روشهای مختلف حذف رویدادهای وابسته از زمینلرزه‌های ایران و تأثیر آن در پارامترهای لرزه‌خیزی زاگرس

سید حسن موسوی بفروئی[1]، سید هادی دهقان منشادی[2]

[1] استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران mousavi@ardakan.ac.ir
[2] دانش‌آموخته مقطع دکتری زلزله‌شناسی، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، shdehghan@ut.ac.ir

چکیده

در این تحقیق با استفاده از روش‌های پنجره‌ای، زنجیره‌ای و پنجره‌های مختلط، کاتالوگ یکنواخت زمینلرزه‌های ایران از 400 سال قبل از میلاد تا انتهای سال 2018 خوشه‌بندی شده است. سپس با استفاده از کاتالوگ‌های تهیه شده، آستانه کامل بودن داده‌های ایالت لرزه‌زمینساختی زاگرس برای 5 بازه زمانی بعد از سال 1900 تعیین شده و بر اساس آنها و یک دسته داده تاریخی قبل از 1900، پارامترهای لرزه‌خیزی زاگرس تعیین شده است. بیشینه بزرگی برآورد شده برای زاگرس با همه روشها برابر 7/65±0/4 و مقدار b-value بین 0/94 بر اساس داده‌های تهیه شده از روش ریزنبرگ (1985) و 1/09 بر اساس داده‌های تهیه شده از روش گاردنر-نوپوف (1974) بدست آمده است. نرخ رویداد سالیانه زمینلرزه با بزرگی $M_w \geq 3$ بین 192 بر اساس داده‌های تهیه شده از روش گرانتال (1986) و 431 بر اساس داده‌های تهیه شده از روش ریزنبرگ (1985) با پارامترهای کمینه، تعیین شده است.

واژه‌های کلیدی: رویدادهای وابسته، خوشه بندی، لرزه خیزی، پارامترهای لرزه‌خیزی، مقدار b، زاگرس.

Declustering of Iranian earthquakes with difference methods and their impact on Zagros seismicity parameters

Seyed Hasan Mousavi-Bafrouei [1], Seyed Hasan Hadi Dehghan Manshadi [2],

[1]Ph.D. graduate student, institute of geophysics, University of Tehran
[2]Assistant Professor, department of engineering, Ardakan University

Abstract

In the present paper, uniformed seismic catalog of Iranian plateau contained events from 400BC to 2018 AD, have been clustered by the windows, linking and conjugate windows methods. The threshold magnitude of Zagros for 5 time intervals after 1900 has been estimated. Seismicity parameters of Zagros has been calculated on the basis of these 5 complete parts and historical data (before 1900). All methods show the value of Mmax for Zagros is 7.65±0.4 and the b-value is 0.94 up to 1.09 according to Reasenberg (1985) and Gardner-Knopoff (1974) respectively. Annual seismicity rate of occurrence of Zagros for M_{min} = 3.0 is 192 by data of Gruenthal (1986) declustering methods this value is achieved 431 by data of Reasenberg (1985) declustering method.

