

## دینامیک‌های تکتونیک و فوران‌های آتشفشانی کواترنری: شواهد کمی از برهمکنش ژئودینامیکی در شمال غرب ایران و قفقاز جنوبی

عطیه سناخوان؛ دانشجوی دکترا، گروه علوم زمین، دانشکده علوم و فناوری‌های همگرا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

علی سلگی\*؛ دانشیار گروه علوم زمین، دانشکده علوم و فناوری‌های همگرا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

علی سربی؛ استادیار گروه زمین‌شناسی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، البرز، ایران  
مهران آراین؛ استاد گروه علوم زمین، دانشکده علوم و فناوری‌های همگرا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۳

### چکیده

شمال‌باختر ایران، ارمنستان و آناتولی شرقی بخشی کلیدی از کمربند ماگمایی آلپ-همیالیا هستند که میزبان مراکز آتشفشانی کواترنری متعدد و لرزه‌خیزی شدید به شمار می‌روند. با وجود شواهد فراوان از فوران‌های هولوسن و تاریخی، نقش دقیق ساختارهای تراکشی ناشی از گسل‌های امتدادلغز در کنترل مکان و زمان آتشفشان‌خیزی کمتر به‌طور کمی آزموده شده است. در این پژوهش با ترکیب داده‌های سنجش‌ازدور با وضوح بالا (QuickBird, Corona, Landsat)، کانالوک لرزه‌ای تاریخی-ابزاری تا سال ۲۰۲۵، و شواهد باستان‌شناسی-تاریخی، ۸۲۰ مرکز آتشفشانی با دقت ۹۲٪ شناسایی و تحلیل شدند. آزمون‌های آماری نشان می‌دهد فاصله میانگین دهانه‌ها از گسل‌های فعال (۶/۳ km) به‌طور معنادار کمتر از توزیع تصادفی (۹/۵ ± ۷/۰ km) است ( $p=1.0 \times 10^{-4}$ ). تمرکز بیشینه مراکز در step-over (جابجایی پله‌ای) بازشونده و pull-apart basins (حوضه کششی امتدادلغز)، همراه با هم‌زمانی نسبی سن‌های هولوسن/تاریخی با خوشه‌های لرزه‌ای  $M_w \geq 5$ ، می‌تواند نشان دهنده هم‌زمانی تکتونیک-آتشفشان در مقیاس ناحیه‌ای باشد. نمونه‌های شاخص شامل آراتات، تسخو-کارکار، پوراک و سبلان هستند که شواهد تاریخی و C14 نقش مستقیم گسل‌های کششی در هدایت فوران‌ها را تأیید می‌کنند. بر اساس نتایج، به نظر می‌رسد که سامانه‌های امتدادلغز با مؤلفه کششی، کنترل‌کننده صعود ماگما و زمان‌بندی فوران‌ها در این پهنه‌اند و احتمالاً بتوان گفت که خطر آتشفشانی، در کنار خطر لرزه‌ای، سهم مهمی در افزایش ریسک طبیعی منطقه دارد. این یافته‌ها اهمیت پایش یکپارچه لرزه‌ای-آتشفشانی و مدل‌سازی تنش برای ارزیابی دقیق‌تر مخاطرات در قفقاز جنوبی و شمال‌باختر ایران را برجسته می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: آتشفشان‌زایی کواترنری، گسل‌های امتدادلغز، Pull-apart basins، برهم‌کنش تکتونیک-آتشفشان، شمال‌باختر ایران.

## مقدمه

خاورآناطولی-قفقاز جنوبی-شمال باختر ایران یکی از پهنه‌های اصلی آتشفشان‌زایی کواترنر است (Karakhian et al., 1959; Karapetian et al., 2001; Sanford, 2002)؛ اما پیوند کمی «مکان-زمان فوران‌ها» با پهنه‌های تراکشی ناشی از گسل‌های امتدادلغز هنوز به صورت آزمون‌پذیر نشان داده نشده است. این خلأ تمرکز مقاله حاضر است. در مقیاس جهانی نیز چارچوب‌های تازه‌ای برای برهم‌کنش زلزله-آتشفشان پیشنهاد شده که مکانیزم‌های محتمل برانگیزش را از طریق ویژگی‌های رئولوژیک ماگما، گازدهی باز/بسته و حضور سامانه‌های هیدروترمال طبقه‌بندی می‌کند و نیاز به آزمون میدانی در پهنه‌های تراکشی را برجسته می‌سازد (Rapagnani et al., 2025). این پژوهش با چارچوبی فرضیه‌محور به دنبال آزمون این ادعاست که پهنه‌های کششی ناشی از گسل‌های امتدادلغز - به‌ویژه جابجایی پله‌ای بازشونده و حوضه کششی امتدادلغز - اولین مرتبه کنترل بر جای‌گیری و زمان‌بندی آتشفشان‌خیزی کواترنری در شمال باختر ایران و قفقاز جنوبی دارند.

با وجود مطالعات کلاسیک درباره منشاء ماگما و چارچوب تکتونیکی، رابطه‌ی هم‌زمانی فضایی-زمانی فعالیت آتشفشانی با پهنه‌های تراکشی گسل‌های فعال در این منطقه کمتر به صورت کمی و آزمون‌پذیر بررسی شده است (Karapetian et al., 2001). پرسش اصلی این پژوهش آن است که: آیا فعالیت گسل‌های امتدادلغز منطقه، از طریق ایجاد حوضه کششی امتدادلغز محلی، کنترل مستقیم بر جای‌گیری و زمان‌بندی آتشفشان‌های کواترنری داشته است؟ بر این اساس، سه فرضیه‌ی آزمون‌پذیر مطرح می‌شود:

- چگالی مراکز در جابجایی پله‌ای بازشونده و حوضه کششی امتدادلغز بیش از قطعات غیرکششی همان سامانه‌هاست.
- سن‌های هولوسن/تاریخی فوران‌ها با بیشینه لرزه‌خیزی (کاتالوگ تاریخی/ابزاری) هم‌زمانی نسبی دارند.
- امتداد جریان‌های جوان و ردیف مخروط‌های آتشفشانی با شاخه‌های گسلی نرمال/کششی سامانه‌های امتدادلغز هم‌راستا است.

به این ترتیب، پژوهش حاضر با هدف آزمون فرضیات مورد اشاره، بررسی خواهد شد. تحلیل فاصله/چگالی دهانه‌ها و آزمون‌های آماری، می‌تواند شواهد مستقلی برای انطباق تکتونیک-آتشفشان در پهنه ارائه کند. هدف ما کمی‌سازی کنترل تراکشی جابجایی پله‌ای و حوضه کششی امتدادلغز بر مکان و زمان آتشفشان‌زایی کواترنر در شمال باختر ایران، ارمنستان و خاورترکیه است. با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور، تاریخ‌گذاری زمین‌شناسی و شواهد باستان‌شناسی-تاریخی، می‌توان نشان داد که احتمالاً مراکز آتشفشانی هولوسن و تاریخی این منطقه در ارتباط نزدیک با ساختارهای تکتونیکی فعال شکل گرفته‌اند. چنین یافته‌هایی بر اهمیت فرآیندهای تکتونیکی در مکان‌یابی و زمان‌بندی فوران‌ها و نقش آن‌ها در افزایش مخاطرات طبیعی منطقه تأکید دارد. نمونه‌های نماینده شامل آرات، تسخو-کارکار، پوراک، ویوتس‌سر و سمباتاسار هستند که شواهد تاریخی و C14 آن‌ها در مطالعه تلفیق شده است.

## ویژگیهای منطقه مورد مطالعه:

- تکتونیک منطقه

کمر بند آناطولی-قفقاز-ایران بخش کلیدی از کمر بند آلپ-همیالیاست که پیامد همگرایی صفحه عربستان با اوراسیا را نشان می‌دهد. در شرق/مرکز آناطولی، دو گسل اصلی راستالغز شمال آناطولی و خاورآناطولی با نرخ‌های لغزش چشمگیر، جابه‌جایی بلوک آناطولی را به سوی باختر سامان می‌دهند و در سه‌گانه کاریلووا همگرا می‌شوند؛ این زمینه تکتونیکی با برخورد عربستان-اوراسیا و ساختارهای فروافتادگی نئوتتیس/بیاتلیس تعریف می‌شود (Medved et al., 2021). این

چارچوب تنش-کینماتیکی بستر شکل‌گیری و صعود ماگماها و نیز تمرکز آتشفشان‌های کواترنر را مهیا کرده است. مطالعات کلاسیک و نوین نشان داده‌اند که ماگماتیسم گستردهٔ پسابروردی در آناتولی شرقی و قفقاز/ایران با فرایندهایی مانند شکست/جداشدگی ورقه (slab break-off)، عقب‌رفتگی/پوسته‌کنی سنگ‌کره (delamination/peel-back) و همرفت مقیاس کوچک زیرسنگ‌کره، تغذیه می‌شود (Keskin, 2005; Keskin, 2007; Memiş et al., 2020). شواهد لرزه زمین‌ساختی و ژئوشیمیایی سنگ‌کره و تزریق آستنوسفری داغ زیر آناتولی شرقی پشتیبانی می‌کنند (Medved et al., 2021; Skobeltsyn et al., 2014).

