Homogeniziranje i analiza kataloga potresa na području Hrvatske

Ivanković, Ljiljana

Master's thesis / Diplomski rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:710816

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Ljiljana Ivanković

HOMOGENIZIRANJE I ANALIZA KATALOGA POTRESA NA PODRUČJU HRVATSKE

Diplomski rad

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

SMJER: SEIZMOLOGIJA I FIZIKA ČVRSTE ZEMLJE

Ljiljana Ivanković

Diplomski rad

Homogeniziranje i analiza kataloga potresa na području Hrvatske

Voditelj diplomskog rada: doc. dr. sc. Snježana Markušić

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____
2. _____
3. _____
4. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2017.

Sažetak

U ovom je radu provedeno homogeniziranje kataloga potresa Hrvatske tako da je svim potresima pridijeljena veličina momentne magnitude. Potom je opisana seizmičnost Hrvatske. Iz kataloga su izdvojeni glavni potresi te je određena potpunost kataloga za deset magnituda potpunosti. Provedena je i statistička analiza potpunih kataloga te su izračunati parametri *a* i *b* Gutenberg – Richterove relacije, koji se koriste pri procjeni seizmičkog hazarda.

Harmonization and analysis of earthquake catalogue for Croatia

Abstract

The earthquake catalogue for Croatia is harmonized by determining the moment magnitude for all earthquakes. Also, the seismicity of Croatia is described. The catalogue is desclustered and completeness intervals for ten magnitude thresholds are estimated. The complete catalogue is statistically analysed and parameters *a* and *b* from Gutenberg – Richter relation, which are used for the seismic hazard assesment, are calculated.

Sadržaj

1. Uvod 6
2. Opažanje potresa 7
   2.1. Veličine kojima opisujemo jakost potresa 7
   2.2. Sustavno opažanje potresa na području Hrvatske i Hrvatski katalog potresa 8
3. Uniformiranje kataloga uvođenjem momentne magnitude 10
   3.1. Konverzija lokalne u momentnu magnitudu 10
   3.2. Seizmičnost Hrvatske 17
      3.2.1. Povijesna seizmičnost 18
      3.2.2. Seizmičnost nakon 1900. godine 20
4. Analiza kataloga potresa 21
   4.1. Izdvajanje kataloga glavnih potresa 21
   4.2. Potpunost kataloga 24
   4.3. Koeficijenti Gutenberg – Richterove relacije 36
5. Zaključak 44
6. Literatura 45

1. Uvod

Potres je prirodna pojava koja se ne može ni spriječiti ni predvidjeti. Neka su područja seizmički aktivnija od drugih i veća je opasnost od štete uzrokovane potresom. Smanjenje štete može se postići protupotresnom gradnjom. Međutim, što je zgrada otpornija na potres, to ju je skuplje sagraditi. Bilo bi idealno kad bi se mogla predvidjeti najjača trešnja tla na kojem je zgrada sagrađena u vremenu u kojem bi se ona trebala koristiti. Iako se potres ne može predvidjeti, može se procijeniti seizmički hazard. Procjenom seizmičkog hazarda na nekom se prostoru određuje kolika je vjerojatnost premašaja određene vrijednosti akceleracije tla u odabranom vremenskom intervalu. Ako je hazard poznat, trebalo bi se graditi tako da građevina za svog životnog vijeka može izdržati maksimalnu akceleraciju tla procijenjenu s velikom vjerojatnošću.

U procjeni hazarda važnu ulogu ima ujednačen i potpun katalog potresa. On sadrži podatke o seizmičnosti, pa se iz njega može detektirati koja su područja seizmički najaktivnija, a time i najugroženija od štete uzrokovane potresom. Radi se i statistička analiza kataloga potresa, pa se dobiveni parametri koriste u procjeni seizmičkog hazarda. U Hrvatskom katalogu potresa (Arhiv Geofizičkog zavoda, PMF) nalaze se podaci o potresima koji su se dogodili na širem području Hrvatske. Određeno im je vrijeme nastanka, epicentar, žarišna dubina, lokalna magnituda i intenzitet. Bolje bi bilo imati katalog s momentnom magnitudom jer se momentna magnituda koristi u procjeni hazarda i katalog s momentnom magnitudom je usporediv s međunarodnim katalozima. Zato je potrebno naći relaciju prema kojoj se iz lokalne magnitude navedene u Hrvatskom katalogu potresa računa momentna magnituda.

Nakon tako dobivenog ujednačenog kataloga potresa Hrvatske u ovom radu provedena je standardna analiza istoga: opis seizmičnosti, izdvajanje glavnih potresa, određivanje pragova potpunosti te koeficijenata a i b Gutenberg – Richterove relacije.

2. Opažanje potresa

2.1. Veličine kojima opisujemo jakost potresa

Za procjenu jakosti potresa koriste se veličine magnitude i intenziteta. Intenzitet se procjenjuje iz učinaka potresa na površini, a iskazuje se brojem stupnja makroseizmičke ljestvice. Postoji nekoliko makroseizmičkih ljestvica intenziteta. Jedna od njih je Mercali – Cancani – Siebergova (MCS) ljestvica, koja je korištena za određivanje intenziteta potresa u Hrvatskom katalogu potresa (Arhiv Geofizičkog zavoda, PMF). Između ostaloga, učinci potresa ovise o udaljenosti od epicentra, dubini žarišta i vrsti tla. Veličina koja ne ovisi o učincima potresa na površini je magnituda. Magnitudu kao pojam uveo je C. F. Richter 1935. godine [1]. Radi se o veličini koja opisuje jakost potresa kao funkciju energije oslobođene u žarištu potresa. Oslobođena energija je povezana s amplitudom seizmičkog vala na seizmogramu, ali dva se različita potresa mogu uspoređivati tek ako se u obzir uzmu nehomogenosti prilikom rasprostiranja valova, žarišna dubina, mehanizam nastanka potresa i instrumenti kojima su opaženi. Po Richterovoj definiciji, magnituda potresa je logaritam najveće amplitude zapisa potresa zabilježene standardnim torzionim Wood-Andersonovim kratkoperiodičnim seizmografom na epicentralnoj udaljenosti 100 km.

Očito je da se za određivanje magnitude treba raspolagati instrumentalnim zapisom potresa, a razdoblje instrumentalne seizmologije je počelo početkom 20. stoljeća. Prije toga mogao se odrediti jedino intenzitet potresa. Kako bi jakosti povijesnih i instrumentalno opaženih potresa bile usporedive, izvedena je empirijska relacija za područje Hrvatske koja daje vezu između intenziteta i magnitude potresa [2].

U Hrvatskom katalogu potresa, u kojem je najstariji potres iz 373. godine prije nove ere, svakom je potresu određena lokalna magnituda. Međutim, lokalna magnituda podcjenjuje jakost vrlo jakih potresa i precjenjuje jakost vrlo slabih potresa. Zato je predložena relacija za magnitudu koja je logaritam seizmičkog momenta, momentna magnituda [3]. Seizmički moment je umnožak prosječnog pomaka duž rasjedne plohe, površine rasjedne plohe i modula smicanja stijena na rasjedu. Seizmički moment je bolja mjera količine energije od amplitude zapisa seizmograma jer ne podcjenjuje vrlo jake potrese. Momentna magnituda se koristi i prilikom određivanja seizmičkog hazarda određenog područja, pa je cilj kreiranje kataloga u kojem će za svaki potres biti određena momentna magnituda. Kako je u Hrvatskom katalogu potresa navedena samo lokalna magnituda, potrebno je naći relaciju pomoću koje je moguće iz lokalne magnitude izračunati momentnu. Katalog potresa s momentnom magnitudom koristi se prilikom

izdvajanja glavnih potresa, određivanja potpunosti kataloga i računanja koeficijenata u Gutenberg – Richterovoj relaciji.

2.2. Sustavno opažanje potresa na području Hrvatske i Hrvatski katalog potresa

Na području Hrvatske se tek nakon zagrebačkog potresa, koji se dogodio 9.11.1880., počinju sustavno opažati potresi. Odmah nakon navedenog potresa, Jugoslavenska akademija znanosti i umjetnosti (JAZU) osnovala je Potresni odbor čiji je glavni zadatak bio sakupljanje i objavljivanje podataka o potresima. U prvim izvješćima su objavljeni opširni podaci o zagrebačkom potresu, a kasnije su objavljeni i podaci o potresima na području Hrvatske u vremenskom razdoblju od 361. do 1906. godine [4].

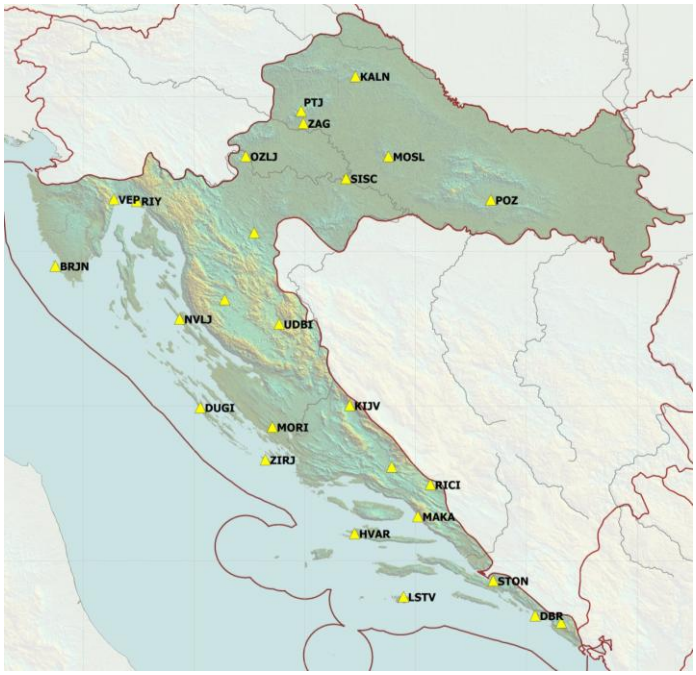
Prva seizmološka postaja na području Hrvatske otvorena je 1900. godine u Puli, a zatvorena 1918. godine zbog propasti Austro-Ugarske monarhije. Nije poznato što se dogodilo s instrumentima i instrumentalnim zapisima te postaje [4].

U prvoj polovici 20. stoljeća na području Hrvatske radilo je još pet postaja, većinom u obalnom dijelu: u Rijeci, Sinju, Šibeniku, Dubrovniku, te u Zagrebu. Seizmološka postaja u Rijeci je radila u razdoblju 1901.-1918., te je bila opremljena Vicentinijevim seizmografom. Conradovi seizmografi su bili na postajama u Sinju (1914.-1924.), Šibeniku (1926.-1940.) i Dubrovniku (1927.-1929.). Seizmološka postaja u Zagrebu radi kontinuirano od 1906. do danas [4]. Najprije je bila opremljena mehaničkim Wiechertovim instrumentima, potom od 1983. elektromagnetskim Sprengnether instrumentom, te od 2003. digitalnim seizmografom tipa Güralp.

Veliku ulogu u pokretanju seizmološke postaje u Zagrebu imao je Andrija Mohorovičić. U siječnju 1892. postao je direktor Meteorološkog opservatorija u Zagrebu (kasnije Geofizički zavod), a godinu kasnije inicirao je sustavno prikupljanje podataka vezanih uz potrese. Prvi uređaj, električni seizmoskop Agamemnon, nabavila je JAZU 1901. godine čime je osnovana seizmološka postaja u Zagrebu. Međutim, prve mehaničke seizmografe nabavio je Andrija Mohorovičić. Prvi instrument je bio Vicentinijev seizmograf, kojeg je posudio 1906. godine od kolege iz Budimpešte, a iste je godine počelo i redovito objavljivanje podataka o potresima. Mohorovičić nije bio potpuno zadovoljan radom Vicentinijevog uređaja, pa je ubrzo nabavio dva Wiechertova seizmografa: jednog mase 800 kg 1908. godine i drugog mase 1000 kg godinu dana kasnije. Oba su navedena seizmografa bilježila horizontalne komponente pomaka tla. Instrument koji je bilježio vertikalnu komponentu tla je postavljen tek 1932. godine. Bio je

to Wiechertov seizmograf mase 1200 kg. Osim što je zaslužan za nabavljanje prvih seizmografa početkom 20. stoljeća, Mohorovičić je uvidio i važnost određivanja točnog vremena. Zato je počeo s opažanjima vremena prolaska zvijezda kroz lokalni meridijan, čime je osnovao Službu točnog vremena u Hrvatskoj. Navedeni seizmografi su, osim Vicentinijevog koji je radio 18 godina, radili kontinuirano do 1983. godine, kada su premješteni na novu lokaciju Geofizičkog zavoda na Horvatovac. Nedavno su obnovljeni, pa ondje rade i danas [4].

U sklopu UNESCO-vog projekta o seizmičnosti područja Balkana [5] ranih sedamdesetih godina prošlog stoljeća nabavljeni su elektromagnetski seizmografi (Sprengnether, SKM-3 i Vegik). S tim novim uređajima otvorene su i stalne postaje na Puntijarki, Hvaru, u Dubrovniku i Rijeci te privremene postaje od kojih su neke još aktivne. Rezultat tog projekta je bio katalog potresa na području Balkana objavljen u dva sveska: prvi je obuhvaćao potrese koji su se dogodili u razdoblju 1901.-1970., a drugi potrese do 1901. godine. Dio kataloga s potresima koji su se dogodili na području Hrvatske postao je jezgra Hrvatskog kataloga potresa. Prvi 16-bitni digitalni seizmograf je instaliran u Zagrebu 1989. godine. Moderna mreža seizmografa u Hrvatskoj temelji se na 7 širokopojasnih seizmometara nabavljenih 1999. godine [4]. Broj digitalnih seizmografa je u stalnom porastu, te je krajem 2015. godine bilo aktivno 26 širokopojasnih instrumenata, čije lokacije su navedene na slici 1.



Slika 1: Lokacije seizmoloških postaja u Hrvatskoj (stanje: 31.12.2015.).

Hrvatski katalog potresa je proizvod Seizmološke službe Geofizičkog odsjeka PMF-a, a sadrži podatke o potresima opaženima u Hrvatskoj i okolnim područjima. Svakom je potresu u katalogu određeno vrijeme nastanka, lokacija epicentra, dubina žarišta, magnituda i intenzitet. Katalog je važan jer daje bazu podataka korisnu za mnoga proučavanja, poput analize seizmičnosti nekog područja, procjene seizmičkog hazarda i drugog. Nekoliko je puta revidiran i dopunjavan nakon 1970. godine. Novi potresi se u katalog upisuju u pravilu s kašnjenjem od 1-2 godine zbog sakupljanja podataka i određivanja lokacije potresa [4].

3. Uniformiranje kataloga uvođenjem momentne magnitude

3.1. Konverzija lokalne u momentnu magnitudu

Kako bih našla vezu između lokalne M_L i momentne M_W magnitude, potražila sam potrese kojima je određena momentna magnituda, a koji se nalaze i u Hrvatskom katalogu potresa. Pretražila sam četiri kataloga: ISC [6], ANSS [7], SHARE *European Earthquake Catalogue* (SHEEC) [8][9] i EMSC [10] te našla ukupno 1965 potresa s podatkom o momentnoj magnitudi, a koji se nalaze i u Hrvatskom katalogu potresa. Nađeni potresi su se dogodili u vremenskom razdoblju između 1908. i 2015. godine, ali je za svaki izvor taj vremenski period različit, kako je navedeno u tablici 1. Najviše potresa sam našla u katalogu SHARE, njih 1542 (tablica 1), ali taj katalog na žalost sadrži podatke o potresima s vremenima nastanka do kraja 2006. godine. U ostala tri navedena kataloga zajedno sam našla upola manje potresa nego u SHARE-u, a i njima su neki potresi zajednički tako da nema ukupno 2209 potresa kojima se može uspoređivati lokalnu i momentnu magnitudu, nego 1965, što nije puno manji broj. U katalogu ISC-a se uz svaki potres navode magnitude iz svih dostupnih izvora, pa se uz neke potrese može naći i više od jedne vrijednosti momentne magnitude. Tako sam bila u mogućnosti kreirati katalog u kojem je, uz lokalnu magnitudu, navedena i momentna magnituda iz određenog izvora. Kako je za neke potrese prikupljeno više vrijednosti momentne magnitude, koje nisu uvijek iste, referentna momentna magnituda je određena kao njihov medijan.

Iz ovako dobivenog kataloga potresa izbačeni su oni potresi kojima je razlika lokalne magnitude, navedene u Hrvatskom katalogu potresa, i momentne magnitude, pridijeljene iz vanjskog kataloga, veća od jedan. Takvih potresa je 129, pa je nakon izbacivanja *outliera* u katalogu ostalo 1836 potresa pomoću kojih je određena veza lokalne i momentne magnitude za Hrvatski katalog potresa. Koeficijenti empirijske relacije koja

povezuje lokalnu i momentnu magnitudu su određeni metodom EIVREG (*errors-in-variables*). To je metoda najmanjih kvadrata koja uzima u obzir pogreške u mjerenju nezavisne varijable, ovdje lokalne magnitude.

Tablica 1: Broj potresa s podatkom o momentnoj magnitudi, koji se nalaze i u Hrvatskom katalogu potresa, nađen u svakom pojedinom pretraživanom katalogu i vremensko razdoblje iz kojeg su vremena nastanka tih potresa.

Katalog	**Broj potresa**	**Razdoblje**
ANSS	200	1995.-2015.
EMSC	12	2015.
ISC	455	1995.-2015.
SHARE	1542	1908.-2006.

Općenito su izvedene relacije koje povezuju magnitudu površinskih i prostornih valova s momentnom magnitudom za potrese iz međunarodnih izvora (na primjer ISC, NEIC, HRVD) iz cijelog svijeta [11], ali ne i relacija koja bi povezivala lokalnu i momentnu magnitudu. Problem je što je Richter definirao lokalnu magnitudu pomoću standardnog Wood-Andersonovog (WA) seizmografa. Ustanovljeno je da različiti WA seizmografi mogu imati različito povećanje [11], što dovodi do sistematske pogreške u određivanju lokalne magnitude. Zbog toga se ne može odrediti regionalna veza lokalne magnitude s drugim magnitudama, nego se ta veza određuje za svaki WA seizmograf (ili seizmograf koji je kalibriran nekim WA seizmografom). Zagrebačka seizmološka postaja je u razdoblju 1908.-1982. bila opremljena Wiechertovim instrumentom, u razdoblju 1983.-2002. instrumentom Sprengnether i 2003.-2015. instrumentom tipa Güralp. Za svako navedeno razdoblje određena je relacija koja povezuje lokalnu i momentnu magnitudu, kako bi se uzeo u obzir režim rada instrumenta.

