

VLADIMIR MIHAILOV*
DRAGUTIN CVIJANOVIC**

SEIZMIČNOST JUŽNOG JADRANA S POSEBNIM OSVRTOM NA POJAVU RAZORNIH POTRESA U PROŠLOSTI

1. U V O D

Da bi se dobila jasnija predodžba o tome kakva opasnost od potresa prijete našim krajevima, posebno onima uz obalu južnog Jadrana, potrebno je vratiti se u prošlost. Naime, prema rezultatima istraživanja u okviru međunarodnog projekta »Istraživanja seizmičnosti Balkanskog poluotoka«, koji je završen 1974. godine (UNDP/UNESCO, 1974), prvi podaci o razornim potresima na Balkanskom poluotoku potiču iz 2100 godine p.n.e. Od te godine pa sve do 1400 god. p.n.e. u području otoka Krete, spominje se 8 razornih potresa, od kojih 5 intenziteta X, a jedan čak XII stupnjeva MCS ljestvice. Nakon 1400 god. p.n.e. do početka n.e. zna se još za 23 takva potresa s epicentrom na području Balkana i zapadnog dijela Male Azije. U narednih 1900 godina, n.e. zna se još za oko 800 razornih potresa, ili jedan takav potres svake 2 do 3 godine. Spomenute brojke nemaju poseban statistički značaj, pogotovo one iz daleke prošlosti, no one sigurno ukazuju na slijedeće:

- da živimo na području u kome su razorni potresi stalna pojava, i
- da su takvi potresi relativno česta pojava.

Do istog zaključka može se doći i na osnovi najnovijih pouzdanih podataka o potresima, koji su se dogodili u ovom stoljeću.

* Viši naučni saradnik, Institut za zemljotresno inženjerstvo i inženjersku seizmologiju Univerziteta »Kiril i Metodij«, Skopje.

** Znanstveni suradnik, Građevinski institut. Fakultet građevinskih znanosti Sveučilišta u Zagrebu.

Uzmu li se u obzir samo oni najjači ($M \geq 6,5$; $I_0 \geq 9$ stupnjeva MCS ljestvice) u razdoblju od 1901. do 1970. godine, takvih potresa na području Balkana i zapadnog dijela Male Azije bilo je 70. Njihov prostorni raspored prikazan je na Sl. 1. Žarišta tih potresa uglavnom su bila u južnom dijelu Balkanskog poluotoka (izuzev područja Vrancea u Rumunjskoj) i u Maloj Aziji. Međutim, potresi najveće magnitude $M = 7,8$, odnosno $M = 7,7$ imali su žarišta na području Bugarsko-Jugoslavenske granice kod Berova i Pehčeva (4. travnja 1904. god.) i kraj Cipra (26. lipnja 1926. god.). Ostali potresi nisu prelazili iznos magnitude $M = 7,5$ što se može smatrati kao približna gornja granica jačine potresa u tom području. Interesantan je i vremenski slijed tih razornih potresa. Moglo bi se reći da se oni događaju skoro kontinuirano i najveći razmak između dva razorna potresa bio je samo 3 godine, a u nekim godinama bilo ih je i više (najviše 4 takva potresa u jednoj godini).

Za nas je značajno da je gornja geografska granica događanja takvih potresa negdje oko 43 paralele, a najugroženija područja su Makedonija i priobalni dio Južnog Jadrana.

2. RAZORNI POTRESI NA PODRUČJU JUŽNOG JADRANA

Potresi u južnom dijelu Jadrana, u predjelu od Dubrovnika preko Boke Kotorske do Ulcinja i Skadra nastaju na mjestu sučeljavanja Jadranske depresije i Dinarida. Prvi podatak o razornom potresu u tom području potječe iz 373. god. p.n.e., kada je porušen grad Epidaurum, današnji Cavtat. Od tada pa do 1520. god. n.e. zabilježeno je još 14 takvih potresa, od kojih se mogu istaći oni iz 344. (444. ili 1444. god. n.e.) kada je porušen Ulcinj i 518. kada je porušen grad Dioklea sjeverno od Skadarskog jezera (isti potres porušio je grad Skupi, današnje Skopje, i vjerojatno mu je žarište bilo u području Skopske Crne Gore).

