بررسی تغییرات در روند تعداد تجمعی ناهنجاری‌های مغناطیسی قبل و بعد از زمین‌لرزه با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای

همایون علیمرادی خمارتاجی[۱]، حبیب رحیمی[۲]، محسن اویسی مؤخر[۳]
[۱] دانشجوی دکتری، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، alimoradi.h@ut.ac.ir
[۲] دانشیار مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، rahimih@ut.ac.ir
۳ استادیار گروه فیزیک، دانشگاه رازی. moveisy9@gmail.com

چکیده

کشور ایران به دلیل قرار گرفتن بر روی کمربند لرزه‌خیز آلپ-هیمالیا همواره در معرض خطر وقوع زمین‌لرزه‌های مخرب قرار دارد و تاکنون چندین زمین‌لرزه بزرگ در آن به وقوع پیوسته است که باعث خسارات مالی و جانی زیادی شده است که توجه به زمین‌لرزه و تحقیق در زمینه‌های مختلف آن را امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر کرده است در این تحقیق زمین‌لرزه‌هایی که از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ در محدوده کشور ایران با بزرگی بالای ۵.۵ به وقوع پیوسته است موردبررسی قرار گرفتند. بدین منظور از داده‌های ماهواره‌ای میدان مغناطیسی برداری تمام مسیرهایی که از نزدیکی محل وقوع زمین‌لرزه عبور کرده‌اند در فاصله زمانی دو ماه قبل وقوع تا یک ماه بعد آن مورداستفاده قرار گرفتند تا ناهنجاری‌هایی که از یک مقدار آستانه انحراف معیار بالاتری دارند بررسی و مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گیرند. درنهایت با برازش تابع سیگموئید بروی تعداد تجمعی ناهنجاری‌ها وقوع زمین‌لرزه‌های موردبررسی قابل پیش‌بینی شدند. با استفاده از بانک داده موجود در ۹۰ درصد موارد وقوع زمین‌لرزه‌های بررسی‌شده در این مطالعه، بی‌هنجاری‌های پیش‌نشانگری چند ساعت تا یک ماه قبل وقوع زمین‌لرزه‌ها مشاهده می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: پیش‌نشانگر، سیگموئید، زمین‌لرزه، داده ماهواره‌ای، میدان مغناطیسی، ناهنجاری

Investigation of changes in the cumulative number of magnetic anomalies before and after earthquakes using satellite data

Homayoon Alimoradi Khomartaji [1], Habib Rahimi [2], Mohsen Ovaisi Moaakhar[3]
[1] PH.D. Student, Institute of Geophysics, University of Tehran, alimoradi.h@ut.ac.ir
[2] *Associate Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, rahimih@ut.ac.ir*
[3] Assistant Professor, Department of physics, Razi University. Moveisy9@gmail.com

Abstract

Iran is always at risk of destructive earthquakes due to its location on the Alpine-Himalayan seismic belt, and several large earthquakes have occurred there so far, which have caused a lot of financial and human losses. Variety has made it a necessity and inevitable. In this study, earthquakes that occurred from 2014 to 2021 in Iran with a magnitude above 5.5 were investigated. For this purpose, magnetic field satellite data were used to analyze all the orbits that passed near the earthquake site between two months before the occurrence and one month after it, in order to study and analyze anomalies that have a higher standard deviation threshold. To be placed. Finally, by fitting the sigmoid function to the cumulative number of anomalies, the occurrence of the studied earthquakes was predicted. Using the existing database in 90% of the occurrence of earthquakes studied in this study, pre-indication abnormalities are observed a few hours to a month before the occurrence of earthquakes.

Keywords: precursors, Sigmoid, Earthquake, Satellite data, Magnetic field, Anomaly