Računala sam regresiju za parove točaka lokalne i momentne magnitude. Pretpostavlja se da je veza te dvije magnitude linearna i regresiju koja ih povezuje traži se metodom EIVREG. Koeficijenti regresije i njihove pogreške za sva tri navedena vremenska razdoblja se nalaze u tablici 2, odakle se vidi da su svi pravci bliski relaciji $M_L = M_W$. Dobivene regresije su na slikama 2-4. Najviše podataka, njih 984, je u razdoblju 1908.-1982. (slika 2). Za isto je razdoblje pravac regresije najbliži pravcu $y = x$, koji je na slikama označen crnom bojom. Najmanje podataka, njih 338, je u razdoblju 1983.-2002. (slika 3). Sa sve tri slike je vidljivo da je rasap podataka velik, a odstupanje je izraženije za magnitude manje od 5,0. Kako su pravci regresije slični, određena je i regresija na cijelom skupu podataka, od ukupno 1836 potresa (tablica 2), prikazana na slici 5. Sa slike 5 se može vidjeti da je odstupanje od pravca regresije veće za magnitude manje od 5,0 i da je

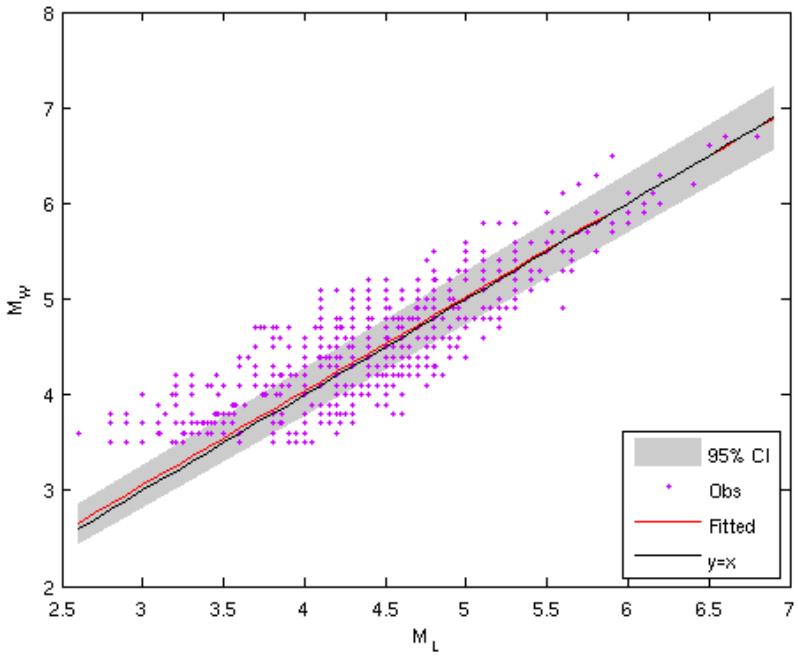
taj pravac blizak pravcu $y = x$, kao i za ostale regresije. Na slici 6, gdje su prikazana sva 4 pravca iz tablice 2, vidi se koliko se oni podudaraju. Od pravca za razdoblje 1908.-2015. najviše odstupa pravac određen za razdoblje 1983.-2002., manje je odstupanje za pravac određen za razdoblje 2003.-2015., a pravac određen za razdoblje 1908.-1982. se niti ne vidi koliko je odstupanje malo. Zbog sličnosti s ostalim relacijama u tablici 2, odlučila sam momentnu magnitudu iz lokalne magnitude računati prema relaciji dobivenoj na temelju najvećeg broja podataka:

$$M_W = 0{,}11 + 0{,}99M_L \qquad (1)$$

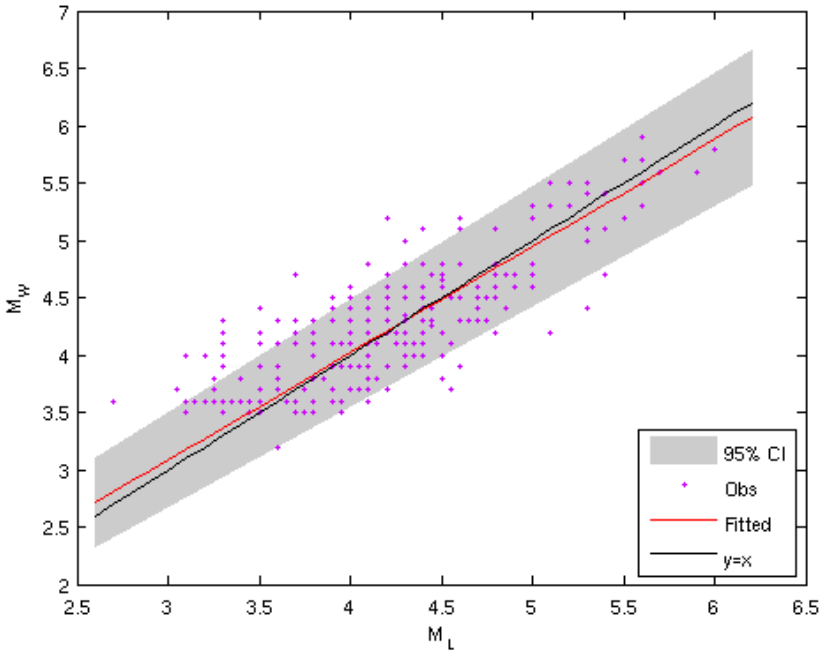
Dalje u ovom radu su sve momentne magnitude izračunate iz lokalnih magnituda za potrese u Hrvatskom katalogu potresa prema formuli (1).

Tablica 2: Relacije koje povezuju momentnu magnitudu M_W i lokalnu magnitudu M_L određene za četiri različita vremenska razdoblja. U zagradama ispod koeficijenata su njihove standardne devijacije.

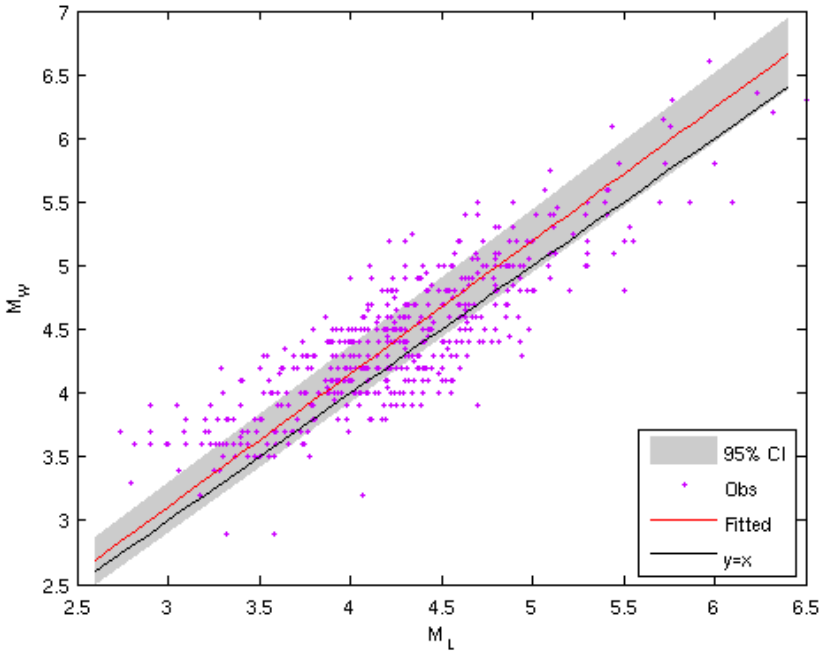
Vremensko razdoblje	**Regresija $M_W = b_0 + b_1M_L$**	**Broj potresa**	**Koeficijent determinacije R^2**
1908.-1982.	M_W = 0,11 + 0,98M_L (0,07) (0,01)	984	0,8574
1983.-2002.	M_W = 0,29 + 0,93M_L (0,12) (0,03)	338	0,8126
2003.-2015.	M_W = -0,02 + 1,04M_L (0,06) (0,01)	514	0,9415
1908.-2015.	M_W = 0,11 + 0,99M_L (0,05) (0,01)	1836	0,8663



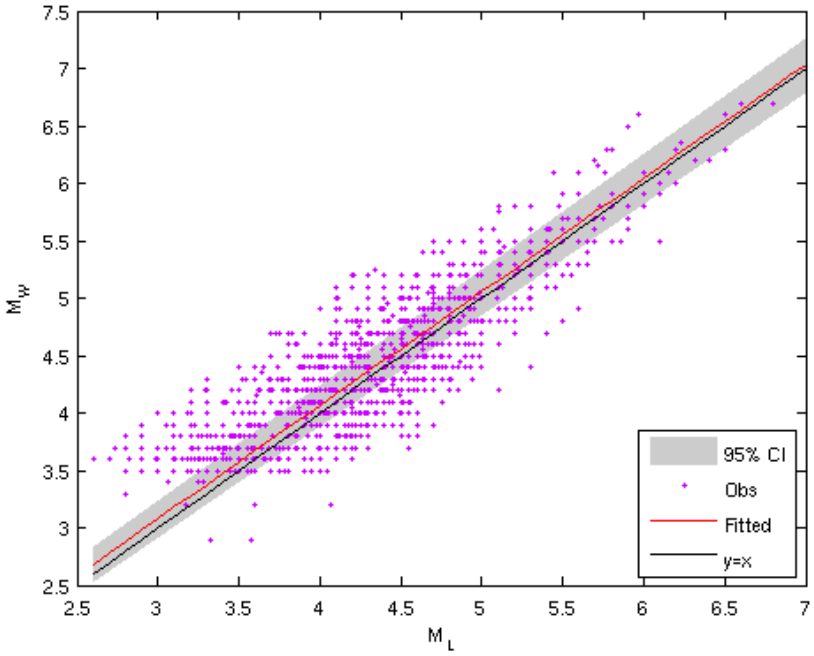
Slika 2: Veza lokalne i momentne magnitude za razdoblje 1908.-1982. Ljubičasti rombovi označavaju parove magnituda, crvena linija prikazuje pravac koji povezuje momentnu i lokalnu magnitudu, a crni pravac je $y = x$. Sivo područje označava interval pouzdanosti od 95%.



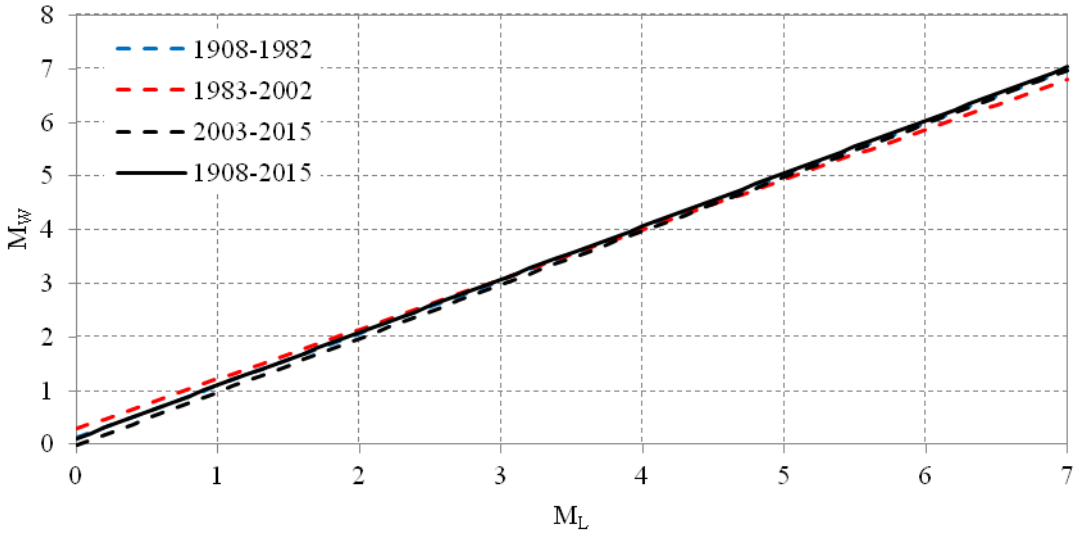
Slika 3: Veza lokalne i momentne magnitude za razdoblje 1983.-2002. Ljubičasti rombovi označavaju parove magnituda, crvena linija prikazuje pravac koji povezuje momentnu i lokalnu magnitudu, a crni pravac je $y = x$. Sivo područje označava interval pouzdanosti od 95%.



Slika 4: Veza lokalne i momentne magnitude za razdoblje 2003.-2015. Ljubičasti rombovi označavaju parove magnituda, crvena linija prikazuje pravac koji povezuje momentnu i lokalnu magnitudu, a crni pravac je $y = x$. Sivo područje označava interval pouzdanosti od 95%.

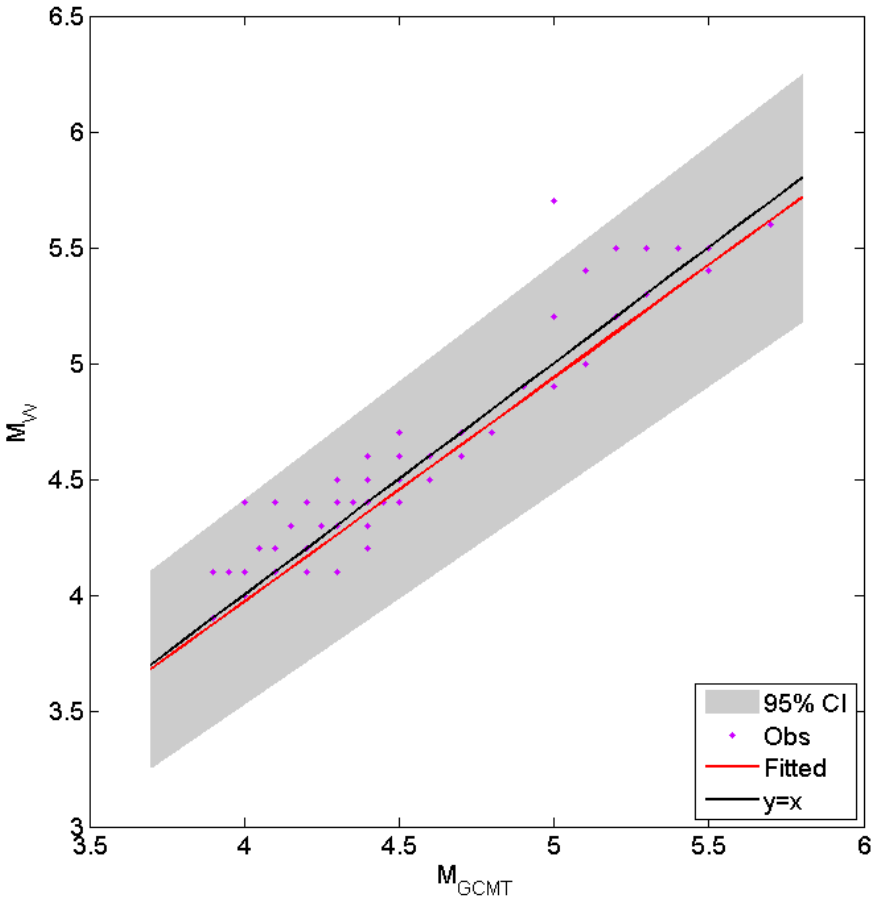


Slika 5: Veza lokalne i momentne magnitude za razdoblje 1908.-2015. Ljubičasti rombovi označavaju parove magnituda, crvena linija prikazuje pravac koji povezuje momentnu i lokalnu magnitudu, a crni pravac je $y = x$. Sivo područje označava interval pouzdanosti od 95%.



Slika 6: Relacije iz tablice 2, koje povezuju lokalnu i momentnu magnitudu. Plava isprekidana linija prikazuje relaciju koja se odnosi na vremensko razdoblje 1908.-1982., crvena isprekidana linija prikazuje relaciju koja se odnosi na razdoblje 1983.-2002., crna isprekidana linija prikazuje relaciju koja se odnosi na razdoblje 2003.-2015., a crna puna linija prikazuje relaciju koja se odnosi na razdoblje 1908.-2015.

Također sam našla 82 potresa s podatkom o momentnoj magnitudi iz GCMT (*Global Centroid-Moment-Tensor*) kataloga, a koji se nalaze i u Hrvatskom katalogu potresa. Izdvojila sam ih jer se ta magnituda smatra pouzdanijom od momentne magnitude iz nekog drugog izvora. Odredila sam regresiju koja povezuje momentnu magnitudu iz GCMT kataloga i momentnu magnitudu dobivenu kao medijan svih dostupnih momentnih magnituda. Koeficijenti regresije i njihove pogreške su u tablici 3, a pravac regresije s parovima magnituda je na slici 7. Kako se vidi sa slike 7, pravac regresije je blizak pravcu $y = x$ i sve točke osim jedne su u intervalu pouzdanosti od 95%. Iz ovoga zaključujem da je medijan momentnih magnituda pouzdan kao i momentna magnituda iz GCMT kataloga, barem za ova 82 potresa. Uz to, 82 potresa je malo u odnosu na 1836 potresa za koje sam našla momentnu magnitudu, pa sam ovdje uzela da je relacija (1) reprezentativna za izračun momentne magnitude.

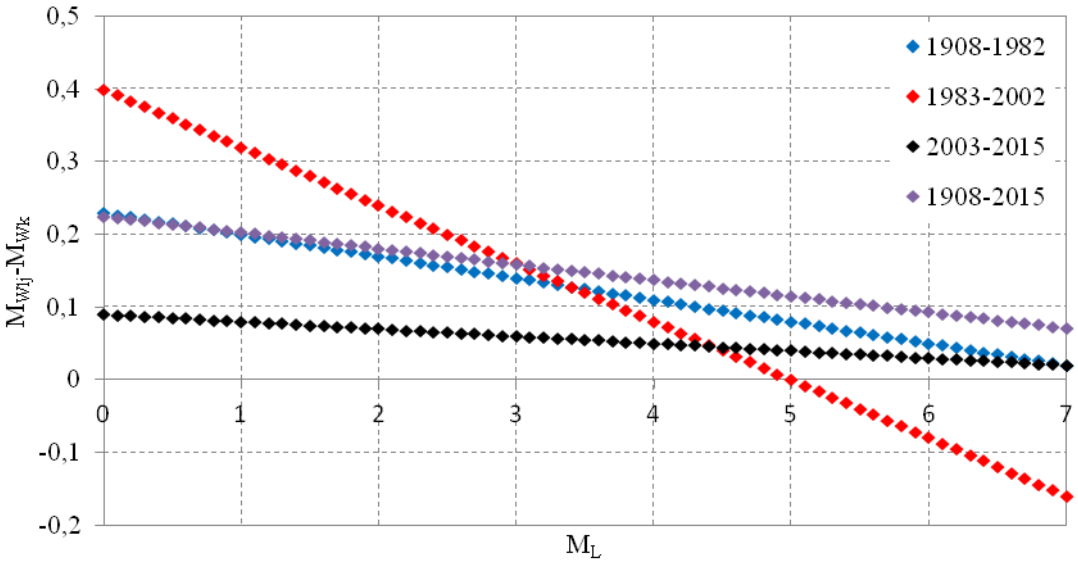


Slika 7: Veza momentne magnitude iz kataloga GCMT i momentne magnitude dobivene kao medijan. Ljubičasti rombovi označavaju parove magnituda, crvena linija prikazuje pravac koji povezuje navedene dvije magnitude, a crni pravac je $y = x$. Sivo područje označava interval pouzdanosti od 95%.

