

بررسی زمین ساخت جنبا در منطقه البرز با استفاده از مشاهدات شبکه دائمی GPS

فاطمه خرمی^۱، خالد حسامی^۲، حمیدرضا نانکی^۱ و فرخ توکلی^۱

^۱سازمان نقشه برداری کشور، تهران، ایران

^۲پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۵/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۱۱/۱۹

چکیده

در این مقاله با استفاده از اندازه گیری های شبکه دائمی GPS ایران، کینماتیک کنونی شمال ایران (بخش شمالی ایران مرکزی و پهنه البرز) در بازه زمانی ۲۰۰۵-۲۰۰۹ مورد مطالعه قرار می گیرد و چگونگی دگرشکلی این منطقه با استفاده از میدان سرعت و آهنگ کرنش ژئودتیک بررسی خواهد شد. میدان سرعت حاصل از توزیع کنونی ایستگاه های دائمی GPS نشان می دهد در البرز خاوری 5 mm/yr حرکت امتدادلغز چپ گرد و 2 mm/yr و 6 mm/yr است. قابل توجه است که حدود 70% کوتاه شدگی موجود در البرز مرکزی-باختری مقدار حرکت امتدادلغز چپ گرد و کوتاه شدگی به ترتیب برابر 2 mm/yr و 6 mm/yr است. مابقی (2 mm/yr) در دامنه های جنوبی رخ می دهد، بنابراین میدان سرعت حاصل، به خوبی نشان می دهد که در البرز مرکزی و باختری تغییر شکل عمدتاً از نوع فشارشی و در البرز خاوری از نوع امتدادلغز است. همچنین به نظر می رسد که 3 mm/yr کوتاه شدگی در بلوک ایران مرکزی در حال رخ دادن است که مقداری از آن (1.5 mm/yr) در بخش شمالی بلوک ایران مرکزی یعنی در حد فاصل گسل های پارچین-پیشوا-رباط کریم و بقیه آن (1.5 mm/yr) روی گسل تفرش توزیع شده است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که بلوک ایران مرکزی کاملاً صلب نیست. محورهای کرنش ژئودتیک به دست آمده نیز نشان می دهند که دگرشکلی البرز خاوری از نوع فشارشی-برشی و دگرشکلی البرز باختری غالباً فشارشی می باشد. آهنگ کرنش در نواحی جنوب و جنوب باختری پهنه البرز، به دلیل قرارگیری روی بلوک ایران مرکزی کاهش می یابد. با توجه به راستای محورهای کرنش، در حاشیه شمالی بلوک ایران مرکزی (جنوب و جنوب باختر پهنه البرز) سازوکار فشارشی مشاهده می شود. همچنین در این مقاله نشان داده شده است که نتایج ژئودتیک حاصل با شواهد زمین شناسی و زمین ساخت جنبای منطقه البرز همخوانی بسیار زیادی دارد.

کلید واژه ها: شبکه دائمی GPS، البرز، سینماتیک، میدان سرعت، آهنگ کرنش ژئودتیک، ایران مرکزی

*نویسنده مسئول: فاطمه خرمی

E-mail: ftm95_khrm@yahoo.com

۱- مقدمه

ایران از نظر زمین ساختی بخشی از کمربند فعال آلپ-همالیا را تشکیل می دهد. وضعیت کنونی ایران، از نظر زمین ساختی ناشی از همگرایی بین صفحات عربستان و اوراسیاست که دگرشکلی های حاصل از آن، به شکل کمربند های کوهستانی (زاگرس، البرز، کپه داغ) و گسل های بزرگ امتدادلغز احاطه کننده بلوک ها (ایران مرکزی، لوت، حوضه خزر جنوبی) نمایان می شود (Jackson & McKenzie, 1984; 1988). از آنجا که پهنه های دگرشکلی با مناطق لرزه خیز ایران ارتباط نزدیکی دارند (Jackson & McKenzie, 1984; 1988)، بنابراین اندازه گیری و تعیین حرکات و دگرشکلی های پوسته ای از اهمیت ویژه ای برخوردار است. روش های مختلفی برای توصیف انواع تغییر شکل وجود دارد. به منظور تعیین تغییر شکل پوسته زمین، می توان تغییر مختصات یک نقطه را در دو زمان مختلف به دست آورد. اما به دلیل وابستگی مختصات یک نقطه به سیستم مختصات تعریف شده، باید از پارامترهایی استفاده کرد که کمترین وابستگی به تعریف سیستم مختصات را داشته باشند. از جمله این پارامترها می توان به تنسور کرنش و دوران اشاره کرد. پاسخ یک جسم در برابر تنش های اعمال شده بر روی آن و به عبارت دیگر تغییر شکل نسبی یک جسم، کرنش یا استرین نام دارد. می توان تغییر شکل یک جسم را در طول زمان بیان کرد، که در این صورت پارامتری به نام آهنگ کرنش تعریف می شود. تعیین و بررسی تنسور آهنگ کرنش پوسته زمین، امکان توصیف فرایندهای ژئودینامیکی مانند تجمع کرنش گسل ها را که یک پارامتر مهم در ارزیابی خطر لرزه ای به شمار می آید؛ فراهم می آورد.

مطالعات گوناگونی توسط پژوهشگران درباره حرکات پوسته ای و چگونگی توزیع دگرشکلی در مقیاس ایران (Nilfroushan et al., 2003; Vernant et al., 2004 a; Masson et al., 2005, 2007) و مناطق مختلف آن از جمله البرز (Vernant et al., 2004b; Djamour, 2004) با استفاده از شبکه های GPS (Campaign) موردی انجام شده است. قابل توجه است که اندازه گیری های GPS در حالت پیوسته (Continuous) (شبکه های دائمی GPS) امکان پایش جابجایی های سطحی را با قدرت تفکیک زمانی بالا فراهم می آورند. در حالی که مشاهدات GPS در حالت موردی جابه جایی های سطحی را تنها در زمان های معینی پایش می کنند. در حالت پیوسته، قدرت تفکیک زمانی مورد نیاز برای تعیین بهتر طیف خطاهای اندازه گیری (King & Bock, 1995) و امکان برآوردهای قابل اعتمادتری از حرکات زمین مانند سرعت ایستگاه ها میسر است (Zhang, 1996; Zhang et al., 1997). بنابراین مشاهدات دائم GPS از نظر دقت و پایش پیوسته تغییرات هر نقطه در مقایسه با اندازه گیری های موردی از اهمیت بسزایی برخوردارند. در همین راستا در سال ۲۰۰۵ یک شبکه دائم GPS سراسری با عنوان (Iranian Permanent GPS Network) IPGN به منظور اهداف ژئودینامیک و بررسی پیوسته حرکات پوسته زمین در ایران توسط سازمان نقشه برداری کشور نصب و راه اندازی شد (Djamour et al., 2006). در این مقاله از تعدادی از ایستگاه های این شبکه، واقع در رشته کوه های البرز برای بررسی دگرشکلی و کینماتیک کنونی این پهنه استفاده شده است. بنابراین با استفاده از میدان سرعت حاصل از مشاهدات شبکه دائمی GPS، دگرشکلی کنونی البرز مورد بررسی قرار می گیرد. همچنین برای اولین بار چگونگی توزیع آهنگ کرنش ژئودتیک به دست آمده از شبکه دائمی GPS ایران، مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

با استفاده از روش های ژئودتیک مانند GPS (Global Positioning System) می توان تغییرات پوسته ای را با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا پایش کرد. تاکنون

۲- زمین‌ساخت جنبه در البرز

وجود تقسیم‌شدگی کرنش را در البرز تأیید می‌کنند، ولی آنها نشان داده‌اند که رخداد این تقسیم‌شدگی به‌طور کامل روی نداده است. یک ویژگی جالب در مورد تقسیم‌شدگی کرنش در کوه‌های البرز این است که گسل‌های امتدادلغز عموماً در مرکز و یا بخش جنوبی کوه‌های البرز و در ارتفاعات بالا تمرکز یافته‌اند در حالی که گسل‌های راندگی در هر دو دامنه مشاهده می‌شوند.

