

Digitalno modelovanje postojećih stambenih fondova radi procene energetske efikasnosti i cirkularnosti: Najnovija dostignuća

Zorana Petojević
Upravljanje projektima u
građevinarstvu,
Građevinski fakultet
Univerziteta u Beogradu
Beograd, Srbija
Zurich University of Applied
Sciences, School of
Architecture, Design, and Civil
Engineering, Toessfeldstrasse
11, 8401 Winterthur,
Switzerland
zjovanovic@grf.bg.ac.rs,
ORCID 0000-0001-9555-5989

Ana Nadaždi
Upravljanje projektima u
građevinarstvu,
Građevinski fakultet
Univerziteta u Beogradu
Beograd, Srbija
anikolic@grf.bg.ac.rs , ORCID
0000-0002-2833-9722

Aleksandra Parezanović
Upravljanje projektima u
građevinarstvu,
Građevinski fakultet
Univerziteta u Beogradu
Beograd, Srbija
aparezanovic@grf.bg.ac.rs ,
ORCID 0000-0002-4706-3135

Dušan Isailović
Upravljanje projektima u
građevinarstvu,
Građevinski fakultet
Univerziteta u Beogradu
Beograd, Srbija
disailovic@grf.bg.ac.rs ,
ORCID 0000-0002-9664-2483

Nenad Višnjevac
Upravljanje projektima u
građevinarstvu,
Građevinski fakultet
Univerziteta u Beogradu
Beograd, Srbija
nvisnjevac@grf.bg.ac.rs ,
ORCID 0000-0002-5097-7106

Radovan Gospavić
Katedra za Matematiku Fiziku i
Nacrtnu Geometriju,
Građevinski fakultet
Univerziteta u Beogradu
Beograd, Srbija
gospavic@grf.bg.ac.rs, ORCID
0000-0002-4336-1813

Goran Todorović
Katedra za Matematiku Fiziku i
Nacrtnu Geometriju,
Građevinski fakultet
Univerziteta u Beogradu
Beograd, Srbija
todor@grf.bg.ac.rs, ORCID
0000-0002-1195-4761

Abstract— U današnjem svetu, zgrade su ključni akteri u ekosistemu, trošeći ogromne količine resursa i generišući značajne količine štetnih gasova i otpada. Evropska Unija

postavlja visoke ciljeve u dekarbonizaciji, energetske efikasnosti i cirkularnosti zgrada, zahtevajući detaljno sagledavanje postojećih zgrada. Digitalna tranzicija postaje ključna poluga u

tom procesu, omogućavajući precizno digitalno modelovanje postojećih zgrada i urbanih regija. Ovo istraživanje identifikuje ključne izazove, uključujući prikupljanje obimnih podataka, stvaranje preciznih 3D modela i integraciju semantičkih podataka za preciznu analizu energetske efikasnosti i cirkularnosti zgrada. Metodologija modelovanja jedne urbane regije u Beogradu je prikazana kao studija slučaja.

Ključne reči— Digitalno modelovanje gradskih sredina; Energetska sanacija; Cirkularna ekonomija; BIM; GIS

I. UVOD

Savremeni svet suočava se sa jednim od najvećih izazova - klimatskim promenama, koje su delimično rezultat ljudskih aktivnosti. Izgrađeno okruženje koje smo stvorili ima značajan negativan uticaj na klimatske promene, a zgrade su centralni deo tog okruženja. One su veliki potrošači energije, prirodnih resursa, uzrokuju emisiju velike količine štetnih gasova sa efektom staklene bašte i proizvode velike količine otpada kroz procese građenja, renoviranja ili rušenja [1]. Sa druge strane, građevinski sektor istovremeno igra ključnu ulogu u ekonomskom razvoju i unapređenju infrastrukture sa tendencijom rasta u narednim godinama, podstaknutim urbanizacijom, rastom populacije i potrebom za razvojem infrastrukture [2]. Sve ovo stavlja naglasak na potrebu da se izgrađeno okruženje, a posebno zgrade, transformišu u održive sisteme sa što manjim negativnim uticajem na prirodu. U kontekstu izgradnje novih zgrada, primetan je sve veći trend upotrebe održivih tehnologija i materijala. To uključuje izgradnju zgrada od recikliranih materijala, ugradnju sistema koji koriste samo obnovljive izvore energije, kao i primenu koncepta potpuno demontažnih i iskoristivih zgrada [3]. Ipak, iako ove zgrade predstavljaju izazov kako u fazi izgradnje tako i tokom celog njihovog životnog veka, veći izazov leži u transformaciji postojećih zgrada u ovakve zgrade. Procenjuje se da će u narednih 20-30 godina samo 2% novih zgrada biti izgrađeno, dok će 98% postojećih zgrada ostati i dalje u upotrebi [4]. Sve ove zgrade su predviđene da budu transformisane u održive sisteme [4]. Iz tog razloga, neophodno je usmeriti pažnju i resurse ka postojećim zgradama kako bismo ostvarili ciljeve održivosti.

