نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال هشتم، شماره ۲، تابستان ۱٤۰۰

صفحات ۷۱ – ۸۲

بررسی مخاطرات لرزه ای با مطالعهٔ تغییرات آهنگ کرنش در البرز مرکزی با استفاده از داده های GPS

شاهرخ پوربیرانوند [۱]؛ استادیار پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله،تهران، ایران

دریافت مقاله : ۱۳۹۹/۰۲/۲۳ پذیرش نهایی:۱۴۰۰/۰۲/۱۸

چکیده

البرز مرکزی به علت استقرار کلان شهر تهران از اهمیت خاصی در مطالعات مرتبط با سوانح طبیعی از جمله خطر لرزه ای برخوردار است. این اهمیت باعث توسعهٔ شبکه ای نسبتاً متراکم از ایستگاههای GPS در این منطقه و مناطق همجوار شده است. در این مطالعه از درون‌یابی بردارهای سرعت GPS بر روی یک شبکه مستطیل شکل و محاسبهٔ کرنش در مرکز هر سلول برای مطالعهٔ تغییرات آهنگ کرنش در گستره البرز مرکزی استفاده شد. نتایج دلالت بر تغییرات مکانی در محورهای اصلی آهنگ کرنش ژئودتیکی در منطقه و همچنین تغییر در آهنگ کرنش مساحتی (اتساع) در قسمتهای مختلف البرز مرکزی دارد که در تلفیق با جهت گیری گسلهای اصلی منطقه، واقعیت‌های مهمی را دربارهٔ سازوکار حرکت گسلها آشکار نمود. بی‌هنجاری‌های مشاهده شده در این کمیتها، با لرزه‌خیزی و حرکتهای راندگی و راستالغز بر روی گسلهای مهم منطقه تطابق معنی داری را نشان داده و افراز دگرشکلی را در البرز مرکزی و نواحی پیرامون که به دلیل اعمال تنش های تکتونیکی مایل بر گسلها و صفحات شکستگی های ضعیف از پیش موجود رخ می دهد، مورد تایید قرار دادند. بی هنجاری های مثبت مشاهده شده در نقشهٔ آهنگ کرنش مساحتی یا اتساع بیانگر مکان های مستعد مخاطرات لرزه ای می باشند.

واژه های کلیدی: آهنگ کرنش مساحتی، افراز دگرشکلی، البرز مرکزی، مخاطرات لرزه ای، GPS

۱ -نویسندهٔ مسئول: Email: beyranvand@iiees.ac.ir

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.2.71]

مقدمه

رشته کوه البرز در جنوب حوضه دریای خزر بخشی از همگرایی اوراسیا و عربستان را در خود جای می‌دهد و ایران مرکزی را از اوراسیا جدا می نماید (Stocklin, ۱۹۷٤). این رشته کوه در باختر و خاور به ترتیب با کمربندهای تراستی مهم تالش و کپه داغ محدود می شود. تفاوتهای مهمی در قسمتهای خاوری و باختری البرز دیده می‌شود که در ناحیهٔ مورد مطالعه یعنی البرز مرکزی نیز به چشم می خورد. این تفاوتها شامل الگوی V شکل گسلها و شکستگی ها در دو بخش خاوری و باختری و تفاوت سازوکارهای کانونی زمین‌لرزه ها و همچنین آهنگهای کوتاه شدگی و حرکتهای راستالغز عمدتاً چپگرد موازی با راستای رشته‌کوه در منطقه است. قسمت خاوری بیشتر حرکت راستالغز چپگرد (حدود ۲ میلی متر در سال در جنوب محدوده و حدود ۵ میلی متر در سال در شمال محدوده) با آهنگ کوتاه شدگی متعامد بسیار پایینی در گسل خزر (حدود ۲ میلی متر در سال) را نشان می دهد. بخش باختری راندگی (حدود ۶ میلی متر در سال) در گسل خزر با مقداری جزئی از حرکت چپگرد (حدود ۲ میلی متر در سال در شمال محدوده و ۱ میلی متر در سال جنوب آن) را نشان می‌دهد (Djamour, et al., ۲۰۱۰).

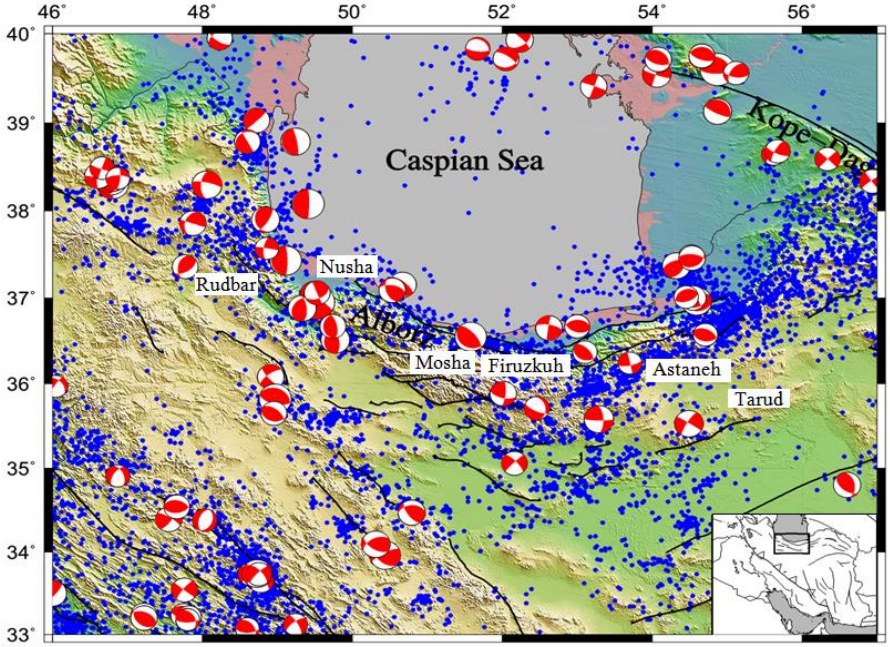
با وجود مطالعات صورت گرفته هنوز ابهاماتی در مورد نحوهٔ تکامل تکتونیکی و ساختار پوسته در البرز وجود دارد (Berberian and King, ۱۹۸۱; Berberian, ۱۹۸۳; Allen, et al., ۲۰۰۳). کوه‌های البرز پس از برخورد ایران مرکزی با اوراسیا در تریاس پسین (کوهزایی سیمرین) و از برخورد صفحات عربستان با اوراسیا تشکیل شدند (Zanchi, et al., ۲۰۰۶ ؛ Alavi, ۱۹۹٦). تکامل ژئودینامیکی اخیر البرز مرکزی تحت عنوان افراز دگرشکلی ناشی از کوتاه شدگی مایل در این گستره توصیف شده است (Jackson, et al., ۲۰۰۲). این حالت می تواند در نتیجه ی رژیم ترافشارشی که از پلیوسن آغاز شد باشد و ممکن است با جابجایی حوضه جنوبی خزر SCB به سمت جنوب باختری نسبت به بلوک ایران مرکزی همراه شده باشد. پیش از این دوره و از زمان میوسن، کوتاه شدگی شمالی جنوبی در البرز روی داده و این کوتاه شدگی بر راندگی‌های بادبزنی شکل با شیب به سمت داخل از دو منتهی الیه طرفین کمربند، که همراه با حرکت‌های راستالغز راستگرد و چپگرد به ترتیب در بخشهای باختری و خاوری بوده، توزیع گردیده است (Allen, ۲۰۰۴). این زمینهٔ تکتونیکی منجر به فراخاست بخش مرکزی کمربند در ۴ تا ۶ میلیون سال پیش شد. بر اساس برآورد آهنگ لغزش و جابجایی کلی در امتداد گسلهای راستالغز چپ گرد، به عنوان مثال آستانه و جاجرم، افراز کرنش یا دگرشکلی در البرز همراه با حرکت جنوب باختری حوضه دریای خزر جنوبی دو برابر قدیمی تر یعنی مربوط به ۱۰ میلیون سال قبل بوده است (Hollingsworth, et al., ۲۰۰۸).