۳- پردازش داده‌های GPS

از سال ۲۰۰۵ یک شبکه دائمی GPS سراسری با عنوان IPGN به منظور اهداف ژئودینامیک و بررسی پیوسته حرکات پوسته زمین در ایران توسط سازمان نقشه‌برداری کشور نصب و راه‌اندازی شده است. در این مقاله از تعدادی از ایستگاه‌های این شبکه (۳۰ ایستگاه) واقع در شمال ایران (بخش شمالی ایران مرکزی و پهنه البرز) برای بررسی دگرشکلی و کینماتیک کنونی این منطقه استفاده شده است. این شبکه (که از این پس آن را شبکه TEHN می‌نامیم) از طرف شمال به حوضه خزر جنوبی، از جنوب به بلوک ایران مرکزی و از باختر و خاور بین طول جغرافیایی $48^{\circ}5'$ و 56° محدود می‌شود. در حقیقت، بیشتر ایستگاه‌های این شبکه در بخش‌هایی از البرز باختری و مرکزی پراکنده شده‌اند (شکل ۲).

همه ایستگاه‌ها مجهز به گیرنده Ashtech UZ12 و آنتن choke-ring می‌باشند و مشاهدات مربوط به بازه زمانی ۲۰۰۹-۲۰۰۵ هستند. برای پردازش داده‌های GPS و محاسبه مختصات و بردارهای سرعت از نرم‌افزار GAMIT/GLOBK (Herring et al., 2009a; Herring et al., 2009b) استفاده شده است. در مرحله پردازش اولیه (نرم‌افزار GAMIT) به منظور اتصال شبکه TEHN با چارچوب مرجع ITRF (International Terrestrial Reference Frame) مربوطه و سرشکنی مناسب مدارات، ۲۲ ایستگاه IGS (International GNSS Service) که دارای توزیع جهانی هستند، وارد پردازش شدند.

در مرحله دوم (نرم‌افزار GLOBK) برای تعیین میدان سرعت، شبه مشاهدات به‌دست آمده با شبه مشاهدات روزانه ۴ شبکه جهانی (eura, igs1, igs2, igs3) که توسط SOPAC (Scripps Orbits and Permanent Array Center) تهیه شده‌اند؛ ترکیب و سرانجام سرعت‌ها نسبت به چارچوب مرجع اوراسیا محاسبه شدند. برای به‌دست آوردن سرعت‌ها نسبت به چارچوب مرجع اوراسیا، سرعت مسطحانی ۲۱ ایستگاه IGS واقع در اروپا و آسیای مرکزی، کمترین مقدار در نظر گرفته شدند (Vernant et al., 2004a) که عبارتند از: ARTU, BOR1, BRUS, GRAS, GRAZ, IRKT, JOZE, KOSG, KSTU, MADR, NYAL, ONSA, POTS, TIXI, TOUL, TROM, VILL, WTZR, YAKT, ZECK, ZIMM.

۴- میدان سرعت

بردارهای سرعت در سطح اطمینان ۹۵ درصد برآورد شدند و دارای خطایی برابر ± 0.5 mm/yr هستند. مقادیر میدان سرعت به‌دست آمده نسبت به چارچوب مرجع اوراسیا در جدول ۱ ارائه شده است. شکل ۳ به روشنی نشان می‌دهد یک برش چپ‌گرد در البرز خاوری در حال رخ دادن است که با توجه به ایستگاه‌های BIAJ, SMNN و GRGN مقدار آن 5 mm/yr است. همچنین با در نظر گرفتن سه ایستگاه یاد شده 2 mm/yr فشارش در البرز خاوری مشاهده می‌شود که به دلیل عدم وجود ایستگاه‌های کافی در این بخش از البرز، نمی‌توان به بیان جزئیات بیشتر پرداخت. البته لازم به ذکر است که به دلیل وجود فرونشست در ایستگاه GRGN، بردار مسطحانی آن دارای مقداری خطا است. در البرز مرکزی و بخش خاوری البرز باختری (که از این پس آن را البرز مرکزی-

البرز به رشته کوه‌هایی گفته می‌شود که روند عمومی آن تقریباً خاوری-باختری است، اما بخش مرکزی آن تحذب آشکاری به سمت جنوب پیدا کرده است و شکل V به‌خود گرفته است (Stocklin, 1974a) (شکل ۱)، به گونه‌ای که مجموعه البرز را از نظر جغرافیایی می‌توان به سه بخش باختری، مرکزی و خاوری تقسیم کرد. در البرز باختری روند کوه‌ها (گسل‌ها و چین‌خوردگی‌ها) شمال باختری-جنوب خاوری است و در البرز خاوری این روند به صورت جنوب باختری-شمال خاوری تغییر می‌کند. این دو روند در البرز مرکزی با یکدیگر تلاقی کرده و در محل برخورد آنها، بلندترین بخش البرز (کوه دماوند به ارتفاع 5610 متر) به چشم می‌خورد.

کوه‌های البرز تشکیل یک ساختار برشی-فشارشی را می‌دهند که در آن تمایل جابه‌جایی در دامنه جنوبی به سمت جنوب و در دامنه شمالی به سمت شمال است. به عبارت دیگر، شیب گسل‌های معکوس دامنه جنوبی به سمت شمال و شیب گسل‌های معکوس دامنه شمالی به سمت جنوب است (Allen et al., 2003a). همچنین بخشی از تغییر شکل پوسته به‌ویژه در بخش مرکزی کوه‌های البرز به صورت حرکات برشی در طول گسل‌های امتدادلغز چپ‌گرد دیده می‌شود (Allen et al., 2003a; Bachmanov et al., 2004; Ritz et al., 2006).

در نخستین مطالعاتی که توسط Nilforoushan et al. (2003) و Vernant et al. (2004 a) با استفاده از شبکه موردی GPS در ایران انجام شد، آهنگ تغییر شکل کنونی کلی ایران و مناطق مختلف آن از جمله البرز مرکزی برآورد شد. Vernant et al. (2004 a) حرکت رو به شمال صفحه عربستان نسبت به اوراسیا را در طول جغرافیایی بحرین برابر 22 ± 2 mm/yr و آهنگ حرکت بلوک ایران مرکزی نسبت به حوضه خزر جنوبی را 14 ± 2 mm/yr برآورد کردند، که از این مقدار حدود 8 ± 2 mm/yr مربوط به کوتاه‌شدگی شمالی-جنوبی البرز است و 6.5 ± 2 mm/yr ساحل خزر جنوبی رخ می‌دهد.

