

# KONCEPT TEMELJENJA PASIVNIH HIŠ NA POTRESNIH OBMOČJIH

## FOUNDATION CONCEPT FOR PASSIVE HOUSES IN SEISMIC AREAS

**prof. dr. Vojko Kilar, univ. dipl. inž. grad.**

vojko.kilar@fa.uni-lj.si

**Boris Azinovič, univ. dipl. inž. grad.**

boris.azinovic@fa.uni-lj.si

**doc. dr. David Koren, univ. dipl. inž. grad.**

david.koren@fa.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, Zoisova 12,  
1000 Ljubljana

**Znanstveni članek**

UDK 697.1:699.84

**Povzetek** | V članku je predstavljen predlagani koncept temeljenja energijsko-učinkovitih stavb na izolirani AB temeljni plošči, ki ohranja dobre lastnosti z vidika toplotne zaščite stavb, njegova dodatna naloga pa je funkcija potresne varovalke, ki lahko bistveno poveča potresno odpornost stavbe. Sistem varovalke temelji na principu dopuščene minimalnega horizontalnega zdrsa med sloji toplotne izolacije pod stavbo, do katerega pa lahko pride samo pri močnejših potresnih vzbujanjih. Zaradi dodanih vertikalnih in horizontalnih zadrževalnikov so zdrsi/nagibi kontrolirani in omejeni. Z izbiro konstrukcijskega sklopa z izbranim koeficientom trenja je investitorju in projektantu omogočena izbira želene stopnje zaščite: 1. *Osnovna zaščita* (kot po predpisih), 2. *Izboljšana zaščita* (kontroliran zdrs z malo poškodbami ali brez njih) ali 3. *Visoka zaščita* (potresna izolacija). Prikazani izbrani rezultati opravljenih nelinearnih dinamičnih analiz različnih AB konstrukcij potrjujejo učinkovitost predlaganega sistema temeljenja. Po mnenju avtorjev je za gradnjo energijsko učinkovitih stavb na potresno ogroženih območjih trenutno najracionalnejša izbira predlaganega scenarija izboljšane zaščite. V tem primeru je detajl temeljenja mogoče izvesti z običajnimi materiali iz prakse sodobne energijsko-učinkovite gradnje in ne pomeni večjega dodatnega stroška.

**Ključne besede:** pasivna hiša, energijsko-učinkovita gradnja, drsna potresna izolacija, temeljenje na toplotni izolaciji, potresna varovalka, koeficient trenja

**Summary** | In the paper, a conceptual foundation solution for reducing the seismic response of passive houses founded on layers of thermal insulation (TI) is proposed. The system prevents the occurrence of thermal bridges through RC foundation slab, and is capable of acting as seismic fuse to increase the seismic resistance of the building. The seismic fuse allows the minimal horizontal sliding between the TI layers, which could be activated only in the case of stronger ground motions. Due to additionally implemented vertical and horizontal restrainers the shifts/rocking rotations are controlled and limited to structurally acceptable levels. Depending on the selected friction coefficient between the TI layers, three different seismic response scenarios can be expected: scenario 1: Basic protection ("sliding prevention, no damage reduction"); scenario 2: Extended protection ("sliding controllable, damage reduced or eliminated") and scenario 3: High protection ("sliding isolation system"). The selected results of NLDA analysis of different RC structures have confirmed the efficiency of the proposed foundation system. The authors believe that at the time being, the most rational is the selection of the scenario »Extended protection«. In this case, the proposed seismic fuse could be easily constructed without any significant additional costs, using the materials that have already been used in the practice of modern energy efficient building.

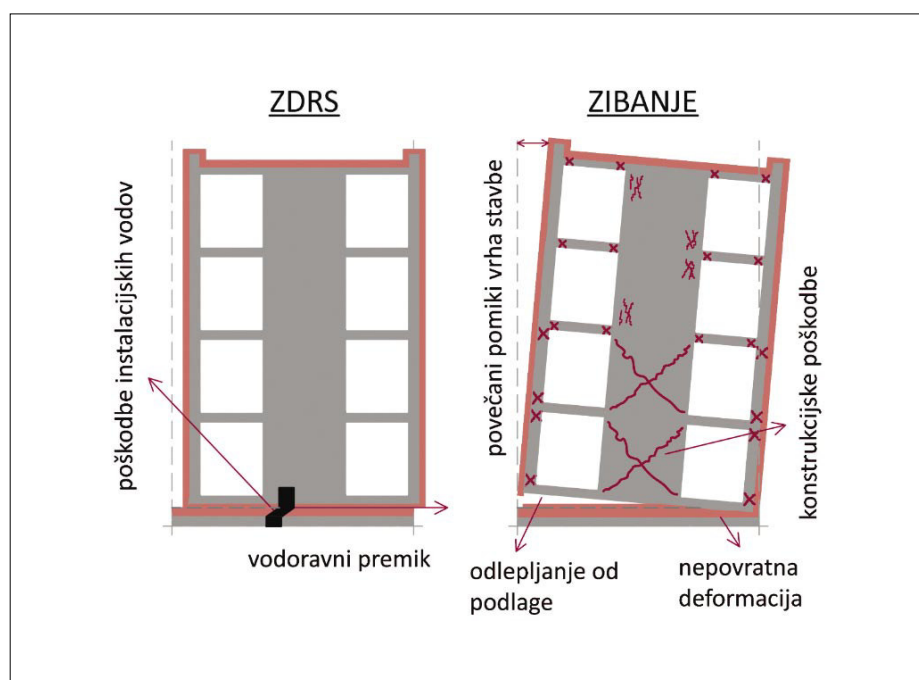
**Keywords:** passive house; energy-efficient building; sliding isolation; foundation on thermal insulation; seismic fuse; friction coefficient

## 1 • UVOD

Pri gradnji energijskoučinkovitih stavb moramo največ pozornosti nameniti zahtevi o neprekinjenosti toplotnoizolacijskega ovoja stavbe. Večina obstoječih rešitev (detajlov) energijskoučinkovitih stavb izvira predvsem iz potresno neogroženih območjih, kot je Nemčija, kjer sta razvoj in tehnologija takšnih stavb v največjem porastu. V primeru prenosa teh rešitev na potresno aktivna območja je treba posebno pozornost posvetiti tudi potresno odporni izvedbi konstrukcijskih detajlov. Eden od njih je temeljenje na toplotni izolaciji (TI), ki si ga lahko ponazorimo z obnašanjem trdne težje kocke, postavljene na mehko blazino. Kocka se bo zaradi vertikalne teže pogreznila v blazino, zaradi horizontalnih premikov blazine se bo kocka zibala, ob bolj sunkovitih premikih pa bo kocka zdrsnila v horizontalno smer ((Kilar, 2013a), (Kilar, 2013b), (Kilar, 2013c)). Temu podobno je obnašanje stavbe na več slojih TI pod armiranobetonsko (AB) temeljno ploščo, ki je prikazano na sliki 1. Napetosti zaradi vertikalne in horizontalne obtežbe lahko povzročijo prekoračitve vertikalne tlačne nosilnosti toplotnoizolacijskih plošč in nepredvidena povečanja obremenitev na konstrukcijo zgornje stavbe, nagibanje stavbe in posledično stiskanje izolacije. Deformacije zaradi horizontalnega zdrsa pa lahko vodijo v poškodbe instalacijskih vodov, dostopov, stopnic in drugih priključkov. Na podlagi predhodnih raziskav v okviru projekta Javne agencije za raziskovalno dejavnost RS (ARRS) z naslovom Varnost pasivnih hiš pri potresu smo iskali ustrezne (nadomestne) rešitve temeljenja na TI s poudarkom na konstrukcijski/potresni varnosti. Tako predlagamo

poseben koncept temeljenja na TI, ki v primeru močne potresne obtežbe lahko obvaruje nosilno konstrukcijo pasivne hiše pred poškodbami in v kombinacijami z ustrezno sprojektiranimi zadrževalniki hkrati omogoča varovanje inštalacijskih vodov. Med potresom je treba določene inštalacijske vode, ki potencialno ogrožajo človeška življenja (npr. elektrika, plin), varovati z namenom zadostitve zahteve po njihovi neporušitvi. Sistem temelji na principu drsenja, ki se aktivira šele pri močnejših

potresnih vzburjanjih, in zagotavlja kontroliran potresni odziv tako temeljenih stavb. Po principu delovanja je torej predlagani sistem podoben drsnim potresnim izolatorjem ((Naeim, 1999), (Hong, 2004), (Kilar, 2007), (Panchal, 2009), (Fadi, 2010), (Koren, 2011), (Becker, 2012), (Lu, 2013), (Chung, 2015)). Za zanimivost velja poudariti, da je bil konceptualno podoben način temeljenja na drsnih svinčenih ploščah uporabljen pri gradnji ljubljanskega Nebotičnika (Fajfar, 1995). Predlagani sistem je namenjen za izboljšanje potresne varnosti različnih energijskoučinkovitih stavb, temeljenih na toplotnoizolacijskih ploščah iz različnih materialov.



