

KARTA POTRESNE INTENZITETE SLOVENIJE

Seismic Intensity Map of Slovenia

Barbara Šket Motnikar*, Polona Zupančič** UDK 550.343.4(497.4)

Povzetek Abstract

Z verjetnostnim postopkom prostorskega glajenja potresne dejavnosti je narejena nova karta potresne nevarnosti – karta potresne intenzitete. Namenjena je civilni zaščiti pri načrtovanju ukrepov za preprečevanje in zmanjševanje škode ob potresih, ne sme pa se uporabljati za projektiranje. Pas največje potresne nevarnosti (VIII EMS) poteka po osrednjem delu Slovenije od severozahoda proti jugu in jugovzhodu države. Z oddaljevanjem od tega pasu se potresna nevarnost zmanjša na VII EMS, na skrajnem severovzhodnem in jugozahodnem delu pa je ocenjena na VI EMS. Karta je narejena za povratno dobo 475 let. Upoštevana so povprečna dejanska tla danega območja intenzitete.

A new map of seismic hazard – a seismic intensity map – was prepared on the basis of a probability procedure for spatial smoothing of the seismic activity. The map will be used by the civil protection in the planning of measures for the prevention and reduction of damage caused during earthquakes. However, the map must not be used for project engineering. The belt of the greatest seismic hazard (VIII EMS) lies across the central part of Slovenia, from north-west to south and south-east of the country. Further away from the belt the hazard reduces to VII EMS. The extreme north-east and south-west part the seismic hazard is estimated at VI EMS. The map is made for a return period of 475 years and was prepared based on average grounds of the given intensity area.

Uvod

S Pravilnikom o mehanski odpornosti in stabilnosti objektov (Uradni list RS, št. 101/2005) je Slovenija uradno sprejela evropski standard za potresno odporno gradnjo Evrokod 8 oziroma EC8 (SIST EN-1998-1:2005), po katerem moramo za projektiranje uporabljati karto referenčnih vrednosti maksimalnega pospeška tal na trdnih tleh (tla tipa A po EC8). Pripravljen je tudi Nacionalni dodatek (SIST EN 1998-1:2005/oA101:2005), ki za projektiranje določa karto Potresna nevarnost Slovenije – Projektni pospešek tal (Lapajne in sod., 2001). Karta pospeška tal se nanaša na trdna tla, zato moramo vpliv tal na potresno nevarnost posebej upoštevati s koeficientom tal, ki je za nekatere značilne tipe tal priporočen v EC8 ali pa ga določimo s posebnimi geomehanskimi raziskavami.

Za potrebe civilne zaščite in za širšo javnost namesto pospeška raje uporabljamo potresno intenziteto, saj prikazuje pričakovane potresne učinke na posameznih območjih Slovenije. Neposredno (že v definiciji posamezne

stopnje intenzitete) določa tudi delež ogroženih objektov posameznega tipa. Poleg tega karta intenzitete vsaj v grobem že upošteva vpliv tal. Ocenjevanje namreč temelji na podatkih o preteklih učinkih potresov, ki že sami po sebi vsebujejo informacijo o značilnostih dejanskih tal.

Dosedanja karta potresne intenzitete Slovenije za povratno dobo 500 let (Ribarič in sod., 1987) je bila do leta 2008 del veljavnih predpisov o potresno odporni gradnji – Pravilnik (s spremembami in dopolnitvami) o tehničnih normativih za graditev objektov visoke gradnje na seizmičnih območjih (Uradni list SFRJ, 31/1981, 49/1982, 29/1983, 21/1988 in 52/1990). Narejena je bila po dopolnjeni metodi ekstremnih vrednosti ob upoštevanju avtorjevih bogatih strokovnih izkušenj in seizmotektonskih značilnosti ozemlja.

V prispevku je predstavljena sodobna intenzitetna karta, ki je narejena po enaki metodologiji kot uradna karta projektne pospeška tal. Uporabljena sta bila postopek prostorskega glajenja potresne dejavnosti (Lapajne in sod., 2003) in računalniški program OHAZ, ki ga je bilo treba dopolniti zaradi posebne oblike modela pojemanja intenzitete (Šket Motnikar in sod., 2007). Verjetno je to prvi primer uporabe postopka prostorskega glajenja potresne dejavnosti za intenziteto.

