

Primljen / Received: 9.4.2021.

Ispravljen / Corrected: 13.9.2021.

Prihvaćen / Accepted: 12.10.2021.

Dostupno online / Available online: 10.11.2021.

Potres Petrinja magnitude Mw 6.4: glavni parametri potresa, utjecaj na građevine i preporuka za njihovu obnovu

Autori:



Prof. dr. sc. **Jure Radnić**
jure.radnic@gradst.hr
Autor za korespondenciju



Doc. dr. sc. **Nikola Grgić**
nikola.grgic@gradst.hr



Dr. sc. **Ante Buzov**
ante.buzov@gradst.hr



Dr. sc. **Ivan Banović**
ivan.banovic@gradst.hr



Doc. dr. sc. **Marija Smilović Zulim**
marija.smilovic@gradst.hr



Doc. dr. sc. **Goran Baloević**
goran.baloevic@gradst.hr



Doc. dr. sc. **Marina Sunara**
marina.sunara@gradst.hr

Sveučilište u Splitu
Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

Pregledni rad

Jure Radnić, Nikola Grgić, Ante Buzov, Ivan Banović, Marija Smilović Zulim, Goran Baloević, Marina Sunara

Potres Petrinja magnitude Mw 6.4: glavni parametri potresa, utjecaj na građevine i preporuka za njihovu obnovu

Razorni potres Petrinja (opći pojam za potrese na Banovini) od 29.12.2020. magnitude Mw 6.4 oduzeo je 7 ljudskih života i prouzročio katastrofalne štete na području Banovine. U radu su prikazani i analizirani najvažniji parametri potresa te naglašena njihova važnost u razumijevanju nastalih oštećenja i rušenja građevina te oblikovanju optimalne konstrukcije za njihovu obnovu. Dan je doprinos u razumijevanju složenog mehanizma nastanka potresa preko analize naponsko-deformacijskog stanja u stijenskom masivu tijekom međudjelovanja tektonskih ploča. Uzroci rušenja i oštećenja zgrada objašnjeni su kombiniranim utjecajem svojstava njihove konstrukcije, tla i samog potresa. Predložena su rješenja optimalne konstrukcije novih zgrada, kao i rješenja konstrukcijskog ojačanja oštećenih zgrada.

Ključne riječi:

potres Petrinja, glavni parametri potresa, mehanizam nastajanja potresa, utjecaj na građevine, obnova građevina

Subject review

Jure Radnić, Nikola Grgić, Ante Buzov, Ivan Banović, Marija Smilović Zulim, Goran Baloević, Marina Sunara

Mw 6.4 Petrinja earthquake in Croatia: Main earthquake parameters, impact on buildings and recommendation for their structural strengthening

Strong Mw 6.4 Petrinja earthquake from 29.12.2020. took 7 lives and caused catastrophic damage in the Banovina area. The paper presents and analyses the most important earthquake parameters and highlights their importance in understanding the damage and demolition of buildings, as well as creating an optimal structure for their reconstruction. A contribution is made to the understanding of the complex mechanism of earthquake formation through the analysis of the stress-strain state in a rock mass during tectonic plate conflict. The causes of demolition and damage to buildings are explained by the combination of the properties of their structure, soil and the earthquake itself. Solutions for optimal structure of new buildings, as well as solutions for structural renovation of damaged buildings are proposed and described.

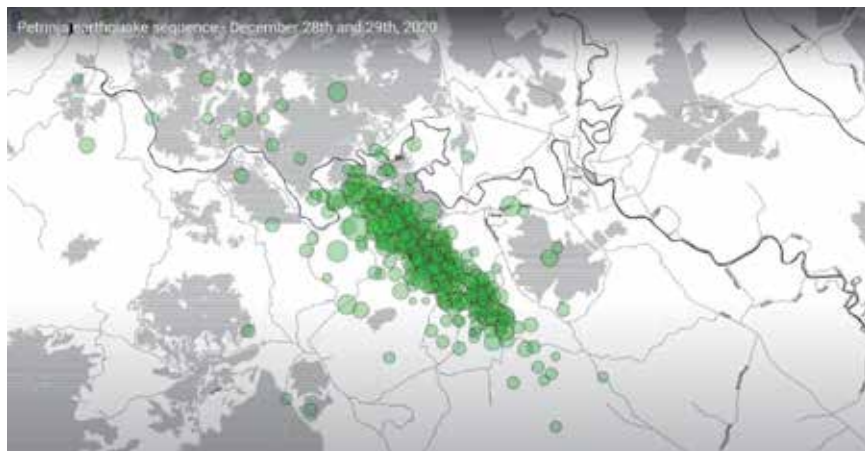
Key words:

Petrinja earthquake, main earthquake parameters, mechanism of earthquake formation, impact on buildings, reconstruction of buildings

1. Uvod

Umjereni potres magnitude M_w 5,2 pogodio je 28. prosinca 2020. šire područje gradova Glina (12.000 stanovnika), Petrinja (25.000 stanovnika) i Sisak (60.000 stanovnika), locirano približno 60 km jugoistočno od glavnoga grada Zagreba, kojemu je prethodio niz slabijih potresa. Sljedećeg dana, 29. prosinca, razorni potres magnitude M_w 6,4 pogodio je isto područje, a osjetio se i u susjednim državama i dalje. U periodu između dva potresa bilo je više od stotinu slabijih potresa u tom području (slika 1.) [1]. Razorni potres prouzročio je sedam ljudskih žrtava, brojne ozljede i goleme materijalne štete u radijusu preko 50-60 km od epicentra. Umjereni i slabiji potresi još uvijek se javljaju u širem epicentralnom području, što će vjerojatno dulje potrajati.

U promatranom seizmičkom području, s epicentrom u Pokupskom, jak potres magnitude M_w 5,8-6,0 bio je 1909. godine [2]. Na osnovi analize tog potresa čuveni hrvatski geofizičar Andrija Mohorovičić otkrio je diskontinuitet između Zemljine kore i plašta (Mohorovičićev diskontinuitet).



Slika 1. Epicentri potresa u području Gline, Petrinje i Siska u periodu 28. i 29. prosinca 2020. [1]



Slika 2. Glavni seizmogeni rasjedi u Hrvatskoj [3]

U svrhu utvrđivanja što pouzdanijih uzroka urušavanja i oštećenja građevina od svakog potresa, osim poznavanja svojstava konstrukcija i njihove interakcije s tlom, poželjno je da konstrukcijski inženjer poznaje barem osnovne parametre razmatranog potresa. Zato su u poglavlju 2 najprije prikazani osnovni podaci razornog potresa Petrinja. Također, razmatrano je naponsko-deformacijsko stanje stijenskog masiva pred slom zbog međudjelovanja tektonskih ploča i dan izvorni doprinos opisu nastajanja potresa preko oslobođene energije deformacije. U poglavlju 3 opisane su posljedice djelovanja potresa na zgrade u području Petrinje, Gline i Siska. Preporuke za obnovu i ojačanje glavnih i sekundarnih konstrukcijskih elemenata zgrada prikazane su u poglavlju 4. Glavni zaključci rada navode se u poglavlju 5.

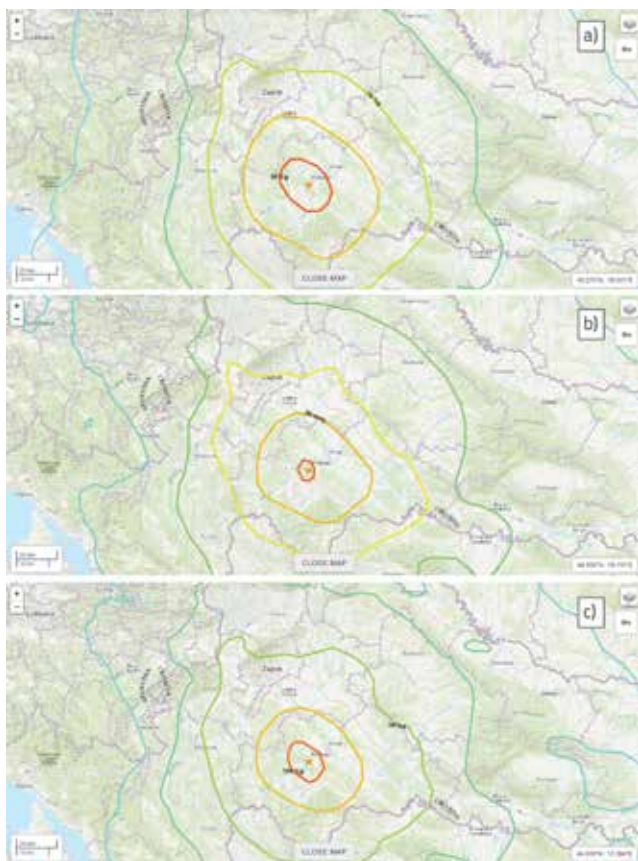
2. Neke karakteristike razornog potresa Petrinja

2.1. Osnovne seizmotektonske karakteristike epicentralnog područja potresa

Tektonika Mediterana, koji je lociran u zatvorenom području između afričke i euroazijske tektonske ploče, vrlo je složena i uključuje gibanje više regionalnih mikroploča i malih lokalnih ploča [3]. Neke od njih se ponekad pomiču nezavisno od afričke i euroazijske ploče. Jadranska mikroploča dio je afričke ploče, koja se također giba nezavisno, potiskujući planinsko kopneno područje prema sjeveru. Poblize o toj tektonici može se naći u [4, 5]. Epicentralno područje potresa Petrinja u pravcu je konfliktnog pomicanja dinarida prema sjeveru i suprotnom gibanju panonske mikroploče prema jugu. Rasjed je upravo na granici bivšeg Panonskog mora. Precizniji opis ove problematike može se naći u [6]. U skladu s postojećim spoznajama [3], glavni tektonski rasjedi u Hrvatskoj prikazani su na slici 2. Potres Petrinja nastao je kao posljedica plitkog tlačno-posmičnog sudara unutar euroazijske ploče, na granici suprotnog gibanja dinarske i panonske mikroploče. Žarišni mehanizam pomaka ukazuje da se ruptura u tlu pojavila približno vertikalno, u smjeru sjeverozapada. Zapravo, radi se o postojećem subvertikalnom potresu s desnim pomakom pri pružanju, pri čemu je istočno krilo pomaknuto prema jugoistoku, a zapadno prema sjeverozapadu [6].

2.2. Osnovne karakteristike potresa od 29. prosinca 2020.

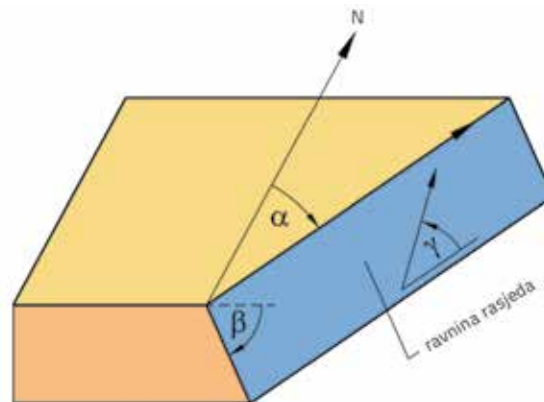
Važne parametre potresa Petrinja magnituda M_w 6,4 procijenile su brojne relevantne institucije. Prema analizi Američkog geološkog zavoda (USGS) [7], Vršno ubrzanje tla (eng. *Peak Ground Acceleration* - PGA) iznosilo je 114 % gravitacije (g), a vršna brzina tla (eng. *Peak Ground Velocity* - PGV) iznosila je 0,813 m/s, sa žarištem (hipocentrom) potresa 13,5 km, koji je prouzročio teška oštećenja građevina. Procijenjeno je da je PGA iznosila najmanje 50 % g unutar radijusa od 9 km od epicentra (slika 3.a), PGV najmanje 0.2 m/s unutar radijusa od 24 km (slika 3.b) i PSA (vršno spektralno ubrzanje za $T = 0,3$ s; T = period slobodnih oscilacija jednostupnjevnog modela) najmanje 50 % g unutar radijusa od 22 km (slika 3.c). Parametri žarišnog mehanizma i moment tenzora prikazani su u tablici 1. [7], uz objašnjenje prema slici 4. Žarišni mehanizam potresa prema USGS katalogu [7] prikazan je na slici 5.



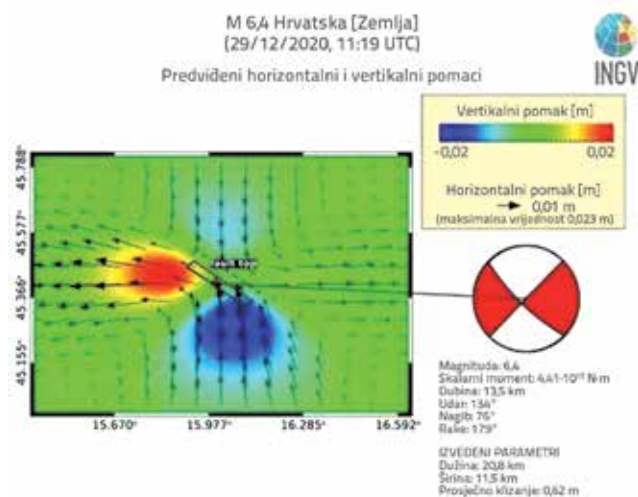
Slika 3. Parametri PGA, PGV i PSA potresa Petrinja magnituda M_w 6.4 [7]: a) Vršno ubrzanje tla (PGA); b) Vršna brzina tla (PGV); c) Vršno spektralno ubrzanje tla (PSA) za $T = 0.3$ s

Potres Petrinja analizirao je Talijanski nacionalni institut za geofiziku i vulkanologiju (INGV) pomoću SAR tehnike interferometrije (InSAR) aplicirane na satelitske snimke dobivene pomoću misije Sintel-1 Europske svemirske agencije (ESA) 24. i 30. prosinca 2020. [8]. Analizom dviju uzastopnih snimki,

ustanovljeni su pomaci na površini tla u zoni potresa pomoću relativnih pomaka između površja za vrijeme seizmičkog događaja. Rezultat analize je karta razlika u faznom doprinosu između dviju snimki – tzv. fazni interferogram (slika 6.). On predstavlja pomak od približno 2,8 cm duž vidokruga satelita. Epicentar potresa označen je žutom zvijezdicom [9]. Analiza InSAR metodom korištena je također u radu [10].