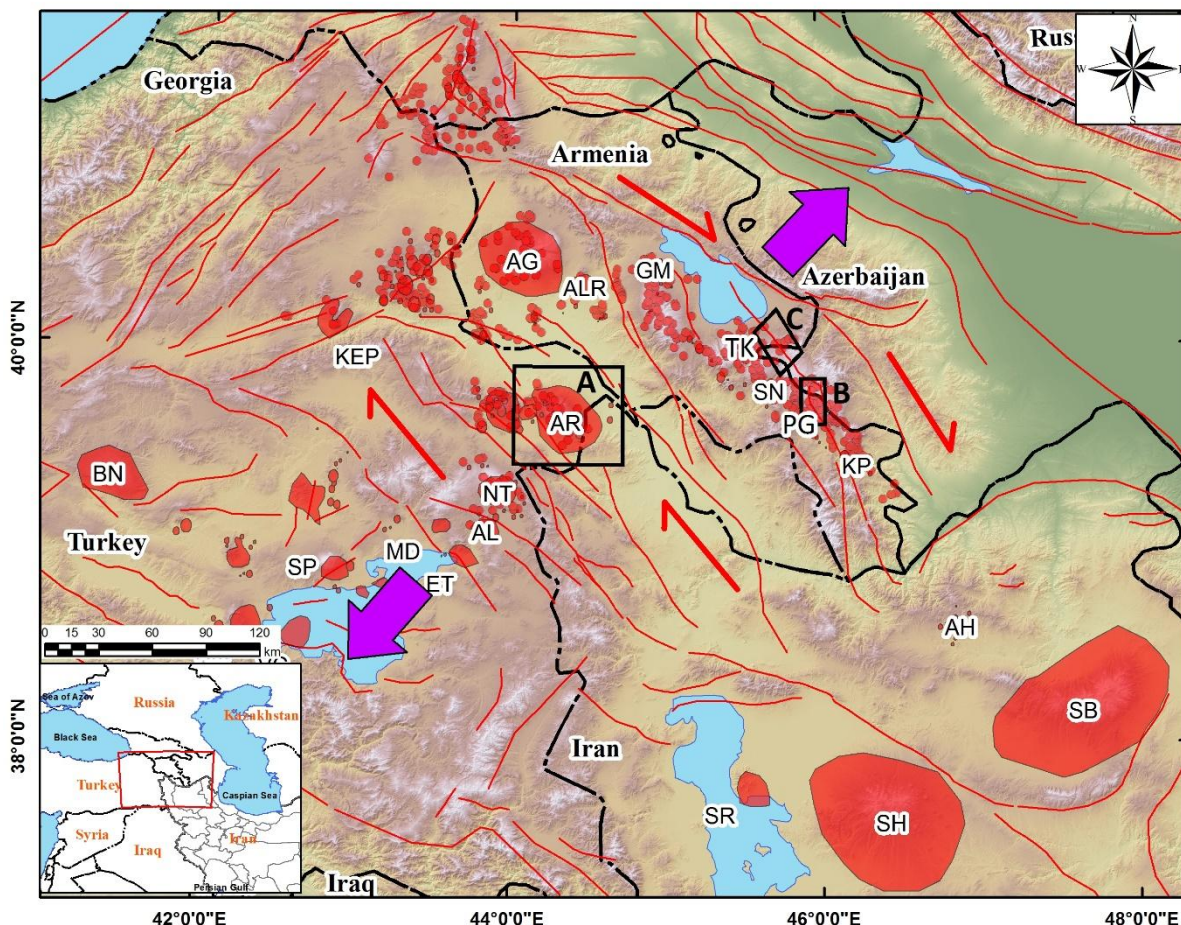
#### - ماگماتیسم منطقه

در ارمنستان، کواترنر نوسان‌دار ماگماتیسم (مثلاً جلگهٔ گغام و کوه آرگاتس) از ~۷۰۰ هزار سال تا ده‌ها هزار سال گذشته ادامه داشته و با تغییرات حجمی و دمایی همراه بوده است. داده‌های ژئوفیزیکی جدید نیز پوسته محلی نازک زیر آرگاتس و گغام را نشان می‌دهد که با حضور ماگمای درون‌پوسته‌ای سازگار است (Kaviani et al., 2018; Tseng et al., 2017). در شمال‌باختر ایران، سامانه‌های سهند-سبلان نمونه‌های شاخص ماگماتیسم پسابروردی‌اند (Fedele et al., 2023). برای سهند، طیف سنگی از کالک‌قلیایی تا ترکیب‌های آدکیتی/غیرآدکیتی اواخر میوسن-کواترنر گزارش شده که بر پیچیدگی منبع (ترکیب آستنوسفری-لیتوسفری و احتمال بخش‌برداری پوسته‌ای) دلالت دارد (Feizizadeh et al., 2020). سبلان نیز یک آتشفشان مرکب پر حجم با شواهد ژئوشیمی است که منشأ و تکاملش در بافت برخورد عربستان-اوراسیا بررسی شده است (Ghalamghash et al., 2016).

#### - برهم‌کنش گسل-آتشفشان

کسکین (Keskin, 2005; Keskin, 2007) مدل ناحیه آناتولی شرقی را «هات‌اسپات در پهنهٔ برخورد» تفسیر می‌کند. بدین ترتیب که در آن، جدایش ورقه لیتوسفری، جایگزینی آستنوسفر داغ و نازک‌شدن سنگ‌کره باعث پیدایش موادی با دمای بالا و فرار کمتر و نهایتاً فوران‌های پسابروردی می‌شود. مدل‌های عددی و توموگرافی نیز برآمدگی فلات را نشان می‌دهند (Memiş et al., 2020). در ایران نیز ضخامت ناحیه گذار گوشته و شواهد لرزه‌ای از قطعه‌قطعه‌شدن ورقه تئیس پشتیبانی کرده‌اند (Kaviani et al., 2018). برهم‌کنش تنش‌های الاستیک بین سامانه‌های راستالغز و مخازن ماگمایی می‌تواند باز/بسته شدن شکستگی‌ها، تسهیل یا ممانعت از بالآمدن ماگما و زمان‌بندی فوران را کنترل کند. این موضوع در الگوهای آناتولی (مرکزی/شرقی) با مدل‌سازی انتقال تنش و تحلیل‌های ساختاری نشان داده شده است (Bonali et al., 2022; Hedger and Gottsmann, 2012). هر چند محدوده مورد بررسی مطالعه فوق، محدود بوده و یافته‌ها کلی هستند. چنین سازوکارهایی می‌توانند برای ناحیه شرقی آناتولی و ادامه ساختاری آن تا ارمنستان و شامل باختر ایران نیز تعمیم داده شوند. در خاورترکیه، کوه‌های آتشفشانی بزرگ مانند آرارات/آغری/داغی، سوپهان، تندورک و نمروت بخش‌هایی از مجموعه پسابروردی‌اند که تکامل ژئومورفیک و خطرپذیری آن‌ها نیز مطالعه شده است. رخدادهای تاریخی فوران در حوالی نیروگاه متسامور نیز در ارمنستان ثبت شده‌اند (Trifonov and Karakhanian, 2004). با این حال، نویسندگان تنها به داده‌های تاریخی اکتفا نموده‌اند. در ارمنستان، نواحی گغام-آرگاتس-سیونیک تنوع سنگی-زمانی وسیعی نشان می‌دهند؛ تغییر گذار از آتشفشان‌های چند منشائی به تک منشائی در سیونیک به تغییرات رژیم تنش نسبت داده می‌شود (Meliksetian et al., 2021). مطالعات رسوبی-کواترنر در درهٔ هرازدان نیز پیوند ژرف میان آتشفشان‌زایی و تکامل ژئومورفیک را گزارش کرده‌اند (Sherriff et al., 2019). از دید ساختاری، نازک‌شدن پوسته، با حضور گرا دیان حرارتی بالا، امکان دارد که با مسیرهای ترجیحی برای صعود ماگما سازگار باشد (Kaviani et al., 2018; Tseng et al., 2017). با این حال مطالعه یاد شده از بررسی دهانه‌های آتشفشانی اجتناب نموده است. در شمال‌باختر ایران، سهند

و سیلان دو مرکز کلیدی‌اند. سهند شواهد هم‌زمانی ماگماتیسیم‌های آداکیتی اواخر میوسن-کواترنر را دارد که در بافت کمر بند ارومیه-دختر و پسابر خوردی تفسیر شده است (Fedele et al., 2023). برای سیلان، ژئوشیمی و پتروژنز فرآیند روشنی از ماگمای پوسته‌ای-گوشته‌ای در زون برخوردی، ارائه می‌کند (Ghalamghash et al., 2016). این شواهد با بازسازی‌های ناحیه‌ای جدید از تحول کمر بند ماگمایی ترک-قفقاز-ایران همخوان است (Grosjean et al., 2022). بدین ترتیب، عدم بررسی توامان داده‌ها لرزه‌خیزی تاریخی و ابزاری، ارتباط دهانه‌های آتشفشانی با گسل‌ها، همگی از مواردی هستند که به عنوان ضعف مطالعاتی در این منطقه به شمار می‌روند.



شکل ۱: توزیع آتشفشان‌های پلی‌ژنیک (پلیگون‌های قهوه‌ای) و میدان‌های تک‌ژنی (نقاط) در فلات آناتولی-ارمنستان-ایران. پیکان‌های قرمز: راست‌لغز راست‌بر (جهت لغزش)؛ پیکان‌های بنفش: امتداد کشش منطقه‌ای. منابع داده: گسل‌های فعال ((Gulen et al., 2011)), اختصارات: AG=Aragats; PG=Porak group; TK=Tskhouk-Karkar; AR=Ararat; KEP=Kars; GM=Gegham HL; ET=Etrusk; BN=Bingöl; AH=Ahar VF; ALR=Arailer; AL=Aladağ; NM=Nemrut; MD=Meydan Dağ; KP=Kapan HL; JV=Kechut-Javakhk VP; Erzurum VP; SR=Saray; SP=Süphan; SN=Syunik HL; SM=Samsari VF; SH=Sahand; SB=Sabalan; VC=Van caldera; TN=Tendürek.

## روش مطالعه

برای آزمون سه فرضیه مطرح شده، ما از داده‌های چندمنبعی سنجش‌ازدور، کاتالوگ لرزه‌ای تاریخی و دستگاهی، شواهد باستان‌شناسی-تاریخی، و مجموعه‌ای از داده‌های تصادفی استفاده کردیم.

- داده‌های سنجش‌ازدور و استخراج مراکز آتشفشانی

مراکز آتشفشانی با تفسیر بصری روی تصاویر (QuickBird (0.6 m, 2002–2006) ، Corona KH-4B (2.7 m, 1967–1972) و Landsat-7 ETM+ (30 m, 1999–2003) شناسایی شدند. این داده‌ها از سایت [www.earthexplorer.com](http://www.earthexplorer.com) اخذ گردیدند. این تنوع وضوح مکانی امکان کنترل مقیاس‌های متفاوت و تغییرات زمانی را فراهم کرد. عدم قطعیت مکانی تشخیص دهانه‌ها با مقایسه بین QuickBird و Corona حدود  $100 \pm$  m برآورد شد. مراکز آتشفشانی به صورت واحدهای ماکروسکوپی (cone, maar, lava shield) تعریف شدند و خوشه‌های کمتر از ۱ km به‌عنوان یک مرکز در نظر گرفته شدند. در مجموع ۸۲۰ مرکز استخراج شد. صحت‌سنجی در ۴۵ نقطه با داده‌های میدانی و GoogleEarth Pro انجام و دقت موقعیت‌یابی حدود  $\leq 92\%$  به دست آمد. این داده‌ها برای بررسی چگالی دهانه‌های آتشفشانی استفاده خواهد شد (فرضیه اول).