۱ مقدمه

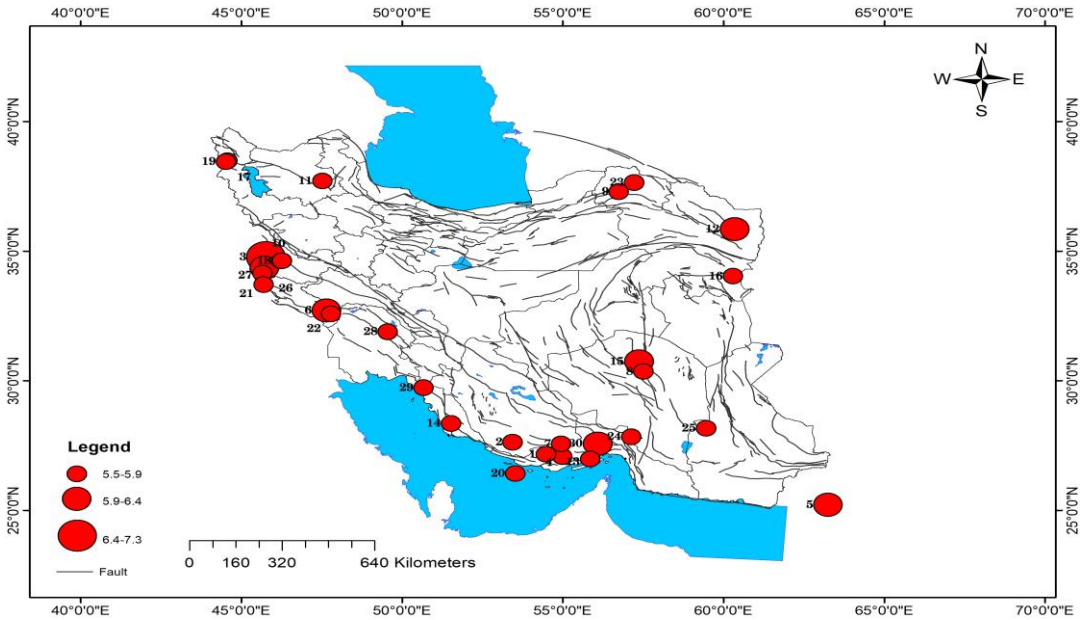
عنصر کلیدی برای مطالعه فرآیند وقوع زمین‌لرزه-و در حالت ایده آل برای پیش‌بینی وقوع آن - اشاره به وجود

پیش‌نشانگرهای احتمالی زلزله (در مقیاس زمانی، طولانی، متوسط یا کوتاه) و همچنین تشخیص آن‌ها به‌عنوان تابعی از فاصله است (از ناحیه کانونی رویداد زمین‌لرزه). یک بررسی گسترده را می‌توان به‌عنوان‌مثال در [5]–[1] مورد بررسی قرارداد. درواقع، برخی از فرایندها، مانند پیش‌نشانگرها، می‌توانند در اطراف ناحیه کانونی (پیش‌نشانگرهای محلی) شناسایی شوند. سایر پیش‌نشانگرهای احتمالی را می‌توان نه‌تنها بر روی مرکز زمین‌لرزه، بلکه در نزدیکی منطقه مزدوج مغناطیسی آن یا در امتداد خط میدان با اثر روی مرکز زمین‌لرزه (پیش‌نشانگرهای پراکنده) شناسایی کرد.

درنهایت یک دسته دیگر از پیش‌نشانگرها را می‌توان با نوسانات قابل‌تشخیص نه‌تنها در امتداد یک لوله شار ژئومغناطیسی مرتبط با مرکز زلزله، بلکه در «پوسته» یونی مغناطیسی مناسب (پیش‌نشانگرهای توزیع‌شده) گسترش دارد. امروزه بحث در مورد پیش‌نشانگرهای زلزله همچنان باز است. بااین‌وجود، نتایج قطعی به دست نیامده است، حجم زیادی از اندازه‌گیری‌ها در سرار جهان با روش‌شناسی بسیار متنوع و بررسی مقادیر و پارامترهای فیزیکی مختلف، هم در زمین و هم در فضا، جمع‌آوری‌شده‌اند.

برخلاف انتظار، مشکل تکرارپذیری و تائید نتایج ادعا شده توسط نویسندگان مختلف با استفاده از روش‌شناسی یکسان و/ یا تجزیه‌وتحلیل و تحلیل پارامترهای یکسان وجود دارد. درحالی‌که اثرات هم‌زمان لرزه‌ای در اتمسفر به‌خوبی ثابت‌شده است [6] پدیده‌های احتمالی پیش از زلزله در سطح و همچنین اتصال بین لیتوسفر، جو و یونسفر، هنوز مورد مناقشه است [8] ,[7].

منطقه مورد بررسی در این مقاله محدوده کشور ایران است. ایران به دلیل قرارگیری در کمربند لرزه‌خیز آلپ-هیمالیا و در محل تصادم ورقه‌های اوراسیا-عربستان، ازنظر زمین‌شناسی فعال است. حدود ۸ درصد از زمین‌لرزه‌های دنیا و حدود ۱۷ درصد از زلزله‌های بزرگ دنیا در فلات ایران رخ می‌دهد.. در این مقاله، ما با استفاده از داده‌های میدان مغناطیسی برداری ماهواره swarm [9] که ازلحاظ زمانی و مکانی نزدیک به محل وقوع رخداد هستند، تمام زمین‌لرزه‌ها از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ که در کشور ایران با بزرگی بیشتر ۵.۵ رخ‌داده‌اند را برای به دست آوردن تک ناهنجاری‌ها مورد تجزیه‌وتحلیل قرار می‌دهیم. در شکل ۱ رومرکز زمین‌لرزه‌های مورداستفاده نشان داده‌شده است.