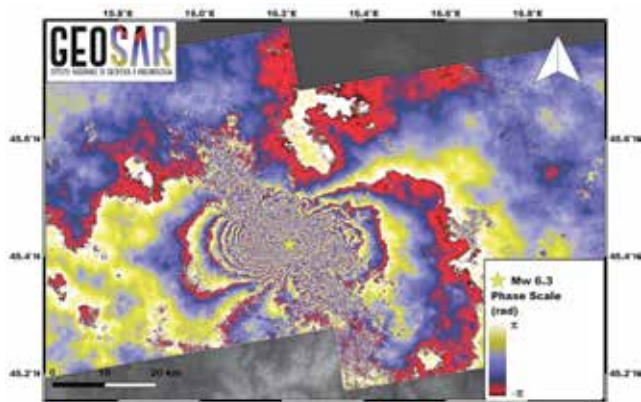
Slika 4. Parametri položaja rasjeda [7]



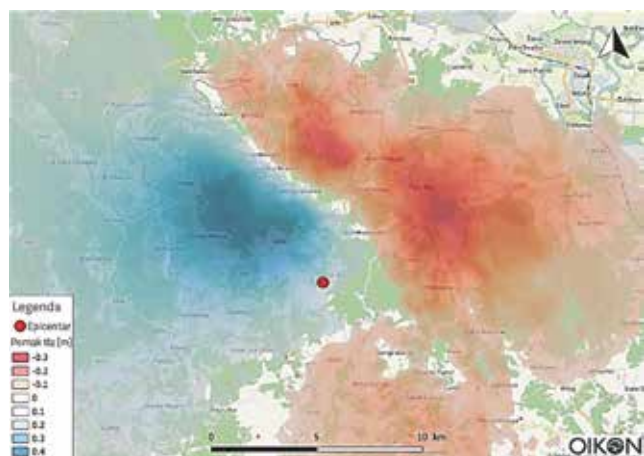
Slika 5. Žarišni mehanizam potresa Petrinja magnituda M_w 6,4 [7]

Tablica 1. Moment tenzor [7]

Magnituda	6,36 Mw		
Hipocentar	13,5 km		
Polutrajanje	3,93 s		
Kut pružanja (α)	134°		
Kut nagiba (β)	76°		
Kut pomaka (γ)	179°		
Moment			
Os	M [Nm]	Nagib osi	Azimet
T	$4,444 \cdot 10^{18}$	11°	90°
N	$-0,067 \cdot 10^{18}$	76°	228°
P	$-4,377 \cdot 10^{18}$	9°	358°



Slika 6. Fazni interferogram koji se odnosi na potres u Hrvatskoj 30. prosinca 2020. [8]



Slika 7. Karta vertikalnih pomaka duž satelitskog vidokruga 29. prosinca 2020. [9]

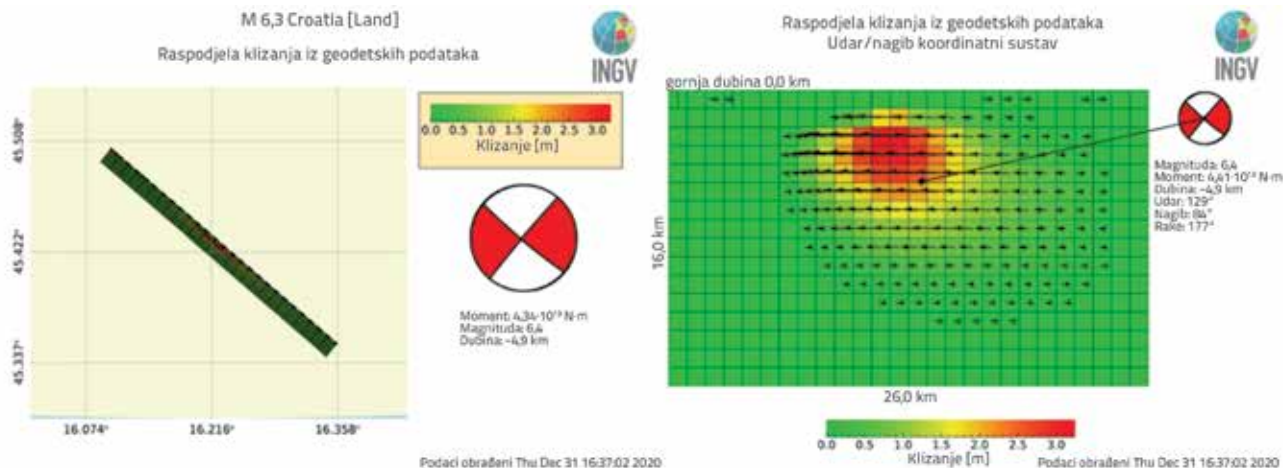
Transformacija interferograma u kartu pomaka površine tla prikazana je na slici 7. [9]. Uočljivo je da je najveći pomak od približno 30 cm na zapadnoj strani epicentra, te približno -20 cm na istočnoj strani. To pokazuje da je površinsko puknuće nastalo zbog posmičnog rasjednog mehanizma (pomak po pružanju),

orijentiranog približno u smjeru jugoistok-sjeverozapad. U radovima [4, 10] ne dijeli se takvo mišljenje.

Interferometrijski podaci su uzeti za identifikaciju parametara rasjeda i raspodjelu pomaka u ravnini rasjeda. Utvrđen je približno vertikalni rasjed ($\beta = 76^\circ$), orijentiran jugoistok-sjeverozapad ($\alpha = 134^\circ$). Identificiran je vršni horizontalni pomak (klizanje) od približno 3.5 m, lociran na dubini približno 4 km (slika 8). Utvrđeno je da je mehanizam sloma približno čisto posmičan ($\gamma = 179^\circ$).

Prema analizi Geofizičkog odsjeka Prirodoslovno-matematičkog fakulteta (PMF) [11], magnituda potresa bila je $M_L 6,2$, s epicentrom oko 4,5 km jugozapadno od Petrinje (45.4002 N, 16.2187 E), na dubini 11.5 km. Intenzitet potresa bio je VIII-IX prema ljestvici EMS. Djelovanje potresa je zabilježeno na zapisu šest akceleroagrafa u gradu Zagrebu. Tablica 2. prikazuje podatke s četiriju seizmičkih postaja na nižim nadmorskim visinama (sličnih epicentru potresa), a ostale dvije ovdje nisu razmatrane (njihove nadmorske visine su približno do 993 m i imaju značajna odstupanja izmjerenih veličina zbog topografije lokacije i lokalnih svojstava tla). Prosječna udaljenost razmatranih akceleroagrafa od epicentra potresa prema PMF je oko 50 km. Prosječno PGA u Z, N, E smjerovima iznosilo je približno 0,046 g, 0,11 g i 0,10 g. Prosječno rezultantno PGA iznosilo je približno 0,16 g, što je gotovo jednako PGA prema USGS [7]. Prosječni PGD (vršni pomaci tla) u Z, N, E smjerovima bili su 0,76 cm, 2,06 cm i 3,14 cm. Prosječni rezultantni PGD bio je približno 3,8 cm. Na temelju navedenoga, može se konstatirati da se potres u Zagrebu manifestirao kao blagoumjereni, što potvrđuju nastala oštećenja gradskih zgrada.

Položaj epicentra razornog potresa Petrinja razlikuje se prema pojedinim izvorima. Na slici 9. prikazani su epicentri prema USGS [7], INGV [8] i PMF [11]. Prema [7], epicentar je bio oko 3 km jugozapadno od Petrinje (Križ Hrastovački), a prema [8], oko 3 km sjeveroistočno od Petrinje (Nova Drenčina). Prema [11], epicentar je lociran oko 4,5 km jugozapadno od Petrinje (Strašnik). Na temelju razine i načina oštećenja zgrada u području Petrinje pretpostavlja se da je PMF najpreciznije pozicionirao epicentar potresa.

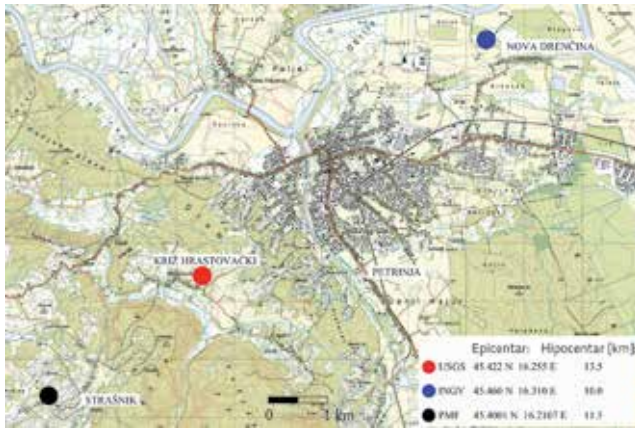


Slika 8. Položaj rasjeda (lijevo) i raspodjela posmičnih pomaka u ravnini rasjeda (desno) - Lab GeoSAR-INGV [8]

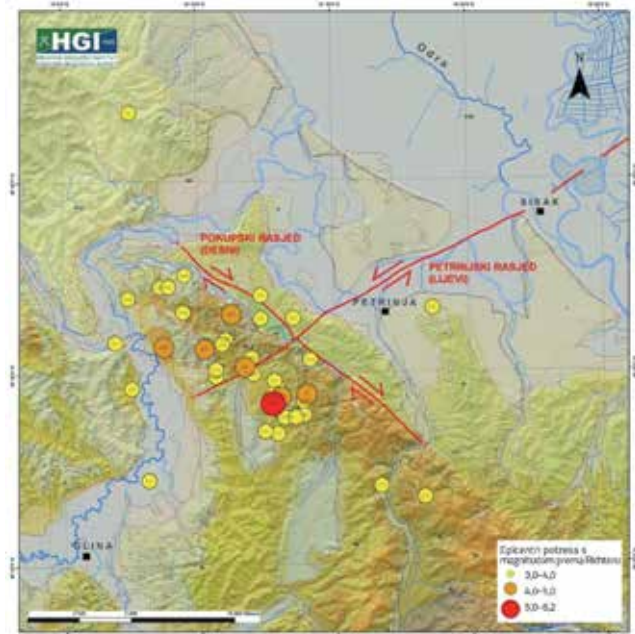
Tablica 2. Izmjereni podaci akceleroografa u Zagrebu [11]

Seizmička postaja	Udaljenost do epicentra [km]	Nadmorska visina [m]	PGA [m/s ²]				PGD [cm]			
			Z	N	E	R	Z	N	E	R
QARH	52,75	122,0	0,455	0,934	0,800	1,31	0,86	2,77	4,21	5,1
QUHS	50,78	179,0	0,427	1,243	0,958	1,62	0,86	2,30	2,87	3,8
QZAG	48,53	115,0	0,574	0,937	1,065	1,55	0,80	1,80	2,95	3,5
QGAJ	45,46	100,0	0,370	1,125	1,276	1,75	0,50	1,37	2,51	2,9
prosječno	49,40	129,0	0,460	1,070	1,020	1,56	0,76	2,06	3,14	3,8

$R = (Z^2 + N^2 + E^2)^{1/2}$; Z = vertikalno, N = sjever, E = istok



Slika 9. Predviđeni epicentar raznog potresa Petrinja prema nekim izvorima



Slika 10. Glavni rasjedi u području Petrinje, Siska i Gline, s epicentrima i magnitudom jačih potresa [12]

Šire epicentralno područje potresa smješteno je u vijugavom toku rijeke Kupe i njenih pritoka, u području debelih naslaga mekog vlažnog tla podložnog likvefakciji. Prema [7], predviđen

je značajan utjecaj likvefakcije na površini otprilike od 400 km². Prema nalazima Hrvatskog geološkog instituta (HGI) [12], potres je aktivirao sustav rasjeda u podzemlju šireg područja Gline, Petrinje i Siska. On je nastao na sjeveroistočnom rubu dinarida, na lokalitetu križanja postojećih rasjeda u smjerovima sjeverozapad-jugoistok i sjeveroistok-jugozapad (slika 10.). Oba rasjedna sustava sastoje se od više posmičnih rasjeda. Jedan je dobro poznat kao desni pokupski rasjed, a drugi manje poznat kao lijevi petrinjski rasjed. Oni su posljedica tlačnog sudara tektonskih ploča u smjeru sjever-jug. Oba rasjeda su na geološkoj karti Hrvatske [13]. Na temelju urušavanja i teških oštećenja zgrada na području Gline, pretpostavlja se pružanje lijevog petrinjskog rasjeda do Gline [4, 10]. Na širem epicentralnom području potresa, duž pružanja rasjeda, pronađene su brojne različite manifestacije potresa, kao što su otvorene pukotine i paraklaze, razlijevanja vode, pješčani "vulkani" zbog likvefakcije, deformacije površine tla i linijskih infrastrukturnih objekata i sl. [12].

Nažalost, nisu postojali akceleroografi u blizini epicentra potresa koji bi snimili njegovo trajanje i druge važne parametre ubrzanja tla. Prema brojnim snimkama kamera, ukupno trajanje potresa u blizini epicentra iznosilo je do 10 s, pri čemu su dominantni pomaci tla trajali vjerojatno kraće, oko 8 s. Prema USGS [7], tzv. polutrajanje potresa (engl. *half-duration of earthquake*) iznosilo je 3,93 s. Dakle, to je bio tzv. udarni potres (engl. *impact earthquake*), s velikim vršnim ubrzanjem (PGA) i vrlo malim predominantnim periodom ubrzanja. Takvi su tipovi potresa osobito nepovoljni za krute građevine, kao što je najveći broj niskih zgrada u širem epicentralnom području ovog potresa. Šireći se od hipocentra i prolazeći kroz različite slojeve tla, dolazilo je do prigušenja amplitude potresa i povećanja njegovog predominantnog perioda oscilatornih ubrzanja. Tako je u Zagrebu, koji je također lociran na debelim naslagama mekog tla, prosječno PGA palo na 1,56 m/s² (tablica 2.), a ukupno trajanje potresa produženo je na približno 20 - 30 s.