Vernant et al. (2004b) در مطالعات بعدی با استفاده از یک شبکه متراکم‌تر GPS در البرز، مقدار کوتاه‌شدگی البرز مرکزی را از 8 ± 2 mm/yr به 5 ± 2 mm/yr تصحیح کرده و تفاوت این دو مقدار (3 mm/yr) را ناشی از کوتاه‌شدگی در جنوب البرز (حاشیه شمالی بلوک ایران مرکزی) در نظر گرفتند و نشان دادند که حوضه خزر جنوبی با نرخ 6 ± 2 mm/yr رو به شمال باختری (نسبت به اوراسیا) در حرکت است. همچنین آنها یک برش چپ‌گرد با آهنگ 4 ± 2 mm/yr را در سراسر کمربند مشاهده کرده و بخش عمده آن را به گسل مشا نسبت دادند. آنها نشان دادند که راستای بیشینه کوتاه‌شدگی در البرز برابر 30° N است.

حرکت رو به شمال باختری حوضه خزر جنوبی نسبت به اوراسیا و یا دوران ساعت‌گرد آن که در دوران پلیستوسن آغاز شده، به نظر می‌رسد که نه تنها باعث تغییر رژیم البرز از حالت کلی فشارش شمالی-جنوبی به حالت برشی-فشاری با راستای NNE-SSE شده بلکه موجب ایجاد رژیم برشی-کششی در قلمرو داخلی البرز نیز گردیده است (Ritz et al., 2006). بدین ترتیب ریتز و همکاران نشان دادند که حرکت چپ‌گرد روی گسل‌های طالقان-مشا-فیروزکوه با یک مؤلفه نرمال همراه است، در واقع چنین استنباط می‌شود که تحولی از حالت برشی-فشاری به حالت برشی-کششی در قلمرو داخلی البرز مرکزی در حدود ۱/۵ میلیون سال پیش روی داده است. ظاهراً حرکت مورب لغز (معکوس و چپ‌گرد) در البرز به صورت حرکات امتدادلغز محض و راندگی محض بر روی گسل‌های موازی پهنه البرز تقسیم می‌شود. این واقعیت هم در حل سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های روی‌داده در البرز قابل مشاهده است (Jackson et al., 2002) و هم در تحلیل دقیق ساختارهای زمین‌شناسی منطقه آشکار شده است (Allen et al., 2003a; Jackson et al., 2002; Ritz et al., 2006). آخرین نتایج GPS ارائه شده توسط (Djamour et al., 2010) نیز

دگرشکلی البرز مرکزی- باختری غالباً فشارشی است. با در نظر گرفتن چندضلعی ۶ مشاهده می‌شود که در حاشیه جنوبی البرز مرکزی مقداری حرکت امتدادلغز چپ‌گرد وجود دارد. به طور کلی از باختر به خاور مقدار حرکت امتدادلغز افزایش می‌یابد. در چندضلعی‌های ۳ و ۴ مؤلفه کشش معنی‌دار نیست و فقط مؤلفه فشارش دیده می‌شود. بنابراین به نظر می‌رسد که گسل‌های واقع در جنوب باختر پهنه البرز (گسل‌های اشتهاورد، ایپک، کوشک نصرت و ایندس) یک مؤلفه فشارشی دارند. در چندضلعی ۵ با توجه به محور فشارش و راستای گسل‌ها می‌توان کوتاه‌شدگی و همچنین مؤلفه امتدادلغز راست‌گرد را در محدوده چندضلعی یاد شده مشاهده کرد که به نظر می‌رسد عمدتاً حرکات راست‌گرد در طول گسل پارچین مستهلک شود.

۶- نتیجه‌گیری

الف- آخرین مطالعات درباره کینماتیک کنونی البرز توسط Djamour et al. (2010) با استفاده از شبکه GPS موردی و شبکه GPS دائم انجام شده است. میدان سرعت حاصل از پردازش‌های ما نقاط مشترک زیادی با نتایج Djamour et al. (2010) دارد که بیانگر درستی کار ما و آنهاست. اختلافاتی که در ادامه به آنها اشاره خواهیم کرد؛ می‌تواند ناشی از چگونگی تفسیر نتایج، استفاده از مدل بلوکی و شبکه GPS موردی توسط Djamour et al. (2010) باشند.

نتایج ما نشان می‌دهند که در البرز خاوری از جنوب به شمال 5 mm/yr حرکت امتدادلغز چپ‌گرد و 2 mm/yr کوتاه‌شدگی وجود دارد. در حالی که Djamour et al. (2010) با استفاده از مدل بلوکی 5 mm/yr و 2 mm/yr حرکت امتدادلغز چپ‌گرد را به ترتیب در شمال (گسل خزر خاوری) و جنوب البرز خاوری (در مجموع 7 mm/yr حرکت امتدادلغز چپ‌گرد در البرز خاوری) برآورد کرده‌اند. از پردازش‌های ما می‌توان چنین استنباط کرد که حدود 70% کوتاه‌شدگی موجود در البرز مرکزی- باختری (4 mm/yr) روی گسل‌های شمال البرز و خزر خاوری رخ می‌دهد. همچنین در طرفین گسل‌های یاد شده 2 mm/yr حرکت برشی چپ‌گرد وجود دارد، که به دلیل عدم وجود ایستگاه بین این دو گسل، نمی‌توان به یقین بیان کرد که حرکات یاد شده چگونه بر روی این دو گسل توزیع شده است. در حالی که Djamour et al. (2010) بر این باورند که گسل خزر باختری به ترتیب دارای 6 mm/yr و $2-3 \text{ mm/yr}$ حرکت فشارشی و برشی چپ‌گرد است. به عبارت دیگر، آنها کل فشارش موجود در البرز مرکزی - باختری را به گسل خزر باختری نسبت داده‌اند. همچنین در این تحقیق نحوه توزیع 3 mm/yr کوتاه‌شدگی بیان شده توسط Vernant et al. (2004b) تعیین شده است. Vernant et al. (2004b) بر این باورند که 3 mm/yr کوتاه‌شدگی بین بلوک ایران مرکزی و پیشانی جنوبی (دماغه) البرز توسط گسل‌های فشارشی پیشوا و پارچین رخ می‌دهد. به نظر می‌رسد آنها بر این باورند که بلوک ایران مرکزی کاملاً صلب است، بنابراین دگرشکلی یاد شده را به بلوک ایران مرکزی نسبت نداده‌اند. با توجه به این نکته که ایران مرکزی یک بلوک کاملاً صلب نیست و فقط بخش جنوب باختری ایران مرکزی که زون سندج-سیرجان نام دارد، صلب می‌باشد و بقیه بلوک ایران مرکزی غیر صلب است، بنابراین می‌توان 3 mm/yr کوتاه‌شدگی را به بلوک ایران مرکزی نسبت داد. از آنجا که نتایج ما نشانگر رخداد 1.5 mm/yr فشارش روی حاشیه شمالی بلوک ایران مرکزی (حد فاصل گسل‌های پارچین-پیشوا-رباط کریم) و 1.5 mm/yr فشارش روی گسل تفرش هستند، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مقدار 3 mm/yr دگرشکلی بیان شده توسط Vernant et al. (2004b) در بلوک ایران مرکزی روی گسل‌های یاد شده توزیع شده است.