Tablica 3: Relacija koja povezuje momentnu magnitudu M_W dobivenu kao medijan i momentnu magnitudu dobivenu iz kataloga GCMT M_{GCMT}. U zagradama ispod koeficijenata su njihove standardne devijacije.

Regresija $M_W = b_0 + b_1 M_{GCMT}$	**Broj potresa**	**Koeficijent determinacije** R^2
$M_{GCMT} = 0{,}10 + 0{,}97 M_L$ (0,11) (0,03)	82	0,9458

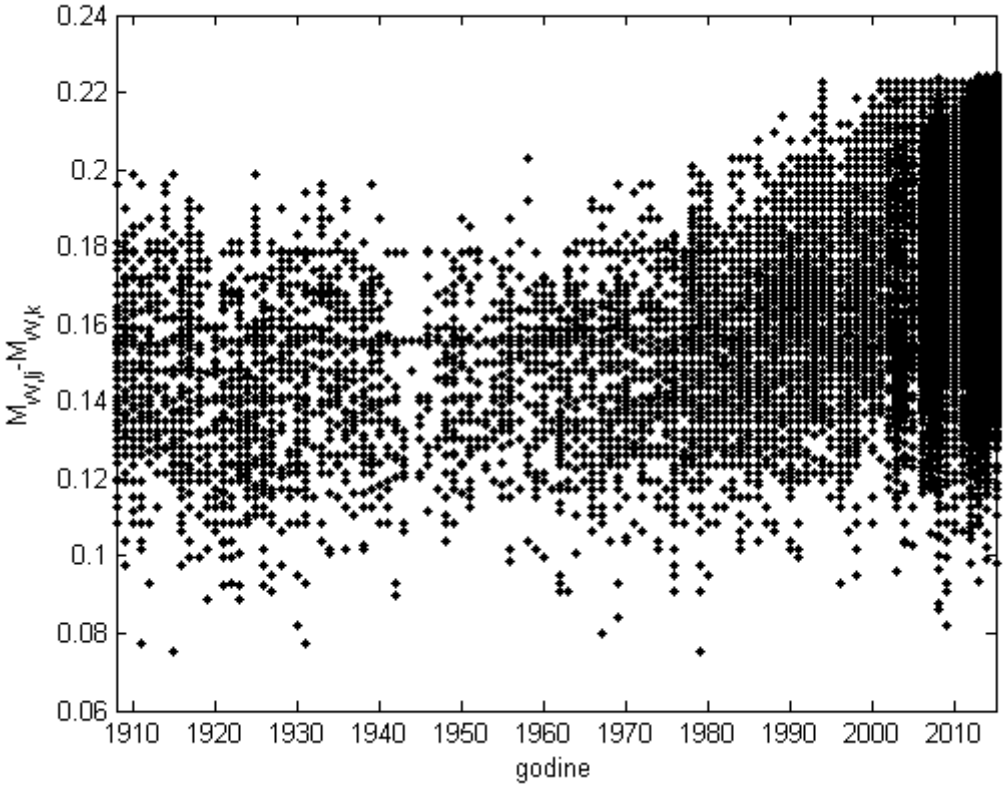
Jedina do sada izvedena relacija koja povezuje momentnu i lokalnu magnitudu na području Hrvatske izvedena je u [12] i navedena u tablici 4. Ako se usporede relacija iz tablice 4 s relacijama iz tablice 2, vidi se da je broj potresa pomoću kojih su regresije određene u ovom radu puno veći (čak je deset puta veći broj potresa za najmanji skup podataka, u razdoblju 1983.-2002.), a vrijednosti standardnih devijacija koeficijenata manje. Usporedila sam odstupanja relacije iz [12] od relacija iz tablice 2, prikazane na slici 8. Najveća je razlika u razdoblju 1983.-2002., ali ni ona nije veća od 0,4. Relacija iz [12] se najbolje slaže s relacijom dobivenom za vremensko razdoblje 2003.-2015. U tom je razdoblju najveća razlika 0,09. Na slici 9 sam prikazala odstupanja momentne magnitude izračunate relacijom iz tablice 4 od momentne magnitude dobivene prema formuli (1) za Hrvatski katalog potresa u razdoblju 1908.-2015. Razlika je uvijek pozitivna, što znači da je momentna magnituda za istu lokalnu magnitudu veća ako se računa prema formuli (1), dobivenoj u ovom radu, nego prema formuli iz [12].



Slika 8: Razlika momentne magnitude izračunate iz lokalne magnitude za Hrvatski katalog potresa prema formulama dobivenima u ovom radu (tablica 2) i momentne magnitude izračunate prema formuli iz [12] za tri različita vremenska razdoblja. Plavi rombovi se odnose na formulu koju sam dobila za razdoblje 1908.-1982., crveni rombovi na razdoblje 1983.-2002., crni rombovi na razdoblje 2003.-2015., a ljubičasti rombovi za razdoblje 1908.-2015. godine.

Tablica 4: Relacija iz [12] koja povezuje momentnu magnitudu M_W i lokalnu magnitudu M_L. U zagradama ispod koeficijenata su njihove standardne devijacije.

Regresija $M_W = b_0 + b_1 M_L$	**Broj potresa**	**Koeficijent determinacije** R^2
M_W = -0,11 + 1,01M_L (0,38) (0,08)	31	0,852



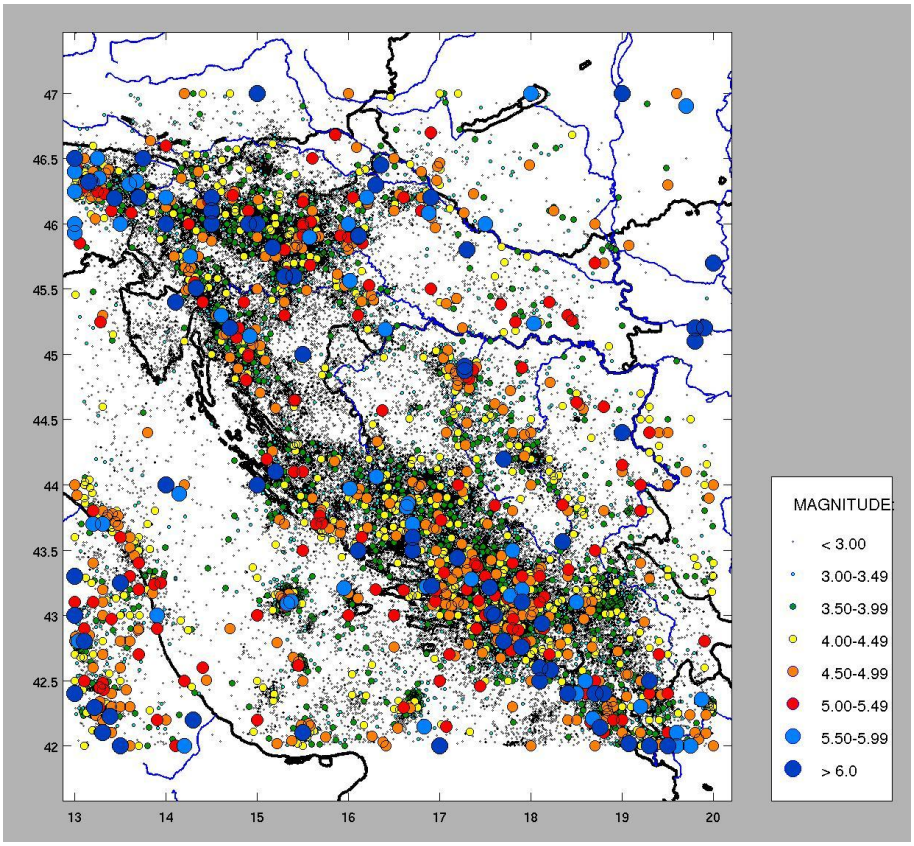
Slika 9: Vremenska razdioba odstupanja momentne magnitude izračunate iz lokalne magnitude za Hrvatski katalog potresa relacijom iz [12] od momentne magnitude izračunate iz relacije (1).

3.2 Analiza seizmičnosti Hrvatske

Područje Hrvatske sastoji se od nekoliko tektonskih jedinica: Panonskog bazena na sjeveru, istočnog dijela Alpa na sjeverozapadu, Dinarida, prijelazne zone između Dinarida i Jadranske ploče te Jadranske ploče [4].

Seizmičnost se analizira na temelju kataloga potresa. Katalog sadrži potrese koji su se dogodili u Hrvatskoj i u okolnim područjima, pa gledam samo područje omeđeno s 42° i 47° sjeverne geografske širine te 13° i 20° istočne geografske dužine jer se unutar tih koordinata nalazi područje Hrvatske. U Hrvatskom katalogu potresa je unutar tog područja opažen i lociran 78701 potres, u vremenskom razdoblju od 373. g.pr.n.e. do kraja 2015. godine, a epicentri su prikazani na slici 10. Ova slika prikazuje seizmičnost Hrvatske, odnosno seizmički aktivne regije u Hrvatskoj. Najviše jakih potresa je u obalnom dijelu, u

području Dinarida, jer u tom području dolazi do sudara Jadranske ploče i Dinarida [4]. Značajna je aktivnost i u Jadranu, najveća na granici srednjeg i južnog dijela u blizini otoka Jabuke. Seizmičnost je najslabija na području Slavonije, na istoku zemlje.



Slika 10: Epicentri potresa iz Hrvatskog kataloga potresa do kraja 2015. godine unutar područja omeđenog s 42° i 47° sjeverne geografske širine te 13° i 20° istočne geografske dužine. Ukupan broj potresa na slici je 78701. Legenda se odnosi na momentne magnitude.

3.2.1. Povijesna seizmičnost

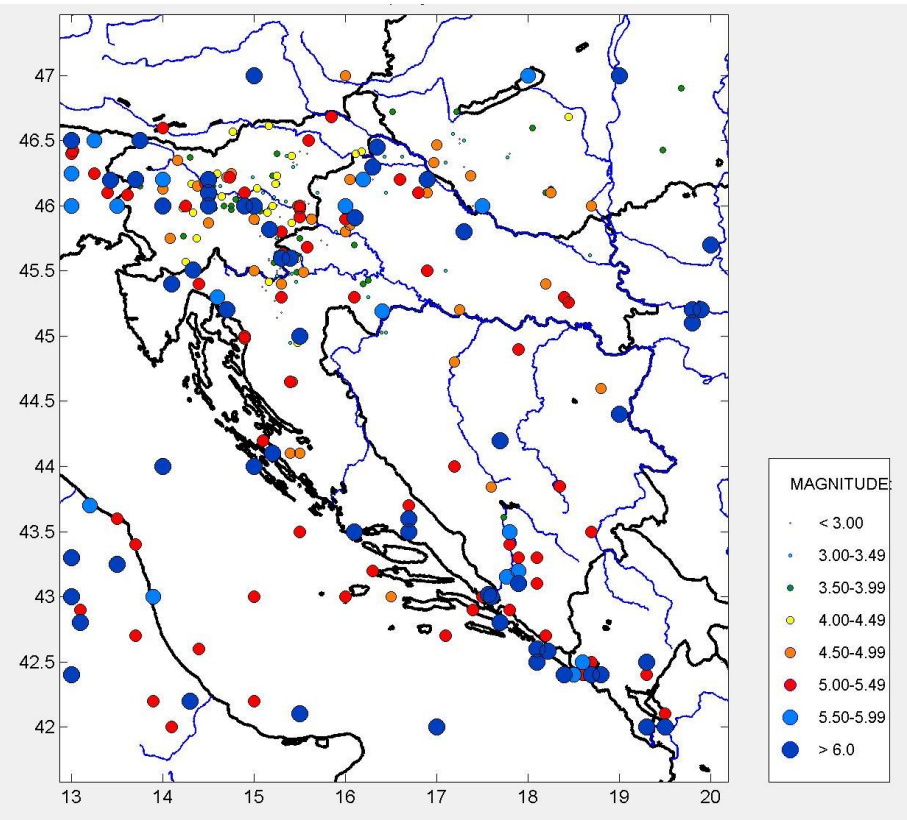
Povijesna seizmičnost obuhvaća potrese koji su se dogodili do kraja devetnaestog stoljeća, odnosno prije 1901. godine, u razdoblju u kojem se ne raspolaže instrumentalnim podacima. U Hrvatskom katalogu potresa navedeno je 920 potresa do kraja 1900. godine, od čega je njih 569 unutar područja izdvojenog na slici 11. Najjači i najvažniji povijesni potres je katastrofalni dubrovački potres iz 1667. godine, intenziteta X °MCS. U tom je potresu stradalo više od 5000 građana i uništeno više od ¾ javnih zgrada [4].

U obalnom dijelu Hrvatske su se dogodili i povijesni potresi procijenjenog intenziteta IX °MCS: potres iz 15. stoljeća s epicentrom u blizini Metkovića, razoran potres iz 15. stoljeća s epicentrom u Dalmaciji kojem lokacija i intenzitet nisu pouzdano određeni, potres s epicentrom blizu Sinja iz kasnog 19. stoljeća, jaki potresi u području

Zadra iz 13., 14., 15. i 18. stoljeća, razorni potresi iz 13. i 16. stoljeća na sjevernom dijelu obale u blizini Vinodola i Senja te u 18. stoljeću na području Rijeke [4].

U povijesnim dokumentima iz 6. i 11. stoljeća nalaze se podaci o jakim potresima, intenziteta do IX °MCS, između Karlovca i Novog Mesta, duž granice Hrvatske i Slovenije [4]. U arhivima se spominje i jaki potres iz 1459. godine blizu Varaždina, u sjevernom dijelu Hrvatske, intenziteta IX °MCS [4].

Najgušće naseljeno područje u Hrvatskoj je grad Zagreb i njegova okolica. Ovo je seizmičko područje tektonski složeno jer se nalazi u kontaktnoj zoni Alpa, Dinarida i Panonskog bazena [4]. U ovom području možemo razlikovati dva velika epicentralna područja: Brežice-Krško na granici Hrvatske i Slovenije, gdje se dogodio velik broj jakih potresa u 17. stoljeću (najjači intenziteta IX °MCS), i Medvednica blizu Zagreba, gdje je najjači zabilježeni potres ranije spomenuti iz 1880. godine [4].



Slika 11: Epicentri svih potresa iz Hrvatskog kataloga potresa s vremenom nastanka prije 1901. godine unutar područja omeđenog s 42° i 47° sjeverne geografske širine te 13° i 20° istočne geografske dužine. Ukupan broj potresa na slici je 569. Legenda se odnosi na momentne magnitude.

3.2.2. Seizmičnost nakon 1900. godine

Nakon 1900. godine dogodile su se četiri serije potresa na području Hrvatske koje treba spomenuti: pokupski potresi, potresi na Biokovu, potresi na području Ston-Slano i potresi na Jabuci [4].

Glavni potres u nizu pokupskih potresa dogodio se 8.10.1909. i vjerojatno je najpoznatiji potres koji se dogodio na području Hrvatske. Proučavanjem seizmograma tog potresa Andrija Mohorovičić je dokazao postojanje graničnog sloja između Zemljine kore i plašta, nazvane po njemu Mohorovičićevim diskontinuitetom. Tako je Mohorovičić postao jedan od najvećih i najpoznatijih hrvatskih znanstvenika svih vremena, a pokupski potres je ušao u povijest svjetske seizmologije. Osim otkrića diskontinuiteta, Mohorovičić je na temelju ovog potresa razradio proceduru određivanja jedinstvene lokacije žarišta i otkrio analitički izraz za povećanje brzine seizmičkih valova povećanjem dubine (Mohorovičićev zakon). U ovoj seriji je 49 potresa, a najjači zabilježeni intenzitet je VIII °MCS [4].

Potresi koji su se dogodili na području Biokova 1962. godine jedni su od najvažnijih skupina potresa u obalnom dijelu Hrvatske prošlog stoljeća. Dva najveća potresa u ovom nizu su magnituda 5,9 i 6,1, s pripadajućim intenzitetima VII i VIII-IX °MCS. Ovi potresi su uzrokovali veliku štetu na području Biokova i praktički ondje definirali seizmički hazard. Iako je u to vrijeme u Hrvatskoj radio samo jedan seizmograf, sakupljeno je dovoljno mikroseizmičkih podataka za pouzdano lociranje 46 od 63 potresa koji se mogu naći na zagrebačkim seizmogramima [4].

Serija potresa koja se dogodila 1996. godine na području Ston-Slano je najveća seizmička serija na dubrovačkom području nakon katastrofalnog potresa iz 1667. godine. Potresi su potpuno uništili 3 sela i uzrokovali veliku štetu u mnogo južnodalmatinskih gradova. Glavni potres je bio magnitude 6,0. Nakon glavnog potresa slijedile su tisuće naknadnih potresa, od kojih je pouzdano locirano 1350 [4].

Potresi nastali u sredini Jadranskog mora pokraj otoka Jabuke 2003. godine jedni su od najjačih zabilježenih na Jadranskoj mikroploči. Glavni potres je bio magnitude 5,5, prethodnih potresa bilo je više od 150, a naknadnih više od 4600. Većina ovih potresa opažena je na seizmološkoj postaji na Hvaru (HVAR), koja je udaljena oko 90 km istočno od epicentra. Kako se epicentri nalaze na otvorenom moru pa nema seizmoloških postaja u neposrednoj blizini, pouzdano je locirano samo 597 potresa. Ovi su potresi značajni jer je u 1980-ima stvoreno opće mišljenje da je Jadranska mikroploča gotovo aseizmična i kao cjelina se rotira suprotno od smjera kazaljke na satu oko pola u sjevernoj Italiji. Ta je

rotacija potvrđena na temelju GPS podataka. Na slici 10 vidimo da seizmičnost Jadrana nije zanemariva, a veća je u njegovom južnom dijelu. Ova skupina potresa je važna jer može poslužiti za identifikaciju rasjeda, što se koristi u određivanju hazarda. Poboljšanje procjene hazarda za područje Jadrana je osobito važno za naseljene hrvatske otoke [4].

