بررسی لرزه‌خیزی شمال‌غرب ایران و شرق ترکیه با استفاده مکان‌یابی مجدد خوشه‌های لرزه‌ای

سلمان اندایشگر[۱]، عبدالرضا قدس[۲]، اسماعیل شبانیان[۳]، یوخن براونمیلر[۴]
[۱] دانشجوی دکتری، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه، زنجان، s.andayeshgar@iasbs.ac.ir
[۲] استاد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه، زنجان، aghods@iasbs.ac.ir
[۳] دانشیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه، زنجان، shabanian@iasbs.ac.ir
[۴] دانشیار، دانشگاه فلوریدای جنوبی، jbraunmiller@gmail.com

چکیده

در این مطالعه ما با مکان‌یابی مجدد زمین‌لرزه‌ها و تعیین سازوکار کانونی آنها با استفاده از تمام داده‌های موجود، به بررسی لرزه‌خیزی، تعیین گسله‌های فعال و چشمه‌های لرزه‌ای و تطابق این روندها با نقشه‌های گسلی موجود و مرزهای تکتونیکی پرداختیم. ما ۸ خوشه لرزه‌ای شامل ۱۳۵۱ زمین‌لرزه، را به روش تجزیه هایپوسنتروئید مکان‌یابی مجدد کردیم. نتایج ما نشان می‌دهد که عمده لرزه‌خیزی بر روی گسله شمال تبریز و امتداد آن به سمت گسله گلاتو-سیاه‌چشمه-خوی و سیستم گسلی چالدران، انتهای سیستم گسلی زاگرس به سمت سلماس و جنوب شرق آناتولی و گسله گرمی‌چای که در مطالعات گذشته به‌عنوان مرزهای تکتونیکی معرفی شده‌اند، متمرکز شده است. اما روندهایی عمود بر گسله شمال تبریز، غرب خوی و دریاچه وان مشاهده می‌شود که با روند گسله‌های شناخته شده همسو نیست. همچنین در مطالعات گذشته گسله‌ای در غرب سلماس معرفی شده که نتایج ما لرزه‌خیزی را روی آن نشان نمی‌دهد.

واژه‌های کلیدی: مکان‌یابی مجدد، لرزه‌خیزی، شمال‌غرب ایران.

Seismicity of NW Iran and east Turkey using relocation of seismic clusters

Salman Andayeshgar [1], Abdolreza Ghods [2], Esmaeil Shabanian [3], Jochen Braunmiller [4]
[1] *PhD student, Department of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan, Iran*
[2] *Professor, Department of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan, Iran*
[3] *Associate Professor, Department of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan, Iran*
[4] *Associate Professor, University of South Florida.*

Abstract

In this study, by relocating earthquakes and determining their focal mechanism using all available data, we investigated seismicity, determined active faults and seismic sources, and matched these trends with existing fault maps and tectonic boundaries. We relocated 8 seismic clusters containing 1351 earthquakes using the hypocentroid decomposition method. Our results show that most of the seismicity is concentrated on the North Tabriz fault, the Gailatu–Siah Cheshmeh–Khoy fault and the Chalderan fault system which in the previous studies as tectonic boundaries have been introduced. Our results show a concentrated trends of seismicity from Zagros towards Salmas and southeast Anatolia and on the Garmachay fault. However, there are trends perpendicular to the North Tabriz fault, West Khoy and Lake Van, which are not in line with the trends of the known faults. Also, in past studies, a fault has been introduced in the west of Salmas, and our results do not show seismicity on it.

Keywords: Relocation, Seismicity, NW Iran.