همان گونه که Nazari et al. (2009) به کمک داده‌های ریخت‌شناسی و دیرینه‌لرزه‌شناسی نشان دادند که کمترین آهنگ حرکت امتدادلغز چپ‌گرد روی گسل طالقان برابر $0.6-1.6 \text{ mm/yr}$ است، از نتایج ما (دو ایستگاه HSGD و TLGN)

باختری می‌نامیم) میزان برش چپ‌گرد نسبت به البرز خاوری کمتر است، چنانچه از CHSM در جنوب تا BLDH و POOL در شمال حرکت برشی قابل ملاحظه‌ای مشاهده نمی‌شود. با توجه به پروفیل رسم شده (شکل ۴)، از جنوب تا شمال البرز مرکزی 6 mm/yr کوتاه‌شدگی وجود دارد. ایستگاه‌های BLDH، POOL، MABD، NKAD و واقع در طرفین گسل‌های خزر باختری و شمال البرز 4 mm/yr فشارش و 2 mm/yr حرکت امتدادلغز چپ‌گرد را در مجموع برای این دو گسل نشان می‌دهند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت بیشتر کوتاه‌شدگی البرز مرکزی (70%) روی گسل‌های خزر باختری و شمال البرز روی می‌دهد. لازم به ذکر است به دلیل عدم وجود ایستگاه بین گسل خزر باختری و گسل شمال البرز، نمی‌توان به یقین بیان کرد که حرکات یاد شده چگونه بر روی این دو گسل توزیع شده است. ایستگاه‌های SHOR، PLZI و RTCL نشان‌دهنده وجود 2.5 mm/yr کوتاه‌شدگی و 1.5 mm/yr حرکت امتدادلغز راست‌گرد روی گسل پارچین هستند. همچنین مقایسه دو ایستگاه MOBK و SHOR بیانگر آن است که گسل پیشوا دارای 1.5 mm/yr مؤلفه کششی و 1.5 mm/yr مؤلفه برشی چپ‌گرد است. روی بخش باختری گسل طالقان بین دو ایستگاه HSGD و TLGN حرکت امتدادلغز چپ‌گردی معادل $2-2.5 \text{ mm/yr}$ مشاهده می‌شود. همچنین در باختر بلوک ایران مرکزی، با در نظر گرفتن دو ایستگاه HAMD و TFSH مقدار 1.5 mm/yr کوتاه‌شدگی روی گسل تفرش در حال رخ دادن است.

۵- توزیع کرنش از طریق تانسور آهنگ کرنش ژئودتیکی

با استفاده از تانسور آهنگ کرنش می‌توان فرایندهای ژئودینامیکی از قبیل انباشت کرنش در گسل‌ها را تشریح کرد. در این مطالعه با استفاده از میدان سرعت مسطحاتی به دست آمده و به کارگیری روش مثلث‌بندی دلونی (Delaunay Triangulation) آهنگ کرنش ژئودتیکی مسطحاتی برای منطقه شمال ایران محاسبه شده است. بدین منظور تانسور گرادیان سرعت مسطحاتی برای هر مثلث محاسبه شد. عموماً گرادیان سرعت ترکیبی از دگرشکلی و دوران است، بنابراین این تانسور دو بعدی، غیر متقارن است و می‌توان آن را به دو بخش متقارن و غیرمتقارن تقسیم کرد. بخش متقارن تانسور، معرف آهنگ کرنش و بخش غیرمتقارن آن آهنگ دوران صلب را نشان می‌دهد (Malvern, 1969).

آهنگ کرنش حاصل از میدان سرعت مسطحاتی در راستای محورهای کشش و فشارش در شکل ۵ و جدول ۲ نمایش داده شده‌اند. لازم به یادآوری است خطای آهنگ کرنش‌های برآورد شده $5-8 \times 10^{-9} \text{ yr}^{-1}$ است. بنابراین تنها دگرشکلی چندضلعی‌هایی (پلیگون) که آهنگ کرنش آنها بیشتر از خطای یاد شده باشد، معنی‌دار است. از آنجا که در این مطالعه توزیع کنونی ایستگاه‌های دائمی GPS همگن نیست، از ترکیب مثلث و چندضلعی برای بررسی بهتر دگرشکلی منطقه استفاده شده است. با توجه به شکل ۵ یک مؤلفه فشارش غالب با راستای شمال-شمال خاوری در منطقه البرز به روشنی آشکار است. راستای محور فشارش در برخی از نواحی البرز (چندضلعی‌های ۱، ۶، ۷ و ۸) تقریباً عمود بر روند گسل‌هاست (29°N) اما در البرز خاوری (چندضلعی‌های ۹، ۱۰ و ۱۱) به صورت مورب است (16°N). با توجه به شکل ۵ می‌توان گفت که بیشتر حرکت فشارشی البرز مرکزی بر روی گسل‌های واقع در حاشیه شمالی آن رخ می‌دهد (چندضلعی ۷). همچنین در برخی چندضلعی‌ها (۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱) افزون بر مؤلفه فشارش، مؤلفه کشش کوچکی مشاهده می‌شود که می‌تواند بیانگر وجود مؤلفه امتدادلغز در الگوی دگرشکلی البرز باشد. از آنجا که در البرز خاوری راستای محورهای فشارش و کشش نسبت به محور ساختارهای گسلی آن مایل هستند، در حالی که در البرز مرکزی-باختری محورهای کشش تقریباً به موازات و محورهای فشارش عمود بر ساختارهای گسلی هستند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت دگرشکلی البرز خاوری از نوع فشارشی-برشی و

باختر پهنه البرز (اشتهارد، ایپک، کوشک نصرت، ایندس) یک مؤلفه فشارشی دارند. راستای محورهای فشارش حاصل با سازوکار کانونی زمین لرزه های روی داده در این ناحیه مطابقت دارند.

ج- از دیدگاه زمین‌ساخت جنباً، فعالیت‌های فرسایشی و زمین‌ساختی یک منطقه نقش بسزایی در پدیدار شدن و شکل‌گیری توپوگرافی و شیب دامنه‌های آن منطقه دارند. بدین صورت که شیب تند دامنه‌ها نشان می‌دهد که حرکات قائم، قوی‌تر از فرسایش عمل کرده‌است. زیرا هنگامی که زمین‌ساخت و بالامدگی فعال‌تر از فرسایش عمل نماید، آنگاه فرسایش در لبه ناهمواری (توپوگرافی) فرصت عقب‌نشینی پیدا نمی‌کند و صرفاً درجا می‌زند و در نتیجه باعث می‌گردد که شیب توپوگرافی افزایش یابد. در حالی که توپوگرافی کم شیب بیانگر آن است که فعالیت زمین‌ساخت و بالامدگی نسبت به فرسایش ضعیف‌تر بوده است. از آنجا که شیب دامنه‌های شمالی پهنه کوهستانی البرز از دامنه‌های جنوبی آن بیشتر است (شکل ۶)، می‌توان نتیجه گرفت فعالیت‌های زمین‌ساختی و گسلش در دامنه‌های شمالی قوی‌تر از فرسایش بوده است، در حالی که این موضوع در دامنه‌های جنوبی حالت عکس می‌یابد. نکته قابل توجه آن است که نتایج ژئودتیک حاصل از این مطالعه نیز این موضوع را تأیید می‌کنند. زیرا بردارهای سرعت به‌دست آمده نشان می‌دهند که حدود ۷۰٪ کوتاه‌شدگی موجود در البرز مرکزی- باختری ($\sim 4 \text{ mm/yr}$) روی دامنه‌های شمالی (گسل‌های شمال البرز و خزر باختری) رخ می‌دهد.

