

# Pregled stanja područja zgrada u blokovima i metoda konstrukcijskog ojačanja s osvrtom na karakteristike grada Zagreba

---

Oreb, Jakov; Atalić, Josip

Source / Izvornik: **8. simpozij doktorskog studija građevinarstva, 2022, 149 - 163**

Conference paper / Rad u zborniku

Publication status / Verzija rada: **Published version / Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

<https://doi.org/10.5592/CO/PhDSym.2022>

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:237:804597>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-17**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,  
University of Zagreb](#)



# Pregled stanja područja zgrada u blokovima i metoda konstrukcijskog ojačanja s osvrtom na karakteristike grada Zagreba

Jakov Oreb<sup>1</sup>, izv. prof. dr. sc. Josip Atalić<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, jakov.oreb@grad.unizg.hr

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, josip.atalic@grad.unizg.hr

## Sažetak

Zgrade u blokovima i nizovima dio su tipične arhitekture povijesnog centra grada Zagreba, kao i mnogih središta gradova diljem Europe. Potres u Zagrebu (ožujak 2020.), kao i nedavni potresi u Italiji, ukazali su na međudjelovanje stambenih jedinica i njihovo kompleksno ponašanje pri potresnom djelovanju. Literatura, norme i propisi u ovom dijelu još uvijek ne daju jasne upute. Prikazan je pregled eksperimentalnih i numeričkih metoda iz dostupne literature koji analiziraju međusobni utjecaj zgrada u blokovima s osvrtom na karakteristike grada Zagreba. Naglasak je na numeričkom modeliranju i prijedlogu metoda sanacije i protupotresnog ojačanja blokova kao cjeline, kao i analiza trenutne inženjerske prakse.

*Glavne riječi: potresno inženjerstvo, numeričko modeliranje, zgrade u blokovima, zidane konstrukcije, metode sanacije i protupotresnog ojačanja, tipska ojačanja*

## State of the art of the masonry building aggregates and retrofit strategies with emphasis on the City of Zagreb

### Abstract

Buildings aggregates are part of the typical architecture of the historical City center of Zagreb, along with many other city centers throughout Europe. The earthquake in the City of Zagreb (March 2020), and recent earthquakes in Italy, suggested the interaction of structural units within aggregate, and their complex behavior during earthquakes, including seismic pounding. Literature, current norms, and regulations for this problem still do not provide clear instructions. An overview of experimental and numerical methods from the available literature that analyze the mutual influence of buildings in aggregates regarding the characteristics of the City of Zagreb is presented. The emphasis is on unreinforced masonry structures numerical modeling and retrofitting strategies and interventions for the whole aggregate, and analysis of current engineering practice in Croatia.

*Key words: earthquake engineering, numerical modelling, building aggregates, masonry structures, retrofitting strategies, typical retrofitting interventions*

## 1 Uvod

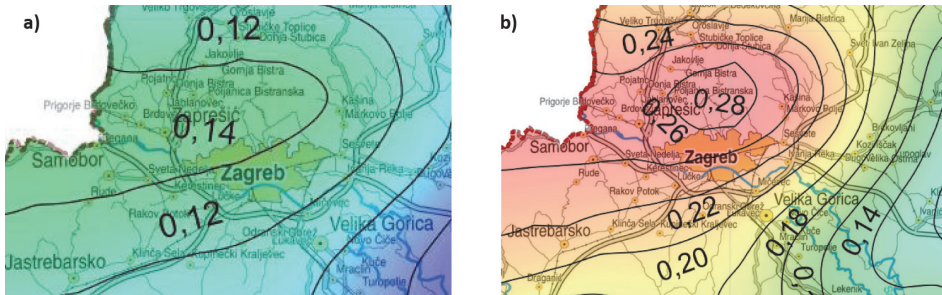
U ožujku 2020. godine Zagreb je pogodio potres magnitude 5,5. Nakon Zagrebačkog uslijedio je potres u Petrinji u prosincu iste godine, magnitude 6,2. Posljedice oba potresa vidljive su i dan danas, dvije godine nakon. Zadatak građevinske struke je ponuditi ispravne modele obnove kako bi se posljedice budućih potresa smanjile na minimum. Jedno od prepoznatih područja za koja je potrebno ponuditi rješenje inženjerskoj praksi su zgrade u blokovima u tradicijskoj jezgri grada Zagreba.

