

## OCENA POTRESNE RANLJIVOSTI OBJEKTOV ARHITEKTURNE DEDIŠČINE NA OBMOČJU SLOVENIJE

*Simon PETROVČIČ*

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, Zoisova 12, 1000 Ljubljana  
e-mail: simon.petrovcic@fa.uni-lj.si

*Vojko KILAR*

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, Zoisova 12, 1000 Ljubljana  
e-mail: vojko.kilar@fa.uni-lj.si

### IZVLEČEK

*Objekti arhitekturne dediščine običajno niso bili zasnovani za prevzem potresne obremenitve. V nedavnih potresih na območju Mediterana je bilo največ poškodovanih prav zgodovinskih stavb. Prispevek vsebuje oceno potresne ranljivosti arhitekturne dediščine za najpogostejše tipologije na območju Slovenije, za katero velja povečana potresna ogroženost. Na podlagi podatkov iz registra nepremične kulturne dediščine in pričakovane potresne intenzitete je bila izdelana posebna karta, ki prikazuje posamezne enote nepremične kulturne dediščine in pričakovane potresne intenzitete. Izvedena ocena temelji na verjetnostni pričakovani stopnji poškodovanosti znotraj obravnavanega območja intenzitete. Rezultati so bili za posamezno tipologijo izraženi kot verjetnost pojava posamezne stopnje poškodovanosti po EMS-ovi makroseizmični lestvici.*

**Ključne besede:** arhitekturna dediščina, potresna odpornost, ocenjevanje ranljivosti, konservatorstvo

## VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ SISMICA DELLE OPERE DEL PATRIMONIO ARCHITETTONICO SUL TERRITORIO SLOVENO

### SINTESI

*Le opere del patrimonio architettonico non sono state solitamente progettate per far fronte ad un carico sismico. Nei recenti terremoti nell'area del Mediterraneo sono stati proprio gli edifici storici ad essere maggiormente danneggiati. Il contributo comprende una valutazione della vulnerabilità sismica del patrimonio architettonico per le tipologie più frequenti sul territorio sloveno e che sono soggette ad un maggior rischio sismico. Sulla base dei dati del Registro del patrimonio culturale immobiliare e dell'intensità sismica prevista è stata realizzata un'apposita mappa che mostra le singole unità del patrimonio culturale immobiliare e le intensità sismiche previste. La valutazione effettuata si basa sulla probabilità dei livelli di danno previsti all'interno dell'area di intensità esaminata. I risultati espressi per la singola tipologia mostrano la probabilità che si verifichi un determinato grado di danno secondo la scala macrosismica europea (EMS).*

**Parole chiave:** patrimonio architettonico, resistenza sismica, valutazione della vulnerabilità, conservazione

## UVOD

Potresi se razlikujejo od drugih naravnih nesreč po ogromni rušilni moči, ki lahko v hipu prizadene zelo široko območje in povzroči ogromno gmotno škodo na grajenem okolju. Gradnja objektov po gradbenih predpisih, katerih namen je aplikativna uporaba teoretičnega znanja z različnih tehničnih področij za zagotovitev ustrezne stopnje varnosti, kakovosti in trajnosti zgrajenih objektov, se po svetu širše in v okviru zakonskih določil uporablja šele dobrih sto let. Starodavni objekti arhitekturne dediščine so bili zato običajno grajeni izkustveno, na podlagi izkušenj, ki so jih graditeljski mojstri pridobivali postopoma, zlasti pri gradnji podobnih objektov v preteklosti. Zagotavljanje zadostne odpornosti in stabilnosti takih objektov glede potresnega vpliva pri zasnovi in gradnji pogosto ni bilo posebej upoštevano, saj osnovno teoretično znanje s tega področja še ni bilo dognano, praktična spoznanja pa so se zaradi relativne redkosti potresov v življenjski dobi človeka težje prenašala v nove rodove graditeljskih mojstrov.

Zgodovinske stavbe in podobni objekti običajno torej niso bili zasnovani tako, da bi bili odporni proti potresnim obremenitvam. Gradbeni material in konstrukcijski sistemi, ki tvorijo take objekte, običajno dobro prenašajo tlačne obremenitve, nastale zaradi delovanja gravitacijskih obtežb. Tovrstne konstrukcije običajno slabo prenašajo strižne in natezne napetosti, zato so zelo ranljive za horizontalne obremenitve, med katerimi je najmočnejša potresna. V preteklosti je bilo pogosto pomanjkljivo tudi njihovo vzdrževanje, tako da je material marsikdaj razpadel zaradi vpliva časa in okolja. V nedavnih potresih smo že bili priče številnim izgubam na tem področju. V potresih, ki so se zgodili v zadnjem času na evropskih tleh (npr. 1976 – Furlanija, 1979 – Črna gora, 1980 – Potenza, 1997 – Umbrija, 1998 in 2004 – Posočje, 2009 – L'Aquila, 2012 – Modena), je bilo največ poškodovanih stavb in žrtev prav posledica neustrezne trdnosti zgodovinskih stavb.

Ocena potresne odpornosti obstoječih objektov znotraj opazovanega področja predstavlja prvi korak pri načrtovanju statične sanacije arhitekturne dediščine. Na področju potresnega inženirstva so bile v zadnjih desetletjih razvite številne nove metode, ki omogočajo zelo zanesljivo analizo potresnega odziva na nivoju večjega števila objektov s skupnimi karakteristikami (npr. FEMA, 1998; Freeman, 1998; Faccioli idr., 1999; Faeh idr., 2001; Giovinazzi in Lagomarsino, 2002; Erdik idr., 2004; Lagomarsino, 2006; Bosiljkov idr., 2015) ter nivoju posameznega objekta (npr. FEMA, 1998; SIST, 2005; Petrovčič in Kilar, 2013; Sinkovič idr., 2016). V prispevku se osredotočamo na ocenjevanje potresne ranljivosti posameznih tipologij objektov arhitekturne dediščine. Dobljene ocene veljajo torej za celotno območje in ne za konkreten primer in služijo kot osnovno vodilo pri odločanju o varstvenih posegih v arhitekturno

dediščino na določenem področju. V nadaljevanju je predstavljena metoda za ocenjevanje ranljivosti in prikazan primer ocene za območje Slovenije.

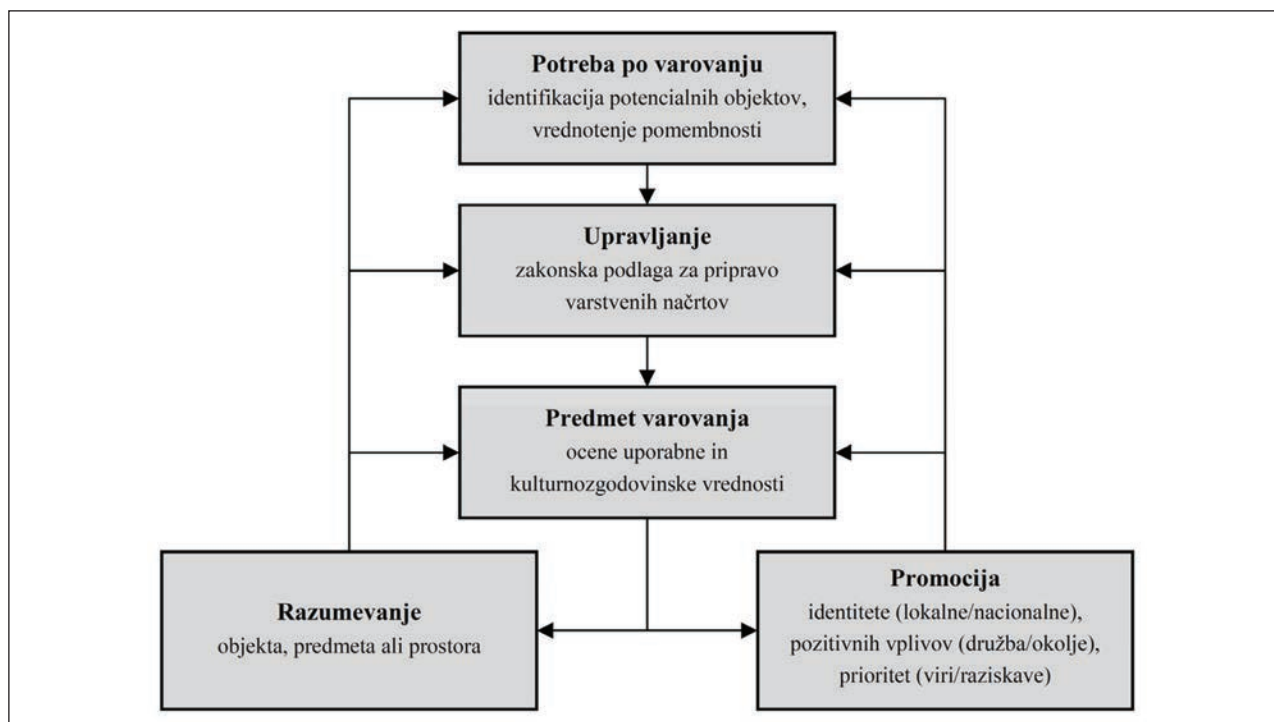
## VAROVANJE ARHITEKTURNE DEDIŠČINE IN NJENA RANLJIVOST NA POTRESNO OBTEŽBO

## Proces varovanja arhitekturne dediščine

Arhitekturna dediščina predstavlja zožitev pojma kulturna dediščina na vso nepremično dediščino, povezano z grajenim okoljem. V splošnem lahko kot arhitekturno dediščino opredelimo vsak grajeni objekt, ki v ljudeh vzbuja občutek radovednosti, povezan z vprašanjem o njegovem nastanku in kulturi ter duhu časa, v katerem je nastal (Feilden, 2003). Zanj je lahko značilna večja arhitekturna, estetska, zgodovinska, arheološka, ekonomska ali pa tudi družbenopolitična in simbolna vrednost. Kljub temu pa je prvi vtis vedno čustven, saj predstavlja simbol narodne identitete oz. dediščine.

Zakon o varstvu kulturne dediščine (ZVKD-1, Ur. l. RS, št. 16/2008) opredeljuje, da varstvo kulturne dediščine zajema ohranjanje materialnih in vsebinskih lastnosti predmetov, skupin predmetov oz. objektov ali območij, opredeljenih kot dediščina. V tem kontekstu pojem varstvo pomeni skrb za njihovo celovitost in neokrnjenost ter poudarjanje in zagotavljanje pomena predmetov in objektov kulturne dediščine kot bistvene sestavine sodobnega življenja. Varstvo kulturne dediščine ima predvsem kulturno funkcijo, varstvo arhitekturne dediščine pa se nanaša predvsem na ohranjanje vrednot oblikovanosti, materiala, izdelave, umestitve v prostor in vplivnega območja. Arhitekturne spomenike varujemo z zavarovanjem in drugimi instrumenti na podlagi omenjenega zakona ter z zakoni s področja urejanja prostora. V Sloveniji je na podlagi vpisa v zbirni register dediščine evidentirana dediščina varovana in je s tem obvezno izhodišče za pripravo prostorskih načrtov občin.

