

تعیین پارامترهای لرزه‌ای زمین‌لرزه‌های ایران به کمک نظریه شبکه

سارا تقوی^۱، فتانه تقی زاده فرهمند^{۲*} و صغری رضایی^۳

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، واحد قم، دانشگاه آزاد اسلامی، قم، ایران

^۲دانشیار، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، واحد قم، دانشگاه آزاد اسلامی، قم، ایران

^۳استادیار، دانشکده فیزیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۳۰، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۶)

چکیده

زمین‌لرزه جزء مهمترین و یکی از زیان‌بارترین مخاطرات طبیعی است که رخداد آن اثرات جبران‌ناپذیر جانی و خسارات مالی برجای می‌گذارد. زمین‌لرزه‌ها که بیشتر در پوسته زمین به وقوع می‌پیوندند از لحاظ زمانی و مکانی پدیده‌های پیچیده هستند. در سال‌های اخیر نظریه شبکه به عنوان یک روش مطالعه مناسب برای توصیف ویژگی‌های مختلف پدیده‌های پیچیده شناخته شده است. برای مطالعه روی زمین‌لرزه‌ها به عنوان یک شبکه پیچیده، ما نیازی به دانستن جزئیات گسل‌ها و زمین‌لرزه‌ها نداریم و تنها با دانستن بزرگی، زمان وقوع و مکان وقوع زلزله، می‌توانیم چندین جنبه از پدیده زلزله را مطالعه کنیم. از این‌رو در این تحقیق برای بررسی زمین‌لرزه‌های ایران در بازه زمانی ۱۹۹۶ الی ۲۰۲۰ میلادی (ثبت شده در ایستگاه‌های شبکه‌های لرزه‌نگاری وابسته به موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ISC) از ابزارهای تعریف شده برای بررسی سامانه‌های پیچیده که همان شبکه‌های پیچیده می‌باشد، استفاده شده است. برای ساخت شبکه، زمین‌لرزه‌ها به صورت گره در نظر گرفته شده و برای ایجاد یال بین گره‌ها از کمیت معرفی شده در روش بایسی و پاکزوسکی استفاده شد. در این پروژه با ساخت شبکه، پارامترهای لرزه‌خیزی (b -value a -value)، بعد فراکتالی و نسبت همبستگی در ایران مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقادیر a -value $\approx 6/9$ ، b -value $\approx 1/93$ و $d_f \approx 1/56$ می‌باشند و برای هر بزرگی، نرخ پس‌لرزه از قانون اموری با گرادیان خط $p \sim I$ تبعیت می‌کند و تابع توزیع درجه‌های شبکه به صورت توانی از رابطه $P(k) \sim k^{-\gamma}$ با $\gamma = 1/59$ پیروی می‌کند که نشان دهنده بدون مقیاس بودن شبکه زمین‌لرزه‌ها است. همچنین تابع توزیع احتمال همبستگی نیز به صورت توانی تغییر می‌نماید و با افزایش بزرگی زمین‌لرزه‌ها مقدار توان کاهش می‌یابد. با استفاده از مفهوم ضریب خوشه‌ای مقدار آستانه تابع همبستگی محاسبه گردید و توزیع فواصل l برای آستانه‌های مختلف m محاسبه و با برونیابی مقیاس مناسب، تابع آن محاسبه گردید.

کلمه‌های کلیدی: شبکه‌های پیچیده، زمین‌لرزه، تابع توزیع درجه، ایران

۱ مقدمه

زمین لرزه یکی از زیان‌بارترین بلایای طبیعی است که ماهیتی بسیار پیچیده دارد و در بسیاری از موارد، وقوع آن منجر به کشته شدن هزاران نفر و وارد آمدن اثرات اقتصادی فاجعه‌آمیز در مناطق زلزله‌زده می‌شود. با توجه به توزیع جهانی مراکز سطحی زمین‌لرزه‌ها، بخشی از انرژی آزاد شده به وسیله زمین‌لرزه‌ها در کمربند لرزه‌خیز آلپ-همیالیا مشاهده می‌شود. فلات ایران به دلیل موقعیت ویژه آن در روی کمربند کوه‌زایی و لرزه‌خیز آلپ-همیالیا (Allen et al., 2004; Mirzaei et al., 1998) در گذشته‌های دور و همین‌طور در سال‌های اخیر به دلیل رخداد زلزله متحمل خسارات زیادی از نظر جانی و اقتصادی شده است. لذا بررسی و مطالعه جنبه‌های مختلف زمین‌لرزه در مناطق لرزه‌خیز مانند ایران ضروری است، که به شناخت بیشتر زلزله که پدیده‌ی پیچیده‌ای است کمک می‌کند.

در سال‌های اخیر، نظریه شبکه به عنوان روش قدرتمند برای توصیف پدیده‌های پیچیده مورد استفاده قرار گرفته است (Costa et al., 2011). در نظر گرفتن تمام فاکتورهایی که موجب جابه‌جایی گسل‌ها می‌شود و قرار دادن آن‌ها در یک مجموعه معادلات ریاضی که بتواند پدیده زمین‌لرزه را توصیف کند، کار دشواری است و به دلیل عدم دسترسی به اعماق زمین که محل وقوع زمین‌لرزه می‌باشد با عدم قطعیت همراه است. یکی از راه‌های مطالعه بر روی زمین‌لرزه‌ها مطالعه آماری آن‌ها می‌باشد. از آن‌جایی که تعداد زمین‌لرزه‌ها زیاد است و همبستگی‌های پیچیده‌ای از لحاظ فضایی، زمانی و همین‌طور شدت، بین زمین‌لرزه‌ها وجود دارد لذا می‌توان آن‌ها را سامانه‌ای پیچیده در نظر گرفت. دو قانون کلاسیکی گوتنبرگ-ریشتر و اوموری تاییدی بر پیچیدگی زمین‌لرزه‌ها می‌باشند (Gutenberg and Richter, 1941; Omori, 1984). این‌رو می‌توان از ابزارهای تعریف شده برای بررسی سامانه‌های پیچیده که همان شبکه‌های پیچیده می‌باشد،

برای مطالعه‌ی زمین‌لرزه‌ها بهره برد. در نظریه شبکه‌های پیچیده زمین‌لرزه‌ها نیازی به دانستن جزئیات سیستم گسلی نیست بلکه تنها با دانستن بزرگ‌ها، زمان و مکان رخداد زمین‌لرزه‌ها می‌توان جنبه‌های مختلف پدیده زمین‌لرزه را بررسی کرد. در این روش اجزاء سامانه، رومرکز زمین‌لرزه به عنوان گره و برهم‌کنش میان آن‌ها به صورت یال‌های بین گره‌های شبکه نشان داده می‌شوند و به دلیل عدم وابستگی اجزاء سامانه به پارامترهای گسلس، نسبت به تحلیل سینماتیکی و دینامیکی زمین‌لرزه‌ها، بسیار ساده‌تر بوده و به دور از محاسبات سنگین و حل معادلات پیچیده ریاضی است و تنها با داشتن اطلاعات کاتالوگی زمین‌لرزه‌ها، جنبه‌های مختلف پدیده‌ی پیچیده زلزله مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

در مطالعه آماری زمین‌لرزه‌ها، حجم بالای داده‌های ثبت شده وجود دارد که نیازمند انجام محاسبات با تعداد زیاد است. همچنین به دلیل پیچیدگی بالای رخداد حادثه در چشمه و ناهمسانگردی و ناهمگنی و ... در مسیر و عدم قطعیت‌های زیاد، تعیین پارامترهای زلزله به کمک علم زلزله‌شناسی با سختی امکان‌پذیر بوده و زمان بسیار زیادی صرف خواهد شد در صورتی که به کمک آمار داده‌ها و نظریه شبکه، نتایج قابل توجهی به دست می‌آید. چنین مطالعاتی توسط ژئوفیزیکدان‌ها روی زمین‌لرزه‌های ایتالیا، کالیفرنیا و ژاپن نیز صورت گرفته است که در آنها ابتدا شبکه مناسب ساخته شده و سپس ویژگی‌های آماری مورد بررسی قرار گرفته است، مانند مطالعه طول گسیختگی با استفاده از مفهوم زمین‌لرزه‌های بازگشتی (Davidsen et al., 2005)، بررسی زمین‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها به کمک شبکه‌های بدون مقیاس (Baiesi and Paczuski, 2004)، بررسی تابع توزیع درجه و ویژگی‌های آماری شبکه (Abe and Suzuki, 2004a,b, 2005, 2006, 2007, 2009a,b, 2011) و همچنین تحلیل توالی‌های لرزه‌ای زمین‌لرزه‌ها به کمک شبکه (Telesca and Lovallo, 2012). اخیراً

مانند تابع توزیع درجه، ضریب خوشه‌ای و ... مفید است که اطلاعاتی راجع به حالت کلی شبکه در اختیار قرار می‌دهند (Boccaletti et al., 2006).

