodili su se tijekom 38 dana raspoređenih kroz šest mjeseci, pri čemu su dnevni angažmani trajali približno od 2 do 8 sati, uz sudjelovanje od 2 do 6 radnika po ciklusu. Ukupno vrijeme rada iznosilo je 181 h, što odgovara 22,5 uzastopnih radnih dana, odnosno približno 5 tjedana. Tijekom projekta nastala je minimalna količina otpada, bila je potrebna mala količina dodatne opreme i pomoćnih konstrukcija, a radovi su izvedeni bez ijedne nezgode.



Slika 7. Montaža 3D tiskanih zidova na gradilištu (lijevo) te izvedba temelja i krovišta (desno)

3.8. Analiza značajki i procesa

3.8.1. Usklađenost s propisima

Prototip izveden 3D tiskom projektiran je u skladu s lokalnim propisima koji se odnose na građenje i javnu upotrebu objekata (čl. 4.1.10 u [29]). Cjelovita arhitektonska i konstrukcijska projektna dokumentacija dostavljena je na pregled tehničkoj službi lokalne uprave, koja je nakon razmatranja dala odobrenje. Predložena izgrađena površina i visina objekta niže su od maksimalno dopuštenih vrijednosti određenih urbanističkim planom, a procijenjeni broj korisnika odgovara propisanim kriterijima. Nadalje, visina prostora ispunjava propisani minimalni zahtjev, dimenzije otvora usklađene su s važećim uvjetima, a materijali zidova postižu propisanu razinu akustičke zaštite. Zahtjevi u vezi s pristupačnošću za osobe s invaliditetom i starije korisnike ispunjeni su ugradnjom ulazne rampe, vrata dovoljne širine te unutarnjih prostora odgovarajuće veličine.

Za trajnu upotrebljivost građevine potrebno je također zadovoljiti toplinske zahtjeve prema klimatskoj zoni te posebne gradskom planu dekontaminacije [32]. Krov je projektiran s 100 mm toplinske izolacije od mineralne vune, oblogom od gipsanih ploča i slojem od drva i metalnog lima, pri čemu je postignuta procijenjena toplinska propusnost od 0,33 W/m²K, u skladu s redovitim i posebnim propisima (maksimalno dopuštenih 0,38 W/m²K odnosno 0,33 W/m²K). Zidovi imaju ponderiranu toplinsku propusnost od 0,645 W/m²K, uzimajući u obzir armiranobetonske dijelove i šupljine ispunjene kugličastim polistirenom, smještene između dvaju betonskih slojeva debljine 4,5 cm. Gornji dio zidova obložen je gipsanim pločama, čime se osigurava usklađenost sa standardnim propisima te se približava ispunjenju posebnih zahtjeva (maksimalno dopuštenih 1,7 W/m²K odnosno 0,60 W/m²K).

Prozori su opremljeni hermetički zatvorenim izolacijskim staklima (dvoslojnim ostakljenjem) s toplinskom propusnošću od 2,9 W/m²K te ponderiranom raspodjelom površina po stranama od 29,4 %, 0 %, 37 % i 6 %, čime se zadovoljava standardni zahtjev da maksimalno 60 % površine ostakljenja smije imati propusnost do 2,4 W/m²K. Također su zadovoljeni posebni propisi koji ograničavaju najveći dopušteni udio ostakljenih površina po pročelju na 78 %, 51 %, 38 % i 30 % Kontinuirana betonska podna ploha izvedena na tlu ne podliježe posebnim toplinskim zahtjevima. Vidljivi temelji ne uključuju dodatnu izolaciju, u skladu sa standardnim propisima, iako poseban propis zahtijeva minimalnu R-vrijednost od 45 R100.