- کاتالوگ لرزه‌ای

کاتالوگ لرزه‌ای از ترکیب داده‌های مختلف تهیه شد: (الف) زمین‌لرزه‌های تاریخی از منابع منطقه‌ای (Ambraseys, 2009) و دیگر متون محلی، (ب) داده دستگاهی (NEIC (1964–2025) ، و (ج) ISC (1900–2025). رکوردهای تکراری حذف و بزرگی‌ها به Mw یکسان‌سازی شدند. آستانه کامل بودن (Mc) با روش maximum curvature تعیین و پارامترهای a و b با روش آکی و ریشتر (Aki and Richards, 2002) محاسبه شدند. عدم قطعیت Mc حدود  $\pm 0.1$  و b حدود  $\pm 0.05$  است. این بخش از روش برای بررسی ارتباط فوران‌ها با لرزه خیزی گذشته و حال استفاده می‌گردد (فرضیه دوم).

- داده‌های تاریخی و باستان‌شناسی

شواهد تاریخی-باستان‌شناسی، تاریخ‌گذاری‌های باستانی عمدتاً از منابع یونانی، ارمنی و اسلامی و داده‌های C14، گردآوری شدند. دقت زمانی داده‌های C14 بین  $10 \pm$  تا  $100 \pm$  سال متغیر است و در تحلیل زمان‌بندی فوران‌ها لحاظ شد.

- داده‌های تصادفی

برای آزمون نقش گسل‌ها،  $10/000$  نقطه تصادفی در گستره مطالعه (با حذف نواحی دریاچه و ارتفاعات یخچالی) تولید شد. فاصله میانگین این نقاط تا نزدیک‌ترین گسل فعال با مراکز آتشفشانی مقایسه گردید. تفاوت میانگین‌ها با آزمون permutation ( $10/000$  تکرار) سنجیده شد و سطح معنی‌داری  $p < 0.001$  در نظر گرفته شد. این بخش از بررسی برای مطالعه ارتباط ردیف مخروط‌های آتشفشانی و شاخه‌های گسلی استفاده خواهد شد (فرضیه سوم).

- تحلیل‌های آماری

توزیع فاصله‌ها با آزمون دونمونه‌ای Kolmogorov-Smirnov و میانگین‌ها با t-test مقایسه شدند. کلیه محاسبات در Python (SciPy v1.10) انجام گرفت. آزمون‌های permutation، K-S، و t-test همگی کاهش معنادار فاصله دهانه‌ها تا گسل‌های فعال و تمرکز آن‌ها در ساختارهای کششی را تأیید می‌کنند و بدین‌ترتیب پیوند مستقیم میان روش‌های به‌کاررفته و یافته‌های اصلی مطالعه روشن می‌شود.

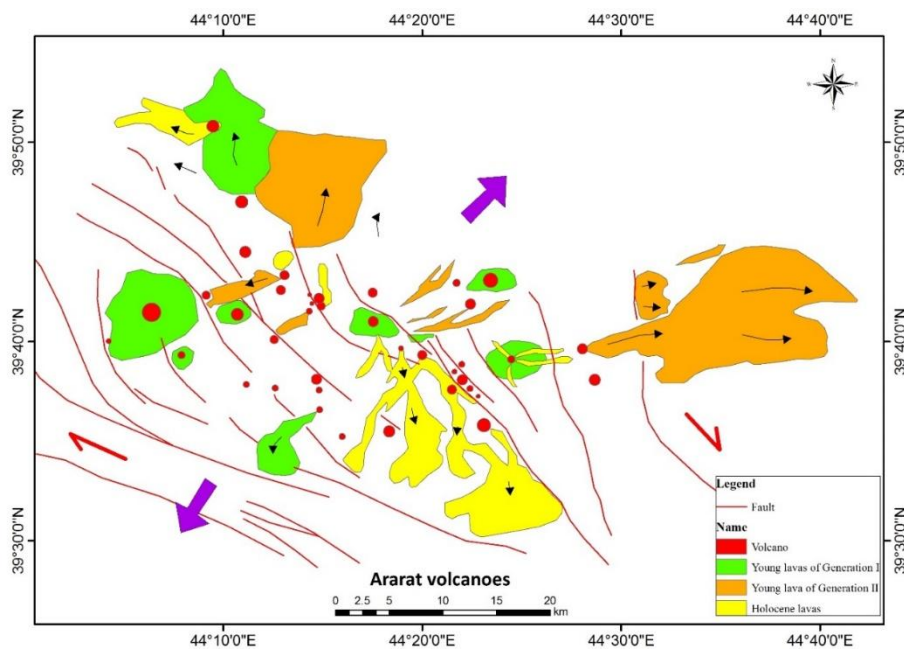
## تحلیل و نتایج

در گستره مورد مطالعه در مجموع ۸۲۰ مرکز آتشفشانی شناسایی شد که شامل ۷ آتشفشان پلی‌ژنیک عمده (مانند آرات، آرگانس، نمرت، سبلان، سهند و ...) و صدها مرکز تک‌منشائی پراکنده در حوضه‌های کششی است (شکل ۲). بزرگ‌ترین مراکز پلی‌ژنیک دهانه‌هایی با قطر ۲-۵ km و جریان‌های گدازه‌ای به طول بیش از ۱۵ km دارند. این نتایج مبنای تحلیل‌های مکانی و زمانی بعدی است. به طور کلی، شکل قرارگیری این دهانه‌ها، الگوهای خطی و دایره‌ای را دنبال می‌کند.

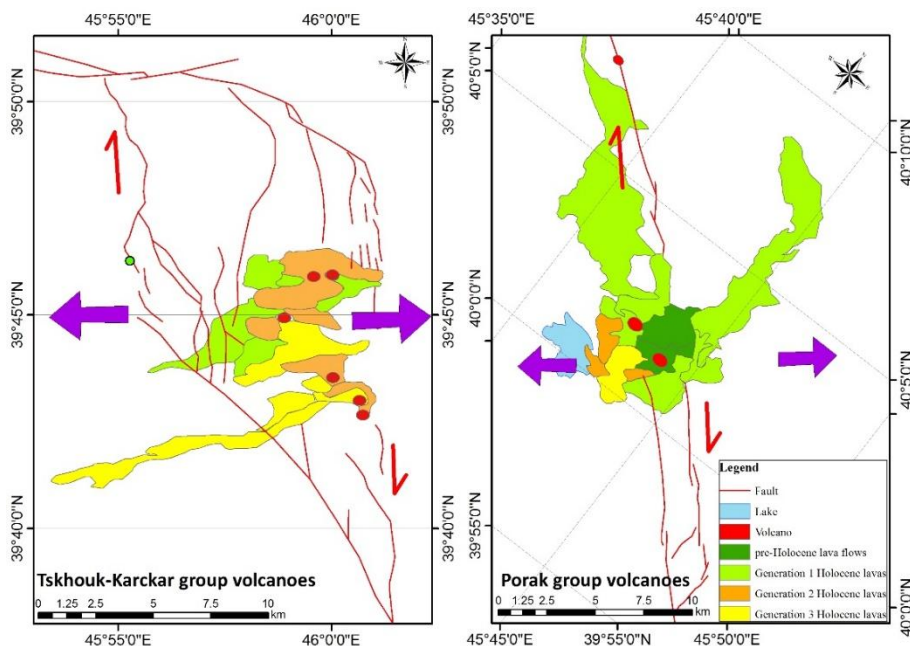
### - آتشفشان‌های عمده پلی‌ژنیک منطقه

در گستره مطالعه پنج آتشفشان پلی‌ژنیک اصلی قرار دارند: سهند، سبلان، آرات، تسخو-کارکار، و سمباتاسار (شکل‌های ۳ و ۲). این آتشفشان‌ها گستره‌های گدازه‌ای و سازندهای دگرشیب جوان (پلیستوسن-هولوسن) را تشکیل داده‌اند و کانون‌های اصلی ماگماتیسم کواترنری منطقه به شمار می‌آیند.

- سهند: مخروط مرکب با بیش از ۱۲ مرکز جانبی؛ آخرین فوران‌های بازالتی احتمالاً هولوسن میانی (Feizizadeh et al., 2020)
  - سبلان: ساختار کالدرایی با میدان‌های گدازه جوان در دامنه شمالی؛ شواهد فوران تاریخی/باستانی گزارش شده است (Saber et al., 2022).
  - آرات: مخروط استراتوولکانو با دهانه‌های فرعی فعال در کواترنر پسین؛ جریان‌های بازالتی دره‌های شعاعی را پر کرده‌اند (Karakhanian et al., 2004).
  - تسخو-کارکار: مجموعه‌ای از مراکز متعدد در ارمنستان؛ جریان‌های هولوسن در منابع تاریخی ذکر شده‌اند (Meliksetian et al., 2021).
  - سمباتاسار: مرکز پلی‌ژنیک کوچک‌تر با دهانه‌های بازالتی-آندزیتی؛ داده‌های C14 سن هولوسن پایانی را نشان می‌دهد (Meliksetian et al., 2021).
- جدول ۱ ویژگی‌های کلیدی این آتشفشان‌ها را خلاصه می‌کند، از جمله ارتفاع، قطر دهانه، سن آخرین فوران و منابع اصلی. این تجمیع داده مبنای تحلیل‌های بعدی ما در ارتباط با سامانه‌های کششی و غسل‌های امتدادلغز است.



شکل ۲: نسل‌های مختلف فوران‌های آتشفشان آرارات. فلش‌های مشکی جهت حرکت جریان‌گدازه را نمایش می‌دهند. راستای حرکت امتداد لغز راستگرد گسل‌ها با فلش قرمز و امتداد تنش کششی با فلش‌های بنفش دیده می‌شود. دایره‌های قرمز، دهانه‌های آتشفشان هستند.