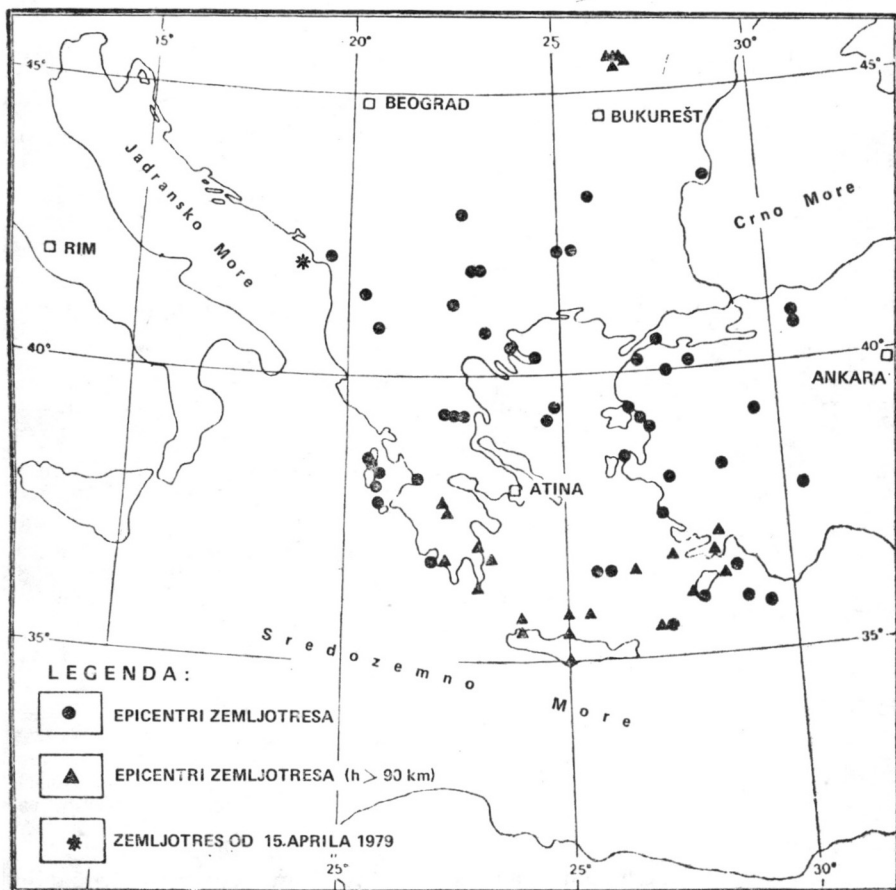
Prvi, pouzdaniji podatak o razornim potresima u Južnom Jadraniu je iz 1520. godine, kada je stradao grad Dubrovnik i kada je po nekim podacima bilo 18 mrtvih, a po drugima 150 mrtvih i 400 ranjenih. Štete od potresa bile su i u Kotoru. Godine 1563. žarište razornog potresa bilo je kraj Kotora. Poginulo je više od 150 ljudi, srušeno je 168 kuća, a malo ih je ostalo neoštećeno.

Značajna je i serija potresa od 1608. do 1610. godine. Žarišta su im vjerojatno migrirala na liniji Kotor—Herceg Novi. Porušene su i oštećene mnoge kuće, srušen je most između kopna i otoka sv. Marko, bilo je i mrtvih.

Slično se događalo u razdoblju od 1631. do 1632. godine. Dubrovnik, Kotor, Herceg Novi i Budva stalnim i jakim potresima bili su na pola porušeni, vjerojatno je bilo i poginulih (spominje se broj »...više od tisuću«).

Najstrašnji od svih bio je veliki dubrovački potres od 6. travnja 1667. godine. U Dubrovniku je poginulo oko 3—5 tisuća ljudi, grad je potpuno porušen; u Kotoru je bilo 200 mrtvih, srušeno je oko 2/3 kuća, sve palače i crkve i gradske zidine; u Budvi je poginulo 70 ljudi, a ostalo je samo 5 kuća nesrušenih; u Perastu je bilo 40 mrtvih; u Herceg Novom ostalo je samo 5—6 kuća, a štete je bilo u Baru, Ulcinju i Skadru te na sjeveru od Makarske.

Iza velikog dubrovačkog potresa nastalo je relativno dugo razdoblje smanjene seizmičke aktivnosti sve do 1905. godine, kada je razoran potres magnitude $M = 6,6$ i intenziteta IX stupnjeva MCS razrušio grad Skadar.



Sl. 1. Epicentralna karta

Prave razmjere katastrofe, koje može izazvati jaki potres, mogle su se sagledati tek nakon pojačane seizmičke aktivnosti 1979. godine u Crnogorskom Primorju. Glavni potres ($M = 7,1$, $I_0 = IX-X$ stupnjeva MCS, $h = 17$ km) i serija naknadnih potresa, koji su intenzivnije trajali nekoliko mjeseci, izazvali su ogromne štete, posebno u predjelu od Boke Kotorske do ušća rijeke Mati u Albaniji, a poginulo je 129 ljudi.¹ Potresi su potpuno uništili stare gradove Ulcinj, Bar, Budvu i Kotor, a posebno su jako oštećeni mnogi kulturnopovijesni spomenici. Iz priloženog popisa najjačih potresa s epicentrom u Južnom Jadranu i susjednim područjima vidi se, da su se oni najčešće pojavljivali svakih 11 do 75 godina. Iznimno je vremenski razmak između velikog dubrovačkog potresa 1667. i potresa u Herceg Novom 1780. bio 113 godina, a samo 1 godina između debarskog 1967. i rumijskog 1968. godine.

3. SEIZMIČKI HAZARD

Matematički model seizmičkog hazarda koji je korišćen u ovoj studiji omogućuje teorijsku i kvantitativnu analizu vjerojatnosnih karakteristika pojave maksimalnih ubrzanja gibanja tla za promatranu lokaciju sa određenim stupnjem vjerojatnosti za određeni vremenski period.

Najjači potresi s epicentrom u području južnog Jadrana

Datum	Vrijeme GMT	Epicentar h	M	I_0	Bilješka	
1	2	3	4	5	6	7
1520 05 17		42,6 18,1			IX	Dubrovnik, 18 mrtvih, pojava tsunamija
1563 06 13	12	42,4 18,8			IX	Kotor, više od 150 mrtvih, 2/3 zgrada porušeno
1608 07 03		42,4 18,7			VIII	Hercegnovi; Kotor, bilo je ljudskih žrtava, potresi su trajali do 1610. god.
1632		42,5 18,7			(VIII)	Dubrovnik, Kotor, česti potresi porušili su znatan broj kuća, bilo je žrtava.
1667 04 06	08 54	42,6 18,1			X	Dubrovnik, oko 3—5 tisuća mrtvih, grad je potpuno porušen, pojava tsunamija, Kotor 200, Budva 70, Perast 40 mrtvih, razaranja su bila od ušća Neretve do Ulcinja.