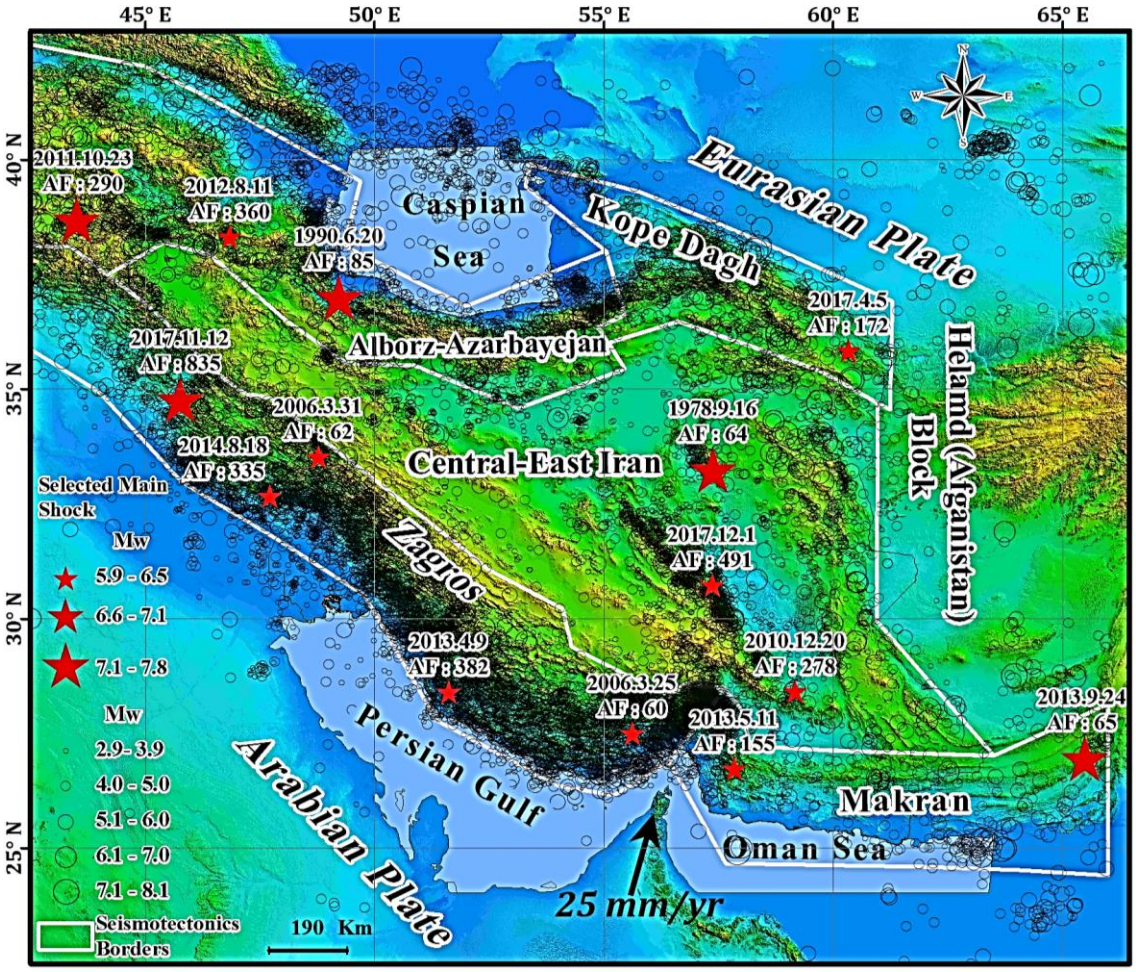
Keywords: Dependent events, Clustering, Seismicity, Seismicity parameters, b-value, Zagros

1 مقدمه

معمولاً در پی وقوع زمینلرزه‌های بزرگ تعدادی زمینلرزه کوچکتر بصورت یک سری زمانی اتفاق می‌افتد که از نظر تعداد و بزرگی آهنگ نزولی دارند. زمینلرزه‌ها به دو دسته رویدادهای مستقل و رویدادهای وابسته شامل پیشلرزه‌ها و پسلرزه‌ها تقسیم می‌شوند. هدف اصلی از خوشه بندی کاتالوگ زمینلرزه، طبقه‌بندی رویدادهای کاتالوگ به دو دسته مذکور و رسیدن به یک کاتالوگ حاوی رویدادهای مستقل است که تک‌تک رویدادهای آن بعنوان رویدادهای پوآسونی و بدون وابستگی به رویدادهای قبل و بعد از آن، شناخته می‌شوند. یکی از مهمترین کاربردهای حذف رویدادهای وابسته در زلزله‌شناسی، تعیین پارامترهای لرزه‌خیزی و برآورد احتمالاتی خطر زمینلرزه است که با فرض مستقل بودن رویدادها انجام می‌شود. برای شناسایی رویدادهای وابسته، روشی کاملا قطعی و عملی وجود ندارد و در دهه‌های اخیر روشهای متعددی برای این کار تدوین شده است که در یکی از دو دسته تصادفی (stochastic model) و قطعی یا معین (Deterministic) قرار می‌گیرند. در روشهای تصادفی، احتمال اینکه رویدادی مرتبط به یک رویداد قبلی یا بعدی باشد محاسبه می‌شود (زوانگ و همکاران، 2002، مارسن و لنگلین، 2008). در مورد روش قطعی که این پژوهش با استفاده از آن انجام شده، دو دیدگاه متفاوت وجود دارد: الگوریتم‌های زنجیره‌ای مانند روش ریزنبرگ (ریزنبرگ، 1985) که در آن رویدادهای وابسته بصورت خوشه‌ای به هم زنجیر می‌شوند و الگوریتم‌های پنجره‌ای مانند روش‌های گاردنر-نوپوف (گاردنر-نوپوف، 1974)، آرهامر (آرهامر، 1986) و گرانتال (گرانتال، 1985) که در آنها از پنجره‌های زمانی و مکانی برای تشخیص رویدادهای وابسته استفاده می‌شود. در این تحقیق با استفاده از روشهای قطعی، رویدادهای وابسته از کاتالوگ حذف شده و تاثیر روش حذف رویدادهای وابسته در پارامترهای لرزه‌خیزی ایالت لرزه‌زمینساختی زاگرس بررسی شده است.