از سوی دیگر، حرکت حوضه دریای خزر جنوبی (حرکت به سمت جنوب باختری و چرخش در جهت عقربه های ساعت) بسیار جوانتر بوده است (Ritz, et al., ۲۰۰٦). تفسیر آنها در حقیقت بر این اساس استوار است که پیچش کلی چپگرد کمربند البرز (که مرتبط با حرکت حوضه خزر جنوبی است) به علت مایل بودن برخی از گسلها نسبت به روند کلی رشته کوه (به عنوان مثال طالقان، مشا) یک مولفهٔ نرمال را نشان می‌دهد. توپوگرافی منتجه از این مولفه نرمال کوچک است و هنوز بر برجستگی های ارتفاعی منطقه تاثیر قابل توجهی نگذاشته است. اشاره شده است که تغییر کینماتیکی (از عمدتا معکوس به چپگرد نرمال) همزمان با فعالیت های آتشفشانی دماوند رخ داده است (Ritz, et al., ۲۰۰۶).

بیشتر دگرشکلی در منطقه به صورت لرزه ای اتفاق می‌افتد (Masson, et al., ۲۰۰۵) لذا فعالیت لرزه ای در سراسر منطقه البرز به چشم می خورد. در شکل ۱ نمایی از توپوگرافی به همراه زمین لرزه های ثبت شده توسط پژوهشگاه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOI: 10.52547/jsaeh.8.2.71]

بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله (از سال ۱۹۰۰ تا ۲۰۰۶) و موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (از سال ۲۰۰۶ تا کنون) به همراه گسلهای مهم منطقه نشان داده شده است. در این تصویر سازوکارهای کانونی دور لرزه ای از GCMT نیز نمایش داده شده اند. لرزه خیزی تاریخی (Ambraseys and Melville, ۲۰۰۵) و نیز دستگاهی در منطقه بالا گزارش شده است (e. g. Engdahl, et al., ۱۹۹۸). راه حل‌های سازوکار کانونی زلزله ها از GCMT بیشتر گسلش راستالغز و تراستی را در منطقه نشان می دهد. گسل های فعال به طور عمده موازی کمربند البرز هستند و الگوی V شکلی در باختر و خاور البرز مرکزی به وجود می‌آورند که راستاهای باختر-شمال باختری، خاور-جنوب خاوری و باختر-جنوب باختری، خاور-شمال خاوری را نشان می دهد (شکل ۱). گسلهای راندهٔ شمال البرز و خزر با شیب به سمت جنوب و گسل های راندهٔ های شمال تهران، گرمسار و پارچین با شیب به سمت شمال اصلی ترین ساختارهای راندگی فعال محدوده مورد بحث هستند. گسلهای طالقان، مشا، فیروزکوه، در قسمت جنوبی رشته کوه البرز حرکت راستالغز چپگرد را نشان می دهند (Berberian, ۱۹۸۳; Ritz, et al., ۲۰۰۶; Jackson, et al., ۲۰۰۲). دگرشکلی برآورد شده از مدل میان لرزه ای در امتداد دو پروفیل نشان می‌دهد که با توجه به جهت گیری گسلها، گسلش چیره در بخش خاوری عمدتا راستالغز چپگرد است و در بخش باختری راستالغز چپگرد راندگی است (Djamour, et al., ۲۰۱۰).



شکل ۱. لرزه خیزی منطقه، به همراه نقشهٔ گسلهای مهم و سازوکارهای کانونی دورلرزه ای

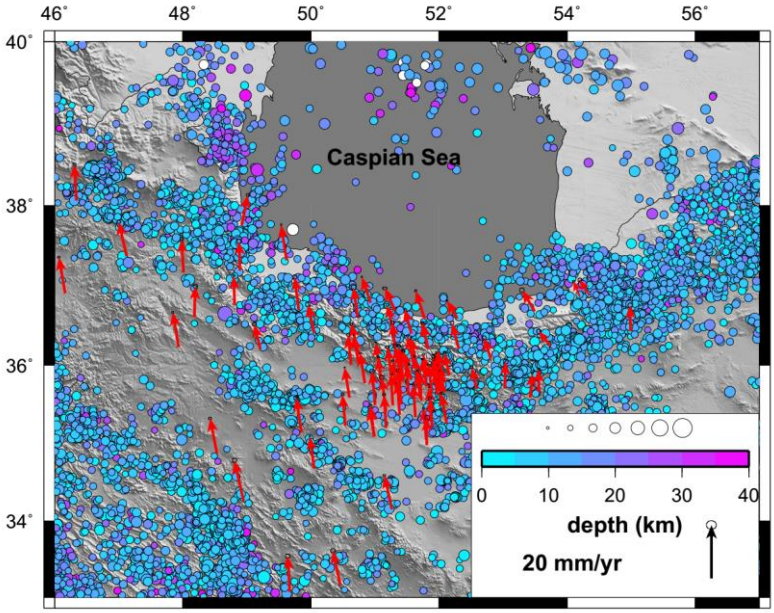
داده ها و روش کار

مطالعات GPS در منطقه با گسترش تدریجی شبکه ژئودینامیک دائمی و عملیات GPS مختلف در منطقه توسعه یافته است. مطالعات GPS متعددی در ایران انجام شده است که برخی به طور کلی تمام کشور را پوشش داده‌اند (Nilforoushan, et al., ۲۰۰۳; Reilinger, et al., ۲۰۰۶; Masson, et al., ۲۰۰۵; Vernant, et al., ۲۰۰٤) و برخی به طور خاص البرز را تحت پوشش قرار داده اند (Djamour, et al., ۲۰۱۰; Masson, et al., ۲۰۰۵). اولین برآورد کینماتیکی (حرکت امروزی) البرز مرکزی از پروفیل حالت برداشت GPS، که SGPS خوانده می شود، در عرض البرز مرکزی به دست آمد (Vernant, et al., ۲۰۰٤). اگرچه، سایت های SGPS پراکنده بودند و تنها کوتاه شدگی کلی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOI: 10.52547/jsaeh.8.2.71]

شمالی جنوبی (۲ ± ۵ میلی متر در سال) و حرکت راستالغز چپگرد ناحیه ای (۲ ± ۴ میلی متر در سال) برآورد شد. از آن زمان، چندین سایت SGPS و همچنین یک شبکه GPS دائم (CGPS) برپا شده است. علاوه بر این، اندازه گیری گرانی مطلق دقیق (AG) به منظور محدود کردن بهتر آهنگ فراخاست در سراسر گستره تکرار شده است (Djamour, et al., ۲۰۱۰).