Odločitev za varovanje in načrtovanje obsega varovanja arhitekturne dediščine je posledica kompleksnega metodološkega procesa, ki ga prikazuje slika 1 (Baker, 1999). Prvi korak je zavest o obstoju potrebe po varovanju, ki izhaja iz definicije pojma kulturne oz. v našem primeru arhitekturne dediščine. V tem koraku potekata identifikacija potencialnih objektov varovanja, vrednotenje njihove pomembnosti in ogroženosti, kamor spada tudi konstrukcijska odpornost objekta na potresno obtežbo. Drugi korak je upravljanje in zajema zakonsko podlago za pripravo načrtov varovanja. V tej fazi se izoblikujejo konkretne smernice varovanja in smernice za vzdrževanje. Ocenijo se tako pozitivni kot tudi negativni vplivi, ki bi jih taki posegi povzročili, ter se določi razmerje med ekonomskimi in okoljskimi vplivi. V tretjem koraku se natančno opredelijo predmet varovanja, izdelajo se ocene njegove uporabne kot tudi kulturnozgodovinske vrednosti ter se določijo vplivi varstvenih posegov na ekonomske, socialne, izobraževalne



**Slika 1: Proces varovanja arhitekturne dediščine kot ga opisuje Baker (1999)**

**Figure 1: The process of architectural heritage conservation according to Baker (1999)**

in kulturne vrednosti. Iz vseh treh korakov kot rezultat sledita večje razumevanje vrednosti objekta tudi v širšem kontekstu ter njegova promocija, ki sta ključna pojma pri določanju identitete in prostora (Zupančič Strojani in Mullins, 2002). Proces je iterativen, zato se je na podlagi rezultatov mogoče vrniti v katerikoli korak in proces ponoviti do konca.

Iz zgorajnjega procesa torej izhaja, da je potrebno problematiko odpornosti objekta arhitekturne dediščine na zunanje vplive obravnavati že v prvem koraku, v katerem se definira potreba po varovanju. Z omenjenim prispevkom želimo torej pokazati katere vrste objektov arhitekturne dediščine na območju Slovenije so bolj ranljive na potresno obtežbo in s tem ozaveščati strokovno javnost in nosilce javnih pooblastil o ciljnih skupinah objektov, ki so prioritarno potrebne varovanja. Kot navajajo Vodopivec in soavtorji (2015), pregledne in znanstveno utemeljene metode odločanja, opredeljene za določen prostor in za določeno vrsto dediščine, pomagajo upravljavcem dediščine pri njihovem odločanju.

#### **Ranljivost arhitekturne dediščine na potresno obtežbo in način njenega ocenjevanja**

Starodavni objekti arhitekturne dediščine so bili običajno grajeni izkustveno, na podlagi izkušenj, ki so jih graditeljski mojstri pridobivali postopoma, zlasti pri

gradnji podobnih objektov v preteklosti. Pojav potresa je z vidika življenjske dobe človeka redek pojav, zato se je graditeljska praksa razlikovala od obdobja do obdobja in tudi glede na seizmičnost njihove geografske lokacije (Feilden, 2003). Na območjih z visoko seizmičnostjo, na katerih se močni potresi pojavljajo pogosteje, lahko v starih stavbah pogosto najdemo konstrukcijske detajle in ojačitve za boljši prevzem potresnih sil, po drugi strani pa na območjih z nizko seizmičnostjo take detajle najdemo le na stavbah, zgrajenih v prvih nekaj letih po večjih potresih (Tomaževič, 2009).

Objekti arhitekturne dediščine so torej na potresno obremenitev različno občutljivi oz. ranljivi. Zaradi njihove pomembnosti in unikatnosti je pogosto treba oceniti ranljivost za vsak obravnavani objekt posebej. Kljub temu pa velja, da je tudi pri objektih arhitekturne dediščine v prvem koraku treba oceniti ranljivost posameznih tipov objektov glede na dano lokacijo. Tako dobimo splošno oceno ranljivosti na določenem območju, ki je eden od ključnih dejavnikov pri določanju stopnje in obsega sanacijskih ukrepov v smislu protipotresne utrditve. Rezultat ranljivostne analize znotraj določenega geografskega območja daje podatek o vplivu potresa na arhitekturno dediščino v obravnavani regiji za posamezni tip objekta. V splošnem lahko s takimi analizami določimo stopnjo potresnega tveganja za vse objekte in tako lažje načrtujemo tudi ukrepe za zaščito in reševanje v primeru rušilnih potresov.

Različne metode za ocenjevanje ranljivosti so podane na makroseizmičnih lestvicah in pogosto omogočajo grobo oceno ranljivosti stavb na širšem območju, ki jo dobimo iz osnovnih karakteristik objektov (tipologija, material, lega) ter podatkov o intenziteti. V zadnjih nekaj desetletjih so bile razvite tudi različne statistične metode, ki v kombinaciji z makroseizmičnimi lestvicami omogočajo natančnejše ocenjevanje ranljivosti objektov znotraj določenega območja. Najbolj splošna je metoda za oceno ranljivosti po evropski makroseizmični lestvici (skrajšano EMS) (Grünthal, 1998), ki je nadgradnja metode z lestvice MSK (Medvedev in Sponheuer, 1969) in tudi drugih predhodnih lestvic, s katerimi so se poškodbe klasificirale neodvisno od vrste objektov. Tak pristop je sicer preprost, vendar lahko daje precej netočne ocene na območjih z različnimi tipologijami objektov. Točnejši pristop bi seveda zahteval zajemanje širšega nabora arhitektonskih in inženirskih parametrov določene stavbe, vendar bi bilo to v praksi zelo težko izvedljivo, zlasti pri pripravi ocen ranljivosti za širše območje. Metoda po EMS temelji na kompromisu med preprosto delitvijo potresne odpornosti posameznih tipov stavb glede na uporabljeni material in tehnologijo gradnje ter robustnim načinom razlikovanja med različnimi odzivi (stopnjami poškodovanosti) na potresno obremenitev.

V nadaljevanju bo predstavljen primer novejših metode, ki temelji na dejansko registriranih poškodbah za določen tip objekta in intenzitete. Določena bo ocena ranljivosti tipičnih objektov arhitekturne dediščine v Sloveniji.

#### OCENJEVANJE RANLJIVOSTI NA PODLAGI DEJANSKO REGISTRIRANIH POŠKODB

V zadnjih desetletjih so bile razvite različne analitične metode za oceno ranljivosti skupine objektov na širšem območju, ki temeljijo na verjetnostni analizi (Dolce idr., 1994; FEMA, 1998; Freeman, 1998; Faccioli idr., 1999; Faeh idr., 2001; Erdik idr., 2003; Giovinazzi in Lagomarsino, 2002; Lagomarsino, 2006; Bosiljkov idr., 2015). V nadaljevanju bo predstavljena metoda, ki jo predlaga Lagomarsino (2006) in je sinteza dela različnih avtorjev, ki se ukvarjajo s problematiko ocenjevanja ranljivosti stavb. Ideja metode je, da se podatki o dejanski poškodovanosti stavb pridobijo na podlagi opazovanja poškodb, nastalih na stavbah po potresih znotraj homogenega makroseizmičnega območja. Podrobneje je v tem prispevku opisana njena aplikacija na zidane stavbe. Glavne značilnosti metode lahko strnemo v dveh točkah (Roca idr., 2006):

- kot osnova za določitev ranljivosti in pričakovanih poškodb se uporablja evropska lestvica EMS, za katero velja, da se kljub določeni meri subjektivnosti lahko uspešno uporablja za celostno analizo ranljivosti;

- metoda temelji na podatkih o dejansko registriranih poškodbah na določenem tipu objektov in pri določeni intenziteti, pri čemer lahko izberemo različno količino podatkov in s tem dosežemo želeno raven natančnosti.

#### Nastanek poškodb na zidanih objektih pri potresih glede na lestvico EMS





Lestvica EMS pri zidanih stavbah je predvidenih šest razredov ranljivosti, označenih s črkami od A do F. Pri razvrščanju posameznih vrst zidanih konstrukcij v razrede ranljivosti se poleg uporabljenega materiala upošteva tudi raven potresno odporne gradnje. Prvi trije razredi (A, B in C) predstavljajo odpornost tradicionalne gradnje, kamor običajno uvrščamo tudi objekte arhitekturne dediščine (zelo ranljiva skupina). Med temi so hiše iz nežgane gline ali zemlje, preproste zidane stavbe in starejše armiranobetonske konstrukcije, pri katerih ukrepi za povečanje varnosti med gradnjo v večini primerov niso bili upoštevani. Razreda D in E predstavljata novejših konstrukcije, ki so že bile grajene ob upoštevanju ukrepov za potresno varno gradnjo, zato so pri potresni obremenitvi manj ranljive (ranljiva skupina). Sem spadajo solidno grajene lesene konstrukcije, konstrukcije iz povezanega ali armiranega zidovja ter jeklene konstrukcije. V razredu F so konstrukcije, ki so bile projektirane po sodobnih načelih potresno odporne projektiranja (manj ranljiva skupina).

Uvrstitev določenega objekta v posamezno skupino je odvisna od vrste konstrukcije, tj. od materiala in posledično tudi od načina gradnje, ne pa tudi od tipologije objektov in obdobja, v katerem je bila konstrukcija zgrajena. Odziv posamezne vrste konstrukcije na potresno obremenitev je lahko zelo različen in je odvisen tudi od predhodne poškodovanosti objekta, kakovosti gradnje, neregularnosti, stopnje potresne odpornosti itd.

V prispevku smo na sliki 2 za namen primerljivosti med lestvico EMS in Evropskim predpisom Evrokodom 8-3 (SIST, 2005), ki ureja projektiranje potresno odporne konstrukcij pri prenovi stavb, približno umestili stopnje poškodovanosti (oznake D0 do D5), ki jih predvideva EMS.

V primerjavi s stopnjami poškodovanosti so evrokodova mejna stanja prag med različnimi stopnjami poškodovanosti. Tudi Evrokod 8-3 predvideva določene poškodbe za posamezno mejno stanje. Iz opisov poškodb, ki so za posamezno mejno stanje predvidene, lahko predpostavimo, da je mejno stanje DL na meji med stopnjami poškodovanosti D1 in D2, mejno stanje SD je doseženo približno na prehodu med D3 in D4, mejno stanje NC pa med D4 in D5.