Tako kot karta projektne pospeška tal je tudi karta potresne intenzitete izračunana za povratno dobo 475

* dr., Ministrstvo za okolje in prostor, ARSO, Urad za seizmologijo in geologijo, Dunajska cesta 47, Barbara.Sket-Motnikar@gov.si

** Ministrstvo za okolje in prostor, ARSO, Urad za seizmologijo in geologijo, Dunajska cesta 47, Polona.Zupancic@gov.si

let, kar ustreza 90-odstotni verjetnosti, da vrednosti na karti v 50 letih ne bodo presežene.

Vhodni podatki in parametri

Katalog potresov

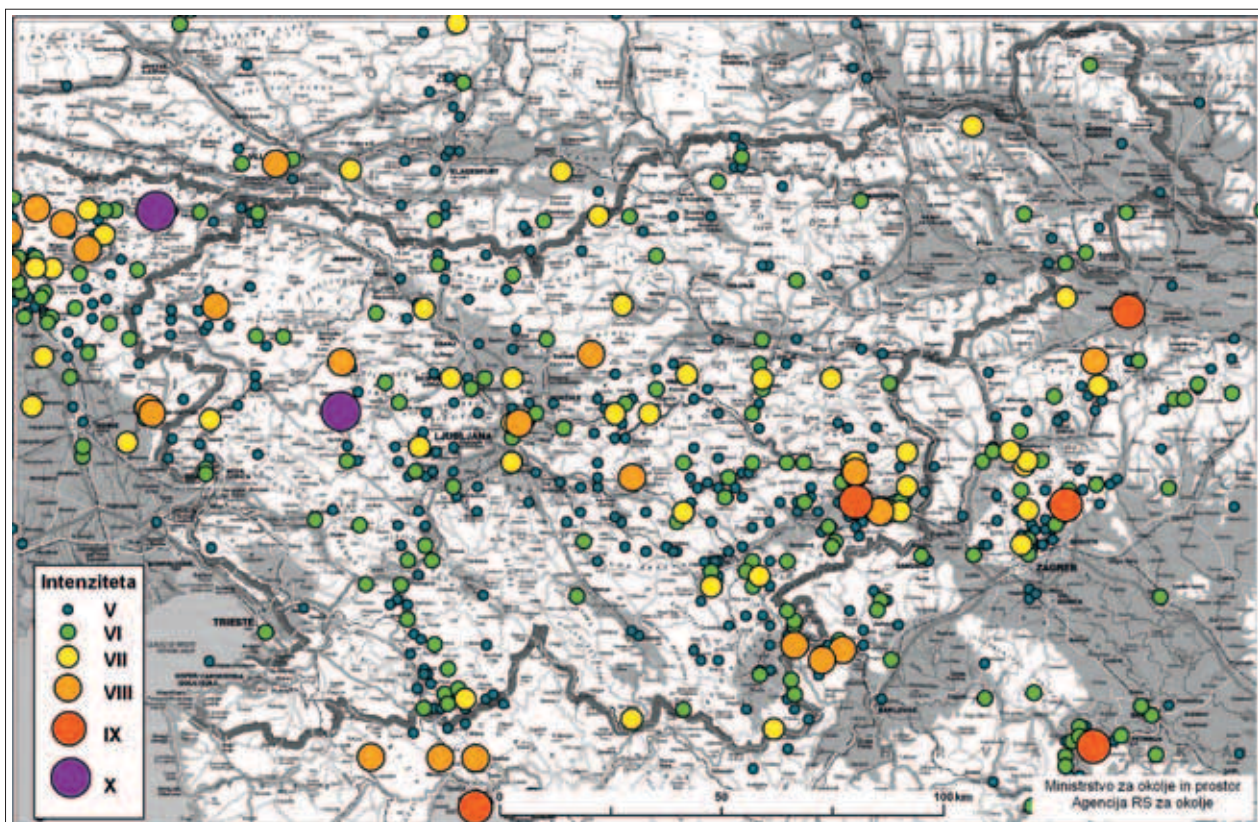
Vir seizmoloških podatkov je poenoten katalog potresov Slovenije in sosednjih dežel (Ribarič, 1982, 1992, 1994; Živčič, 1992, 1996), ki je bil zadnjič dopolnjen leta 2010 (Živčič, interna dokumentacija). Katalog zajema obdobje 1201–2009 in površino dobrih 100.000 km². Skrajne meje tega območja so nekaj manj kot 100 km od meja Slovenije. Opredelitve intenzitetnih stopenj so se skozi zgodovino spreminjale (Lapajne, 2007). V Evropi so prevladale 12-stopenjske intenzitetne lestvice MCS (Mercalli-Cancani-Siebergova lestvica, od leta 1923), MSK (Medvedev-Sponheuer-Karnikova lestvica, od leta 1964) in EMS (evropska makroseizmična lestvica, od leta 1992). Delno so bile različne intenzitetne lestvice poenotene že v Ribaričevem katalogu (Ribarič, 1994), sicer pa so razlike med intenzitetnimi stopnjami na teh lestvicah manjše, kot je nezanesljivost določitve stopnje intenzitete pri zgodovinskih potresih. Zato so v katalogu vrednosti vseh intenzitetnih lestvic obravnavane enotno, in sicer kot vrednosti danes veljavne lestvice EMS (Grünthal, ur., 1998).