۱ مقدمه

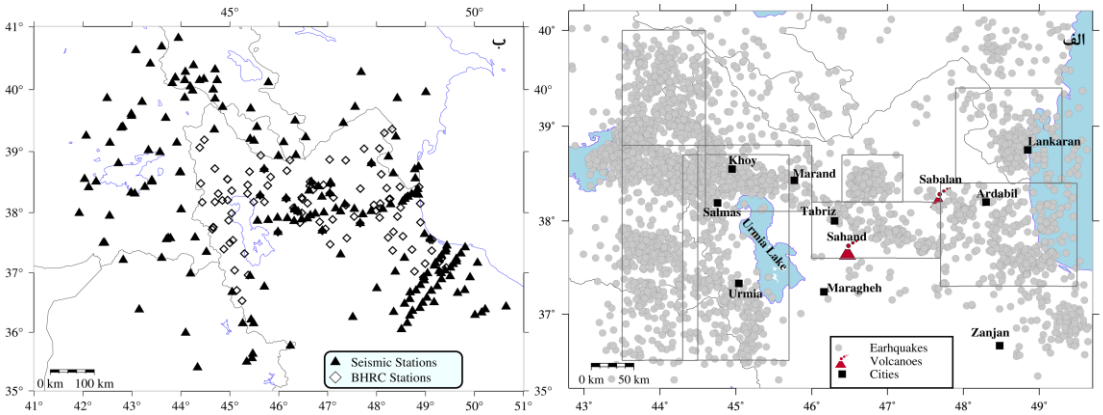
در بخش‌هایی از شمال‌غرب ایران به دلیل پیچیدگی ساختاری و کمبود اطلاعات زمین‌شناسی، آگاهی و دانش ما در مورد گسلش فعال و مرزهای تکتونیکی با مشکل روبرو می‌شود، بنابراین توزیع زمین‌لرزه‌ها اطلاعات حیاتی در مورد گسلش فعال فراهم می‌کند. یکی از روش‌های به نقشه درآوردن گسله‌های فعال، تعیین مکان زمین‌لرزه‌های متوسط تا بزرگ است که باید در امتداد ساختارهای لرزه‌زا اصلی تراز شوند. متاسفانه عدم قطعیت رومرکز زمین‌لرزه‌ها و همچنین عدم

قطعیت در تعیین عمق زمین‌لرزه‌ها، می‌تواند منجر به شناسایی نادرست گسله مسبب حتی برای زمین‌لرزه‌های بزرگ شود. برخی زمین‌لرزه‌ها نیز در ایران به دلیل کمبود داده‌های لرزه‌ای محلی، با خطای قابل توجهی مکان‌یابی شده‌اند. همچنین خطاهای کاتالوگ برای برخی از رخدادهای قدیمی حتی بیشتر از ۱۰۰ کیلومتر گزارش شده است (کاراسوزن و همکاران، ۲۰۱۹). برای اجتناب از این عدم‌قطعیت‌ها، زمین‌لرزه‌ها با استفاده از روش‌های چندرویدادی، مکان‌یابی مجدد می‌شوند. یکی از معروف‌ترین روش‌های مکان‌یابی چندرویدادی، روش تجزیه هایپوسنتروئید (HDC) است. این روش نخستین بار توسط جردن و سردرپ (۱۹۸۱) ارائه شد و سپس توسط اریک برگمن توسعه یافت. تاکنون مطالعات زیادی به منظور بررسی لرزه‌خیزی و گسلش فعال در شمال‌غرب ایران با این روش انجام شده است (بطور مثال: عزیززنجانی و همکاران، ۲۰۱۳؛ قدس و همکاران، ۲۰۱۵).