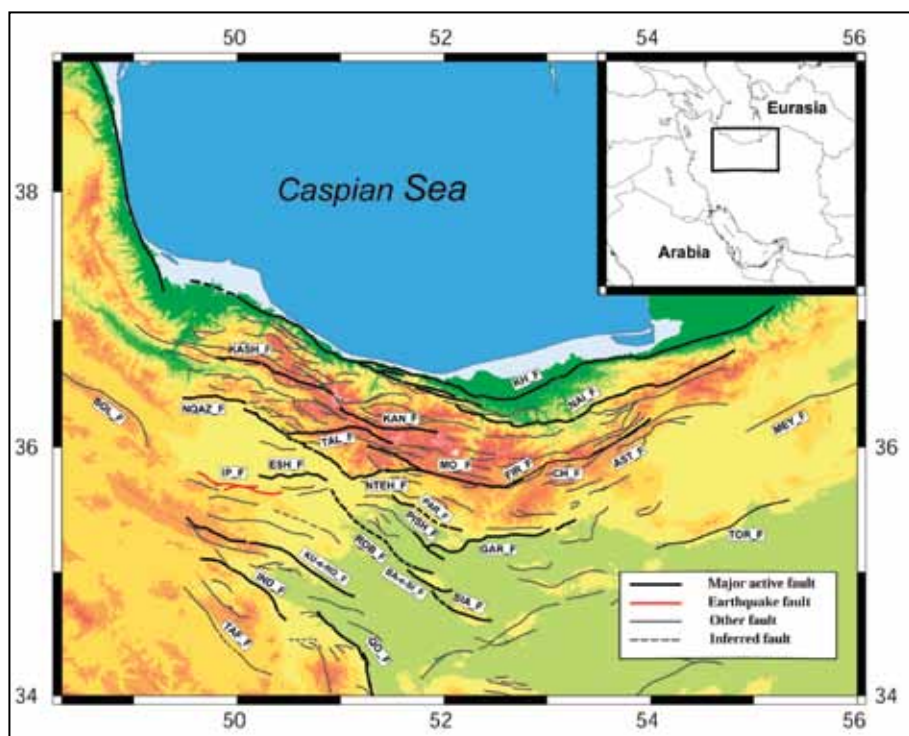
سیاسگزاری

در پایان لازم است که از کارشناسان محترم اداره ژئودزی و ژئودینامیک سازمان نقشه‌برداری کشور که مسئولیت پردازش داده‌های شبکه دائمی GPS ایران را به عهده داشته و دارند (خانم‌ها: رحیمی، حسینی، آقامحمدی، علیجان‌زاده، موسوی و افتخارزاده)، قدر دانی شود. همچنین از داوران محترم که با ارائه نقطه نظرات ارزشمند خود به بالا بردن کیفیت این مقاله کمک نمودند، سیاست‌گذاری می‌م‌گردد.

نیز استنباط می‌شود که روی بخش باختری این گسل حرکت برشی چپ‌گردی معادل 2-2.5 mm/yr در حال رخ دادن است. با توجه به مقدار خطای برآورد شده برای بردارهای سرعت (± 0.5 mm/yr) مشاهده می‌شود آهنگ لغزش حاصل از اندازه‌گیری‌های GPS با مقدار ارائه شده توسط Nazari et al. (2009) تفاوت اندکی دارد که می‌تواند ناشی از اختلاف روش‌های اندازه‌گیری باشد. همچنین از نتایج حاصل استنباط می‌شود که گسل پارچین دارای حرکت امتدادلغز راست‌گرد است. با توجه به راستای گسل پارچین و بردار سرعت ایستگاه SHOR وجود حرکت برشی راست‌گرد در روی این گسل توجه‌پذیر است.

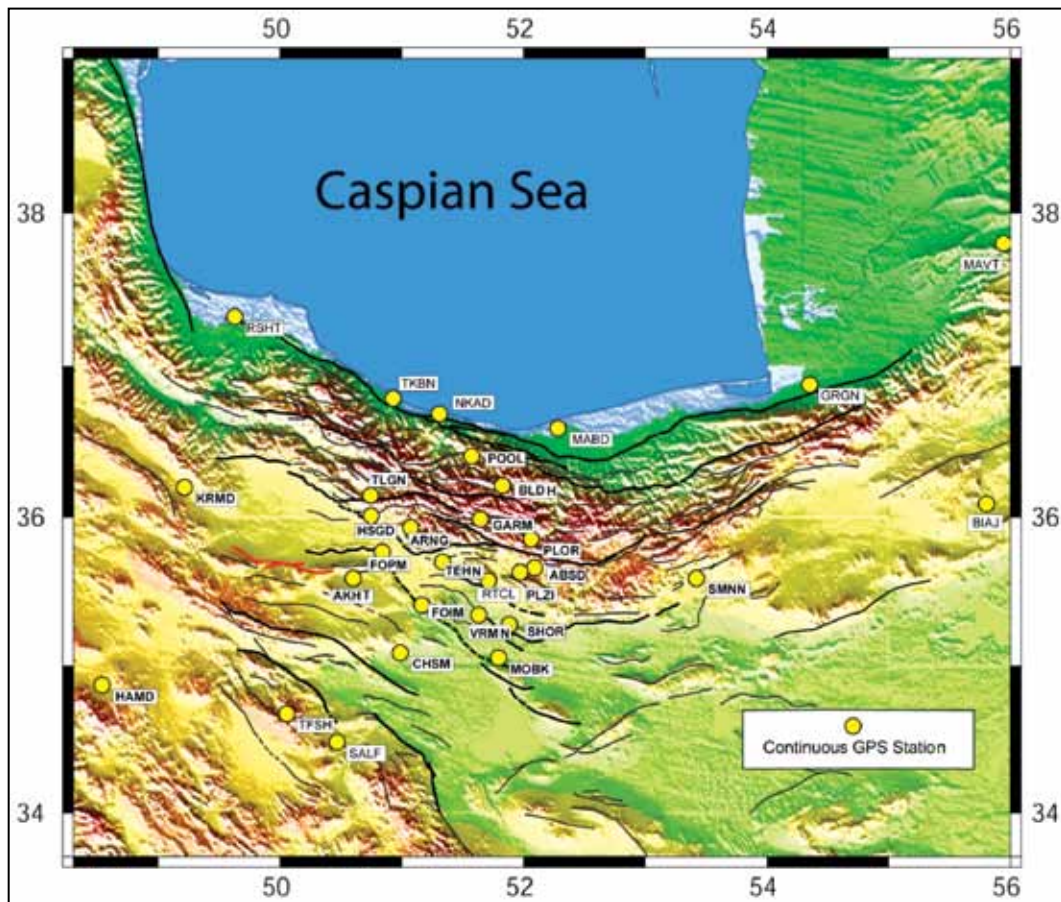
ب- (Masson et al. (2005) برای اولین بار آهنگ کرنش ژئودتیکی را با استفاده از نتایج میدان سرعت به دست آمده توسط Vernant et al. (2004a) برای سراسر ایران محاسبه کردند. آنها در آن مطالعه کرنش ژئودتیکی و کرنش لرزه‌ای مناطق مختلف ایران از جمله البرز را در حالت کلی مقایسه کردند. موسوی (۱۳۸۴) نیز آهنگ کرنش ژئودتیکی را با دو روش عددی تفاضلی محدود و المان محدود برای کل ایران و به‌طور خاص برای البرز محاسبه کرده‌است. نتایج موسوی با استفاده از روش المان محدود نشان می‌دهد که در البرز حرکت انقباضی و در محل تلاقی البرز با بلوک ایران مرکزی حرکت انبساطی وجود دارد. همچنین او به وجود حرکت برشی در البرز اشاره می‌کند. وی بر این باور است که در بخش‌های خاوری و باختری البرز به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار کشیدگی مشاهده می‌شود.