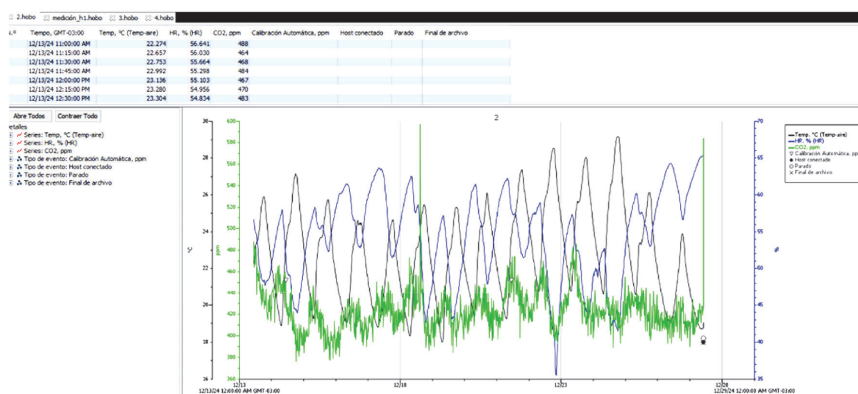
Posebni ekološki plan dodatno propisuje kontrolu rizika od kondenzacije, koja je riješena ugradnjom vodoodbojnih membrana na krovu i zidovima. Zahtjevi za ograničenje infiltracije zraka i nepropusnost zraka za vrata i prozore

ispunjeni su brtvljenjem svih spojeva mortom i silikonskim brtvama, uz preklopna rješenja obložnih ploča oko otvora.

3.8.2. Ekološka učinkovitost

Računalna simulacija energetske svojstava pokazala je prosječnu godišnju potrebu od 2228,8 kWh za cijelu kuću, odnosno 79,6 kWh/m² na godinu, raspoređenu na grijanje i hlađenje, ovisno o godišnjemu dobu. Najveća potreba za hlađenjem zabilježena je u veljači (250 kWh), dok je najveća potreba za grijanjem bila u kolovozu (160 kWh). Ukupna godišnja potreba za energijom procijenjena je na 2240 kWh/godišnje, što prema nacionalnoj tarifi za električnu energiju iznosi približno 448 američkih dolara na godinu. To je manje od polovine nacionalnog prosjeka po kućanstvu te je oko 20 % niže kada se proračun normalizira prema ekvivalentnoj površini.

Provodi se i nadzor okolišnih uvjeta pomoću četiriju unutarnjih senzora koji mjere temperaturu, vlažnost i CO₂, zajedno s vanjskom meteorološkom stanicom. Slijede faza praćenja kontroliranog toplinskog režima, uz primjenu HVAC sustava kapaciteta 12 000 BTU/h, prikupljanje podataka sa senzora, mjerenje infiltracije zraka (engl. *blower door test*), analiza toplinske propusnosti površina te termografska snimanja. Početna mjerenja tijekom dvotjednoga ljetnog razdoblja, provedena u uvjetima slobodne oscilacije temperature (bez klimatizacijskog sustava), zabilježila su prosječnu unutarnju temperaturu od 23 °C, s dnevnim maksimalnim vrijednostima od 27 do 29 °C u poslijepodnevnim satima te minimalnim vrijednostima od 17 do 18 °C u ranim jutarnjim satima. Relativna vlažnost, obrnuto proporcionalna temperaturi, u prosjeku je iznosila od 51 do 53 %, s najvišim vrijednostima od 61 do 63 % i najmanjim vrijednostima od 34 do 39 %. Koncentracije CO₂ kretale su se u prosjeku između 415 i 432 ppm, s vršnim vrijednostima od 493 do 597 ppm te minimalnim vrijednostima od 361 do 376 ppm. Prema ASHRAE 55 rasponima temperature za toplinsku udobnost, udobni se uvjeti postižu zimi pri prosječnim temperaturama od 20 do 24 °C, a ljeti pri temperaturi od 23 do 26 °C, uz relativnu vlažnost zraka između 30 i 60 %. Prototip je unutar tih granica održavao uvjete udobnosti tijekom 48,21 % vremena, što nadmašuje nacionalne pokazatelje za usporedive