V katalogu potresov nekatere vrednosti intenzitete niso celoštevilске. Vmesna vrednost (na primer VI–VII) pomeni, da ima intenziteta vse značilnosti spodnje (VI) in tudi nekatere značilnosti zgornje stopnje (VII), ki pa je zaradi premajhnega števila podatkov (na primer pre malo stavb določene gradnje na danem območju) ne moremo potrditi. Vmesne vrednosti intenzitete so bile zato pred izračunom zaokrožene, polovico vrednosti navzgor in polovico navzdol.

Za izločanje popotresov so bili uporabljeni enaki postopki in parametri časovno-prostorskega okna kot pri izračunu karte projektnega pospeška tal. Vseh potresov v katalogu je 4921, po izločitvi popotresov 2402, od tega jih ima 1046 nadžariščno intenziteto EMS V ali več (slika 1).

Celovitost podkatalogov

Čim starejši so dogodki v katalogu, tem večja je verjetnost, da so njihovi opisi manj zanesljivi in so zato parametri podani z manjšo natančnostjo, šibkejši potresi pa morda sploh niso zabeleženi. Za oceno potresne nevarnosti po verjetnostnem postopku pa je potreben celovit (kompleten) podkatalog, to je del kataloga, v katerem so zabeleženi vsi potresi z nadžariščno intenziteto I_0 nad izbrano spodnjo mejo. Katalog je bil zato razdeljen na pet časovnih obdobj (za pet spodnjih vrednosti intenzitete), ki predstavljajo pet celovitih podkatalogov. Pri izračunu



Slika 1: Potresi z nadžariščno intenziteto EMS V ali več
Figure 1: Earthquakes with epicentral intensity V EMS and above

so bili upoštevani vsi potresi, ki spadajo vsaj v en celovit podkatalog oziroma model:

- M1: leto ≥ 1945 , $I_0 \geq V$ EMS
- M2: leto ≥ 1895 , $I_0 \geq VI$ EMS
- M3: leto ≥ 1800 , $I_0 \geq VII$ EMS
- M4: leto ≥ 1500 , $I_0 \geq VIII$ EMS
- M5: leto ≥ 1200 , $I_0 \geq IX$ EMS

Pri ocenjevanju projektnega pospeška tal so bili uporabljeni tudi energijski modeli, pri katerih je na podlagi skupne sproščene energije zgodovinskih potresov izračunano pripadajoče število potresov. Tako je poudarjen pomen najmočnejših zgodovinskih potresov. Pri poglobljeni analizi teh potresov (Ina Cecić, 2010, osebni pogovor) se je izkazalo, da je ocena njihove lokacije in intenzitete izredno nezanesljiva. Energijski modeli zato niso bili uporabljeni za izračun karte intenzitete.

