

Primljen / Received: 5.5.2021.

Ispravljen / Corrected: 25.11.2021.

Prihvaćen / Accepted: 5.12.2021.

Dostupno online / Available online: 10.4.2022.

# Automatizirana predobrada modela građevine za proračun konstrukcija

## Autori:



<sup>1</sup>Mr.sc. **Goran Šibenik**  
goran.sibenik@tuwien.ac.at  
Autor za korespondenciju



<sup>1</sup>Prof.dr.sc. **Iva Kovačić**  
iva.kovacic@tuwien.ac.at



<sup>1</sup>**Valentinas Petrinās**, dipl.ing.građ.  
valentinas.petrinas@tuwien.ac.at



<sup>2</sup>Dr.sc. **Wendelin Sprenger**  
wendelin.sprenger@zueblin.de



<sup>2</sup>**Dario Bubalo**, dipl.ing.građ.  
dbubalo1987@gmail.com



<sup>3</sup>**Nikola Ruzičić**, dipl.ing.građ.  
nikola.ruzicic@atp.ag

Pregledni rad

**Goran Šibenik, Iva Kovačić, Valentinas Petrinās, Wendelin Sprenger, Dario Bubalo, Nikola Ruzičić**

## Automatizirana predobrada modela građevine za proračun konstrukcija

Tijek rada prilikom korištenja BIM-a i dalje zahtijeva dugotrajnu ručnu predobradu (preliminarnu analizu) modela za proračun konstrukcija, kao što je dodjeljivanje novih podataka poput svojstava građevnog materijala ili opterećenja, što sprječava slanje brzih povratnih informacija i podložno je pogreškama. Glavni cilj ovog istraživanja jest automatizacija predobrade analitičkih modela građevina radi ubrzanja i poboljšanja proračuna konstrukcija. Istraživanje se temelji na pregledu literature i analizi slučaja, uz formalizaciju metoda preliminarnu analize, njihovu verifikaciju kroz dva pilot modela građevina i evaluaciju u panel-raspravi stručnjaka u praksi. Izrađene procedure mogu se automatski dodijeliti opterećenja, oslonce i spojeve za podne konstrukcijske elemente i smanjiti vrijeme pripreme modela, pogreške i troškove projektiranja u svakodnevnoj praksi proračuna konstrukcija. Međutim, potrebna je šira primjena postojeće prakse kako bi se povećala korisnost i primjenjivost predloženih metoda.

### Ključne riječi:

proračun konstrukcija, automatizacija, informacijsko modeliranje gradnje, BIM, predobrada

Subject review

**Goran Šibenik, Iva Kovačić, Valentinas Petrinās, Wendelin Sprenger, Dario Bubalo, Nikola Ruzičić**

## Automated preprocessing of building models for structural analysis

BIM workflows still involve time-consuming manual model preprocessing for structural analysis such as assigning new data like structural material properties or loads, which prevents prompt feedback and is error prone. The main objective of this research is to automate the preprocessing of analytical building models so as to accelerate and improve structural analysis. The research is based on literature review and a real use case analysis, followed by formalization of preprocessing methods, their verification via two pilot building models, and evaluation by practitioners through panel discussion. The developed procedures can automatically assign loads, supports and joints floor-wise and reduce the model preparation time, errors and design costs in daily structural analysis practice; however, further adoption and consideration of existing practices is needed to increase the usefulness and usability of the proposed methods.

### Key words:

structural analysis, automation, building information modelling, BIM, preprocessing

<sup>1</sup> Institut za interdisciplinarno upravljanje procesima gradnje, Tehničko Sveučilište u Beču, Austrija

<sup>2</sup> Ed. Züblin AG, Stuttgart, Njemačka

<sup>3</sup> ATP architekten ingenieure, Beč, Austrija

## 1. Uvod

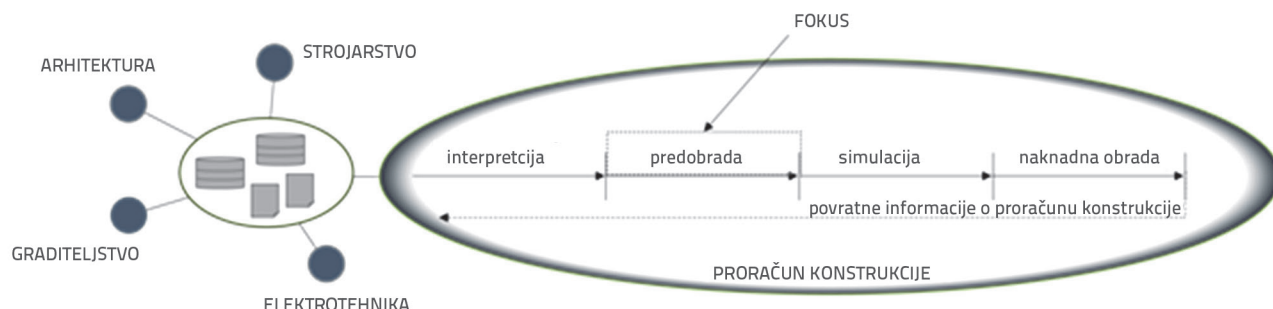
Korištenje informacijskog modeliranja gradnje (eng. *Building Information Modeling* - BIM) postaje široko rasprostranjena praksa tijekom projektiranja građevina. Međutim, istraživanja vezana uz analizu i optimizaciju konstrukcija zaostaju za drugim domenama u području arhitekture i građevinarstva [1] te još uvijek postoje brojni izazovi u suradnji sudionika u BIM okruženju [2]. BIM se definira kao "korištenje zajedničkog digitalnog prikaza izgrađenog objekta za olakšavanje procesa projektiranja, izgradnje i upravljanja kao pouzdane osnove za donošenje odluka" [3]. Stoga bi BIM za proračun konstrukcija bio korištenje zajedničkog digitalnog prikaza izgrađenog objekta za proračun konstrukcije kao pouzdane osnove za donošenje odluka. Iako ta definicija integrira modele i procese izgradnje, opseg zajedničkih informacija i procesa ostaje nejasan. BIM potencijali još nisu ostvareni u svom punom opsegu iz više razloga, poput otpora interesnih sudionika, nedostatka znanja i potrebe za prilagodbom već postojećih radnih procesa [4]. Ti izazovi se također pojavljuju kod modeliranja i proračuna konstrukcije u BIM okruženju, što rezultira modelima zgrada koje se često ne dijele među interesnim sudionicima projekta, a svakodnevni posao karakterizira ručna predobrada modela. Sadržaj analitičkih BIM modela i povezanih procesa ostaje nejasan, budući da međunarodne BIM norme (npr. [5, 6]) ili nacionalne [7] pružaju opće okvire i ne sadrže detaljnu specifikaciju tijeka digitalnog načina rada. BIM softveri trebali bi omogućiti besprijekoran protok informacija između interesnih sudionika projekta [8], ali se i dalje javljaju problemi različitih klasifikacija podataka, razina razvoja (detalja) i standarda. [2, 9]. Ovaj rad se bavi razvojem učinkovitijih procesa za proračun konstrukcije u BIM okruženju, s ciljem automatizacije predobrade modela zgrada radi proračuna konstrukcija (slika 1.). Ovo istraživanje temelji se na postojećem radu u kojem se opisuju interpretacije fizičkih modela u analitičke modele zgrada. Fizički modeli su definirani od strane drugih sudionika u procesu projektiranja [9]. Prethodno istraživanje obuhvatilo je automatizirane postupke interpretacije postojećih informacija, poput interpretacije geometrije, redefiniranja vrste građevnog elementa ili materijala. Pokazalo se da dobiveni model građevine još uvijek nije spreman za proračun konstrukcije. Predobrada

modela građevine uključuje postupke dodjele novih informacija kao što su opterećenja ili oslonci kako bi model bio spreman za proračun. Ti postupci međusobno povezuju projektiranje i proračun konstrukcije, a njihova automatizacija mogla bi pružiti brze povratne informacije i smanjiti vrijeme, pogreške i troškove potrebne za proračun konstrukcije. Automatizirana predobrada i modeliranje elemenata konstrukcije su prepoznati problemi u postojećoj literaturi koji su adresirani u ovom istraživanju [1]. Cilj ovog je istraživanja razviti i verificirati automatizirano rješenje za procedure predobrade u BIM računalnim programima za proračun konstrukcije s obzirom na to što predobradu trenutno ručno provode građevni inženjeri - statičari (slika 1.). Ti postupci nisu standardizirani unutar postojećih heterogenih tijekova rada u procesu projektiranja zgrade. Glavne prednosti automatizacije koriste će statičarima, budući da se dugotrajan, greškama podložan i skup ručni rad djelomično automatizira. Nadalje, automatizacija procedura predobrade omogućuje poboljšanje procesa projektiranja i bolje rezultate zahvaljujući brzim povratnim informacijama, dopuštajući više iteracija i na taj način optimiziranje oblikovanja građevine te sigurnije i učinkovitije zgrade.

## 2. Pregled literature

### 2.1. BIM u graditeljstvu

Sektor graditeljstva zaostaje za drugim industrijama zbog sporog rasta produktivnosti i poremećaja u lancu vrijednosti; digitalne tehnologije prepoznate su kao dio rješenja za poboljšanje suradnje, kontrole lanca vrijednosti i donošenja odluka na temelju podataka [10]. BIM pokriva nekoliko ciljeva digitalizacije u graditeljstvu i trebao bi donijeti višestruke prednosti u fazi projektiranja kao što je ranija suradnja sudionika i pružiti mogućnost povezivanja modela građevine s različitim alatima za analizu [11]. Međutim, implementacija BIM-a susreće se s višestrukim poteškoćama kao što su otpor promjenama od strane interesnih sudionika, problemi u prilagodbi postojećih tijekova rada, istinsko razumijevanje i korištenje alata ili nedostatak potrebne suradnje [4]. Cilj različitih nacionalnih i međunarodnih norma jest ubrzati implementaciju BIM-a u graditeljstvu. Skup međunarodnih



Slika 1. Fokus istraživanja u BIM okruženju

norma ISO 19650 bavi se organizacijom i digitalizacijom informacija o građevinama i građevnim radovima uključujući BIM. Za postizanje prave suradnje potrebna je veća razina normiranih procesa [3]. Norma naglašava važnost planiranja isporuke informacija i matricu odgovornosti [3]. Prijenos informacija ostvaruje se putem zajedničkog podatkovnog okruženja (eng. *Common Data Environment - CDE*) tijekom cijelog životnog ciklusa građevine. Od interesa je faza isporuke podataka o građevini, koja obuhvaća fazu projektiranja [5]. Te norme predstavljaju važan korak prema olakšavanju automatiziranog upravljanja informacijama pružajući okvir koji se može koristiti za razvoj sustava za upravljanje informacijama. Cilj ovog istraživanja jest dodatno istražiti mogućnosti preporučene normama za upravljanje informacijama kod proračuna građevnih konstrukcija. Sektor graditeljstva karakteriziraju slabo povezani projektni timovi koji se sastoje od više malih i srednjih poduzeća koja surađuju na realizaciji jedinstvenog građevnog projekta. Takva vrsta suradnje rezultira heterogenim tijekovima rada, a standardizirani tijekovi rada i informacija još uvijek nisu definirani. Stoga je potrebno istražiti tijekove rada specifične za provedbu proračuna konstrukcije.

