



Estimation of mechanism of earthquakes in active seismic areas around Tehran, Mashhad and Tabriz cities

Fatemeh Naghdi Dodaran^a, Majid Nemati^{*b}

^a MsC Student in Environment, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

^b Professor in Geophysics, Shahid Bahonar University of Kerman Kerman, Iran

Received: 4 June 2022

Revised: 7 July 2022

Accepted: 12 July 2022

Abstract

In this study the data required to solve the mechanism of earthquakes were collected from a combination of waveform data from the Institute of Geophysics, the University of Tehran and the International Institute of Seismology and Earthquake Engineering. The first P-wave polarization method for the broadband, seismic stations were used to solve the earthquake mechanism. The location error of these earthquakes was about 5 km and the maximum rotation of the nodal plains in the mechanisms was considered 5 degrees. These mechanisms have been processed with the least error in the number of wrong polarizations for seismic mechanisms around the most populous cities of Tehran, Mashhad, and Tabriz. Based on the solution of seismic mechanism in this study, Mosha, north Tehran, Ipack, Garmsar and Ivanki faults, are considered to have the dominant mechanism of strike-slip right lateral with the small normal component, reverse, strike-slip left lateral, strike-slip with small reverse component and inverted mechanism, respectively. This research showed that the faults around Mashhad city like Bahler and Ashkabad left lateral strike slip with a small reverse component and reverse, respectively. The dominant mechanism of the 2017 Fariman aftershocks, is also inverse with the strike-slip right lateral component. Also, the resolved mechanisms of earthquakes around the historical city of Tabriz show that earthquakes with a dominant mechanism of strike-slip right lateral with a small reverse component are related to the North Tabriz fault. Other earthquakes, which are the aftershocks of the 2012 Ahar-Varzeqan doublet earthquakes, also have a strike-slip right lateral with a small reverse component. The 2012 Ahar-Varzeqan earthquakes also have a pure right lateral mechanism. The mechanism of some of these faults, which were studied in previous works (geologically or seismologically), are consistent with the mechanism solved in this study.

Keywords: Earthquake mechanisms, Faults of Iran, Initial polarizations of P waves, Metropolises of Iran, Ahar-Varzeqan earthquake, Tehran earthquake

*. Corresponding author: Majid Nemati Email:nematimajid_1974@uk.ac.ir Tel:+989125243641

How to cite this Article: Naghdi Dodaran, F., & Nemati, M. (2024). Estimation of mechanism of earthquakes in active seismic areas around Tehran, Mashhad and Tabriz cities. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(2), 116-140.



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)



دسترسی آزاد


نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی


DOI: 10.22067/geoh.2022.77045.1241



مقاله پژوهشی

برآورد سازوکار زمین‌لرزه‌ها در گستره لرزه‌ای پیرامون کلان‌شهرهای تهران، مشهد و تبریز

فاطمه نقدی دودران^۱ - دانشجوی زیست‌محیطی دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران 

مجید نعمتی^۱ - استاد ژئوفیزیک دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران 

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۴/۲۴ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۵/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۵/۲۷

چکیده

در این پژوهش داده‌های موردنیاز برای حل سازوکار زمین‌لرزه‌ها از هم‌آمیخت داده‌های شکل موج موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله گردآوری شده‌اند. پس از ویرایش داده‌ها و پیش از داده‌پردازی از روش قطبش‌های نخستین موج P رسیده به ایستگاه‌های لرزه‌نگاری باند پهن، بلنددوره و هم‌چنین کوتاه‌دوره برای حل سازوکار زمین‌لرزه‌ها بهره گرفته شد. خطای کانون‌یابی این زمین‌لرزه‌ها نزدیک به ۵ کیلومتر بوده و بیشینه چرخش صفحه‌های گرهی در سازوکارها ۵ درجه در نظر گرفته شد. این سازوکارها با کم‌ترین خطا در شمار قطبش‌ها برای سازوکارهای زمین‌لرزه‌های پیرامون شهرهای پرجمعیت و مهم تهران، مشهد و تبریز پردازش شده‌اند. بر پایه حل سازوکار زمین‌لرزه‌ها در این پژوهش، گسل‌های مشاء، شمال تهران، اپیک، پیشوا و ایوانکی، به ترتیب دارای سازوکار چیره راستالغز چپ‌بر با مؤلفه کوچک نرمال، معکوس، راستالغز چپ‌بر، راستالغز راست‌بر با مؤلفه کوچک معکوس و سازوکار چیره معکوس می‌باشند. این پژوهش نشان داد که گسل‌های پیرامون مشهد مانند باهله و اشک‌آباد، به ترتیب دارای سازوکار چیره راستالغز چپ‌بر با مؤلفه کوچک معکوس و معکوس می‌باشند. سازوکار چیره پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه ۲۰۱۷ فریمان که به گمان در راستا و دنباله گسل فریمان روی داده‌اند، نیز معکوس با مؤلفه راستالغز راست‌بر می‌باشند. هم‌چنین، سازوکارهای حل‌شده زمین‌لرزه‌های پیرامون شهر تاریخی تبریز نشان می‌دهد که زمین‌لرزه‌هایی با سازوکار چیره راستالغز راست‌بر و معکوس به گسل شمال تبریز وابسته هستند. دیگر زمین‌لرزه‌ها که پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه‌های دوگانه ۲۰۱۲ اهر- ورزقان می‌باشند، نیز دارای راستالغز راست‌بر و مؤلفه معکوس هستند. زمین‌لرزه‌های ۲۰۱۲ اهر- ورزقان نیز دارای سازوکار راستالغز راست‌بر خالص هستند.

سازوکار برخی از این گسل‌ها که در کارهای (زمین‌شناسی یا لرزه‌شناسی) پیشین بررسی شده بودند، با سازوکار حل شده این پژوهش هم‌خوانی دارند.

کلیدواژه‌ها: سازوکار زمین‌لرزه‌ها، گسل‌های ایران، قطبش‌های نخستین امواج P، کلان‌شهرهای ایران، زمین‌لرزه اهر-ورزقان، زمین لرزه تهران

مقدمه

کشور ایران یکی از لرزه‌خیزترین کشورهای جهان و بخشی از بزرگ‌ترین گستره دگرریختی هم‌گرا در زمین (کمر بند کوه‌زایی آلپ-همالیا) است (شکل ۱). پوسته ایران زمین در نتیجه واگرایی دریای سرخ و حرکت رو به شمال‌خاور ورقه عربستان و برخورد صفحات عربی و اوراسیا تحت فشارش قرار گرفته است. کوتاه‌شدگی و ستبرشدگی پوسته‌ای در این گستره برخوردی سبب تشکیل کمر بند کوه‌های قفقاز، زاگرس، البرز، کپه‌داغ، زون راستالغز همراه با خم‌های فشاری در خاور و فرورانش مکران در فلات ایران شده است. وجود این پهنه‌های فشارشی جنبا موجب می‌شود که زمین‌لرزه‌های کوچک و بزرگی همواره در این گستره‌ها روی دهند. هرچند که بیش‌تر انرژی جنبشی، به‌ویژه در زاگرس به‌گونه دگرشکلی‌های بی‌لرزه رخ می‌دهد و تنها نزدیک به ۱۰٪ از آزاد شدن تنش به‌صورت لرزه‌ای و همراه با زمین‌لرزه است (Jackson & Mckenzie, 1984)

از آنجایی که کانون بیش‌تر تمدن‌های ایرانی (و هم‌چنین جهانی) روی گسل‌ها واقع شده‌اند، زمین‌لرزه‌های ایران در گذشته و حال یکی از منابع خطر برای زیستگاه‌های انسان در بیش‌تر نقاط این سرزمین بوده‌اند. تمرکز روکانون زمین‌لرزه‌ها بیش‌تر در راستای زون زاگرس در جنوب و جنوب‌باختر، راستای کپه‌داغ-قفقاز در شمال-شمال‌خاور، راستای رشته‌کوه‌های البرز، شمال‌لوت و هم‌چنین در خاور ایران قابل‌بررسی است. هم‌خوانی روکانون زمین‌لرزه‌های ایران با روندهای مهم موجود میان پستی‌ها و بلندی‌ها بسیار جالب‌توجه است. توجه به داده‌های نگاشته شده در سال‌های پس از ۱۹۶۰ میلادی نشان می‌دهد که زمین‌لرزه‌های زاگرس با بزرگای کم‌تر و فراوانی بیش‌تر نسبت به زمین‌لرزه‌های البرز و ایران مرکزی رخ داده‌اند (شکل ۱؛ Nemati, 2015).

شهرهای مشهد، تهران و تبریز در شمال ایران از پرجمعیت‌ترین شهرهای شمال ایران هستند. در گستره شمالی ایران در پیرامون شهرهای بررسی شده در این پژوهش (مشهد، تهران و تبریز)، چند کار لرزه‌شناسی انجام شده که به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. کار (Moradi, Hatzfeld, & Tatar, 2011) که یک بررسی خردلرزه‌خیزی با شبکه لرزه‌نگاری محلی بود، نشان داد که تقریباً سازوکار چیره همه خردلرزه‌های وابسته به گسل شمال تبریز پیش از سال ۲۰۱۰ راستالغز راست‌بر است. این پژوهش شیب گسل را نیز نزدیک به قائم برآورد نموده و هم‌چنین این گسل را یک گسل با عملکرد ساده معرفی

نمود. (Ashtari, Hatzfeld, & Kamalian, 2005) به کمک یک شبکه لرزه‌نگاری محلی روی سازوکار زمین‌لرزه‌های جنوب البرز و گستره تهران کار کرده‌اند. در این بررسی‌ها سازوکار گسل مشاء راستالغز چپ‌بر به دست آمده است. در کپه‌داغ کارهای لرزه‌ای چندانی انجام نشده است. در یک مدل‌سازی، (Hollingsworth, Jackson, Alarcon, Boomer, & Bolourchi, 2007) سازوکار زمین‌لرزه سال ۱۹۹۷ گرم‌خان بجنورد (۶/۴Mw) را راستالغز راست‌بر (در راستای سامانه گسلی قوچان) به دست آورده‌اند. (Zamani, Angelier, & Zamani, 2008) سازوکار گسل اشک‌آباد را معکوس و راست‌بر و سازوکار گسل نیشابور را راستالغز راست‌بر معرفی نموده‌اند. این کار که از تنها کارهای نزدیک به موضوع این پژوهش در کپه‌داغ است، در پیرامون مشهد سازوکار زمین‌لرزه‌ای را حل نکرده است. یکی از مسائلی که موردتوجه پژوهشگران قرار گرفته نقش گسترش کلان‌شهرهای ایران در تشدید لرزه‌خیزی آن‌ها و بروز بحران‌های محیطی حاصل از آن در این کلان‌شهرهاست (Hosseinzadeh, SR, 2004).