2.3. Naponsko-deformacijska analiza sloma stijenskog masiva u žarišnoj zoni potresa

Sadržaj u ovom potpoglavlju nije vezan za potres Petrinja već vrijedi općenito i pokušava objasniti nastanak i širenje potresa u stijenskom masivu uslijed gibanja tektonskih ploča preko

mehanizma njegova sloma zbog prekoračenja čvrstoće, kada se oslobođena energija deformacije velikim dijelom pretvara u kinetičku energiju – podrhtavanje tla. Izneseno je najvećim dijelom stajalište autora.

Litosfera, Zemljina kora i gornji dio plašta, nije kontinuirana homogena i izotropna struktura, već je razdijeljena u nekoliko velikih, više desetaka malih i veliki broj manjih tektonskih jedinica formiranih od raznovrsnog stijenskog masiva. Zbog složenog milenijskog nastajanja i stalnih promjena, u stijenskom masivu prisutni su brojni diskontinuiteti, kaverne, pukotine, zdrobljene zone, rasjedi i brojni drugi raznovrsni efekti i anomalije, što ima za posljedicu njegovu anizotropiju te umanjene čvrstoće u određenim zonama i smjerovima.

U pravilu, zapreminska masa i čvrstoća stijenskog masiva povećava se s dubinom od površine zemlje. Za osnovno geostatičko/gravitacijsko stanje, stijenski masiv je u stabilnom ravnotežnom stanju, s različitim razinom normalnih i posmičnih naprezanja u svakoj točki prostora. Prirast tlačne i posmične čvrstoće stijenskog masiva po dubini posljedica je utjecaja bočnog tlaka, tj. spriječenosti bočne deformacije koja izaziva prostorno stanje naprezanja i deformacija. Čvrstoća stijene u troosnom tlaku višestruko je veća od njene jednoosne tlačne čvrstoće. Posmična čvrstoća stijene povećava se s povećanjem tlačnog naprezanja okomito na plohu posmika, do blizu čistog tlačnog sloma. Vlačna čvrstoća homogene stijene prilično je velika i za neke tipove stijena iznosi približno više od desetine do petine njene tlačne čvrstoće. Međutim, zbog brojnih diskontinuiteta/prekida i anomalija u stijenskom masivu, njegova vlačna čvrstoća je često gotovo zanemariva. Općenito, tlačna čvrstoća stijenskog masiva znatno je veća od njegove posmične čvrstoće, a vlačna mu je čvrstoća prosječno zanemariva.

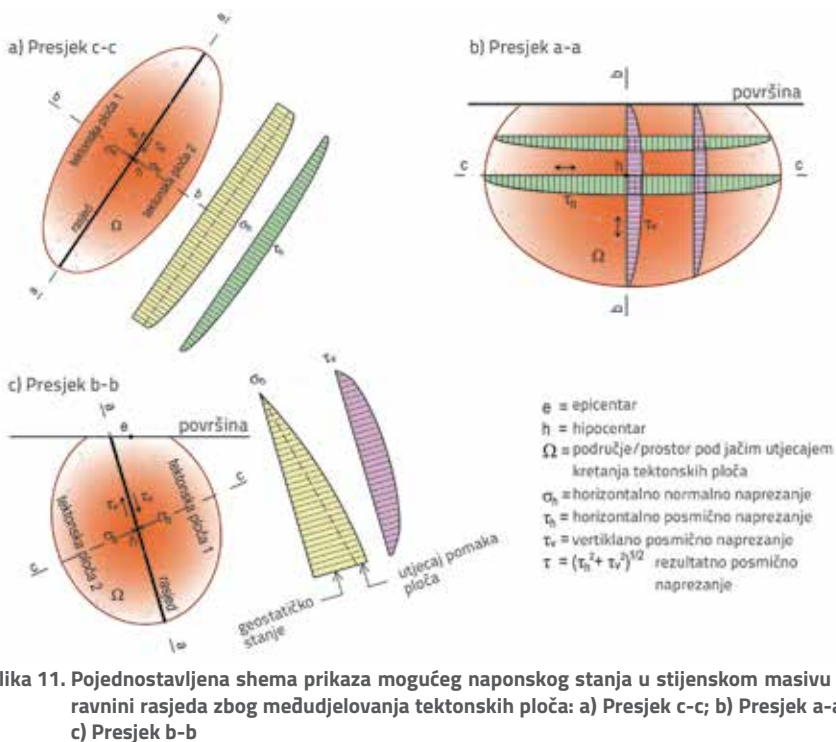
Brojni faktori utječu na promjenu temeljnog ravnotežnog geostatičkog stanja u stijenskom masivu, koji mijenjaju njegovo početno naponsko-deformacijsko stanje. Tako npr. gibanje tektonskih ploča povrh "plastičnog" Zemljinog plašta izaziva raznovrsne efekte na prethodno naponsko-deformacijsko stanje stijenskog masiva. Naime, to gibanje izaziva dopunske sile koje povećavaju prethodna normalna i posmična naprezanja u stijenskom masivu. Ovisno o razini ukupnih naprezanja/deformacija, čvrstoća i drugih parametara stijenskog masiva, ovisi gdje i kada će doći do njegovog sloma u afektiranom području. Ako slom nastane, trenutno se oslobađa golema unutarnja energija deformacije (engl. *strain energy*), odnosno, akumulirana potencijalna energija trenutno se pretvara u mehaničku kinetičku te u

toplinsku i zvučnu energiju. Oslobođena kinetička energija se manifestira jakim vibriranjem stijenskog masiva u žarišnoj zoni i propagacijom oscilatornih valova/pomaka u svim smjerovima od hipocentra potresa. Ovaj prirodni fenomen zovemo potres.

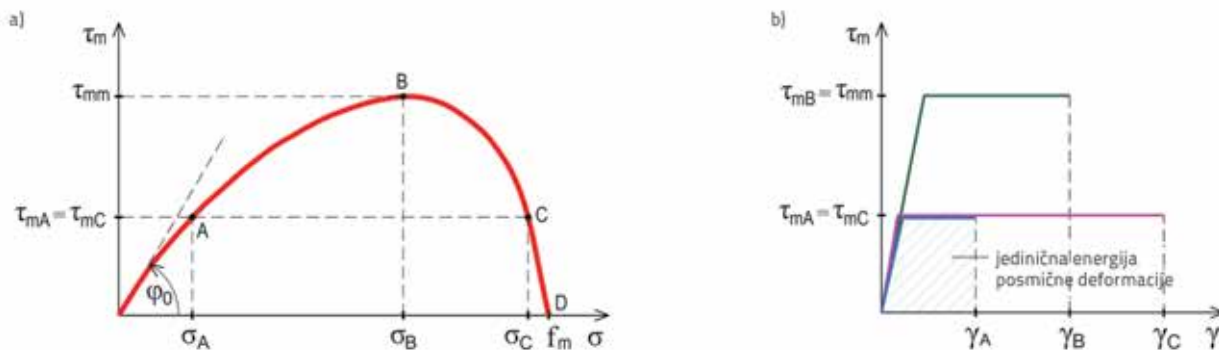
Slom stijenskog masiva se vjerojatno najčešće javlja zbog prekoračenja njegove posmične čvrstoće, što je bio slučaj i pri razornom potresu Petrinja. Uzrok tome je značajno manja posmična čvrstoća stijenskog masiva u odnosu na njegovu tlačnu čvrstoću. Pojednostavljena shema mogućeg naponskog stanja u ravnini potjecanja rasjeda u stijenskom masivu zbog nekog konfliktnog gibanja tektonskih ploča prikazana je na slici 11. Posmična naprezanja τ javljaju se u pretpostavljenoj ravnini rasjeda, a tlačna naprezanja σ okomito na nju.

Shematska ovisnost idealizirane posmične čvrstoće stijenskog masiva u ravnini rasjeda τ_m o bočnom tlačnom naprezanju σ prikazana je na slici 12.a. Najveća posmična čvrstoća (točka B) je pri normalnom tlačnom naprezanju σ_B . Drobljenje stijene zbog tlačnog naprezanja (točka D) javlja se zbog prekoračenja njene tlačne čvrstoće okomito na ravninu rasjeda f_m . Veza τ - γ (prikazana je kao idealizirana elastoplastična), gdje je τ posmično naprezanje a γ posmična deformacija, također ovisi o razini bočnog tlačnog naprezanja, koje utječe na veličinu početnog modula posmika i posmičnu deformaciju pri slomu. Površina ispod τ - γ dijagrama na slici 12.b predstavlja posmičnu energiju deformacije po jedinici volumena. Za jednako posmično naprezanje (točke A i C na krivulji na slici 12.a), granična posmična deformacija mnogo je veća pri većem normalnom naprezanju (veća oslobođena energija deformacije - jači potres).

Slika 13. shematski prikazuje tlocrt dijela dviju tektonskih ploča koje imaju suprotni pomak na kontaktu, na kojemu postoji



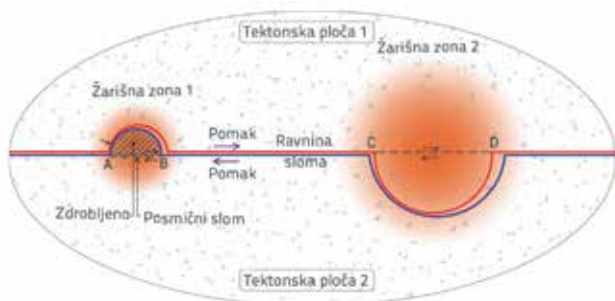
Slika 11. Pojednostavljena shema prikaza mogućeg naponskog stanja u stijenskom masivu u ravnini rasjeda zbog međudjelovanja tektonskih ploča: a) Presjek c-c; b) Presjek a-a; c) Presjek b-b



Slika 12. a) Schematska ovisnost posmične čvrstoće stijenskog masiva u ravnini rasjeda od poprečnog tlačnog naprezanja; b) Idealizirana veza posmično naprezanje - posmična deformacija

obostrano „zadiranje“ (utiskivanje) i posmično zahvaćanje stijenskih masiva, s pojavom značajnih posmičnih naprezanja. Uz pretpostavku jednake čvrstoće stijenskog masiva i jednake posmične pomake u žarišnoj zoni 1 i žarišnoj zoni 2, ako se prekorači posmična nosivost stijenskog masiva u nadolazećem vremenu, doći će također do potresa u žarišnoj zoni 2. On će biti mnogo jači nego onaj u žarišnoj zoni 1 zbog akumulirane veće energije deformacije u zahvaćenom prostoru. Takav slijed može objasniti nastajanje serije potresa u lokalnoj tektonskoj zoni tijekom duljeg razdoblja. Seizmička aktivnost u lokalnom seizmičkom području smirit će se kada se razina naprezanja u stijenskom masivu dovoljno smanji u odnosu na njegov kapacitet nošenja, odnosno kada se uspostavi dugotrajna stabilna ravnoteža naprezanja.

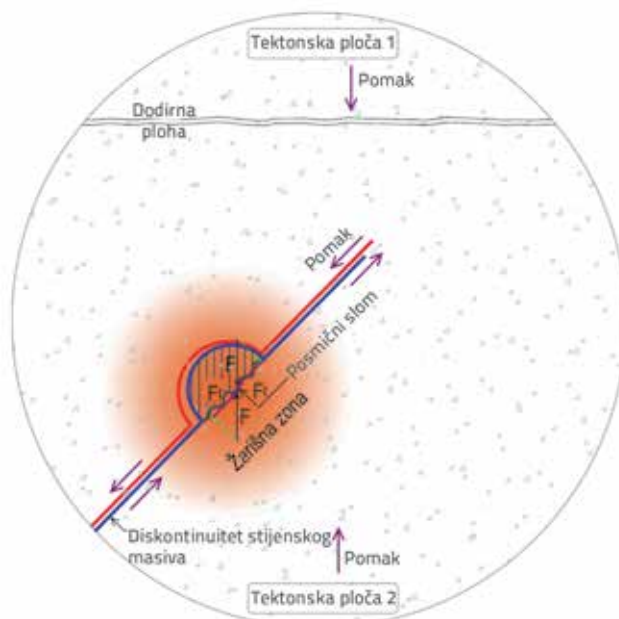
Zbog nastavka gibanja tektonskih ploča, doći će do daljnjeg povećanja prethodnih naprezanja u žarišnoj zoni 2. Ako se prekorači posmična nosivost stijenskog masiva u nadolazećem vremenu, doći će također do potresa u žarišnoj zoni 2. On će biti mnogo jači nego onaj u žarišnoj zoni 1 zbog akumulirane veće energije deformacije u zahvaćenom prostoru. Takav slijed može objasniti nastajanje serije potresa u lokalnoj tektonskoj zoni tijekom duljeg razdoblja. Seizmička aktivnost u lokalnom seizmičkom području smirit će se kada se razina naprezanja u stijenskom masivu dovoljno smanji u odnosu na njegov kapacitet nošenja, odnosno kada se uspostavi dugotrajna stabilna ravnoteža naprezanja.



