

مطالعه زمین‌ساخت فعال البرز (ایران) با استفاده از داده‌های ژئودتیکی

محمدجواد بنی‌مهدی دهکردی^۱، زهرا موسوی^۲، اسماعیل شبانیان^۳، مجید عباسی^۳ و عبدالرضا قدس^{۴*}

^۱ دانشجوی دکتری ژئوفیزیک، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، ایران

^۲ دانشیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، ایران

^۳ استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

^۴ استاد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، ایران

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۹، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۲)

چکیده

در این پژوهش آهنگ تغییرشکل البرز با استفاده از تلفیق داده‌های شبکه‌های جدید جی‌پی‌اس دائمی موقعیت‌یابی یکپارچه مالکیت‌ها (شمیم) و شهرداری تهران (سمت) و شبکه جدید موقت IASBS_NCC با داده‌های ایستگاه‌های دائمی و موقت سازمان نقشه‌برداری کشور بررسی شده است. افزایش تعداد ایستگاه‌ها باعث بهبود میدان سرعت شده است که نشان می‌دهد مسبب تغییرشکل فعال در تمام عرض البرز، چندین گسله فعال است. برخلاف باور غالب درباره تقسیم کرنش در البرز بین گسله‌های امتدادلغز در پهلوی جنوبی و گسله فشارشی خزر در پهلوی شمالی، میدان سرعت جدید نشان‌دهنده پخش بودن حرکات امتدادلغز و فشارشی در طول گسله‌های مختلف در عرض البرز است. در مطالعات پیشین به علت نبود ایستگاه بین گسله خزر و دیگر گسله‌های دامنه شمالی، تمام تغییرشکل مشاهده‌شده در نیمه شمالی البرز به گسله خزر مرتبط دانسته شده است. در میدان سرعت جدید، وجود یک بردار جی‌پی‌اس جدید بین گسله‌های شمال البرز و خزر در قسمت شرقی البرز بر نقش غالب گسله شمال البرز در جایدهی کرنش دلالت دارد. نقشه جدید همانند نقشه‌های قبلی، مقدار کرنش کلی کمتری برای غرب البرز نشان می‌دهد که در همخوانی با سطح لرزه‌خیزی کمتر مشاهده‌شده در این منطقه است. میدان سرعت جدید نشان‌دهنده وجود سامانه کششی فعال در غرب البرز در بازه طول جغرافیایی ۴۹ تا ۵۰/۵ درجه است و همچنین نشان‌دهنده حرکت امتدادلغز دو میلی‌متری در لبه شمالی ایران مرکزی است که می‌تواند با پهنه گسلی آران-طرود و گسله عطاری مرتبط باشد. با وجود اینکه مطالعات زلزله‌نگاری دال بر فعالیت بیشتر نیمه شرقی گسله مشا است و مطالعات زمین‌شناسی، آهنگ تغییرشکل آن را دو میلی‌متر بر سال برآورد کرده است، میزان هر دو حرکت امتدادلغز و فشارشی در طول گسله مشا کمتر از یک میلی‌متر بر سال است. در محدوده کلان‌شهر تهران، میزان حرکت امتدادلغز و فشارشی چشمگیر نیست و در حد کمتر از یک میلی‌متر است که به معنای دوره بازگشت بسیار طولانی زلزله‌های بزرگ است.

کلمه‌های کلیدی: البرز، تحلیل خطر، تهران، جی‌پی‌اس، میدان سرعت

۱ مقدمه

کلان‌شهر تهران منطقه فعال لرزه‌خیز در البرز است (برای مثال اشتری و همکاران، ۲۰۰۵ و تاتار و همکاران، ۲۰۱۲) که به دلیل تمرکز زیاد جمعیت، بیشترین خطرپذیری لرزه‌ای را در ایران دارد. البرز قسمتی از کمربند فعال آلپ-همیالیا است که بیش از ۲۵ درصد جمعیت کشور ایران را در خود جای داده است (مرکز آمار ایران، <https://amar.org.ir>). حرکت توأمان رو به شمال ایران مرکزی و به سمت شمال غرب حوضه جنوبی خزر نسبت به اوراسیا (جکسون و همکاران، ۲۰۰۲ و ورنانت و همکاران، ۲۰۰۴)، در البرز شبکه‌ای از گسله‌های فعال و لرزه‌زا به وجود آورده است که آهنگ لغزش بیشتر آنها مشخص نیست و برای تعدادی از آنها مانند گسله‌های کهریزک، شمال و جنوب ری حتی توافق درباره گسله بودن یا نبودن آنها وجود ندارد (برای مثال دی مارتینی و همکاران، ۱۹۹۸ و نظری و همکاران، ۲۰۱۰). تعیین آهنگ لغزش گسله‌ها نقشی کلیدی در تعیین دوره بازگشت زلزله‌های بزرگ دارد و ناگزیر قدمی اساسی در تعیین نقشه‌های خطر و خطرپذیری لرزه‌ای در کلان‌شهر تهران است.

بر اساس مطالعات قبلی تصور بر این است که عمده تغییرشکل در نیمه جنوبی البرز در امتداد گسله‌های فیروزکوه، مشا، آستانه و طالقان و در نیمه شمالی در امتداد گسله خزر متمرکز است. جمور و همکاران (۲۰۱۰) در مدل‌سازی بلوکی خود همه تغییرشکل در البرز را بر گسله‌های خزر، مشا، فیروزکوه، آستانه و طالقان متمرکز کردند. بر اساس این مدل‌سازی کینماتیکی که با استفاده از داده‌های جی‌پی‌اس انجام شد، حرکت غالب امتدادلغز چپ‌بر روی گسله‌های فیروزکوه، مشا، آستانه و طالقان محاسبه شد. این حرکت در مواردی با مولفه کوچکی از فشارش یا کشش در برخی از این گسله‌ها همراه است. همچنین گسله خزر حرکت توأمان فشارشی و امتدادلغز

چپ‌بر دارد که مؤلفه فشاری آن از سمت شرق به غرب افزایش می‌یابد (جمور و همکاران، ۲۰۱۰). از آنجایی که تراکم ایستگاه‌های جی‌پی‌اس در نیمه شمالی البرز در امتداد گسله خزر است و هیچ ایستگاهی بین گسله‌های شمال البرز و خزر وجود ندارد، هنوز مشخص نیست با اضافه شدن ایستگاه‌های جی‌پی‌اس در فاصله بین گسله‌های خزر و شمال البرز، تا چه اندازه نتایج این مطالعات می‌تواند تغییر کند.

غالب مطالعات قبلی لرزه‌زمین‌ساختی، نحوه تغییرشکل کلی در البرز را به صورت تقسیم کرنش بین گسله‌های امتدادلغز پهلوی جنوبی البرز (در امتداد گسله‌های مشا، فیروزکوه، آستانه و طالقان) و گسله فشاری خزر در پهلوی شمالی البرز دانسته‌اند (برای مثال جکسون و همکاران، ۲۰۰۲؛ آلن و همکاران، ۲۰۰۳؛ تاتار و همکاران، ۲۰۰۷ و هولینگروث و همکاران، ۲۰۱۰). در این مطالعات شیب گسله خزر به سمت جنوب و شیب گسله‌های پهلوی جنوبی البرز به سمت شمال فرض شده است (برای مثال آلن و همکاران، ۲۰۰۳). نتایج مدل‌سازی بلوکی کینماتیکی جمور و همکاران (۲۰۱۰) با این نظریه همخوانی کامل ندارد؛ چون نشان می‌دهد هر دو حرکت امتدادلغز و فشاری در امتداد گسله خزر به‌عنوان مرز بلوک وجود دارد. هرچند این ناهمخوانی می‌تواند ناشی از پیش‌فرض مدل باشد که البرز (میان گسله‌های مشا و خزر) را یک بلوک کاملاً کشتان در نظر گرفته است و به‌طور قطعی بود یا نبود تقسیم کرنش را نشان نمی‌دهد. شبانیان و همکاران (۲۰۱۲) در جمع‌بندی خود از بررسی کینماتیک فعال البرز که بر پایه مجموع مطالعات زمین‌شناسی، زلزله‌شناسی و ژئودزی بود، نشان دادند که دلیل هندسه لبه جنوبی پوسته حوضه خزر جنوبی و حرکت آن نسبت به ایران مرکزی، سازوکار اصلی گسله‌های اصلی موازی نوار در البرز شرقی (حدوداً از شرق جاده فیروزکوه) راستالغز است. این کینماتیک در بخش غربی (شامل البرز مرکزی و غربی) به یک رژیم ترا فشارشی

(۳) تا حد امکان آهنک لغزش برای برخی گسله‌ها یا پهنه‌های گسلی اصلی تعیین شود. آهنک لغزش به‌دست‌آمده با قرار گرفتن در کنار دیگر پارامترهای لرزه‌زمین‌ساختی می‌تواند به بهبود ارزیابی خطر زمین‌لرزه در کلان‌شهر تهران کمک کند.

۲ لرزه‌زمین‌ساخت

البرز قسمتی از کمربند کوهزایی آلپ-همیالیا است که در شمال ایران بین دو بلوک صلب حوضه جنوبی خزر در شمال و ایران مرکزی در جنوب قرار دارد (شکل ۱). همگرایی رو به شمال ایران مرکزی نسبت به اوراسیا و حرکت به سمت شمال غرب حوضه جنوبی خزر نسبت به اوراسیا علت اصلی تغییرشکل در البرز است. ساختار وی‌شکل (V) البرز (برای مثال عباسی و فرید، ۲۰۰۹؛ سلیمانی آزاد و همکاران، ۱۳۸۲ و شبانیان و همکاران، ۲۰۱۲) به طول ۴۰۰ کیلومتر و عرض ۶۰ تا ۱۲۰ کیلومتر در لبه جنوبی دریای خزر از زنجان تا شاهرود امتداد دارد. این ساختار شامل مجموعه‌ای از چین‌ها و گسله‌های موازی است که در غرب، روند شمال غربی- جنوب شرقی و در شرق، روند شمال شرقی- جنوب غربی دارد (برای مثال آلن و همکاران، ۲۰۰۳؛ و جکسون و همکاران، ۲۰۰۲).

بر اساس مطالعات قبلی جی‌پی‌اس، آهنک کرنش در طول و عرض رشته‌کوه البرز کم است. بیشینه مقدار کوتاه‌شدگی در عرض رشته‌کوه البرز در حدود ۵ میلی‌متر بر سال و بیشینه حرکت امتدادلغز چپ‌بر در حدود ۴ میلی‌متر بر سال تخمین زده شده است (ورنانت و همکاران، ۲۰۰۴ و جمور و همکاران، ۲۰۱۰) که بین چندین گسله مهم مانند مشاء، فیروزکوه، شمال تهران، طالقان و خزر پخش می‌شود. با وجود زمین‌لرزه‌های تاریخی در گستره البرز، مطالعات دیرینه‌زلزله‌شناسی نتوانسته است به‌طور دقیق گسله مسبب، زمان و تعداد رخداد تاریخی و بزرگای آنها را مشخص کند (برای مثال بربریان و یتس، ۲۰۱۷). آخرین

تبدیل می‌شود که ممکن است از نظر ساختاری در قالب تقسیم کرنش یا حرکت مورب‌لغز انجام شود؛ با این حال، کینماتیک امروزی البرز در جزئیات بسیار پیچیده‌تر به چشم می‌آید؛ برای نمونه ریتز و همکاران (۲۰۰۶) نشان دادند بخشی از گسله مشاء در هولوسن سازوکار کششی دارد. نظری و همکاران (۲۰۰۹) نیز در بررسی‌های خود نشان دادند گسله طالقان (در انتهای خمیده سامانه چپ‌بر البرز مرکزی) سازوکار راستالغز کششی دارد. بررسی درستی این نظریه‌ها و توضیح برخی پیچیدگی‌های مشاهده‌شده نیازمند یک میدان سرعت با بردارهای جی‌پی‌اس متراکم‌تر از میدان‌های سرعت جی‌پی‌اس موجود است، طوری که بتواند حرکات ساختارهای اصلی را جداگانه توضیح دهد.