Evropska unija je uspostavila robustan sistem strategija, direktiva i akcionih planova u okviru kojih je postavila visoke ciljeve u oblastima dekarbonizacije, energetske efikasnosti i cirkularne ekonomije u zgradarstvu. Sve nove javne zgrade moraju biti zgrade bez emisije štetnih gasova već od 2027, a ostale nakon 2030, dok postojeće zgrade moraju zadovoljiti minimalne energetske standarde počevši od 2027 kroz primenu mera za obnovu koje su u skladu sa principima cirkularne ekonomije [4], [5]. U skladu s postavljenim ciljevima, dugoročno planiranje intervencija u postojećem fondu zgrada mora se oslanjati na relevantne i precizne podatke o karakteristikama datog fonda. Iako modelovanje pojedinačnih zgrada, bilo da se radi o energetskim, konstruktivnim, materijalnim, ekološkim ili finansijskim parametrima, može biti izvodljivo uz razumno potrošeno vreme, korišćenjem sada već odavno razvijenih metodologija i široko dostupnih tehničkih resursa, isto se ne možemo reći

kada je reč o modelovanju urbanih regija sa hiljadama ili čak milionima zgrada. Čak i modeliranje jednog od prethodno navedenih aspekata za sve zgrade unutar jedne urbane regije, uz zahtev za racionalnu potrošnju resursa, kako tehničkih, ljudskih, tako i finansijskih, predstavlja izazovan zadatak. Ipak, zahtevi za utvrđivanjem stanja postojećeg fonda zgrada prisutni su već u nekoliko dokumenata. Na primer, Direktiva o energetskim performansama zgrada (EPBD) zahteva detaljno sagledavanje postojećih zgrada na nacionalnom nivou u cilju izrade Nacionalnih strategija za renoviranje, kao i potrebu harmonizacije energetske razreda na nivou EU uz integrisanje podataka u centralni repozitorijum zgrada i digitalne knjige zgrada.

Sa druge strane, iako je sektor građevinarstva ocenjen kao jedan od najsporijih u prihvatanju digitalizacije, digitalna tranzicija postaje sve važnija u ovom sektoru [6]. Uprkos izazovima, digitalizacija se definiše kao ključni faktor za transformaciju građevinskog sektora u održivi sistem. Digitalne tehnologije omogućavaju stvaranje preciznih i detaljnih digitalnih kopija postojećih zgrada, kao i kompleksnih modela urbanih regija.

Potreba za stvaranjem 3D modela zgrade i gradova, tj. digitalne kopije nečeg postojećeg, nije nova, ali je i dalje izazovno ako želimo postići visok nivo preciznosti, detaljnosti i automatizacije pogotovu. U poslednjih nekoliko decenija, 3D modeli gradova su uglavnom bili korišćeni za vizualizaciju; međutim, danas se sve više primenjuju u različitim domenima i za širok spektar zadataka, kao što su izračunavanje prenosa toplote, za simulaciju potrošnje energije u zgradama, simulaciju protoka vazduha, procenu šteta od poplava ili zemljotresa, analizu solarne radijacije, procenu cirkularnosti i protoka materijala [7-12]. Za ovakve analize potrebni su nam informacioni modeli zgrada sa relevantnim semantičkim podacima: godina izgradnje, tip zgrade, karakteristike i količine ugrađenih materijala, podaci u realnom vremenu poput temperature u zatvorenom prostoru, nivoa buke, prisustva ljudi i životinja, vlažnosti vazduha, stanja komponenti zgrade (npr. otvaranje/zatvaranje prozora), parametri vazduha, nivoa solarnog zračenja, itd. Sa druge strane potreba za nivom geometrijske preciznosti zavisi od zahtevane analize, niži nivoi obično se koriste za svrhe urbanističkog planiranja, dok inženjerske analize zahtevaju preciznije modele, gde specifične analize kao što su analize protoka unutrašnjeg vazduha zahtevaju modelovanje i unutrašnjosti objekta. Značaj ovih analiza se drastično povećava sa povećanjem digitalizovane regije, tj. ako možemo raditi analize za čitave gradove ili države.

Međutim, izazovi u stvaranju preciznih 3D modela za veliki broj zgrada su i dalje prisutni. Potrebno je prikupiti obimne podatke o svakom delu zgrade, što može biti vremenski i resursno zahtevno. Takođe, potrebno je koristiti napredne tehnologije za skeniranje i modeliranje kako bi se postigla visoka preciznost i detaljnost [9], [11], [13], [14]. Sve ovo zahteva stručnost i investicije kako bi se obezbedila

tačna i pouzdana digitalna kopija postojećih zgrada, gradova ili država.

U ovom radu dat je pregled savremenih metoda i tehnologija za modelovanje postojećih stambenih fondova, izradu digitalnih mapa za urbane regije, kao i njihovu primenu u proceni energetske efikasnosti i cirkularnosti. Navedeni su ključni izazovi i mogućnosti za buduća istraživanja i razvoj u ovoj oblasti. Na kraju je prikazan metodološki okvir za modelovanje jedne urbane regije u Beogradu koji se razvija u okviru Horizont projekta CircBoost.

II. DIGITALNO MODELOVANJE ZGRADA ZA POTREBE ENERGETSKOG MODELOVANJA

Kada je u pitanju energetska modelovanje zgrada velikih regija, ne primenjuje se uvek digitalno mapiranje. Postojeći pristupi mogu se podeliti u tri kategorije: (i) top-down, (ii) bottom-up statistički i (iii) bottom-up inženjerski pristupi [7]. Samo bottom-up inženjerski pristupi uključuje digitalno modelovanje zgrada.