Slika 13. Pojednostavljena tlocrtna shema uzastopnog nastanka potresa pri suprotnom posmičnom pomaku tektonskih ploča na kontaktu (2D prikaz)

Potres se također može javiti izvan kontaktne plohe tektonskih ploča čak i kada su one u frontalnom tlačnom sudaru (slika 14.), kada u stijenskom masivu na tom lokalitetu postoji anomalija - diskontinuitet s reduciranom čvrstoćom. Naime, tada tangencijalna komponenta F_t frontalne sile F duž

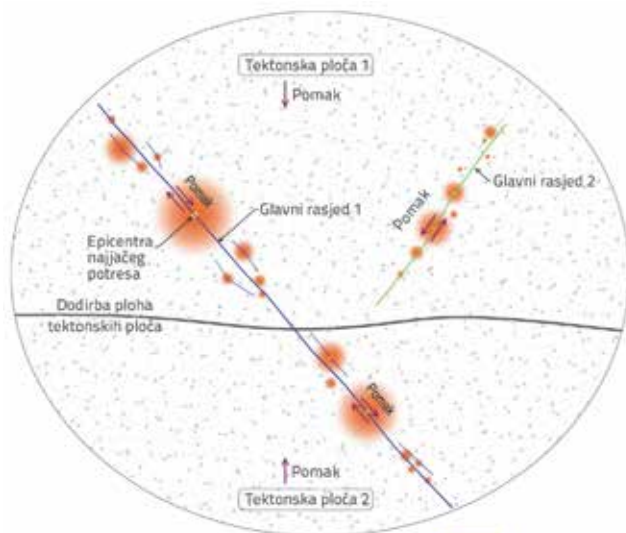
diskontinuiteta može izazvati slom stijenskog masiva i inicirati potres.



Slika 14. Pojednostavljena tlocrtna shema nastanka potresa izvan kontakta tektonskih ploča

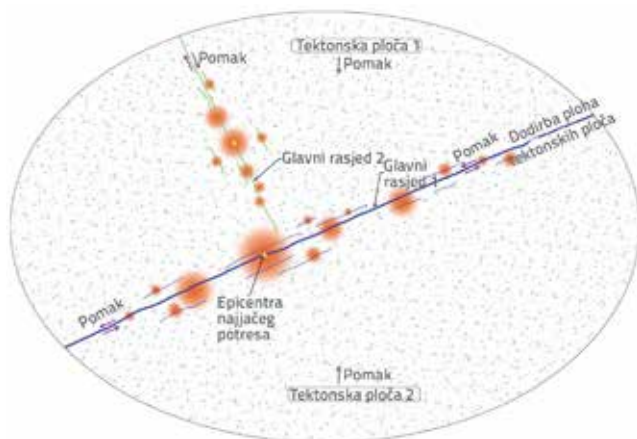
Na slici 15. prikazana je pojednostavljena tlocrtna shema frontalnog sudara dviju tektonskih ploča gdje se zbog anomalija u stijenskom masivu i njegove prekoračene nosivosti mogu aktivirati rasjedi u obje tektonske ploče, čak u različitim smjerovima. Zbog koncentracije posmično-vlačno-tlačnih naprezanja bočno od glavnog rasjeda i prekoračenja njegove nosivosti, uvijek se javljaju manji potresi (lokalni rasjedi) obostrano uz glavni rasjed. Oni, kao i manji potresi u smjeru glavnog rasjeda, obično se javljaju u manjem broju i kraćem vremenu prije glavnog potresa, te u dužem vremenu i većem broju nakon njega. To je dio često dužeg vremenskog procesa uravnoteženja poremećenog naponsko-deformacijskog stanja u određenom području stijenskog masiva zbog pomicanja i međudjelovanja tektonskih ploča. Teorijski je neupitno da

preraspodjela napreznja zbog potresa (osobito jačeg) utječe na pomicanje tla i promjenu postojećeg stanja napreznja u njegovom širem epicentralnom području, što može utjecati na pojavu potresa u kraćem ili dužem razdoblju podalje od njegova epicentra. Nažalost, vjerojatno je samo pitanje vremena kada će se na istom ili bliskom lokalitetu ovaj prirodni fenomen ponoviti s manjim ili većim posljedicama.



Slika 15. Pojednostavljena tlocrtna shema područja frontalnog tlačnog sudara dviju tektonskih ploča i mogućeg formiranja rasjeda (nastanka potresa) duž zona prekoračene nosivosti stijenskog masiva

Na slici 16. prikazano je moguće nastajanje rasjeda i potresa pri sudaru dviju tektonskih ploča na kosom kontaktu.



Slika 16. Pojednostavljena tlocrtna shema nastanka potresa pri sudaru dviju tektonskih ploča na kosom kontaktu

Veličina oslobođene energije pri potresu, koja odgovara oslobođenoj energiji deformacije stijenskog masiva pri slomu, ovisi o dubini žarišne zone (hipocentru), razini prekoračene čvrstoće/deformacije i tipu sloma, volumenu stijene

zahvaćenim lomom i drugim parametrima. U pravilu, potresi s plitkim epicentrom su manje amplitude ubrzanja zbog nižih gravitacijskih i ukupnih napreznja pri slomu tla, te afektiranog manjeg volumena tla. Potresi s dubljim hipocentrom u pravilu su snažniji zbog suprotnih razloga. Pri tome treba imati na umu da se utjecaj potresa na ljude i građevine smanjuje s udaljenosti od hipocentra, kao i epicentra, jer se potresni valovi (gibanja tla) sve više prigušuju (osobito kroz mekša tla i zone diskontinuiteta). Naime, praktično je važno kako se potres manifestira na površini zemlje. S obzirom na to, vrlo jaki potresi s vrlo dubokim hipocentrom mogu biti manje pogubni za ljude i građevine nego slabiji potresi plićeg hipocentra.

3. Utjecaj potresa Petrinja na građevine

Osim gubitka ljudskih života i više desetaka ozlijeđenih od ovog potresa, tisuće ljudi izgubilo je svoje domove. Najviše je stradalo područje Petrinje, Gline i Siska. Dosad je prijavljena šteta na približno 50.000 objekata. Oštećenja su također nastala na području Karlovca i Zagreba, ali i u Bosni i Hercegovini te Sloveniji. Na slici 17. shematski su prikazana oštećenja objekata u području Petrinje, Gline i Siska [8]. Stvarna oštećenja su daleko šira jer nisu uključena ona unutar objekata te druga koja nisu satelitski registrirana.

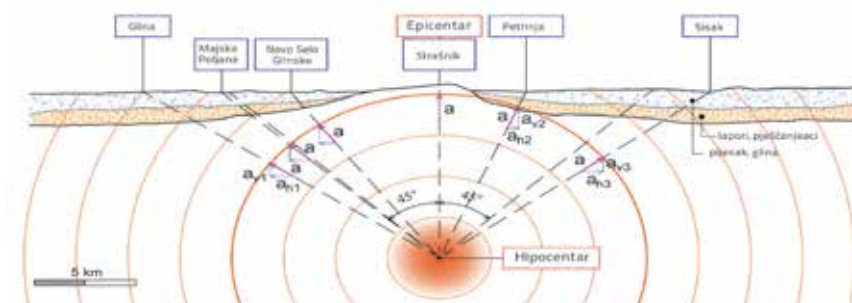
Kako je područje Petrinje, Gline i Siska u neposrednoj blizini epicentra potresa, s hipocentrom na dubini oko 11,5 km [11], utjecaj vertikalne komponente potresnog ubrzanja/sile u tom području bio je vrlo značajan. Slika 18. shematski prikazuje vertikalni presjek kroz Zemljinu koru u smjeru Glina-Petrinja-Sisak, s pojednostavljenim prikazom geoloških karakteristika tla prema [13]. Na slici su prikazani samo radijalni P-valovi potresa, odnosno radijalna ubrzanja a . Treba imati na umu da se na svim plohama diskontinuiteta, uključujući i površinu, javljaju horizontalni S-valovi. Njihov utjecaj na amplitudu horizontalnog ubrzanja tla na površini u pravilu je dominantan, a osobito za dalje lokacije i meka tla. Takvo područje je pretežito smješteno na dubokim naslagama mekog vlažnog tla, u području toka više rijeka i njihovih pritoka. Stoga je utjecaj dodatnog/prenesenog ubrzanja i likvefakcije na površini tla bio značajan.

Ubrzanja tla u užem epicentralnom području potresa računski su predviđena na oko 0,5 g [7], što je dakle prouzročilo seizmičke sile veličine oko 50 % težine. U trenutku potresom izazvanog značajnog povećanja gravitacijskih ubrzanja (tlačnih napreznja), došlo je do tlačnog sloma materijala koje je imalo manju tlačnu nosivost (tlo ispod temelja, ziđe u zidovima i stupovima i sl.). Na lokacijama s visoko zasićenim pjeskovitim tlom došlo je do erupcije/izbijanja vode i pijeska na površinu tla. U trenutku značajno smanjenih gravitacijskih ubrzanja (smanjenja tlačnih napreznja) došlo je do posmičnog sloma materijala zbog istovremenog djelovanja horizontalnog potresnog ubrzanja (posmičnog napreznja) i smanjene posmične čvrstoće materijala zbog smanjenog tlaka (tlo ispod temelja, ziđe i sl.).



Slika 17. Satelitska snimka oštećenja objekata u području Petrinje, Gline i Siska [14]: a) Petrinja; b) Glina; c) Sisak

Prema [7] (slika 3.c), PSA u užem epicentralnom području potresa bilo je približno do 100 % g za $T = 0,3$ s. Kako su zgrade u tom području pretežito niske i krute, s pretežno niskim osnovnim periodom slobodnih oscilacija (T), PSA je za njih bila još veća.



Slika 18. Shematski vertikalni presjek kroz Zemljinu koru u smjeru Glina-Petrinja-Sisak

Utjecaj posmičnih/poprečnih potresnih sila osobito je izražen kod zidanih zgrada s većim otvorima, te napose u vrhu zgrade gdje je posmična čvrstoća materijala niža zbog manjeg vertikalnog tlačnog napreznja. U odnosu na ukupni broj zgrada, najviše ih je i najteže oštećenih u Petrinji, te potom u Glini i Sisku. Razina oštećenja građevina ovisi o brojnim faktorima, kao što su:

- karakteristike potresa (snaga, epicentar, hipocentar, amplituda ubrzanja, trajanje, spektralne vrijednosti pomaka, brzina i ubrzanja, predominantni period ubrzanja i sl.)
- svojstva tla kroz koje se šire potresni valovi, uključujući i ona na lokaciji građevine
- karakteristike građevine (lokacija u odnosu na epicentar, dinamičke karakteristike – krutost i masa, tip konstrukcije, vrsta gradiva, temeljenje, mogućnost disipacije seizmičke energije i sl.), itd.

Najteža potresna oštećenja u Petrinji, osobito u njejoj staroj jezgri, obrazlažu se sljedećim činjenicama:

- mala udaljenost od epicentra potresa (oko 4 km) – velike potresne sile
- lokacija na debelim naslagama mekog tla
- pored vertikalne komponente ubrzanja, značajan utjecaj njene horizontalne komponente
- značajan utjecaj dopunskih seizmičkih sila zbog debelih naslaga mekog tla
- značajna zastupljenost gradnje iz perioda Austro-Ugarske Monarhije, koja nije povoljna za seizmička područja (masivni zidani zidovi iz sitne opeke, fleksibilne međukatne konstrukcije, pretežito velika katna visina i visoki strmi krovovi, često nedostatna kvaliteta zidne opeke i morta, neadekvatna povezanost međukatne konstrukcije i zidova te zidova međusobno, visoki nepridržani zabatni zidovi, brojni veći otvori u vanjskim zidovima, često neodgovarajuća drvena krovna konstrukcija bez ukruta u ravnini krova i s horizontalnim potiskom na zidove pročelja za samo vertikalna opterećenja, visoki masivni dimnjaci, brojni masivni ukrasni elementi na vijencu i po visini pročelja itd.).

Kod brojnih zgrada došlo je do teškog oštećenja ili urušavanja njihovih fleksibilnih zabatnih zidova i drvene krovne konstrukcije (neki primjeri na slici 19.). Pri tome su zabatni zidovi često bili samostojeći i velike visine, a horizontalni potisak rogova za stalni teret se često izravno prenosio preko drvene nadzidnice bočno na ravninu zidova pročelja (ne na vezne grede). Primjer gdje je neadekvatna drvena krovna konstrukcija uzrokovala horizontalni bočni potisak i pomak zida vidljiv je na slici 19.e.

Karakteristična oštećenja zidanih zidova s otvorima vidljiva su na zgradama prikazanim na slici 20., kao i na nekim zgradama na slici 19. Tipične križne pukotine u stupcima između otvora u zidu, kao i u njegovim nadvojima,



Slika 19. Neke zgrade u Petrinji s teškim oštećenjima zabatnih zidova i drvenog krova



Slika 20. Neke zgrade u Petrinji s tipičnim oštećenjima nosivih zidova na pročelju

posljedica su utjecaja savijanja i posmika od potresa, tj. prekoračenja glavnih vlačnih naprezanja koje zide nije moglo nositi (osobito u horizontalnom smjeru, gdje su tlačna naprezanja minimalna). Kod velikog vertikalnog seizmičkog ubrzanja dolazilo je do:

- smanjenja vertikalnih tlačnih naprezanja i prekoračenja posmične čvrstoće materijala kada su ona bila suprotna od gravitacije
- povećanja tlačnih naprezanja i prekoračenja tlačne čvrstoće materijala kada su ona bila u smjeru gravitacije.

Na nasipu uz lijevu obalu rijeke Petrinjčice, u blizini kupališnog objekta, vidljivo je njegovo značajno uleknučje. Ono je posljedica utjecaja potresnog ubrzanja, osobito njegove vertikalne komponente, na debelom sloju saturiranog mekog tla i likvefakcije u tlu (slika 21.a). Pri tome su vidljivi tragovi horizontalnih pomaka u asfaltnom zastoru na vrhu nasipa od preko 10 cm. Takvi su pomaci tla vidljivi i uz obližnji manji dvoetažni kupališni objekt uz Kupu (slika 21.b), koji je doživio teška oštećenja (pukotine) u podnožju i na vrhu armiranobetonskih stupova prve etaže. Osim velikih potresnih sila, tome je doprinijela nepovoljna fleksibilna konstrukcija objekta u prizemlju. Uz objekt su vidljivi tragovi izbijanja pijeska na površinu tla zbog likvefakcije. Nešto manja oštećenja zgrada u Glini i Sisku, u odnosu na Petrinju, obrazlažu se činjenicom da su oni dalje od epicentra i da su imali manja potresna ubrzanja, osobito manju njegovu vertikalnu komponentu (imali su veći utjecaj horizontalne komponente ubrzanja) – vidjeti sliku 18. Pri tome je prosječna visina i masa zgrada u Glini nešto manja, a u Sisku vjerojatno nešto veća. U njima su zgrade prosječno novije i građene vjerojatno nešto prikladnije. Gradnja u Petrinji, Glini i Sisku pretežito je urbana, u velikoj mjeri sa zgradama u nizu. Općenito, načini i tipovi oštećenja zgrada u tim gradovima su podjednaki.