شکل ۱. رومرکز زمین‌لرزه‌هایی که با بزرگی بالاتر از ۵.۵ ز سال ۲۰۱۴ در محدوده فلات ایران اتفاق افتاده‌اند.

۲ روش تحقیق

در این تجزیه‌وتحلیل از داده‌های میدان مغناطیسی برداری با نرخ نمونه‌برداری ۱ هرتز و سطح b-۱ استفاده‌شده است. ابتدا داده‌ها با توجه به بزرگی هر زمین‌لرزه و تاریخ وقوع آن داده‌ها را از سایت ماهواره swarm دانلود می‌کنیم (http://earth.esa.int/swarm) و در ادامه تجزیه و تحلیل زیر را بر روی آن انجام می‌دهیم.

با استفاده از داده‌های میدان مغناطیسی برداری (VFM) تمام اندازه‌گیری‌های مؤلفه‌های مغناطیسی X (شمال) و Y (شرق) و Z (عمود) در نظر گرفته‌شده است. برای هر یک از زمین‌لرزه‌ها تمام مسیرهایی که از ۷ روز قبل از وقوع زمین‌لرزه تا روز وقوع آن از داخل ناحیه دوبرووسکی [10] عبور کرده‌اند در نظر گرفته می‌شود.ابتدا نسبت به زمان از هر یک از مسیرها مشتق گرفته می‌شود .این روش بیشتر نوسانات کند سیگنال مغناطیسی را از بین می‌برد.سپس بهترین منحنی برازش شده که توسط الگوریتم cubic-spline با نقاط گره ۶ ثانیه تنظیم و به‌دست‌آمده است روی مسیرها اعمال می‌شود و از سری زمانی کم می‌کنیم در ادامه مانده‌های به‌دست‌آمده ترسیم می‌شوند.مقیاس در محدوده $\pm 1\, nT/s$ ثابت است،به‌طوری‌که می‌توان باقیمانده یک مسیر خاص را با دیگری مقایسه کرد.این باقیمانده‌ها نسبت به هرگونه تغییر ناگهانی سیگنال اصلی بسیار حساس هستند [11] با این کار می‌توانیم ناهنجاری‌های مغناطیسی که قبل از وقوع زمین‌لرزه و در اطراف زمین‌لرزه به وقوع پیوستند را در داده‌های میدان مغناطیسی برداری پیدا کنیم در ادامه با توجه به اینکه اغلب ناهنجاری‌هایی که از سنگ‌کره نشاءت می‌گیرند بیشتر در مؤلفه y میدان مغناطیسی بروز می‌کنند [12] لذا بر روی مؤلفه y میدان مغناطیسی که ناهنجاری در آن دیده‌شده است یک پنجره متحرک به عرض یک درجه تعریف می‌کنیم که هر بار میزان انحراف معیار داخل پنجره را با کل مسیر مقایسه کند و از این طریق یک انحراف استاندارد برای هر یک از زمین‌لرزه‌ها به دست می‌آوریم و در ادامه بعدازاینکه انحراف استاندارد آستانه را برای هریک از زمین‌لرزه‌ها به دست آوردیم این بار داده‌های میدان مغناطیسی را برای هرکدام از زمین‌لرزه‌ها از دو ماه قبل از وقوع تا یک ماه پس‌ازآن در نظر می‌گیریم و مراحل الگوریتم گفته شده را روی هر یک از مدارها اعمال می‌کنیم و هر جا که مقدار انحراف استاندارد از مقدار آستانه بیشتر شد آن را به‌عنوان ناهنجاری شناسایی می‌کنیم و با ناهنجاری‌های قبلی جمع می‌کنیم .این روش به دلیل حساسیت به انحراف غیرعادی نسبت به یک فرآیند تصادفی معمولی که مقدار انباشته‌شده دارای یک افزایش خطی آماری است،مورداستفاده قرار می‌گیرد.

به‌طور خاص، در صورت بروز پدیده‌های بحرانی، انتظار می‌رود ناهنجاری‌های مکرر هنگام نزدیک شدن به نقطه بحرانی افزایش و هنگام دور شدن از آن کم شدن ناهنجاری‌های مکرر را داشته باشیم، بنابراین هنگام نزدیک شدن به زمان وقوع زمین‌لرزه با افزایش تعداد ناهنجاری‌های مغناطیسی مواجه هستیم و پس‌ازآن یک بازیابی آهسته داریم. برای به دست آوردن نقطه بحرانی سیستم از یک تابع سیگموئید تعمیم‌یافته استفاده می‌کنیم:

$$S(t) = a + \frac{b-a}{(1-e^{\frac{t-t_f}{c}})} \qquad (1)$$

که در آن a، b، c و t_f ثابت‌های هستند که با محاسبات مناسب داده می‌شوند ، t_f نقطه عطف تابع است.
اگرچه این تابع یک‌راه حل خیلی دقیق نیست ولی نزدیک شدن یک سیستم به نقطه بحرانی آن رضایت‌بخش است. یکی دیگر از مزایای استفاده از تناسب سیگموئید، تخمین زمان است. علیرغم اینکه تابع استفاده‌شده فقط تقریبی است، پارامتر t_f یک تخمین مناسب از زمان تغییر بنیادی سیستم بحرانی است. برای درک اینکه آیا سازگاری با تابع سیگموئید قوی