4. Analiza kataloga potresa

4.1. Izdvajanje kataloga glavnih potresa

Empirijsku relaciju koja povezuje broj i magnitudu potresa na nekom području dali su Gutenberg i Richter [13]:

$$\log_{10}[N(>M)] = a - bM \tag{2}$$

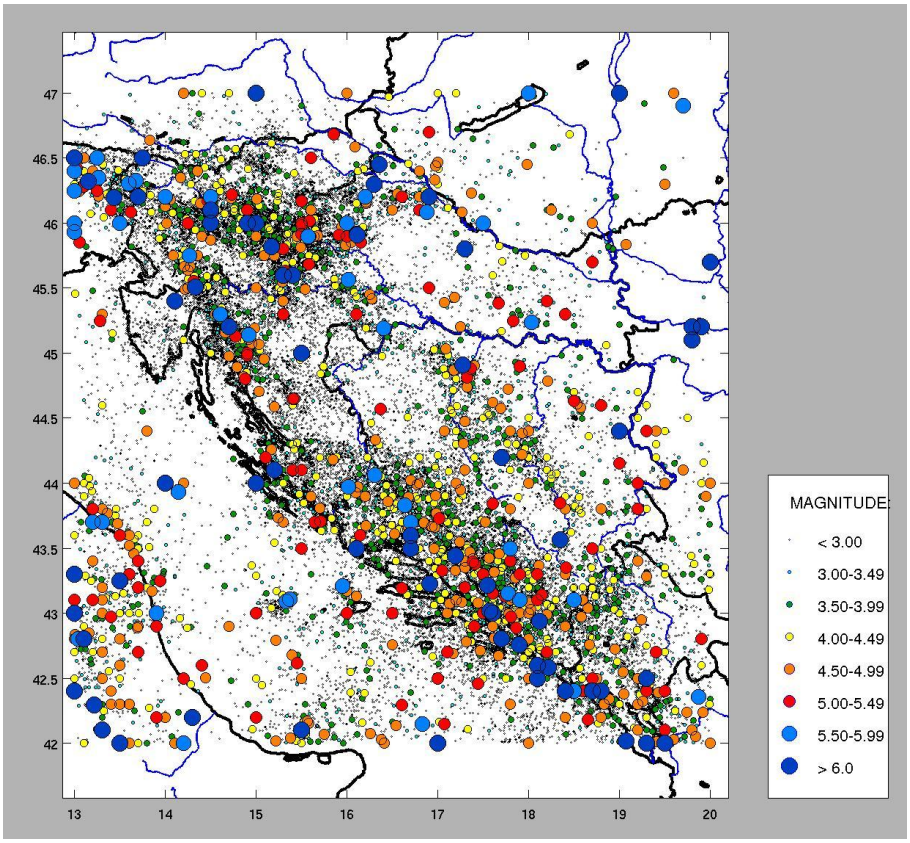
gdje je N ukupni broj potresa magnitude veće od magnitude M, a je nivo seizmičnosti, a b je blizu 1 [14]. Vrijednost b je gradijent Gutenberg – Richterove relacije, gdje veća vrijednost znači veći udio slabijih potresa u odnosu na jake potrese, a manja vrijednost parametra b znači manji udio slabijih potresa u odnosu na jake.

U Hrvatskom katalogu potresa do kraja 2015. godine opaženo je i locirano 90780 potresa. Taj je broj ograničen na 78701 potres, ako se u obzir uzmu samo potresi s epicentrima unutar područja pravokutnog oblika omeđenog s 42° – 47° sjeverne geografske širine i 13° – 20° istočne geografske dužine. Odabrala sam ove koordinate jer u potpunosti obuhvaćaju područje Hrvatske.

Parametri a i b u Gutenberg – Richterovoj relaciji važni su u procjeni seizmičkog hazarda. Oni se računaju iz kataloga potresa u kojemu su potresi Poissonovi događaji. To znači da su potresi, odnosno njihova vremena nastanka, međusobno nezavisni događaji. Ta nezavisnost ne vrijedi za prethodne i naknadne potrese jer su oni ovisni o glavnom potresu. Tako su samo glavni potresi međusobno nezavisni pa ih je potrebno izdvojiti u katalog glavnih potresa pomoću kojeg se traže parametri Gutenberg – Richterove relacije.

Prethodni i naknadni potresi nisu fizički odvojeni od glavnog potresa pa je njihovo prepoznavanje subjektivno. Stoga postoji više metoda za izdvajanje glavnih potresa, neki su navedeni u [12]. Ovdje za izdvajanje glavnih potresa koristim metodu kao u članku o istraživanju seizmičnosti sjeverozapadnog dijela Hrvatske [15]. Prethodni i naknadni potresi izdvajaju se prema njihovoj blizini u prostoru i vremenu. Pretpostavlja se da su se oni dogodili unutar prozora čije vremensko i prostorno ograničenje ovisi o magnitudi glavnog potresa, a veličine tih prozora navedene su u tablici 5. Veličina prozora između magnituda 3,0 i 7,0 je određena logaritamsko – linearnom interpolacijom iz zadanih

veličina za krajnje magnitude. Naknadni potresi za glavni potres magnitude 3,0 se traže unutar radijusa od 15 km i najviše 25 dana nakon glavnog potresa, a za glavni potres magnitude 7,0 unutar područja radijusa 80 km i najviše 1000 dana nakon glavnog potresa. Ne traže se naknadni potresi bliže od 10 km od epicentra glavnog potresa niti oni koji su se dogodili u intervalu kraćem od 15 dana od glavnog potresa. Ovako sam od ukupno 78701 potresa našla 34463 glavna potresa, 8542 prethodna i 35696 naknadnih potresa. Epicentri glavnih potresa prikazani su na slici 12.

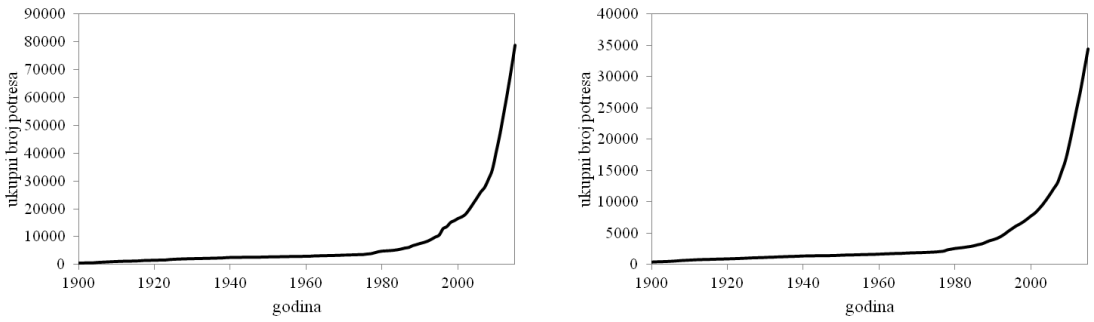


Slika 12: Epicentri glavnih potresa iz Hrvatskog kataloga potresa koji su se dogodili do kraja 2015. godine unutar područja omeđenog s 42° i 47° sjeverne geografske širine te 13° i 20° istočne geografske dužine. Ukupan broj potresa na slici je 34463. Legenda se odnosi na momentne magnitude.

Tablica 5: Parametri prozora ovisni o magnitudi potresa M_W korištenih za izdvajanje glavnih potresa iz kataloga. *D* je polumjer prozora, a *T* je vremensko trajanje prozora.

M	***D* (km)**	***T* (dan)**
3,0	15,0	25,0
3,2	16,3	30,1
3,4	17,7	36,2
3,6	19,3	43,5
3,8	21,0	52,3
4,0	22,8	62,9
4,2	24,8	75,6
4,4	26,9	90,9
4,6	29,3	109,3
4,8	31,9	131,5
5,0	34,6	158,1
5,2	37,7	190,1
5,4	41,0	228,7
5,6	44,5	275,0
5,8	48,4	330,7
6,0	52,6	397,6
6,2	57,2	478,2
6,4	62,2	575,0
6,6	67,7	691,5
6,8	73,6	831,6
7,0	80,0	1000,0

Ako grafički prikažem kumulativnu razdiobu svih i samo glavnih potresa (slika 13), očekujem da krivulja kumulativne razdiobe bude glatkija za glavne potrese, kao u [16]. Na slici je uočljiva razlika krivulja u razdoblju oko 2000. godine. Za razdiobu svih potresa (lijevo) krivulja na dva mjesta naglo mijenja nagib, a za razdiobu glavnih potresa (desno) krivulja je u istom vremenskom periodu izglađena. Ipak, kumulativna razdioba glavnih potresa nije pravac, kao u [16]. Za takvu bi sliku katalog trebao biti potpun pa sam odredila i potpunost kataloga.

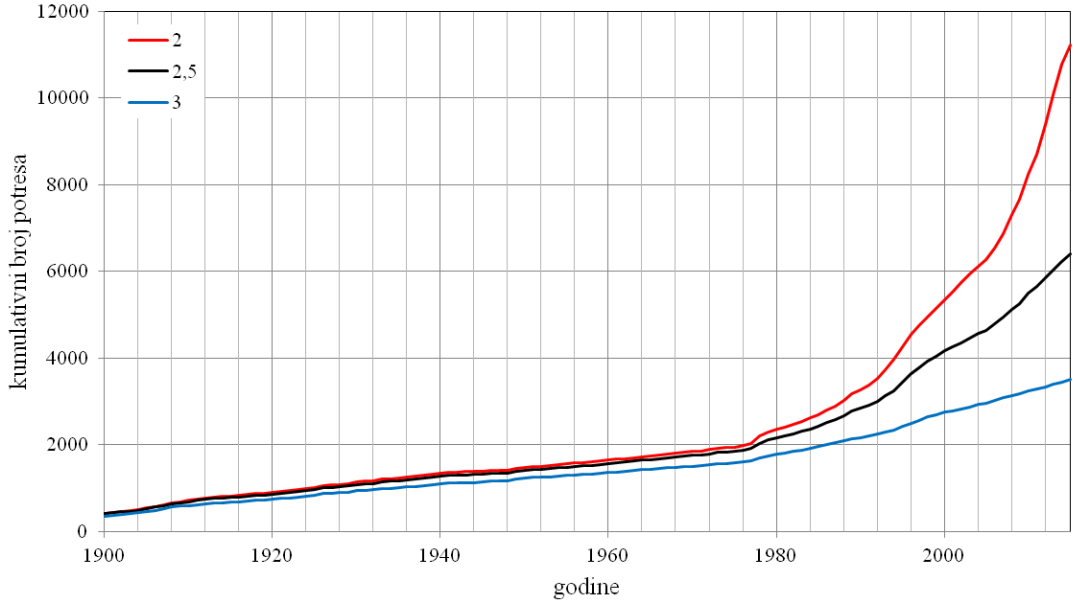


Slika 13: Kumulativna razdioba potresa iz Hrvatskog kataloga potresa u području 42° - 47° sjeverne geografske širine i 13° - 20° istočne geografske dužine. Lijevo: svi potresi (78701), desno: glavni potresi (34463).

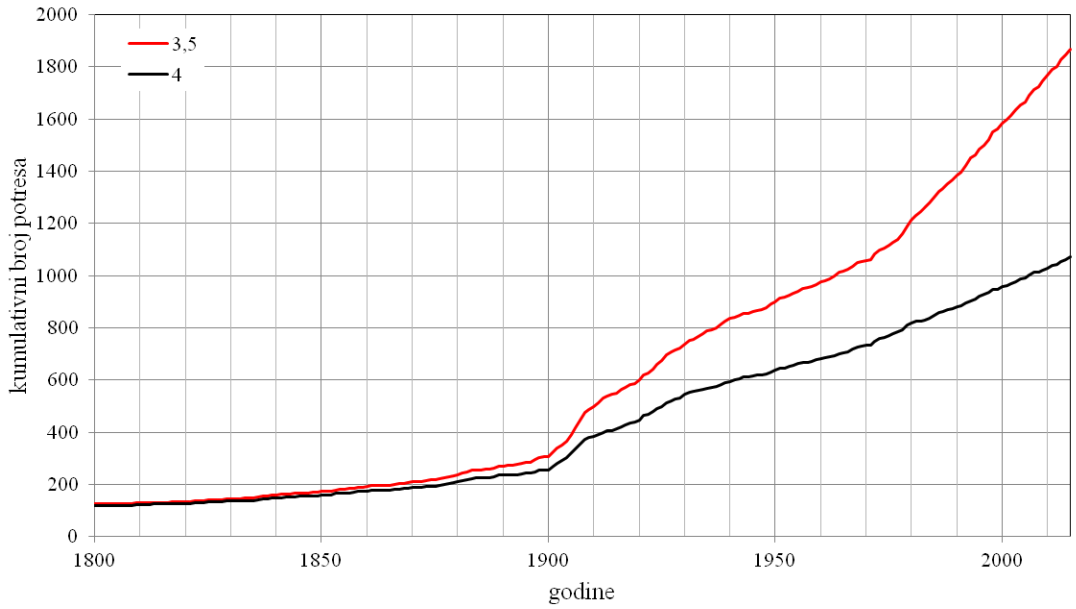
4.2. Potpunost kataloga

Prije određivanja parametara *a* i *b* iz Gutenberg – Richterove relacije potrebno je odrediti potpunost kataloga. Potpunost se određuje za određeno vremensko razdoblje, određeno područje i određenu magnitudu. Ako je katalog potpun, na primjer, za magnitude veće od 3,0 nakon 1980. godine, to podrazumijeva da su od 1980. godine do danas opaženi svi potresi magnitude veće od 3,0.

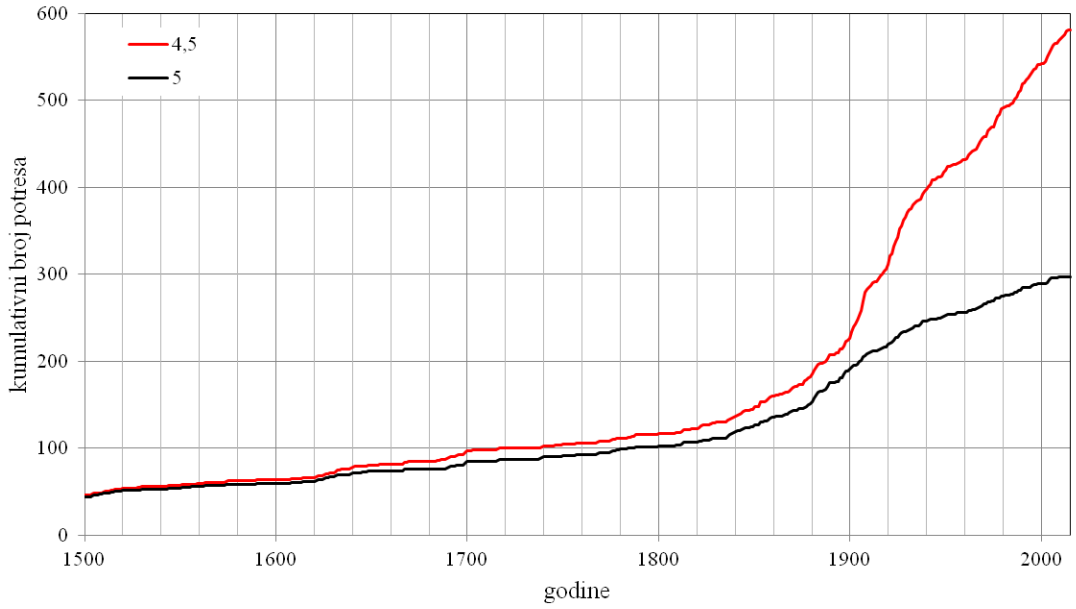
Odredila sam godinu potpunosti za deset različitih magnituda: 2,0, 2,5, 3,0, 3,5, 4,0, 4,5, 5,0, 5,5, 6,0 i 6,5 pojednostavljenom metodom kao u [17]. Grafički se prikazuje ukupan broj potresa magnitude veće od odabrane u ovisnosti o vremenu. Po pretpostavci, nagib krivulje će biti konstantan ako se prag potpunosti ne mijenja jer se broj potresa jednoliko povećava. Ako se odjednom nagib krivulje kumulativnog broja potresa poveća, opaženi godišnji broj potresa u kasnijim godinama je veći i mogu zaključiti da se prag potpunosti promijenio. Nacrtala sam krivulje ukupnog broja potresa za deset različitih magnituda potpunosti, na slikama 14-17. Na svakoj krivulji sam tražila najkasniju promjenu nagiba, a godinu u kojoj se ta promjena dogodila je godina potpunosti. Najteže je bilo odrediti godinu potpunosti za najveće magnitude, 5,5, 6,0 i 6,5, jer je takvih potresa malo pa krivulje nisu glatke, kako se vidi na slici 17. U tablici 6 su navedene godine potpunosti za svaku odabranu magnitudu.



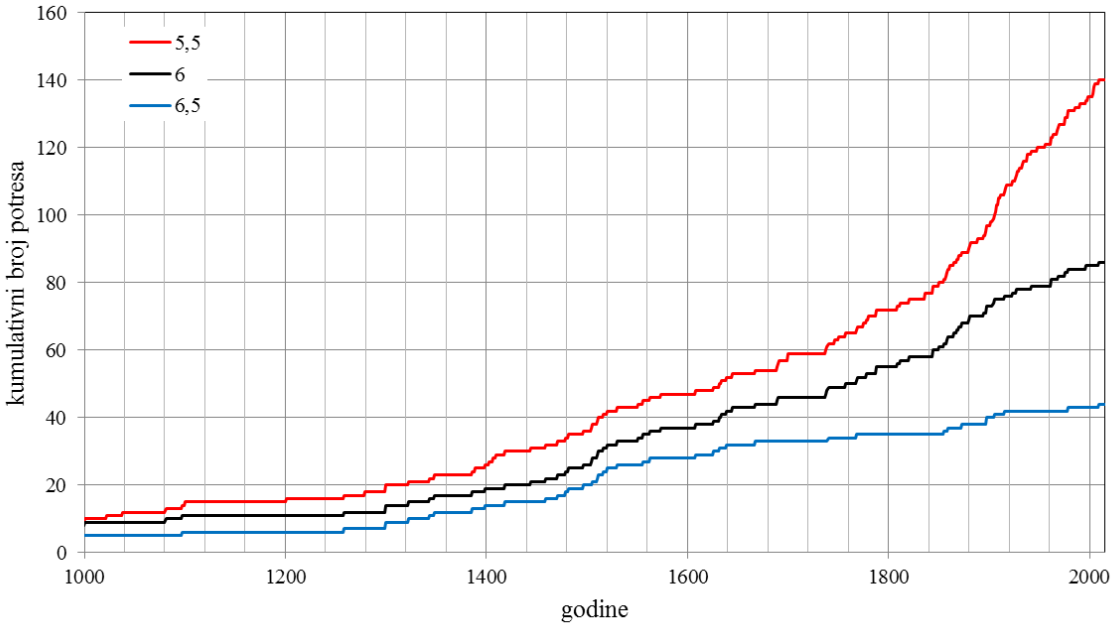
Slika 14: Kumulativni broj glavnih potresa u ovisnosti o vremenu. Razdioba potresa magnitude $M_W \geq 2{,}0$ je prikazana crvenom linijom, $M_W \geq 2{,}5$ crnom linijom, a $M_W \geq 3{,}0$ plavom linijom.



Slika 15: Kumulativni broj glavnih potresa u ovisnosti o vremenu. Razdioba potresa magnitude $M_W \geq 3{,}5$ je prikazana crvenom linijom, a $M_W \geq 4{,}0$ crnom linijom.



Slika 16: Kumulativni broj glavnih potresa u ovisnosti o vremenu. Razdioba potresa magnitude $M_W \geq 4{,}5$ je prikazana crvenom linijom, a $M_W \geq 5{,}0$ crnom linijom.