Slika 8. Praćenje okolišnih parametara u dnevnome boravku tijekom 14 dana ljeta

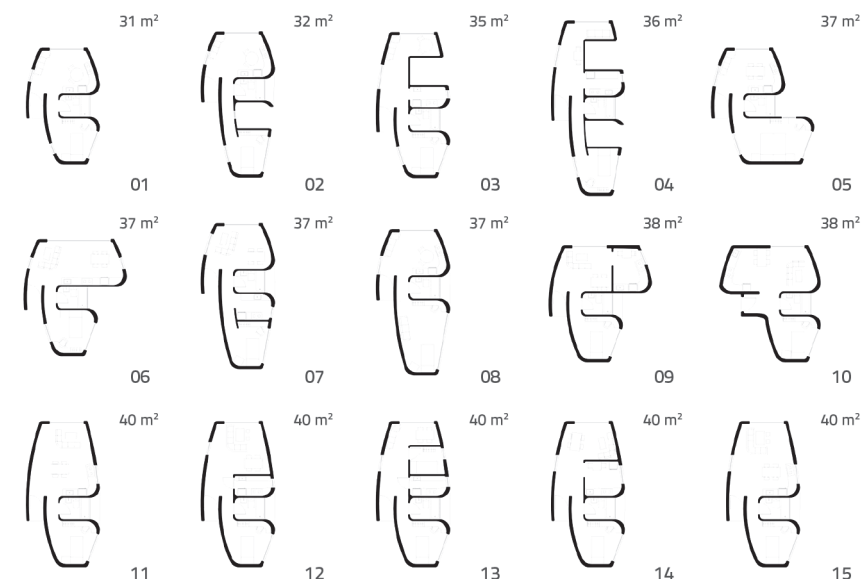
stambene objekte. Za koncentracije CO₂ u zatvorenim prostorima, ASHRAE 62.1 određuje optimalan raspon od 400 do 800 ppm, dok Svjetska zdravstvena organizacija vrijednosti ispod 1000 ppm smatra prihvatljivima za zdravlje (slika 8.). Dobiveni rezultati upućuju na to da objekt može osigurati toplinsku udobnost i kvalitetu zraka u unutarnjemu prostoru i bez dodatnih klimatizacijskih sustava.

3.8.3. Analiza konstrukcije

Analiza konstrukcije potvrdila je to da predloženi model zadovoljava nosivost na primijenjena opterećenja, pri čemu naprezanja prenesena na tlo ostaju unutar dopuštenih granica. Seizmičke deformacije (međukatni pomaci u smjerovima X i Y) bile su unutar dopuštenih granica propisanih važećim regulativama. Svi konstrukcijski elementi zadovoljavali su izračunane zahtjeve otpornosti, osiguravajući upotrebljivost i sigurnost kuće. Zidovi su, naprimjer, ispunili kriterije maksimalne tlačne i posmične otpornosti. Nadalje, zadovoljavajuće je potvrđena otpornost nadvoja, vlačnih sidara, posmičnih sidara, izvlačenja betona iz temelja, otpornosti temeljnog sidra na klizanje, izvlačenja zidnih elemenata te otpornosti na bočno odvajanje. Međutim, klizna otpornost zidnih sidara i zateznih sidara, iako unutar dopuštenih vrijednosti, pokazala je ograničene sigurnosne rezerve u odnosu na propisane granice. Analiza metodom konačnih elemenata provedena u računalnom programu ETABS potvrdila je da su naprezanja u tlu ostala ispod prihvatljivih pragova te da su seizmičke deformacije u skladu s čileanskim propisima. Općenito, strukturni elementi pokazali su odgovarajuću otpornost, osiguravajući dugoročnu sigurnost prototipa. Planirana su i dopunska eksperimentalna ispitivanja radi dodatnog usavršavanja i potvrde tih numeričkih proračuna.

3.8.4. Arhitektonske varijacije

Parametarsko programiranje omogućilo je razradu više od stotinu tlocrtnih rješenja za prizemne stambene jedinice, u rasponu od prototipova slične veličine (30 m² s jednom spavaćom sobom) do većih od nacionalnog prosjeka (90 m² s tri spavaće sobe). Dimenzije unutarnjih prostorija evidentirane su radi provjere njihove upotrebljivosti. Prilagodbe projektnih rješenja obuhvaćale su uzdužna ili poprečna proširenja tlocrta uz zadržavanje središnje sanitarne jezgre, što je povremeno uključivalo dvije kupaonice, te središnjeg ulaza. U pojedine su modele uključene međupovršinske niše poput unutarnjih dvorišta, dupliciranih profila ili kupaonica smještenih u središtu tlocrta radi osiguranja prozora u svim boravišnim prostorijama. Razvijena su i kompaktna te proširena rješenja,