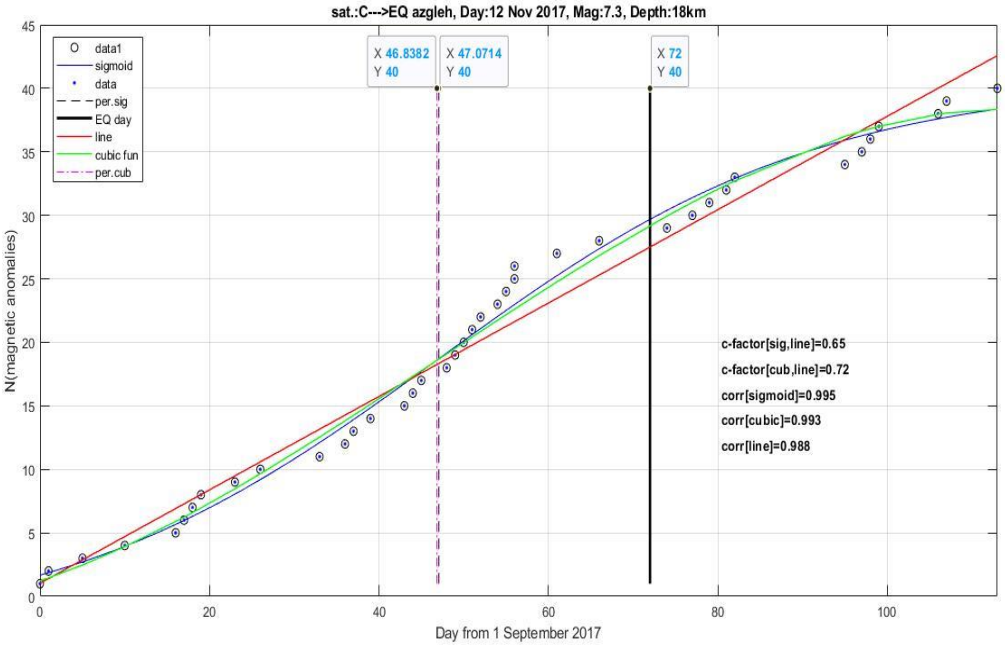
است، آن را با یک خط مستقیم مقایسه می‌کنیم. علاوه بر این،فاکتور-c را نیز به‌صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$C = \sqrt{\frac{1-r_p^{\,2}(sigmoid)}{1-r_p^{\,2}(line)}} \qquad (2)$$

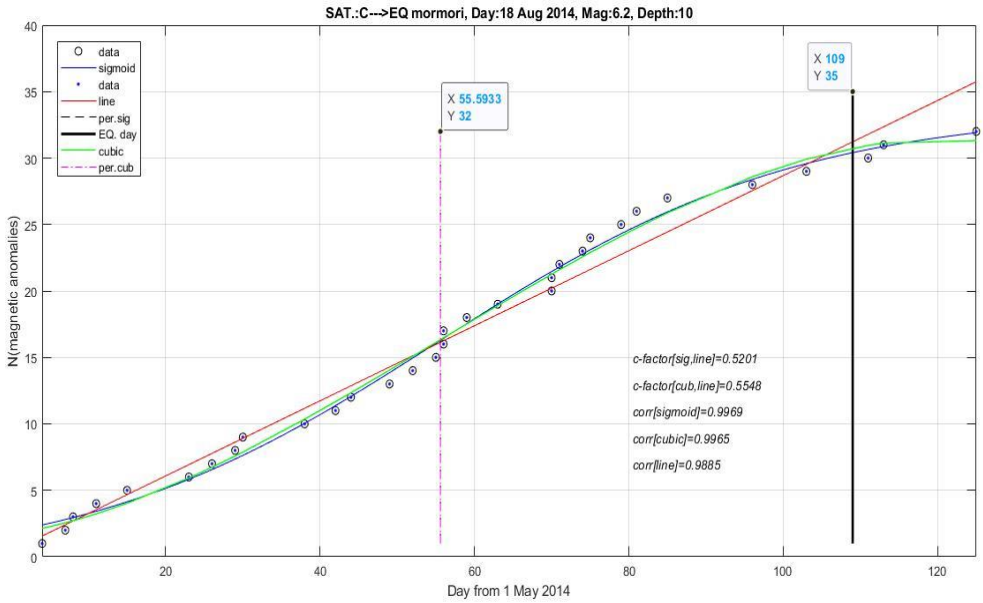
فاکتور –c کمتر از ۱ کارایی بهتری به‌وسیله تابع سیگموئید نسبت به خطی را به دست می‌دهد.
اگر تعداد انباشته‌شده از ناهنجاری‌های مغناطیسی در حال تولید اثر اتصال سنگ‌کره، جو، یون کره قبل و بعد از زمین‌لرزه باشد، تناسب سیگموئید می‌تواند یک تخمین از زمان تغییر این اتصال، یعنی زمان رخ دادن زمین‌لرزه را فراهم می‌کند.