Pod pojmom potres se najčešće smatra iznenadno oslobađanje nakupljene (elastične) potencijalne energije u Zemljinoj unutrašnjosti (kori) u obliku potresnih valova i topline. Prirodna je katastrofa koju je gotovo nemoguće predvidjeti i spriječiti, ali se sigurno može očekivati s određenom vjerojatnošću na cijelom teritoriju Zemlje [1]. Međutim, pogrešno je pretpostaviti da opasnost od djelovanja potresa predstavlja jedino intenzitet potresnog opterećenja na lokaciji. "Ubija građevina, ne ubija potres" iskustvena je tvrdnja koja je postala uvriježena među građanima i inženjerima i ima svoje uporište u povijesnim događajima tijekom potresa. Kao potvrda ove tvrdnje javlja se pojam potresni rizik koji je opsežniji i daje potpuniju informaciju po pitanju sigurnosti u slučaju potresa. Potresni rizik određuje (i) potresna opasnost (hazard) koja proizlazi iz potresne aktivnosti područja, (ii) potresna izloženost (na primjer naseljenost), (iii) potresna oštetljivost uvjetovana karakteristikama koncepcije, konstrukcije, materijala, kvalitete građenja i vremena gradnje, a direktni utjecaj ima nekontrolirana rekonstrukcija [2]. Potresni rizik grada Zagreba je vrlo velik zbog umjerenog do visokog potresnog hazarda, velike izloženosti (guste naseljenosti – 19,8 % stanovništva RH [3] i preko 65.000 studenata koje broji Sveučilište u Zagrebu [4], kulturnog nasljeđa i važnosti grada – gospodarski, kulturni, znanstveni i upravni centar RH) i velike oštetljivosti (zbog nepovoljnog koncepta nosive konstrukcije, starosti, lošeg održavanja, nezakonitih izvedbi i rekonstrukcija). Gradska četvrt Donji grad, iako zauzima svega 0,5 % površine grada, značajno doprinosi riziku, prvenstveno zbog fonda zgrada sa nepovoljnim svojstvima (tradicijska gradnja) i velike gustoće naseljenosti.

Na području RH potresni hazard je definiran važećom kartom potresnih područja [5], prema kojoj se u Zagrebu mogu očekivati vršna ubrzanja tla na osnovnoj stijeni u rasponu od 0,20 do 0,28 g (slika 1), za povratno razdoblje od 475 godina.

Potresna izloženost postojećeg fonda građevina u centru grada, je zbog niza uzroka poput lošeg održavanja, mnogobrojnih nelegalnih i nedokumentiranih rekonstrukcija, manjka dokumentacije i izgradnje bez korištenja normi za potresno projektiranje i izvođenje izrazito naglašena. To ne znači da te zgrade nemaju nikakvu otpornost na djelovanje potresa, već da je potrebno posvetiti više vremena analizi postojećeg stanja, izradi adekvatne dokumentacije i rekonstrukcije, što je jedan od ciljeva ovog rada. Ovaj rad se stoga detaljno posvetio baš tim zgradama unutar gradskog centra

s naglaskom na zgrade u blokovima i nizovima. Položaj zgrade u bloku, uz ranije navedene parametre ima velik utjecaj na potresnu oštećljivost, na način da najveću oštećljivost prema preliminarnim analizama baze podataka pokazuju jedinice koje se nalaze na kraju niza, dok položaj jedinice između dvije ili, idealnom slučaju između 3 jedinice ima pozitivan utjecaj. [6] Istu tvrdnju potvrđuje i rad koji proučava potresnu oštećljivost zgrada u Osijeku [7], i uz to dodatno kvantitativno obrađuje i utjecaj visine susjednih zgrada te ukazuje na to da viša zgrada povoljno utječe na nižu, a niža susjedna zgrada nepovoljno na višu zgradu.



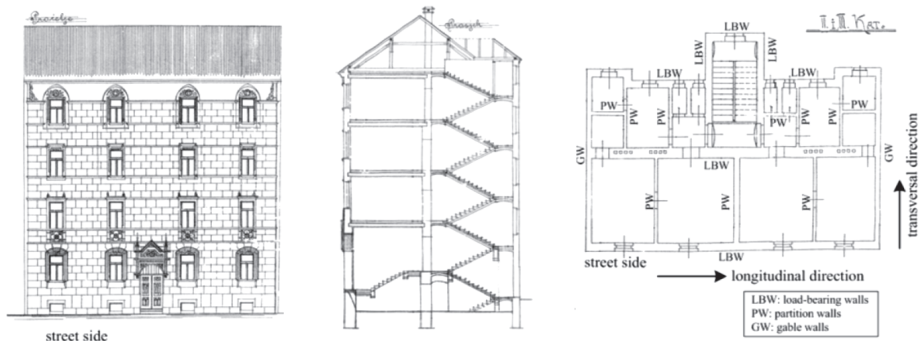
**Slika 1. Horizontalna vršna ubrzanja tla za Zagreb i okolicu a) povratno razdoblje 95 godina, b) povratno razdoblje 475 godina [5]**

Gradska jezgra Zagreba, kao i mnoga povijesna gradska središta diljem Europe, stoljećima se razvijala i zgušnjavala, iako je veliki dio obnovljen nakon razaranja zagrebačkog potresa 1880. godine. Ova rekonstrukcija rezultirala je karakterističnim velikim blokovima tradicijskih zidanih zgrada (slika 2) koje oblikuju gradsko središte Zagreba [8]. Svaka ulična strana bloka sastoji se od pet ili više zgrada različitih dimenzija, obično ukupne tlocrtna dimenzije oko 100 x 50 m (dimenzija s ulične strane). Ukupna bruto izgrađena površina u povijesnoj jezgri grada iznosi oko 5,2 km<sup>2</sup>, od čega je tlocrtna površina zgrada oko 1,2 km<sup>2</sup>. Blokovi ponekad sadrže i neplanski izgrađene anekse [9]. Povremeno postoji razmak između dva niza zgrada koje mogu služiti raznim namjenama, poput prolaza vatrogasnog vozila i/ili automobila.