روکانون و سازوکار زمین‌لرزه‌های پیرامون شهرهای بزرگ در بررسی خطر لرزه‌ای در این شهرها بسیار مهم هستند. دانشگاه هاروارد آمریکا (GCMT; Global Moment Tensor Solution) و موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران از ارگان‌هایی هستند که به حل سازوکار زمین‌لرزه‌ها در ایران می‌پردازند. همه زمین‌لرزه‌های با بزرگای ۴ تا ۵ از دسته زمین‌لرزه‌هایی هستند که سازوکار آن‌ها توسط ارگان‌های وابسته حل نمی‌شود، هم‌چنین موسسه ژئوفیزیک نیز از سال ۲۰۱۲ کاتالوگ خود را آغاز نموده است. در این پژوهش سازوکار زمین‌لرزه‌های پیرامون شهرهای بزرگ با بزرگای ۴ تا ۶ حل شده و همراه با دیگر سازوکار زمین‌لرزه‌های پیشین روی نقشه‌ها آورده و تفسیر می‌شوند. این پژوهش با توجه به تأثیر کلیدی و مهمی که سازوکار زمین‌لرزه در بررسی‌های خطر زمین‌لرزه با روش‌های مختلف دارد، انجام شده است. کوشش بر این بوده که شهرهای گزینش شده برای بررسی سازوکارها، در ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی ایران پراکندگی یکسانی داشته باشند.

مواد و روش‌ها

گستره در دست بررسی در نوار شمالی کشور جای دارد. این گستره در استان‌های لرزه‌زمین‌ساختی کپه‌داغ، البرز و آذربایجان جای دارد. در این پژوهش، سازوکار زمین‌لرزه‌هایی با بزرگای میانه (moderate) پیرامون شهرهای تهران، مشهد و تبریز حل شده و بررسی خواهند شد.

روش‌های مطالعه

در این پژوهش در نقشه‌ها، گسل‌های اصلی از کار (Hessami, Jamali, & Tabassi, 2003) و گسل‌های فرعی از نقشه‌های سازمان زمین‌شناسی برگرفته شده‌اند. برای حل سازوکار قابل‌قبول یک زمین‌لرزه با خطای کم، پراکندگی مناسب ایستگاه‌های شبکه‌های لرزه‌نگاری در پیرامون روکانون

زمین‌لرزه لازم است. به کمک داده‌های قطبش این ایستگاه‌ها، سازوکار زمین‌لرزه‌های گزینش شده در فصل داده‌ها پردازش خواهند شد. پراکندگی ایستگاه‌ها در پیرامون شهرهای تبریز، تهران و مشهد قابل قبول است. زمین‌لرزه‌های تاریخی و پیش‌دستگاهی در پیرامون همه شهرهای بررسی شده، به‌ویژه شهرهای تبریز و تهران وجود دارند. زمین‌لرزه‌های برداشت شده توسط شبکه لرزه‌نگاری موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران همان‌گونه که از لرزه‌زمین‌ساخت گستره البرز میانی انتظار می‌رود، در پیرامون شهر تهران فشردگی بیش‌تری دارند.

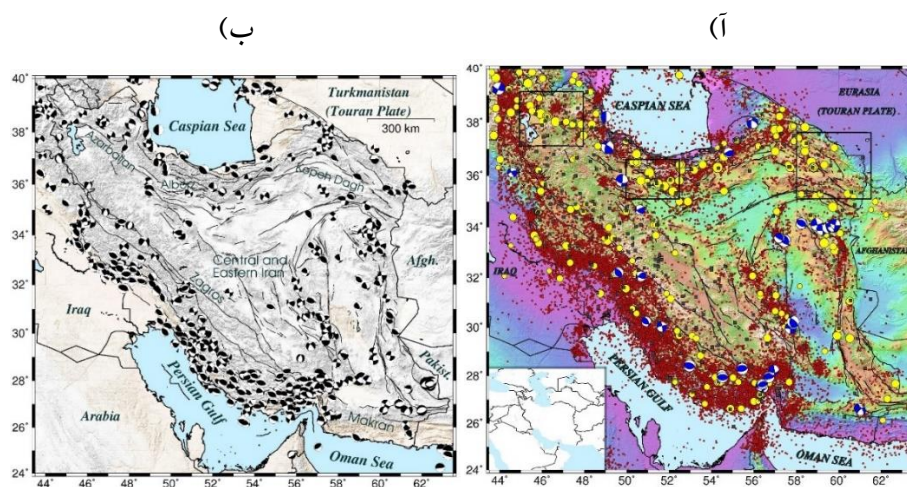
هم‌خوانی پراکندگی زمین‌لرزه‌های تاریخی و پیش‌دستگاهی و شهرها یک امر طبیعی است، چون داده‌های تاریخی برای بررسی این زمین‌لرزه‌ها به‌کاربرده می‌شوند. این داده‌ها نیز در مستندات تاریخی آمده که از شهرهای قدیمی و باستانی گردآوری شده است. شکل ۱ آ و ب به ترتیب، زمین‌لرزه‌های بزرگ (>۵/۵) تاریخی (Ambraseys & Melville, 1982) و شهرهای ایران و سازوکار زمین‌لرزه‌های بزرگ (>۵/۵) ایران را از (Jackson, Haines, & Holt, 1995) و (GCMT) نمایش می‌دهند. به پراکندگی کم زمین‌لرزه‌های تاریخی و پیش‌دستگاهی در مرکز و جنوب خاوری ایران توجه کنید.

داده‌های شکل موج موردنیاز برای حل سازوکار زمین‌لرزه‌های بزرگ از تارنمای موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله گردآوری شده‌اند. از میان این داده‌ها، تنها داده برخی زمین‌لرزه‌ها از دیدگاه کمی و کیفی برای حل سازوکار مناسب خواهند بود. ستون‌های ۸ تا ۱۱ در جدول‌های ۱ تا ۳ به ترتیب، خطای زمانی، شمار ایستگاه‌های برداشت‌کننده، شمار فازهای خوانده شده و نبود آزمون‌های زمین‌لرزه هستند. نبود آزمون‌های زمین‌لرزه‌ها را از زمین‌لرزه بیان می‌کند. هرچه نبود آزمون‌های زمین‌لرزه کم‌تر باشد ایستگاه‌ها زمین‌لرزه را بهتر پوشش داده‌اند.

داده‌ها بایستی پیش از داده‌پردازی ویرایش شوند. نخستین کار پس از برداشت و ذخیره‌سازی این داده‌ها، دسته‌بندی آن‌ها است. در این کار، این داده‌ها هرکدام برای یک زمین‌لرزه خاص هستند. از آنجایی که بیش‌تر داده‌پردازی به کمک نرم‌افزار ساین (Seisan) انجام می‌شود، این داده‌ها بایستی برای این نرم‌افزار ویرایش و آماده شوند. برای انجام پردازش‌های معمول زمین‌لرزه‌شناسی مانند کانون‌یابی زمین‌لرزه‌ها، برآورد بزرگا و سازوکار زمین‌لرزه‌ها نیاز به داده‌های زیر است: موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های لرزه‌نگاری و مدل سرعتی موج در زمین، شکل موج زمین‌لرزه‌ها و منحنی پاسخ لرزه‌نگارها.

روش به دست آوردن سازوکار زمین‌لرزه‌ها با به‌کارگیری قطبش‌های نخستین موج P رسیده به ایستگاه‌های لرزه‌نگاری بانده پهن، بلنددوره (پژوهشگاه زلزله‌شناسی) و هم‌چنین کوتاه دوره (موسسه ژئوفیزیک) روش بسیار مطمئن و جا افتاده‌ای است. این روش براین پایه استوار است که یک زمین‌لرزه

زمین‌ساختی کره زمین را به ۴ بخش دوبه‌دو متقابل تقسیم می‌کند که قطبش موج P در ایستگاه‌های آن گستره‌ها متفاوت هستند. صفحه گسلی و صفحه عمود بر آن، این قطبش‌ها را از یکدیگر جدا می‌کنند. اگر خطای روکانونی زمین‌لرزه از فاصله میان ایستگاه‌های به‌کار برده شده برای به‌دست آوردن سازوکار آن کم‌تر باشد، خطای کانونیابی تأثیر زیادی روی سازوکار نمی‌گذارد. تأثیر خطای کانونیابی به‌ویژه خطای ژرفی زمین‌لرزه روی سازوکار آن برای زمین‌لرزه‌های محلی با فاصله روکانونی کم‌تر از ۱۵۰ کیلومتر بسیار بیش‌تر از زمین‌لرزه‌های ناحیه‌ای و دورلرز است (Stien & Wyssession, 2003)؛ زیرا زمین‌لرزه‌های محلی (هم‌چنین خردلرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها) بیش‌تر با شبکه‌های محلی با فاصله میان ایستگاهی کم برداشت می‌شوند. جای ایستگاه روی دایره سازوکار کانونی بستگی به زاویه گسیل موج داشته که آن‌هم به ژرفای زمین‌لرزه بستگی دارد. از آنجایی که زاویه گسیل موج زمین‌لرزه‌های محلی بزرگ‌تر از زمین‌لرزه‌های ناحیه‌ای و دورلرز می‌باشد (Lay & Wallace, 1995)، بنابراین خطای ژرفی در زمین‌لرزه‌های ناحیه‌ای و دورلرز تأثیر کم‌تری روی زاویه گسیل موج و در پی آن سازوکار زمین‌لرزه می‌گذارد تا زمین‌لرزه‌های محلی. پژوهش‌گران زیادی با این روش سازوکار زمین‌لرزه‌ها را در یک گستره وسیعی از بزرگا به‌دست آورده‌اند (Mckenzie, 1972; Jackson & Mckenzie, 1984; Akashe & Berckhmer, 1984; Priestley, Baker, & Jackson, 1994; Ni & Barazangi, 1986). برون‌داد این پژوهش برای این زمین‌لرزه‌ها هم‌آمیخت و در پی آن پردازش موج‌های پیکری برداشت شده با ایستگاه‌های شبکه‌های لرزه‌نگاری موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی بوده است. بیشینه خطای کانونیابی این زمین‌لرزه‌ها ۵ کیلومتر بوده و بیشینه چرخش صفحه‌های گرهی در سازوکارها ۵ درجه می‌باشد. این سازوکارها با کم‌ترین خطا در پلاریته‌ها پردازش شده‌اند (پیوست ۱، ۲ و ۳ به ترتیب برای سازوکارهای شهرهای تهران، مشهد و تبریز). روش به‌دست آوردن سازوکار زمین‌لرزه‌ها به‌کارگیری قطبش‌های نخستین موج P رسیده به ایستگاه‌ها است. برای ایستگاه‌های نزدیک‌تر از ۱۵۰ کیلومتر فاز P_g و برای ایستگاه‌های دورتر فاز P_n خوانده شده‌اند.