Slika 21. a) Uleknuti zemljani nasip na prilazu kupališnom objektu; b) Kupališni objekt u Petrinji uz Kupu

Osim velikog broja teško oštećenih i urušenih zgrada u Petrinji, Glini i Sisku, brojne su teško oštećene i urušene obiteljske kuće i manji gospodarski objekti u selima u radijusu otprilike do 25 km od epicentra potresa. To su uglavnom dvoetažne građevine s relativno krutim zidanim zidovima u oba smjera, ali nažalost pretežito nekvalitetne gradnje (osobito gospodarski objekti). Kvaliteta gradnje je u skladu s lošom imovinskom mogućnošću ljudi na tom području, koji uglavnom žive od poljoprivrede i stočarstva.

Pokazatelj jačine potresa na razmatranom području najjasnije se očitovao preko razine oštećenja gotovo tipskih, novih dvoetažnih stambenih kuća izgrađenih nakon Domovinskog rata. One su građene iz sitnih, manje kvalitetnih blokova iz pečene gline, u manje kvalitetnom vapneno-cementnom mortu s malo cementa. U pravilu, prizemlje kuća izdignuto je iznad terena. Pretpostavlja se da je temeljenje izvedeno na tankoj betonskoj ploči (ispod koje je slabo nabijeni kameni nabačaj) ili na trakastim temeljima, na tlu male nosivosti i velike deformabilnosti. U zidovima prizemlja nema vertikalnih serklaža, a na katu i zabatima uglavnom ih je malo. Kod nekih porušenih zgrada, vertikalni serklaži nisu imali armaturu. Međukatne konstrukcije su izvedene vjerojatno kao fert-stropovi ili tanke armiranobetonske ploče. Na neožbukanim vanjskim zidovima vidljivo je da su horizontalni serklaži male visine ili ih nema (ploha je prekrivena toplinskom izolacijom). Krovna konstrukcija je drvena.

Oštećenja kuća u selu Strašnik, gdje je bio epicentar potresa [11], nešto su manja nego u obližnjim selima u užem epicentralnom području potresa. To se obrazlaže činjenicom da se to selo nalazi na manjem brdu, s vjerojatno tankim slojem površinskog mekog tla iznad stijenskog masiva (manji je utjecaj prenesenog ubrzanja). Kako prethodno opisane tipske kuće imaju dosta zidova u oba smjera, a potresno ubrzanje bilo je pretežno vertikalno (slika 18.), one uglavnom nisu imale teška oštećenja. Najveća oštećenja bila su na krovovima i zidovima s više otvora. Urušeni su uglavnom stariji objekti neadekvatnog nosivog sustava i lošije kvalitete izgradnje te neke navedene tipske kuće.



Slika 23. Neka karakteristična oštećenja obiteljskih kuća u Novom Selu Glinskom

U mjestu Novo Selo Glinsko, koje se nalazi oko 7 km jugozapadno od epicentra potresa, primjetna su teža oštećenja na prethodno opisanim tipskim zgradama nego u Strašniku. To se obrazlaže činjenicom da je selo locirano na debljim naslagama mekog tla i da je tu utjecaj amplifikacije ubrzanja i njegove horizontalne komponente bio značajan (slika 18.). Naime, na većini oštećenih zgrada uočljivo je pomicanje čitavih zidova ili njihovih rubova prema jugozapadu, u smjeru kretanja udarnog vala iz epicentra

potresa. To je izazvalo brojne vertikalne pukotine u zidovima od djelovanja velikih udarnih poprečnih sila. Velike posmične potresne sile na tom lokalitetu svjedoče dva prevrnutna manja spomenika, čija je dimenzija u smjeru prevrtanja bila samo malo manja nego njihova visina (na slici 22. prikazana je prevrnutna kapelica).



Slika 22. Prevrnuta kapelica u Novom Selu Glinskom

Spomenici su se prevrnuti također u smjeru jugozapada, prema epicentru potresa (zbog suprotnog smjera inercijalne sile objekata u odnosu na djelujuću potresnu silu). Neka karakteristična oštećenja obiteljskih kuća u ovom selu prikazana su na slici 23.

Najteža oštećenja obiteljskih zgrada u selima oko epicentralnog područja potresa bila su vjerojatno u selu Majske Poljane, gdje je izgubljeno šest života. Ono je locirano oko 11 km jugozapadno od epicentra potresa, na pretežito ravničarskom terenu s vjerojatno debelim naslagama mekog i vodom zasićenog tla. Najjača oštećenja, ali ne i najveće potresne sile, tumače se činjenicom da su u ovom području obiteljske zgrade najlošije kvalitete te u mnogim slučajevima improvizirane nosive konstrukcije (osobito gospodarski objekti). Prema kvaliteti zgrada može se zaključiti da tu živi siromašno pučanstvo. Sumnja se da su u rušenju kuća gdje su izgubljeni ljudski životi, osim loše konstrukcije i izgradnje, važan utjecaj imali neprimjereni uvjeti temeljenja i moguća likvefakcija tla.

Jedan od rjeđih slučajeva urušavanja obiteljskih kuća zbog ponajviše njihovog fleksibilnog prizemlja vidljiv je na slici 25., koja prikazuje dvokatnicu u selu Prekopa, lociranom oko 9 km jugozapadno od epicentra potresa, uz cestu Glina – Petrinja. Zbog male krutosti prizemlja, došlo je do povećanih seizmičkih sila na krutom katu i sloma vertikalnih elemenata donje etaže, s translacijom gornje etaže približno od 1,0 – 1,5 m u smjeru jugozapada (udara potresa). Zbog ekscentričnosti centra krutosti u prizemlju u odnosu na centar masa, došlo je i do horizontalne rotacije gornje etaže (koja je oštećena, ali je očuvala integritet) u odnosu na tlocrt prizemlja. Urušavanju su doprinijeli i drugi faktori: loša kvaliteta zida, nedostatak serklaža, loša gradnja i sl. U području pogođenom potresom teško je oštećeno ili porušeno više crkava i drugih sakralnih građevina. Neke od njih prikazane su na slici 26. One u većini imaju nepovoljniju konstrukciju nego prethodno opisane stambene zgrade. Naime, pretežito su znatno više, masivnije i s većim potresnim silama, većih raspona/izmjera, složenije konstrukcije i ponegdje s većim nepovoljnim otvorima.



Slika 25. Urušena obiteljska kuća u selu Prekopa zbog fleksibilnog prizemlja i snage potresa



Slika 24. Fotografije nekih teško oštećenih i urušenih kuća u selu Majske poljane

Na slici 26.a prikazana je teško oštećena crkva sv. Marije Magdalene u mjestu Sela pored Siska, locirana oko 13 km sjeveroistočno od epicentra potresa. Ona ima brojne vertikalne pukotine u zidanim zidovima zbog prekoračenja horizontalnog vlačnog naprezanja u prilično nekvalitetnom zidu od sitne opeke, te brojne kose pukotine uz otvore od posmika. Masivna visoka kupola većeg raspona, koja također ima više pukotina, generala je velike potresne sile na donju konstrukciju i teško je oštetila.

U Novom Selu Glinskom srušen je zvonik i teško oštećen veliki dio crkve sv. Blaža i Benedikta (slika 26.b). Uzroci oštećenja i smjer pada zvonika analogni su prethodno navedenom za obiteljske kuće u tom selu. Pri tome treba navesti i dodatne nepovoljnosti za ovu crkvu, kao što su njena uzvišena lokacija (povećane potresne sile) te neprimjereni drvena, betonska i zidana konstrukcija.

Srušeni zvonik i dio južnog zabatnog zida crkve Uznesenja BDM u selu Gora, locirane 3 km sjeverozapadno od epicentra potresa, prikazani su na slici 26.c. Oni su izgrađeni izvana od kamenih blokova, s prilično nekvalitetnom ispunom od krupnog lomljenog kamena i betona. Srušeni konzolni zabatni zid u visini oko 6 m nije bio povezan s drvenim krovom, koji nije urušen i doima se konstrukcijski pouzdano. Smjer pada zvonika je također prema jugozapadu, od epicentra potresa.

Likvefakcija u tlu pri ovom potresu također je uvelike utjecala na stvaranje više od stotinu rupa (vrtača) u tlu (engl. *sinkholes*) u užem epicentralnom području potresa; najviše u selu Mečečani lociranom oko 22 km jugoistočno od žarišta potresa. Rupe su velike, promjera i dubine približno do 15 m, a neke su se pojavile uz same kuće (slika 27.). Njihovo nastajanje posljedica je djelovanja pomaka/trešnji tla uzrokovanih potresom u području vodom intenzivno saturiranog tla u slivu obližnjih rijeka i njihovih pritoka, gdje se ispod tankog humusnog sloja nalaze duboke naslage rahlog pjeskovitog tla. Naime, tijekom vremena



Slika 26. Neke potresom teško oštećene crkve: a) Crkva sv. Marije Magdalene u mjestu Sela; b) Crkva sv. Blaža i Benedikta u Novom Selu Glinskom; c) Crkva Uznesenja BDM u Gori

i osobito pri potresnom udaru dolazi do spuštavanja i zbijanja rahlog tla te dubokog propadanja površinskog sloja zbog prekoračene njegove vrlo male vertikalne posmične čvrstoće na plohi sloma. Ona je očekivano približno kružnog tlocrtnog oblika i gotovo vertikalna. Veliki dugotrajni utjecaj u nastajanju rupa ima promjena razine vode u tlu te njeno vertikalno i horizontalno kretanje, što dovodi do ispiranja i iznošenja sitnih čestica pijeska te propadanja krupnijih i težih čestica tla (tzv. sufozija). Pojava rupa neposredno uz kuće može se objasniti dodatnim tlakom na površini tla od njihove težine, što povećava slijevanje tla. Stoga je vjerojatna pojava takvih rupa i ispod samih kuća, što je iznimno opasno. Ova problematika razmatrana je također u [15].



Slika 27. Jedna od brojnih rupa u tlu u području sela Mećečani [16]

Zidane zgrade s krutim armanobetonским međukatnim konstrukcijama te ispravnim vertikalnim i horizontalnim serklažima nisu imale oštećenja ili su ona bila mala. Suvremene armanobetonске zgrade, a osobito one projektirane u skladu s propisima koji su na snazi nakon 2005. godine, praktično nisu imale oštećenja, iako je jačina potresa u tom području bila veća od one koja je do sada bila tu predviđena. To potvrđuje pouzdanost sadašnjih propisa za projektiranje i proračun građevina u seizmički aktivnim područjima. Međutim, oštećenja nekih novijih zgrada koja će zahtijevati veće troškove sanacije, a koje su projektirane prema konceptu da one mogu imati oštećenja ali da se ne smiju urušiti pri projektom ubrzanju, upućuju na potrebu da se što prije razmotri i usvoji još konzervativniji koncept proračuna s nižom razinom oštećenja građevine pri potresu.

4. Smjernice za obnovu porušenih i oštećenih zgrada u potresu

4.1. Nove zgrade

Sve potresom porušene i teško oštećene zgrade, kao i one čija obnova ne bi bila racionalna, treba ukloniti i izgraditi nove u skladu sa sadašnjim propisima, normama i pravilima struke za gradnju u seizmički aktivnim područjima. Pri tome treba uzeti u obzir sva stečena iskustva na

posljedicama ovog potresa, kao i lokalne specifičnosti na širem pogođenom području (geološko-geotehničke karakteristike tla, uvjeti temeljenja, tradicijska gradnja itd.).

Ovo je prilika da se za buduću gradnju u Hrvatskoj, kod njenih građana i sudionika u građenju, stvori svijest o nužnosti izgradnje dostatno seizmički otpornih građevina, te o potrebi seizmičkog ojačanja velikog broja postojećih građevina koje ne zadovoljavaju kriterije seizmičke otpornosti prema suvremenim propisima, a sve s ciljem da se izbjegnu gubici ljudskih života i goleme materijalne štete pri jačem potresu. Posljedice ovako jakog potresa, a vjerojatni su još snažniji potresi u velikom dijelu Hrvatske, trebale bi snažno odjeknuti u svijesti građana i rezultirati čvrstom spoznajom da provizorna i često nelegalna i nestručna izgradnja stambenih i osobito obiteljskih poljoprivrednih zgrada može rezultirati katastrofalnim posljedicama pri jačem potresu.

Ovo je također upozorenje dijelu projektanata građevinskih konstrukcija da pri projektiranju obrate više pozornosti na glavna i temeljna pitanja vezana za stvarnu sigurnost građevine i razinu njenog mogućeg oštećenja pri jačem potresu (npr. rješenju temeljenja, ispravnoj koncepciji nosive konstrukcije, rješenju detalja, odabiru i kvaliteti gradiva, ispravnom proračunu sigurnosti zgrade zasnovanom na njenim stvarnim pomacima i deformacijama/naprezanjima pri potresu, odabiru tzv. nekonstrukcijskih elemenata i sl.). Nažalost, čest je formalistički i nedovoljno vjerodostojni pristup s naglaskom na proračun potrebne armature i dokaz pomaka i naprezanja u nosivim elementima za često neprimjerenu nosivu konstrukciju, koristeći često njene neprimjerene proračunske modele. Trebamo uvijek biti svjesni da o našim projektnim rješenjima dominantno ovisi seizmička i opća sigurnost građevine, kao što također ovisi o kvaliteti izvedbe tj. savjesti izvođača, što ponekad nije slučaj. Također, potrebno je podići razinu stručnosti i odgovornosti tehničkog nadzora pri izvedbi, te zakonski uvesti obvezni povremeni projektantski nadzor pri izradi konstrukcije građevine. Nažalost, današnja zakonska regulativa u RH dopušta da projektant ne mora sudjelovati u izradi izvedbenog projekta, niti u izgradnji građevine. To je velika pogreška koja odgovara pojedincima, ali ne i društvu. Nužno je da projektant sudjeluje od ideje do kraja realizacije svake građevine, što je

bila donedavna dobra praksa. Trebali bi biti svi svjesni da teške posljedice razornog potresa nisu samo problem onih koji su njime izravno pogođeni, već čitavog društva koje zbog toga trpi goleme gubitke.