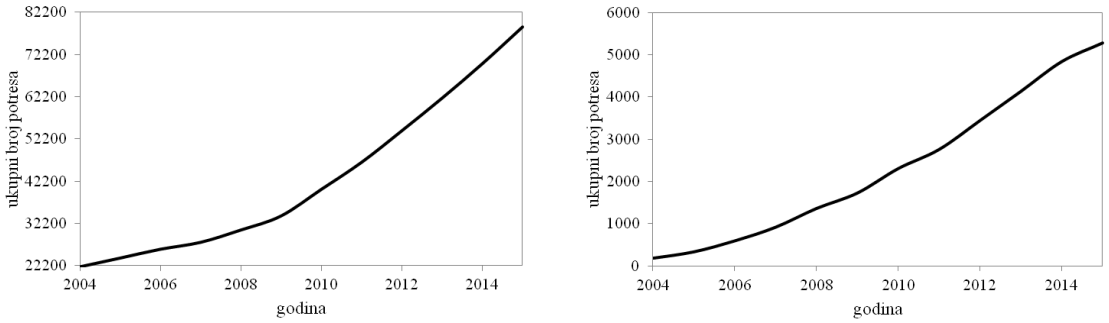


Slika 17: Kumulativni broj glavnih potresa u ovisnosti o vremenu. Razdioba potresa magnitude $M_W \geq 5{,}5$ je prikazana crvenom linijom, $M_W \geq 6$ crnom linijom, a $M_W \geq 6{,}5$ plavom linijom.

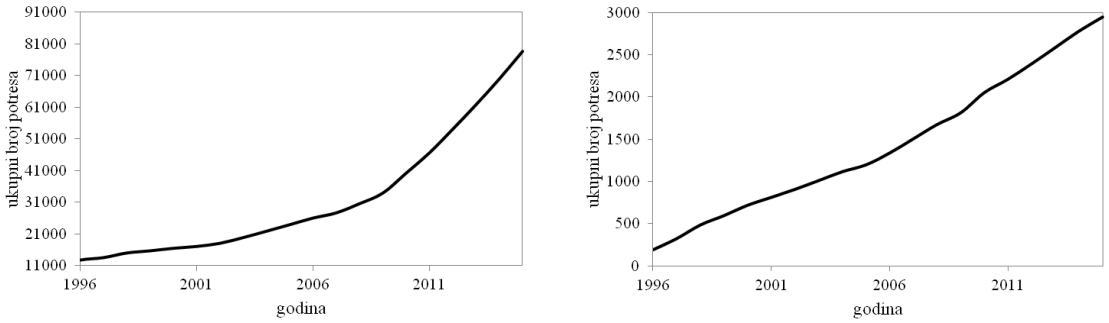
Tablica 6: Godina potpunosti za svaku od 10 izabranih magnituda.

Odabrana magnituda	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
Godina potpunosti	2004.	1996.	1980.	1970.	1900.	1850.	1800.	1750.	1500.	1400.

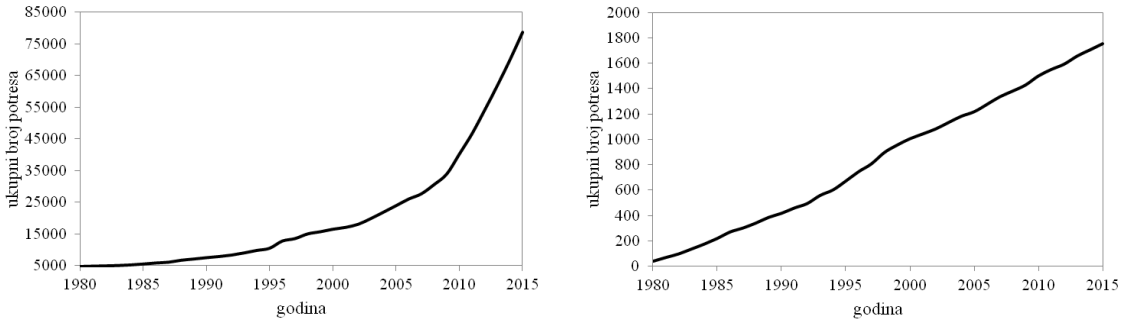
Sada imam potpune kataloge i zanima me jesu li potresi u njima Poissonovi događaji. Usporedila sam ih s početnim katalogom, koji sadrži sve potrese koji su se dogodili do kraja 2015. godine s epicentrima između 42° i 47° sjeverne geografske širine i 13° i 20° istočne geografske dužine. Želim vidjeti jesu li kumulativne razdiobe potresa iz potpunih kataloga bliže pravcima od kumulativne razdiobe potresa iz početnog kataloga, kao u [16]. Te su razdiobe prikazane na slikama 18-27, gdje se svaka slika odnosi na katalog s drugim pragom potpunosti, koji su navedeni u tablici 6. Što je vremensko razdoblje veće, odnosno godina potpunosti manja, razdioba svih potresa (lijevi prikaz na slikama) sve više odstupa od pravca. Kumulativne razdiobe potresa iz potpunih kataloga (desni prikazi na slikama) izgledaju kao pravci više od kumulativne razdiobe potresa iz početnog kataloga. Krivulje su najviše ravne i glatke za kataloge potpune od magnituda 2,0, 2,5, 3,0, 3,5 i 4,0 (slike 18-22), a za veće magnitude su sve manje ravne. Od pravca najviše odstupa slika 27, ali u tom potpunom katalogu ukupno je samo 30 potresa.



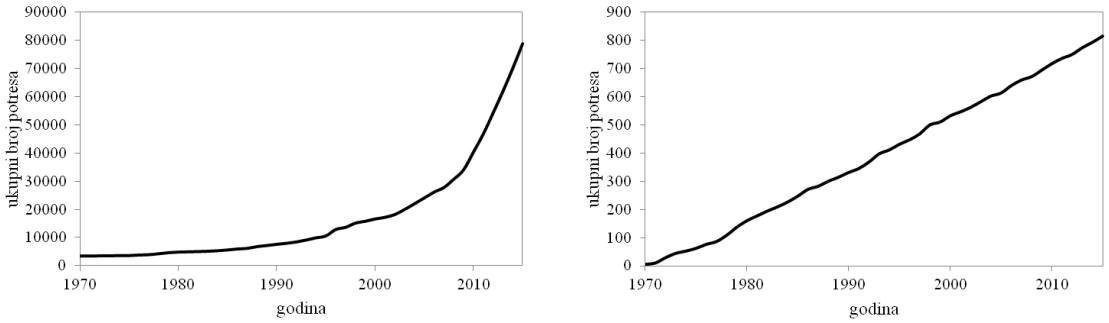
Slika 18: Kumulativni broj potresa nakon 2004. godine na području 42°-47° sjeverne geografske širine i 13°-20° istočne geografske dužine. Lijevo: cijeli katalog, desno: potpuni katalog s najmanjom magnitudom potresa 2,0.



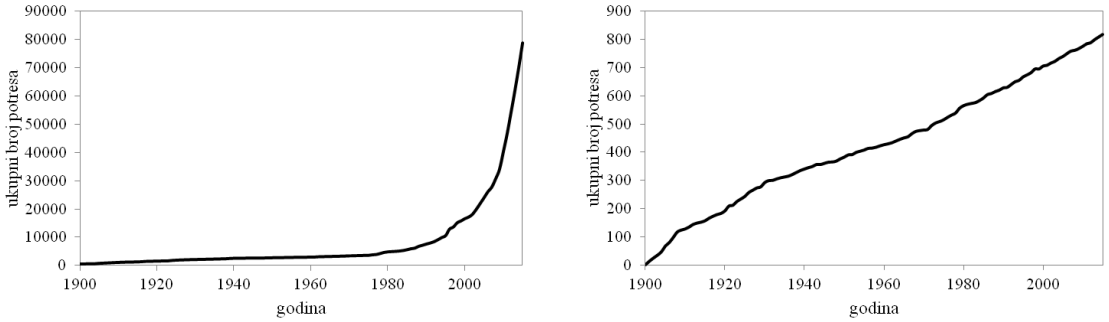
Slika 19: Kumulativni broj potresa nakon 1996. godine na području 42°-47° sjeverne geografske širine i 13°-20° istočne geografske dužine. Lijevo: cijeli katalog, desno: potpuni katalog s najmanjom magnitudom potresa 2,5.



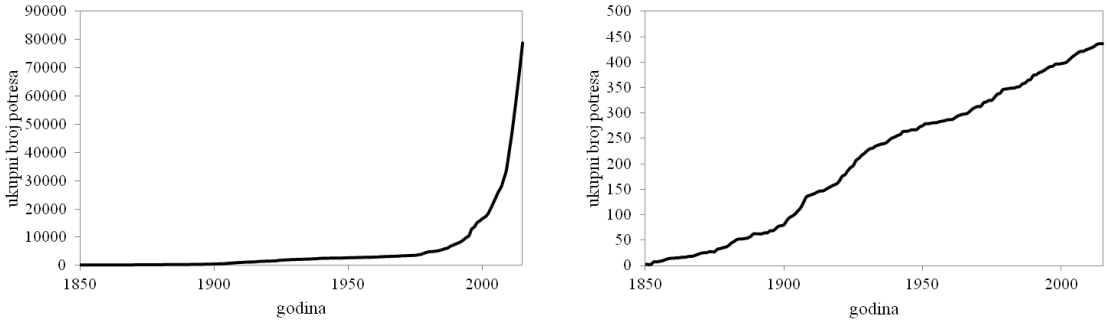
Slika 20: Kumulativni broj potresa nakon 1980. godine na području 42°-47° sjeverne geografske širine i 13°-20° istočne geografske dužine. Lijevo: cijeli katalog, desno: potpuni katalog s najmanjom magnitudom potresa 3,0.



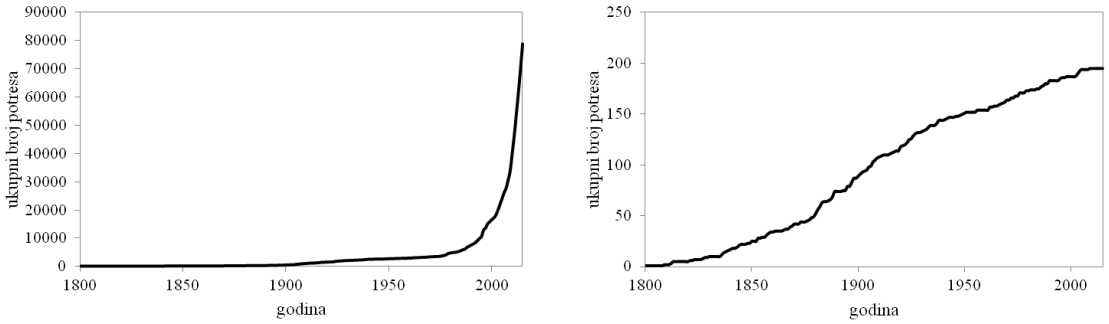
Slika 21: Kumulativni broj potresa nakon 1970. godine na području 42°-47° sjeverne geografske širine i 13°-20° istočne geografske dužine. Lijevo: cijeli katalog, desno: potpuni katalog s najmanjom magnitudom potresa 3,5.



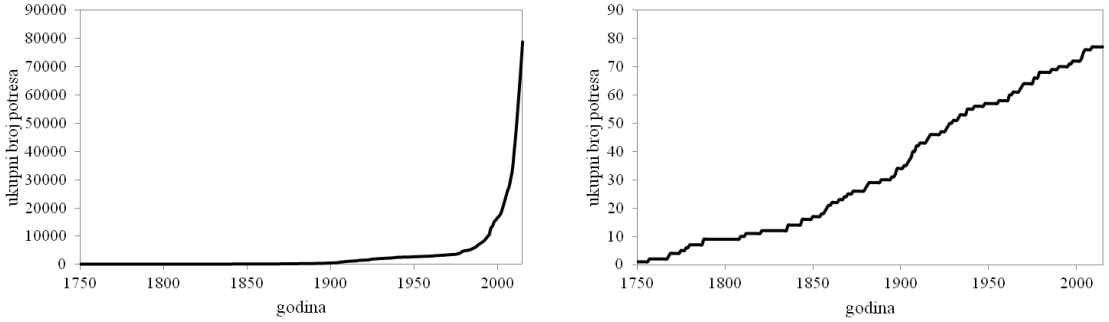
Slika 22: Kumulativni broj potresa nakon 1900. godine na području 42°-47° sjeverne geografske širine i 13°-20° istočne geografske dužine. Lijevo: cijeli katalog, desno: potpuni katalog s najmanjom magnitudom potresa 4,0.



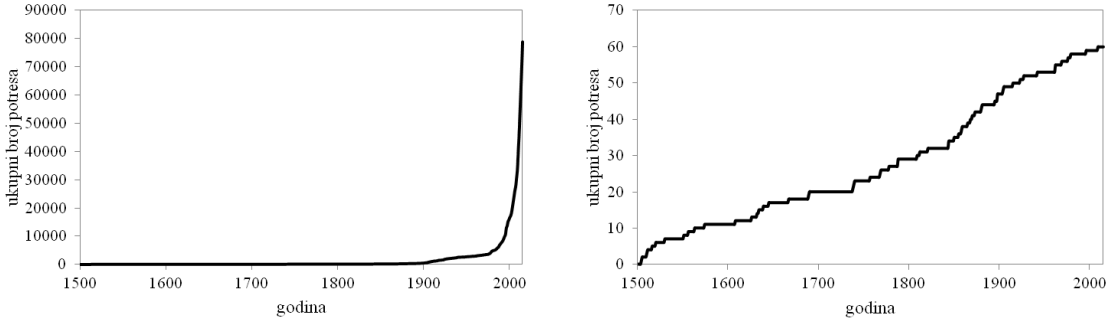
Slika 23: Kumulativni broj potresa nakon 1850. godine na području 42°-47° sjeverne geografske širine i 13°-20° istočne geografske dužine. Lijevo: cijeli katalog, desno: potpuni katalog s najmanjom magnitudom potresa 4,5.



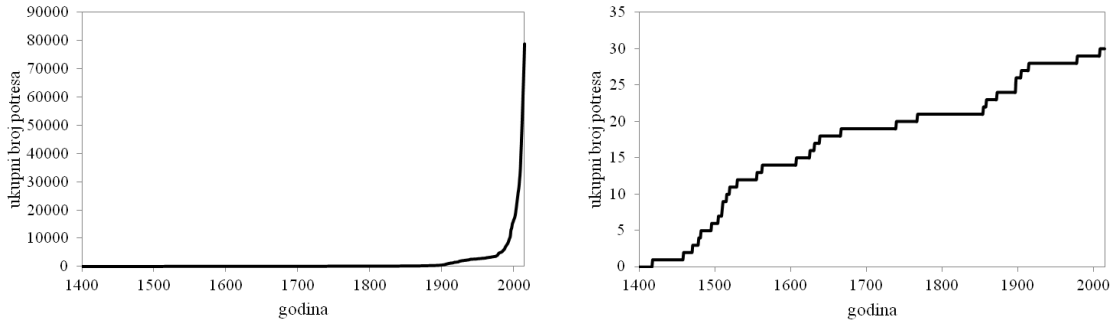
Slika 24: Kumulativni broj potresa nakon 1800. godine na području 42°-47° sjeverne geografske širine i 13°-20° istočne geografske dužine. Lijevo: cijeli katalog, desno: potpuni katalog s najmanjom magnitudom potresa 5,0.



Slika 25: Kumulativni broj potresa nakon 1750. godine na području 42°-47° sjeverne geografske širine i 13°-20° istočne geografske dužine. Lijevo: cijeli katalog, desno: potpuni katalog s najmanjom magnitudom potresa 5,5.



Slika 26: Kumulativni broj potresa nakon 1500. godine na području 42°-47° sjeverne geografske širine i 13°-20° istočne geografske dužine. Lijevo: cijeli katalog, desno: potpuni katalog s najmanjom magnitudom potresa 6,0.

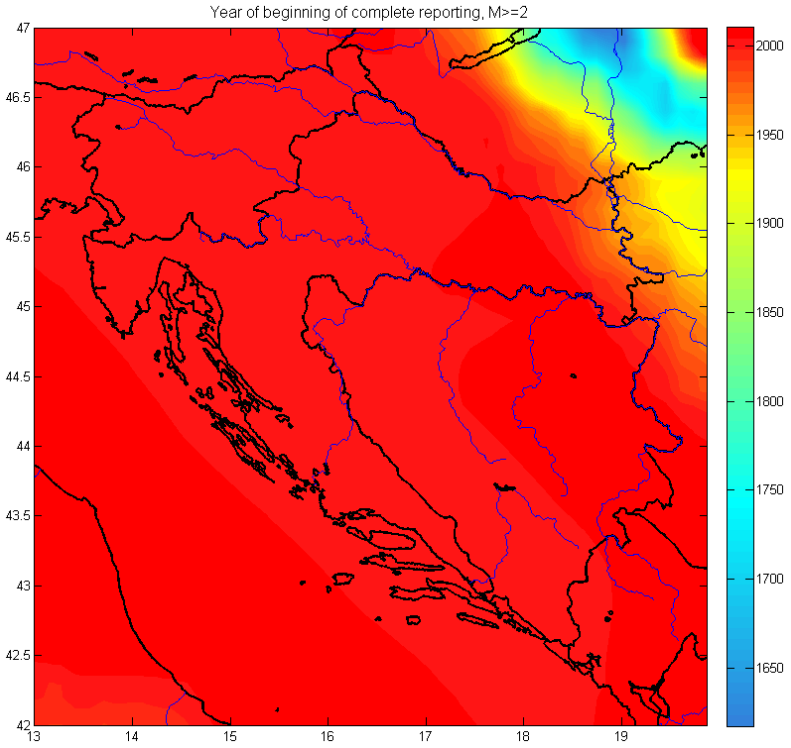


Slika 27: Kumulativni broj potresa nakon 1400. godine na području 42°-47° sjeverne geografske širine i 13°-20° istočne geografske dužine. Lijevo: cijeli katalog, desno: potpuni katalog s najmanjom magnitudom potresa 6,5.