## 2.2. BIM alati za proračun konstrukcija

Pojava BIM-a u graditeljstvu rezultirala je razvojem BIM alata za proračun konstrukcija, ali je potrebno razjasniti koncept BIM-a za provedbu proračuna konstrukcija. Digitalni alati koji koriste metodu konačnih elemenata (eng. *Finite Element Method – FEM*) koriste se za simulaciju svojstava konstrukcije već nekoliko desetljeća. U novije vrijeme BIM alati za proračun konstrukcija postali su dostupniji. FEM je najčešće primjenjivana metoda za analizu konstrukcije, gdje se građevni elementi definiraju u analitičkom prikazu [9, 12]. FEM se može primijeniti u različitim mjerilima, od pojedinog detalja spoja do cijele građevine, ali se u praksi obično primjenjuje u mjerilu građevnih elemenata, primjerice za proračun ploče ili dijela statičkog sustava konstrukcije, slijedeći tradicionalne metode analize kada nije bilo moguće izraditi simulaciju cijele građevine. Dostupna literatura nudi prikaz različitih značajki prema kojima se razlikuju softveri za FEM simulacije od BIM alata za proračun konstrukcija. Značajke BIM alata za proračun konstrukcija opisane su u literaturi kao:

- BIM alati omogućuju komunikaciju s drugim interesnim sudionicima putem standardiziranih formata poput Industry Foundation Classes (IFC) formata ili pružaju dodatne metode kojima se mogu uvoziti i uređivati modeli koji su izvorno modelirani u drugim softverima [13].
- Korištenje inteligentnih objekata i podrška objektno orijentiranom projektiranju u modelima za proračun konstrukcija je temeljna značajka BIM softvera [14], iako su tradicionalni FEM softveri uglavnom već objektno orijentirani.
- Osnovna značajka BIM-a jest tijek rada u kojem su projektiranje, proračun i dokumentiranje konstrukcije

međusobno povezani procesi, što znači da se njihove međuovisnosti barem djelomično automatski rješavaju [15].

- Tijek rada u kojem se podaci prenose u softvere za proračun konstrukcija digitalnim putem smatra se tijekom rada u BIM okruženju [16], u usporedbi s tradicionalnim tijekom rada u kojem se podaci ponovo modeliraju.
- Najveći potencijal BIM-a prepoznat je u automatizaciji tijeka rada [16], jer aktivnosti poput ponovnog modeliranja ili pridruživanja novih informacija obavljaju statičari ručno, što povećava mogućnost pogreški i nedosljednosti.

Pregled stanja u građevnom sektoru pokazuje da je sljedeći korak u razvoju BIM-a poboljšanje internih tješkova rada u BIM okruženju, gdje će se postojeći podaci koristiti na učinkovitiji način prilikom izrade modela konstrukcije [17]. U radu autora Vilutienea i suradnika [1] dan je iscrpan pregled implementacije BIM-a za proračun konstrukcija. Oni tvrde da su tehnička pitanja relevantna za građevne inženjere zanemarena u istraživanjima. Kako bi se projektiranje i analiza, a na kraju i proces dokumentiranja učinkovito povezivali, tumačenje informacija od drugih interesnih sudionika i dodjeljivanje novih informacija za proračun konstrukcija potrebno je automatizirati koliko god je to moguće. Iako postoje različiti pogledi na BIM u proračunu konstrukcija, iz dostupne literature može se zaključiti to da su postupci koje provode statičari više automatizirani u tješkovima rada u BIM okruženju, u usporedbi s tradicionalnim pristupima, kao što je dopuštanje uvoza vanjskih modela i poboljšanje povezanosti između procesa projektiranja, proračuna i dokumentiranja konstrukcije.

## 2.3. Prednosti BIM-a u proračunu konstrukcija

Stručnjaci iz različitih domena građevinarstva daju doprinose u procesu projektiranja građevina. Povećani broj istraživanja na temu implementacije BIM-a u projektiranju i proračunu konstrukcija prikazuje njegovu važnost [1]. Prepoznat je spori tempo primjene BIM-a u graditeljstvu, a posebno u proračunu konstrukcije, stoga se može zaključiti i da je potrebno dodatno istražiti prednosti rada u BIM-u i korištenja BIM alata kako bi se riješili tehnički problemi u fazi projektiranja zgrada [1]. Slično prethodnom, pregled literature naglašava povećanje bitnosti automatiziranja proračuna konstrukcija posljednjih godina [18]. Ovaj pregled opisuje studiju u kojoj su automatizacija projektiranja konstrukcija i interoperabilnost sa ostalim sektorima, što su teme i ovoga istraživanja, prepoznati kao najbitniji čimbenik za poboljšanje procesa projektiranja. Navodi se i to kako bi automatska predobrada modela građevina omogućila više iteracija, a time i optimalno projektno rješenje, uštedjelo bi se vrijeme i novac potreban za preliminarnu analizu modela i izbjegle ljudske pogreške do kojih dolazi zbog višestruke ručne obrade modela. Vremenski ovisan proračun konstrukcija postao bi izvediv, a mogla bi se poboljšati i sigurnost na gradilištu. Prijedlog za automatiziranu predobradu modela građevina opisan je u [18], ali samo za ranu fazu projektiranja. Nove radne procedure koje će poboljšati djelotvornost i

učinkovitost postojećih procesa projektiranja prepoznate su kao najpopularnija tema vezana uz primjenu BIM-a u proračunu konstrukcija [19].

Uobičajeni tijek rada kod proračuna konstrukcija tijekom projektiranja zgrade opisan je u [14] i navodi se kako se značajna količina ručnog rada može izbjeći povezivanjem proračuna konstrukcija i modela arhitektonskog projekta. Oni predstavljaju prilično jednostavnu studiju slučaja i opisuju kako se opterećenja poput vlastite težine i ujednačenog projektog opterećenja ručno kreiraju za proračun. U tradicionalnom tijeku rada, model arhitektonskog projekta obično se uvozi u FEM alate od konceptualnog rješenja do konačnog projektog rješenja [20]. Tijek rada koji podržava analizu podataka tijekom projektiranja građevina predložen je u [20], ali fokus je na projektiranju konstrukcije, a ne na proračunu konstrukcije. Softverski dodatak na alat za proračun konstrukcija Robot podržava statičare kod optimizacije građevinske konstrukcije [21]. Neki koraci koje pruža softverski dodatak su definiranje poprečnih presjeka, oslonaca i slučajeva opterećenja. Nosači mogu biti valjkasti, pričvršni ili fiksni spojevi na temelje, a slučajevi opterećenja uključuju vlastita opterećenja, korisna opterećenja i opterećenja vjetra. Međutim, većina ulaznih podataka se u model unosi ručno.

Drugi oblik automatizacije proračuna konstrukcija jest pružanje podrške kroz pomoćne alate prilikom izrade arhitektonskog projekta uvođenjem znanja o konstrukciji u alate za izradu arhitektonskog projekta. Projektiranje elemenata i spojeva može se realizirati na takav način [22]. Međutim, takav pristup teško može zamijeniti ustaljene prakse proračuna konstrukcija koje se oslanjaju na softvere za proračun konstrukcija s velikim tržišnim udjelom. Dodatni alat Matlab može pomoći arhitektima u ranim fazama projektiranja da dobiju povratne informacije za projekte obnove na temelju tlocrta [23]. Motivacija za primjenom tog alata su iterativni zahtjevi za povratnom informacijom o projektu, koje statičari obično pružaju samo za finalizirani arhitektonski projekat, što je također slučaj prilikom izrade glavnog projekta. Istraživanje [23] usmjereno je na tlocrte i zidove kao konstrukcijske elemente, što ne odgovara u potpunosti BIM pristupu prilikom izrade glavnog arhitektonskog projekta.

Validacija modela prije dodjele novih informacija može se smatrati dijelom predobrade modela građevine za proračun konstrukcija, osobito ako su modeli iz druge tvrtke. To je široka tema koja se razvija u više smjerova. Budući da norme dostupne za proračun konstrukcija još nisu spremne za digitalizaciju [9], potrebno je opsežno preispitivanje definicija građevnih elemenata, njihovih svojstava i odgovarajućih rubnih uvjeta. Validacija se može usredotočiti na dvije vrste informacija: geometrijske [24], primjerice da li je određeni građevni element koji ima određeni geometrijski oblik valjan, ili semantičke informacije [25], primjerice da li elementi i njihova svojstva odgovaraju određenoj shemi. U ovome radu validacija nije opširno istražena, ali je prepoznata kao korak koji prethodi dodjeli novih informacija za analizu konstrukcije.

## 2.4. Predobrada modela u različitim domenama graditeljstva

Pristup upravljanju podacima s fokusom na energetske i optimizaciju konstrukcije građevine opisan je u [26], naglašavajući potrebu za neodređenostima u arhitektonskom modelu u ranoj fazi projektiranja. Optimizaciju konstrukcije tijekom rane faze projektiranja karakterizira nedostatak informacija za proračun konstrukcija. Stoga se BIM modeli različite razine detaljnosti (eng. *Level of Detail* – LOD) koriste za sakupljanje i korištenje stručnog znanja za izvođenje proračuna [26] što je razvijeno pomoću nejasnog logičkog sustava zaključivanja u [27]. Iako se u njihovom radu [26] ne raspravlja o interoperabilnosti različitih softvera i prijenosima podataka, autori zadržavaju predloženi metamodel sa višestrukim LOD-em u skladu s IFC normom. Međutim, prijenos podataka u skladu s IFC normom mogao bi donijeti više problema i smanjiti izvedivost pristupa [2]. Keough i suradnici [28] razvijaju CatBot koji izravno povezuje parametarski dizajn u alatu Catia i proračun konstrukcije u Robot-u koji generira nova projektna rješenja uzimajući u obzir i proračun konstrukcije. Svojstva konstrukcije dodijeljena su u Catia-i kako bi se mogla izvesti višestruka optimizacija projektog rješenja u ranoj fazi projektiranja. Alat koji automatski predlaže višestruke varijante projekta visoke građevine, koje su od velike važnosti u ranoj fazi projektiranja, predstavljen je u [29]. Nedostaju automatizirani pristupi za provođenje proračuna konstrukcija, osobito ako se koriste BIM modelima [29]. Pokušaji automatizacije slični ranim fazama projektiranja nisu pronađeni za kasnije faze. Modele zgrada i proračun konstrukcija u fazi izrade glavnog projekta karakteriziraju detaljnije informacije i drugačije vrste nesigurnosti u odnosu na ranu fazu projektiranja, stoga je potrebno prikupiti drugačija stručna znanja kako bi se automatizirala predobrada modela.

Potreba za automatskom predobradom FEM modela iz dostupnih modela prepoznata je i u drugim domenama graditeljstva osim u projektiranju i građenju zgrada. Informacijsko modeliranje tunela, kao paralela BIM-u, koristi se za automatsku pripremu FEM proračuna [13]. Rubni uvjeti i svojstva materijala osim geometrije su automatski dodijeljeni, ali nisu detaljno pojašnjeni, u pristupu "BIM-za-FEM" [13]. Razvijen je okvir za proračun utjecaja djelovanja vjetra na zgradu [30], u kojem je prepoznata potreba za automatskom interpretacijom geometrije i proračunom za takvu višestruku analizu sklonu pogreškama. Istraživanja u drugim domenama imaju slične motive, međutim, tijek rada i uključenost sudionika u drugim domenama graditeljstva razlikuju se od faze projektiranja i izgradnje zgrada.