Top-down pristup ne koristi digitalne modele zgrada, već funkcioniše na način da se analizira i modeluje potrošnja energije na agregiranom nivou, umesto da se fokusira na pojedinačne zgrade. Umesto da se bavi detaljima o svakoj zgradi, top-down pristup se oslanja na statističke modele i analize koje identifikuju obrasce potrošnje energije na nivou populacije zgrada. Na primer, u top-down pristupu može se analizirati ukupna potrošnja energije u gradovima različitih veličina na osnovu podataka o prosečnoj potrošnji po stanovniku ili po kvadratnom metru prostora. Iako može pružiti korisne uvide na visokom nivou, top-down pristup može propustiti specifične karakteristike ili faktore koji utiču na potrošnju energije u pojedinačnim zgradama.

Ni Bottom-up statistički pristup ne koristi digitalne modele, već empirijske podatke i merenja kako bi procenio potrošnju energije zgrada. Na osnovu ovih podataka, statistički modeli se koriste za predviđanje potrošnje energije za različite tipove zgrada na osnovu njihovih karakteristika i lokalnih faktora. Na primer, moguće je koristiti podatke o veličini zgrade, starosti, vrsti grejanja i klimatskim uslovima kako bi se predvidela količina energije koju bi prosečna zgrada u određenoj oblasti potrošila tokom godine. Primena ovakvih pristupa je značajno ograničena jer se oslanja na tačnost i reprezentativnost dostupnih podataka i gotovo da se i ne koristi u inženjerske svrhe.

Bottom-up inženjerski pristup se oslanja na simulaciju fizičkih procesa kako bi se procenile performanse zgrada. Bottom-up inženjerski pristup koristi matematičke modele koji opisuju termičke karakteristike zgrada i njihove sisteme grejanja, hlađenja i ventilacije. Ovaj pristup sastoji se od dva glavna tipa: (a) zasnovanog na arhetipu i (b) Building-by-building pristup [7].

Modeliranje energetske efikasnosti zgrada po arhetipima predstavlja pristup koji omogućava procenu energetskih

performansi velikog broja zgrada koristeći reprezentativne tipove zgrada, poznate kao arhetipovi. Postoje nacionalne i evropske studije koje su sprovedene kako bi definisale tipologije zgrada - arhetipovi i njihove glavne karakteristike (na primer, projekti TABULA). Za zemlje koje nemaju nacionalnu tipologiju, da bi se koristion ovaj pristup mora se sprovesti proces arhetipizacije zgrada. On se obično sprovodi u dva koraka: segmentacija (takođe poznata kao klasifikacija) i karakterizacija (takođe poznata kao parametrizacija) [8]. Segmentacija je proces grupisanja objekata prema određenim karakteristikama poput namene, lokacije, starosti, veličine ili energetske efikasnosti. Karakterizacija se odnosi na proces dodeljivanja specifičnih vrednosti ili parametara svakom arhetipu. Ovo uključuje definisanje različitih karakteristika ili osobina svakog arhetipa, kao što su veličina, period izgradnje, ugrađeni materijali, energetska efikasnost i druge relevantne informacije.

Nakon definisanja arhetipova, pristupa se prikupljanju podataka o zgradama u izabranoj regiji. Ovi podaci uključuju prostorne informacije i druge relevantne detalje. Obično se podaci dobijaju iz javnih baza podataka o zgradama ili katastra, koji sadrže informacije poput tipa zgrade, lokacije, godine izgradnje, visine, broja etaža, bruto i neto površine. Takođe, prikupljaju se i meteorološki podaci iz stanica u odabranoj regiji. Često se za dobijanje geometrije osnovne zgrade koristi OpenStreetMap, koja se zatim kombinuje sa informacijama o visini i broju etaža, stvarajući uprošćeni geometrijski model zgrade (najčešće nivoa detaljnosti LOD1 [9]).

Nakon dobijanja ovih geometrijskih modela za sve zgrade, primenjuje se tehnika grupisanja i klasterovanja zgrada. Zgrade se prvo grupišu najčešće prema parametrima kao što su starost, klimatska zona i tipologija zgrade. Zatim se vrši dalje klasterovanje, tj. dodatno se objekti dele na podgrupe (klustere) unutar svake grupe. Ova podela zasniva se na parametrima koji imaju značajan uticaj na energetske potrebe zgrade, kao što su faktor oblika zgrade, faktor zaklonjenosti zgrade drugim zgradama, što je bitno za procenu toplotnih dobitaka, kao i parametar površina zgrade.