از آنجایی که عمق لرزه‌خیزی در البرز مرکزی بیشتر در اعماق بین ۱۰ تا ۲۰ کیلومتری متمرکز است (برای مثال نعمتی و همکاران، ۲۰۱۱؛ تاتار و همکاران، ۲۰۱۲ و سلطانی‌مقدم و همکاران، ۲۰۱۹)، اندازه‌گیری کرنش سطحی با داده‌های جی‌پی‌اس می‌تواند در تخمین آهنک لغزش گسله‌ها مؤثر باشد (برای مثال ساویج و بورفورد، ۱۹۷۳). تمرکز مطالعات پیشین جی‌پی‌اس (نیلفروشان و همکاران، ۲۰۰۳؛ ورنانت و همکاران، ۲۰۰۴؛ جمور و همکاران، ۲۰۱۰ و خرمی و همکاران، ۲۰۱۹) بر قسمت‌های البرز به‌خصوص اطراف کلان‌شهر تهران بوده است و تنها از داده‌های شبکه‌های دائمی و موقت سازمان نقشه‌برداری استفاده کرده‌اند. ما در این پژوهش با افزایش بردارهای جی‌پی‌اس در سطحی گسترده‌تر و تلفیق داده‌های ایستگاه‌های جی‌پی‌اس جدید موقت و ثابت (در مجموع ۲۷ ایستگاه) به مطالعه تغییرشکل پوسته البرز پرداخته‌ایم. در این کار تلاش شده است: (۱) نحوه تقسیم کرنش در عرض البرز و الگوی تغییر آن در طول البرز با استفاده از میدان سرعت بهبود یافته جی‌پی‌اس بررسی شود؛ (۲) نقش گسله خزر در جایدهی کرنش در تغییرشکل البرز ارزیابی شود؛

است. شبانیان و همکاران (۲۰۱۲) بر این باورند که گسله‌های اصلی موازی با لبه جنوبی خزر در البرز شرقی سازوکار اصلی راستالغز دارند، ولی در البرز غربی رژیم تنش به رژیم ترفشارشی تبدیل می‌شود که ممکن است از نظر ساختاری در قالب تقسیم کرنش یا حرکت مورب‌لغز انجام شود.

گسله‌های شمال البرز و خزر مهم‌ترین گسله‌های نیمه شمالی البرز هستند که تعدادی زمین‌لرزه تاریخی و دستگاهی به آنها نسبت داده شده است (بربریان و یتس، ۲۰۱۷). گسله خزر مسبب اصلی زمین‌لرزه بلده با بزرگای ۶/۲ (تاتار و همکاران، ۲۰۰۷) معرفی شده است. دو زمین‌لرزه فریم ۱۱۲۷ با بزرگای ۶/۸ و کسوت ۱۹۳۵ با بزرگای ۶/۶ در مازندران به گسله شمال البرز منتسب شده‌اند (آمبرسیز و ملویل، ۱۹۸۲ و بربریان و یتس، ۲۰۱۷). گسله خزر شمالی‌ترین و طولانی‌ترین گسله البرز است که مرز شمالی بلوک البرز را می‌سازد. طبق مطالعه جمور و همکاران (۲۰۱۰) این گسله مسئول اصلی جابجایی کرنش در نیمه شمالی البرز است. بر پایه مطالعات جی‌پی‌اس و بر اساس مدل بلوکی برای قسمت شرقی آن، حرکت امتدادلغز چپ‌بر و فشاری به ترتیب با آهنگ ۵ و ۳-۲ میلی‌متر بر سال و برای قسمت غربی آن، حرکت امتدادلغز چپ‌بر و فشاری به ترتیب با آهنگ ۳-۲ و ۶ میلی‌متر بر سال تخمین زده شده است (جمور و همکاران، ۲۰۱۰ و خرمی و همکاران، ۲۰۱۹). در مدل بلوکی تمام تغییرشکل در داخل بلوک به مرزهای آن اختصاص داده می‌شود و فرض می‌شود تغییرات داخلی در بلوک وجود ندارد یا ناچیز است. شناخت دقیق مرزها مستلزم وجود شبکه‌ای از ایستگاه‌های پرشمار و با فاصله مناسب است که دربردارنده تمام گسله‌ها یا مناطق گسلی موجود باشد. وجود لرزه‌خیزی زیاد درون بلوک البرز، که در مدل‌سازی بلوکی جی‌پی‌اس لحاظ شده است، نشان می‌دهد درون بلوک البرز، کرنش در حال جای‌گیری است و این بلوک کاملاً کششان نیست.

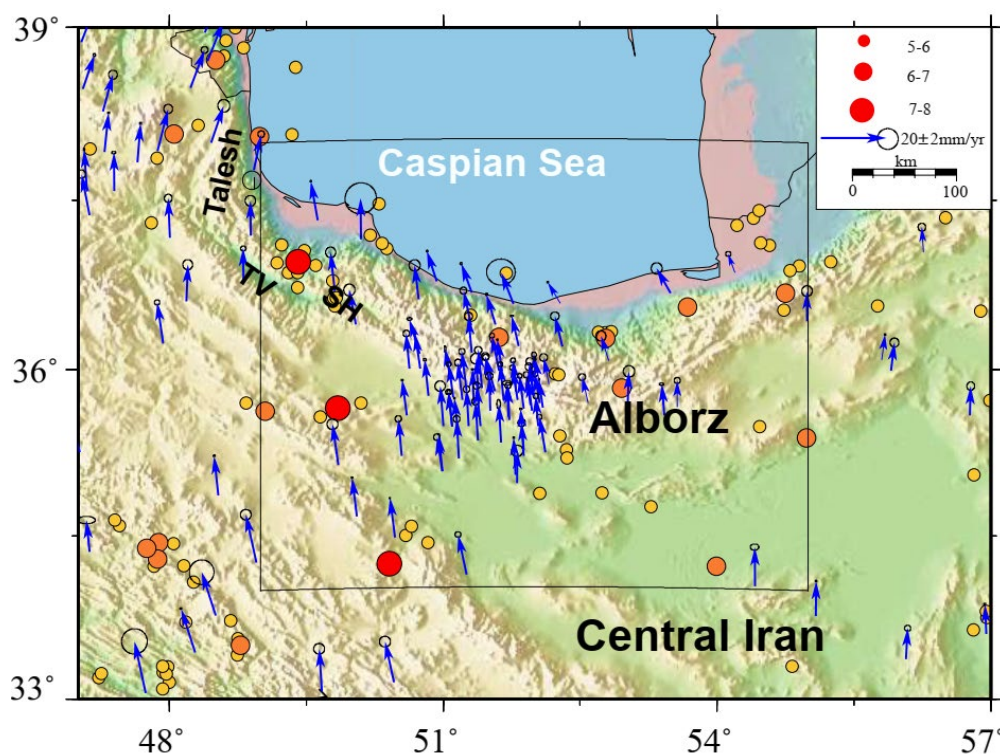
زمین‌لرزه تاریخی گزارش شده در سال ۱۸۳۰ میلادی با بزرگای بیشتر از ۷ اتفاق افتاده که به گسله مشا نسبت داده شده است (بربریان و یتس، ۲۰۱۷). زمین‌لرزه‌های دستگاهی (برای مثال اشتری و همکاران، ۲۰۰۵؛ نعمتی و همکاران، ۲۰۱۱ و تاتار و همکاران، ۲۰۱۲) بیانگر وجود تعداد زیادی گسله فعال آشکار و پنهان است. تعداد زیاد گسله‌های فعال، آهنگ کم کرنش لرزه‌ای، ناکافی بودن تراکم شبکه‌های زلزله‌نگاری و جی‌پی‌اس از مهم‌ترین چالش‌ها در شناخت لرزه‌زمین‌ساخت البرز است. در البرز چندین مطالعه زلزله‌شناسی در زمینه لرزه‌شناسی انجام شده است، ولی همگی آنها در بازه زمانی کوتاهی برداشت داده داشته‌اند (اشتری و همکاران، ۲۰۰۵؛ نعمتی و همکاران، ۲۰۱۱ و تاتار و همکاران، ۲۰۱۲) و ناگزیر نتوانسته‌اند فعالیت لرزه‌خیزی گسله‌هایی را که بیشترشان آهنگ لغزش کمی دارند، به‌خوبی مطالعه کنند. بر پایه مطالعات زمین‌شناسی و ریخت‌شناسی، بیشتر گسله‌های اصلی فعال مشخص شده‌اند، ولی هنوز توافق عمومی درباره گسله بودن یا لرزه‌خیز بودن تعدادی از آنها وجود ندارد و همچنین درباره سازوکارشان نیز اتفاق نظر وجود ندارد (برای مثال بربریان و یتس، ۲۰۱۷). آهنگ لغزش بسیاری از گسله‌های فعال شناخته شده هنوز مشخص نیست.

مطالعات نوزمین‌ساخت و زلزله‌شناسی بر این باورند که تغییرشکل فعلی در البرز در امتداد گسله‌های موازی فشاری و امتدادلغز چپ‌بر که تقریباً در امتداد رشته‌کوه گسترده شده‌اند (جکسون و همکاران، ۲۰۰۲؛ آلن و همکاران، ۲۰۰۳ و ریتز و همکاران، ۲۰۰۶) تقسیم شده است. بر اساس جکسون و همکاران (۲۰۰۲)، تقسیم کرنش فعال در نتیجه همگرایی مورب ورقه‌های اوراسیا و عربی و همچنین حرکت به سمت شمال-غرب حوضه جنوبی خزر نسبت به اوراسیا اتفاق می‌افتد. جمور و همکاران (۲۰۱۰) با توجه به نتایج مدل‌سازی کینماتیکی بردارهای جی‌پی‌اس اعتقاد دارند که تقسیم کرنش در البرز به‌صورت جزئی رخ داده

قسمت شرقی گسله شمال تهران (حوالی کرج) را $۰/۳$ میلی‌متر بر سال را برآورد کردند. نظری و همکاران (۲۰۱۴) برای گسله فیروزکوه، آهنگ حرکت امتدادلغز چپ‌بر را $۱/۲-۱/۲$ میلی‌متر بر سال محاسبه کردند.

در این مطالعه برای شعاع ۱۲۰ کیلومتری نسبت به مرکز شهر تهران، از نقشه پایه گسله‌ها بر اساس پژوهش شبانیان و حسن‌زاده (۱۴۰۰) استفاده شده است. این نقشه بر اساس ارزیابی مطالعات لرزه‌زمین ساخت قبلی، عکس‌های هوایی و بازدیدهای میدانی ترسیم شده است. برای نواحی خارج از این فاصله، از نقشه گسله‌های فعال ایران (حسامی و همکاران، ۲۰۰۳) استفاده شده است. همچنین پهنه گسلی حبله‌رود-تخت‌رستم، که شامل مجموعه‌ای از گسله‌های شمال شرق-جنوب غرب چپ‌بر از کوه تخت‌رستم تا فیروزکوه است، همراه با شواهد ساختاری و ریخت‌زمین‌ساختی مرتبط معرفی شده است (شکل ۲).

آهنگ کرنش برای بسیاری از گسله‌های البرز مشخص نیست و تنها برای قطعات کوچکی از گسله مشا با استفاده از روش‌های زمین‌شناسی تخمین زده شده است. گسله مشا گسله‌ای امتدادلغز در شرق تهران است که زمین‌لرزه تاریخی ۱۸۳۰ لواسانات را به قسمت شرقی آن منتسب می‌دانند (سلیمانی آزاد و همکاران، ۱۳۸۲ و ریتز و همکاران، ۲۰۰۳). با توجه به مطالعات دیرینه‌زلزله‌شناسی، آهنگ حرکت چپ‌بر روی این گسله ۲۱ ± ۲ میلی‌متر بر سال (ریتز و همکاران، ۲۰۰۳) تخمین زده شده است. نظری و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از مطالعات دیرینه‌زلزله‌شناسی بر پایه روش‌های زمین‌ریخت‌شناسی، برای گسله طالقان کمینه لغزش افقی را بین $۰/۶$ تا $۱/۶$ میلی‌متر بر سال و کمینه آهنگ لغزش قائم را $۰/۵$ میلی‌متر بر سال به‌دست آوردند. ریتز و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از مطالعات دیرینه‌زلزله‌شناسی، آهنگ لغزش در



شکل ۱. نقشه لرزه‌زمین‌ساختی البرز و مناطق اطراف آن. رومکز زلزله‌ها (دایره‌ها) در بازه زمانی ۱۹۰۹ تا ۲۰۲۳ (دایره‌ها) از فهرست‌نامه USGS تهیه شده است. بردارهای آبی، میدان سرعت مسطحاتی جی‌پی‌اس را نسبت به اوراسیا در سرتاسر ایران نمایش می‌دهند (خرمی و همکاران، ۲۰۱۹). منطقه مورد مطالعه با کادر سیاه‌رنگ نشان داده شده است. TV و SH به‌ترتیب معرف دره طارم و دره شاهرود است.