**Slika 2. Tlocrtni pogled na tri zagrebačka bloka [9]**

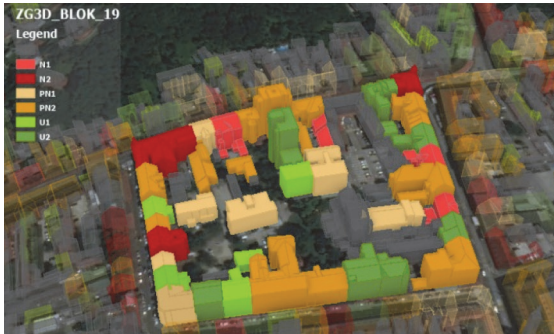
Nosiva konstrukcija zgrada u blokovima razlikuje se ovisno o položaju unutar bloka (kutna ili srednja zgrada ili na kraju niza). Ukoliko pričamo o tipičnoj zgradi unutar niza (slika 3), ona se obično sastoji od tri nosiva uzdužna zida paralelna s ulicom (debljine 30 – 60 cm, zidani od pune opeke) i nekoliko pregradnih zidova okomitih na njih debljine 15 cm. Međukatna konstrukcija iznad podruma obično je izvedena kao zidani bačvasti svod (ponekad i kao armiranobetonska ploča), a ostali katovi su izvedeni od drvenih greda oslonjenih na uzdužne zidove povezane sa dva sloja drvenih dasaka. Ovi sustavi drvenih podova su vrlo teški, jer je slobodni prostor između greda ispunjen "šutom". Mnoge zidane zgrade zagrebačkih blokova nisu bili primjereno održavane, uporabni vijek im je istekao, a ta činjenica, zajedno s mnogostrukim modifikacijama na konstrukciji zgrade u periodu od izgradnje do danas, negativno su utjecale na potresnu otpornost konstrukcije. Na primjer, vanjski zidovi prizemlja često su bili djelomično ili čak potpuno uklonjeni zbog postavljanja izloga. Slično, unutarnji konstrukcijski (nosivi) i pregradni zidovi u gornjim etažama ponekad su uklanjani kako bi se dobio prostor, ostavljajući vanjski zidovi bez potpore izvan ravnine [9].



**Slika 3. Pogled na fasadu, poprečni presjek i karakteristični tlocrt primjera zgrade u bloku [9]**

Ukoliko se napravi osvrt na rezultate pregleda oštećenja i procjene uporabljivosti povijesnih zidanih zgradama u blokovima u odnosu na prosječno pregledane zgrade pokazale su se ranjivijima, pri čemu je je 59 % pregleda označeno zelenom (uporabljive), 34 % žutom (privremeno neuporabljive), a 7 % crvenom (neuporabljiva) oznakom (slika 4). Zanimljivo je istaknuti i da su zgrade u uglovima blokova, koje se po istraživanjima smatraju ranjivijima, imale slične omjere i stoga nisu bile ranjivije od zgrada u nizu u Zagrebu (zeleno: 58 %, žuta: 34 %, crvena: 8 %). Loš učinak ovih povijesnih zidanih zgrada može se pripisati prvenstveno nedostatku nosivih zidova u poprečnom smjeru i fleksibilnim drvenim međukatnim konstrukcijama koje nisu mogle osigurati prijenos horizontalnog opterećenja poput dijafragme. Dodatni razlozi lošeg odgovora mogu biti pronađeni u lošijoj kvaliteti materijala (posebno morta degradiranog atmosferilijama), "slabijim" parapetima između nosivih zidova

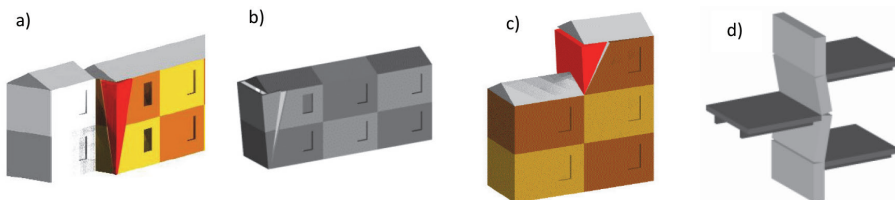
(manje debljine od nosivog zida), kao i slabe veze fleksibilne međukatne konstrukcije i pregradnih zidova sa nosivim zidovima[10].



Slika 4. Uporabljivost zgrade na jednom primjeru građevinskog bloka. Zelena je upotrebljiva, žuta je privremeno neupotrebljiva, a crvena je neupotrebljiva [11]

## 2 Analiza tehničke regulative, pripadnih normi i inženjerske prakse

Ponašanje zgrada u blokovima pri djelovanju potresa, različito je od ponašanja samostojećih zgrada, zbog utjecaja međudjelovanja sa susjednim zgradama što uzrokuje modificiranje rubnih uvjeta, opterećenje i mehanizme kolapsa (slika 5.) konstrukcijskih jedinica (skraćeno K.J.) [12]. Međutim, ova činjenica još uvijek nema utjecaj na trenutno stanje prakse u RH, gdje su zahvati potresnog ojačanja ili izgradnje novih građevina projektirani i izvođeni kao da se radi o samostojećim zgradama, najčešće bez analize utjecaja na susjedne zgrade i međusobnog međudjelovanja.