## 2.5. Tijekovi rada kod proračuna konstrukcija

Pregled literature u ovom potpoglavlju usredotočen je na detalje unutar istraživanja koji opisuju tijekove rada u proračunu konstrukcija u mjerilu građevnih elemenata. Tijekovi rada proračuna konstrukcija predstavljaju sve procese i informacije

Tablica 1. Porijeklo informacija iz pregleda digitalnih tijekova rada gdje se razmjenjuju model arhitektonskog projekta i model za proračuna konstrukcije

	Arhitektonski projekt	Proračun konstrukcija
[20]	Geometrija	Svojstva poprečnog presjeka, rubni uvjeti, opterećenja
[21]	Geometrija (opcija 1)	Geometrija (opcija 2), poprečni presjeci, oslonci, slučajevi opterećenja
[32]	Crteži, početne dimenzije, veličina poprečnog presjeka	Analički modeli, konstruktivna svojstva, opterećenja
[35]	Geometrija, lokacija elemenata, vrsta materijala i svojstva,	Vrste opterećenja, rubni uvjeti
[36]	Pojavnost – umjetnički, geometrijski i prostorni aspekt	Pojednostavljeni model, komponente opterećenja i spojevi elemenata
[37], [38]	Geometrijski položaj, profili elemenata, podaci o materijalima, elementi konstrukcije koje su odabrali arhitekti, poput vertikalnog i poprečnog sustava prijenosa opterećenja	Novi elementi konstrukcije, vrste opterećenja i njihove kombinacije, geometrijski rubni uvjeti
[39]	Geometrija (fizički model)	Opterećenja i oslonci
[40]	Katnost, raster, geometrija	Analički model, svojstva materijala, svojstva presjeka, rubni uvjeti, informacije o opterećenju
[41]	Geometrija, spojevi elemenata, dimenzije poprečnih presjeka, mehanička svojstva materijala	Oblikovanje geometrije i oslonaca, odabir materijala i dodjeljivanje opterećenja

koje vode do proračuna konstrukcija. Sastoje se od razmjene podataka kao i od definiranja novih informacija. Statičari ne definiraju svoj model od početka. Geometrija modela rezultat je razmjene podataka između sektora arhitektonskog projektovanja i proračuna konstrukcija. Tijek rada uključuje prije svega izradu geometrije od strane arhitekta, međusobno usaglašavanje o nosivoj konstrukciji, te definiranje modela za proračun konstrukcije na temelju arhitektonskog modela. Informacije koje rezultiraju provedbom prethodnih aktivnosti nisu normirane niti detaljno definirane.

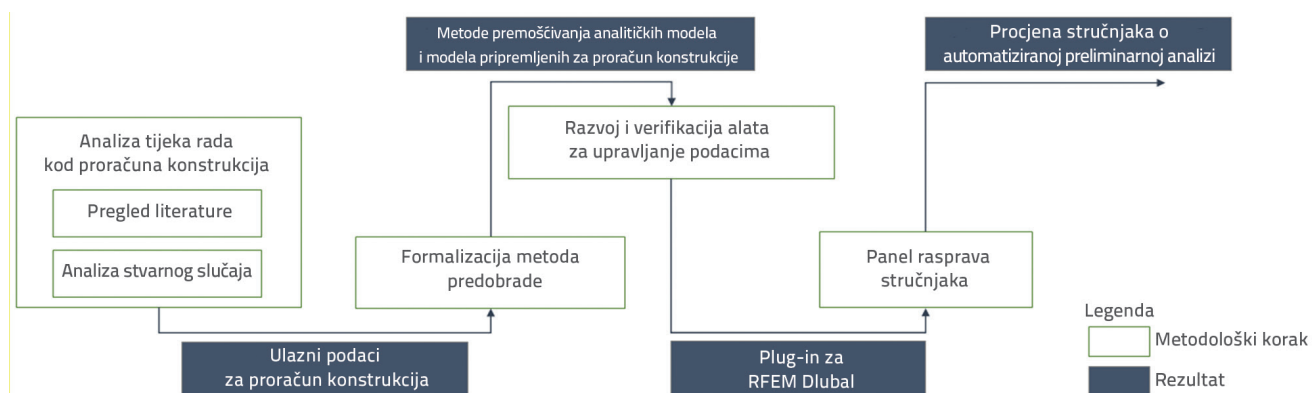
Postoji više znanstvenih radova koji se bave tijekovima rada u BIM okruženju i proračunom konstrukcije i opisuju tijek rada proračuna konstrukcije i odgovarajući protok podataka. Skup smjernica za modeliranje sa ciljem poboljšanja razmjene podataka između fizičkih i analitičkih modela s fokusom na geometriju modela definiran je u [32]. Predložen je okvir koji uključuje interpretaciju fizičkog modela u odgovarajući analitički model, oba u IFC formatu, ali modeli nisu prethodno obrađeni za proračun konstrukcije [33]. Oni interpretiraju postojeće informacije [33], kao što su geometrija i materijal, ali ih ne obogaćuju dodatnim informacijama na način da bi bili spremni za simulaciju. Postoji nekoliko slučajeva iz prakse koji primjenjuju 3D proračun konstrukcije, a prednosti 3D proračuna konstrukcije kao bolje razumijevanje konstrukcije i bolji rezultati s troškovnog gledišta su navedeni u [34]. Ne postoji konsenzus o izvoru informacija u istraživanju koje opisuje razmjenu podataka (tablica 11).

## 2.6. Sažet pregled literature

Primjena BIM-a za proračun konstrukcija ne podrazumijeva određeno mjerilo ili vrstu proračuna, ali podrazumijeva više automatiziranih procesa, veću količinu razmjene informacija i manje ručnog rada. Prijedlozi za automatizaciju trenutne prakse u projektiranju odnose se prije svega na ranu fazu projektiranja (npr. [26]), kojoj još uvijek nedostaje značajna količina informacija o projektu građevine u usporedbi s

glavnim projektom; dakle, usmjerava se prema generativnom projektiranju. Druge prakse u graditeljstvu, kao što je projektiranje tunela, imaju djelomično automatiziranu predobradu modela, ali i različite tijekove rada i uključenost interesnih sudionika projekta. Tijekovi rada kod proračuna konstrukcija tijekom projektiranja građevine su heterogeni i nisu dovoljno istraženi u postojećoj literaturi. Iz pregleda literature digitalnih tijekova rada prikazanog u Tablici 1. može se zaključiti da: geometriju svih građevnih elemenata koji zatvaraju prostor te materijale građevnih elemenata s vizualnim svojstvima i vrstama građevnih elemenata isporučuje sektor arhitektonskog projektiranja za sektor proračuna konstrukcije. U pojedinim slučajevima, nakon konzultacija sa statičarima, arhitekti definiraju nosive građevne elemente, temelje i raster. Informacija koja obično nije eksplicitno definirana tijekom arhitektonskog projektiranja jest analitička geometrija elemenata konstrukcije, opterećenja, strukturna svojstva materijala, oslonci i konstrukcijske veze građevnih elemenata. Računalni programi u domeni arhitekture obično ne nude načine za definiranje tih informacija. U normama ili literaturi nedostaju automatizirane metode predobrade modela građevina kao dio tijeka rada proračuna konstrukcija, osim metoda koje pružaju računalni programi koji prevladavaju probleme specifične za računalni program u obliku zaobilaznih rješenja. Cilj istraživanja jest unaprijediti postojeće prakse proračuna konstrukcija pružanjem automatizirane predobrade modela građevine, i na taj način smanjiti troškove, pogreške i vrijeme potrebno za proračun te pružiti bolju povratnu informaciju. Identificirani problemi su rezultat nepotpune dokumentacije koja opisuje tijek rada kod proračuna konstrukcija, nepostojanja metoda koje su potrebne za automatizaciju i naposljetku automatizirane procedure. Stoga je cilj ovog istraživanja rješavanje problema nepostojanja predobrade modela identificiranjem i automatizacijom uobičajenih postupaka predobrade modela građevine za fazu izrade glavnog projekta tijekom projektiranja građevina.





Slika 2. Koraci metodologije i odgovarajuće isporuke

### 3. Metodologija

Fokus ovog rada, koji zaokružuje implementaciju razmjene podataka između izrade arhitektonskog projekta i proračuna konstrukcije, jest automatizacija koraka predobrade modela koji prethode proračunu konstrukcije u fazi projektiranja građevine, a koji se zasad provode ručno. U prethodnom istraživanju razvijen je, implementiran i verificiran okvir koji olakšava razmjenu podataka između izrade modela arhitektonskog projekta i modela za proračun konstrukcije [9, 31]. Okvir omogućuje otvorenu klasifikaciju i interpretaciju na središnjoj pohrani podataka, te konačno automatizira razmjenu podataka sa vlasničkim softverima. Objekti su definirani u mjerilu elemenata zgrade, gdje se semantičke informacije definiraju IFC terminologijom, a geometrijske informacije s geometrijskim jezgrom *Open Cascade*. *Open Cascade* pruža unaprijed definirane metode koje se primjenjuju za interpretaciju geometrije. Automatizacija procedura predobrade modela koje stvaraju model spreman za proračun konstrukcije ostvaruje se kroz nekoliko metodoloških koraka opisanih u nastavku i na slici 2.

- Identifikacija metoda preliminarne analize modela temelji se na detaljnom pregledu literature (poglavlje 2.5.) i provedenoj analizi stvarnog slučaja procesa modeliranja i razmjene podataka njemačke projektantske tvrtke (poglavlje 4.). Analiza slučaja odražava svakodnevne postupke koji se provode pomoću BIM alata za proračun konstrukcija.
- Potrebno je formalizirati metode automatizirane predobrade modela kako bi se mogle izvesti kao alat za upravljanje podacima (poglavlje 5.). Alat pristupa analitičkom modelu na središnjoj pohrani podataka, nakon interpretacije geometrijskih i negeometrijskih informacija iz fizičkog modela građevine koji je dostavio arhitekt [9, 31]. Takav model smatra se polazištem za metode predobrade modela koje ga pripremaju za proračun konstrukcije. Slični modeli mogu se ručno izraditi na temelju podataka dostupnih u arhitektonskom projektu. Analitički modeli koji su korišteni za predobradu modela sadrže analitičku geometriju elemenata konstrukcije, vrste građevnih elemenata i materijale. Metode preliminarne analize dobivaju se iz prethodno provedene analize. Metode se razvijaju usporedbom početnih i

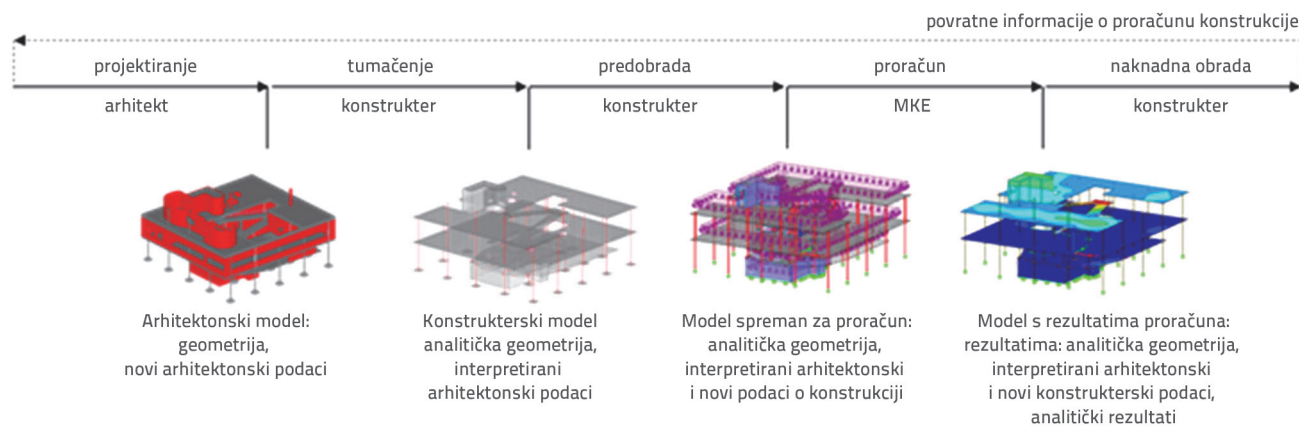
očekivanih modela građevine, te identifikacijom i opisivanjem procesa koji osiguravaju željeni rezultat.