2 حذف رویدادهای وابسته با روشهای مختلف

بانک داده‌های مورد استفاده در این مطالعه کاتالوگ یکنواخت زمینلرزه‌های ایران شامل 25915 زمینلرزه از 400 سال قبل از میلاد تا انتهای سال 2018 میلادی است (موسوی بفروئی و بابائی ماهانی، 2020). این کاتالوگ شامل رویدادهای مربوط به محدوده‌ای با مختصات جغرافیایی بین 42 تا 66 درجه طول شرقی و 22 تا 42 درجه عرض شمالی با بزرگی‌های $2/6 \leq M_w \leq 8/1$ است. موقعیت رویدادها بر اساس تقسیم‌بندی ایران توسط میرزایی و همکاران (1998) به 5 ایالت لرزه زمینساختی تعیین شده است (شکل 1). با استفاده از 6 روش گاردنر-نوپوف (1974)، آرهامر (1986)، گرانتال (1985)، ریزنبرگ (1985) با پارامترهای کمینه، ریزنبرگ (1985) با پارامترهای بیشینه و پنجره‌های مختلط (موسوی بفروئی و همکاران، 2014)، کاتالوگ خوشه‌بندی شده است. در شکل 1 زمینلرزه‌ها پس از حذف رویدادهای وابسته با روش پنجره‌های مختلط به همراه تعدادی از زمینلرزه‌های اصلی که برای هر یک از آنها بیش از 60 رویداد وابسته شناسایی شده است، نشان داده شده است. نتایج حاصل از 6 روش حذف رویدادهای وابسته، در جدول 1 آمده است. مقایسه نتایج نشان از تفاوت قابل توجه در تعداد خوشه‌ها و تعداد رویدادهای وابسته شناسایی شده دارد که در بین آنها در روش گرانتال بیشترین تعداد خوشه و رویداد وابسته شناسایی شده و در نتیجه کاتالوگ شامل رویدادهای مستقل با کمترین تعداد (8530 زمینلرزه) به دست آمده است و در روش ریزنبرگ با پارامترهای کمینه کمترین تعداد خوشه و رویداد وابسته شناسایی شده و در نتیجه کاتالوگ شامل رویدادهای مستقل با بیشترین تعداد (20883 زمینلرزه) به دست آمده است. در جدول 2 تعداد رویدادهای وابسته در 5 خوشه منتخب مربوط به 5 زمینلرزه با بزرگی $M_w \geq 6$ با استفاده از هر یک از روشها آمده است. در همه موارد نتایج روش ریزنبرگ با پارامترهای کمینه با روشهای دیگر اختلاف قابل توجه دارد و نتایج روشهای دیگر در بیشتر موارد به هم نزدیک است.



شکل 1. پراکندگی رومرکز زمین‌لرزه‌های اصلی فلات ایران برروی ایالت‌های لرزه‌زمینساختی ایران براساس تقسیم‌بندی میرزائی و همکاران (1998). ستاره‌ها چند زمین‌لرزه منتخب را به همراه تعداد پسلرزه‌های آن‌ها و تاریخ رویدادشان نشان می‌دهند. AF، به تعداد پسلرزه‌ها اشاره دارد. رومرکز و بزرگی زمین‌لرزه‌ها از کاتالوگ موسوی و بابایی ماهانی (2020) اقتباس شده‌اند.

جدول 1. نتایج خوشه‌بندی با استفاده از روشهای مختلف.