Slika 5. Prikaz mehanizama kolapsa zgrada unutar blokova/nizova: a) Tlocrtno izmaknuta fasada dovodi do slučaja zabatnog zida koji nije pridržan susjednom zgradom; b) K.J. na početku ili na kraju niza nije pridržan sa susjednom zgradom; c) Susjedne K.J. različite visine. Sudaranje može uzorkovati otkazivanje više zgrade; d) Međukatne konstrukcije na različitoj visini kod susjednih K.J. Potresno opterećenje može uzrokovati sudaranje na razini međukatne konstrukcije i otkazivanje zidova izvan ravnine [12]

Trenutna praksa i zakonska regulativa je u kontrastu sa znanstvenim istraživanjima na ovu temu i inženjerskoj praksi u drugim zemljama Europe i Svijeta (npr. Italija), koje smatraju takav pristup pogrešnim [13] i pravno obvezuju projektiranje i izvedbu

zgrada u bloku i/ili nizu kao cjeline. Dodatno, regulativni i normativni okvir za ojačanje postojećih zgrada i izgradnju novih zgrada je pretežito formiran za samostojeće zgrade, dok je nedostatak po pitanju detaljnih uputa za projektiranje zgrada u blokovima manjkav.

## 2.1 Eurokod 8 i Hrvatski propisi za projektiranje zgrada u nizovima/blokovima

Budući da je trenutno u razvoju nova generacija Eurokoda, prikazani su podaci iz zadnje dostupne *draft* verzije Eurokoda 8 (EC8), kako bi se uvidjeli i prezentirali dijelovi koji se odnose na zgrade u blokovima. Pregledom postojećeg, ali i novog EC8, zaključeno je da propisuje potrebu za uključivanjem međudjelovanja susjednih građevina, ali ne daje konkretne smjernice kako ih definirati. EC8 – Dio 1-1 [14] definiran je pojam “dinamički neovisne jedinice” (paragraf 3.1.11.) kao konstrukciju ili njezin dio izravno izložen gibanju temeljnog tla na čiji odziv ne utječe odziv susjednih jedinica ili konstrukcija. Da bi se konstrukcija smatrala dinamički neovisnom, po EC8 – Dio 1-2 [15], dodatno su definirane minimalne dimenzije potresne razdjelnice (točka 6.2.10.) između dviju konstrukcija kao funkcija horizontalnog pomaka zgrade i katne visine zgrade ili neovisne jedinice; ukoliko ovaj zahtjev nije ispunjen, tada jedinice se smatraju da nisu dinamički neovisne [8]. EC8 – Dio 3 [16] ističe se činjenica da je norma namijenjena ocjeni i proračunu postojećih samostojećih konstrukcija, točnije u situacijama kako je konstrukcija dinamički neovisna o susjednim, ili gdje se međudjelovanje može zanemariti. Prilikom numeričkog modeliranja, postoji također obaveza uzimanja u obzir, numeričkim metodama, potencijalni utjecaj susjednih konstrukcija preko ekvivalentnih rubnih uvjeta i/ili dodatne mase, ali nije detaljno opisano na koji način takva međudjelovanja trebaju biti modelirana (točka 6.2.1. i 7.), te nisu navedene dodatne informacije (točka 0.3, 11.2.1 (g), 11.3.3). Nizom mjerodavnih normi EC 8, po pitanju problematike blokova, zaključuje se da međudjelovanja trebaju biti uzeta u obzir, ali detaljne smjernice na koji način, trebaju biti obuhvaćene, nisu navedene. Dodatno, prema dosadašnjim saznanjima, konstrukcijske jedinice tradicijskih blokova/nizova u Zagrebu su razdvojene razdjelnicama koje nisu adekvatne (zgrade su priljubljene jedna uz drugu) prema EC 8 – Dio 1-2 [15], što znači da se one ne bi smjele smatrati niti analizirati kao dinamički neovisne jedinice. Tehničkim propisom o izmjenama i dopunama tehničkog propisa za građevinske konstrukcije [17], definirane su razine obnove, ali također bez posebnog naglaska na zgrade u blokovima. Tijekom rekonstrukcije, zgrada se ojačava u postojećim gabaritima, što znači da potresna razdjelnica ostaje dimenzije kao i u postojećem stanju, kao i rubni uvjeti unutar agregata. Posljedično, rješenje za pojačanje konstrukcije ili njenu cjelovitu obnovu može promijeniti masu i krutost svake zgrade zasebno bez ukupne analize potencijalnih štetnih učinaka na susjedne zgrade unutar bloka ili niza. Štoviše, uobičajeno je da susjedne zgrade imaju različite projektante koji

ne usklađuju projektna rješenja po pitanju dinamičkih parametara. Razlozi takvoj praksi mogu biti i imovinsko/pravni problemi, budući da vlasnici zgrada u Hrvatskoj nisu obvezni ojačati zgrade u blokovima i nizovima kao cjeline, već je svaki vlasnik odgovoran samo za svoju jedinicu unutar bloka/niza.