۳ داده‌های مورد استفاده و پردازش آن‌ها

به منظور بررسی تغییر شکل سطح زمین و به دست آوردن آهنگ این تغییرات می‌توان از شبکه‌های دائم و موقت جی‌پی‌اس بهره برد. یکی از اهداف این مطالعه به دست آوردن بردار سرعت افقی با استفاده از شبکه‌های ثابت (permanent) و موقت (campaign) برای البرز است. در این پژوهش برای تعیین میدان سرعت مسطحاتی در منطقه البرز مشاهدات ایستگاه‌های جی‌پی‌اس سه شبکه ثابت و دو شبکه موقت در بازه زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۱ پردازش شد. شبکه جی‌پی‌اس ثابت ایران (International Permanent GPS Network) موسوم به IPGN در حال حاضر شامل ۱۵۰ ایستگاه جی‌پی‌اس است که سازمان نقشه‌برداری در سال ۱۳۸۴ جهت اهداف ژئودینامیک و بررسی پیوسته حرکات پوسته زمین نصب و راه‌اندازی کرد. این شبکه شامل بیش از ۱۵۰ ایستگاه است که بر اساس توزیع جمعیت و زمین‌ساخت منطقه گسترش یافته است. فاصله متوسط بین ایستگاه‌ها بین ۲۵ تا ۱۰۰ کیلومتر است و همه آن‌ها به گیرنده UZ12 Ashtech و آنتن Choke-ring مجهز هستند. در البرز تقریباً بیشتر ایستگاه‌های شبکه IPGN بین طول جغرافیایی ۵۰/۵ و ۵۲ درجه شرقی قرار دارند که گسله‌هایی همچون پیشوا، کوه سرخ، اشتهاارد، شمال تهران، مشا، کندوان، شمال البرز و خزر را در برمی‌گیرد. منطقه مورد مطالعه دربرگیرنده ۳۲ ایستگاه از شبکه دائمی IPGN است و برای اولین بار بردارهای سه ایستگاه GRGN،

GTCL و KRMD محاسبه و ارائه شد. شبکه دائمی "شمیم" (شبکه موقعیت‌یابی یکپارچه مالکیت‌ها) در حال حاضر شامل ۱۴۴ ایستگاه جی‌پی‌اس است که در سال ۱۳۹۵ از سوی سازمان ثبت اسناد و املاک کشور با هدف افزایش دقت در نقشه‌برداری کاداستر از کلیه اراضی و املاک موجود در کشور و صدور سند تفکیکی راه‌اندازی شد. تمامی ایستگاه‌ها به گیرنده لایکا و آنتن Choke-ring مجهز هستند و فاصله متوسط بین آن‌ها ۶۰ تا ۱۹۰ کیلومتر است. شبکه شمیم توزیع مکانی بهتری نسبت به شبکه IPGN دارد، ولی طول مدت داده‌های در دسترس آن در حدود چهار سال است. در این مطالعه از یازده ایستگاه شبکه شمیم استفاده شده است. شبکه ثابت "سمت" در حال حاضر شامل پنج ایستگاه جی‌پی‌اس است که سازمان فناوری اطلاعات و ارتباطات شهرداری تهران در سال ۱۳۸۹ به منظور تعیین موقعیت ۲۴ ساعته دقیق و آنی در سطح شهر تهران راه‌اندازی کرده است. تمامی ایستگاه‌ها به گیرنده لایکا و آنتن Choke-ring مجهز هستند. فاصله بین ایستگاه‌ها ۱۲ تا ۱۸ کیلومتر است. در منطقه مورد مطالعه، شبکه‌های موقت سازمان نقشه‌برداری شامل ۵۴ ایستگاه است که در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۸ سه بار برداشت شده‌اند. تمامی ایستگاه‌ها به گیرنده Ashtech Z12 یا Trimble 4000SSI و آنتن Choke-ring مجهز بودند. تمرکز این سامانه بیشتر اطراف تهران و لبه جنوبی دریای خزر است (جمور و همکاران، ۲۰۱۰).

نرم افزار VELROT تلفیق شد. بسته نرم افزاری VELROT همه بردارهای سرعت را نسبت به چارچوب مرجع اوراسیا همگن و یکپارچه می کند (هرینگ و همکاران، ۲۰۱۵) و به این ترتیب امکان استفاده از آنها را در مطالعات مربوط به زمین ساخت فعال و تعیین آهنگ لغزش گسله ها فراهم می کند.

۴-۱ تعیین مختصات روزانه

برای تعیین مختصات روزانه از بسته نرم افزاری GAMIT استفاده شده است. از مزیت های این بسته نرم افزاری، اعمال تصحیحات دقیق مربوط به پارامترهای مداری، جزرومد، حرکت قطبی و تصحیحات مربوط به اتمسفر و مرکز فاز آنتن با استفاده از فایل های کمکی و مدل های جهانی است. این نرم افزار از مشاهدات تفاضلی دو گانه ترکیبی دو سیگنال L1 و L2 که عاری از خطای یونسفر است، برای تعیین مختصات روزانه استفاده می کند. در این نرم افزار، ابتدا یک مدل با استفاده از مختصات ماهواره ها و مقادیر اولیه مختصات ایستگاه های جی پی اس تولید می شود. این مدل شامل پدیده هایی مانند دوران زمین، پتانسیل گرانی زمین و اثر اتمسفر بر سیگنال های دریافتی است. پارامترهای مدل نظری (مختصات ایستگاه ها، خطای تروپوسفری، ابهام فاز، خطای مداری و پارامترهای دوران زمین) با استفاده از روش کمترین مربعات با مشاهدات واقعی مقایسه شدند تا بهترین جواب برای این پارامترها تعیین شود.

برای تعیین مختصات روزانه از فایل های مداری دقیق منتشر شده سرویس بین المللی GNSS استفاده شد. این سرویس از شبکه جهانی ایستگاه های ثابت GNSS، مراکز جمع آوری و تحلیل داده ها تشکیل شده است و از سال ۱۹۹۴ تاکنون داده های GNSS را جمع آوری و ذخیره و محصولات مرتبط با این داده ها را هم تولید و منتشر می کند. از جمله این محصولات، فایل های مداری کم دقت و آنی با دقت ۱۶۰ سانتیمتر تا فایل های مداری دقیق با دقت کمتر از

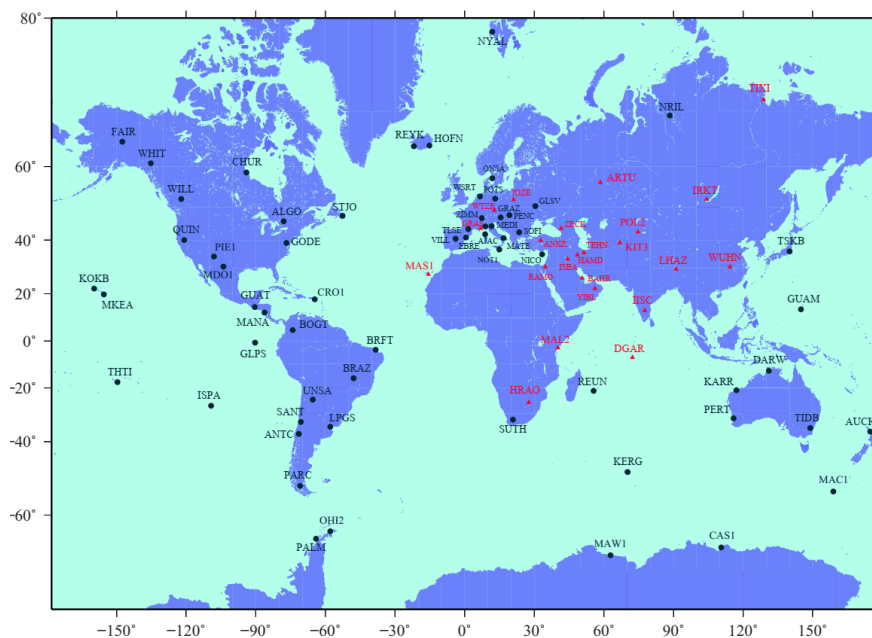
شبکه موقت NCC-IASBS را سازمان نقشه برداری کشور (NCC) برای اهداف گرانی سنجی، ترازبایی، نجومی و مغناطیس سنجی در فاصله زمانی سال های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۷ نصب کرد و یک بار برداشت انجام شد. فاصله بین ایستگاه های درجه یک این شبکه تقریباً ۵۵ کیلومتر است. در اپک اول، اندازه گیری های جی پی اس به مدت یک روز با استفاده از گیرنده های جی پی اس Ashtech UZ-12 یا Trimble 4000SSI و آنتن Choke-ring انجام شد. دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان (IASBS) در بازه زمانی سال های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ تعداد هشت ایستگاه از این شبکه را با استفاده از دستگاه های جی پی اس Trimble 5700II یا Epoch25 مجهز به آنتن ژئودتیک Trimble Zephyr به مدت یک روز دوبار اندازه گیری کرد. این مجموعه شامل ایستگاه های 2314، 2318، 2319، 2419، 2414، 2313، 2413 و 2513 است که با توجه به محل قرارگیری آنها، نسبت به کارهای گذشته پوشش دهنده مناسبی هستند (شکل ۲).

۴ پردازش داده های GPS

در این مطالعه برای پردازش داده های جی پی اس و تعیین مقادیر جابه جایی و محاسبه میدان سرعت از نرم افزار GAMIT/GLOBK (هرینگ و همکاران، ۲۰۱۰) استفاده شده است. برای تعیین بردارهای سرعت و مختصات روزانه، پردازش داده ها با توجه به راهبرد سایر پژوهشگران در دو مرحله انجام شده است (فیگل و همکاران، ۱۹۹۳). در مرحله اول پردازش داده ها، داده های GNSS (Global Navigation Satellite System) به صورت روزانه با استفاده از روش کمترین مربعات، تحلیل و در مرحله دوم، نتایج روزانه به عنوان ورودی برای محاسبه سری زمانی و بردار سرعت ایستگاه ها استفاده می شود. در نهایت، بردارهای سرعت به دست آمده با بردارهای سرعت منتشر شده در مطالعات قبلی با استفاده از بسته

مرجع به همراه اپک مرجع است (التمیمی و همکاران، ۲۰۱۶). از آنجا که ایستگاه‌های متعلق به سرویس جهانی GNSS در تعریف چهارچوب مرجع ITRF2014 به کار می‌روند، برای ترکیب شبکه البرز با این چهارچوب و انتقال مختصات از این چهارچوب مرجع به ایستگاه‌های پردازشی، ۲۳ ایستگاه IGS در پردازش روزانه با داده‌های شبکه‌های البرز ترکیب شد (شکل ۳). این ایستگاه‌ها شامل ARTU, BAHR, DGAR, GRAS, HARO, IISC, IRKT, JOZE, KUNM, LHAZ, MALI, MAS1, POL2, RAMO, SELE, TEHN, TIXI, TRAB, TIBL, WTRZ و WUHN است. ایستگاه‌ها طوری انتخاب شده‌اند که پوشش مکانی مناسبی در اطراف ایران داشته باشند تا خط مبنای مکانی این ایستگاه‌ها با ایستگاه‌های شبکه البرز همگن و مناسب باشد. شکل ۳ توزیع مکانی این ایستگاه‌ها را در اطراف ایران نشان می‌دهد.

۲/۵ سانتیمتر و با تأخیر ۱۲ تا ۱۸ روزه است (http://sopac-cs.csrc.ucsd.edu). برای کاهش خطا در تعیین موقعیت ایستگاه‌های پردازش شده، از به‌روزترین مدل‌های مؤثر در خطاهای مشاهدات جی‌پی‌اس استفاده شده است. از جمله این مدل‌ها می‌توان مدل تابع تصویر VMF1 (بوهم و همکاران، ۲۰۰۶) برای کاهش خطای تروپوسفری و مدل اقیانوسی جزرومد FES2004 (لیارد و همکاران، ۲۰۰۶) برای کاهش خطای حاصل از جزرومد زمین صلب نام برد. در حال حاضر، روش‌های ژئودزی ماهواره‌ای برای اندازه‌گیری تغییر شکل پوسته از چهارچوب مرجع جهانی ITRF استفاده می‌کنند. این چهارچوب مرجع را سرویس بین‌المللی دوران زمین (IERS) با توجه به مشاهدات سامانه‌های ناوبری تعریف می‌کند و از سال ۱۹۸۸، هر چند وقت یک‌بار به‌روز می‌شود. جدیدترین نسخه این چهارچوب مرجع، ITRF2014 است که شامل مختصات و سرعت ایستگاه‌های مورد استفاده برای تعریف چهارچوب



شکل ۳. توزیع مکانی ایستگاه‌های IGS. مثلث‌های قرمز پراکندگی ایستگاه‌های IGS اطراف ایران را نشان می‌دهد که در پردازش روزانه با شبکه‌های ثابت و موقت البرز ترکیب شده‌اند. دایره‌های سورمه‌ای نشان‌دهنده پراکندگی ایستگاه‌های IGS هستند که به صورت جهانی انتخاب شده‌اند تا شبکه‌های پردازش شده البرز به چهارچوب مرجع ITRF متصل شوند.

را بررسی و روزهایی را از داده‌ها حذف کرد که مختصات با نوفه زیاد، خطای کاملاً مشخص یا تغییرشکل ناشی از زلزله دارند. فرایند بررسی و کنترل سری زمانی ایستگاه‌ها تا زمان به‌دست آوردن سری زمانی بدون دورافت یا پرش ادامه می‌یابد.