برای محاسبهٔ آهنگ کرنش به بردارهای سرعت به دست آمده از پردازش داده های GPS نیاز است. داده‌های مورد استفاده در این مطالعه از یکی از مقالاتی که به آنها اشاره شد گرفته شده است (Djamour, et al., ۲۰۱۰). این مجموعه داده خود با تلفیق ایستگاههای مختلف دائمی و موقتی GPS تشکیل شده (شکل ۲). چهارچوب مرجع مورد استفاده در این مجموعه از داده ها اوراسیا است. داده های مورد استفاده در مطالعهٔ مذکور شامل ۱۰۳ ایستگاه GPS می باشد که در گسترهٔ طول جغرافیایی ۴۵ تا ۵۹ و عرض جغرافیایی ۲۸ تا ۳۸ درجه پراکنده اند. این داده ها برای محاسبهٔ آهنگ کرنش مورد استفاده قرار گرفته اند اما به علت بالاتر بودن اطمینان نتایج در مناطقی که به مرکز محدوده مورد مطالعه نزدیک تر هستند، و نیز تمرکز مطالعه بر البرز مرکزی، نقشه هایی که در بردارندهٔ نتایج محاسبات آهنگ کرنش هستند، در قسمتهای آتی در گسترهٔ کوچک تری از طول جغرافیایی ۴۸ تا ۵۵ درجه و عرض جغرافیایی ۳۵ تا ۳۸ درجه نشان داده شده اند و تفسیر نتایج به دست آمده نیز در این محدوده صورت گرفته است.



شکل ۲. بردارهای سرعت GPS به همراه از لرزه خیزی منطقه شامل عمق و بزرگای زمین‌لرزه‌ها (بر اساس اطلاعات حاصل از شبکه های داخل کشور)

اندازه گیری های ژئودتیک در سراسر نواحی مرز بین صفحات اغلب توافق قابل توجهی با آهنگ های بلندمدت حرکت صفحه ای نشان می دهند. به عنوان مثال در کالیفرنیا اندازه گیری هایی که در مقیاس زمانی ۵-۱۰ ساله با تداخل‌سنجی خط مبنای خیلی بلند VLBI (Very Long Baseline Interferometry) انجام شد (Argus and Gordon, ۱۹۹۰; Ward, ۱۹۹۰) حرکاتی را نشان داد که در آهنگ های صفحه ای بلند مدت غیر قابل تمایز بود (DeMets, et al., ۱۹۹٤). این هماهنگی بین آهنگ های بلند مدت و کوتاه مدت ابتدا در زلاندنو در مرز صفحه ای بین

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOI: 10.52547/jsaeh.8.2.71]

صفحات استرالیا و اقیانوس آرام مورد توجه قرار گرفت (Walcott, ۱۹۸٤). با استفاده از روش های (Haines, ۱۹۸۲) و (Walcott, ۱۹۸٤) توزیع‌های آهنگ کرنش برشی ژئودینامیک مدل سازی شد.

(Haines, ۱۹۸۲) ، (Walcott, ۱۹۸٤) و (Bibby, et al., ۱۹۸٦) حرکات در زلاند نو را نسبت به یک خط که فرض شده بود به صورت صلب عمل می کند تعیین کردند. (Haines and Holt ,۱۹۹۳) برازشی چند جمله‌ای را توصیف کردند که خیلی محدود نبوده، امکان تعیین حرکات نسبت به هر منطقه یا نقطهٔ مشخص شده را در ناحیهٔ دگرشکلی در سطح زمین کروی فراهم می کرد. این تکنیک اجازهٔ تعیین تانسور گرادیان سرعت افقی را از سه مولفهٔ تانسور آهنگ کرنش $\varepsilon_{\theta\theta}$، $\varepsilon_{\varphi\varphi}$ و $\varepsilon_{\theta\varphi}$ در سطح زمین می دهد. در این روش میدان سرعت افقی بوسیلهٔ برازش توزیع آهنگ کرنش با اسپلاین‌های دو-مکعبی (bicubic splines) بجای چند جمله‌ای ها با تغییراتی در روش برآورد می شود.

اگر چه محاسبات ما برای یک زمین کروی انجام می شود منطقهٔ مورد مطالعه اغلب به حد کافی کوچک هست که بجای آهنگهای کرنش افقی $\varepsilon_{\theta\theta}$، $\varepsilon_{\varphi\varphi}$ و $\varepsilon_{\theta\varphi}$ در مختصات کروی از ε_{xx}، ε_{yy} و ε_{xy} در مختصات کارتزین استفاده شود. در سیستم کارتزین x به سمت شرق، y به سمت شمال و z به سمت بالا مثبت در نظر گرفته می شوند. آهنگ کرنش افقی می تواند به صورت آهنگهای کرنش برشی $\dot{\gamma}_1$ و $\dot{\gamma}_2$ و آهنگ کرنش اتساعی $\dot{\sigma}$(dilatational) که از آن به عنوان آهنگ واگرایی افقی یاد می کنیم بیان شود:

رابطه(۱) $$\dot{\varepsilon}_{xx} = \dot{\sigma} + \dot{\gamma}_1$$

رابطه(۲) $$\dot{\varepsilon}_{yy} = \dot{\sigma} - \dot{\gamma}_1$$

رابطه(۳) $$\dot{\varepsilon}_{xy} = \dot{\gamma}_2$$

که:

رابطه(۴) $$\dot{\gamma}_1 = \frac{1}{2}(\dot{\varepsilon}_{xx} - \dot{\varepsilon}_{yy})$$

رابطه(۵) $$\dot{\gamma}_2 = \dot{\varepsilon}_{xy}$$

رابطه(۶) $$\dot{\sigma} = \frac{1}{2}(\dot{\varepsilon}_{xx} + \dot{\varepsilon}_{yy})$$

این تعریف ها از آهنگهای کرنش برشی، یک دوم آهنگهای کرنش مهندسی هستند. آهنگهای واگرایی افقی می‌توانند از اطلاعات آهنگ فراخاست (uplift) به دست آیند. با فرض عدم وجود تغییر حجم داریم:

