

# MODELIRANJE ŠTEVILA SMRTNIH ŽRTEV PRI PORUŠITVI STAVBE

## MODELLING THE NUMBER OF FATALITIES GIVEN THE COLLAPSE OF A BUILDING

asist. dr. Nuša Lazar Sinkovič, univ. dipl. inž. grad.

prof. dr. Matjaž Dolšek, univ. dipl. inž. grad.

matjaz.dolsek@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

Jamova 2, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek

UDK 614.8.069:624.042.7

**Povzetek** | Močnih potresov ne moremo preprečiti, vendar lahko njihove posledice ublažimo z ustreznimi ukrepi, kot je na primer potresno odporna gradnja. Zato je smiselno, da se pri potresno odpornem projektiranju kot tudi pri potresno odpornem utrjevanju obstoječih stavb upošteva vpliv kategorije pomembnosti stavbe, saj so posledice zaradi poškodovanosti ali porušitve od stavbe do stavbe različne. V splošnem je več kazalnikov, s katerimi bi lahko definirali pomembnost stavbe. V tem članku se osredotočimo na modeliranje števila smrtnih žrtev pri porušitvi stavbe. Ta kazalnik bi lahko v prihodnosti predstavljal enega izmed kazalnikov za določitev kategorije pomembnosti stavbe, saj je zaščita človeških življenj osnovni cilj standardov za potresno odporno projektiranje stavb. Predstavljeni model za oceno števila smrtnih žrtev pri porušitvi stavbe upošteva tip stavbe oziroma konstrukcijski sistem in časovno odvisni model zasedenosti stavbe. Uporabo modela za oceno števila smrtnih žrtev pri porušitvi stavbe prikažemo na primeru stavbe Fakultete za gradbeništvo in geodezijo. Za model zasedenosti stavbe smo privzeli model po FEMA P-58-1, na osnovi katerega smo predvideli 467 uporabnikov stavbe v dnevnem času pri največji zasedenosti stavbe. V primeru, da stavbo poruši potres, ki se zgodi med tednom v delovnem času, se število smrtnih žrtev ocenjuje na 117. Smrtnih žrtev ne pričakujemo, če bi se porušitev zgodila ponoči, 4 smrtne žrtve pa so predvidene, če bi potres porušil stavbo v dnevnem času med vikendom. Povprečno število smrtnih žrtev pri pogoju porušitve na letni ravni znaša 24.

Ključne besede: smrtne žrtve, posledice potresa, porušitev stavbe, potresno tveganje, grajeno okolje, potresno inženirstvo

**Summary** | The consequences of earthquakes cannot be completely prevented, but they can be effectively mitigated by appropriate measures, such as earthquake-resistant construction. Therefore, it is reasonable to consider the building importance category in earthquake-resistant design, as well as in seismic retrofit of existing buildings, since the consequences of damage or collapse of buildings are different from one building to another. In general, several indicators could define the building importance category. In this article, we focus on a model for the estimation of the number of fatalities given the collapse of a building, which could be used in the future as one of the indicators for determining the building importance category, since the protection of human lives is a basic objective of standards for earthquake-resistant design of buildings. The introduced fatality model takes into account the type of the building, i.e. the structural system, and a time variant population model of people present in the building during the earthquake. The use of the model for the estimation of the number of fatalities is demonstrated by means of an example of the building of the Faculty of Civil and Geodetic Engineering. In the example we adopted the population model proposed by FEMA P-58-1, based on which

we predicted a peak building occupancy of 467 during the day. If an earthquake causes the collapse of the building on a weekday during working hours, the expected number of fatalities is 117. No fatalities are expected if collapse occurs during the night and 4 if the building collapses during the weekend in the daytime. The average number of expected fatalities on an annual basis is 24.

Key words: fatalities, earthquake consequences, building collapse, seismic risk, built environment, earthquake engineering

## 1 • UVOD

Standard Evrokod 8, ki se uporablja za projektiranje stavb na potresnih območjih, ima tri osnovne cilje: zaščititi človeška življenja, omejiti škodo in zagotoviti uporabnost stavb, ki so pomembne za civilno zaščito (SIST EN 1998-1, 2005). Naključna narava potresa onemogoča natančno napovedovanje potresnih dogodkov. Čeprav je verjetnost pojava močnega potresa nizka, zelo močnih potresov, ki povzročijo ekonomsko škodo ali celo porušitev stavbe, ne moremo izključiti pri napovedovanju posledic potresov v prihodnosti. Zato lahko posledice prihodnjih potresov merimo z verjetnostnimi kazalniki v smislu potresnega tveganja, ki pa uporabnikom stavb ali drugim interesnim skupinam pogosto niso na voljo. Kupci oz. lastniki nepremičnin ali zavarovalnice nimajo informacij o potresnem tveganju, kar onemogoča vrednotenje potresnega tveganja in njegovo upoštevanje pri določitvi cene stavbe in zavarovalne premije. Ta problem rešujemo v okviru projekta Seizmični stresni test grajenega okolja (2017–2020).

Potresno tveganje lahko izrazimo z različnimi kazalniki (na primer (Snoj, 2014), (Babič, 2017)). V sodobnem potresnem inženirstvu se za mero potresnega tveganja najpogosteje uporablja verjetnost prekoračitve izbrane

stopnje poškodovanosti ali porušitve stavbe za določeno časovno obdobje, na primer za eno leto ali življenjsko dobo stavbe. Z ekonomskega vidika so kot kazalnik najbolj zanimive pričakovane ekonomske izgube zaradi potresov ali verjetnost, da izgube prekoračijo neko vrednost v določenem časovnem obdobju (Sutley, 2017). Kazalniki potresnega tveganja lahko izražajo tudi čas prekinitve opravljanja dejavnosti v stavbi kot posledica poškodb ali porušitve stavbe. Izgube pa so lahko izražene tudi s sociološkega vidika, na primer s številom smrtnih žrtev oziroma poškodovancev ali številom začasnih ali trajnih selitev prebivalcev (Sutley, 2017). Za posplošen opis posledic potresov se najpogosteje uporabljata ekonomska škoda in število smrtnih žrtev, saj sta ta dva kazalnika najbolj razumljiva širši javnosti. Na primer, potres leta 1994 na območju Northridgea v Kaliforniji je povzročil 40 milijard dolarjev ekonomske škode in 57 smrtnih žrtev; potres leta 2011 v Christchurchu v Novi Zelandiji je terjal 18 milijard dolarjev in 185 smrtnih žrtev; potres in cunami leta 2011 v regiji Tohoku na Japonskem pa sta zahtevala kar 360 milijard dolarjev in 28.000 smrtnih žrtev (Sutley, 2017). Iz navedenih primerov je razvidno, da ekonomska škoda

in število smrtnih žrtev nista proporcionalno povezana. Samo en kazalnik torej ne prikaže celotnega obsega izgub zaradi potresov. Zato so nekateri avtorji poskušali smrt osebe oceniti tudi z ekonomskega vidika in tako povezati ta dva kazalnika tveganja. Na primer Sutley in sodelavci (Sutley, 2017) za smrt osebe navajajo vrednost okoli 4 milijone dolarjev, za kritične poškodbe pa okoli 3 milijone dolarjev. Ti dve vrednosti obsegata izgubo življenja in kvalitete življenja, ceno zdravljenja, izgubljene prihodke in drugo.