Kada se cela oblast podeli na klustere, iz svakog klastera se bira reprezentativni uzorak zgrada za koje se kasnije vrši simulacija potrošnje energije. Obim uzorka se bira tako da broj simulacija ne bude previše računarski zahtevn (do 50 zgrada po klasteru [8]), a reprezentativne zgrade se smatraju onima čije vrednost parametra za dati klaster odstupa što manje od srednje vrednosti za sve zgrade u klasteru. Kada je određen reprezentativni uzorak, karakterizacija elemenata zgrade se najčešće vrši se na osnovu tipa zgrade i godine izgradnje. Karakterizacija podrazumeva, definisanje debljine međuspratne konstrukcije, debljine spoljašnjih zidova, odnos transparentnih i netransparentnih površina i termičke karakteristike elemenata. Svi ovi parametri predpostavljaju se onako kako je to definisano za tip zgrade kome određena zgrada pripada. Dodatno, tehnike mašinskog učenja se isto mogu primeniti za karakterizaciju elemenata zgrade [8], ali

trening set za ove predikcione modele mora biti značajno veliki. Pored navedenog i standardi koji se koriste u građevinarstvu, preporuke za projektovanje i naučna literatura mogu biti izvori podataka. Ovako semantički obogaćeni modeli u reprezentativnim uzorcima svih klastera se sada koriste za simulaciju energetske potrebe. Prilikom simulacije, ostali parametri značajni za energetske modelovanje, kao što su ugrađeni tehnički sistemi, režimi njihovog rada i okupiranost zgrade se najčešće uzimaju iz relevantnih standarda. Dobijena prosečna vrednost potrošnje energije po jednom metru korisne površine na godišnjem nivou (KWh/m²/a) za dati klaster se uzima kao referentna vrednost za sve zgrade u datom klasteru. Ukupna energija za svaku zgradu se dobija na osnovu dobijene prosečne vrednosti KWh/m²/a za klaster kome zgrada pripada i korisne površine zgrade. Nakon proračuna za sve zgrade, njihove ukupne energije se mogu agregirati na različitim nivoima: za jedan kvart, ulicu, mesnu zajednicu, opštinu, grad i na kraju za čitavu državu (ako je tolika regija uzeta za modelovanje) i koristiti za dalje analize.

Ovaj pristup u modelovanju ima svoje prednosti jer ne zahteva značajne računarske resurse i nije vremenski zahtevan. Ukoliko postoje dobre baze podataka o zgradama i jasno definisana tipologija zgrada u državi, proces prikupljanja podataka postaje manje zahtevan. Međutim, mana ovakvog pristupa leži u preciznosti modela, jer se modelovanje energetske potrebe zasniva na reprezentativnim zgradama koje se kasnije skaliraju na veću populaciju zgrada. Takođe, sama geometrija modela (noži nivo LOD1, slika 1), koja se generiše na osnovu osnove objekta i informacija o ukupnoj visini, takođe utiče na tačnost izračunavanja. Ipak smatra se da je ovaj način modelovanja zgrada dovoljno precizan za sagledavanje potreba za renoviranjem većih grupa zgrada kao i ispitivanje različitih scenarija energetske sanacije i modeliranja procene životnog ciklusa (engl. *Life cycle assessment - LCA*) i donošenje strateških odluka.

Proteklih godina usled brzog napretka geoinformacionih tehnologija (GIS) i računarskih sposobnosti, omogućeno je modelovanje pojedinačnih zgrada u velikom obimu. Ovaj pristup modelovanja fonda zgrada za potrebe procene energetske potreba naziva se Building-by-building (zgrada po zgrada) pristup. Sam proces energetskog modelovanja kod ovog pristupa prolazi kroz nekoliko koraka: prikupljanje podataka za geometrijsko modelovanje zgrada, integracija i procesuiranje podataka za dobijanje 3D modela u nekom od formata koji se kasnije mogu koristiti u simulacijama, definisanje i prikupljanje podataka za semantičko obogaćivanje modela, ovi podaci mogu biti i iz realnog vremena što povećava tačnost kao i iz drugih baza podataka, integrisanje ovih podataka u izabrani 3D format, povezivanje sa programima za vizualizaciju 3D modela, izbor vrste simulacije (stacionarni uslovi, dinamičke simulacije, vremenski period: časovni, mesečni, godišnji) koja će se sprovesti, povezivanje 3D semantičkih modela sa izabranim programom za simulaciju energetske potrebe, samo simuliranje i agregiranje rezultata za njihovu dalju analizu.

Kako bi se prvo adekvatno modelovali geometrijski modeli potrebno je pregršt podataka. GIS informacioni sistemi i OpenStreetMap pruža obilje informacija o infrastrukturi regije i zgradama u njoj. U poslednje vreme sve više se kriste tehnike kao što su LiDAR (Light Detection and Ranging) i fotogrametrija za akviziciju podataka sa terena [9].

LiDAR tehnologija, omogućava prikupljanje detaljnih trodimenzionalnih informacija o terenu i objektima putem laserskog skeniranja, dok fotogrametrija koristi fotografije za izradu trodimenzionalnih modela [9], [13]. Kao rezultat dobija se oblak tačaka koji se dalje procesuiraju kako bi se izdvojile zgrade. Segmentacija i klasterovanje su načini na koje se ova izdvajanja izvršavaju. Detekcija zgrada je suštinski segmentacioni proces u kojem se detektuju grupe tačaka koje pripadaju zgradama i odvajaju se od ostalog oblaka tačaka. Nakon što su zgrade detektovane, sledeći korak je ekstrakcija njihovih geometrijskih karakteristika kao što su oblik, visina i orijentacija, a onda se zgrade mogu klasifikovati prema različitim svojstvima kao što su namena, starost ili energetska efikasnost. Klasifikacija zgrada je od suštinskog značaja za razumevanje njihovih karakteristika i potreba u kontekstu energetske efikasnosti. Nakon što su zgrade detektovane, karakterisane i klasifikovane, mogu se kreirati 3D modeli svake zgrade.