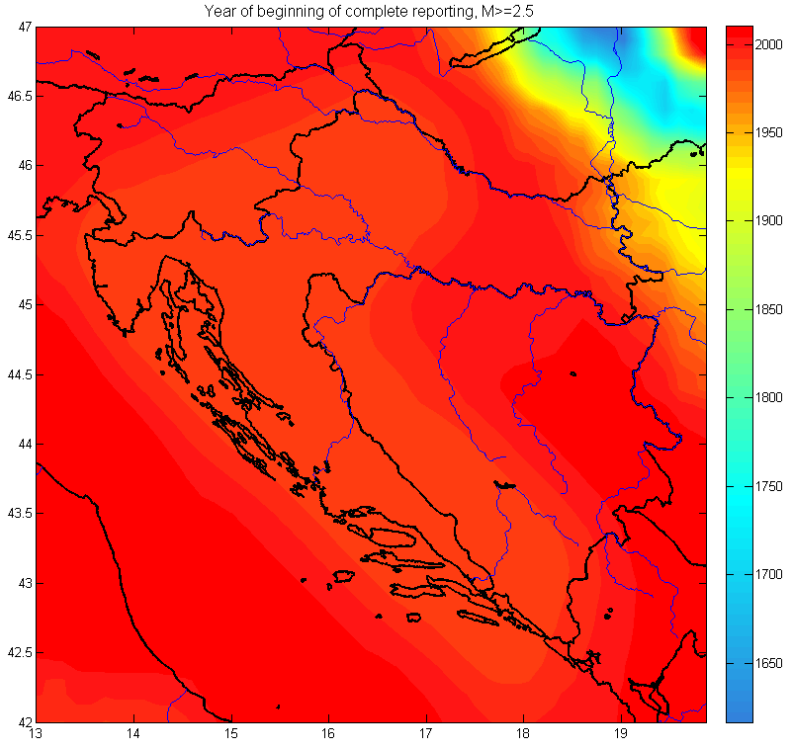
Godina potpunosti se za određenu magnitudu mijenja i prostorno. Ta promjena je grafički prikazana na slikama 28-37. Kako sam i očekivala, katalog je potpun za veće vremensko razdoblje što je magnituda potpunosti veća. Za najmanje odabrane magnitude, 2,0 (slika 28) i 2,5 (slika 29), katalog je potpun nakon 2000. godine na cijelom području Hrvatske. Za veće magnitude godina potpunosti nije jednaka za cijelu Hrvatsku. Od magnitude 3,0 (slika 30) do 5,0 (slika 34) katalog je potpun za veće vremensko razdoblje na području sjeverozapadne Hrvatske. U tablici 7 navedene su godine potpunosti za sjeverozapadni dio i ostatak Hrvatske. Vidim da je sjeverozapadni dio Hrvatske za magnitude potpunosti od 3,5 do 5,0 potpun cijelo jedno stoljeće prije od ostatka Hrvatske. Za magnitude veće od 5,0 slika se mijenja. Tako se na slici 35, uz sjeverozapadni dio, ističe i područje Istre, Velebita i Primorja. Na tim dijelovima godina potpunosti nakon magnitude 5,5 je 1700., a drugdje je 1750. Situacija je još manje ujednačena za magnitude potpunosti 6,0 (slika 36) i 6,5 (slika 37). Za magnitudu potpunosti 6,0 najranija godina potpunosti je 1300., i to na području Primorja, Like i Ravnih kotara te Dubrovnika. Dijelovi Hrvatske s najkasnijom godinom potpunosti za istu magnitudu su Slavonija i Dalmacija od Splita do Metkovića, a ta je godina 1600. Katalog na području Istre i Gorskog kotara je potpun nakon 1500. godine, a za područje središnje Hrvatske ne može se odrediti jedinstvena godina potpunosti. Za magnitudu potpunosti 6,5 katalog je potpun na području Slavonije nakon 1500. godine, a za ostatak Hrvatske je teško odrediti, kako se vidi i na slici 37.

Tablica 7: Godine potpunosti za odabrane magnitude na području sjeverozapada i ostatka Hrvatske.

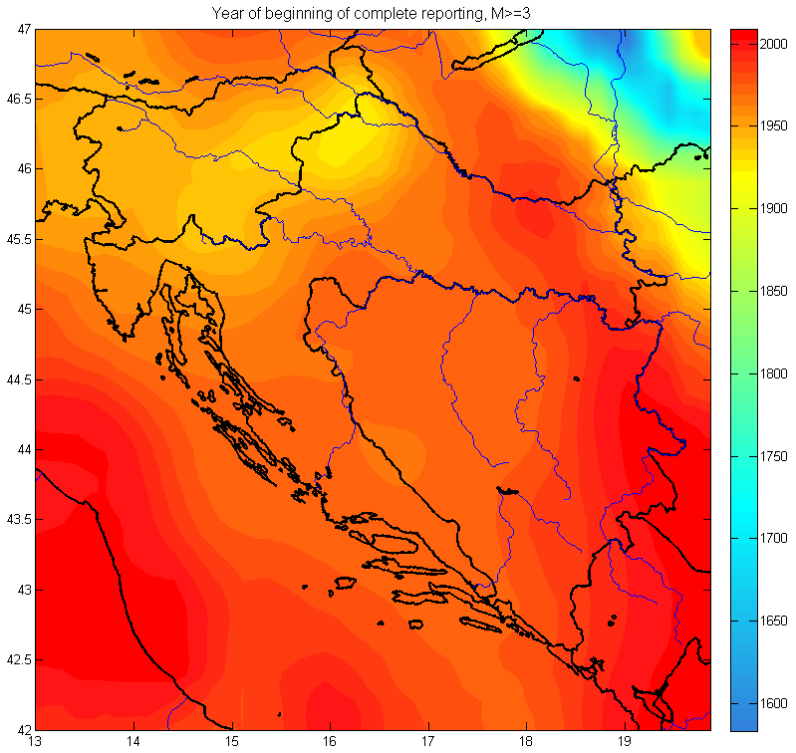
Magnituda	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
Godina potpunosti sjeverozapadnog dijela Hrvatske	1930.	1850.	1850.	1800.	1750.
Godina potpunosti ostatka Hrvatske	1950.	1950.	1950.	1900.	1850.



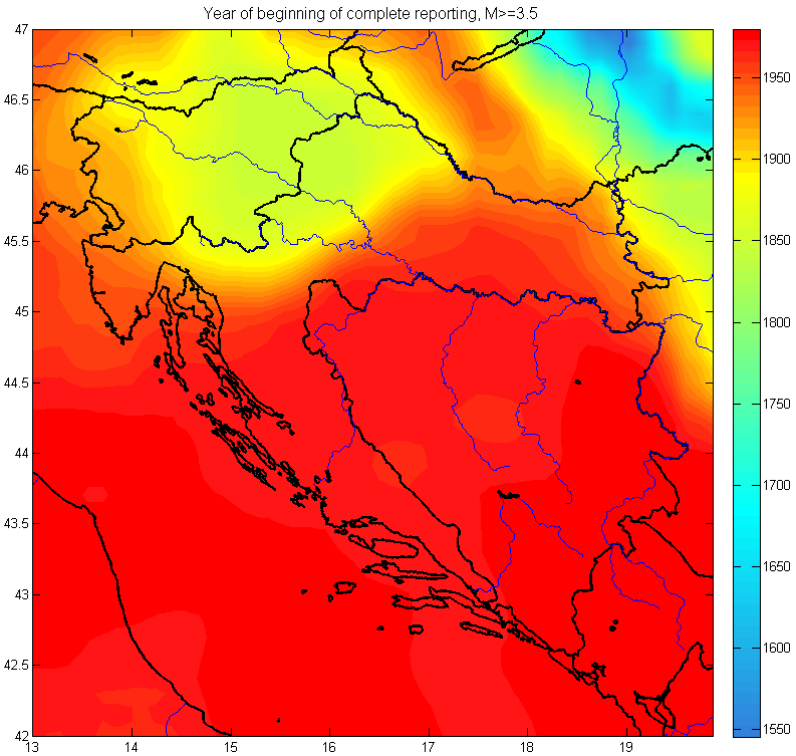
Slika 28: Godina potpunosti kataloga glavnih potresa magnitude $M_W \geq 2$.



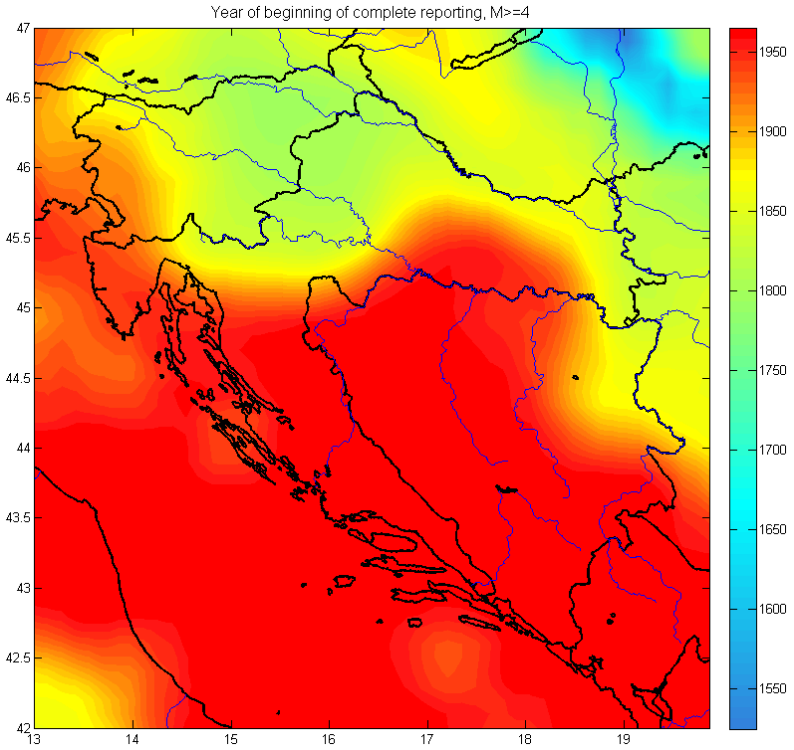
Slika 29: Godina potpunosti kataloga glavnih potresa magnitude $M_W \geq 2{,}5$.



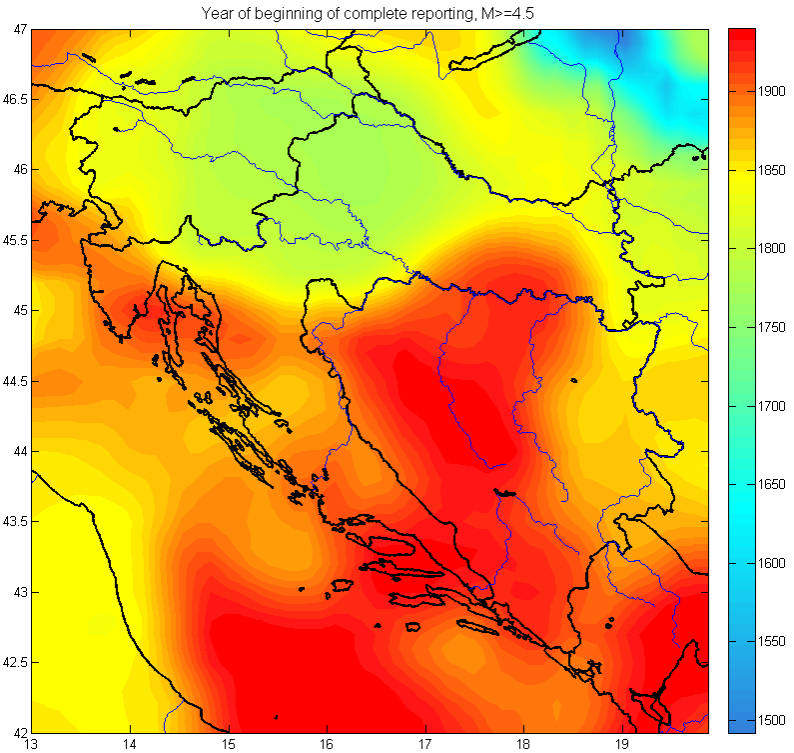
Slika 30: Godina potpunosti kataloga glavnih potresa magnitude $M_W \geq 3$.



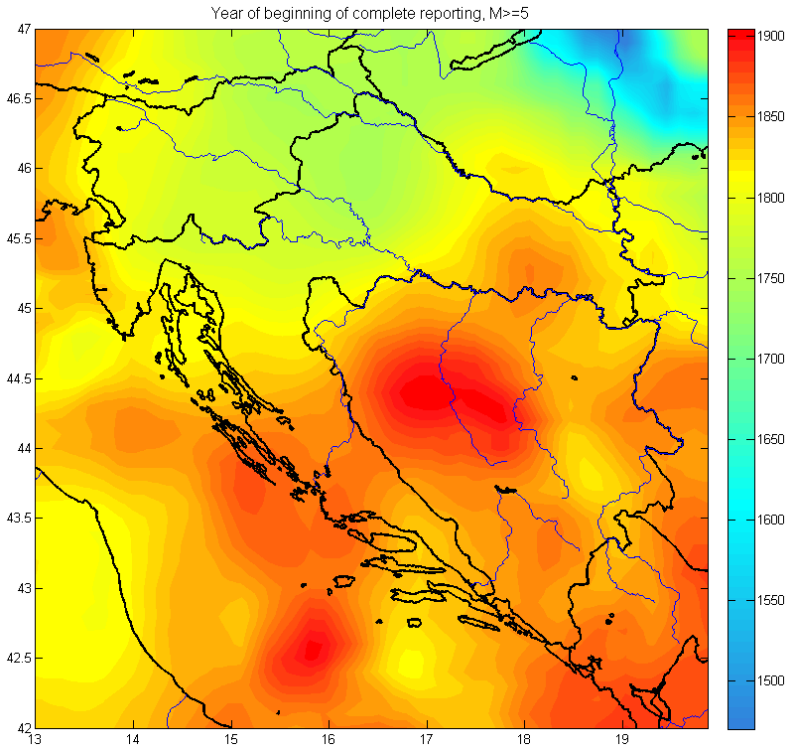
Slika 31: Godina potpunosti kataloga glavnih potresa magnitude $M_W \geq 3{,}5$.



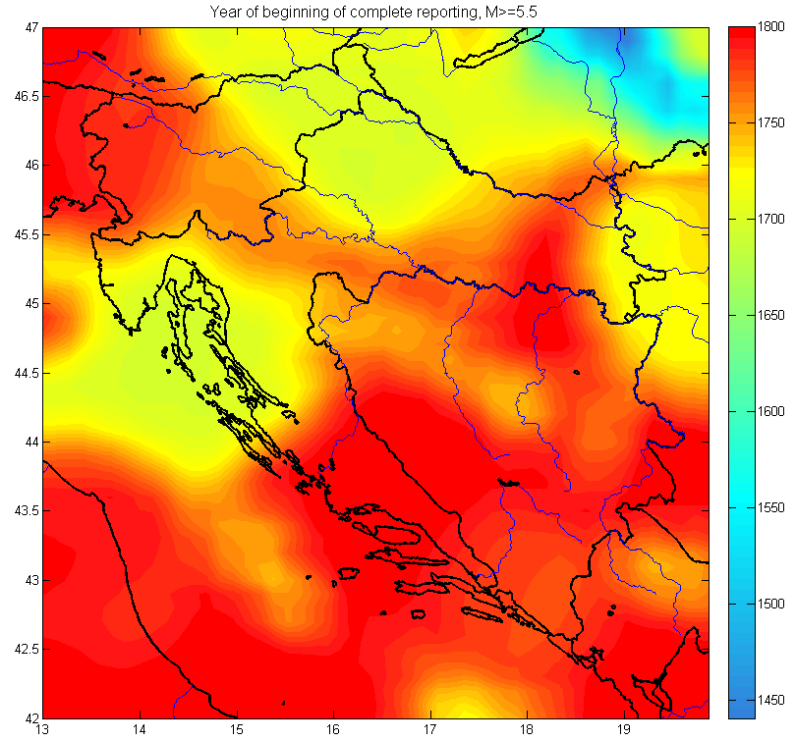
Slika 32: Godina potpunosti kataloga glavnih potresa magnitude $M_W \geq 4$.



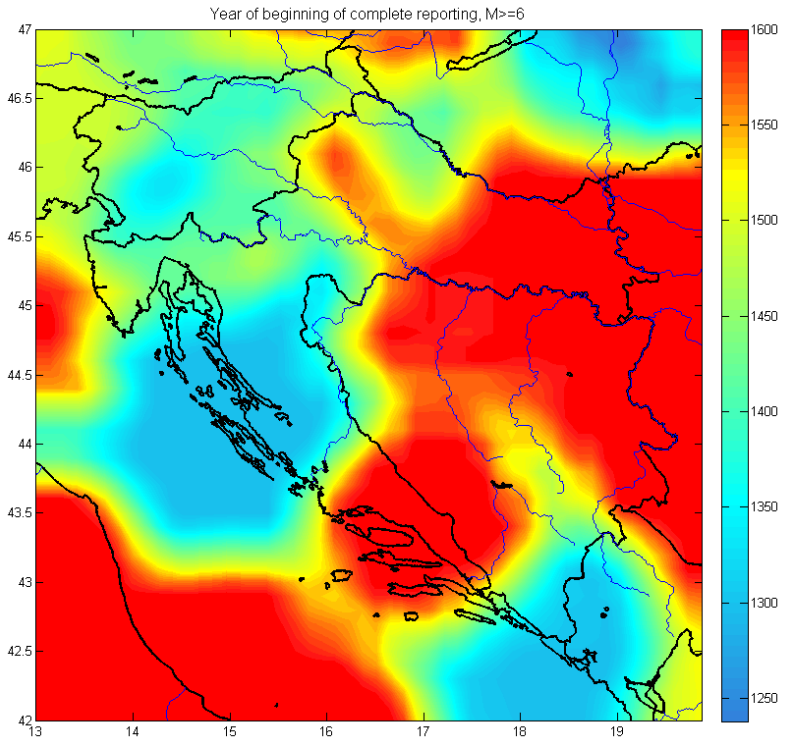
Slika 33: Godina potpunosti kataloga glavnih potresa magnitude $M_W \geq 4{,}5$.



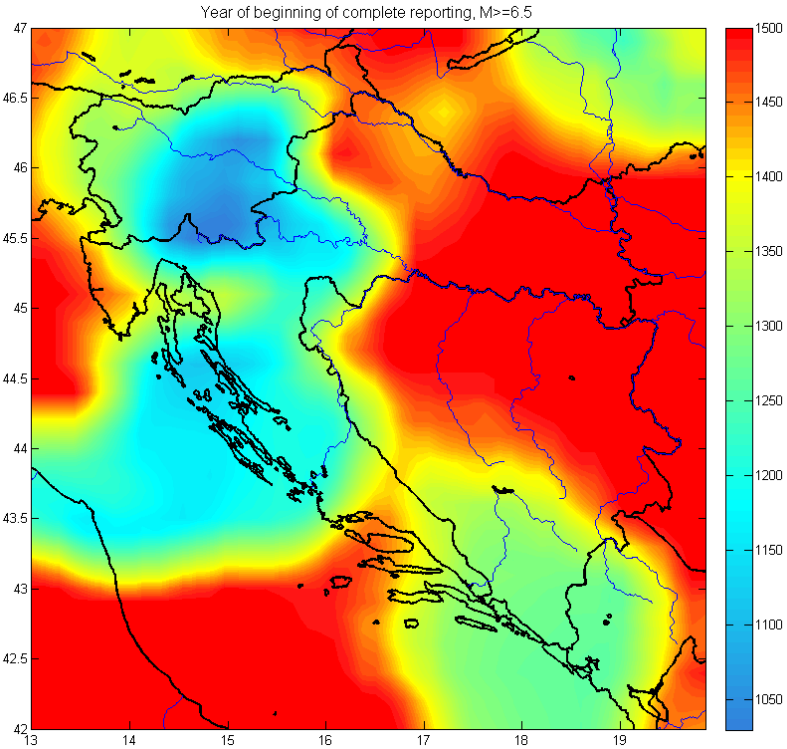
Slika 34: Godina potpunosti kataloga glavnih potresa magnitude $M_W \geq 5$.