۳-۴ محاسبه بردار سرعت ایستگاه‌های جی‌پی‌اس
نوفه در سری زمانی ایستگاه‌های جی‌پی‌اس با زمان و فضا مرتبط است (ژانگ و همکاران، ۱۹۹۷ و لنگین، ۲۰۰۸). خطای مرتبط با فضا می‌تواند ناشی از پدیده‌های آب‌شناختی یا خطا در مدل‌سازی مدارها، جو یا چارچوب مرجع باشد. اگر نوفه همبسته در برآورد حداقل مربعات سرعت ایستگاه نادیده گرفته شود (فقط نوفه سفید فرض شود)، عدم قطعیت‌های سرعت به‌طور غیرواقعی کوچک هستند (جانسون و همکاران، ۱۹۹۵ و ویلیامز، ۲۰۰۳)؛ بنابراین در این مطالعه از مرتبه اول گاوس-مارکوف (FOGM) به‌عنوان نوفه تصادفی برای محاسبه نوفه همبسته در تخمین سرعت استفاده شد (رلینگر و همکاران، ۲۰۰۶ و جمور و همکاران، ۲۰۱۰). FOGM در فیلتر کالمن قسمت GLOBK اجرا شده است. با این فرض که هر سری زمانی می‌تواند به اندازه کافی مدل شود، با استفاده از FOGM یک مدل نوفه تصادفی یکتا برای هر ایستگاه محاسبه می‌شود. الگوریتم این مدل نوفه تصادفی به‌صورت زیر است (گلب، ۱۹۷۴):

$$\Phi_{xx}(\Gamma) = \sigma^2 e^{-\beta|\Gamma|} \quad (1)$$

که Φ_{xx} یک خودهمبستگی FOGM، σ^2 واریانس بلندمدت و $1/\beta$ همبستگی زمانی است. مدل نوفه FOGM از میانگین‌گیری باقیمانده‌های سری زمانی برای هر ایستگاه تخمین زده می‌شود. فاصله میانگین‌گیری حداقل از هفت روز

نتایج پردازش روزانه شامل مختصات روزانه ایستگاه‌ها و ماتریس واریانس کواریانس مربوطه، تعیین خطای تروپوسفری با فواصل دو ساعته، خطای مداری برای هر ماهواره، پارامترهای دوران زمین و ابهام فاز است. یکی از پارامترهایی که در فایل خروجی پردازش روزانه برای صحت نتایج کنترل می‌شود، پارامتر $postfit\ nrms$ است. اگر ابهام فاز در مشاهدات فاز به‌خوبی حل شده باشد، این عدد باید کمتر از ۰/۲۵ شود (باک و همکاران، ۱۹۸۶ و هرینگ و همکاران، ۲۰۱۰). همچنین ۷۵ ایستگاه جهانی در مدت زمان ۲۲ سال (۲۰۰۰-۲۰۲۱) به‌صورت روزانه و یک شبکه جهانی پردازش و نتایج پردازش روزانه این شبکه جهانی برای تعیین بردارهای سرعت مسطحاتی و سری زمانی ایستگاه‌های البرز استفاده شد.

۲-۴ محاسبه سری زمانی مختصات ایستگاه‌های GPS

در این مرحله، پردازش‌های روزانه مربوط به ایستگاه‌های ایران و جهان با استفاده از GLOBK با هم ترکیب می‌شوند. GLOBK در واقع یک فیلتر کالمن و یک برآوردگر خطی است که می‌تواند مجهولات را بر اساس تلفیق مدل دینامیکی و مدل مشاهداتی به‌دست‌آورد. در مدل دینامیکی از مجهولات لحظات قبل، مجهولات زمان بعد پیش‌بینی می‌شوند. سپس مجهولات پیش‌بینی‌شده بر اساس مدل مشاهداتی بهبود می‌یابند. در اولین مرحله، پردازش‌های روزانه شبکه محلی البرز و شبکه جهانی ۷۵ ایستگاه IGS به‌منظور ایجاد سری زمانی در سه جهت (شمالی-جنوبی، شرقی-غربی، ارتفاعی) با یکدیگر ترکیب شده‌اند. سری‌های زمانی روزانه جی‌پی‌اس ناشی از حرکت ورقه‌های زمین‌ساختی، دگرشکلی هنگام زلزله و بعد از زلزله، بالاآمدگی ماگمایی یا تغییرشکل پوسته زمین به دلیل شارژ شدن آبخوان‌ها است. قبل از تعیین میدان سرعت مسطحاتی، باید سری زمانی ایستگاه‌ها

(خرم‌دره) و ARNG (آرننگه) در تفسیرها و پروفیل‌ها استفاده نشده است. حرکت عمودی در ایستگاه‌های نامبرده به قدری زیاد است (بیشتر از دو سانتی‌متر در سال) که می‌تواند مقدار حرکت مسطحاتی مشاهده‌شده را تحت تأثیر قرار دهد و مؤلفه غیرزمین‌ساختی در آنها ایجاد کند. حرکات عمودی مشاهده‌شده بیشتر مربوط به پدیده فرونشست در دشت‌ها به علت مصرف بی‌رویه آب‌های زیرزمینی است (برای مثال رضایی و موسوی، ۲۰۱۹).

جهت توصیف نتایج، البرز نسبت به طول جغرافیایی ۵۲/۵ درجه به دو قسمت شرقی و غربی تقسیم می‌شود. طول جغرافیایی ۵۲/۵ درجه در واقع مرکز خمیدگی رشته کوه البرز و محلی است که روند گسله‌ها از شمال شرق به جنوب غرب در البرز شرقی به شمال غرب به جنوب شرق در البرز غربی تغییر جهت می‌دهد. در البرز شرقی با حرکت از جنوب به شمال طول بردارهای سرعت آرام کاهش می‌یابد که به معنای وقوع کوتاه‌شدگی در این قسمت است و همچنین جهت بردارهای سرعت به سمت غرب می‌چرخد که بیانگر حرکت چپ‌بر است که در مطالعات گذشته نیز به آن اشاره شده است (جمور و همکاران، ۲۰۱۰). الگوی دگرشکلی در البرز غربی با البرز شرقی متفاوت است. مقدار کوتاه‌شدگی مشاهده‌شده در راستای جنوب به شمال از طول جغرافیایی ۵۲/۵ تا ۴۹ درجه کاهش پیدا می‌کند؛ به عبارتی، بیشینه کوتاه‌شدگی در مرکز خمیدگی رشته کوه البرز در قسمت غربی قرار دارد. در غرب البرز (دره طارم، شکل ۱)، میدان سرعت یک حرکت کششی در راستای شمال-جنوب دیده می‌شود. در البرز غربی نیز همچون البرز شرقی حرکت چپ‌بر مشاهده می‌شود، ولی میزان آن به مراتب کمتر است. علاوه بر حرکت چپ‌بر در قسمت جنوب غربی، یک حرکت راست‌بر روی گسله کوشک نصرت مشاهده می‌شود. این حرکت راست‌بر در

تایک‌دهم از کل مدت سری زمانی است. مدل FOGM مدلی برای پیش‌بینی سرعت ایستگاه بر اساس مدت زمان سری زمانی است (رلینگر و همکاران، ۲۰۰۶). FOGM از مدل RW (Random Walk) استفاده می‌کند. RW نمونه‌ای خاص از مدل FOGM است که در آن همبستگی زمانی $1/\beta$ بی‌نهایت است. با استفاده از RW در GLOBK می‌توان مدل نوفه را به دست آورد که عدم قطعیت سرعت یکسانی را در مدل FOGM در سراسر مدت زمان سری زمانی پیش‌بینی می‌کند. از RW می‌توان در فیلتر کالمن که از داده‌های یکسانی برای سری زمانی استفاده می‌کند، برای محاسبه سرعت و عدم قطعیت واقعی استفاده کرد. از آنجایی که به میانگین‌گیری در سراسر سری زمانی نیاز است، این الگوریتم فقط در سری زمانی پیوسته کاربرد دارد. برای ایستگاه‌های موقت از بیشترین عدم قطعیت استفاده‌شده در RW برای ایستگاه‌های پیوسته استفاده می‌شود.

۵ نتایج

مشاهدات سه شبکه ثابت و دو شبکه موقت در بازه زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۱ برای محاسبه میدان سرعت مسطحاتی و ارتفاعی منطقه البرز پردازش شد. محدوده زمانی داده‌برداری برای هر کدام از شبکه‌ها در جدول ۱ آمده است. شکل ۴ میدان سرعت مسطحاتی به دست آمده را نسبت به چهارچوب مرجع اوراسیا نشان می‌دهد. بردارهای سرعت آبی‌رنگ در مقالات قبلی منتشر شده‌اند (جمور و همکاران، ۲۰۱۰ و خرمی و همکاران، ۲۰۱۹)، اما بردارهای سرعت صورتی‌رنگ برای اولین بار در این مطالعه برآورد شده‌اند. از آنجا که فرونشست‌های زیاد ممکن است باعث ایجاد یک حرکت افقی شود، بر اساس میدان سرعت مؤلفه عمودی از بردارهای ایستگاه‌های GRGN (گرگان)، VRMN (ورامین)، KRMD

مطالعه خدایپرست و همکاران (۲۰۲۰) بر اساس مطالعات ساختاری و زمین شناسی قبلاً گزارش شده است.

جدول ۱. محدوده زمانی داده برداری شبکه‌های دائمی (سه مورد اول) و موقت (موارد چهارم و پنجم) مورد استفاده در این پژوهش. شبکه موقت سازمان نقشه برداری (NCC) در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۸ سه بار اندازه گیری شده است.

شبکه	زمان
IPGN	۲۰۱۸-۲۰۰۴
SHAMIM	۲۰۲۱-۲۰۱۸
SAMT	۲۰۲۰ و ۲۰۱۸-۲۰۱۳
NCC	۲۰۰۸-۲۰۰۰
NCC-IASBS	۲۰۱۹، ۲۰۱۸، ۲۰۰۶

در حوضه جنوبی دریای خزر از شرق به غرب بردارهای سرعت حرکت مشخص رو به شمال غرب را نسبت به ورقه اوراسیا نشان می دهند (جمور و همکاران، ۲۰۱۰). همچنین طول این بردارها از شرق به غرب تقریباً افزایش می یابد و روند آن‌ها به راستای شمالی- جنوبی نزدیک می شود که مؤید حرکت ساعتگرد حوضه جنوبی دریای خزر نسبت به اوراسیا است (جکسون و همکاران، ۲۰۰۲؛ جمور و همکاران، ۲۰۱۰ و موسوی و همکاران، ۲۰۱۳). در محدوده کلان شهر تهران با وجود اینکه تعداد و تراکم ایستگاه‌های جی پی اس زیاد است، تغییرات طول و جهت آنها چندان مشخص نیست و در حد مقدار خطای مشاهده شده و به عبارتی، کمتر از یک میلی متر است. برای درک بهتر چگونگی تغییرات میدان سرعت در البرز، با رسم یک پروفیل در البرز شرقی و دو پروفیل در البرز غربی عمود بر روندها و گسله‌های اصلی (شکل ۴) و تصویر کردن بردارهای سرعت در راستای این پروفیل‌ها و عمود بر آنها میزان حرکت‌های برشی و کوتاه شدگی بررسی می شود (شکل ۵). با توجه به اینکه ایستگاه‌های جی پی اس در اطراف اکثر گسله‌ها تراکم زیادی ندارند، نمی توان آهنگ لغزش را

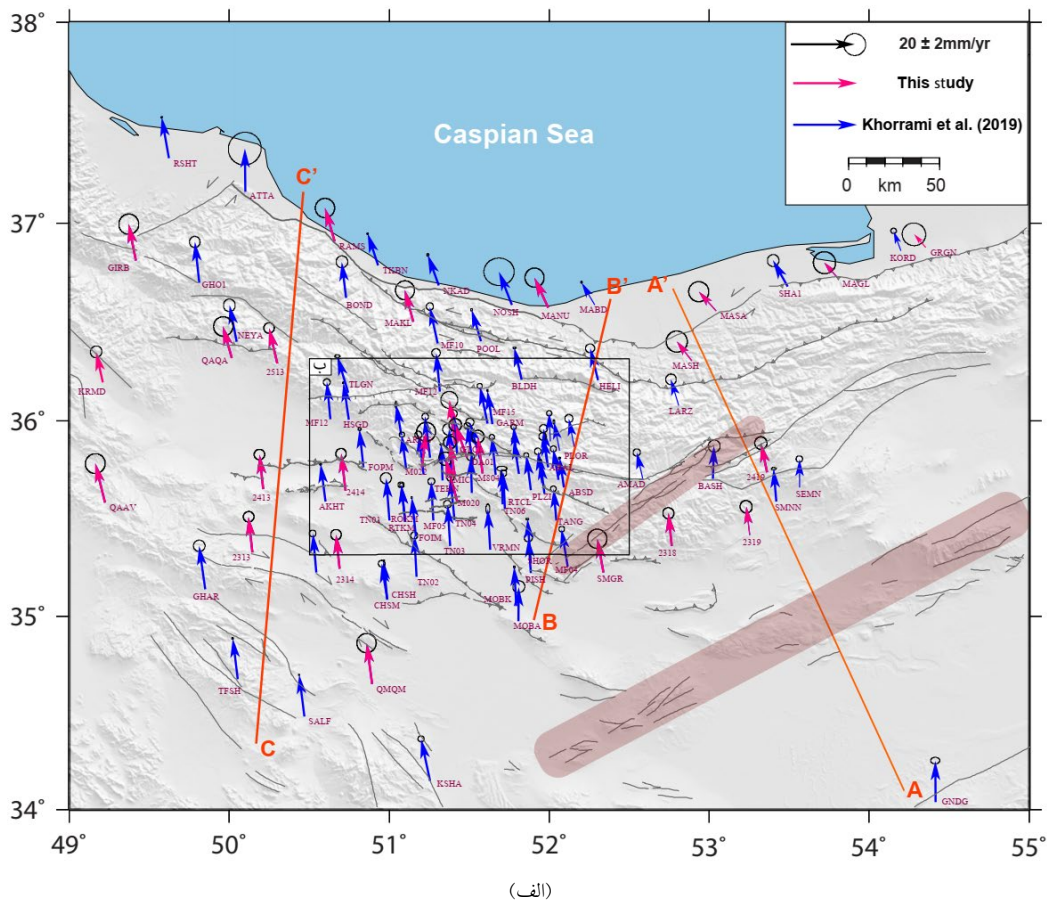
برای هر گسله محاسبه کرد و تنها می توان آهنگ لغزش تجمعی را برای سامانه‌های گسلی متشکل از چندین گسله تخمین زد. در صورت قفل بودن گسله‌ها، عمده میدان تغییر شکل ناشی از آنها تا فاصله برابر با عمق لایه لرزه‌زا (در البرز حدود ۲۰ کیلومتر) در هر سمت گسله توزیع می شود. از آنجا که فاصله میان بعضی از گسله‌ها کمتر از ۴۰ کیلومتر است، با مطالعات جی پی اس تنها می توان یک آهنگ تغییر شکل برای یک سامانه گسلی با گسله‌های نزدیک به هم ارائه کرد.