- Izrađeni alat za upravljanje podacima održava komunikaciju sa središnjom pohranom podataka (realiziranom s MongoDB-om) i omogućava pretvorbu podataka za određeni alat za proračun po metodi konačnih elemenata (RFEM Dlubal). Podacima u MongoDB i RFEM Dlubal može se pristupiti putem aplikacijskog programskog sučelja (eng. *Application Programming Interface – API*). API-ji se koriste s tehnologijom *.Net framework* za stvaranje softvera koji je dostupan kao softverski priključak (eng. plug-in) u RFEM Dlubal. RFEM grafičko korisničko sučelje (eng. *Graphical User Interface – GUI*) također služi kao GUI za softverski priključak i omogućuje krajnjem korisniku uvid u metode automatizacije. Razvijene metode predobrade implementirane su i verificirane kroz dva pilot modela građevina koje je ustupila prije spomenuta građevna kompanija. Dva modela su predobrađena izrađenim alatom i izvršen je proračun konstrukcije. Rezultate će procijeniti autori i uspoređuju ih s rezultatima tradicionalnog proračuna konstrukcija. U ovom koraku istraživanja dvije se pokusne građevine koriste za provjeru načina rada identificiranih postupaka i dostatnosti informacija (poglavlje 6.).
- Naposljetku, povratne informacije i procjena potencijala generalizacije implementiranih metoda automatizacije prikupljene su kroz panel raspravu stručnjaka u praksi (poglavlje 7.). Iskustvo stručnjaka potrebno je kako bi se identificirali potencijali optimizacije jer su pravila predobrade zavise od osobnog načina rada, ili načina rada pojedine tvrtke.

### 4. Identifikacija koraka predobrade: analiza tijeka rada kod proračuna konstrukcija

#### 4.1. Procedure tijekom rada

Cilj prikazanog istraživanja jest automatski izraditi model dostatan za proračun konstrukcije dodjeljivanjem dodatnih informacija modelu koji potječe iz drugih domena. Kako bi se to postiglo, potrebna je značajna količina novih informacija specifičnih za proračun konstrukcije. Svaka informacija se



Slika 3. Postupci koji vode do povratnih informacija o provedenom proračunu konstrukcija

generira ili uređuje u određenoj točki tijekom rada (slika 3.); metode automatizacije zamjenjuju ručno izvedene postupke i generiraju ili uređuju iste informacije. U ovom poglavlju se istražuje porijeklo informacija. Procedure koje prethode povratnim informacijama statičara prikazane su na slici 3. Procedure tokom kojih informacije definiraju isključivo statičari pripadaju predobradi, dok redefiniranje informacija koje potječu iz modela arhitektonskog projekta, centralno pohranjene kao otvoreni model arhitektonskog projekta, pripadaju interpretaciji arhitektonskog projekta, pri čemu se interpretirani model arhitektonskog projekta također centralno pohranjuje kao otvoreni model konstrukcije.

Dodatne informacije definiraju isključivo statičari, kao što su opterećenja, kombinacije opterećenja ili dodatni elementi konstrukcije. Definiranje takvih informacija, njihovo odvajanje od informacija koje potječu iz modela arhitektonskog projekta i postupci kojima se definiraju zahtijevaju detaljno istraživanje tijekom rada, prakse i procesa koje primjenjuju statičari. Stoga se tijekom rada istražuje pregledom literature (poglavlje 2.5) i analizom stvarnog slučaja kako bi se snimili postojeći procesi modeliranja i proračuna.

#### 4.2. Analiza stvarnog slučaja

U stvarnom slučaju (tijeku rada njemačke građevne tvrtke), analiza procesa uključujući postupke projektiranja, interpretacije i predobrade, provedena je u razdoblju od osam mjeseci (od travnja 2020.) kroz više intervjua, promatranje procesa i dobivanja kontinuiranih povratnih informacija koje su pružali stručnjaci iz te tvrtke. Tim se sastojao od BIM stručnjaka i statičara, koji su radili na implementaciji i poboljšanju tijekom rada projektiranja zgrada u različitim domenama, kao i na obavljanju svakodnevnih zadataka proračuna konstrukcija. Stoga su mogli identificirati izazove i prilike unutar postojećeg tijeka rada, kao i opisati standardne tijekove rada koji rezultiraju povratnim informacijama nakon provedenog proračuna konstrukcija. Inženjeri koriste alat RFEM Dlubal za provođenje proračuna konstrukcije; a arhitektonski projekt nije nužno pružila ta

tvrtka, nego vanjski suradnici na tom projektu. Stvarnei slučaj služi prije svega za potvrđivanje rezultata dobivenih pregledom literature (poglavlje 2.5); nadalje, dokumentirani su detalji, koji nisu postojali ili nisu dovoljno opisani u literaturi, potrebni za automatizaciju modeliranja i procesa zaključivanja nužnih za pripremu modela konstrukcije spremnog za provedbu proračuna konstrukcije. Točne informacije koje se dodjeljuju tijekom provedbe spomenutih postupaka su dobivene i po potrebi raspravljene sa stručnjacima koji su uključeni u projekt. Analiza procesa specifičnih praksi tvrtke pokazala je da se u Revitu generira arhitektonski projekt koji je potrebno filtrirati, a definiranje nosivih elemenata prepušta se statičaru. Filtrirani model nije uvezen kao takav u alat za proračun konstrukcije RFEM Dlubal. Preuređen je za tzv. "2.5D proračun konstrukcije". Ta analiza se odnosi na modeliranje pojedinih ploča, a građevni elementi ispod ploče su predstavljeni kao točkasti ili linearni nosači, ovisno o vrsti građevnog elementa. Proračuni se izvode pojedinačno za svaku ploču. Ako se ne radi o gornjoj ploči konstrukcije, svi elementi iznad ploče su predstavljeni kao točkasta ili linearna opterećenja, ovisno o vrsti građevnog elementa, s vrijednostima dobivenim iz prethodnog proračuna. Prva ploča koja se izračunava je gornja ploča konstrukcije, a ploče na nižim etažama se u proračun obuhvaćaju uzastopno. Geometrija ploče se ponovno definira iz postojećeg filtriranog modela.

Potrebno je dodijeliti višestruka opterećenja: vlastito i pokretno opterećenje za svaku ploču, te dodatno opterećenje od vremenskih utjecaja na krovnu ploču. Standardni proračun ne uključuje proračun dodatnog opterećenja od vremenskih utjecaja za vertikalne elemente koji može biti potreban. Opterećenja izračunana na nosače gornje ploče, koji su zapravo vertikalni građevni elementi ispod ploče, prenose se na donju ploču na mjestu gdje su ti elementi u dodiru s donjom pločom. To mogu biti linearna ili točkasta opterećenja, ovisno o vrsti građevnog elementa. Spojevi između nosača i ploča su modelirani tako da ne prenose rotaciju, osim spojeva koji podupiru konzolu. Analiza stvarnog slučaja daje rezultate slične rezultatima iz pregleda literature tijekom rada proračuna konstrukcije: geometrija potječe

Tablica 2. Porijeklo informacija iz analize postupaka

Porijeklo informacija	Informacije
Arhitektonski model	Geometrija, vrste građevnih elemenata - arhitektonska semantika, materijali s vizualnim svojstvima, korištenje prostora (nije uvijek definirano)
Međusobna suglasnost o arhitektonskom modelu (model konstrukcije)	Geometrija konstrukcijskog sustava, svojstva nosivosti
Model za proračun konstrukcije	Analiitička geometrija, vrste građevnih elemenata – semantika analize konstrukcija, materijali sa svojstvima konstrukcije, vrste opterećenja i slučajevi, oslonci, spojevi

iz arhitektonskog modela, koncept za proračun konstrukcije generira se usuglašavanjem arhitekta i statičara, što rezultira modelom za proračun konstrukcije. Model se sastoji od više horizontalnih građevnih elemenata i vertikalnih elemenata pretvorenih u nosače i opterećenja. Materijal i interpretacija građevnih elemenata odabiru se prema uputama koje daje arhitekt. Potpuno nove informacije koje dodjeljuju statičari su: opterećenja, kombinacije opterećenja i oslonci. U 2.5D simulaciji, oslonci su definirani ispod svake ploče od građevnih elemenata ispod ploče, a ne samo od temelja. U 3D analizi spojevi između građevnih elemenata i ploča modeliraju se kao spojevi, a ne kao nosači. Pregled porijekla informacija dan je u tablici 2.

Analizirani 2.5D tijek rada izvršava se pomoću većeg broja RFEM datoteka, a informacije se ručno dodjeljuju. Slika 4 prikazuje 2.5D tijek rada: a) opterećenja su dodijeljena gornjoj ploči; b) donji elementi građevine definiraju se kao oslonci i izračunavaju se reakcije; c) reakcije su dodijeljene sljedećoj ploči kao dodatno opterećenje. Značajan dio tijeka rada može se automatizirati u svom trenutačnom stanju. Međutim, u ovome radu, autori proučavaju potpuno razvijeni BIM tijek rada, koji se temelji na 3D modelima zgrada. Zbog toga se naše metode preliminarne analize djelomično razlikuju od analiziranog tijeka rada.

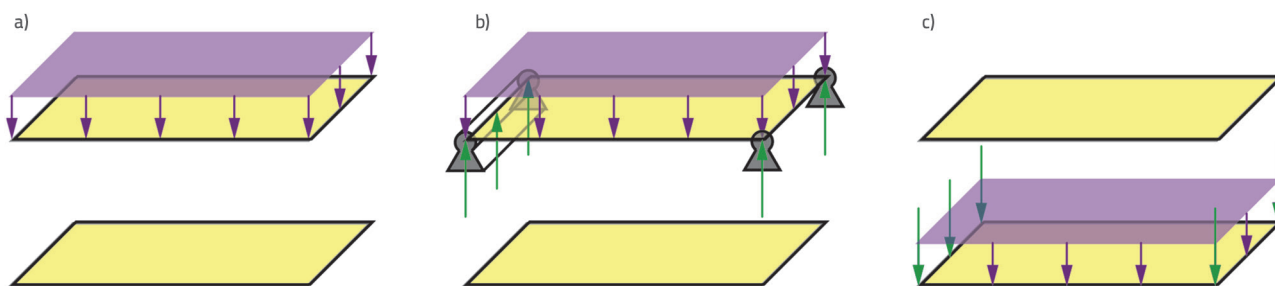
## 5. Formalizacija metoda predobrade za automatiziranu predobradu

### 5.1. Pregled novog tijeka rada

Informacijama definiranim u arhitektonskom modelu građevine dodijeljene su nove informacije da bi se dobio model za proračun konstrukcije. Neke se informacije mogu interpretirati i ovisi o

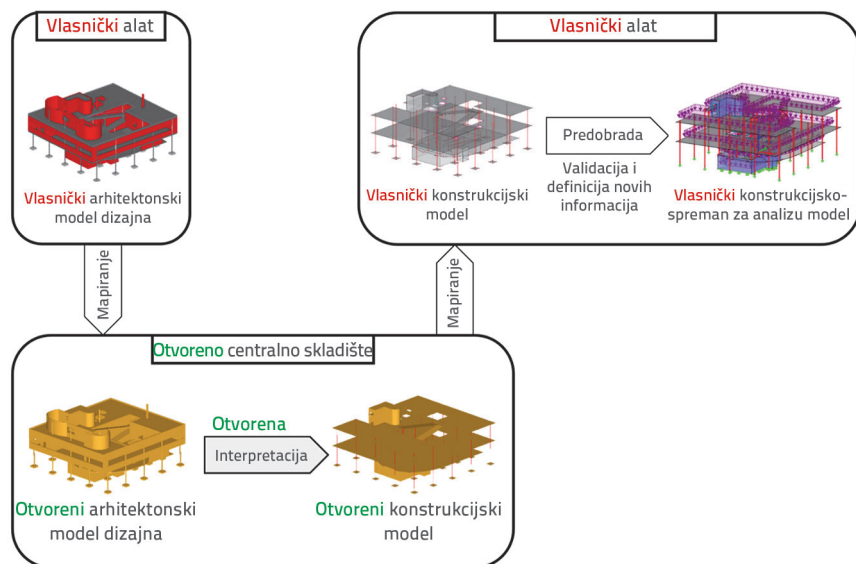
informacijama koje pruža arhitekt, a neke su nove. Usredotočit ćemo se na nove informacije potrebne za proračun konstrukcije, te definirati metode automatizacije na temelju vrste informacije koja se dodjeljuje. Dok je način tumačenja geometrijskih i negeometrijskih informacija građevnih elemenata sa svojstvima nosivosti na temelju informacija koje dodjeljuje arhitekt prethodno razvijen do detalja [9, 31], ovdje će biti prikazan način generiranja novih informacija koje su prepoznate kao ključne za proračun konstrukcije.