در این مطالعه برای اولین بار آهنگ کرنش ژئودتیکی شمال ایران با استفاده از بردارهای سرعت حاصل از مشاهدات شبکه دائمی GPS محاسبه شده است. وضعیت محورهای آهنگ کرنش به خوبی بیانگر سه موضوع است: ۱- با توجه به راستای محورهای کشش و فشارش و روند گسل‌ها، مشاهده می‌شود دگرشکلی البرز مرکزی- باختری عمدتاً از نوع فشارشی و البرز خاوری از نوع فشارشی-برشی است که بردارهای سرعت نیز به خوبی این روند را تأیید می‌کنند. ۲- کاهش آهنگ کرنش در جنوب باختری پهنه البرز (چندضلعی‌های ۳، ۴ و ۵) به دلیل قرارگیری این نواحی روی بلوک ایران مرکزی است. ۳- به نظر می‌رسد گسل‌های واقع در جنوب

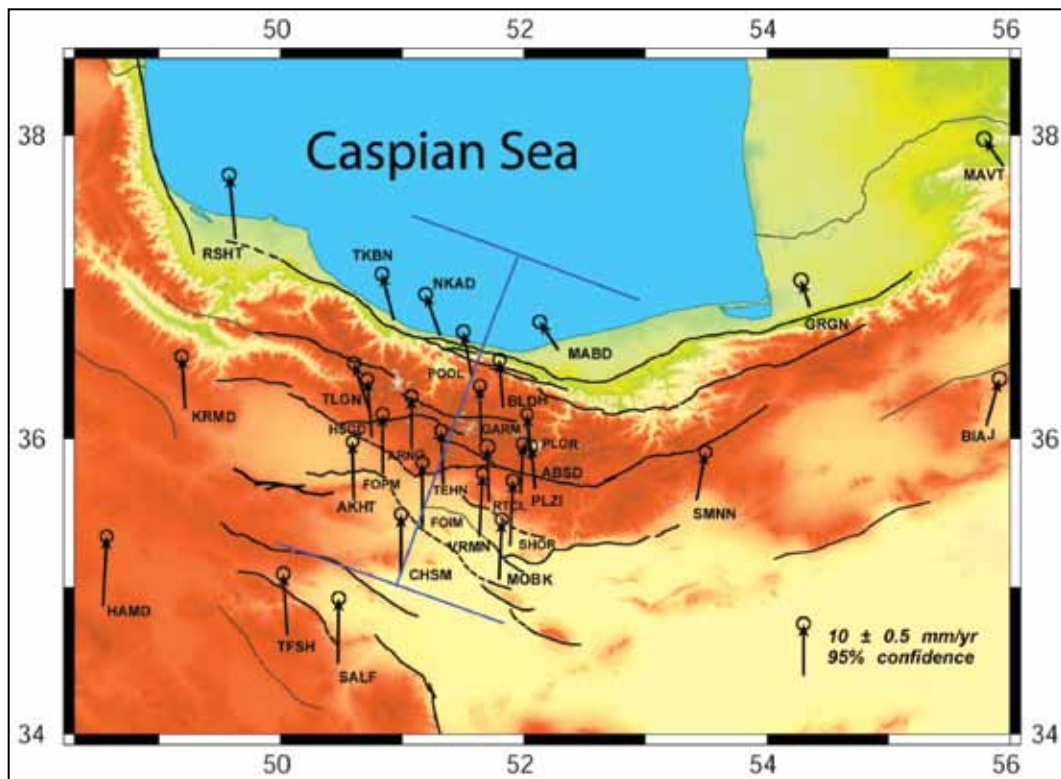


شکل ۱- نقشه گسل های البرز (برگرفته از طالبیان و همکاران، زیر چاپ). نام گسل ها با حروف اختصاری نشان داده اند.

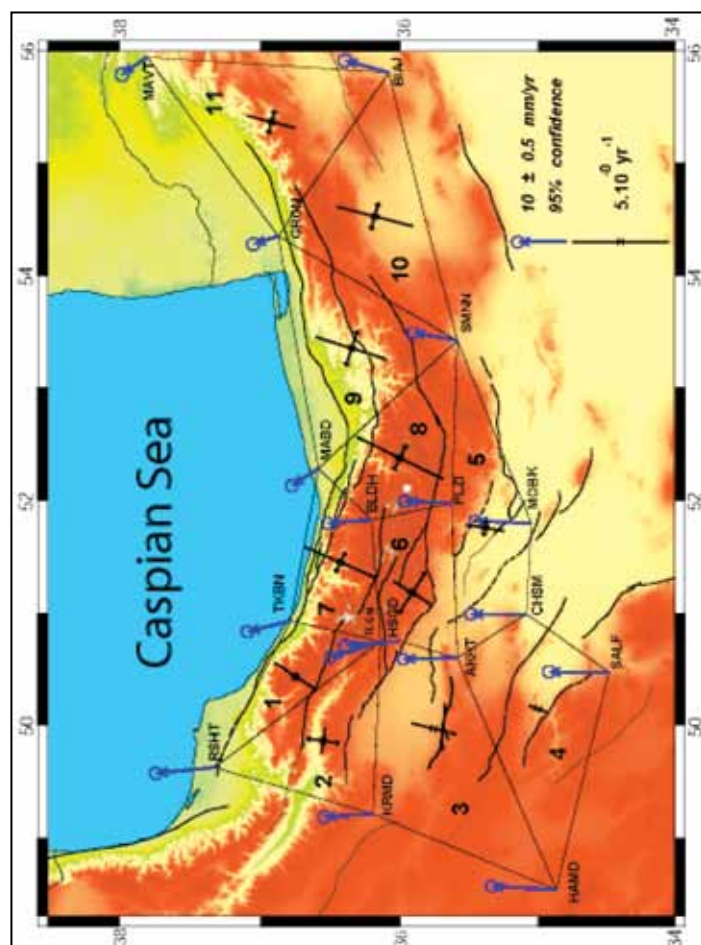
KH_F: Khazar, NAL_F: North Alborz,
KASH_F: Kashachal, KAN_F:
Kandevan, NQAZ_F: North Qazvin,
TAL_F: Taleghan, SOL_F: Soltaniye,
IP_F: Ipak, ESH_F: Eshtehard ,
NTEH_F: North Tehran, MO_F:
Mosha, FIR_F: Firuzkuh, CH_F:
Chashm, AST_F: Astaneh, IND_F:
Indes, QO_F: Qom, KU-e-NO_F:
Kushk-e-Nosrat, ROB_F: Robotkarim,
BA-e-SI_F: Band-e-Siah, SIA_F:
Siahkuh, PISH_F: Pishva, PAR_F:
Parchin, GAR_F: Garmsar, TOR_F:
Torud, TAF_F: Tafresh