شکل ۳: نقشه تکتونیک آتشفشان‌های منطقه. سمت راست گروه آتشفشانی پوراک و سمت چپ تسخو-کارکار. فلش‌های قرمز سازوکار راستالغز راستگرد گسل‌ها را نشان می‌دهند. فلش‌های بنفش امتداد نیروی کششی حاصل از حوضه کششی امتداد لغز را نمایش داده‌اند. دایره‌های قرمز، دهانه‌های آتشفشان هستند.

جدول ۱: خلاصه ویژگی‌های تکتونیکی، سن و شواهد فعالیت آتشفشانی کواترنری در ایران، ارمنستان و خاور ترکیه

نام	موقعیت	چارچوب تکتونیکی	آخرین فعالیت	شواهد کلیدی	منابع
آرارات	مرز ترکیه- ایران- ارمنستان	حوضه کششی امتدادلغز پیچیده در امتداد گسل ماکو-نخجوان	هولوسن (~۱۰ ka) و تاریخی (۱۸۴۰ م)	جریان‌های گدازه جوان، شواهد باستان‌شناسی فرهنگ کورا-ارس، گزارش‌های تاریخی	(Karakhanian et al., 2002)
تسخو- کارکار	سیونیک، ارمنستان	حوضه کششی امتدادلغز شامباک- سوان	هولوسن (نسل ۳ گدازه)	گرادیان ژئوترمال بالا، آثار عصر مس-سنگی روی گدازه‌های قدیمی‌تر	(Meliksetian et al., 2021)
پوراک	شمال دریاچه سوان	حوضه کششی امتدادلغز شامباک- سوان - سراغ-سوان	تاریخی (~۱۱۰۰ ق.م)	تاریخ‌گذاری C14، آثار باستانی روی گدازه‌های قدیمی‌تر، سنگ‌نگاره‌های هزاره ۵ ق.م.	(Meliksetian, 2013)
واپوتس سر	جنوب دره آرپا، ارمنستان	ساختار کششی مرتبط با گسل‌های فعال	تاریخی (~۷۰۰ م)	C14 از ذغال زیر گدازه، آثار باستانی روی نسل‌های قدیمی‌تر	(Karakhanian et al., 2002)
سمباتاسار	شمال دره یغگندزور، ارمنستان	ساختار کششی محلی	تاریخی (~۱۶۰۰ ق.م)	C14 از ذغال زیر گدازه، آثار عصر برنز/آهن روی گدازه‌های قدیمی‌تر	(Karakhanian et al., 2002)
سهند	آذربایجان شرقی، ایران	کمر بند ماگمایی ارومیه-دختر، ماگماتیسیم پسابرخوردی	کواترنر	ژئوشیمی آدکیتی، سنگ‌های اواخر میوسن	(Fedele et al., 2023)
سبلان	آذربایجان شرقی، ایران	کمر بند ماگمایی ارومیه-دختر، پسابرخوردی	هولوسن (شواهد فومرولی)	ژئوشیمی و پتروژنز، تاریخ‌گذاری زیرکن، چشمه‌های آبگرم فعال	(Ghalamghash et al., 2016)

### - تکتونیک و لرزه خیزی

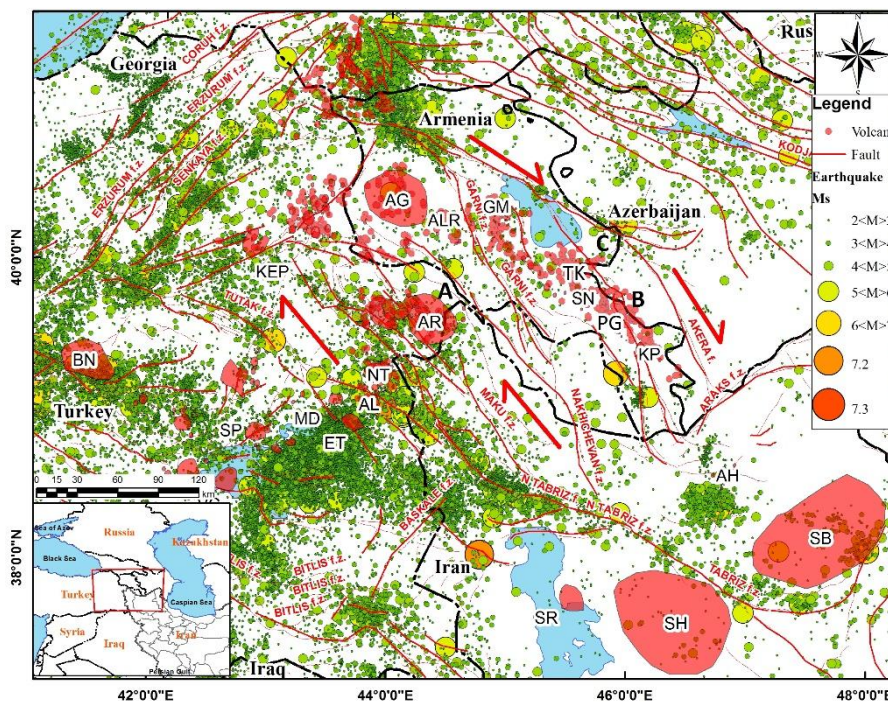
نقشه هم‌گذاری آتشفشان‌های کواترنری، گسل‌های فعال و رخداد‌های لرزه‌ای (شکل ۴) نشان می‌دهد که مراکز آتشفشانی چند منشائی و تک منشائی در امتداد پهنه‌های امتدادلغز با مؤلفه کششی و درون ساختارهای حوضه کششی امتدادلغز تمرکز یافته‌اند؛ الگویی که با چارچوب تکتونیکی «پسابرخورد» در آناتولی شرقی، نازک‌شدن لیتوسفر، جدایش ورقه فرورفته، و جایگزینی آستنوسفری سازگار است. هم‌راستایی بزرگ‌مقیاس رخداد‌های لرزه‌ای با پهنه‌های کششی پیرامون دریاچه سوان و دشت آرارات و نیز در امتداد کمان تبریز-سهند-سبلان نشان می‌دهد که گره‌های انتقال تنش سامانه‌های

امتدادلغز، همان جاهایی‌اند که مسیرهای ترجیحی صعود ماگما باز می‌شوند (Ambraseys and Melville, 1982; Baftipour et al., 2022; Jarahi, 2017; Karakhanian et al., 2004; Yılmaz et al., 1998).

در شاخه غربی-میانی کمر بند، آزارات-سوان-سیونیک از نمونه‌های شاخص هم‌مکانی آتشفشان هولوسن و لرزه‌خیزی است. آزارات به صورت حوضه کششی امتدادلغز هم‌محور با شاخه‌های راست‌لغز سردارایات-نخجوان و ماکو است. این آتشفشان، ردیف دهانه‌ها و جریان‌های جوان هم‌راستا با شاخه‌های فرعی گسل، کانال‌های تغذیه دایک را دنبال می‌کند. رخداد زمین لرزه تاریخی ۱۸۴۰ میلادی ( $M_w \approx 7.4$ ) که هم‌زمان با فعالیت انفجاری دامنه شمالی آزارات گزارش شده، یک گواه زمانی-مکانی روشن از برهم‌کنش گسلش-آتشفشان در این منطقه است (Ambraseys and Melville, 1998; Karakhanian et al., 2004; Yılmaz et al., 1982). در شمال دریاچه سوان، گروه پوراک میان گسل‌های شامب-سوان و سراغ-سوان در کانون بیشینه کشش جای گرفته و تاریخ‌گذاری رادیوکربنی و شواهد باستان‌شناسی، نسل سوم گدازه‌ها را در بازه تاریخی-هولوسن جای می‌دهد؛ وضعیتی که بیانگر تحریک ماگما درون حوضه کششی امتدادلغز است (Karakhanian et al., 2002; Meliksetian et al., 2021). به سوی جنوب، تسخو-کارکار و فلات سیونیک با گردایان ژئوترمال بالا، نشان می‌دهند که شکستگی‌های نرمال-امتدادلغز علاوه بر هدایت گدازه‌ها، سامانه هیدروترمال فعال و احتمالاً انبارهای کم‌عمق را نیز کنترل می‌کنند (Meliksetian et al., 2021).

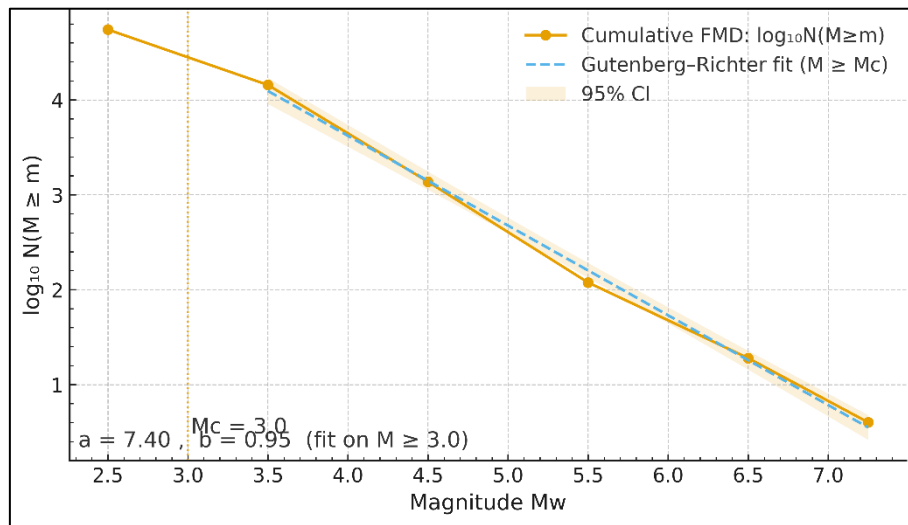
در شاخه شرقی کمر بند، هم‌جواری لرزه‌خیزی با آتشفشان‌های سهند و سبلان در امتداد گسل شمال تبریز، تصویری کم‌ابهام از کنترل ساختاری محل و زمان فعالیت آتشفشانی به دست می‌دهد. سهند با هم‌زمانی مجموعه‌های آداکیتیدر اواخر میوسن-کواترنر بیانگر منشاء گوشته‌ای است؛ نشانه‌ای از پویایی ژرف‌ساخت که با تنش‌های کششی-برشی میدان تبریز هم‌افزا شده است (Fedele et al., 2023). در سبلان، رسانندگی‌های بالا در داده‌های مگنتوتلوریک، ذخایر گرمایی فعال و هم‌راستایی آشکار با گسل‌های NE-SW و NW-SE، مسیرهای ترجیحی جریان سیال/ماگما را نشان می‌دهد که با چیدمان خوشه‌های لرزه‌ای پیرامون تبریز سازگار است (Ghalamghash et al., 2016; Rahimzadeh et al., 2023).