Pri projektiranju je zato pomembno, da se omeji škoda in preprečijo smrtne žrtve zaradi potresov. Ker se potencial za posledice pri porušitvi stavbe spreminja od stavbe do stavbe, se postavlja vprašanje, na kakšen način naj se pri projektiranju upoštevajo posledice porušitve. Ta problem standard Evrokod 8 reši z vpeljavo kategorije pomembnosti stavbe, vendar je kazalnikov za definicijo kategorije pomembnosti stavbe lahko več, kot jih predvideva Evrokod 8. Ena izmed možnosti, ki bi jo lahko vpeljali in prihodnosti, je tudi upoštevanje pričakovanega števila smrtnih žrtev pri porušitvi stavbe, saj je zaščita človeških življenj osnovni cilj standardov za potresno odporno projektiranje stavb. Zato v prvem delu članka predstavimo model za oceno števila smrtnih žrtev pri porušitvi stavbe. Model nato uporabimo na primeru stavbe Fakultete za gradbeništvo in geodezijo.

## 2 • SMRTNE ŽRTVE PRI POTRESIH

Smrtne žrtve pri potresih so posledica treh glavnih vzrokov: delne ali celotne porušitve stavb, vzrokov, ki niso povezani s stavbami samimi, na primer infarkt, in nesreč, kot so cunamiji, plazovi in požari. V članku nas zanimajo predvsem smrtne žrtve kot posledica poškodb ali porušitve stavbe, saj porušitev stavb v povprečju povzroči kar okoli 75 % vseh žrtev med potresi (Coburn, 1992). Pri potresih nižje intenzitete je lahko delež smrti zaradi vzrokov, ki niso direktno povezani s poškodbami

stavbe, primerljiv z deležem zaradi porušitve stavb. Občasno pa se zgodi, da nesreče, ki sledijo potresu, povzročijo večje število žrtev kot potres. Takšen primer je potres Fukushima (2011), pri čemer je cunami povzročil večino smrtnih žrtev.

Očitno je, da bo število žrtev pri nekem potresu odvisno od kvalitete gradnje, jakosti potresa in od gostote poseljenosti območja, ki ga prizadene potres. Število žrtev pa je odvisno tudi od časa pojava potresa, saj se

razporeditev prebivalstva čez dan, teden in leto v splošnem spreminja. Ponoči je denimo večina prebivalcev v lastnih domovih, čez dan pa na delovnih mestih ali v šolah. Razporeditev prebivalstva je različna tudi med delavnikom in med vikendom, nanjo pa vplivajo tudi prazniki in šolske počitnice. Na število smrtnih žrtev torej vpliva tudi čas dogodka, ki ga ne moremo vnaprej napovedati. Število smrtnih žrtev v primeru delne ali celotne porušitve stavbe je odvisno tudi od tega, kje se v primeru dogodka osebe nahajajo (na odprtem ali v notranjosti stavbe), ter od lastnosti stavbe. Število žrtev med uporabniki stavbe v času porušitve je različno v

primeru nizke ali visoke stavbe. Polega tega pa na število žrtev vplivata tudi material in tip konstrukcijskega sistema, saj je od slednjega odvisen način porušitve stavbe, od konstrukcijskega materiala pa možne poškodbe ljudi

((Coburn, 1992), (FEMA, 2012b), (So, 2013), (Tsang, 2016)). Na število smrtnih žrtev vpliva veliko parametrov, zaradi česar je ocena števila žrtev pri porušitvi stavbe zahteven proces, ki je povezan s številnimi negotovost-

mi in predpostavkami. V nadaljevanju članka predstavimo poenostavljen model za oceno števila smrtnih žrtev pri porušitvi stavbe, ki ne upošteva vplivov negotovosti pri določitvi vhodnih parametrov modela.

### 3 • MODEL ZA OCENO ŠTEVILA SMRTNIH ŽRTEV PRI PORUŠITVI STAVBE

#### 3.1 Kratek pregled metod za oceno števila smrtnih žrtev

Metode za oceno števila smrtnih žrtev so lahko verjetnostne (na primer (Yeo, 2002), (Tsang, 2016)) ali deterministične (na primer (Coburn, 1992), (Jaiswal, 2010)). Z verjetnostnimi metodami ocenimo pričakovano število žrtev v nekem časovnem obdobju, na primer za dobo enega leta, pri čemer upoštevamo vse možne potrese na neki lokaciji. Za posamezno osebo lahko ocenimo tudi verjetnost smrti, ki temelji na verjetnosti dosežene stopnje poškodovanosti (porušitve) stavbe, in verjetnosti smrti za neko stopnjo poškodovanosti (porušitve) v odvisnosti od intenzitete potresa. Verjetnostne metode omogočajo upoštevanje vpliva naključne narave potresa, kar zajamemo pri definiciji potresne obtežbe, in vpliva modelnih negotovosti, povezanih z računskim modelom stavbe, modelom zasedenosti stavbe in drugimi negotovimi parametri obravnavanega problema. Pri determinističnih metodah se pričakovano število žrtev določi na osnovi enega potresnega scenarija pri izbranem času dogodka in predpostavljeni porazdelitvi prebivalstva. Pri determinističnem pristopu vpliva negotovosti ni možno direktno upoštevati, lahko pa ga upoštevamo približno, in sicer tako, da račun ponovimo z različnimi vhodnimi parametri, na primer spreminjamo čas dogodka ali potresni scenarij (FEMA, 2012b). Pri uporabi tako verjetnostnih kot determinističnih metod za oceno števila smrtnih žrtev se običajno uporabljajo modeli zasedenosti stavbe, s katerimi lahko ocenimo število oseb, prisotnih v stavbi v času potresa. Tak model je predlagan na primer v (FEMA, 2012b) in je podrobneje opisan v poglavju 3.3, nihanje zasedenosti za nekaj tipičnih stavb čez dan pa je predlagal tudi Coburn s sodelavci (Coburn, 1992). Deterministične metode temeljijo na kar nekaj predpostavkah in poenostavitvah, vendar so rezultati bolj intuitivni kot pri verjetnostnih metodah. V članku smo se zato omejili na deterministične metode. Metode se lahko nadalje delijo na empirične (na primer (Jaiswal, 2010)), polempirične (na

primer (So, 2013)) ali analitične (na primer (Yeo, 2002), (Porter, 2008), (FEMA, 2012b)). Empirične metode temeljijo zgolj na opazovanjih pri predhodnih potresih, analitične metode pa združujejo analizo stavbe in eksperimentalne podatke.