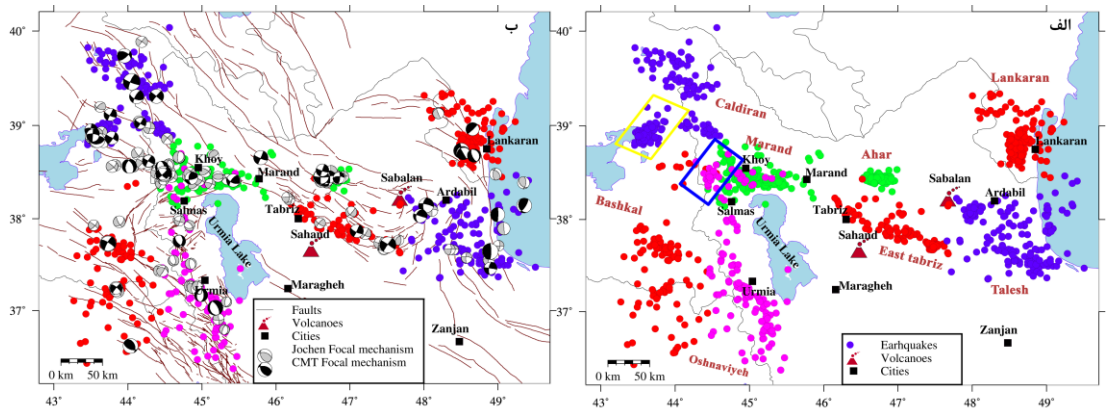
مطالعات انجام شده در شمال‌غرب (عزیززنجانی و همکاران، ۲۰۱۳؛ قدس و همکاران، ۲۰۱۵؛ مرادی و همکاران، ۲۰۱۱) بر روی یک ناحیه یا گسله خاص و با استفاده از داده‌های لرزه‌ای و پس‌لرزه‌های یک زمین‌لرزه خاص در مدت زمان محدود انجام گرفته است و تاکنون مطالعه جامعی که تمام منطقه شمال‌غرب ایران را پوشش دهد صورت نگرفته است. بنابراین ما با هدف بررسی نحوه توزیع زمین‌لرزه‌ها و گسلش فعال و پاسخگویی به این سوالات که آیا لرزه‌خیزی روی گسله‌های بزرگ و خاصی متمرکز شده است یا بین گسله‌ها توزیع می‌شود؟ آیا لرزه‌خیزی روی مرزهای تکتونیکی بلوک متمرکز است یا در داخل بلوک توزیع می‌شود؟ مکانیزم عمده لرزه‌خیزی به چه صورت است و آیا همه گسله‌های شناخته شده فعال هستند یا لرزه‌خیزی گسله‌های ناشناخته‌ای را مشخص می‌کند؟، یک مطالعه در مقیاس منطقه‌ای و با استفاده از تمام داده‌های موجود با استفاده از روش مکان‌یابی چند رویدادی تجزیه هایپوسنتروئید انجام می‌دهیم.