رابطه (۷) $$\dot{\sigma} = \frac{1}{2}\frac{\partial w}{\partial z}$$

که $\partial w / \partial z$ آهنگ کرنش قائم است. اطلاعات آهنگ فراخاست مورد اشاره، فراخاست سنگها با توجه به میانگین سطح دریاست که با فراخاست سطح نسبت به سطح دریا یا ژئوئید متفاوت است. فراخاست سنگها نسبت به ژئوئید تنها در غیاب فرسایش با فراخاست سطحی نسبت به ژئوئید معادل است (England and Molnar, ۱۹۹۰). ما تنها مولفه های آهنگ کرنش $\dot{\gamma}_1$ و $\dot{\gamma}_2$ را از اطلاعات گسل به دست می آوریم. اطلاعات روی آهنگ واگرایی افقی در داده های آهنگ فراخاست سنگها جای داده شده است (Walcott, ۱۹۸٤). مقدار زیاد فراخاست می‌تواند با گسلش در راستای ساختارهای عمده همراه باشد. همچنین برخی از فراخاست‌ها می توانستند با کوتاه‌شدگی بر روی ساختارهای رانده ای

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.2.71]

که غلبهٔ کمتری دارند و بین گسلهای راستالغز عمده واقع شده اند، همراه باشد. به دلیل ارتباط قوی تر بین مقادیر آهنگ کرنش مساحتی یا اتساع و پارامترهای مهم در بررسی مخاطرات لرزه ای (لرزه خیزی) در ادبیات مرتبط با موضوع و پیشینهٔ پژوهش، در این مطالعه از تغییرات در جهت تفسیر مشاهدات استفاده خواهد شد.

- **جهت آهنگ کرنش از مطالعات GPS**

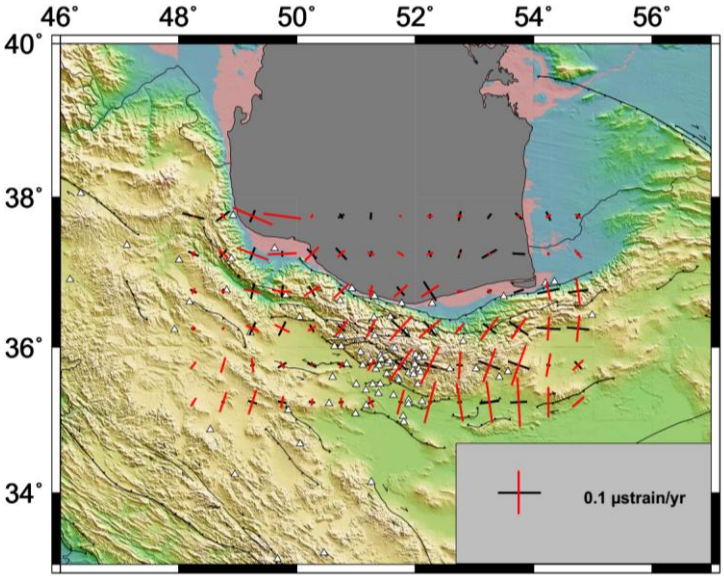
آهنگ کرنش با درون‌یابی سرعت GPS بر روی یک شبکه مستطیل شکل و سپس با مشتق گیری در مرکز هر سلول، با استفاده از روش توسعه یافته توسط (Haines, et al., ۱۹۹۸) به دست آمده است. سلول های شبکه دارای ابعادی در حدود ۰/۲ درجه هستند. جهت بزرگترین آهنگ کرنشهای فشارشی و کششی افقی در اینجا به ترتیب به عنوان $(\dot{\varepsilon}_{H\max})$ و $(\dot{\varepsilon}_{H\min})$ تعریف شده است. در شکل ۳ بزرگترین آهنگ کرنش افقی کششی و فشارشی در محدودهٔ مورد مطالعه به ترتیب توسط میله های سیاه و قرمز در مرکز سلولهای شبکه گرید بندی شده، بر روی توپوگرافی نشان داده شده اند. عدم قطعیت در راستای آهنگ کرنش در این روش در حدود ۳ درجه (Keiding, et al., ۲۰۰۸) و در بزرگای محورهای آهنگ کرنش در حدود ۱۰ نانواسترین بر سال (Zhu and Shi, ۲۰۱۱) ارزیابی شده است.

در مورد شکلهای نمایش داده شده از کمیتهای حاصل از نتایج محاسبات آهنگ کرنش باید این نکته را خاطر نشان کرد که این محاسبات و در نتیجه کمیتهای محاسبه شده، در واقع از بردارهای سرعت GPS موجود در پایگاه داده های مطالعهٔ حاضر به دست آمده اند. از آنجا که در مطالعات GPS معمولا از نقاطی خارج از محدودهٔ مورد بررسی به عنوان ایستگاههای مرجع استفاده می شود، پایگاه داده های مذکور شامل ایستگاههایی در نقاطی خارج از البرز مرکزی نیز بود. اما با توجه به اینکه اعتمادپذیری نتایج با نزدیک شدن به لبه‌های محدوده کاهش می یابد، تنها نتایجی که در نواحی میانی که همان البرز مرکزی و ناحیهٔ مورد توجه در این مطالعه است واقع شده اند، مورد بحث و بررسی قرار گرفته اند. این محدوده با توجه به پوشش چگال شبکهٔ GPS مورد استفاده در این مطالعه به طور تقریبی در بین طولهای جغرافیایی ۴۸ تا ۵۵ درجه و عرضهای جغرافیایی ۳۵ تا ۳۸ درجه قرار می‌گیرد.

با در نظر گرفتن موارد فوق، مشاهده می شود که در دو سوی خاوری و باختری البرز راستای جهت محور فشارشی آهنگ کرنش به طور تقریبی در توافق با روند V شکل گسلهای فعال منطقه است (شکل ۳). به این معنی که در قسمت خاوری البرز میله های قرمز که مبین محور فشارشی کرنش هستند مطابق با روند گسلهای منطقه، راستایی تقریباً شمال خاوری-جنوب باختری پیدا می‌کنند و به همین ترتیب در بخشهای باختری راستای محورهای فشارشی آهنگ کرنش متناسب با جهت گیری گسلها راستایی شمال باختری-جنوب خاوری دارند. در میان این دو ناحیه قسمتی وجود دارد که محور مذکور حالت افقی پیدا می کند. این ناحیه در حدود طول جغرافیایی ۵۰ درجه واقع شده است و نسبت به محل تقاطع رونهای گسلی البرز خاوری و باختری، قدری به سمت چپ متمایل است. از نظر بزرگای محور فشارشی کرنش مشاهده می‌شود که در جایی که محورهای فشارشی آهنگ کرنش تقریباً به صورت افقی قرار می گیرند طول این محورها به کمترین حد خود می‌رسد. در خاور و جنوب خاوری البرز مرکزی وهمچنین در شمال باختری محورها طول بزرگتری دارند، اما باید به این نکته توجه کرد که در کناره های محدودهٔ مورد مطالعه به علت کاهش تعداد ایستگاهها سطح اطمینان به نتایج چندان بالا نیست و ممکن است بی هنجاری های مشاهده شده در طول محور آهنگ کرنش و سایر کمیتهای محاسبه شده بیانگر واقعیت های زمین شناسی منطقه نباشند.