از آنجایی که زمین‌لرزه‌ها از نظر زمان، مکان و بزرگای دارای ارتباط پیچیده‌ای هستند، برای بررسی آنها می‌توان از نظریه شبکه استفاده کرد که اولین قدم در این مسیر، ساخت شبکه مناسب است. برای ساخت یک مدل شبکه‌ای به منظور توصیف یک سامانه، ابتدا باید گره‌ها و یال‌ها را شناخت زیرا یک شبکه مناسب باید قادر به بیان بسیاری از ویژگی‌های یک سامانه باشد. دو رویکرد کلی از شبکه زمین‌لرزه‌ها توسط محققین در نظر گرفته شده است. در رویکرد اول که به روش آبه و سوزوکی معروف می‌باشد، منطقه جغرافیایی مورد مطالعه به سلول‌هایی با اندازه یکسان تقسیم می‌شوند و اگر زمین‌لرزه‌ای در این سلول‌ها قرار گیرد، آن سلول‌ها نقش گره را بازی می‌کنند. در این رویکرد برای ارتباط بین زمین‌لرزه‌ها (گره‌ها) که همان یال‌ها می‌باشند سری زمانی زمین‌لرزه‌ها را در نظر گرفته می‌شود. دو سلولی که در آن زمین‌لرزه‌های پی‌درپی رخ داده‌اند توسط یال به هم وصل می‌شوند.

آبه و سوزوکی مطالعات وسیعی برای ساخت این شبکه‌های پیچیده از زمین‌لرزه‌ها انجام دادند (Abe and Suzuki, 2004a,b, 2005, 2006, 2007, 2009a,b, 2011). تنبوم و همکاران نیز با تقسیم منطقه مورد مطالعه به سلول‌هایی، آن‌هایی که شامل زمین‌لرزه هستند را گره در نظر گرفتند ولی برای ایجاد یال بین گره‌ها از الگوی فعالیت تشابهی بین دو گره استفاده کردند (Tenenbaum et al., 2012). در رویکرد دوم مکان زمین‌لرزه‌ها به عنوان گره در نظر گرفته می‌شوند و دو گره زمانی به هم مربوط می‌شوند که توسط روابطی، به هم وابسته باشند. روش‌های متداول در این دسته برای ساخت شبکه زمین‌لرزه‌ها عبارت از روش بایسی و پازوسکی (۲۰۰۴)، روش تسکا و لوالو (۲۰۱۲) و روش دیویدسن و همکاران (۲۰۰۵) می‌باشد.

مطالعات متعددی به کمک شبکه‌های پیچیده بر روی زمین‌لرزه‌های ایران نیز انجام شده است که شامل بررسی ویژگی‌های آماری (LotfiandDaroon, 2012)، تشخیص گسل‌های فعال و غیرفعال به کمک الگوریتم پیچ‌رنک (Daroon and Lotfi, 2014)، بازیابی قوانین زلزله‌شناسی تجربی به کمک شبکه زمین‌لرزه (Rezaei et al., 20107)، پیش‌بینی زمین‌لرزه (Rezaei et al., 2019a)، بررسی شاخص هشدار دهنده از وقوع احتمالی زلزله (Rezaei et al., 20109b) و ... هستند.

در این مطالعه سعی بر این است تا با استفاده از روش شبکه‌بندی، ضرایب لرزه‌خیزی و پارامترهای آماری همچون تابع توزیع درجات، تابع همبستگی، ضریب خوشه‌ای و تابع توزیع فاصله بین زمین‌لرزه‌های رخ داده در ایران که در ایستگاه‌های شبکه‌های لرزه‌نگاری وابسته به موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران ثبت شده‌اند، مورد بررسی قرار گیرد.

۲ اصول نظری

نظریه‌ی شبکه که یکی از بزرگترین شاخه‌های ریاضیات است اولین بار با انتشار مقاله‌ای از لئونارد اوایلر، ریاضیدان سوئیس در سال ۱۷۳۶ مطرح گردید (بابلیان، ۱۳۸۶) که با جبر و نظریه ماتریس‌ها پیوند مستحکم و تنگاتنگی دارد. در واقع شبکه، مدل ریاضی برای یک مجموعه گسسته است که اعضای آن به طریقی به هم مرتبط هستند. اعضای شبکه به صورت مجموعه‌ای از گره‌ها و برهم‌کنش بین اعضای توسط مجموعه‌ای از یال‌ها، مشخص می‌شود. اعضای مجموعه در جامعه می‌تواند انسان و یال بین آن‌ها رابطه دوستی باشد و در مجموعه ملکولی، اتم‌ها به عنوان اعضای مجموعه و یال بین آن‌ها اتصال‌های شیمیایی باشد. از نظریه شبکه در طراحی مدارهای الکتریکی، اصلاح هندسی خیابان‌ها برای حل مشکل ترافیک، در شهرسازی و عمران و ... استفاده می‌شود. برای فهم رفتارهای شبکه روش‌های برگرفته از مکانیک آماری و تعریف کمیت‌های آماری

رابطه بعدی مربوط به قانون اوموری (۱۹۸۴) است که بیان می‌کند فرکانس پس‌لرزه‌ها با گذشت زمان مطابق رابطه ۳ کاهش می‌یابد.

$$v(t) \sim K/(c+t)^p \quad (۳)$$

در رابطه بالا K و c مقادیر ثابت، t فاصله زمانی از رخداد اصلی و $p \approx 1$ است.

سه قانون بیان شده، قوانین آماری هستند که برای هر زمین‌لرزه در هر نقطه در زمین، قابل استفاده هستند. بایسی و پازوسکی (۲۰۰۴) با ترکیب روابط ۱ تا ۳ و در نظر گرفتن زمین‌لرزه‌هایی با بزرگی m که در منطقه‌ای به شعاع r و در بازه زمانی τ رخ داده‌اند، رابطه‌ی کمی ۴ را ارائه نمودند.

$$\bar{n} = C\tau r^{df} \Delta m 10^{-bm} \quad (۴)$$

در این رابطه کمی (\bar{n}) که n یک کمیت جهت ایجاد ارتباط بین گره‌ها (زمین‌لرزه‌ها) است، C ضریب ثابت شامل تمام مشخصات لرزه‌ای مربوط به منطقه بوده، Δm خطای مربوط به اندازه‌گیری‌هایی است که ممکن است در تعیین مکان، زمان و بزرگی زمین‌لرزه‌ها اتفاق افتاده باشند، r شعاع منطقه مورد بررسی، τ بازه زمانی، df بعد فراکتالی، b پارامتر لرزه‌خیزی رابطه گوتنبرگ-ریشتر و m بزرگی زمین‌لرزه هستند.