U ovom poglavlju prikazane su metode predobrade razvijene na temelju rezultata analize tijekom rada. Ulazne i izlazne informacije ostaju iste u tradicionalnim i automatiziranim postupcima, dok razvijene metode odražavaju stvarnu praksu statičara. Cilj je postići isti rezultat kao s tradicionalnom predobradom – model spreman za proračun konstrukcije, bez ponavljanja ručnog rada koji je sklon pogreškama. Rezultati analize procesa podrazumijevaju da se filtriranje i interpretacija nosivih elemenata građevine obavljaju u interpretacijskom dijelu iz arhitektonskog modela građevine. Na temelju analiziranog procesa, nakon interpretacije dostupni su sljedeći podaci: analitička geometrija građevnih elemenata, materijali, vrste građevnih elemenata i da li su nosivi. Potrebne su dodatne informacije: opterećenja, oslonci i spojevi. Korak validacije u tradicionalnom pristupu odvija se vizualnim proučavanjem modela te eventualnim dodjeljivanjem novih ili uređivanjem informacija na problematičnim mjestima. Validacija je od presudne važnosti za metode predobrade. Nakon provjere valjanosti, autori rada predlažu metode kojima se definiraju sljedeće informacije: razine etaža, temelji, opterećenja i spojevi. Novi tijek rada koji obuhvaća prijenos podataka od arhitektonskog projekta do proračuna konstrukcija prikazan je na slici 5.



Slika 4. Tijek rada u 2,5D analizi





Slika 5. Pregled novog tijeka rada

## 5.2. Validacija modela

Početni korak prije dodjele novih informacija jest validacija modela. Neki primjeri problema koji se mogu pojaviti tijekom uvoza modela su materijali koji nisu uopće ili pravilno definirani ili složeni geometrijski oblici koji nisu ispravno prikazani. Razmotrili smo neke od tih problema i pokušali ih riješiti prije uvoza. Validacija modela predstavlja širok skup tema koje treba razmotriti prije dodjeljivanja novih informacija. Autori rada su prepoznali važnost provjere valjanosti prije provođenja bilo kojeg koraka predobrade, pri čemu se valjanost u ovom radu tretirala primjerno obzirom da su metode predobrade realizirane u jedinstvenom tijeku rada. Za širu upotrebu, validacija modela zahtijeva opsežan razvoj.

U radu su razmatrane informacije o materijalu kao primjer. Identificira se element kojemu nedostaje informacija o materijalu prilikom uvoza i pokreće se zahtjev za dodatnim postupkom, jer se očekuje da ta informacija potječe od arhitekta. Primjer je prikazan na slici 6. Takvi postupci prevladaju neslaganja između očekivane i dostupne količine informacija. Dodatne informacije mogu biti potrebne zbog nedostatka informacija na središnjoj pohrani ili učinkovitosti softverskih alata. Iscrpnost metoda validacije poboljšava kvalitetu i učinkovitost metoda predobrade.

## 5.3. Metode predobrade: nove informacije

Metode predobrade bit će predstavljene na temelju informacija o građevini koje prikazuju: razine etaža, temelje, opterećenja i spojeve.

### Razine etaža

Kako se sadašnja praksa u analizi slučaja usredotočuje na izračun prema etažama, potrebna je metoda predobrade za određivanje razina etaža. Razine etaža često se definiraju u softveru za izradu arhitektonskog modela, ali te razine ne moraju nužno odgovarati

potrebama građevnih inženjera ili načinu na koji su definirane u alatu za proračun konstrukcije. Općenito, razine etaža u građevinarstvu definiraju se kao aksijalna ravnina podnih ploča, što predstavlja informaciju koja je već dostupna nakon provedenog koraka interpretacije. Svrha metode predobrade jest otkriti relevantne podne ploče, dodijeliti im točan položaj ili z koordinatu i pripremiti strukturu za provedbu ostalih koraka predobrade. Ploče se najprije filtriraju, a samo se horizontalne smatraju relevantnima za analizu. Također, mogu se i validirati ako postoji više ploča unutar određene granice tolerancije; poravnanje susjednih ploča već je razmotreno u koraku interpretacije [9]. Metoda koja definira razine etaža ne generira novo znanje, no budući da stvara strukturu za ostatak provedbe predobrade, smatra se metodom predobrade.

### Temelji

U procesu projektiranja zgrade nije jasno definirano jesu li temelji modelirani tijekom izrade arhitektonskog projekta ili proračuna konstrukcije. Čak i ako su temelji definirani u arhitektonskom modelu, za njihovo dimenzioniranje odgovorni su statičari. Iz analize procesa, autori rada zaključili su da temelje općenito definiraju statičari te predložili automatsku izradu temelja tijekom predobrade modela za proračun konstrukcija.

Potrebno je automatski generirati tri vrste temelja: individualne, trakaste ili temeljne ploče, ovisno o vrsti geometrijskog elementa gdje se postavljaju: točka, linija ili površina. Temelji se postavljaju na donji dio svakog konstrukcijskog elementa koji prenosi opterećenja u tlo, tako da točka predstavlja donji dio stupa, linija donji dio zida, a površina ploču koja se koristi kao temeljna. U slučaju da se temelji modeliraju tijekom izrade arhitektonskog projekta, građevni elementi koji definiraju temelje trebaju se definirati kao točke, linije ili površine već tijekom interpretacije modela. Temelji se obično postavljaju na najnižu razinu konstrukcije, ali pozicioniranje može biti složenije i na više razina. Položaj tla ili vanjskog prostora u odnosu na građevinu mogao bi se razmotriti u složenijim postupcima validacije.

### Opterećenja

Uvezeni modeli za proračun konstrukcije ne sadrže podatke o opterećenjima jer opterećenja obično nisu definirana tijekom izrade arhitektonskog projekta. Opterećenja su uvjet za svaki proračun konstrukcije. Postoji nekoliko vrsta opterećenja koja se dodjeljuju prije proračuna. Dodatno, potrebno je definirati kombinacije opterećenja kako bi se analizirala svojstva konstrukcije u složenijim uvjetima, a način na koji se definiraju opterećenja propisan je u normama [42]. Obično se pojavljuju

četiri vrste opterećenja: vlastito, pokretno, udarno opterećenje i opterećenje uzrokovano vanjskim utjecajem [43]. Vlastita opterećenja predstavljaju stalna opterećenja konstrukcije, odnosno vlastitu težinu građevnih elemenata. Vlastita težina ovisi o materijalima i primjenjuje se na svaki element konstrukcije. Vlastita težina kao podatak može se automatski dodijeliti za cijelu građevinu jer informacije o materijalu dolaze iz arhitektonskog modela, a svojstva materijala, kao što je specifična težina, dostupna su u RFEM-u.

Pokretna opterećenja primjenjuju se na sve ploče u modelima građevina. Mogu biti privremena poput namještaja ili korisnika izračunati prema standardnim vrijednostima [44, 45], kao i nenosivi elementi konstrukcije čiji je proračun također standardiziran [46]. Preduvjet za automatizaciju pokretnih opterećenja na temelju interpretiranih modela jest taj da arhitekt na odgovarajući način definira namjenu prostorija. Međutim, to često nije slučaj te je stoga cilj dodijeliti namjene prostorija za cijelu etažu.

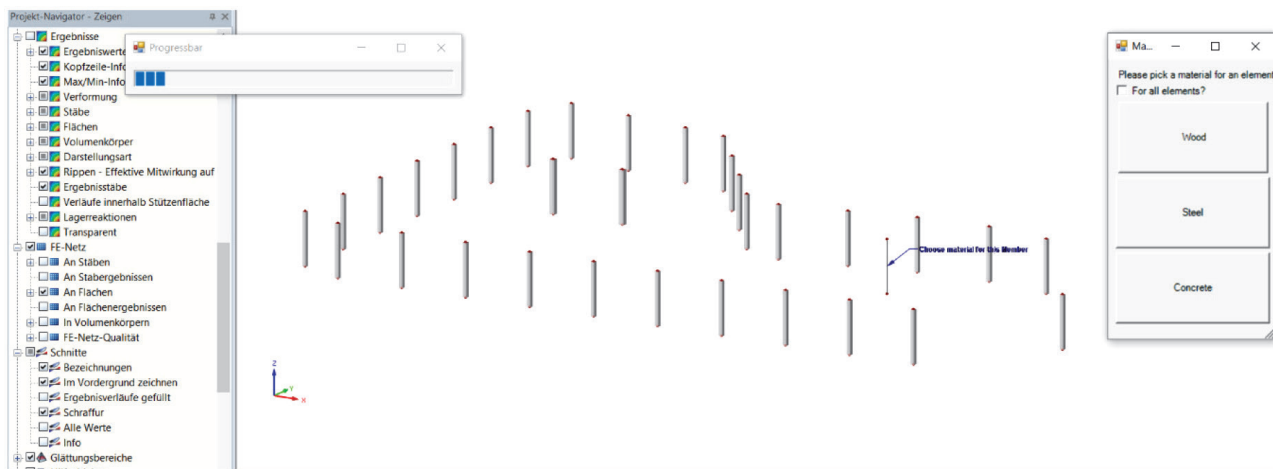
Osim vlastitih i pokretnih opterećenja, vanjska opterećenja su također potrebna za proračun konstrukcije. Ona ovisi o dva čimbenika: geografskom položaju građevine, koji određuje specifične vrijednosti vanjskog opterećenja, te o tome graniči li neki građevni element s vanjskim prostorom. Ako su prostorije definirane u modelu zgrade, građevni element koji graniči s vanjskim prostorom može se lako identificirati, u suprotnom je potrebno razviti složeniji algoritam zaključivanja. Pojednostavljeni pristup, ako u modelu nedostaju namjene prostorija i ako se provodi izračun po etažama konstrukcije, opterećenja snijegom dodjeljuju se samo na pločama na najvišoj razini konstrukcije, s koeficijentima dostupnim u standardima za određenu lokaciju [46]. U RFEM-u te vrijednosti se mogu dodijeliti prema nadmorskoj visini, odnosno snježnoj zoni. Zemljopisni položaj građevine je poznata informacija od početka projekta i trebala bi biti prisutna u središnjoj bazi podataka. Udarne opterećenja obično se dodjeljuju samo u posebnim slučajevima.

## Spojevi

Tijekom proračuna konstrukcije ploča bez modeliranja vertikalnih elemenata, nema spojeva između vertikalnih i horizontalnih elemenata jer su vertikalni elementi predstavljeni kao oslonci ili opterećenja. Spojevi određuju na koji su način građevni elementi međusobno povezani. Za 3D proračun imaju značajan utjecaj na konačne rezultate proračuna. Spojevi se prije svega modeliraju kao točkaste veze, a rotacija se ne prenosi kod točkastih spojeva u oba smjera. Kod linearnih spojeva se rotacija može prenijeti u smjeru linije koja definira spoj. Fiksni spojevi modeliraju se kada je riječ o konzoli, odnosno kada je potreban prijenos rotacije. Informaciju o konzoli arhitekt ne definira izravno, međutim, to se znanje može automatizirati, ili analizom namjene prostorije (primjerice balkon) ili složenijim algoritmom koji može identificirati konzole na temelju geometrije. Po zadanim postavkama dodjeljuju se točkasti spojevi, koji se mogu naknadno prilagoditi. Spojevi između elemenata tema su koja zahtijeva daljnja istraživanja radi dobivanja realnih rezultata i istraživanja njihovog potencijala za automatizaciju.