بررسی لرزه‌خیزی همین پهنه، با  $Mc \approx 3.0$  و  $b \approx 0.95$ ، تصویری سازگار با کمر بندهای امتدادلغز فعال عرضه می‌کند. مقدار پارامتر  $b$ : نشان‌دهنده توازن نسبی ریزلرزه و وجود پتانسیل رویدادهای بزرگ است. پیکربندی‌ای که معمولاً در مرزهای حوضه کششی امتدادلغز رخ می‌دهد و می‌تواند در باز-بسته شدن شکستگی‌ها و صعود ماگما نقش داشته باشد (Bonali et al., 2012; Hedger and Gottsmann, 2022). تمرکز رخدادها  $M_w \geq 5$  در پیرامون آزارات-پوراک-تسخو-کارکار و نیز در امتداد تبریز-سهند-سبلان، همراه با شواهد زمین‌ساختی کششی و تاریخ‌گذاری‌های مستقل، بر این تعبیر می‌افزاید که پهنه‌های تراکشی سامانه‌های راست‌لغز، مکان و زمان فعالیت آتشفشانی هولوسن-تاریخی را در این ناحیه کنترل کرده‌اند (Karakhanian et al., 2002; Karakhanian et al., 2004; Yılmaz et al., 1998). به این ترتیب، نقشه حاضر نه تنها یک هم‌مکانی ساده را نمایش نمی‌دهد، بلکه الگوی منسجمی از هم‌راستایی کانون‌های لرزه‌ای، مسیرهای دایک، و میدان‌های آتشفشانی را در مقیاس ناحیه‌ای آشکار می‌کند؛ الگویی که با مدل‌های ژئودینامیکی نازک‌شدن لیتوسفر و جایگزینی آستنوسفری داغ در فلات آناتولی-قفقاز-ایران هم‌خوان است (Keskin, 2005; Keskin, 2007; Memiş et al., 2020; Skobeltsyn et al., 2014).



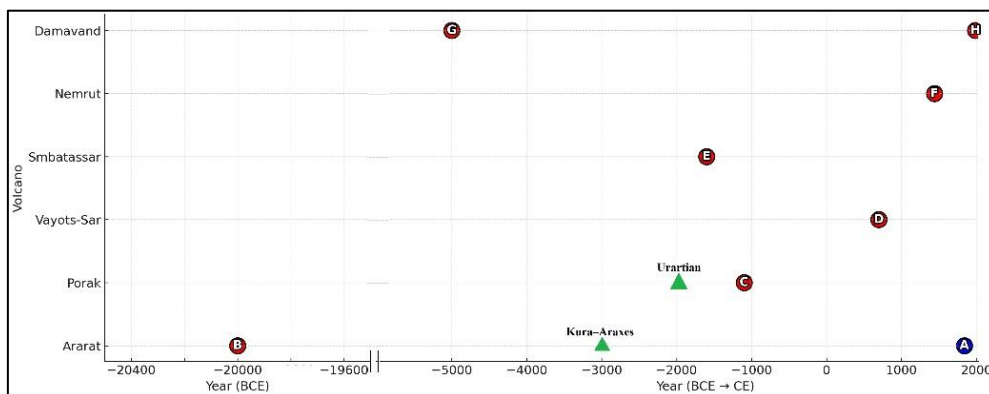
شکل ۴: نقشه هم‌گذاری آتشفشان‌های کواترنری، گسل‌های فعال و زمین‌لرزه‌ها در شمال‌باختر ایران، ارمنستان و خاور ترکیه. پلیگون‌ها و نمادها مراکز/میدان‌های آتشفشانی (AG, AR, TK, PG, ...) را نشان می‌دهند؛ گسل‌های اصلی با خطوط تیره نمایش داده شده‌اند. زمین‌لرزه‌ها بر اساس بزرگای هم‌ارز  $M_w$  طبقه‌بندی شده‌اند (کلاس‌های رنگی در لگند). هم‌مکانی خوشه‌های لرزه‌ای با پهنه‌های کششی نوع حوضه کششی امتدادلغز (به‌ویژه AR-PG-TK-SN) و هم‌راستایی با سامانه تبریز-سهند-سبلان (NTF-SH-SB) دیده می‌شود؛ این الگو با کنترل ساختاری بر مکان‌یابی و زمان‌بندی آتشفشان‌خیزی هولوسن-تاریخی سازگار است.

تحلیل توزیع فراوانی-بزرگی زمین‌لرزه‌های شمال‌باختر ایران نشان می‌دهد که مقدار کامل بودن کاتالوگ در این ناحیه برابر با  $M_c=3.0$  است. برازش رابطه‌ی گوتنبرگ-ریشتر برای رویدادهای بزرگ‌تر از این مقدار منجر به برآورد  $b \approx 0.95$  شد. مقدار نزدیک به واحد برای ضریب  $b$  با مقادیر متداول در مناطق تکتونیکی فعال همخوانی دارد (Jarahi, 2017) و بیانگر آن است که احتمال وقوع زمین‌لرزه‌های بزرگ در منطقه وجود دارد، هرچند فراوانی آنها کم است. علاوه بر این، مقدار بالای پارامتر  $a$  ( $\approx 7.40$ ) نرخ لرزه‌خیزی قابل توجه شمال‌باختر ایران را در مقایسه با سایر بخش‌های کشور تأیید می‌کند (شکل ۵).



شکل ۵: توزیع فراوانی-بزرگی زمین‌لرزه‌های شمال‌باختر ایران. محور افقی بزرگی گشتاوری (Mw) و محور عمودی  $\log_{10}N(M \geq m)$  را نشان می‌دهد. خط‌چین بیانگر برازش رابطه‌ی گوتنبرگ-ریشتر برای رویدادهای با بزرگی بیش از  $M_c = 3.0$  و ناحیه‌ی سایه‌دار بازه‌ی اطمینان ۹۵٪ برازش است.

برای ارائه‌ی یک دیدگاه جامع از توزیع زمانی فعالیت‌های آتشفشانی و رخداد‌های لرزه‌ای در شمال‌باختر ایران، ارمنستان و خاورترکیه، کلیه‌ی داده‌های تاریخی و باستان‌شناسی در قالب یک خط زمان گردآوری شد (شکل ۶). این شکل هم قدمت فعالیت‌های آتشفشانی را نشان می‌دهد (مانند جریان‌های جوان آتشفشان آرارات در حدود ۲۰ هزار سال پیش) (Karakhanian et al., 2004)، و هم فوران‌های تاریخی مستند همچون نمروود در سال ۱۴۴۱ میلادی و آرارات در سال ۱۸۴۰ میلادی که همراه با زمین‌لرزه‌ی ویرانگر  $M_w \sim 7.4$  بوده است. همچنین فوران‌های تاریخ‌گذاری‌شده باستان‌شناسی در پوراک (~۱۱۰۰ ق.م) و سمباتاسار (~۱۶۰۰ ق.م) و مسدود شدن رود آرپا بر اثر فوران وایوتس‌سر (~۷۰۰ م) بیانگر هم‌زمانی سکونت انسانی با خطرات آتشفشانی است. این تجمیع داده‌ها نشان می‌دهد که تمدن‌های کهنی مانند کورا-آراکس و اورارتویی بارها در معرض تهدید مستقیم فعالیت‌های آتشفشانی قرار گرفته‌اند.



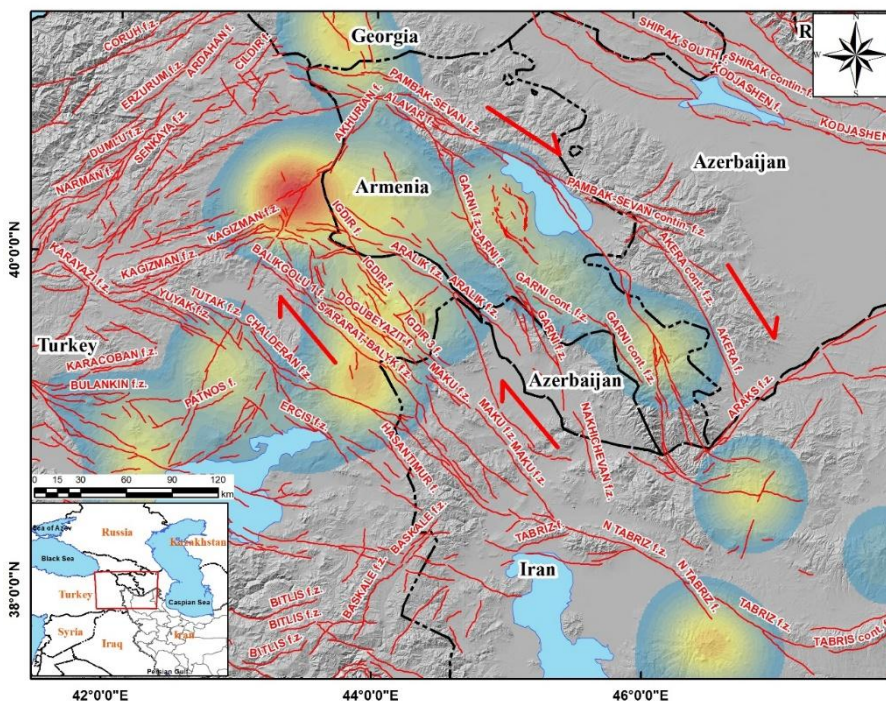
شکل ۶: خط زمان فوران‌های آتشفشانی و رخداد‌های لرزه‌ای در شمال‌باختر ایران، ارمنستان و خاورترکیه. دایره‌های قرمز فوران‌ها آتشفشانی و دایره‌ی آبی فوران همراه با زلزله هستند. A:(Ambraseys, 2009; Karakhanian et al., 2004) B:(Yılmaz et al., 1998) C:(Meliksetian, 2013) D:(Karakhanian et al., 2002) E:(Karakhanian et al., 2002) F:(Yılmaz et al., 1998) G:(Davidson et al., 2004) H:(Berberian, 1994)