## 2.2 Izgradnja novih građevina unutar blokova

U centru grada Zagreba, gotovo svaki blok ima minimalno jednu modernu zgradu koja je izgrađena na mjestu gdje prije zgrade nije bilo, ili na mjestu postojeće zgrade koja je uklonjena. Moderne zgrade pretežito su izvedene kao armiranobetonske ili zidane omeđenim žiđem, a ponekad možemo vidjeti i primjere kada potresna razdjelnica ne postoji. Ukoliko razmak između građevina ipak postoji, on je najčešće ispunjen toplinskom izolacijom (npr. ekstrudiranim polistirenom, XPS) debljine oko 10 cm, da bi se izbjeglo nakupljanje prljavštine i/ili životinja unutar razdjelnice (slika 6.). Polistiren ima značajnu tlačnu čvrstoću i kao takav ne smanjuje sudaranje, već prenosi potresne sile između susjednih zgrada. [18] Iz svega navedenog može se pretpostaviti da izgradnja nove zgrade koja mijenja novu unutar bloka ili niza, može nepovoljno utjecati na susjedne građevine.



Slika 6. Primjer izgradnje moderne zidane i armiranobetonske zgrade unutar Zagrebačkog bloka (fotografirano 4. ožujka 2022.) – a) razdjelnica ispunjena toplinskom izolacijom; b) bez razdjelnice

## 2.3 Strana praksa – primjer talijanskih normi i propisa za projektiranje zgrada u blokovima

Italija je u posljednje vrijeme, pogođena brojnim potresima (Molise, 2002.; L'Aquila, 2009.; Središnja Italija, 2016.), razvila mnogo smjernica i propisa za rješavanje problema rekonstrukcije zgrada u blokovima i prepoznata je kao vodeća zemlja u svijetu po dostupnosti propisa u tom području. Nakon potresa u L'Aquili, zgrade unutar povijesnih središta, uglavnom građene u blokovima, ojačane su kasnije u odnosu na zgrade izvan blokova [19]. Pilot-projekt je definiran na način da su zgrade podijeljive u blokove, te je analizirano konstrukcijsko ponašanje "imaginarnog" bloka. Za-



datak i odgovornost projekatana je bila da utvrde koje su manje jedinice (blokovi/nizovi) zajedno reagirale na isto potresno djelovanje. Iz ovog pilot projekta razvili su i smjernice za analizu, projektiranje i obnovu zidanih zgrada u blokovima/nizovima. Prema Talijanskom pravilniku br. 19/2017 [20] za obnovu nakon potresa 2016., lokalna samouprava može identificirati blokove/nizove na temelju potresnih međudjelovanja zgrada. Kada lokalna samouprava identificira blokove, budući radovi projektiranja i izvođenja moraju se provesti za blok kao cjelinu. Ako općina ne identificira agregate, još uvijek se može uspostaviti konzorcij za projektiranje i izvođenje radova na blokovima. Za vrlo velike blokove ili nizove, moguće je smanjiti broj zgrada u globalnom modelu, ali ne na manje od tri zgrade. Konačno, jedinice lokalne samouprave imaju moć zamjene kada vlasnici ne poduzmu ništa. Razlika u odnosu na blokove u Zagrebu, koji su predmet ovog projekta, je arhitektura i veličina bloka, te odvojenost jedinica budući da se u Italiji, na primjerima zgrada oštećenih u navedenim potresima, blok ili niz sastoji od manjeg broja zgrada koje na kontaktima u većini slučajeva imaju zajedničke zidove.

### **3 Pregled dosadašnjeg znanstvenog doprinosa po pitanju zgrada u blokovima**

#### **3.1 Pregled eksperimentalnog znanstvenog istraživanja i rezultata**

Dosadašnje znanstveno eksperimentalno istraživanje po pitanju blokova u velikom mjerilu, ograničeno je na svega nekoliko ispitivanja u mjerilu 1:2. Uzroci tako malom broju testova se mogu potražiti u kompleksnosti i cijeni ispitivanja na potresnim stolovima, kao i kapacitetu potresnih stolova zbog težine uzoraka. Oba poznata testiranja provedena su na dvije susjedne zgrade različite visine sa zidom od kamenog materijala (*engl. stone masonry*). Prvim testom, u EUCENTRE laboratoriju, Pavia [21], obrađeno je ponašanje susjednih zgrada u njihovom izvornom, neojačanom stanju, te kasnije i u rekonstruiranom, ojačanom stanju. Budući da su jedinice bile međusobno povezane na kontaktu segmentima kamena i međukatnom konstrukcijom na razini podova, izostalo je potpuno odvajanje i sudaranje pri testiranju, koje bi se, prema tipologiji (poglavlje 1.) za Zagreb očekivalo. Drugo ispitivanje, u laboratoriju LNEC, Portugal [22,23] obradilo je problem potpuno razdvojenih konstrukcijskih jedinica, povezanih jedino tankim slojem morta. Iskustvo iz ovog eksperimenta potvrdilo je utjecaj međudjelovanja na kontaktu između jedinica na ponašanje jedinica i naglasilo potrebu za ispravnim modeliranjem tog međudjelovanja. Iako istraživanja nisu provedena na tipologiji zgrada u Zagrebu (poglavlje 1.) i samim tim rezultati ne mogu poslužiti kao reprezentativni i za Zagrebačke blokove, eksperimentalno je potvrđeno da međudjelovanje postoji.

