

بررسی اتصال ترجیحی در شبکه زمین‌لرزه‌های ایران

صغری رضائی^{۱*}، هانیه مقدسی^۱، امیرحسین درونه^۱، فثانه تقی‌زاده فرهمند^۲

^۱دانشکده فیزیک، دانشگاه زنجان، زنجان

^۲گروه فیزیک، واحد قم، دانشگاه آزاد اسلامی، قم، ایران

چکیده

زمین‌لرزه‌ها از نظر زمانی و مکانی رفتار پیچیده‌ای دارند که می‌توانند با استفاده از نظریه شبکه‌های پیچیده مورد بررسی قرار گیرند. شبکه زمین‌لرزه‌ها به دلیل اضافه شدن رخداد‌های لرزه‌ای جدید با گذشت زمان، یک شبکه پویا است که منجر به ایجاد گره‌ها و یال‌های جدید در شبکه می‌شوند. در این مقاله، فرضیه اتصال ترجیحی برای گره‌های جدید را بررسی می‌کنیم که تاییدی بر این موضوع است که گره‌های جدیدی که وارد شبکه می‌شوند، ترجیح می‌دهند به گره‌های با درجه بالا متصل شوند. نشان می‌دهیم که اتصال ترجیحی در شبکه زمین‌لرزه‌های ایران وجود دارد و نرخ اتصالات با درجه هر گره، رابطه خطی دارد.

Investigation of preferential attachment in Iran earthquake network

Rezaei, Soghra¹; Moghaddasi, Hanieh¹; Darooneh, Amir Hossein¹; Taghizadeh-Farahmand, Fataneh²

¹ Department of Physics, Zanjan University, Zanjan

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

Abstract

Earthquakes have complex spatio-temporal behavior that can be studied using complex network theory. Earthquake networks are dynamical due to addition of new seismic events over time leading to creating new nodes and links in the network. Here we study the preferential attachment hypothesis for the connection of new nodes which states that it is more probable for newly added nodes to join the highly connected nodes. We showed that the preferential attachment is present in the case of Iran earthquakes network and the attachment rate has a linear relationship with node degree.

مقدمه

شبکه‌های تکاملی، رشد و اتصال ترجیحی است [۵]. رشد به معنی اضافه شدن گره‌های جدید به شبکه با گذشت زمان است و منظور از اتصال ترجیحی این است که گره‌های جدیدی که وارد شبکه می‌شوند، ترجیح می‌دهند به جای اتصال به گره‌های با درجه پایین به گره‌های با درجه بالا متصل شوند. تعداد یال‌های متصل به یک گره به عنوان درجه تعریف می‌شود. به زبان ریاضی، احتمال اتصال یک گره جدید به k_i امین گره موجود در شبکه با درجه k_i ، به صورت زیر است،

$$\Pi(k_i) = \frac{k_i^\alpha}{\sum_j k_j^\alpha} = C(t)k_i^\alpha \quad (1)$$

در سال‌های اخیر نظریه شبکه‌های پیچیده به عنوان یک ابزار مناسب برای توصیف ویژگی‌های مختلف پدیده‌های پیچیده شناخته شده است [۱]. برای توصیف یک سیستم با استفاده از مدل شبکه‌ای، ابتدا باید گره‌ها و یال‌ها را شناخت. اجزای سیستم به عنوان گره و ارتباط بین آن‌ها به عنوان یال تعریف می‌شود. شبکه‌های دنیای واقعی به دلیل گسترش ارتباطاتشان با محیط اطراف دائماً در حال تکامل هستند یعنی با گذشت زمان، گره‌ها به شبکه اضافه و یا از شبکه حذف می‌شوند و در نتیجه یال‌های آن‌ها نیز تغییر می‌کنند مثل شبکه‌های اجتماعی، شبکه اینترنت، شبکه متابولیک سلولی و شبکه همکاری‌های علمی [۴-۲]. دو مشخصه

در این رابطه $C(t)$ ثابت بهنجارش و α یک نمایه مثبت است. اگر $\alpha = 1$ باشد در اینصورت اتصال ترجیحی خطی بوده، شبکه بدون مقیاس و تابع توزیع درجات توانی است.