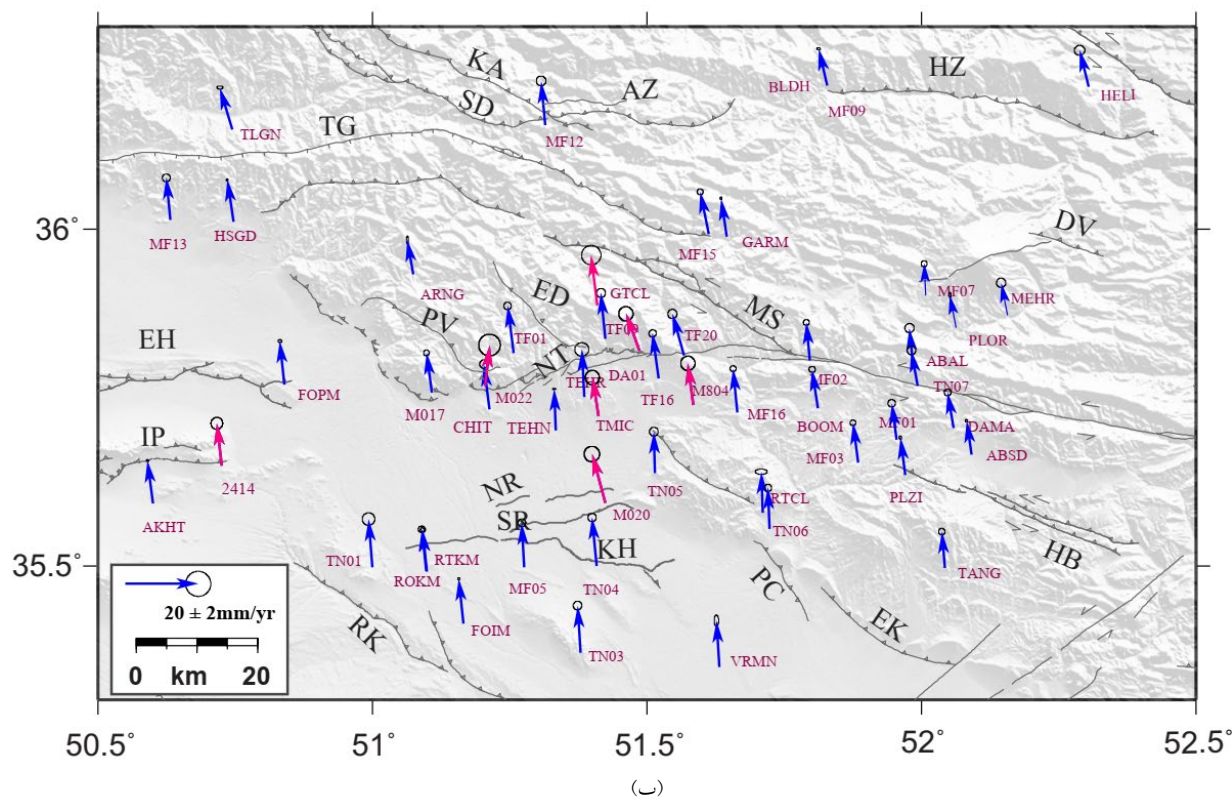
پروفیل AA' (شکل ۴- الف) در البرز شرقی قرار دارد و در بردارنده دو بلوک ایران مرکزی در جنوب و البرز در شمال است. طول این پروفیل که عمود بر گسله‌های اصلی رسم شده است، بیش از ۳۵۰ کیلومتر است و از شمال بلوک ایران مرکزی شروع و تا لبه ساحلی دریای خزر ادامه دارد. پروفیل AA' گسله‌های کویر بزرگ (GK) و پهنه گسلی آران- طرود (ATD) را قطع می کند که دو روند ساختاری با راستای شمال شرقی- جنوب غربی در بخش شمالی بلوک ایران مرکزی هستند. هر دو پهنه گسلی کویر بزرگ و آران- طرود سازوکار امتداد لغز چپ بر دارند (افلاکی و همکاران، ۲۰۱۷). ایستگاه GNDG جنوبی ترین ایستگاه دائمی است که در نزدیکی گسله کویر بزرگ قرار دارد و به وضوح به سمت شمال جهت گیری دارد، در حالی که ایستگاه MASA در حاشیه جنوبی دریای خزر با حرکت شمال غربی قرار گرفته است. پروفیل AA' از گسله‌های مهمی مانند گسله عطاری (AT)، پهنه گسلی آستانه- صبور (AS)، گسله شمال البرز (NA) و گسله خزر (KZ) عبور می کند. پهنه گسلی آستانه- صبور از تعدادی روند شمال شرقی- جنوب غربی تشکیل شده است که در بیشتر طول خود نشانه‌های

مقدار میانگین وزنی مؤلفه فشاری و امتدادلغز بیشتر لحاظ می‌شود.

پروفیل AA' حدود ۶ میلی‌متر بر سال حرکت امتداد لغز چپ‌بر را در امتداد خود نشان می‌دهد (شکل ۵- الف) که این مقدار با نتایج ورنانت و همکاران (۲۰۰۴) و جمور و همکاران (۲۰۱۰) سازگار است. بر اساس شکل ۵- الف مؤلفه تجمیعی امتدادلغز چپ‌بر با حرکت به سمت شمال در سه مرحله افزایش می‌یابد که متناظر با سه پهنه گسلی است. این شکل نشان‌دهنده ۲ میلی‌متر بر سال حرکت چپ‌بر بین ایستگاه GNDG و لبه جنوبی گسله عطاری است.

زمین‌ریختی دارند که بیانگر گسلش‌های جوان است (هالینگزورث و همکاران، ۲۰۱۰). پهنه گسلی آستانه- صبور احتمالاً با زلزله‌های تاریخی سال‌های ۸۵۶، ۱۳۰۱ و ۱۸۹۰ مرتبط است (امبرسیز و ملویل، ۱۹۸۲). برای ارزیابی مؤلفه‌های امتدادلغز و کوتاه‌شدگی در البرز، ابتدا پروفیل بر اساس نحوه تغییر مؤلفه‌های بردارهای جی‌پی‌اس در امتداد آن به تکه‌هایی تقسیم می‌شود. از آنجایی که مؤلفه‌های بردارهای جی‌پی‌اس اندازه خطای متفاوتی دارند، برای محاسبه میانگین بردارها در هر تکه از میانگین وزنی با استفاده از خطای گزارش‌شده برای هر بردار استفاده شده است. هرچه اندازه خطای بردار مشاهده‌شده کمتر باشد، وزن آن در محاسبه





شکل ۴. بردارهای میدان سرعت جی‌پی‌اس در (الف) البرز (ب) اطراف کلان‌شهر تهران. بردارهای آبی‌رنگ نمایانگر ایستگاه‌هایی هستند که در پژوهش‌های پیشین (جمور و همکاران ۲۰۱۰ و خرمی و همکاران، ۲۰۱۹) استفاده شده‌اند و در این مقاله دوباره پردازش شده‌اند. بردارهای صورتی‌رنگ نشان‌دهنده ایستگاه‌های جدید هستند که برای اولین بار استفاده شده‌اند.

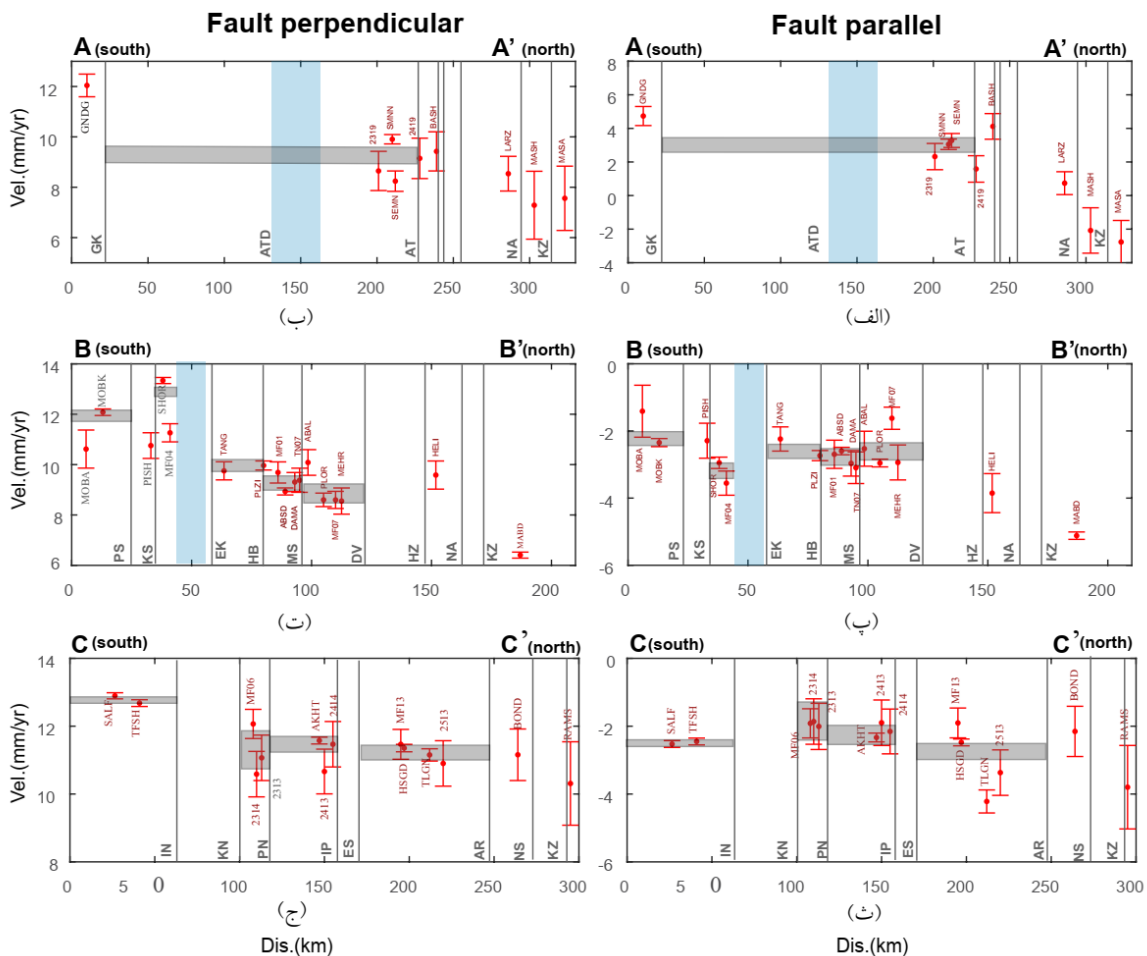
وجود ایستگاه جی‌پی‌اس MASH بین گسله‌های خزر و شمال البرز، هیچ حرکت واضحی در امتداد گسله خزر مشاهده نمی‌شود؛ بنابراین می‌توان مقدار حرکت چپ‌بر مشاهده‌شده را به گسله شمال البرز اختصاص داد. تغییرات پلکانی شرح داده شده نشان می‌دهد بخش عمده‌ای از مؤلفه امتداد لغز چپ‌بر در امتداد پهنه گسلی آستانه-صبور و گسله شمال البرز قرار دارد.