## 3.2 Pregled numeričkog znanstvenog istraživanja i rezultata

Više je istraživača modeliralo ponašanje blokova primjenjujući razne metode i pristupe, stoga se može reći da unificirana metodologija nije pronađena. Odabir ispravnog načina modeliranja predstavlja ključnu točku kod analize postojećeg stanja i rekonstrukcije, budući da pojednostavljeni pristup modeliranju veze između jedinica može potpuno krivo procijeniti mehanizam otkazivanja građevine [24]. U RH je međusobno sudaranje građevina analizirano za nekoliko građevina kritične infrastrukture. [18] Dobiveni parametri povećanja unutarnjih sila implementirani su u obrazac za preliminarnu procjenu potresne oštetljivosti povezanih zgrada. [25] Procjena oštetljivosti više zgrada također je provedena na većem broju zgrada u gradu Osijeku [7], a u procjenu su uključeni i parametri vezani za zgrade u blokovima. Konkretno, na zidanim zgradama donjogradskih blokova grada Zagreba dosad nisu provedena konkretna numerička ispitivanja, niti numerički analizirane mjere ojačanja. Generalne upute za ojačanja dana su "Programom cjelovite obnove povijesne jezgre grada Zagreba" [26] te su analizirane i korištene kao ulazni parametri za izradu metodologije u ovom radu. U svijetu, u odnosu na RH postoji veći broj znanstvenih radova na ovu temu, pogotovo u posljednjih 10 godina, što govori o njenoj aktualnosti. Za Zagreb je nužno razviti poseban pristup i metodologiju obzirom na specifičnu arhitekturu i rezultate otkazivanja koji su nastali nakon nedavnih potresa 2020. Budući da se arhitektura i principi gradnje razlikuju, neki od pregledanih radova su primijenili pojednostavljenja koja, za Zagreb neće vrijediti, stoga nisu detaljnije opisana u nastavku. Proučavanjem blokova i inženjerske prakse te strane prakse zaključeno je da se radi o odvojenim jedinicama koje imaju odvojeni susjedni zid (poglavlje 1.) i zbog toga može nastupiti sudaranje. Dinamički odziv stoga uzima u obzir posljedice sudaranja koje se promatraju za tri različita modela: (i) Model s modeliranom nelinearnom vezom između jedinica, (ii) model s nezavisnim jedinicama, (iii) model s potpuno povezanim jedinicama. [23] Temeljem rezultata na detaljnom numeričkom modelu potrebno je uvesti pojednostavljena za svakodnevnu praksu, kao jedan od zaključaka. Naime, zbog vremenskog i financijskog okvira, ali i nedostupnosti podataka, kod praktične primjene često nije moguće modelirati više samostalnih zgrada u nizu. U takvim slučajevima često pribjegava modeliranju izoliranih jedinica, ali pristup koji unosi manju grešku u proračun jest uz modeliranje djelovanja ostalih jedinica pomoću jednostavnih jednodimenzionalnih elemenata koji mogu biti kalibrirani na osnovi osnovnih geometrijskih parametara ili pak parametara koji mogu biti procijenjeni već uz osnovni vizualni pregled. [6] Postoje rješenja koja predlažu jednodimenzionalne elastoplastične veze u poprečnom smjeru (dok su veze u uzdužnom smjeru izostavljene) između jedinica s čvrstoćom  $R$  i krutošću  $K$  u ovisnosti o visini etaže, ukupnoj duljini niza zgrade u koeficijentima  $\alpha$  i  $\beta$  koji uzimaju u obzir poziciju jedinice u nizu. [27] Jasno je, pogledavši sliku 2, da

bi za Zagreb bila potrebna kalibracija elemenata veza u uzdužnom smjeru, koja bi svakako bila dosta zahtjevna [28], te bi u tom slučaju vjerojatno bilo bolje odlučiti se i na modeliranje susjednih jedinica. Potencijalno dobar pristup za Zagrebačke blokove je pristup modeliranju dijelova ostalih jedinica pomoću linearno elastičnih ili nelinearnih elemenata na spojevima s ostalim građevinama, koje je moguće generirati modalnom analizom susjednih jedinica[29].

#### **4 Rasprava i prijedlog metodologije za analizu i rekonstrukciju zgrada u blokovima**

U nastavku su raspravljene hipoteze i predložena je metodologija za analizu postojećeg stanja, sa ishodima analiza i prijedlog rekonstrukcije zgrada unutar blokova. Prema iskustvima tijekom potresa u Zagrebu i Petrinji 2020. godine, stranoj literaturi i tehničkim propisima, može se razmišljati u smjeru rekonstrukcije blokova kao cjelina, te potencijalno pogrešnim smatrati pristup uvriježen u inženjerskoj praksi o rekonstrukciji zgrade unutar bloka kao pojedinačne cjeline (*engl. standalone building*). Dodatno, izgradnja novih zgrada unutar blokova, bez prikladne potresne razdjelnice može negativno utjecati na potresnu oštetljivost zgrada u bloku.

Kao ulazni podatak za (i) definiranje potresnog hazarda uz upotrebu snimljenih potresnih zapisa pri Zagrebačkom potresu; (ii) usvajanje eksperimentalno utvrđene čvrstoće зида [30]; (iii) eksperimentalno utvrđivanje dinamičkih parametara zgrade (*engl. Operational Modal Analysis – OMA*) s naglaskom na lociranje međudjelovanja; (iv) izrada numeričkog modela i kalibracija sa točkom (iii) i oštećenjima utvrđenim pri potresu 22. ožujka 2020. u Zagrebu; (v) utvrđivanje krutosti nelinearne veze između jedinica; (vi) utvrđivanje oblika kolapsa; (vii) modeliranje niza zgrada unutar bloka zbog utvrđivanja broja zgrada u nizu na središnju jedinicu, kako bi se odredio broj zgrada koje zajedno idu u rekonstrukciju; (viii) analiza utjecaja krute susjedne zgrade bez adekvatne potresne razdjelnice na ponašanje zgrada u bloku/nizu; (ix) analiza utjecaja sanirane i protupotresno ojačane susjedne zgrade na ponašanje zgrada u bloku/nizu; (x) Prikaz tipskih metoda ojačanja za blokove kao cjeline.