روش خوشه‌بندی	تعداد خوشه‌ها	تعداد و درصد زمینلرزه‌های مستقل
پنجره های مختلط (موسوی بفروئی و همکاران، 2014)	1772	17123 (66٪)
گاردنر-نوپوف (1974)	2804	12113 (47٪)
ریزنبرگ (1985؛ پارامترهای کمینه)	1445	20883 (81٪)
ریزنبرگ (1985؛ پارامترهای بیشینه)	1711	17293 (67٪)
آرهامر (1986)	1592	17016 (66٪)
گرانتال (1985)	2970	8530 (33٪)

3 تعیین آستانه کامل بودن داده‌ها و پارامترهای لرزه‌خیزی زاگرس

با استفاده از کاتالوگ زمینلرزه‌های مستقل به دست آمده با هر یک از 6 روش ذکر شده در بخش قبل، زمینلرزه‌های روی داده در ایالت لرزه زمینساختی زاگرس جدا شده‌اند و برای هر کاتالوگ زمینلرزه‌های قبل از سال 1900 بعنوان زمینلرزه‌های تاریخی و ناکامل در نظر گرفته شده است و زمینلرزه‌های پس از آن به 5 دسته کامل با تفکیک سال رویداد مطابق جدول 3 در نظر گرفته شده است و با استفاده از نرم افزار Zmap (ویمر، 2001) آستانه کامل بودن داده‌ها از بهترین پاسخ بین سه روش بیشینه انحنا، 90٪ احتمال و 95٪ احتمال، برای هر دسته از داده‌ها تعیین شده و نتایج در

جدول 3 آمده است.

جدول 2. تعداد زمینلرزه‌های شناسایی شده در 5 خوشه زمینلرزه‌ای منتخب با استفاده از روش‌های مختلف

مشخصات زمینلرزه اصلی	پنجره های مختلط (موسوی بفروئی و همکاران، 2014)	گاردنر-نوپوف (1974)	ریزنبرگ (1985؛ پارامترهای کمینه)	ریزنبرگ (1985؛ پارامترهای بیشینه)	آرهامر (1986)	گرانتال (1985)
سرپل ذهاب- کرمانشاه 12/11/2017 (M_w= 7/4)	835	731	150	346	898	850
اهر-ورزقان 11/08/2012 (M_w= 6/5)	360	372	188	304	318	375
محمد آباد ریگان - کرمان 20/12/2010 (M_w= 6/5)	278	293	55	238	194	301
خورموج - بوشهر 09/04/2013 (M_w= 6/3)	382	443	223	248	361	319
سفید سنگ - فریمان 05/04/2017 (M_w= 6/1)	172	180	106	160	163	180

جدول 3. آستانه کامل بودن داده‌های زاگرس در 5 بازه زمانی مختلف برای کاتالوگ‌های تهیه شده از روشهای مختلف خوشه‌بندی

روش خوشه‌بندی	1900-1925	1926-1963	1964-1999	2000-2005	2006-2018
پنجره‌های مختلط (موسوی بفروئی و همکاران، 2014)	6	5/7	5/3	4/5	3
گاردنر-نوپوف (1974)	6	5/7	5/1	3/9	3/6
ریزنبرگ (1985؛ پارامترهای کمینه)	6	5/7	5/2	4/0	2/9
ریزنبرگ (1985؛ پارامترهای بیشینه)	6	5/5	5/1	3/9	2/9
آرهامر (1986)	6	5/6	5/1	3/9	2/9
گرانتال (1985)	6	5/7	5/1	5/2	3/7

رویدادهای موجود در هر یک از کاتالوگهای زمینلرزه‌های مستقل تهیه شده با 6 روش خوشه‌بندی، به یک دسته ناکامل مربوط به قبل از سال 1900 و 5 دسته کامل مطابق تقسیم بندی جدول 3 تقسیم بندی شده، با استفاده از روش کیجکو-سلفول (1992) و بر اساس داده‌های هر کاتالوگ پارامترهای لرزه‌خیزی ایالت لرزه زمینساختی زاگرس تعیین شده است و نتایج آن در جدول 4 آمده است.

جدول 4. پارامترهای لرزه‌خیزی ایالت لرزه‌زمینساختی زاگرس بر اساس کاتالوگ‌های تهیه شده با حذف پسلرزه از روش‌های مختلف. λ_3 آهنگ رویداد سالانه زمینلرزه‌های بزرگتر از 3 را نشان می‌دهد.