طبق این روش دو زمین‌لرزه i و j که به ترتیب در زمان‌های T_i و T_j رخ داده‌اند (که در آن $T_i < T_j$) و بزرگی زمین‌لرزه i برابر با m_i است و اگر فاصله بین کانون‌های دو زمین‌لرزه با $l = l_{ij}$ و بازه زمانی با $\tau = t$ $t_{ij} = T_i - T_j$ نمایش داده شود، در این حالت رابطه ۴ برای دو زمین‌لرزه i و j ، به صورت رابطه زیر (رابطه ۵) خواهد بود:

$$n_{ij} = C t l^{df} \Delta m 10^{-b m_i} \quad (۵)$$

اگر این کمیت برای تمام زمین‌لرزه‌های بعد از یک زمین‌لرزه خاص $i = i^*$ محاسبه شود، تنها یک زمین‌لرزه j وجود دارد که موجب کمینه‌شدن n_{ij} می‌شود. در واقع زمین‌لرزه i^* زمین‌لرزه‌ای است که با زمین‌لرزه j بیشترین

در این پژوهش، برای توصیف پارامترهای آماری لرزه‌خیزی در ایران، از الگوریتم بایسی و پاکروسکی (۲۰۰۴) استفاده شد. بایسی و پاکروسکی برای بیان ارتباط بین زمین‌لرزه‌ها یک رابطه کمی ارائه کردند که شامل پارامترهای فاصله زمانی و فاصله مکانی بین دو زمین‌لرزه و همچنین بزرگی زمین‌لرزه اول است. در این روش یک سری زمانی از زمین‌لرزه‌ها در نظر گرفته می‌شود که در آن زمین‌لرزه‌ها به عنوان گره هستند و برای ایجاد یال بین گره‌ها از رابطه کمی استفاده شد که در ادامه توضیح داده می‌شود. بایسی و پاکروسکی برای بیان کمیت مورد نظر از چندین رابطه اساسی استفاده کردند. یکی از این روابط قانون گوتنبرگ-ریشتر (۱۹۴۱) (رابطه ۱) است که برای تعداد زمین‌لرزه‌های با بزرگی m در منطقه مورد نظر می‌باشد.

$$P(m) \sim 10^{-bm} \quad (۱)$$

در رابطه بالا، b پارامتر لرزه‌خیزی و نشان دهنده تجمع تنش در منطقه و $P(m)$ فراوانی زمین‌لرزه‌های با بزرگی بیشتر از m است. دومین رابطه استفاده از ظاهر فراکتالی کانون زمین‌لرزه‌ها یا بعد فراکتالی df است که با استفاده از روش جعبه‌شمار (Hitara, 1989) محاسبه می‌گردد. در روش جعبه‌شمار ابتدا منطقه به ابعاد R در نظر گرفته شده و به جعبه‌های مربع شکل به ابعاد r تقسیم‌بندی می‌شود. سپس تعداد جعبه‌هایی که حداقل درون آن‌ها یک رومرکز زمین‌لرزه وجود دارد شمرده شده، که برابر با $N(r)$ می‌باشد. در صورت خالی بودن تعداد زیاد جعبه، می‌توان عمل تقسیم جعبه‌ها را ادامه داد و محاسبات را تکرار نمود. اگر منطقه از ساختار خودتشابهی فراکتال تبعیت کند بعد فراکتال از رابطه ۲ محاسبه می‌گردد:

$$N(r) \sim r^{-df} \quad (۲)$$

در این رابطه، df بعد فراکتالی است که گاهی چگالی بعد نیز نامیده می‌شود.

برای تعیین فواصل مکانی نیز مکان هر رخداد زمین‌لرزه در مجموعه داده‌ها با i ، بزرگی زمین‌لرزه با m_i ، زمان رخداد بر حسب ثانیه با T_i ، عرض جغرافیایی و طول جغرافیایی کانون زمین‌لرزه بر حسب رادیان با θ_i و ϕ_i نشان داده می‌شوند و فاصله بین دو رخداد i و j توسط رابطه کروی زیر (رابطه ۷) بیان می‌شود:

$$l_{ij} = R_0 \text{Arc cos}[\sin(\theta_i) \sin(\theta_j) + \cos(\theta_i) \cos(\theta_j) \cos(\phi_i - \phi_j)] \quad (7)$$

که در رابطه اندیس i و j به ترتیب نشان‌دهنده زمین‌لرزه اول و دوم می‌باشند. در این رابطه، R_0 شعاع کره زمین بر حسب متر است.

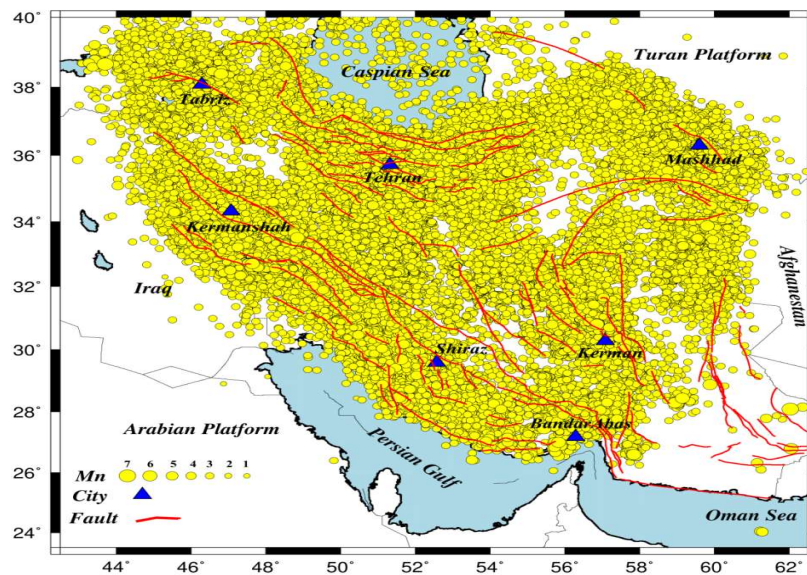
۳ داده‌ها

به منظور پردازش و محاسبه پارامترهای آماری لرزه‌خیزی در ایران از کاتالوگ لرزه‌ای با ۱۳۰۰۰ زمین‌لرزه محلی با بزرگای ناتلی تا ۷ که در ایستگاه‌های دائمی شبکه لرزه‌نگاری کشوری وابسته به مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (<http://irsc.ut.ac.ir>) که از ۱ ژانویه سال ۱۹۹۶ تا ۱ ژانویه سال ۲۰۲۰ میلادی به ثبت رسیده بودند (شکل ۱)، استفاده شد.

ارتباط را دارد. به طور کلی، اگر $n_{ij} \ll 1$ باشد، در این صورت ارتباط بسیار قوی بین دو زمین‌لرزه i و j وجود دارد و بالعکس. بنابراین ارتباط C_{ij} بین دو زمین‌لرزه i و j با معکوس n_{ij} به صورت زیر رابطه دارد:

$$C_{ij} = \frac{1}{n_{ij}} \quad (6)$$

از رابطه C_{ij} برای طبقه‌بندی پس‌لرزه‌ها استفاده می‌شود. این کمیت نشان می‌دهد که زمین‌لرزه‌ها با بعضی از زمین‌لرزه‌های قبلی و بعدی خود در ارتباط هستند. بنابراین، یک طبقه‌بندی از حوادث به عنوان پیش‌لرزه، پس‌لرزه و زمین‌لرزه اصلی نمایان می‌شود. در یک شبکه ساده، پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها براساس یال‌های ورودی و یال‌های خروجی تعریف می‌شوند که یال‌های ورودی تعداد زمین‌لرزه‌هایی است که قبل از زمین‌لرزه اصلی رخ داده‌اند و یال‌های خروجی، زمین‌لرزه‌های رخ داده پس از زمین‌لرزه اصلی موردنظر هستند. شبکه در فواصل زمانی و مکانی مختلف تحت عنوان پنجره‌های فضا و زمانی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این تعریف، پس‌لرزه‌هایی که بعد از زمین‌لرزه اصلی رخ داده‌اند برابر با مجموع تمام رخدادهایی است که داخل این پنجره‌های فضا زمانی با اندازه‌های از پیش تعیین شده، اتفاق افتاده‌اند.