۲ روش تحقیق

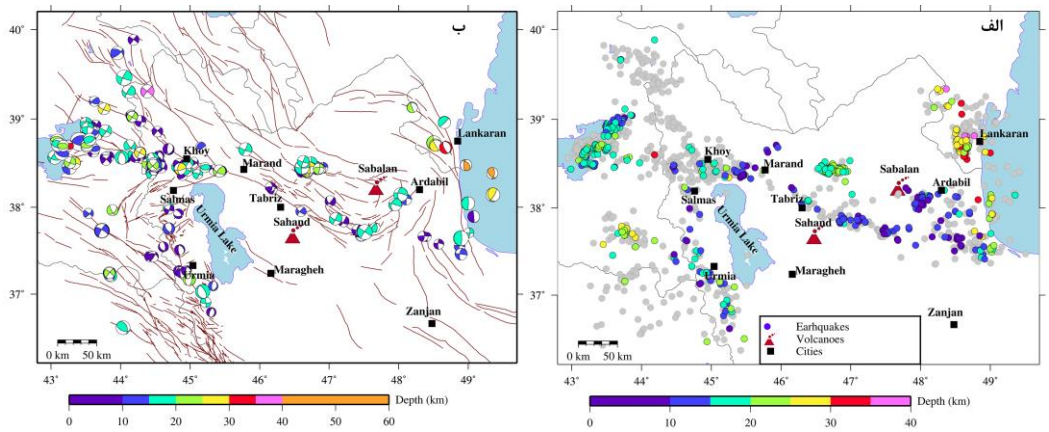
مکان‌یابی چند رویدادی به روش اچ‌دی‌سی و با استفاده از برنامه (mloc) نسخه (۱۰.۴.۷) انجام شد. داده‌های مورد استفاده برای مکان‌یابی مجدد هر خوشه لرزه‌ای از زمین‌لرزه‌های محلی با بزرگای بیشتر از ۳ ثبت شده از سال ۱۹۶۰ تا ۲۰۲۱ میلادی در شبکه لرزه‌نگاری جهانی (ISC)، شبکه لرزه‌نگاری مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (IRSC)، شبکه لرزه‌نگاری پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (INSN)، شبکه‌های لرزه‌نگاری موقت دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان (IASBS و TAROM)، شبکه لرزه‌نگاری موقت ایران_چین (IRCH) و شبکه شتاب‌نگاری کشوری (ISMN) انتخاب شده است. شکل ۱ زمین‌لرزه‌های محلی ثبت شده در شبکه‌های لرزه‌نگاری ذکر شده و نقشه تمام ایستگاه‌هایی که از داده‌های آن‌ها برای مکان‌یابی استفاده شده است را نشان می‌دهد. در منطقه شمال‌غرب ایران تعداد ۸ خوشه لرزه‌ای انتخاب شده است که با کادرهای خاکستری در شکل ۱-الف مشخص شده است. شکل ۲-الف نتایج مکان‌یابی مجدد ۸ خوشه لرزه‌ای در شمال‌غرب ایران شامل ۱۳۵۱ زمین‌لرزه را نشان می‌دهد که با رنگ‌های مختلف از یک‌دیگر تفکیک شده‌اند. از این تعداد زمین‌لرزه، ۱۳۲۴ رخداد با خطای رومرکز کمتر از ۵ کیلومتر، ۱۳۰۱ با خطای رومرکز کمتر از ۴ کیلومتر، ۱۲۳۸ رخداد با خطای رومرکز کمتر از ۳ کیلومتر و ۲۷ رخداد با خطای بیشتر از ۵ کیلومتر مکان‌یابی مجدد شده‌اند. برای زمین‌لرزه‌های مکان‌یابی شده، تعداد ۴۹ فوکال مکانیسم از سایت CMT Global گرفته شد. همچنین تعداد ۶۷ فوکال مکانیسم نیز به روش ممان تانسور محاسبه شده است (شکل ۲-ب). در خوشه‌های لرزه‌ای ذکر شده، برای رخدادهایی که دارای پوشش پرتویی مناسب و کنترل عمقی مطلوب بودند عمق رخدادها با خطای قابل قبولی (۲ تا ۳ کیلومتر) تخمین زده شده است و برای رخدادهایی که کنترل عمقی نداشتند، عمق ثابتی در نظر گرفته شده است. از ۱۳۵۱ زمین‌لرزه، حدود ۵۰۰ رخداد با خطای بین ۲ تا ۳ کیلومتر تعیین عمق شد. در شکل ۳، تغییرات عمقی زمین‌لرزه‌های موجود در خوشه‌های لرزه‌ای نشان داده شده است. در این شکل دایره‌های خاکستری زمین‌لرزه‌های با عمق ثابت را نشان می‌دهد و دایره‌های رنگی نیز عمق رخدادهای دارای کنترل عمقی را مشخص می‌کند که از ۴ تا ۳۸ کیلومتر در محدوده شمال‌غرب متغیر است و با رنگ آبی تا صورتی نشان داده شده است.



شکل۱. الف) نقشه لرزه‌خیزی منطقه شمال‌غرب ایران. ۸ خوشه لرزه‌ای با کادرهای خاکستری مشخص شده است. زمین‌لرزه‌های ثبت شده در ۳ شبکه لرزه‌نگاری ISC، IRSC و IIEES با همدیگر تلفیق شده است و با رنگ خاکستری مشخص شده است. ب) نقشه تمام ایستگاه‌های لرزه‌نگاری (مثلث‌های مشکی) و شتابنگاری (لوزی‌های مشکی) دارای فاز مستقیم استفاده شده در مکان‌یابی مجدد.



شکل۲. الف) نتایج مکان‌یابی مجدد خوشه‌های لرزه‌ای. برای تفکیک هر خوشه از رنگ‌های مختلف استفاده شده است. نام خوشه‌ها در کنار آن‌ها با رنگ قهوه‌ای نوشته شده است. کادرهای آبی و زرد روندهای دارای ابهام را نشان می‌دهد ب) نتایج مکان‌یابی مجدد خوشه‌های لرزه‌ای به همراه سازوکارهای کانونی استخراج شده از سایت CMT (توپ‌های مشکی رنگ) و براونمیلر (توپ‌های خاکستری رنگ). خطوط قهوه‌ای رنگ، گسله‌های محدوده شمال‌غرب ایران توسط تقی‌پور و همکاران (۲۰۱۸) و نیاسری‌فرد و همکاران (۲۰۲۱) را نشان می‌دهد.