۳ نتیجه‌گیری

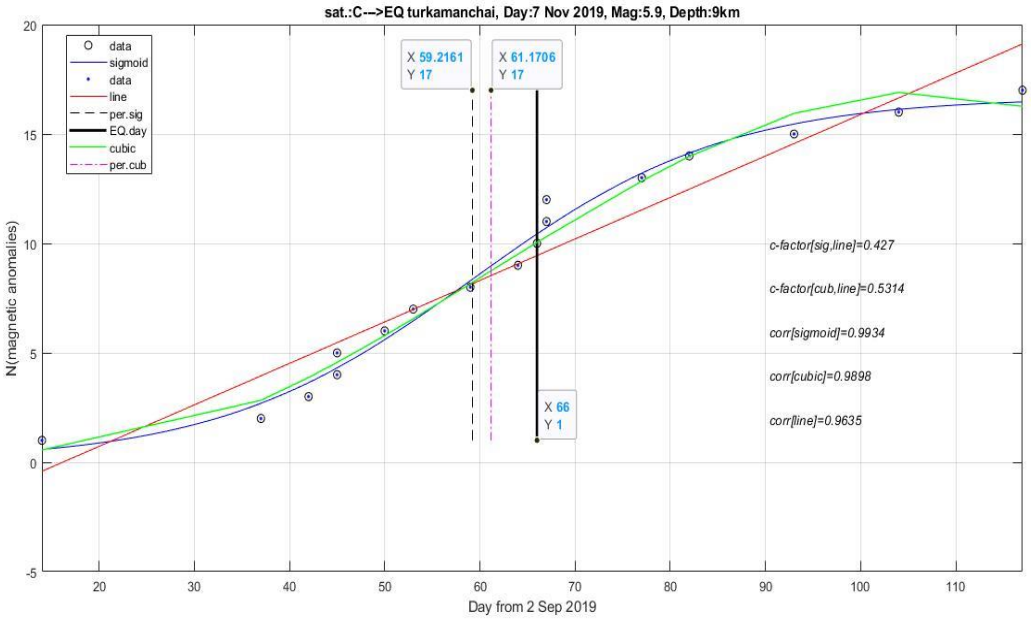
این روش بر روی ۳۰ زمین‌لرزه موردبررسی در این تحقیق اعمال‌شده است. در اینجا برای نمونه از ۳ مورد از آن‌ها استفاده می‌کنیم.
در ادامه شکل‌ها ۲ تا ۴ به‌دست‌آمده نشان داده شده است. برای هر زمین‌لرزه دو ماه قبل تا یک ماه بعد از وقوع زمین‌لرزه تمام مدارها موردبررسی قرارگرفته است. در هرکدام از طرح‌های زیر محورy تعداد تجمعی ناهنجاری‌های مغناطیسی، محور x روزهای قبل و بعد زلزله، روز وقوع زمین‌لرزه با خط سیاه توپر و نقاط عطف توابع سیگموئید و مکعبی به‌عنوان پیش‌نشانگر به ترتیب با خط‌چین سیاه و بنفش مشخص‌شده‌اند.