¹ Ukupni broj poginulih odnosi se na Crnu Goru (94 žrtve) i Albaniju (35 žrtava). Podaci o žrtvama u Albaniji dobiveni su od Dr E. Sulstarove, direktora seizmološke opservatorije pri Akademiji nauka, Tirana, za vrijeme posjete albanske delegacije Titogradu.

1	2	3	4	5	6	7
1780 09 21	13 15	42,4	18,5		VIII	Hercegnovi, 3 mrtva, pojava tsunamija, pukotine u tlu, odroni
1855 07 03		42,0	19,5		IX	Skadar
1905 06 01	04 42 15	42,0	19,5	18	6,6	IX—X Skadar
1921 03 30	15 05	41,7	20,5	13	5,8	VIII—IX Korab
1967 11 30	07 23 50	41,4	20,45	17	6,6	IX Debar
1968 11 03	04 49 34	42,0	19,3	20	5,5	VII—VIII Rumija
1979 04 15	06 19 48	42,0	19,04	17	7,1	IX—X Crnogorsko Primorje, 129 mrtvih, razaranja od Dubrovnika do Skadra, veliki odroni stijena i zemlje, aktivirana klizišta, pukotine u tlu, promjena nivoa mora, veliki broj naknadnih potresa.

U praktičnom postupku metodologija definiranja seizmičkog hazarda uključuje:

- prikupljanje empirijskih podataka o seizmičkim i tektonskim karakteristikama područja,
- definiranje seizmičkih izvora,
- određivanje čestine potresa pojedinih seizmičkih izvora,
- izbor analitičkog izraza za opadanje maksimalnog ubrzanja gibanja tla od žarišta,
- vjerojatnosni model generiranja pojave potresa,
- distribucija vjerojatnosti maksimalnog ubrzanja u zavisnosti od povratnog perioda i
- određivanje prihvatljivog seizmičkog hazarda za različite povratne periode i nivoe vjerojatnosti.

Kombiniranjem parametara koji definiraju seizmički izvor sa zavisnostima čestine potresa i opadanja maksimalnog ubrzanja s udaljenošću od žarišta uz primjenu pojedinih modela generiranja potresa, kao na primjer, Poissonov model, moguće je formulirati rješenje.

Parametri koji definiraju seizmički hazard, odnosno vjerojatnost pojave zemljotresa, općenito su: kumulativna vjerojatnost maksimalnog ubrzanja tla, povratni period zemljotresa određenog intenziteta, i nivo vjerojatnosti maksimalnog ubrzanja tla u zavisnosti od povratnog perioda.

Ti parametri koriste se u praktične svrhe, i to: za izradu karata seizmičkog hazarda i za izradu dijagrama povratnog perioda maksimalnih ubrzanja tla.

Najbolji način za prezentiranje seizmičkog hazarda, odnosno distribuciju pojedinih parametara gibanja tla za određeno geografsko područje je karta seizmičkog hazarda na kojoj se efekti zemljotresa prikazuju u najpogodnijem obliku u zavisnosti od namjene karte. Smatra se, da su maksimalno ubrzanje tla za različite periode i nivo vjerojatnosti najupotrebljiviji za analizu i projektiranje konstrukcija. Potrebne informacije za izradu ovih karata dobivamo preko funkcije kumulativnih distribucija maksimalnih ubrzanja tla.

Praktični značaj dijagrama povratnih perioda maksimalnih ubrzanja tla sastoji se u tome što se pomoću njih može odrediti i uspoređivati relativna seizmička aktivnost i nivo seizmičkog hazarda pojedinih lokacija.

4. MODEL SEIZMIČNOSTI

Šire područje Južnog Jadrana (od Dubrovnika do Ulcinja) predstavlja jednu od seizmički najaktivnijih zona kod nas, sa složenim uslovima nastajanja zemljotresa. Kroz njega se protežu nekoliko jasno izdiferenciranih seizmičkih zona ispresjecanih sa više poprečnih rasjeda. Na taj način se formiraju tzv. seizmotektonski čvorovi, gdje nastaje najveći broj jakih zemljotresa (područje Skadarskog jezera, Boke Kotorske, Crnogorsko primorje, itd.).

Složenost tektonske strukture, povezane sa nastankom zemljotresa, njihov mehanizam, energija koja se oslobađa u žarištu, rasprostiranje talasa od žarišta do pojedinih lokacija i niz drugih poznatih i manje poznatih činioca, koji prate pojavu zemljotresa na razmatranom području Južnog Jadrana, vrlo je teško definirati nekim od poznatih modela teorije vjerovatnoće i matematičke statistike, bez uvođenja pojedinih pretpostavki odnosno pojednostavljenja.

Istraživanja povezana sa mehanizmom nastanka zemljotresa i karakteristikama pojedinih seizmičkih izvora koji su u ovoj fazi istraživanja, zbog nedovoljnog broja podataka, ostale nedovoljno proučene bile su glavni, no ne i jedini, razlog za uvođenje izvjesnih pretpostavki kod definiranja modela seizmičnosti šireg područja Južnog Jadrana.