### - پراکندگی آتشفشان ها و گسل ها

شکل ۷ یک میدان چگالی مکانی از دهانه‌ها/مراکز آتشفشانی را روی ردّ گسل‌های فعال منطقه آناتولی-قفقاز-ایران نمایش داده است. لب‌های پُرچگالی (هاله‌های زرد-قرمز) به‌طور سیستماتیک در امتداد زون‌های امتدادلغز راست‌بر با مؤلفه کششی کشیده شده‌اند و در چند «گره انتقال تنش» به بیشینه می‌رسند. این چینش سه مشاهده قوی و قابل استناد ایجاد می‌کند:

### - هم‌راستایی آنیزوتروپ چگالی با امتداد گسل‌ها

تمام لب‌های اصلی چگالی امتداد NW-SE دارند؛ همان امتدادی که برای شاخه‌های راست‌لغز عمده (Pambak-Sevan-Syunik و شاخه‌های هم‌راستا تا آکره-ارس) دیده می‌شود. این هم‌راستایی بدان معناست که محورهای اصلی کشش موضعی، جهت‌گیری میدان دهانه‌ها را تعیین کرده و مسیرهای ترجیحی تغذیه دایک‌ها را هم‌راستا با راستای لغزش باز نگه داشته‌اند. چنین هم‌راستایی «محور بیضی‌های چگالی-محور گسل» مطابق انتظار مدل‌های تکتونولوکانی در زون‌های راست‌لغز است که در آن جابجایی پله‌ای بازشونده به حوضه کششی امتدادلغز و میدان‌های تک‌ژنی/چندژنی فعال تبدیل می‌شوند (Adiyaman et al., 1998; Karakhanian et al., 2002; Yilmaz et al., 1998).



شکل ۷: نقشه چگالی هسته‌ای مراکز/دهانه‌های آتشفشانی بر روی تریس گسل‌های فعال در کمربند آناتولی-قفقاز-ایران. رنگ‌های گرم نشان‌دهنده چگالی بالاتر دهانه‌هاست. سطح چگالی با کرنل گاوسی محاسبه و بر حسب  $\text{km}^{-2}$  نرمالیزه شده است.

### - بیشینه‌های موضعی در گره‌های انتقال تنش

سه بیشینه منطقه‌ای که در نقشه واضح‌اند، هر سه با گره‌های انتقال تنش جابجایی پله‌ای هم‌مکان‌اند:

- دالان سوان-آرارات-سیونیک (حداصل شامب-سوان/اسراغ-سوان تا سرداراپات-نخجوان/ماکو): دو هسته پُرچگالی پشت‌سر هم دیده می‌شود که دقیقاً روی حوضه کششی امتدادلغز سوان-گرنی و ادامه آن به سوی آرارات می‌نشینند. همین پهنه میزبان مراکز هولوسن-تاریخی پوراک و تسخو-کارکار و رخداد تاریخی ۱۸۴۰

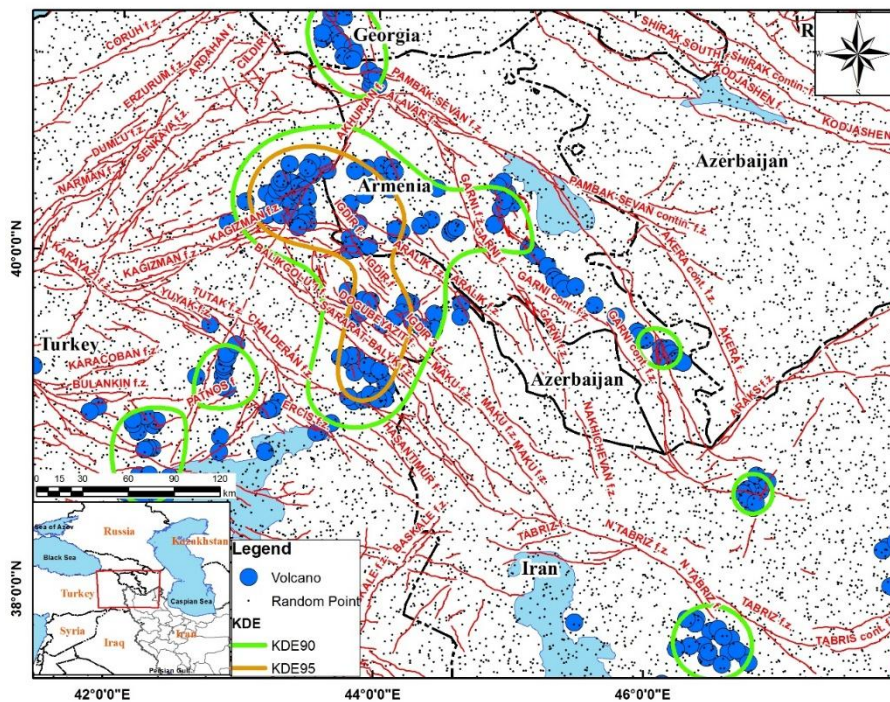
- آارات است؛ هم‌مکانی‌ای که در منابع میدانی و تاریخی هم گزارش شده است (Karakhanian et al., 2002; 2004; Ambraseys & Melville, 1982).
- پهنه وان-ارچی‌ش-پاتنوس: لب جنوبی-غربی نقشه روی کناره شمالی دریاچه وان می‌نشیند؛ جایی که نمرود، سپیان و توندک در امتداد زون‌های تراکشی پی‌درپی قرار دارند. این محل در الگوهای «پسابر خورد بدون پلوم» به‌عنوان یکی از گره‌های اصلی تزریق آستوسفری داغ و نازک شدن لیتوسفر شناخته می‌شود (Keskin, 2005; Memiş et al., 2020).
  - پهنه تبریز-سهند-سبلان: در جنوب شرقی نقشه یک هسته چگالی روشن روی سامانه تبریز قرار دارد که به سمت سهند و سبلان امتداد می‌گیرد؛ هم‌راستایی که با شواهد زمین‌گرایی-مگنتوتلوریک سبلان و مسیرهای دایک سهند همخوان است. (Ghلامghash et al., 2016; Rahimzadeh et al., 2023)
- هم‌پوشانی چگالی با استپ‌اورهای بازشونده و کاهش چگالی در خم‌های فشاری در امتداد بخش‌هایی که گسل‌ها به صورت موازی و هم‌جهت پیش می‌روند، سطح چگالی یکنواخت‌تر است؛ اما هر جا که شاخه‌ها گسستگی عرضی پیدا می‌کنند (جابجایی جانبی و جابجایی پله‌ای مثبت)، یک هسته چگالی روی همان استپ‌اور پدیدار می‌شود (نمونه کلاسیک در سوان-گرنی). برعکس، در بخش‌هایی که هندسه گسل‌ها به سوی خم‌های فشاری می‌رود، چگالی به صورت حاشیه‌ای و پراکنده مشاهده می‌شود. این واگرایی-همگرایی چگالی با منطق مکانیکی باز-بسته شدن شکستگی‌ها در سامانه راست‌لغز سازگار است و نشان می‌دهد بازشدگی موضعی مؤلفه کششی شرط لازم برای خوشه‌بندی دهانه‌هاست. (Bonali et al., 2012; Hedger & Gottsmann, 2022)

### - شواهد کمی کنترل ساختاری

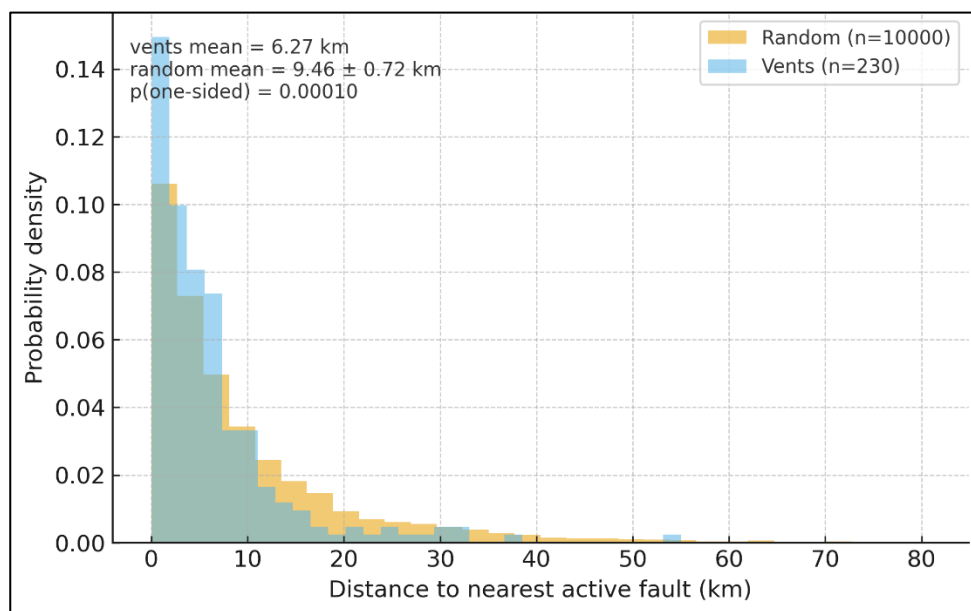
نقشه تحلیلی که در شکل ۸ ارائه شده، نشان می‌دهد «کاهش فاصله» در کجا متمرکز است. کنتورهای چگالی دهانه‌ها (KDE؛ صدک‌های ۹۰ و ۹۷) کانون‌های تجمع را مشخص می‌کند و رنگ‌بندی دهانه‌ها برحسب فاصله نقطه‌ای تا نزدیک‌ترین گسل این تمرکز را کمی می‌کند. مقایسه درون/بیرون هسته‌های KDE نشان می‌دهد میانگین فاصله دهانه‌های درون KDE90 برابر  $2/94 \text{ km}$  ( $n=23$ ) و برای بیرون KDE90 برابر  $6/64 \text{ km}$  ( $n=207$ ) است؛ اختلاف  $3/69 \text{ km}$  در آزمون پرموتیشن معنادار است ( $p=0.00120$ ). افزون بر این، هم‌بستگی اسپیرمن میان «نمره KDE هر دهانه» و «فاصله تا گسل» منفی است ( $r \approx -0.234$ )، به این معنا که هرچه شدت تجمع محلی بیشتر باشد، فاصله تا گسل کمتر می‌شود. در نتیجه، شکل ۱۰ نه فقط موقعیت خوشه‌های آتشفشانی را نشان می‌دهد، بلکه روشن می‌کند که اثر نزدیک شدن به گسل عمدتاً در همین خوشه‌ها (احتمالاً نواحی کششی) به بیشینه می‌رسد؛ بدین ترتیب نقشه مکانی اثر آماری مشاهده‌شده در شکل ۹ را ارائه می‌دهد و مکان‌های اولویت‌دار برای پایش مشترک لرزه‌ای-آتشفشانی را مشخص می‌کند.