Jaiswal in Wald (Jaiswal, 2010) sta predlagala empirično metodo, ki omogoča hitro oceno žrtev in ekonomskih izgub po večjih potresih po svetu. Z metodo se za posamezno območje oz. državo določi stopnja smrtnih žrtev oz. razmerje med številom žrtev in številom izpostavljenih ljudi v odvisnosti od intenzitete po modificirani Mercallijevi lestvici (MMI) na osnovi opazovanj preteklih potresov. Za območja, kjer ti podatki niso na voljo, sta stopnjo smrtnih žrtev določila na osnovi drugih območij z upoštevanjem geografskih, klimatskih in socioloških karakteristik ter lastnosti grajenega okolja. Klimatske karakteristike se v načinu gradnje odražajo na primer v velikih odprtinah, usmerjenih proti soncu, in nizkih etažah v hladnih področjih ter v debelejših strehah in zunanjih stenah v vročih območjih, kar vpliva tudi na potresno varnost stavbe. Sociološke karakteristike sta avtorja upoštevala z indeksom HDI (angl. Human Development Index), ki zajema pričakovano življenjsko dobo, pismenost, izobrazbo in bruto družbeni proizvod na prebivalca. Model je vgrajen v sistem PAGER (angl. Prompt Assessment of Global Earthquakes for Response). Uporaben je na nivoju grajenega okolja in potrebuje ažurne podatke o populaciji ljudi na obravnavanem območju grajenega okolja. Model ne zajema vpliva tipa konstrukcije, ki pa ga lahko zajamemo s polempiričnimi in analitičnimi modeli.

Pri polempiričnih metodah se za vsak tip stavbe na podlagi podatkov iz preteklih potresov določi delež porušenihih stavb in delež stavb z močnimi poškodbami v odvisnosti od intenzitete potresa (na primer (So, 2013)), pri analitičnih metodah pa se poškodovanost stavbe oz. vseh stavb grajenega okolja določi z analizo stavb pri izbrani potresni obtežbi (na primer (Yeo, 2002), (Porter, 2008), (FEMA, 2012b)). Potresna obtežba je za analizo pri

determinističnem pristopu določena s spektrom odziva ali z izbranim potresnim scenarijem, ki je določen z izvorom potresa, oddaljenostjo in magnitudo. Metode, ki poškodbe stavbe določajo na nivoju elementov stavbe, so mdr. predlagali Yeo in Cornell (Yeo, 2002) ter (FEMA, 2012b), ki za posamezne elemente stavbe določijo stopnjo poškodovanosti in delež ljudi v stavbi, ki je ogrožen zaradi posameznega elementa.

Za ocenjeno stopnjo poškodovanosti lahko nato na osnovi predhodnih opažanj med potresi ocenimo število smrtnih žrtev ali poškodovancev kot delež oseb, ki so v stavbi v času potresa, slednjega pa ocenimo iz stopnje zasedenosti stavbe. V nadaljevanju se bomo omejili zgolj na oceno števila smrtnih žrtev pri porušitvi stavbe. Nekateri avtorji obravnavajo tudi druge stopnje poškodovanosti in s tem povezane poškodbe ljudi. So in Spence (So, 2013) sta delež smrtnih žrtev na osnovi empiričnih podatkov predlagala tako za porušitev stavbe kot za močno poškodovane stavbe. Spence (Spence, 2007) je predlagal metodologijo, s katero se na osnovi empiričnih podatkov določi delež smrtnih žrtev in delež poškodovancev za šest stopenj poškodovanosti stavbe in pet kategorij poškodovanosti oseb, kjer peta kategorija predstavlja smrt. V aplikacijah HAZUS (FEMA, 2012a) in PAGER (Porter, 2008), ki služita za oceno posledic potresov, se upošteva pet stopenj poškodovanosti stavbe, za katere se posamično določi število pričakovanih žrtev. Šest stopenj poškodovanosti oz. tri stopnje uporabnosti stavbe upošteva tudi spletna aplikacija Ocena posledic potresa (POTROG, 2017), ki je bila nedavno pripravljena v sklopu projekta POTROG – Potresna ogroženost v Sloveniji za potrebe Civilne zaščite.

#### 3.2 Kratek pregled metod za modeliranje porušitve stavbe

Z modelom za oceno števila smrtnih žrtev ocenimo število smrtnih žrtev pri porušitvi stavbe. Predpostavljeno je, da se obravnavane stavbe pri potresu porušijo. Za hitro oceno števila smrtnih žrtev po potresu je zato treba oceniti, katere stavbe se pri potresu porušijo. V ta namen se lahko uporabi empirični pristop, kjer se število porušenihih stavb in posledično izpostavljenih ljudi določi

v odvisnosti od intenzitete potresa na podlagi opazovanj pri predhodnih potresih (na primer Jaiswal in Wald (Jaiswal, 2010)). Za natančnejšo oceno porušitve stavbe in s tem povezanega števila smrtnih žrtev pa lahko poškodovanost stavbe napovemo z analizo odziva posamezne stavbe za izbrani potresni scenarij. Z nelinearno analizo stavbe lahko določimo tudi mehanizem porušitve in stopnjo poškodovanosti posameznih elementov, kar omogoča oceno števila smrtnih žrtev zaradi poškodb stavbe tudi v primeru, ko se stavba pri potresu ne poruši (na primer (Yeo, 2002)). Nadalje lahko z oceno potresnega tveganja določimo tudi verjetnost prekoračitve izbrane stanja poškodovanosti ali porušitve stavbe za določeno časovno obdobje, na primer eno leto, ali življenjsko dobo stavbe. Pri tem lahko zajamemo negotovosti, povezane z analizo, in naključnost potresa. Verjetnost porušitve je dober kazalnik potresnega tveganja oz. varnosti stavbe. Večja verjetnost porušitve pomeni tudi večjo verjetnost za izgubo življenja, ki je enaka produktu verjetnosti porušitve in verjetnosti izgube življenja pri porušitvi stavbe. Modeliranje porušitve stavbe je zunaj obsega tega članka. V članku se omejimo le na modeliranje števila smrtnih žrtev pri pogoju porušitve stavbe. Takšen parameter predstavlja le potencial za izgube, vendar se ga lahko smiselno uporabi kot kazalnik za definicijo pomembnosti stavbe.