Slika 1 • Možno obnašanje energijskoučinkovite stavbe med potresi – prikaz brez aplikacije predlagane rešitve temeljenja

## 2 • SISTEM POTRESNE VAROVALKE

### 2.1 Opis predlaganega koncepta temeljenja

Predlagani sistem temeljenja je izveden s pomočjo toplotnoizolacijskih plošč z vmesnim slojem hidroizolacije ali folije (drsní sloj), ki glede na način izvedbe površine (hrapavost, žlebljenje, lepljenje) zagotavlja želeni koeficient trenja. Sistem smo dopolnili z vertikalnimi in/ali horizontalnimi zadrževalniki različnih izvedb, katerih uporaba pa ni vedno nujna. Uporabimo lahko torej vse obstoječe konstrukcijske elemente za temeljenje na to-

plotni izolaciji in iz njih sestavimo poseben konstrukcijski sklop, ki pod AB temeljno ploščo deluje kot potresna varovalka. Z aplikacijo predlaganega sistema se izboljša potresni odziv tako temeljenih stavb, saj so manj izpostavljene zibanju, preprečeno pa je tudi nekontrolirano drsenje. V primeru močnejšega potresa sistem horizontalnih zadrževalnikov dopušča manjše kontrolirane horizontalne zdrse ( $\Delta H$ ) in deluje kot potresna varovalka – ščiti pred poškodbami zgornjo konstrukcijo,

saj vanjo ne more prenesti večje horizontalne sile, kot je sila trenja konstrukcijskega sklopa pod njo. Glavne komponente predlaganega sistema so (slika 2):

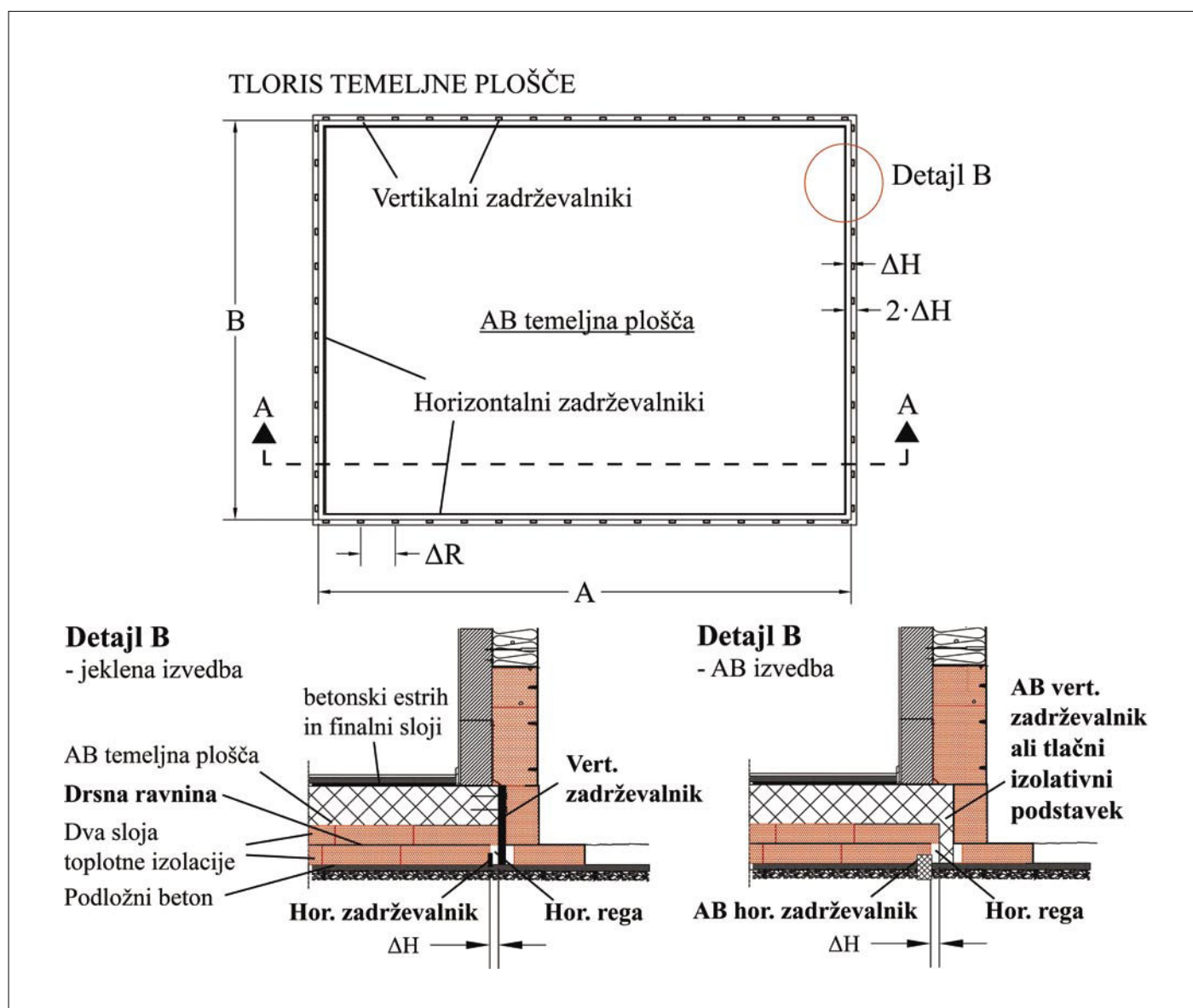
- (1) Dve ali več toplotnoizolacijskih plošč ustrezne debeline in trdnosti.
- (2) Izbrana drsna ravnina (vmesni sloj folije ali hidroizolacije med dvema slojema TI-plošč).
- (3) Horizontalni zadrževalniki, ki preprečujejo zdrsa na stiku utrjene podlage (podložnega betona) in spodnjega sloja TI-plošč.
- (4) Vertikalni zadrževalniki, ki preprečujejo nekontrolirano zibanje in bočno omejujejo največji horizontalni pomik (zdrs).

- (5) Horizontalna rega ( $\Delta H$ ), s katero je omejen največji dopustni horizontalni pomik (zdrs).

Vertikalni zadrževalniki so vgrajeni v rob temeljne plošče enakomerno po celotnem obodu (na medsebojni razdalji  $\Delta R$  – slika 2). Na stiku s podlago morajo imeti dovolj veliko jekleno ali AB kontaktno površino, da v primeru močnega potresa zmanjšujejo nekontrolirano čezmerno zibanje in s tem prekoračitev tlačnih trdnosti in mejnih tlačnih deformacij v TI pod temeljno ploščo. Zibanje preprečujejo tako, da se na tlačni strani naslonijo na podložni beton, ki mora biti po potrebi dodatno ojačan po vsem obodu temeljne plošče. Vertikalni zadrževalniki se

vgradijo dovolj nagosto, da se omejijo kontaktne tlačne napetosti na stiku s podlago. Poleg tega vertikalni zadrževalniki z bočnim naleganjem na sloje TI omejujejo velikost horizontalnega zdrsa. Lahko so različnih oblik in izvedb, kar je prepuščeno projektantu. Morajo biti izdelani iz materiala z nizko toplotno prevodnostjo in visoko tlačno in upogibno trdnostjo (možen je sistem izvedbe z okroglimi dvojno zvitimi jeklenimi armaturnimi palicami, različnimi jeklenimi profili oz. kovinskimi elementi, s tlačnimi podstavki iz toplotnoizolativnega (nano)betona ali pa tudi z masivnimi AB zavijki/robovi/distančniki, ki se vgradijo/ulijejo v AB temeljno ploščo ali podložni beton). Zadrževalnike projektiramo na želeni višji nivo zaščite (tj. ob upoštevanju

potresa s predpostavljeno večjo povratno dobo, kot jo upoštevamo pri dimenzioniranju same drsne ravnine/rege in zgornje konstrukcije), in ob upoštevanju redukcijskega faktorja  $q=1$ . Pri nižjih hišah je zibanje v primeru potresa zanemarljivo in zato vertikalni zadrževalniki za omejevanje nagiba stavbe niso nujno potrebni. Njihova funkcija je v tem primeru samo omejevanje zdrsa, zato je lahko njihova izvedba enostavnejša. V primeru močnejše potresne obtežbe se lahko zgornji sloj toplotnoizolacijskih plošč skupaj s stavbo v horizontalni smeri premakne za največ  $\Delta H$  (slika 3) v katerokoli smer. Velikost horizontalne rege ( $\Delta H$ ) med vertikalnim in horizontalnim zadrževalnikom se določi v fazi projektiranja glede na izbrani konstruk-



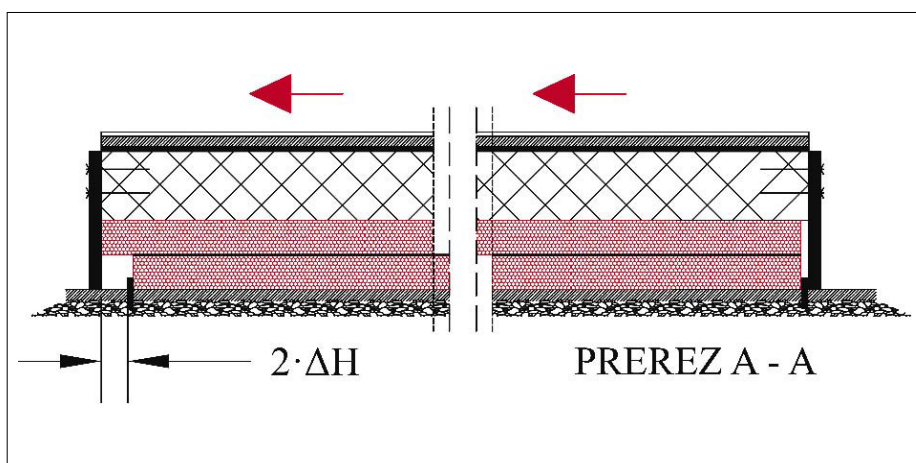
Slika 2 • Shematski prikaz (tloris in detajl) predlaganega sistema temeljenja

cijski sklop, koeficient trenja drsne površine, maso stavbe, projektni pospešek temeljnih tal (projektno intenziteto) na dani lokaciji ter zeleno raven zaščite zgornje konstrukcije. Hkrati je treba upoštevati tudi deformabilnost vseh instalacijskih vodov, ki potekajo skozi temeljno ploščo. Drsna ravnina mora biti izvedena tako, da ima nižji koeficient trenja, kot ga imajo preostali stiki med sloji uporabljenega konstrukcijskega sklopa. Za nekatere posamezne sklope oz. njihove stike med sloji smo koeficient zdrsa izmerili s testi in znaša med 0,3 in 0,5 (Kilar, 2014). V večini primerov je v drsni ravnini smotrna uporaba hidroizolacije ali folije, ki ima dvojno vlogo: osnovni namen je zaščita celotne ali dela temeljne blazine pred vlago oz. vodo v primeru visoke podtalnice, dodatno pa hidroizolacijski sloj pri močnejših potresih omogoča zdrse, ki pa so zaradi sistema horizontalnih in vertikalnih zadrževalnikov omejeni oz. kontrolirani. Horizontalni zadrževalniki so izvedeni na obeh straneh spodnjega sloja TI kot enostavni omejevalci pomika (npr. robniki iz armiranega betona, kovinski profili, lahko so tudi del okoliškega tlaka ali drenažnih cevi), ki morajo biti za prevzem horizontalnih sil ustrezno temeljeni oz. utrjeni.