شکل ۱ (ا) زمین‌لرزه‌های بزرگ ($M > 5.5$) تاریخی (آمبراسیس و ملویل، ۱۹۸۲) (نشان‌گرهای زرد)، شهرهای ایران (چهارگوش‌های خاکستری)، زمین‌لرزه‌های نهاد ISC (نشان‌گرهای قرمز) و سازوکار زمین‌لرزه‌ها از جکسون و همکاران (۱۹۹۵) (نشان‌گرهای آبی). (ب) سازوکار زمین‌لرزه‌های بزرگ ($M > 5.5$) ایران (۲۰۲۲، GCMT).

Fig.1. a) Historical large earthquakes ($M > 5.5$) (Ambraseys and Melville, 1982) (yellow markers), cities of Iran (gray squares), earthquakes recorded by ISC (red markers), and earthquake mechanisms from Jackson et al. (1995) (blue markers). b) Mechanisms of large earthquakes ($M > 5.5$) in Iran (2022 GCMT)

گسل‌های پیرامون شهر تهران

در این بخش سازوکار گسل‌های مشاء، شمال تهران، گرمسار، کهریزک و ایپک بررسی خواهند شد. (Solaymani, Ritz, & Abbassi, 2011) گسل مشاء را در کواترنری آغازین به گونه گسلی راستالغز و چپ‌بر با سامانه نرمال پنداشته‌اند. به گفته برخی دیگر از پژوهش‌گران نیز گسل مشاء یک گسل راستالغز چپ‌بر جنبا است. زمین‌لرزه‌هایی چون زمین‌لرزه سال ۱۶۶۵ با بزرگای ۶/۵، زمین‌لرزه سال ۱۸۳۰ با بزرگای ۷/۱، زمین‌لرزه سال ۱۹۳۰ با بزرگای ۵/۲، زمین‌لرزه سال ۱۹۵۵ با بزرگای ۴/۰ و زمین‌لرزه سال ۱۹۷۴ با بزرگای ۴/۳ وابسته به شاخه خاوری گسل مشاء (نزدیک به گستره در دست بررسی) بوده و همگی جنبش‌های دوباره گسل مشاء هستند (Berberian & Yeats, 1999). گسل گرمسار که در کار (Tchalenko, 1974) با سازوکار معکوس برداشت شده بود، دارای راستای خاور، شمال خاوری- باختر، جنوب باختری بوده و دارای شیب رو به شمال است که اگرچه پیشینه لرزه‌خیزی بارزی در گستره گسلی گرمسار وجود ندارد، این گسل دارای بیش‌ترین توان جنبش در گسل‌های مرز جنوبی البرز خاوری است. (Nemati, 2011). گسل شمال تهران نیز معکوس بوده و

شیب رو به شمال دارد (Berberian & Yeats, 1999). گسل ایپک با راستای تقریباً خاوری - باختری (شکل ۳) و درازای بیش از ۱۰۰ کیلومتر، از فاصله تقریبی ۱۰ کیلومتری جنوب بوئین‌زهره می‌گذرد. گسل جنبای ایپک زمین‌لرزه اول سپتامبر ۱۹۶۲ میلادی زمین‌لرزه‌ای با بزرگای ۷/۱ را موجب شد، که زمین‌لرزه بوئین‌زهره به همراه ۱ متر جابه‌جایی افقی نام‌گذاری شد (Ambraseys & Melville, 1982). گسل کهریزک به شکل دیواره بلندی (۱ تا ۱۰ متر) با راستای خاوری - باختری و درازای بیش از ۴۰ کیلومتری در ۱۰ کیلومتری جنوب شهر ری دیده می‌شود. راستای آن خاوری - باختری (۸۰-۷۰ N) و شیب آن به سمت شمال ارزیابی شده است (De Martini, et al., 1998). آرایش هندسی گسله در روی زمین، سازوکار راندگی با شیب به سوی شمال را برای این گسله پیشنهاد می‌کند (شکل ۲).

گسل‌های پیرامون شهر مشهد

مجموعه چین‌خورده کپه‌داغ با گسل‌های بی‌شماری بریده شده که می‌توان آن‌ها را در دو گروه دسته‌بندی کرد. گروه نخست گسل‌های پی‌سنگی هستند. این گروه در بخش باختری کپه‌داغ گسترش دارند و شامل شش گسل با روند کلی خاوری - باختری می‌باشند. این گسل‌ها با تغییر سازوکار به‌گونه معکوس، سبب چین‌خوردگی و گسلش راندگی با شیب به سوی شمال شده‌اند. گروه دوم، گسل‌های راستالغز و جنبای بوده که نقش مهمی در جنبش زمین‌ساختی جوان گستره دارا هستند. گسل اشک‌آباد یک گسل معکوس پرشیب یا راندگی با شیب به سمت جنوب است که ۷ تا ۱۰ کیلومتر جابه‌جایی معکوس دارد. سازوکارهای کانونی موجود از کپه‌داغ نیز نشان‌دهنده یک گسل معکوس پرشیب با بردار لغزش شمال - شمال خاور هستند (Tchalenko, 1975). گسل‌های راستالغز نیز با عنوان «سامانه گسله مورب شناخته می‌شوند که شامل گسل‌های راست‌بر با راستای NNW-SSE و چپ‌بر با راستای NE-SW می‌باشند (شکل ۳).

گسل باغان در ایران درازایی نزدیک به ۷۵ کیلومتر داشته و باعث جابه‌جایی ۸ کیلومتری چین‌ها شده است. این گسل از دیدگاه لرزه‌ای نیز جنبای است به‌گونه‌ای که در زمین‌لرزه ۱ می ۱۹۲۹ قوچان، همه درازای آن دچار گسیختگی گردید (Ambraseys & Melville, 1982). سامانه گسلی قوچان در گستره‌ای به پهنای ۵۰ کیلومتر با روند NNW-SSE در شمال باختر قوچان تا شمال شیروان جای گرفته است. درازای این پهنه در ایران حدود ۱۰۰ کیلومتر است. این پهنه، متشکل از حدود ۱۰ گسل راستالغز راست‌بر است که در راستای شمال - شمال باختر و به موازات یکدیگر قرار گرفته و باعث جابه‌جایی محور چین‌ها گردیده‌اند (Tchalenko, 1975). گسل وارون کشف‌رود بخشی از ساختار مهم

کپه‌داغ است. شیب گسل کشف‌رود به سوی شمال خاور و راستای آن شمال باختر- جنوب خاور بوده و به موازات رشته‌کوه کپه‌داغ خاوری است (شکل ۳).

گسل‌های پیرامون شهر تبریز

گسل شمال تبریز و گسل زمین‌لرزه‌ای اهر- ورزقان گسل‌های مهم این گستره هستند که زمین‌لرزه‌های بررسی شده به آن‌ها وابسته هستند. بررسی دقیق محل کانونی زمین‌لرزه‌ها در برش‌های گوناگون لرزه‌ای گسل شمال تبریز نشان‌دهنده شیب تند به سوی شمال خاوری در بخش‌های باختری و میانی و شیب تند به سوی جنوب باختری در بخش‌های خاوری این گسل می‌باشد. تمامی سازوکارهای محاسبه شده زمین‌لرزه‌ها در راستای این گسل، بیان‌گر جنبش چیره راست‌الغز راست‌بر در این گسل هستند (Moradi et al., 2011) گسل شمال تبریز اگرچه میزبان زمین‌لرزه بزرگ دستگاهی نیست، شاهد رخداد زمین‌لرزه‌های بزرگ تاریخی در راستای خود بوده است (شکل ۴). هم‌چنین این گسل میزبان مهاجرت خاور به باختر سه زمین‌لرزه تاریخی در راستای خود بوده است (Berberian & Yeats, 1999). گسله بزقوش که در پاره‌ای از نوشتارها از آن با نام گسله میانه یاد می‌شود، از جنوب خاوری میانه در جنوب، تا خاور لاهرود در شمال، نزدیک به ۱۴۵ کیلومتر درازا دارد. راستای جنوبی این گسل شمالی-جنوبی بوده و شیب کلی آن به سوی خاور است. گسل خاوری- باختری در بخش شمالی کوه های بزقوش دارای شیب به سوی شمال و گسل جنوبی دارای شیب به سوی شمال بوده است.

گسیختگی وابسته به زمین‌لرزه سال ۲۰۱۲ ($M_w 6.0-6.1$) در کار میدانی در یک زون خاوری- باختری برداشت شده است. در این بررسی درازای گسیختگی و گسلش این زمین‌لرزه نزدیک به ۱۳ کیلومتر اعلام شد. گسلش سطحی زمین‌لرزه اهر - ورزقان با کمینه ۶۵ سانتی‌متر جابه‌جایی راست‌الغز راست‌بر و ۲۵ سانتی‌متر جابه‌جایی شاقولی، در جاده ورزقان گزارش شده است. بیش‌تر پس‌لرزه‌های این زمین‌لرزه دارای سازوکار راست‌الغز راست‌بر با مؤلفه معکوس بودند (Copley, et al., 2013; Nemati, 2013) (شکل ۴).

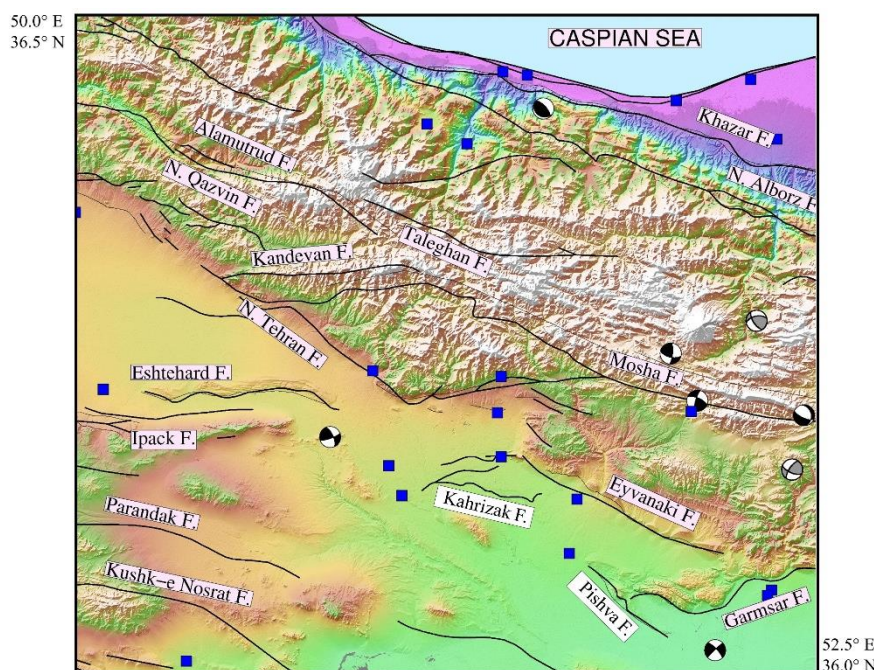
نتایج و بحث

سه کلان‌شهر تهران، مشهد و تبریز در این مقاله بررسی شده است. یکی از مهم‌ترین دلایل گزینش این سه شهر برای بررسی لرزه‌ای، جمعیت آن است که اهمیت آن‌ها را می‌رساند. علت بررسی این شهرها به‌گونه جدا، استان‌های لرزه‌زمین‌ساختی است که این شهرها در آن جای دارند. این سه شهر، به ترتیب در سه استان لرزه‌زمین‌ساختی البرز، کپه‌داغ و آذربایجان (بنابر مشاوره‌ای که نویسنده با دکتر بربریان داشته است، می‌توان استان لرزه‌زمین‌ساختی آذربایجان را یک استان جدا در نظر گرفت) جای

دارند. این سه استان، دارای ویژگی‌های لرزه‌ای و زمین‌شناسی متفاوت هستند (Berberian, 1976)، بنابراین، بایستی جدا بررسی شوند.