Osnovne pretpostavke, koje su usvojene u ovoj studiji, su slijedeće:

- Seizmički izvori definirani su pomoću linijskih i površinskih modela izvora.
- Seizmičnost svakog seizmičkog izvora definirana je logaritamsko-linearnim izrazom za čestinu zemljotresa

$$\log N'(M) = a' + \beta M$$

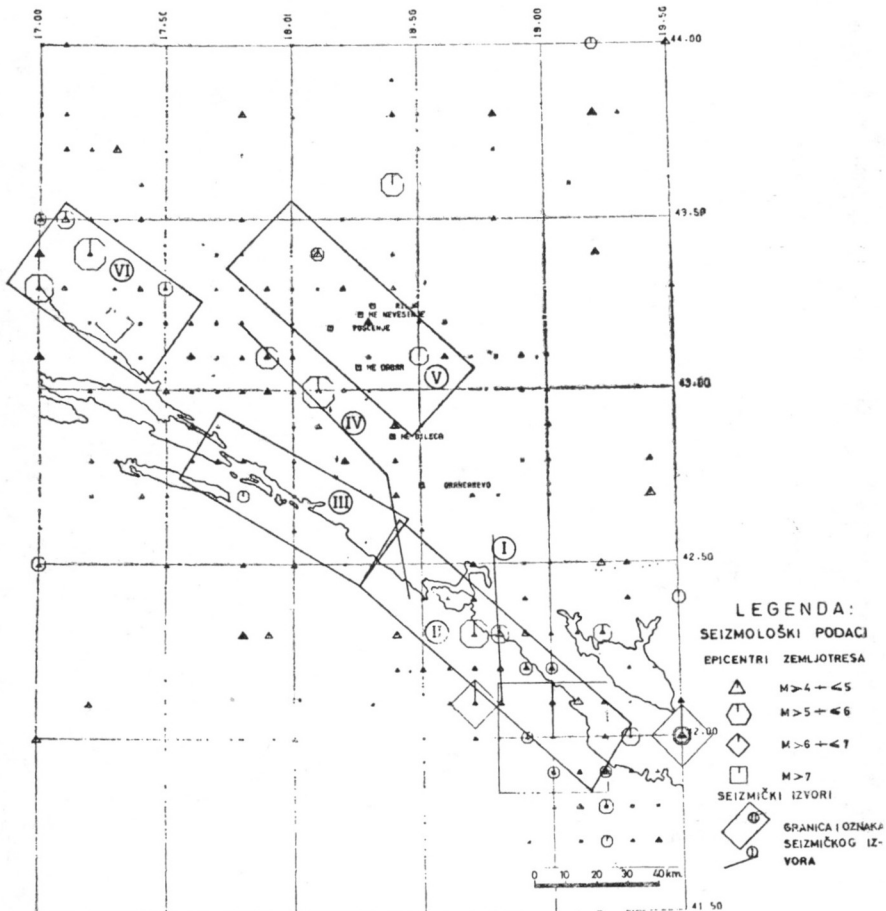
koji su dobiveni analizom postojećih podataka za pojedine izvore.

- Kao analitički izraz za opadanje maksimalnog ubrzanja tla sa udaljenošću od žarišta uzet je izraz L. Esteve:

$$a = \frac{5000 \exp(0.8 M)}{(R_h + 40)^2}$$

- Za generiranje pojave zemljotresa usvojen je Poissonov model:

$$P_n(t) = \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^n}{n!}$$



Sl. 2. Model seizmičnosti južnog dela Jadranskog primorja

Za proračun seizmičkog hazarda na području Južnog Jadrana, korišteni su pouzdani podaci o potresima iz razdoblja od 1901. do 1980. god. Najprije su definirani seizmički izvori: linijski i površinski (tablica 1) ovisno o prostornim dimenzijama i formi epicentralnih područja, odnosno zona pojačane seizmičnosti. Linijski su: Kotor—Grahovo i Zubačko—Ljubuški, a površinski: Crnogorsko primorje, Dubrovnik—Ston i nešto sjevernije Bileća—Nevesinje i Biokovo (Sl. 2).

Aktivnost svakog seizmičkog izvora (tablica 2) definirana je funkcijom ovisnosti čestine $N(M)$ i magnitude M potresa: $\ln n(M) = \alpha' + \beta M$, s tim da je za interval magnituda uzet iznos $0,2 M$, a za čestine $N(M)$ uzete su kumulativne vrijednosti (Sl. 3).