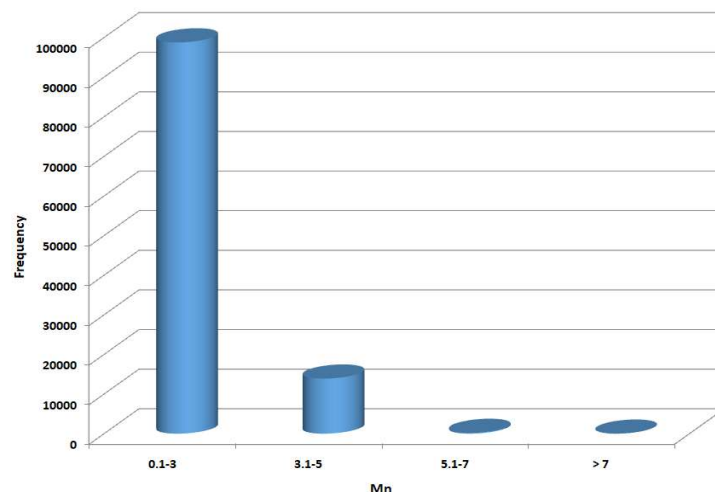
شکل ۱. موقعیت رومرکز (دوایر توپر زرد رنگ) زمین‌لرزه‌های رخ داده در بازه زمانی ۱۹۹۶ تا ۲۰۲۰.

مقادیر a ، b در رابطه گوتبرگ-ریشتر (۱۹۴۱)، $P(m)$ در رابطه اوموری (۱۹۸۴) و مقدار d_f در رابطه بعد فراکتالی برای منطقه ایران، محاسبات زیر انجام گرفت. با استفاده از داده‌ها و رابطه گوتبرگ-ریشتر و به کمک شیب نمودار لگاریتمی فراوانی تجمعی زمین‌لرزه‌ها برحسب بزرگا، مقدار ضرایب لرزه‌خیزی a - و b -value برای زمین‌لرزه‌های ایران تعیین شد که در شکل ۳ نشان داده شده است. مطابق شکل ۳ برای آستانه‌ی بزرگای بیشتر از ۲/۵، نمودار به صورت خطی می‌باشد که شیب نمودار $0/93 \approx b$ و عرض از مبدأ $6/91 \approx a$ تعیین شد.

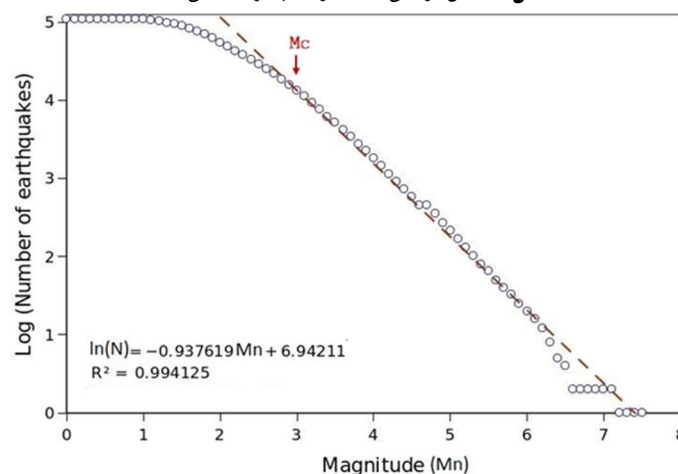
نمودار شکل ۲ توزیع داده‌های ایران را برحسب بزرگا نشان می‌دهد که زمین‌لرزه‌ها بیشتر دارای بزرگای کمتر از ۳ در مقیاس ناتلی می‌باشند. مطابق شکل ۳ برای آستانه بزرگای بیشتر از ۳ رابطه گوتبرگ-ریشتر برقرار بوده و لذا در انجام محاسبات مقادیر بالای ۲/۵ در نظر گرفته شد.

۴ مشاهده‌ها

به منظور پردازش و محاسبه پارامترهای آماری لرزه‌خیزی در ابتدا زمین‌لرزه‌ها را به عنوان گره در نظر گرفته و برای ایجاد ارتباط بین زمین‌لرزه‌ها از تعریف رابطه ۶ استفاده شد. در این رابطه، به دنبال محاسبه کمیت‌های مطرح شده برای



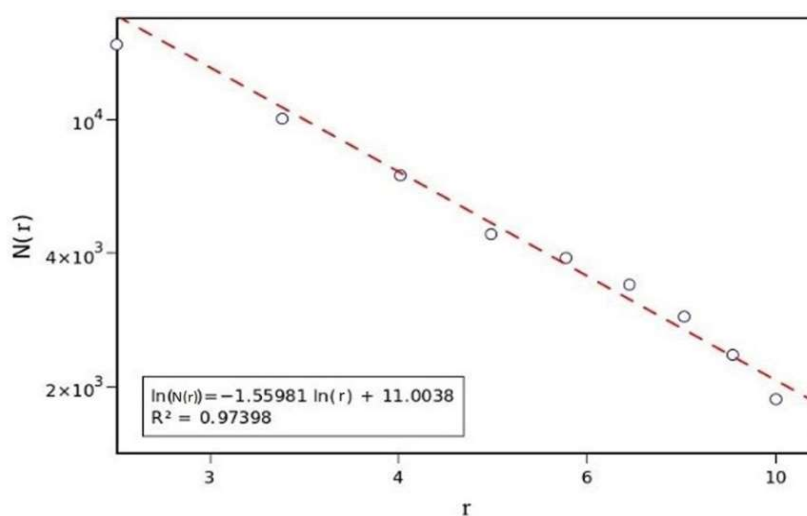
شکل ۲. نمایش فراوانی داده‌ها برحسب بزرگا ناتلی.



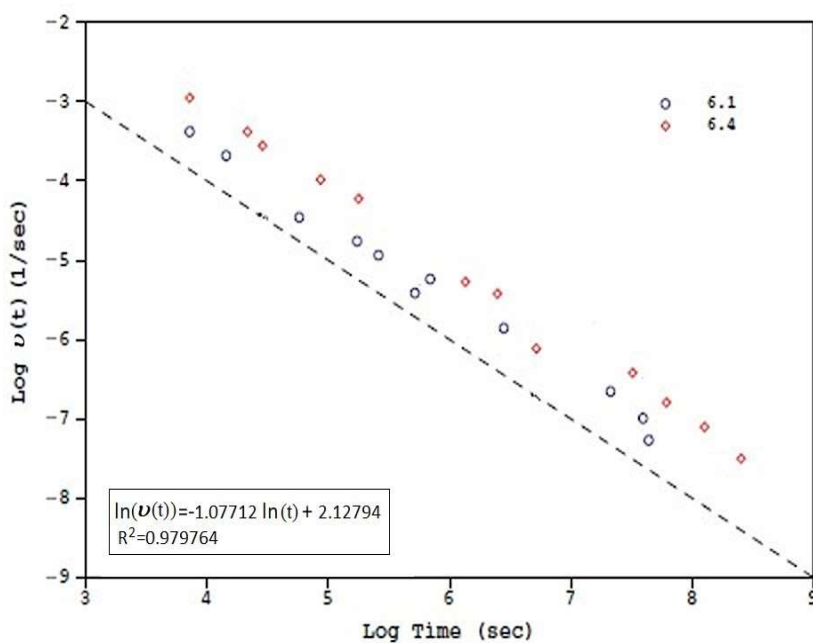
شکل ۳. نمودار گوتبرگ-ریشتر و مقدار b -value برای زمین‌لرزه‌های ایران.

نتیجه‌ای از شبکه برای چندین زمین‌لرزه محاسبه شد. نمودار مربوط به این قانون در شکل ۵ برای زمین‌لرزه‌هایی با بزرگی ۶/۱ و ۶/۴ نشان داده شده است. برای هر بزرگی، نرخ پس‌لرزه‌ها $v(t)$ از قانون اوموری با شیب خط $p \approx 1$ تبعیت می‌کند..

با استفاده از روش جعبه‌شمار نمودار لگاریتمی فراوانی رومرکز حوادث $N(r)$ در جعبه‌هایی به ابعاد r برحسب بعد جعبه‌ها، رسم گردید که در شکل ۴ نشان داده شده است. به کمک شیب نمودار، بعد فراکتالی برای زمین‌لرزه‌ای ایران $d_f \approx 1/56$ محاسبه شد. قانون اوموری به عنوان



شکل ۴. نمودار لگاریتمی فراوانی رومرکز حوادث $N(r)$ برحسب بعد جعبه‌ها، r برای زمین‌لرزه‌های ایران.

