

akademik prof. dr. Peter Fajfar, univ. dipl. inž. grad.
peter.fajfar@fgg.uni-lj.si



prof. dr. Matej Fischinger, univ. dipl. inž. grad.
matej.fischinger@fgg.uni-lj.si



prof. dr. Tatjana Isaković, univ. dipl. inž. grad.
tatjana.isakovic@fgg.uni-lj.si



prof. dr. Matjaž Dolšek, univ. dipl. inž. grad.
matjaz.dolsek@fgg.uni-lj.si



Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo (IKPIR),
Jamova 2, 1000 Ljubljana

Pregledni znanstveni članek
UDK 624.042.7(497.4)(091)

50 LET POTRESNEGA INŽENIRSTVA NA IKPIR

50 YEARS OF EARTHQUAKE ENGINEERING AT IKPIR

Povzetek

V članku je podan zgoščen pregled dela, opravljenega na področju potresnega inženirstva v petdesetih letih obstoja Inštituta za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo (IKPIR) in njegovega predhodnika Računskega centra Fakultete za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo (RC FAGG). Poudarek je na rezultatih raziskav, zelo na kratko pa so omenjene tudi druge aktivnosti, ki obsegajo pedagoško ter razvojno in strokovno delo, vključno s sodelovanjem pri pripravi predpisov.

Ključne besede: potresno inženirstvo, gradbene konstrukcije, IKPIR

Summary

The article gives a concise overview of the work done in the field of earthquake engineering in fifty years of existence of IKPIR and its predecessor, the FAGG Computing Center. The emphasis is on the research results. Very briefly, also other activities are mentioned. They include teaching, development and consulting, including participation in the development of regulations.

Key words: earthquake engineering, structural engineering, IKPIR

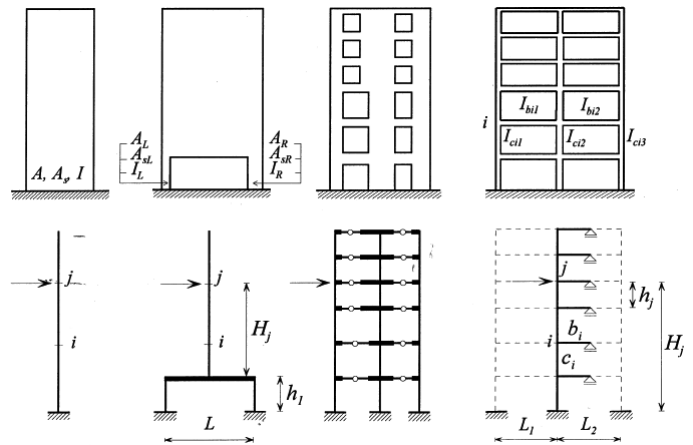
1 ZAČETKI

Leta 1971, ko je bil ustanovljen Računski center Fakultete za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo (RC FAGG), predhodnik kasnejšega IKPIR, smo se v Sloveniji že dobro zavedali potresnega tveganja. Slovenski inženirji, med njimi sta bila tudi kasnejša sodelavca RC FAGG in IKPIR, prof. Sergej Bubnov in prof. Ervin Prelog, so pripravili prvi sodoben slovenski predpis o projektiranju potresoodpornih gradbenih objektov, ki je bil sprejet že leta 1963, dober mesec pred rušilnim potresom v Skopju. Bubnov je imel vodilno vlogo pri pripravi predpisa, Prelog pa je izdelal navodila za račun potresnih obremenitev v skladu s predpisom. V šestdesetih letih prejšnjega stoletja ni bilo na razpolago elektronskih računalnikov, zato je bilo v praksi mogoče analizirati samo skrajno poenostavljene modele konstrukcij pri potresnih obremenitvah. Skopski potres je vzbudil večje zanimanje za potresno inženirstvo. Na tedanjem ZRMK so pod vodstvom takratnega direktorja Viktorja Turnška pričeli raziskovati potresno odpornost zidanih stavb, medtem ko na FAGG raziskav s področja potresnega inženirstva ni bilo. Študenti gradbeništva v Sloveniji med svojim študijem niso slišali praktično ničesar o potresnem inženirstvu in dinamiki gradbenih konstrukcij.

2 ELASTIČNA ANALIZA – PROGRAM EAVEK

Prihod elektronskih računalnikov je ponudil izjemno priložnost za preboj na področju analize konstrukcij pri običajnih »statičnih računih«, še posebno pa pri analizi konstrukcij pri potresnih obremenitvah, ki temelji na dinamiki in je računsko bistveno bolj zahtevna kot običajna statična analiza. To priložnost smo izkoristili sodelavci RC FAGG, ki smo se že pred ustanovitvijo RC FAGG leta 1971 pričeli ukvarjati z uporabo računalnikov za analizo konstrukcij.

Tehnični vodja novega RC FAGG je postal prvi avtor tega članka, ki se je naučil uporabljati računalnik med svojim delom na Katedri za metalne konstrukcije FAGG pod vodstvom prof. Miloša Marinčeka. V njegovem magistrskem delu, ki je bilo izdano tudi kot prva publikacija RC FAGG [Fajfar, 1972], so bile postavljene teoretične osnove metode, ki je zajemala statično in dinamično analizo stavb s spektri odziva. Uporabljen je bil psevdotridimenzionalni model, kjer je bila konstrukcija razdeljena na podkonstrukcije (okvirje, stene, jedra, slika 1), imenovane makroelementi. Izdelan je bil računalniški program DA-VEK (Dinamična Analiza VEčetažnih Konstrukcij), ki je bil nato uspešno uporabljen pri potresnih analizah vrste pomembnih objektov v Sloveniji ter pri pedagoškem in raziskovalnem delu na FAGG. V disertaciji, ki je bila v skrajšani verziji izdana kot publikacija RC FAGG [Fajfar, 1974a] in povzeta v članku [Fajfar, 1974a], so bile teoretske osnove razširjene, tako da so zajemale tudi teorijo drugega reda, račun elastične stabilnosti in določanje časovnega odziva pri dinamični analizi. Vse dopolnitve so bile vključene v novem programu EAVEK (Elastična Analiza VEčetažnih Konstrukcij) [Fajfar, 1976]. Program je bil napisan v FORTRAN-u. Glavno delo pri programiranju brezformatnih podatkov je opravil Matej Fischinger, takrat še študent. Program se je izvajal na majhnih računalnikih tipa IBM 1130 s 64k pomnilnika in je omogočal analizo prostorskih modelov stavb do višine 30 etaž. V naslednjih dveh desetletjih je bilo narejenih več posodobitev in izboljšav programa. Zaradi trdnih teoretičnih osnov je bilo mogoče program enostavno prilagoditi vsem



Slika 1. Najpogostejši makroelementi z računskimi modeli.

spremembam potresnih predpisov. V osemdesetih letih se je s študijem makroelementov precej ukvarjal Boris Lutar v okviru svoje magistrske in doktorske naloge, v zgodnjih devetdesetih letih pa je veliko dela na novih različicah program EAVEK opravil Vojko Kilar v okviru dodiplomskega in magistrskega študija. Pri izdelavi različnih verzij programa so poleg Fajfarja, ki je programiral osnovno verzijo programa in vodil delo pri naslednjih verzijah, ter Fischingerja, Lutarja in Kilarja neposredno ali posredno sodelovali tudi drugi sodelavci IKPIR Mladen Bratović, Vid Marolt, Iztok Peruš, Smiljan Sočan, Iztok Kovačič, Andrej Vitek in Žiga Turk.

Medtem ko so v začetni fazi uporabe programa EAVEK analize za potrebe prakse opravljali sodelavci RC in kasneje IKPIR, sta enostaven način priprave podatkov in pregleden izpis rezultatov omogočila, da je postopoma vse večje število uporabnikov prešlo na samostojne obdelave preko terminalov, ki so bili priključeni na republiški računski center (RRC) v Ljubljani. Uporabniki so bili organizirani kot člani Kluba uporabnikov programske opreme (KUZPO) IKPIR. Po pojavu osebnih računalnikov je bila pripravljena verzija programa za IBM PC in kompatibilne računalnike, ki so jo uporabljali skoraj vsi projektanti v Sloveniji in številni uporabniki drugod v nekdanji Jugoslaviji. V okviru sodelovanja IKPIR in univerze v Pekingu je bila leta 1987 izdelana verzija programa s spektrom po kitajskih predpisih in s priročnikom v angleščini.

Ključ do uspeha programa EAVEK je bil preprost in pregleden model konstrukcije, ki sledi intuitivnemu razmišljanju gradbenih inženirjev, zahteva razumevanje konstrukcijskega sistema in njegovih glavnih nosilnih elementov, je zelo enostaven za uporabo in zagotavlja pregledne rezultate, ki so dovolj natančni za veliko večino konstrukcij stavb. Čeprav postopek analize in program nista bila na ustrezen način predstavljena mednarodni strokovni skupnosti in nista doživela mednarodnega priznanja kot v primeru rezultatov raziskav na področju nelinearne analize, si drznemo trditi, da je program pomembno vplival na razumevanje potresnega odziva stavb in na kvaliteto potresoodpornega projektiranja ter s tem na potresno odpornost stavb v Sloveniji.

V zadnjih letih 20. stoletja je hiter razvoj programske in strojne opreme v računalništvu povzročil, da raziskovalne skupine na univerzah niso več mogle slediti temu razvoju in posodabljati aplikativne programske opreme glede na zahteve upo-

rabnikov. To delo so prevzela podjetja, ki so se profesionalno ukvarjala z razvojem in distribucijo programov. Na IKPIR smo prenehali posodabljati program EAVEK in druge aplikativne programe za analizo konstrukcij, smo jih pa še vedno uporabljali, predvsem pri pedagoškem delu. Tako je npr. Daniel Celarec v okviru svoje diplomske naloge leta 2007 izdelal verzijo programa, ki izračuna ne le obremenitve makroelementov, pač pa tudi obremenitve njihovih posameznih elementov. Komercialni programi so počasi zamenjevali IKPIR-jeve programe, vključno z EAVEK-om, čeprav so teoretične osnove tega programa še danes v celoti veljavne, zamenjali so se samo spektri v predpisih. Nedavno so sodelavci IKPIR srednje in mlajše generacije spet oživili program EAVEK. V spletni verziji programa je jedro programa z vsemi teoretičnimi osnovami ostalo nedotaknjeno, izdelani pa so bili ustrezni programi za procesiranje [Klinc s sodelavci, 2016].

3 NELINEARNA ANALIZA

Pri močnih potresih dopuščamo, da se konstrukcije deformirajo v neelastično območje. Za analizo obnašanja v tem območju je v principu primerna samo nelinearna analiza, ki pa je bistveno zahtevnejša od linearne analize, zato so se v praksi uporabljali in se še vedno v veliki meri uporabljajo približni postopki, ki temeljijo na linearni analizi in uporabljajo faktorje redukcije sil (q -faktorji v standardu Evrokod 8 [SIST, 2006a]). Naš prispevek q -faktorjem je bil predlog, da se faktor definira kot produkt faktorja, ki upošteva dodatno nosilnost, in faktorja, ki zajema vpliv sipanja energije [Fischinger in Fajfar, 1990]. Ta definicija se je uveljavila v standardih in predpisih, vključno s standardom Evrokod 8 [SIST, 2006a].

Z nelinearno analizo smo se v RC FAGG pričeli ukvarjati v poznih sedemdesetih letih prejšnjega stoletja. Pri tem smo za končni cilj vedno imeli pred očmi praktično uporabnost postopkov.

Naše začetne raziskave so bile usmerjene predvsem v parametrične študije neelastičnega odziva konstrukcij z eno prostostno stopnjo in v matematično modeliranje armiranobetonskih konstrukcij. Prvič smo nelinearno analizo uporabili za simulacijo obnašanja stavbe, poškodovane med potresom v Črni gori leta 1979 [Fajfar s sodelavci, 1981]. Za nelinearno analizo konstrukcij smo največ uporabljali DRAIN-2D [Kanaan s sodelavci, 1973], razvit na univerzi v Berkeleyju, in IDARC [Park s sodelavci, 1987], razvit na univerzi v Buffalu. Oba programa smo prilagajali našim potrebam. Za račun neelastičnih spektrov smo razvijali lastno programsko opremo.

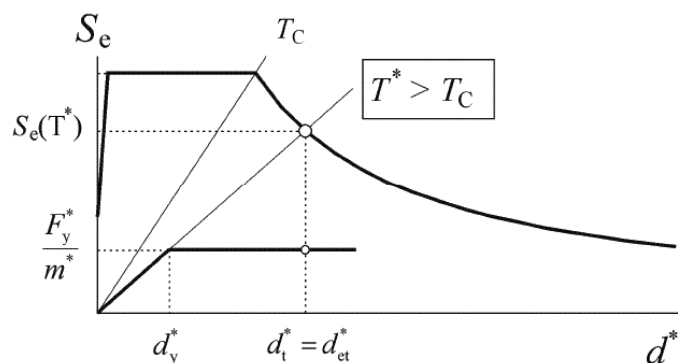
Prvi rezultati študija neelastičnih spektrov so bili predstavljeni na 7. evropski konferenci o potresnem inženirstvu [Fischinger in Fajfar, 1982]. V naslednjih dobrih desetih letih so bile izvedene obsežne parametrične študije sistemov z eno prostostno stopnjo. V teh študijah smo raziskovali vpliv značilnosti gibanja tal, začetne togosti, nosilnosti, duktilnosti, histereznega obnašanja in dušenja na deformacije sistemov z eno prostostno stopnjo in na njihovo sipanje energije. Predlagali smo ekvivalenten faktor duktilnosti, ki zajema vpliv kumulativnih poškodb [Fajfar, 1992]. Pomembno delo pri parametričnih študijah je opravil Tomaž Vidic v okviru svojega magistrskega in doktorskega študija ter kot podoktorski raziskovalec. Najpomembnejša, visoko citirana povezana članka sta bila objavljena leta 1994 v Earthquake Engineering and Structural Dynamics [Vidic, Fajfar in Fischinger, 1994], [Fajfar in Vidic, 1994].