## 2.2 Možnost izbire stopnje zaščite konstrukcije (scenarij odziva)

Predlagana rešitev za temeljenje projektantu in/ali investitorju omogoča, da preko koeficienta trenja drsne površine sam izbere zeleno stopnjo zaščite konstrukcije zgornje stavbe in njene vsebine v primeru močne potresne obtežbe. V splošnem lahko izbira med tremi osnovnimi scenariji potresnega odziva (slika 4):

– »Osnovna zaščita« – scenarij, pri katerem je **zdrs preprečen**, zagotovljena pa je osnovna zaščita zgornje konstrukcije. To pomeni, da je raven zaščite zgornje konstrukcije enaka, kot je zahtevana po predpisih (pri projektnem potresu lahko še vedno nastanejo poškodbe zgornje konstrukcije). Uporaben je za enostavnejše (1- do 2-etažne) stavbe z zadovoljivo potresno odpornostjo, pri katerih zmanjšanje potresnih sil ni nujno potrebno. Za takšne stavbe je v drsni ravnini pod temelji priporočljiva uporaba slojev z večjim koeficientom trenja ali z drugimi mehanskimi ukrepi, tako da do drsenja pri projektnem pospešku temeljnih tal na dani lokaciji sploh ne pride. Pri večjih potresnih intenzitetah je mogoče tudi mehansko preprečevanje zdrsa s predlaganim sistemom horizontalnih in vertikalnih zadrževalnikov ali drugimi po-



Slika 3 • Obnašanje sistema temeljenja v primeru močne horizontalne obtežbe (stavba nad AB ploščo na sliki se je premaknila v levo)

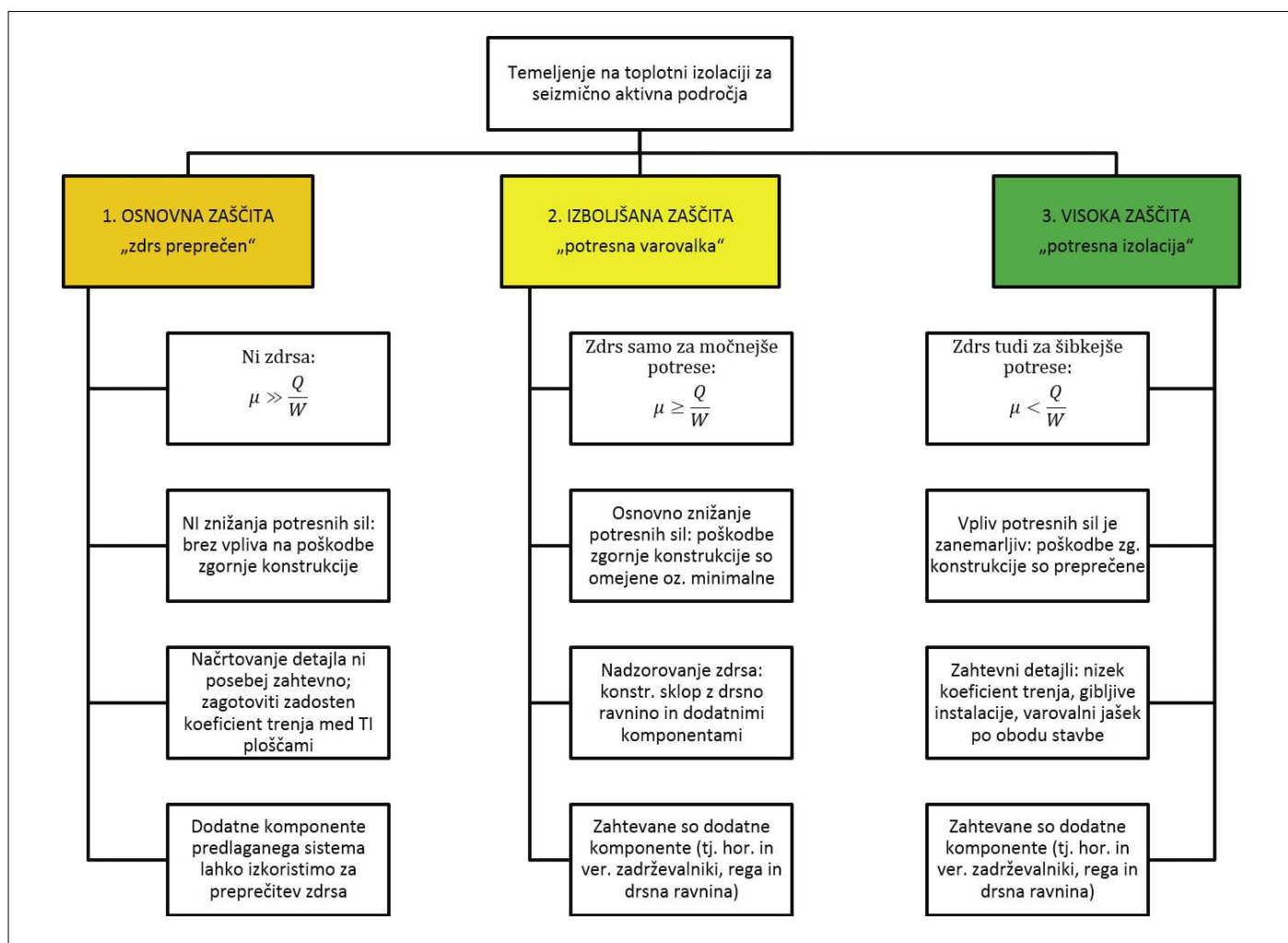
dobnimi ukrepi (lepljenje površin), s katerimi lahko zagotovimo, da bo  $\Delta H \approx 0$ , vendar pa tega ne priporočamo, saj tako za vse intenzitete preprečimo delovanje potresne varovalke.

– »Izboljšana zaščita« – scenarij, pri katerem dopustimo manjše horizontalne zdrse v zato predvideni ravnini pod temelji. Ta scenarij omogoča omejitev potresnih sil, ki se preko drsne ravnine med potresom iz tal lahko prenesejo v zgornjo konstrukcijo. To pomeni, da je nivo zaščite zgornje konstrukcije boljši, kot je zahtevan po predpisih (pri projektnem potresu nastanejo bistveno manjše poškodbe zgornje konstrukcije ali pa ta ostane elastična). **Potresna varovalka** se vključuje v vseh primerih, ko je potresna sila večja od tiste, na katero je bila stavba projektirana. Ob kontroliranih zdrsih lahko na dano potresno silo zgornjo konstrukcijo projektiramo tako, da bo stavba ostala nepoškodovana tudi pri močnejših potresih od projektnega.

– »Visoka zaščita« – scenarij, pri katerem še dodatno omejimo potresne sile, ki se preko drsne ravnine med potresom iz tal lahko prenesejo v zgornjo konstrukcijo. To dosežemo z izbiro čim manjšega koeficienta trenja med sloji toplotne izolacije pod temelji. Vrednosti koeficientov trenja so primerljive z vrednostmi, ki jih imajo običajni drsni potresni izolatorji (med 0,05 in 0,15 v primeru stika teflon – nerjavno jeklo). V praksi je tako nizke vrednosti koeficienta trenja sicer relativno težko/drugo doseči, saj gre za velike površine (pod celotno temeljno ploščo). Ta scenarij pomeni, da je nivo zaščite zgornje konstrukcije še boljši kot v zgoraj opisanih scenarijih, in omogoča

podobno zaščito, kot jo nudi **potresna izolacija** (brez poškodb zgornje konstrukcije tudi pri zelo močnih potresih). Raziskave specifičnih kontaktnih materialov, ki bi se lahko splošno uporabljali v gradbeni industriji, so čedalje pogostejše ((Nanda, 2012), (Quaglioni, 2014), (Calvi, 2015)). Za učinkovito delovanje predlaganega sistema temeljenja je pri tretjem scenariju treba zagotoviti vse dodatne komponente (ustrezno gibljive instalacijske vode, vertikalne in horizontalne zadrževalnike, horizontalne rege  $\Delta H$ ). V povezavi s slednjo je nujno potrebna izvedba dilatacije objekta po celotnem obodu temeljne plošče, s čimer se tudi izognemo morebitnim trkom objekta s sosednjimi stavbami (Polycarpou, 2010). V praksi lahko mejno strižno napetost, pri kateri se bo zdrs aktiviral, povečajo tudi kontaktni pritiski zaradi vertikalnih reakcij stavbe in sama izvedba temeljne plošče, ki nikoli ni popolnoma ravna. Ker pa v predlaganem sistemu temeljenja zdrs nastopa v sredini med sloji TI, je pričakovati, da bodo vplivi neravnosti precej manjši. V praksi je treba izvesti horizontalno rego tako, da pri projektnem potresu zadrževalniki ne trčijo.

Meje med scenariji sicer niso vedno ostre, po mnenju avtorjev pa je pri sodobnih pasivnih hišah najbolj priporočljivo in racionalno projektirati na drugi scenarij (»izboljšana zaščita«), saj v tem primeru lahko uporabimo materiale, ki se tudi običajno uporabljajo v že znanih (obstojećih) detajlih temeljenja pasivnih hiš. Posledično so dodatni stroški v primeru implementacije drugega scenarija zanemarljivi.



Slika 4 • Opis možnih scenarijev potresnega odziva stavb, temeljenih po predlogu

### 3 • RAČUNALNIŠKE ANALIZE POTRESNEGA ODZIVA STAVB, TEMELJENIH NA PREDLAGANEM SISTEMU

#### 3.1 Parametrična študija poenostavljenih (SDOF) modelov

Učinkovitost predlaganega sistema temeljenja smo najprej analizirali s parametrično študijo 2-etažnih stavb z nihajnimi časi ( $T_{FB}$ ) v območju med 0,10 in 0,30 s. Pri tem nihajni čas ( $T_{FB}$ ) predstavlja nihajni čas vpete (angl. *fixed base*) konstrukcije tj. konstrukcije, ki ni temeljena na TI. Uporabljen je bil poenostavljen SDOF-numerični model ((Azinović, 2014), (Kilar, 2015), (Azinović, 2016), (McKenna, 2015)), shematsko prikazan na sliki 5. Temeljna plošča florisnih dimenzij 16 x 8 m je bila modelirana kot absolutno toga in podprta z nelinearnimi vzmetmi, ki simulirajo toplotnoizolacijsko podlago, tj.

