

Primljen / Received: 23.4.2026.

Ispravljen / Corrected: 5.6.2026.

Prihvaćen / Accepted: 9.6.2026.

Dostupno online / Available online: 10.7.2026.

Utjecaj međukatnih konstrukcija na seizmički odziv nearmiranih zidanih zgrada iz razdoblja kasnog 19. i početka 20. stoljeća u Zagrebu

Autori:



Ivan Volarić, spec.aedif.seism., v.pred.
Tehničko veleučilište u Zagrebu
Graditeljski odjel
ivan.volacic@tvz.hr



Izv.prof.dr.sc. **Mislav Stepinac**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
mislav.stepinac@grad.unizg.hr
Autor za korespondenciju

Pregledni rad

Ivan Volarić, Mislav Stepinac

Utjecaj međukatnih konstrukcija na seizmički odziv nearmiranih zidanih zgrada iz razdoblja kasnog 19. i početka 20. stoljeća u Zagrebu

U radu su razmotreni konstrukcijski nedostaci nearmiranih zidanih građevina zagrebačke tradicionalne (austroougarske) gradnje, s naglaskom na ulogu međukatnih konstrukcija u prijenosu i raspodjeli potresnih djelovanja. Dan je povijesni pregled razvoja takvih konstrukcija i tipologija gradnje. Posebna pozornost posvećena je nedostatnoj međusobnoj povezanosti nosivih elemenata te neujednačenoj distribuciji horizontalnih sila, što izravno utječe na potresnu otpornost zgrada. U radu su analizirana svojstva ugrađenih materijala, tipične tlocrtno dispozicije te karakteristični sustavi međukatnih konstrukcija u Zagrebu. Kroz tri reprezentativne studije slučaja razmotrene su različite dispozicije konstrukcijskog sustava uz primjenu dviju metoda ojačanja, a na temelju čega su izvedeni zaključci o učinkovitosti pojedinih intervencija.

Ključne riječi:

drvene međukatne konstrukcije, zidane građevine, pojačanje konstrukcija, Zagreb, Donji grad, N2 metoda

Subject review

Ivan Volarić, Mislav Stepinac

The influence of floor structures on the seismic response of unreinforced masonry buildings from the late 19th and early 20th century in Zagreb

The paper examines structural deficiencies of unreinforced masonry buildings of traditional Zagreb construction practices from Austro-Hungarian period, with an emphasis on the role of floor structures in the transfer and distribution of seismic actions. A historical overview of the development of such structures and building typologies is provided. Special attention is given to the insufficient interconnection of load-bearing elements and the uneven distribution of horizontal forces, which directly affect the seismic resistance of buildings. The paper analyses the properties of the materials used, typical floor plan layouts, and characteristic floor structure systems in Zagreb. Through three representative case studies, different structural system configurations are examined using two strengthening methods, based on which conclusions are drawn regarding the effectiveness of individual interventions.

Key words:

timber floor structures, masonry buildings, structural strengthening, Zagreb, Lower town, N2 method

1. Uvod

Grad Zagreb se na današnjoj lokaciji prvi put spominje krajem 11. stoljeća. Tijekom stoljeća nalazio se pod vlašću raznih vladara i državnih tvorevina, dok je istodobno bio izložen nizu prirodnih nepogoda; svi ti utjecaji zajedno usmjeravali su njegov postupni urbani i graditeljski razvoj. U 17. i 18. stoljeću grad su znatno oštetila četiri velika požara [1, 2], koja su potaknula velike promjene u gradnji te se s drvenih sustava gradnje prešlo na opečne materijale. "Tijekom 17. i 18. stoljeća podižu se prve reprezentativne stambene građevine plemstva i građanstva na Gradecu" [2], dok su se u vrijeme Habsburgovaca primjenjivali tipovi gradnje karakteristični za Beč. Promjenom načina gradnje u stambenom fondu povećana je osjetljivost na potresna djelovanja, ponajprije zbog korištenja masivnih materijala velike zapreminske mase koji pri seizmičkome pobuđivanju stvaraju znatne inercijalne sile. Potresi velikog intenziteta u Zagrebu su zabilježeni 1880., 1883., 1901., 1905. i 2020. [3, 4]. Potres magnitude $M_w = 6,3$ koji je 1880. pogodio Zagreb, poznat kao veliki zagrebački potres, prouzročio je opsežna oštećenja građevnog fonda, pri čemu je stradalo više od 1700 zgrada. U obnovu bili su uključeni arhitekti i graditelji iz različitih dijelova Austro-Ugarske Monarhije, što je imalo snažan utjecaj na daljnji razvoj grada. Tijekom obnove došlo je do znatnih urbanističkih i arhitektonskih promjena, uključujući preoblikovanje brojnih dotadašnjih ulica i građevina. Proces obnove trajao je više godina, a pojedine zgrade dovršavane su tek početkom 20. stoljeća. Takav vremenski raspon rezultirao je slojevitim arhitektonskim izrazom, u kojemu se prepoznaju različiti stilovi karakteristični za to razdoblje. Nakon potresa uočen je prelazak prema ujednačenijemu i normiranijemu pristupu projektiranju u sklopu historicizma, dok se u kasnijim fazama razvoja postupno pojavljuju i elementi secesije te moderne. Stambeni fond Povijesne urbane cjeline grad Zagreb, koji je pod konzervatorskom zaštitom, datira pretežno s kraja 19. stoljeća i početka 20. stoljeća [5]. Građevine su u tome razdoblju sustavno organizirane u zatvorene blokove (slika 1.), definirane uličnim

frontama i unutarnjim dvorištima. Takva blokovska izgradnja rezultirala je kontinuiranim nizovima zgrada s međusobno naslonjenim zidovima i jasno oblikovanom urbanom matricom. Nosivi zidovi u pravilu su organizirani pretežno u smjeru paralelnom s ulicom, dok se u smjeru okomitom na ulicu uočava nedostatan udio nosivih zidova. Broj zidova okomitih na ulicu (dva fasadna i dva stubišna) brojčano je veći od onih paralelnih s ulicom (dva fasadna i središnji). Međutim, sva četiri zida okomita na ulicu u pravilu nisu vertikalno opterećena jer su grednici postavljeni u njihovu pravcu, a uz to zidovi okomiti na ulicu znatno su tanji od zidova paralelnih s ulicom. U radu su Stepinac i ostali [6], na reprezentativnome uzorku od 103 analizirane zgrade, utvrdili da postotak zidova od 5 % (za analizirani smjer) u tlocrtu nije zadovoljen za 12 % zgrada u x-smjeru (paralelno s ulicom) te za 16 % u y-smjeru (okomito na ulicu). U slučaju strožega kriterija, odnosno granične vrijednosti od 10 % (za analizirani smjer) površine zidova u tlocrtu, uvjet ne zadovoljava približno 75 % zgrada, neovisno o smjeru [6]. U radu detaljno su analizirani i parametri vitkosti zidova, tlocrtne asimetrije, omjera stranica u tlocrtu, duljine istaka, kompaktnosti te međusobnog položaja centra masa i centra krutosti.

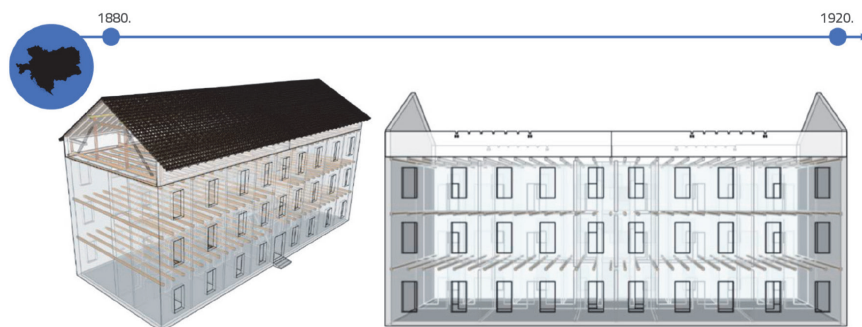
Glavni nosivi sustav zgrada čine masivni nosivi opečni zidovi s plitkim "pruskim" svodovima izvedenima iznad podruma ili suterena, dok se u ostalim međukatnim zonama nalaze drveni grednici između kojih se ugrađivala štuta kao zvučna i toplinska izolacija. Krovšte je u pravilu izvedeno kao drvena krovna konstrukcija, najčešće dvostrešna, s tradicionalnim pokrovom od crijepa, pri čemu se opterećenje prenosi na uzdužne nosive zidove (slika 2.).

Analizirajući građevine u povijesnoj jezgri vidljivo je da dominiraju građevine starosti između 100 i 150 godina, dok pri projektiranju novih građevina za konstrukcije zgrada, mostova i drugih inženjerskih građevina uobičajenih dimenzija ili obične važnosti projektanti predviđaju uporabni vijek od 50 godina [7, 8]. Uz uporabni vijek koji je daleko premašen povijesne građevine ne zadovoljavaju temeljna načela gradnje u potresnim područjima među kojima je dostatno kruta dijafragma u razini

kata temelj za pravilnu raspodjelu horizontalnih inercijalnih sila na vertikalne nosive elemente. Nepovezana konstrukcija uz problem globalne stabilnosti ima izražene i mehanizme otkazivanja izvan ravnine. Otkazivanje izvan ravnine jedan je od najčešćih i najopasnijih oblika mehaničkoga gubitka stabilnosti kod zidanih zgrada tijekom potresa [9]. Tipologija gradnje povijesnih građevina u Zagrebu izravno utječe na mehanizam otkazivanja zidova izvan ravnine zbog nedostatka ukrućujućih zidova okomitih na nosive ulične zidove. Kroz uporabni vijek građevina dulji od 150 godina ukrućujući zidovi okomiti na ulicu uklanjani su tijekom raznih, vrlo



Slika 1. Tipičan donjogradski blok zgrada u Zagrebu



Slika 2. Klasična stambena zgrada u povijesnoj jezgri grada Zagreba

često nedopustivih i konstrukcijski neopravdanih adaptacija. Prvi seizmički propis iz 1964. u prvim je člancima definirao maksimalni razmak ukružujućih zidova ovisno o intenzitetu djelovanja, tj. potresnoj zoni, te ta činjenica jasno upućuje na važnost zadržavanja tih zidova u konstrukciji. Važno je napomenuti da su upravo ti zidovi znatno oštećeni u potresima, što za izravnu posljedicu ima to da se u njima trošila potresna energija te da su, iako vrlo tanki, doprinijeli prijenosu potresnog opterećenja. Usporedbe radi, zagrebačke stambene zgrade je 2020. pogodio potres umjerene magnitude, dok su Turska i njezin građevni fond pretrpjeli znatnu štetu, kolaps velikog broja građevina te mehanizme oštećenja drugačije nego u Zagrebu (npr. meki kat) zbog dvaju potresa magnituda 7,7 i 7,6 M_w [10]. U povijesnoj urbanoj cjelini Grad Zagreb, u prostorima prizemlja koji se koriste u prodajne i ugostiteljske svrhe u pravilu se uklanjaju glavni nosivi zidovi, što za potresa velikih intenziteta dovodi upravo do aktivacije mehanizma mekog prizemlja.

2. Povijesne zidane nearmirane građevine u Zagrebu

2.1. Materijali korišteni tijekom gradnje

Povijesne građevine u jezgri Zagreba građene su većinom od opečnih proizvoda u kombinaciji s vapnenim mortom kao vezivnim sredstvom. Odnosi čvrstoća materijala koji se koriste u zidanim konstrukcijama vrlo su neujednačeni [11]. Kako se radi o materijalima koji su već tijekom gradnje imali različite mehaničke karakteristike, tako je nakon dugogodišnjih degradacija materijala neophodno poznavati mehaničke karakteristike trenutnog stanja za izradu složenih numeričkih nelinearnih modela. Uz zide nosivu konstrukciju povijesnih građevina čine drveni i čelični elementi u zoni međukatnih konstrukcija te drveni elementi u krovnim konstrukcijama.