زمین لرزه‌ها پدیده‌هایی پیچیده از نظر زمانی و مکانی هستند که به طور ناگهانی به دلیل جابه‌جایی گسل‌ها در پوسته زمین به وجود می‌آیند. به دست آوردن یک مجموعه معادلات ریاضی که تمام عوامل دخیل در جابه‌جایی گسل‌ها را در بر گرفته و بتواند پدیده زمین‌لرزه را توصیف کند، کار سختی است. در نظریه شبکه‌های پیچیده نیازی به دانستن جزئیات سیستم گسلی نداریم بلکه تنها با داشتن اطلاعاتی در مورد مکان، زمان و بزرگی رخداد زلزله قادریم جنبه‌های مختلف پدیده زمین‌لرزه را دریابیم. شبکه زمین‌لرزه‌ها با گذشت زمان و با اضافه شدن رخداد‌های لرزه‌ای تکامل می‌یابد، در واقع گره‌ها و یال‌های جدید به شبکه اضافه می‌شود. با توجه به نظریه اتصال ترجیحی، احتمال ارتباط رخداد‌های لرزه‌ای جدید با رخداد‌های با ارتباطات بالا، بیشتر از رخداد‌های با ارتباطات پایین است.

برای بررسی اتصال ترجیحی در شبکه زمین‌لرزه‌ها، نخست باید سری زمانی زمین‌لرزه‌ها را با شبکه‌ای نشان دهیم. دو رویکرد اصلی توسط نویسندگان برای ساخت شبکه زمین‌لرزه‌ها وجود دارد. در رویکرد اول، منطقه جغرافیایی مورد مطالعه به سلول‌هایی با اندازه یکسان تقسیم می‌شوند. اگر زمین‌لرزه‌ای در این سلول‌ها اتفاق بیافتد، آن‌ها به عنوان گره تلقی می‌شوند. رخداد‌های لرزه‌ای پشت سر هم از نظر زمانی، توسط یال‌ها به هم متصل می‌شوند. در مقالات مختلفی ویژگی‌های چنین شبکه‌هایی مطالعه شده است [۶-۸]. نقاط فعال در منطقه جغرافیایی ایران توسط الگوریتم پیچ‌رنک توسط این روش محاسبه شده است [۹]. در رویکرد دوم، رخداد‌های لرزه‌ای به عنوان گره در نظر گرفته می‌شوند و دو گره زمانی به هم وصل می‌شوند که توسط روابطی، به هم وابسته باشند [۱۰، ۱۱]. رضائی و همکاران از رویکرد اول برای تعریف گره و برای ایجاد یال بین گره‌ها از روش پدیداری که در رویکرد دوم مورد استفاده قرار گرفته بود، استفاده کردند [۱۲]. آنها نشان دادند که قوانین گوتنبرگ-ریشتر و اموری قابل بازیابی از این شبکه هستند.

در این مقاله ابتدا روش محاسبه اتصال ترجیحی و ساخت شبکه زمین‌لرزه‌ها را توضیح می‌دهیم و سپس نتایج حاصل را بیان می‌کنیم.

روش تحقیق

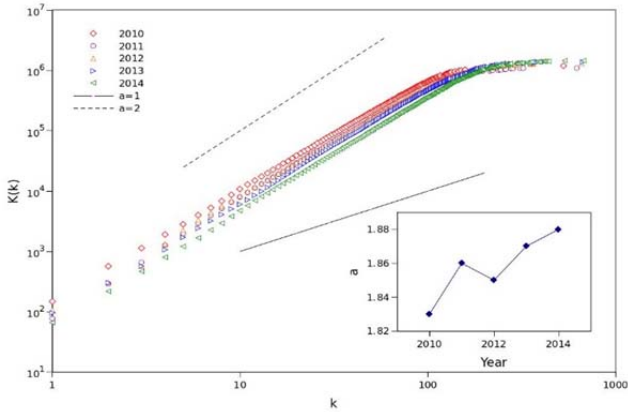
در شبکه‌های تکاملی، با گذشت زمان گره‌ها و یال‌های جدید به شبکه اضافه می‌شوند که رابطه بین گره‌های جدید و گره‌های موجود در شبکه، با محاسبه تابع اتصال ترجیحی قابل توصیف است. در واقع بعد از ورود گره‌های جدید و ایجاد یال با گره‌های موجود در شبکه، تابع $\Pi(k)$ با رسم تغییرات درجه گره‌های موجود در شبکه بر حسب درجه آن‌ها، از معادله ۱ به دست می‌آید. برای محاسبه $\Pi(k)$ در شبکه، همه گره‌های موجود در شبکه را با " T گره" و گره‌های جدیدی که در بازه زمانی ΔT به شبکه اضافه می‌شوند را با عنوان " T_1 گره" در نظر می‌گیریم که $\Delta T \ll T_1$ و $T_1 < T$ است. تغییرات درجه " T گره" را بعد از گذشت زمان ΔT و اضافه شدن " T_1 گره" محاسبه می‌کنیم. با رسم Δk بر حسب k می‌توانیم $\Pi(k, T, T_1)$ را به دست آوریم. برای حذف نوسانات بهتر است تابع توزیع تجمعی را به صورت زیر در نظر بگیریم،