Kakšne poškodbe bo določena vrsta konstrukcije utrpela, je odvisno tudi od intenzitete potresne obremenitve. Lestvica EMS za vsako od dvanajstih intenzitet ocenjuje za posamezni ranljivostni razred okvirne stopnje poškodovanosti.

Stopnja poškodovanosti	Mejno stanje po EC8-3	Grafični prikaz*	Opis poškodb	Opombe
D0	DL		Ni poškodb.	
D1			Zanemarljive poškodbe, z lasastimi razpokami na majhnem številu sten. Konstrukcija ni poškodovana.	Odpadanje ometa v manjših količinah in padanje nepovezanih zidakov.
D2	SD		Zmerne poškodbe, z lažjimi poškodbami konstrukcije. Veliko razpokanih zidov in porušeni deli dimnikov.	Odpadanje večjih kosov ometa in zmerne poškodbe nekonstrukcijskih elementov.
D3			Obsežne poškodbe, z zmernimi poškodbami konstrukcije v obliki širokih razpok v večini zidov.	Večje poškodbe nekonstrukcijskih elementov. Padanje strešnikov in rušenje dimnikov.
D4	NC		Zelo hude poškodbe konstrukcije in nekonstrukcijskih elementov ter porušitve posameznih zidov.	Možna delna porušitev konstrukcije.
D5			Porušitev.	Popolna oz. skoraj popolna porušitev.

\* Vir slik: Grünthal, 1998

Slika 2: Predlog kombiniranja stopenj poškodovanosti zidanih konstrukcij po EMS z mejnimi stanji po Evrokodu 8-3  
 Figure 2: Damage grades based on the EMSscale and limit states based on Eurocode 8-3

**Preglednica 1: Razredi ranljivosti po EMS in pripadajoči indeksi ranljivosti****Table 1: Vulnerability classes based on the EMS scale and their corresponding vulnerability indexes**

Razred ranljivosti	A	B	C	D	E	F
Indeks ranljivosti (V)	1.00	0.83	0.67	0.50	0.33	0.17

Prehodi med zaporednimi stopnjami poškodovanosti naj bi v splošnem predstavljali premo sorazmerno odvisnost med naraščajočo oz. padajočo intenziteto. Treba je tudi izpostaviti, da lestvica EMS ne navaja vseh možnih kombinacij med razredi ranljivosti in doseženo stopnjo poškodovanosti. Izpostavljeni sta vedno samo dve najvišje doseženi stopnji poškodovanosti, pri čemer velja predpostavka da bodo drugi objekti istega razreda ranljivosti utrpeli manjše stopnje poškodovanosti, in sicer v sorazmernih deležih. Pomembno je razlikovati tudi med poškodbami konstrukcijskih elementov (poškodbami na nosilni konstrukciji) in nekonstrukcijskih elementov (sekundarnih konstrukcijskih elementov, predelnih sten, dimnikov) ter med poškodbami, ki so nastale kot posredna posledica sekundarnega delovanja potresnega vpliva (npr. trkov med konstrukcijami, zemeljskih ali snežnih plazov, likvefakcije idr.).

**Opis metode**

Metoda je zelo priročna, ker določa analitično zvezo med razredi ranljivosti po EMS, potresno intenziteto in pričakovano stopnjo poškodovanosti. Shematično je potek metode prikazan na sliki 3. Osnovni parameter je povprečna stopnja poškodovanosti (oznaka  $m_D$ ), ki je pri določeni intenziteti srednja vrednost stopnje poškodovanosti (slika 2). Statistično so stopnje poškodovanosti od D0 do D5 diskretne spremenljivke, parameter  $m_D$  pa je zvezna spremenljivka in je brez neposredne fizikalne interpretacije. Če vzamemo kot primer  $m_D = 3.6$ , to pomeni, da pri dani intenziteti v povprečju lahko pričakujemo poškodbe med tipoma D3 in D4.

Vrednost parametra  $m_D$  pri določeni intenziteti lahko določimo iz dejanskih podatkov o poškodbah na objektih po potresih. Če ti podatki niso na voljo, lahko parameter  $m_D$  ocenimo glede na razred ranljivosti, ki mu obravnavana vrsta objekta pripada. To storimo s t. i. indeksom ranljivosti (oznaka  $V$ ), ki številčno opredeljuje enega od šestih ranljivostnih razredov, označenih s črkami od A do F (gl. Grünthal, 1998). Posamezne indekse ranljivosti prikazuje preglednica 1. Ker so objekti v razredu A v najranljivejši skupini, se jim dodeli najvišji indeks, tj.  $V = 1.00$ . V drugih razredih so premo sorazmerno nižji indeksi, pri čemer je indeks vsakega naslednjega razreda manjši za šestino.

Prve ocene za določitev analitične zveze med  $m_D$  ter  $V$  pri določeni intenziteti so bile določene na podlagi opazovanja poškodb na več kot 2000 cerkvah po potre-

su v Umbriji in Markah leta 1997 (Lagomarsino, 1998). Rezultate analize sta pozneje uporabila Giovinazzi in Lagomarsino (2002) ter predlagala splošno zvezo za  $m_D$ , ki velja za katerokoli tipologijo stavb in je prikazana na sliki 2. V navedeni enačbi označuje  $I$  stopnjo intenzitete po EMS.  $Q$  je t. i. indeks duktilnosti, ki ponazarja stopnjo povečanja poškodovanosti v odvisnosti od intenzitete in je v intervalu med 2.0 in 3.0. Višje vrednosti za  $Q$  veljajo za duktilnejše objekte. Za stavbe je priporočena vrednost  $Q = 2.3$ .

Parameter  $m_D$  pove, kolikšna je pri posameznem indeksu ranljivosti  $V$  in intenziteti  $I$  srednja vrednost razreda poškodovanosti. Braga idr. (1982) so ugotovili, da je funkcijo gostote verjetnosti posameznega razreda poškodovanosti ( $p_k$ ) možno oceniti z uporabo binomske porazdelitve. Izraz za  $p_k$  je prav tako prikazan na sliki 3, pri čemer označuje verjetnost stopnje poškodovanosti  $D_k$  (od D0 do D5). Indeks  $k$  torej zavzema vrednosti med 0 in 5. Ob poznavanju verjetnosti za posamezni  $D_k$  lahko določimo tudi kumulativno verjetnost  $P_i$ , pri čemer bodo dosežene poškodbe stopnje  $D_i$  ali večje.

Z uporabo opisanega postopka se torej lahko izognemo opisnim ocenam in ranljivost objektov kvantificiramo. Prednost takega pristopa je, da lahko hitro in razmeroma preprosto ocenimo ranljivost večjega števila objektov na širšem območju. Ker ocena temelji na uporabi podatkov o dejansko nastalih poškodbah, lahko natančnost metode prilagajamo glede na vhodne podatke. Tak pristop je zelo primeren za preliminarno analizo ranljivosti objektov arhitekturne dediščine, pri čemer moramo zaradi visoke kulturne vrednosti uporabljati natančnejše metode. Po drugi strani pa so pri takem pristopu še vedno številne omejitve. Ena glavnih pomanjkljivosti je, da se analizira globalna odpornost objektov. To pa je zaradi arhitektonske kompleksnosti, konstrukcijskih detajlov, kakovosti materiala, načinov gradnje ter predhodnih poškodb lahko posledica različnih lokalnih porušitev, ki jih z globalnim pristopom ni mogoče zajeti. Temu bi se lahko izognili, če bi analizo ranljivosti izvajali na posameznih elementih, ki so sestavni deli objektov in jih v potresnem smislu lahko samostojno obravnavamo.

**ŠTUDIJA PRIMERA: OCENA RANLJIVOSTI OBJEKTOV ARHITEKTURNE DEDIŠČINE V SLOVENIJI**

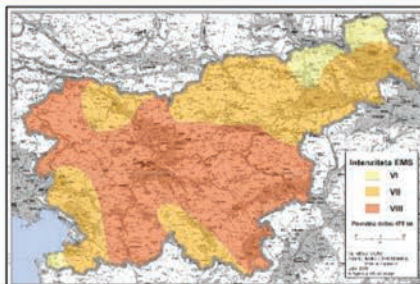
V tem prispevku bo ocena izvedena na podlagi verjetnostne analize po metodi, opisani v prejšnjem

### Vhodni podatki

#### Potresna intenziteta ( $I$ )

Odraža škodo, ki jo potres določene jakosti povzroči na celotno grajeno okolje.

→ Karta potresne intenzitete po lestvici EMS.



#### Indeks ranljivosti ( $V$ ) in indeks duktilnosti ( $Q$ )

Indeksa sta vezana na posamezno tipologijo objektov in številčno opredeljujeta verjetnost nastanka posamezne stopnje poškodb (indeks ranljivosti) in stopnjo povečanja poškodovanosti v odvisnosti od intenzitete (indeks duktilnosti).

Indeks ranljivosti je definiran kot vsota izhodiščne vrednosti ( $V_0$ ) in korekcijskih faktorjev zaradi dodatnih karakteristik obravnavanih objektov (vzdrževanje, material, geometrija, lega itd.):

$$V = V_0 + \sum V_K$$

→ Vrednosti indeksov izhajajo iz opazovanih poškodb na posamezni tipologiji pri preteklih potresih.



### Izračun ranljivosti

#### Povprečna stopnja poškodovanosti pri intenziteti $I$

$$\mu_D = 2.5 \left[ 1 + \tanh \left( \frac{I + 6.25 V - 13.1}{Q} \right) \right]$$

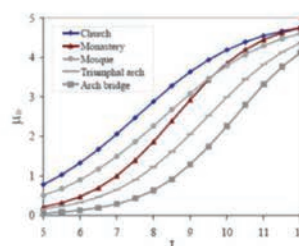
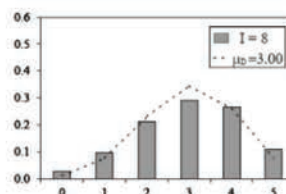
#### Verjetnosti nastanka poškodb posameznega razreda poškodovanosti po EMS (od D0 do D5)

$$p_k = \frac{5!}{k!(5-k)!} (0.2 \mu_D)^k (1 - 0.2 \mu_D)^{5-k}$$

→  $k$  označuje indeks razreda poškodovanosti (od 0 do 5)

#### Skupna verjetnost nastanka poškodb pri posamezni intenziteti

$$P(D_i | \mu_D) = \sum_{k=i}^5 p_k$$



Slika 3: Shematski prikaz potrebnih vhodnih podatkov in postopek izračuna ranljivosti na podlagi verjetnostne analize

Figure 3: Schematic representation of the required input data and the calculation procedure for vulnerability assessment based on a probabilistic approach

**Preglednica 2: Tipologija in število enot kulturne dediščine državnega pomena****Table 2: Different typologies and their registered entities classified as cultural heritage of national importance**

Tip enote	Št. enot	Primer
Profana stavbna dediščina	125	grad Turjak
Sakralna stavbna dediščina	31	cerkev Sv. Trojice v Ljubljani
Sakralno-profana stavbna dediščina	6	samostan v Kostanjevici na Krki
Memorialna dediščina	49	Ilirski steber v Ljubljani

Vir: Register nepremične kulturne dediščine, september 2012

poglavju, pri kateri za izbrano tipologijo objekta izhajamo iz dejanskih, med potresom nastalih poškodb, ki jim v posamezni intenzitetni coni predpišemo verjetnost pojavitve. Izbrano metodo je mogoče uporabiti na različnih tipologijah objektov. V nekaterih primerih (npr. cerkve) je mogoče pridobiti ustrezno količino podatkov o nastalih poškodbah pri različnih intenzitetah. V drugih primerih pa se je zaradi pomanjkanja podatkov treba zanesti na individualno presojo za določitev ustreznih parametrov. V prispevku bomo metodo uporabili za tri najpogostejše tipologije objektov, s čimer bomo dopolnili že izvedene študije.