شکل ۲. زمین‌لرزه ازگله



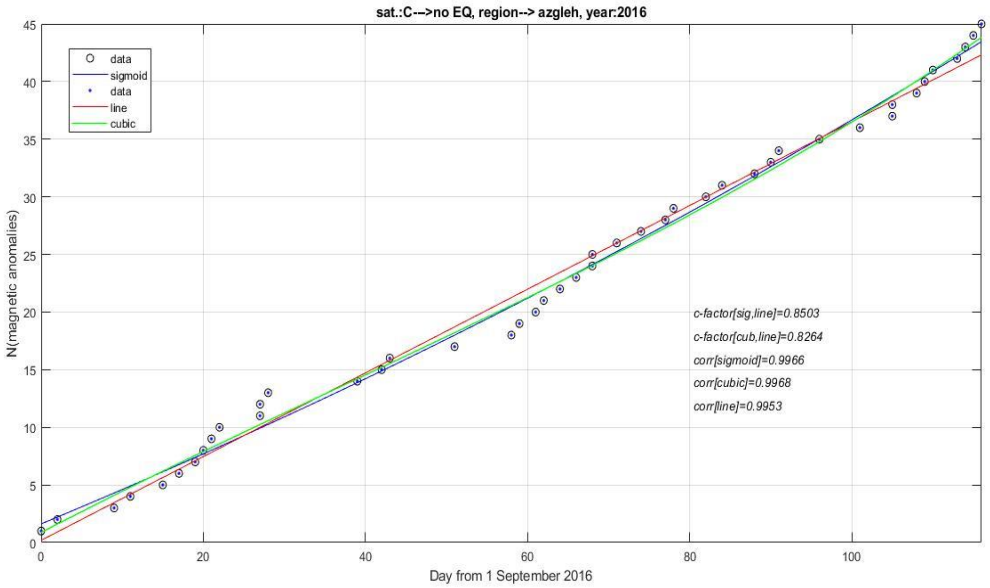
شکل ۳. زمین‌لرزه مورموری



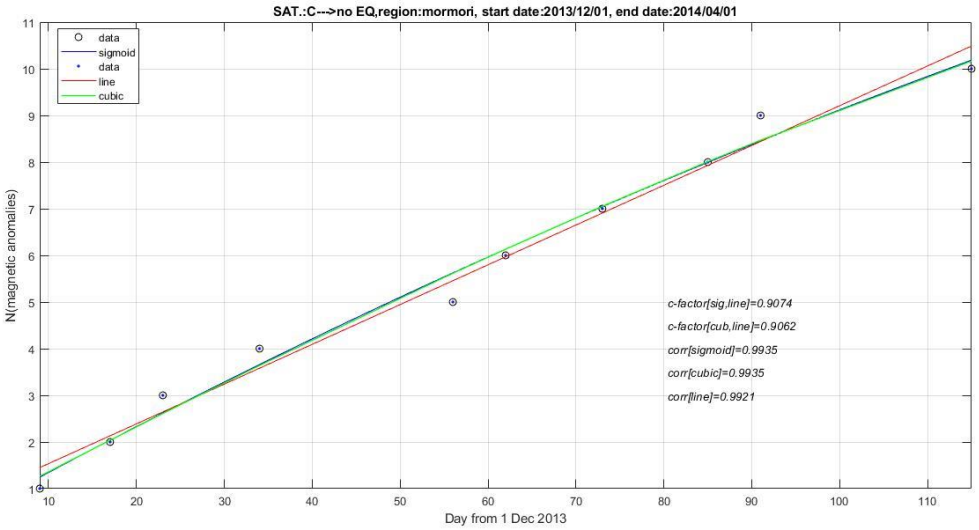
شکل ۴. زمین‌لرزه ترکمنچای

در این مرحله یک تجزیه‌وتحلیل دیگر تحت عنوان تجزیه‌وتحلیل «اشتباه» را انجام خواهیم داد. به این صورت که در مورد مناطقی که زمین‌لرزه اتفاق افتاده سعی می‌کنیم در همان مناطق و در مدت‌زمانی مشابه که زمین‌لرزه قابل‌توجهی رخ نداده است تعداد تجمعی ناهنجاری‌ها را رسم می‌کنیم و انتظار داریم که رفتار ناهنجاری‌ها به حالت خطی نزدیک‌تر باشد نسبت به موقعی که زمین‌لرزه مهمی در آن منطقه رخ‌داده است. در اینجا ما برای هر سه زمین‌لرزه‌ای که در