2.1.1. Opeka i vapneni mort

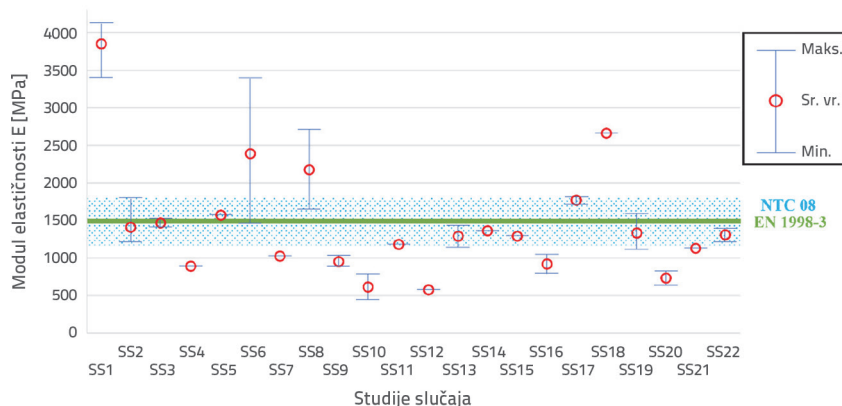
Opečni elementi jesu građevni materijal koji je industrijski proizveden, a mehaničke karakteristike i dimenzije ujednačenije su naspram prirodnih materijala. Do 1932. koristila se tzv. austrijska opeka dimenzija 14 cm x 29 cm x 6,5 cm, dok se nakon 1932. prelazilo na opeku tzv. normalnog formata

dimenzija 12 x 25 x 6,5 cm. Opečni elementi kod povijesnih građevina imaju izražen problem degradacije materijala u zonama gdje dolazi do kontakta s tlom i vlagom, jer suvremene hidroizolacije nisu izvedene te se na taj način izravno utječe na smanjenje mehaničkih karakteristika materijala. Uz opeku glavni nosivi element zidane konstrukcije jest vapneni mort. Vapno se tradicionalno koristi kao materijal u građevinskim radovima više od tri tisuće godina [12]. Proizvodi

se tako da se zagrije vapnenačko kamenje kako bi se kalcijev karbonat pretvorio u kalcijev oksid (živo vapno), a zatim se živo vapno gasi vodom [13] te mu se dodaju pijesak i voda kako bi se dobio vapneni mort. Tako proizveden kompozitni element sačinjen od opeke i vapnenog morta ima vrlo složeno ponašanje i mehaničke karakteristike. Dva osnovna parametra koja je neophodno poznavati kod takvog zida jesu modul elastičnosti te posmična čvrstoća materijala. Danas se za ispitivanje koriste dvije dokazane metode. Jednostavnija i jeftinija, ali i nepreciznija, obuhvaća mjerenje sile pri kojoj dolazi do sloma u sljubnici bez mjerenja vertikalnog opterećenja. Druga metoda, koja je puno preciznija, ali složenija te vremenski zahtjevnija, jest mjerenje pomoću plosnatih preša, tzv. *flat-jack*, kojima se dolazi i do točnoga vertikalnog opterećenja u zidu. Istražuju se i nove mogućnosti mjerenja mehaničkih karakteristika pomoću brzine prolaska zvučnog vala kroz materijal, a navedenom problematikom bave se Ortega i suradnici u radu [14].

Proračunski parametar koji bi najbolje oslikao svojstva zida jest vlačna čvrstoća, ali je zbog složenosti ispitivanja i vrlo destruktivne prirode samoga vlačnog testa gotovo nemoguće izraditi i financijski opravdati takve testove na zgradama koje nisu znatno oštećene, tj. na zgradama koje nisu razine oštećenja IV. i više prema EMS-98 klasifikaciji. Takvo ispitivanje vrlo je složeno, skupo, dugotrajno te ga je nemoguće provoditi na velikome broju zgrada, a samim time bi se i rezultati vrlo vjerojatno osipali te ne bi bili referentni za cijeli građevni fond.

U sklopu projekta ARES provedena su brojna ispitivanja posmične čvrstoće i modula elastičnosti zida u Zagrebu i okolici. Rezultati su objavljeni u doktorskoj disertaciji Luke Lulića te znanstvenome radu Stepinca i ostalih [15, 16]. Dobiveni su rezultati vrlo nehomogeni. Svakako je neophodno napomenuti kako su dobiveni rezultati (slika 3.) za pojedine građevine ispod preporučenih vrijednosti modula elastičnosti od $E = 1500$ MPa koje predlažu nova generacija eurokoda te nacionalna talijanska norma (NTC 2018, NTC Circolare 2019). Modul elastičnosti devet zgrada nalazi se unutar raspona od 500 MPa do 1100 MPa, dok četiri zgrade bilježe modul elastičnosti iznad 2000 MPa. Navedena činjenica jasno pokazuje razloge zbog kojih nelinearne složene proračune nije moguće primjenjivati bez provedenih ispitivanja mehaničkih karakteristika materijala pri pojačanju konstrukcije.



Slika 3. Rezultati ispitivanja modula elastičnosti u usporedbi s EN i NTC propisima [15]

2.1.2. Drvo

Botaničke vrste drva koje su najčešće dio zagrebačkih građevina jesu jela i smreka, dok je upotreba hrasta bila rezervirana za zgrade posebne važnosti ili u zonama velikih koncentracija naprezanja. Drvo kao materijal karakterizira promjena mehaničkih karakteristika ovisno o postotku vlažnosti, a prekomjerna vlažnost dovodi i do mehaničkih degradacija materijala. Međukatne konstrukcije u pravilu nemaju izražen problem degradacije biološkim nametnicima, naprimjer, krovne konstrukcije prikazane na slici 4. Degradacija drva truljenjem zbog prisustva vlage u međukatnim konstrukcijama pojavljuje se u zoni grednika, na osloncu odnosno na dijelu grednika u zidu gdje nije osigurano ventiliranje, što je i očekivano s obzirom na fiziku zgrade i detalje oslanjanja grednika na opečni zid. Grednici u međukatnim ravninama "konzervirani" su slojem šute i pijeska te se oštećenja pojavljuju u zonama gdje su slojevi uklonjeni ili kojima su dodavani novi drveni elementi prekomjerne vlažnosti. Pri izvođenju sanacije i ojačanja međukatnih konstrukcija neophodno je u početnoj fazi analizirati arhivsku dokumentaciju uz preliminarni vizualni pregled, provesti mjerenje geometrije, a potom provesti detaljni pregled intervencija i spojeva u konstrukciji [17].

Kod projektiranja sanacija i pojačanja postojećih drvenih konstrukcija izražen je problem nedostatka normativnih dokumenata za te procese u Hrvatskoj. U Europi prepoznata je potreba za definiranjem normativnog dokumenta kod proračuna postojećih drvenih konstrukcija, što je nekoliko država i učinilo [18]. Botaničke vrste, tipovi konstrukcija, pozicije elemenata u konstrukcijama i slično izravno utječu na mehaničke karakteristike elemenata te se podaci iz drugih država teško mogu preuzeti kao referentni. Baza podataka u Hrvatskoj redovito je povezana sa znanstvenim ili stručnim radom pojedinaca te je kao referentne podatke moguće uzeti tri izvora. Tehnički muzej u Zagrebu, sagrađen 1949., obrađen je u radu Stepinca i suradnika [19] iz kojeg je vidljivo kako elementi u izloženim zonama, gdje je prisutna veća razina vlažnosti, zadovoljavaju uvjete klase čvrstoće C16, dok se elementi u višim zonama od tla mogu svrstati u klasu čvrstoće C24, a s iznimkom i u klasu

čvrstoće C27. U radu Perković i suradnici [20] analiziraju drvenu krovnu nosivu konstrukciju Državnog arhiva u Zagrebu te donose zaključak da je pretežna klasa drva C24. Treba napomenuti kako su oba objekta vrlo važne građevine, pa je kvaliteta materijala u usporedbi s ostalim stambenim zgradama vjerojatno bolja. Kada se radi o lameliranim krovnim konstrukcijama, tada su ispitivanja mehaničkih karakteristika provedena na industrijskome objektu u Kutini građenom oko 1980. [21]. Ispitne epruvete lameliranih lijepljenih nosača uzete su iz konstrukcije te su razorno

ispitivane u laboratoriju. Dobiveni su rezultati karakteristične čvrstoće na savijanje od 22 N/mm², što elemente svrstava u klasu čvrstoće ispod GL24h, koja se danas smatra standardnom klasom čvrstoće.



Slika 4. Drvena konstrukcija oštećena djelovanjem bioloških nametnika

Na temelju analiza i ispitivanja provedenih u navedenim radovima dolazi se do zaključka kako je kod postojećih drvenih konstrukcija neophodno uzeti u obzir utjecaj vlažnosti i degradacije materijala uz smanjenje efektivne površine poprečnog presjeka kod izračuna geometrijskih karakteristika.

2.1.3. Čelik

U povijesnim stambenim zgradama čelik ima vrlo malu i koncentriranu primjenu na pozicijama gdje su koncentrirana velika opterećenja te gdje drugi materijali manjih čvrstoća ne mogu zadovoljiti tražene mehaničke karakteristike. Čelične grede često se postavljaju ispod krakova stubišta kao tetive, ispod pregradnih zidova u razini međukatne konstrukcije, u zonama balkona, kod pruskih svodova u stropovima iznad podruma ili suterena te kod geometrijski složenijih tlocrtnih

Tablica 1. Geometrijske karakteristike povijesnog NPI 200 i suvremenog IPE 200 čeličnog profila

Profil	Visina [mm]	Širina [mm]	Debljina pojasnice [mm]	Masa [kg/m]
IPE 200	200	100	5,6	18,4
NPI 200	200	90	7,8	22,4

dispozicija koje nije moguće premostiti drvenim grednicima, a što je vidljivo na slici 5.



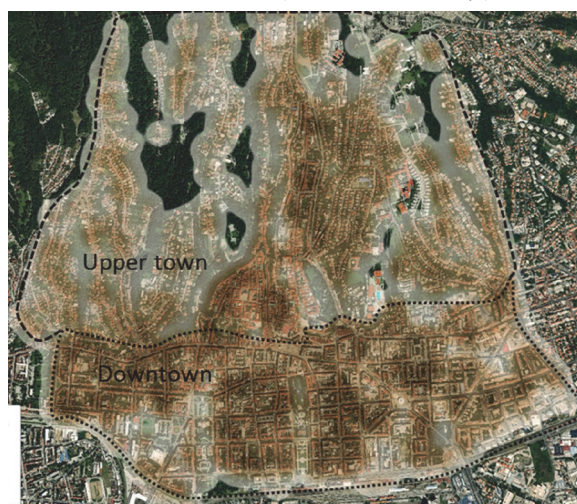
Slika 5. Čelični grednici međukatne konstrukcije kod klasične donjogradske uglovnice u zoni erkera i čelične grede ispod pregradnih zidova

Čelični profili koji su se povijesno koristili imali su različitu geometriju od danas korištenih profila. Povijesne profile karakteriziraju manja širina, veća debljina pojasnice i veća masa po dužnome metru. Povijesni profili masivniji su i manje optimizirani od suvremenih. U tablici 1. uspoređene su geometrijske karakteristike za povijesni profil NPI 200 i suvremeni profil IPE 200.