Kako su zgrade na potresom pogođenom području velikim dijelom locirane na debljem stišljivom tlu male nosivosti i velike deformabilnosti, sa značajnim amplifikacijama pomaka/ubrzanja od potresa, kao i zbog konstrukcijskih i drugih karakteristika pretežito nižih i krućih zgrada, poželjno je predvidjeti temeljenje pomoću betonske ploče na čitavoj površini zgrade. Kako većina zgrada ima mali broj etaža i nosive zidove na manjem razmaku, debljina temeljnih ploča može biti mala (vjerojatno 20-35 cm), kao i potrebna armatura u njoj. Iznad temeljne ploče do razine poda prizemlja, a sukladno s razinom na kojoj treba obaviti temeljenje (obvezna je kontrola projektanta konstrukcija, odgovornog geotehničara i nadzornog inženjera), treba izvesti krute nadtemeljne armiranobetonske zidove i tanju podnu armiranobetonsku ploču na kamenoj podlozi. Takva prostorno kruta armiranobetonska konstrukcija distribuirat će i umanjiti naprezanja u tlu, ublažiti njegova ukupna i relativna slijeganja te povećati općenitu sigurnost zgrade na moguće klizanje tla. Na lokalitetima kvalitetnijeg temeljnog tla i tamo gdje je to tehnički povoljnije i racionalnije, treba koristiti trakaste temelje sa što većom krutosti na savijanje/visinom (oblik poprečnog presjeka), koji trebaju biti povezani po obodu zgrade.

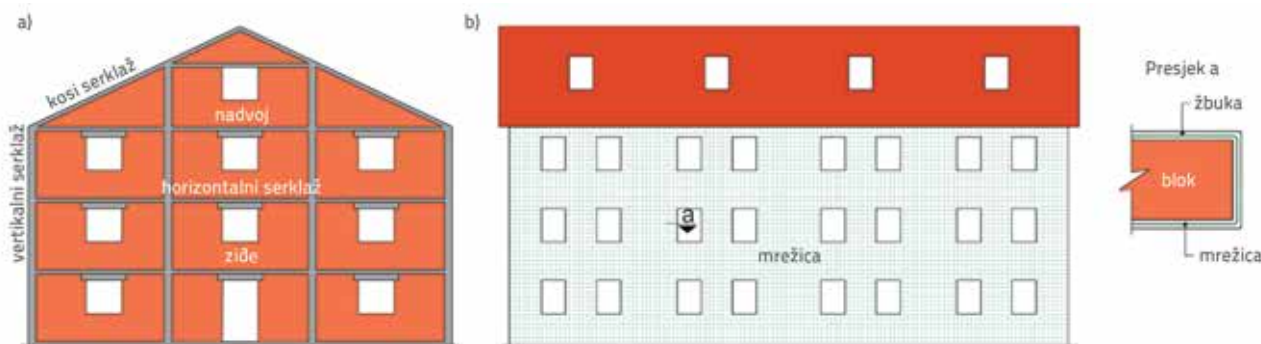
4.1.1. Nosiva vertikalna konstrukcija

Kako su zgrade na razmatranom području pretežito manje katnosti, te osobito zbog brzine gradnje, angažiranja većeg broja potencijalnih izvođača i ljudstva, manjih tehnoloških zahtjeva i sl., omeđeni zidani zidovi trebali bi biti povoljno rješenje vertikalne nosive konstrukcije većine zgrada u postojećim uvjetima. Pri tome bi zidovi trebali biti pravilno raspoređeni u tlocrtu zgrade u oba smjera (površina zidova u svakom smjeru u svakoj etaži trebala bi biti barem 3 % bruto tlocrtne površine etaže), debljine barem 25 cm. Poželjno je da zidovi jednog smjera budu što više na krajevima povezani sa zidovima drugog (okomitog) smjera, te da centar krutosti zgrade bude što bliže njenom centru masa. Vertikalni serklaži trebaju biti na razmaku do 4 m i oko većih

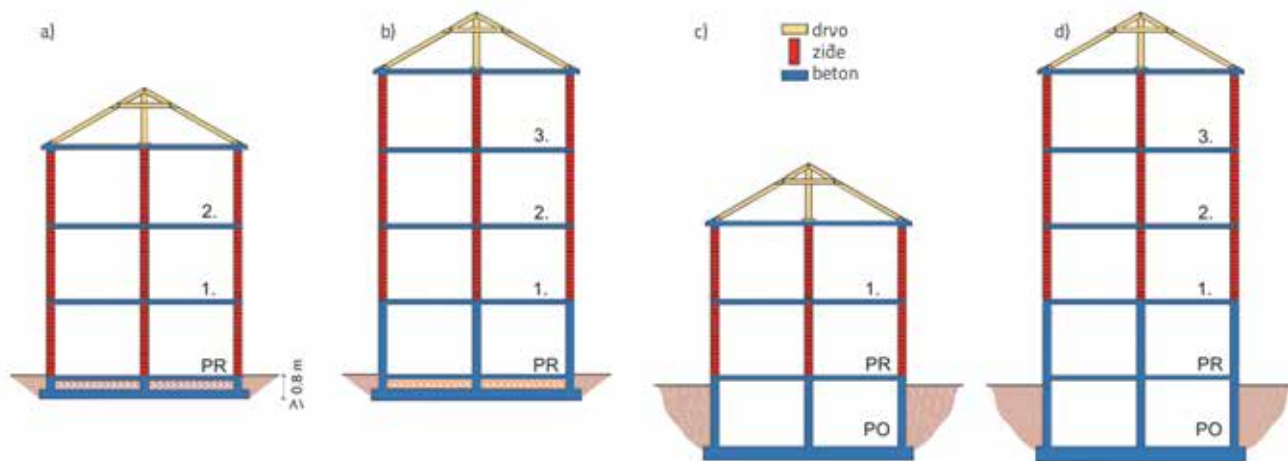
otvora, armirani s najmanje $4\phi 14$ uzdužno i poprečno s $\phi 8$ na razmaku do 25 cm. Horizontalne serklaže na razini međukatnih konstrukcija treba armirati s najmanje $4\phi 12$ uzdužno, te poprečno kao vertikalne serklaže. Na kosim zabatnim zidovima treba izvesti kose serklaže kao vertikalne serklaže. Armaturu serklaža treba oblikovati kao kod betonskih okvira, kako bi njihov doprinos nosivosti zida bio što veći (serklaži su u osnovi meki betonski okviri u kojima se pretežito javljaju uzdužne sile, ali i manji momenti savijanja).

U proračunu zidanih zidova/zgrada na potres, u prostorni model treba uključiti stvarnu geometriju zidova s otvorima (slika 28.a). U model krutosti, ali ne u nosivost, treba uključiti nekonstrukcijske zidove (ako značajnije doprinose ukupnoj krutosti zgrade), jer će se tako dobiti realnije/veće potresne sile u konstrukciji. Sve vlačne sile u betonskoj konstrukciji treba preuzeti armaturom (serklaži), a u zidu obostranim tankim nehrđajućim mrežicama (serklaži), a u zidu obostranim tankim nehrđajućim mrežicama u sklopu žbuke. S obzirom na njihovu nisku cijenu i jednostavnost izvedbe, preporuča se što intenzivnije koristiti tanke nehrđajuće mrežice malog "oka" od polipropilenskih, staklenih, bazaltnih ili sličnih vlakana, koje će znatno povećati nosivost nearmiranog zida na vlak i posmik, posebno njegovu duktilnost, te smanjiti širine pukotina. To je osobito korisno u nadvoju iznad otvora i parapetnom zidu iznad njega (tu su značajna vertikalna posmična naprezanja i horizontalna vlačna naprezanja), te u stupcima između otvora (tu su značajna horizontalna posmična naprezanja i vertikalna vlačna naprezanja). Mrežice trebaju biti nosive u oba smjera i preklapljene najmanje 20 cm, poprečno obavijene oko otvora (slika 28.b).

Pri proračunu zidanih zgrada na potres prema sadašnjim propisima [17, 18], treba uzeti koeficijent ponašanja (smanjenje sila pred slom u odnosu na sile dobivene prema teoriji elastičnosti) 1,5 do najviše 2,0. Naime, "proračunsko sprječavanje" zgrade od urušavanja, a da bi pri tome imala teška oštećenja i bila neracionalna za obnovu (što je posljedica prevelikog koeficijenta ponašanja), nema nikakva smisla. U tom pogledu, kao i inače, nije temeljna zadaća projektanta konstrukcija da, "slijepo" primjenjujući odredbe propisa i normi, "štedi" na troškovima za njenu izgradnju, što se u uvjetima jakog potresa često pokaže pogrešnim, već da projektira dugoročno racionalne, sigurne i trajne konstrukcije.



Slika 28. Neki jako perforirani zidani zidovi: a) Serklaži i nadvoji; b) Ojačanje zida tankim mrežicama



Slika 29. Shema moguće optimalne konstrukcije nižih zgrada

Fleksibilne etaže sa smanjenom krutosti vertikalnih konstrukcija, a osobito u prizemlju (što je danas čest slučaj), ne treba primjenjivati jer se time značajno smanjuje seizmička otpornost zgrade. Projektanti konstrukcija su često uvjereni da će svojim "preciznim proračunom" osigurati da ona ima zahtijevanu mehaničku otpornost i sigurnost za sva namijenjena opterećenja, što se ponekad pri jakom potresu pokaže netočnim. Zato treba više pažnje posvetiti oblikovanju ispravne koncepcije konstrukcije, rješavanju detalja i misaonoj analizi njenog stvarnog naponsko-deformacijskog ponašanja i mogućnosti preraspodjele unutarnjih sila pri potresu, uz svakako nužni adekvatni računski dokaz njene zahtijevane sigurnosti za projektirane uvjete.

Niski zidani zidovi, osobito oni s otvorima, obično imaju niži posmični nego savojni kapacitet nosivosti. Stoga je kontrola zida na posmik nužna. Dobro je što se u posmičnu nosivost omeđenog zidanog zida ne uključuje značajan doprinos vertikalnih serklaža, što je na strani veće sigurnosti. Nažalost, u praksi se često izostavlja provjera zidova na djelovanje potresa okomito na njihovu plohu. To je nužno provesti s adekvatnom računskom silom/ubrzanjem i osigurati potrebnu nosivost zida serklažima.

Projektiranim rješenjima treba što više smanjiti pomake zidane zgrade, a time i pomake malo otpornih pregradnih zidova i drugih nekonstrukcijskih elemenata, jer to neminovno vodi većim pukotinama i oštećenjima u konstrukcijskim i nekonstrukcijskim elementima (osobito na spojevima). U tom pogledu, ne treba štedjeti na površini poprečnog presjeka zidova u odnosu na tlocrtnu površinu zgrade, razmaku i dimenzijama serklaža, krutosti temelja i sl. Osobito treba izbjegavati krute i teške pregradne zidove male nosivosti, te preferirati lagane i visokonosive pregrade. Toplinsku izolaciju zgrada u pravilu treba rješavati neovisno o njenoj konstrukciji, naknadno na vanjskim ploham zidova, kako bi se nosiva zidana konstrukcija mogla najpouzdanije riješiti.

Omeđeni zidani zidovi kao jedini nosivi vertikalni elementi zgrada u područjima visoke seizmičnosti pogodni su za zgrade

do tri etaže (slika 29.a). Ako zgrada ima četiri etaže, u prizemlju treba predvidjeti armiranobetonske zidove (osobito u slučaju jako perforiranih/mekih zidova). To će ne samo povećati krutost i sigurnost zgrade u prizemlju, već također osigurati manje pomake čitave zgrade i bolju preraspodjelu naprezanja u tlu ispod temelja (slika 29.b).

Ako zgrada ima potpuno ili djelomično ukopani podrum, podrumsku konstrukciju treba također izvesti u armiranom betonu (slika 29.c). U protivnom, zidani zidovi bi zahtijevali guste vertikalne serklaže zbog bočnog potiska tla, bile bi veće koncentracije naprezanja u temeljnom tlu i zgrada bi imala manju trajnost. Ako zgrada ima podrum i četiri etaže iznad njega, armiranobetonske zidove treba izvesti u podrumu i prizemlju (slika 29.d). Velik utjecaj na kvalitetu zidane građevine ima njena izvedba. Zato je nužno osigurati pouzdanog izvođača radova te kvalitetni i kontinuirani tehnički nadzor pri njenoj izgradnji.

Za izgradnju višekatnih zgrada, većih izmjera i složenije konstrukcije, osobito s mnogo otvora u zidovima, optimalna vertikalna konstrukcija zgrada su armiranobetonski zidovi. Uz istu proračunsku sigurnost, u odnosu na omeđene zidane zidove, armiranobetonski zidovi imaju bolju vezu s međukatnim konstrukcijama i međusobno, povoljnije stanje raspucavanja u vlačnim zonama, bolju preraspodjelu unutarnjih sila pri potresu, ravnomjerniji prijenos opterećenja na temelje i sl., što upućuje na opći zaključak da su oni tehnički povoljniji. Međutim, omeđeni zidani zidovi mogu biti povoljno rješenje za niže zgrade u postojećim uvjetima zbog prethodno navedenih dobrih svojstava, kao što to mogu biti i armiranobetonski zidovi.