Malo poenostavljena verzija redukcijskih faktorjev, predlagana v prvem članku, je bila vključena v N2-metodo.

Spodbujeni z uspehom programa EAVEK smo psevdotridimenzionalni model razširili v nelinearno območje in tako razvili postopek za približno nelinearno analizo stavb. Rezultat dela, ki ga je pretežno opravil Vojko Kilar, je program NEAVEK (Nelinearna Analiza VEčetažnih Konstrukcij [Kilar in Fajfar, 1997]). Kasneje se je z NEAVEK-om ukvarjal Iztok Peruš. Program se je v glavnem uporabljal pri raziskovalnem delu v okviru IKPIR, ni pa prodril med projektante, saj predpisi niso zahtevali nelinearne analize.

Najodmevnejši rezultat raziskovalcev IKPIR je N2-metoda za nelinearno analizo konstrukcij, ki kombinira nelinearno statično (potisno) analizo sistema z več prostostnimi stopnjami in dinamično analizo (z uporabo spektrov odziva) ekvivalentnega sistema z eno prostostno stopnjo. Metoda, ki omogoča razmeroma enostavno uporabo nelinearne analize v praksi, je vključena v standard Evrokod 8 [SIST, 2006a] in uveljavljena v svetu. Prvi prispevek o N2-metodi je bil objavljen leta 1987 v prvi številki nove evropske revije European Earthquake Engineering [Fajfar in Fischinger, 1987], ki ni imela velikega kroga bralcev. Odmevnejši je bil prispevek na 9. svetovni konferenci o potresnem inženirstvu [Fajfar in Fischinger, 1989]. Nadaljnji razvoj je bil razmeroma počasen. »Zrelo« verzijo, ki je vključevala neelastične spektre, razvite leta 1994, smo objavili leta 1996 [Fajfar in Gašperšič, 1996]. Približno v tem obdobju je ameriški inženir Freeman s sodelavci predlagal predstavitev spektra odziva v formatu pospešek-pomik (AD) namesto običajne oblike pospešek-nihajni čas. Ta enostavna, vendar briljantna ideja, ki omogoča grafično ponazoritev postopka računa, je povzročila preboj pri praktični uporabi metod, ki temeljijo na potisni analizi. AD-format je bilo razmeroma enostavno vključiti v N2-metodo. Njena nova verzija je bila predstavljena v dveh izjemno odmevnih člankih ([Fajfar, 1999], [Fajfar, 2000]). Takoj zatem smo na povabilo pripravljavcev evropskega standarda Evrokod 8 (ali krajše EC8) izdelali osnutek teksta za vključitev N2-metode v EC8, ki je bil uradno uveljavljen leta 2004 (slika 2). Od prve objave preliminarne verzije N2-metode do njene vključitve v regulativo je torej preteklo kar 17 let!

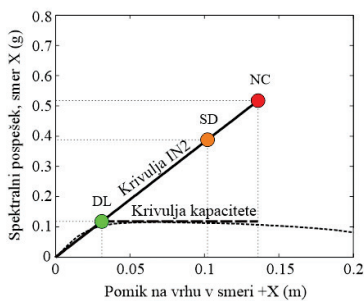
Kot vsaka približna metoda ima tudi N2 vrsto omejitev. V začetku tega tisočletja smo raziskovali, kako bi čim bolj zmanjšali



Slika 2. Določanje ciljnega pomika v N2-metodi za ekvivalentne sisteme z eno prostostno stopnjo s srednjimi in dolgi-mi nihajnimi časi. Slika je vključena v standard Evrokod 8-1 [SIST, 2006a].

obseg teh omejitev. Vse metode, ki temeljijo na potisni analizi in ekvivalentnem sistemu z eno prostostno stopnjo so načeloma uporabne predvsem za konstrukcije, ki nihajo pretežno v osnovni nihajni obliki. Neposredno ne morejo zajeti vpliva torzije in višjih nihajnih oblik po višini konstrukcije. Prvi vpliv sta proučevala Iztok Peruš in Damjan Marušič [Fajfar, Marušič in Peruš, 2005], drugega pa Maja Kreslin [Kreslin in Fajfar, 2011]. Pokazalo se je, da je oba vpliva mogoče upoštevati istočasno s kombinacijo rezultatov osnovne N2-metode in standardne modalne analize s spektri odziva [Kreslin in Fajfar, 2012]. Razširjena N2-metoda je vključena v drugo generacijo EC8 [SIST, 2021a]. Osnovna N2-metoda tudi ni neposredno uporabna za okvirje s polnili. Glavno delo pri razširitvi uporabnosti metode za ta tip konstrukcije je opravil Matjaž Dolšek [Dolšek in Fajfar, 2005].

V začetku tisočletja so na Univerzi v Stanfordu razvili tako imenovano Inkrementalno dinamično analizo (IDA), ki predstavlja napredno, vendar računsko zahtevno metodo za dinamično analizo konstrukcij. Za praktično uporabo je analizo mogoče bistveno poenostaviti, če namesto računa časovnega poteka odziva uporabimo potisno analizo. Postopek smo imenovali Inkrementalna N2 (IN2) metoda [Dolšek in Fajfar, 2004] (slika 3).



Slika 3. Krivulja kapacitete in krivulja IN2 za stavbo SPEAR, ki je bila psevdodinamično preizkušena v laboratoriju ELSA v Ispri.

Gostujoči doktorand je razvil poenostavljeno različico originalne IDA, ki vključuje algoritem za izbiro majhnega števila akcelrogramov za oceno mediane potresnega odziva objekta [Azarbakht in Dolšek, 2007]. Izdelana je bila tudi posplošitev metode IDA, ki je omogočila preučevanje vpliva negotovih parametrov nelinearnega modela objekta na potresno ranljivost objekta [Dolšek, 2009].

Zgodba o razvoju N2-metode in njenih razširitev je objavljena v knjigi [Fajfar, 2021], ki jo je izdalo Mednarodno združenje za potresno inženirstvo v okviru novega programa Read the masters.

4 VERJETNOSTNA ANALIZA IN ODLOČITVENI MODEL ZA PROJEKTIRANJE OBJEKTOV

Značilnosti gibanja tal zaradi potresov v življenjski dobi objekta ne znamo natančno napovedati. Negotov je tudi odziv konstrukcij ob danem gibanju tal. Zato bi bil za oceno potresne zmogljivosti objektov primeren verjetnostni pristop. Ker pa so

verjetnostne metode večinoma precej zahtevne, je običajno verjetnostna analiza omejena samo na določanje potresnega gibanja tal, to je določanje potresne nevarnosti, medtem ko se analiza konstrukcij v praksi običajno izvaja s determinističnimi metodami, pri čemer se slučajnost potresne obtežbe in negotovost v potresnem odzivu upoštevata z različnimi projektnimi dejavniki (npr. projektna potresna obtežba, metoda načrtovanja nosilnosti, materialni varnostni faktorji). Dolgoročno se bomo tudi v praksi težko popolnoma izognili količinski določitvi tveganja. V ta namen so potrebni zelo poenostavljeni postopki, ki so predstavljeni v obliki, ki jo poznajo inženirji in ki zahtevajo le malo dodatnega dela in usposobljenosti.

Z določanjem potresne nevarnosti za območje Slovenije smo se na IKPIR pričeli ukvarjati že v začetku osemdesetih let. Pri tem smo prevzemali metode iz najsodobnejše literature tistega časa [Breška in Fajfar, 1987]. Največ dela na tem področju je opravil Zdene Breška. Kasneje so bili v raziskave vključeni tudi sodelavci takratnega Seizmološkega zavoda RS (kasneje Uprava RS za geofiziko in Agencija RS za okolje), predvsem dr. Janez Lapajne. Te raziskave so nam omogočile, da smo na željo investitorjev in projektantov določili projektne potresne parametre za večino pomembnih objektov v Sloveniji, pri katerih so predpisi zahtevali natančnejši postopek določanja potresnih obremenitev.

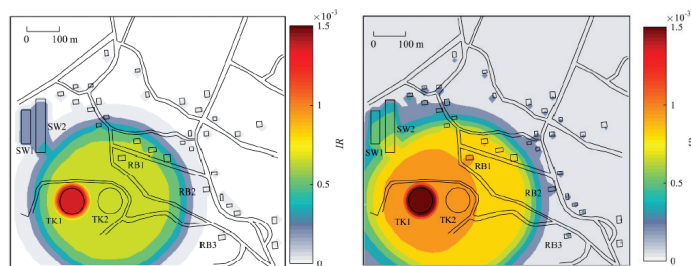
Raziskave na področju verjetnostnih metod, ki zajemajo tudi odziv konstrukcije, so se začele v začetku tega tisočletja v okviru disertacije Matjaža Dolška. V prvem članku o oceni tveganja [Dolšek in Fajfar, 2007] je bil predlagan sorazmerno preprost postopek za oceno potresnega tveganja, ki temelji na potisni analizi. Postopek smo imenovali »Pushover-based Risk Assessment method« ali krajše PRA-metoda. Za uporabo PRA-metode so potrebne privzete vrednosti za parameter raztrosa. Raziskave tega parametra je opravil Mirko Kosič v okviru svojega doktorskega študija in objavil več člankov, med njimi [Kosič, Dolšek in Fajfar, 2016]. Pred tem je Daniel Celarec opravil obsežne analize občutljivosti modelnih parametrov na globalne parametre potresnega odziva armiranobetonskih okvirjev in okvirjev s polnili (npr. [Celarec, Ricci in Dolšek, 2012]) ter analize potresnega tveganja z upoštevanjem vpliva staranja materiala [Celarec, Vamvatsikos in Dolšek, 2011]. Ugotovili smo, da neupoštevanje vpliva modelirnih negotovosti in vpliva staranja materiala na potresni odziv objekta vodi v precenjeno potresno zmogljivost objekta.

Kmalu smo ugotovili, da verjetnostna analiza ne omogoča le ocene tveganja, pač pa je lahko zelo koristna tudi pri projektiranju objektov na potresnih območjih. Raziskave smo zato usmerili v razvoj metod projektiranja na ciljno potresno tveganje. Doktorand Marko Brozovič je razvil metodo projektiranja 3R z uporabo nelinearne dinamične analize [Dolšek in Brozovič, 2016]. V tem primeru se potresni scenarij, za katerega se preverja potresni odziv objekta, določi iz ciljnega potresnega tveganja. Na osnovi izbrane skupine akcelrogramov se nato izvede nelinearna dinamična analiza in ugotovi število prekoračitev mejnega stanja. Če je to število prekoračitev manjše od dopustnega, projektant lahko sklene, da je verjetnost za prekoračitev mejnega stanja manjša od ciljne verjetnosti za izbrano dobo. Ne glede na to, da metoda 3R zahteva majhno število nelinearnih dinamičnih analiz, je računsko precej zahtevna, saj so pri projektiranju z nelinearnimi metodami potrebne iteracije. V takem primeru je smiselno, da se osnovna konstrukcija projektira z računsko manj zahtevnimi metodami, nato pa

se določi potresna zmogljivost objekta z bolj natančno nelinearno dinamično analizo. Zato je doktorandka Nuša Lazar Sinkovič za projektiranje na ciljno tveganje uporabila potisno analizo, izpopolnila pa je tudi integral potresnega tveganja, kjer je upoštevala fizikalno opredeljene integracijske meje. Za spodnjo integracijsko mejo je upoštevala potrese, ki povzročijo prekoračitev mejnega stanja pri najmanjši možni intenziteti gibanja tal. Ugotovila je, da obstajajo takšna gibanja tal, ki pri projektni intenziteti gibanja tal povzročijo prekoračitev mejnega stanja blizu porušitve, čeprav so objekti projektirani po sodobnih standardih za potresnoodporno projektiranje [Lazar Sinkovič in Dolšek, 2014], ter da imajo fizikalno opredeljene meje intenzitete gibanja tal vpliv na potresnoodporno projektiranje stavb. Nekoliko kasneje smo za projektiranje na ciljno potresno tveganje definirali stopnjo zanesljivosti postopkov projektiranja v povezavi z različnimi vrstami potresne analize [Lazar Sinkovič, Brozovič in Dolšek, 2016]. Ciljno potresno tveganje smo naposled vpeljali tudi v konvencionalno potresnoodporno projektiranje, ki temelji na linearnoelastični analizi, bodisi na metodi s horizontalnimi silami ali na modalni analizi s spektri odziva. Ta problem smo rešili tako, da smo konvencionalni princip redukcije potresnih sil razširili. V definicijo faktorja obnašanja q smo eksplicitno vključili še povratno dobo projektnega potresa, ciljno potresno tveganje ter slučajnost in negotovost potresne obtežbe in potresnega odziva objekta [Žižmond in Dolšek, 2019]. S tem smo razvili paleto metod potresnoodpornega projektiranja za izbrani objekt na ciljno potresno tveganje z vsemi različicami potresne analize.