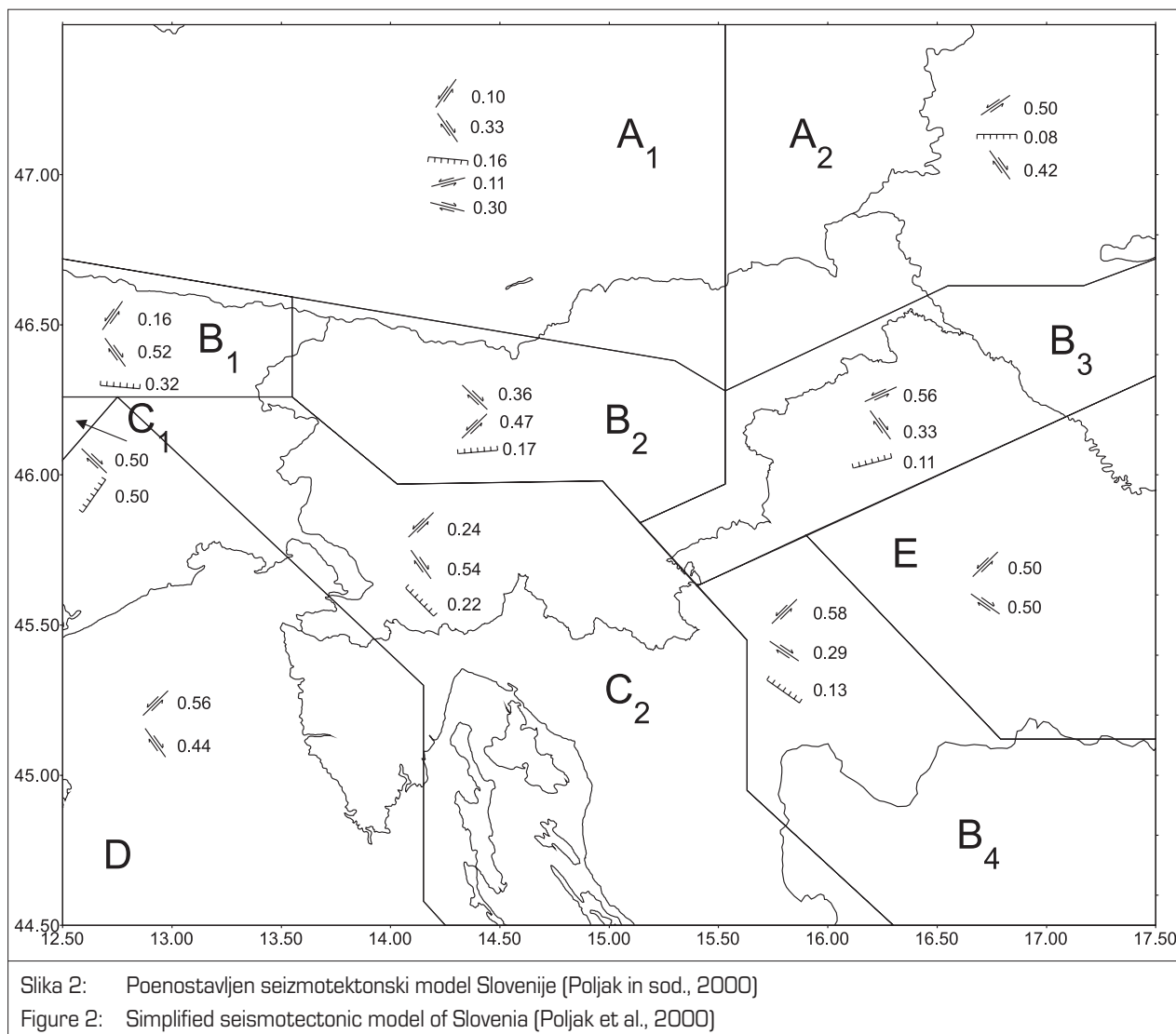
Določitev vrednosti parametra b

Običajno predpostavimo, da število potresov pada z magnitudo po logaritemsko linearni relaciji (Gutenberg in

Richter, 1944) ali po posplošeni dvojno odsekani eksponentni relaciji (Cornell in Vanmarcke, 1969). Intenziteta je približno linearno povezana z magnitudo, zato lahko tudi za intenziteto predpostavimo dvojno odsekano eksponentno povezavo s številom potresov. Za ocenjevanje parametra b , ki določa razmerje med številom velikih in majhnih potresov, smo uporabili metodo največje zanesljivosti (Weichert, 1980) in svoj računalniški program. Upoštevali smo vse potrese v podkatalogu modela M1 na območju približno 40 km okrog Slovenije, za zgornjo mejo pa smo izbrali enotno intenziteto X EMS. Izračunana vrednost b je enaka 0,54.