2.2. Tipologija povijesnih građevina u Zagrebu

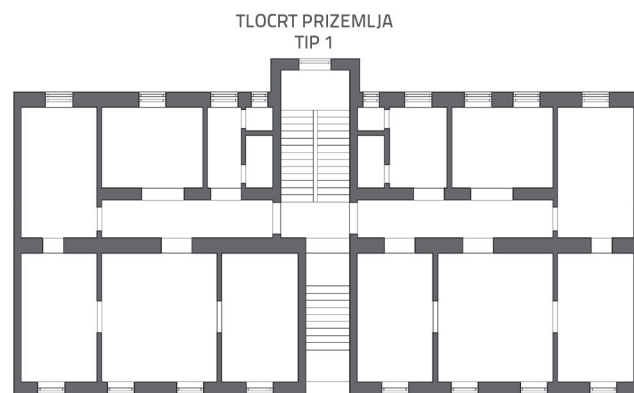
Zidane povijesne građevine čine dominantnu nosivu konstrukciju u Donjem gradu. Nakon potresa 2020. Stepinac i suradnici u radu [22] analizirali su tip konstruktivnog sustava. Na slici 6. prikazani su vrlo tamni tonovi smeđe boje u zoni Donjega i Gornjega grada koji prikazuju izrazitu zastupljenost zidanih građevina u povijesnoj jezgri grada Zagreba. U radu [5] Moretić i suradnici u tri gradska bloka analiziraju, među ostalim, godinu gradnje, broj katova i tip međukatne konstrukcije. Najveći udio zgrada oko 50 % datira iz razdoblja od 1861. do 1920., dok je sljedeće razdoblje po zastupljenosti ono od 1921. do 1945., sa nešto više od 10 %. Među navedenim građevinama dominiraju zgrade sa četiri kata (oko 40 %), a zgrade s pet katova imaju udio od oko 15 %. Najzastupljenija međukatna konstrukcija svrstava se u podatne međukatne drvene konstrukcije (oko 60 % udjela), dok armiranobetonske krute dijafragme u navedena tri gradska bloka imaju udio manji od 5 %. Grad Zagreb uvelike je oblikovao utjecaj Habsburške Monarhije, pod kojim se snažno nalazio kroz stoljeća. Povijesna urbana cjelina građena je po uzoru na Beč te je formiran niz gradskih

blokova. Oblikovanje bloka snažno je utjecalo na tlocrtne dispozicije koje su se koristile za stambene zgrade. Blokova gradnja uz veliku iskoristivost prostora ima niz nedostataka u pogledu mogućnosti oblikovanja tlocrtnih dispozicija i osvjetljenosti stambenih prostora. Upravo taj problem definirao je tlocrtne dispozicije velike razvedenosti koje danas s konstruktorskog gledišta stvaraju velike izazove kod ojačanja nosivih konstrukcija. Nakon analiza i pregleda velikog broja zgrada nakon potresa 2020. u povijesnoj jezgri detektirana su tri karakteristična tlocrta koja su znatno zastupljena.



Slika 6. Zastupljenost zidanih konstrukcija u povijesnoj jezgri grada Zagreba [22]

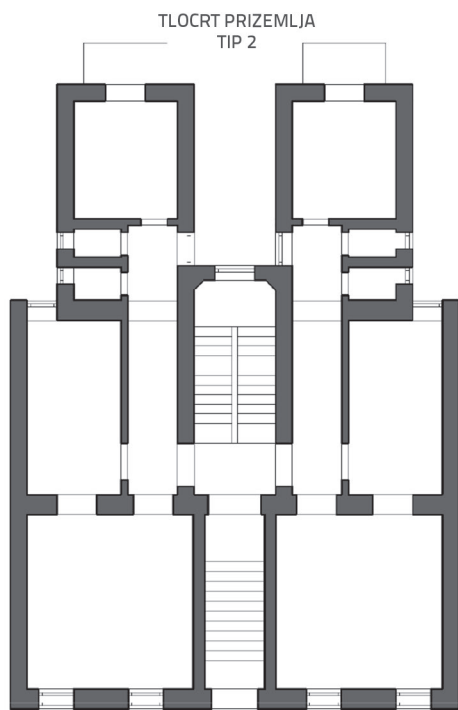
Na slici 7. prikazan je karakteristični tlocrt prizemlja TIP 1 prema kojemu je vidljivo kako su nosivi zidovi postavljeni paralelno uz ulicu u četiri ravnine, dok okomito na glavne nosive zidove dolaze vrlo tanki pregradni ukrčujući zidovi koji sprječavaju gubitak stabilnosti izvan ravnine uličnih zidova.



Slika 7. Tlocrtna dispozicija prizemlja – karakteristični TIP 1

U pravilu su zidani u zajedničkome vezu s uličnim zidovima, ali njihova debljina najčešće nije dostatna za preuzimanje potresne sile te su nakon potresa 2020. na njima uočene znatne kose i križne pukotine. U dvorišnome dijelu vidljivo je istaknuto stubište koje kod različitih građevina ima veće ili manje duljine istake prema dvorištu. Poprečni zidovi (fasadni i zidovi stubišta okomiti na ulicu) nisu vertikalno opterećeni (grednici su postavljeni okomito na nosive ulične zidove), što dodatno umanjuje otpornost poprečnog smjera. Predmetna tlocrtna dispozicija nema osiguranu dvosmjernu otpornost i krutost, što je jedan od glavnih nedostataka tog tipa objekta, uz nedovoljno krutu dijafragmu u razini kata.

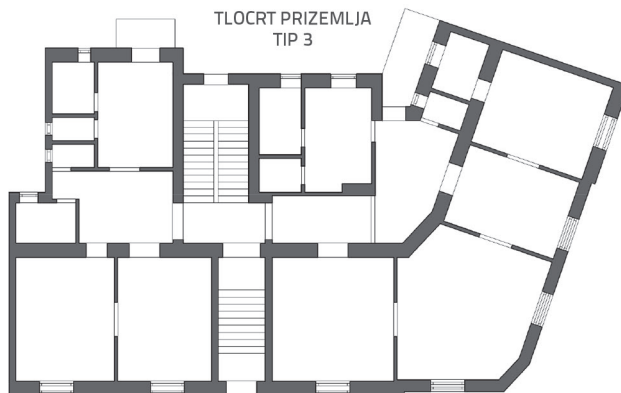
Na slici 8. prikazan je karakteristični tlocrt prizemlja TIP 2 koji ima dva istaknuta volumena u zoni dvorišta kojima je osigurana dobra osvjetljenost dvorišnih prostorija na građevinskim česticama veće dubine. Na taj je način dobivena arhitektonski povoljna dispozicija, ali se ističe neostvaren uvjet jednoličnosti i simetrije konstrukcije te pravilnosti tlocrta. Nosivi su zidovi kod tog tipa tlocrta ravnomjernije raspoređeni u odnosu na TIP 1, ali se i dalje pojavljuje problem nedovoljno krute dijafragme u razini kata.



Slika 8. Tlocrtna dispozicija prizemlja – karakteristični TIP 2

Tlocrtna dispozicija prikazana na slici 9. predstavlja građevine koje se nalaze na krajevima blokova te se nazivaju uglovnicama. Taj tip građevine karakteriziraju najnepovoljnija raspodjela zidova, geometrijski oblik i zadovoljavanje temeljnih načela gradnje u potresnim područjima. Kod analiziranih postojećih građevina tog tipa vrlo često se u prvim tonovima pojavljuju torzijski oblici,

a mjere ojačanja tog tipa konstrukcije zahtijevaju znatne građevinske radove u pogledu dodavanja novih zidova koji će preuzeti potresne sile.



Slika 9. Tlocrtna dispozicija prizemlja – karakteristični TIP 3

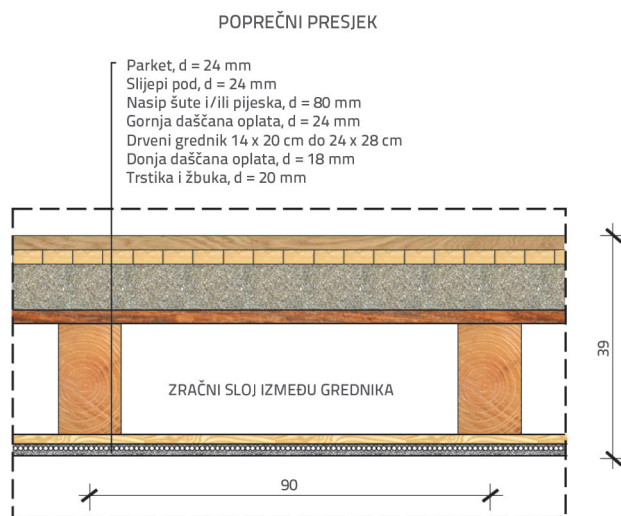
3. Međukatne konstrukcije povijesnih zgrada u Zagrebu

Međukatne konstrukcije uz prijenos vertikalnoga stalnog i korisnog opterećenja u potresnim područjima imaju i vrlo važnu zadaću osiguranja povezanosti građevine i raspodjele potresnih sila na zidove. Krajem 19. stoljeća i početkom 20. stoljeća najviše su u upotrebi bile drvene međukatne konstrukcije, raspona do 6 metara, uz minimalni svijetli raspon od 3,5 metara te uobičajenu debljinu od 30 do 55 cm, ovisno o tipu i načinu izvedbe [11]. Takav tip međukatnih konstrukcija predstavlja fleksibilnu dijafragmu koja nije na odgovarajući način povezana s glavnim nosivim zidovima, ne osigurava dovoljnu krutost te se inercijalne sile raspoređuju na zidove neovisno o njihovoj krutosti, a s obzirom na njihov udio u površini. Kod opisanog tipa međukatne konstrukcije može doći do lokalnih udara grednika u zidove na koje su oslonjeni, a uslijed nedovoljne povezanosti i nedostatka sidrenja može doći do lokalnog sloma zida (izbijanja opeke) na osloncima. Pri izradi numeričkih modela zidanih građevina nulti uvjet, koji mora biti zadovoljan kako bi globalni model mogao egzistirati, jest osiguravanje dovoljne povezanosti konstrukcije u zonama međukatnih konstrukcija. Ako navedena pretpostavka nije osigurana, proračun na, naprimjer, savijanje ili posmik u vlastitoj ravnini zida ne prikazuje realno ponašanje konstrukcije, jer postoji velika mogućnost aktivacije lokalnih mehanizama sloma zidanih elemenata. U radu [9] Jajčević i suradnici detaljno su opisali lokalne mehanizme sloma, način proračuna primjenjujući virtualni rad te detektirali tipične primjere lokalnih mehanizama od kojih je jedan povezan s otkazivanjem zida pročelja koji je uzrokovan upravo nedovoljnom povezanošću međukatnih konstrukcija s nosivim zidovima. Ovaj se rad ne bavi lokalnim mehanizmima otkazivanja izvan ravnine, već je studija slučaja bazirana na pojačanjima na temelju kojih je osigurana globalna povezanost konstrukcije.