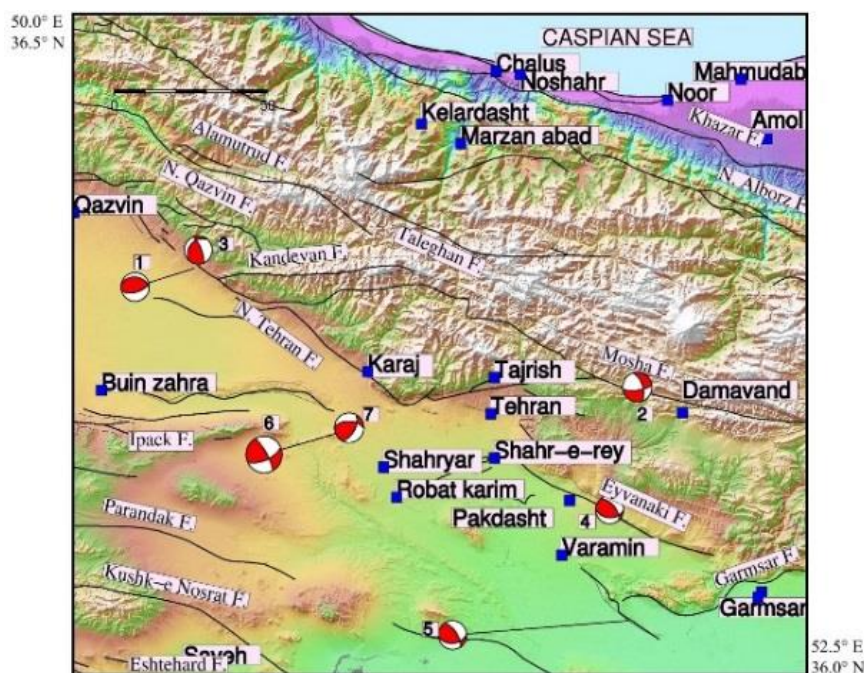
زمین‌لرزه‌های پیرامون شهر تهران

بررسی زمین‌لرزه‌های پیرامون شهر تهران به‌عنوان پایتخت کشور از اهمیت زیادی برخوردار است. شکل ۳ نقشه گسل‌ها و سازوکار زمین‌لرزه‌های موسسه ژئوفیزیک و GCMT (به ترتیب، نشان‌گرهای خاکستری و تیره) را در پیرامون این شهر نمایش می‌دهد. شهرهای کرج، قزوین، سمنان، گرمسار، ساوه، بوئین‌زهرا و شهرهای شمالی آمل، چالوس و نوشهر از شهرهای بزرگ و کوچک و دور و نزدیک به پایتخت ۱۵ میلیونی ایران هستند. اگرچه لرزه‌خیزی تاریخی و پیش‌دستگاهی پیرامون شهر تهران بسیار روی داده است، در تهران و پیرامون تقریباً نبود لرزه‌خیزی بزرگ دستگاهی احساس می‌شود. لرزه‌خیزی تاریخی و پیش‌دستگاهی پیرامون شهر تهران به سامانه‌های گسلی مشاء، شمال تهران، ایوانکی، فیروزکوه و گرمسار وابسته است (شکل ۲ و ۳). زمین‌لرزه‌ها در شکل ۲ و ۳ بیش‌تر به گسل‌های مشاء، گرمسار و خزر وابسته هستند.



شکل ۲ نقشه گسل‌های اصلی و فرعی همراه با نام آن‌ها، سازوکار زمین‌لرزه‌های ($M > 5.5$) موسسه ژئوفیزیک (نشان‌گرهای خاکستری) و سازوکار زمین‌لرزه‌های ($M > 5.5$) از GCMT (نشان‌گرهای مشکی) در پیرامون کلان‌شهر تهران.

Fig.2. Map of the main and secondary faults along with their names, earthquake mechanisms ($M > 5.5$) from the Institute of Geophysics (gray markers) and earthquake mechanisms ($M > 5.5$) from GCMT (black markers) in the metropolis of Tehran.



شکل ۳ سازوکارهای حل شده زمین‌لرزه‌های $M < 4.0$ در این پژوهش (نشان‌گرهای قرمز) در پیرامون شهر تهران.

Fig.3. Resolved earthquake mechanisms ($M < 4.0$) in this study (red markers) in the metropolis of Tehran.

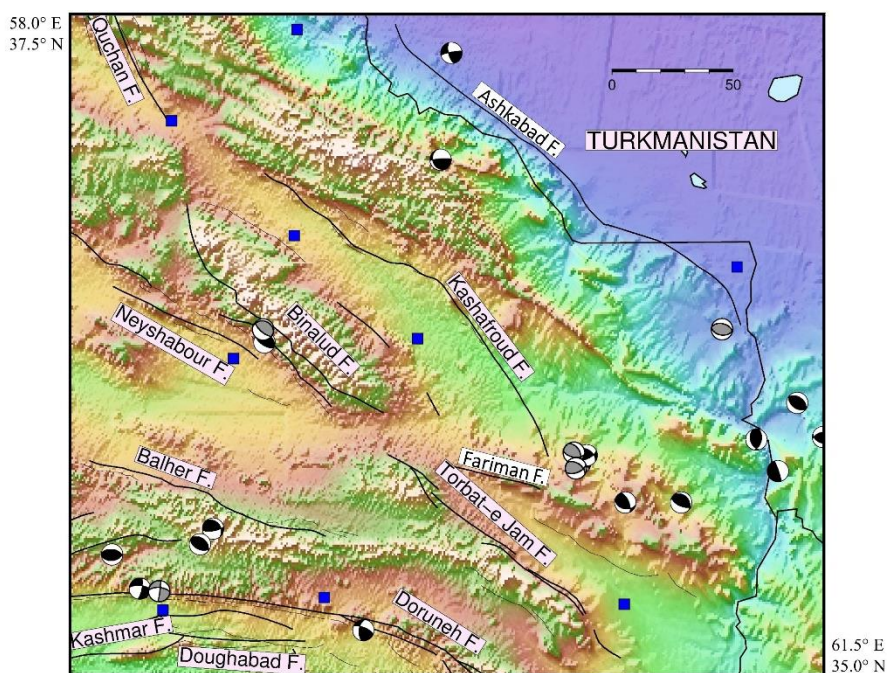
جدول ۱ ویژگی‌های سازوکار کانونی حل شده از زمین‌لرزه‌های پیرامون شهر تهران را نشان می‌دهد. در تشخیص وابستگی یک زمین‌لرزه به یک گسل، نزدیکی آن زمین‌لرزه به گسل و شیب عمومی گسل در آن گستره در نظر گرفته می‌شود. سازوکارهای حل شده زمین‌لرزه‌های ($M < 4.0$) در این پژوهش نشان می‌دهد که زمین‌لرزه‌های 1, 3 به گسل شمال تهران وابسته هستند. زمین‌لرزه 2 به گسل مشاء، زمین‌لرزه 4 به گسل ایوانکی، زمین‌لرزه 5 به گسل پیشوا و زمین‌لرزه‌های 6, 7 به گسل ایپک وابسته هستند. بر پایه حل سازوکار زمین‌لرزه‌ها در این پژوهش، گسل‌های مشاء، شمال تهران، ایپک، پیشوا و ایوانکی، به ترتیب دارای سازوکار چیره راستالغز چپ‌بر با مؤلفه کوچک نرمال، معکوس، راستالغز چپ‌گرد، راستالغز راست‌بر با مؤلفه کوچک معکوس و سازوکار چیره معکوس می‌باشند.

جدول ۱. ویژگی‌های سازوکارهای حل شده از زمین‌لرزه‌های پیرامون کلان‌شهر تهران.

NO.	Date	Time	Long.	Lat.	Mn	Lat.	Lon.	Rake	RMS.	N.S.	Q
1	2/22/2006	19:25.4	50.409	36.114	4.1	75.39	60.5	78.49	0.5	18	B
2	12/20/2006	39:21.1	51.926	35.79	4.2	341.89	59.4	19.96	0.3	12	A
3	7/29/2009	27:44.0	50.425	36.165	4	338.07	72.77	58.43	0.4	29	A
4	2/20/2011	22:16.5	51.831	35.454	4	93.34	42.35	52.86	0.5	30	A
5	8/13/2015	42:13.0	51.894	35.148	4.1	85.55	43.42	37.59	0.6	33	A
6	12/20/2017	57:37.3	50.95	35.675	5.2	66.42	65.04	13.12	0.3	95	A
7	12/26/2017	24:34.0	50.941	35.679	4.2	28.2	58.67	42.54	0.3	62	A

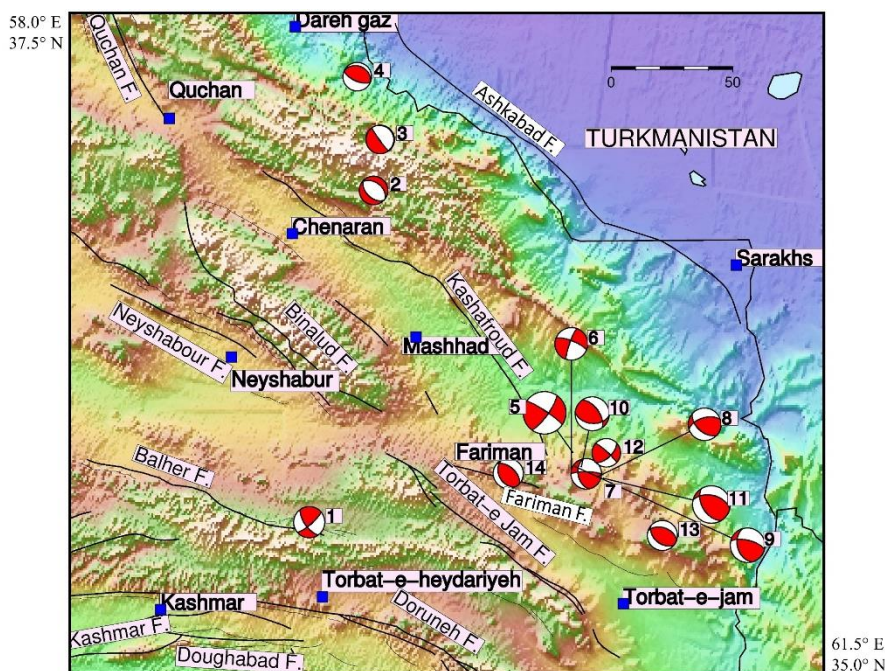
Table1- Characteristics of the resolved mechanisms from earthquakes in the metropolise of Tehran