Sledilo je spoznanje, da je zelo malo znanega o ciljnem potresnem tveganju. Da bi ta problem bolje razumeli, je bilo treba raziskave usmeriti k analizam potresnega tveganja grajenega okolja. Takšne analize so manj natančne od analize potresnega tveganja za posamezen objekt, vendar nudijo dodatne informacije, ki so koristne za načrtovanje grajenega okolja kot celote. V okviru teh raziskav je doktorand Anže Babič razvil krivulje potresne ranljivosti za različne razrede montažnih armiranobetonskih hal [Babič in Dolšek, 2016], ki se lahko uporabijo za študije potresnega tveganja stavbnega fonda, sestavljene iz montažnih armiranobetonskih hal. Pri tem so modeli temeljili na študijah, opisanih v razdelku Montažni objekti. Doktorand Aleš Jamšek se je problema analize tveganja stavbnega fonda lotil drugače. Razvil je poenostavljeni nelinearni model pretežno simetričnih armiranobetonskih okvirjev in okvirjev s polnili [Jamšek in Dolšek, 2020] ter pokazal, da so takšni modeli dovolj natančni za modeliranje potresnega odziva stavbnega fonda z uporabo potisne analize ali nelinearne dinamične analize. Ker je model računsko učinkovit, se lahko uporabi za analize stavbnega fonda.

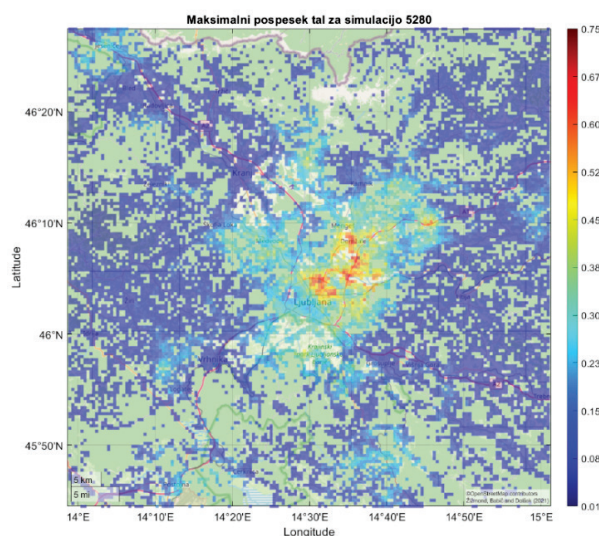
Korak naprej je naredila doktorandka Francesca Celano, ki je razvila metodo za analizo potresnega tveganja industrijsko urbanih območij, kjer je poleg neposrednih posledic potresov upoštevala še vpliv učinkov domin zaradi pojava požara, eksplozij in širjenja strupenih snovi v okolje (slika 4 [Celano in Dolšek, 2020]). Teoretične osnove razvite metode temeljijo na metodi Monte Carlo, ki pa jo je možno uporabiti tudi za namen projektiranja, in sicer tako, da se izračunajo ciljne krivulje potresne ranljivosti posameznih komponent obravnavanega sistema z upoštevanjem ciljnega potresnega tveganja celotnega industrijsko urbanega območja. Ciljna potresna ranljivost posamezne komponente se lahko nato uporabi za projektiranje komponent sistema na osnovi predhodno razvitih metod za projektiranje posameznih objektov. Na primer: Stefano

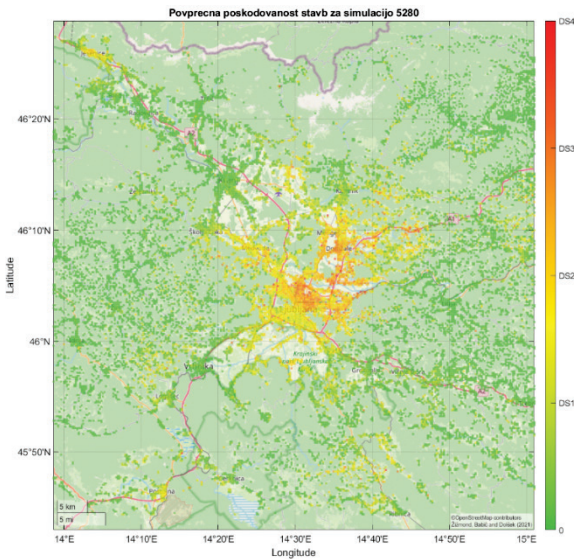


Slika 4. Zemljevid smrtnega tveganja izbranega industrijsko urbanega območja. Z barvno lestvico je prikazano individualno tveganje na leto brez upoštevanja učinkov domin (levo) in z (desno) upoštevanjem učinkov domin (povzeto po [Celano in Dolšek, 2020]).

Caprinozzi [Caprinozzi s sodelavci, 2020] je razvil relativno enostavno metodo za oceno tveganja za izlitje tekočine iz jeklenih rezervoarjev s plavajočimi strehami, za katere se je tudi v praksi večkrat izkazalo, da v primeru močnih potresov predstavljajo kritične komponente industrijsko urbanih območij.

Da bi določili najbolj primerno ciljno tveganje, je v odločitve treba vključiti vse deležnike, ki so izpostavljeni tveganju, in ne le strokovnjake s tega področja. Zato smo začeli opravljati raziskave, ki poleg inženirskih parametrov potresnega odziva objektov omogočajo oceno kazalnikov tveganja, ki so razumljivi širši skupnosti. Doktorand Jure Snoj je že 2014. razvil metodo za oceno škode zaradi potresov. V članku [Snoj in Dolšek, 2020] smo pokazali, da ima kvaliteta gradnje zidanih stavb precejšen vpliv na pričakovano škodo zaradi potresov. Anže Babič je v okviru doktorske disertacije analizo izgub zaradi potresov precej izpopolnil, razvil pa je tudi inovativen sistem za ocenjevanje tveganja [Babič in Dolšek, 2019], ki temelji na kumulativnem tveganju in upošteva kratkoročno in dolgoročno nedopustno tveganje. Prednost inovativnega ocenjevanja tveganja je tudi v tem, da se lahko uporabi za upravljanje tveganja, saj je predvideno, da se ocena v primeru dolgoročno nedopustnega tveganja sčasoma poslabšuje, če lastnik ni izvedel ukrepov za zmanjšanje tveganja. Model ocenjevanja smo kasneje harmonizirali z uveljavljeno sedemstopenjsko lestvico ocenjevanja, ki se uporablja za energetske izkaznice, in ga uporabili pri izvedbi seiz-





Slika 5. Prostorska porazdelitev maksimalnih pospeškov tal in pripadajoča poškodovanost stavbnega fonda za izbrano simulacijo gibanja tal potresa z magnitudo 6,2 in epicentrom 5 km severno od središča Ljubljane (povzeto po [Babič, Dolšek in Žižmond, 2021]).

mičnega stresnega testa stavbnega fonda v Republiki Sloveniji [Dolšek s sodelavci, 2020]. V okviru seizmičnega stresnega testa smo razširili informacije o posledicah potresa v Ljubljani iz leta 1895 na obstoječi stavbni fond v Sloveniji (slika 5).

5 ARMIRANOBETONSKE STENE

Konstruktivski sistemi z armiranobetonskimi stenami se v svetu in še posebno pri nas veliko uporabljajo. Zaradi velike nosilnosti in togosti ter ustrezne duktilnosti so zelo primerni za gradnjo na potresnih območjih. Je pa odziv armiranobetonskih sten na potresno obtežbo specifičen in je bil v preteklosti razmeroma malo raziskan, kar se je odražalo v pomanjkljivih določilih v predpisih. Tako je bilo ves čas obstoja IKPIR projektiranje potresno odpornih sten pomembna tema raziskav in sodelovanja s prakso.

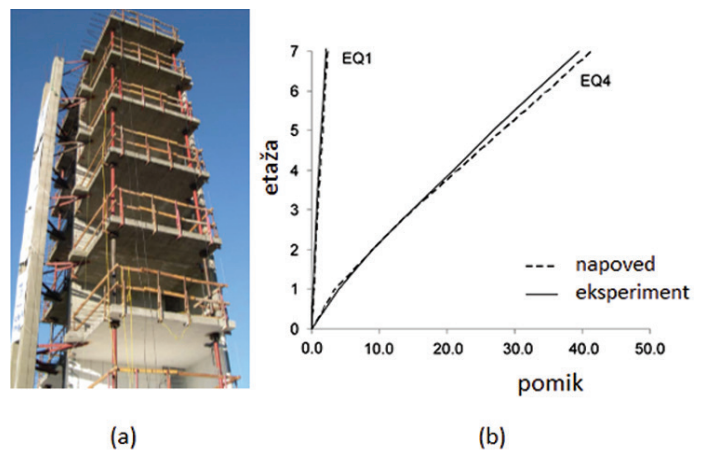
Program EAVEK, ki vključuje posebne makroelemente za konzolne stene in stene z odprtini, je že zelo zgodaj omogočil napreden in učinkovit račun večine višjih stanovanjskih in poslovnih objektov v Sloveniji. Ob pojavu špekulacij v medijih, da potresnoodporna gradnja stanovanjskih blokov zahteva enormne podražitve, so sistematične raziskave vpliva potresnoodporne gradnje na ceno objektov z nosilnimi stenami pokazale, da so podražitve praviloma majhne [Fischinger, Fajfar in Rogač, 1978]. Kasneje smo, tudi z uporabo nelinearne analize, sistematično analizirali faktorje, ki vplivajo na potresno odpornost in ceno potresnoodpornih armiranobetonskih sten [Fischinger in Kante, 2002]. Rezultati raziskav so bili uporabljeni pri razvoju jugoslovanskih predpisov in Evrokodov. Omenimo na primer določitev minimalnega razmerja med prerezom sten in površino tlorisa, zahtevo po povečanju računskih strižnih sil za stene, zahtevo po uporabi Q-mrež v stojinah sten in konstrukcijska določila za armiranje vogalov sten. Organizirali smo seminarje za projektante in pripravili dokumente s komentarji ob sprejetju jugoslovanskega prepisa za potresno-

odporno gradnjo v letu 1981 [Bubnov s sodelavci, 1982] in v podporo sprejetja in uvajanja standardov Evrokod (na primer [Fajfar, Fischinger in Beg, 2009]). V pomoč projektantom smo izdelali programe za dimenzioniranje elementov s kompleksnimi prečnimi prerezi in mrežno armaturo.

V začetnem obdobju delovanja IKPIR so bile, podobno kot povsod po svetu, analize in raziskave omejene na elastično obnašanje sten. Se pa je težišče raziskav zelo zgodaj tudi v svetovnem merilu usmerilo v neelastičen odziv. Nelinearna analiza je bila prvič uporabljena pri analizah referenčne stenasto-okvirne stavbe, ki je bila preizkušena v Tsukubi v okviru japonsko-ameriškega projekta [Fajfar, Fischinger in Remec, 1985]. Rezultate teh raziskav smo uporabili v projektih analize učinkovitosti jugoslovanskih in ameriških predpisov za gradnjo na potresnih območjih.

V praksi smo nelinearno analizo sten prvič uporabili v okviru razvoja velikopanelnega sistema SCT, kjer je eksperimente naredila skupina pod vodstvom Mihe Tomaževiča na ZRMK, na IKPIR pa smo naredili nelinearno analizo s programom DRAN-2D [Kanaan s sodelavci, 1973], v katerega smo vgradili element s histereznimi pravili, ki so modelirala stik med paneli pri upogibnem odzivu [Fischinger s sodelavci, 1987].

Ta element je postal osnova za razvoj uspešne slovenske verzije modela z več vertikalnimi vzmetmi (MVLEM - Multiple Vertical Line Element Model) za nelinearno analizo armiranobetonskih sten [Fischinger, Vidic in Fajfar, 1992]. Uspešnost modela smo kasneje dokazali z dvema odličnima napovedma (»benchmark« študijami) potresnega odziva sten, ki so bile preizkušene na potresnih mizah. Za steno, ki je bila preizkušena v San Diegu, in za stenasto stavbo, ki je bila preizkušena na največji potresni mizi na svetu E-defence, smo se sodelavci IKPIR v elitni mednarodni konkurenci najbolj približali eksperimentalnim rezultatom (na primer [Fischinger, Kante in Isakovič, 2009]). Značilen rezultat uspešne vnaprejšnje napovedi je ilustriran na sliki 6. V zadnjem obdobju je bil MVLEM-element dopolnjen tako, da med prvimi na svetu omogoča ana-



Slika 6. Konstrukcijski sklop z armiranobetonsko steno v 7-etažni stavbi v naravnem merilu, ki je bil preizkušen na potresni mizi Univerze v Kaliforniji v San Diegu: (a) fotografija sklopa, (b) slepo napovedani in eksperimentalno izmerjeni horizontalni pomiki so se zelo dobro ujemali pri elastičnem odzivu (test EQ1) in pri zadnjem, močno neelastičnem odzivu (test EQ4).

lizo osno-upogibne-strižne interakcije pri nelinearnem odzivu sten [Isaković in Fischinger, 2019].

Pomemben rezultat nelinearnih analiz sten je bila tudi izboljšana definicija faktorja povečanja strižnih sil v primerjavi z rezultati elastične analize, ki je bila uporabljena pri razvoju standardov Evrokod [Rejec, Isaković in Fischinger, 2012].