3.1. Tipovi međukatnih konstrukcija

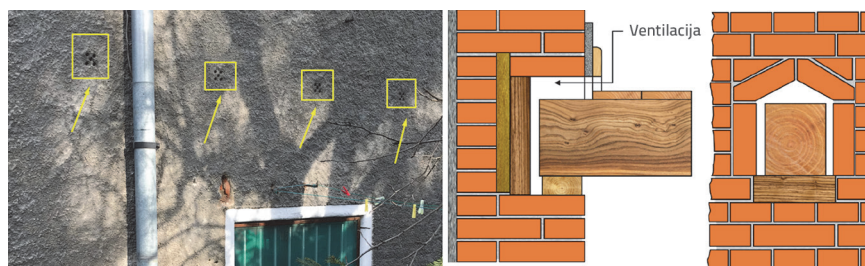
3.1.1. Međukatne konstrukcije s klasičnim drvenim grednikom

Međukatne konstrukcije izvedene od drvenih grednika dominantni su konstruktivni sustav u povijesnim građevinama u Zagrebu. Kod konstrukcija čija visina međukatne konstrukcije nije bila ograničena koristio se sustav s drvenim grednikom bez upuštenog nasipa. Debljina tog sustava je oko 39 cm, grednici se nalaze na razmacima najčešće do 90 cm, a dimenzije poprečnog presjeka variraju ovisno o rasponima stropova. Na drvene grednike postavljao se sloj dasaka, na koje se nanosio sloj pijeska ili šute u koji su se polagale blazinice za postavljanje gornje daščane oplata i u konačnici podne obloge. U pogledu tog sustava nalazio se sloj dasaka koji je bio čavlan za grednike, a na koji su se povezivali trska i sloj žbuke. Daščana oplata nije bila dodatno povezivana sa zidovima, a drveni grednici izvodili su se kao slobodno oslonjeni. Opisani sustav prikazan je na slici 10.



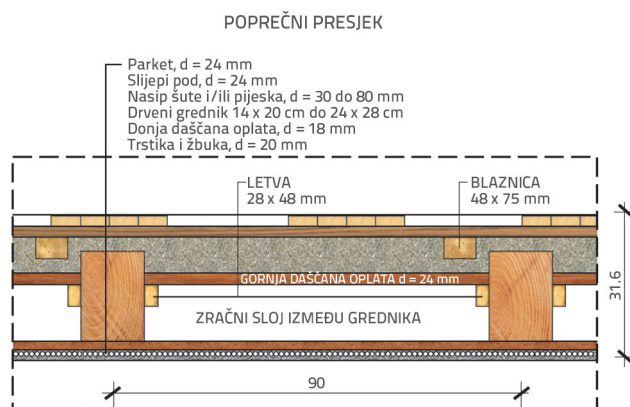
Slika 10. Poprečni presjek međukatne konstrukcije s klasičnim drvenim grednikom bez upuštenog nasipa

Vrlo sličan sustav s drvenim grednicima (slika 11.) predstavlja drugi tip koji se razlikuje samo po upuštenoj gornjoj daščanoj oplati. Na drvene su se grednike bočno postavljale letve ili



Slika 12. Perforirani gipsani elementi u zoni međukatne konstrukcije na pročelju te primjer ventilacije

štafle, na koje se oslanjala gornja daščana oplata. Izvedbom upuštene oplata izolacijski sloj šute ili pijeska djelomično se upuštao između drvenih grednika te se na taj način dobivala manja debljina međukatne konstrukcije. Pri izmjeri postojećih konstrukcija na temelju debljina međukatnih konstrukcija moguće je doći do preliminaranih pretpostavki o slojevima, vodeći se opisanim sustavima.



Slika 11. Poprečni presjek međukatne konstrukcije s klasičnim drvenim grednikom s upuštenim nasipom

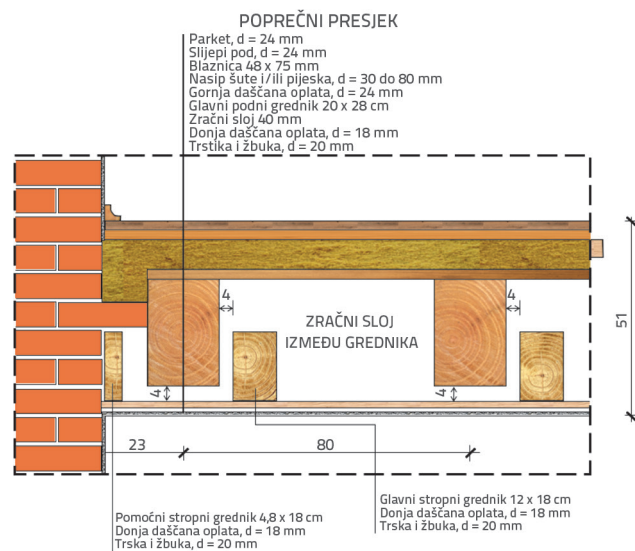
U prethodnim poglavljima je navedeno kako su drveni grednici u pravilu u zadovoljavajućemu stanju ako nisu mijenjane pozicije mokrih zona u stanovima i ako u konstrukciju nisu dodavani elementi prekomjerne vlažnosti koji dovode do razvoja bioloških nametnika. Jedan od razloga takvog stanja jest prozračivanje grednika koji na fasadnim zidovima često u zoni međukatnih konstrukcija na razmaku od 90 cm do 100 cm imaju perforirane gipsane pločice kako bi se osigurala povoljna mikroklima u međukatnoj konstrukciji. Taj je detalj kod sanacije ili pojačanja međukatne konstrukcije neophodno replicirati jer osigurava trajnost i predstavlja veliku konzervatorsku vrijednost (slika 12.).

3.1.2. Međukatne konstrukcije s dvostrukim drvenim grednikom

Sustav s dvostrukim drvenim grednikom prikazan na slici 13. koristio se kod objekata javne namjene kao što su zdravstvene ustanove ili škole, a kako bi se osigurala odvojena podna i stropna nosiva konstrukcija. Na taj se način sprječavao prijenos

zvuka i vibracija s jedne na drugu etažu. Također, sustav se koristio kod većih raspona. Drveni grednici postavljani su u dvije ravnine. Glavni podni grednik preuzimao je stalna i korisna uporabna opterećenja, dok je stropni grednik bio izmaknut iz ravnine od podnoga grednika kako bi se osigurala dilatacija te je preuzimao opterećenje samo od stropnih slojeva. Kod svih sustava s drvenim grednicima slojevi poda iznad

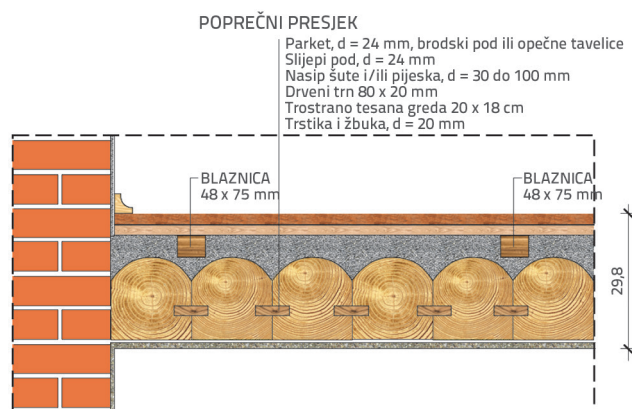
gornje daščane oplata i slojevi stropa u podgledu ne razlikuju se znatno. Glavni nedostatak tog sustava međukatne konstrukcije velika je visina koja iznosi oko 51 cm.



Slika 13. Poprečni presjek međukatne konstrukcije s dvostrukim grednikom

3.1.3. Međukatne konstrukcije s trostrano tesanim gredama

Međukatna konstrukcija s trostrano tesanim gredama prikazana na slici 14. jest sustav koji doprinosi većoj povezanosti glavnih nosivih zidnih elemenata te osigurava veću krutost u odnosu na klasične sustave s drvenim grednicima na razmaku od 90 cm do 100 cm. Najčešće se primjenjuje kod objekata koji datiraju iz sredine 19. stoljeća i koji su često pojedinačno zaštićena kulturna dobra.



Slika 14. Poprečni presjek međukatne konstrukcije s trostrano tesanim gredama

Također, primjena u povijesti vidljiva je kod objekata koja imaju skladišnu namjenu, čija su korisna uporabna opterećenja veća. Kod objekata koji datiraju s kraja 19. stoljeća uz klasični sustav

grednika u ostalim etažama trostrano tesane grede primjenjuju se za međukatne konstrukcije prema zoni tavana na koje se u sloj nasipa polažu opečne pločice (tavelice) debljine 4 cm kako bi se osigurala požarna otpornost i spriječilo širenje požara iz zone tavana. Tavanski su prostori u povijesti imali skladišnu funkciju te je rizik za nastanak i širenje požara na ostali dio objekta bio veći. Zanimljivo je spomenuti kako su "1868. godine donesene Bečke norme vezane za zaštitu od požara koje su propisivale ovaj način zaštite od požara" [11].

U tom su sustavu drveni grednici trostrano tesani, dok je s gornje strane ostavljena izvorna zaobljena forma trupca (slika 15.). Gredici su najčešće poprečnog presjeka 20 cm x 18 cm i postavljali su se jedan do drugoga. Vidljivo je i kako su međusobno povezivani drvenim trnovima kako bi se ostvarili bolja povezanost i krutost. Na gredama izvodio se sloj nasipa različite visine, ovisno o poziciji, u koji su se postavljali blazinice i daščana oplata ako se izvodio parket ili su se opečne pločice (tavelice) izravno postavljale na sloj nasipa. Uz veću krutost i mogućnost preuzimanja većeg opterećenja tu međukatnu konstrukciju odlikuje mala visina, ali i višestruko veći utrošak drveta, što posredno generira i višestruko višu cijenu.

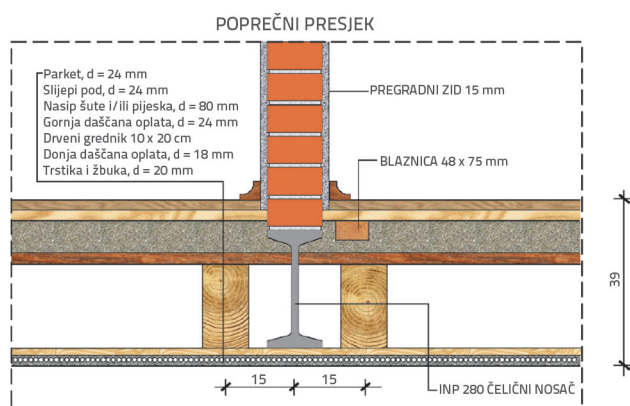


Slika 15. Međukatna konstrukcija izvedena od trostrano tesanih greda u stambenoj zgradi i monumentalnoj građevini

3.1.4. Međukatne konstrukcije s drvenim grednikom i čeličnim profilima

Čelični profili u međukatnim konstrukcijama povijesnih građevina koriste se u zonama gdje upotreba drvenih elemenata s obzirom na njihove mehaničke karakteristike i ograničenja materijala ne bi bila ekonomična. Kod tlocrtnih dispozicija, najčešće uglovnica koje nemaju pravilnu kvadratnu ili pravokutnu formu, čelični se grednici postavljaju u zonama velikih koncentracija opterećenja ili velikih raspona. Na tako izvedene čelične grednike postavljaju se drveni grednici koji preuzimaju opterećenja u kraćemu nosivom smjeru. Koncipiranjem nosivog sustava na opisani način konstrukcija se sastoji od glavnih čeličnih i sekundarnih drvenih grednika te se optimalno koriste mehaničke karakteristike pojedinog materijala. Početkom 20. stoljeća kod stropnih konstrukcija reprezentativnijih javnih zgrada većih raspona korišteni su čelični profili s armiranobetonskom pločom debljine 10 cm između čeličnih profila, kao i u slučajevima sekundarnih drvenih grednika okomito na glavne nosače. Visina čeličnih profila je kod tih konstrukcija također veća od debljine

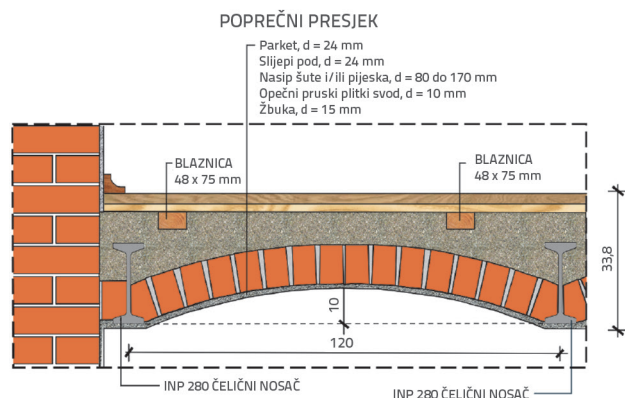
armiranobetonske ploče, a prostor do vrha čeličnog profila služio je kao sloj za zvučnu i toplinsku izolaciju te je ispunjen šutom. Druga zona gdje je vidljiva primjena čeličnih grednika jest ona ispod pregradnih opečnih zidova, kada se zidovi ne izvode kontinuirano, a što je prikazano na slici 16. Opečni elementi imaju veliku vlastitu težinu, a drveni grednici ne mogu zadovoljiti tražene uvjete progiba ako se radi o srednjim ili većim rasponima te je čelična traverza na tim pozicijama optimalno rješenje. Pri vizualnome pregledu objekta pozicije čeličnih elementa nije moguće detektirati bez istražnih radova jer su upušteni u podne slojeve. Podni i stropni slojevi tog tipa međukatne konstrukcije istovjetni su kao i kod međukatnih konstrukcija s klasičnim drvenim grednicima bez upuštanja nasipa između grednika.