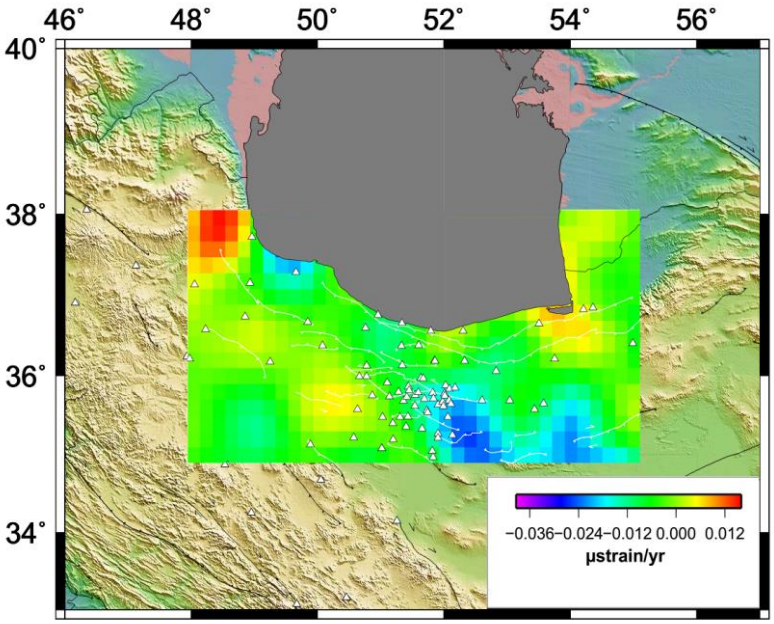
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.2.71]



شکل۳: جهت محورهای اصلی آهنگ کرنش بر روی توپوگرافی به همراه گسلهای اصلی منطقه. خطوط نازک قرمز و سیاه جهت محور کرنش اصلی انقباضی و اتساعی را نشان می دهند. دو خط عمود نشان دهندهٔ محور آهنگ کرنش با بزرگی ۱۰۰ نانواسترین بر سال برای هر دو محور، در راهنمای واقع در گوشه پایین سمت راست نشان داده شده است. ایستگاههای GPS با مثلث های کوچک نشان داده شده اند.

در شکل (۴) نمایی از آهنگ کرنش مساحتی یا اتساعی، به دست آمده از محاسبات آهنگ کرنش با استفاده از داده‌های GPS مشاهده می شود. بی هنجاری های مشاهده شده در این نقشه با توجه به تجربیات حاصل از استفاده از این روش در نقاط دیگر به عنوان فرونشست و فراخاست قابل تفسیر است (Keiding, et al., ۲۰۰۸).



شکل ۴. آهنگ کرنش مساحتی یا اتساع به دست آمده از محاسبات آهنگ کرنش رنگ پس زمینه را تشکیل می دهد. در این شکل فشردگی یا فراخاست با رنگ آبی و اتساع یا فرونشست با رنگ قرمز مطابق با مقیاس رنگی نشان داده شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.2.71]

شرح و تفسیر نتایج

مطالعهٔ حاضر برای اولین بار با استفاده از روش گریدبندی با قدرت تفکیک بالاتر نسبت به مطالعات قبلی در منطقه به انجام رسیده است. اگرچه جهات آهنگ کرنش به دست آمده در مطالعات پیشین (Masson, et al., ۲۰۰۷). در مناطق البرز مرکزی به طور کلی مشابه با نتایج به دست آمده از این مطالعه می باشد، اما روشن است که با توجه به بالاتر بودن قدرت تفکیک این روش به دلیل بهره مندی از گرید بندی بسیار چگال‌تر نسبت به مثلث بندی های انجام شده در روش های قبلی که مساحت بسیار بیشتری را مورد میانگین گیری قرار می دادند، نتایج حاضر طبیعتاً با دقت بیشتری قادر به نمایش تغییرات جهت آهنگ کرنش می‌باشند.

نکته جالب توجه در مطابقت جهت‌گیری محور فشارشی آهنگ کرنش با واقعیت های زمین شناسی منطقه نهفته است. در خصوص عدم تطابق محل انشقاق روندهای گسلی در البرز مرکزی با محل تغییر جهت محورهای فشارشی آهنگ کرنش که پیشتر در قسمتهای قبلی به آن اشاره شد باید توجه شود که راستای محورهای فشارشی کرنش، به جابجایی های روی داده ارتباط دارد و از مطالعهٔ دگرشکلی حاصل شده است و ممکن است بین این راستاها و راستای گسلها ارتباط مستقیمی برقرار نباشد. اما همخوانی این راستاها می‌تواند بیانگر اتفاق افتادن جابجایی در راستای گسلهای فعال منطقه باشد که به نوعی می تواند متذکر حرکت راستالغر باشد. همینطور عمود بودن این محورها بر راستای گسل می تواند به صورت چیرگی گسلش شیب‌لغز که در منطقهٔ مورد مطالعه خود را به صورت راندگی نشان می دهد تفسیر شود. نتایج استفاده از این تفسیر، همخوانی خوبی با نتایج مطالعات پیشین مبنی بر چیرگی حرکتهای شیب‌لغز با مولفهٔ کوچکی از حرکتهای شیب‌لغز در بخش باختری و غلبهٔ حرکتهای راستالغز توام با مولفهٔ کوچکی از حرکت شیب‌لغز در بخش خاوری البرز مرکزی دارد (Djamourm et al., ۲۰۱۰). به این معنی که در بخش خاوری البرز مرکزی جایی که محورهای فشارشی آهنگ کرنش موازی با روندهای گسلی هستند حرکتهای راستالغز بیشتر مورد انتظار است که این موضوع با واقعیت زمین شناسی منطقه همخوانی دارد. این موضوع در عرضهای جغرافیایی ۵۲ تا ۵۳/۵ درجه به چشم می خورد. محل تقاطع الگوی V شکل گسلها نیز تقریبا در همین منطقه واقع شده است. در بخش باختری البرز مرکزی در حدود عرض جغرافیایی ۵۱ درجه راستای محورهای فشارشی آهنگ کرنش هنوز تقریبا موازی با بخش خاوری هستند اما به علت تغییر روند گسلها که در این بخش برخلاف گسلهای بخش خاوری، راستایی شمال باختری-جنوب خاوری دارند، این محورها عمود بر روند گسلها قرار گرفته اند. عمود بودن محور فشارشی آهنگ کرنش بر راستای گسل باعث می شود که دگرشکلی به صورت شیب‌لغز متعامد یا کوتاه شدگی مورد انتظار باشد که این موضوع نیز با توجه به مطالعه ذکر شده با واقعیات زمین شناسی منطقه مطابقت دارد. در عرضهای جغرافیایی کمتر از ۵۱ درجه محورهای فشارشی آهنگ کرنش با چرخشی در جهت عقربه های ساعت به صورت افقی درآمده، سپس با جهت گیری در راستای باخترشمال باختری-خاور جنوب خاوری مجدداً با روند گسلهای منطقه منطبق می‌شوند.