شهرهای چناران، قوچان، دره‌گز، نیشابور، تربت‌جام، تربت حیدریه، فریمان و کاشمر از شهرهای بزرگ و کوچک و دور و نزدیک به این شهر پرجمعیت ایران هستند. لرزه‌خیزی تاریخی و پیش‌دستگاهی در نزدیکی مشهد (۱۶۷۳) و پیرامون در سامانه گسلی قوچان و گسل درونه دیده می‌شود. لرزه‌خیزی تاریخی و پیش‌دستگاهی پیرامون شهر مشهد از سال ۸۴۰ تا ۱۹۱۸ میلادی روی داده است (شکل ۴ و ۵).



شکل ۴ نقشه گسل‌های اصلی و فرعی همراه با نام آن‌ها، سازوکار زمین‌لرزه‌های ($>5/5$) موسسه ژئوفیزیک (نشان‌گرهای خاکستری) و سازوکار زمین‌لرزه‌های ($>5/5$) از GCMT (نشان‌گرهای مشکی) در پیرامون کلان‌شهر مشهد.

Fig.4. The map of the main and secondary faults along with their names, the mechanisms of earthquakes (magnitude > 5.5) from the Geophysical Institute (indicated by gray markers), and the mechanisms of earthquakes (magnitude > 5.5) from GCMT (indicated by black markers) around the metropolis of Mashhad.



شکل ۵ نقشه سازوکارهای حل شده زمین‌لرزه‌های ($>4/0$) در این پژوهش (نشان‌گرهای قرمز) در پیرامون کلان‌شهر مشهد.

Fig.5. The map of the resolved mechanisms of earthquakes (magnitude > 4.0) in this study (indicated by red markers) around the metropolise of Mashhad.

جدول ۲ ویژگی‌های رقومی سازوکارهای حل شده از زمین‌لرزه‌های پیرامون مشهد را نشان می‌دهد. شکل ۳ آ و ب نیز به ترتیب، نقشه گسل‌های اصلی و فرعی همراه با نام آن‌ها، نام شهرهای بزرگ و کوچک و سازوکارهای حل شده زمین‌لرزه‌های بزرگ از GCMT و $>4/0$ را در این پژوهش (نشان‌گرهای قرمز) در پیرامون شهر مشهد نمایش می‌دهد. سازوکارهای حل شده زمین‌لرزه‌های ($M_L > 4/0$) در این پژوهش نشان می‌دهد زمین‌لرزه 1 به گسل باهله و وابسته است. زمین‌لرزه‌های 2 به گسل کشف‌رود و 3، 4 به گسل اشک‌آباد، 5 همان زمین‌لرزه ۲۰۱۷/۰۴/۰۵ فریمان با بزرگای ۶/۰ بوده و زمین‌لرزه‌های 6 - 12 پس‌لرزه‌های این زمین‌لرزه هستند. زمین‌لرزه‌های ۱۳ و ۱۴ نیز به گسل فریمان و امتداد آن وابسته است. سازوکار نرمال زمین‌لرزه 2 نشان می‌دهد که به گسل اشک‌آباد وابسته نبوده و به گمان، به گسل کشف‌رود وابسته است.

بر پایه حل سازوکار زمین‌لرزه‌ها در این پژوهش، گسل‌های باهله و اشک‌آباد، به ترتیب دارای سازوکار چیره راست‌الغز چپ‌بر با مؤلفه کوچک معکوس و معکوس می‌باشند. سازوکار چیره پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه فریمان که به گمان در راستا و دنباله گسل فریمان روی داده‌اند، معکوس با مؤلفه راست‌الغز راست‌بر می‌باشند. سازوکار پس‌لرزه‌های 6، 12 از زمین‌لرزه فریمان با خود زمین‌لرزه

هم‌خوانی دارند. سازوکار زمین‌لرزه‌های 8, 9, 10, 11 معکوس بوده و با سازوکار گسل فریمان هم‌خوانی دارند.

جدول ۲. ویژگی‌های سازوکارهای حل شده از زمین‌لرزه‌های پیرامون کلان‌شهر مشهد.

NO.	Date	Time	Lat.	Long.	Mn	Str.	Dip	Rake	RMS.	N.S.	Q
1	12/19/2006	8:57	35.581	59.117	4.4	145.06	65.51	14.02	0.5	23	A
2	1/2/2010	22:13	36.836	59.415	4	134.46	48.13	-84.62	0.2	7	B
3	11/5/2010	23:00	37.027	59.446	4	346.15	5.38	-68.17	0.5	35	A
4	4/6/2014	12:38	37.262	59.339	4	113.68	64	90	0.2	30	A
5	4/5/2017	6:09	35.847	60.339	6	35.6	77.05	7.63	0.5	107	B
6	4/5/2017	6:19	35.758	60.333	4.6	199.28	81.11	-15.72	0.7	25	B
7	4/5/2017	6:24	35.765	60.402	4.3	270.43	78.56	44.87	0.6	26	A
8	4/5/2017	6:38	35.753	60.452	4.6	253.09	56.31	47.77	0.6	51	A
9	4/5/2017	7:47	35.793	60.351	4.9	283.68	66.54	54.71	0.4	67	A
10	4/5/2017	17:08	35.793	60.38	4.8	95.72	43.35	50.31	0.5	70	A
11	5/2/2017	21:12	35.748	60.483	5.3	283.62	48.92	57.34	0.6	94	A
12	5/21/2017	19:51	35.845	60.495	4	46.53	61.12	8.5	0.5	29	B
13	12/20/2020	18:45	35.53	60.756	4.2	289.3	45.86	76	0.4	40	A
14	1/11/2021	19:27	35.766	60.041	4.2	312.02	54.51	78.92	0.4	50	B

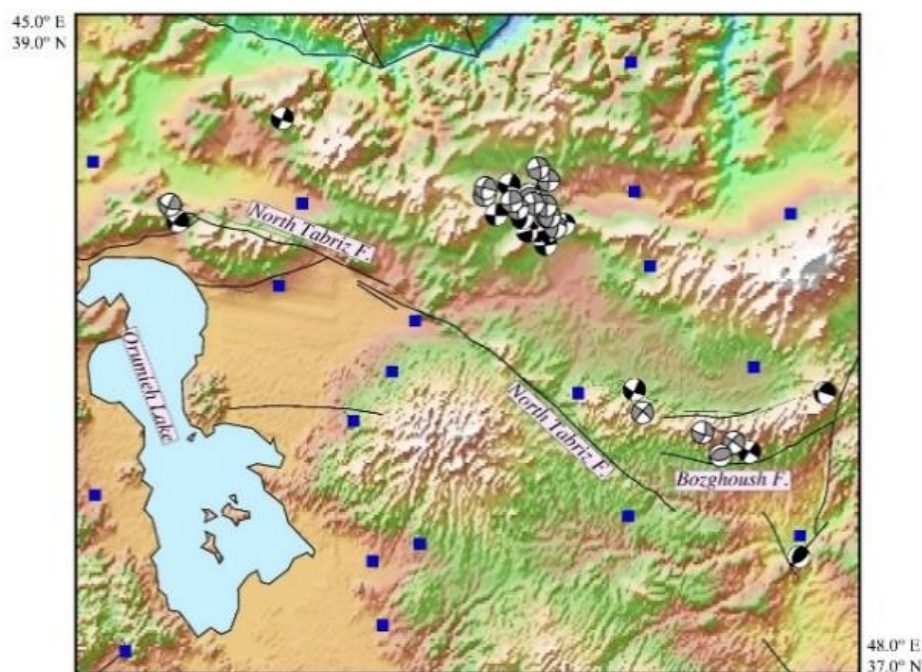
Table2- Characteristics of the resolved mechanisms from earthquakes in the metropolis of Mashhad

۳-۳ زمین‌لرزه‌های پیرامون شهر تبریز

شکل ۶ و ۷ نقشه گسل‌های گستره، سازوکار زمین‌لرزه‌های GCMT (نشان‌گرهای سیاه)، موسسه ژئوفیزیک (نشان‌گرهای خاکستری) و این پژوهش (نشان‌گرهای قرمز) را در پیرامون شهر تبریز نمایش می‌دهد. شهرهای شبستر، اسکو، آذرشهر، بستان‌آباد، مرند و هریس از شهرهای بزرگ و کوچک و دور و نزدیک این شهر تاریخی، مهم و پرجمعیت ایران هستند. لرزه‌خیزی تاریخی و پیش‌دستگاهی پیرامون این شهر در پیرامون سامانه گسلی شمال تبریز و گسل بزقوش پراکنده شده است. لرزه‌خیزی تاریخی و پیش‌دستگاهی پیرامون شهر تبریز از سال ۱۸۸۳ تا ۱۰۴۲ روی داده است (شکل ۱ آ).