Slika 16. Poprečni presjek međukatne konstrukcije s drvenim grednikom i čeličnim profilima

3.1.5. Međukatne konstrukcije sa zidanim plitkim svodovima i traverzama

Izvedba opečnog svoda pronašla je svoju primjenu u zonama iznad podruma ili otvorenog prizemlja kako bi se konstrukcija zaštitila od prodora vlage iz nižih etaža, ali i širenja vatre prema stambenim prostorima (slika 17.).



Slika 17. Poprečni presjek međukatne konstrukcije sa zidanim plitkim svodovima i traverzama

Kod manjih raspona koriste se polukružni svodovi, ali češće se koristi tzv. pruski svod zbog male visine i lakše prilagodbe projektnim zahtjevima. Na kraju svakog svoda postavljaju se čelične traverze, a visina svoda iznosi oko desetine raspona. Svodovi se zidaju u blago zakrivljenoj formi, a sustav se koristi uz već navedene pozicije u zonama hodnika i stubišta, naprimjer, za izvedbu podesta gdje su uvjeti požarnog i uporabnog opterećenja izraženi.

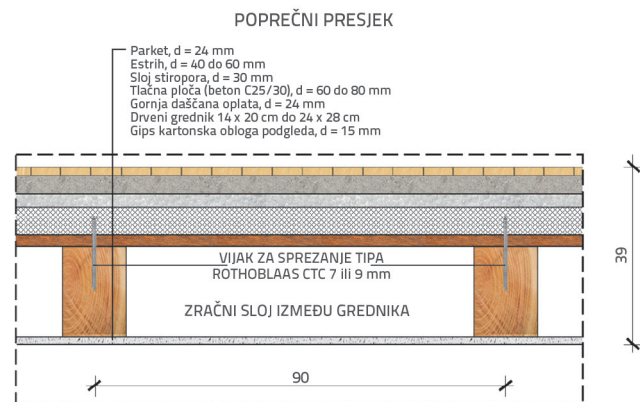
3.2. Metode pojačanja drvenih međukatnih konstrukcija

Pri sanaciji i pojačanju drvenih međukatnih konstrukcija prvo treba ocijeniti postojeće stanje konstrukcije. Mnoge nedestruktivne metode i modeli mogu biti primijenjeni u cilju ocjenjivanja stanja i mehaničko-fizikalnih svojstava drvene građe, elemenata i detalja, ali sve metode imaju određena ograničenja [23]. Pri konstrukcijskoj obnovi međukatne konstrukcije stvaraju se samo točkasto u nekoliko pozicija u objektu te kvalitetne istražne radove i ispitivanja često nije moguće provesti.

Pojačanje međukatnih konstrukcija može se podijeliti u nekoliko skupina. Tijekom potresne obnove redovito se izvodi neki od tipova tlačne ploče koja ukružuje i povezuje konstrukciju sa zidovima te se navedeni radovi mogu svrstati u prvu skupinu. Izvedba tlačne ploče na postojećoj stropnoj konstrukciji ne smije se promatrati samo kao zahvat kojim se povećava nosivost stropa na vertikalna opterećenja. Njezina primarna konstruktivna uloga u zidanome sustavu jest formiranje dostatno krute horizontalne dijafragme, sposobne za prihvati i raspodjelu horizontalnih seizmičkih sila prema vertikalnim nosivim elementima. Time se smanjuje nepovoljno lokalno ponašanje pojedinih stropnih polja i poboljšava prostorno djelovanje građevine kao cjeline. Takav se učinak može ostvariti samo ako je tlačna ploča odgovarajuće povezana s obodnim i unutarnjim nosivim zidovima. Povezivanje dijafragme i ziđa mora omogućiti siguran prijenos posmičnih i vlačnih sila na zidove te spriječiti odvajanje stropne konstrukcije od vertikalnih elemenata tijekom potresnog djelovanja. U protivnome izvedena ploča ostaje lokalno ojačanje stropa, bez pouzdanog doprinosa globalnoj seizmičkoj otpornosti građevine. Detalji povezivanja ovise o geometriji građevine, stanju ziđa, vrsti stropne konstrukcije, mehaničkim svojstvima materijala i mogućim konzervatorskim ograničenjima. U praksi se ono može ostvariti sidrenjem ploče u zidove, izvedbom rubnih armiranobetonskih ili čeličnih elemenata, povezivanjem s postojećim ili novim serklažima (ako oni postoje), ugradnjom čeličnih zatega i sidara ili drugim mehanički kompatibilnim rješenjima. Bez takvih veza nije moguće pretpostaviti zajedničko djelovanje horizontalne dijafragme i nosivih zidova, ni pouzdano ocijeniti stvarni doprinos zahvata seizmičkome poboljšanju zgrade. U drugu skupinu ojačanja ubrajaju se radovi na povezivanju drvenih grednika sa zidovima uz točkasto sanaciju grednika, ako su vidljive vlažne zone ili biološki učinci, dok bi treća skupina obuhvaćala zahvate na pojačanju grednika kod prekomjernih progiba ili linijskih oštećenja dodavanjem novih drvenih ili čeličnih elemenata.

3.2.1. Izvedba tlačne ploče

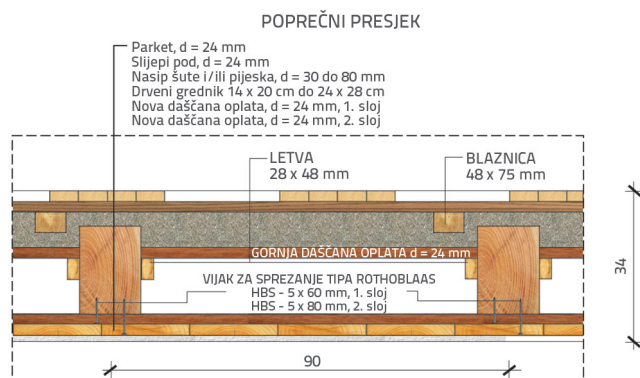
Pojačanje drvene međukatne konstrukcije izvedbom tlačne ploče drvo-beton (slika 18.) jedan je od najracionalnijih zahvata jer se maksimalno koriste visoke vlačne čvrstoće drveta u vlačnoj zoni presjeka i visoke tlačne čvrstoće betona u tlačnoj zoni presjeka. Navedena dva materijala međusobno se vijcima visoke čvrstoće i duktilnosti povezuju u cjelinu, a koji preko posmika prenose naprezanja iz jednog elementa u drugi. Pri odabiru spojnih sredstava treba težiti spajalu koji ima malu popustljivost kako bi se ostvarilo što manje klizanje spojnog sredstva. Krutost i čvrstoća sustava moraju biti kvantificirani i uzeti u obzir pri dimenzioniranju te posebnu pozornost treba usmjeriti na duktilnost samog spoja [24]. Taj tip nosača u praksi se proračunava γ -metodom, koja se primjenjuje za elastično područje ponašanja. Daanoun i suradnici u radu [25] analiziraju ponašanje spregnutih nosača drvo-beton u nelinearnome području ponašanja izradom numeričkih modela u naprednim programskim paketima. Debljina betonskih ploča koje se upotrebljavaju nisu obično veće od 8 cm, jer bi se u suprotnome znatno povećala vlastita težina cijele konstrukcije [26]. Povećanje tlačne ploče iznad 8 cm ne doprinosi povećanju otpornosti poprečnog presjeka (grednici su relativno male visine) te je zbog toga korištenje debljih ploča neracionalno.



Slika 18. Pojačanje međukatne konstrukcije s klasičnim drvenim grednicama bez upuštenog nasipa pomoću armanobetonke tlačne ploče

Armanobetonka tlačna ploča povezuje se s drvenim grednicama najčešće vijcima koji se postavljaju u jedan ili dva reda, ovisno o širini drvenog elementa, a koji se ugrađuju pod kutom od 30 ili 45 stupnjeva tako da se u svaku poziciju postavlja jedan vijak ili se u svaki čvor postavljaju dva vijka u X kako bi se osigurala veća nosivost. U zonama ležaja vijci se zbog većih posmičnih naprezanja polažu na manjemu razmaku, dok se zbog ekonomičnosti i uštede kako se odmiče od ležaja ugrađuju na većemu razmaku. Nakon ugradnje vijaka u tlačnu zonu ugrađuje se armaturna mreža, koja se dodatno sidri u zidove. Izvedbom tog ojačanja rasterećuje se konstrukcija uklanjanjem šute, a nakon izvedbe smanjuje se progib u odnosu na postojeće stanje te povećava nosivost na vertikalna djelovanja.

Uz beton kao materijal kojim se izvodi tlačna ploča moguće je koristiti i materijale od drva ili na bazi drva u što se ubrajaju CLT ploče, lamelirane lijepljene ploče, furnirske ploče i LVL ploče. Mirra u svojoj doktorskoj disertaciji i znanstvenim publikacijama daje detaljan pregled ojačanja s različitim tipovima ploča [27]. U povijesnoj urbanoj cjelini grada Zagreba u konstrukcijskoj se obnovi često primjenjuju sustavi kod kojih se grednici s donje strane ukrućuju uklanjanjem sloja podgleda bez intervencija u ostale međukatne slojeve, a jedan od tih tipova vidljiv je na slici 19. Važno je naglasiti kako se radi o vrlo diskutabilnome rješenju s gledišta vertikalnih djelovanja zbog velikih dugotrajnih progiba koji su ostvareni eksploatacijom objekata.