با مقایسهٔ شکلهای ۱، ۳ و ۴ نکتهٔ جالب توجه دیگری به نظر می رسد که نبود فعالیت لرزه ای در مناطقی واقع در باختر تهران بزرگ به مرکزیت طول و عرض جغرافیایی ۵۰ و ۳۵/۷ درجه و نیز طول و عرض جغرافیایی ۴۹ و ۳۶/۵ است. در این دو منطقه همانطور که در شکل ۱ مشاهده می شود فعالیت لرزه ای اندکی به چشم می خورد و این موضوع با اندازه های بسیار کوچک محورهای اصلی آهنگ کرنش در منطقه (شکل ۳) همراه شده است. از طرفی با توجه به بی هنجاری مثبت مشاهده شده در شکل ۴ که نشان دهندهٔ فراخاست نسبی است که تقریباً در همان حدود

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.2.71]

رخ می دهد، می توان به این نتیجه گیری رسید که احتمالاً تجمع تنش موجب این بالاآمدگی در منطقه شده است. انرژی ناشی از این تجمع تنش با درنظر گرفتن بزرگای ناچیز محورهای آهنگ کرنش در این محدوده ها به صورت بی لرز آزاد نمی شود. همچنین تخلیهٔ انرژی با درنظر گرفتن لرزه خیزی پایین این نواحی به صورت لرزه ای نیز صورت نمی گیرد. چنانچه از موارد مطرح شده وجود قفل شدگی در میان گسلهای فعال منطقه نتیجه گیری شود، وقوع زمین‌لرزه‌ای بزرگ در این ناحیه، محتمل است.

از سوی دیگر با مقایسهٔ شکلهای ۴ و ۵ واقعیتهای مهمی در خصوص لرزه خیزی و سازوکارهای مسبب آن در منطقه قابل استنباط می باشد. با مقایسهٔ این دو شکل با شکل ۱ که نمای خوبی از لرزه خیزی عمومی منطقه را نشان می دهد می توان مشاهده کرد که در مناطقی که وجود خوشه ای از زمین لرزه ها، منبع یا منابع مهمی را برای رخدادهای لرزه ای در منطقه معرفی می کند، شاهد وجود بی هنجاری در نقشهٔ آهنگ کرنش اتساعی می باشیم. این موضوع با توجه به این که گسلش‌ها در منطقهٔ مورد مطالعه تحت تاثیر مشترک میدان تنش ناحیه ای و راستای گسلهای از پیش موجود، در چارچوب افراز دگرشکلی در البرز، به یکی از دو حالت راندگی یا راستالغز و یا ترکیبی از این دو با مولفه‌ای غالب صورت می گیرند، قابل درک و توجیه است.

از نظر مقایسهٔ بی هنجاری های مشاهده شده در نقشهٔ آهنگ کرنش مساحتی یا اتساعی نیز نکات حائز اهمیتی به چشم می خورد. نقشهٔ آهنگ کرنش مساحتی یا اتساعی بی هنجاری هایی را در مناطق شمالی (به طور ضعیفتر در حدود طول جغرافیایی ۵۲ درجه) و جنوبی (به طور قویتر در طول جغرافیایی ۵۰ درجه) البرز مرکزی نشان می دهد که با توجه به سازوکارهای کانونی قابل پیش بینی بوده، توسط سایر مطالعات اخیر نیز تایید شده اند (Tatar, et al., ۲۰۱۲; Djamour, et al, ۲۰۱۰) .

همانطور که در نقشه آهنگ کرنش مساحتی یا اتساع ملاحظه می شود سازوکار راندگی روندی کلی در البرز مرکزی است که با توجه به رژیم تکتونیکی کلی فشارشی حاکم بر منطقه، کم و بیش در همه جا با رنگ سبز متناسب با مقباس رنگی شکل به چشم می خورد. این موضوع به معنی فراخاست با آهنگی آرام در سراسر منطقه است که مورد تایید مطالعات قبلی انجام گرفته در منطقه می باشد (Djamour, et al, ۲۰۱۰). تنها استثنائات موجود در این فرض کلی دو منطقه یکی در جنوب خاور البرز مرکزی و دیگری در منطقه ای حدوداً به طول و عرض جغرافیایی ۴۹ و ۳۷ درجه در سواحل باختری دریای خزر است. این دو منطقه نشانگر بی هنجاری منفی در آهنگ کرنش مساحتی یا اتساع هستند.

البته بی هنجاری های مثبت برجسته ای نیز در طولهای جغرافیایی کمتر از ۵۰ درجه و بیشتر از ۵۳/۵ درجه و همینطور پایین از عرض جغرافیایی ۳۶ درجه به چشم می‌خورند که به علت واقع شدن در لبهٔ کناری محدودهٔ اصلی مورد مطالعه و کمتر بودن چگالی شبکهٔ GPS در این قسمت ها تفسیر آن نیازمند بررسی‌های بیشتر و تکمیل پایگاه داده های موجود است، اما با نگاهی اجمالی می توان به هماهنگ بودن این بی‌هنجاری‌ها که لبه های بیرونی محدودهٔ مورد بررسی در این مقاله واقع شده اند با چرخش بلوک حوضهٔ جنوبی خزر نسبت به قطب چرخشی که در سمت خاور-شمال خاوری واقع است (Djamour, et al, ۲۰۱۰) پی برد. این بی‌هنجاری های مثبت در آهنگ کرنش مساحتی یا اتساع، طبق مطالعات قبلی انجام گرفته توسط این روش با آهنگ فراخاست متناسب هستند (Keiding, et al., ۲۰۰۸). در این خصوص بی هنجاری قوی مثبت (رنگ قرمز به معنای بالا آمدگی) مشاهده شده در باختر دریای خزر،

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.2.71]

جایی که وجود سنگهای دگرگونی شاهدی بر فشار شدید تکتونیکی ناشی از رخداد روراندگی هستند (Zanchi, et al.. ۲۰۰۹) قابل توجه ویژه است.