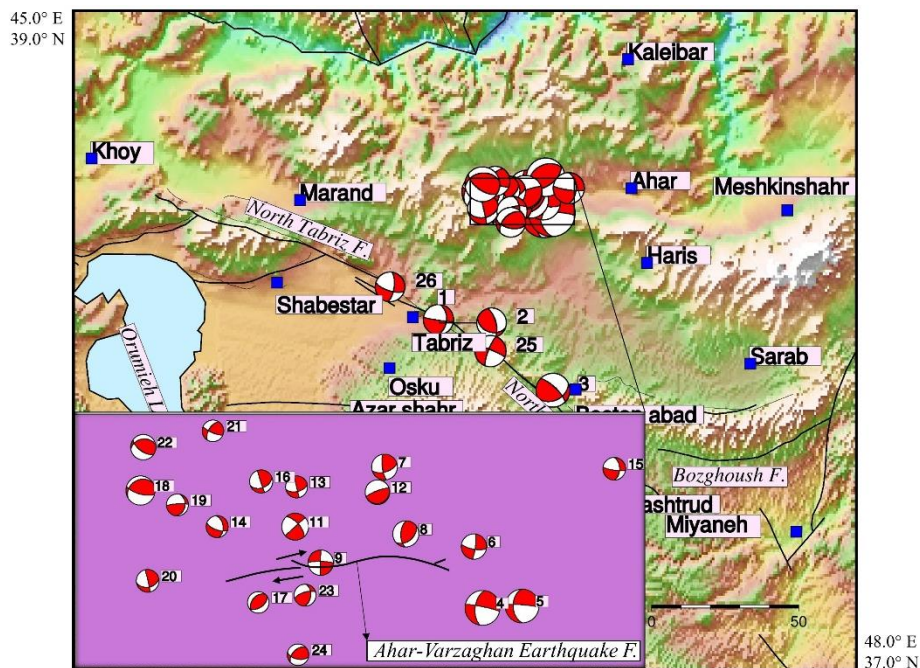
همان‌گونه که در شکل ۱ آ دیده می‌شود، اگرچه گسل شمال تبریز خاستگاه زمین‌لرزه‌های تاریخی و پیش‌دستگاهی زیادی بوده است، این گسل میزبان زمین‌لرزه بزرگ دستگاهی نیست. جدول ۳ مشخصات مکانیسم‌های حل شده زمین‌لرزه‌های پیرامون شهر تبریز را نشان می‌دهد. سازوکارهای حل شده زمین‌لرزه‌های در این پژوهش (شکل ۷) نشان می‌دهد که زمین‌لرزه‌های 1, 2, 3, 25, 26 با سازوکار چیره راست‌الغز راست‌بر و معکوس به گسل شمال تبریز وابسته هستند. دیگر زمین‌لرزه‌ها که

پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه‌های دوگانه ۲۰۱۲ اهر- ورزقان می‌باشند، نیز دارای راستالغز راست‌بر و معکوس هستند. زمین‌لرزه‌های ۲۰۱۲ اهر- ورزقان 4, 5 دارای سازوکار راستالغز راست‌بر خالص هستند. سازوکار راستالغز راست‌بر زمین‌لرزه‌های 6, 7, 13, 15, 16, 19, 21 با گسل هم‌لرز خاوری-باختری بررسی شده (Copley, et al., 2013) هم‌خوانی دارد. سازوکار زمین‌لرزه‌های 11, 14, 20, 22, 23 نیز با شیب‌های گسلی اندکی متفاوت می‌توانند به گسل خاوری باختری زمین‌لرزه وابسته باشند.



شکل ۶ نقشه گسل‌های اصلی و فرعی همراه با نام آن‌ها، سازوکار زمین‌لرزه‌های ($>4/5$) موسسه ژئوفیزیک (نشان‌گرهای خاکستری) (از سال 2012 تاکنون) و سازوکار زمین‌لرزه‌های ($>5/5$) از GCMT (نشان‌گرهای مشکی) (از سال 1976 تاکنون) در پیرامون کلان‌شهر تبریز.

Fig.6. The map of the main and secondary faults along with their names, the mechanisms of earthquakes (magnitude > 4.5) from the Geophysical Institute (indicated by gray markers) (from 2012 to present), and the mechanisms of earthquakes (magnitude > 5.5) from GCMT (indicated by black markers) (from 1976 to present) around the metropolise of Tabriz.



شکل ۷ نقشه سازوکارهای حل شده زمین‌لرزه‌های (>4.0) در این پژوهش (نشان‌گرهای قرمز) در

پیرامون کلان‌شهر تبریز.

Fig.7. The map of the resolved mechanisms of earthquakes (magnitude > 4.0) in this study (indicated by red markers) around the metropolis of Tabriz.

جدول ۳. ویژگی‌های سازوکارهای حل شده از زمین‌لرزه‌های پیرامون کلان‌شهر تبریز.

NO.	Date	Time	Lat.	Long.	Mag.	St.	Dip	Rake	RMS.	N.S.	Q
1	12/1/2007	18:22	38.072	46.398	4.1	5.23	45.22	-4.98	0.1	5	A
2	12/2/2007	10:00	38.062	46.402	4	109.97	37.45	41.7	0.1	6	B
3	2/2/2010	10:16	37.857	46.838	4.6	64.43	39.67	26.03	0.3	18	B
4	8/11/2012	12:23	38.393	46.806	6.5	187.61	55.61	-6.93	0.5	78	A
5	8/11/2012	12:34	38.394	46.814	6.3	178.66	45.7	-8.89	0.8	69	A
6	8/11/2012	15:21	38.427	46.8	4.7	6.88	80.15	-17.5	0.7	77	B
7	8/11/2012	15:43	38.461	46.737	4.8	172.27	75.97	32.4	0.7	44	A
8	8/11/2012	22:24	38.434	46.752	4.9	182.9	58.68	60.35	0.7	61	A
9	8/13/2012	1:56	38.418	46.692	4.7	180.74	88.41	170.99	0.7	54	A
10	8/14/2012	14:02	38.503	46.81	5.2	54.98	54.06	86.29	0.6	74	A
11	8/15/2012	17:49	38.438	46.674	5	318	65	0	0.5	59	A
12	8/16/2012	17:14	38.457	46.732	4.6	69.05	10	90	0.7	65	B
13	9/17/2012	7:05	38.46	46.675	4.1	166.83	90	35	0.5	29	A
14	10/8/2012	8:25	38.438	46.619	4.1	352.95	44.81	-35.53	0.5	58	A
15	10/16/2012	4:15	38.47	46.899	4.2	0.29	51.62	-12.25	0.6	70	A
16	10/26/2012	22:31	38.463	46.65	4.3	162.21	86.41	45.89	0.8	64	B
17	10/27/2012	3:56	38.396	46.648	4	220.95	41.49	79.4	0.7	40	A
18	11/7/2012	6:26	38.458	46.565	5.4	239.96	27.39	47.8	0.8	78	A
19	11/7/2012	7:02	38.45	46.591	4.1	10.72	31.47	16.74	1	33	A
20	11/8/2012	9:45	38.408	46.57	4.2	346.93	87.77	-47.96	0.8	58	A
21	11/10/2012	13:48	38.491	46.616	4	211.85	58.68	16.48	0.7	17	B

22	11/16/2012	3:58	38.482	46.567	4.7	261.67	36.05	52.49	0.7	84	A
23	3/3/2013	20:59	38.4	46.681	4.1	4.29	48.44	30.79	0.5	72	A
24	3/8/2013	13:45	38.367	46.676	4	225.65	49.49	45.81	0.5	54	B
25	8/16/2019	10:55	37.976	46.598	4.2	201.01	78.16	-7.53	0.4	45	A
26	6/7/2021	22:44	38.171	46.212	4	7.85	67.59	-23.46	0.4	31	A

Table3- Characteristics of the resolved mechanisms from earthquakes in the metropolise of Tabriz

نتیجه گیری

حل سازوکار زمین‌لرزه‌ها بر پایه بیش‌ترین شمار قطبش ایستگاه‌ها، پراکندگی یکنواخت و مناسب آن‌ها و محدودیت چرخش صفحه‌های گرهی با ایستگاه‌ها انجام شده است. درجه آزادی حرکت صفحه‌های گرهی ۵ درجه در نظر گرفته شده و سازوکارها با بیشینه یک یا دو خطای قطبش در گستره‌های کششی و فشاری حل شدند. این سازوکارهای حل شده، بر پایه شرایط بالا، به دو دسته با کیفیت خوب (A) و منصفانه (B) دسته‌بندی شدند. در حل سازوکارها در این پژوهش، برخلاف برخی از کارهای پژوهشی دیگر مانند (Jackson & Mckenzie, 1984)، تنها از پراکندگی قطبش‌ها کمک گرفته شد. علت به کار بردن این روش، مقایسه نتیجه دو روش و نشان دادن استقلال و کارآمدی این روش است.

بر پایه توضیحات بالا نتایج زیر به دست آمد:

۱- تهران و مجموعه شهرهای پیرامون آن در گستره اثر گسل‌های جنب‌ای و لرزه‌زایی چون گسل‌های شمال تهران و مشاء در سوی شمال-شمال خاوری و گسل‌های پیشوا در بخش جنوبی خود جای دارند. گستره تهران در میانه خود نیز دربردارنده مجموعه‌ای از پاره گسل‌ها و پدیده‌های کم‌وبیش خطی است که از برخی از آن‌ها با نام‌های نیاوران، محمودیه، داوودیه، در بخش‌های شمالی شهرری و کهریزک در بخش جنوبی شهر یاد می‌شود. تاکنون زمین‌لرزه‌ای در درون شهر روی گسل‌های یادشده روی نداده است. سازوکارهای حل شده زمین‌لرزه‌های ($>4/0$) در این پژوهش نشان می‌دهد زمین‌لرزه‌ها به گسل‌های شمال تهران، مشاء، ایوانکی، گرمسار و ایپک وابسته هستند. بر پایه حل سازوکار زمین‌لرزه‌ها با روش قطبش نخستین موج P، گسل‌های مشاء، شمال تهران، ایپک، گرمسار و ایوانکی، به ترتیب دارای سازوکار چیره راستالغز چپ‌بر با مؤلفه کوچک نرمال، معکوس، راستالغز چپ‌گرد، راستالغز راست‌بر با مؤلفه کوچک معکوس و سازوکار چیره معکوس می‌باشند. با سنجش این نقشه با نتایج کارهای پیشین از نهاد GCMT و کارهای لرزه‌شناسی (Ashtari et al., 2005) در این گستره، پی می‌بریم که هم‌خوانی نسبی میان این پژوهش و پژوهش‌های گذشته وجود دارد.

۲- ایالت لرزه‌زمین‌ساختی و کمربند چین‌خورده و راندگی درون‌قاره‌ای کپه‌داغ یک ساختار جنباً با راستای $N120^{\circ}$ و درازای ۷۰۰ کیلومتر است که مرز امروزی میان پهنه اوراسیا (پلت‌فرم توران) و خرده‌قاره ایران مرکزی را مشخص می‌سازد. کران شمالی آن گسل اشک‌آباد (قلمرو حکمرانی اشکانیان) یا گسل اصلی کپه‌داغ، مرز بلوک ایران و توران، است. سازوکارهای حل‌شده زمین‌لرزه‌های ($>4/0$) این پژوهش در این گستره، نشان می‌دهد که زمین‌لرزه‌ها به گسل‌های باه‌لر، کشف‌رود، اشک‌آباد و فریمان وابسته هستند. بر پایه حل سازوکار زمین‌لرزه‌ها، گسل‌های باه‌لر و اشک‌آباد، به ترتیب دارای سازوکار چیره راستالغز چپ‌بر با مؤلفه کوچک معکوس و معکوس می‌باشند. سازوکار چیره پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه فریمان که به گمان در راستا و روی دنباله گسل فریمان روی داده‌اند، معکوس با مؤلفه راستالغز راست‌بر می‌باشند. سازوکار برخی از پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه فریمان با خود زمین‌لرزه هم‌خوانی دارند، اگرچه سازوکار برخی از زمین‌لرزه‌ها نیز معکوس بوده و با سازوکار گسل فریمان هم‌خوانی دارند. حل زمین‌لرزه‌های گسل باه‌لر و گستره فریمان در این پژوهش با حل دانشگاه هاروارد هم‌خوانی نسبی دارند.