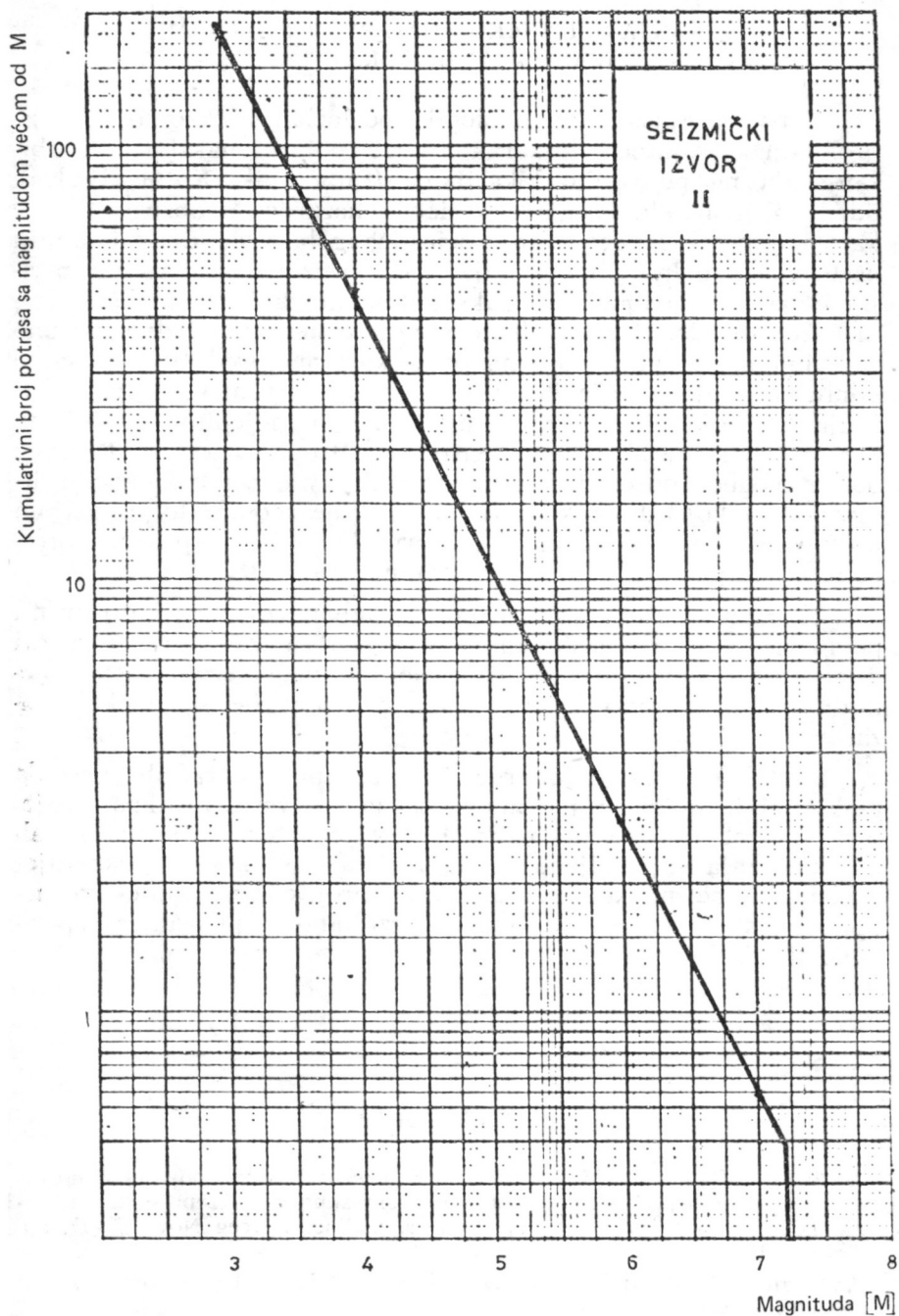
U tablicama 1 i 2 date su osnovne karakteristike pojedinih seizmičkih izvora i brojčane vrijednosti koeficijenata α' i β za sve izvore.

Tablica 1

Red. br.	SEIZMIČKI IZVOR			Broj potr.	Prosječna dubina žarišta h (km)	Maks. magnit. (RM)	
	Oznaka	Naziv	Tip			Opaž. vrijednost	Račun. vrijednost
1	I	Kotor—Grahovo	linijski	18	14,5	5,5	6,5
2	II	Crnogorsko Primorje	površinski	77	13,5	7,0	7,2
3	III	Dubrovnik Ston	površinski	43	17,8	6,5	6,8
4	IV	Zubačko-Ljubuški	linijski	27	15,6	6,0	6,0
5	V	Bileća—Nevesinje	površinski	28	13,0	5,4	5,6
6	VI	Biokovo	površinski	83	16,5	6,2	6,5

Tablica 2

Red. br.	SEIZMIČKI IZVOR			Dužina (km)	Površ. (km)	$\ln N(M) = \alpha' + \beta M$	
	Oznaka	Naziv	Tip			α'	β
1	I	Kotor—Grahovo	linijski	55		4.340807	— 1.569614
2	II	Crnogorsko Primorje	površinski		2500	4.952847	— 1.387258
3	III	Dubrovnik—Ston	površinski		1700	1.794386	— 1.106054
4	IV	Zubačko-Ljubuški	linijski	105		3.797539	— 1.351878
5	V	Bileća — Nevesinje	površinski		2500	4.246681	— 1.475841
6	VI	Biokovo	površinski		1700	5.384847	— 1.508600