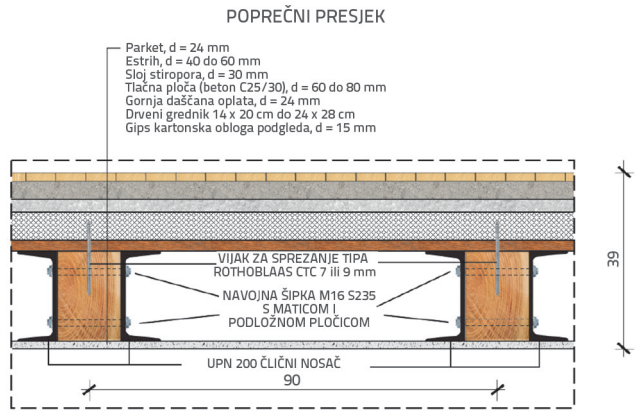
Slika 19. Ojačanje međukatne konstrukcije s klasičnim drvenim grednicama i upuštenim nasipom plošnim ukrućivanjem s donje strane grednika

Parisi i Piazza [28] provodili su ispitivanja međukatnih konstrukcija s različitim tipovima ojačanja te su za sva ispitivanja kreirane krivulje kapaciteta. Kod neojačane konstrukcije dolazi do središnjeg pomaka od 50 mm već kod resultantne sile od 80 kN, što pokazuje da su drvene međukatne konstrukcije u postojećemu stanju vrlo fleksibilne. Podaskavanjem grednika dvama slojevima dasaka pri resultantnoj sili od 350 kN dolazi do središnjeg pomaka od 45 mm, dok se krutost dodatno povećava dodavanjem perforiranih čeličnih traka. Tri sloja furnirske ploče zalijepljene na drvene grede i armanobetonka spregnuta ploča u provedenome ispitivanju osiguravaju najveće krutosti i za resultantnu silu od 300 kN središnji pomak manji je od 5 mm.

3.2.2. Pojačavanje grednika linijskim elementima

Drveni grednici u međukatnim konstrukcijama opterećeni su vlastitom težinom konstrukcije i dugotrajnim stalnim opterećenjem koje je uzrokovalo dugotrajne progibe. Kako bio se proveli sanacija i ojačanje prekomjerno prognutih konstrukcija, zona s prekomjernim vlaženjem ili zona biološke degradacije primjenjuju se linijska ojačanja u vidu drvenih elementa ili čeličnih UNP profila. Novi se elementi postavljaju uz postojeće, povezuju navojnim šipkama ili vijcima za drvo te preuzimaju dio opterećenja s drvenih grednika. Ugradnja je u pravilu obostrana, a kod nalijeganja čeličnog elementa na zidove neophodno je izvesti podlijevanje mortovima visoke čvrstoće kako bi se

osigurao prijenos opterećenja. Na slici 20. prikazan je sustav u kojemu se obostrano ugrađuju UPN 200 čelični profili, a izvedba opisanog tipa ojačanja moguća je isključivo kod konstrukcija koje nemaju upušteni nasip, ako se ne uklanjaju podni slojevi, već se radovi izvode iz zone podgleda.



Slika 20. Ojačanje drvenog grednika čeličnim UPN profilom

4. Studija slučaja

Nakon što su provedene analize korištenih građevnih materijala, konstruktivnih sustava i tlocrtnih dispozicija, kroz studije slučaja obrađena su tri tipa građevina kao karakteristične zagrebačke povijesne stambene zgrade. Tipovi su opisani u poglavlju 2.2., a u programu 3Muri [29] izrađeno je devet numeričkih modela, za svaki tip po tri varijante. Uz izvornu konstrukciju koja se analizira u neojačanoj stanju svaka od karakterističnih tlocrtnih dispozicija analizirana je s izvedenim ojačanjem međukatne konstrukcije drvenom lameliranom pločom debljine 6 cm te spregnutom armiranobetonskom pločom debljine 8 cm. Kroz navedene numeričke modele analiziran je utjecaj međukatnih konstrukcija na zidanu konstrukciju, a nisu se provodila dodatna ojačanja vertikalnih zidanih elemenata kako bi usporedbe bile relevantne. Proračun je napravljen samo za granično stanje znatnog oštećenja, što je dopušteno ako se konstrukcija pojačava do maksimalno razine 2.

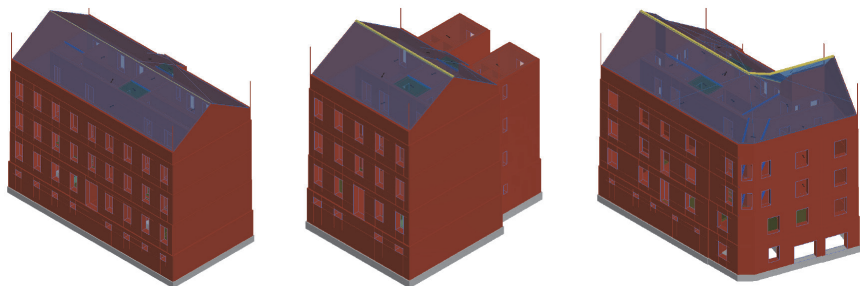
Mehaničke karakteristike materijala nisu ispitivane na terenu, već su kao podloga za donošenje zaključaka o izboru mehaničkih svojstava materijala primjenjivani radovi [14, 16, 30]. S obzirom na navedenu literaturu i dostupna ispitivanja građevina slične godine gradnje i konstruktivnih sustava, u svim numeričkim modelima korištene su srednje vrijednosti svojstva zida prikazana na slici 21. Modul elastičnosti koji se primjenjivao u numeričkim modelima iznosi 1500 N/mm², modul posmika 500 N/mm², dok je pretpostavljena posmična čvrstoća 0,19 N/mm². Važno je naglasiti kako su navedene vrijednosti pretpostavka autora kako bi se dobili usporedivi rezultati za numeričke modele, a pri projektiranju ojačanja konstrukcija u praksi neophodno je provoditi ispitivanja mehaničkih karakteristika i navedene vrijednosti nije preporučljivo nekritički primijeniti. Vrijednosti posmične čvrstoće koje se pronalaze u literaturi često su ispod granice od 0,15 N/mm². U prikazanim analizama isti su faktor povjerenja i ista razina znanja primijenjeni za sve analizirane

građevine kako bi se omogućila dosljedna usporedba rezultata između različitih konstruktivnih tipologija. Budući da je cilj rada usporediti ponašanja različitih zgrada pri istim pretpostavkama o materijalu, za sve su modele usvojene jednake mehaničke karakteristike zida. Time je smanjen utjecaj varijabilnosti materijala, a naglasak je stavljen na razlike koje proizlaze iz geometrije, rasporeda nosivih zidova, konstrukcijskog sustava i tipoloških obilježja pojedinih građevina. Usvojene vrijednosti mehaničkih karakteristika materijala nalaze se unutar raspona koji se uobičajeno primjenjuju u projektantskoj praksi za postojeće zidane građevine slične tipologije, osobito kada se provodi komparativna numerička analiza, a ne proračun pojedinačne građevine temeljen na detaljnome ispitivanju materijala. Pri interpretaciji rezultata potrebno je naglasiti da provedene analize nisu usmjerene na određivanje apsolutne seizmičke otpornosti svake pojedine građevine na temelju individualno ispitanih svojstava materijala, nego na međusobnu usporedbu različitih tipoloških modela pod jednakim proračunskim pretpostavkama. Zbog toga su mehanička svojstva materijala, uključujući E, G i posmičnu čvrstoću, namjerno zadržana jednakima u svim modelima.

Mehaničke karakteristike drvenih grednika s kojima su provedeni proračuni klasa je čvrstoće punoga mekog drva C20, uzimajući u obzir godinu gradnje i degradaciju materijala. Kod ojačanih varijanti međukatne konstrukcije primjenjuju se lamelirano lijepljeno drvo klase čvrstoće GL24h i armirani beton C25/30 za spregnutu ploču. Vertikalna opterećena konstrukcije zadana su prema [31, 32]. Dodatno stalno opterećenje međukatne konstrukcije izvornog stanja stropa iznad podruma iznosi $g_k = 5,34 \text{ kN/m}^2$, strop ostalih etaža iznosi između $g_k = 3,48 \text{ do } 4,29 \text{ kN/m}^2$, ovisno o debljini, dok je strop prema tavanu između $g_k = 3,08 \text{ – } 3,51 \text{ kN/m}^2$, ovisno u poziciji tavana ili ravnoga krova. Seizmičko opterećenje određeno je prema [33, 34] te je ubrzanje tla za 475-godišnji povratni period $a_{475} = 0,25 \text{ g}$, dok je ubrzanje tla za 95-godišnji povratni period $a_{95} = 0,13 \text{ g}$.

Tablica 2. Mehaničke karakteristike materijala za sve analizirane tipove

Mehanička svojstva	Opečno zide
Modul elastičnosti, E [N/mm²]	1.500
Modul posmika, G [N/mm²]	500
w [kg/m³]	1.835
f _m [N/mm²]	4,00
f _k [N/mm²]	3,00
Posmična čvrstoća, T [N/mm²]	0,19
f _{vim} [N/mm²]	0,65
CF	1,35
γ _m	2,00
Granična posmična deformacija	0,0053
Granična savojna deformacija	0,0107
φ _∞	0,0
Stanje oštećenja	Postojeće

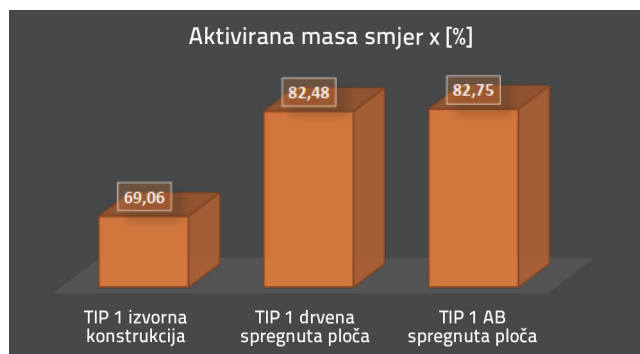


Slika 22. Numerički modeli u TIP 1, TIP 2 i TIP 3 u programu 3Muri [29]

Na temelju definirane geometrije i opterećenja za tri tipa konstrukcije pripremljeni su numerički modeli izvornog stanja te s pojačanjima, provedena je diskretizacija sustava i generirani su pojednostavljeni modeli s makroelementima na kojima je proveden nelinearni proračun N2 metodom postupnoga guranja.

4.1. Analiza i usporedba rezultata

Analiza i usporedba rezultata provedena je na temelju ukupne aktivirane mase po tonovima, u kojima je postotak veći od 5 % na bazi ostvarenog pomaka konstrukcije, te izračuna IZO koeficijenta koji prema nacionalnoj regulativi predstavlja postotak nosivosti konstrukcije u usporedbi sa suvremenim propisima [35, 36]. Ukupna aktivirana masa konstrukcije TIP 1 za izvornu konstrukciju te ojačanu konstrukciju s drvenom i armiranobetonskom spregnutom pločom prikazan je na slici 23. za smjer x i slici 24. za smjer y.

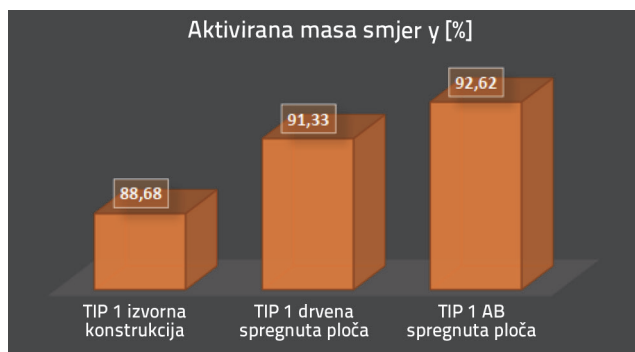


Slika 23. Suma aktivirane mase tonova s masom većom od 5 % za konstrukciju TIP 1 i smjer x

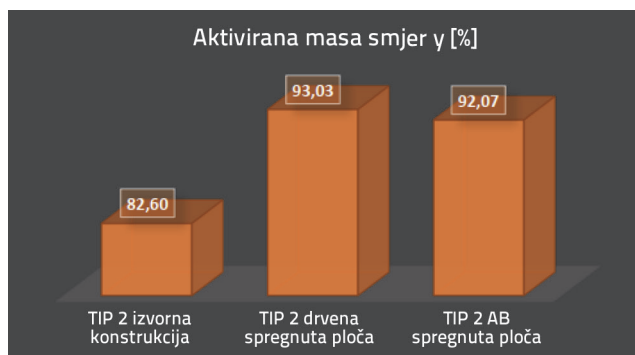
Te slike prikazuju kako izvorna konstrukcija ima najmanju aktiviranu masu za oba smjera. Bolja povezanost konstrukcije postiže se ojačanjem drvenom spregnutom pločom, dok je najveća aktivirana masa zabilježena za oba smjera kod armiranobetonske spregnute ploče. Kod konstrukcije TIP 3 suma aktivirane mase također se povećava izvedbom drvene spregnute ploče, dok je najveća povezanost konstrukcije vidljiva izvedbom armiranobetonske spregnute ploče.