الگوی توزیعی فاصله‌ها، یک جابه‌جایی سیستماتیک به سوی مقادیر کوچک را نشان می‌دهد؛ چگالی احتمال برای دهانه‌ها در بازه زیر ۱۰ کیلومتر به‌طور محسوسی از نمونه‌های تصادفی پیشی می‌گیرد و دنباله راست هر دو توزیع، هرچند کشیده است، اثر غالب را تغییر نمی‌دهد. برآورد میانگین‌های مرجع ( $10^3$  تکرار) بازه ۹۵٪ برای حالت تصادفی را حدود ۸ تا ۱۱  $\text{km}$  نشان می‌دهد، در حالی که میانگین دهانه‌ها ( $6/27 \text{ km}$ ) به‌روشنی بیرون از این بازه قرار دارد؛ بنابراین تفاوت مشاهده‌شده تنها ناشی از شکل توزیع نیست، بلکه یک کاهش معنادار و پایدار در کل جمعیت دهانه‌هاست ( $p=1.0 \times 10^{-4}$ ). از منظر بزرگی اثر نیز، اختلاف میانگین‌ها ( $3 \text{ km}$ ) معادل کاهش ۳۳/۹٪ نسبت به مرجع تصادفی است و به‌صورت بصری با شیفت کلی منحنی آبی به چپ در شکل ۹ دیده می‌شود. این نتیجه، شواهد آماری مستقلی فراهم می‌کند که

مراکز آتشفشانی منطقه در مقیاس ناحیه‌ای به گسل‌های فعال نزدیک‌تر از انتظار تصادفی قرار گرفته‌اند و ارتباط گسلش و آتشفشان را بار دیگر تایید می‌کنند.



شکل ۸: فاصله تا نزدیک‌ترین گسل فعال برای دهانه‌ها/مراکز هولوسن-تاریخی. نمادها بر اساس مقدار نزدیک‌ترین فاصله تا گسل رده‌بندی شده‌اند؛ خطوط سبز



شکل ۹: توزیع فاصله دهانه‌ها (نارنجی) و ۱۰۰۰۰ نمونه تصادفی (آبی) و آمار بوت‌استرپ میانگین‌ها. میانگین دهانه‌ها ۶/۲۷ km و میانگین نمونه‌های تصادفی ۹/۴۸ ± ۰/۷۳ km است. ( $p = 1.0 \times 10^{-4}$ ).

## بحث

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تمرکز مکانی آتشفشان‌های هولوسن-تاریخی در آناتولی شرقی، قفقاز جنوبی و شمال‌باختر ایران به‌طور سیستماتیک با پهنه‌های تراکشی درون سامانه‌های امتدادلغز هم‌مکان است. این الگو با میانگین فاصله‌ی کمتر دهانه‌ها نسبت به گسل‌های فعال، و نیز هم‌زمانی نسبی برخی فوران‌های تاریخی با زمین‌لرزه‌های بزرگ، تأیید شد. چنین ارتباطی پیش‌تر در دیگر مناطق تکتونیکی مشابه نیز گزارش شده است؛ برای مثال، مطالعاتی در کالیفرنیا (Hill et al., 2002) و آناتولی مرکزی (Keskin, 2007) نشان داده‌اند که بازشدگی‌های موضعی در استپ‌اورهای گسل‌های راست‌لغز می‌توانند مسیرهای ترجیحی برای صعود دایک باشند. یافته‌های ما نشان می‌دهد که این الگو در کمربند ایران-قفقاز نیز تکرار می‌شود و احتمالاً بیانگر یک سازوکار ژئودینامیکی مشترک است.

یکی از نکات برجسته‌ی مطالعه‌ی حاضر، وضوح هم‌مکانی هسته‌های چگالی دهانه‌ها با گره‌های انتقال تنش در سه ناحیه‌ی آرات، وان-پانتوس و تبریز-سیلان است. این هم‌مکانی در مطالعات قبلی تنها به‌صورت کیفی بیان شده بود (Şengör et al., 2003; Yılmaz et al., 1998)، اما تحلیل کمی حاضر نشان داد که فاصله‌ی متوسط دهانه‌ها تا گسل فعال به‌طور معناداری از توزیع تصادفی کمتر است. چنین شواهدی تأیید می‌کند که کنترل ساختاری نه‌فقط در مقیاس محلی، بلکه در مقیاس ناحیه‌ای نیز عامل اصلی مکان‌گزینی فعالیت آتشفشانی بوده است.

از دیدگاه زمانی، هم‌پوشانی برخی فوران‌ها با زمین‌لرزه‌های بزرگ منطقه‌ای نیز جالب توجه است. نمونه‌ی شاخص آن رخداد ۱۸۴۰ آرات است که در گزارش‌های تاریخی به همراه فوران انفجاری ویرانگر در دامنه‌ی شمالی ثبت شده است. پدیده‌ی هم‌وقوعی زلزله و فوران پیش‌تر در ایسلند (Gudmundsson, 2020) و ژاپن (Toda et al., 2005) هم ثبت شده و معمولاً به بازشدگی سریع شکستگی‌ها در اثر اعمال تنش بر انباره‌های ماگمایی نسبت داده می‌شود. هرچند داده‌های ما برای اثبات این رابطه کافی نیست، هم‌زمانی‌های مشاهده‌شده نشان می‌دهد که چرخه‌های لرزه‌ای می‌توانند در زمان‌بندی برخی فوران‌ها نقش تسهیل‌کننده داشته باشند.

از منظر سازوکار ژئودینامیکی، یافته‌های این مطالعه با مدل «پسابرخورد بدون پلوم» که برای آناتولی شرقی پیشنهاد شده (Keskin, 2005; Şengör et al., 2003) سازگار است. بر اساس این مدل، نازک‌شدن لیتوسفر و تزریق آستوسفری، شرایط حرارتی مناسب برای ذوب پوسته را فراهم کرده و شکستگی‌های تراکشی درون سامانه‌های امتدادلغز، مسیر صعود ماگما را کنترل می‌کنند. مقایسه با قفقاز جنوبی (Parfenov et al., 2019) و شمال‌باختر ایران (Morley et al., 2009) نشان می‌دهد که چنین سازوکاری می‌تواند در سراسر کمربند قفقاز-ایران به‌طور مشابه عمل کند.

در عین حال، محدودیت‌های مطالعه نیز باید مد نظر قرار گیرد. عدم قطعیت در تعیین سن دقیق برخی جریان‌های آتشفشانی و وابستگی به داده‌های تاریخی/باستان‌شناسی باعث می‌شود ارزیابی زمان‌بندی فوران‌ها با خطا همراه باشد. همچنین، دقت موقعیت‌یابی دهانه‌ها از تصاویر ماهواره‌ای به‌طور متوسط چند صد متر است و ممکن است در خوشه‌های متراکم خطای هم‌پوشانی ایجاد کند. با وجود این محدودیت‌ها، نتایج کمی فاصله‌ها و آزمون‌های آماری از استحکام بالایی برخوردارند و اعتبار نتایج کلی را تقویت می‌کنند.

به‌طور کلی، یافته‌های این مطالعه نه‌تنها درک ما از ارتباط ساختارهای امتدادلغز با آتشفشان‌زایی کواترنر را در منطقه‌ی قفقاز-ایران گسترش می‌دهد، بلکه پیامدهای مستقیمی برای مخاطره‌ی لرزه‌ای-آتشفشانی نیز دارد. دشت آرات و کمان تبریز-سیلان، به‌عنوان دو پهنه‌ی پرجمعیت و زیرساختی، در مجاورت گره‌های تراکشی فعال قرار دارند و شواهد هولوسن نشان می‌دهد که پتانسیل فعالیت مجدد در آن‌ها وجود دارد. این نتایج تأکید می‌کند که پایش چندپارامتری (لرزه‌ای، GPS، InSAR و گاز) و سناریونگاری گشودگی دهانه‌های جدید باید بخشی از اولویت‌های مدیریت ریسک منطقه باشد.

## نتیجه‌گیری

بررسی حاضر نشان داد که آتشفشان خیزی کواترنر در آناتولی شرقی، قفقاز جنوبی و شمال‌باختر ایران نه پدیده‌ای پراکنده، بلکه بخشی از یک الگوی منسجم تکتونو-آتشفشانی است. تمرکز مکانی دهانه‌ها در پهنه‌های تراکشی مرتبط با گسل‌های امتدادلغز، و هم‌زمانی نسبی برخی فوران‌های تاریخی با زمین‌لرزه‌های بزرگ، بیانگر آن است که سامانه‌های گسلی فعال نه‌تنها مسیر صعود ماگما را تعیین می‌کنند، بلکه می‌توانند زمان‌بندی بخشی از فوران‌ها را نیز تحت‌تأثیر قرار دهند. این ارتباط در تحلیل‌های کمی فاصله و آزمون‌های آماری به‌وضوح آشکار شد و از سطح یک مشاهده‌ی کیفی فراتر رفت. از دیدگاه ژئودینامیکی، یافته‌های ما نشان می‌دهد که برخورد صفحات و نازک‌شدن لیتوسفر در پهنه‌ی ایران-قفقاز، در کنار شکستگی‌های تراکشی، شرایطی منحصر به‌فرد برای تجمع و صعود ماگما فراهم کرده است؛ شرایطی که مشابه آن در مناطق پسابروردی دیگر گزارش شده ولی کمتر در این گستره‌ی جغرافیایی بررسی شده بود. در نتیجه، این مطالعه نه‌تنها جایگاه منطقه را در بحث جهانی «آتشفشان‌زایی بدون پلوم» روشن‌تر می‌کند، بلکه نقش سامانه‌های امتدادلغز در تنظیم این فرایند را برجسته می‌سازد.