### 3.3 Predstavitel splošnega determinističnega modela za določitev števila žrtev pri porušitvi stavbe

Splošni deterministični model za določitev števila žrtev zaradi porušitve stavb je predlagal Coburn s sodelavci (Coburn, 1992). Po tem modelu se število smrtnih žrtev  $K_s$  zaradi porušitve stavb na nekem območju izračuna po naslednji enačbi:

$$K_s = \sum_b K_{s_b} = \sum_b D5_b \cdot [M1_b \cdot M2_b \cdot M3_b \cdot (M4_b + M5_b)] \quad (1)$$

kjer je  $b$  tip stavbe,  $K_{s_b}$  število žrtev zaradi porušitve stavb tipa  $b$ ,  $D5_b$  število porušenih stavb tipa  $b$  (stopnja poškodovanosti 5, ki je enaka porušitvi),  $M1_b$  do  $M5_b$  pa faktorji, ki vplivajo na število smrtnih žrtev. Tip stavbe  $b$  je lahko določen tako s konstrukcijskim sistemom kot z namembnostjo stavbe. Stavbe s podobnimi karakteristikami lahko združimo tudi v skupine, za katere posamezne faktorje določimo le enkrat.  $D5_b$  lahko za izbrani potresni scenarij določimo empirično, to je na osnovi zapisov preteklih potresov, ali z analizo stavb grajenega okolja. Model omogoča

oceno števila žrtev za celotno grajeno okolje ali zgolj za posamezno stavbo, pri čemer upoštevamo le del enačbe (1) v oglatem oklepaju.  $M1_b$  je število ljudi v stavbi za posamezen tip stavbe, kjer je tip določen predvsem glede na namembnost stavbe. Na primer, Coburn in sodelavci (Coburn, 1992) navajajo povprečno vrednost  $M1_b$  za enostanovanjske stavbe v Evropi med 2 in 3, v državah, kot sta Iran in Turčija, pa v povprečju 8.  $M1_b$  lahko v Sloveniji za stanovanjske stavbe določimo s pomočjo Centralnega registra prebivalcev, priporočljive vrednosti za polno zasedene stavbe različnih namembnosti pa podaja, na primer, (FEMA, 2012b) (glej preglednico 1).

Namembnost	Največje število uporabnikov (na 100 m <sup>2</sup> )	Čas v dnevu s presežkom uporabnikov
Pisarne	4,3	Dan (15:00)
Osnovne šole	15,1	Dan
Srednje šole	15,1	Dan
Fakultete	12,9	Dan
Bolnišnice	5,4	Dan (15:00)
Hoteli in moteli	2,7	Noč (3:00)
Večstanovanjske stavbe	3,3	Noč (3:00)
Raziskovalni laboratoriji	3,2	Dan (15:00)
Trgovine	6,5	Dan (17:00)
Skladišča	1,1	Dan (15:00)

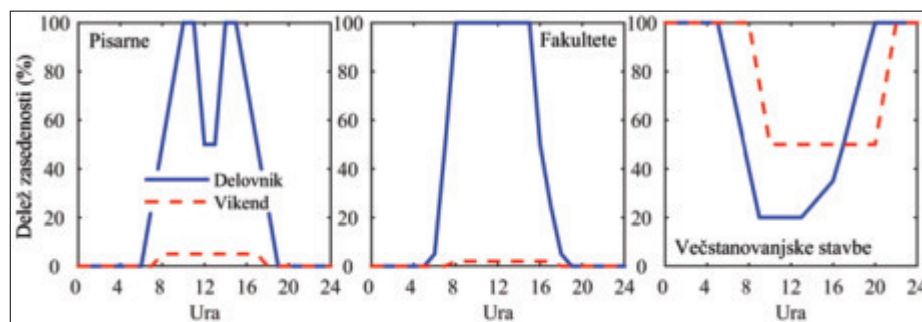
Preglednica 1 • Največje število uporabnikov na 100 m<sup>2</sup> in pripadajoči čas dneva za različne namembnosti stavb v skladu s (FEMA, 2012b).

Faktor  $M2_b$  predstavlja delež zasedenosti v času potresa, ki ga lahko določimo na osnovi modelov prebivalstva, ki zajamejo razpore-

ditev prebivalcev čez dan, teden ali leto. Na sliki 1 je prikazan primer modelov zasedenosti pisarn, fakultet in večstanovanjskih stavb v času med delovnikom in vikendom, ki jih predlaga (FEMA, 2012b). Razvidne so razlike med pričakovanim deležem zasedenosti stavb v nočnem času, ki je 0% za pisarne in fakultete ter 100% za večstanovanjske stavbe. Za določitev najhujšega možnega scenarija lahko upoštevamo, da so v stavbi v času potresa prisotni vsi uporabniki stavbe hkrati. V tem primeru je  $M2_b$  enak 1.

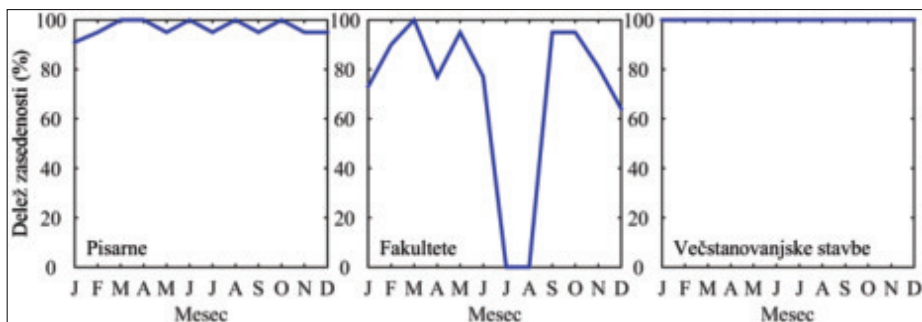
Če nas zanima povprečno število smrtnih žrtev za dogodek, ki se zgodi kadarkoli v letu, pa potrebujemo ekvivalenten delež ljudi, ki je v teoriji vedno prisoten v stavbi,  $M2_{b,ekv}$ . Za določitev te vrednosti moramo poznati tudi nihanje zasedenosti stavbe med letom, na katerega vplivajo predvsem šolske počitnice in prazniki. (FEMA, 2012b) predlaga nihanje zasedenosti stavbe glede na mesece v letu, pri čemer je za vsak mesec zajeto povprečno število delovnih dni in praznikov. Zasedenost stavbe med vikendom ostaja za vsak mesec enaka, prav tako pa je enaka zasedenost stavbe tudi med tednom za bolnišnice, hotele in večstanovanjske stavbe. Na sliki 2 so prikazane razlike v modelih zasedenosti pisarn, fakultet in večstanovanjskih stavb v odvisnosti od meseca (FEMA, 2012b). Zaradi praznikov in dopustov nekoliko niha zasedenost pisarn. Poleg slednjih pa na zasedenost fakultet bistveno vplivajo poletne počitnice. V večstanovanjskih stavbah se upošteva enak model zasedenosti stavbe vse leto. V posamezni državi se število praznikov in njihovi datumi razlikujejo, zato se lahko tudi modeli zasedenosti stavbe med letom razlikujejo od modelov, ki jih predlaga FEMA.