Slika 35: Godina potpunosti kataloga glavnih potresa magnitude $M_W \geq 5{,}5$.



Slika 36: Godina potpunosti kataloga glavnih potresa magnitude $M_W \geq 6$.



Slika 37: Godina potpunosti kataloga glavnih potresa magnitude $M_W \geq 6{,}5$.

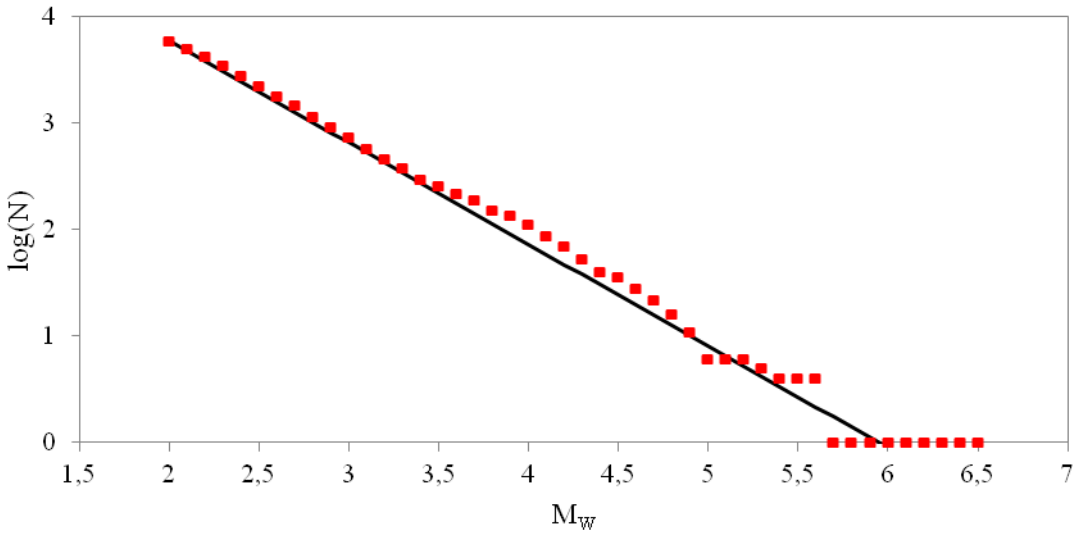
4.3. Koeficijenti Gutenberg – Richterove relacije

Za potpune kataloge sam odredila parametre *a* i *b* Gutenberg – Richterove relacije metodom najveće vjerodostojnosti, a rezultati se nalaze u tablici 8. Nagib pravca *b* je uglavnom unutar granica očekivanja, odnosno oko 1. Neočekivano velika vrijednost parametra *b* je izračunata za katalog s magnitudom potpunosti 6,5. To odstupanje može biti zbog povijesnih potresa: od 30 potresa magnitude $M_W \geq 6{,}5$, 26 ih je povijesnih. Procjena intenziteta povijesnih potresa je upitna, kao i njegova konverzija u magnitudu, što unosi određenu pogrešku u određivanju jakosti povijesnih potresa.

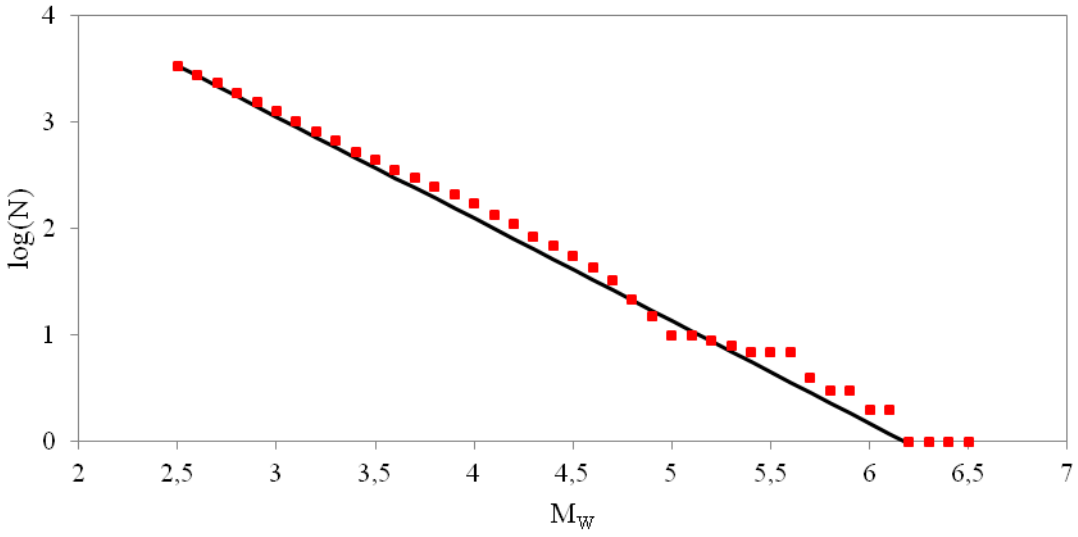
Tablica 8: Koeficijenti iz Gutenberg – Richterove relacije za kataloge potresa različite godine i magnitude potpunosti te broj potresa na temelju kojeg su navedeni koeficijenti izračunati.

Magnituda	**Godina potpunosti**	**Broj potresa**	***a***	***b***
2,0	2004.	5287	5,68	0,95
2,5	1996.	2948	5,93	0,96
3,0	1980.	1753	6,14	0,94
3,5	1970.	815	6,13	0,90
4,0	1900.	817	6,36	0,85
4,5	1850.	436	6,76	0,91
5,0	1800.	195	6,76	0,89
5,5	1750.	77	6,82	0,89
6,0	1500.	60	8,10	1,05
6,5	1400.	30	10,30	1,36

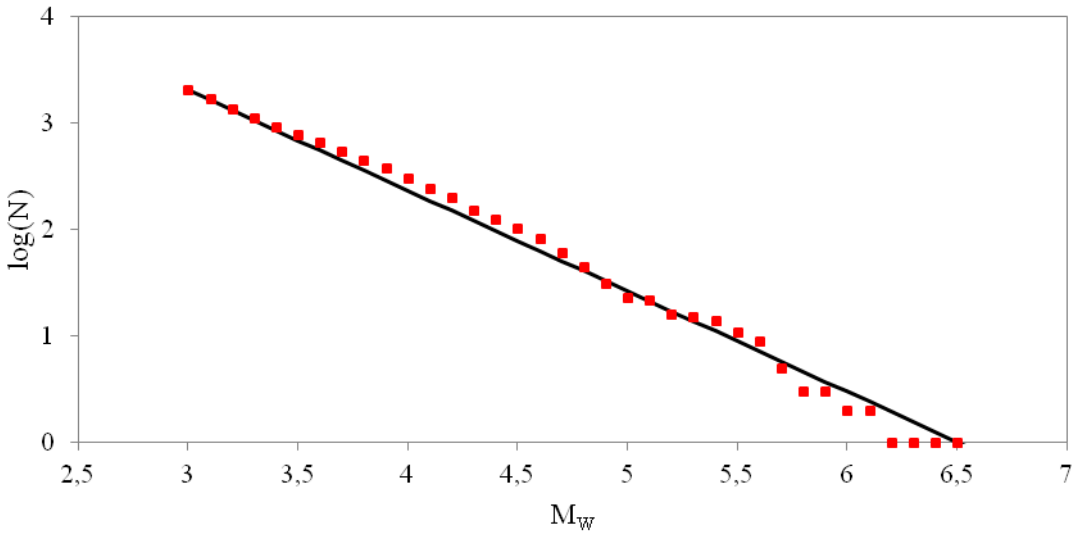
Na slikama 38-47 su podaci o broju potresa, odnosno logaritmu broja potresa, u ovisnosti o magnitudi iz svakog potpunog kataloga i pravci Gutenberg – Richterove relacije za odgovarajuće kataloge s koeficijentima iz tablice 8. Sa slika se vidi da pravac dobro opisuje točke. Na slikama 38-41 se može primijetiti da bi se kroz točke moglo provući više pravaca različitih nagiba, koji ovise o rasponu magnituda. Tako za točke na slici 38 pravac s jednim nagibom opisuje točke u rasponu magnituda između 2 i 3,5, pravac drugog nagiba točke u rasponu magnituda između 3,5 i 5, a pravac s nekim trećim nagibom magnitude između 5 i 6. Situacija je slična za slike 39-41: jedan nagib pravca dobro opisuje potrese magnituda do 3,5, drugi nagib potrese magnituda do 4,5 ili 5 i treći potrese najvećih magnituda. Na istim se slikama može uočiti da nagib prikazanog pravca, određen parametrom *b*, najbolje opisuje najslabije magnitude.



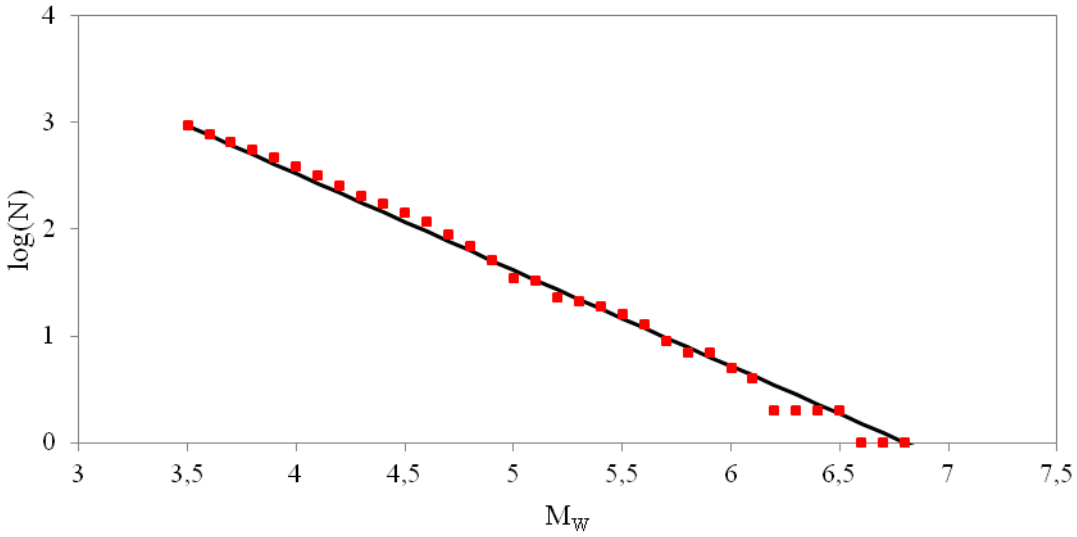
Slika 38: Crveni kvadrati prikazuju dekadski logaritam broja potresa u ovisnosti o magnitudi. Crni pravac prikazuje Gutenberg – Richterovu relaciju. Podaci se odnose na katalog glavnih potresa potpun za magnitudu $M_W \geq 2{,}0$.



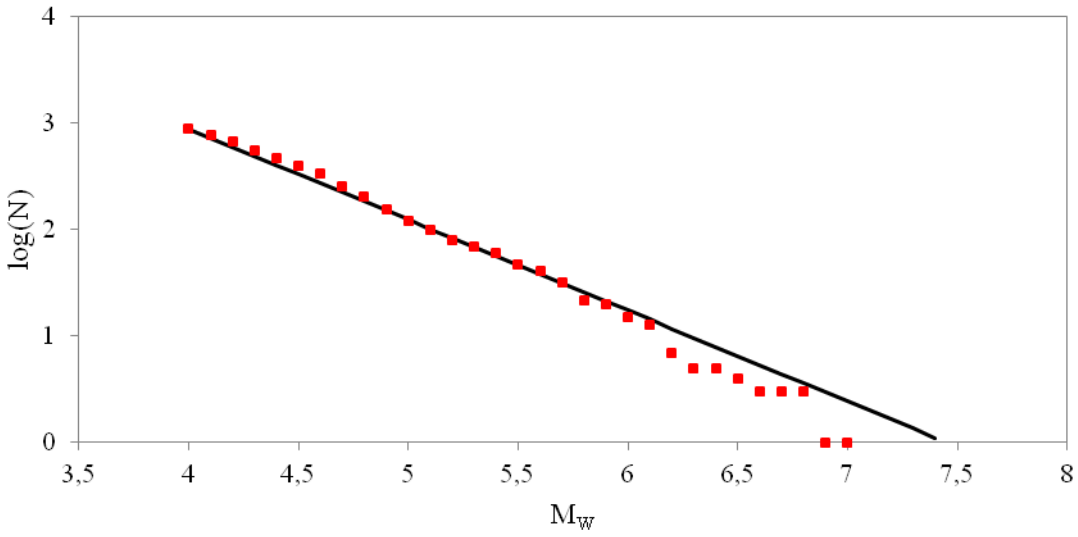
Slika 39: Crveni kvadrati prikazuju dekadski logaritam broja potresa u ovisnosti o magnitudi. Crni pravac prikazuje Gutenberg – Richterovu relaciju. Podaci se odnose na katalog glavnih potresa potpun za magnitudu $M_W \geq 2{,}5$.



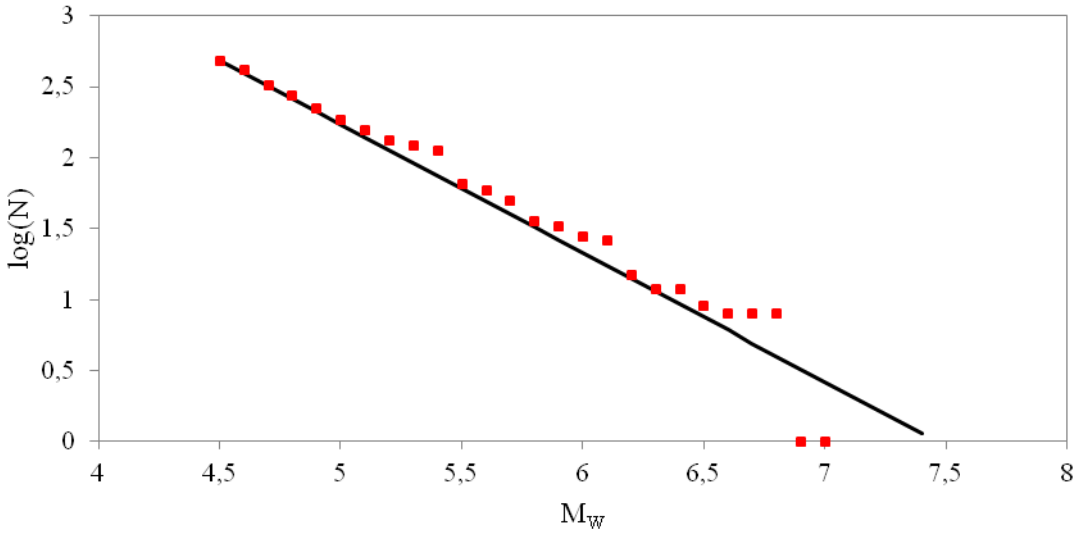
Slika 40: Crveni kvadrati prikazuju dekadski logaritam broja potresa u ovisnosti o magnitudi. Crni pravac prikazuje Gutenberg – Richterovu relaciju. Podaci se odnose na katalog glavnih potresa potpun za magnitudu $M_W \geq 3{,}0$.



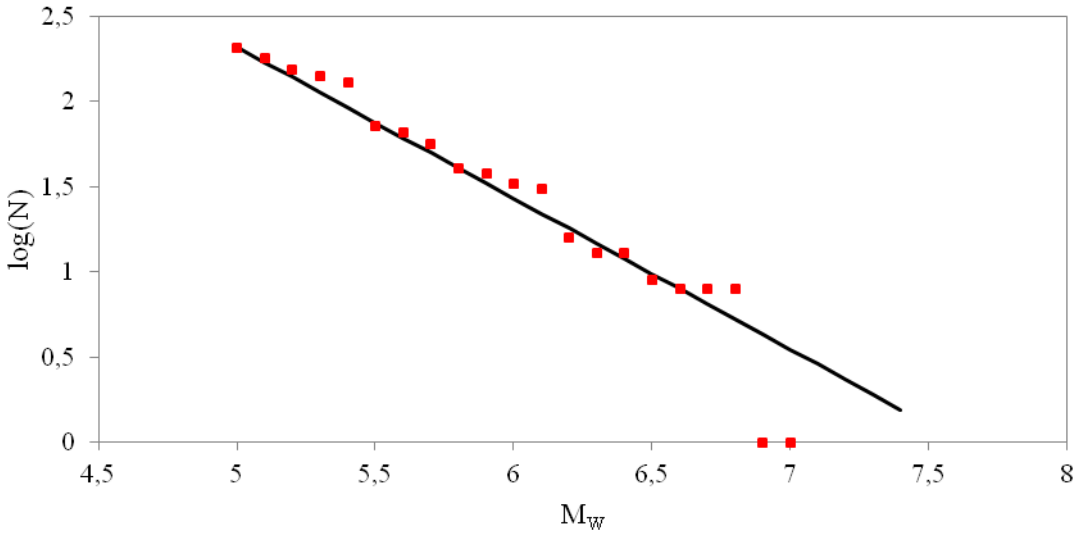
Slika 41: Crveni kvadrati prikazuju dekadski logaritam broja potresa u ovisnosti o magnitudi. Crni pravac prikazuje Gutenberg – Richterovu relaciju. Podaci se odnose na katalog glavnih potresa potpun za magnitudu $M_W \geq 3{,}5$.



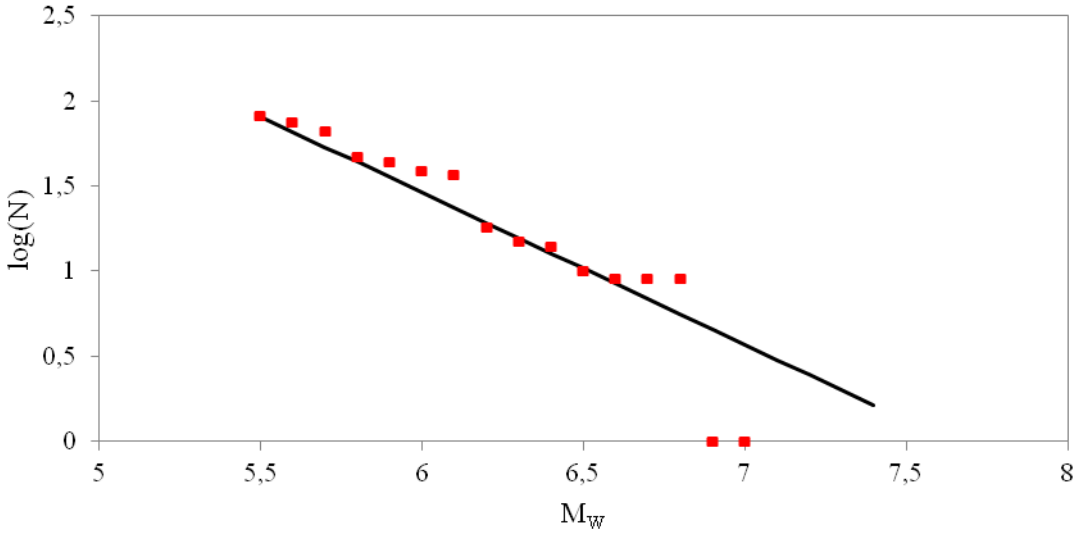
Slika 42: Crveni kvadrati prikazuju dekadski logaritam broja potresa u ovisnosti o magnitudi. Crni pravac prikazuje Gutenberg – Richterovu relaciju. Podaci se odnose na katalog glavnih potresa potpun za magnitudu $M_W \geq 4{,}0$.