پیامد عملی این الگو، توجه به مخاطره‌های هم‌زمان لرزه‌ای-آتشفشانی است. شواهد تاریخی نشان می‌دهد که حتی در دشت‌های پرجمعیتی مانند آرارات و کمان تبریز-سیلان، فوران‌های جوان در بستر چرخه‌های لرزه‌ای رخ داده‌اند. این واقعیت ضرورت پایش یکپارچه‌ی این سامانه‌ها را دوجندان می‌کند، چراکه گشودگی دهانه‌های جدید می‌تواند به‌سرعت در پهنه‌های تراکشی فعال اتفاق بیفتد. در این چارچوب، پایش لرزه‌ای و ژئودتیکی دقیق، در کنار تاریخ‌گذاری پرتراکم و مدل‌سازی تنش، ابزارهایی کلیدی برای کاهش عدم‌قطعیت‌ها و افزایش توان پیش‌بینی‌پذیری هستند. در نهایت، این پژوهش نشان می‌دهد که فهم فرایندهای آتشفشانی در کمربند ایران-قفقاز تنها با در نظر گرفتن تعامل تکتونیک و ماگما امکان‌پذیر است. چنین رویکردی نه‌تنها افق‌های جدیدی برای پژوهش‌های منطقه‌ای می‌گشاید، بلکه برای مدیریت خطر در یکی از پرجمعیت‌ترین و لرزه‌خیزترین کمربندهای جهان ضرورت دارد.

## References

- Aki, K. and Richards, P.G., 2002. Quantitative seismology. University Science Books.
- Ambraseys, N., 2009. Earthquakes in the Mediterranean and Middle East: A Multidisciplinary Study of Seismicity up to 1900. Cambridge University Press, Cambridge.
- Ambraseys, N.N. and Melville, C.P., 1982. A History of Persian Earthquakes. Cambridge University Press, Cambridge, 1, 219 pp.
- Baftipour, M., Jarahi, H., Polat, G. and Seifilaleh, S., 2022. Damavand Earthquake of 2020 the Mainshock or an Alarm for Disaster for the Capital of Iran. American Journal of Engineering and Applied Sciences, 15(1): 51-58.
- Berberian, M., 1994. Natural hazards and the first earthquake catalogue of Iran, 1. International Institute of Earthquake Engineers and Seismology, 603 pp.
- Bonali, F., Corazzato, C. and Tibaldi, A., 2012. Elastic stress interaction between faulting and volcanism in the Olacapato–San Antonio de Los Cobres area (Puna plateau, Argentina). Global and planetary change, 90: 104-120.
- Davidson, J., Hassanzadeh, J., Berzins, R., Stockli, D.F., Bashukoo, B., Turrin, B. and Pandamouz, A., 2004. The geology of Damavand volcano, Alborz Mountains, northern Iran. GSA Bulletin, 116(1-2): 16-29.
- Fedele, L., Ghazi, J.M., Agostini, S., Ronca, S., Innocenzi, F. and Lustrino, M., 2023. Concurrent adakitic and non-adakitic Late Miocene-quaternary magmatism at the Sahand volcano, Urumieh-Dokhtar magmatic arc (NW Iran). Lithos, 458: 107344.
- Feizizadeh, B., Kazemi Garajeh, M., Blaschke, T. and Lake, T., 2020. An object based image analysis applied for volcanic and glacial landforms mapping in Sahand Mountain, Iran. Catena, 198: 105073.
- Ghalamghash, J., Mousavi, S., Hassanzadeh, J. and Schmitt, A., 2016. Geology, zircon geochronology, and petrogenesis of Sabalan volcano (northwestern Iran). Journal of Volcanology and Geothermal Research, 327: 192-207.
- Grosjean, M., Moritz, R., Rezeau, H., Hovakimyan, S., Ulianov, A., Chiaradia, M. and Melkonyan, R., 2022. Arabia-Eurasia convergence and collision control on Cenozoic juvenile K-rich magmatism in the South Armenian block, Lesser Caucasus. Earth-Science Reviews, 226: 103949.
- Gudmundsson, A., 2020. Volcanotectonics: Understanding the structure, deformation and dynamics of volcanoes. Cambridge University Press.
- Gulen, L., Schweig, E., Williams, R. and K., G., 2011. Active fault database for the Middle East region; Earthquake Model of the Middle East EMME Project. 82.
- Hedger, E. and Gottsmann, J., 2022. Investigating stress transfer between the Tuz Gölü fault zone and Hasan Dağ volcano (Turkey). Frontiers in Earth Science, 9: 732696.
- Hill, D.P., Pollitz, F. and Newhall, C., 2002. Earthquake–volcano interactions. Physics Today, 55(11): 41-47.
- Jarahi, H., 2017. Delineate Location of the Last Earthquake Case Study NW of Iran. American Journal of Geosciences, 17(1): 6.
- Karakhanian, A., Djrashian, R., Trifonov, V., Philip, H., Arakelian, S. and Avagian, A., 2002. Holocene-historical volcanism and active faults as natural risk factors for Armenia and adjacent countries. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 113(1-2): 319-344.
- Karakhanian, A.S., Trifonov, V.G., Philip, H., Avagyan, A., Hessami, K., Jamali, F., Salih Bayraktutan, M., Bagdassarian, H., Arakelian, S., Davtian, V. and Adilkhanyan, A., 2004. Active faulting and natural hazards in Armenia, eastern Turkey and northwestern Iran. Tectonophysics, 380(3): 189-219.
- Karapetian, S., Jrashian, R. and Mnatsakanian, A.K., 2001. Late collision rhyolitic volcanism in the north-eastern part of the Armenian Highland. Journal of Volcanology and geothermal Research, 112(1-4): 189-220.
- Kavianian, A., Sandvol, E., Moradi, A., Rumpker, G., Tang, Z. and Mai, P.M., 2018. Mantle transition zone thickness beneath the Middle East: Evidence for segmented Tethyan slabs, delaminated lithosphere, and lower mantle upwelling. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 123(6): 4886-4905.
- Keskin, M., 2005. Domal uplift and volcanism in a collision zone without a mantle plume: Evidence from Eastern Anatolia.
- Keskin, M., 2007. Eastern Anatolia: A hotspot in a collision zone without a mantle plume.
- Medved, I., Polat, G. and Koulakov, I., 2021. Crustal structure of the Eastern Anatolia Region (Turkey) based on seismic tomography. Geosciences, 11(2): 91.
- Meliksetian, K., 2013. Pliocene-Quaternary volcanism of the Syunik upland (Armenia), pp. 247-258.
- Meliksetian, K., Neill, I., Barfod, D., Milne, E., Waters, E., Navasardyan, G., Grigoryan, E., Olive, V., Odling, N. and Karakhanian, A., 2021. Pleistocene - Holocene volcanism at the Karkar geothermal prospect, Armenia. Quaternary Geochronology, 66: 101201.
- Memiş, C., Göğüş, O.H., Uluocak, E.Ş., Pysklywec, R., Keskin, M., Şengör, A.C. and Topuz, G., 2020. Long wavelength progressive plateau uplift in Eastern Anatolia since 20 Ma: implications for the role of slab peel-Back and Break-off. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 21(2): e2019GC008726.
- Morley, C.K., Kongwung, B., Julapour, A.A., Abdolghafourian, M., Hajian, M., Waples, D., Warren, J., Otterdoom, H., Srisuriyon, K. and Kazemi, H., 2009. Structural development of a major late Cenozoic basin and transpressional belt in central Iran: The Central Basin in the Qom-Saveh area. Geosphere, 5(4): 325-362.
- Parfenov, A., Lebedev, V., Chernyshev, I., Vashakidze, G., Yakushev, A., Goltzman, Y.V., Chugaev, A., Oleinikova, T., Kanunnikova, E. and Gabarashvili, K., 2019. Petrological-geochemical characteristics of lavas, sources and evolution of magmatic melts of the Kazbek neovolcanic center (Greater Caucasus). Petrology, 27(6): 606-632.

- Rahimzadeh, S., Mirzaei, N. and Moshasha, Y. ۲۰۲۳. Evidence of active faulting in the Azarshahr-Tabriz fault zone of northwestern Iran. 16: 53-68.
- Rapagnani, G., Cesca, S., Saccorotti, G., Petersen, G., Dahm, T., Bianco, F. and Grigoli, F., 2025. Coupled earthquakes and resonance processes during the uplift of Campi Flegrei caldera. *Communications Earth & Environment*, 6(1): 607.
- Saber, R., Caglayan, A. and Isik, V., 2022. Landscape response to deformation in the Sabalan area, NW Iran: Inferred from quantitative morphological and structural analysis. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 113(3): 227-252.
- Sanford, A.R., 1959. Analytical and experimental study of simple geologic structures. *Geological Society of America Bulletin*, 70(1): 19-52.
- Şengör, A., Özeren, S., Genç, T. and Zor, E., 2003. East Anatolian high plateau as a mantle-supported, north-south shortened domal structure. *Geophysical Research Letters*, 30(24).
- Sherriff, J., Wilkinson, K., Adler, D., Arakelyan, D., Beverly, E., Blockley, S., Gasparyan, B., Mark, D., Meliksetian, K. and Nahapetyan, S., 2019. Pleistocene volcanism and the geomorphological record of the Hrazdan valley, central Armenia: linking landscape dynamics and the Palaeolithic record. *Quaternary Science Reviews*, 226: 105994.
- Skobeltsyn, G., Mellors, R., Gök, R., Türkelli, N., Yetirmishli, G. and Sandvol, E., 2014. Upper mantle S wave velocity structure of the East Anatolian-Caucasus region. *Tectonics*, 33(3): 207-221.
- Toda, S., Stein, R.S., Richards-Dinger, K. and Bozkurt, S.B., 2۰۰۰. Forecasting the evolution of seismicity in southern California: Animations built on earthquake stress transfer. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(B5).
- Trifonov, V.G. and Karakhanian, A.S., 2004. *Geodynamics and the history of civilization*. Nauka, Moscou.
- Tseng, T.-L., Lin, C.-M., Huang, B.-S. and Karakhanyan, A., 2017. Thin Crust and High Crustal Vp/Vs beneath the Central Armenia Plateau of the Lesser Caucasus, AGU Fall Meeting Abstracts, pp. T51H-02.
- Yılmaz, Y., Güner, Y. and Şaroğlu, F., 1998. Geology of the quaternary volcanic centres of the east Anatolia. *Journal of volcanology and geothermal research*, 85(1-4): 173-210.