Slika 9. Arhitektonske varijante stambenih rješenja

pomaknute konfiguracije te tlocrti u obliku slova L i U. Uočeni su izazovi vezani uz raspored namještaja, osobito uz zakrivljene zidove, razdvajanje prostorija te oblikovanje većih otvora koji su predstavljali konstruktivna ograničenja. Rješenja na više razina (dvoetažna ili troetažna) ocijenjena su izvedivima uz odgovarajuće projektiranje protupotresnih međukatnih konstrukcija i stubišta.

Razvijeno je pet detaljnih modela koji se uklapaju u širinu 3D pisača, čime je osigurana njihova izvedivost na gradilištu. Ta rješenja obuhvaćaju površine od 24,5; 37; 46; 64 i 84 m², s jednom do tri spavaće sobe, a neka uključuju i odvojene kuhinje (slika 9.). Izvorna tlocrtna koncepcija zadržana je uz prilagodbu osnih udaljenosti, središnjih pozicija i radijusa zakrivljenosti te uz dodavanje do triju unutarnjih zidova. Time su potvrđene raznolikost i učinkovitost parametarskog programiranja u generiranju valjanih projektnih varijanti.

3.8.5. Građenje

Prototip se izvodio u skladu s utvrđenim planom i raspoloživim resursima, uz povremena produljenja zbog neujednačenog ritma rada i specifičnih zahtjeva u pogledu materijala. Tehnička razrada i koordinacija bili su zahtjevniji nego uobičajeno zbog eksperimentalnoga karaktera projekta, pri čemu su se pojedini zadaci pokazali osobito izazovnim. Tijekom koordinacijskih rasprava s istraživačima i stručnjacima identificirana su četiri moguća poboljšanja za povećanje produktivnosti, održivosti i arhitektonske raznolikosti:

- bolje planiranje projekta, osobito u pogledu opskrbe materijalima, osobljem, opremom i potrebnim prilagodbama, kako bi se ubrzala ukupna izvedba putem tiska elemenata.
- prilagodba armature, brtvi i instalacija kako bi se omogućilo njihovo uklapanje u zakrivljene oblike i hrapave završne površine tiskanih elemenata



Slika 10. Prikaz izvedenog prototipa

- provjera mjera, razina i linija tiskanih elemenata vodovoda kako bi se osigurala njihova pravilna ugradnja s naknadnim komponentama
- optimiranje dodatnih elemenata radi povećanja učinkovitosti procesa tiska.

Prototip je dovršen, uključujući instalacije, namještaj, vanjske elemente te informativne oznake i fotografije koje dokumentiraju proces izgradnje (slika 10.). Održano je javno otvorenje kojemu su nazočili predstavnici lokalne građevinske industrije i akademske zajednice. Otvoreni obilasci održavaju se svaka dva tjedna, uz obveznu prijavu i stručno vođenje člana istraživačkog tima. U četiri mjeseca izlaganja prototip je posjetilo gotovo 300 osoba, uglavnom stručnjaka i studenata, a objavljeno je i desetak medijskih priloga, uključujući nekoliko međunarodnih, čime je ostvareno više od 300.000 izravnih dosegâ uz približno 1000 reakcija ili komentara. Posjetitelji su istaknuli jedinstven oblik i završnu obradu, percipiranu konstrukcijsku stabilnost te prilagođenost klimatskim uvjetima, osobito u pogledu osunčanja i oborina, pri čemu su posebnu pozornost posvetili unutarnjim prostorima. Povratne informacije naglasile su inovativnost arhitektonskog rješenja, ali i izraženu zabrinutost u pogledu troškova, potresne i energetske učinkovitosti te mogućih učinaka na zapošljavanje koji bi mogli nastati primjenom te tehnologije.