#### Enote nepremične kulturne dediščine na ozemlju Republike Slovenije

Republika Slovenija je skladno s 5. členom ustave dolžna skrbeti za ohranjanje naravnega bogastva in kulturne dediščine ter ustvarjati možnosti za skladen civilizacijski in kulturni razvoj. Register nepremične kulturne dediščine v Sloveniji, ki ga vodi ministrstvo, pristojno za kulturo, vsebuje več kot 30 000 enot in obsega vso nepremično kulturno dediščino ne glede na vrsto, tip, obseg, lastništvo ali varstveni status enote (MIZKŠ, 2012). Od tega je okoli dvesto enot stavbne in memorialne dediščine s statusom kulturnega spomenika državnega pomena, kamor uvrščamo najpomembnejše spomenike v Sloveniji (preglednica 2). Slika 4a v sklopu načrta varstva kulturne dediščine za obdobje 1986–2000 prikazuje lokacije spomenikov državnega pomena in prednostna območja varovanja.

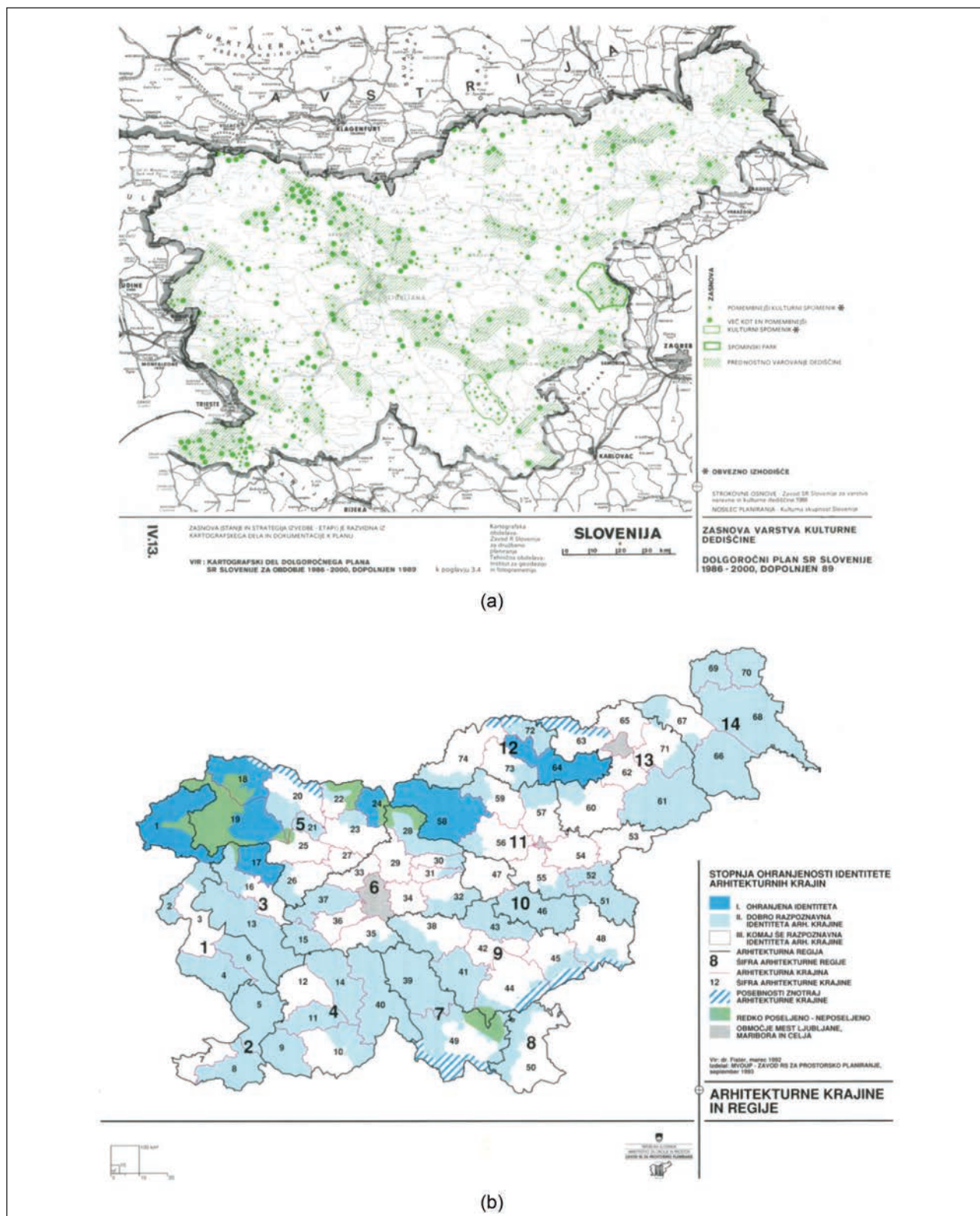
V splošnem pojem arhitekturna dediščina presega okvire registra nepremične kulturne dediščine, saj je ta ena izmed glavnih sestavin identitete prostora. Fister idr. (1993) so pri izdelavi modela določanja arhitekturne identitete v Sloveniji prišli do zaključka, da je danes na Slovenskem 74 topografsko določljivih krajin, med seboj povezanih v štirinajst arhitekturnih regij. Slika 4b prikazuje omenjene krajin in regije skupaj s stopnjo ohranjenosti njihove identitete. V najvišjo kategorijo je uvrščenih sedem arhitekturnih krajin, omejenih pretežno

na gorska območja. V tej kategoriji je ohranjena večina kakovostnih razmerij med celotno stavbno dediščino in splošno identiteto arhitekturne krajine ter ni izrazite moteče arhitekture ali drugih posegov v prostor, ki bi bistveno razvrednotili dele arhitekturne krajine.

V drugo kategorijo je uvrščenih petindvajset arhitekturnih krajin, ki so skoncentrirane predvsem v zahodni, južni in severovzhodni Sloveniji. Tukaj je identiteta krajine še razmeroma dobro razpoznavna, saj je ohranjena večina značilne mreže naselij in prostorskih značilnosti. To pomeni, da lahko, poleg spomenikov državnega in lokalnega pomena, tudi številne objekte znotraj prve in druge kategorije vrednosti arhitekturne krajine obravnavamo kot objekte arhitekturne dediščine. V sklopu tega prispevka je bila zato za primerjavo izdelana karta z imenom Nepremična kulturna dediščina in potresna intenziteta (slika 5). Na njej so prikazani vsi elementi kulturne dediščine iz registra, tudi tisti, ki niso klasificirani kot spomeniki državnega in lokalnega pomena. Ker vpisi v register zajemajo tudi arheološke ostanke iz prazgodovine in antike, so zaradi relevantnosti prikazani samo objekti, zgrajeni od 11. stol. n. št. dalje. Kot podlaga karte je bila uporabljena karta potresne intenzitete Slovenije za 475-letno povratno dobo (Šket Motnikar in Zupančič, 2011), ki je bila izdelana na podlagi 1046 zapisov različnih intenzitet potresov, dobljenih iz poenotnega kataloga potresov Slovenije in sosednjih dežel, ki zajema obdobje med letoma 1201 in 2010 ter površine dobrih 100 000 km<sup>2</sup> (Šket-Motnikar in Zupančič, 2011). Skrajne meje tega območja so slabih 100 km od meja Slovenije. Karta intenzitet je določena za povratno dobo 475 let, kar ustreza 90-odstotni verjetnosti, da vrednosti na karti v petdesetih letih ne bodo presežene, in upošteva povprečne značilnosti tal znotraj območja posamezne stopnje intenzitete, na kar vplivajo tudi značilnosti lokalne geološke podlage.