30 cm sloj iz dveh 15 cm plošč iz ekstrudiranega polistirena (XPS) z nominalno tlačno trdnostjo 400 kPa. Mehanske karakteristike XPS-plošč pri tlačni in strižni obremenitvi ter koeficiente trenja na sklopih, ki se uporabljajo na stiku konstrukcije s temeljnimi tlemi, smo določili v okviru eksperimentalnih raziskav, opravljenih v Konstrukcijsko-prometnem laboratoriju na UL FGG ((Bokan-Bosiljkov, 2013a), (Bokan-Bosiljkov, 2013b), (Kilar, 2014)). Strižna (trenjska) nosilnost sklopov pod obravnavano stavbo je bila v parametrični študiji upoštevana pri tlačni predobremenitvi, ki ustreza začetnim tlačnim napetostim v TI-podlagi zaradi teže konstrukcije v potresnem projektne stanju

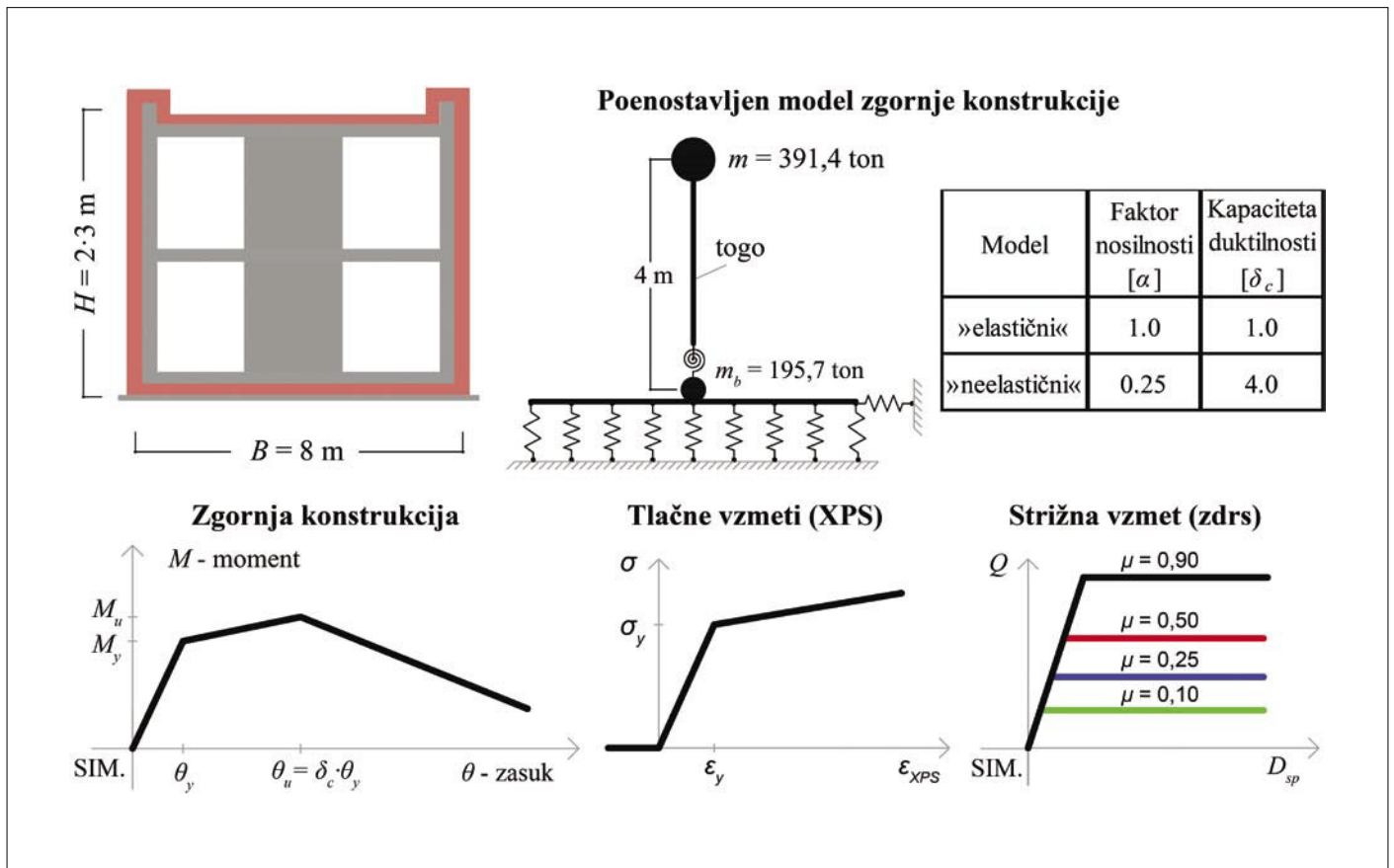
(45 kPa). Analiziranih je bilo 6 variant detajla z različnimi koeficienti trenja ( $\mu = 0,1-0,9$ ). Za zgornjo konstrukcijo sta bili v analizi upoštevani dve različni varianti – s predpostavljenim elastičnim obnašanjem (s faktorjem nosilnosti  $\alpha = 1,0$  in kapaciteto duktilnosti  $\delta_c = 1,0$ ) in s predpostavljenim nelinearnim obnašanjem ( $\alpha = 0,25$  in  $\delta_c = 4,0$ ). Nelinearno obnašanje zgornje konstrukcije je bilo modelirano z idealizirano trilinearno ovojnico. Modeli z elastičnim obnašanjem predstavljajo nižje pasivne stavbe z visokim deležem sten glede na florisno površino stavbe. Ti modeli so bili analizirani za opazovanje odziva oz. obnašanja konstrukcije na nivoju temeljev (npr. dosežen horizontalni pomik oz. zdrs  $D_{sp}$ ), medtem ko so bili modeli z nelinearnim in duktilnim obnašanjem analizirani za opazovanje odziva oz. obnašanja zgornje konstrukcije (npr. dosežena zahteva za duktilnost  $\delta_d$ ) (Azinović, 2014).

Potresna obtežba je bila simulirana z naborem 30 akceleroگرامov, ki so bili izbrani tako, da se je njihov povprečni spekter pospeškov prilegal Evrokodovemu elastičnemu spektru (SIST, 2005) s 5 % dušenjem, za tla tipa A s projektnim pospeškom temeljnih tal 0,25 g. Magnitude izbranih potresov so bile v območju med 5,5 in 7, oddaljenosti od prelomnic pa med 5 in 50 km. Izbranih 30 akceleroگرامov tako predstavlja različne zapise naslednjih potresov: Northridge (1994), Morgan Hill (1984), Bagnoli Irpinia (1980), Loma Prieta (1989), San Fernando (1971), Coyote Lake (1979), Whittier Narrows (1987), and Sierra Madre (1991). Potresni odziv obravnavanih stavb smo analizirali z inkrementalno dinamično analizo (IDA), kjer smo intenziteto vzbujanja vsakega posameznega akceleroگرامa povečevali s korakom 0,02 g do 1,0 g. Za končni rezultat smo pri izbrani intenziteti vzbujanja opazovali povprečni največji odziv vseh 30 upoštevanih akceleroگرامov in verjetnosti pojava scenarijev pri različnih potresnih intenzitetah. Detajli modeliranja, opravljenih analiz in podrobni rezultati študije so podani v ((Azinović, 2014), (Kilar, 2015), (Azinović, 2016)).

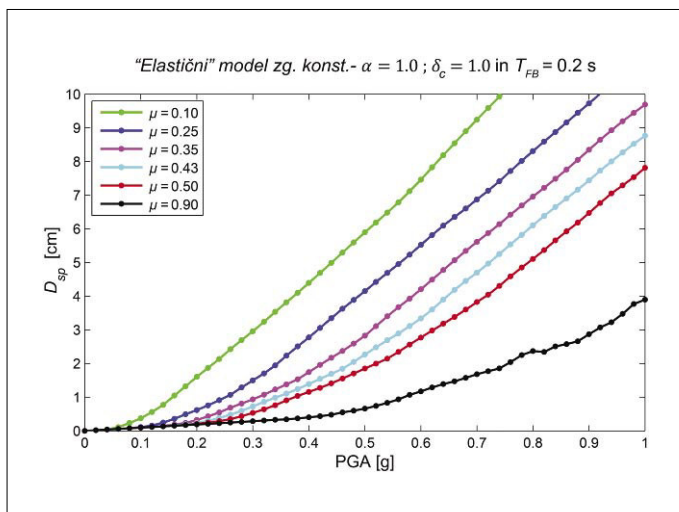
Izbrani rezultati računalniških simulacij na poenostavljenih (SDOF) modelih stavb so prikazani na slikah 6–8. Na sliki 6 je v obliki povprečnih IDA-krivulj prikazan največji doseženi pomik oz. zdrs spodaj ( $D_{sp}$ ), tj. na nivoju TI pod temelji analizirane stavbe z nihajnim časom  $T_{FB} = 0,20$  s (model s predpostavljenim elastičnim obnašanjem ( $\alpha = 1,0$  in  $\delta_c = 1,0$ )). Vidimo, da se pri podani intenziteti vzbujanja največji zdrsi pojavijo v primeru uporabe sklopa z nizkim koeficientom trenja. Pri koeficientu trenja  $\mu = 0,1$  analizirana stavba zdrsi že pri šibkih potresih ( $PGA < 0,10$  g) in lahko govorimo o scenariju visoke zaščite oziroma o drsni potresni izolaciji. V tem primeru pa je treba računati na večje horizontalne pomike, ki zahtevajo ustrezno projektiranje gibljivih instalacijskih vodov in dilatacij. Pri projektnem potresu ( $PGA = 0,25$  g) je v danem primeru velikost zdrsa znašala okrog 2,5 cm. V primeru izbire sklopa z višjim koeficientom trenja ( $\mu = 0,9$ ) je zdrs preprečen tudi v primeru močnejših potresov ( $PGA \leq 0,45$  g). Kateri scenarij odziva bo dosežen pri preostalih analiziranih vrednostih koeficienta trenja (med 0,1 in 0,9), je odvisno predvsem

od ravni  $PGA$ . Kriterij pojava drsenja bo opisan in prikazan v nadaljevanju članka v obliki krivulj ranljivosti.