$$\kappa(k) = \int \Pi(k) dk \quad (2)$$

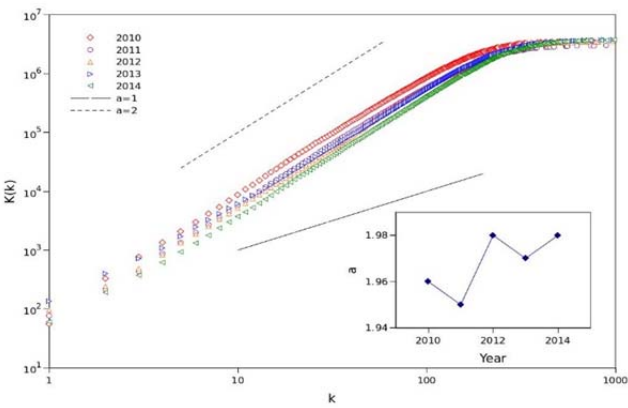
اگر تابع $\Pi(k)$ وابسته به k باشد، $\kappa(k) = k^{\alpha+1}$ خواهد شد و اگر $\alpha = 1$ باشد در این صورت اتصال ترجیحی وجود دارد.

برای ساخت شبکه زمین‌لرزه‌ها از مدل رضائی و همکاران استفاده می‌کنیم [۱۲]. در این مدل شبکه‌ای، ابتدا منطقه جغرافیایی مورد نظر به سلول‌های مربعی با اندازه یکسان تقسیم می‌شوند که این سلول‌های مربعی بدون هیچ هم‌پوشانی کل منطقه را در بر می‌گیرند. سری زمانی لرزه‌ها را در نظر گرفته و هر زمین‌لرزه با هر بزرگا که داخل این سلول‌ها اتفاق بیفتد به عنوان گره در نظر می‌گیریم. برای ایجاد ارتباط بین گره‌ها از روش پدیداری استفاده می‌کنیم به این ترتیب که، رخداد‌های لرزه‌ای را مطابق شکل ۱ در یک نمودار میله‌ای که محور افقی آن زمان است، قرار می‌دهیم. هر میله مطابق با یک زمین‌لرزه است که ارتفاع آن بزرگای مربوط به

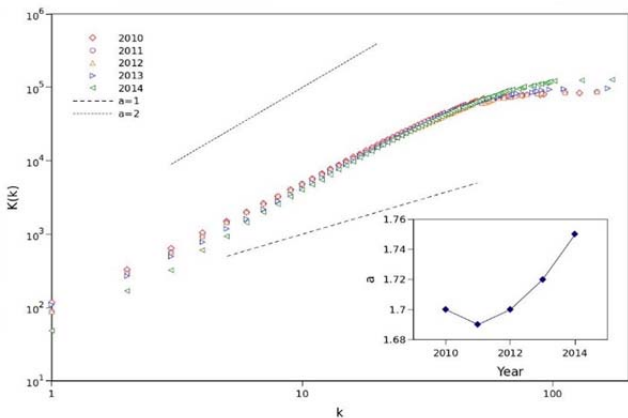
مشاهده می‌شود. در شکل‌ها $a = \alpha + 1$ است. اگر اتصال ترجیحی وجود نداشت، نباید $\Pi(k)$ به k وابسته بوده و $\kappa(k)$ با k متناسب می‌شد. اما $\kappa(k)$ خطی نیست که نشان‌دهنده وجود اتصال ترجیحی است. نمایه α متناظر