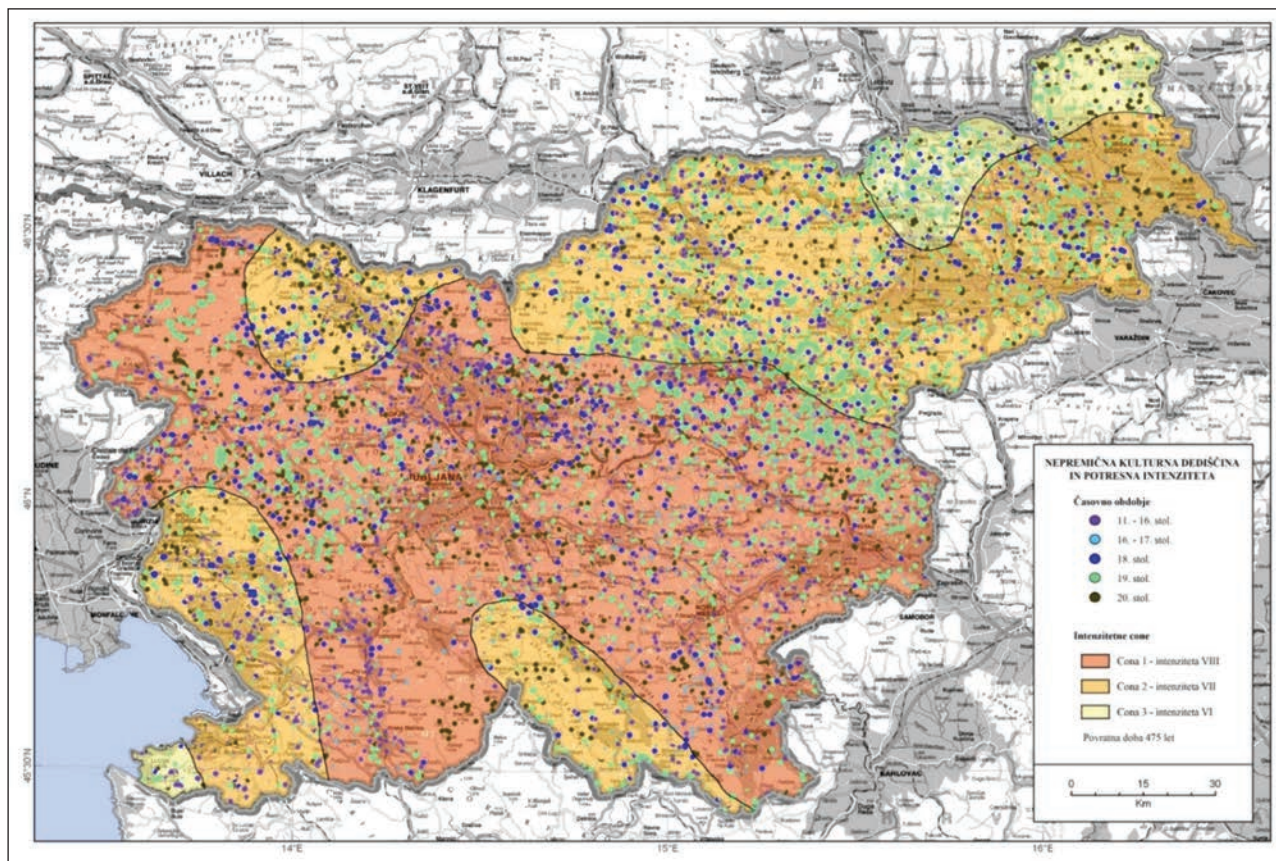
Na sliki 5 je tako poleg lokacije objekta mogoče razbrati tudi predvideno stopnjo intenzitete. Intenzitete so razdeljene v tri cone: v coni 1 je intenziteta VIII, v coni 2 je VII, v coni 3 pa je predvidena intenziteta VI. Na podlagi podatkov, predstavljenih na karti, lahko za-





Slika 4: Načrt varstva kulturne dediščine za obdobje 1986–2000 (a) ter arhitekturne krajinje in regije s stopnjo ohranjenosti identitete (b) (Fister et al., 1993)

Figure 4: Cultural heritage protection plan for the years 1986–2000 (a) and architectural regions of Slovenia with their corresponding level of identity conservation (b) (Fister et al., 1993)



**Slika 5: Predlagana karta nepremične kulturne dediščine na posameznih intenzitetnih conah (Vir: podloga karte z intenzitetnimi območji povzeta po Šket-Motnikar in Zupančič, 2011, 114)**

**Figure 5: Proposed cultural heritage chart of structures and other fixed artefacts in specific intensity zones**

ključimo, da se objekti arhitekturne dediščine pojavljajo v večjem številu v vseh treh intenzitetnih conah.

### Analizirane tipologije

Izbrane so bile tri tipologije objektov, in sicer *stavbe*, *cerkve* ter *stolpi*. Vse tri tipologije so značilne za nepremično dediščino na Slovenskem in so med potresno obremenitvijo zaradi svoje konstrukcijske zasnove, načinov gradnje in uporabljenega materiala najranljivejše. Krajši opisi izbranih tipologij so navedeni v nadaljevanju.

- *Stavbe* zajemajo gospodarske in stanovanjske objekte, ki so pogosti v zgodovinskih mestnih jedrih. So razmeroma pravilnih tlorisnih dimenzij, z dokaj enakomerno porazdelitvijo sten v tlorisu in brez večjih prekinitev po višini. V višino merijo do štiri etaže in so grajene kot skupine med seboj povezanih objektov, kar pomeni, da so nosilni zidovi lahko skupni. Običajno je etažna višina večja od treh metrov, z nizkimi

parapeti ter s posledično velikimi okni. Stropi, kot tudi ostrešja, so leseni. Zidovi pogosto tudi niso povezani z zidnimi vezmi, zaradi česar je bistveno zmanjšana njihova potresna odpornost, saj ne delujejo povezano. Slika 6a prikazuje tri objekte kot značilne predstavnike te tipologije. Kolizej v Ljubljani so zgradili leta 1847 in je bil postavljen kot zadnji od treh podobnih objektov v avstro-ogrski monarhiji, za zgradbama (»Coliseum«) v Gradcu in na Dunaju (Kržan, 2008). V slovenski sekciji organizacije ICOMOS (angl. International Council on Monuments and Sites) so med drugim izpostavili, da je Kolizej na Slovenskem edini še ohranjeni primer romantične umetnosti na prehodu iz bidermajerja v historizem (ICOMOS/SI, 2011). Kljub večletnemu prizadevanju civilne iniciative ter dela arhitekturne in umetnostnozgodovinske stroke, da bi stavbo ohranili in restavrirali, so jo leta 2011 porušili. Drugi primer je t. i. Kadetnica v Mariboru. Gre za poslopje, s katerim je bil v Mariboru uveden neoromanski slog, ki se pri tem objektu najzra-

ziteje izraža s pročeljem na katerem so polkrožni zaključki oken in dekorativni elementi (Lutman in Weiss, 2003). Poslopje je bilo zgrajeno leta 1856 kot največja tovrstna stavba v tedanji Avstriji. Po zadnji prenovi, ki je bila zaključena leta 2009, so v njej center za vojaško izobraževanje in usposabljanje, vojaški muzej in informacijske službe. Tretji primer objekta tipologije stavb je Auerspergova palača, v kateri je danes ljubljanski mestni muzej. Gre za prvo arhivsko dokumentirano stavbo, ki je nastala s prezidavo grofovske palače grofov Turjaških iz leta 1547. Do leta 1935 je bila stavba s klasicistično fasado dom Auerspergov, ki veljajo za eno najvplivnejših kranjskih plemiških družin (Vovk-Čepič in Veselko, 2002). Danes je v lasti Mestne občine Ljubljana.

- *Cerkve* zaradi monumentalne zasnove, pri kateri se veliki razponi premoščajo z razmeroma redkimi rastrami zelo visokih ter vitkih stebrov in sten, prav tako predstavljajo potresno zelo ranljivo tipologijo. V preteklosti je gradnja cerkva vedno posebej obsegala vrhunec graditeljske stroke posamezne dobe. Z iznajdbo novega materiala in tehnik gradnje so se pojavljali tudi novi arhitekturno-konstruktivski elementi, ki so tvorili njihov skelet. Zato bi bilo tudi pri ocenjevanju ranljivosti treba upoštevati tipologije, vezane na posamezna zgodovinska obdobja. V Sloveniji je največ objektov sakralne arhitekture iz obdobja baroka, za katerega so v konstrukcijskem smislu značilni veliki volumni (široke ladje) in kupole ovalnih oblik. Druge karakteristike, kot so težnje po simetriji v tlorisu in po višini ter začetki gradnje kupol, pa izvirajo že iz renesanse (Crocini, 1998). V doktorski disertaciji (Petrovčič, 2013) smo vse cerkvene objekte klasificirali pod enotno tipologijo. Kot primeri te tipologije so na sliki 6b prikazani Frančiškanska cerkev v Ljubljani, cerkev sv. Mohorja v Gornjem Gradu ter cerkev Marije Snežne v Polskavi. Frančiškanska cerkev je zgrajena v slogu zgodnjebaročne bazilike z eno ladjo in dvema vrstama stranskih kapel. Cerkev sv. Mohorja pa je eden ključnih spomenikov visokega baroka na Slovenskem, ki sledi vzoru ljubljanske stolnice (Vidrih, 2012a in 2012b). Tudi cerkev Marije Snežne je poznogotska cerkev t. i. koroškega tipa z v celoti poslikano zunanostjo (arhitekturno poslikavo). Zaradi močne statične ogroženosti je bila v letih 2007 in 2008 izvedena sanacija s protipotresno utrditvijo (Kilar in Marušič, 2007).
- *Stolpi in zvoniki*<sup>1</sup> zajemajo tako posvetne kot sakralne objekte, za katere je značilno, da je višina bistveno večja od tlorisnih dimenzij in da so grajeni iz nearmiranega kamna ali opeke. Sem uvrščamo tako grajske stolpe, stolpe na mestnih

**Preglednica 3: Upoštevane tipologije objektov in pripadajoče vrednosti indeksov  $V_0$ ,  $V$  in  $Q$**

**Table 3: Considered typologies and corresponding values indexes  $V_0$ ,  $V$  and  $Q$**

Objekt	$V_0$	$V$	$Q$
Stavba	0.83	0.99	2.3
Cerkev	0.89	1.01	3.0
Stolp / zvonik	0.78	0.86	2.0

zidovih, razgledne stolpe kot tudi cerkvene zvonike, ki so popolnoma ali po večjem delu svoje višine ločeni od okoliških objektov. Zaradi neugodnega razmerja med višino in širino ter visoko postavljenim težiščem se pri potresni obremenitvi obnašajo kot sistem obrnjenega nihala, za katero obstaja nevarnost prevrnitve. Primeri takih objektov so predstavljeni na sliki 6c. Kamnit obrambni stolp na Taboru so leta 1485 izdelali Benečani, da bi se zaščitili pred vpadi Turkov. Pozneje je bil vaška žitnica, danes pa je v njem muzej. Grad Branik – Rihemberk je največji ohranjeni srednjeveški grad na Primorskem, s prevladujočim kamnitim romanskim stolpom iz 13. stol. Razmeroma vitek prostostoječi zvonik cerkve sv. Jurija v Piranu je del cerkvenega kompleksa na vzpetini nad mestom Piran, ki ga poleg zvonika sestavljajo še cerkev in krstilnica (baptisterij). Zvonik je bil zgrajen 1608 in je izdelan po vzoru cerkve sv. Marka v Benetkah (Bernik, 1994).

Glede na tipološke enote iz registra nepremične kulturne dediščine (preglednica 2) uvrščamo stavbe med profano stavbno dediščino, cerkve in stolpi pa so del sakralne oz. sakralno-profane stavbne dediščine. Določeni manjši stolpi so lahko tudi del memorialne dediščine.

Za potrebe analize po metodi, predstavljeni v prejšnjem poglavju, je treba za vsako obravnavano tipologijo določiti tudi indekse ranljivosti ( $V$ ) in duktilnosti ( $Q$ ). Vrednosti izbranih indeksov so prikazane v preglednici 3. Določene so bile na podlagi ranljivosti posameznih vrst zidanih konstrukcij, po predlogih Lagomarsina (2006), ki je določil indekse za podobne tipologije objektov v severni Italiji. Indeks  $V_0$  je izhodiščna vrednost za oceno ranljivosti posameznega objekta. Poleg izhodiščne vrednosti pa je predvidena tudi njegova korekcija (indeks  $V_k$ ), ki upošteva nekatere dodatne karakteristike obravnavanih objektov, vezane na raven vzdrževanja, kakovost vgrajenega materiala, pravilnost

<sup>1</sup> Zaradi krajšega zapisa bo v nadaljevanju za stolpe in zvonike pogosto rabljen samo izraz stolpi.