مؤلفه عمود بر گسله پروفیل AA' (شکل ۵-ب) نشان‌دهنده کوتاه‌شدگی تقریباً ۴ میلی‌متری در سال در عرض کمربند البرز شرقی است. بیشترین میزان کوتاه‌شدگی (بیش از ۲ میلی‌متر بر سال) بین ایستگاه‌های GNDG و 2319 رخ

این فاصله تحت تأثیر دو پهنه گسلی کویر بزرگ و آران-طرود قرار دارد. در نبود ایستگاه‌های جی‌پی‌اس بین دو سامانه گسلی، مقدار حرکت امتداد لغز مشاهده‌شده را می‌توان به هر یک از پهنه‌های گسلی یا به مجموع حرکت روی دو پهنه گسلی اختصاص داد. گام دوم تغییر شکل امتداد لغز، مربوط به حرکت امتداد لغز در عرض پهنه گسلی آستانه-صبور است. در گسله‌های چاشم، بشم و آستانه که زیرمجموعه پهنه گسلی آستانه-صبور هستند، حرکت امتداد لغز چپ‌بر با آهنگ حدود ۲ میلی‌متر در سال پراکنده شده است. گام سوم مربوط به حرکت امتداد لغز چپ‌بر ۳ میلی‌متر بر سال در گسله‌های شمال البرز و خزر است. با توجه به

در سال کوتاه‌شدگی با عبور از گسله‌های کویر بزرگ و عطاری رخ می‌دهد. چندین مطالعه زمین‌شناسی (واکر و جکسون، ۲۰۰۴ و فرید و همکاران، ۲۰۱۱) پیشنهاد کرده‌اند که سازوکار کویر بزرگ و آران-طرود، اغلب امتدادلغز چپ‌بر با یک مؤلفه جزئی شیب‌لغز است. مشاهدات ما نشان می‌دهد مقدار مشخصی از کوتاه‌شدگی در امتداد نیمه جنوبی پروفیل رخ داده است. عمود بودن پروفیل بر گسله‌ها

می‌دهد که دربردارنده پهنه‌های گسلی کویر بزرگ و آران-طرود است. در چند پهنه گسلی دیگر نیز همین کوتاه‌شدگی مشاهده می‌شود. در نگاه اول، کاهش پلکانی سرعت از ایستگاه GNDG به ایستگاه MASA ممکن است به‌عنوان کوتاه‌شدگی زمین‌ساختی (تغییر شکل فشارشی) در ساختارهای فعال تفسیر شود. با وجود این، تفسیر این تغییر ساده نیست؛ برای مثال در اولین مرحله تغییرات، بیش از ۲ میلی‌متر



شکل ۵. نتایج تصویر بردارهای میدان سرعت در راستای پروفیل (سمت چپ) و عمود بر راستای سه پروفیل (سمت راست) نشان‌داده‌شده در شکل ۴. دو محدوده فیروزه‌ای نشان‌دهنده دو پهنه گسلی آران-طرود (ATD) و حبله‌رود-تخت‌رستم (HT) هستند. محدوده‌های خاکستری معرف متوسط وزن‌دار سرعت محاسبه‌شده از بردارهای سرعت مسطحاتی است. پهنه در جهت محور عمودی محدوده‌های خاکستری مربوط به متوسط وزن‌دار خطای اندازه مؤلفه بردار جی‌پی‌اس است. نام اختصاری گسله‌ها در زیرنویس شکل ۲ آورده شده است.

دلالت بر آن دارد که کوتاه‌شدگی مشاهده‌شده، زمین‌ساختی است؛ با این حال فاصله زیاد ایستگاه‌های جی‌پی‌اس و وجود احتمالی گسله‌های ناشناخته (پنهان یا ناشناخته) با جهت‌گیری‌های مختلف، مانع از اختصاص کل این مقدار به کوتاه‌شدگی زمین‌ساختی در امتداد گسله‌های کویر بزرگ و آران- طرود می‌شود. مقدار کوتاه‌شدگی در گسله شمال البرز، بیش از ۱ میلی‌متر بر سال تخمین زده می‌شود. کوتاه‌شدگی چشمگیری روی گسله خزر مشاهده نشد.

پروفیل 'BB' از قسمت مرکزی البرز و آتشفشان دماوند و همچنین در محل تغییر جهت روندها از شمال شرقی به شمال غربی عبور می‌کند که از این منظر، نسبت به پروفیل 'AA' حالت آینه‌ای دارد. این پروفیل دست‌کم از نُه گسله یا پهنه گسلی عبور می‌کند که مهم‌ترین آنها گسله‌های کوه سرخ، حبله‌رود- تخت‌رستم، حصار بن و ایوان کی و همچنین گسله‌های شرق مشا، شمال البرز و خزر هستند. پروفیل 'BB' مقدار جابه‌جایی امتدادلغز چپ‌بر ۳/۵ میلی‌متر بر سال را نشان می‌دهد که قسمت اصلی و عمده آن در نیمه شمالی البرز است. شکل ۵- پ مؤلفه چشمگیر چپ‌بری روی گسله مشا نشان نمی‌دهد. حتی اگر فرض شود که گسله مشا کاملاً قفل شده است، همچنان تا فاصله ۲۰ کیلومتری از هر سمت گسله جابه‌جایی چشمگیری مشاهده نمی‌شود. با توجه به عمق بیشینه لرزه‌خیزی ۲۰ کیلومتری گسله مشا، عمق قفل‌شدگی آن باید حدود ۲۰ کیلومتر باشد. فاصله بیست کیلومتری از گسله مشا فاصله‌ای است که در آن تغییرشکل ناشی از گسله قفل‌شده بیشینه است. ایستگاه‌های جی‌پی‌اس با خطای بسیار کم در اطراف گسله مشا، حرکت امتدادلغز چپ‌بر کمتر از یک میلی‌متری نشان می‌دهند. حرکت امتدادلغز چپ‌بر درخور توجه ۱/۵ میلی‌متر بر سال در اطراف گسله کوه سرخ نشان‌دهنده سازوکار امتدادلغز چپ‌بر غالب برای این گسله

است. در نیمه شمالی پروفیل 'BB'، تقریباً ۲ میلی‌متر بر سال مؤلفه چپ‌بر روی گسله‌های دماوند و هزار مشاهده می‌شود که حاکی از سازوکار غالب امتدادلغز چپ‌بر برای این دو گسله است. گسله‌های شمال البرز و خزر به‌طور کلی حدود ۱/۵ میلی‌متر بر سال حرکت امتدادلغز چپ‌بر دارند که می‌توان آن را با مقدار مشاهده‌شده در پروفیل 'AA' مقایسه کرد. به علت نبود ایستگاه جی‌پی‌اس در فاصله بین گسله‌های خزر و شمال البرز، مقدار حرکت چپ‌بر مشاهده‌شده را نمی‌توان برای دو گسله شمال البرز و خزر تفکیک کرد.

در امتداد پروفیل 'BB' در عرض رشته‌کوه البرز ۵/۵ میلی‌متر بر سال کوتاه‌شدگی رخ می‌دهد که روی هشت گسله یا پهنه گسله توزیع شده است (شکل ۵-ت). کاهش یکنواخت در مقادیر کوتاه‌شدگی به سمت شمال از گسله پیشوا تا گسله شمال البرز نشان‌دهنده سهم تقریباً مشابه (کمتر از یک میلی‌متر بر سال) گسله‌ها در فرایند کوتاه‌شدگی است. در برخی ساختارها مانند مجموعه ساختارهای شامل گسله‌های پیشوا، کوه سرخ و پهنه گسلی حبله‌رود- تخت‌رستم، فاصله نزدیک گسله‌ها و اندرکنش احتمالی بین آنها مانع از تخصیص سهم آنها در مقدار کوتاه‌شدگی می‌شود. مقدار کوتاه‌شدگی این مجموعه حدود ۲ میلی‌متر بر سال است. بخشی از این تغییر احتمالاً به دلیل کوتاه شدن ظاهری ناشی از گسله چپ‌بر حبله‌رود- تخت‌رستم است که نسبت به پروفیل 'BB' مایل است. در دامنه شمالی رشته‌کوه البرز، گسله‌های شمال البرز و خزر کمتر از ۳ میلی‌متر بر سال کوتاه‌شدگی دارند. با توجه به نبود ایستگاه جی‌پی‌اس در فاصله بین دو گسله، نمی‌توان مقدار کوتاه‌شدگی را برای هر کدام از گسله‌ها مشخص کرد.

پروفیل 'CC' شامل ایستگاه‌های جدید 2313، 2314، 2413، 2414 و 2513 و RAMS است. بردارهای سرعت

ایستگاه‌ها است و می‌تواند به‌عنوان مشاهده‌ای مطمئن گزارش شود.

۶ بحث و نتیجه‌گیری

هدف از این مقاله بررسی تغییرشکل پوسته البرز با استفاده از مشاهدات جی‌پی‌اس ایستگاه‌های جدید (۲۷ ایستگاه) به همراه ایستگاه‌های موجود قبلی است. یک نتیجه مهم حاصل از افزایش تعداد ایستگاه‌ها و میدان سرعت جدید به‌دست آمده این است که دگرشکلی فعال در امتداد گسله‌های اصلی پهلوی جنوبی (برای مثال گسله‌های مشا، فیروزکوه، طالقان و آستانه) و پهلوی شمالی (گسله خزر) متمرکز نشده است. به عبارت دقیق‌تر، تغییرشکل فعال کوتاه‌مدت به‌دست آمده از بردارهای جی‌پی‌اس در تمام عرض منطقه از جنوب تا شمال توزیع شده است. میدان سرعت جی‌پی‌اس بهبودیافته در این مطالعه به‌وضوح نشان می‌دهد نحوه تغییرشکل در البرز به‌صورت جدایش کرنش (برای مثال جکسون و همکاران، ۲۰۰۲) در امتداد گسله‌های امتدادلغز پهلوی جنوبی و گسله فشاری خزر نیست و کرنش به‌صورت ترافشارشی و به‌صورت محدودتر تراکشنی جایدهی می‌شود. در شکل ۴ پروفیل‌ها به‌وضوح نشان می‌دهند کرنش برشی و فشارشی در عرض البرز پخش شده است. بر اساس این یافته پیش‌بینی می‌شود انواع زمین‌لرزه‌ها با سازوکار فشاری و امتدادلغز در عرض طول البرز دیده شود. پخش بودن کرنش برشی و فشارشی در عرض البرز نشان‌دهنده وجود گسله‌های متفاوت با جهت‌گیری‌های مختلف نسبت به محورهای تنش است. پخش بودن انواع سازوکارهای فشاری و امتدادلغز در عرض و طول البرز به‌طور مستقیم بر ارزیابی‌های موجود خطر زمین‌لرزه تأثیر دارد؛ چون دیگر نمی‌توان حرکات امتدادلغز

به‌دست آمده از این ایستگاه‌ها بینش جدیدی درباره زمین‌ساخت غرب البرز فراهم می‌کند. مؤلفه امتدادلغز از نقطه C تا فاصله ۱۲۰ کیلومتری از آن به‌صورت راست‌بر و در ادامه، به‌صورت چپ‌بر عمل می‌کند. مؤلفه امتدادلغز راست‌بری در حدود ۱ میلی‌متر بر سال روی گسله‌های ایندس و کوشک نصرت دیده می‌شود. بعد از گسله پرندهک (به فاصله تقریبی ۱۲۰ کیلومتری)، مؤلفه جانبی به حالت چپ‌بر تغییر می‌کند. مقدار کلی این حرکت چپ‌بر بین ۱ تا ۱/۵ میلی‌متر بر سال است که دست‌کم روی پنج پهنه گسلی تقسیم شده است و قسمت شمالی ایران مرکزی و قسمت غربی البرز را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مقدار کل کوتاه‌شدگی در راستای پروفیل CC' در حدود ۲ میلی‌متر بر سال است که بخش اعظم آن روی گسله ایندس است. با توجه به راستای گسله ایندس نسبت به پروفیل CC' (۴۵ درجه) و مؤلفه امتدادلغز راست‌بر آن، امکان دارد قسمتی از کوتاه‌شدگی مشاهده‌شده ظاهری و هندسی باشد و نشان‌دهنده کوتاه‌شدگی زمین‌ساختی در اثر فشارش نباشد.

پدیده جالبی که در البرز غربی (گوشه شمال غرب شکل ۴- الف) می‌توان به آن اشاره کرد، افزایش مؤلفه رو به شمال بردارها در ایستگاه‌های 2315، QAQA، NEYA، GH01، ATTA و RSHT از دشت قزوین به سمت ساحل دریای خزر است. این الگو نشان‌دهنده بروز کشیدگی در این بخش از منطقه، به‌ویژه نواحی شمالی دره شاهرود است. فاصله میان ایستگاه‌ها و ناشناخته بودن ساختارهای فعال زمین‌شناسی ناحیه سبب می‌شود تفسیر بیشتری در این باره ارائه نشود، اما به‌طور کلی می‌توان آهنگ حدودی ۲ میلی‌متر بر سال را برای کشش در حال رخداد در این بخش از منطقه مطرح کرد. این مقدار به‌طور مشخص بیشتر از خطای اندازه‌گیری در این

را به گسله‌های پهلوی جنوبی و حرکات فشاری را به گسله خزر منحصر دانست.