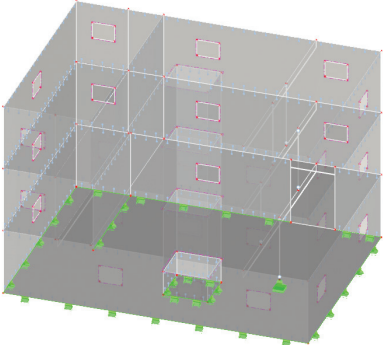
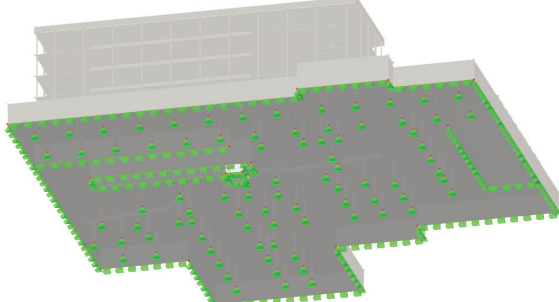
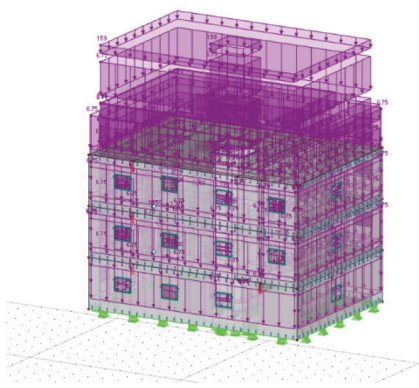
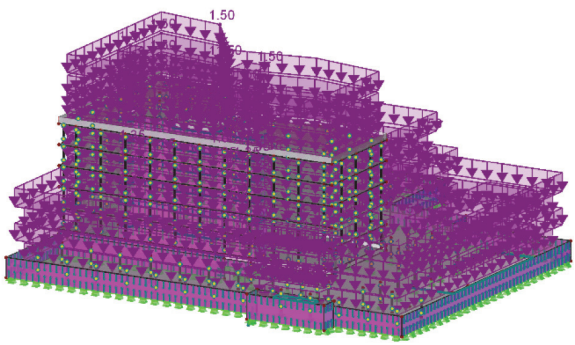
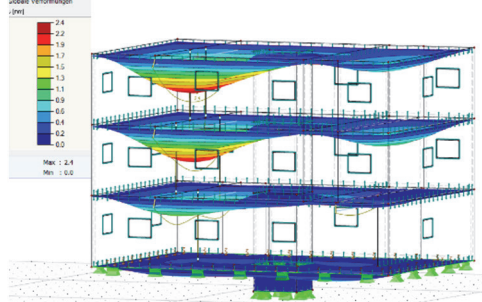
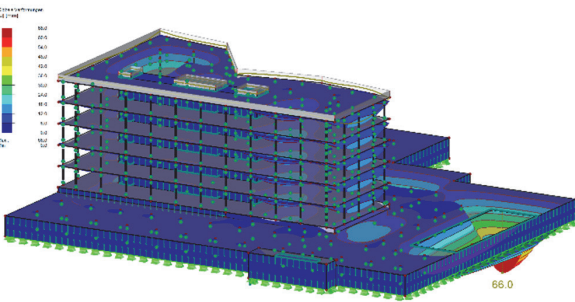
## 6. Implementacija i verifikacija: pilot modeli građevina

Predložene metode predobrade implementirane su i verificirane na dva pilot modela građevina koje je ustupila građevna tvrtka. Metode predobrade implementirane su na 3D modelima, razvijenim prethodno kroz interpretaciju modela zgrada [9, 31]. Modeli u prethodnom istraživanju kreirani su sa IFC izvozom iz računalnog programa Autodesk Revit te se automatski interpretiraju u analitičke modele građevina. Kontekst tih istraživanja u skladu je s opsegom informacija u modelima arhitektonskih projekta koji su opisani u analizi tijeka rada. Interpretirani modeli predstavljaju polazište za metode predobrade, a ti modeli sadrže analitičku geometriju elemenata konstrukcije sa zadanim vrstama građevnih elemenata i materijalima. Međutim, isti ili slični modeli mogu se i ručno



Slika 6. Dodjela materijala nakon validacije

Table 3. Snimke rezultata metoda predobrade i proračuna konstrukcije

	Pilot model 1	Pilot model 2
Temelji		
Opterećenja		
Rezultati proračuna		

generirati unutar alata za proračun, nakon ponovnog definiranja informacija koje su dane u arhitektonskom projektu.

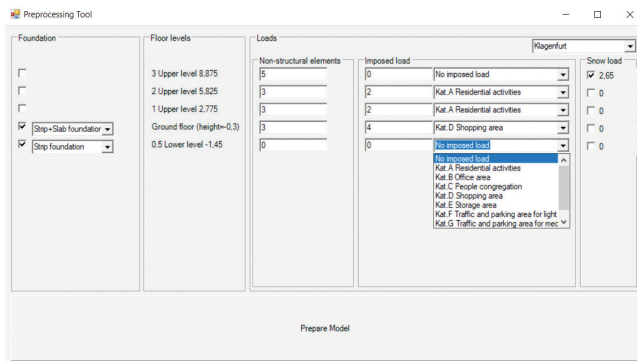
Predložena automatizacija metoda predobrade zahtijeva prelazak s 2.5D na 3D modele. Implementacija se sastojala od pružanja načina za provjeru valjanosti modela kroz validaciju materijala (slika 6.) i predobrade validiranog modela. Metode predobrade uključivale su definiranje razine etaža, temelja, opterećenja te kombinacija opterećenja, i spojeva. Na kraju su rezultati provedenog proračuna konstrukcije uspoređeni s rezultatima koje je dobila tvrtka koja je ustupila modele za ovo istraživanje.

Predobrada je implementirana s modelima konstrukcije koji su pohranjeni na središnju pohranu i vlasničkim RFEM modelom, pri čemu je primijenjen alat RFEM Dlubal API s podacima dostupnima na središnjem mjestu pohrane podataka. Na taj je način omogućeno korištenje geometrijske jezgre sustava

*Open Cascade* pomoću arhitekture sustava *.Net framework* za realizaciju komunikacije i metoda predobrade.

Alat za predobradu je realiziran kao RFEM *plug-in*. Pristup je djelomično automatiziran, međutim, zadane vrijednosti ili dodatne informacije kao što je korištenje prostora mogu dovesti do potpuno automatiziranog pristupa. Analitički modeli koji se obrađuju sa softverskim priključkom moraju imati točne informacije: analitičke geometrije građevnih elemenata, vrste građevnih elemenata i vrste materijala. Softverski priključak najprije detektira ploče zgrade koji predstavljaju glavnu strukturu za daljnje korake automatizacije (slika 7.).

Na određenoj etaži moguće je automatizirati izradu oslonaca ili opterećenja. U tablici 3. rezultati su prikazani na dva pilot-modela. Spojevi se definiraju bez interakcije korisnika, no mogu se dalje uređivati ako je potrebno. Prikazani su temelji, opterećenja i rezultati proračuna.

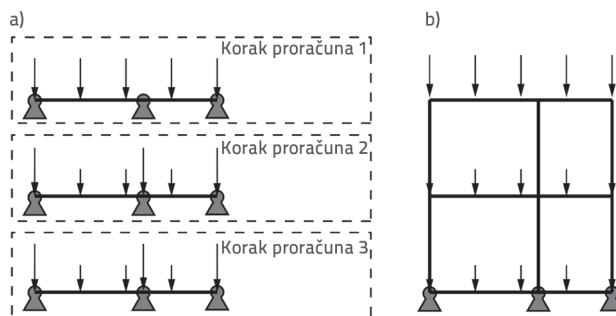


Slika 7. Snimka zaslona

Verifikacija je provedena usporedbom rezultata proračuna s predloženim metodama i rezultatima iz 2,5D proračuna. Shematski prikazi 2,5D i 3D proračuna prikazani su na slici 8. 2,5D proračun se izvodi postupno, kat po kat, s više datoteka i modela, a 3D pristup ima jedan proračun. RFEM Dlubal podržava 2,5D proračun dopuštajući prijenos izračunanih reakcija kao opterećenja između više datoteka.

Uspoređene su dobivene reakcije u temeljima u 2,5D i 3D proračunu. Opterećenja dodijeljena pločama su jednaka u obje analize, no reakcije se razlikuju. Razlika se mjeri kao postotak 2,5D rezultata. 3D analiza općenito rezultira sličnim reakcijama u temeljima, međutim rezultati su katkad znatno drugačiji, ponekad čak mijenjaju smjer reakcije. Pojedinačni rezultati uspoređeni su u tablici 4., a razlika između rezultata dobivenih u 2,5D i 3D proračunu sažeta je u tablici 5. Razlika prikazuje nepouzdanost 3D analize za inženjere koji su upoznati s 2,5D, budući da se rezultati

razlikuju za više od 15% u 18,2% temelja prvog i 29,9% temelja drugog pilot-modela. Čak i ako je relativna razlika značajna, apsolutna razlika ne pokazuje nerealne vrijednosti. Rezultate je potvrdio statičar.



Slika 8. Shematska usporedba: a) 2,5D analiza; b) 3D analiza

## 7. Evaluacija kroz panel diskusiju stručnjaka u praksi

Panel diskusija je odabrana kao metoda za dobivanje povratnih informacija od male skupine stručnjaka i evaluaciju predloženog pristupa. Panel rasprava je održana kao *online* radionica s tri statičara iz dvije različite građevne tvrtke te dva BIM stručnjaka. Rasprava je trajala 108 minuta, a moderirao ju je prvi autor ovog rada. Predstavljen je opći tijek rada s interpretacijama i metodama predobrade za analitički model, nakon čega je uslijedila poluotvorena rasprava. Rasprava je uključivala unaprijed definirani otvoreni upitnik za procjenu korisnosti i upotrebljivosti razvijenog softverskog priključka. Fokus rasprave i upitnika stavljen je na primjenjivost metoda predobrade u

Tablica 4. Usporedba 2,5D i 3D proračuna

	Snimke položaja temelja	Pozicija	2,5D	3D	Diff, [kN]	Diff, [%]
Pilot model 1		1	185,71 kN/m	170,21 kN/m	15,5	8,35
		2	117,38 kN/m	134,40 kN/m	-17,0	14,50
		3	170,84 kN/m	179,51 kN/m	-8,7	5,07
		4	876,49 kN	657,25 kN	219,2	25,01
Pilot model 2		1	3,16 kN/m	3,58 kN/m	-0,42	13,29
		2	83,73 kN	179,31 kN	-95,58	114,15
		3	55,81 kN	38,40 kN	17,41	31,20
		4	100,52 kN	97,47 kN	3,05	3,03



Tablica 5. Pregled razlika reakcija između temelja u 2,5D i 3D proračunu

Razlika	0-5 %	5-15 %	15-25 %	25-50%	>50%
Pilot model 1	1 (9,1%)	8 (72,7%)	1 (9,1%)	1 (9,1%)	0 (0%)
Pilot model 2	55 (51,4%)	20 (18,7%)	9 (8,4%)	11 (10,3%)	12 (11,2%)

svakodnevnoj praksi. Kako svi inženjeri koji sudjeluju u radu koriste RFEM Dlubal u svojim praksama, RFEM Dlubal *plug-in* pruža mogućnost ispitivanja postupaka u poznatom okruženju. Povratne informacije koje su dali sudionici u raspravi odnosile su se na opća pitanja u vezi s automatizacijom predobrade, kao i na specifične metode predobrade. Opće napomene uključuju:

- Obje tvrtke koriste arhitektonske modele koji potječu iz Revit-a i RFEM Dlubal za proračun konstrukcije.
- 2,5D preferira se u odnosu na 3D proračun konstrukcije prije svega zbog sljedivosti i jasnoće proračuna, međutim izraženi poprečni presjeci građevnih elemenata mogu biti veći nego u 3D.
- 3D proračun daje rezultate koje je teško provjeriti zbog složenosti sustava.
- Za inženjere koji obavljaju kontrolu potrebna je sljedivost simulacije, što nije dostupno u 3D proračunu.
- Automatizacija metoda predobrade smatra se korisnom i primjenjivom, ali je potrebna određena prilagodba.
- Praksa se ne razlikuje značajno u navedenim tvrtkama.
- Statičari su obično uključeni u projekt prije nego što se unaprijed definira glavni projekt i pojedine informacije se mogu unaprijed definirati.
- Značajna količina znanja temeljenog na iskustvu u praksi koristi se za identifikaciju i analizu modela.