Velik izziv so bili eksperimenti potresnega odziva armiranobetonskih sten, ki smo jih opravili v velikem merilu na potresnih mizah. Zaradi dokaj velike nosilnosti armiranobetonskih sten je za njihovo preizkušanje potrebna zelo zmogljiva in draga oprema, s katero razpolagajo le največji laboratoriji. Zato so takšni testi dokaj redki in jih je bilo možno narediti le v okviru uspešno pridobljenih evropskih projektov. Zasnovo smo preizkuse dveh povezanih petetažnih sten s prirobnicami, kjer smo primerjali učinek konstrukcijskih detajlov v skladu s tedaj veljavno prakso in v skladu z zahtevami tedaj novih standardov Evrokod 8 [SIST, 2006a]. Steni sta predstavljali velik model značilne stanovanjske stavbe z armiranobetonskimi stenami v Sloveniji. Eksperimenti so bili opravljeni v laboratoriju LNEC na Portugalskem ([Fischinger, Isaković in Kante, 2006], slika 7). Preizkus smo podprli z nelinearnimi analizami. Poleg neposrednega vpliva na projektantsko prakso in predpise so ti rezultati kasneje v svetovnem merilu postali referenčni za preučevanje nelinearnega odziva povezanih sten na potresni vpliv. Zlasti so bili rezultati pomembni za raziskave nelinearnega strižnega obnašanja sten, nepričakovano velikega vpliva prenosa obremenitve preko prečk na slope ter upogibno-strižne interakcije v njih.



Slika 7. Test petetažnih sten s prirobnicami na potresni mizi v laboratoriju LNEC [Fischinger, Isaković in Kante, 2006].

V zadnjem času smo eksperimentalne in analitične raziskave usmerili na študij še neraziskanega področja prenosa obremenitev med stenami preko stropnih plošč. Povezanost sten z medetažnimi ploščami je bila v dosednji praksi in raziskavah podcenjena ali povsem zanemarjena. Sestavni del raziskav, pri katerih sta poleg Isakovičeve in Fischingerjeve sodelovala tudi Matija Gams in doktorand Antonio Janevski, je bil preizkus trietažnih sten, povezanih z medetažnimi ploščami v merilu 1 : 2 na potresni mizi IZIS v Skopju [Isaković s sodelavci, 2020].

Rezultati na področju nelinearnega modeliranja sten in prispevki k razvoju predpisov za njihovo uporabo so bili opaženi

ter priznani v evropskem in svetovnem merilu. Zato smo bili povabljeni, da vodimo evropsko sodelovanje pri projektu US NSF SAVI (Science Across Virtual Institutes) Wall Institute, ki združuje vodilne svetovne strokovnjake za analizo potresne odpornosti armiranobetonskih sten z namenom povezovanja svetovnega znanja na področju modeliranja neelastičnega potresnega odziva sten in izdelave baze podatkov o podpornih eksperimentih. Ključni rezultati na področju modeliranja so bili objavljeni v obsežnem in odmevnem članku [Koložvari s sodelavci, 2019]. Pripravljena je bila tudi posebna številka revije Bulletin of Earthquake Engineering s to tematiko [Fischinger s sodelavci, 2019].

6 OKVIRJI S POLNILI

Armiranobetonski okvirji z zidanimi polnili so pogost konstrukcijski sistem. Čeprav polnila lahko pomembno vplivajo na potresni odziv konstrukcije, se pri analizah običajno tretirajo kot nekonstrukcijski element. Na IKPIR smo raziskave okvirjev s polnili pričeli opravljati konec osemdesetih in v začetku devetdesetih let prejšnjega stoletja. Roko Žarnić, ki je dobil bogate izkušnje pri svojem delu na ZRMK, je prišel kot mladi raziskovalec na IKPIR in obravnaval okvirje s polnili v magistrski in doktorski nalogi. Janez Reflak je v svoji disertaciji obravnaval elastično analizo okvirjev s polnili z metodo podkonstrukcij [Reflak in Fajfar, 1991]. Kasneje se je z okvirji s polnili ukvarjal Matjaž Dolšek, ki je skupaj z mentorjem v mednarodnih revijah objavil šest zelo dobro citiranih člankov, povezanih s to tematiko (npr. [Dolšek in Fajfar, 2001] in [Dolšek in Fajfar, 2008]). V teh člankih je bilo med drugim obravnavano modeliranje polnil z nadomestnimi diagonalami, predlagani so bili neelastični spektri odziva za okvirje s polnili, N2-metoda je bila razširjena na ta konstrukcijski sistem in uporabljena za analizo, s katero smo raziskovali pozitivne in negativne učinke polnil na konstrukcijo.

Modeliranje polnil z diagonalami je praktično uporabno, vendar ima omejitve. Z dvema križnima diagonalama ni mogoče dobro simulirati vpliva polnila na steber, posledično pa ni možno simulirati strižne porušitve stebrov. Celarec je zato razvil iterativen postopek potisne analize, s katerim se s približnim postopkom oceni vpliv morebitne strižne porušitve stebrov na potisno krivuljo [Celarec in Dolšek, 2013]. Na primerih je pokazal, da je potresna zmogljivost okvirja s polnili lahko precej precenjena, če se ne modelira strižna porušitev stebrov.

7 MONTAŽNI OBJEKTI

Delo pri analizi montažnih objektov se je pričelo takoj po ustanovitvi RC FAGG. V začetku sedemdesetih let je bil izdelan računalniški program za izdelavo statičnega računa (vključno s potresnimi vplivi) montažnih dvoranskih konstrukcij, ki jih je gradilo podjetje SGP Gorica iz Nove Gorice. V naslednjih letih so bili razviti podobni programi še za montažne sisteme SGP Grosuplje, Ingrad in Vemont. Leta 1986 smo izdelali programski sistem MONCAD, namenjen projektiranju vseh obstoječih betonskih montažnih konstrukcij, sestavljenih iz krovnih elementov, nosilcev, stebrov in čašastih temeljev. MONCAD je bil v uporabi vse do okrog 2010. V letih 1986–87 smo v sodelovanju z gradbenim podjetjem SCT in z ZRMK razvili velikopanelni sistem, ki je primeren za gradnjo na potresnih območjih. Z njim je bilo v Ljubljani zgrajenih več kot 1000 stanovanj.



Slika 8. Testi fasadnih panelov v naravnem merilu, izvedeni na potresni mizi IZIIS v Skopju.

Sistematične raziskave potresnega odziva montažnih armiranobetonskih objektov so na IKPIR potekale zadnjih dvajset let v okviru različnih evropskih projektov. Raziskave sta vodila Fischinger in Isaković, sodelovala sta doktoranda Miha Kramar in Blaž Zoubek. Večina rezultatov teh raziskav je bila pred kratkim vključena v standard ISO 20987 [ISO, 2019].

Primerjali smo potresni odziv montažnih in monolitnih hal ter potresno ranljivost tipičnih hal z močnimi stiki [Kramar, Isaković in Fischinger, 2010]. Na osnovi teh rezultatov so bila spremenjena zelo konservativna določila začetnih različic standarda Evrokod 8-1 [SIST, 2006a], ki so ogrozila obstoj industrije montažnih armiranobetonskih hal. Zelo konservativna določila so bila posledica slabega poznavanja potresnega odziva montažnih konstrukcij, predvsem različnih vrst stikov, ki odločilno vplivajo na potresni odziv. Med najbolj ključnimi so stiki med gredami in stebri, ki so najbolj pogosto povezani z mozniki. Naredili smo obsežne eksperimentalne in analitične študije teh stikov [Zoubek s sodelavci, 2014] in razvili postopek za njihovo projektiranje [Zoubek, Fischinger in Isaković, 2015], ki bo predvidoma vključen v novo verzijo standarda Evrokod 2-4 [CEN, 2019].

Sodelovali smo pri načrtovanju in analizi več psevdodinamičnih testov armiranobetonskih montažnih hal v naravnem merilu v največjem evropskem laboratoriju JRC v Ispri, Italija. Najprej so bili eksperimenti namenjeni raziskavam potresnega odziva glavnega nosilnega sistema montažnih hal, nadaljnji eksperimenti pa so bili namenjeni proučevanju potresnega odziva različnih vrst stikov, študiju vpliva različnih tipov strešnih elementov na povezanost navpičnih nosilnih elementov in študiju potresnega odziva fasadnih panelov, vključno z razvojem novih vrst stikov.

Pri študiju potresnega odziva fasadnih panelov in njihovih stikov z nosilno konstrukcijo montažnih hal s psevdodinamičnimi testi ni bilo možno preizkusiti določenih dinamičnih vplivov, kot so npr. udarci med fasadnimi paneli in nosilno konstrukcijo. Zato smo teste, opravljene v laboratoriju JRC, dopolnili z lastnimi testi na potresni mizi [Isaković, Zoubek in Fischinger, 2018]. Zasnovali smo vrsto testov montažnih hal v naravnem merilu z različnimi tipi fasadnih panelov, ki se danes uporabljajo v srednji Evropi. Testi so bili izvedeni na eni izmed

največjih potresnih miz v Evropi, v laboratoriju IZIIS v Skopju (slika 8). Poleg celotnih hal smo eksperimentalno preizkusili tudi vrsto različnih posameznih stikov. Najprej smo preučevali možnične stike med stebri in gredami. Ti testi so bili izvedeni na ZAG. Ciklične teste tipičnih stikov fasadnih panelov z glavno nosilno konstrukcijo smo testirali najprej v laboratoriju na UL FGG. Te teste smo dopolnili z dinamičnimi testi posameznih stikov, ki so bili opravljeni na ZAG. Na podlagi teh eksperimentov in komplementarnih analitičnih raziskav smo razvili postopke za projektiranje stikov fasadnih panelov [Zoubek, Fischinger in Isaković, 2016].

Razvili smo tudi inovativni sistem za potresno utrditev fasadnih panelov s pomočjo sintetičnih potresnih pridrževalcev. V ta namen smo naredili več obsežnih serij preizkusov v laboratoriju na UL FGG, s katerimi smo ugotovili najbolj učinkovite materiale in načine pritrdjevanja pridrževalcev na panele in nosilno konstrukcijo hale.

Analize armiranobetonskih hal je nadaljeval doktorand Giovanni Menichini (opravljal je dvojni doktorat na UL in Univerzi v Firencah), ki je naredil sistematične študije odziva navpičnih fasadnih panelov pri istočasnem potresnem vznujanju v dveh smereh, v ravnini panelov in pravokotno na to ravnino [Menichini in Isaković, 2018]. Definiral je ustrezne numerične modele za navpične panele, ki se lahko prosto zibajo (angl. »rocking panels«) in razvil postopek za oceno potresnih zahtev pravokotno na ravnino navpičnih panelov.

Nadaljevali smo tudi s študijami stikov vodoravnih fasadnih panelov v armiranobetonskih montažnih halah, s čimer smo dopolnili eksperimentalne in analitične študije potresnega odziva posameznih stikov [Starešinič s sodelavci, 2020]. Gabrijele Starešinič je v okviru svoje doktorske naloge študirala vpliv stikov na potresni odziv glavnega konstrukcijskega sistema montažnih hal.

8 ETAŽNI SPEKTRI

Nekonstrukcijskim elementom je tipično namenjen zelo velik del stroškov pri graditvi gradbenih objektov pa tudi pri popravilih po morebitnih potresih. Žal se jim pri projektiranju posveča premalo pozornosti. Za projektiranje elementov, ki so občutljivi za pospeške, se uporabljajo etažni spektri pospeškov. Ti spektri imajo za nekonstrukcijske elemente (opremo) enak pomen kot spektri gibanja tal za primarno konstrukcijo. Raziskave etažnih spektrov na IKPIR je spodbudilo naše sodelovanje z Jedrsko elektrarno Krško (NEK). Pri analizah smo postali pozorni na izredno visoke pospeške opreme, ki lahko dosežejo vrednosti večkratnika težnostnega pospeška. Začetno delo na področju etažnih spektrov je bilo opravljeno v okviru diplomske naloge Tomaža Vidica leta 1986. Delo je nadaljeval doktorand Dejan Novak v začetku devetdesetih let prejšnjega stoletja [Fajfar in Novak, 1995]. Žal je delo zastalo. Z raziskavami na področju etažnih spektrov smo nadaljevali šele leta 2010, ko se nam je pridružil doktorand Vladimir Vukobratović. Začel je na točki, kjer je Novak končal. Dejstvo, da je bila naša glavna ideja direktne metode za določanje etažnih spektrov neelastičnih primarnih konstrukcij še vedno primerna po petnajstih letih, dokazuje, da po svetu v tistem obdobju na tem področju ni bilo veliko narejenega. Metoda, razvita v okviru Vukobratovičeve disertacije, omogoča direkten račun etažnih spektrov za elastične in neelastične konstrukcije. Rezultate raziskav smo objavili v treh člankih v mednarodnih revijah in v članku

v Gradbenem vestniku. Malo poenostavljena verzija metode [Vukobratović in Fajfar, 2017] je bila sprejeta kot osnova za račun etažnih spektrov v novi generaciji EC8 [CEN, 2021a].

9 MOSTOVI

Začetki strokovnega in raziskovalnega dela na IKPIR na področju potresne analize in projektiranja mostov sovpadajo z začetkom gradnje avtocestnega križa v Sloveniji v devetdesetih letih prejšnjega stoletja. V tistem času pri nas ni obstajal uporaben predpis za potresno odporno gradnjo premostitvenih objektov. Fischinger in Fajfar sta leta 1990 pri potresni analizi viadukta Reber, prvega pomembnega objekta, ki je bil zgrajen v okviru avtocestnega križa, upoštevala sodobne principe za projektiranje mostov na potresnih področjih. Glede na to, da je sledilo projektiranje velikega števila pomembnih premostitvenih objektov, smo pripravili priročnik [Fajfar, Fischinger in Isaković, 1995] z navodili za projektiranje mostov na potresnih področjih, ki ga je DARS uradno priporočil za projektiranje premostitvenih objektov v okviru avtocestnega križa. Navodila so temeljila na predstandardu Evrokod 8-2 [SIST, 2006b]. Priročnik je bil na voljo tudi v elektronski – hipertekstni obliki, kar je bila za tiste čase precejšnja novost. Predstavljal je prvi priročnik za standarde Evrokod 8 v Evropi in omogočil prvo uradno uporabo standardov Evrokod v Evropi.