**Preglednica 4: Korekcija indeksa ranljivosti – parametri in korekcijski faktorji**  
**Table 4: Correction of the vulnerability index – parameters and correction factors**

Parameter	Korekcijski faktor ( $V_k$ )			
(a) raven vzdrževanja	zelo slaba (+0.08)	slaba (+0.04)	srednja (0)	dobra (-0.04)
(b) kakovost materiala	slaba (+0.04)	srednja (0)	dobra (-0.04)	
(c) regularnost v tlorisu	večja neregularnost (+0.04)	regularna (0)	simetrična (-0.04)	
(č) regularnost po višini	večja neregularnost (+0.04)	regularna (0)		
(d) povezava s sosednjimi objekti	na vogalu (+0.04)	brez povezave (0)	povezava z obeh strani (-0.04)	
(e) sanacijski ukrepi	niso prisotni (0)	so prisotni (-0.08)		
(f) naklon terena	strmo pobočje (+0.08)	rahel naklon (+0.04)	na ravnini (0)	

**Preglednica 5: Korekcija indeksa ranljivosti – upoštevani korekcijski faktorji pri posameznih tipologijah**  
**Table 5: Correction of the vulnerability index – considered correction factors for each specific typology**

Objekt	Korekcijski faktor ( $V_k$ )							Vsota $V_k$
	(a)	(b)	(c)	(č)	(d)	(e)	(f)	
<b>Stavba</b>	0.04	0.04	0	0.04	0.04	0	0	<b>0.16</b>
<b>Cerkev</b>	0	0.04	0	0.04	0	0	0.04	<b>0.12</b>
<b>Stolp/zvonik</b>	0.04	0.04	-0.04	0	0.04	0	0	<b>0.08</b>

v tlorisu, pravilnost po višini, lego, že uporabljene utrditvene ukrepe in morfologijo terena.

Predviden razpon vrednosti korekcijskih faktorjev je prikazan v preglednici 4. Končna vrednost indeksa ranljivosti je določena kot vsote izhodiščne ranljivosti in skupne vrednosti vseh upoštevanih korekcijskih faktorjev.

Preglednica 5 prikazuje izbrane vrednosti korekcijskih faktorjev za posamezni parameter pri določenem tipu objekta. Poudariti je treba, da gre v vseh primerih za grobo oceno posameznih parametrov, s katero poskušamo samo približno zajeti reprezentativne karakteristike posamezne tipologije v Sloveniji. Pri vseh tipologijah smo predpostavili, da sanacijski ukrepi za povečanje potresne odpornosti še niso bili izvedeni. Glede na to, da so bile osnovne ocene indeksov ranljivosti narejene za objekte v severni Italiji, za katere je v splošnem značilna razmeroma dobra kakovost uporabljenega materiala (Feilden, 2003), smo za objekte v Sloveniji pri uporabljenem materialu predpostavili nekoliko slabšo kakovost, pri stavbah in stolpih pa tudi nekoliko

slabšo stopnjo vzdrževanja. Pri vseh treh primerih smo upoštevali regularno zasnovo v tlorisu, pri stolpih celo simetrično, ki oceno ranljivosti nekoliko zmanjšuje. Za stavbe in cerkve pa smo upoštevali še neregularno zasnovo po višini. Pri povezanosti s sosednjimi objekti smo pri stavbah in stolpih predpostavili vogalno lego, ki v splošnem deluje neugodno zaradi povečanih torzijskih vplivov. Poleg tega smo pri cerkvah upoštevali tudi lego na neugodnem terenu (teren v naklonu).

## Rezultati

Ocene ranljivosti za posamezno tipologijo objektov so prikazane na sliki 7. Rezultati so podani v obliki histogramov poškodb, ki prikazujejo verjetnost doseganja posamezne stopnje poškodovanosti po EMS znotraj treh intenzitetnih con, ki jih prikazuje slika 5. Verjetnosti doseganja posamezne stopnje poškodovanosti so bile izračunane na podlagi postopka, prikazanega na sliki 3. Slika 7 poleg stopnje poškodovanosti prikazuje tudi meje med posameznimi mejnimi stanji po Evrokodu 8-3. Interval do



*Kolizej v Ljubljani  
(porušen leta 2011)*



*Kadetnica v Mariboru*



*Auerspergova palača v Ljubljani  
(danes Mestni muzej Ljubljana)*

**(a) Stavbe**



*Frančiškanska cerkev v Ljubljani*



*Cerkev sv. Mohorja v Gornjem Gradu*



*Cerkev Marije Snežne v Solčavi*

**(b) Cerkve**



*Stolp Tabor v vasi Lokevič na Krasu  
(danes Vojaški muzej Tabor)*



*Okrogel kamnit stolp na gradu  
Rihemberk v Vipavski dolini*

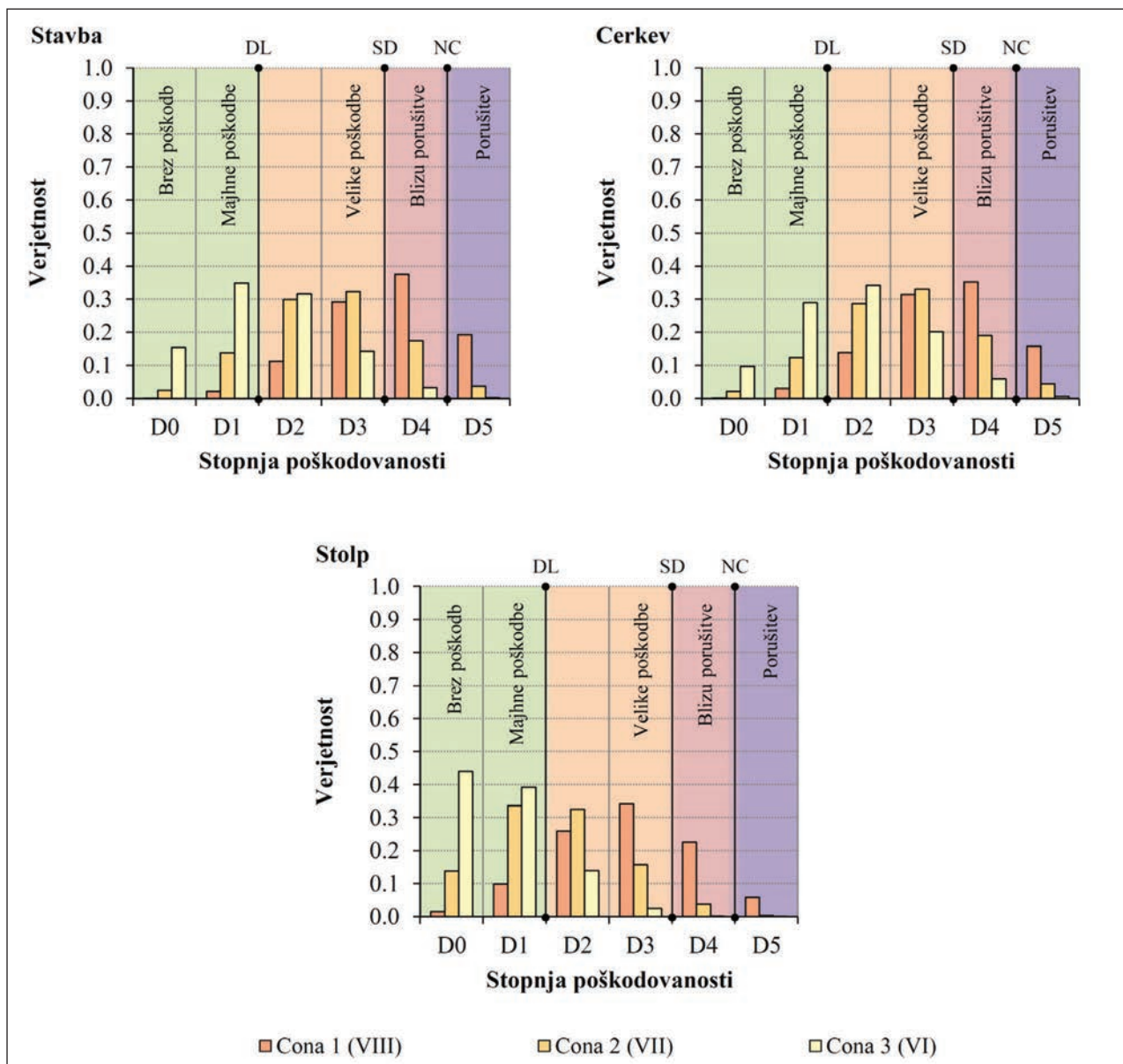


*Zvonik cerkve sv. Jurija v Piranu*

**(c) Stolpi / zvoniki**

**Slika 6: Primeri objektov, ki pripadajo izbranim tipologijam: (a) stavbe, (b) cerkve, (c) stolpi**

**Figure 6: Examples of structures corresponding to a certain typology: (a) buildings, (b) churches and (c) towers**



Slika 7: Verjetnost pojavitve določene stopnje poškodovanosti, ki velja v posameznih intenzitetnih conah (povratna doba potresa  $T_r = 475$  let)

Figure 7: Damage grade probability for a specific intensity zone (return period  $T_r = 475$  years)

mejnega stanja DL predstavlja območje brez poškodb oz. manjših poškodb. Med mejnima stanjema DL in SD se na konstrukciji pojavljajo zmernejše poškodbe, vendar je konstrukcija še stabilna. Med mejnima stanjema SD in NC je konstrukcija zelo močno poškodovana in je že na meji porušitve. Ko je preseženo mejno stanje NC, pa se konstrukcija poruši. Podrobnejši opis poškodb pri posameznem mejnem stanju je opisan na sliki 2. Iz rezultatov na sliki 7 je razvidno, da stopnja poškodovanosti po pričakovanih narašča z intenziteto. Najmanjše poškodbe nastanejo znotraj cone 3 (intenziteta VI), nekoliko večje

znotraj cone 2 (intenziteta VII), največje pa znotraj cone 1 (intenziteta VIII). Razporeditev doseženih stopenj poškodb je močno odvisna tudi od tipologije objektov. Stavbe in cerkve imajo med seboj podobno razporeditev poškodb. Verjetnost pojavitve poškodb je pri teh dveh tipologijah pretežno v območju med DL in NC. Pri obeh tipologijah velja, da bi večina objektov pri intenzitetah VII in VIII presegla mejno stanje DL.