Na temelju povratnih informacije dobivenih od inženjera uključenih u projekt prepoznat je potencijal standardizacije za predložene metode predobrade:

- Sličan pristup se provodi za identifikaciju razina etaža; međutim, važna točka je otkrivanje razine prizemlja, koja se obično postavlja blizu kote  $\pm 0,00$ .
- S obzirom na rezultate geotehničke analize, temelji građevine mogu se odrediti na dva načina:
  - kao predloženo rješenje, ispod svakog elementa posebno isključivanjem mogućnosti dodavanja temeljne ploče zbog loših karakteristika tla.
- Opterećenja značajno ovise o namjeni i posebnim zahtjevima građevine. Predložena opterećenja mogu se smatrati standardnim ulaznim podatkom. Potrebno je razmotriti upotrebu više građevnih propisa. Spojevi se mogu modelirati na dva načina, ovisno o tome koristi li se
  - montažni, što znači da se rotacija ne prenosi, ili
  - sustav izgradnje na licu mjestu, koji označava da se može prenijeti i rotacija.

Metode preliminarnе analize zahtijevaju određenu prilagodbu, ali sličan softverski priključak koji bi mogao automatizirati

postojeće prakse ili neke korake preliminarnе analize prepoznat je kao značajna pomoć u svakodnevnom poslovanju.

## 8. Rasprava

Ovo istraživanje dalo je odgovor na pitanje "Kako omogućiti automatiziranu predobradu modela građevine u softveru za proračun konstrukcija?". Predložene metode predobrade automatiziraju dodjeljivanje dodatnih informacija koje se tradicionalno dodjeljuju ručno i zaokružuju tijekom informacija prije proračuna konstrukcija. Ručna predobrada, nedostatan iskorištavanje softvera u postojećim radnim tijekovima temeljenima na BIM-u, nedostatak tehničkih rješenja za proračun konstrukcija i podrške postojećim praksama pitanja su na koja se daje odgovor s novim prijedlogom. Ti su problemi navedeni u literaturi [1, 17]. Međutim, iako poneka automatizirana predobrada postoji u drugim fazama projektiranja [26] ili domenama [13], predobrada za proračun konstrukcija u fazi izrade glavnog projekta još uvijek nedostaje. Predloženo rješenje usklađeno je s općim tendencijama BIM-a za proračun konstrukcija, kako bi se automatizirali tijekovi rada unutar i izvan područja graditeljstva [15, 16]. Automatizirana prethodna obrada modela pruža bržu povratnu informaciju i smanjuje pogreške, troškove i vrijeme potrebno za analizu konstrukcije.

Standardni tijek rada za proračun konstrukcija uključuje: generiranje podataka tijekom izrade arhitektonskog projekta, interpretaciju postojećih podataka za proračun konstrukcija i dodjelu novih podataka kroz predobradu. U standardima je protok informacija unutar tijeka rada, uključujući odgovornog sudionika u projektu, poziciju unutar tijeka rada i način na koji se generira, prepoznat je kao ključan za digitalizaciju [3]. Budući da tijekovi rada kod proračuna konstrukcija nisu dovoljno dokumentirani, oni su analizirani u ovom istraživanju. Interpretacije koriste već definirane informacije i stvaraju otvorene modele konstrukcije [9]. S druge strane, predstavljene metode predobrade daju nove informacije analitičkim modelima interpretiranim iz arhitektonskog projekta i specifične su za softverske alate.

Diskusija stručnjaka u praksi pokazuje postojeći nesklad između prakse i teoretske hipoteze koja stoji iza koncepta proračuna konstrukcija temeljenog na BIM-u, a to je jaz koji se pokušava riješiti ovim istraživanjem. Dok BIM promiče korištenje zajedničke digitalne prezentacije građevine, a BIM alati za proračun konstrukcija pružaju načine za izradu i analizu 3D modela, u praksi se implementira hibridno rješenje: 3D proračun se provodi pojednostavlivanjem modela do razina pojedinih etaža, obično do samo jedne ploče, tzv. 2,5D proračun. 2,5D proračun posebno je cijenjen



zbog transparentnosti proračuna, koju zahtijevaju inženjeri koji obavljaju kontrolu. Kada se proračun provodi s cjelovitim 3D modelom, vlasnički alati ne nude jasno objašnjenje koraka simulacije, niti preuzimaju odgovornost za rezultate proračuna, što nije prihvatljivo za inženjere koji su odgovorni za stabilnost građevine. 2,5D se može promatrati kao podskup proračuna temeljenog na 3D modelu, gdje se metoda predobrade primjenjuje u manjem mjerilu, npr. pojedine etaže ili samo jedanog građevnog elementa, kao što je ploča. Dodatni alat za dekompoziciju 3D modela i postizanje komunikacije između parcijalnih modela potreban je za potpunu automatizaciju preliminarne analize kod 2,5D proračuna. Sudionici u istraživanju, statičari, izrazili su zabrinutost u vezi s rezultatima i pouzdanosti 3D proračuna, jer kruti model često daje nezadovoljavajuće rezultate. 3D model s iscrpnom validacijom i automatskim metodama predobrade smatra se izvedivim rješenjem, ali 2,5D daje bolje i brže rezultate ako se koraci preliminarne analize izvode ručno. U okviru istraživanja prikazana je usporedba 2,5D i 3D proračuna koja pokazuje pouzdanost 3D proračuna.

Predložene metode predobrade s nekoliko prilagodbi, poput odabira vrste konstrukcije (montažne ili izgradnje na licu mjesta) ili definiranja mogućnosti temeljenja, smatraju se mogućim putem prema pouzdanom 3D proračunu. 3D proračun se provodi za simulaciju potresa, obično na već definiranim projektom zgrade. Stoga se ne predviđa stalna povratna informacija od strane statičara simuliranjem ponašanja konstrukcije, posebno za zahtjevne i dugotrajne simulacije poput ponašanja konstrukcije tijekom potresa. Automatizacijom predobrade, tijekom rada mogli bi doseći dobivanje povratnih informacija u stvarnom vremenu i time dovesti do optimiziranog projekta građevine.

Ažuriranje modela i praćenje promjena i dalje predstavlja izazov i zahtijeva razmatranje u novom okviru. U postojećim praksama promjene se izvode ručno i prenose na etaže konstrukcije pod utjecajem, osim ako promjene ne zahtijevaju potpuno novu simulaciju.

Sudionici panel-diskusije prepoznali su potencijal predloženih metoda automatizirane predobrade i daljnje automatizacije procesa. Automatsko prepoznavanje razina etaža, definiranje temelja, opterećenja i spojeva smatra se značajnom pomoći u proračunu konstrukcije, a moglo bi omogućiti brže uređivanje modela, manju sklonost pogreškama i na kraju pružiti povratnu informaciju u stvarnom vremenu. Povratne informacije u stvarnom vremenu otvorile bi nove mogućnosti za optimizaciju modela i posljedično pružile izgradnju kvalitetnijih građevina.

## 9. Zaključak

U ovom radu utvrđena je i formalizirana predobrada za proračun konstrukcija tijekom projektiranja građevine, na temelju čega su predložene metode automatizacije. Automatizirane metode stvaraju modele građevina spremne za proračun dodjeljivanjem informacija o konstrukciji.

Interpretacijski postupak, koji prethodi predobradi, temelji se na prethodno razvijenom okviru za razmjenu podataka koji karakteriziraju višestruke klasifikacije specifičnih domena i otvorene interpretacije [9]. Budući da modeli zgrada koji potječu od arhitektonskih BIM modela ne daju dovoljno informacija za proračun konstrukcija, automatiziraju se procesi dodjele novih informacija o konstrukciji. Doprinos ovog istraživanja jest prijedlog za automatizaciju metoda predobrade, što može poslužiti kao osnova za budući razvoj i standardizaciju metoda. Uz to, ovaj rad pridonosi detaljnoj analizi tijeka rada uključujući tijekom informacija, dokumentirane metode predobrade, realizaciju softverskog priključka i povratne informacije stručnjaka iz prakse. Nadalje, prikazana je usporedba 2,5D i 3D proračuna kako bi se odgovorilo na sumnje statičara. Automatizacija tijekom rada predviđa se razvojem BIM alata i prepoznata je kao nedostatak znanja u dostupnoj literaturi.

Priprema modela građevine za proračun konstrukcija zaokružuje okvir za razmjenu podataka u jednom smjeru, od arhitektonskog projektiranja do proračuna konstrukcije, i može pružiti prve rezultate proračuna uvođenjem nekih pretpostavki uz manje napora. Pristup primijenjen u ovom istraživanju ne automatizira daljnje optimizacije konstrukcije poput postavljanja armature ili izmjene materijala (naknadna obrada modela), to su teme za buduća istraživanja. Međutim, kako je potvrđeno na panel diskusiji, automatizacija koraka predobrade za provedbu proračuna konstrukcija u ovom trenutku je ključna za ostvarivanje prednosti BIM-a i ubrzanje digitalizacije u domeni projektiranja i proračuna konstrukcija.

Predložene metode predobrade u ovoj su fazi temeljene na pregledu literature i praksama razmjene podataka unutar građevne tvrtke i odnose se na definiranje razina etaža, temelja, opterećenja i spojeva. Metode ovise i o arhitektonskom modelu građevine. Vanjski modeli, iz drugog softvera, ili druge tvrtke zahtijevali bi iscrpne postupke predobrade. Potrebna je arhitektura sustava koja bi adekvatno podržavala takav heterogeni skup usluga. Predloženi pristup treba provjeriti sa dodatnim softverskim alatima; neki alati možda ne pružaju sučelja za postizanje sličnih rezultata. Nakon razmatranja ostalih softvera, pozicioniranje metoda unutar okvira je od presudne važnosti. Ograničenja RFEM API-ja prepoznata su u smjeru modifikacije geometrije. Stoga je za neke korake prethodne obrade modela potreban Open Cascade kernel i centralno uređena geometrija što pruža veću fleksibilnost.

Buduće istraživanje uključuje pružanje sličnih usluga s dodatnim alatima za proračun konstrukcije, modelima građevina i praksama. Slični softverski priključci potrebni su i za druge softvere za analizu konstrukcija, a prijedlog predstavljen u ovome radu može poslužiti kao osnova. Autori ovog rada namjeravaju istražiti mogućnost pružanja takvih usluga s mikro servisnom arhitekturom, kako bi se mogli zadovoljiti heterogeni tijekom rada.

## Zahvala

Autori zahvaljuju tvrtki Strabag SE iz Beča, i njihovoj podružnici Züblin iz Stuttgarta, što su podržali ovo istraživanje kroz projekt DATAFILTER. Također žele zahvaliti arhitektonskom

birou ATP arhitekten ingenieure iz Beča, na sudjelovanju u panel-raspravi. Posebno zahvaljuju Konstantinosu Kessoudisu, Richardu Schaffraneku, Maximilianu Knollu i dr. Georgu Hochreineru na podršci u provođenju ovog istraživanja.