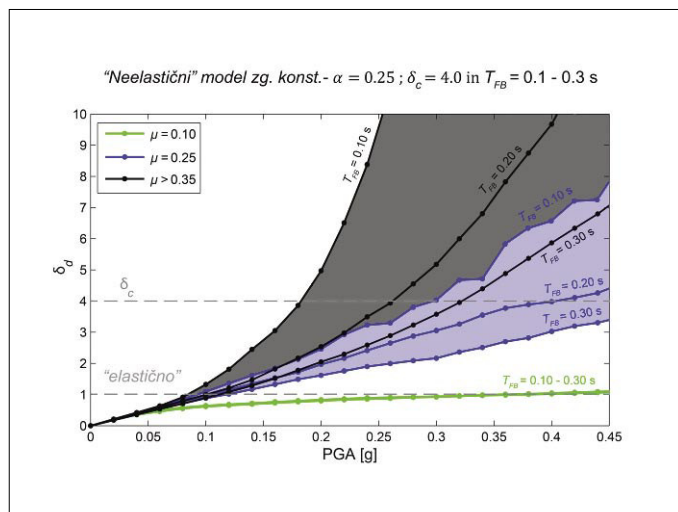
Na sliki 7 je v analogni obliki kot na sliki 6 prikazana največja dosežena duktilnost ( $\delta_d$ ) zgornje konstrukcije analizirane stavbe (model s predpostavljenim nelinearnim obnašanjem ( $\alpha = 0,25$  in  $\delta_c = 4,0$ )). Pri tem so na istem grafu prikazani rezultati za stavbe z različnimi nihajnimi časi:  $T_{FB} = 0,10$  s, 0,20 s in 0,30 s (pahljasta prikaz). Opazovani parameter ( $\delta_d$ ) je definiran kot kvocient med doseženo rotacijo v plastičnem členku in rotacijo na meji elastičnosti in je dejansko pokazatelj poškodovanosti zgornje konstrukcije. Iz grafa vidimo, da poškodbe lahko zmanjšamo, če za konstrukcijski sklop pod temeljno ploščo uporabimo nižji koeficient trenja. Pri  $PGA = 0,3$  g na primer opazimo, da je obnašanje vseh analiziranih modelov s koeficientom trenja  $\mu = 0,1$  elastično, modeli z  $\mu = 0,25$  utrpijo poškodbe, ki pa so omejene ( $\delta_d \leq \delta_c$ ), pri modelih z večjimi koeficienti trenja pa pride do porušitve ( $\delta_d > \delta_c$ ). Pri tem so poškodbe večje v primeru konstrukcij s krajšimi nihajnimi časi ( $T_{FB}$ ).



Slika 5 • Numerični model analiziranih stavb



Slika 6 • Povprečne IDA-krivulje za največji doseženi pomik (zdrs) (elastični model zgornje konstrukcije)



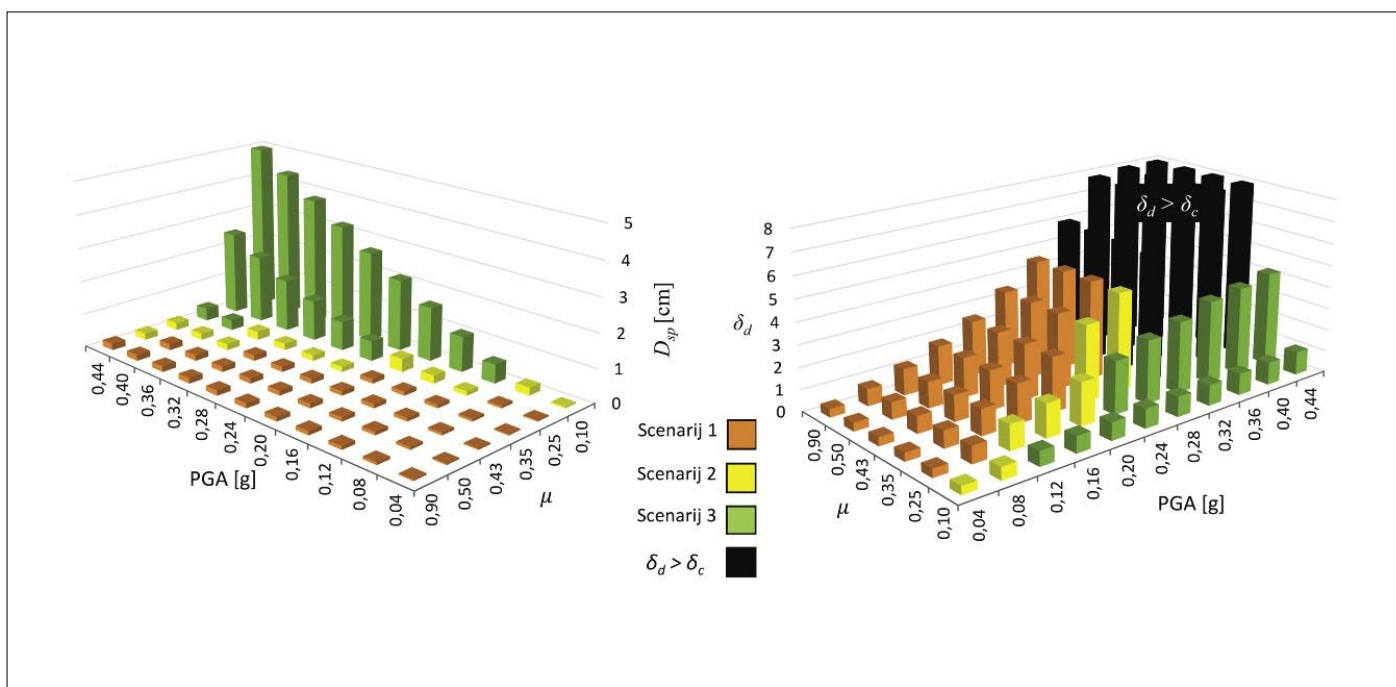
Slika 7 • Povprečne IDA-krivulje za največjo doseženo duktilnost zgornje konstrukcije (neelastični model)

Za model z nihajnim časom  $T_{FB} = 0,20$  s in s predpostavljenim nelinearnim obnašanjem ( $\alpha = 0,25$  in  $\delta_c = 4,0$ ) so na sliki 8 in v preglednici 1 pokazani posamezni scenariji odziva (glede na doseženi horizontalni pomik in duktilnost) v odvisnosti od stopnje PGA in upoštevane koeficienta trenja. Kriterij za določitev vrste scenarija, ki je bil uporabljen na sliki 8, izhaja iz rezultatov za doseženi horizontalni pomik oz. zdrs ( $D_{sp}$ ). Ta je največji v primeru nizkih  $\mu$  in pri močnejših vzbujanjih

– takrat lahko govorimo o tretjem scenariju (visoka zaščita). Če natančneje pogledamo, kakšne so v teh primerih zahteve za duktilnost ( $\delta_d$ ) oz. raven poškodovanosti zgornje konstrukcije, vidimo, da je bila kapaciteta duktilnosti ( $\delta_c$ ) v izbranih primerih presežena in torej v teh primerih (črni stolpci na sliki 8) kljub močnemu drsenju ne moremo govoriti o scenariju visoke zaščite zgornje konstrukcije. Pri končni določitvi scenarija potresnega odziva obravnavane konstrukcije je torej naj-

no hkrati opazovati horizontalne pomike oz. zdrs ( $D_{sp}$ ) in zahteve za duktilnost zgornje konstrukcije ( $\delta_d$ ).

Če opazujemo zahteve za duktilnost ( $\delta_d$ ) pri stopnji PGA 0,25 g (preglednica 1), lahko vidimo, da se v primerjavi z modelom s preprečenim zdrsom ( $\mu = 0,90$ ) zahteva za duktilnost ( $\delta_d$ ) zmanjša za 37,5 % (model z  $\mu = 0,25$ ) oz. v primeru drsne potresne izolacije ( $\mu = 0,10$ ) kar za 80 %.



Slika 8 • Scenariji potresnega odziva analiziranih modelov (neelastični model zgornje konstrukcije,  $T_{FB} = 0,20$  s) glede na raven PGA

Za ilustracijo so predlagani scenariji potresnega odziva na sliki 9 prikazani še v obliki krivulj ranljivosti ((Dolšek, 2012), (Eads, 2013)) za pojav zdrsa med XPS-ploščami pod temeljno ploščo stavbe. Pri tem je bil v modelu zdrs numerično določen kot stopnja  $PGA$ , pri kateri je dejanska strižna sila v horizontalni vzmeti dosegla njeno strižno nosilnost (slika 5). Pri tem smo v vsakem koraku IDA-analize (tj. pri vsaki analizirani stopnji  $PGA$ ) ugotovili, pri koliko akceleroگرامih se je aktiviral mehanizem zdrsa, in nato izračunali kvocient med številom akceleroگرامov, pri katerih se je pojavil zdrs, in številom vseh upoštevanih akceleroگرامov (30). Ta kvocient je v obliki stopničastih krivulj prikazan na sliki 9 in ga lahko interpretiramo kot verjetnost drsenja pri izbrani stopnji  $PGA$ . Pri tem je treba poudariti, da pri takšni interpretaciji verjetnosti ni bila upoštevana funkcija potresne nevarnosti in zato ta kvocient ne predstavlja verjetnosti prekoračitve mejnega stanja. V splošnem to pomeni, da bi lahko v realnosti še vedno nastal zdrs, čeprav je verjetnost drsenja pri nizkih stopnjah  $PGA$  majhna. Dodatno je prikazana še regresijska krivulja, ki je bila določena z uporabo lognormalnih porazdelitvenih funkcij (Baker, 2015). Tako določene krivulje nam lahko v fazi projektiranja služijo za napoved scenarija potresnega odziva in izbiro ustreznega detajla za temeljenje. V primeru zelenega prvega scenarija (osnovna zaščita), je za detajl temeljenja najprimernejša izbira koeficienta trenja z zelo majhno pogojno verjetnostjo drsenja. Kot lahko vidimo s slike 9, takšno verjetnost izkazujejo detajli z visokimi koeficienti trenja ( $\mu = 0,9$ ) pri stopnjah  $PGA$  do največ 0,2 g. Nasprotno pa je v primeru zelenega tretjega scenarija (visoka zaščita) za detajl temeljenja najprimernejša izbira koeficienta trenja z zelo veliko verjetnostjo drsenja pri projektnem potresu. Za doseg drugega scenarija (izboljšana zaščita), kjer je zahtevan kontroliran oz. omejen zdrs, pa je predlagana izbira sklopa (koeficienta trenja), pri katerem je pri projektnem potresu verjetnost zdrsa v povprečju enaka 50 %. Lahko pa verjetnost zdrsa projektant izbere tudi poljubno glede na želje investitorja posameznega objekta. Če je zelena višja stopnja zaščite zgornje konstrukcije in instalacijskih vodov, je treba pri izbiri koeficienta trenja upoštevati višje verjetnosti zdrsa (približujemo se tretjemu scenariju). V primeru analiziranega elastičnega modela zgornje konstrukcije z detajlom temeljenja s koeficientom trenja, enakim  $\mu = 0,50$ , (slika 9) lahko predlagane tri scenarije definiramo takole: 1. scenarij je predviden za šibke potrese