در نظریه تقسیم کرنش لرزه‌ای (جکسون و همکاران، ۲۰۰۲) گسله خزر با شیب به سمت جنوب دانسته شده و مسئول آزاد شدن بیشتر کرنش فشارشی در البرز معرفی شده است. در این تحقیق برای اولین بار یک بردار جی‌پی‌اس بین گسله شمال البرز و گسله خزر ارائه شده است. میدان سرعت جی‌پی‌اس بهبود یافته به وضوح نشان می‌دهد دست کم در امتداد پروفیل AA' بیشتر کرنش فشارشی و برشی در امتداد گسله شمال البرز جایدهی می‌شود. این یافته شک بسیار اساسی در نظریه تقسیم کرنش لرزه‌ای و نیز ساختار گوه‌ای دوسویه البرز به وجود می‌آورد و سبب تحول اساسی در برآورد میزان خطر لرزه‌ای برای شهرهای ساحلی استان‌های گیلان و مازندران می‌شود؛ چون میزان جایدهی کرنش در امتداد گسله خزر را به میزان درخور توجهی کاهش می‌دهد و ناگزیر مقدار خطر لرزه‌ای ناشی از این گسله را کمتر خواهد کرد. اثبات کم بودن کرنش لرزه‌ای در امتداد گسله خزر هنوز به نصب ایستگاه‌های جدید بین گسله خزر و گسله‌های جنوبی آن نیاز دارد.

با مقایسه پروفیل‌های سرعت AA' و CC' در نیمه شرقی و غربی البرز می‌توان دریافت که میزان حرکت امتداد لغز چپ‌بررسی در حدود ۵ میلی‌متر بر سال است. همچنین با مقایسه پروفیل‌های اجرا شده، بیشترین کوتاه‌شدگی به میزان ۵/۵ میلی‌متر بر سال روی پروفیل BB' در مرکز خمیدگی البرز قرار دارد. میدان سرعت جی‌پی‌اس بهبود یافته به وضوح نشان‌دهنده یک رژیم تراکشنی بین طول جغرافیایی ۴۹ و ۵۰/۵ و عرض جغرافیایی ۳۶ و ۳۷/۵ از قزوین تا دشت ساحلی دریای خزر است. وقوع زمین‌لرزه رودبار با مؤلفه نرمال (برای مثال بربریان و واکر، ۲۰۱۰ و آجرلو و همکاران، ۲۰۲۱) با

میدان سرعت جی‌پی‌اس و وجود کشش در غرب البرز همخوانی دارد. ماسون و همکاران (۲۰۰۶) و جمور و همکاران (۲۰۱۰) وجود تنش در غرب البرز را ذکر کرده بودند، اما نتایج ایشان فقط بر اساس مشاهداتشان در ایستگاه ATTA است؛ در حالی که در این تحقیق ایستگاه‌های QAQA، NEYA، GHO1، ATTA، KRMD، GIRB و RSHT به‌طور نظام‌مند تغییر شکل کششی را در قسمت‌های غربی منطقه مورد مطالعه تأیید می‌کنند. برای توضیح علل ممکن برای وجود سامانه کششی در اطراف دره شاهرود، باید مقیاس مشاهدات را به مقیاس منطقه‌ای بزرگ‌تری تغییر داد که در آن عناصر ژئودینامیکی همچون حوضه جنوبی دریای خزر در حال تعامل هستند؛ برای مثال مطالعات زلزله‌شناسی و ژئودتیک قبلی (جکسون و همکاران ۲۰۰۲؛ جمور و همکاران ۲۰۱۰ و موسوی و همکاران، ۲۰۱۳) حرکت حوضه جنوبی خزر را مدل کرده و چرخش آن را نسبت به اوراسیا شرح داده‌اند. با در نظر گرفتن الگوی کلی این چرخش ساعتگرد در اطراف قطب اوپلر در شمال شرقی حوضه جنوبی خزر، بسیاری از مکان‌ها در سواحل شرقی حوضه جنوبی خزر باید سامانه فشاری داشته باشند؛ در حالی که در جنوب غربی حوضه جنوبی خزر انتظار کشش می‌رود. به عبارت دقیق‌تر، اثر لبه‌ای حوضه جنوبی خزر با کوه‌های تالش موقعیتی را برای ایجاد یک جزء کششی فراهم می‌کند که از عرض جغرافیایی تقریباً ۳۶ درجه شروع می‌شود و در اطراف رشت و سواحل دریای خزر به حداکثر می‌رسد و سپس به تدریج به سمت شمال تا عرض جغرافیایی ۴۱ درجه کاهش می‌یابد (جمور و همکاران، ۲۰۱۰).

میدان سرعت جی‌پی‌اس بهبود یافته تفاوت بارزی بین مقدار کرنش در شرق و غرب البرز نشان می‌دهد. مقدار متوسط کرنش فشارشی و برشی در غرب البرز تقریباً نصف

سرعت بازنگری شده در این مطالعه اطلاعاتی مبنی بر تأیید آن نشان نمی‌دهد؛ برای نمونه با وجود چینش ایستگاهی به نسبت خوب در دو طرف گسله مشا (شکل‌های ۴ و ۶-ب)، حرکت امتدادلغز غالب و واضحی روی آن دیده نمی‌شود و تنها مؤلفه کوتاه‌شدگی کمتر از یک میلی‌متر بر سال را می‌توان تشخیص داد. حتی اگر در این ارزیابی، تنها از ایستگاه‌های با کمترین مقدار خطا استفاده شود، برای گسله مشا مؤلفه امتدادلغز چپ‌بر کمتر از ۰/۵ میلی‌متر بر سال برآورد می‌شود. این مقدار به‌طور مشخص کمتر از مقادیر پیشنهادی قبلی است. علت ناهمخوانی میان آهنگ لغزش تعیین شده به روش ژئودیتیک (جمور و همکاران، ۲۰۱۱ و این مطالعه) را می‌توان این‌گونه توضیح داد که در مطالعه جمور و همکاران (۲۰۱۰)، کل جابه‌جایی نسبی میان دو بلوک فرضی کویر و البرز روی سامانه گسله چپ‌بر شاهرود- آستانه- مشا متمرکز شده است و دور از انتظار نیست که آهنگ لغزش بیشتری به‌دست آید. دلیل اختلاف آهنگ لغزش به‌دست آمده در این مطالعه با آهنگ لغزش زمین‌شناسی تعیین شده برای گسله مشا هنوز برای ما روشن نیست.

در جنوب شرقی البرز، گسله کویر بزرگ (برای مثال فرید و همکاران، ۲۰۱۱) و پهنه گسلی آران- طرود (برای مثال افلاکی و همکاران، ۲۰۱۷) دو گسله با راستای شمال شرقی- جنوب غربی در ایران مرکزی هستند که به ترتیب در لبه‌های جنوبی و شمالی دشت کویر قرار دارند. بر اساس مطالعات قبلی (فرید و همکاران، ۲۰۱۱ و افلاکی و همکاران، ۲۰۱۷) هر دو آنها بیشتر چپ‌بر هستند و مؤلفه عمودی ناچیزی دارند. در طول پروفیل 'AA'، به ترتیب حدود ۲ میلی‌متر و ۲ تا ۳ میلی‌متر بر سال حرکت چپ‌بر و کوتاه‌شدگی در منطقه دربرگیرنده گسله کویر بزرگ و پهنه گسلی آران- طرود جایدهی می‌شود. مقدار مشابهی از حرکت چپ‌بر و

مقدار آن در شرق البرز است. نقشه لرزه‌خیزی البرز به‌وضوح لرزه‌خیزی به‌مراتب بیشتری را در شرق البرز نشان می‌دهد (سلطانی‌مقدم، ۲۰۱۹) که در تأیید کمتر بودن میزان کلی کرنش در غرب البرز است؛ بنابراین کم بودن بارز زلزله‌ها در غرب البرز تماماً مربوط به گاف یا سکون لرزه‌ای نیست بلکه تا اندازه‌ای در ارتباط با مقدار کمتر کرنش در غرب البرز است. کمتر بودن کرنش افقی در غرب البرز در کارهای قبلی مانند نقشه کرنش افقی خرمی و همکاران (۲۰۱۹) هم به‌خوبی منعکس شده، ولی با سطح لرزه‌خیزی مقایسه نشده است. جکسون و همکاران (۲۰۰۲) گزارش کرده‌اند که گسله‌های امتدادلغز چپ‌بر شرق البرز را به‌مراتب بهتر می‌توان از گسله‌های امتدادلغز چپ‌بر غرب البرز (مانند گسله رودبار) تشخیص داد. آنها حدس زدند که واضح نبودن سطحی گسله‌های امتدادلغز غرب البرز مرتبط با سرعت لغزش کمتر گسله‌های امتدادلغز در غرب البرز است. مشاهدات ما حدس جکسون و همکاران (۲۰۰۲) را تأیید می‌کند.

گسله مشا یک گسله اصلی امتداد لغز چپ‌بر (ریتز و همکاران، ۲۰۰۶ و سلیمانی آزاد و همکاران، ۲۰۱۱) با شیب ۷۰ درجه رو به شمال است که یک گسله فعال لرزه‌ای محسوب می‌شود (برای مثال تاتار و همکاران، ۲۰۱۲). بر اساس مطالعه مدل بلوکی جمور و همکاران (۲۰۱۰) آهنگ حرکت امتدادلغز چپ‌بر این گسله ۱/۶ میلی‌متر بر سال و آهنگ کوتاه‌شدگی در عرض آن ۱/۱ میلی‌متر بر سال است. سلیمانی آزاد و همکاران (۱۳۸۲) نیز در مطالعات دیرینه- لرزه‌شناسی خود که با حفر یک ترانشه در بخش میانی تکه شرقی گسله مشا انجام شد، آهنگ لغزش امتدادلغز زمین‌شناسی آن را بیش از ۲ میلی‌متر بر سال پیشنهاد کردند. در نگاه نخست، آهنگ لغزش به‌دست آمده از هر دو روش زمین‌شناختی و ژئودزی نزدیکی پذیرفتنی‌ای دارند، اما میدان

لرزه‌شناسی گسل مشا در دره مشا: پژوهشنامه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ۶(۳-۴)، ۴۶-۶۱.
 شبانیان، ا.، حسن‌زاده، م.، ۱۴۰۰، گسله‌های کوآترنری فعال شهر تهران و نواحی پیرامون: پروژه هشدار سریع شهرداری تهران، گزارش داخلی.

Abbassi, M. R., and Farbod, Y., 2009, Faulting and folding in Quaternary deposits of Tehran's piedmont (Iran): *Journal of Asian Earth Sciences*, **34**(4), 522-531.

Aflaki, M., Shabanian, E., Davoodi, Z., and Mohajjel, M., 2017, Reactivation versus reworking of the active continental margin during the Zagros collision: Mahallat-Muteh-Laybid complexes, Sanandaj-Sirjan zone, Iran: *Journal of Geodynamics*, **107**, 1-19.

Ajorlou, N., Hollingsworth, J., Mousavi, Z., Ghods, A., and Masoumi, Z., 2021, Characterizing near-field surface deformation in the 1990 Rudbar earthquake (Iran) using optical image correlation: *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **22**(6), e2021GC009704.

Allen, M. B., Ghassemi, M. R., Shahrabi, M., and Qorashi, M., 2003, Accommodation of late Cenozoic oblique shortening in the Alborz range, northern Iran: *Journal of Structural Geology*, **25**(5), 659-672.

Altamimi, Z., Rebischung, P., Metivier, L., and Collilieux, X., 2016, ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions: *Journal of Geophysical Research*, **121**, 6109-6131.

Ambraseys, N. N., and Melville, C. P., 1982, *A History of Persian Earthquakes*: Cambridge University Press.

Ashtari, M., Hatzfeld, D., and Kamalian, N., 2005, Microseismicity in the region of Tehran: *Tectonophysics*, **395**(3-4), 193-208.

Berberian, M., and Walker, R., 2010, The Rudbār Mw 7.3 earthquake of 1990 June 20; seismotectonics, coseismic and geomorphic displacements, and historic earthquakes of the western 'High-Alborz', Iran: *Geophysical Journal International*, **182**(3), 1577-1602.