Izkaže se, da so stolpi oz. zvoniki najmanj ranljiva skupina, saj bi jih pri intenziteti VI 44 odstotkov ostalo nepoškodovanih (stopnja poškodovanosti D0), pri inten-

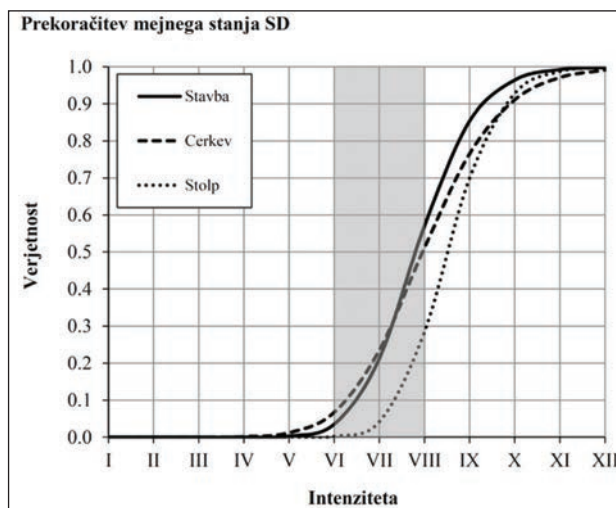
ziteti VIII pa bi jih nepoškodovanih ostalo le okoli tri odstotke. Preostali deleži bi utrpeli poškodbe od stopnje D1 do D4. Z višanjem intenzitete se situacija poslabšuje. Pri intenziteti VII je največja verjetnost pojavitve poškodb tipa D1 (okoli 34 %) in D2 (okoli 32 %). Približno enaka verjetnost je tudi pri intenziteti VIII, le da je tu pričakovan tip poškodb D3.

Največja verjetnost poškodb razreda poškodovanosti med D2 in D3 torej velja za stavbe in cerkve pri vseh treh intenzitetah. To velja tudi za stolpe pri intenzitetah VII in VIII. Verjetnost popolne porušitve (stopnja D5) je največja pri stavbah (okoli 20 %) in cerkvah (okoli 17 %). Predpis Evrokod 8-3, ki ureja zahteve glede protipotresnega utrjevanja konstrukcij, določa, da konstrukcija izkazuje dovolj veliko potresno varnost, če pri projektni potresni obremenitvi za  $T_R = 475$  let mejno stanje SD ni preseženo. Pri tem mejnem stanju je konstrukcija močnejše poškodovana. Nosilni elementi še vedno lahko prenašajo vertikalno obtežbo in v določeni meri tudi horizontalno, kar omogoča preživetje ponovljenega zmernega popotresnega sunka. Zaradi velikosti in števila poškodovanih elementov popravilo verjetno ni več ekonomično. Dodatno predpis zahteva tudi preveritev preseganja mejnega stanja DL (v Sloveniji se upošteva potres s  $T_R = 95$  let) ter mejnega stanja NC (upošteva se potres s  $T_R = 2475$  let).

Verjetnosti preseganja mejnega stanja SD za obravnavane tipologije objektov so prikazane na sliki 8. Ob upoštevanju rezultatov s slike 7 je določitev te verjetnosti dokaj trivialna, saj so v tem primeru prikazani rezultati že bili določeni za povratno dobo 475 let. Tako lahko na podlagi zadnje enačbe iz slike 3 preseganje mejnega stanja SD določimo kot kumulativno verjetnost za stopnji poškodovanosti D4 in D5.

S slike 8 je tudi razvidno, da sta tipologiji stavb in cerkva najbolj ogroženi. Za stavbe verjetnost prekoračitve mejnega SD pri intenziteti VIII dosega 57 odstotkov. Povedano drugače, v coni z intenziteto VIII, ki zajema osrednjo, dobršen del severozahodne in jugovzhodno Slovenijo, bi se ob potresu, ki se lahko pojavi z desetodstotno verjetnostjo v petdesetih letih, kar 57 odstotkov zgodovinskih zidanih stavb močno poškodovalo ali celo porušilo. Tudi pri intenziteti VII je ta verjetnost še vedno razmeroma visoka in znaša približno 20 odstotkov. Pri intenziteti VI se ta verjetnost krepko zmanjša in znaša samo štiri odstotke. Zelo podobne vrednosti veljajo tudi za cerkve. Razlog za tako obnašanje je slaba konstrukcijska zasnova takih objektov, ki pri cerkvah pogosto vključuje visoke vertikalne elemente z velikimi razponi. Pri stavbah pa je zaradi lesenih stropov pogosta slabša povezanost s sosednjimi zidovi, kar zelo neugodno vpliva na potresni odziv takih objektov. To se v analizi odraža že v izhodiščnem indeksu ranljivosti ( $V_0$ ), pri katerem je za stavbe bila privzeta vrednost  $V_0 = 0.83$ , kar ustreza razredu ranljivosti B po EMS (preglednica 1).

Pri cerkvah je bila ranljivost ocenjena še nekoliko višje, in sicer z indeksom  $V_0 = 0.89$ . Z upoštevanjem



Slika 8: Krivulje ranljivosti za izbrane tipologije objektov

Figure 8: Fragility curves of selected typologies

korekcijskih faktorjev pa se je vrednost končnega indeksa ranljivosti za obe tipologiji še povečala in v obeh primerih znaša približno 1.0 (preglednica 3), kar ustreza razredu ranljivosti A po EMS. V ta razred uvrščamo najranljivejše objekte, zato se tudi pri ocenjevanju ranljivosti, ki jo podaja lestvica EMS, pričakuje, da bo pri intenziteti VIII med 20 in 60 odstotkov objektov utrpelo stopnje poškodovanosti tipa D4 ter 20 odstotkov tipa D5 (porušitev), kar skupaj nanese od 40 do 80 odstotkov za obe stopnji poškodovanosti skupaj. V povprečju je to ravno 60 odstotkov, kar je zelo blizu verjetnosti preseganja mejnega stanja SD za stavbe (57 %), ki smo jo dobili z analizo, pri čemer smo upoštevali kumulativno verjetnost dveh stopenj poškodovanosti (D4 in D5). Tako ujemanje naše analize z metodo analize po lestvici EMS potrjuje ustreznost izbrane metode. Poleg stavb in cerkva se pri intenziteti VIII tudi stolpi izkažejo kot zelo ranljiva tipologija, saj bi bilo pri kar 28 odstotkih prekoračeno mejno stanje SD. Pri višjih intenzitetah ranljivost hitro pade, in sicer na zgolj štiri odstotke pri intenziteti VII, pri intenziteti VI pa je zanemarljivo majhna.

Iz navedenega sledi, da je pri stavbah, cerkvah in večinoma tudi stolpih (izjema je cona z intenziteto VI) razmeroma velika verjetnost preseganja mejnega stanja SD pri večjih intenzitetah (VII in VIII). Slika 8 za omenjene tri tipologije predstavlja t. i. krivulje ranljivosti (angl. fragility curves), ki za posamezno tipologijo prikazujejo verjetnost prekoračitve mejnega stanja SD v odvisnosti od intenzitete po EMS. Določene so na podlagi kumulativne verjetnosti po zadnji enačbi na sliki 3 za vsako intenziteto posebej. Krivulje ranljivosti sicer običajno prikazujejo verjetnost v odvisnosti od  $a_g$  (Symakezis, 2006). Ker imamo v analizi opravka z intenzitetami in ker v splošnem zveza med intenziteto in projektnim

**Preglednica 6: Deleži objektov, ki bi pri projektni potresni obremenitvi ( $T_R = 475$  let) znotraj posameznih intenzitetnih con verjetno utrpeli večje (nepopravljive) poškodbe**

**Table 6: The amount of structures that would in specific intensity zones sustain greater (irreparable) damage in the case of the design seismic loading ( $T_R = 475$  years)**

Intenziteta	Večja mesta / kraji / regije	Močnejše poškodovani objekti
VIII	Ljubljana, Kranj, Celje, Bovec, Postojna, Trbovlje, Novo mesto ...	57 % (stavbe) 51 % (cerkve) 30% (stolpi)
VII	Nova Gorica, Jesenice, Ribnica, Velenje, Dravograd, Ptuj, Murska Sobota ...	21 % (stavbe) 24 % (cerkve) 4% (stolpi)
VI	Portorož, Maribor, Gornja Radgona, severno Pomurje (Goričko) ...	4 % (stavbe) 7 % (cerkve) 1 % (stolpi)

pospeškom tal ni enoznačno določljiva, predstavitev krivulj ranljivosti v takem formatu ne bi bila smiselna.

S slike 8 je razvidno, da pri vseh treh tipologijah obstaja verjetnost presegevanja mejnega stanja SD šele od intenzitete V dalje, kar je skladno tudi z lestvico EMS, ki poškodbe na konstrukcijah predvideva šele pri intenziteti V. Pri intenziteti XII ta verjetnost pri vseh tipologijah presega 98 odstotkov. Za cerkve in stolpe do intenzitete VII je značilen dokaj podoben potek krivulje ranljivosti, pri čemer je pri cerkvah verjetnost presegevanja mejnega stanja SD nekoliko večja, od intenzitete VII dalje pa je ta verjetnost večja pri stavbah. Največja razlika je pri intenziteti IX in znaša okoli 15 odstotkov. V primerjavi s stavbami in cerkvami je za stolpe značilna dokaj nižja verjetnost prekoračitve tega mejnega stanja. Največja razlika je pri intenziteti VIII, kjer presega 20 odstotkov. Krivulja ranljivosti je za stolpe premaknjena nekoliko bolj v desno. Razlog za tako obnašanje je dobra zasnova takih objektov, saj so običajno zelo masivni in čokati (značilna je majhna vitkost). Posledično je pri teh objektih nižji tudi indeks ranljivosti ( $V$ ), ki pri stolpih po upoštevanju korekcijskih faktorjev znaša 0.9. Pri stavbah in cerkvah z nekoliko manj ugodno izhodiščno zasnovo znaša indeks ranljivosti 1.03 oz. 1.05 (preglednica 3). Pri intenziteti X ranljivost stolpov nekoliko preseže ranljivost cerkva, vendar je ta razlika minimalna in znaša največ okoli tri odstotke.

#### SKLEP IN RAZPRAVA

Na podlagi izvedene analize je mogoče zaključiti, da stavbe, cerkve in stolpi spadajo v izjemno ranljivo

skupino objektov arhitekturne dediščine v Sloveniji. Pri najpogostejših in tudi najbolj ogroženih tipologijah, tj. cerkvah in do tri etaže visokih zidanih stavbah, veljajo znotraj posameznih intenzitetnih con zaključki, prikazani v preglednici 6. Kljub temu je treba poudariti, da gre v prikazani analizi le za grobo oceno ranljivosti, ki velja za območje celotne Slovenije, ob predpostavljanih vrednostih indeksov  $V$  in  $Q$ , ki so bile pridobljene ob opazovanju poškodb na objektih v severni Italiji, ki so jih v preteklem desetletju prizadeli potresi. Za prenos metode na območje Slovenije, pa smo v okviru te študije določili korekcijske faktorje (preglednica 5), ki vključujejo lokalne arhitekturne, konstrukcijske in druge značilnosti vezane na izbrane tipologije.