#### **5 Zaključak**

Cilj ovog rada bilo je dati pregled stanja područja zgrada u blokovima i metoda konstrukcijskog ojačanja s naglaskom na karakteristike arhitekture i načina gradnje u gradskoj jezgri Zagreba. Obzirom na izražen rizik od potresa grada Zagreba, manjkavost tehničkih propisa po pitanju analize blokovske gradnje i trenutnu inženjersku praksu u RH koja nije u skladu sa stranim propisima i zaključcima znanstvenih istraživanjima, potrebno je ponuditi ispravne modele obnove kako bi se posljedice

budućih potresa smanjile na minimum. Nedoumice proizašle iz različitosti i posebnosti Zagrebačke arhitekture i principa gradnje, potrebno je dokazati i kvantificirati na analiziranim primjerima i tako potvrditi definirane hipoteze. Ciljevi daljnjeg rada na području trebali bi biti posvećeni smanjenju potresnog rizika kompletnog bloka i niza, a ne samo individualne građevine uz dodatno razvijanje načina ojačanja predmetnih zgrada na način da primijenjene intervencije budu prihvatljive po pitanju djelovanja na vrijednost kulturne baštine kojoj pripadaju.

## Literatura

- [1] Dasović, I., Herak, M., Prevolnik, S.: Uvodno o potresu i njegovim učincima (poglavlje), Potresno inženjerstvo, Obnova zidanih zgrada (ur. Uroš, M., Todorić, M., Crnogorac, M., Atalić, J., Šavor Novak, M., Lakušić, S.), Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, pp. 13-36, 2020.
- [2] Zamolo, M., Grandić, D.: Tehnička regulativa za projektiranje potresne otpornosti i za obnovu nakon potresa – smjernice i upute za provedbu obnove (poglavlje), Potresno inženjerstvo, Obnova zidanih zgrada (ur. Uroš, M., Todorić, M., Crnogorac, M., Atalić, J., Šavor Novak, M., Lakušić, S.), Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, pp. 123-164, 2020.
- [3] Grad Zagreb – službene stranice – Popis stanovništva, kućanstava i stanova – Popis 2021. – prvi rezultati, <https://www.zagreb.hr/popis-stanovnistva-kucanstava-i-stanova/1043>, pristup: 11.06.2022.
- [4] Agencija za znanost i visoko obrazovanje – Broj studenata prema ustanovi izvođača, Sveučilišta u Zagrebu, Splitu, Osijeku i Rijeci (2013/14 – 2018/19), <https://www.azvo.hr/hr/visoko-obrazovanje/statistike/2113-broj-studenata-prema-ustanovi-izvodaca-sveucilista-u-zagrebu-splitu-osijeku-i-rijeci-2013-14-2017-18>, pristup: 11.06.2022.
- [5] Herak, M., Allegreti, I., Herak, D., Ivančić, I., Kuk, V., Marić, K., Markušić, S., Sović, I.: Republic of Croatia, Seismic hazard map, 2011. <http://seizkarta.gfz.hr/hazmap/karta.php>, pristup: 11.06.2022.
- [6] Tomić, I.: Utjecaj gradnje u stambenim blokovima na procjenu stanja zgrade (poglavlje), Potresno inženjerstvo, Obnova zidanih zgrada (ur. Uroš, M., Todorić, M., Crnogorac, M., Atalić, J., Šavor Novak, M., Lakušić, S.), Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, pp. 207-2016, 2020
- [7] Hadzima-Nyarko, M., Lešić, M., Morić, D.: "Seismic Vulnerability Assessment for Residential Buildings in Osijek, Croatia", Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering, Chilean Association of Seismology and Earthquake Engineering Board Directors ACHISINA – Asociación Chilena de Sismología e Ingeniería Antisísmica (ur.). Santiago, 2017. str. 1-12