Berberian, M., and Yeats, R. S., 2017, Tehran: An earthquake time bomb, in *Tectonic Evolution, Collision, and Seismicity of Southwest Asia*: In

کوتاه‌شدگی نیز در کارهای جی‌پی‌اس قبلی (ورنانت و همکاران، ۲۰۰۴؛ جمور و همکاران، ۲۰۱۰ و خرمی و همکاران، ۲۰۱۹) گزارش شده است که مشاهده ما را تأیید می‌کند. از آنجایی که بر اساس مشاهدات زمین‌شناختی، این دو سامانه گسلی امتداد لغزند، مؤلفه کوتاه‌شدگی به دست آمده نمی‌تواند در عرض دو گسله کویر بزرگ و پهنه گسلی آران-طرود جایدهی شود. وجود ساختارهای مرتبط با زمین‌ساخت نمک مانند گنبد‌های نمکی و دیاپیرسم وسیع نمک در حد فاصل این دو گسله می‌تواند توضیحی برای این ناسازگاری باشد. این به معنای آن است که ساختارهای سطحی ایجاد شده در قلمرو زمین‌ساخت پوسته نازک این بخش با رفتار جریان معمول خود، سبب جذب غیرمتمرکز کرنش فشاری در حد فاصل دو پهنه گسلی شوند و نشانه‌های حرکات رخ داده در پی‌سنگ را پنهان کنند. با توجه به اینکه شبکه ایستگاه‌های جی‌پی‌اس در اطراف دو پهنه گسلی بسیار پراکنده و تنگ است، هنوز برای ما روشن نیست که کرنش در پی‌سنگ این منطقه به چه ترتیب جذب می‌شود.

تشکر و قدردانی

از سازمان نقشه‌برداری کشور به دلیل در اختیار گذاشتن داده‌های اپک اول شبکه NCC-IASBS کمال تشکر را داریم. از سازمان پیشگیری و مدیریت بحران شهر تهران برای در اختیار قرار دادن داده‌های پیوسته جی‌پی‌اس آن سازمان و همچنین داده‌های سری زمانی جی‌پی‌اس شبکه شمیم نهایت سپاسگزاری را داریم. قسمتی از این پژوهش با حمایت مالی طرح بنیاد ملی علم ایران با شماره ۹۷۰۱۵۶۶۶ انجام شده است.

منابع

سلیمانی آزاد، ش.، فقهی، خ.، شبانیان، ا.، عباسی، م.، ریتز، ژ.، ۱۳۸۲، نتایج مقدماتی حاصل از بررسی‌های دیرینه-

- Honor of Manuel Berberian's Forty-Five Years of Research Contributions.
- Bock, Y., Gourevitch, S. A., Counselman III, C. C., King, R. W., and Abbot, R. I., 1986, Interferometric analysis of GPS phase observations: *Manuscripta Geodaetica*, **11**, 282-288.
- Boehm, J., Werl, B., and Schuh, H., 2006, Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **111**(B2).
- De Martini, P. M., Hessami, K., Pantosti, D., D'Addezio, G., Alinaghi, H., and Ghafory-Ashtiani, M., 1998, A geologic contribution to the evaluation of the seismic potential of the Kahrizak fault (Tehran, Iran): *Tectonophysics*, **287**(1-4), 187-199.
- Djamour, Y., Vernant, P., Bayer, R., et al., 2010, GPS and gravity constraints on continental deformation in the Alborz mountain range, Iran: *Geophysical Journal International*, **183**(3), 1287-1301.
- Farbod, Y., Bellier, O., Shabaniyan, E., and Abbassi, M. R., 2011, Geomorphic and structural variations along the Doruneh Fault System (Central Iran): *Tectonics*, **30**(6).
- Feigl, K. L., Agnew, D. C., Bock, Y., et al., 1993, Space geodetic measurement of crustal deformation in central and southern California, 1984-1992: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **98**(B12), 21677-21712.
- Gelb, A. (ed.), 1974, *Applied Optimal Estimation*: MIT press.
- Herring, T. A., King, R. W., Floyd, M. A., and McClusky, S. C., 2015, *Introduction to GAMIT/GLOBK, Release10.6*: Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology.
- Herring, T. A., King, R. W., and McClusky, S. C., 2010, *Introduction to GAMIT/GLOBK*: Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.
- Hessami, K., Jamali, F., and Tabassi, H., 2003, Major active faults of Iran (map): *International Institute of Earthquake Engineering and Seismology*.
- Hollingsworth, J., Nazari, H., Ritz, J. F., et al., 2010, Active tectonics of the east Alborz mountains, NE Iran: Rupture of the left-lateral Astaneh fault system during the great 856 AD Qumis earthquake: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **115**(B12).
- Jackson, J., Priestley, K., Allen, M., and Berberian, M., 2002, Active tectonics of the south Caspian basin: *Geophysical Journal International*, **148**(2), 214-245.
- Johnson, H. O., and Agnew, D. C., 1995, Monument motion and measurements of crustal velocities: *Geophysical Research Letters*, **22**(21), 2905-2908.
- Khodaparast, S., Madanipour, S., Nozaem, R., and Hessami, K., 2020, Structural evidence on strike slip Kinematic inversion of the Kushk-e-Nosrat Fault zone, Central Iran: *Geopersia*, **10**(1), 195-209.
- Khorrami, F., Vernant, P., Masson, F., et al., 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.
- Langbein, J., 2008, Noise in GPS displacement measurements from Southern California and Southern Nevada: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **113**(B5).
- Lyard, F., Lefevre, F., Letellier, T., and Francis, O., 2006, Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004: *Ocean Dynamics*, **56**, 394-415.
- Masson, F., Djamour, Y., Van Gorp, S., et al., 2006, Extension in NW Iran driven by the motion of the South Caspian Basin: *Earth and Planetary Science Letters*, **252**(1-2), 180-188.
- Mousavi, Z., Walpersdorf, A., Walker, R. T., et al., 2013, Global Positioning System constraints on the active tectonics of NE Iran and the South Caspian region: *Earth and Planetary Science Letters*, **377**, 287-298.
- Nazari, H., Ritz, J. F., Salamati, R., Shafei, A., et al., 2009, Morphological and palaeoseismological analysis along the Taleghan fault (Central Alborz, Iran): *Geophysical Journal International*, **178**(2), 1028-1041.
- Nazari, H., Ritz, J. F., Salamati, R., Shahidi, A., Habibi, H., Ghorashi, M., and Bavandpur, A. K., 2010, Distinguishing between fault scarps and shorelines: the question of the nature of the Kahrizak, North Rey and South Rey features in the Tehran plain (Iran): *Terra Nova*, **22**(3), 227-237.
- Nazari, H., Ritz, J. F., Walker, R. T., et al., 2014, Palaeoseismic evidence for a medieval

- earthquake, and preliminary estimate of late Pleistocene slip-rate, on the Firouzkuh strike-slip fault in the Central Alborz region of Iran: *Journal of Asian Earth Sciences*, **82**, 124-135.
- Nemati, M., Hatzfeld, D., Gheitanchi, M. R., Sadidkhouy, A., and Mirzaei, N., 2011, Microseismicity and seismotectonics of the Firuzkuh and Astaneh faults (East Alborz, Iran): *Tectonophysics*, **506**(1-4), 11-21.
- Nilforoushan, F., Masson, F., Vernant, P., et al., 2003, GPS network monitors the Arabia-Eurasia collision deformation in Iran: *Journal of Geodesy*, **77**, 411-422.
- Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., et al., 2006, GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **111**(B5).
- Rezaei, A., and Mousavi, Z., 2019, Characterization of land deformation, hydraulic head, and aquifer properties of the Gorgan confined aquifer, Iran, from InSAR observations: *Journal of Hydrology*, **579**, 124196.
- Ritz, J. F., Balescu, S., Soleymani, S., Abbassi, M., et al., 2003, Determining the long-term slip rate along the Mosha Fault, Central Alborz, Iran. Implications in terms of seismic activity: *Proceeding of the 4th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, Tehran, Iran (Vol. 1214)*.
- Ritz, J. F., Nazari, H., Balescu, S., Lamothe, M., et al., 2012, Paleoearthquakes of the past 30,000 years along the North Tehran Fault (Iran): *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **117**(B6).
- Ritz, J. F., Nazari, H., Ghassemi, A., Salamati, R., Shafei, A., Solaymani, S., and Vernant, P., 2006, Active transtension inside central Alborz: A new insight into northern Iran-southern Caspian geodynamics: *Geology*, **34**(6), 477-480.
- Savage, J. C., and Burford, R. O., 1973, Geodetic determination of relative plate motion in Central California: *Journal of Geophysical Research*, **78**(5), 832-845.
- Shabaniyan, E., Acocella, V., Gioncada, A., Ghasemi, H., and Bellier, O., 2012, Structural control on volcanism in intraplate post collisional settings: Late Cenozoic to Quaternary examples of Iran and Eastern Turkey: *Tectonics*, **31**(3).
- Solaymani Azad, S., Ritz, J. F., and Abbassi, M. R., 2011, Left-lateral active deformation along the Mosha-North Tehran fault system (Iran): Morphotectonics and paleoseismological investigations: *Tectonophysics*, **497**(1-4), 1-14.
- SoltaniMoghadam, S., Tatar, M., and Komeazi, A., 2019, An improved 1-D crustal velocity model for the Central Alborz (Iran) using Particle Swarm Optimization algorithm: *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **292**, 87-99.
- Tatar, M., Hatzfeld, D., Abbassi, A., and Yamini Fard, F., 2012, Microseismicity and seismotectonics around the Mosha fault (Central Alborz, Iran): *Tectonophysics*, **544**, 50-59.
- Tatar, M., Jackson, J., Hatzfeld, D., and Bergman, E., 2007, The 2004 May 28 Baladeh earthquake (Mw 6.2) in the Alborz, Iran: overthrusting the South Caspian Basin margin, partitioning of oblique convergence and the seismic hazard of Tehran: *Geophysical Journal International*, **170**(1), 249-261.
- Walker, R., and Jackson, J., 2004, Active tectonics and late Cenozoic strain distribution in central and eastern Iran: *Tectonics*, **23**(5).
- Williams, S. D. P., 2003, The effect of coloured noise on the uncertainties of rates estimated from geodetic time series: *Journal of Geodesy*, **76**, 483-494.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Chery, J., et al., 2004, Deciphering oblique shortening of central Alborz in Iran using geodetic data: *Earth and Planetary Science Letters*, **223**(1-2), 177-185.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., et al., 2004, Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman: *Geophysical Journal International*, **157**(1), 381-398.
- Zhang, J., Bock, Y., Johnson, H., et al., 1997, Southern California Permanent GPS Geodetic Array: Error analysis of daily position estimates and site velocities: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **102**(B8), 18035-18055.

Constraint on the active tectonics of the Alborz (Iran) using geodetic data

Javad Dehkordi¹, Zahra Mousavi², Esmacil Shabani², Madjid Abbasi³ and Abdolreza Ghods^{4*}

¹Ph.D. Student, Department of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan, Iran

²Associate Professor, Department of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan, Iran

³Assistant Professor, Department of Surveying (Geomatics) Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Iran

⁴Professor, Department of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan, Iran,

(Received: 10 December 2023, Accepted: 14 October 2023)

Summary

In this research, the deformation pattern of Alborz is investigated using a combination of data from the new permanent GPS networks that belong to State Organization for Registration of Deeds and Properties (SHAMIM) and Tehran Municipality (SAMT), the new temporary IASBS_NCC network and the permanent and temporary stations of the National Cartographic Organization. The addition of the 27 new GPS stations has improved the obtained velocity field, which shows that the active deformation happens across the entire width of Alborz from south to north by several faults and active fault zones. Contrary to the common belief about the strain partitioning in the Alborz Mountains between the strike-slip faults in the southern flank of the Alborz and along the compressional south-dipping Khazar fault in the northern flank of the Alborz, the new velocity field indicates a spread of strike-slip and compressional movements along different faults across the width of the Alborz. In previous works, due to the lack of GPS stations between the Khazar fault and other active faults in the northern flank of the Alborz (e.g. North Alborz fault), all the observed deformation in the northern flank of the Alborz has been associated with the Khazar fault. In the improved velocity field, the presence of a new GPS vector between the North Alborz and the Khazar fault in the eastern part of the Alborz indicates a dominant role of the North Alborz fault in the strain accommodation once compared to the Khazar fault. Like the previous works, the new velocity field shows a lower total strain for the western Alborz, which is consistent with the lower observed seismicity in the western Alborz. The new velocity field indicates an active extensional system in the western Alborz in a longitude range of 49° to 50.5° around the Tarom Valley. The extensional system might be related to the counterclockwise rotation of the South Caspian Basin relative to Eurasia. The improved velocity field shows a noticeable strike-slip motion of 2 mm/yr at the northern edge of Central Iran which could be related to the Aran-Torud fault zone and Attari fault. There is also a shortening rate of ~2 mm/yr between the northern edge of Central Iran and the Eastern Alborz which could be related to the salt tectonic within the Great Kavir fault. The improved velocity field shows a right-lateral strike-slip motion of ~1 mm/yr across the Indes and Kushk-Nosrat faults. Despite the observed large seismic activity and a geological slip rate of 2 mm/yr for the eastern part of the Mosha fault, both strike-slip and compressional slip rates along the Mosha fault are less than 1 mm/yr. Within a radius of ~50 km from the center of Tehran metropolitan area, there is no noticeable rate of strike-slip or compressional movement and the strain rate is around the error limit or less than 1 mm/yr. The low strain rate implies a very long earthquake return period for large earthquakes in Tehran metropolitan area.

Keywords: Alborz, GPS, hazard analysis, Tehran, velocity field