Parametri glajenja potresne dejavnosti

Prva stopnja postopka glajenja potresne nevarnosti je krožno Gaussovo glajenje s polmerom 30 km, kar približno ustreza ocenjeni napaki pri določitvi lokacije nadžarišč v katalogu potresov za obdobje zadnjih 300 let. Na drugi stopnji opravimo eliptično glajenje, pri čemer so osi elipse v smeri prevladujočih prelomov. Smeri prelomov so določene v poenostavljenem seizmotektonskem modelu Slovenije (Poljak in sod., 2000), ki smo ga



uporabili tudi za ocenjevanje projektnega pospeška tal (slika 2). Vsakemu območju je po subjektivni oceni (Mladen Živčić, 2010, osebni pogovor) določena zgornja meja intenzitete, in sicer: VIII EMS (na območjih A2, D, E), IX EMS (A1, B2, B3, B4, C2) ali X EMS (B1, C1).

Relacija med dolžino pretrga in intenziteto

Za izračun karte projektnega pospeška tal smo uporabili uveljavljene relacije med dolžino pretrga in magnitudo (Wells in Coppersmith, 1994). Te relacije so z uporabo regresijske linearne zveze med magnitudo in intenziteto »prevedene« na intenziteto in predstavljajo le približek za določitev dolžine pretrga na podlagi dane intenzitete.

Model pojemanja intenzitete

Območje, na katerem so zabeleženi največji učinki potresa, imenujemo makroseizmično nadžarišče, pripadajočo intenziteto pa nadžariščno intenziteto. Z oddaljevanjem od tega območja se učinki zmanjšujejo. Model pojemanja intenzitete pove, kako intenziteta pojema z oddaljenostjo od makroseizmičnega nadžarišča pri dani nadžariščni intenziteti in pri dani (makroseizmični ali instrumentalni) globini potresa. Model pojemanja je eden izmed vhodnih podatkov, ki imajo največji vpliv na končne rezultate.

Globina potresov

Intenziteta na dani lokaciji je odvisna od globine potresa: plitvi potresi imajo na nadžariščnem območju večje učinke, a prizadenejo manjše območje kot globlji potresi. Najprej smo želeli ugotoviti, ali je globina potresov značilno različna na posameznih območjih Slovenije in bližnje okolice. Obravnavano ozemlje smo razdelili na štiri vrste območij:

- vzhodna, osrednja in jugozahodna Slovenija,
- območja seizmotektonskega modela (Poljak in sod., 2000),
- območja ob najpomembnejših prelomih,
- območja okrog izbranih velikih potresov.

Za vsako območje vseh štirih razdelitev smo izračunali povprečno globino. Med posameznimi območji Slovenije so sicer razlike (9–13 km), vendar niso statistično značilne. Upoštevati moramo tudi veliko nenatančnost pri določitvi globine zgodovinskih potresov. Globina potresa je v splošnem sorazmerna magnitudi, povprečna globina na vsem območju pa je okrog 10 km. Zato smo v modelu pojemanja intenzitete za celotno ozemlje Slovenije privzeli enotno globino 10 km.

Oblike modela pojemanja in regresijski koeficienti

Model pojemanja je narejen na podlagi obstoječih kart izoseist. Upoštevali smo 17 potresov: šest iz osrednje Slovenije, tri iz jugozahodne, šest iz vzhodne in dva iz Posočja. Najstarejši potres je iz leta 1897, najnovejši pa iz 2004. Za vse potrese so podani povprečni intenzitetni polmeri, nadžariščna intenziteta pa je med VI in VIII. Preizkusili smo tri uveljavljene oblike enačbe modela pojemanja intenzitete (na primer Sponheuer, 1960): Koevesligethyjev model in dva regresijska modela.