روش خوشه‌بندی	b-value	λ_3	Mmax
پنجره های مختلط (موسوی بفروئی و همکاران، 2014)	0/98 ± 0/01	268 ± 14	7/65 ± 0/40
گاردنر-نوپوف (1974)	1/09 ± 0/01	421 ± 20	7/65 ± 0/41
ریزنبرگ (1985؛ پارامترهای کمینه)	0/94 ± 0/01	431 ± 14	7/65 ± 0/42
ریزنبرگ (1985؛ پارامترهای بیشینه)	± 0/01	362 ± 15	7/66 ± 0/43

		0/94 ± 0/01 0/97	
آرهامر (1986)	394 ± 15		7/65 ± 0/44
گرانتال (1985)	192 ± 8	/98 ± 0/04	7/65 ± 0/45

4 نتیجه‌گیری

با استفاده از 6 روش با الگوریتم‌های پنجره‌ای، زنجیره‌ای و پنجره‌های مختلط، رویدادهای وابسته از کاتالوگ زمینلرزه‌های ایران مربوط به بازه زمانی 400 سال قبل از میلاد تا انتهای سال 2018 شناسایی و حذف شده است و کاتالوگ شامل رویدادهای مستقل تهیه شده با روشهای مختلف، مقایسه شده است. تفاوت بین تعداد خوشه‌ها، درصد زمینلرزه‌های مستقل نسبت به کل و تعداد رویداد در هر خوشه برای 5 زمینلرزه اصلی منتخب معنی‌دار است و بیانگر تأثیر گذاری زیاد در کاربردهای این کاتالوگ از جمله پارامترهای لرزه‌خیزی مناطقی است که با استفاده از آنها تعیین می‌شود. آستانه کامل بودن داده‌های ایالت لرزه‌زمینساختی زاگرس برای 5 بازه زمانی بعد از سال 1900 تعیین شده است. نتایج نشان می‌دهد مقادیر تعیین شده برای دو بازه زمانی 2000 تا 2005 و 2006 تا 2018 برای کاتالوگها در بعضی موارد تفاوت قابل ملاحظه‌ای دارند. پارامترهای لرزه خیزی تعیین شده برای زاگرس بر اساس داده‌های تهیه شده از روشهای مختلف، تفاوت قابل ملاحظه‌ای دارد. بنابراین در کاربردهایی از قبیل تعیین لرزه‌خیزی و برآورد خطر زمینلرزه در مناطق مختلف انتخاب روش حذف رویدادهای وابسته می‌تواند تاثیر بسیار زیادی در نتایج داشته باشد.

منابع

Gardner, J. K., and Knopoff, L., 1974, Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, Poissonian?: Bulletin of Seismological Society of America, **64**, 1363-1367.

Gruenthal, G., 1985, The up-dated earthquake catalogue for the German Democratic Republic and adjacent areas - statistical data characteristics and conclusions for hazard assessment: 3rd International Symposium on the Analysis of Seismicity and Seismic Risk, Liblice/Czechoslovakia, 17-22 June 1985 V. I, 19-25.

Kijko, A., and Sellevoll, M. A., 1992, Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files, Part II: Incorporation of magnitude heterogeneity: Bulletin of Seismological Society of America, **82**, 120–134.

Marsan, D., and Lengline, O., 2008, extending earthquake reach through cascading: Sciencs, **319**, 1076-1079.

Mirzaei, N., Gao, M., and Chen, Y. T., 1998, Seismic source regionalization for seismic zoning of Iran: Major seismotectonic provinces: Journal of Earthquake Prediction Research, **7**, 465-495.

Mousavi-Bafrouei, S. H., and Babaie Mahani, A., 2020, A comprehensive earthquake catalogue for the Iranian Plateau (400 B.C. to December 31, 2018): in press.

Mousavi-Bafrouei, S. H., Mirzaei, N., Shabani, E., 2014, A declustered earthquake catalog for the Iranian Plateau: Annals of Geophysics, **57**:S0653

Reasenberg, P., 1985, Second-order moment of central California seismicity: 1969-82: J. Geophys. Res., **90**, 5479-5495.

Uhrhammer, R. A., 1986, Characteristics of northern and central California seismicity: Earthquake Notes, **57**, p. 21.

Wiemer, S., 2001, A software package to analyze seismicity: ZMAP: Seismological Research Letter, **72**, 374-383.

Zhuang, J., Ogata, Y., and Vere-Jones, D., 2002, Stochastic declustering of space-time earthquake occurrences: Journal of the American Statistical Association, **97**, 369-380.