Z upoštevanjem modelov zasedenosti stavbe za delovne dni in vikende (slika 1) ter nihanjem zasedenosti stavbe med letom (slika 2) lahko ekvivalentni delež ljudi, ki je v teoriji vedno prisoten v stavbi,  $M2_{b,ekv}$  določimo z naslednjo enačbo:



Slika 1 • Modeli zasedenosti pisarn, fakultet in večstanovanjskih stavb v času med delovnikom in vikendom (FEMA, 2012b).





Slika 2 • Nihanje zasedenosti pisarn, fakultete in večstanovanjskih stavb v mesecih v letu (FEMA, 2012b).

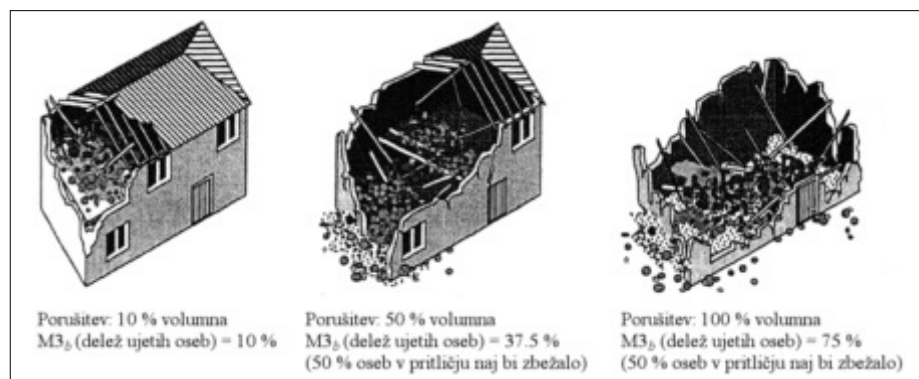
$$M2_{b,ekv} = \frac{1}{12} \sum_{m=1}^{12} \frac{p_{m,D,b} d_{m,D}}{24} \sum_{h=1}^{24} p_{h,D,b} + d_{m,V} \frac{1}{24} \sum_{h=1}^{24} p_{h,V,b} \quad (2)$$

kjer je  $m$  posamezni mesec,  $d_m$  število dni  $m$ -tega meseca,  $d_{m,D}$  in  $d_{m,V}$  pa sta števili delovnih dni in dni med vikendom za  $m$ -ti mesec.  $p_{m,D,b}$  je delež zasedenosti stavbe, ki je prisoten med delovnikom za posamezni mesec  $m$  in tip stavbe  $b$  in zajema vpliv praznikov in počitnic na nihanje zasedenosti stavbe (slika 2). Parameter  $p_{h,D,b}$  predstavlja delež zasedenosti stavbe med delavnikom v stavbi določene namembnosti (slika 1). Odvisen je od ure  $h$  in je izražen relativno glede na zasedenost stavbe med delavnikom za posamezni mesec. Po analogiji  $p_{h,V,b}$  predstavlja delež zasedenosti stavbe določene namembnosti med vikendom. Ta parameter je prav tako odvisen od ure, vendar gre za absolutni, in ne relativni delež zasedenosti stavb, saj je predpostavljeno, da prazniki in počitnice ne vplivajo na zasedenost med vikendi.

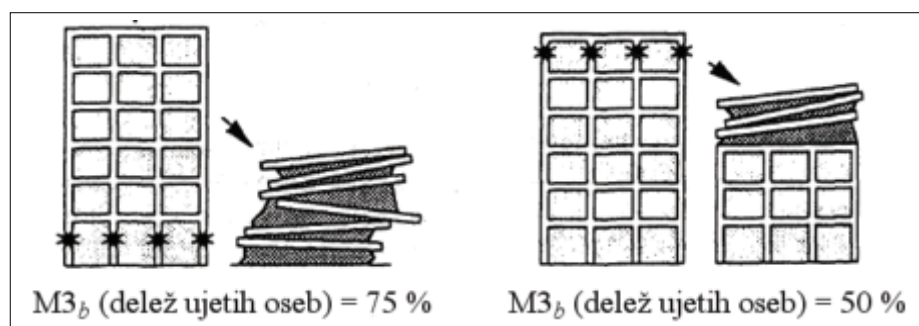
Z uporabo enačbe (2) lahko za podatke, ki so predstavljeni na slikah 1 in 2, izračunamo, da znaša  $M2_{b,ekv}$  23,4% za pisarne, 19,6% za fakultete in 68,3% za večstanovanjske stavbe, pri čemer smo za posamezni mesec predpostavili 9 dni med vikendi ( $d_{m,V} = 9$ ) ter 21 delovnih dni za mesece s 30 dnevi ( $d_{m,D} = 21$ ,  $d_m = 30$ ) in 22 delovnih dni za mesece z 31 dnevi ( $d_{m,D} = 22$ ,  $d_m = 31$ ).

V primeru porušitve stavbe število smrtnih žrtev ni nujno enako številu ljudi, ki v času dogodka zaseda stavbo, saj nekatere osebe iz stavbe zbežijo brez posledic, čeprav zapuščenju stavbe med potresom ni priporočljivo (URSZR, 2013).  $M3_b$  zato določa delež oseb, ki so ujele v porušeni stavbi in je odvisen od stopnje in tipa porušitve stavbe ter od tipa in geometrije stavbe. Na sliki 3 je prikazan

vpliv stopnje porušitve na faktor  $M3_b$ , kjer se vsi trije primeri smatrajo za porušeno stavbo, razlikuje pa se delež porušenega volumna. Na sliki 4 je za armiranobetonski okvir prikazan vpliv tipa porušitve na  $M3_b$ . Poleg tega avtorji navajajo vrednost  $M3_b = 75\%$  pri prevrnitvi visokih stavb in  $30\%$  pri trkih s sosednjimi stavbami. Za zidane stavbe so Coburn in sodelavci (Coburn, 1992) predlagali vrednosti



Slika 3 • Vpliv stopnje porušitve na faktor  $M3_b$  (Coburn, 1992).