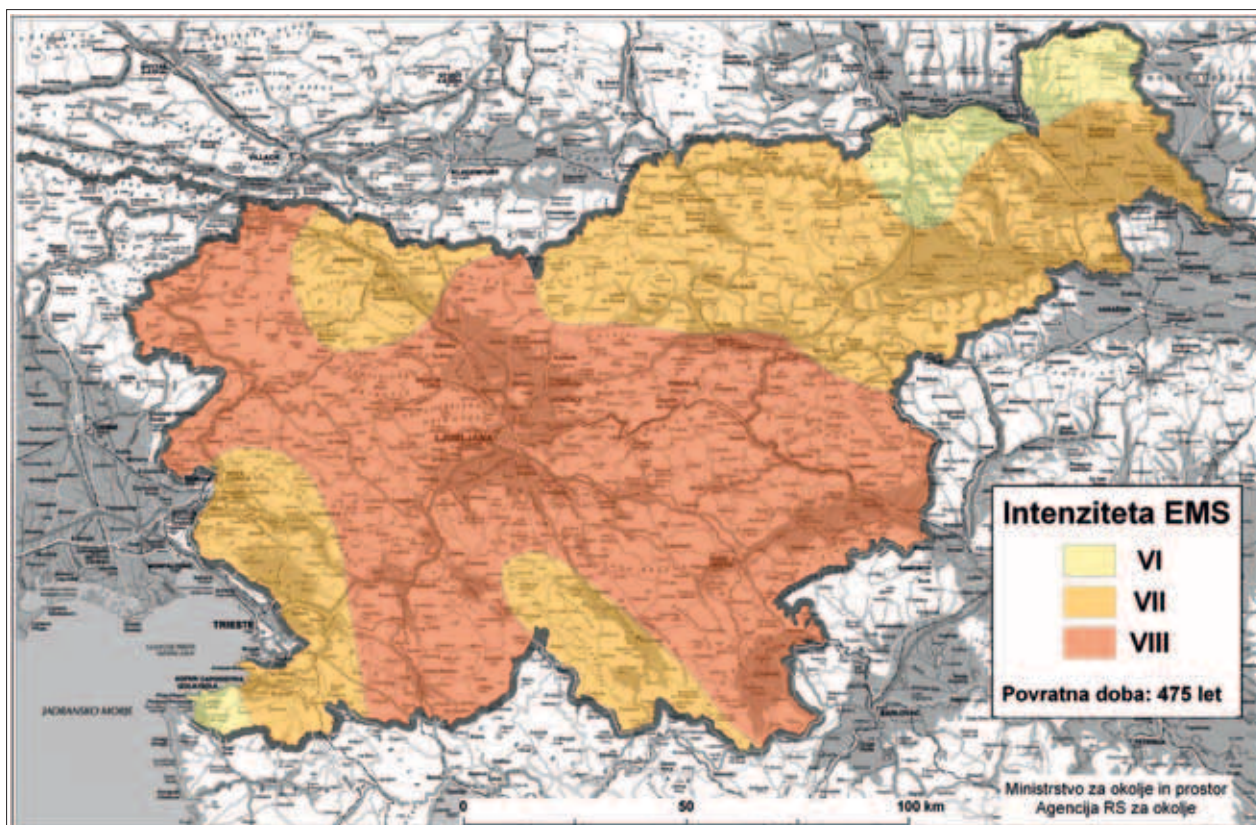
Izkazalo se je, da je Koevesligethyjev model zelo občutljiv, saj se z vsakim dodanim potresom zelo spreminja, prav tako pa so zelo velike razlike tudi v različnih smereh (azimutih). Tega modela zato nismo uporabili za ocenjevanje potresne nevarnosti, koeficiente drugih dveh modelov pa smo določili z regresijsko metodo. Zaradi manjše standardne napake smo za končni model pojemanja intenzitete izbrali model, ki intenziteto na dani lokaciji povezuje z nadžariščno intenziteto in razdaljo od nadžarišča.