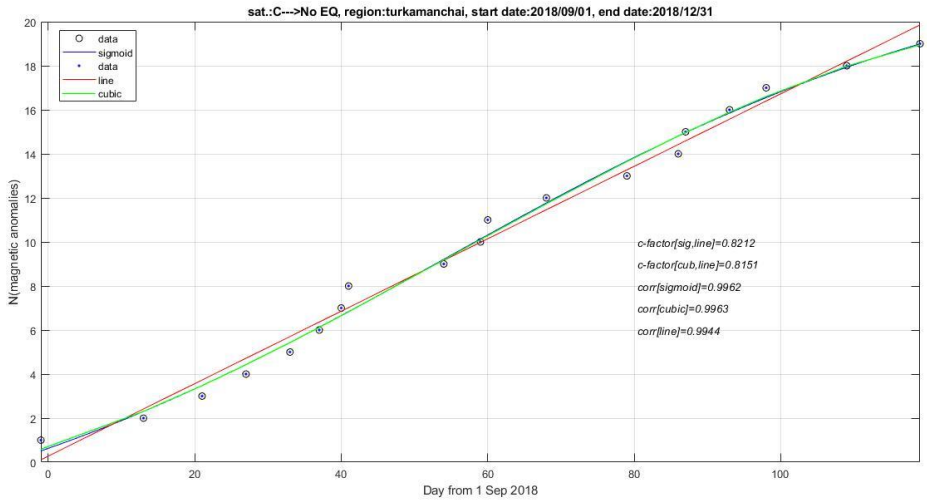
شکل‌های ۲ تا ۴ نشان داده‌ایم یعنی زمین‌لرزه ازگله با بزرگی ۷.۳، مورموری با بزرگی ۶.۲ و ترکمنچای با بزرگی ۵.۹ این تحلیل را انجام داده‌ایم که نتایج آن در شکل‌های ۵،۶و۷ نشان داده‌شده است.



شکل ۵. منطقه مربوط به زمین‌لرزه ازگله در دوره‌ای که زمین‌لرزه بالای ۵ رخ نداده است.

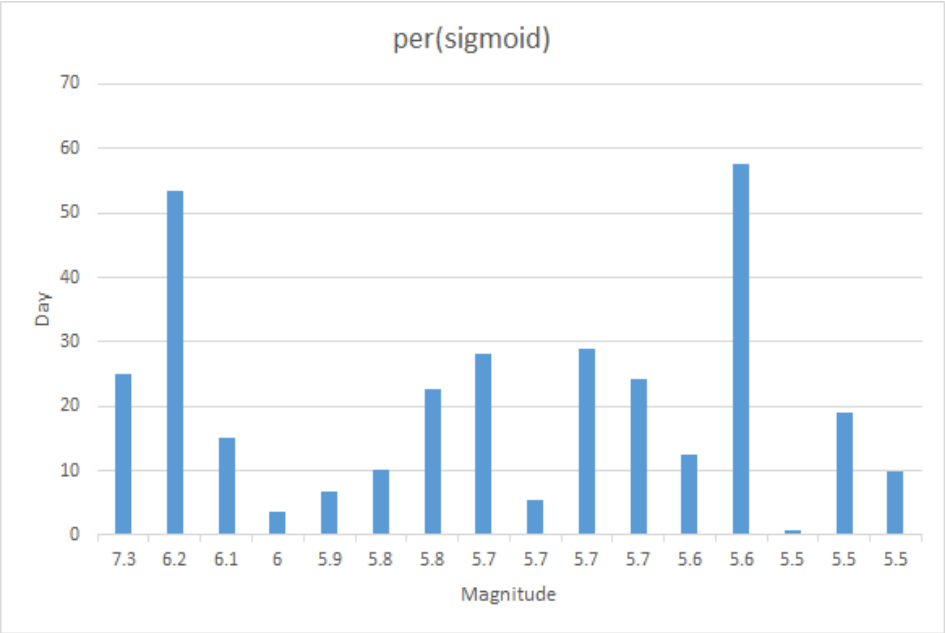


شکل۶. ناحیه مربوط به زمین‌لرزه مورموری در استان ایلام در دوره‌ای که زمین‌لرزه بالای ۵ نداشته است.