TIP 2 tlocrtne dispozicije za smjer x prati postotke aktivirane mase kao i kod tlocrtne dispozicije TIP-a 1 i 3, dok je kod smjera y vidljivo kako je aktivirana masa konstrukcije ojačane spregnutom

pločom 93,03 %, a kod ojačanja armiranobetonskom spregnutom pločom 92,07 % (slika 25.). Analizom tlocrtne dispozicije i usmjerenja međukatnih konstrukcija kod TIP-a 2 vidljivo je kako su međukatne konstrukcije položene u dva smjera, a nosivi zidovi u dvorišnome dijelu također su postavljeni u dva smjera uz veliku razvedenost tlocrta te se navedeno nameće kao uzrok takve raspodjele masa.



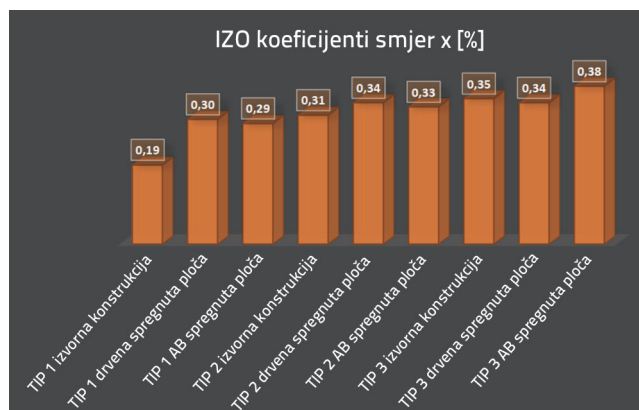
Slika 24. Suma aktivirane mase tonova s masom većom od 5 % za konstrukciju TIP 1 i smjer y



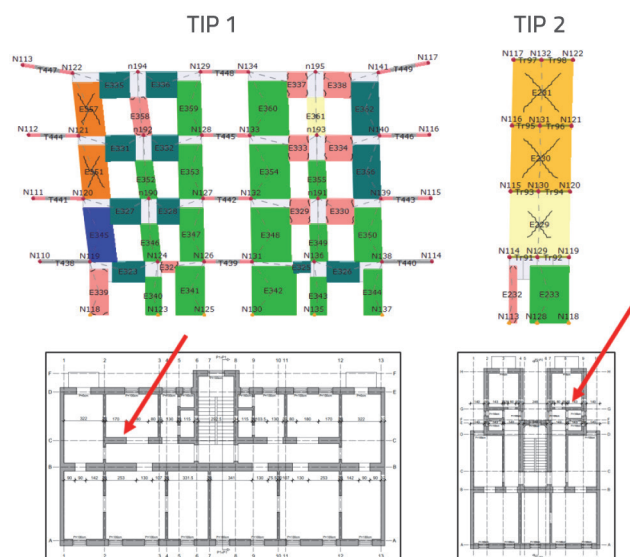
Slika 25. Suma aktivirane mase tonova s masom većom od 5 % za konstrukciju TIP 2 i smjer y

Prema svim dostupnim podacima, vidljivo je kako dva razmatrana tipa ojačanja osiguravaju bolju povezanost konstrukcije, povećavaju aktivaciju većeg postotka mase te na taj način izravno utječu na izbjegavanje aktivacije lokalnih mehanizama sloma зида, tj. na otkazivanje зида izvan ravnine. Opisani zahvati neophodni su korak pri ojačanju građevina na potresna djelovanja, a iste nije moguće zamijeniti ojačanjem vertikalnih elemenata.

Izračunom IZO koeficijenata vidljivo je kako se postotak nosivosti konstrukcije povezivanjem u međukatnim ravninama znatno povećava kod TIP-a 1 za smjer x jer predmetna dispozicija u označenoj ravnini nema zidove koji se protežu do kraja objekta (slike 26. i 27.), a vrlo kratki zidovi ulaze u stanje znatnog oštećenja kod vrlo malih pomaka.



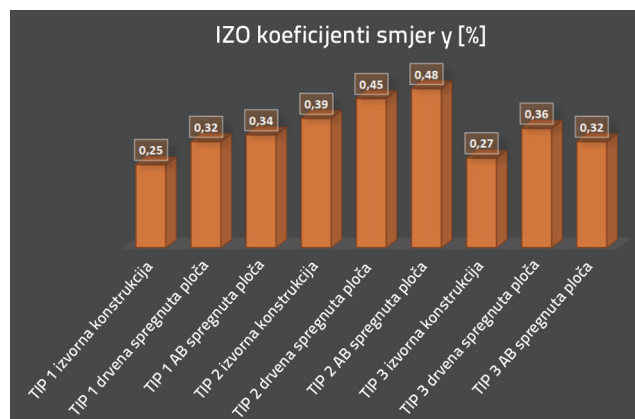
Slika 26. IZO koeficijenti konstrukcija za smjer x



Slika 27. Kritične pozicije za izvorno stanje TIP 1 i ojačano stanje drvenom pločom TIP 2, smjer x

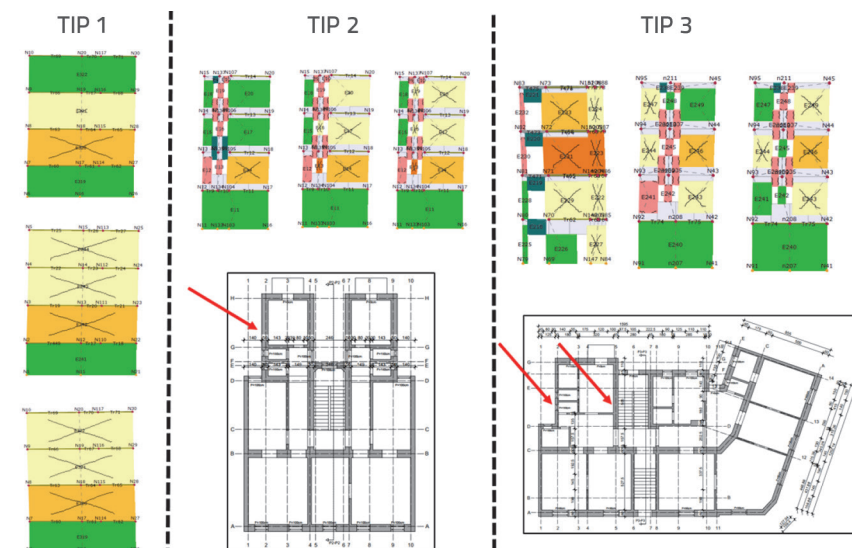
Ostale tlocrtne dispozicije i uz ojačanja nemaju znatno povećanje nosivosti izvedbom ojačanja jer su kapaciteti nosivosti vertikalnih elemenata premašeni, a pozicija zidova u tlocrtu i uz povezivanje konstrukcije i povoljniju raspodjelu inercijalnih sila i dalje manifestiraju vrlo velika naprezanja u kritičnim pozicijama. Neophodno je napomenuti kako su drveni grednici pretežno oslonjeni na uzdužne zidove (smjer x), što dovodi do znatnih vrijednosti uzdužnih tlačnih sila u zidovima koja kod provjere na posmik djeluje povoljno. Na slici 28. prikazane su vrijednosti IZO koeficijenta za sve analizirane tipove i pojačanja prema kojima je vidljivo kako postotak nosivosti konstrukcije za ojačano stanje drvenom pločom i

spregnutom armiranobetonskom pločom raste između 7 % i 10 % bez ojačanja vertikalnih elemenata.

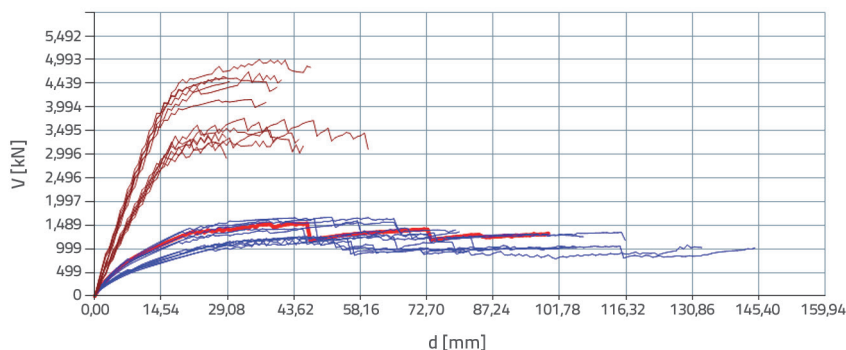


Slika 28. IZO koeficijenti konstrukcija za smjer y

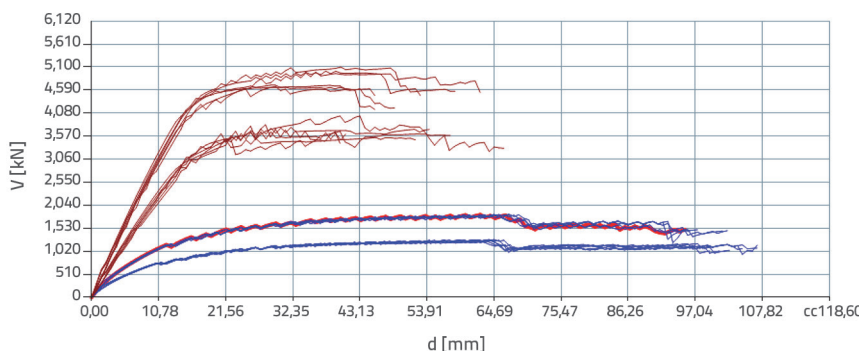
Kod TIP-a 1 i 2 drvena spregnuta ploča daje manju nosivost od armiranobetonske spregnuta ploče, dok kod TIP-a 3 drvena spregnuta ploča osigurava 36 % nosivosti, a armiranobetonska spregnuta ploča 32 % nosivosti u usporedbi sa suvremenim eurokodovim propisima. Kod svih tipova i načina ojačanja iste pozicije zidova ulaze u stanje znatnog oštećenja, ali povezana ojačana konstrukcija osigurava veći pomak i povoljniju raspodjelu potresnih sila. Inicijalna nepovezana konstrukcija redovito u smjeru y ima isključivo nepovezane tanke pregradne zidove na koje nisu oslanjane međukatne konstrukcije. Kod povezivanja konstrukcije u smjeru y intervencijom u međukatne konstrukcije općenito se postiže povećanje postotka nosivosti u usporedbi sa suvremenim propisima, ali puni kapacitet konstrukcije ostvaruje se ojačanjem vertikalnih opečnih zidova u kombinaciji s međukatnim konstrukcijama. Analizom krivulja kapaciteta prikazanih na slikama 30. i 31. za TIP 2 vidljivo je kako se ojačanjem konstrukcije armiranobetonskom spregnutom



Slika 29. Kritične pozicije za tri tipa konstrukcije u izvornome i pojačanome stanju



Slika 30. Krivulja kapaciteta za 24 analize TIP 2 – izvorno stanje

Slika 31. Krivulja kapaciteta za 24 analize TIP 2 – ojačanje AB spregnutom pločom $d = 8$ cm

pločom za smjer y uz ostvareni pomak povećava i vrijednost poprečne sile, dok je za smjer x rast ostvarene poprečne sile i kapacitet konstrukcije zanemariv.