Rekonstrukcija zgrada iz oblaka tačaka može se raditi na dva načina, korišćenjem: *model driven methods* - metode vođene modelom ili korišćenjem *data driven methods* - metode vođene podacima [9], [14]. Metode vođene modelom koriste unapred definisane modele ili šablone za identifikaciju i rekonstrukciju zgrada iz podataka o tačkama. Ovi modeli sadrže informacije o geometriji zgrada i tipičnim karakteristikama strukture. Korišćenjem algoritama, podaci o tačkama se porede sa ovim modelima kako bi se identifikovale zgrade i odredile njihove karakteristike. Međutim, ove metode mogu biti manje precizne za kompleksne ili nepravilne strukture. Za kompleksnije strukture koriste se metode vođene podacima koje koriste mašinsko učenje i statističke tehnike za identifikaciju obrazaca u podacima o tačkama i rekonstrukciju zgrada na osnovu tih obrazaca. Umesto unapred definisanih modela, analizira se velike količine podataka kako bi se identifikovale zajedničke karakteristike zgrada i generisali odgovarajući modeli. Ove metode zahtevaju obimnije skupove podataka, tj. oblake tačaka velikih gustina koji se najčešće dobijaju kombinacijom snimanja sa terena i iz vazduha jer u suprotnom modeli mogu biti nedovoljno obučeni i podložni greškama. Bez obzira koji metod se koristi, uvek se vrši integrisanje sa podacima iz različitih baza: GIS ili bilo kojih drugih nacionalnih baza koje se sve više kreiraju za potrebe različitih analiza i kreiranja statistika. Različiti tipovi podataka se integrišu u 3D standardizovane formate, kao što su CityGML, Shapefile i GeoJSON. Najčešće korišćeni format je CityGML [9], [11].

CityGML predstavlja međunarodni standard koji je razvio Open Geospatial Consortium (OGC). Ovaj standard

predstavlja otvoreni model podataka zasnovan na XML formatu, a njegova struktura se oslanja na porodicu ISO 19100 standarda i predstavlja aplikacionu šemu za Geography Markup Language (GML). Koristi se za skladištenje i razmenu virtualnih 3D modela gradova. Ono što razlikuje CityGML od konvencionalnih načina reprezentacije 3D modela gradova jeste mogućnost dodavanja semantičkih slojeva u model kao i mogućnost povezivanja objekte sa odgovarajućim objektima u eksternim bazama podataka [11].

Objekti u CityGML modelu mogu biti predstavljeni na pet različitih nivoa preciznosti, poznatih kao nivoi detaljnosti (Level Of Detail - LOD). LOD u CityGML-u predstavlja različite nivoe tačnosti i kompleksnosti strukture objekata u 3D modelu grada. Na najnižem nivou, LOD0, koristi se 2.5D digitalni model terena (DTM), prikazujući zgrade kao jednostavne osnove ili poligone ivica krova. LOD1 predstavlja zgrade kao blokove bez detaljnih struktura krova, dok se na LOD2 dodaje jednostavna struktura krova i informacije o većim delovima zgrade poput balkona. Detaljniji nivo, LOD3, obuhvata precizniju geometriju spoljih zidova kao i krovne strukture, prozore i vrata. Na najvišem nivou, LOD4, pružaju se informacije o enterijerima zgrada, uključujući prostorije, stepenice i nameštaj (Slika 1).



Sl. 1. Standardizovana mera Level Of Detail (LOD) koja ukazuje na nivo detaljnosti modela. Izvor: [15]

Kao što je ranije navedeno, za simulaciju energetske potreba kod Arhitektoničkog pristupa modelovanja koriste se LOD1 nivo, dok se LOD2 najčešće kod Building-to-building pristupa. Korišćenje modela visoke kompleksnosti, posebno u dinamičkim simulacijama, i dalje zahteva znatno vreme i resurse računara. Radije se ide da semantički podaci koji se unose u modele zamenjuju informacije koje bi se dobila iz viših nivoa detaljnosti (ne moramo imati prozore i vrata u geometrijskom modelu ali možemo datom zidu pridružiti informacije o površini prozora i vrata kao i njihovom položaju).

Međutim, jedan od izazova u vezi sa CityGML-om jeste teškoća dodavanja semantike u 3D modele, kao i pitanje efikasne vizualizacije ovih modela. Za vizualizaciju se koriste postojeći CityGML pregledači ili se vrši izvoz geometrije u formate poput KML-a i X3D-a.

Kada je u pitanju modelovanje zgrada za potrebe daljih simulacija uvek je potrebno pažljivo izvršiti selekciju semantičkih podataka kojima se dodatno opterećuju modeli kako modeli ne bi postali jako robustni a simulacije velikog broja modela zgrada zahtevne. Autori u radu [16] predlažu da se za svaku zgradu integrišu u model prvo sledeći podaci: (1) površina osnove zgrade, zapremina, broj spratova (iznad i ispod zemlje), broj punih spratova iznad zemlje; (2) adresa;