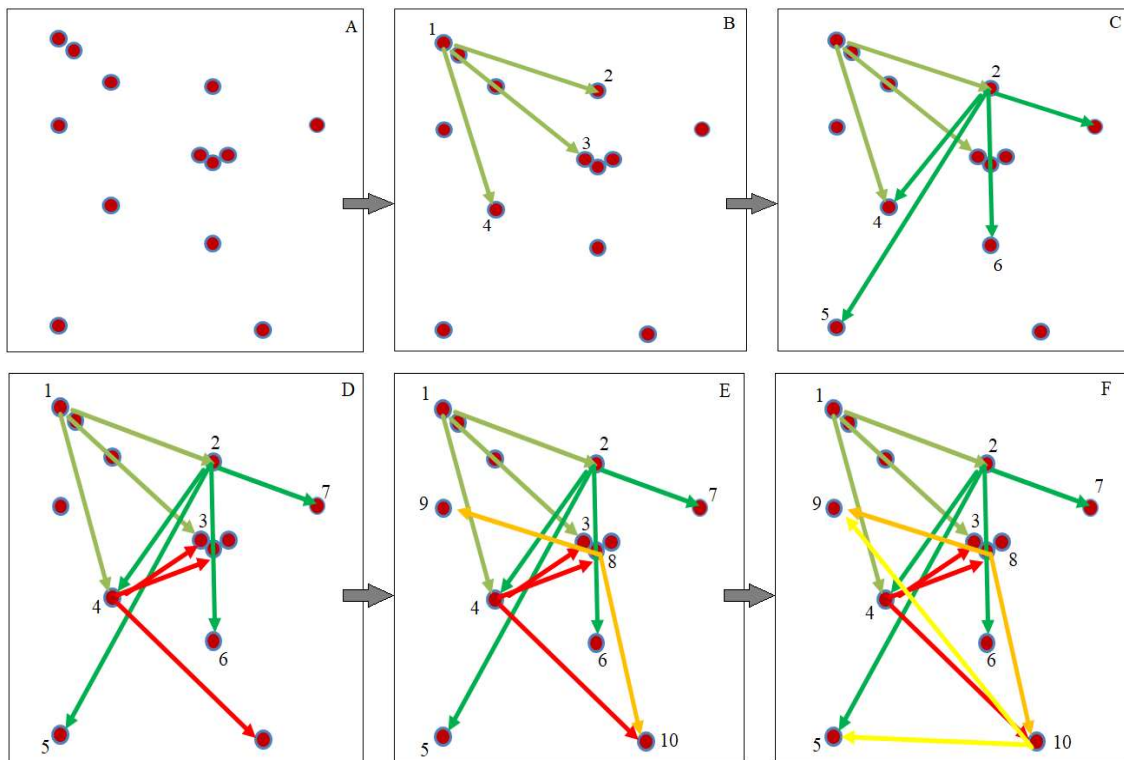


شکل ۵. قانون اوموری برای نرخ پس‌لرزه‌ها.

دوایر توپر قرمز رنگ هستند که در این شبکه، به عنوان گره تعریف می‌شوند در شکل ۶-A نشان داده شده است. در سری زمانی زمین لرزه‌ها، زمین لرزه اول، انتخاب می‌شود و رابطه کمی ۶ برای تمام زمین لرزه‌های (گره‌های) بعد از آن محاسبه می‌شوند که اگر اندازه این کمیت از یک مقدار آستانه بیشتر باشد، دو گره با یک یال به هم متصل می‌شوند (شکل ۶-B). اندازه این آستانه با ترسیم ضریب خوشه‌ای (شکل ۸) قابل محاسبه است. حال زمین لرزه (گره) ۲ در نظر گرفته شده و مراحل گفته شده برای گره‌های بعد از آن، محاسبه می‌شوند (شکل ۶-C). این فرایند برای تمام گره‌ها ادامه می‌یابد که در شکل‌های ۶-D تا ۶-F چند مرحله دیگر نیز نمایش داده شده است.

در ادامه، برای محاسبه توزیع فواصل l بین رخدادها برای آستانه‌های مختلف بزرگی m و به کمک مختصات رومرکز کاتالوگی زمین لرزه‌ها از رابطه ۷ استفاده شد. به این ترتیب با مقادیر ثابت b و d_f مربوط به منطقه جغرافیایی ایران، مقدار ثابت C از محاسبه \bar{n} در رابطه ۴ برای پنجره‌های با اندازه مختلف به دست آمد که مقدار آن $C \leq 10^{-9}$ بود ولی برای سادگی در محاسبات، $C = 10^{-9}$ در نظر گرفته شد. همان‌طور که قبلاً بیان شد، زمین لرزه‌ها به عنوان گره در نظر گرفته شد و برای ایجاد ارتباط بین گره‌ها، مقدار n_{ij} و معادل آن c_{ij} برای زمین لرزه‌های ایران در محدوده زمانی و مکانی بیان شده، محاسبه شد.

برای مثال، مراحل انجام کار در شکل ۶-A-F نمایش داده شده است. رومرکز فرضی زمین لرزه‌ها به صورت



شکل ۶. نمایش شماتیک گره‌ها و یال‌ها در شبکه پیچیده زمین لرزه‌ها.

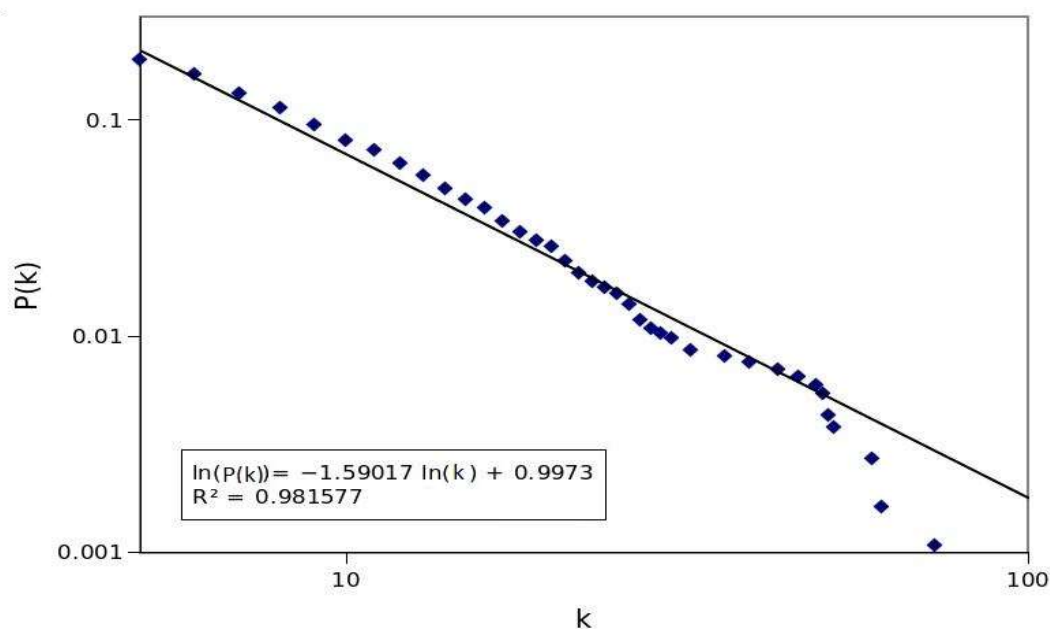
مرتبط با گره‌های شبکه، درجه آن است که در واقع تعداد پیوندها و یا یال‌هایی است که به گره مربوطه i وصل

پس از ساخت شبکه، ویژگی‌های شبکه مورد بررسی قرار گرفت. یکی از مهم‌ترین و ساده‌ترین کمیت‌های

گره‌ها در شبکه دارای درجه k هستند. به عبارت دیگر اگر یک گره به شکل کاملاً تصادفی از میان گره‌های شبکه انتخاب شود با احتمال $P(k)$ ، درجه آن k خواهد بود. تابع توزیع درجات در ایران مطابق شکل ۷، از رابطه توانی $P(k) \sim k^{-\gamma}$ تبعیت می‌کند، که در این رابطه $\gamma = 1/59$ است. این رابطه توانی برای تابع توزیع درجات بر حسب درجه خروجی، نشان می‌دهد که شبکه زمین‌لرزه‌ها یک شبکه بدون مقیاس است (Caldarelli, 2007).