Sledile so raziskave na področju nelinearnega odziva mostov. V začetni študiji sta Gašpersič in Fajfar ugotovila, da je N2-metoda uporabna za analizo pravih konstrukcij mostov, pogosto pa odpove pri nepravilnih konstrukcijah. Rezultati so bili objavljeni v dveh člankih na mednarodnih konferencah v letih 1997 in 1998.

Vse nadaljnje raziskave na področju potresnega odziva mostov, opisane v nadaljevanju, sta opravila Isaković in Fischinger z doktorandi.

Glede na ugotovitve, da je odziv mostov kvalitativno drugačen od stavb in da na ta odziv zelo pogosto pomembno vplivajo višje nihajne oblike, je bila ustrezno prilagojena uporaba N2-metode ([Isaković in Fischinger, 2006], [Isaković, 2014]),

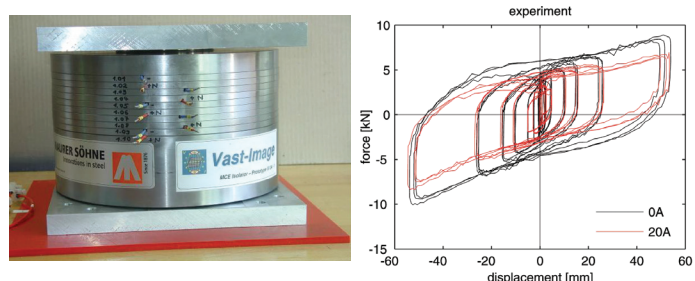


Slika 9. Test potresnega odziva viadukta na treh potresnih mizah na UNR, ki smo ga analizirali na IKPIR.

Raziskana je bila tudi primernost drugih nelinearnih metod za potresno analizo mostov. Velik del rezultatov teh raziskav je bil najprej vključen v knjigo [Kappos s sodelavci, 2012], potem pa v novi standard Evrokod 8-2 [CEN, 2021b], katerega priprava je v zaključni fazi. Preden je bil uradno sprejet trenutno veljavni standard Evrokod 8-2 [SIST, 2006b], je doktorand Jaka Zevnik študiral potresno ranljivost različnih konfiguracij viaduktov, projektiranih po tem standardu.

Na področju raziskav potresnega odziva mostov smo zelo uspešno sodelovali z Univerzo Nevada v Renoju, ZDA (UNR), ki razpolaga z enim izmed najbolj opremljenih laboratorijev za raziskave potresnega odziva mostov na svetu. Vključeni smo bili v projekt uporabe inovativnih konstrukcijskih detajlov v mostnih stebrih. Sodelovali smo pri analizah mostov, ki so bili preizkušeni v velikem merilu simultano na treh potresnih mizah ([Isaković in Fischinger, 2011], slika 9). Isaković je s kolegi na UNR sodelovala tudi pri razvoju postopkov za projektiranje potresnih pridrževalcev v mostovih [Saiidi s sodelavci, 2001] in pri projektu potresne utrditve pomembnega viadukta v centru Las Vegasa, ZDA.

Ukvarjali smo se tudi s potresno izolacijo mostov. Sodelovali smo pri razvoju nove inteligentne naprave za potresno izolacijo, ki sama uravnava svojo togost glede na intenziteto potresa ([Ahmadi s sodelavci, 2005], [Isaković, Zevnik in Fischinger, 2011], slika 10). Naprava je bila razvita v okviru evropskega



Slika 10. Inteligentna naprava za potresno izolacijo, razvita v okviru evropskega projekta VAST-IMAGE.

projekta VAST-IMAGE, v katerem so sodelovali najbolj priznane raziskovalne institucije in renomirani proizvajalci v Evropi. Vključeni smo bili v projekt prvega potresno izoliranega modernega objekta v Sloveniji – viadukta Ločica. Pripravili smo navodila za projektiranje potresno izoliranih konstrukcij [Fischinger in Isaković, 2001]. Fischinger je bil ustanovni član ASSISI (Anti-Seismic Systems International Society), svetovnega združenja za potresno izolacijo.

Doma smo sodelovali pri vrsti preizkusov mostnih stebrov. Fischinger in Isaković sta sodelovala z Lojzeto Bavecem na ZAG pri preizkusih potresnega odziva viadukta Ravbarkomanda v pomanjšanem merilu ([Isaković, Bavec in Fischinger, 2008], slika 11). Na osnovi teh preizkusov je bil določen način utrditve teh stebrov. Skupaj s kolegi na ZAG sta Isaković in doktorand Zlatko Vidrih testirala različne možnosti utrditve mostnih stebrov s karbonskimi vlakni, predvsem različne načine pritrditve na stebre. To delo sta nadaljevala doktorand Andrej Anžlin z ZAG in Isaković, ki sta testirala in analizirala vpliv različnih konstrukcijskih pomanjkljivosti na potresni odziv mostnih stebrov in eksperimentalno preizkusila zmogljivosti inovativne po-



Slika 11. Ciklični testi škatlastih stebrov viadukta Ravbarko-manda v pomanjšanem merilu so narejeni v sodelovanju z ZAG.

stopka za utrditev mostnih stebrov s karbonskimi vlakni [Anžlin in Isaković, 2016].

Število integralnih mostov v zadnjem času strmo narašča, o njihovem zapletenem potresnem odzivu pa vemo zelo malo. Bili smo vključeni v evropski projekt SERENA, kjer so bile eksperimentalno raziskane osnovne značilnosti potresnega odziva integralnih mostov [Fiorentino s sodelavci, 2021].

Na osnovi odmevnih rezultatov sta bila Fischinger in Isaković povabljeni k sodelovanju v delovni skupini Evropskega združenja za potresno inženirstvo, Projektiranje in utrditev mostov na potresnih območjih, ki se ukvarja z razvojem metod in orodij za projektiranje mostov na potresnih območjih.

10 CENILKA POGOJNEGA POVPREČJA (CAE METODA)

Prof. Igor Grabec s Fakultete za strojništvo UL je razvil metodologijo, ki simulira delovanje umetnih nevronske mreže, imenovano »cenilka pogojnega povprečja« (Conditional Average Estimator – CAE). Metoda predstavlja večdimenzionalno neparametrično regresijo, ki omogoča ocene neznanih količin kot funkcije znanih podatkov. Na IKPIR smo CAE-metodo uporabljali za empirične raziskave kapacitete armiranobetonskih elementov, potresne nevarnosti in vpliva tal na potresno gibanje. Pri vseh raziskavah je imel najpomembnejšo vlogo Iztok Peruš, ki je v sodelovanju z raziskovalci izven IKPIR uspešno uporabil CAE-metodo tudi na različnih drugih področjih. Raziskave potresne kapacitete so bile del disertacije Karmen Poljanšek. Rezultati raziskav, kjer je bila uporabljena CAE-metoda, so bili objavljeni v šestih člankih v mednarodnih revijah, med njimi [Peruš, Poljanšek in Fajfar, 2006].

11 EKSPERIMENTALNO DELO

Eksperimentalno delo smo na IKPIR začeli razmeroma pozno. Univerza je bila dolgo povsem ločena od raziskovalnih institutov, ki so imeli laboratorije. FAGG je svoj laboratorij zgradil šele leta 1984, predvsem po zaslugi Janeza Duhov-

nika, ki je vodil gradnjo laboratorija in predlagal, da se za togo ploščad laboratorija uporabi zaklonišče. Tudi po pridobitvi razmeroma skromnega laboratorija so bile možnosti za eksperimentalno delo na področju potresnega inženirstva, ki večinoma zahteva posebno opremo in velika materialna sredstva, zelo skromne. Zaradi tega smo pri svojem delu v največji možni meri uporabljali rezultate eksperimentov, ki so jih opravljali naši kolegi po svetu. Možnost sodelovanja pri eksperimentih v velikih evropskih laboratorijih (in s tem dostop do vseh eksperimentalnih podatkov) se je široko odprla z vključitvijo v evropske raziskovalne projekte. Ponujeno priložnost sta izkoristila Fischinger in Isaković z doktorandi. Posamezni eksperimenti so opisani v razdelkih o stenah in montažnih konstrukcijah.

Dolšek in doktorand Jure Snoj sta se ukvarjala tudi z meritvami ambientnih in vsiljenih vibracij objektov. Že leta 2013 smo rezultate meritev nihajnih časov uporabili za kalibracijo nelinearnega modela zidane stavbe [Snoj, Österreicher in Dolšek, 2013]. Zaradi hitrega razvoja digitalizacije so meritve ambientnih in vsiljenih vibracij v zadnjih letih postale trend v potresnem inženirstvu.

12 DRUGI RAZISKOVALNI REZULTATI

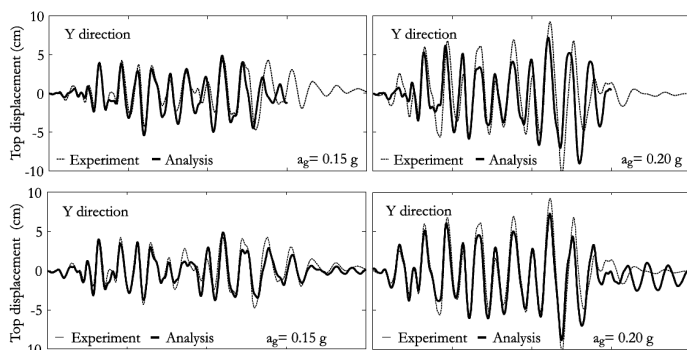
Raziskovalno delo na področju potresnega inženirstva na IKPIR je bilo poleg opisanega v predhodnih poglavjih usmerjeno še v vrsto drugih problemov. Nekateri od njih so omenjeni v nadaljevanju.

Pri analizi stavb običajno predpostavimo, da so medetažne konstrukcije toge v svoji ravnini. Ta predpostavka je lahko v nekaterih primerih, npr. pri dolgih in ozkih tlorisih, vprašljiva. Vpliv podajnosti stropov v njihovi ravnini na odziv konstrukcij stavb pri vodoravni obtežbi je raziskoval Janez Duhovnik v svoji doktorski disertaciji konec sedemdesetih in v prvi polovici osemdesetih let [Duhovnik, 1982].

V osemdesetih in v začetku devetdesetih let se je Hinko Šolinc ukvarjal z raziskavami seizmičnih problemov v zvezi s tekočinami. Raziskave so med drugim obsegale dinamično linearno analizo rezervoarjev z metodo končnih elementov ob upoštevanju hidrodinamičnih tlakov [Šolinc, 1987] in vpliv tekočine na potresni odziv pregrad, kjer je bila uporabljena metoda robnih elementov.

Leta 2013 smo v sodelovanju s prof. Markom Poličem s Filozofske fakultete UL opravili spletno anketo, s katero smo skušali pridobiti podatke o zaznavanju potresne ogroženosti Slovenije in o sprejemljivem tveganju ter o pripravljenosti za ukrepanje. Rezultate ankete smo objavili v dveh člankih v Gradbenem vestniku, prvi med njima je [Fajfar, Polič in Klinc, 2014].

V okviru evropskega projekta SPEAR je bilo v laboratoriju ELSA JRC v Ispri opravljenih več psevdodinamičnih preiskav trietažne AB-stavbe, zgrajene v merilu 1 : 1 (slika 3). Rezultati testov dajejo dragocene podatke za študij numeričnega modeliranja konstrukcij. SPEAR-stavbo smo pogosto uporabljali v naših analizah. Pri njih so med drugim sodelovali doktoranda Damjan Marušič in Matej Rozman ter gostujoči raziskovalec Aurel Stratan. Objavili smo več člankov, med njimi ([Fajfar s sodelavci, 2006] in [Rozman in Fajfar, 2009]). Na sliki 12 so za primer prikazane primerjave računskih in eksperimentalnih pomikov na vrhu stavbe.



Slika 12. Primerjava računskih in eksperimentalnih pomikov na vrhu SPEAR-stavbe za dve jakosti potresa. Zgornji rezultati so bili izračunani pred testom, spodnji z izboljšanim modelom po testu (po [Fajfar s sodelavci, 2006]).

Doktorand Klemen Sinkovič je primerjal metode različnih zahtevnosti za ocenjevanje potresne odpornosti AB-stavb, od najenostavnejšega postopka, ki zahteva samo osnovne podatke o stavbi, do najbolj zahtevne metode, ki uporablja nelinearno dinamično analizo [Sinkovič, Peruš in Fajfar, 2016].

13 SODELOVANJE PRI PRIPRAVI PREDPISOV

V nekdanji Jugoslaviji je pripravo predpisov o potresnoodporni gradnji vodil Zvezni zavod za standardizacijo, glavni vpliv na delo pri pripravi v sedemdesetih letih prejšnjega stoletja je imel IZiIS (Inštitut za potresno inženirstvo in inženirsko seizmologijo) v Skopju. V delovni skupini je sodeloval tudi Fajfar. Pri pripravi novega predpisa so bila številna nesoglasja in zapleti, dokler ni bil predpis po potresu leta 1979 v Črni gori sprejet leta 1981. Predpis je uvedel nekaj pomembnih novosti, imel pa je tudi številne pomanjkljivosti. Na IKPIR smo v sodelovanju z ZRMK in Seizmološkim zavodom SRS pripravili obširno publikacijo IKPIR na 250 straneh [Bubnov s sodelavci, 1982], v kateri smo kritično analizirali posamezna določila predpisa in podali tudi predloge za spremembe in izboljšave. Publikacija je predstavljala tudi nekakšen komentar predpisov in je vsebovala praktične napotke za projektante. Predpis je z nekaj spremembami in dopolnitvami veljal vse do leta 2008 (zadnja leta vzporedno z EC8), ko so postali obvezni Evrokodi.