(3) broj stanara/korisnika, broj porodica; (4) katastarski kod, broj posebnih delova, broj stambenih jedinica, broj soba, glavna namena prostorija; (5) godina izgradnje; (6) lista rekonstrukcija od završetka izgradnje, kao i (7) Sertifikat o energetske efikasnosti. Najčešće se ovi podaci sakupljaju iz postojećih nacionalnih baza. Zatim se vrši dalja karakterizacija zgrada. Karakterizacija se vrši na osnovu, kao i kod prethodnog pristupa, na osnovu arhitektoničke zgrade, standarda, preporuka i naučne literature. Neki se atributi prepisuju a neki izračunavaju. Isti autori predlažu sledeće informacije da se unesu u model svake zgrade: površine svih elemenata (zidova, osnova i krovova), zajedno sa njihovim azimutima i nagibnim uglovima, klasifikacija susednih zidova u adijabatske (bez prenosa toplote) i neadiabatske površine (vrši se prenos toplote), U-vrednosti za sve elemente termičkog omotača, toplotni kapacitet, debljina zidova, vrednosti g-faktori za staklene površine i vrednosti solarne insolacije za različite površine u različitim pravcima. Dodatno se unose i klimatski parametri sredine u kojoj se nalazi zgrada. Samo termalno zoniranje objekta je teže moguće ako se ne koriste modeli viših nivoa, LOD4. Informacije o tehničkim sistemima se uzimaju ili iz arhitektoničke ili iz energetske sertifikata.

Danas se širom sveta razvijaju platforme i alati za simulaciju energetske potreba koji se oslanjaju na CityGML standard. Pored poznatog alata EnergyPlus, razvijeni su i drugi alati kao što su SimStadt, City Building Energy Saver (CityBES), TEASER i Urban Modelling Interface (UMI), koji takođe koriste CityGML standard.

Postoje dva osnovna pristupa za simulaciju energetske potreba zasnovane na CityGML standardu. Prvi pristup, poznat kao pojednostavljena metoda – Simplified approach, ima za cilj brzo dobijanje godišnjih i mesečnih vrednosti potrošnje energije za grejanje prostora [11]. Ovaj pristup uvodi određena pojednostavljena u model proračuna: podrazumeva jednu termalnu zonu u zgradi, zanemaruje uticaj akumulaciju toplote u zidu, transmisioni gubici toplote na delu termičkih mostova se predpostavljaju kao %-tualna vrednost od ukupnih transmisionih gubitaka kroz netransparentne delove zgrade, ventilacioni gubici toplote se predpostavljaju na sličan način u vidi %-tualnog iznosa, unutrašnja temperatura se predpostavlja kao konstantna vrednost. Sva ova uprošćenja dovode do toga da je brzina realizacije ovakvih simulacija velika čak i za veliki broj zgrada (130s za 1900 zgrada na standardnom računaru [11]). Drugi pristup je dinamička simulacija, kada se koristi CityGML baza podataka u kombinaciji sa dinamičkim simulacionim okruženjem EnergyPlus gde se vrše dinamičke simulacije sa satnom vremenskom rezolucijom. Najčešće se kod ovih simulacija za jednu zgradu generiše više termalnih zona, uzimaju se stvarni meteorološki podaci, promenljivo temperaturno polje unutar objekta i nezanemaruje se akumulacija toplote u zidovima.

Danas mnogi evropski i svetski gradovi imaju digitalne mape zgrada sa podacima o energetske potrebama zgrada količinom emisije CO₂, kao i finasijama za potrošnju

energije, predlozima za sanaciju i cenom koštanja i povratnim periodom investicije. Neki dobri primeri prakse su gradovi: London, Ciri, Amsterdam, Helsinki, Berlin, New York City, Singapur itd [17].

Kada govorimo o tačnosti ovih modela u širem urbanom kontekstu, kao što je cela gradska regija, obe metode, bilo da se oslanjaju na arhetipove ili simulacije zgrada po zgrada, pružaju otprilike sličan stepen preciznosti. Studije su pokazale da je greška obično između 2 i 6% [8]. Međutim, za manje oblasti sa samo nekoliko desetina ili stotina zgrada, tačnost arhitektonskih pristupa značajno opada. Greške u predikciji energetske performansi pojedinačnih zgrada su bile i do 15 puta veće u odnosu na greške za ukupan skup svih zgrada.