Scenarij potresnega odziva	Osnovna zaščita*	Izboljšana zaščita	Visoka zaščita
$\mu$	> 0,50	~ 0,25	< 0,10
stična (drsna) ravnina	stik XPS-XPS ali XPS-beton	običajna HI med dvema XPS-ploščama	med dvema XPS-ploščama posebni sloj kot npr. teflon
Projektni $PGA$ (0,25 g)			
$D_{sp}$ (cm)	0,1	0,7	2,3
$\delta_d$	4,0	2,5**	0,8
Povečani $PGA$ (0,375 g)			
$D_{sp}$ (cm)	0,2	1,8	4,1
$\delta_d$	8,8	3,9	1,0

\* podobno se obnaša stavba, ki ni temeljena na TI  
 \*\*  $\delta_d \leq 1,0$  lahko dosežemo z zmanjšanjem koeficienta trenja ( $\mu$ ) ali pa s povečanjem kapacitete duktilnosti konstrukcije ( $\delta_c$ )

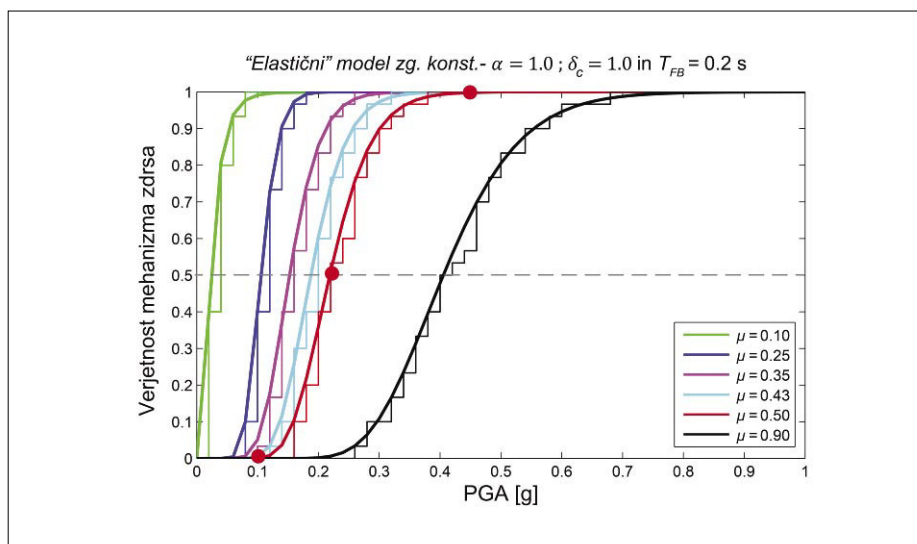
Preglednica 1 • Srednje vrednosti nelinearnega dinamičnega odziva analiziranih modelov (neelastični model zgornje konstrukcije,  $T_{FB} = 0,20$  s) pri izbrani stopnji  $PGA$

( $PGA < 0,10$  g), 2. scenarij pri potresih s  $PGA$  okrog 0,25 g, 3. scenarij pa lahko pričakujemo v primeru močnih potresov ( $PGA > 0,45$  g).

### 3.2 Analiza odziva dejanske AB stavbe (MDOF-modeli)

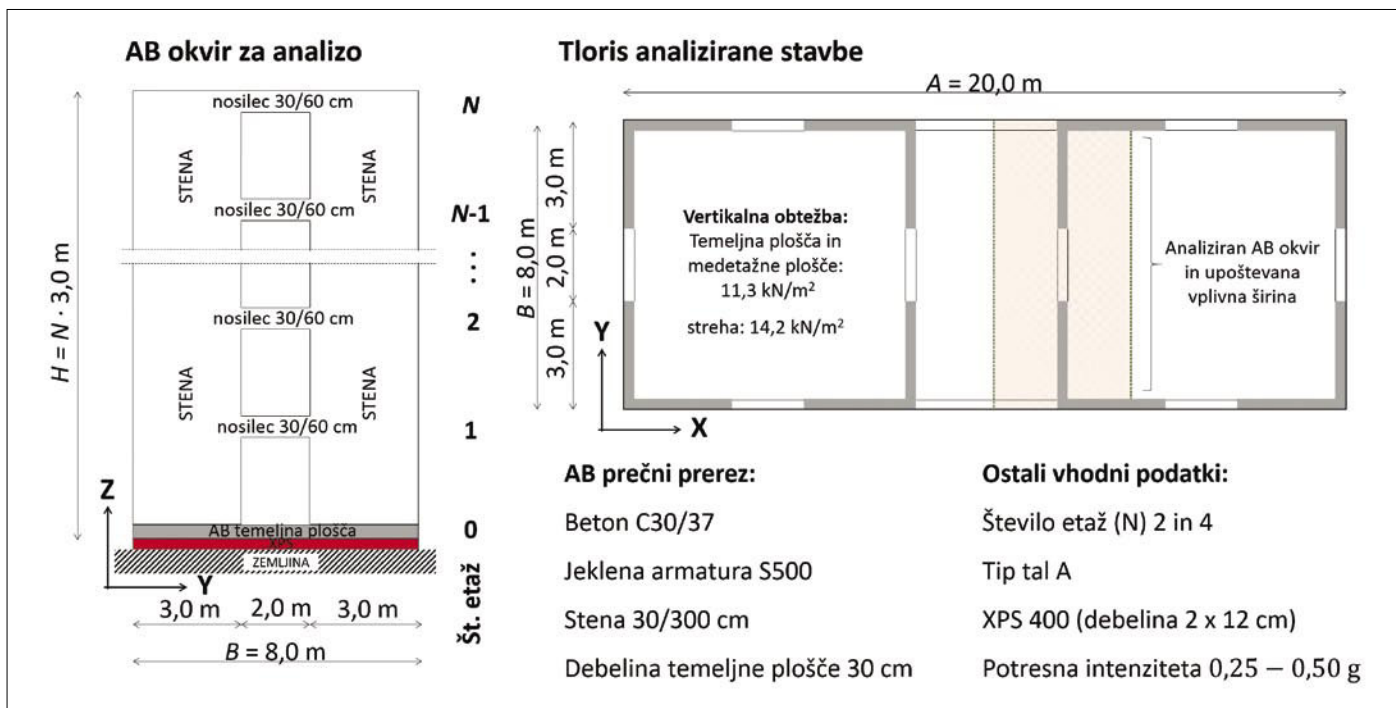
Da bi učinkovitost predlaganega sistema temeljenja še natančneje preverili, smo analizirali izbrane variante dejanske večetažne energijskoučinkovite pasivne poslovne stavbe (slika 10). Konstrukcija stavbe je armirano-betonska (AB) okvirna, temeljena na temeljni plošči debeline 30 cm. V tem članku je stavba analizirana ravninsko (v prečni Y-smeri). V nelinearni analizi so bili za stebre in grede upoštevani AB pravokotni prerezi z minimalno

armaturo po Evrokodu 8 za srednji razred duktilnosti (DCM). Ker v praksi natezna nosilnost na stiku konstrukcije s temeljnimi tlemi ni zagotovljena (možni so delni dvigi temelja od temeljnih tal), je bilo obnašanje temeljnih tal in TI-slojev v tlaku modelirano z nelinearnimi kontaktnimi vzmetmi z nosilnostjo samo v tlaku. Obnašanje zemljine v strigu pa je bilo modelirano z linearnimi elastičnimi vzmetmi. Stavba je obširneje obravnavana v ((Koren, 2014), (Koren, 2016)), kjer so natančno analizirani vsi kritični parametri, ki vplivajo na potresno obnašanje stavb, temeljenih na XPS. V omenjenih analizah je bilo predpostavljeno, da je zdrs med sloji pod temeljno ploščo preprečen. Modeli, analizirani v tem članku,

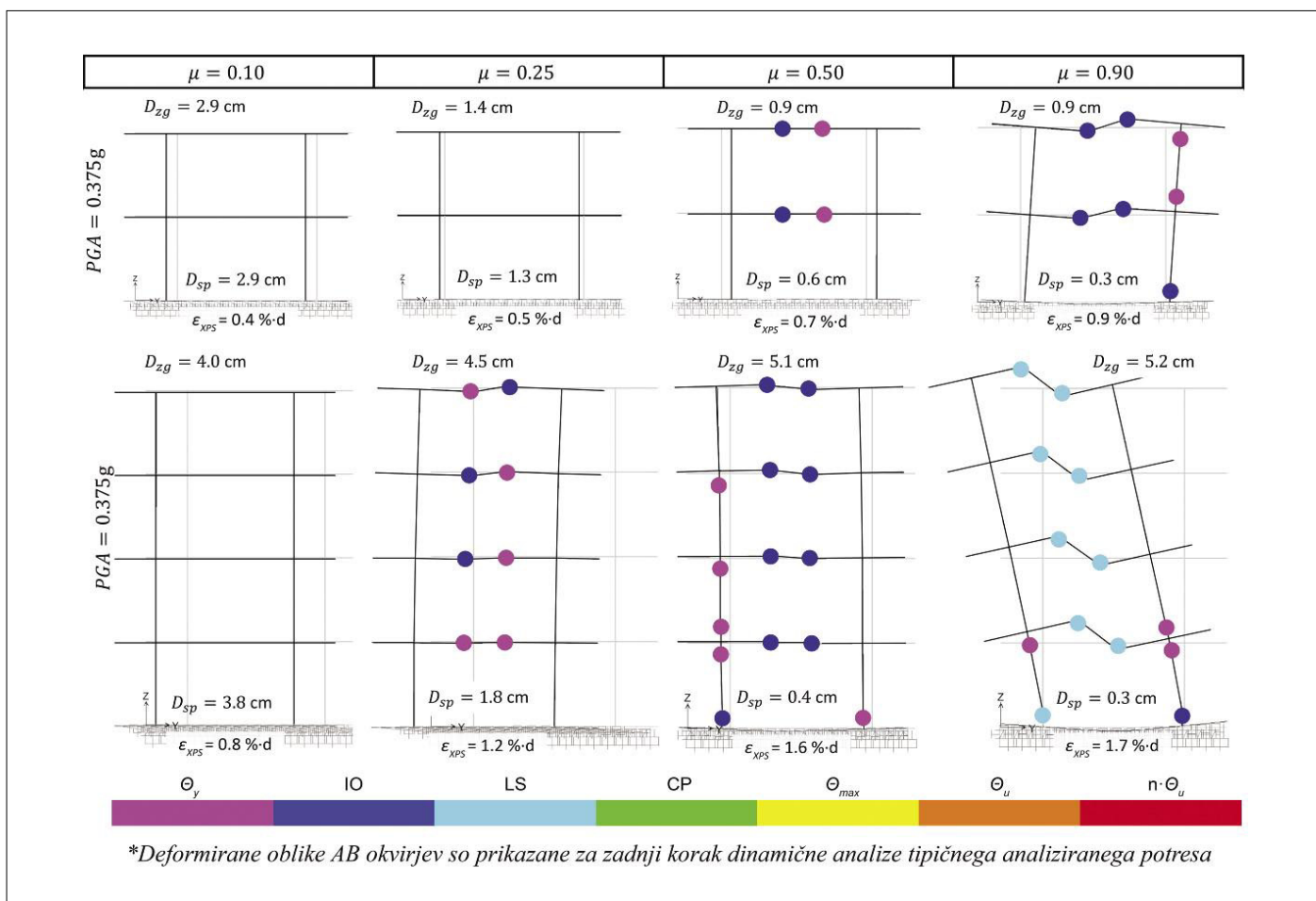


Slika 9 • Krivulje ranljivosti za pojav zdrsa med XPS ploščami pod temeljno ploščo stavbe (elastični model zgornje konstrukcije)