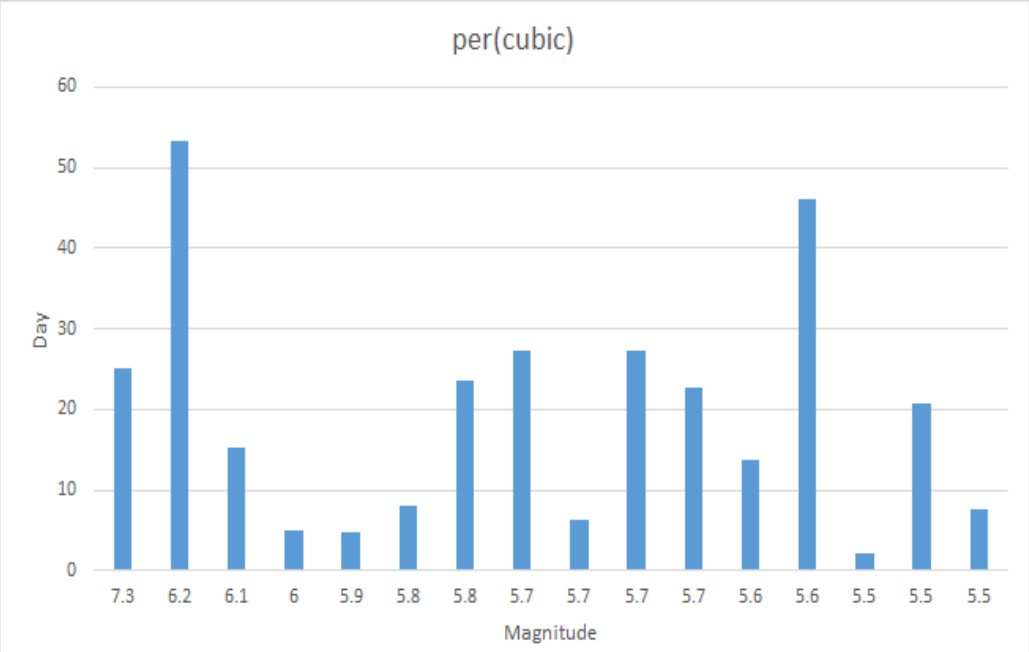


شکل ۷. ناحیه مربوط به زمین‌لرزه ترکمنچای در استان آذربایجان شرقی در دوره‌ای که زمین‌لرزه بالای ۵ در آن رخ نداده است.

همان‌طور که مشاهده می‌کنید در هر سه مورد مشخص است که در حالت غیر لرزه‌ای تعداد تجمعی ناهنجاری‌های مغناطیسی حالت خطی دارند که این تأیید می‌کند نتایج به‌دست‌آمده در مورد زمین‌لرزه‌ها اتفاقی نیست.
نتایج این تحقیق مطابق با نتایجی است که برای سایر پیش‌نشانگرهای مرتبط با سنگ‌کره است که در تحقیقات قبلی به آن رسیده‌اند مانند پیش‌نشانگر گاز رادون، تغییر سطح آب‌های زیرزمینی، تغییر دمای سطح، تغییر در میدان گرانشی و... که در همگی آن‌ها وقوع علائم پیش‌نشانگری در ۹۰درصد موارد بین چند ساعت تا یک ماه قبل از وقوع زمین‌لرزه بوده است در اینجا نیز همین اتفاق رخ می‌دهد و همان‌طور که در شکل‌های ۸ و ۹ می‌بینیم در هر دو مورد تابع سیگموئید و مکعبی بیشتر پیش‌بینی‌ها در فاصله چند ساعت تا یک ماه قبل از زمین‌لرزه اتفاق افتاده است.



شکل ۸. پیش‌بینی تابع سیگموئید



شکل۹. پیش‌بینی تابع مکعبی

منابع

[1] A. A. Tronin, “Remote sensing and earthquakes: A review,” Phys. Chem. Earth, parts A/B/C, vol. 31, no. 4–9, pp. 138–142, 2006.
[2] M. Hayakawa, Earthquake prediction with radio techniques. John Wiley & Sons, 2015.
[3] S. Pulinets and D. Ouzounov, The possibility of earthquake forecasting. IOP publishing, 2018.
[4] M. Parrot, “DEMETER satellite and detection of earthquake signals,” in Natural Hazards, CRC Press, 2018, pp. 115–138.
[5] D. Ouzounov, S. Pulinets, K. Hattori, and P. Taylor, Pre-earthquake processes: A multidisciplinary approach to earthquake prediction studies, vol. 234. John Wiley & Sons, 2018.
[6] T. Tanimoto, “Interaction of solid Earth, atmosphere, and ionosphere,” Treatise Geophys., vol. 4, pp. 421–444, 2007.
[7] R. J. Geller, “Earthquake prediction: a critical review,” Geophys. J. Int., vol. 131, no. 3, pp. 425–450, 1997.
[8] S. Hough, The Great Quake Debate: The Crusader, the Skeptic, and the Rise of Modern Seismology. University of Washington Press, 2020.
[9] E. Friis-Christensen, H. Lühr, and G. Hulot, “Swarm: A constellation to study the Earth’s magnetic field,” Earth, planets Sp., vol. 58, no. 4, pp. 351–358, 2006.
[10] I. P. Dobrovolsky, S. I. Zubkov, and V. I. Miachkin, “Estimation of the size of earthquake preparation zones,” Pure Appl. Geophys., vol. 117, no. 5, pp. 1025–1044, 1979.
[11] A. De Santis, G. Balasis, F. J. Pavòn-Carrasco, G. Cianchini, and M. Mandea, “Potential earthquake precursory pattern from space: The 2015 Nepal event as seen by magnetic Swarm satellites,” Earth Planet. Sci. Lett., vol. 461, pp. 119–126, 2017.
[12] K. J. Pinheiro, A. Jackson, and C. C. Finlay, “Measurements and uncertainties of the occurrence time of the 1969, 1978, 1991, and 1999 geomagnetic jerks,” Geochemistry, Geophys. Geosystems, vol. 12, no. 10, 2011.