Izdelava karte potresne intenzitete

Postopek ocenjevanja potresne intenzitete je enak postopku izračuna projektnega pospeška tal in je izpeljan iz izpopolnjenega Franklovega postopka glajenja potresne dejavnosti (Frankel, 1995; Petersen in sod., 2008; Lapajne in sod., 2003). Obravnavano območje je razdeljeno na mrežo celic, velikih 10 x 10 km, v katerih preštejemo pretekle potrese nad spodnjo mejo intenzitete. Število potresov v posamezni celici nato zgladimo z dvostopenjskim postopkom. Prva stopnja je krožno Gaussovo glajenje, s čimer upoštevamo napako pri določanju lokacije nadžarišča. Na drugi stopnji opravimo eliptično glajenje, pri čemer so osi elipse v smeri prevladujočih prelomov. Ustrezne enačbe glajenja so bile že večkrat objavljene (na primer Lapajne in sod., 2003). Letno verjetnost prekoračitve dane intenzitete ocenimo po standardnem Cornellovem (1968) postopku. Za izračun smo uporabili lasten računalniški program OHAZ (Zabukovec, 2000; Šket Motnikar in sod., 2007).

Z opisanim postopkom smo v vsaki točki mreže (središče celice) izračunali intenziteto, nato smo vrednosti z interpolacijo razširili po vsem obravnavanem ozemlju in jih zaokrožili na najbližje celo število. Slovenijo smo tako razdelili na območja, ki ustrezajo celoštevilskim stopnjam potresne intenzitete po EMS. Na končni karti (slika 3) smo ročno naredili še manjše popravke (Mladen Živčić, 2010, osebni pogovor); območje intenzitete VIII smo na primer razširili, tako da vsebuje ves Ravenski prelom (in ne le večjega dela).

Pas največje potresne nevarnosti (VIII EMS) poteka po osrednjem delu Slovenije od severozahoda proti jugu



Slika 3: Karta potresne intenzitete Slovenije za povratno dobo 475 let

Figure 3: Seismic intensity map of Slovenia for a return period of 475 years

in jugovzhodu države. Z oddaljevanjem od tega pasu se potresna nevarnost zmanjša na VII EMS, na skrajnem severovzhodnem in jugozahodnem delu pa je ocenjena na VI EMS.

Sklepne misli

Karta potresne intenzitete je nova informacija širši javnosti in predvsem civilni zaščiti pri načrtovanju ukrepov za preprečevanje in zmanjševanje škode ob potresih, ne sme pa se uporabljati za projektiranje. Zaradi primerljivosti z uradno karto projektnega pospeška tal smo uporabili verjetnostni postopek prostorskega glajenja potresne dejavnosti (Lapajne in sod., 2003) in ga prilagodili izračunu intenzitete. Prav tako smo smiselno uporabili iste vrednosti vhodnih parametrov kot za karto projektnega pospeška tal. Za izračun smo uporabili računalniški program OHAZ, uporabljen pri izračunu karte projektnega pospeška tal, ki ga je bilo treba prilagoditi posebni obliki modela pojemanja intenzitete (Šket Motnikar in sod., 2007). Verjetno smo s tem prvi uporabili postopek prostorskega glajenja potresne dejavnosti za intenziteto. Tako kot karta projektnega pospeška tal je tudi karta potresne intenzitete izračunana za povratno dobo 475 let, kar ustreza 90-odstotni verjetnosti, da vrednosti na karti v 50 letih ne bodo presežene. Pri izračunu so za vsako intenzitetno stopnjo upoštevana povprečna dejanska tla danega območja.

Viri in literatura

1. Cecić, I., 2010. Osebni pogovor.
2. Cornell, C. A., 1968. Engineering seismic risk analysis, Bull. Seism. Soc. Am. 58, 1583–1606.
3. Cornell, C. A., in Vanmarcke, E. H., 1969. The major influences on seismic risk. Proceedings of the Fourth World Conference on Earthquake Engineering, Santiago, Chile, A-1, 69–93.
4. Frankel, A., 1995. Mapping seismic hazard in the Central and Eastern United States. Seismological Research Letters, Vol. 66, No. 4, 8–21.
5. Grünthal, G. (ur.), 1998. European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98). Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie 15, Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxembourg, 99 str. in pripadajoča spletna stran: http://www.gfz-potsdam.de/portal/gfz/Struktur/Departments/Department+2/sec26/resources/documents/PDF/EMS-98_Original_englisch_pdf?binary=true&status=300&language=de.
6. Gutenberg, B., in Richter, C. F., 1944. Frequency of earthquakes in California. Bull. Seism. Soc. Am. 34, 185–188.
7. Lapajne, J., Šket Motnikar, B., Zupančič, P., 2001. Nova karta potresne nevarnosti – projektni pospešek tal namesto intenzitete. Gradbeni vestnik 50, 140–149.
8. Lapajne, J. K., Šket Motnikar, B., Zupančič, P., 2003. PSHA methodology for distributed seismicity. Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 93, No. 6, pp. 2502–2515.