شکل۳. الف) تغییرات عمقی زمین‌لرزه‌ها براساس مکان‌یابی مجدد. ب) تغییرات عمقی زمین‌لرزه‌ها براساس سازوکارهای کانونی.

۳ نتیجه‌گیری

نتایج مکان‌یابی مجدد زمین‌لرزه‌ها در خوشه‌های تالش، شرق‌تبریز، مرند و کالدیران (شکل ۲) نشان می‌دهد که عمده لرزه‌خیزی در این ناحیه بر روی گسله شمال تبریز و امتداد آن به سمت گسله گلاتو-سیاه‌چشمه-خوی، سیستم گسلی چالدران و گسله گرمی‌چای متمرکز شده است. این گسله‌ها در مطالعات قبلی (قدس و همکاران،۲۰۱۵؛ خرمی و همکاران، ۲۰۱۹؛ افلاکی و همکاران، ۲۰۲۱) به‌عنوان مرز اصلی بلوک معرفی شده‌اند. سازوکارهای کانونی استخراج شده (شکل ۲-ب) نیز نشان دهنده یک مرز اصلی با سازوکار راستالغز راست‌بر است که از غرب کوه‌های بزقوش به سمت شمال‌غرب در امتداد گسله شمال تبریز ادامه دارد. در انتهای این سیستم گسلی چالدران (در شمال چالدران) لرزه‌خیزی پراکنده مشاهده می‌شود که نشان دهنده وجود پایانه‌های گسلی است. سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها نیز در این ناحیه از امتدادلغز به نرمال تغییر می‌یابد. همچنین دو روند عمود بر گسله شمال تبریز با روند شمال‌شرقی مشاهده می‌شود که می‌تواند پله‌های گسلی با سازوکار امتدادلغز چپ‌بر باشد. نتایج مکان‌یابی مجدد زمین‌لرزه‌ها در خوشه‌های اشنویه و باشکال، یک روند لرزه‌خیزی متمرکز از زاگرس به سمت سلماس را نشان می‌دهد. سازوکارهای کانونی زمین‌لرزه‌ها نشان می‌دهد که مکانیسم زمین‌لرزه‌ها به صورت نرمال است (شکل ۲-ب). علاوه بر این روند دیگری نیز مشاهده می‌شود که از انتهای سیستم گسلی زاگرس شروع می‌شود و امتداد آن به جنوب‌شرق آناتولی ختم می‌شود. سازوکارهای کانونی استخراج شده نشان دهنده یک روند با مکانیسم امتدادلغز راست‌بر است (شکل ۲-ب). این روندها منطبق بر سیستم گسلی معرفی شده توسط نیاسری‌فرد و همکاران (۲۰۲۱) است. با این وجود، در مطالعه نیاسری‌فرد و همکاران (۲۰۲۱) براساس اطلاعات زمین‌شناسی و شواهد سطحی یک سیستم گسلی به موازات مرز اصلی و در سمت غرب آن معرفی شده است، اما نتایج مکان‌یابی مجدد زمین‌لرزه‌ها، لرزه‌خیزی و فعالیت قابل استنادی را بر روی این سیستم گسلی نشان نمی‌دهد. ما حدس می‌زنیم که این سیستم گسلی، احتمالاً یک گسله قاشقی باشد که به کمک مرز اصلی معرفی شده، تنش تکتونیکی منطقه بر روی آن جای‌گیری می‌شود و این گسله در عمق به لایه لرزه‌زا نمی‌رسد و پی‌سنگی نیست. نتایج تعیین عمق زمین‌لرزه‌ها نیز تغییرات عمقی بسیار جالبی را در شمال‌غرب ایران نشان می‌دهد (شکل ۳-الف). بطور مثال زمین‌لرزه‌هایی که در امتداد گسله شمال تبریز مکان‌یابی شده‌اند، همگی دارای عمق میانگین (تا ۱۲ کیلومتر) هستند. اما در خود بلوک، یعنی به سمت خوشه اهر-ورزقان و همچنین به سمت زاگرس یعنی در خوشه اشنویه و باشکال، عمق زمین‌لرزه‌ها بیشتر می‌شود. در تالش و لنکران نیز به دلیل وجود پوسته خزرجنوبی، عمق زمین‌لرزه‌ها نسبت به کل منطقه افزایش می‌یابد که در مطالعه عزیززنجانی و همکاران (۲۰۱۳) نیز به آن پرداخته شده است و عمق بدست آمده از سازوکارهای کانونی نیز آن را تایید می‌کند (شکل ۳-ب). در برخی خوشه‌های لرزه‌ای مکان‌یابی شده، روندهایی مشاهده می‌شود که با روند هیچ گسله شناخته شده‌ای همسو نیست، از جمله یک روند با امتداد شمال‌شرقی در غرب خوی (کادر آبی در شکل ۲-الف) که سازوکار زمین‌لرزه‌های آن به صورت امتدادلغز چپ‌بر است و به گسله شمال تبریز می‌رسد. در این ناحیه داده‌های زمین‌شناسی و نتایج مکان‌یابی مجدد در مورد اینکه کدام مکانیسم غالب است ابهام دارند. در نزدیکی دریاچه وان نیز یک روند مشاهده می‌شود (کادر زرد رنگ در شکل ۲-الف) که سازوکارهای کانونی زمین‌لرزه‌ها روی آن به صورت چپ‌بر است ولی روند اصلی برای ناحیه، روندهای راست‌بر در امتداد گسله شمال تبریز معرفی شده است.