Slika 4 • Vpliv stopnje porušitve na faktor  $M3_b$  (Coburn, 1992).

$M3_b$  glede na potresno intenziteto v skladu z 12-stopenjsko potresno lestvico MSK oz. EMS. Takšen model temelji na predpostavljene pozitivni korelaciji med potresno intenziteto in stopnjo (volumnom) porušenega objekta. Za zidane stavbe do treh etaž avtorji podajajo povprečne vrednosti  $M3_b$ , od 5% pri intenziteti VII do 70% pri intenziteti X na lestvici MSK.

Za armiranobetonske stavbe s tremi do petimi etažami je predlagan  $M3_b$  v povprečju 50% za oddaljene potrese in 70% v bližini prelomov. Vrednost  $M3_b$  se lahko v mestih s primernimi sistemi za javljanje potresov in izobraževanjem uporabnikov o evakuacijskih poteh bistveno zmanjša, vendar verjetno ne na manj kot za 10%.

Stopnja in tip porušitve stavbe se upoštevata tudi v modelu (FEMA, 2012b), kjer je treba določiti tudi verjetnost posameznega tipa porušitve pri porušitvi stavbe, vsota teh pa mora biti enaka 1. Oцени se tudi delež porušene površine pri vsakem tipu porušitve ter verjetnost smrti v primeru, da se oseba nahaja na tej površini. Slednje se lahko določi na osnovi preteklih opazovanj ali na podlagi inženirske presoje.

Faktor  $M4_b$  predstavlja delež žrtev med ljudmi, ujetimi v stavbi ob porušitvi, in sicer kot delež ljudi, ujetih v stavbi, ki niso izgubili življenja med potresom. Faktor  $M4_b$  je

odvisen od tipa konstrukcijskega sistema, saj lahko posamezni gradbeni materiali povzročijo poškodbe na različnih način. Pri zidanih in armiranobetonskih stavbah je možna zadušitev zaradi praha, ki se tvori ob porušitvi elementov. Avtorji za  $M4_b$  navajajo vrednost 20% za zidane stavbe in 40% za armiranobetonske stavbe.

Faktor  $M5_b$  določa delež žrtev med ljudmi, ujetimi v stavbi po porušitvi. To so osebe, ki so porušitev stavbe preživele, vendar so življenje izgubile po porušitvi.  $M5_b$  je odvisen od tipa poškodb oseb v stavbi in hitrosti odziva reševalcev. Osebe z manjšimi poškodbami bodo namreč lažje počakale na odziv reševalcev kot tiste s hujšimi poškodbami. V primerih, ko je veliko ljudi ujetih v porušeni stavbah, se vrednost  $M5_b$  poveča, saj bo odziv po potresu počasnejši in manjši. Avtorji navajajo vrednosti  $M5_b$  med 45 % in 95 % za zidane stavbe in med 70 % in 90 % za armiranobetonske stavbe, kjer najmanjše vrednosti pripadajo najboljšemu odzivu reševalnih ekip. Vrednosti tudi nakazujejo na lažje reševanje iz zidanih stavb v primerjavi z armiranobetonskimi stavbami.

Pri oceni števila žrtev z uporabo enačbe (1) lahko vrednosti faktorjev  $M1_b$  in  $M2_b$  določimo glede na model razporeditve prebivalcev,  $M3_b$  pa na osnovi analize stavbe ali empiričnih podatkov.  $M4_b$  in  $M5_b$  bi lahko ocenili na osnovi predhodnih potresov, vendar so tako podrobni podatki redko na voljo. Alternativno lahko faktorje  $M3_b$  do  $M5_b$  nadomestimo z enim samim faktorjem, in sicer z deležem smrtnih žrtev (Murakami, 1992) med uporabniki stavbe v primeru porušitve, ki jo lahko ocenimo na osnovi podatkov iz predhodnih potresov. Delež smrtnih žrtev pri porušitvi različnih tipov stavb sta na osnovi empiričnih podatkov predlagala na primer So in Spence (So, 2013) (preglednica 2). Delež smrtnih žrtev znaša med 1,3 % (leseni okviri) in 27,8 % (jekleni okviri). Glede na vrednosti v preglednici 2 bi lahko napačno sklepali, da je varnost sodobnih AB-stavb manjša kot za šibke in neutrgene zidane stavbe, saj je delež smrtnih žrtev pri porušitvi slednjih manjša. Vendar pa je tveganje za porušitev sodobnih AB-okvirjev seveda manjše kot tveganje za porušitev starih zidanih stavb, zaradi česar je tudi tveganje za izgubo življenja v sodobnih AB-okvirjih zaradi potresov manjše. Tsang in Wenzel (Tsang, 2016) sta delež smrtnih žrtev določila s pomočjo aplikacije HAZUS (preglednica 3). Poleg deleža

smrtnih žrtev za ljudi prisotne v stavbi avtorja podajata tudi delež smrtnih žrtev za ljudi zunaj stavbe. Delež smrtnih žrtev se zunaj stavbe veča s številom etaž, v stavbi pa je delež smrtnih žrtev 8 % za manjše lesene stavbe in lahke jeklene okvirje ter 15 % za preostale stavbe.

Vrednosti deleža smrtnih žrtev so tako So in Spence kot tudi Tsang in Wenzel določili empirično, to je na osnovi podatkov predhodnih potresov, vendar se vrednosti med posameznimi avtorji precej razlikujejo. Tsang in Wenzel (Tsang, 2016) sta delež smrtnih žrtev določila z aplikacijo HAZUS, ki zajema podatke s celega sveta, medtem ko sta So in Spence (So, 2013) delež smrtnih žrtev določila le na osnovi opazovanj pri treh evropskih mestih (Istanbul, Lizbona in Solun). Poleg tega se nekoliko razlikujejo tudi definicije posameznih tipov stavb. Aplikacija HAZUS razlikuje med AB- ali jeklenimi okvirji s polnili in brez njih, kjer se v splošnem pričakuje večje število poškodovancev ali tudi smrtnih žrtev pri okvirjih s polnili (Tsang, 2016), medtem ko So in Spence te delitve ne upoštevata.

Tip stavbe	Delež smrtnih žrtev (%)
Šibke zidane	20,0
Nearmirane, neutrgene zidane	7,8
Zidane z AB-stropi, potresno utrjene zidane, starejši AB-okvirji	25,0
Sodobni AB-okvirji in stene	25,0
Leseni okvirji	1,3
Jekleni okvirji, AB-stavbe, projektirane po strožjih zahtevah standardov	27,8

Preglednica 2 • Delež smrtnih žrtev glede na tip stavbe (So, 2013).