9. Lapajne, J., 2007. Intenziteta potresa in makroseizmična lestvica. *Ujma* 21, 130–132.
10. Petersen, M. D., Frankel, A. D., Harmsen, S. C., Mueller, C. S., Haller, K. M., Wheeler, R. L., Wesson, R. L., Zeng, Y., Boyd, O. S., Perkins, D. M., Luco, N., Field, E. H., Wills, C. J., in Rukstales, K. S., 2008. Documentation for the 2008 Update of the United States National Seismic Hazard Maps. Open-File Report 2008–1128, U. S. Department of the Interior in U. S. Geological Survey, Virginia.
11. Poljak, M., Zupančič, P., Lapajne, J. K., Šket Motnikar B., 2000. Seismotectonic input for spatially smoothed seismicity approach. *Proceedings of Workshop Seismicity modelling in seismic hazard mapping*, Poljče, 117–124.
12. Ribarič, V., 1982. Seizmičnost Slovenije – Katalog potresov. Seizmološki zavod SR Slovenije, Ljubljana, 649 str.
13. Ribarič, V., 1992. Seizmičnost Slovenije – Katalog potresov, Dodatek 1. Seizmološki zavod SR Slovenije, Ljubljana, 145 str.
14. Ribarič, V., 1994. Seizmičnost Slovenije – Katalog potresov, Dodatek 2. Seizmološki zavod SR Slovenije, Ljubljana, 91 str.
15. Ribarič, V., Hadžijevski, V., Pekevski, D., Jorgić, M., Kuk, V., Šupič, V., Vukašinović, M., 1987. Seizmološke karte SFR Jugoslavije i Tumač. Zajednica za seizmologiju SFR Jugoslavije, Beograd.
16. SIST EN 1998-1:2005. Evrokod 8 – Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij – 1. del: Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe, slovenski standard, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana.
17. SIST EN 1998-1:2005/oA101:2005. Evrokod 8 – Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij – 1. del: Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe – Nacionalni dodatek. Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana.
18. Sponheuer, W., 1960. Methoden zur Herdtiefenbestimmung in der Makroseismik. *Freiberger Forschungshefte*, C 88, Geophysik, Akademie Verlag, Berlin, 120 str.
19. Šket Motnikar, B., Zupančič, P., Kuka, N., Zabukovec, B., 2007. OHAZ version 6.0. Computer Program for Seismic Hazard Calculation, User's Manual, ARSO, ISA, Ljubljana.
20. Uradni list SFRJ, 31/1981, 49/1982, 29/1983, 21/1988 in 52/1990, Pravilnik o tehničnih normativih za graditev objektov visoke gradnje na seizmičnih območjih s spremembami in dopolnitvami.
21. Uradni list RS, št. 101/2005. Pravilnik o mehanski odpornosti in stabilnosti objektov.
22. Weichert, D. H., 1980. Estimation of the earthquake recurrence parameters for unequal observation periods for different magnitudes. *Bull. Seism. Soc. Am.* 70, 1337–1346.
23. Wells, D. L., Coppersmith, K. J., 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull. Seism. Soc. Am.* 84, št. 4, 974–1002.
24. Zabukovec, B., 2000. OHAZ – A computer program for spatially smoothed seismicity approach, *Proceedings of Workshop Seismicity modeling in seismic hazard mapping*, Poljče, 135–140.
25. Živčič, M., 1992. Katalog potresov, Projekt NEK-PSHA92. Univerza v Ljubljani, FAGG – IKPIR, Ljubljana.
26. Živčič, M. (ur.), 1996. Quantitative Seismic Zoning of the Circum Pannonian Region, QZEZ-CIPAR, Scientific report on Task A: Seismicity and Geodynamics. *Comm. Eur. Comm., Project CIPA CT 94-0283*, Ministrstvo za okolje in prostor, Uprava RS za geofiziko, Ljubljana.
27. Živčič, M., 2010. Katalog potresov, interna dokumentacija, ARSO.
28. Živčič, M., 2010. Osebni pogovor.