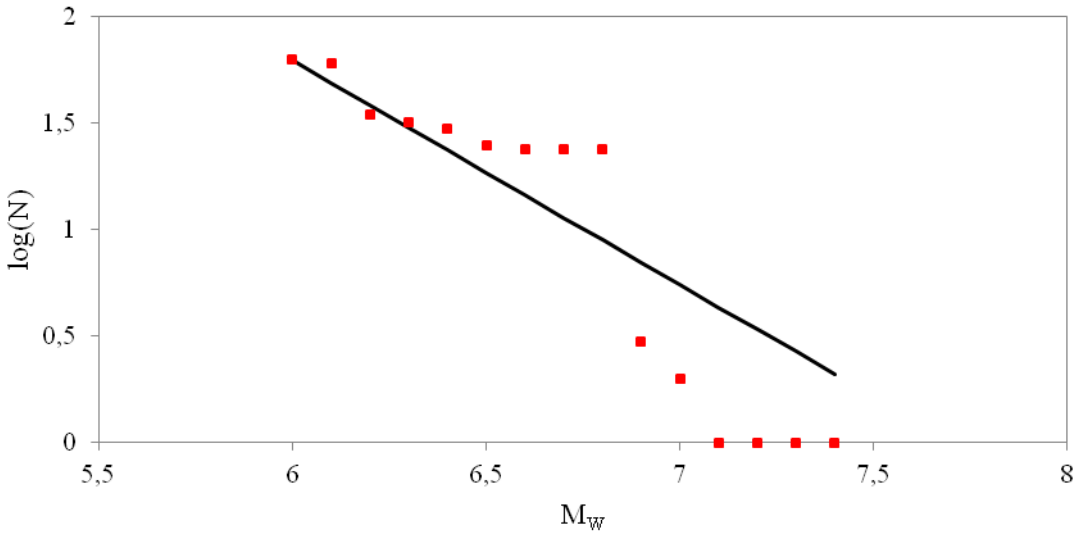
Slika 43: Crveni kvadrati prikazuju dekadski logaritam broja potresa u ovisnosti o magnitudi. Crni pravac prikazuje Gutenberg – Richterovu relaciju. Podaci se odnose na katalog glavnih potresa potpun za magnitudu $M_W \geq 4{,}5$.



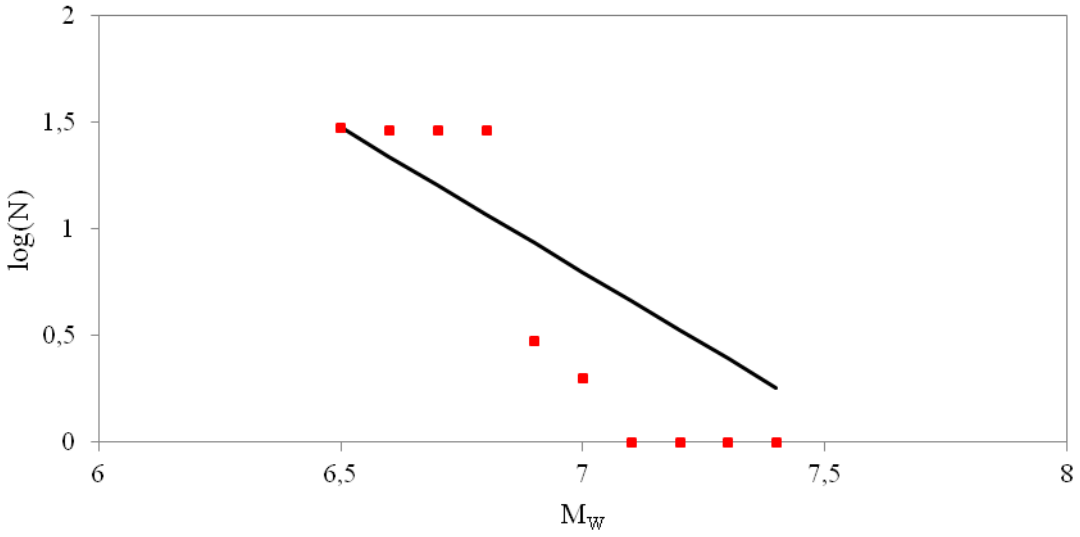
Slika 44: Crveni kvadrati prikazuju dekadski logaritam broja potresa u ovisnosti o magnitudi. Crni pravac prikazuje Gutenberg – Richterovu relaciju. Podaci se odnose na katalog glavnih potresa potpun za magnitudu $M_W \geq 5{,}0$.



Slika 45: Crveni kvadrati prikazuju dekadski logaritam broja potresa u ovisnosti o magnitudi. Crni pravac prikazuje Gutenberg – Richterovu relaciju. Podaci se odnose na katalog glavnih potresa potpun za magnitudu $M_W \geq 5{,}5$.

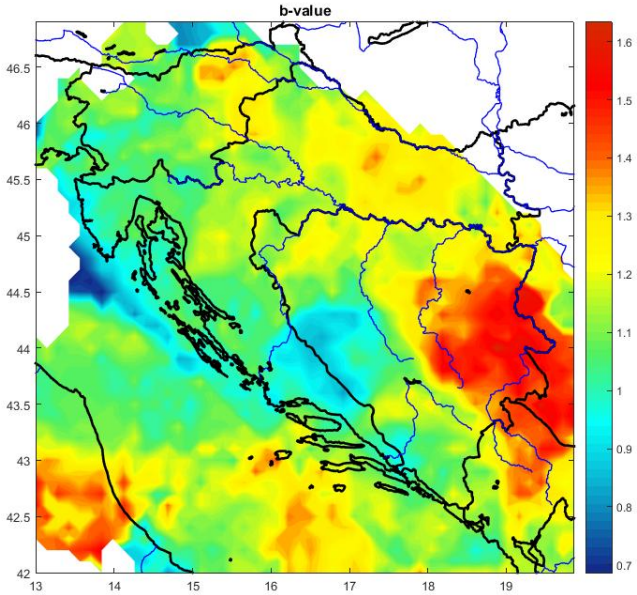


Slika 46: Crveni kvadrati prikazuju dekadski logaritam broja potresa u ovisnosti o magnitudi. Crni pravac prikazuje Gutenberg – Richterovu relaciju. Podaci se odnose na katalog glavnih potresa potpun za magnitudu $M_W \geq 6{,}0$.

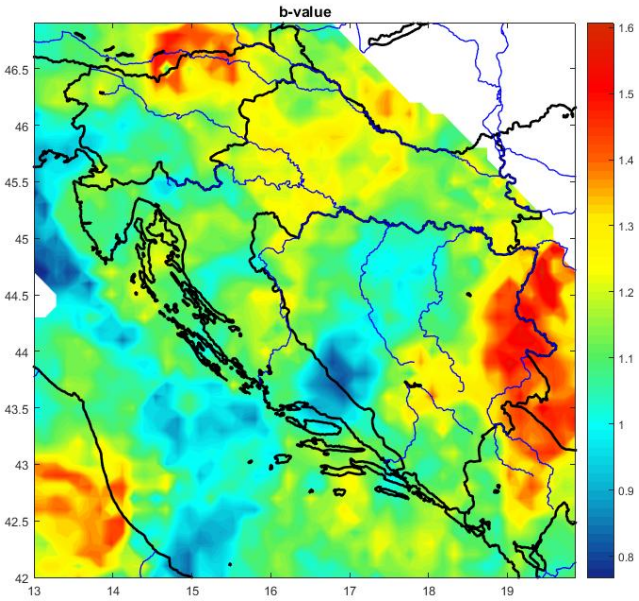


Slika 47: Crveni kvadrati prikazuju dekadski logaritam broja potresa u ovisnosti o magnitudi. Crni pravac prikazuje Gutenberg – Richterovu relaciju. Podaci se odnose na katalog glavnih potresa potpun za magnitudu $M_W \geq 6{,}5$.

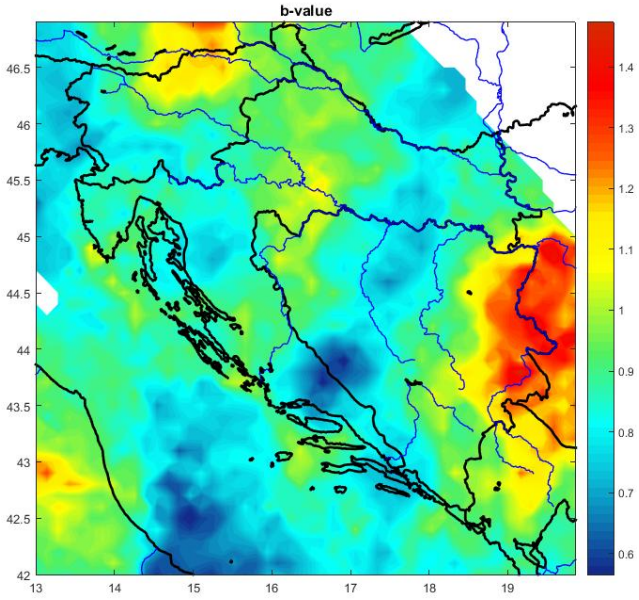
Prostorna promjena parametra *b* iz Gutenberg – Richterove relacije prikazana je grafički na slikama 48-50. Slike su samo za potpune kataloge s magnitudama potpunosti 2,0, 2,5 i 3,0 jer je u ostalim katalozima broj potresa premali za prikaz promjene parametra *b* na cijelom području Hrvatske. Ako se usporede slike 48-50, vidi se manja vrijednost parametra *b* za katalog s magnitudom potpunosti 3,0 (slika 50) u odnosu na druga dva kataloga na cijelom obuhvaćenom području. Iako je vrijednost parametra *b* manja za taj katalog, što se vidi iz tablice 8, nije značajno manja, pa nisam očekivala smanjenje kao na slikama. Posebno sam gledala područje Slavonije, sjeverozapadne Hrvatske, obalnog dijela Hrvatske i južni dio Jadranskog mora. Najveću vrijednost parametra *b* očekujem na području Slavonije jer je ono najmanje seizmički aktivno, a veći *b* znači veći udio slabijih potresa u odnosu na jake. Tako su slike 48 i 49 u skladu s očekivanjima. Najmanja vrijednost parametra *b* je u obalnom dijelu Hrvatske jer je tamo seizmičnost najveća, što se vidi i na slikama 48-50. Sjeverozapadni dio Hrvatske ima manji *b* od istočnog dijela na slici 48, a veći na slikama 49 i 50. Na slici 48 se vidi da je vrijednost *b* velika u južnom Jadranu. To me ne čudi jer katalog potpun za magnitude $M_W \geq 2$ od 2004. godine (slika 48) ne obuhvaća potres iz 2003. s epicentrom kod otoka Jabuke. Za južni Jadran je ista vrijednost i na slici 49, koji obuhvaća i spomenuti jabučki potres, ali je ipak još uvijek premalo jakih potresa za manju vrijednost *b*. Zato je na istom području, prema slici 50, vrijednost parametra *b* manja nego u druga dva kataloga.



Slika 48: Prostorna razdioba parametra *b* iz Gutenberg – Richterove relacije za katalog glavnih potresa potpun za magnitudu $M_W \geq 2$ od 2004. godine.



Slika 49: Prostorna razdioba parametra *b* iz Gutenberg – Richterove relacije za katalog glavnih potresa potpun za magnitudu $M_W \geq 2{,}5$ od 1996. godine.



Slika 50: Prostorna razdioba parametra *b* it Gutenberg – Richterove relacije za katalog glavnih potresa potpun za magnitudu $M_W \geq 3$ od 1980. godine.

Vrijednost parametra *b* određena iz potpunog kataloga s momentnim magnitudama koristi se, uz još neke parametre, u procjeni hazarda. Problem je ovdje što se *b* značajno mijenja na području proračuna. Sa slike 48 se vidi da je vrijednost *b* na istoku na granici Bosne i Hercegovine i Srbije 1,6, a jugozapadno od Istre je 0,8. Ta razlika od 0,6 sugerira da bi za precizno određivanje hazarda bilo poželjno obuhvatiti manje područje nego ovdje, odnosno provesti seizmičko zoniranje, i izračunati *b* koji se na tom području značajnije ne mijenja.

5. Zaključak

U ovom radu sam uniformirala Hrvatski katalog potresa uvođenjem momentne magnitude i analizirala ga na području između 42° i 47° sjeverne geografske širine te 13° i 20° istočne geografske duljine. Momentnu magnitudu sam uvela jer se ona koristi u procjeni hazarda. U instrumentalnom razdoblju opažanja potresa na zagrebačkoj postaji korištena su tri različita instrumenta. Iako se sugerira da bi se trebala računati posebna relacija za svaki instrument [11], zaključila sam da su relacije za različita vremenska razdoblja (tablica 2) slične relaciji (1), izvedenoj za cijelo instrumentalno razdoblje. Zato sam momentnu magnitudu računala iz lokalne magnitude prema formuli (1) za sve potrese u katalogu i pomoću nje radila statističku analizu. Ovo nije prva relacija za konverziju lokalne magnitude u momentnu magnitudu za područje Hrvatske, ali je određena na većem skupu podataka i dobro se slaže s ranije određenom relacijom u [12].

Na području Hrvatske seizmički najaktivniji su obalni i sjeverozapadni dio (slika 10), gdje su se kroz povijest dogodili mnogi snažni potresi, a najjači je pogodio Dubrovnik. Jadran je zanimljiv jer se prije tridesetak godina smatrao gotovo aseizmičnim, što nije u skladu s podacima iz kataloga. Snažne serije potresa važne su zbog identificiranja aktivnih rasjeda koji se koriste u procjeni hazarda.

Iz kataloga glavnih potresa sam izdvojila nekoliko potpunih kataloga jer se na potpunom katalogu određuju parametri *a* i *b* u Gutenberg – Richterovoj relaciji. Potpunost sam odredila metodom iz [17], koja zahtijeva gledanje kumulativne razdiobe potresa, jer je dobra i za malo podataka. Potpunost kataloga glavnih potresa sam odredila za čak 10 magnituda kako bih ih mogla usporediti. Godina potpunosti se smanjuje s povećanjem magnitude potpunosti, ali se tako smanjuje i broj potresa u katalogu (tablica 8). Potpuni katalozi više nalikuju Poissonovim procesima od kataloga svih potresa (slike 18-27).

Za potpuni katalog glavnih potresa pravac Gutenberg – Richterove relacije dobro opisuje točke koje prikazuju logaritam broja potresa u ovisnosti o magnitudi (slike 38-47), a nagib pravca *b* bolje opisuje slabije potrese. Prostorna promjena *b* je prevelika da bi se za dobru procjenu hazarda uzelo u obzir cijelo područje na kojem sam računala parametar *b* u ovom radu. Kako bi se usklađeni katalog potresa za područje Hrvatske mogao primijeniti prilikom procjene seizmičkog hazarda, potrebno je provesti seizmičko zoniranje, te ponoviti statističku analizu za subkataloge koji pripadaju pojedinoj zoni.

6. Literatura

[1] Richter, C. An instrumental earthquake magnitude scale. // Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 25, 1 (1935), str. 1-32.

[2] Herak, D. Razdioba brzina prostornih valova potresa i seizmičnost šireg područja Dinare. Doktorski rad. Zagreb: Prirodoslovno-matematički fakultet, 1995.

[3] Kanamori, H. The energy release in great earthquakes. // Journal of geophysical research. Vol. 82, 20 (1977), str. 2981-2987.

[4] Markušić, S. Seismicity of Croatia // Earthquake Monitoring and Seismic Hazard Mitigation in Balkan Countries / Husebye, Eystein, S. (ur.). Dordrecht : Springer, 2008. Str. 81-98.

[5] Shebalin, N. V.; Karnik, V.; Hadžievski, D. Catalogue of earthquakes I-II, UNDP/UNESCO Survey of the seismicity of the Balkan region. Skopje, 1974.

[6] International seismological centre, http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/catalogue/, 5.3.2015.

[7] ANSS Composite Catalogue Search, http://www.ncedc.org/anss/catalog-search.html/, 8.3.2015.

[8] Grünthal, G.; Wahlström, R. The European-Mediterranean earthquake catalogue (EMEC) for the last millenium. // Journal of seismology. Vol. 16, 3 (2012), str. 535-570.

[9] Grünthal, G.; Wahlström, R.; Stromeyer, D. The share European earthquake catalogue (SHEEC) for the time period 1900-2006 and its comparison to the European-Mediterranean earthquake catalogue (EMEC). // Journal of seismology. Vol. 17, 4 (2013), str. 1339-1344.

[10] EMSC-CSEM, http://www.emsc-csem.org/Earthquake/?filter=yes/, 8.3.2015.

[11] Scordilis, E. M. Empirical global relations converting MS and mb to moment mangitude. // Journal of seismology. Vol. 10, 2 (2006), str. 225-236.

[12] Markušić, S.; Gülerce, Z.; Kuka, N.; Duni, L.; Ivančić, I.; Radovanović, S.; Glavatović, B.; Milutinović, Z.; Akkar, S.; Kovačević, S.; Mihaljević, J.; Šalić, R. An updated and unified earthquake catalogue for the Western Balkan Region. // Bulletin of Earthquake Engineering. Vol. 14, 2 (2016), str. 321-343.

[13] Gutenberg, B.; Richter, C. F. Magnitude and Energy of Earthquakes. // Annali di geofisica. Vol. 9, 1 (1956), str. 1-15.

[14] Richter, C. F. Elementary Seismology. San Francisco : W. H. Freeman and Co., 1958.

[15] Herak, D,: Herak, M.; Tomljenović, B. Seismicity and earthquake focal mechanisms in North-Western Croatia. // Tectonophysics. Vol. 465, 1-4 (2009), str. 212-220.
[16] Luen, B.; Stark, P. B. Poisson tests of declustered catalogues. // Geophysical journal international. Vol. 189, 1 (2012), str. 691-700.
[17] Mulargia, F.; Gasperini, P.; Tinti, S. Contour mapping of Italian seismicity. // Tectonophysics. Vol. 142, 2-4 (1987), str. 203-216.