۳- گستره آذربایجان و تبریز از دیدگاه لرزه‌خیزی تاریخی در ایران یگانه به شمار می‌رود. گسل شمال تبریز خاستگاه زمین‌لرزه‌های تاریخی و پیش‌دستگاهی زیادی در این گستره است، اگرچه، بایستی در تفسیر روکانون زمین‌لرزه‌های تاریخی و پیش‌دستگاهی در همه‌جا، پراکندگی جمعیت را نیز در گذشته در نظر داشته باشیم. در شمال باختری ایران، وجود جابه‌جایی‌های برشی، سبب ایجاد گسل‌های راستالغز شده است که به گسل شمال تبریز به‌عنوان یکی از نمونه‌های بارز و بسیار مهم آن می‌توان اشاره کرد. سازوکارهای حل‌شده زمین‌لرزه‌ها در این پژوهش نشان می‌دهد که زمین‌لرزه‌ها با سازوکار چیره راستالغز راست‌بر و معکوس به گسل شمال تبریز وابسته هستند (Moradi et al., 2011) نشان دادند که تقریباً سازوکار چیره همه خردلرزه‌های وابسته به گسل شمال تبریز پیش از سال ۲۰۱۰ راستالغز راست‌بر می‌باشد. این پژوهش شیب گسل را نیز نزدیک به قائم برآورد نموده و همچنین این گسل را یک گسل با عملکرد ساده معرفی نموده‌اند؛ بنابراین، سازوکار زمین‌لرزه‌ها و شیب به‌دست آمده از حل سازوکارهای آن‌ها در این پژوهش با پژوهش (Moradi et al., 2011) هم‌خوانی دارد. دیگر زمین‌لرزه‌ها که پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه‌های دوگانه ۲۰۱۲ اهر- ورزقان می‌باشند، نیز دارای راستالغز راست‌بر و معکوس هستند. سازوکار خود زمین‌لرزه‌های ۲۰۱۲ اهر- ورزقان، راستالغز راست‌بر خالص به‌دست آمده است. سازوکار راستالغز راست‌بر برخی از پس‌لرزه‌ها با گسل هم‌لرز خاوری- باختری بررسی شده (Copley, et al., 2013) هم‌خوانی دارد. سازوکار برخی از پس‌لرزه‌ها نیز با شیب‌های گسلی اندکی متفاوت می‌تواند به گسل خاوری باختری زمین‌لرزه وابسته باشند.

این پژوهش نشان داد گسل‌های مشاء، شمال تهران، ایپک، گرمسار و ایوانکی، به ترتیب دارای سازوکار چیره راستالغز چپ‌بر با مؤلفه کوچک نرمال، معکوس، راستالغز چپ‌گرد، راستالغز راست‌بر با مؤلفه کوچک معکوس و سازوکار چیره معکوس می‌باشند. با توجه به اینکه بیشتر ویرانی‌ها در فرادیواره گسل‌های معکوس روی می‌دهد، با یک تفسیر البته ساده می‌توان گفت که خوشبختانه، شهر تهران در فرادیواره گسل معکوس شمال تهران جای ندارد. اگرچه، تنها این عامل در خطر لرزه‌ای دخیل نیست، درباره شهر تهران درازا (در نتیجه بزرگای زمین‌لرزه ایجاد شده) گسل راستالغزی مانند مشاء بسیار قابل توجه است.

گسل‌های باهله و اشک‌آباد نیز به ترتیب، دارای سازوکار چیره راستالغز چپ‌بر با مؤلفه کوچک معکوس و معکوس می‌باشند. سازوکار چیره پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه ۲۰۱۷ فریمان، معکوس با مؤلفه راستالغز راست‌بر می‌باشند. سازوکار برخی از پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه فریمان با خود زمین‌لرزه هم‌خوانی داشته و برخی از آن‌ها نیز معکوس بوده و با سازوکار گسل فریمان هم‌خوانی دارند. شهر مشهد در معرض خطر جنبش گسل‌هایی مانند بینالود، کشف‌رود و فریمان جای دارد. می‌توان گفت از میان این گسل‌ها تنها گسل فریمان در سال‌های اخیر جنباً بوده و گسل کشف‌رود و بینالود لرزه‌خیزی چندانی نداشته‌اند.

در گستره آذربایجان نیز زمین‌لرزه‌ها با سازوکار چیره راستالغز راست‌بر و معکوس به گسل شمال تبریز وابسته هستند. دیگر زمین‌لرزه‌ها که پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه‌های ۲۰۱۲ اهر- ورزقان می‌باشند، نیز عمدتاً دارای راستالغز راست‌بر و معکوس هستند. سازوکار خود زمین‌لرزه‌های ۲۰۱۲ اهر- ورزقان، راستالغز راست‌بر خالص به دست آمده است. سازوکار راستالغز راست‌بر برخی از پس‌لرزه‌ها با گسل هم‌لرز خاوری-باختری زمین‌لرزه هم‌خوانی دارد. نزدیکی زیاد شهر تبریز به گسل شمال تبریز در ایجاد خطر لرزه‌ای بسیار قابل توجه است. ویرانی‌های تاریخی تبریز گویای اهمیت این موضوع است. بزرگ نبودن زمین‌لرزه‌های دستگاهی این گسل می‌تواند گویای این واقعیت باشد که هم‌اکنون بخش‌هایی از این گسل در تکه‌های گسلی کوچک شکسته شده و ایجاد زمین‌لرزه می‌نماید. اگرچه این تفسیر نمی‌تواند یکپارچه شدن تکه‌های گسلی و ایجاد یک زمین‌لرزه بزرگ‌تر را نفی کند.

References

- Akasheh, B., & Berckhemer, H. (1984). Focal Mechanisms of Earthquakes in Iran with Special Emphasis on Small Shocks in Tehran Region. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie - Abhandlungen*. 168(2-3), 244-255.
<https://doi.org/10.1127/njgpa/168/1984/244>.

- Ambraseys, M.M., & Melville, C.P. (1982). *A History of Persian Earthquakes*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Ashtari M., Hatzfeld D., & Kamalian, N. (2005). Microseismicity in the Region of Tehran. *Tectonophysics*, 395(3-4), 193–208.

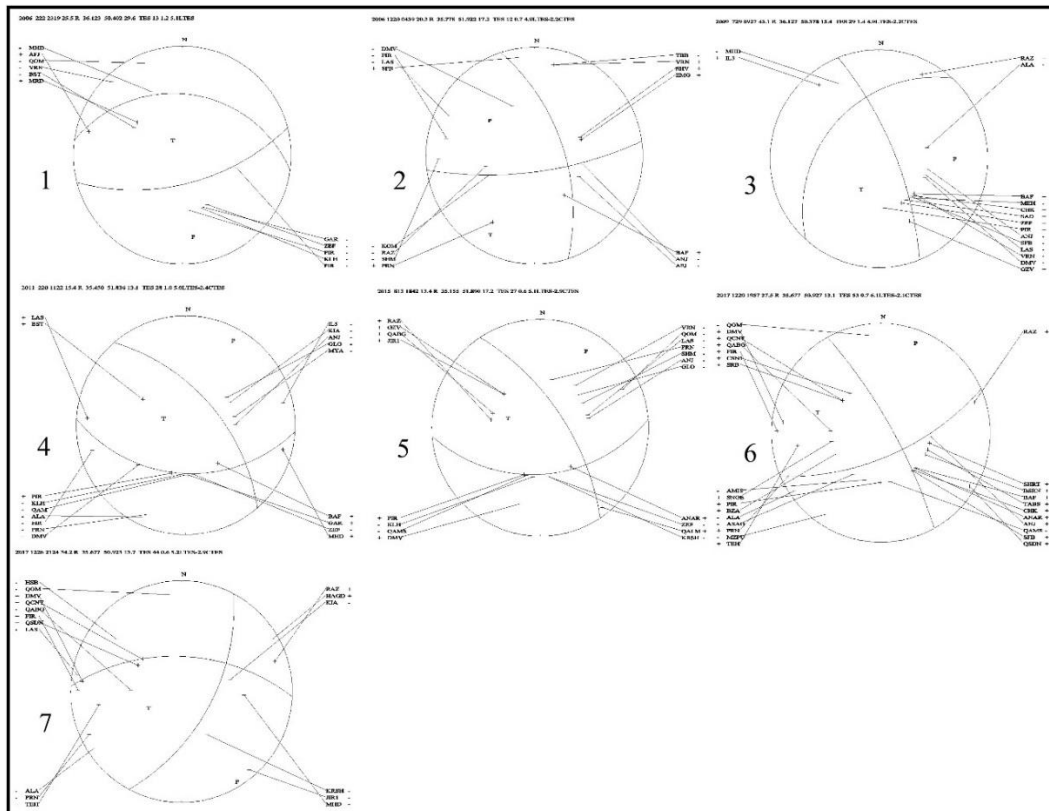
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.09.011>.