4.1.2. Međukatna konstrukcija

Optimalna međukatna konstrukcija zgrada mogu biti monolitne armiranobetonske ploče, najmanje debljine 14 (15) cm gdje se zahtijeva odgovarajuća zvučna izolacija. Poželjno je da ploče budu križno armirane, s kontinuiranom donjom armaturom (potrebni su prikladni preklopi iznad unutarnjih oslonaca radi mogućnosti preuzimanja eventualnog vlaka pri potresu i povećanja tlačne

nosivosti donjeg pojasa), te kontinuiranom gornjom armaturom u gornjoj ploči podruma i kata pri višekatnosti i nepravilnom tlocrtnom razmještanju nosivih zidova. Ploče trebaju biti dobro povezane s vanjskim zidovima armaturom, osobito sa zidanim zidovima. Betonska ploča ima veliku krutost u svojoj ravnini i djelotvorno "raspodjeljuje" horizontalne potresne sile na vertikalne nosive zidove sukladno s njihovom krutosti/deformabilnosti. Činjenica je da betonska ploča, u odnosu na lakšu polumontažnu konstrukciju, ima veću masu i doprinosi povećanju potresnih sila. Međutim, veća težina betonske ploče doprinosi većim tlačnim naprezanjima u zidu, koji povećavaju njegovu posmičnu nosivost. Ovo je osobito važno kod niskih krutih zgrada, kod kojih je utjecaj posmika pri potresu uvijek veći od utjecaja savijanja. Zbog malog vertikalnog tlačnog naprezanja i male posmične čvrstoće pri vrhu zidanih zidova, često se pri potresu javljaju horizontalne pukotine od horizontalnih sila na spoju međukatne konstrukcije i zida. S druge strane, povećana težina međukatne konstrukcije doprinosi smanjenju vlačne armature u betonskim zidovima i stupovima, te sigurnosti temelja na odizanje i klizanje. Također treba imati na umu da su ostali stalni teret iznad ploče i težina zidova uvijek veći od težine betonske ploče.

Općenito, dobro je voditi računa kakav je odnos vertikalnih i horizontalnih unutarnjih sila u zidovima i stupovima, te kako on utječe na njihovu armaturu i nosivost. Veliki moment savijanja i mala uzdužna tlačna sila (velika ekscentričnost tlačne sile) vodi većoj vlačnoj armaturi od savijanja, smanjenoj posmičnoj nosivosti i opasnosti od odizanja te gubitka stabilnosti temelja. Veća tlačna sila za isti moment savijanja i poprečnu silu, vodi manjoj vlačnoj armaturi, većoj posmičnoj nosivosti i manjoj rotaciji temelja. Velika uzdužna tlačna sila koja dovodi do prekoračenja tlačne nosivosti ili gubitka stabilnosti elementa je nepovoljna. Ukratko, povećana tlačna sila nije uvijek nepovoljna, već može biti i povoljna (osobito kod laganih krovnih konstrukcija zbog mogućnosti odizanja pri potresu/vjetru).

Racionalno rješenje kod zidanih zgrada može biti lagana polumontažna fert konstrukcija ili druga slična konstrukcija podjednakih svojstava. Kod takvih međukatnih konstrukcija bitno je da monolitna betonska ploča iznad montažne blokovske ispune bude debela barem 5 cm i da bude kontinuirano armirana zavarenim čeličnim mrežama nosivim u dva smjera, s "okom" 10 x 10 cm, površine najmanje 1,66 cm²/m (Q-166) i s

preklopima najmanje 30 cm u oba smjera. Također je vrlo važno da međukatna konstrukcija bude dobro povezana armaturom s vanjskim zidovima. Objektivno, armiranobetonska ploča je kvalitetnije rješenje od polumontažnih međukatnih konstrukcija.

4.1.3. Krovna konstrukcija

Radi jednostavnosti i brzine izgradnje, tehničke prihvatljivosti, racionalnosti i očuvanja tradicijske gradnje, preporučuje se kvalitetna drvena konstrukcija kosih krovova u što većem opsegu. Ona treba imati kvalitetan projekt (nacрте, detalje i proračun), što nažalost u brojnim slučajevima nije tako. Drvena građa treba biti dostatno suha, kvalitetna i zaštićena protiv insekata i truleži, te vlage na spojevima s betonom i zidom. Za manje i srednje raspone treba preferirati klasičnu drvenu građu, a za veće lijepljene lamelirane drvene nosače. Krovnu konstrukciju zgrade treba uključiti u njen globalni prostorni model za proračun na sva relevantna opterećenja, uključujući i potres.

Drvena krovna konstrukcija treba biti čvrsto povezana sa zabatnim zidovima zgrade i završnom ravnom betonskom krovnom pločom. Dobro je poznato, što potvrđuju brojni srušeni krovovi i pri ovom potresu, da se u vrhu zgrade generiraju velike potresne sile. Zato i ovaj dio konstrukcije zgrade treba adekvatno riješiti i izračunati, tako da po mogućnosti pretrpi samo manja oštećenja pri jakom potresu.

Osnovni nosivi sustav krovne konstrukcije treba biti takav da se za vertikalna opterećenja ne prenose horizontalne sile na vertikalne nosive elemente zgrade, odnosno da se one prenesu u armiranobetonsku krovnu ploču (npr. prema slici 30.). Također treba imati na umu da je krov često lagan i da može doći do njegova odizanja pri potresu (osobito u epicentralnom području s velikom vertikalnom komponentom ubrzanja) i "klizanja" pri istovremenom djelovanju horizontalnih komponenti ubrzanja potresa. Zato nadzidnica treba biti dobro usidrena vijcima u betonsku podlogu, a veze rogova s nadzidnicom, međusobno i s drugim gredama trebaju biti pomoću vijaka i moždanika. Također je bitno da drvena krovna konstrukcija bude dobro usidrena u kose zabatne zidove (kosi serklaž), s kojim zajedno treba tvoriti prostornu nosivu konstrukciju otpornu na vertikalna i horizontalna opterećenja. U tom kontekstu, važno je da drvena krovna konstrukcija bude kruta u svojoj ravnini i da može



Slika 30. Neki drveni krov s dijagonalnom uzdužnom ukrutom u njegovoj ravnini (kosnici)

prenijeti sve potresne sile u tom smjeru od svoje mase i mase zabatnih zidova. Pojednostavljeno rečeno, pri potresu krov treba nositi često slabašni zidani zabatni zid, a ne da zid nosi njega. Da bi se to osiguralo, najbolje je iznad rogova predvidjeti krutu daščanu oplatu sustava utor-pero, učvršćenu vijcima (eventualno čavlima) za robove. Ona ujedno služi za polaganje hidroizolacije krova i doprinosi toplinskoj izolaciji zgrade. Ako pak ona nije arhitektonski predviđena, ili je nema na postojećem krovu koji treba ojačati, u ravninama krova treba izvesti kosnike iz debelih mosnica za njegovu uzdužnu ukrutu, učvršćenih vijcima za robove (slika 30.).

Drvena krovna konstrukcija je osobito estetski povoljna kod stambenog potkrovlja. Tada je potrebno predvidjeti i izvesti estetski prikladne tesarske veze drvenih elemenata. Eventualno potrebne zidne istake (vertikalne konzole) do drvene nadzidnice treba izvesti iz armiranog betona, ili u kombinaciji gustih vertikalnih serklaža i horizontalnim serklažom na vrhu.

Ako se želi bolja zvučna izolacija i cjelovito trajnije rješenje, krovna konstrukcija može se predvidjeti kao kosa betonska ploča ili fert konstrukcija, uz primjeran proračun i izvedbu.

4.1.4. Nekonstrukcijski elementi zgrade

Nažalost, u projektima nosive konstrukcije zgrada obično se ne razmatra sigurnost njenih tzv. nekonstrukcijskih elemenata, kao što su pregradni zidovi, dimnjaci te ukrasni i drugi elementi na krovu ili pročeljima, čije urušavanje pri potresu može ubiti ili ozlijediti čovjeka. Zbog takvih iskustava pri petrinjskom i zagrebačkom potresu, ovakvu praksu u projektiranju i izvedbi nekonstrukcijskih elemenata zgrade treba odmah promijeniti. Takve elemente nužno je provjeriti na djelovanje potresnih sila okomito na njihovu ravninu, na analogan način kao konstrukcijske zidove. Poželjno je osigurati da pregradni zidovi budu pridržani bočnim zidovima, a ne samo međukatnim konstrukcijama. Pregradne zidove veće visine i nepridržanih krajeva treba izbjeći. Konzolne pregradne zidove ne koristiti. Ako je nužno, bočnu stabilnost zidova treba osigurati zasebnim vertikalnim ili kosim elementima. Osobito je važno da projektom predviđena rješenja budu ispravno realizirana u izvedbi.

Nove dimnjake treba predvidjeti iz lakših i čvršćih materijala, s prikladnom toplinskom i mehaničkom zaštitom, da generiraju manje potresne sile i da na njih budu mnogo otporniji. Dimnjak je nužno nepomično/čvrsto povezati s krovnom konstrukcijom, kako ne bi bio nepovoljnog konzolnog nosivog sustava od poda potkrovlja do vrha. Naime, u tom je slučaju gotovo nemoguće osigurati njegovu stabilnost čak i pri slabijem potresu. Neadekvatno pridržanje dimnjaka u ravnini krova najvažniji je razlog njihovog urušavanja pri potresu.

Svaki crijep na krovu treba ispravno učvrstiti vijkom ili eventualno čavlom za čvrstu drvenu letvu, jer njegov pad može biti poguban za onoga tko bi bio blizu takve zgrade čak i pri slabijem potresu. Naime, kao što je to prethodno navedeno za cijeli krov, tijekom potresa može doći do odizanja crijepa te uz malo horizontalno potresno ubrzanje do njegova klizanja i pada s krova.

Sve ukrasne i druge nekonstrukcijske elemente na pročeljima i krovu zgrade treba izbjegavati. Ako su oni nužni, treba osigurati njihovu stabilnost i sigurnost spoja za nosivi konstrukcijski element zgrade.

4.1.5. Ostala gradnja

Nove manje kuće u seoskim područjima mogu se graditi iz suhog, kvalitetnog prirodnog drva. Kod toga treba imati na umu njihove prednosti (manja masa – manje potresne sile, manji temelji, lakša i brža gradnja, kratkoročno niža cijena, ugodni interijer i eksterijer i sl.) i nedostatke (mala trajnost, visoki troškovi održavanja, dugoročno veća cijena, lošija zvučna izolacija, veće posljedice od požara, niža funkcionalnost i kvaliteta stanovanja i sl.) u odnosu na klasične betonske i zidane kuće.

Manje montažne armiranobetonske obiteljske kuće mogu se graditi u seoskim područjima, pri čemu treba inzistirati na kvalitetnim (trajnim) spojevima montažnih elemenata. U pravilu, one trebaju imati kvalitetu i ostale pozitivne značajke kao monolitne betonske kuće. Montažna gradnja većih stambenih zgrada nije prihvatljiva i davno je napuštena. Montažna gradnja od betona i čelika prikladnija je kod gospodarskih objekata.

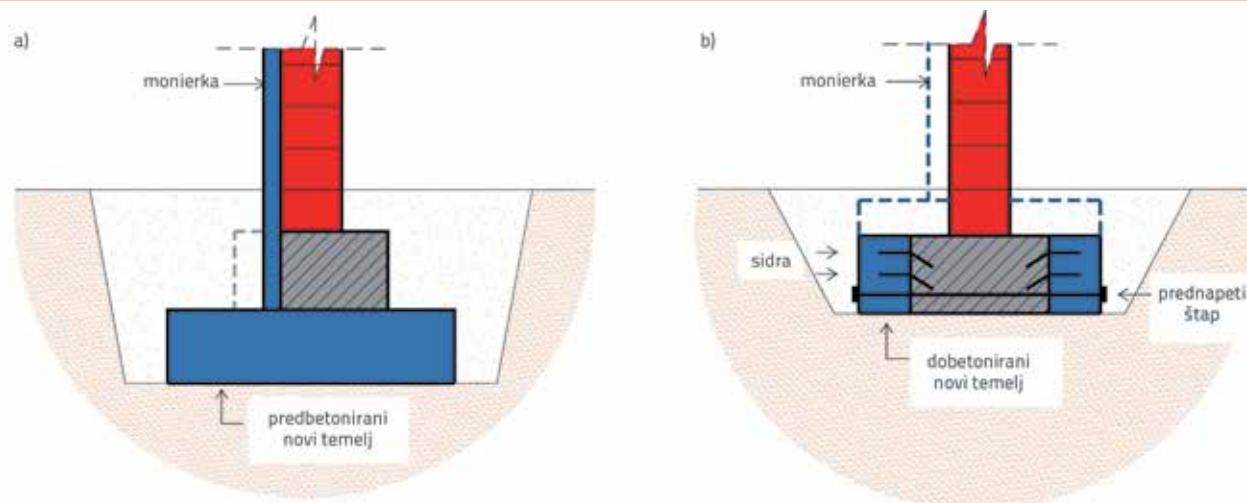
4.2. Ojačanje postojećih zgrada

4.2.1. Zgrade koje nisu zaštićena graditeljska baština

Bilo bi iznimno važno da teške posljedice nedavnih potresa u svijesti pojedinaca i svih građana Hrvatske rezultiraju potrebom povećanja postojeće seizmičke sigurnosti brojnih postojećih građevina lociranih u zonama visoke seizmičnosti ili barem onih koji su od širega društvenog interesa (bolnice, škole, važni privredni i kulturni objekti, mostovi i sl.), jer su takvi i još mnogo razorniji potresi mogući i vjerojatni ne samo na području Banovine i Zagreba, već duž čitavog obalnog i priobalnog hrvatskog područja. Takva bi inicijativa trebala biti organizirana i sustavno provedena na razini države, kao svaki strateški dugogodišnji državni projekt.