Sl. 3. Regresija čestine potresa za seizmički izvor Crnogorskog primorja

5. KARTA SEIZMIČKOG HAZARDA I DIJAGRAMI MAKSIMALNIH UBRZANJA

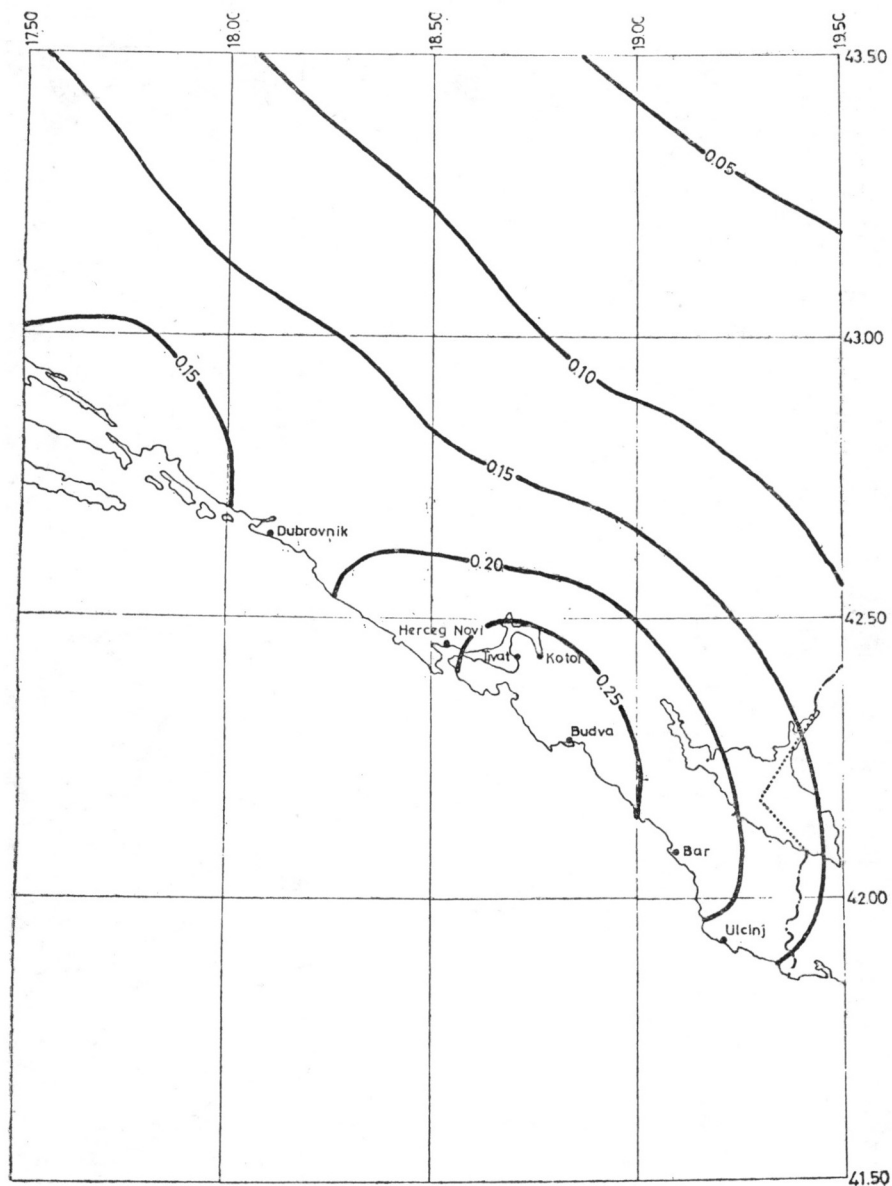
Naprijed opisana metodologija poslužila je kao osnova za proračun vjerojatnosnih karakteristika pojave maksimalnih ubrzanja tla na pojedinim lokacijama (Dubrovnik, Kotor, Budva), odnosno za izradu karata seizmičkog hazarda. S obzirom da je kao parametar za definiranje seizmičkog hazarda u ovoj studiji uzeto maksimalno ubrzanje tla, karte seizmičkog hazarda predstavljene su distribucijom maksimalnih ubrzanja za različite vremenske periode, tj. za različite povratne periode. Ovdje posebno spominjemo izolinije koje na ovim kartama predstavljaju samo konturne linije označenih brojnih vrijednosti maksimalnih ubrzanja tla koje nisu istovremeno i granice pojedinih seizmičkih zona i kao takve bi ih trebalo tretirati. Drugim riječima, to znači da je moguće odrediti maksimalno ubrzanje tla za lokaciju između bilo koje dvije konturne linije linearnom interpretacijom njihovih brojnih vrijednosti. Konturne linije imaju posebne brojčane vrijednosti za različite povratne periode (Sl. 4 i 5).

Za gradove Dubrovnik, Kotor i Budvu izrađeni su dijagrami povratnih perioda maksimalnih ubrzanja tla (sl. 6). Na osnovu tih dijagrama moguće je uspoređivanje relativne seizmičnosti pojedinih gradova, odnosno uspoređivanje njihovog seizmičkog hazarda.