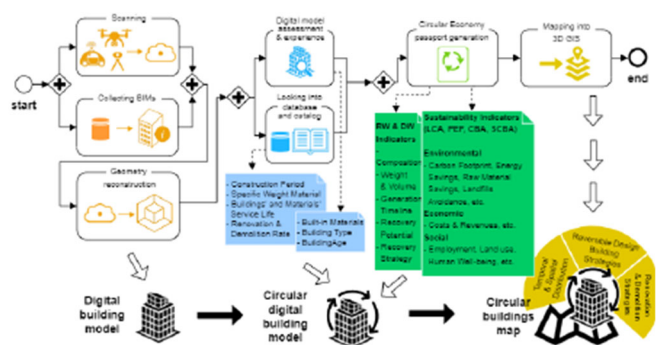
III. DIGITALNO MODELOVANJE ZGRADA ZA POTREBE PROCENE CIRKULARNOSTI

A. 3D digitalna mapa cirkularnosti zgrada

U sklopu projekta CircBoost, koji je deo programa Horizont Evropa, koji se fokusira na testiranje i usvajanje cirkularnih rešenja u građevinskom sektoru i sektoru građevinskih materijala, razvija se cirkularna mapa zgrada za jedan deo grada Beograda kao i za nekoliko regiona u Evropi [18]. Ova mapa predstavlja 3D digitalnu reprezentaciju postojećih zgrada. Mapa se sastoji od informacionih modele za svaku zgradu u datom području, koji sadrže sve relevantne informacije sa aspekta cirkularne ekonomije na nivou elementa zgrade, same zgrade i na nivou cele urbane regije. Informacije uključuju detalje o ugrađenim materijalima, vrstama i količinama, kao i njihov cirkularni potencijal: što se i u kojoj meri može ponovno iskoristiti, reciklirati ili odložiti na deponiju. Kako bi doprinela smanjenju količine otpada koja se predviđa za odlaganje na deponiju, mapa će sadržavati preporuke za najbolje prakse i savremene metode u tretmanu otpada. Prognoze kada će ugrađeni materijali postati otpad biće integrisane u mapu, a modeli za predikciju će se zasnivati na osnovu važećih strategija za renoviranje i urbanističkih planova za datu oblast. Ovako razvijena mapa će adresirati ključna pitanja u planiranju upravljanja otpadom: kakav otpad će biti generisan, u kojoj količini, kada će se to dogoditi, koliko otpada može biti iskorišćeno i kako to postići. Iako mapa nije dizajnirana za tržište kupoprodaje, već kao dragocen izvor informacija i znanja, može se koristiti od strane operatera otpada za pronalaženje najbližih izvora sekundarnih sirovina. Dodatno, povezivanjem mape sa sektorima lokalnih samouprava koji izdaju dozvole za rušenje, renoviranje i izgradnju novih objekata, mapa može poslužiti kao alat za informisanje o tome šta će tačno biti srušeno ili renovirano u bliskoj budućnosti, tj. gde će se generisati otpad. Pored kompanija koje se bave procesuiranjem otpada, veliki broj zainteresovanih strana može imati koristi od mape. Među njima su vlasnici zgrada i menadžeri objekata, koji mogu jednostavno pristupiti informacijama o mogućnostima ponovne upotrebe otpada koji se generiše prilikom renoviranja njihove zgrade, kao i njihovoj ekonomskoj vrednosti. Takođe, tu su i građevinske

kompanije i specijalizovane firme za rušenje, koje lako mogu identifikovati lokacije za buduće projekte. Pored toga, važno je napomenuti i lokalne i državne vlasti, koje mogu koristiti ove informacije kako bi unapredile politike i strategije u oblasti građevinarstva i upravljanja resursima.

Izrada ovakve mape zahteva korišćenje najnovijih tehnologija, alata, metoda i metodologija kako bi se uspešno prikupili, analizirali i vizuelno prikazali podaci o zgradama i ugrađenim materijalima. Ovo obuhvata primenu laserskog skeniranja, vazdušnog/terestričkog skeniranja, mobilnog mapiranja i naprednih algoritama za segmentaciju oblaka tačaka i rekonstrukciju geometrije zgrada. Takođe, koriste se sofisticirane metode za procenu protoka građevinskog otpada i analizu cirkularnosti, uključujući modele zasnovane na tipologiji zgrada i dinamičke modele protoka otpada. Semantičko obogaćivanje informacionih modela sa informacijama o cirkularnom potencijalu zgrade uspostavljanje specifične strukture podataka za skladištenje informacija o cirkularnosti. Konačno, razvoj modela podataka za 3D GIS aplikaciju podrazumeva primenu standarda interoperabilnosti i otvorenih izvora kako bi se omogućila fleksibilnost i široka dostupnost rezultata. Ove komponente se integrišu u složen proces, koji je dat u okviru rada [19], kako bi se stvorila mapa koja pruža sveobuhvatni uvid u cirkularnost urbane regije i koja doprinosi unapređenju održivosti i efikasnosti u upravljanju resursima. Detaljan prikaz metodološkog okvira za razvoj mape dat je u nastavku na Slici 2.



Sl. 2. Metodologija izrade mape u 4 koraka Izvor: iz prijave projekta CircBoost

IV. ZAKLJUČAK

Ovo istraživanje pruža pregled savremenih metoda i tehnologija za digitalno modelovanje postojećih stambenih fondova, izradu digitalnih mapa za urbana područja, kao i njihovu primenu u proceni energetske efikasnosti i cirkularnosti. Istraživanje pokazuje da su ključni izazovi prikupljanje obimnih podataka i stvaranje preciznih 3D modela, uz integraciju semantičkih podataka radi postizanja veće tačnosti u proceni energetske efikasnosti i cirkularnosti svake zgrade u analiziranoj regiji. Za prikupljanje podataka s terena za geometrijsko modelovanje danas se koriste GIS informacioni sistemi, OpenStreetMap, ali i sve više tehnika kao što su LiDAR (Light Detection and Ranging) i fotogrametrija. Semantički podaci se uglavnom modeluju

koristeći reprezentativne tipove zgrada, poznate kao arhetipovi. Upotreba standardizovanih formata poput CityGML omogućava integraciju i razmenu podataka, ali postavlja pitanja o dodavanju semantike i efikasnoj vizualizaciji modela.