هستند و با k_i نشان داده می‌شوند. در شبکه‌های جهت‌دار، یال‌ها دارای جهت هستند در نتیجه هر گره دارای دو درجه متفاوت خواهد بود: درجه ورودی $k_i(in)$ ، تعداد یال‌های ورودی به آن گره و درجه خروجی $k_i(out)$ ، تعداد یال‌های خروجی از آن گره. درجه یک گره مجموع درجات ورودی و خروجی آن گره می‌باشد که برابر است با $k_i = k_i(in) + k_i(out)$ است.

توزیع درجه گره‌های شبکه با تابع توزیع درجه $P(k)$ مشخص می‌شود. این تابع نشان می‌دهد که چه کسری از



شکل ۶. تابع توزیع درجات شبکه زمین‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌های ایران. شیب خط راست $1/59.017$ است و نشان می‌دهد که تابع توزیع درجات، بدون مقیاس با مقدار $\gamma = 1/59$ است.

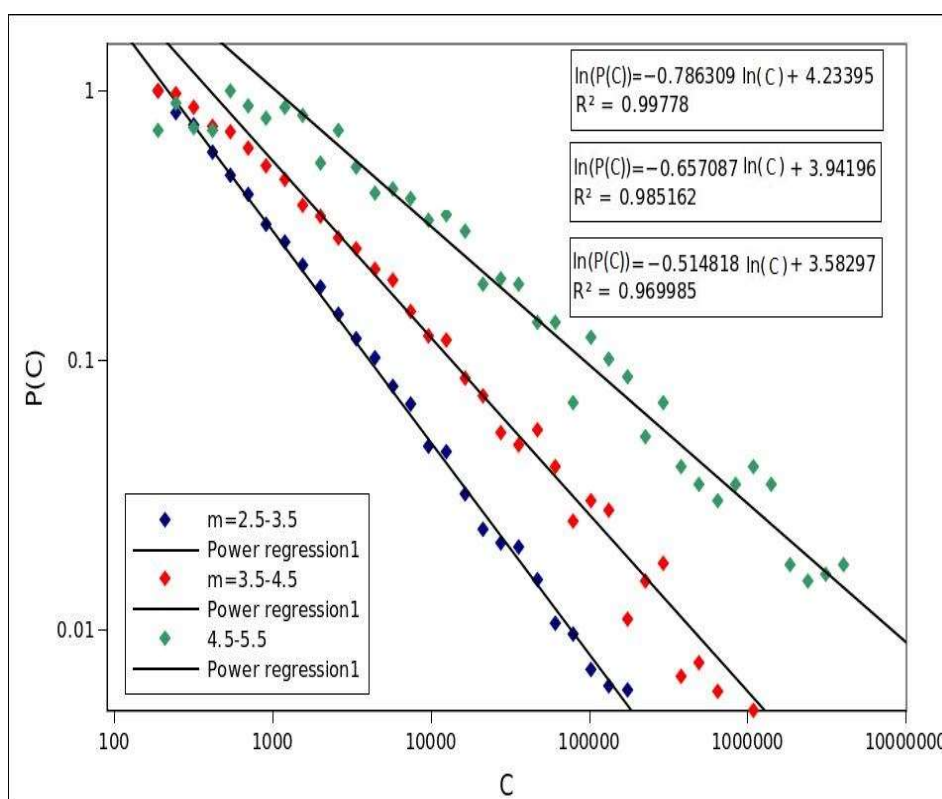
کاهش می‌دهد که با توجه به مفهوم تابع توزیع همبستگی C_{ij} منطقی است، زیرا این تابع بستگی به بزرگی زمین‌لرزه‌ها دارد و هرچه بزرگی زمین‌لرزه‌ها بیشتر می‌شود مقدار توابع همبستگی C_{ij} و در نتیجه تعداد این توابع افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به نمودارها ملاحظه می‌شود که در بزرگی‌های کوچک، مقادیر بزرگ‌تری از C_{ij} وجود

همچنین تابع توزیع احتمال همبستگی C_{ij} بین گره‌ها $P(c)$ ، به ازای بزرگی‌های مختلف در شکل ۷ رسم گردیده است. محور x و y به صورت لگاریتمی هستند. این تابع توزیع نشان می‌دهد که رابطه همبستگی یک رابطه توانی است. شیب این خطوط با افزایش بزرگی زمین‌لرزه‌ها و کاهش تعداد زمین‌لرزه‌ها، تغییر پیدا کرده و روند

آستانه، در نظر گرفتن ضریب خوشه‌ای و بزرگترین خوشه است. تمایل گره‌های شبکه برای تشکیل گروه‌های متمرکز از ویژگی‌های ساختاری شبکه است که کمیت ضریب خوشه‌ای برای سنجش این ویژگی معرفی می‌شود. این کمیت بیانگر احتمال همسایه بودن دو همسایه یک گره با هم است که برای شبکه‌های مختلف عددی بین صفر و یک اختیار می‌کند.

ندارد. این عوامل موجب می‌شود که به ازای زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر، نمودارها کندتر افت کنند و در نتیجه شیب نمودارها کاهش یابند.

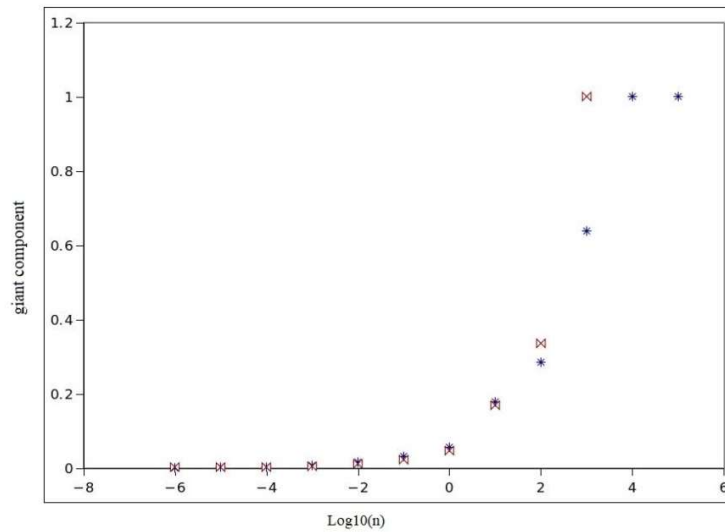
در نمودار شکل ۷ تمام ارتباطات در نظر گرفته شده است. همانطور که در روش ساخت شبکه بیان شد، می‌توان برای ایجاد یال بین گره‌ها یک مقدار آستانه برای n_{ij} و یا c_{ij} در نظر گرفت. یکی از این روش‌های انتخاب مقدار



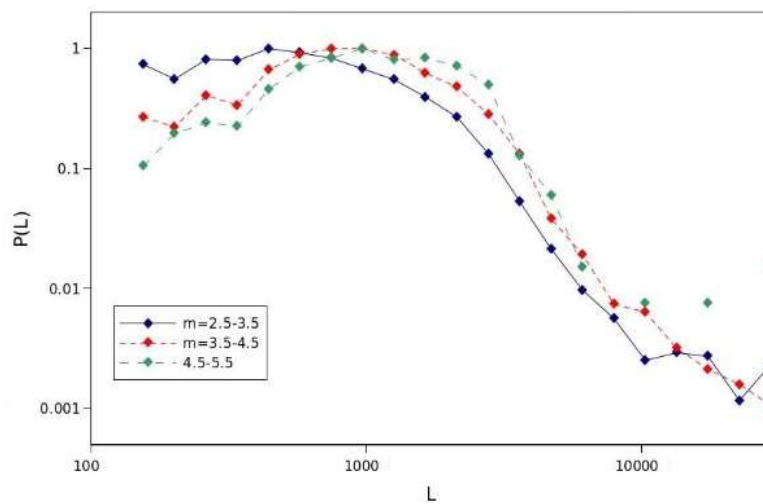
شکل ۷. تابع توزیع احتمال همبستگی برای زمین‌لرزه‌های ایران.