Po osamosvojitvi Slovenije je Urad RS za standardizacijo in meroslovje (USM, zdaj Slovenski inštitut za standardizacijo – SIST) imenoval tehnični komite Konstrukcije (TC KON), ki se je odločil, da kot osnovo za slovenske standarde na področju konstrukcij prevzame evropske standarde Evrokod. Področje potresne odpornosti konstrukcij obravnava standard EN-1998, imenovan Evrokod 8 ali krajše EC8. Za pripravo in sprejem vseh delov EC8 je pristojna posebna delovna skupina Evropskega komiteja za standardizacijo (CEN/TC 250/SC 8), v kateri je od leta 1994 kot predstavnik Slovenije sodeloval Fajfar, leta 2019 pa ga je zamenjala Isaković, ki je tudi predsednica slovenskega tehničnega komiteja za konstrukcije SIST/TC. V Sloveniji je delovna skupina WG8 (v okviru TC KON) pripravila vse potrebno za sprejem posameznih delov EC8, čim so bili ti sprejeti v evropskem merilu. Že leta 1995 je Slovenija, daleč pred vsemi drugimi državami, uradno sprejela več predstandardov. Posebno pomemben je bil del, ki obravnava mostove, saj v času intenziv-

ne gradnje avtocest v Sloveniji sploh nismo imeli predpisov za gradnjo potresno odpornih premostitvenih objektov. DARS je s financiranjem posebne raziskovalne naloge omogočil, da smo lahko v relativno kratkem času pripravili pogoje za uvedbo tega predstandarda [SIST, 1995], predstandard prevedli, ga preverili s testnimi primeri, izdelali priročnik [Fajfar, Fischinger in Isaković, 1995] in pripravili seminar za projektante. Čeprav uporaba predstandarda v Sloveniji ni bila obvezna, je investitor (DARS) pri projektiranju objektov avtocest zahteval njegovo uporabo.

Prvi deli standarda EC8 so bili v Evropi uradno sprejeti leta 2004, že naslednje leto pa tudi v Sloveniji, ki je postala prva država, kjer so Evrokodi leta 2008 postali obvezni. V vmesnem času, ko sta veljala tako stari predpis kot nov standard, so se projektanti lahko spoznali z novim standardom in se ga naučili uporabljati. IKPIR je v sodelovanju s Slovenskim društvom za potresno inženirstvo že decembra 2001 organiziral seminar Novosti v potresnem inženirstvu, ki je bil zaradi velikega zanimanja ponovljen aprila 2002. Kasneje je Inženirska zbornica Slovenije v sodelovanju z UL FGG pripravila številne seminarje za projektante in izdala priročnik za projektiranje po Evrokodih, kjer najobsežnejše poglavje pripada EC8 [Fajfar, Fischinger in Beg, 2009]. Študenti gradbeništva na FGG so se spoznavali z EC8 in ostalimi Evrokodi pri rednih predavanjih.

Leta 2013 se je pričela pripravljati nova generacija Evrokodov. Postopek je zahteven in zamuden in bo predvidoma končan šele sredi tega desetletja. Operativno delo opravljajo projektne skupine. V dveh izmed projektčnih skupin za pripravo revidiranega EC8 sta sodelovala tudi Dolšek in Isaković.

V EC8 so vključeni tudi rezultati raziskav, opravljenih na IKPIR. Sestavni del obstoječega EC8 je osnovna N2-metoda. V revidirani EC8 so vključeni razširjena N2-metoda, poenostavljena verzija postopka za račun etažnih spektrov, račun projektčnih prečnih sil v armiranobetonskih stenah in specifične zahteve za račun mostov z N2-metodo. Vključena sta tudi dva dodatka. Prvi definira način računa ciljnega pomika z nelinearno dinamično analizo sistema z eno prostostno stopnjo in s tem povezanega pospeška, ki povzroči izbrana mejna stanja. Na ta način se lahko uporabi metoda N2 za splošno obliko potisne krivulje. Drugi dodatek podaja poenostavljen model za verifikacijo projektiranja na osnovi zanesljivosti. Postopek za projektiranje moznih stikov med stebri in gredami v montažnih armiranobetonskih halah bo predvidoma vključen v novi standard EC2.

14 PEDAGOŠKO DELO

Sodelavci IKPIR smo na FAGG (kasneje FGG) uvedli in izvajali vse predmete s področja dinamike gradbenih konstrukcij in potresnega inženirstva na vseh stopnjah študija ter pripravili ustrezno študijsko gradivo. Bili smo mentorji pri številnih diplomskih, magistrskih in doktorskih delih. Med njimi je bilo kar 37 doktorskih disertacij s področja potresnega inženirstva. Več diplomantov je dobilo univerzitetne Prešernove nagrade. Usposabljali smo številne domače in tuje mlade raziskovalce. Organizirali in izvajali smo vrsto seminarjev za projektante, ki so bili namenjeni predvsem usposabljanju za uporabo računalniških programov in predpisov za potresnoodporno projektiranje. Vse to pedagoško delo je omogočilo, da so bili projektanti v Sloveniji pripravljeni na delo z novimi predpisi in da so projektantske in raziskovalne organizacije dobile kadre za vrhunskim znanjem na področju potresnega inženirstva.

15 RAZVOJNO IN STROKOVNO DELO

Končni cilj vseh raziskav na področju potresnega inženirstva na IKPIR je bila njihova uporabnost za reševanje problemov v praksi. Na začetku našega delovanja smo pomagali projektantom izvajati potresne analize konstrukcij z našimi in tujimi programi. Kasneje, ko so se projektanti usposobili za samostojno uporabo programov, smo sodelovali z njimi kot konzultanti in revidenti pri bolj zahtevnih projektih.

Aktivno smo vključeni v analize, povezane s potresno varnostjo jedrskih objektov v Sloveniji (obstoječa in planirana jedrska elektrarna Krško ter projektirano odlagališče jedrskih odpadkov). Med drugim smo vodili mednarodna konzorcija, ki sta pripravila študiji potresne nevarnosti na lokaciji NEK v letih 1991–94 in 2000–02. Po katastrofalnem potresu na Japonskem leta 2011 so bili opravljeni »stresni testi« vseh evropskih nuklearnih elektrarn. Vodili smo pregled dela stresnega testa za NEK, ki se je nanašal na potresno in poplavno varnost. Leta 2015 smo pripravili analizo potresne ranljivosti za objekt BB1 v NEK in jo v letu 2020 revidirali zaradi nekaterih prebojev skozi konstrukcijske elemente. V času nadgradnje varnosti v NEK, ki je sledila po potresu na Japonskem, smo vodili pregled projektne dokumentacije za pomožni objekt BB2 in za suho skladišče obrabljene goriva. Poleg tega smo pregledovali projektno dokumentacijo za skladišče nizko in srednje radioaktivnih odpadkov in vodili neodvisno analizo potresnega odziva silosa NSRAO. Od leta 2019 vodimo projekt pregleda analize potresne nevarnosti in neodvisnega preračuna analize potresne nevarnosti za JEK2 ter potresno analizo potencialnih novih nukleark. Pri projektu sodelujemo z ARSO, prof. Abrahamsonom iz Univerze Kalifornija, Berkeley, in razvojnem oddelkom Électricité de France. V okviru projekta smo razvili inovativen neergodični model gibanja tal za območje Krške kotline.

Izdelali smo program za statični račun montažnih ločnih konstrukcij GORICA, s katerim smo v letih 1971–80 izdelali projekte konstrukcije za več kot sto objektov, ki jih je gradil SGP Gorica po celi Jugoslaviji. Program je prerasel v programski sistem MONCAD za račun montažnih hal različnih proizvajalcev. Leta 1976 smo izdelali projekte konstrukcije 12–22 etažnih stanovanjskih objektov v naselju Kneževac v Beogradu. V osemdesetih letih smo med drugim izvedli statično in dinamično analizo za cestni ločni most v Solkanu in revizijo gradbenih projektov Nacionalne in vseučiliščne knjižnice v Zagrebu. V sodelovanju z gradbenim podjetjem SCT in z ZRMK smo razvili velikopanelni sistem SCT. Kasneje smo sodelovali pri revizijah projektov strojnice in hladilnega stolpa TE Šošanj, pri projektu potresne utrditve viadukta Ravbarkomanda, projektu viadukta Reber, projektu prvega modernega potresno izoliranega objekta v Sloveniji – viadukta Ločica, pri projektu nesojenega objekta 70 m visokega novega Kolizeja v Ljubljani in reviziji projekta stolpnice Šiška-Residence ter potresni utrditvi viadukta v centru Las Vegasa, ZDA. Sodelovali smo v natečajni komisiji za izbiro najboljše rešitve za največji viadukt v Sloveniji, Črni Kal. Določili smo projektne potresne parametre za številne pomembne objekte v Sloveniji.

Leta 2020 smo naredili seizmični stresni test stavbnega fonda v Republiki Sloveniji. Razvili smo aplikacijo IKPIR za analize potresnega tveganja, s katero smo prvič v Sloveniji ocenili tveganja stavbnega fonda z uporabo fizikalno opredeljenih metod potresnega tveganja [Dolšek s sodelavci, 2020].

Potem ko sta se po celem svetu razvoj in vzdrževanje programske opreme preselila z univerz na specializirana podjetja, smo se povezali z ameriškim podjetjem Computers & Structures Inc. (CSI), ki izhaja iz Univerze v Berkeleyju. Ta povezava je omogočila, da IKPIR od leta 2003 posreduje računalniške programe podjetja CSI, med njimi posebno SAP 2000 [CSI, 2021a] in ETABS [CSI, 2021b], projektantskim organizacijam in skrbi za pomoč uporabnikom.

16 MEDNARODNO SODELOVANJE

Nujen pogoj za uspešno raziskovalno delo je tesno sodelovanje s kolegi in inštitucijami po svetu, ki se ukvarjajo s podobnimi raziskavami. Na IKPIR smo na področju potresnega inženirstva uspeli vzpostaviti odlične stike z večino vodilnih centrov za potresno inženirstvo. Posebno uspešna je bila naša povezava z Univerzo v Stanfordu in s kalifornijsko univerzo v Berkeleyju, ki je med drugim rezultirala v štirih izjemno odmevnih delavnicah, organiziranih na Bledu v letih 1992, 1997, 2004 in 2011. Delavnic so se udeležili najuglednejši svetovni strokovnjaki s področja potresnega inženirstva. Na delavnicah z zelo omejenim številom povabljenih udeležencev je bil velik del časa namenjen diskusiji. Pisni prispevki, priporočila in zaključki ter



Slika 13. Štiri blejske delavnice so dokumentirane v monografijah.

resolucije so bili zbrani v monografijah, izdanih pri uveljavljenih mednarodnih založbah (slika 13). Brez lažne skromnosti lahko ugotovimo, da so blejske delavnice, posebno druga, zaznavno vplivale na smer razvoja potresnega inženirstva v svetu. Delavnice so predstavljale vrh našega uradnega sodelovanja z ameriškimi institucijami, ki se je začelo v okviru skupnega ameriško-jugoslovanskega fonda za znanstveno in tehnološko sodelovanje. Leta 1983 se je pričel izvajati naš prvi raziskovalni projekt »Ovrednotenje potresnih predpisov v ZDA in Jugoslaviji« z NSB (Nacionalni biro za standarde) v Washingtonu DC. Sledilo je več raziskovalnih projektov s kalifornijsko univerzo v Berkeleyju in z Univerzo v Stanfordu, ki so omogočili vsakoletne obiske naših sodelavcev na vrhunskih ameriških univerzah in izjemno plodno sodelovanje z ameriškimi raziskovalci. Zelo uspešno je bilo tudi dolgoletno sodelovanje z Univerzo Nevada v Renoju (UNR), s katero smo sodelovali pri raziskavah potresnega odziva mostov. Sodelovanje je potekalo v okviru več bilateralnih projektov.

Zadnje uspešno sodelovanje s kalifornijsko univerzo v Berkeleyju smo pripravili v zadnjih dveh letih. Anže Babič, Matjaž Dolšek in Norman Abrahamson so na osnovi zapisov državne mreže potresnih opazovalnic (ARSO) razvili nov neergodični model potresnega gibanja tal za območje Krškega. Pri razvoju neergodičnega modela gibanja tal so bile uporabljene metode strojnega učenja, teorija Gaussovih procesov v kombinaciji z vzorčenjem po metodi Monte Carlo markovskih verig. Neodvisen mednarodni strokovni panel je nedavno podal pozitivno oceno za vključitev neergodičnega modela gibanja tal v verjetnostno analizo potresne nevarnosti za potrebe potresno-odpornega projektiranja nove jedrske elektrarne, kar je prva tovrstna aplikacija modela gibanja tal v svetovnem merilu.

Naše sodelovanje z evropskimi partnerji se je začelo leta 1990 s skupnim projektom z Univerzo v Darmstadt, večji zagon pa je dobilo takoj ko je bilo slovenskim partnerjem mogoče konkurirati za evropska sredstva. Od leta 1993 naprej je bila raziskovalna skupina na področju potresnega inženirstva na IKPIR stalno vključena v evropske raziskovalne projekte. Začeli smo s COST- in TEMPUS-projekti, nadaljevali leta 1997 z dvema projektoma v okviru INCO-COPERNICUS-programa (EUROQUAKE in RECOS), od leta 2000 naprej pa smo stalno vključeni v evropske okvirne programe. V petem okvirnem programu (OP) EU smo sodelovali pri projektih SAFERR, SPEAR, VAST-IMAGE, PRECAST in ECOLEADER. V šestem OP smo bili vključeni v projekta LESSLOSS in PROHITECH, v sedmem OP pa v projekta SAFECAST, SAFECCLADDING, SERIES in STREST. V zadnjem okvirnem programu HORIZON smo sodelovali oz. sodelujemo pri projektih XP-RESILIENCE, SERA, NEWREBAR, METIS in pri projektu BORIS (DG-ECHO). Vsi ti projekti so omogočili dobro sodelovanje s praktično vsemi centri za potresno inženirstvo v Evropi in dodatno financiranje naših raziskav. K nam so na usposabljanje prišli številni mladi raziskovalci iz tujine, največ iz Italije. Nekateri so na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo tudi doktorirali. Ob 100-letnici Univerze v Ljubljani leta 2019 smo organizirali mednarodno poletno šolo »Methods of risk analysis and resilience estimation«, ki se je je udeležilo 50 študentov, podoktorskih raziskovalcev in učiteljev iz petih držav.