4. Rasprava

Iskustvo stečeno na prototipu u osnovi je ograničeno na konkretan slučaj i njegove kontekstualne uvjete. Zato se rezultati

mogu samo djelomično primijeniti u drugim scenarijima. Projektne odluke, raspoloživi resursi te provedene aktivnosti, uključujući prikupljenu dokumentaciju, predstavljaju analitička ograničenja. Unatoč toj specifičnosti, iz primjene novih tehnologija u sklopu uobičajenih projektantskih i izvedbenih praksi proizišle su brojne pouke koje mogu poslužiti kao smjernice za buduće građevine izgrađene 3D tiskom. Nadalje, nekoliko predviđenih ishoda zahtijeva dodatnu provjeru kako bi se potvrdila očekivana postignuća.

Obilježja prototipa, njegov stambeni potencijal te strategije za postizanje konstrukcijskih i okolišnih performansi razvijeni su i provedeni, no zahtijevaju eksperimentalnu provjeru tijekom vremena [36]. Uspješna gradnja, pri čemu su tiskani elementi iskorišteni za realizaciju prototipa, predstavlja znatno postignuće koje pokazuje potencijalne mogućnosti stanovanja. Međutim,

funkcionalna učinkovitost i dugoročna izvedivost još trebaju biti u cijelosti procijenjene. Prilagodba različitih građevinskih zadataka i materijala također upućuje na mogućnost šire integracije tehnologije 3D tiska u procese razvoja građevina, kako u Čileu tako i u sličnim kontekstima. Nadalje, mogućnost praćenja ponašanja konstrukcije izvedene 3D tiskom, u kombinaciji s interesom i prepoznavanjem javnosti, velik je potencijal za unapređenje prihvatanja i širu primjenu te tehnologije.

Ovo iskustvo izrade prototipa, kako je dokumentirano u ovome radu, pruža detaljan referentni materijal za to područje, u kojemu su dosadašnji prikazi često bili ograničeni na opće preglede ili izvješća o pojedinačnim zadacima, bez sveobuhvatnog prikaza izgradnje. Prikazane mogućnosti arhitektonske raznolikosti, potresno otpornih konfiguracija i klimatske prilagodbe konkretan su doprinos razvoju stambenih rješenja u potresno aktivnim područjima i zahtjevnim klimatskim uvjetima uz primjenu novih tehnologija.

U širem kontekstu stambene izgradnje u Čileu te globalnih eksperimentalnih nastojanja u području 3D tiskanih kuća, ovaj rad konkretan je primjer prakse koji unapređuje tehničke mogućnosti i društvene projekcije. Provedba predloženih strategija i provjera njihove učinkovitosti ključan su korak prema širenju primjene te tehnologije.

5. Zaključak

Razvoj ovog prototipa predstavlja multidisciplinarno nastojanje koje unapređuje primjenu 3D tiska demonstriranjem projektiranja i izvođenja, u cilju proširenja mogućnosti stambenih rješenja. Predstavljen je arhitektonski okvir za osnovno

projektno rješenje i više stambenih konfiguracija, koji odražava usklađenost s lokalnim propisima te pokazuje potencijal gradnje izvedene 3D tiskom. Toplinske se značajke procjenjuju analizama temeljenima na normama, simulacijama i početnim mjerenjima. Iznosena je i konstruktivna strategija za potresna područja, uz teorijsku razradu i praktičnu provjeru. Opisan je cjelovit proces građenja, uključujući pregled provedenih aktivnosti i njihovu javnu prezentaciju. Ova detaljna dokumentacija i analiza nemaju presedana u literaturi o gradnji izvedenoj 3D tiskom [6], a pružaju uvid koji može proširiti postojeće mogućnosti i razjasniti povezane izazove. Predloženo arhitektonsko rješenje, koje kombinira pravocrtnu i zakrivljenu formu, predstavlja nov i prilagodljiv oblikovni repertoar koji integrira konstrukcijske i okolišne zahtjeve te postiže pozitivne reakcije javnosti. Konstruktivno praćenje potvrđuje potresnu otpornost, čime se podupire razvoj otpornijih stambenih rješenja. Prilagodba 3D tiskanih kuća različitim klimatskim uvjetima dodatno olakšava poboljšanja energetske učinkovitosti, ekološke udobnosti

i održivosti. Nadalje, uvođenje varijabilnih tlocrta pokazuje potencijal za razvoj raznolikih stambenih modela.