$m=10$ رفتار متفاوتی دارد. قبل از $n_c=10^{-1}$ تغییرات به آرامی و بعد از $n_c=10^{-1}$ تغییرات زیاد می‌شوند. در واقع یک انتقال فاز از مقدار کم به زیاد اتفاق می‌افتد که مرز آن در $n_c=10^{-1}$ است. پس می‌توان برای محاسبات، مقدار آستانه n_c را 10^{-1} در نظر گرفت.

برای این منظور شبکه به ازای آستانه بزرگی‌های مختلف ساخته شد و به ازای آستانه‌های مختلف n_c بزرگترین خوشه در هر حالت محاسبه شد که در نمودار شکل ۸ نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود مقدار بزرگترین خوشه قبل و بعد از 10^{-1}



شکل ۸. نمودار بزرگترین خوشه به ازای آستانه n_c های مختلف.



شکل ۹. توزیع فاصله‌های l برای آستانه‌های مختلف m در منطقه ایران.

رفتار یکسان را نشان می‌دهند. این برونمایی با رابطه زیر بیان شده است.

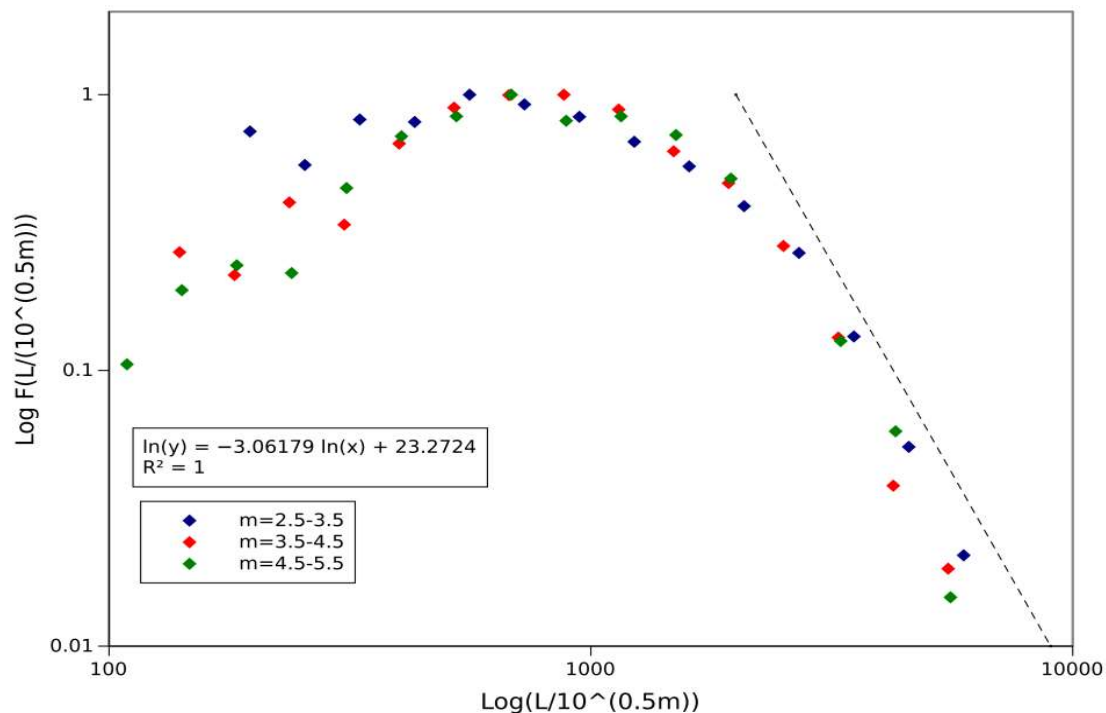
$$P_m(l) \sim 10^{-0.5m} F(l/10^{0.5m}) \quad (8)$$

نمودار شکل ۱۰ نتایج مربوط به شکل ۹ را برای رابطه بالا نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود تمامی نمودارها مستقل از مقدار بزرگی m یک رفتار توانی نزولی با شیب منفی تقریباً ۳ را دارند.

شکل ۹ توزیع فواصل l در رابطه ۷ را برای آستانه‌های مختلف m نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۹ مشخص است، فاصله $l^*(m)$ در جایی که تابع توزیع به مقدار ماکزیمم خود در قله می‌رسد، با بزرگی m افزایش می‌یابد. برای مقادیر بزرگ l ، تمامی توابع توزیع یک رفتار توانی نزولی با شیب $2/67$ را نشان می‌دهند تا جایی که قطع شوند. این قطع‌شدگی به وسعت منطقه مورد بررسی بستگی دارد. با برونمایی مقیاس مناسب، نمودارهای مختلف در این شکل

گرفته است لذا نتایج به دست آمده برای کل ایران صادق می‌باشد.

از آنجائیکه مطابق شکل ۱ رومرکز زمین لرزه‌ها تقریباً کل سطح ایران را پوشش می‌دهد و برای محاسبه پارامترهای آماری لرزه‌خیزی تمام داده‌ها مورد استفاده قرار



شکل ۱۰. نمودار برونابی شده شکل ۹. همان‌طور که مشاهده می‌شود همه توابع بعد از مقدار ماکزیمم، رفتار یکسانی دارند.

بحث و نتیجه گیری

بیت‌اللهی (۱۳۸۷) با استفاده از داده‌های تاریخی و ثبت شده تا ۲۰۰۸ میلادی ضریب لرزه‌خیزی a و b در ایران را به ترتیب در گستره $۰/۴$ تا $۱/۳$ و $۲/۹$ تا $۷/۶$ به دست آوردند که با نتایج به دست آمده در این تحقیق هم‌خوانی قابل قبولی دارد. بعد فراکتالی برای زمین‌لرزه‌های ایران $d_f \approx 1/56$ محاسبه شد. همچنین نتایج نشان دادند که برای هر بزرگی، نرخ پس‌لرزه‌ها از قانون اوموری با شیب خط $1 \approx p$ و تابع توزیع درجات زمین‌لرزه‌ها در ایران از رابطه توانی با $\gamma = 1/59$ تبعیت می‌کند. به دلیل اینکه این مطالعه برای محاسبه d_f ، $P(m)$ و γ اولین بار برای داده‌های ایران صورت گرفته است امکان مقایسه با مطالعات قبلی وجود ندارد. علاوه بر آن تابع توزیع همبستگی نیز یک

در این پژوهش برای ساخت شبکه، زمین‌لرزه‌ها را به صورت گره در نظر گرفته و برای ایجاد یال بین گره‌ها از کمیت معرفی شده توسط بایسی و پازوسکی (۲۰۰۴) استفاده گردید. در رابطه کمی تعریف شده مقادیر کمیت‌های مانند مقادیر b در رابطه گوتنبرگ-ریشر (۱۹۴۱)، p در رابطه اوموری (۱۹۸۴) و مقدار d_f در رابطه بعد فراکتالی برای منطقه ایران، محاسبه شدند. نتایج به دست آمده نشان دادند که ضرایب لرزه‌خیزی $b \approx 0/93$ و a -value $\approx 6/9$ می‌باشد.