Za naše delo je bilo zelo pomembno tudi uradno in neuradno sodelovanje z japonskimi raziskovalci. Prve povezave smo vzpostavili leta 1982 med obiskom Fajfarja na več japonskih inštitucijah. Skupni raziskovalni projekt s tokijsko univerzo je rezultiral v dveh delavnicah v Ljubljani v letih 2000 in 2001.

Trenutno sodelujemo z inštitutom E-Defense, ki razpolaga z največjo potresno mizo na svetu. Povabljeni smo bili k analizi dveh desetetažnih stolpnic, ki sta bili v tem centru preizkušeni v naravnem merilu. V ta projekt so vključene tudi druge univerze, s katerimi že leta uspešno sodelujemo, med njimi Univerza v Tokiu, kalifornijska univerza v Berkeleyju, kalifornijska univerza v Los Angelesu in Univerza v Neaplju.

Duhovnik in Fajfar sta bila člana jugoslovanske delegacije, ki je leta 1981 obiskala kitajske inštitucije in si med drugim ogledala tudi posledice katastrofalnega potresa v Tangshanu leta 1976, kolikor je bilo nekaj let po potresu še vidnega. V letih 1989-1991 smo izvajali skupni raziskovalni projekt z univerzo Tsinghua v Pekingu. S prof. Mingwujem Yuanom s pekinške univerze smo plodno sodelovali pri izmenjavi programske opreme za račun konstrukcij (programa SAP in EAVEK). Dve kitajski raziskovalki sta se usposabljali na IKPIR.

17 OBISKI PRIZADETIH OBMOČIJ PO POTRESIH

Močan potres v urbanem okolju je najpomembnejši vir informacij za vse, ki delamo v potresnem inženirstvu. Raziskave posledic potresa so najboljša šola za inženirje. Čeprav obiskov prizadetih območij ni enostavno organizirati, smo obiskali več krajev, ki so jih prizadeli močni potresi. Leta 1976 smo si ogledali posledice potresa v Furlaniji in na ozemlju Slovenije. Močno smo bili angažirani leta 1979 v Črni gori. Naloga naše ekipe je bil nadzor dela lokalnih ekip, ki so pregledovale škodo. Po treh tednih terenskega dela smo analizirali tudi več stavb in pripravili slovensko in angleško različico poročila o potresu in njegovih posledicah [Fajfar s sodelavci, 1981]. Kasneje smo imeli priložnost kmalu po potresih videti posledice potresov v Ciudadu de Mexicu (1985), Northridgu (1994), Kobeju (1995), Izmitu (1999), L'Aquili (2009), Čilu (2010) in Emilii Romagni (2012), iz česar smo se tudi učili. Obisk območja, ki ga je prizadel potres Tohoku (2011) se je zgodil z enoletno zamudo, vendar je bilo še vedno mogoče opaziti nekaj škode zaradi tega katastrofalnega dogodka. Ogledali smo si tudi katastrofalne posledice potresov v osrednji Italiji (2016), ki so praktično porušili mesta Amatrice in Norcia. Februarja 2021 smo obiskali območje Petrinje, kjer se je poškodovalo precej energetske saniranih stavb. Veliko stavb kulturne dediščine je popolnoma uničenih in jih ne bo mogoče ohraniti.

Na podlagi bogatega slikovnega gradiva smo v devetdesetih letih pripravili informacijski sistem o vzrokih poškodb med potresi EASY [Fischinger, Cerovšek in Turk, 1998]. Izdelan je bil z za tiste čase izjemno naprednimi informacijskimi orodji. Tako se je še enkrat potrdila sinergija področij potresnega inženirstva in gradbene informatike, ki je tako značilna in posebna za delovanje sodelavcev IKPIR.

18 ZAKLJUČEK

V članku zelo na kratko povzemamo glavne dosežke raziskovalcev IKPIR na področju potresnega inženirstva v petdesetletnem obdobju 1971-2021. Nekoliko podrobnejši opis rezultatov, doseženih v obdobju do leta 1990, je prikazan v [Fajfar in Fischinger, 1990]. Celotna bibliografija sodelavcev IKPIR je dostopna v COBISS-u. Verjamemo, da je naše delo pomembno prispevalo h »kulturi« potresnega inženirstva

doma in k večji potresni odpornosti naših gradbenih objektov. Ob tem so rezultati odmevali tudi v svetu in uvrstili raziskovalno skupino na IKPIR ob bok vodilnih skupin na področju potresnega inženirstva. O tem pričajo visoko odmevni članki IKPIR-jevih raziskovalcev, njihovi prispevki k evropskim standardom, številna domača in tuja priznanja ter članstva v akademijah znanosti. Ključ uspešnega raziskovalnega dela so številni predani visoko motivirani študenti in sodelavci ter konstantna finančna podpora domačih in tujih raziskovalnih agencij. Agencija RS za raziskovano delo in njene predhodnice so s financiranjem posameznih projektov, programske skupine Potresno inženirstvo (od leta 1999 dalje) in mladih raziskovalcev pomembno prispevale k nemotenemu poteku raziskav ves čas delovanja IKPIR.

19 LITERATURA

Ahmadi, H., Fuller, K., Fischinger, M., Isaković, T., A Smart elastomeric isolator, 9th World seminar on seismic isolation, energy dissipation and active vibration control of structures, Kobe, Japan, Kobe: Association for Vibration Technologies, 565-586, 2005.

Anžlin, A., Fischinger, M., Isaković, T., Cyclic response of I-shaped bridge columns with substandard transverse reinforcement, *Engineering structures*, 99, 642-652, 2015.

Anžlin, A., Isaković, T. Active confinement of rectangular RC column using prestressed CFRP sheets, 11th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, The University of Tokyo, 789-796, 2016.

Azarbakht, A., Dolšek, M., Prediction of the median IDA curve by employing a limited number of ground motion records, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 36(15), 2401-2421, doi: 10.1002/eqe.740, 2007.

Babič, A., Dolšek, M., Seismic fragility functions of industrial precast building classes. *Engineering structures*, 118, 357-370, doi:10.1016/j.engstruct.2016.03.069, 2016.

Babič, A., Dolšek, M., A five-grade grading system for the evaluation and communication of short-term and long-term risk posed by natural hazards, *Structural safety*, 78, 48-62, doi: 10.1016/j.strusafe.2018.12.006, 2019.

Babič, A., Dolšek, M., Žižmond, J., Simulating historical earthquakes in existing cities for fostering design of resilient and sustainable communities: The Ljubljana case, *Sustainability*, 13, 7624, doi.org/10.3390/su13147624, 2021.

Breška, Z., Fajfar, P., O določanju projektnih potresnih parametrov, *Gradbeni vestnik*, 36(11-12), 249-253, 1987.

Bubnov, S., Fajfar, P., Fischinger, M., Ribarič, V., Tomažević, M., Graditev objektov visokogradnje na seizmičnih območjih: ocena pravilnika, Publikacija IKPIR št. 25. FAGG, 1982.

Caprinuzzi, S., Paolacci, F., Dolšek, M. Seismic risk assessment of liquid overtopping in a steel storage tank equipped with a single deck floating roof, *Journal of loss prevention in the process industries*, 67, 104269, doi: 10.1016/j.jlp.2020.104269, 2020.

Celano, F., Dolšek, M., Fatality risk estimation for industrialized urban areas considering multi-hazard domino effects triggered

by earthquakes, *Reliability engineering and system safety*, 206, doi.org/10.1016/j.ress.2020.107287, 2020.

Celarec, D., Dolšek, M., Practice-oriented probabilistic seismic performance assessment of infilled frames with consideration of shear failure of columns, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 42(9), 1339-1360, doi: 10.1002/eqe.2275, 2013.

Celarec, D., Ricci, P., Dolšek, M., The sensitivity of seismic response parameters to the uncertain modelling variables of masonry-infilled reinforced concrete frames, *Engineering structures*, 35, 165-177, doi: 10.1016/j.engstruct.2011.11.007, 2012.

Celarec, D., Vamvatsikos, D., Dolšek, M., Simplified estimation of seismic risk for reinforced concrete buildings with consideration of corrosion over time, *Bulletin of earthquake engineering*, 9(4), 1137-1155, doi: 10.1007/s10518-010-9241-3, 2011.

CEN, EN 1992-4:2018, Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 4: Design of fastenings for use in concrete, CEN, 2019.

CEN, prEN 1998-1-2:2021, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1-2: Rules for new buildings, version 06-05-2021, CEN, 2021a.

CEN, prEN 1998-2:2021, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 2: Bridges, version 06-05-2021, CEN, 2021b.

CSI, SAP2000 Integrated Software for Structural Analysis and Design, Computers and Structures Inc., Walnut Creek, California, <https://www.csiamerica.com/products/sap2000>, datum vpogleda 6.9.2021, 2021a.

CSI, ETABS, Building analysis and design, Computers and Structures Inc., Walnut Creek, California, <https://www.csiamerica.com/products/etabs>, datum vpogleda 6.9.2021, 2021b.

Dolšek, M., Incremental dynamic analysis with consideration of modeling uncertainties. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 38(6), 805-825, doi: 10.1002/eqe.869, 2009.

Dolšek, M., Brozovič, M., Seismic response analysis using characteristic ground motion records for risk-based decision-making (3R method), *Earthquake engineering & structural dynamics*, 45(3), 401-420, doi: 10.1002/eqe.2664, 2016.

Dolšek, M., Fajfar, P., Soft storey effects in uniformly infilled reinforced concrete frames, *Journal of earthquake engineering*, 5(1), 1-12, 2001.

Dolšek, M., Fajfar P., IN2—a simple alternative for IDA, 13th world conference on earthquake engineering, Vancouver, Canada, Paper 3353, 2004.

Dolšek, M., Fajfar P., Simplified non-linear seismic analysis of infilled reinforced concrete frames. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 34(1), 49-66, 2005.

Dolšek, M., Fajfar P., Simplified probabilistic seismic performance assessment of plan-asymmetric buildings. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 36(13), 2021-2041, doi: 10.1002/eqe.697, 2007.

Dolšek, M., Fajfar, P., The effects of masonry infills on the seismic response of a four-storey reinforced concrete frame - a