منابع

Aflaki, M., Shabanian, E., Sahami, S., & Arshadi, M. (2021). Evolution of the stress field at the junction of Talesh–Alborz–Central Iran during the past 5 Ma: Implications for the tectonics of NW Iran. Tectonophysics, 229115.

Aziz Zanjani, A., Ghods, A., Sobouti, F., Bergman, E., Mortezanejad, G., Priestley, K., ... & Rezaeian, M. (2013). Seismicity in the western coast of the South Caspian Basin and the Talesh Mountains. *Geophysical Journal International*, *195*(2), 799-814.

Ghods, A., Shabanian, E., Bergman, E., Faridi, M., Donner, S., Mortezanejad, G., & Aziz-Zanjani, A. (2015). The Varzaghan–Ahar, Iran, Earthquake Doublet (M w 6.4, 6.2): implications for the geodynamics of northwest

Iran. *Geophysical Journal International*, *203*(1), 522-540.

Karasözen, E., Nissen, E., Bergman, E. A., & Ghods, A. (2019). Seismotectonics of the Zagros (Iran) from orogen-wide, calibrated earthquake relocations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *124*(8), 9109-9129.

Khorrami, F., Vernant, P., Masson, F., Nilfouroushan, F., Mousavi, Z., Nankali, H., ... & Aghamohammadi, A. (2019). An up-to-date crustal deformation map of Iran using integrated campaign-mode and permanent GPS velocities. *Geophysical Journal International*, *217*(2), 832-843.

Niassarifard, M., Shabanian, E., Azad, S. S., & Madanipour, S. (2021). New tectonic configuration in NW Iran: Intracontinental dextral shear between NW Iran and SE Anatolia. *Tectonophysics*, *811*, 228886.

Moradi, A. S., Hatzfeld, D., & Tatar, M. (2011). Microseismicity and seismotectonics of the North Tabriz fault (Iran). *Tectonophysics*, *506*(1-4), 22-30.

Taghipour, K., Khatib, M. M., Heyhat, M., Shabanian, E., & Vaezihir, A. (2018). Evidence for distributed active strike-slip faulting in NW Iran: The Maragheh and Salmas fault zones. *Tectonophysics*, *742*, 15-33.