Zaključimo lahko torej, da na območju Slovenije obstaja povečana potresna ogroženost za stavbe in cerkve na območjih s VIII. stopnjo potresne intenzitete po EMS. Gre za pas, ki poteka od severozahoda, preko osrednje Slovenije in proti jugovzhodu države. Na tem območju lahko pričakujemo, da se bo ob potresu s povratno dobo 475-let poškodovala več kot polovica takšnih objektov. Posegi za povečanje potresne odpornosti arhitekturne dediščine morajo na tem področju biti usmerjeni v ti dve tipologiji objektov.

Rezultat analize ranljivosti znotraj določenega geografskega območja daje podatek o vplivu potresa na arhitekturno dediščino v obravnavani regiji za posamezni tip objekta. Na območju Slovenije pri objektih arhitekturne dediščine je torej sorazmerno veliko potresno tveganje. To pomeni, da je povečanje potresne odpornosti (varnosti) eden izmed ključnih dejavnikov pri načrtovanju sanacije takih objektov.



## SEISMIC VULNERABILITY ASSESSMENT OF ARCHITECTURAL HERITAGE BUILDINGS IN SLOVENIA

Simon PETROVČIČ

University of Ljubljana, Faculty of Architecture, Zoisova 12, 1000 Ljubljana, Slovenia  
e-mail: simon.petrovcic@fa.uni-lj.si

Vojko KILAR

University of Ljubljana, Faculty of Architecture, Zoisova 12, 1000 Ljubljana, Slovenia  
e-mail: vojko.kilar@fa.uni-lj.si

## SUMMARY

*Historical structures were usually not designed to withstand seismic loads. During recent earthquake events in the Mediterranean a high degree of damage was observed on structures of architectural heritage. The article analyses the assessment of seismic vulnerability of such structures in Slovenia. A probabilistic assessment method based on the European macroseismic scale (the EMS) is presented. The method is based on observations of actual damage to individual buildings during earthquakes. Based on data available in the Slovenian Register of cultural heritage real estate and seismic intensity zones a special hybrid map was developed that shows individual cultural heritage structures, placed in the area of a certain seismic intensity. Analyses were performed for three characteristic building typology units: historic masonry buildings, churches and masonry towers. For each typology the probability of a specific state of damage in the event of an earthquake is presented. The study concludes that in Slovenia an increased seismic risk exists for historic masonry buildings and churches in areas with the VIII-th EMS intensity level. In this areas historic masonry buildings and churches have more than 50% probability that an earthquake with a return period of 475 years would cause severe damage or collapse. Therefore, when deciding for safeguarding measures for such structures ensuring sufficient earthquake resistance must also be considered.*

**Keywords:** architectural heritage, seismic resistance, vulnerability assessment, heritage conservation

## VIRI IN LITERATURA

**FEMA (1998):** Handbook for the Seismic Evaluation of Existing Buildings. A Prestandard, Federal Emergency Management Agency (FEMA) Report 310, Washington, ZDA.

**ICOMOS/SI – International Council on Monuments and Sites, Slovenia (2011):** Stališče za javnost – Kolizej. Združenje ICOMOS/SI, Ljubljana, dostopno na <http://www.icomos.si/index.php/sl/novice/zadnje-novice/26-stalisce-za-javnost-kolizej> (dostop 19. 11. 2012).

**MIZKŠ – Ministrstvo za izobraževanje, znanost, kulturo in šport (2012):** Register nepremične kulturne dediščine. Naglič-Kovačec, K. (vodja projekta), Ministrstvo za izobraževanje, znanost, kulturo in šport, Ljubljana. Dostopno na <http://giskds.situla.org/giskd/> (dostop 3. 9. 2012).

**SIST – Slovenski inštitut za standardizacijo (2005):** Evrokod 8: Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij – 3. del: Ocena in prenova stavb, SIST EN 1998-3. Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana.

**Zakon o varstvu kulturne dediščine (ZVKD-1).** Ur. l. RS, št. 16/2008.

**Baker, D. (1999):** Contexts for collaboration and conflict. V: Chitty, G. & D. Baker (ur.): Managing Historic Sites and Buildings. Oxon, Routledge.

**Bernik, S. (1994):** Piran–Pirano. Umetnostni spomeniki. Enciklopedija Slovenije, 8. Ljubljana.

**Bosiljkov, V., D’Ayala, D. & V. Novelli (2015):** Evaluation of uncertainties in determining the seismic vulnerability of historic masonry buildings in Slovenia: use of macro-element and structural element modelling. Bulletin of Earthquake Engineering, 13, 311–329.

**Braga F, Dolce, M. & D. Liberatore (1982):** A statistical study on damaged buildings and an ensuing review of the M.S.K76 scale. In: Proceedings of the 7th European Conference on Earthquake Engineering, Athens.

**Croci, G. (1998):** The conservation and structural restoration of architectural heritage. Southampton, UK, WIT Press.

**Dolce, M., Kappos, A., Zuccaro, G. & A. W. Coburn (1994):** Report of the EAEE Working Group 3: Vulnerability and risk analysis. V: 10th European Conference on Earthquake Engineering, 4, Dunaj.

**Erdik, M., Durukal, E., Siyahi, B., Fahjan, Y., Sesetyan, K., Demircioglu, M. & H. Akman (2004):** Earthquake Risk Mitigation in Istanbul. V: Mulargia, F. & R. J. Geller (ur.): Earthquake Science and Seismic Risk Reduction. Kluwer, Springer.

**Faccioli, E., Pessina, V., Calvi, G. M. & B. Borzi (1999):** A study on damage scenarios for residential buildings in Catania city. *Journal of Seismology*, 3, 327–343.

**Faeh, D., Kind, F., Lang, K. & D. Giardini (2001):** Earthquake scenarios for the city of Basel. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 21, 405–413.

**Feilden, B. M. (2003):** Conservation of historic buildings. Burlington, MA, ZDA Architectural Press, Elsevier.

**Fister, P., Boh-Pečnik, N., Debevec, L., Deu, Ž., Kavčič, M. & L. Lah (1993):** Arhitekturne krajine in regije Slovenije. Ministrstvo za okolje in prostor Republike Slovenije, Zavod Republike Slovenije za prostorsko planiranje, Ljubljana.

**Freeman, S. A. (1998):** Development and use of capacity spectrum method. V: Proceedings of the 6th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Seattle, WA, ZDA.

**Giovinazzi, S. & S. Lagomarsino (2002):** A methodology for the vulnerability analysis of built-up areas. V: Proc. International Conference on Earthquake loss estimation and risk reduction, Bukarešta.

**Grünthal, G. (ur.) (1998):** European Macroseismic Scale 1998 (EMS). V: Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie 15. Luksemburg, Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie.

**Kilar, V. & D. Marušič (2007):** Potresna ojačitev neregularnih kamnitih zidanih konstrukcij. *Varstvo spomenikov*, 42-43, 288–293.

**Kržan, M. (2008):** Parametrična analiza potresne odpornosti Kolizeja v Ljubljani. *Diplomska naloga*. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana.

**Lagomarsino, S. (1998):** A new methodology for the post-earthquake investigation of ancient churches. V: Bisch, P. (ur.): Proceedings of the XI European Conference on Earthquake Engineering, Pariz.

**Lagomarsino, S. (2006):** On the vulnerability assessment of monumental buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4, 4, 445–463.

**Lutman, M. & P. Weiss (2003):** Pregled in preiskave nosilne konstrukcije ter analiza nosilnosti in potresne odpornosti s predlogi potrebnih ukrepov za objekt Kadetnica v Mariboru. Poročilo. Zavod za gradbeništvo Slovenije, Ljubljana.

**Medvedev, S. V. & W. Sponheuer (1969):** Scale of seismic intensity. V: Proc. World Conf. Earthquake Engr., Santiago, Čile.

**Orožen Adamič, M. (1995):** Potresna ogroženost Ljubljane. *Geografski zbornik* 35. Ljubljana.

**Petrovčič, S. (2013):** Potresna izolacija kot sistem za povečanje varnosti arhitekturne dediščine. *Doktorska disertacija*. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, Ljubljana.

**Petrovčič, S. & V. Kilar (2013):** Seismic failure mode interaction for the equivalent frame modeling of unreinforced masonry structures. *Engineering structures*, 54, 9–22.

**Roca, A., Goula, X., Susagna, T., Chávez, J., González, M. & E. Reinoso (2006):** A Simplified Method for Vulnerability Assessment of Dwelling Buildings and Estimation of Damage Scenarios in Catalonia, Spain. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4, 141–158.

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

**Syrmakezis, C. A. (2006):** Seismic protection of historical structures and monuments. *Structural Control Health Monitoring*, 13, 958–979.

**Šket-Motnikar, B. & P. Zupančič (2011):** Karta potresne intenzitete Slovenije. V: Gosar, A. (ur.): *Potresi v letu 2010*. Agencija RS za okolje, Urad za seizmologijo in geologijo, Ljubljana.

**Tomažević, M. (2009):** Potresno odporne zidane stavbe. Tehnis, Ljubljana.

**Vidrih, R. (2012a):** Frančiškanska cerkev. Enciklopedija naravne in kulturne dediščine na Slovenskem – DEDI (spletna publikacija), dostopno na <http://www.dedi.si/dediscina/79-franciskanska-cerkev> (dostop 19. 11. 2012).

**Vidrih, R. (2012b):** Cerkev sv. Mohorja in Fortunata v Gornjem Gradu. Enciklopedija naravne in kulturne dediščine na Slovenskem – DEDI (spletna publikacija), dostopno na <http://www.dedi.si/dediscina/78-cerkev-sv-mohorja-in-fortunata-v-gornjem-gradu> (dostop 19. 11. 2012).

**Vodopivec, B., Šelih, J. & R. Žarnić (2015):** Interdisciplinarna opredelitev prioritete obnove stavbne dediščine na primeru gradov. *Annales, Series historia et sociologia*, 25, 1, 1–18.

**Vovk-Čepič, T. & I. Veselko (2002):** Preobrazbe Turjaške palače. Mestni muzej Ljubljana, Ljubljana.

**Zupančič Strojan, T. & M. Mullins (2002):** The Identity of Place in Virtual Design Studios, *Journal of Architectural Education*, 56, 15–21.