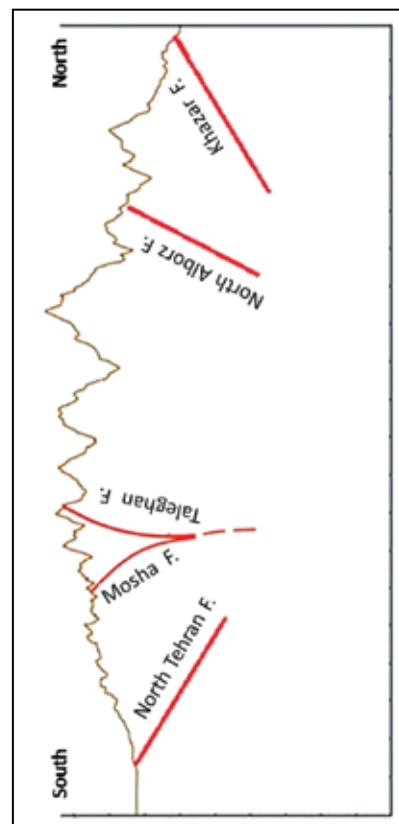
شکل ۲- نحوه پراکندگی ایستگاه‌های دائمی GPS



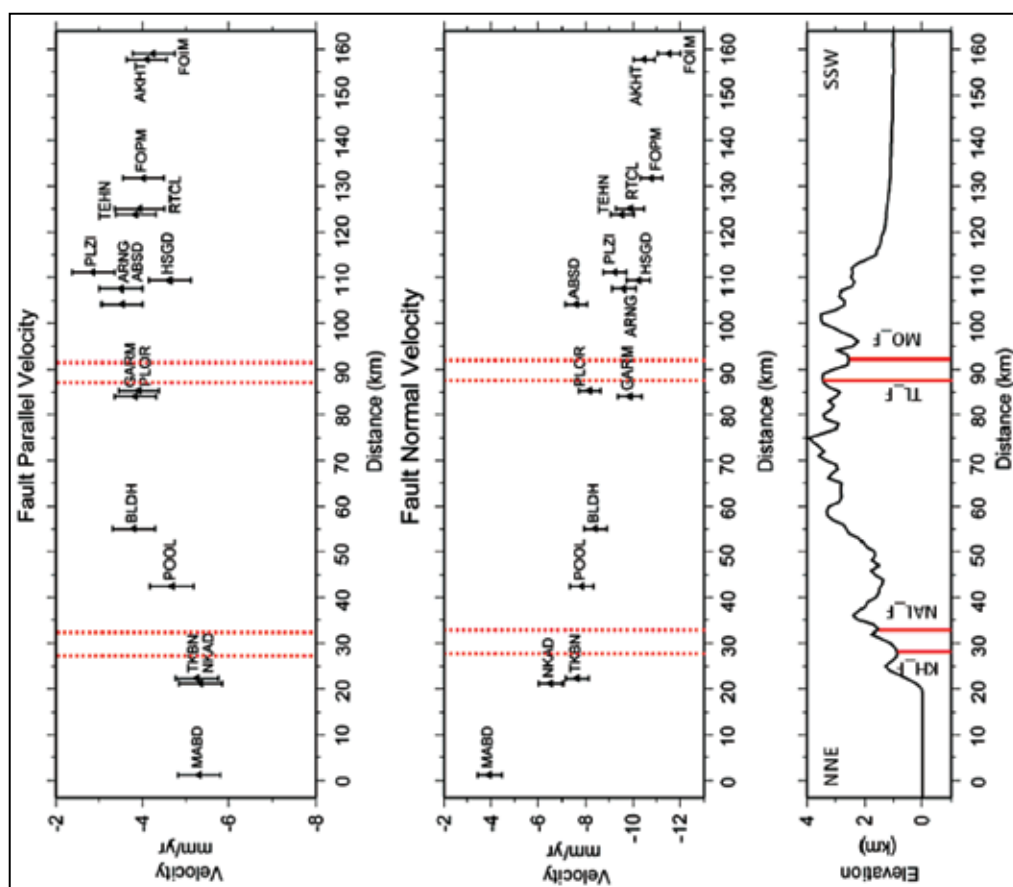
شکل ۳- بردارهای سرعت به همراه بیضی خطای آنها در سطح اطمینان ۹۵ درصد نسبت به چارچوب مرجع اوراسیا. خطوط آبی رنگ نشانگر پروفیل رسم شده بر روی البرز مرکزی- باختری هستند.



شکل ۵- محورهای اصلی تانسور آهنگ کرنش ژئودینامیکی که از میدان سرعت GPS به‌دست آمده‌اند. فلش‌های آبی رنگ معرف بردارهای سرعت به‌دست آمده از این مطالعه هستند.



شکل ۶- توپوگرافی برش عرضی البرز مرکزی (برگرفته از Nazari et al., 2007؛ با تغییرات)



شکل ۴- پروفیل رسم شده بر روی البرز مرکزی - باختری. حروف اختصاری MO_F, TL_F, NAL_F, KH_F به ترتیب بیانگر موقعیت گسل‌های خزر، البرز شمالی، بخش خاوری طالقان و مشا هستند.

جدول ۱- مقادیر بردارهای سرعت نسبت به چارچوب مرجع اوراسیا. V_N و V_E به ترتیب معرف مؤلفه‌های خاوری و شمالی بردارهای سرعت هستند. ستون‌های σ_E و σ_N بیانگر عدم اطمینان مؤلفه‌های خاوری و شمالی در سطح اطمینان ۹۵ درصد هستند. ستون Correlation، ضریب همبستگی بین ستون‌های σ_E و σ_N را نشان می‌دهد.