Slika 10 • Analizirana stavba in vhodni podatki, upoštevani v analizi


 Slika 11 • Tipične poškodbe in povprečni pomiki analiziranih 2- in 4-etažnih modelov pri  $PGA = 0,375\text{ g}$

pa možnost zdrsa vključujejo, saj je ciklično strižno obnašanje toplotnoizolacijske ravnine modelirano s kinematično histerezno ovojnico, predstavljeno na sliki 5, z dodano še tretjo vejo (togost po izvršenem zdrsu  $D_{sp} = \Delta H$  upoštevana v enaki vrednosti kot začetna togost). Pri tem je bila horizontalna rege  $\Delta H$  upoštevana v velikosti 5 cm.

Potresni odziv obravnavnih modelov je bil analiziran z nelinearnimi analizami časovnega odziva z računalniškim programom SAP2000 (CSI, 2015) pri skupini sedmih realnih akcelrogramov, normiranih na tri stopnje *PGA* (0,25 g, 0,375 g in 0,50 g). Ob tem je bila v vseh analizah upoštevana vertikalna obtežba v skladu s potresnim projektnim stanjem po Evrokodu 8. Detajli so podani v (Koren, 2016).

Izbrani rezultati potresnega odziva 2- in 4-etažnega okvira v primeru potresnega vzbujanja s stopnjo *PGA* enako 1,5-kratni vrednosti projektne stopnje *PGA* (0,375 g) so prikazani na sliki 11. Pri različnih detajlih temeljenja (glede na koeficient trenja med sloji) so prikazane tipične »povprečne« poškodbe zgornje konstrukcije, največji horizontalni pomiki ( $D_{sp}$ ) in največje tlačne deformacije v XPS ( $\epsilon_{XPS}$ ). Poškodbe kažejo odziv zgornje konstrukcije, prikazan v obliki doseženih faktorjev duktilnosti za rotacije v nastalih plastičnih členkih. Opazimo lahko, da je največji dosežen pomik  $D_{sp}$  v vseh primerih manjši od upoštewane horizontalne rege ( $\Delta H = 5$  cm). V primeru zelenega tretjega scenarija (visoka zaščita) je pri analizirani stopnji *PGA* treba uporabiti konstrukcijske sklope s koeficientom

trenja  $\mu \approx 0,4$  (2-etažni model) oziroma  $\mu \approx 0,2$  (4-etažni model). Če pa za drsno ravnino uporabimo višje koeficiente trenja, je pričakovan drugi (izboljšana zaščita) oziroma prvi (osnovna zaščita) scenarij potresnega odziva. Drugi scenarij je pri analizirani stopnji *PGA* dosežen, če je uporabljen sklop z  $\mu \approx 0,5$  (2-etažni model) oziroma  $\mu \approx 0,25$  (4-etažni model), prvi scenarij pa pri  $\mu \approx 0,9$  (2-etažni model) oziroma  $\mu \approx 0,35$  (4-etažni model). Naj omenimo, da je bil v primeru upoštewane projektne stopnje *PGA* (0,25 g) pri 4-etažnem modelu dosežen prvi scenarij pri upoštevanem koeficientu trenja  $\mu \approx 0,5$ , drugi scenarij pa pri  $\mu \approx 0,3$ , medtem ko je bilo obnašanje 2-etažnih modelov elastično pri vseh analiziranih koeficientih trenja.

#### 4 • SKLEP

Predlagani koncept temeljenja na TI s horizontalnimi in vertikalnimi zadrževalniki temelji na principu potresne varovalke in lahko poveča potresno varnost tako temeljenih stavb brez bistvenih dodatnih stroškov. Sistem je v primeru temeljenja na XPS primeren za stavbe z največ petimi etažami. Rezultati numeričnih nelinearnih dinamičnih analiz potresnega odziva stavb, temeljenih po predlaganem sistemu, so pokazali, da lahko uporaba kontaktnih površin z nizkim koeficientom trenja močno zmanjša pojav poškodb v zgornji konstrukciji. Na primeru analiziranih konstrukcij stavb so v članku predstavljeni predlagani trije scenariji potresnega odziva tako temeljenih stavb: osnovna, izboljšana in visoka zaščita. Teoretično se zdi glede zaščite zgornje konstrukcije najboljša izbira scenarij visoke zaščite, ki deluje podobno kot klasična potresna (drsna) izolacija. Njegova izvedba v današnjem času pa zahteva določene dodatne neposredne in skrite stroške, ki so lahko za bodočega lastnika težko sprejemljivi. Dodatni stroški izhajajo iz zahtev po uporabi specifičnih materialov z nizkimi koeficienti trenja in posebnih (gibljivih) instalacijskih vodov, zahtev po dilatiranju ob-

jekta idr. Zato je po mnenju avtorjev za gradnjo energijskoučinkovitih stavb na potresno ogroženih območjih trenutno najracionalnejša izbira scenarija izboljšane zaščite, pri katerem je zdrs kontroliran, zgornja konstrukcija pa se pri projektne potresu bistveno manj ali pa sploh ne poškoduje. V tem primeru je detajl temeljenja mogoče izvesti z običajnimi materiali iz prakse sodobne energijskoučinkovite gradnje. Pri tem moramo paziti, da zagotovimo »zadostno« dilatacijsko rego okrog stavbe. Za analizirani primer 4-etažne stavbe na tleh A in ob upoštevanem koeficientu trenja 0,25 je pri analiziranih akcelrogramih s povprečnim maksimalnim pospeškom tal 0,25 g horizontalni zdrs znašal od 0,1 cm do največ 2,3 cm oziroma povprečno 1,1 cm za vse analizirane akceleroگرامe. Za analizirano povprečno intenziteto 0,375 g pa je v tem primeru najmanjši horizontalni zdrs znašal 0,2 cm oziroma največ 4,9 cm (povprečno 1,8 cm). Z nelinearnimi analizami lahko določimo velikost potrebne horizontalne rege za vsak konkreten primer posebej, kot je bilo pokazano v članku. Nekaj predlogov izvedbe horizontalne rege je shematsko prikazanih

v članku, postopek za določitev zadostne dilatacijske rege z upoštevanjem verjetnostih metod analize pa so predlagali Dolšek in sodelavci, 2015 (v tem primeru vgradnja zadrževalnikov ne bi bila potrebna). Edini dodatni strošek je vgradnja horizontalnih in vertikalnih zadrževalnikov, ki pa v relativnem smislu ni velik. Predlagana sistemska rešitev temeljenja je bila patentirana v Uradu RS za intelektualno lastnino pod šifro P-201400253. V praksi se v zadnjem obdobju pojavljajo prodajno usmerjene rešitve, ki preprečujejo horizontalni zdrs z mehanskimi ali drugimi podobnimi ukrepi (lepljenje, žlebljenje površin), vendar pa tega ne priporočamo, saj tako za vse intenzitete preprečimo delovanje potresne varovalke. Sistem temeljenja, prikazan v tem članku, je splošno uporaben in primeren praktično za vse energijskoučinkovite stavbe in vse tipe toplotnoizolacijskih plošč na vseh potresnih območjih. Želja avtorjev je, da bi predlagana rešitev med slovenskimi izdelovalci energijskoučinkovitih hiš naletela na pozitiven odziv in da bi predlagani koncept temeljenja čim prej razvili do stopnje, ki bi dopuščala konkretno izvedbo v praksi, saj trenutno ni na voljo standarda, ki bi omogočal projektiranje tako temeljenih objektov.

#### 5 • ZAHVALA

Avtorji se za finančno podporo zahvaljujejo Javni agenciji za raziskovalno dejavnost Re-

publike Slovenije. Delo je nastalo v okviru raziskovalnega programa FA (P5-0068) in

usposabljanju mladega raziskovalca Borisa Azinoviča.