Tip stavbe	Velikost	Delež smrtnih žrtev zunaj stavbe (%)	Delež smrtnih žrtev v stavbi (%)
Lesene stavbe	≤ 465 m <sup>2</sup>	0,15	8
	> 465 m <sup>2</sup>	0,15	15
Lahki jekleni okvirji	Vse	0,011	8
Jeklene stavbe brez polnili	1 – 3 etaže	0,2	15
	4 – 7 etaž	0,4	15
	≥ 8 etaž	0,6	15
Jeklene stavbe s polnili	1 – 3 etaže	0,5	15
	4 – 7 etaž	0,7	15
	≥ 8 etaž	1,0	15
Betonske stavbe brez polnili	1 – 3 etaže	0,2	15
	4 – 7 etaž	0,4	15
	≥ 8 etaž	0,6	15
Betonske stavbe s polnili	1 – 3 etaže	0,5	15
	4 – 7 etaž	0,7	15
	≥ 8 etaž	1,0	15

Preglednica 3 • Delež smrtnih žrtev zunaj stavbe in v stavbi glede na velikost florisa ali število etaž in tip stavbe (Tsang, 2016)

#### 4 • UPORABA MODELA ZA OCENO ŠTEVILA SMRTNIH ŽRTEV NA PRIMERU ARMIRANOBETONSKE STAVBE

Metodo iz poglavja 3 (enačba (1)) smo uporabili za razvoj modela za oceno števila smrtnih žrtev v primeru porušitve stavbe Fakultete za gradbeništvo in geodezijo (slika 5) zaradi potresa. Stavba je v Ljubljani.

Model zasedenosti stavbe med delavnikom in vikendom ter nihanje zasedenosti stavbe po mesecih sta namenoma približna. Število ljudi v stavbi smo zato določili v skladu s priporočili (FEMA, 2012b) (preglednica 1 in slika 1), pri čemer smo velikost površin

glede na namembnost prostorov določili v skladu z (Žveglič, 2006) (slika 6). Pri tem smo ločeno upoštevali pisarne, učilnice in laboratorije, kjer smo v sklopu pisarn zajeli kabinete iz vseh šestih etaž (glej sliko 6c) ter pisarne, knjižnico in delovne prostore v pritličju (slika 6b). Učilnice in laboratoriji se ponavljajo v vseh 4 etažah na severni strani stavbe, kabinete pa v šestih etažah na južni strani stavbe (glej sliko 6a). V računu smo zanemarili avlo, hodnike, stop-





Slika 5 • Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (UL FGG, 2018).

nišča, arhive in sanitarne prostore ter kletne prostore.

V preglednici 4 so prikazane skupne površine prostorov glede na namembnost in pričakovano število ljudi ( $M1_b, M2_b$ , v enačbi (1)) v dnevnem času, ko se pričakuje 100% zasedenost stavbe, v nočnem času (3:00), ko se v pisarnah in učilnicah pričakuje 0% in v laboratorijih 10% zasedenost,

ter v dnevnem času med vikendom, ko se pričakuje 2% zasedenost v šolah oz. učilnicah, 5% v pisarnah in 25% v laboratorijih. Za obravnavani primer, kjer raziskave v laboratorijih običajno potekajo v delovnem času, smo delež zasedenosti v laboratorijih predpostavili enak kot za pisarne, in sicer 0% ponoči in 5% med vikendom. Pričakovano število ljudi je zaokroženo na celo

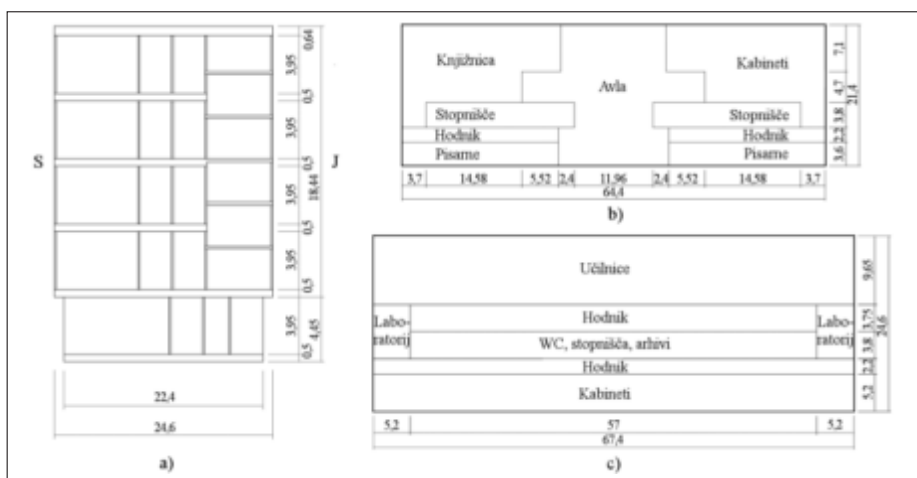
Namembnost površine	Površina (m <sup>2</sup> )	Največje pričakovano število ljudi		
		Dan (15:00)	Noč (3:00)	Vikend (15:00)
Pisarne	2812	121	0	6
Učilnice	2602	336	0	7
Laboratoriji	314	10	0	1
Skupaj		467	0	14

Preglednica 4 • Največje pričakovano število ljudi v dnevnem in nočnem času ter med vikendom glede na namembnost prostorov.

število. Največje skupno pričakovano število ljudi v dnevnem času je 467. V nočnem času se ne pričakuje ljudi v stavbi, med vikendi v dnevnem času pa je ta številka enaka 16.

Vrednosti  $M3_b (M4_b + M5_b)$  smo zajeli v enem koeficientu, in sicer v skladu s preglednico 2 (So, 2013). Ker gre za AB-stavbo, se delež smrtnih žrtev pri porušitvi stavbe glede na podatke iz preglednice 2 ocenjuje na 25%. Pričakovano število žrtev pri porušitvi stavbe zaradi potresa je v dnevnem času med delavnikom  $467 \cdot 0.25 = 117$ , v nočnem času ni pričakovati žrtev ( $0 \cdot 0.25 = 0$ ), med vikendom v dnevnem času pa se predvideva  $14 \cdot 0.25 = 4$  žrtve. Če bi upoštevali ekvivalentno število ljudi, ki je v teoriji vedno prisotno v stavbi (enačba (2)), bi znašalo pričakovano število smrtnih žrtev na letni ravni 24. Pri tem smo upoštevali, da je v pisarnah in laboratorijih vedno prisotnih 23,4% uporabnikov (31), v učilnicah pa 19,6% uporabnikov (66).