- [8] Bojanić B. & Obad Šćitaroci M. (2021) Urban Morphology of Zagreb in the Second Half of the 19th Century—Landmarks Guiding the Reconstruction of the Town and the Preservation of Identity after the 2020 Earthquake. *Heritage*, 4, 3349–3364. <https://doi.org/10.3390/heritage4040186>
- [9] Crnogorac, M., Todorčić, M., Uroš, M., Atalić, J.: Urgentni program potresne obnove – UPPO, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet i Hrvatska komora inženjera građevinarstva. 2020
- [10] Šavor Novak, M., Uroš M, Atalić J., Herak M., Demšić M., Baniček M., Lazarević D., Bijelić N., Crnogorac M. & Todorčić M. (2020): Zagreb earthquake of 22 March 2020 – preliminary report on seismologic aspects and damage to buildings. *GRAĐEVINAR*, 72 (10), 843-867.
- [11] HCPI: GIS karta sa podacima o upotrebljivosti zgrada, Hrvatski centar za potresno inženjerstvo, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu i Grad Zagreb, 2020
- [12] Borri, A., De Maria A: Eurocode 8 and Italian code. A comparison about safety levels and classification of interventions on masonry existing buildings. E. Cosenza (ed), Eurocode 8 Perspectives from the Italian Standpoint Workshop, 237 – 246, 2009 Doppiavoce, Napoli, Italy, 2009
- [13] Da Porto, F., Munari M., Prota A., Modena C.: Analysis and repair of clustered buildings: Case study of a block in the historic city centre of L'Aquila (Central Italy). *Constr Build Mater* 38:1221–1237. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.108>, 2013
- [14] CEN: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules and seismic actions (EN 1998-1-1\_draft version\_09-11-2021), European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2021
- [15] CEN: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1-2: Rules for new buildings (EN 1998-1-2\_draft version\_03-10-2021), European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2021
- [16] CEN: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 3: Assessment and retrofitting of buildings and bridges (EN 1998-3\_draft version\_06-05-2021), European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2021
- [17] Ministarstvo prostornoga uređenja, graditeljstva i državne imovine: Tehnički propis o izmjenama i dopunama tehničkog propisa za građevinske konstrukcije (Narodne novine br. 17/17, 75/20, 7/22), 2022
- [18] Oreb, J., Mušterić, B., Šavor Novak, M. Atalić, J.: Influence of pounding on seismic performance of existing buildings in the City of Zagreb, Croatia // Proceedings of the International Conference on Sustainable Materials, Systems and Structures (SMSS2019) Durability, Monitoring and Repair of Structures / Baričević, A.; Jelčić Rukavina, M.; Damjanović, D.; Guadagnini, M. (ur.), Paris: RILEM Publications S.A.R.L., 2019. 556-563, 2019

- [19] Di Ludovico, M. et al (2020): The reconstruction of residential buildings of historical centres damaged by L'Aquila 2009 earthquake, 17th Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE, Sendao, Japan, 2020
- [20] Presidenza del Consiglio dei Ministri, Il Commissario del governo per la ricostruzione nei territori interessanti dal sisma del 24 agosto 2016 (2017): "Misure per il ripristino con miglioramento sismico e la ricostruzione di immobili ad uso abitativo gravemente danneggiati o distrutti dagli eventi sismici verificatisi a far dal 24 agosto 2016, Ordinanza n. 19 del 7 aprile 2017
- [21] Senaldi, I., Guerrini, G., Comini, P., Graziotti, F., Penna, A., Beyer, K., Magenes, G.: Experimental seismic performance of a half-scale stone masonry building aggregate. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(2), 609-643, 2020.
- [22] Tomić, I., Penna, A., DeJong, M., Butenweg, C., Correia, A.A., Candeias, P.X., Senaldi, I., Guerrini, G., Malomo, D., Beyer, K.: "Seismic testing of adjacent interacting masonry structures." 17WCEE, Sendai, Japan, 2020
- [23] Tomić, I., Penna, A., DeJong, M., Butenweg, C., Senaldi, I., Guerrini, G., Malomo, D., Beyer, K.: "Blind predictions of shake table testing of aggregate masonry buildings." 17WCEE, Sendai, Japan, 2020
- [24] Tomić, I., Penna, A., DeJong, M., Butenweg, C., Senaldi, I., Guerrini, G., Malomo, D., Beyer, K.: "Technical report on SERA Transnational Access activities TA1-TA10 M36." Technical report, 2020
- [25] Atalić, J., Krolo J., Damjanović D., Uroš M., Sigmund Z., Šavor Novak M., Hak S., Korlaet L., Koščak J., Duvnjak I., Bartolac M., Serdar M., Dokoza I., Prekupec F., Oreb J., Mušterić B., Demšić M., Baniček M., Žagar T., Jandrić K.: Studija za saniranje posljedica od potresa, Faza I-IX, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2013-2021
- [26] Atalić, J., Lakušić S., Srkoč M., Uroš M., Baniček, M., Žagar, T., Sigmund Z., Šavor Novak M.: Program cjelovite obnove Povijesne jezgre grada Zagreba – Konstruktorski modeli obnove, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Hrvatski centar za potresno inženjerstvo, 2021
- [27] Formisano, A., Massimilla, A.: A novel procedure for simplified nonlinear numerical modeling of structural units in masonry aggregates. *International Journal of Architectural Heritage*, 12(7-8), 1162-1170, 2018
- [28] Senaldi, I., Magenes, G., Penna, A.: Numerical investigations on the seismic response of masonry building aggregates. In *Advanced Materials Research* (Vol. 133, pp. 715-720). Trans Tech Publications Ltd, 2010
- [29] Stavroulaki, M.E.: Dynamic behavior of aggregated buildings with different floor systems and their finite element modeling. *Frontiers in Built Environment*, 5, 138., 2019

- [30] Krolo, J., Damjanović, D., Duvnjak, I., Frančić Smrkić, M.: Određivanje mehaničkih svojstava zida (poglavlje), Potresno inženjerstvo, Obnova zidanih zgrada (ur. Uroš, M., Todorčić, M., Crnogorac, M., Atalić, J., Šavor Novak, M., Lakušić, S.), Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, pp. 285-307, 2020