5. Zaključak

U radu sustavno su analizirane drvene međukatne konstrukcije kao dominantan tip međukatnih sustava u nearmiranim zidanim zgradama zagrebačke tradicionalne (austroougarske) gradnje, pri čemu su obuhvaćeni njihova tipologija, konstruktivne značajke te utjecaj na globalno potresno ponašanje građevina. Pokazano je da takvi sustavi, zbog svoje ograničene krutosti u ravni i nedostatne povezanosti s nosivim zidovima, ne osiguravaju učinkovitu raspodjelu horizontalnih djelovanja, što rezultira nepovoljnim prostornim odzivom konstrukcije. Time drvene međukatne konstrukcije predstavljaju jedan od dominantnih izvora potresne ranjivosti promatranoga fonda zgrada.

Analizom tipičnih tlocrtnih dispozicija i odnosa međukatnih i vertikalnih nosivih elemenata dodatno je potvrđeno da izostanak *box* djelovanja, karakterističnog za suvremene zidane sustave s armiranobetonskim pločama, ima znatan utjecaj na razinu oštećenja. U tome kontekstu razmotrene su i

najčešće metode ojačanja međukatnih konstrukcija, ponajprije u obliku drvenih i armiranobetonskih spregnutih ploča, kojima se povećava krutost u ravni, poboljšava međusobna povezanost konstrukcijskih elemenata te omogućuje ravnomjernija raspodjela potresnih sila uz aktivaciju većeg udjela mase sustava. Zahvati samo na ojačanju drvenih međukatnih konstrukcija ne mogu dovesti građevinu do tražene razine obnove, tj. IZO koeficijenta prema [35–37], te su zahvati ojačanja na vertikalnim nosivim elementima neophodni. Također, intervencije samo u vertikalne nosive elemente neće dovesti do željenog cilja, već će kod potresa većih intenziteta dolaziti do aktivacije lokalnih mehanizama otkazivanja zida izvan ravni. Time se jasno potvrđuje potreba za integriranim pristupom ojačanju koji obuhvaća i međukatne konstrukcije i vertikalne nosive elemente, uz osiguranje njihove učinkovite međusobne interakcije.

U poslijepotresnoj obnovi Zagreba uočen je izražen trend uklanjanja i zamjene drvenih konstrukcijskih elemenata, osobito u području krovišta, gdje se tradicionalni sustavi sustavno uklanjaju i zamjenjuju novim materijalima [38]. Takva praksa odražava očitu nedosljednost u pristupu obnovi, a zidani se dijelovi konstrukcije redovito tretiraju kao vrijedna baština koju je potrebno očuvati, drvo se, unatoč svojoj jasno definiranoj ulozi nosivoga inženjerskog materijala, zanemaruje i često neopravdano uklanja. Time se zanemaruje činjenica da drvene konstrukcije, uz odgovarajuću sanaciju i ciljano ojačanje, mogu zadovoljiti suvremene zahtjeve nosivosti i uporabljivosti. Posljedično, drveni elementi nerijetko završavaju kao otpad (slika 32.), čime se ne gubi samo materijalna vrijednost, već i izvorna konstruktivna logika i autentičnost sustava.



Slika 32. Demontirani drveni glavni nosivi elementi u konstrukcijskoj obnovi

LITERATURA

- [1] Kolar, M.: Urbanistički razvoj Zagreba tijekom 17. i 18. stoljeća, Zagreb, 2014.
- [2] Kolar, M.: Urbanistički razvoj Zagreba tijekom 17. i 18. stoljeća, dostupno na: <https://darkoantolkovic.wordpress.com/2019/01/24/urbanisticki-razvoj-zagreba-tijekom-17-i-18-stoljeca>, pristupljeno: 16. travnja 2026.
- [3] Uroš, M., Todorčić, M., Crnogorac, M., Atalić, J., Šavor Novak, M., Lakušić, S.: Potresno inženjerstvo – Obnova zidanih zgrada, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2021.
- [4] Šavor Novak, M., Uroš, M., Atalić, J., Herak, M., Demšić, M., Baniček, M., Lazarević, D., Bijelić, N., Crnogorac, M., Todorčić, M.: Potres u Zagrebu 22. ožujka 2020. – preliminarni izvještaj o seizmološkim istraživanjima i oštećenjima zgrada, GRAĐEVINAR, 72 (2020) 10, pp. 843–867.
- [5] Moretić, A., Chieffo, N., Stepinac, M., Lourenço, P.B.: Vulnerability assessment of historical building aggregates in Zagreb: implementation of a macroseismic approach, Bulletin of Earthquake Engineering, 21 (2023).
- [6] Stepinac, M., Ožić, K., Ninčević, A., Funari, M.F., Lourenço, P.B.: A digital tool based on code indicators to assess the seismic behaviour of existing masonry structures: Application to Croatian residential buildings, Structures, 58 (2023), pp. 1–10.
- [7] HRN EN 1990: Eurokod – Osnove projektiranja konstrukcija, Hrvatski zavod za norme, Zagreb, 2011.
- [8] HRN EN 1990:2011/NA: Eurokod – Osnove projektiranja konstrukcija – Nacionalni dodatak, Hrvatski zavod za norme, Zagreb, 2011.
- [9] Jajčević, K., Demšić, M., Šavor Novak, M., Atalić, J., Uroš, M.: Prevrtanje nepridržanih zidova – prevladavajući mehanizam oštećenja starih zidanih zgrada, GRAĐEVINAR, 77 (2025), pp. 1057–1069.
- [10] Kahraman, O., Kaçın, S.: Detaljna analiza šteta nastalih u pokrajini Hatay uslijed potresa u Pazarcıku i Elbistanu u veljači 2023., GRAĐEVINAR, 77 (2025) 10, pp. 877–887.
- [11] Čaušević, A., Rustempašić, N.: Rekonstrukcije zidanih objekata visokogradnje, Univerzitet u Sarajevu, Sarajevo, 2014.
- [12] Boynton, R.S.: Chemistry and Technology of Lime and Limestone, John Wiley & Sons, New York, 1996.
- [13] Wingate, M.: Small-scale Lime Burning: A Practical Introduction, Intermediate Technology Publications, London, 1985.
- [14] Ortega, J.H., Stepinac, M., Lulić, L., Nunez, G.M., Saloustros, S., Aranha, C., Greco, F.: Correlation between sonic pulse velocity and flat-jack tests for the estimation of the elastic properties of unreinforced brick masonry: Case studies from Croatia, Case Studies in Construction Materials, 18 (2023).
- [15] Lulić, L.: Određivanje mehaničkih svojstava narmiranog ziđa od pune opeke nerazornim i polurazornim metodama, doktorski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2024.
- [16] Stepinac, M., Lulić, L., Damjanović, D., Duvnjak, I., Bartolac, M., Lourenço, P.B.: Experimental Evaluation of Unreinforced Brick Masonry Mechanical Properties by the Flat-Jack Method – an Extensive Campaign in Croatia, International Journal of Architectural Heritage, 18 (2024) 4, pp. 691–708.
- [17] Cruz, H., Yeomans, D., Tsakanika, E., Macchioni, N., Jorissen, A., Touza, M., Mannucci, M., Lourenço, P. B.: Guidelines for On-Site Assessment of Historic Timber Structures, International Journal of Architectural Heritage, 9 (2015) 3, pp. 277–289.
- [18] Dietsch, P., Kreuzinger, H.: Guideline on the assessment of timber structures, Engineering Structures, 33 (2011) 11, pp. 2983–2986.
- [19] Stepinac, M., Rajčić, V., Barbalić, J.: Pregled i ocjena stanja postojećih drvenih konstrukcija, GRAĐEVINAR, 69 (2017) 9, pp. 861–873.
- [20] Perković, N., Stepinac, M., Rajčić, V., Barbalić, J.: Assessment of Timber Roof Structures before and after Earthquakes, Buildings, 11 (2021) 23.
- [21] Čizmar, D., Volarić, I.: Projekt sanacije krovne konstrukcije skladišta kalijevog klorida, projektna dokumentacija, Zagreb, 2019.
- [22] Stepinac, M., Lourenço, P.B., Atalić, J., Kišiček, T., Uroš, M., Baniček, M., Šavor Novak, M.: Damage classification of residential buildings in historical downtown after the ML5.5 earthquake in Zagreb, Croatia in 2020, International Journal of Disaster Risk Reduction, 56 (2021), Article 102140.
- [23] Krause, M., Kurz, J.H., Lanata, F., Krstevska, L., Cavalli, A.: Needs for further developing monitoring and NDT methods for timber structures, in: Proceedings of the International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures, Wrocław, Poland, 2015.
- [24] Stepinac, M., Rajčić, V., Barbalić, J.: Utjecaj dugotrajnog opterećenja na spregnute sustave drvo–beton, GRAĐEVINAR, 67 (2015) 3, pp. 235–246.
- [25] Daanoun, N., Kernou, N., Fellah, M., El-Hiti, G.A.: Pouzdanost i mehanička svojstva spregnutih nosača drvo–beton u nelinearnome području ponašanja, GRAĐEVINAR, 76 (2024) 10, pp. 993–1003.
- [26] Čizmar, D., Vrančić, M.: Proračun spregnutih nosača drvo–beton, GRAĐEVINAR, 68 (2016) 7, pp. 559–570.
- [27] Mirra, M.: Seismic Behaviour of Masonry Buildings with Timber Diaphragms, Delft University of Technology, Delft, 2022.
- [28] Parisi, M.A., Piazza, M.: Seismic strengthening and seismic improvement of timber structures, Construction and Building Materials, 2015.
- [29] STADATA: 3MURI Project, dostupno na: <https://stadata.com/en/3-muri-project/>, pristupljeno: 16. travnja 2026.
- [30] Krolo, J., Damjanović, D., Duvnjak, I., Frančić Smrkić, M., Bartolac, M., Koščak, J.: Metode određivanja mehaničkih svojstava ziđa, GRAĐEVINAR, 73 (2021) 2, pp. 127–140.
- [31] HRN EN 1991-1-1: Eurokod 1 – Djelovanja na konstrukcije – Dio 1-1: Opća djelovanja – Gustoće, vlastite težine, korisna opterećenja zgrada, Hrvatski zavod za norme, Zagreb, 2012.
- [32] HRN EN 1991-1-1:2012/NA: Eurokod 1 – Djelovanja na konstrukcije – Dio 1-1: Nacionalni dodatak, Hrvatski zavod za norme, Zagreb, 2012.
- [33] HRN EN 1998-1: Eurokod 8 – Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija – Dio 1: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade, Hrvatski zavod za norme, Zagreb, 2011.
- [34] HRN EN 1998-1:2011/NA: Eurokod 8 – Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija – Dio 1: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade – Nacionalni dodatak, Hrvatski zavod za norme, Zagreb, 2011.
- [35] Tehnički propis o izmjenama i dopunama Tehničkog propisa za građevinske konstrukcije, Narodne novine, Zagreb, 2020.
- [36] Tehnički propis o izmjenama i dopunama Tehničkog propisa za građevinske konstrukcije, Narodne novine, Zagreb, 2022.
- [37] Tehnički propis za građevinske konstrukcije, Narodne novine, Zagreb, 2017.
- [38] Volarić, I., Čizmar, D., Serdarević, Š., Bakmaz, I.: Klasična drvena krovšta povijesnih građevina u Zagrebu, Polytechnic and Design, 13 (2025) 2, pp. 98–112.