الف



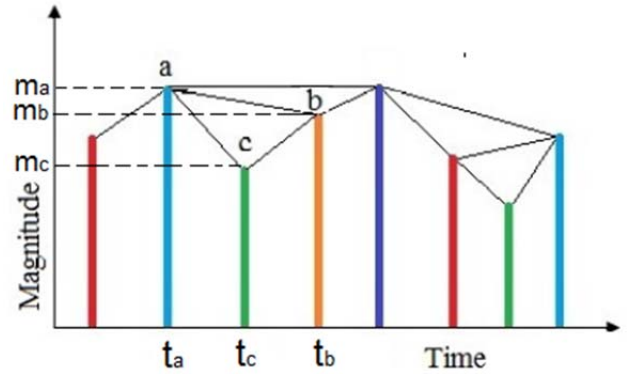
ب



ج

شکل ۲. تابع $\kappa(k)$ بر حسب k برای شبکه زمین‌لرزه‌های ایران به ازای الف) تمام بزرگی‌ها، ب) $m_c = 2$ و ج) $m_c = 3$. هر به صورت $[1999+x, 2010+x]$ که در آن $0 < x < 6$ است.

زمین‌لرزه است. گره‌ها در بالای میله‌ها قرار می‌گیرند و دو گره زمانی توسط یال به هم متصل می‌شوند که شرط پدیداری برقرار باشد.



شکل ۱. نمونه‌ای از سری زمانی. شرط پدیداری نشان می‌دهد که بین کدام گره‌ها می‌تواند یال وجود داشته باشد.

در واقع شرط پدیداری را به زبان ریاضی می‌توان به این صورت توضیح داد که اگر یک خط راست بین دو گره وصل کنیم، این خط نباید توسط هیچ میله‌ای که بین آن‌هاست قطع شود، یعنی،

$$m_c < m_b + (m_a + m_b) \frac{t_b - t_c}{t_b - t_a} \quad (3)$$

نتیجه‌گیری

در این مقاله، داده‌های لرزه‌ای برای منطقه جغرافیایی ایران از سایت <http://irsc.ut.ac.ir> برای بزرگای بین ۸-۰.۱ ریشتر، در محدوده عرض جغرافیایی $24^\circ N - 44^\circ N$ و طول جغرافیایی $40^\circ E - 64^\circ E$ در بازه زمانی ۱ ژانویه ۱۹۹۶ تا ۱ ژانویه ۲۰۱۵ با تعداد ۹۱۶۵۰ زمین‌لرزه، به دست آمد. شبکه زمین‌لرزه‌ها را به روش بیان شده در قسمت قبل ساختیم. برای بررسی اتصال ترجیحی، زمان T را در بازه [۱۹۹۹, ۲۰۱۰] در نظر گرفته و به طور $\Delta T = 1$ سال انتخاب کردیم. بعد از گذشت زمان ΔT ، به طور واضح شبکه تکامل می‌یابد و گره‌های جدید به شبکه اضافه می‌شود. با محاسبه تغییرات درجه هر گره نسبت به درجه هر گره، می‌توان $\Pi(k)$ و $\kappa(k)$ را محاسبه کرد. برای گسترش بررسی، مقدار T را به صورت $[1999+x, 2010+x]$ که در آن $0 < x < 6$ بود، انتخاب کردیم. مقدار $\kappa(k)$ بر حسب k برای بازه‌های زمانی مختلف و همه زمین‌لرزه‌های ذکر شده، در شکل ۲

زیرا این گره‌ها دیگر گره‌ها را با احتمال بیشتری تحت تاثیر قرار می‌دهند.