Uz subvenciju države u određenom iznosu, privatni vlasnik nedovoljno seizmički sigurne građevine trebao bi u pravilu uložiti vlastita sredstva u njeno protupotresno ojačanje i povećanje njene tržišne vrijednosti. Zahvati na zgradi mogu biti postupni i dugoročni, usklađeni s financijskim mogućnostima društva i pojedinca, te željenom razinom povećanja njene postojeće sigurnosti (ona bi se trebala definirati). Dokument o stupnju seizmičke sigurnosti svake građevine trebao bi biti jedan od važnih parametara pri definiranju njene tržišne vrijednosti.

Prema sadašnjem Zakonu [19], nije potrebno povećanje izvorne mehaničke otpornosti i sigurnosti postojeće građevine. To je jedino zahtjev pri njenoj rekonstrukciji, kada se značajnije utječe na njenu postojeću sigurnost, pri čemu se zahtijeva da postojeći i eventualni novi dio građevine trebaju imati mehaničku otpornost i sigurnost u skladu s aktualnim propisima. Zato je razina povećanja postojeće sigurnosti građevine zasad samo



Slika 31. Moguća rješenja povećanja nosivosti postojećih temelja

odluka njenog vlasnika, ali bi bilo dobro da za javne zgrade bude definirana od strane države. Bilo bi poželjno da se sve postojeće javne zgrade ojačaju tako da imaju proračunsku sigurnost kao nove zgrade.

Velik napredak u poboljšanju postojeće seizmičke sigurnosti mnogih građevina i smanjenju opasnosti za zdravlje i život ljudi pri potresu, postigao bi se samo: uklanjanjem težih visećih elemenata sa zidova i skraćivanjem ili bočnim pridržanjem visokih teških ormara unutar zgrade, ukrućom pokrova zgrade i njene krovne konstrukcije, zamjenom ili ukrućom dimnjaka, uklanjanjem nepotrebnih elemenata s krova i pročelja, ukrućom zabatnih zidova i njihovom boljom vezom s krovom itd., za što su potrebna mala sredstva. U postojećim uvjetima nema razloga koristiti specijalne materijale i postupke u sanaciji/ojačanju građevina, već je dostatno upotrijebiti uobičajene materijale i tehnologije izvedbe.

Povećanje nosivosti postojećih temelja u uvjetima deformabilnog tla kod najvećeg broja postojećih zgrada vjerojatno je najprikladnije riješiti njihovim primjerenim mjestimičnim proširenjem s "potkopanim" novim plitkim armiranobetonskim temeljem (slika 31.a), ili bočno dobetoniranim i utegnutim temeljem (slika 31.b), u sukcesivnoj izvedbi. U slučaju kvalitetnih postojećih temelja i šljunčanog tla, povoljna opcija može biti ojačanje tla ispod temelja mlaznim injektiranjem.

Način ojačanja postojećih zidova ovisi o željenoj razini povećanja njihove nosivosti, razmještaju unutar tlocrta zgrade i veličini opterećenja/sila koje prenose. U načelu, povoljna su mjestimična ojačanja postojećih zidova po pročeljima i unutarnjim stubištima tankom armiranobetonskom dijafragmom/monierkom, jer se tako ne mora zadirati u prostor stanovanja. Za sprezanje dijafragme i postojećeg zidanog zida u njemu treba "uštemati" niše na razmaku približno do 1,5 m x 1,5 m, a za sprezanje s postojećim betonskim zidom/elementom u njemu treba izvesti klasična sidra iz betonskog čelika. Ako je povoljno i moguće, preporučuje se dodati nove betonske zidove. Ako je potrebno manje povećanje postojeće nosivosti zidanih zidova, problem se može jednostavnije riješiti njihovim armiranjem s debljim nehrđajućim mrežama (karbonske, bazaltne i sl.), značajno

veće nosivosti od prethodno navedenih tankih mreža, u sklopu obostrane žbuke. Takav je pristup čest tijekom ojačanja zidanih zidova zaštićenih povijesnih građevina.

Golemo poboljšanje seizmičke sigurnosti zgrade s fleksibilnom međukatnom konstrukcijom jest njena zamjena s krutom. Mogu se koristiti klasične betonske ploče, tanke betonske ploče spregnute s drvenim ili čeličnim gredama, te drugi kvalitetni polumontažni sustavi s tankom križno armiranom betonskom pločom. Pri tome je važno osigurati kontinuitet međukatne konstrukcije unutar tlocrta svake etaže, kao i njenu dobru povezanost s vanjskim zidovima.

Pri izradi projekta ojačanja složenijih i važnijih društvenih zgrada i infrastrukturnih objekata, treba pažljivo analizirati svaku konstrukciju i primijeniti njeno optimalno seizmičko ojačanje, sa sigurnosti kao za nove zgrade.

4.2.2. Zgrade koje su zaštićena graditeljska baština

Ove zgrade treba ojačati i obnoviti u skladu s odlukom nadležne državne institucije, koja treba definirati razinu i prihvatljivi način njihovog ojačanja. U projektima i realizaciji takve obnove mogu sudjelovati samo oni koji imaju odgovarajuće dopuštenje Ministarstva kulture za rad na kulturnom dobru. Izrada i realizacija takvih projekata je svakodnevna i ne bi trebale pričinjavati teškoće.

4.3. Postupci izrade i realizacije projekata novih i obnove postojećih zgrada na području devastiranom potresom

Za sve objekte koji su u vlasništvu države ili ona financira njihovu obnovu, nužno je da se izrada i realizacija projekata obnove/ojačanja izvode otvoreno i na zakonit način, prema Zakonu o javnoj nabavi, bez ikakva pogodovanja bilo kojem pojedincu i tvrtki. Postupak obnove zgrada koje su u privatnom vlasništvu može biti putem izravnog ugovaranja radova, bez javnog nadmetanja, prema odluci investitora.

5. Zaključak

Na temelju iznijetog u ovom radu mogu se donijeti najvažniji niže navedeni zaključci. Osim razornog djelovanja potresa, uvelike je teškom oštećenju i rušenju zgrada na potresom pogođenom području pridonijelo ovo:

- neprimjerena aseizmička konstrukcija zgrada iz perioda Austro-Ugarske Monarhije
- neprimjerena gradnja obiteljskih kuća nakon Domovinskog rata
- značajna provizorna izgradnja gospodarskih zgrada i ponegdje obiteljskih kuća u seoskim područjima
- dopunsko povećanje potresnih sila na građevine zbog pretežito debelih naslaga mekog tla, te utjecaj likvefakcije tla na lokacijama njegove saturacije vodom.

Za pouzdano valoriziranje posljedica utjecaja potresa na građevine i iznalaženje optimalne koncepcije obnove njihove konstrukcije nužno je poznavati barem najvažnije parametre potresa.

Nastajanje potresa u stijenskom masivu uslijed međudjelovanja tektonskih ploča može se objasniti mehanizmom njegovog sloma zbog prekoračenja granične čvrstoće (deformacije), kada se oslobođena energija deformacije u stijenskom masivu naglo pretvara velikim dijelom u kinetičku energiju potresa. Uzroci oštećenja i

rušenja svake građevine mogu se objasniti pažljivom analizom interaktivnog utjecaja potresa, tla i njene konstrukcije.

U izgradnji novih građevina na razmatranom području poželjno je pretežno upotrebljavati provjerene kvalitetne armiranobetonske i omeđene zidane konstrukcije, izračunane u skladu s propisima i pravilima struke s nižim (konzervativnim) faktorom ponašanja pri potresu. Niske montažne drvene i betonske kuće mogu se koristiti u seoskim i eventualno prigradskim područjima.

Rekonstrukcija svake teže oštećene građevine je specifična, u kojoj trebaju sudjelovati samo iskusni projektanti i izvođači.

Izradu projekata i realizaciju radova na izgradnji i rekonstrukciji svakog javnog objekta treba provesti otvorenim postupkom prema Zakonu o javnoj nabavi.

Bilo bi iznimno važno i korisno da teške posljedice ovog potresa u svijesti svakog pojedinca i čitavog društva potaknu na čvrstu odluku da će se povećati nedovoljna seizmička sigurnost brojnih građevina u RH na dogovorenu razinu, jer ona sada takva da mnoge od njih mogu razoriti čak i umjereni potresi.

Zahvala

Ovo istraživanje djelomično je podržano kroz projekt KK.01.1.1.02.0027, projekt koji sufinanciraju Vlada Republike Hrvatske i Europska unija kroz Europski fond za regionalni razvoj - Operativni program za konkurentnost i koheziju. Autori su zahvalni na potpori.

LITERATURA

- [1] Seizmiloška služba, Petrinja earthquake sequences – December 28th and 29th, 2020. https://www.youtube.com/watch?v=OSvZhrplVng&ab_channel=SeizmološkaSluzba
- [2] Herak, D., Herak, M.: The Kupa Valley (Croatia) Earthquake of 8 October 1909 - 100 Years Later, *Seismological research Letter* 81 (2010) 1, pp. 30-36, <https://doi.org/10.1785/gssrl.81.1.30>
- [3] Giardini, D. et al.: Seismic Hazard Harmonization in Europe (SHARE): Online Data Resource, <https://doi.org/10.12686/SED-0000001-SHARE>, 2013.
- [4] Tondi, E., Blumetti, A.M., Čičak, M. et al.: Conjugate coseismic surface faulting related with the 29 December 2020, Mw 6.4, Petrinja earthquake (Sisak-Moslavina, Croatia), *Sci Rep* 11 (2021), 9150, <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88378-2>
- [5] Dasović, I., Herak, D., Herak, M., Latečki, H., Mustač, M., Tomljenović, B.: O potresima u Hrvatskoj, *Vijesti Hrvatskoga geološkog društva*, 57/1, godina XLVII, 4 (2020) 27, <http://www.geologija.hr/pdf/vijesti-hgd/Web%20Vijesti%2057-1.pdf>
- [6] Herak, D., Herak, M., Tomljenović, B.: Seismicity and earthquake focal mechanisms in North-Western Croatia. *Tectonophysics*, 465 (2009) 1-4, pp. 212-220, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2008.12.005>.
- [7] United States Geological Survey (USGS), <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000d3zh/executive>
- [8] The National Institute of Geophysics and Volcanology (INGV), <https://ingvterremoti.com/2020/12/30/il-terremoto-mw-6-4-del-29-dicembre-2020-in-croazia-quale-piano-di-faglia/>
- [9] OIKON d.o.o. – Institut za primijenjenu ekologiju, https://oikon.hr/hr/analiza-pomaka-tla-u-petrinji-i-okolici-nakon-razornih-potresa/?fbclid=IwAR0hKzQFeWKHaVU3udBeDa6s8HKQZyLcGA6RPzPa50eaA1STdo-H_2vcg4
- [10] Markušić, S., Stanko, D., Penava, D., Ivančić, I., Bjelotomić Oršulić, O., Korbar, T., Sarhosis, V.: Destructive M6.2 Petrinja Earthquake (Croatia) in 2020 - Preliminary Multidisciplinary Research, *Remote Sensing*, 13 (2021) 6, 1095, <https://doi.org/10.3390/rs13061095>
- [11] Seizmološka služba pri Geofizičkom odsjeku, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu https://www.pmf.unizg.hr/geof/seizmološka_sluzba/potresi_kod_petrinje_2020#
- [12] Hrvatski geološki institut, <https://www.hgi-cgs.hr/priopćenje-za-medije-izvjesce-hrvatskog-geoloskog-instituta-o-potresima>
- [13] Pikija, M.: Osnovna Geološka karta 1:100 000, List Sisak; Institut za geologiju Zagreb; Federalni geološki institut: Beograd, Jugoslavija, 1987.
- [14] Hrvatska udruga za krizni menadžment, procjena posljedica potresa Petrinja pomoću Copernicus EMS, https://hukm.maps.arcgis.com/apps/View/index.html?appid=ed22857664644f10ae2e6e3a3c97af22&fbclid=IwAR1xl5wyil5mdTE1NBuC77YX7dT6ZUNRYVoP8rMTm8_67Rp0-H3jrp4-xQ

- [15] Tomljenović, B., Stipčević, J., Sečanj, M.: Izvješće o zabilježenim pojavama koseizmičkih površinskih deformacija na području Pokuplja i Banovine nastalih potresnom serijom od 28.12. 2020 do 5.01.2021., <https://www.rgn.unizg.hr/hr/izdvojeno/2790-izvjesce-o-zabiljezenim-pojavamakoseizmickih-povrsinskih-deformacija-na-podrucju-pokuplja-i-banovine-nastalih-potresnom-serijom-od-28-12-2020-do-5-01-2021>
- [16] Fotografija rupe u selu Mečočani, <https://www.greenme.it/informarsi/ambiente/doline-carsiche-croazia/>
- [17] Hrvatski zavod za norme (HZN): HRN EN 1996-1-1, Eurokod 6: Projektiranje zidanih konstrukcija -- Dio 1-1: Opća pravila za armirane i nearmirane zidane konstrukcije (HRN EN 1996-1-1:2012/Ispr.1:2015), Hrvatski zavod za norme, Zagreb, 2015.
- [18] Hrvatski zavod za norme (HZN): HRN EN 1998-1-1, Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija -- 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade (HRN EN 1998-1:2004/A1:2013)), Hrvatski zavod za norme, Zagreb, 2013.
- [19] Zakon o gradnji, Narodne novine, broj NN 125/2019, https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2019_12_125_2489.htm



Pravo je vrijeme za sveobuhvatne obnove

Obnova zgrade ili obiteljske kuće idealno je vrijeme kada osim o izgledu treba razmišljati i o kvaliteti života unutar stambenog prostora.

Pravi odabir izolacijskog materijala može poboljšati životne uvjete i na brojne druge načine - smanjujući razinu buke, održavajući stabilnu temperaturu u svakoj prostoriji, smanjujući račune za grijanje i hlađenje, ali i doprinoseći očuvanju okoliša i sigurnosti ukućana u slučaju požara.

Više na www.rockwool.com/hr/



ROCKWOOL

IZOLACIJSKA RJEŠENJA OD KAMENE VUNE