- Berberian, M., (1976). Contribution to the Seismotectonics of Iran (Part II). *Geological Survey of Iran*, 39, 518.
- Berberian M., Yeats, R.S. (1999). Patterns of Historical Earthquake Rupture in the Iranian Plateau. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(1), 120-139. <https://doi.org/10.1785/BSSA0890010120>.
- Copley, A., Faridi, M., Ghorashi, M., Hollingsworth, J., Jackson, J., Nazari, H., Oveisi, B., & Talebian, M. (2013). The 2012 August 11 Ahar earthquakes: consequences for tectonics and earthquake hazard in the Turkish-Iranian Plateau. *Geophysical Journal Journal*, 196(1), 15-21. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt379>.
- De Martini, P.M., Hessami, K., Pantosti, D., D'edezio, G., Alinaghi, H., Ghafori-Ashtiany, M. (1998). A Geologic Contribution of the Evaluation of the Seismic Potential of the Kahrizak Fault (Tehran, Iran). *Tectonophysics*, 287(1-4): 187–199. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(98\)80068-1](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(98)80068-1).
- Hessami, K., Jamali, F. and Tabassi, H. (2003). Major active faults of Iran. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran.
- Hollingsworth, J., Jackson, J., Alarcon, J., Boomer, J., Bolourchi, M.J. (2007). The 4th February 1997 Bojnourd (Garmkhan) Earthquake in NE Iran: Teleseismic, and Strong-Motion Evidence for Rupture Directivity Effects on a Strike-Slip Fault. *Journal of Earthquake Engineering*, 11(2), 193-214. <https://doi.org/10.1080/13632460601031078>.
- Hosseinzadeh, S.R.(2004). Environmental Crises In The Metropolises Of Iran. *WIT Press*, 179-187. <https://doi.org/10.2495/SC040191>.
- Jackson, J.A., McKenzie, D.P. (1984). Active Tectonics of the Alpine-Himalayan Belt Between Western Turkey and Pakistan. *Geophysical Journal International*, 77 (1), 185–264. [10.1111/j.1365-246X.1984.tb01931.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1984.tb01931.x).
- Jackson, J., Haines, J., Holt, W. (1995). The accommodation of Arabia-Eurasia plate convergence in Iran. *Journal Of Geophysical Reseach*, 100, 15205-15219. <https://doi.org/10.1029/95JB01294>.
- Lay, T. & Wallace, T.C. (1995). *Modern Global Seismology*. California: Academic Press Institute.
- McKenzie, D. (1972). Active Tectonics of the Mediterranean Region. *Geophysical Journal International*, 30(2), 109–185. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1972.tb02351.x>.
- Moradi, S. A., Hatzfeld, D., & Tatar, M. (2011). Microseismicity and Seismotectonics of the North Tabriz Fault (Iran). *Tectonophysics*, 506(1-4), 22-30. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.04.008>.
- Nemati, M., Hatzfeld, D., Gheitanchi, M., Sadidkhoy, A., & Mirzaei, N. (2011). Microseismicity and seismotectonics of the Firouzkuh and Astaneh faults (east Alborz, Iran). *Tectonophysics*, 506, 11-21. <http://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.04.007>.
- Nemati, M. (2013). Some Aspects about Seismology of 2012 August 11 Ahar-Varzaghan (Azarbayjan, NW Persia) Earthquakes Sequences. *Journal of Sciences Islamic Republic of Iran*, 24(3), 229-241.
- Nemati, M. (2015). Intermediate-term variations in 200-year seismicity at south of Iran. *Geomatics Natural Hazards and Risks*, 7(3), 1065-1080. <https://doi.org/10.1080/19475705.2015.1030785>.

- Ni, J., Barazangi, M. (1986). Seismotectonics of Zagros continental collision zone and a comparison with the Himalayas. *Journal Of Geophysical Reseach*, 91(B8), 8205-8218. <https://doi.org/10.1029/JB091iB08p08205>.
- Priestley, K., Baker, C., & Jackson, J. (1994). Implications of Earthquake Focal Mechanism Data for the Active Tectonics of the South Caspian Basin and Surrounding Regions, *Geophysical Journal International*, 118(1), 111-141. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1994.tb04679.x>.
- Solaymani, A.S., Ritz, J.F., Abbassi, M.R. (2011). Left-Lateral Active Deformation along the Moshā-North Tehran Fault System (Iran): Morphotectonics and Paleoseismological Investigations. *Tectonophysics*, 497(1-4), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2010.09.013>.
- Stein, S., Wysession, M. (2003). *An Introduction to Seismology, Earthquakes and Earth Structure*. Oxford: Blackwell Publishing.
- Tchalenko, J.S. (1975). Seismicity and Structure of the Kopeh Dagh (Iran, USSR). *Philosophical Transactions of the Royal Society. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 278 (1275), 1-28. <https://doi.org/10.1098/rsta.1975.0019>.
- Zamani, B., Angelier, J., & Zamani, A. (2008). State of Stress Induced by Plate Convergence and Stress Partitioning in Northeastern Iran, as Indicated by Focal Mechanisms of Earthquakes. *Journal of Geodynamics*, 45(2-3), 120-132. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2007.07.003>.

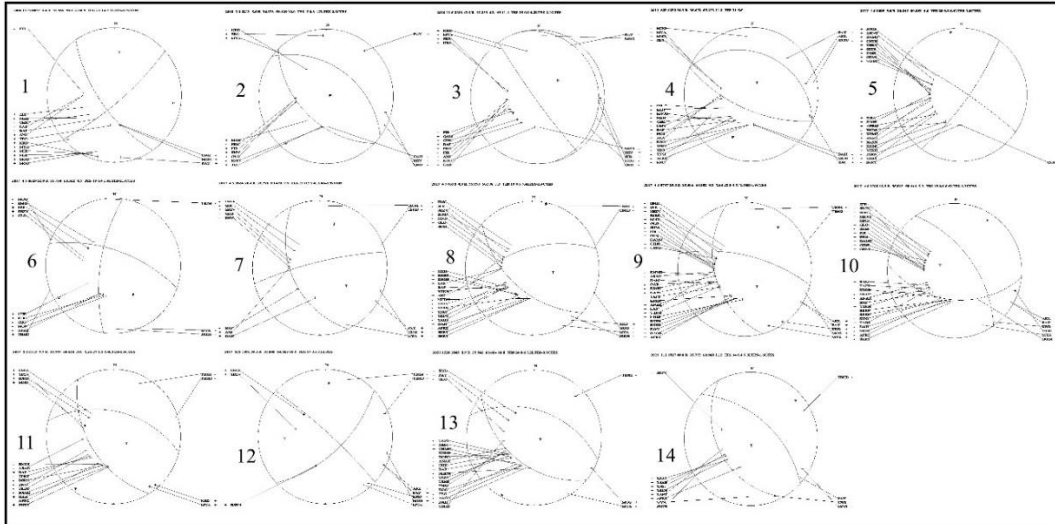
تشکر و قدردانی: از موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران بابت داده‌های برخط ایشان سپاس‌گزاری می‌شود.

پیوست ۱. سازوکارهای زمین‌لرزه‌های پیرامون کلان‌شهر تهران. تصویر پشتوانه پردازش سازوکار زمین‌لرزه‌ها توسط نرم‌افزار ساین که تعداد، پراکنش آزیموتی و صفحه‌های گرهی را نشان می‌دهد.



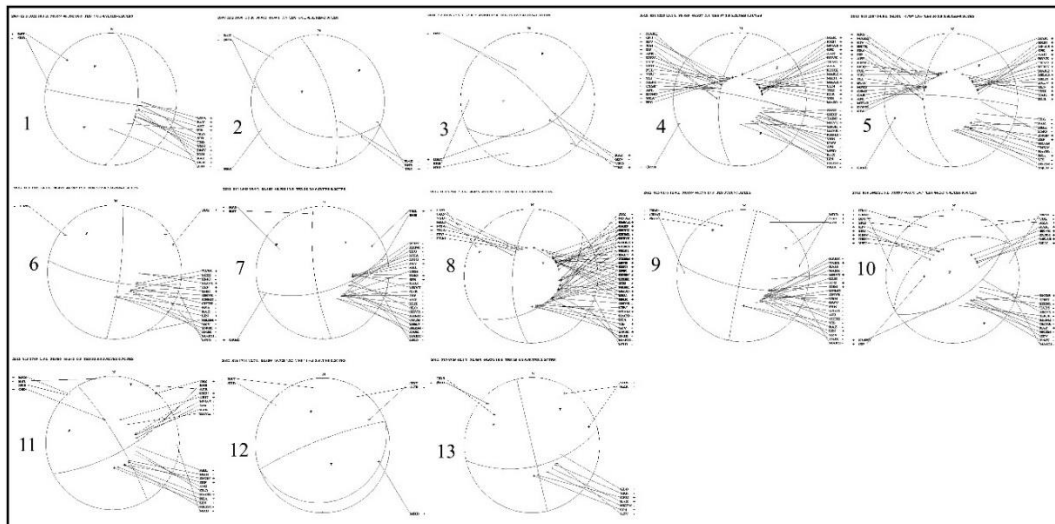
Appx.1. Mechanisms of earthquakes around the metropolis of Tehran. Background image supporting the processing of earthquake mechanisms by the Sazan software, showing the number, azimuthal distribution, and nodal planes.

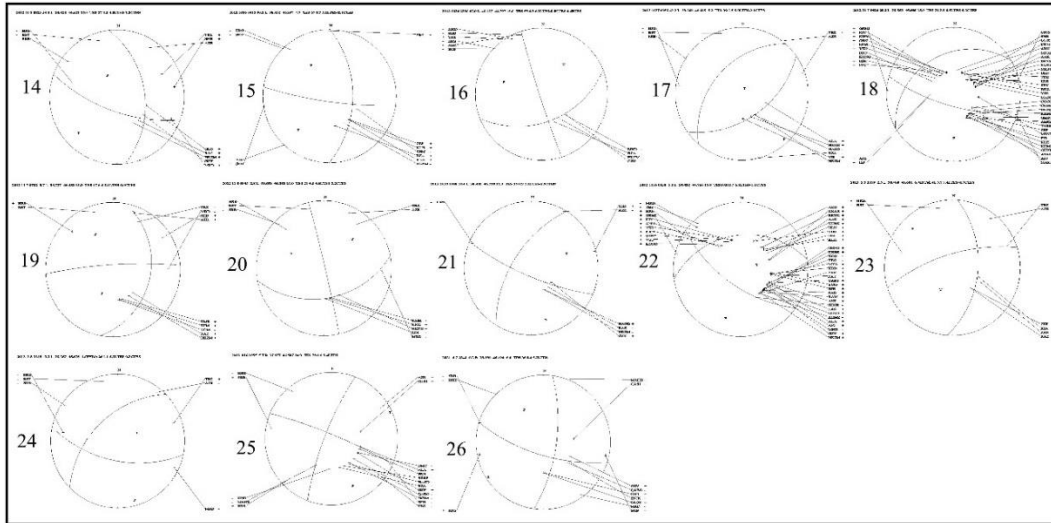
پیوست ۲. سازوکارهای زمین‌لرزه‌های پیرامون کلان‌شهر مشهد. تصویر پشتوانه پردازش سازوکار زمین‌لرزه‌ها توسط نرم‌افزار سایزن که تعداد، پراکنش آزیموتی و صفحه‌های گرهی را نشان می‌دهد.



Appx.2. Mechanisms of earthquakes around the metropolis of Mashhad. Background image supporting the processing of earthquake mechanisms by the Sazan software, showing the number, azimuthal distribution, and nodal planes.

پیوست ۳. سازوکارهای زمین‌لرزه‌های پیرامون کلان‌شهر تبریز. تصویر پشتوانه پردازش سازوکار زمین‌لرزه‌ها توسط نرم‌افزار سایزن که تعداد، پراکنش آزیموتی و صفحه‌های گرهی را نشان می‌دهد.





Appx.3. Mechanisms of earthquakes around the metropolise of Tabriz. Background image supporting the processing of earthquake mechanisms by the Sazan software, showing the number, azimuthal distribution, and nodal planes.