- deterministic assessment, *Engineering structures*, 30(7), 1991-2001, 2008.
- Dolšek, M., Žižmond, J., Babič, A., Lazar, S. N., Jamšek, A., Gams, M., Isaković, T., Seizmični stresni test stavbnega fonda Republike Slovenije (2020-2050), Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Naročnik: Ministrstvo za okolje in prostor RS, 2020.
- Duhovnik, J., The influence of flexibility of floor slabs on the loading of vertical elements of high rise buildings, 7th European conference on earthquake engineering, Atene, 1982.
- Fajfar, P., Analiza horizontalno obteženih nesimetričnih večnadstropnih konstrukcij, Publikacija RC FAGG št. 1, FAGG, 1972.
- Fajfar, P., Statika, dinamika in stabilnost večetažnih objektov, Publikacija RC FAGG št.3, FAGG, 1974a.
- Fajfar, P., Numerična analiza večetažnih objektov, *Gradbeni vestnik*, 23(8/9), 212-220, 1974b.
- Fajfar, P., EAVEK: program za elastično analizo večetažnih konstrukcij, Publikacija RC FAGG št.13, FAGG, 1.izdaja 1976, 2. dopolnjena izdaja 1981, 3. izdaja 1987, izdaja v angleščini 1987.
- Fajfar, P., Equivalent ductility factors, taking into account low-cycle fatigue, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 21(10), 837-848, 1992.
- Fajfar, P., Capacity spectrum method based on inelastic demand spectra, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 28(9), 979-993, 1999.
- Fajfar, P., A nonlinear analysis method for performance-based seismic design, *Earthquake spectra*, 2000, 16(3), 573-592, 2000.
- Fajfar, P., The story of the N2 method, International Association for Earthquake Engineering, 2021.
- Fajfar, P., Dolšek, M., Marušić, D., Stratan, A., Pre-and post-test mathematical modelling of a plan-asymmetric reinforced concrete frame building, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 35(11), 1359-1379, 2006.
- Fajfar, P., Duhovnik, J., Reflak, J., Fischinger, M., Breška, Z., Obnašanje gradbenih objektov med potresi v Črni Gori 1979, Publikacija IKPIR št. 19, FAGG, 1981.
- Fajfar, P., Fischinger, M., Non-linear seismic analysis of RC buildings: implications of a case study, *European earthquake engineering*, 1(1), 31-43, 1987.
- Fajfar, P., Fischinger, M., N2-a method for non-linear seismic analysis of regular buildings, 9th world conference on earthquake engineering, 1988, Tokyo-Kyoto, Japan, 111-116, 1989.
- Fajfar, P., Fischinger, M., Potresnovarno projektiranje objektov visoke gradnje: raziskovalno in razvojno delo v IKPIRu, *Gradbeni vestnik*, 39(9/11), 210-216, 1990.
- Fajfar, P., Fischinger, M., Beg, D., Evrokod 8: projektiranje potresno odpornih konstrukcij. V: Beg, D. (ur.), Pogačnik, A. (ur.). Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po evrokod standardih, Ljubljana: Inženirska zbornica Slovenije, 8.1-8.241, 2009.
- Fajfar, P., Fischinger, M., Isaković, T., EUROCODE 8/2: projektiranje konstrukcij v potresnih območjih – mostovi, Priročnik za uporabo predstandarda ENV 1998-2, IKPIR FGG, 1995.
- Fajfar, P., Fischinger, M., Remec, Č., Evaluation of aseismic provisions in the U.S.A. and Yugoslavia, Publikacija IKPIR 28 A, FAGG, 1985.
- Fajfar, P., Gašperšič, P., The N2 method for the seismic damage analysis of RC buildings, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 25(1), 31-46, 1996.
- Fajfar, P., Marušić, D., Peruš, I., Torsional effects in the pushover-based seismic analysis of buildings, *Journal of earthquake engineering*, 9(6), 831-854, 2005.
- Fajfar, P., Novak, D., Floor response spectra for inelastic structures, 13th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 13), Porto Alegre, Brazil, paper no. K044/1:259-264, 1995.
- Fajfar, P., Polič, M., Klinc, R., Zaznavanje potresne ogroženosti pri strokovnjakih in nestrokovnjakih, *Gradbeni vestnik*, 63, 111-118, 2014.
- Fajfar, P., Vidic, T., Consistent inelastic design spectra: hysteretic and input energy, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 23(5), 523-537, 1994.
- Fiorentino, G., Cengiz, C., De Luca, F., Mylonakis, G., Karamitros, D., Dietz, M., Dihoru, L., Lavorato, D., Briseghella, B., Isaković, T., Vrettos, C., Topa Gomes, A., Sextos, A., Nuti, C., Integral abutment bridges : investigation of seismic soil structure interaction effects by shaking table testing, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 50(6), 1517-1538, 2021.
- Fischinger, M., Cerovšek, T., Turk, Ž., Earthquake engineering slides on the Internet and CD-ROM, 11th European conference on earthquake engineering, Pariz. Rotterdam; Brookfield: A. A. Balkema, 1998.
- Fischinger, M., Fajfar, P., Inelastic spectra of some earthquake recorded in Yugoslavia. 7th European conference on earthquake engineering, Atene, Vol. 3, 53-60, 1982.
- Fischinger M., Fajfar P., On the response modification factors for reinforced concrete buildings, 4th U.S. National conference on earthquake engineering, Palm Springs, Vol. 2, 249-258, EERI, California, 1990.
- Fischinger, M., Fajfar, P., Rogač, R., Stroški potresnovarne gradnje stenastih stavb, *Gradbeni vestnik*, 27(11/12), 240-247, 1978.
- Fischinger, M., Isaković, T., Potresna izolacija pri novogradnjah in sanacijah AC mostov : razvojno-raziskovalna naloga: končno poročilo. IKPIR FGG, 2001.
- Fischinger, M., Isaković, T., Kante, P., Shaking table response of a thin H-shaped coupled wall, V: Managing risk in earthquake country: 100th anniversary earthquake conference: Centennial meeting, Disaster resistant California conference: Proceedings CD-ROM. San Francisco: Earthquake Engineering Research Institute, 2006.
- Fischinger, M., Isaković, T., Kolozvari, K., Wallace, J. W., Nonlinear modelling of reinforced concrete structural walls: guest editorial, *Bulletin of earthquake engineering*, 17(12), 6359-6368, doi: 10.1007/s10518-019-00715-z, 2019.
- Fischinger, M., Kante, P., Isaković, T., NEES RC wall building - blind prediction based on a macro model, 1st international

conference on computational technologies in concrete structures (CTCS 09), Jeju, Korea, Volume of keynote papers and abstracts, 1065-1076, 2009.

Fischinger, M., Kante, P., Parametrična študija seizmičnega odziva AB sten, projektiranih po EC8, Gradbeni vestnik, 51, 246-253, 2002.

Fischinger, M., Tomažević, M., Capuder, F., Fajfar, P., Lutman, M., Szilagy, J., Študija potresne varnosti velikopanelnega sistema SCT, Gradbeni vestnik, 36(11/12), 241-248, 1987.

Fischinger, M., Vidic, T., Fajfar, P., Nonlinear seismic analysis of structural walls using the multiple-vertical-line-element model, v: Fajfar, P. (ur.), Krawinkler, H. (ur.). Nonlinear seismic analysis and design of reinforced concrete buildings. London: Elsevier Applied Science, 191-202, 1992.

Isaković, T., Assessment of existing structures using inelastic static analysis. V: Beer, M. (ur.). Encyclopedia of earthquake engineering, Berlin: Springer, 2014.

Isaković, T., Bevc, L., Fischinger, M., Modeling the cyclic flexural and shear response of the r.c. hollow box columns of an existing viaduct, Journal of earthquake engineering, 2008, 12(7), 1120-1138, 2008.

Isaković, T., Fischinger, M., Higher modes in simplified inelastic seismic analysis of single column bent viaducts, Earthquake engineering & structural dynamics, 35(1), 95-114, 2006.

Isaković, T., Fischinger, M., Applicability of pushover methods to the seismic analyses of an rc bridge, experimentally tested on tree shake tables, Journal of earthquake engineering, 15(2), 303-320, 2011.

Isaković, T., Fischinger, M., Assessment of a force-displacement based multiple-vertical-line element to simulate the non-linear axial-shear-flexure interaction behaviour of reinforced concrete walls, Bulletin of earthquake engineering, 17(2), 6369-6389, doi: 10.1007/s10518-019-00680-7, 2019.

Isaković, T., Gams, M., Janevski, A., Fischinger, M., et al., Large scale shake table test of slab-to-piers interaction in RC coupled walls, 17th World conference on earthquake engineering, Sendai, Japan, http://www.17wcee.jp/program.php#_proceedings, 2020.

Isaković, T., Janevski, A., Gams, M., Fischinger, M., Eksperimentalne raziskave interakcije med armiranobetonskimi ploščami in stenami na potresni mizi, Gradbeni vestnik, 69, 254-264, 2020.

Isaković, T., Zevnik, J., Fischinger, M., Floor response spectra in isolated structures subjected to earthquakes weaker than the design earthquake, Part 2, Isolation with magnetically controlled elastomeric bearings, Structural control & health monitoring, 18(5), 2011.

Isaković, T., Zoubek, B., Fischinger, M., Full-scale shake table tests of cladding panels. 16th European conference on earthquake engineering, Thessaloniki, Greece, 2018.

ISO, Simplified design for mechanical connections between precast concrete structural elements in buildings, ISO 20987, 2019.

Jamšek, A., Dolšek, M., Seismic analysis of older and contemporary reinforced concrete frames with the improved fish-bone model, Engineering structures, 212, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.110514, 2020.

Kanaan, A. E., Powell, G. H., DRAIN-2D, a general purpose computer program for dynamic analysis of planar structures, Report UCB/EERC 73-6, Earthquake engineering research center, University of California, Berkeley, CA, 1973.

Kappos, A. J., Saiidi, M. S., Aydinoglu, M. N., Isaković, T. (avtorji in uredniki), Seismic design and assessment of bridges: inelastic methods of analysis and case studies, Geotechnical, geological and earthquake engineering, Vol. 21, Dordrecht, Springer, 2012.

Kilar, V., Fajfar, P., Simple push-over analysis of asymmetric buildings, Earthquake engineering & structural dynamics, 26(2), 233-249, 1997.

Klinc, R., Peruš, I., Dolenc, M., Fajfar, P., Spletna verzija programa EAVEK, Gradbeni vestnik, 65(1), 10-17, 2016.

Kolozvari, K., Arteta, C. A., Fischinger, M., Gavridou, S., Hube, M. A., Isaković, T., Lowes, L., Orakcal, K., Vásquez, J. A., Wallace, J. W., et al., Comparative study of State-of-the-Art macroscopic models for planar reinforced concrete walls, ACI structural journal, 115(6), 1637-1657, doi: 10.14359/51710835, 2018.

Kosič, M., Dolšek, M., Fajfar, P., Dispersions for the pushover-based risk assessment of reinforced concrete frames and cantilever walls, Earthquake engineering & structural dynamics, 45(13), 2163-2183, 2016.

Kramar, M., Isaković, T., Fischinger, M., Seismic collapse risk of precast industrial buildings with strong connections, Earthquake engineering & structural dynamics, 39(8), 847-868, 2010.

Kreslin, M., Fajfar, P., The extended N2 method taking into account higher mode effects in elevation, Earthquake engineering & structural dynamics, 40(14), 1571-1589, 2011.

Kreslin, M., Fajfar, P., The extended N2 method considering higher mode effects in both plan and elevation, Bulletin of earthquake engineering, 10(2), 695-715, 2012.

Lazar Sinković, N., Brozović, M., Dolšek, M., Risk-based seismic design for collapse safety, Earthquake engineering & structural dynamics, 45(9), 1451-1471, doi: 10.1002/eqe.2717, 2016.

Lazar Sinković, N., Dolšek, M., Incorporating intensity bounds for assessing the seismic safety of structures: Does it matter?, Earthquake engineering & structural dynamics, 43(5), 717-738, doi: 10.1002/eqe.2368, 2014.

Menichini, G., Isaković, T., Modeling the seismic response of vertical concrete cladding panels. V: Structural concrete today - theory, applications, materials, techniques: AICAP days 2018 CTE congress, Milano/Lecco, 2018.

Park, Y.J., Reinhorn, A.M., Kunnath, S.K., IDARC - Inelastic damage analysis of reinforced concrete frame-shear wall structures, Report NCEER-87-0008, SUNNY, Buffalo, 1987.

Peruš, I., Poljanšek, K., Fajfar, P., Flexural deformation capacity of rectangular RC columns determined by the CAE method,

Earthquake engineering & structural dynamics, 35(12), 1453-1470, 2006.

Reflak, J., Fajfar, P., Elastic analysis of infilled frames using substructures, 6th Canadian conference on earthquake engineering, Toronto, University of Toronto Press, 285-292, 1991.

Rejec, K., Isaković, T., Fischinger, M., Seismic shear force magnification in RC cantilever structural walls, designed according to Eurocode 8, Bulletin of earthquake engineering, 10(2), 567-586. doi: 10.1007/s10518-011-9294-y, 2012.

Rozman, M., Fajfar, P., Seismic response of a RC frame building designed according to old and modern practices, Bulletin of earthquake engineering, 7(3), 779-799, 2009.

Saiidi, M., Randall, M., Maragakis, E., Isaković, T., Seismic restrainer design methods for simply supported bridges, Journal of bridge engineering, 6(5), 307-315, 2001.

Sinkovič, K., Peruš, I., Fajfar, P., Assessment of the seismic performance of low-rise RC structures by procedures with different levels of complexity, Bulletin of earthquake engineering, 14(1), 213-239, 2016.

SIST, SIST EN 1998-1:2006, Evrokod 8: Projektiranje potresno-odpornih konstrukcij - 1. del: Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2006a.

SIST, SIST EN 1998-2:2006, Evrokod 8 - Projektiranje konstrukcij na potresnih območjih - 2. del: Mostovi, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2006b.

SIST, SIST ENV 1998-2:1995, Evrokod 8 - Projektiranje konstrukcij na potresnih območjih - 2. del: Mostovi, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 1995.

Snoj, J., Dolšek, M., Pushover-based seismic risk assessment and loss estimation of masonry buildings, Earthquake engineering & structural dynamics, 49(6), 567-588, doi: 10.1002/eqe.3254, 2020.

Snoj, J., Österreicher, M., Dolšek, M., The importance of ambient and forced vibration measurements for the result of seismic performance assessment of buildings obtained by using a simplified non-linear procedure: case study of an old masonry building, Bulletin of earthquake engineering, 11(6), 2015-2132, doi: 10.1007/s10518-013-9494-8, 2013.

Starešinič, G., Zoubek, B., Gams, M., Isaković, T., Fischinger, M., Modelling in-plane dynamic response of a fastening system for horizontal concrete facade panels in RC precast buildings, Engineering structures, 224, 111210, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.111210, 2020.

Šolinc, H., Vpliv hidrodinamičnih tlakov na potresni odziv valjastega rezervoarja, Gradbeni vestnik, 36(11-12), 275-278, 1987.

Vidic, T., Fajfar, P., Fischinger, M., Consistent inelastic design spectra: strength and displacement, Earthquake engineering & structural dynamics, 23(5), 507-521, 1994.

Vukobratović, V., Fajfar, P., Code-oriented floor acceleration spectra for building structures, Bulletin of earthquake engineering, 15(7), 3013-3026, doi: 10.1007/s10518-016-0076-4, 2017.

Zoubek, B., Fahjan, Y., Fischinger, M., Isaković, T., Nonlinear finite element modelling of centric dowel connections in precast buildings, Computers and concrete, 14(4), 463-477, 2014.

Zoubek, B., Fischinger, M., Isaković, T., Estimation of the cyclic capacity of beam-to-column dowel connections in precast industrial buildings, Bulletin of earthquake engineering, 7(7), 2145-2168, 2015.

Zoubek, B., Fischinger, M., Isaković, T., Cyclic response of hammer-head strap cladding-to-structure connections used in RC precast building, Engineering structures, 119, 135-148, 2016.

Žižmond, J., Dolšek, M., Formulation of risk-targeted seismic action for the force-based seismic design of structures, Earthquake engineering & structural dynamics, 48(12), 1406-1428, doi: 10.1002/eqe.3206, 2019.