## LITERATURA

- [1] Vilutiene, T., Kalibatiene, D., Hosseini, M.R., Pellicer, E., Zavadskas, E.K.: Building Information Modeling (BIM) for Structural Engineering: A Bibliometric Analysis of the Literature, *Advances in Civil Engineering*, (2019), <https://doi.org/10.1155/2019/5290690>.
- [2] Sibenik, G., Kovacic, I.: Assessment of model-based data exchange between architectural design and structural analysis, *Journal of Building Engineering*, 32 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101589>.
- [3] ISO: ISO 19650-1:2018 Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) - Information management using building information modelling - Part 1: Concepts and principles. Geneva, Switzerland: ISO, 2018.
- [4] Arayici, Y., Coates, P., Koskela, L., Kagioglou, M., Usher, C., O'Reilly, K.: Technology adoption in the BIM implementation for lean architectural practice, *Automation in Construction*, 20 (2011) 2, pp. 189-195, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.09.016>.
- [5] ISO: ISO 19650-2:2018 Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 2: Delivery phase of the assets. Geneva, Switzerland: ISO, 2018.
- [6] ISO: ISO 29481-1:2016 Building information models - Information delivery manual - Part 1: Methodology and format. Geneva, Switzerland: ISO, 2016.
- [7] LM.VM.: Leistungsmodelle Objektplanung – Architektur [LM.OA.BIM], eds. Lechner, H., Heck, D., Graz, Austria: Verlag der Technischen Universität Graz, 2014. [https://www.arching.at/fileadmin/user\\_upload/redakteure/LM\\_VM\\_2014/LM\\_Objektplanung\\_Arch\\_BIM\\_.pdf](https://www.arching.at/fileadmin/user_upload/redakteure/LM_VM_2014/LM_Objektplanung_Arch_BIM_.pdf)
- [8] Miettinen, R., Paavola, S.: Beyond the BIM utopia: Approaches to the development and implementation of building information modelling, *Automation in Construction*, 43 (2014), pp. 84-91, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.03.009>.
- [9] Sibenik, G., Kovacic, I.: Interpreted open data exchange between architectural design and structural analysis models, *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 26 (2021), Special issue CIB World Building Congress 2019: Information technology of smart city development., pp. 39-57, <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.004>.
- [10] McKinsey & Company: The next normal in construction, <https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/the-next-normal-in-construction-how-disruption-is-reshaping-the-worlds-largest-ecosystem>, 2020.
- [11] Sacks, R., Ghang, L., Eastman, C., Teicholz, P.: BIM Handbook: a Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors. Wiley-Blackwell, 2018.
- [12] Hasan, A.M.M., Torky, A.A., Rashed, Y.F.: Geometrically accurate structural analysis models in BIM-centered software, *Automation in Construction*, 104 (2019), pp. 299-321, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.04.022>.
- [13] Alsahly, A., Hegemann, F., König, M., Meschke, G.: Integrated BIM to FEM approach in mechanised tunneling, *Geomechanics and Tunneling*, 13 (2020), pp. 212-220, <https://doi.org/10.1002/geot.202000002>.
- [14] Bhusar, A.A., Akhare, A.R.: Application of BIM in Structural Engineering, *SSRG International Journal of Civil Engineering (SSRG-IJCE)*, 1 (2014) 5, pp. 11-17.
- [15] Strafacci, A.: What does BIM mean for structural engineers?, *CE News*, 20 (2008) 9, pp. 62-65, [https://images.autodesk.com/adsk/files/what\\_does\\_bim\\_mean\\_for\\_civil\\_engineers\\_ce\\_news\\_1008.pdf](https://images.autodesk.com/adsk/files/what_does_bim_mean_for_civil_engineers_ce_news_1008.pdf).
- [16] Sampaio, A.Z., Azevedo, V.: BIM in structural analyses of buildings, *Proceedings of the 6th International Conference on Mechanics and Materials in Design*, eds. Silva Gomes, J.F., Meguid, S.A., pp. 349-358, Ponta Delgada, Portugal, 2015.
- [17] Mackey D.: BIM and Structural Engineering. *Structure*, 2017 (2017) January, pp. 46-49, <https://www.structuremag.org/wp-content/uploads/2016/12/D-Business-Issues-Mackey-Jan17-1.pdf>.
- [18] Hamidavi, T., Abrishami, S., Hosseini, M.R.: Towards intelligent structural design of buildings: A BIM-based solution, *Journal of Building Engineering*, 32 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101685>.
- [19] Ciotta, V., Asprone, D., Manfredi, G., Cosenza, E.: Building Information Modelling in Structural Engineering: A Qualitative Literature Review, *CivilEng*, 2 (2021), pp. 765-793. <https://doi.org/10.3390/civileng2030042>
- [20] Boechat, L.C., Correa, F.R.: Augmented BIM Workflow for Structural Design Through Data Visualization, *Proceedings of the 18th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (ICCCBE) 2020*, eds. Toledo Santos, E., Scheer, S., Cham, Switzerland, Springer, 2021, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-51295-8\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-030-51295-8_15).
- [21] Eleftheriadis, S., Mumovic, D., Greening, P., Chronis, A.: BIM Enabled Optimisation Framework for Environmentally Responsible and Structurally Efficient Design Systems, *Proceedings of the 32<sup>nd</sup> ISARC*, pp. aa1-9, Oulu, Finland, 2015, <https://doi.org/10.22260/ISARC2015/0096>.
- [22] Patlakas, P., Livingstone, A., Hairstans, R., Neighbour, G.: Automatic code compliance with multi-dimensional data fitting in a BIM context, *Advanced Engineering Informatics*, 38 (2018), pp. 216-231, <https://doi.org/10.1016/j.aei.2018.07.002>.

- [23] Kim, S., Ryu, H., Kim, J.: Automated and qualitative structural evaluation of floor plans for remodeling of apartment housing, *Journal of Computational Design and Engineering*, 8 (2021) 1, pp. 376–391, <https://doi.org/10.1093/jcde/qwaa085>.
- [24] Wu, J., Zhang, J.: New Automated BIM Object Classification Method to Support BIM Interoperability, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 33 (2019) 5, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000858](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000858).
- [25] Lee, Y.-C., Eastman, C.M., Solihin, W.: Rules and validation processes for interoperable BIM data exchange, *Journal of Computational Design and Engineering*, 8 (2021) 1, pp. 97–114, <https://doi.org/10.1093/jcde/qwaa064>.
- [26] Abualdenien, J., Schneider-Marin, P., Zahedi, A., Harter, H., Exner, H., Steiner, D., Singh, M.M., Borrmann, A., Lang, W., Petzold, F., König, M., Geyer, P., Schnellenbach-Held, M.: Consistent management and evaluation of building models in the early design stages. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 25 (2020), pp. 212–232, <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2020.013>.
- [27] Steiner, D.: Formulierung und Generierung von Expertenwissen zur Entwicklung intelligenter Ersatzmodelle für die Tragwerksplanung in frühen Entwurfsphasen (in German), Tagungsband 30. Forum Bauinformatik, eds. Steiner, M., Theiler, M., & Mirboland, M., Weimar, Germany, Bauhaus-Universität Weimar, 2018.
- [28] Keough, I., Benjamin, D.: Multi-objective optimization in architectural design, SpringSim '10: Proceedings of the 2010 Spring Simulation Multiconference, San Diego, California, USA, Society for Computer Simulation International, 2010, <https://doi.org/10.1145/1878537.1878736>.
- [29] Hamidavi, T., Abrishami, S., Ponterosso, P., Begg, D., Nanos, N.: OSD: A framework for the early stage parametric optimisation of the structural design in BIM-based platform, *Construction Innovation*, 20 (2020) 2, pp. 149–169, <https://doi.org/10.1108/CI-11-2019-0126>.
- [30] Delavar, M., Bitsuamlak, G.T., Dickinson, J. K., Costa, L.M.F.: Automated BIM-based process for wind engineering design collaboration, *Building Simulation*, 13 (2020), pp. 457–474, <https://doi.org/10.1007/s12273-019-0589-2>.
- [31] Sibenik, G., Kovacic, I., Petrinas, V., Sprenger, W.: Implementation of Open Data Exchange between Architectural Design and Structural Analysis Models, *Buildings*, 11 (2021) 12, pp. 605, <https://doi.org/10.3390/buildings11120605>.
- [32] Birkemo, A.S., Hjortland, S.C., Samindi, S.M., Samarakoon, M.K.: Improvements for the workflow interoperability between BIM and FEM tools, *Building Information Modelling (BIM) in Design, Construction and Operations III*, eds. De Wilde, P., Mahdjoubi, L., & Garrigos, A., pp. 317 – 327. Southampton, UK: WITpress, 2019.
- [33] Ramaji, I.J., Memari, A.M.: Interpreted information exchange: implementation point of view. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 25 (2020), pp. 123–139, <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2020.008>.
- [34] Haefner, L.: Nowadays Structural Engineering with the Use of BIM Technology—From 3D Modeling, Structural Analysis, and Design to Structural System Evolution: Practitioner Report, *Structures Congress 2017: Business, Professional Practice, Education, Research, and Disaster Management*, ed. Soules J.G., pp. 24 – 34, Reston, Virginia, USA, ASCE, 2017, <https://doi.org/10.1061/9780784480427.003>
- [35] Aldegeily, M., Zhang, J.: From architectural design to structural analysis: a data-driven approach to study Building Information Modeling (BIM) interoperability, *Proc., 54<sup>th</sup> ASC Annual International Conference*, ed. Sulbaran, T., pp. 537–545, Fort Collins, Colorado, ASC Associated Schools of Construction, 2018, <http://ascpro0.ascweb.org/archives/cd/2018/paper/CPRT152002018.pdf>.
- [36] Chi, H.L., Wang, X., Jiao, Y.: BIM-Enabled Structural Design: Impacts and Future Developments in Structural Modelling, Analysis and Optimisation Processes, *Archives of Computational Methods in Engineering*, 22 (2015), pp. 135–151, <https://doi.org/10.1007/s11831-014-9127-7>.
- [37] Deng, X.Y., Chang, T.Y.P.: Creating structural model from IFC-based architectural model, *Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering*, pp. 3687–3695, Montreal, Canada, 2006, <https://itc.scix.net/pdfs/w78-2006-tf577.pdf>.
- [38] Qin, L., Deng, X.Y., Liu, X.L.: Industry foundation classes based integration of architectural design and structural analysis, *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 16 (2011) 1, pp. 83–90, <https://doi.org/10.1007/s12204-011-1099-2>.
- [39] Papadopoulos, N.A., Sotelino, E.D., Martha, L.F., Nascimento, D.L.M., Faria, P.S.: Evaluation of integration between a BIM platform and a tool for structural analysis, *Systems & Management*, 12 (2017), pp 108–116, <https://doi.org/10.20985/1980-5160.2017.v12n1.1203>.
- [40] Ren, R., Zhang, J.: A new framework to address BIM interoperability in the AEC domain from technical and process dimensions, *Advances in Civil Engineering*, (2021), <https://doi.org/10.1155/2021/8824613>.
- [41] Wu, J., Sadraddin, H.L., Ren, R., Zhang, J., Shao, X.: Invariant signatures of architecture, engineering, and construction objects to support BIM interoperability between architectural design and structural analysis, *Journal of Construction Engineering and Management*, 147 (2021) 1, <https://asc.library.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29CO.1943-7862.0001943>.
- [42] ÖNORM: ÖNORM EN 1990:2013 03 15 Eurocode - Basis of structural design (consolidated version), Vienna, Austria, Austrian Standards, 2013.
- [43] Udoeyo, F.: *Structural Analysis*, Philadelphia, Pennsylvania, U.S., Temple University Press, 2019.
- [44] ÖNORM: ÖNORM EN 1991-1-1:2011 09 01 Actions on structures - Part 1-1: General actions - Densities, self-weight and imposed loads for buildings (consolidated version), Vienna, Austria, Austrian Standards, 2011.
- [45] ÖNORM: ÖNORM B 1991-1-1:2020 12 01: Eurocode 1 - Actions on structures - Part 1-1: General actions - Densities, self-weight and imposed loads for buildings - National specifications concerning ÖNORM EN 1991-1-1 and national supplements, Vienna, Austria, Austrian Standards, 2020.
- [46] ÖNORM: ÖNORM B 1991-1-3:2018 12 01 Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-3: General actions - Snow loads, Vienna, Austria, Austrian Standards.