## 6 • LITERATURA

- Azinovič, B., Kilar, V., Koren, D., Energy-efficient solution for the foundation of passive houses in earthquake-prone regions, *Engineering Structures* 112: 133–145, 2016.
- Azinovič, B., Koren, D., Kilar, V., The seismic response of low-energy buildings founded on a thermal insulation layer: a parametric study, *Engineering Structures* 81: 398–411, 2014.
- Baker, J. W., Efficient analytical fragility function fitting using dynamic structural analysis, *Earthquake Spectra* 31(1): 579–599, 2015.
- Becker, T. C., Mahin, S. A., Experimental and analytical study of the bi-directional behavior of the triple friction pendulum isolator, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 41(3): 355–373, 2012.
- Bokan-Bosiljkov V., Poročilo o rezultatih preiskav ugotavljanja obnašanja proizvodov FIBRAN pri tlačni in strižni obremenitvi: poročilo št. FIBRAN-13/01, Konstrukcijsko-prometni laboratorij, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, 2013a.
- Bokan-Bosiljkov V., Poročilo o rezultatih preiskav ugotavljanja obnašanja proizvodov FIBRAN pri preiskavah trenja med sloji izbranih sklopov pri različnih nivojih predobremenitve: poročilo št. FIBRAN-13/02, Konstrukcijsko-prometni laboratorij, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, 2013b.
- Calvi, P., Ruggiero, D. M., Numerical modelling of variable friction sliding base isolators, *Bulletin of Earthquake Engineering*: v tisku, 2015.
- Chung, L. L., Kao, P. S., Yang, C. Y., Wu, L. Y., Chen, H. M., Optimal frictional coefficient of structural isolation system, *Journal of Vibration and Control* 21(3): 525–538, 2015.
- CSI, SAP2000 Structural and earthquake engineering software, Computers and structures, Inc., Berkeley, California, <http://www.csiamerica.com/sap2000>, 2015.
- Dolšek, M., Simplified method for seismic risk assessment of buildings with consideration of aleatory and epistemic uncertainty, *Structure and Infrastructure Engineering* 8(10): 939–953, 2012.
- Dolšek, M., Snoj, J., Žižmond, J., Eksperimentalne raziskave temeljnega sklopa konstrukcijskega sistema JUBHome BASE in priporočila za potresno-odporno projektiranje, Univerza v Ljubljani, FGG, IKPIR, september 2015.
- Eads, L., Miranda, E., Krawinkler, H., Lignos, D. G., An efficient method for estimating the collapse risk of structures in seismic regions, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 42(1): 25–41, 2013.
- Fadi, F., Constantinou, M. C., Evaluation of simplified methods of analysis for structures with triple friction pendulum isolators, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 39(1): 5–22, 2010.
- Fajfar, P., Ljubljanski nebotičnik: skrb za potresno varnost v tridesetih letih, *Gradbeni vestnik* 44 4/5/6: 119–122, 1995.
- Hong, W. K., Kim, H. C., Performance of a multi-story structure with a resilient-friction base isolation system, *Computers & Structures* 82(27): 2271–2283, 2004.
- Kilar, V., Azinovič, B., Koren, D., Potresna varnost pasivnih hiš s toplotno izolacijo pod temeljno ploščo – parametrična študija, *Gradbenik* 17(10): 36–38, 2013c.
- Kilar, V., Koren, D., Azinovič, B., Sliding isolation system for controlled response of passive houses founded on thermal insulation, *Proc. of the 14th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures*, San Diego, California, USA, 9.–11. September 2015.
- Kilar, V., Koren, D., Bokan-Bosiljkov, V., Evaluation of the performance of extruded polystyrene boards – Implications for their application in earthquake engineering, *Polymer Testing* 40: 234–244, 2014.
- Kilar, V., Koren, D., Potresna izolacija stavb kot alternativa za gradnjo na potresnih območjih, *Gradbeni vestnik* 57(12): 307–318, 2007.
- Kilar, V., Koren, D., Zbašnik-Senegačnik, M., Seismic behaviour of buildings founded on thermal insulation layer, *Građevinar* 65(5): 423–433, 2013a.
- Kilar, V., Zbašnik-Senegačnik, M., Potresna varnost pasivnih hiš s toplotno izolacijo pod temeljno ploščo, *Gradbenik* 17(9): 37–39, 2013b.
- Koren, D., Kilar, V., Buildings founded on thermal insulation layer subjected to earthquake load, *Proc. of the 16th International conference on civil and building engineering*, London, United Kingdom, 26–27 May 2014.
- Koren, D., Kilar, V., Seismic vulnerability of reinforced concrete building structures founded on an XPS layer, *Earthq. Struct., An Int'l Journal* (sprejeto v objavo), 2016.
- Koren, D., Potresna izolacija in nesimetrična konstrukcijska zasnova v arhitekturi, *Doktorska disertacija*, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, 2011.
- Lu, L. Y., Lee, T. Y., Juang, S. Y., Yeh, S. W., Polynomial friction pendulum isolators (PFPs) for building floor isolation: An experimental and theoretical study, *Engineering Structures* 56: 970–982, 2013.
- McKenna, F., Fenves, G. L., Scott, M. H., Jeremic, B., OpenSees-Open system for earthquake engineering simulation, University of California, Berkeley, CA: <http://opensees.berkeley.edu/>, 2015.
- Naeim, F., Kelly, J. M., *Design of seismic isolated structures: from theory to practice*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1999.
- Nanda, R. P., Agarwal, P., Shrikhande, M., Suitable friction sliding materials for base isolation of masonry buildings, *Shock and Vibration* 19(6): 1327–1339, 2012.
- Panchal, V. R., Jangid, R. S., Seismic response of structures with variable friction pendulum system, *Journal of Earthquake Engineering* 13(2): 193–216, 2009.

Polycarpou, P. C., Komodromos, P., On poundings of a seismically isolated building with adjacent structures during strong earthquakes, Earthquake Engineering & Structural Dynamics 39(8): 933–940, 2010.

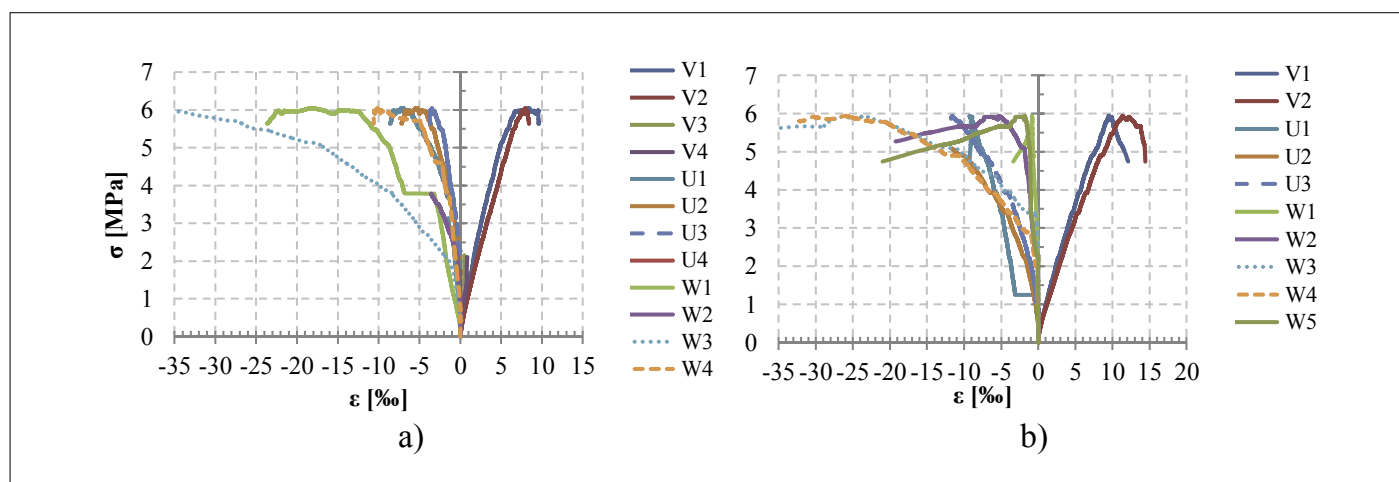
Quaglino, V., Bocciarelli, M., Gandelli, E., Dubini, P., Numerical assessment of frictional heating in sliding bearings for seismic isolation. Journal of Earthquake Engineering 18(8):1198–1216, 2014.

SIST EN 1998-1: 2005, Evrokod 8: Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij, 1. del.: Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe, 2005.

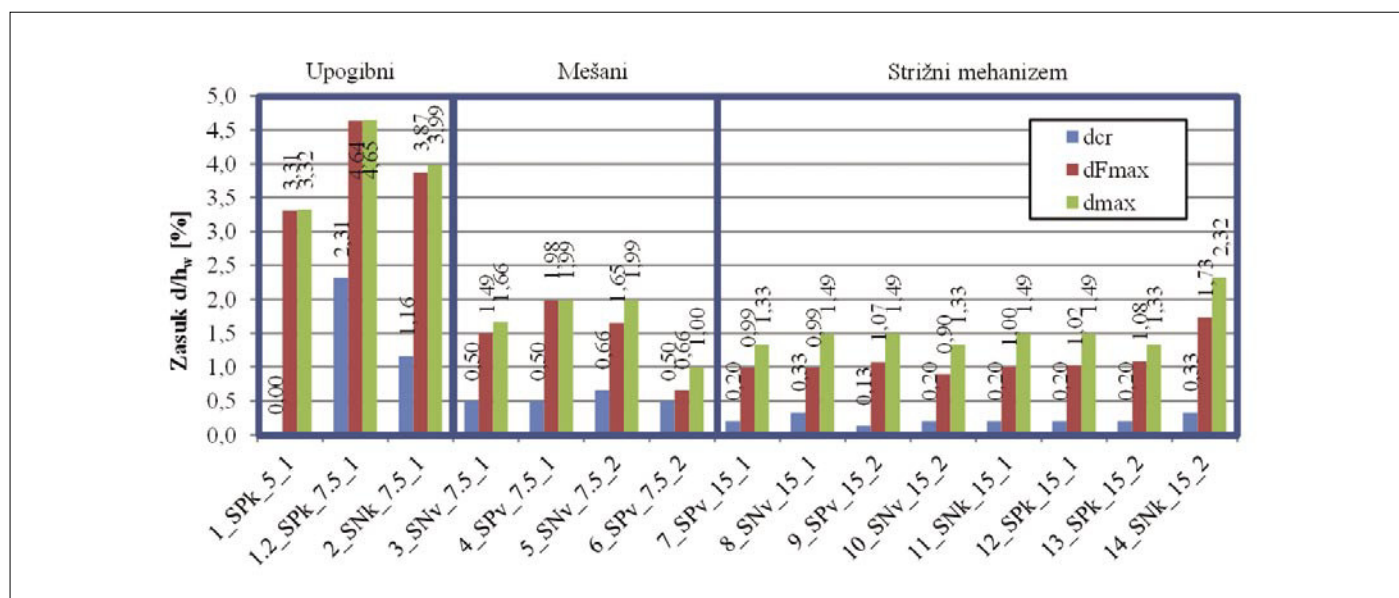
## POPRAVEK

V Gradbenem vestniku februar 2016 je bila v članku dr. Mete Kržan in izr. prof. dr. Vlatka Bosiljkova EKSPERIMENTALNE PREISKAVE TROSLOJNIH KAMNITIH ZIDOV Z OMETI na strani 28 objavljena slika 9, na strani 34 pa slika 15, katerih kakovost se je poslabšala pri pripravi za tisk. Na objavljeni sliki 9 so rastrske črte predebele, na sliki 15 pa so slabo vidne nekatere številke.

Ustrezni sliki sta naslednji:



Slika 9 • Diagram napetost - deformacija za različne induktivne merilce a) za test nepovezanega zidu in b) za test povezanega zidu



Slika 15 • Povprečni zasuki  $d/h_w$  obeh smeri obremenjevanja za zidove v karakterističnih točkah odziva

Avtorjema in bralcem se za napako opravičujem.

prof. dr. Janez Duhovnik