Rezultati iz prikazanega primera so informativni. Na podlagi ažurnih podatkov o številu študentov in zaposlenih bi lahko število ljudi, ki je prisotnih v stavbi, bolj natančno ocenili, kar pa presega namen tega prispevka. Za določitev deleža žrtev smo v primeru uporabili empirično vrednost, ki bi jo lahko bolj natančno ocenili z analitičnimi metodami, s katerimi bi z analizo stavbe določili tip porušitve in poškodovane elemente.



Slika 6 • a) Prečni prezek, b) floris pritličja in c) floris preostalih etaž (Žvegljč, 2006).

## 5 • SKLEP

V članku smo predstavili problem ocene števila smrtnih žrtev pri porušitvi stavbe. V splošnem je problem zelo kompleksen, saj je število smrtnih žrtev odvisno od veliko dejavnikov, večine pa ni mogoče natančno določiti. Zato smo problem obravnavali p-enostavljeno z upoštevanjem več predpostavk. Model je determinističen in temelji pretežno na izkustvenih podatkih. Na število smrtnih žrtev pri porušitvi stavbe vplivata zasedenost stavbe v času potresa in delež smrtnih žrtev v ruševinah porušene stavbe. Obstaja več možnosti za modeliranje za-

sedenosti stavbe v času potresa kot tudi za oceno deleža smrtnih žrtev v ruševinah stavbe. Od teh modelov je precej odvisno ocenjeno število smrtnih žrtev pri porušitvi stavbe. Eno izmed možnosti smo uporabili na primeru stavbe Fakultete za gradbeništvo in geodezijo. Na osnovi privzetega modela zasedenosti stavbe in deleža smrtnih žrtev se izkaže, da pričakovano število smrtnih žrtev pri porušitvi stavbe znaša 117, če bi se stavba porušila v delovnem času med tednom. Smrtnih žrtev ne pričakujemo za porušitev v nočnem času, predvidene pa so štiri smrtne

žrtve, če bi potres porušil stavbo v dnevnem času med vikendom. Povprečno število smrtnih žrtev pri pogojih porušitve za dobo enega leta znaša 24. Čeprav je rezultat negotov in precej odvisen od modela za določitev deleža smrtnih žrtev v ruševinah stavbe, ocenjujemo, da je to negotovost v prihodnosti možno zmanjšati. Zato bi lahko informacija o povprečnem številu smrtnih žrtev pri porušitvi objekta predstavljala enega izmed kazalnikov za bolj natančno opredelitev faktorja pomembnosti stavbe, saj je varovanje človeških življenj osnovni cilj standardov za projektiranje potresno odpornih stavb. Predstavljeni model števila smrtnih žrtev pri porušitvi stavbe bomo uporabili v okviru temeljnega raziskovalnega projekta Stresni test grajenega okolja.

## 6 • ZAHVALA

Predstavljeno delo je bilo pripravljeno v okviru raziskovalnega projekta Seizmični stresni test

grajenega okolja (J2-8159), ki ga financirata ARRS in Avstrijski raziskovalni sklad FWF.

Podpori se iskreno zahvaljujemo. Avtorja se zahvaljujeta A. Babiču za koristne komentarje pri pripravi članka.

## 7 • LITERATURA

- Babič, A., Potresni obremenitveni test za montažne armiranobetonske hale, Doktorska disertacija, Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2017.
- Coburn, A. W., Spence R. J. S., Pomonis, A., Factors determining human casualty levels in earthquakes: Mortality prediction in building collapse, Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, Spain, July 19-24, 1992.
- FEMA, Federal Emergency Management Agency, HAZUS Multi-hazard loss estimation, <https://www.fema.gov/hazus>, 2012a.
- FEMA, Federal Emergency Management Agency, Seismic Performance Assessment of Buildings Volume 1 – Methodology, Applied Technology Council, Washington, D.C., FEMA Publication P-58-1, 2012b.
- Jaiswal, K., Wald, D., An empirical model for global earthquake fatality estimation, Earthquake Spectra 26(4), 1017-1037, 2010.
- Murakami, H. O., A simulation model to estimate human loss for occupants of collapsed buildings in an earthquake, Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, Spain, July 19-24, 1992.
- Porter, K. A., Jaiswal, K. S., Wald, D. J., Earle, P. S., Hearne, M., Fatality models for the U.S. geological survey's prompt assessment of global earthquakes for response (PAGER) system, Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, October 12-17, 2008.
- POTROG, Potresna ogroženost v Sloveniji za potrebe Civilne zaščite, RS Ministrstvo za obrambo, Ljubljana, 2013.
- POTROG, Ocena posledic potresa, RS Ministrstvo za obrambo, Ljubljana, <http://potrog.vokas.si/>, 2017.
- SIST EN 1998-1, Evrokod 8, Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij, 1. del: Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe, SIST EN 1998-1:2005, maj 2005.
- Snoj, J., Ocena potresnega tveganja zidanih stavb, Doktorska disertacija, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2014.
- So, E., Spence, R., Estimating shaking-induced casualties and building damage for global earthquake events: a proposed modelling approach, Bulletin of Earthquake Engineering, 11(1): 347-363, 2013.
- Spence, R., Human losses, Spence, R. (ur.), Earthquake disaster scenario prediction and loss modeling for urban areas, LessLoss report no. 2007/07, pp 51–58, 2007.
- Sutley, E. J., van de Lindt, J. W., Peek, L., The costs of not retrofitting from a combined engineering, socioeconomic and demographic perspective, Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering 16WCEE, Santiago, Chile, January 9-13, 2017.
- Tsang, H-H, Wenzel, F., Setting structural safety requirement for controlling earthquake mortality risk, Safety Science 86: 174-183, 2016.
- UL FGG, Fotografija Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani, <https://www.fgg.uni-lj.si/o-fakulteti/ректорji-in-dekani/>, 2018.
- URSZR, Potres – priporočila in navodila za prebivalce, Urad Republike Slovenije za zaščito in reševanje, <http://www.sos112.si/slo/page.php?src=np41.htm>, 2013.
- Yeo, G. L., Cornell, C. A., Building-Specific Seismic Fatality Estimation Methodology, The Fourth U.S.-Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering Methodology for Reinforced Concrete Building Structures, Earthquake Engineering Research Center, Toba, Japan, October 22-24, 2002.
- Žveglič, L., Primerjalna analiza ukrepov za zmanjšanje porabe energije za ogrevanje v stavbi FGG, Diplomaska naloga, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2006.