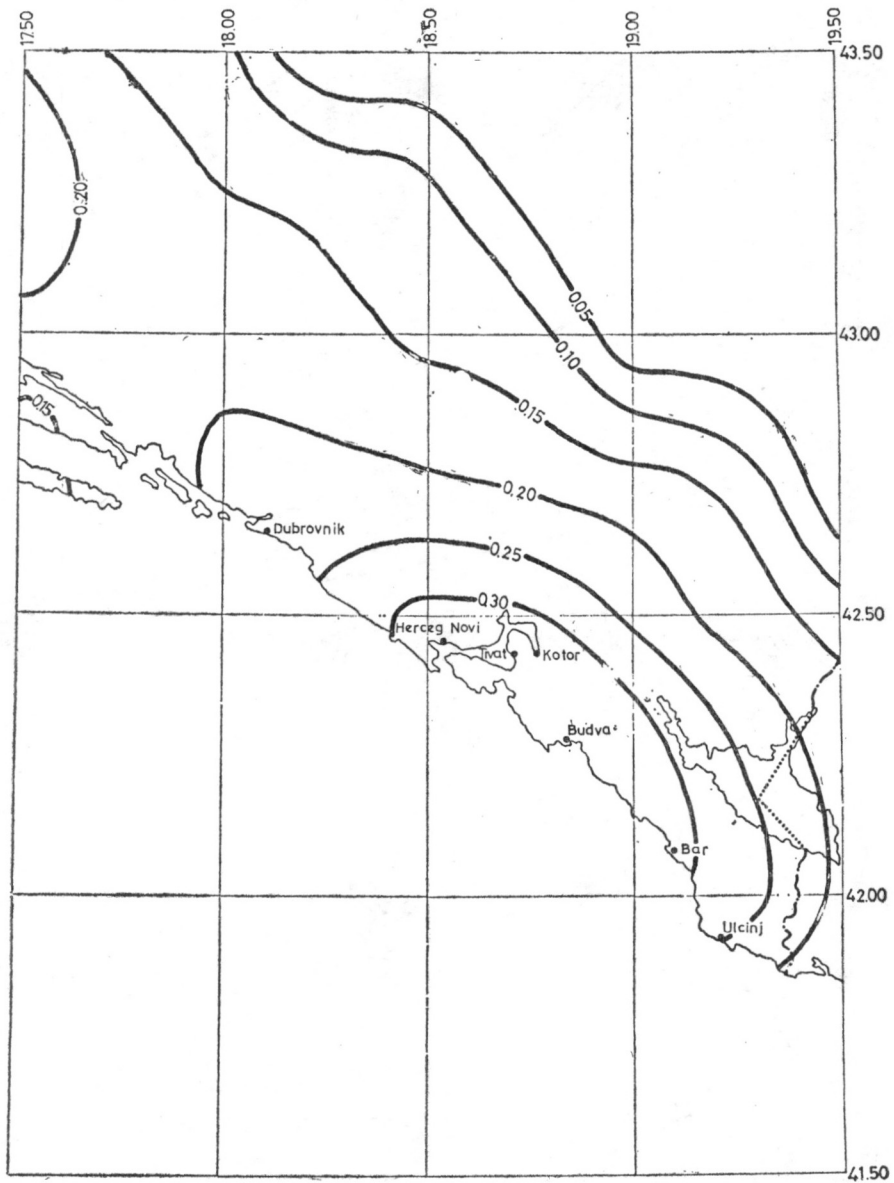
Karte seizmičkog hazarda i dijagrami povratnih perioda maksimalnih ubrzanja tla odnose se na tzv. čvrsto tlo, kao posljedica upotrebe analitičkog izraza L. Esteve za opadanje maksimalnog ubrzanja sa udaljenošću od žarišta. Za potrebe mikrorajonizacije ili seizmičkog parametra za projektiranje objekata neophodne su izvjesne modifikacije rezultata uključivanjem specifičnosti lokalnih uvjeta tla.

LITERATURA

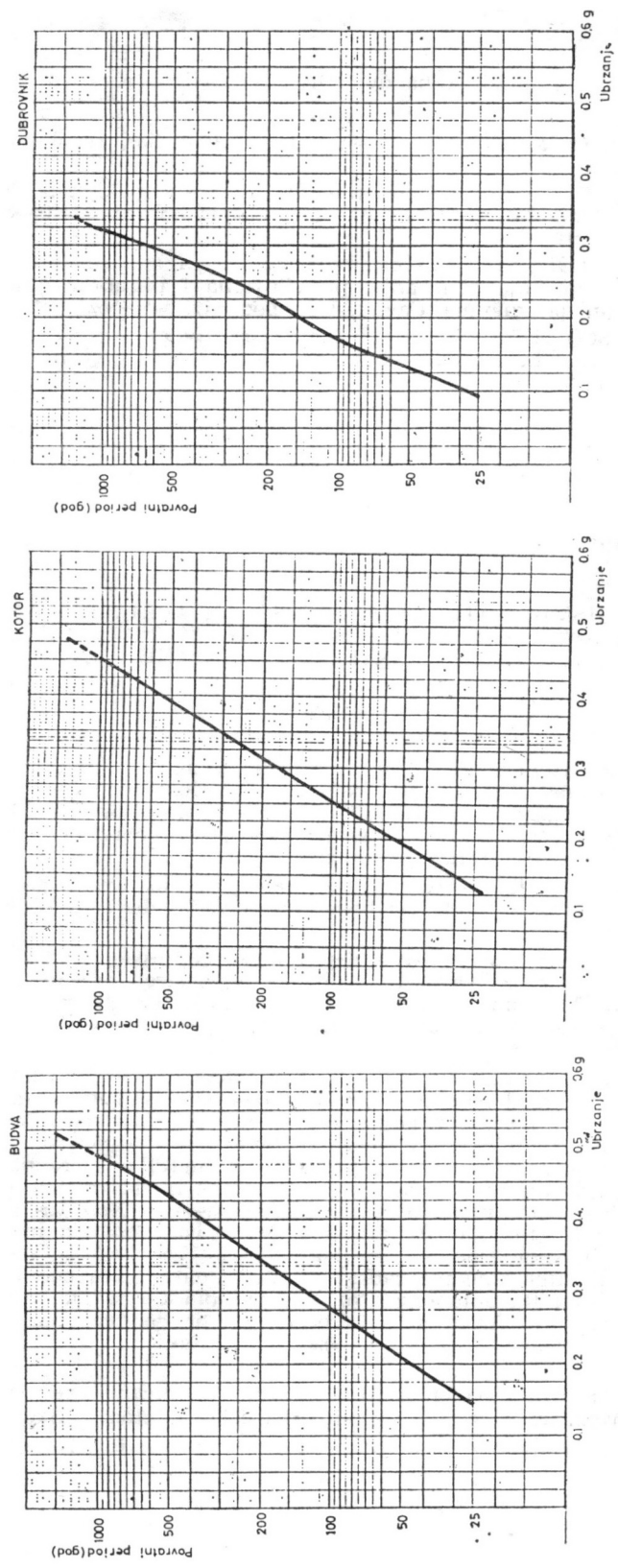
1. Cvijanović D., Živčić, M., Prelogović, E. (1980): Katalog potresa Crnogorskog Primorja 1979. god., Jugoslovenski simpozij o zemljotresu u Crnogorskom Primorju 15. aprila 1979. godine, Herceg Novi 15—17. aprila 1980.
2. Cvijanović, D. (1980): Seizmičnost područja SR Hrvatske. Geofizički zavod PMF Sveučilišta u Zagrebu.
3. Esteve, L. (1973): Seismic Risk, Design Spectra and structural Reliability. 5th World Conf. on Earthquake Engineering.