وجود بی هنجاری های مثبت به رنگهای قرمز و زرد در محل بی هنجاری های منفی مشاهده شده در نقشهٔ آهنگ کرنش مساحتی که با رنگ آبی مشخص شده بودند می‌تواند به توجیه فرونشست های مورد اشاره در ارتباط با گسلش راستالغز در مناطق مورد بحث کمک کند. بی هنجاری های مثبت مشاهده شده در البرز مرکزی را می توان به حرکت راستالغز در امتداد گسلهای مشا و فیروزکوه و احتمالاً گسلهای ناشناختهٔ دیگری در امتداد شمال نسبت داد. اما بی هنجاری شدید مثبت موجود وجود تلفیقی از سازوکارهای راندگی و امتدادلغز در البرز خصوصاً البرز مرکزی که مورد توجه این مطالعه است، به دلیل پدیدهٔ افراز دگرشکلی در این منطقه است. این پدیده معلول دلیل اعمال تنش در جهت گسلها و شکستگی های از پیش موجود بین بلوکهای زمین ساختی است. این شکستگی ها چنانکه در قسمت مقدمه ذکر شد از پیشینهٔ زمین شناسی منطقه که تحولات زمین ساختی متعددی را تجربه کرده است برجای مانده اند. همانطور که سازوکارهای مختلف گسلش راستالغز و راندگی در سراسر البرز با درجات مختلف چیرگی دیده می شوند، میزان افراز دگرشکلی نیز در این محدوده متفاوت است.

حرکتهای راستالغز و وارون که نشان دهندهٔ افراز دگرشکلی با درجات مختلف هستند در سراسر محدوده دیده می شوند. این حرکتها در اثر اعمال نیرو در جهت گسلها و شکستگی های از پیش موجود اتفاق می‌افتند. سازوکار راستالغز مشاهده شده در قسمت میانی البرز مرکزی، نحوهٔ قرارگیری گسلهای مشا و فیروزکوه با روند خاوری باختری، نسبت به محورهای اصلی آهنگ کرنش، حرکت ترکیبی ترافشارشی با سهم بیشتری از مولفهٔ راستالغز را نشان می دهد. از طرف دیگر، عمود بودن محورهای مذکور بر روند گسلها در قسمت های شمال باختری، سازوکاری تقریبا خالص از نوع راندگی را نشان می دهد که به مانند مشاهدات انجام شده در البرز میانی از طریق مطابقت سازوکار کانونی زمین لرزه ها، با این تفسیر همخوانی خوبی دارد.

نتیجه گیری

در این مطالعه آهنگ کرنش ژئودتیک با استفاده از بردارهای سرعت GPS در البرز مرکزی مورد بررسی قرار گرفت. جهت محورهای اصلی آهنگ کرنش تغییرات قابل توجهی را در منطقهٔ مورد مطالعه و مناطق همجوار نشان داد. راستای محورهای اصلی آهنگ کرنش در منطقه تغییراتی نشان داد که تا حدی مشابه با الگوی V شکل گسلها در بخشهای خاوری و باختری در البرز مرکزی است. گسلش مورد انتظار با مطالعهٔ نحوهٔ تغییر جهت محورهای فشارشی آهنگ کرنش و همچنین بی‌هنجاری‌های قابل مشاهده در نقشهٔ آهنگ کرنش اتساعی مطابقت خوبی با لرزه خیزی در منطقه نشان داد. وجود بی‌هنجاری هایی در نقشهٔ آهنگ کرنش مساحتی (اتساع) که در مناطقی از البرز مرکزی با بزرگای اندک محورهای آهنگ کرنش و لرزه خیزی پایین همراه است نشان دهندهٔ قفل شدگی احتمالی است و خطر وقوع مخاطرات لرزه ای، به صورت رخداد زمین‌لرزه ای بزرگ در این ناحیه را تقویت می کند.

منابع

Aki, K. and Richards, P. G., ۲۰۰۲, Quantitative Seismology, Quantitative Seismology: Theory and Methods, University Science Books.

Alavi, M., ۱۹۹٦, Tectonostratigraphic synthesis and structural style of the Alborz mountain system in northern Iran, J. Geodyn., **۲۱(۱)**: ۱–۳۳.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.2.71]