منابع

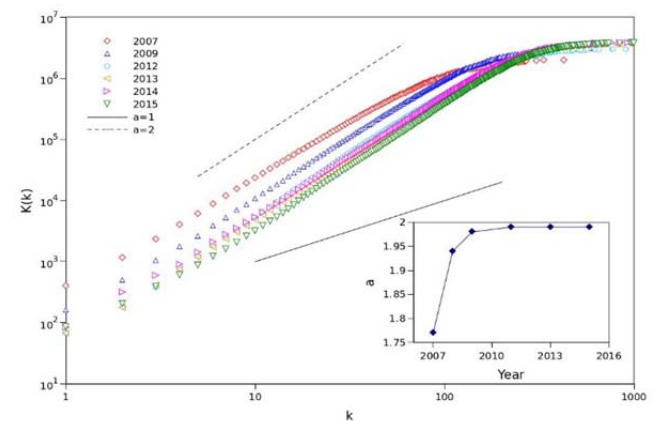
- [1]Costa, L.F. Oliveira, O.N. Travieso, G. Rodrigues, F.A. Boas, P.R.V. Antiqueira, L. Viana, M.P. da Rocha, L.E.C. 2011, Analyzing and modeling real-world phenomena with complex networks: A survey of applications, Adv. Phys. 60, 329.
- [2]Barabasi, A.L. Albert, R. 1999, Emergence of scaling in random networks, Science 286, 509.
- [3]Albert, R. Barabasi, A.L. 2002, Statistical mechanics of complex networks, Rev. Modern Phys. 74, 47.
- [4]Barabasi, A.L. Jeong, H. Neda, Z. Schubert, E. Vicsek, T. 2002, Evolution of the social network of scientific collaborations, Physica A 311, 590.
- [5]Dorogovtsev, S.N. Mendes, J.F.F. Samukhin A.N., 2000, Structure of growing networks with preferential linking, Phys. Rev. Lett. 85, 4633.
- [6]Abe, S. Suzuki, N. 2006, Complex earthquake networks: Hierarchical organization and assortative mixing, Phys. Rev. E 74, 026113.
- [7]Abe, S. Suzuki, N. 2005, Scale-invariant statistics of period in directed earthquake network, Eur. Phys. J. B, 44, 115
- [8]Lotfi, N. Darooneh, A. H. 2012, The earthquakes network: the role of cell size, Eur. Phys. J. B, 85, 23.
- [9]Darooneh, A. H. Lotfi, N. 2014, Active and passive fault detection by using the PageRank algorithm, Eur. phys.Lett 107, 49001.
- [10]Baiesi, M. Paczuski, M. 2004, Scale-free networks of earthquakes and aftershocks, Phys. Rev. E 69, 066106.
- [11]Telesca, L. Lovallo, M. 2012, Analysis of seismic sequences by using the method of visibility graph, Europhys. Lett 97, 50002.
- [12]Rezaei, S. Darooneh, A.H. Lotfi, N. Asaadi, N. 2017, The earthquakes network: Retrieving the empirical seismological laws, Physica A 471, 80.

T . با مقدار انتهایی زمان مربوط و برازش خطی با توان ۱ و ۲ در شکل مشخص شده است. مقدار α در پیوست شکل برای T های مختلف نشان داده شده است.

با هر بازه زمانی در پیوست شکل با مقدار میانگین ۰.۹۵ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، نمودار در درجه‌های بالاتر اشباع می‌شود زیرا تعداد گره‌ها با درجه‌های بالا خیلی کمتر از درجه‌های پایین است.

مطابق شکل ۲-ب و ۲-ج، مقدار $\kappa(k)$ برای آستانه‌های $m_c = 2$ و $m_c = 3$ نیز محاسبه شد که در آن $\langle \alpha \rangle = 0.85$ و $\langle \alpha \rangle = 0.71$ به ترتیب برای هر کدام به دست آمد.

برای بررسی بیشتر، مقدار بزرگی m را ثابت نگه داشته و مقدار T . را به صورت $[x + 1996, 2006]$ که $0 < x < 10$ بود تغییر دادیم. با افزایش بازه زمانی T ، همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود مقدار α به عدد ۱ نزدیکتر می‌شود.



شکل ۳. تابع $\kappa(k)$ بر حسب k برای شبکه زمین‌لرزه‌های ایران به ازای تمام بزرگی‌ها. T ها به صورت $[x + 1996, 2006]$ که در آن $0 < x < 10$ است. هر T با مقدار انتهایی زمان مربوط و برازش خطی با توان ۱ و ۲ در شکل مشخص شده است. مقدار α در پیوست شکل برای T های مختلف نشان داده شده است.

این بررسی‌ها برای شبکه زمین‌لرزه‌های ایتالیا نیز مورد بررسی قرار گرفت که نتایج مشابهی با یافته‌های ذکر شده در این مقاله داشت. این مطالعات نشان‌دهنده وجود اتصال ترجیحی در شبکه زمین‌لرزه‌ها می‌باشد. از این روش می‌توان با مشخص کردن گره‌های با اتصالات بالا، برای برآورد خطر لرزه‌ای استفاده کرد.