Ovo je iskustvo relevantno za poticanje šire primjene 3D tiskanih kuća u različitim geografskim kontekstima i među različitim demografskim skupinama. Međutim, i dalje postoje izazovi u pogledu prikladnosti i performansi. Gradnja 3D tiskom u posljednjim je godinama pokazala znatan potencijal te mora napredovati prema produktivnim i mjerljivo primjenjivim rješenjima. Detaljno izvještavanje o tim naprecima ključno je za usmjeravanje daljnjeg razvoja i provedbe stambenih rješenja izvedenih 3D tiskom.

Zahvala

Ovo je istraživanje provedeno uz potporu istraživačkih projekata ANID Exploratory 13220156, EQM 210225 i FONDEF IT 24I0164. Također, autori zahvaljuju na podršci laboratoriju PEP-Lab pri CITEC-UBB te tvrtkama *Inmobiliaria Aconcagua, CBB, Sika, Isolcork i MK Tienda*.

LITERATURA

- [1] Ghaffar, S.H., Corker, J., Fan, M.: Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution. *Autom. Constr.*, 93 (2018), pp. 1-11.
- [2] Youssef, M., Abbas, L.: Applying 3d Printing Technology in Constructing Sustainable Houses, *Architecture and Planning Journal*, 29 (2023) 1, Paper 4, <https://doi.org/10.54729/2789-8547.1190>
- [3] Gardan, J., Hedjazi, L., Attajer, A.: Additive Manufacturing in Construction: State of Art and Emerging Trends in Civil Engineering, *Journal of Information Technology in Construction*, 30 (2025), pp. 91-112
- [4] García-Alvarado, R., Moroni-Orellana, G., Banda-Pérez, P.: Architectural Evaluation of 3D-Printed Buildings. *Buildings*, 11 (2021), Paper 254, <https://doi.org/10.3390/buildings11060254>,
- [5] Bello, N.D., Memari, A.M.: Comparative Review of the Technology and Case Studies of 3D Concrete Printing of Buildings by Several Companies, *Buildings*, 13 (2023) 106.
- [6] Placzek, G., Schwerdtner, P.: A Global Snapshot of 3D-Printed Buildings: Uncovering Robotic-Oriented Fabrication Strategies, *Buildings*, 14 (2024) 3410, <https://doi.org/10.3390/buildings14113410>
- [7] Khoshnevis, B.: Automated Construction by Contour Crafting-Related Robotics and Information Technologies, *Automation in Construction*, 13 (2004), pp. 5-19
- [8] Bos, F.P., Menna, C., Pradena, M., Kreiger, E., da Silva, W.R.L., Rehman, A.U., Weger, D., Wolfs, R.J.M., Zhang, Y., Ferrara, L.: The realities of additively manufactured concrete structures in practice, *Cem. Concr. Res.*, 156 (2022), Paper 106746.
- [9] Kreiger, M., Kreiger, E., Mansour, S., Monkman, S., Delavar, M.A., Sideris, P., Roberts, C., Friedell, M., Platt, S., Jones, S.: Additive construction in practice - Realities of acceptance criteria, *Cement and Concrete Research*, 186 (2024), Paper 107652, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107652>
- [10] ISO/ASTM 52939:2023 Additive Manufacturing for Construction- Qualification Principles-Structural and Infrastructure Elements, International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2023
- [11] ISO/ASTM 52950:2021 Additive Manufacturing-General Principles-Overview of Data Processing, International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2021.
- [12] ISO/ASTM 52900: Standard Terminology for Additive Manufacturing - General Principles. International Organization for Standardization Geneva, 2021.
- [13] ICC 1500-202X, Standard for Automated Construction Technology for 3D Printing Walls (Draft) International Code Council, 2025.
- [14] Žujović, M., Obradović, R., Rakonjac, I., Milošević, J.: 3D Printing Technologies in Architectural Design and Construction: A Systematic Literature Review. *Buildings* 2022, (2022)
- [15] Glendinning, M.: *Mass Housing: Modern Architecture and State Power*, A Global History, Ed., Bloomsbury, 2021
- [16] MINVU: Plan de Emergencia Habitacional, Ministerio de Vivienda y Urbanismo del Gobierno de Chile: Santiago, Chile, 2023
- [17] Molina, C., Kent, M., Hall, I., Jones, B.: A Data Analysis of the Chilean Housing Stock and the Development of Modelling Archetypes, *Energy Build.*, 206 (2020), Paper 109568
- [18] Jacoby, S., Arancibia, A., Alonso, L.: Space standards and housing design: Typological experimentation in England and Chile, *J. Archit.*, 27 (2022), pp. 94-126.
- [19] Muthumanickam, N.K., Duarte, J.P., Nazarian, S., Memari, A., Bilén, S.G.: Combining AI and BIM in the design and construction of a Mars habitat, In *The Routledge Companion to Artificial Intelligence in Architecture*, Routledge: London, UK, 2021, pp. 251-279.
- [20] Alqaryouti et al.: A Case Study of the Largest 3D Printed Villa: Breaking Boundaries in Sustainable Construction, *E3S Web of Conferences*, 586 (2024), Paper 01002,