Sl. 4. Karta seizmičkog hazarda — južnog dela Jadranskog primorja. Distribucija maksimalnih ubrzanja tla za povratni period od 100 godina



Sl. 5. Karta seizmičkog hazarda — južnog dela Jadranskog primorja. Distribucija maksimalnih ubrzanja tla za povratni period od 200 godina



Sl. 6. Dijagrami povratnih perioda maksimalnih ubrzanja tla (osnovna stena) na lokacijama

4. Mihailov, V. (1978): Seizmički rizik u novoj tehničkoj regulativi, IZIIS, Skopje, 1978.
5. Mihailov, V. (1978): Aseizmičko projektovanje i seizmički rizik. Savetovanje problematike projektovanja u aseizmičkom građenju, Sarajevo, 1978. god. str. 55—70.
6. Mihailov, V. (1977): Osnovni elementi metode za analizu seizmičkog rizika. Savjetovanje planiranja, projektiranja i izgradnje objekata na seizmičkim područjima, Cavtat, 1977. god. str. 548—562.
7. UNDP/UNESCO (1974): Survey of the Seismicity of the Balkan Region. Catalogue of Earthquakes. Part I, 1901—1970., Part II prior to 1901, Skopje, 1974.

Vladimir MIHAJLOV¹
Dragutin CVIJANOVIĆ²

THE SEISMIC NATURE OF THE SOUTH ADRIATIC COAST
WITH SPECIAL REFERENCE TO THE OCCURRENCE OF
DEVASTATING EARTHQUAKES IN THE PAST

Summary

The seismicity of a region can be considered as a set of characteristics of earthquakes observed as space and time phenomenon. The main objective of the investigations of seismicity is to establish some regularities in the occurrence of earthquakes as well as to apply the results obtained in protection against devastating earthquake effects.

Our country is located within the Mediterranean—Transasiatic seismically active zone, its littoral part being subjected to the effects of devastating earthquakes.

In the contact zone between the Adriatic depression and the Dinarides, there is a belt of increased seismic activity, stretching in north west — south east direction covering its littoral part, islands, a part of the Adriatic sea bottom partly entering deep along the valleys of rivers Krka, Cetina, Neretva and Bojana.

The devastating earthquakes initiated extensive seismological investigations in general, and especially investigations on seismicity of this region. After the disastrous earthquake of Zagreb in 1880, M. Krstic worked on earthquake data compilation and even at the end of that century he gave a first presentation of the seismicity of Croatia and the surrounding area, including the Adriatic littoral part (Kispatic, 1891). In this region, he relates the earthquakes to the presence of the Makarska—Vis—Neretva—Dubrovnik seismic fault. Also the contribution of J. Mihailović (1940) in investigation of seismic activity of Vinodol, the Hvar island (1939, 1946) and the South Adriatic (1947). After him, the causes for earthquake occurrence should be looked for within the interaction of »seismic blocks«, while most of the earthquakes and the strongest ones occur in the contact zones of these blocks called »seismigenic zones« or »seismic zones«.

¹ Senior scientific collaborator, Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology, University »Kiril and Metodij«, Skopje.

² Scientific collaborator, Institute of Civil Engineering, Zagreb.

From historic records of our coastal cities like Rijeka, Zadar, Dubrovnik, Kotor and Ulcinj it is seen that they have been destroyed by disastrous earthquakes for many times which points to the presence of permanent, very active seismotectonic processes in that region.

For better understanding of the seismicity of the Adriatic littoral part, historical records of past earthquakes are very significant and they are preserved in rich archives in the major cities like Dubrovnik, Split, Zadar and Rijeka.

The increased seismic activity of the Montenegrin coast in 1979 is one more warning that earthquake effect parameters should be incorporated in the spatial planning, design and construction in order to minimize the devastating earthquake consequences.