هاشمی (۱۳۸۸) به بررسی تغییرات مکانی پارامتر لرزه‌خیزی b در ایران پرداخته است و تغییرات b را بین $۰/۸۴$ تا $۱/۲۸$ محاسبه نموده است. همچنین رحیم خانی و

- Condensed Matter and Complex Systems, 44, 115-117.
- Abe, S., and N. Suzuki, 2006, Complex earthquake networks: Hierarchical organization and assortative mixing, *Physical Review E*, 74, 026113.
- Abe, S., and N. Suzuki, 2007, Dynamical evolution of clustering in complex network of earthquake, *The European Physical Journal B*, 59, 93-97.
- Abe, S., and N. Suzuki, 2009a, Main shocks and evolution of complex earthquake networks, *Brazilian Journal of Physics*, 39, 428-430.
- Abe, S., and N. Suzuki, 2009b, Determination of the scale of coarse graining in earthquake networks, *Europhysics Letters*, 87, 48008.
- Abe, S., D. Pasaten, and N. Suzuki, 2011, Finite data-size scaling of clustering in earthquake networks, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 390, 1343-1349.
- Allen, M., Jackson, G. and Walker, R., 2004. Late Cenozoic reorganization of the Arabia-Eurasia collision and the comparison of short-term and long-term deformation rates: *Tectonics*, 23, 0278-7407.
- Baiesi, M., and Paczuski, M., 2004, Scale-free networks of earthquakes and aftershocks: *Physical Review E*, 69, 066106.
- Boccaletti, S., Latora, V., Moreno, Y., Chavez, M., and Hwang, D.U., 2006, Complex network: structure and dynamics: *Physics Reports* 424, 175-308.
- Caldarelli, G., Scale-free networks, Oxford University Press, 2007.
- Costa, L.F., Oliveira O.N., Travieso, Jr., G., Rodrigues, F.A., Boas, P.R.V., Antiquiera, L., Viana, M.P., and da Rocha, L.E.C., 2011, Analyzing and modeling real-world phenomena with complex networks: A survey of applications: *Advances in Physics*, 60, 329-412.
- Lotfi, N., Darooneh, A. H., 2012, The earthquakes network: the role of cell size, *European Physical Journal B*, 85, 23-26.
- Darooneh, A.H., and Lotfi, N., 2014, Active and passive faults detection by using the PageRank algorithm, *Europhysics Letters*, 107, 49001.
- Daividsen, J., Grassberger, P., Paczuski, M., 2006, Earthquake recurrence as a record breaking process, *Geophys. Res. Lett.*, 32, 1-4.
- Gutenberg, B., and Richter, C.F., 1941, Seismicity of the Earth: *Geol. Soc. Am. Bull.* 34(1).
- Hitara, T., 1989, Fractal Dimension of Fault Systems in Japan: Fractal Structure in Rock Fracture Geometry at Various Scales: *Pure and Applied Geophysics*, 136, 1-12.
- رابطه توانی است که شیب این خطوط با افزایش بزرگی زمین‌لرزه‌ها و کاهش تعداد زمین‌لرزه‌ها، تغییر پیدا کرده و روند کاهشی دارد. با توجه به مفهوم ضریب خوشه‌ای و تعریف بزرگ‌ترین خوشه به ازای آستانه‌های مختلف، مقدار $n_c = 10^{-1}$ محاسبه شد. در ادامه، توزیع فواصل برای آستانه‌های بزرگی مختلف محاسبه شد و ملاحظه شد که فاصله $l^*(m)$ ، در جایی که تابع توزیع به مقدار ماکزیمم خود در قله می‌رسد، با بزرگی m افزایش می‌یابد و با برونیابی مناسب تابع آن محاسبه گردید.
- ### سپاسگزاری
- بر خود لازم می‌دانیم از شبکه لرزه نگاری کشوری (ISC) وابسته به مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران برای در اختیار قرار گذاردن داده‌ها بر روی پایگاه داده‌ها کمال سپاسگزاری را داشته باشیم.
- ### منابع
- بابلیان، ا.، ۱۳۸۶، مباحثی در ریاضیات گسسته، انتشارات مبتکران.
- بیت‌اللهی، ع. و معتمد، پ.، ۱۳۸۹، پارامترهای لرزه‌خیزی برای منطقه البرز مرکزی، پژوهشنامه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، سال ۱۳، شماره ۳ و ۴، ۱-۸.
- رحیم‌خانی، پ.، بیت‌اللهی، ع.، ۱۳۸۷، پهنه بندی مکانی ضرایب لرزه خیزی b, a در گستره ایران و مقایسه با ایالت‌های لرزه زمین ساختی ایران، دوازدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، اهواز، شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب.
- Abe, S., and Suzuki, N., 2004a, Small-world structure of earthquake network, *Physica A Statistical Mechanics and its Applications*, 337, 357-362.
- Abe, S., and N. Suzuki, 2004b, Scale-free network of earthquakes, *Europhysics Letters*, 65, 581.
- Abe, S., and N. Suzuki, 2005, Scale-invariant statistics of period in directed earthquake network, *The European Physical Journal B*

- 80-87.
- Telesca, L., and Lovallo, M., 2012, Analysis of seismic sequences by using the method of visibility graph: *Europhysics Letters*, 97, 50002.
- Tenenbaum, J. N., ShlomoHavlin, and H. E. Stanley, 2012, Earthquake networks based on similar activity patterns, *Physical Review. E*, 86, 046107. University of Tokyo, 7, 111-120.
- Rezaei, S., Moghaddas, H., Darooneh, A. H., Zare, M., 2019a, Forecasting Earthquakes by Hybrid Model. *Applied Geophysics*, 131, 157-170.
- Omori, F., 1984, On the aftershocks of earthquake: *Journal of the College of Science, Imperial* of Pattern Informatic and PageRank `s, *Bulletin of the Seismological Society of America*,
- Rezaei, S., Moghaddas, H., Darooneh, A. H., 2019b, PageRank: An alarming index of probable earthquake occurrence, *Chaos* 29(6).
- Rezaei, S., Darooneh, A. H., Lotfi, N., Asaadi, N., 2017, The earthquakes network: Retrieving the empiricalseismological laws, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 471,

Determination of seismic parameters of Iranian earthquakes by network theory

Sara Taghavi¹, Fataneh Taghizadeh-Farahmand^{2*} and Soghra Rezaei³

¹M.Sc. Student, Department of Physics, Qom Branch, Islamic Azad University, Qom, Iran

²Associate Professor, Department of Physics, Qom Branch, Islamic Azad University, Qom, Iran,

³Assistant Professor, Department of Physics, Zanzan University, Zanzan, Iran

(Received: 20 January 2024, Accepted: 25 April 2024)

Abstract

Complex network theory has appeared as a suitable tool for studying complex phenomena. Earthquakes show spatio-temporal complex behavior that can be studied using complex networks, which enables us to recognize the global properties of Earthquakes.

It is so hard to consider all factors affecting the movement of faults and put them into a compact mathematical equation in order to describe the earthquake phenomenon. In complex network theory, we do not need to know details of the fault system. Using the network method, knowing the magnitude, time of occurrence and location of seismic events, we are able to understand several aspects of the earthquake phenomenon.

Studies on earthquakes using the network method are based on how the network is constructed. It was tried to show that the main statistical features of earthquake phenomena in any region can be retrieved from the associated earthquake network.

In this research, the Baiesi-Paczuski (2004) network model used to investigate the earthquake network.

Earthquake epicenters play the role of network nodes and the relationship between both nodes was established by the relationship defined by Baiesi-Paczuski.

In this project, by constructing the network, the parameters of seismicity (a-value, b-value), fractal dimension and correlation ratio in the Iran region. In the first attempt we drew out the Gutenberg–Richter law from the earthquakes network and the Omori law from the Baiesi-Paczuski network model.

We have used data recorded from 1996 to 2020 data at all the broadband and short-period stations of the Iranian Seismological Center.

The results showed that $b\text{-value} \approx 0.93$ and $a\text{-value} \approx 6.9$ and. Also, the results showed that for $d \approx 1.56$ each earthquake with a certain magnitude, the aftershock rates follow the Omori law with the line gradient of $p \approx -1$ and the earthquake degree distribution function in Iran from the power relationship ($(P(k) \sim k^\gamma)$) with a $\gamma = 1.59$. In addition, the distribution function showed that the correlation relation is also a power relationship.

Keywords: Complex network, earthquake, distribution function, Iran