Na kraju rada, prikazana je metodologija modelovanja jedne urbane regije u Beogradu za potrebe procene cirkularnosti zgrada u regiji koja će bit razvijena. Iako Srbija raspolaže značajnim bazama podataka o postojećim zgradama i ima definisanu nacionalnu tipologijom zgrada, te ima strategije i prateću regulativu u oblasti energetske efikasnosti i cirkularnosti u građevinarstvu, prema najboljim saznanjima autora ovog rada, ne postoji 3D semantički obogaćena digitalna mapa zgrada za bilo koji grad. Projekat CircBoost predstavlja korak ka stvaranju ove mape, te se nadamo da će ova mapa doprineti daljoj digitalizaciji izgrađenog okruženja i transformaciji ka održivijem i prijatnijem okruženju za sve nas.

ZAHVALNICA

Izrada ovog rada finansirana je sa strane projekta CircBoost, Boosting the uptake of circular integrated solutions in construction value chains (ID: 101082068).

LITERATURA

- [1] International Energy Agency (IEA). (2022). World Energy Outlook 2022
- [2] World Economic Forum. (2020). Shaping the Future of Construction: A Breakthrough in Mindset and Technology. <https://www.weforum.org/reports/shaping-the-future-of-construction>
- [3] M. T. Lotz, A. Herbst, Circular buildings: Paving the way to a net-zero industry, policy brief, July 2023
- [4] Energy Performance of Buildings Directive (EPBD), Recast 2023.
- [5] European Commission. (2020). Action Plan for Circular Economy.
- [6] Digitalisation in the construction sector - EU report 2021
- [7] J. Dong, Y. Schwartz, A. Mavrogianni, I. Korolija, D. Mumovic, "A review of approaches and applications in building stock energy and indoor environment modelling," Building Serv. Eng. Res. Technol., Vol. 44(3), 333–354, 2023
- [8] S. Eggimann, N. Vulic, M. Rüdüsüli, R. Mutschler, K. Orehounig, M. Sulzer, "Spatiotemporal upscaling errors of building stock clustering for energy demand simulation," Energy & Buildings, Vol. 258, 111844, March 2022
- [9] J. J. Author, "CityGML building model production from airborne laser scanning," Master Thesis, Aalto University School of Engineering, Espoo, Finland, 2016
- [10] M. Rock, E. Baldereschi, E. Verellen, A. Passer, S. Sala, K. Allacker, "Environmental modelling of building stocks – An integrated review of life cycle-based assessment models to support EU policy making," Renew. Sustain. Energy Rev., Vol. 151, 111550, 2021
- [11] K. A. Ogori, F. Biljecki, K. Kumar, H. Ledoux, J. Stoter, "Modeling cities and landscapes in 3D with CityGML," Building Information Modeling: Technology Foundations and Industry Practice, pp. 199–215., September 2018
- [12] M. Rock, E. Baldereschi, E. Verellen, A. Passer, S. Sala, K. Allacker, "Environmental modelling of building stocks – An integrated review of life cycle-based assessment models to support EU policy making," Renew. Sustain. Energy Rev., Vol. 151, 111550, 2021
- [13] W. Y. Pei, F. Biljecki, R. Stouffs, "Dataset for Urban Scale Building Stock Modelling: Identification and Review of Potential Data Collection Approaches," ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 17th 3D GeoInfo Conference, Sydney, Australia, vol. s X-4/W2-2022, 19–21 October, 2022.
- [14] P. Jayaraj, A. M. Ramiya, "3D CityGML Building Modelling From Lidar Point Cloud Data," The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS TC V Mid-term Symposium "Geospatial Technology – Pixel to People", Dehradun, India, Volume XLII-5, 20–23 November 2018
- [15] Biljecki, F.; Ledoux, H.; Stoter, J. An Improved LOD Specification for 3D Building Models. Comput. Environ. Urban Syst. 2016, 59, 25–37.
- [16] T. Hong, Y. Chen, X. Luo, N. Luo, S. H. Lee, "Ten questions on urban building energy modeling," Building and Environment, Vol. 168, 106508, 2022
- [17] A. Momčilović, Z. Petojević, A. Nadaždi, G. Stefanović, "Urban Energy Mapping: Best Practices and Perspectives of Implementation and Application in Serbia", 20th International Conference on Thermal Science and Engineering of Serbia - SIMTERM 2022, Nis, Serbia, October 2022.
- [18] Web site CircBoost project: <https://circboostproject.eu/>
- [19] Z Petojevic, A Nadazdi, D Isailovic, N Visnjevac, "An Integrated Solution for Increased Circularity in Buildings," 6th IPMA SENET Project Management Conference: Digital transformation and sustainable development in project management, Dubrovnik, Croatia, 21–24 Sep., 2022.

ABSTRACT

In today's world, buildings emerge as pivotal actors in the ecosystem, consuming vast amounts of resources and generating significant quantities of harmful gases and waste. The European Union sets ambitious targets for decarbonizing, energy efficiency, and building circularity, necessitating a detailed assessment of existing buildings and urban regions. Digital transition becomes a crucial lever in this process, enabling precise digital modeling of buildings and urban regions. This research identifies key challenges, including collecting extensive data, creating accurate 3D models, and integrating semantic data for precise energy efficiency and circularity analysis. The methodology for modeling an urban region in Belgrade is presented as a case study.

Digital Modeling of Existing Building Stocks for Assessing Energy Efficiency and Circularity: State of the Art

Zorana Petojević, Ana Nadaždi, Aleksandra Parezanović,
Dušan Isailović, Nenad Višnjevac, Radovan Gospavić, Goran
Todorović