Allen, M., ۲۰۰٤, Late Cenozoic reorganization of the Arabia-Eurasia collision and the comparison of short-term and long-term deformation rates, Tectonics, ۲۳, TC۲۰۰۸, **doi**: ۱۰,۱۰۲۹/۲۰۰۳TC۰۰۱۵۳۰.
Allen, M., Ghassemi, M.R., Sharabi, M. & Qorashi, M., ۲۰۰۳, Accomodation of late Cenozoic oblique shortening in the Alborz range, Iran, J. Struct. Geol., **۲۵**: ٦٥۹–٦۷۲.
Ambraseys, N. N., & Melville, C. P., ۲۰۰٥, A history of Persian earthquakes. New York: Cambridge University Press.
Argus, D. F., and R. G. Gordon, ۱۹۹۰, Pacific-North America plate motion from very long baseline interferometry compared with that determined from magnetic anomalies transform faults,and earthquake slip vectors, J. Geophys Res. ,**۹٥(۱۷):**۳۱٥-۱۷, ۳۲٤.
Berberian, M., ۱۹۸۳, The southern Caspian: a compressional depression floored by a trapped, modified oceanic crust, Can. J. Earth Sci., **۲۰(۲):** ۱٦۳–۱۸۳.
Berberian, M., King, G.C.P., ۱۹۸۱, Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. Canadian Journal of Earth Sciences ۱۸: ۲۱۰–۲٦٥.
Berberian, M., Yeats, R.S., ۲۰۰۱, Contribution of archaeological data to studies of earthquake history in the Iranian Plateau. Journal of Structural Geology **۲۳**: ٥٦۳–٥۸٤.
Bibby, H. M., Haines, A. J. and Walcott, R. I., ۱۹۸٦, Geodetic strain and the present day plate boundary zone through New Zealand, Bull. R. Soc. N Z., **۲٤**:٤۲۷-٤۳۸.
DeMets, C., Gordon, R.G., Argus, D.F. and Stein, S., ۱۹۹٤, Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions, Geophys. Res. Lett., **۲۱**: ۲۱۹۱-۲۱۹٤.
Djamour, Y., Vernant, P., Bayer, R., Nankali, H.R., Ritz, J.F., Hinderer, J., Hatam, Y., Luck, B., Moigne, N., Sedighi, M., Khorrami, F., ۲۰۱۰, GPS and gravity constraints on continental deformation in the Alborz mountain range, Iran. Geophysical Journal International, **۱۸۳**: ۱۲۸۷-۱۳۰۱
Engdahl, E.R., Van der Hilst, R., Buland, R., ۱۹۹۸, Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination. Bulletin of the Seismological Society of America ۸۸: ۷۲۲–۷٤۳.
England, P., and P. Molnar, ۱۹۹۰, Surface uplift, uplift of rocks, and exhumation of rocks, Geology, **۱۸**: ۱۱۷۳-۱۱۷۷.
Global CMT Catalog. [Online]. Available: http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html [۱۹۷٦, Januray ۱]
Haines, A. J. and Holt, W. E.,۱۹۹۳, A procedure to obtain the complete horizontal motions within zones of distributed deformation from the inversion of strain rate data, J. Geophys. Res., **۹۸**: ۱۲,۰٥۷-۱۲,۰۸۲.
Haines, A. J., ۱۹۸۲, Calculating velocity fields across plate boundaries from observed shear rates, Geophys J. R. Astron. Soc., ٦۸:۲۰۳-۲۰۹,
Haines, A. J., Jackson, J. A., Holt, W. E. and Agnew, D. C., ۱۹۹۸, Representing distributed deformation by continuous velocity fields, Rep. ۹۸/٥, Inst. of Geol. and Nucl. Sci., Lower Hutt, New Zealand.
Hollingsworth, J., Jackson, J., Walker, R. and Nazari, H., ۲۰۰۸, Extrusion tectonics and subduction in the eastern South Caspian region since ۱۰ Ma, Geology, **۳٦**: ۷٦۳–۷٦٦, **doi**:۱۰,۱۱۳۰/G۲٥۰۰۸A.۱.
Holt, W. E. and Haines, A. J., ۱۹۹٥, The kinematics of northern South Island, New Zealand, determined from geologic strain rates, Journal of Geophysical Research, **۱۰۰(۹)**: pages ۱۷,۹۹۱-۱۸,۰۱۰.
Holt, W.E. and T.A. Stern ۱۹۹۱, Sediment loading on the western platform of the New Zealand continent: Implications for the strength of a continental margin. Earth and Planetary Sciences Letters, v. ۱۰۷: ٥۲۳-٥۳۸.
Jackson, J.A., Priestley, K., Allen, M. and Berberian, M., ۲۰۰۲, Active tectonics of the South Caspian Basin, Geophysical Journal International, **۱٤۸**:۲۱٤-۲٤٥.
Keiding, M., Árnadóttir, T., Sturkell, E., Geirsson, H., & Lund, B., ۲۰۰۸, Strain accumulation along an oblique plate boundary: the Reykjanes Peninsula, southwest Iceland. *Geophysical Journal International*, ***172*(۲)**: ۸٦۱–۸۷۲. **doi**: ۱۰,۱۱۱۱/j.۱۳٦٥-۲٤٦x.۲۰۰۷,۰۳٦٥٥.x
Kostrov, B.V., ۱۹۷٤, Seismic moment and energy of earthquakes, and seismic flow of rock [Engl. transl.], Izv. Earth Phys., ۱: ۲۳–٤۰.
Masson, F., Chery, J., Hatzfeld, D., Martinod, J., Vernant, P., Tavakoli, F. and Ghafory-Ashtiani, M., ۲۰۰٥, Seismic versus aseismic deformation in Iran inferred from earthquakes and geodetic data, Geophys. J. Int., **۱٦۰**: ۲۱۷–۲۲٦.
Masson, F., Y. Djamour, S. Van Gorp, J. Chéry, M. Tatar, F. Tavakoli, H. Nankali, and P. Vernant, ۲۰۰٦, Extension in NW Iran driven by the motion of the South Caspian Basin, Earth Planet. Sci. Lett., ۲٥۲(۱–۲), ۱۸۰–۱۸۸, **doi**: ۱۰,۱۰۱٦/j.epsl.۲۰۰٦,۰۹,۰۳۸.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]
[DOI: 10.52547/jsaeh.8.2.71]

Masson, F., Anvari, M., Djamour, Y., Walpersdorf, A. and Tavakoli, F., ۲۰۰۷. Large-scale velocity field and strain tensor in Iran inferred from GPS measurements: new insight for the present-day deformation pattern within NE Iran. Geophys. J. Int., ۱۷۰:٤۳٦–٤۰.

Nilforoushan F., Masson F., Vernant P., Vigny C., Martinod J., Abbassi M., Nankali H., Hatzfeld D., Bayer R., Tavakoli F., Ashtiani A., Doerflinger E., Daignières M., Collard P. and Chéry J., ۲۰۰۳, GPS network monitors the Arabia-Eurasia collision deformation in Iran, Journal of Geodesy, ۷۷: ٤۱۱-٤۲۲.

Pourbeyranvand, Sh., Lund, B., Tatar, M. and Arnadottir, Th., ۲۰۱٦, Spatial variations of stress and strain in the Zagros region, southwestern Iran, International Conference and School on Structure, Tectonics and Earthquakes in the Alborz-Zagros-Makran Region

Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S. and Ergintav, S., ۲۰۰٦, GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. J. Geophys. Res., ۱۱۱, B۰٥٤۱۱.

Ritz, J.-F., Nazari, H., Ghassemi, A., Salamati, R., Shafei, A., Solaymani, S. & Vernant, P., ۲۰۰٦, Active transtension inside central Alborz : a new insight into northern Iran-southern Caspian geodynamics, Geology, **۳٤(٦)**: ٤۷۷–٤۸۰.

Stocklin, J., ۱۹۷٤, Possible ancient continental margin in Iran. In: Burke, C., Drake, C. (Eds.), Geology of Continental Margins. Springer-Verlag, New York, pp. ۸۷۳–۸۷۷.

Tatar, M., Hatzfeld, D., Abbassi, A., & Fard, F. Y. (۲۰۱۲). Microseismicity and seismotectonics around the Mosha fault (Central Alborz, Iran). *Tectonophysics*, *544-545*, ٥۰–٥۹. **doi:** ۱۰,۱۰۱٦/j.tecto.۲۰۱۲,۰۳,۰۳۳

Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R., Tavakoli, F. and Chéry, J., ۲۰۰٤, Contemporary Crustal Deformation and Plate Kinematics in Middle East Constrained by GPS measurements in Iran and Northern Oman, Geophys. J. Int., **۱٥۷**: ۳۸۱-۳۹۸.

Walcott, R. I., ۱۹۸٤, The kinematics of the plate boundary zone through New Zealand: A comparison of short-and long-term deformations, Geophys. J. R. Astron. Soc, **۷۹**: ٦۱۳-٦۳۳.

Ward, S. N., ۱۹۹۰, Pacific-North America plate motions: New results from very long baseline interferometry, J. Geophys. Res., **۹٥(۲۱)** :۹٦٥-۲۱,۹۸۱.

Zanchi, A., Berra, F., Mattei, M., Ghassemi, M. & Sabouri, J., ۲۰۰٦, Inversion tectonics in central Alborz, Iran, J. Struct. Geol., **۲۸** : ۲۰۲۳–۲۰۳۷.

Zanchi, A., Zanchetta, S., Berra, F., Mattei, M., Garzanti, E., Molyneux, S., Nawab, A., and Sabouri, J., ۲۰۰۹, The Eo-Cimmerian (Late? Triassic) orogeny in North Iran, The Geological Society, London, Special Publications, **۳۱۲**: ۳۱–٥٥

Zhu, S. and Shi, Y., ۲۰۱۱, Estimation of GPS strain rate and its error analysis in the Chinese continent, Journal of Asian Earth Sciences, **٤۰** : ۳٥۱–۳٦۲.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.2.71]