- [21] Yunitsyna, B.: Sustainable Small-Scale Housing Construction using 3d-printing: Evaluation of Building prototypes, Sustainable Development, Culture, Traditions Journal, 5 (2024), <https://doi.org/10.26341/issn.2241-4002-2024-2a-1-T02030>
- [22] Lacava, Cherrington, N., Corrado, A., Bigdellou, S., Chen, Q.: A Preliminary Study of 3D Printing Home Designs for Improving Efficiency and Sustainability of Indigenous Housing in Canada. Sustainability, 16 (2024) 13, <https://doi.org/10.3390/su16135781>
- [23] Es-sebyty, H., Igouzal, M., Ferretti, E.: Improving stability of an ecological 3D-printed house - a case study in Italy, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 111 (2022) 1.
- [24] Arrêteau, M., Fabien, A., El Haddaji, B., Chateigner, D., Sonebi, M., Sebaibi, N.: Review of Advances in 3D Printing Technology of Cementitious Materials: Key Printing Parameters and Properties Characterization, Buildings, 13 (2023) 1828, <https://doi.org/10.3390/buildings13071828>
- [25] Ramirez, V.: Investigación sobre construcción 3d y sus aplicaciones, Congreso Internacional Arquitectura Blanca, 8 (2018).
- [26] Sanchez, S., Alapont, J.L., Bono, J., Catalan, F.J.: Una Vivienda Impresa en Marruecos: prototipo mediante Impresión 3d en Hormigón para el Solar Decathlon Africa 2019 Marrakech, Marruecos, 9º Congreso Internacional de Arquitectura Blanca - CIAB, 9 (202), pp. 298-305.
- [27] Cobo, C., Montoya, O.L.: Tuhouse: prototipo de vivienda social sostenible de alta densidad para el trópico, Revista hábitat sustentable, 11 (2021) 1, pp. 32-43, <https://dx.doi.org/10.22320/07190700.2021.11.01.03>
- [28] Zavaleta, D., et al.: 3D-printing of a basic housing unit prototype using earthen-based matrices stabilized with rice husk fibers, Journal of Building engineering, 103 (2025), Paper 12111.
- [29] MINVU DS 47 Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, Ministerio de Vivienda y Urbanismo del Gobierno de Chile, 1992.
- [30] INN Nch433 Of 2009 Diseño Sísmico de Edificios, Instituto Nacional de Normalización, Chile, 2009.
- [31] MINVU DS 61 Diseño Sísmico de Edificios, Ministerio de Vivienda y Urbanismo del Gobierno de Chile, 2011.
- [32] MMA D6 Plan de Prevención y de Descontaminación Atmosférica para las Comunas de Concepción Metropolitano, Ministerio del Medio Ambiente del Gobierno de Chile, 2019.
- [33] Delavar, M., Chen, H., Sideris, P.: Seismic Design Methodology for 3D Printed Concrete Buildings, Cityscape 25 (2023) 1, pp. 177-197.
- [34] ACI: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318-19). Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2019.
- [35] Garcia-Alvarado, R., Soza-Ruiz, P., Valenzuela-Astudillo, E., Martuffi-Lazo, D., Duarte, J.P.: Development of a Generative Design System for 3D-Printed Houses in Chile, Buildings, 14 (2024), Paper 2939.