Site	Long. (deg.dec)	Lat. (deg.dec)	V_E (mm/yr)	V_N (mm/yr)	σ_E	σ_N	Correlation
ABSD	52.091	35.661	-0.72	8.34	0.47	0.47	-0.001
AKHT	50.601	35.588	-0.28	11.24	0.47	0.47	-0.001
ARNG	51.075	35.928	0	10.25	0.49	0.49	-0.001
BLDH	51.829	36.208	-0.7	9.21	0.5	0.49	0
CHSM	50.989	35.088	0.01	11.54	0.5	0.49	-0.001
FOIM	51.166	35.409	-0.05	12.3	0.48	0.48	0
FOPM	50.84	35.765	-0.1	11.51	0.48	0.48	0
GARM	51.646	35.985	-0.23	10.59	0.49	0.49	0
HSGD	50.747	36.007	-0.85	11.2	0.48	0.48	0
MABD	52.285	36.588	-3.64	5.53	0.5	0.5	0
MOBK	51.795	35.053	0.54	11.54	0.49	0.49	0
NKAD	51.31	36.685	-2.79	7.97	0.51	0.51	0
PLOR	52.064	35.85	-0.89	9.02	0.47	0.47	-0.001
PLZI	51.971	35.63	0.47	9.68	0.49	0.49	-0.001
POOL	51.574	36.403	-1.72	8.96	0.5	0.5	0
RSHT	49.624	37.323	-1.19	12.34	0.51	0.51	-0.001
RTCL	51.711	35.574	-0.32	10.64	0.58	0.58	0
SHOR	51.884	35.277	0.56	12.68	0.49	0.49	0
SMNN	53.421	35.588	1.7	9.26	0.49	0.49	0
TEHN	51.334	35.697	-0.35	10.29	0.47	0.47	-0.001
TFSH	50.052	34.676	-0.78	11.84	0.51	0.51	-0.001
TKBN	50.93	36.786	-2.33	8.97	0.5	0.5	-0.001
TLGN	50.745	36.144	-3.4	10.41	0.49	0.49	-0.001
VRMN	51.632	35.344	0.64	12.07	0.47	0.47	-0.001
GRGN	54.353	36.876	-1.71	5.13	0.54	0.54	0
HAMD	48.534	34.869	0.73	13.52	0.47	0.47	0
BIAJ	55.805	36.086	2.54	9.05	0.54	0.54	0
MAVT	55.944	37.801	-3.7	5.23	0.55	0.55	0
SALF	50.469	34.484	0.14	12.49	0.51	0.51	0
KRMD	49.211	36.196	-0.65	10.19	0.5	0.5	-0.001

جدول ۲- آهنگ کرنش ژئودتیکی. axis 1 بیانگر محور کشش و axis 2 بیانگر محور فشارش است. ستون آخر، آزمون محور فشارش را نشان می‌دهد.

Poly. Number	Long. (deg.dec)	Lat. (deg.dec)	axis 1 ($\times 10^{-9}$ yr $^{-1}$)	axis 2 ($\times 10^{-9}$ yr $^{-1}$)	Azimuth(deg.dec)
1	50.4332	36.7509	4.52822254	-25.7713223	33.2581463
2	49.86	36.5541	17.2077607	-13.9849058	98.5112001
3	49.9675	35.7607	1.47844385	-24.0594733	13.8500473
4	50.1482	35.0073	1.43359141	-9.68022363	20.8419377
5	51.7553	35.3895	8.77913397	-19.8920364	9.70004039
6	51.1784	35.9155	25.9627909	-22.6374899	32.0709868
7	51.4472	36.4316	12.1392219	-39.9057687	23.9841601
8	52.3764	36.0039	15.171124	-49.7362468	26.014088
9	53.353	36.3508	19.7825668	-38.8570129	17.8279473
10	54.5264	36.1834	15.0865715	-40.1972845	14.7175889
11	55.3674	36.921	13.4283801	-25.3297276	14.4396641

کتابنگاری

موسوی، ز.، ۱۳۸۴- پهنه‌بندی تعیین نرخ تغییرات ممان لرزه‌ای در ایران بر پایه مشاهدات GPS. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی.

References

- Allen, M.R., Ghassemi, M.R., Sharabi, M., Qorashi, M., 2003a- Accomodation of late Cenozoic oblique shortening in the Alborz range, northern Iran, *Journal of Structural Geology*, 25, 659-672
- Bachmanov, D.M., Trifonov, V.G., Hessami, Kh.T., Kozhurin, A.I., Ivanova, T.P., Rogozhi, E.A., Hademi, M.C., Jamali, F.H., 2004- Active faults in the Zagros and central Iran, *Tectonophysics*, 380, 221-241
- Berberian, M. & Yeats, R.S., 1999- Pattern of historical earthquake rupture in the Iranian Plateau, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89, 120-139
- Djamour, Y., 2004- Contribution de la Géodésie (GPS et nivellement) à l'étude de la déformation tectonique et de l'aléa sismique sur la région de Téhéran (montagnes de l'Alborz, Iran), Ph.D. Thesis, University of Montpellier II, France.
- Djamour, Y., Nankali, H.R. & Rahimi, Z., 2006- Iranian Permanent GPS Network, *GIM International*, Volume 20, Issue 9
- Djamour, Y., Vernant, P., Bayer, R., Nankali, H.R., Ritz, J.F., Hinderer, J., Hatam, Y., Luck, B., Moigne, N., Sedighi, M., Khorrami, F., 2010- GPS and gravity constraints on continental deformation in the Alborz mountain range, Iran. *Geophysical Journal International*, 183, 1287-1301
- Herring, T.A., King, R.W., McClusky, S.C., 2009a- GAMIT reference manual, Release 10.3, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- Herring, T.A., King, R.W., McClusky, S.C., 2009b- GLOBK reference manual, Release 10.3, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- Jackson, J. & McKenzie, D., 1988- The relation ship between plate motions and seismic moment tensors, and the rates of active deformation in the Mediterranean and Middle East, *Geophysical Journal*, 93, 45-73
- Jackson, J. & McKenzie, D.P., 1984- Active tectonics of the Alpine-Himalayan belt between western Turkey and Pakistan, *Geophysical Journal Royal Astronomical Society*, 77, 185-264.
- Jackson, J.A., Priestley, K., Allen, M. & Berberian, M., 2002- Active tectonics of the South Caspian Basin, *Geophysical Journal International*, 148, 214-245.
- King, R.W. & Bock, Y., 1995- Documentation of the GAMIT GPS analysis software version 9.3, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- Malvern, L.E., 1969- Introduction to the Mechanics of a Continuum Medium, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Masson, F., Anvari, M., Djamour, Y., Walpersdorf, A., Tavakoli, F., Daignières, M., Nankali, H., Van Gorp, S., 2007- Large-scale velocity field and strain tensor in Iran inferred from GPS measurements: new insight for the present-day deformation pattern within NE Iran, *Geophysical Journal International*, 170, 436-440
- Masson, F., Chéry, J., Hatzfeld, D., Martinod, J., Vernant, P., Tavakoli, F., Ghafory-Ashtiani, M., 2005- Seismic versus aseismic deformation in Iran inferred from earthquakes and geodetic data, *Geophysical Journal International*, 160, 217-226
- Nazari, H., Ritz, J.F., Salamati, R., Shafei, A., Ghassemi, A., Michelot, J.L., Massault, M., Ghorashi, M., 2009- Morphological and palaeoseismological analysis along the Taleghan fault (Central Alborz, Iran), *Geophysical Journal International*, 178, 1028-1041.
- Nazari, H., Ritz, J.F., Salamati, R., Soleymani, S., Balescu, S., Michelot, J.L., Ghassemi, A., Talebian, M., Lamothe, M., Massault, M., 2007- Paleoseismological analysis in Central Alborz, Iran. 50th Anniversary earthquake conference commemorating the 1957 Gobi-Altay earthquake (July - August 2007- Ulaanbaatar-Mongolia)
- Nilforoushan, F., Vernant, P., Masson, F., Vigny, C., Martinod, J., Abbassi, M., Nankali, H., Hatzfeld, D., Bayer, R., Tavakoli, F., Ashtiani, A., Doerflinger, E., Daignières, M., Collard, P., Chéry, J., 2003- GPS network monitors the Arabia- Eurasia collision deformation in Iran, *Journal of Geodesy*, 77, 411- 422
- Ritz, J.F., Nazari, H., Ghassemi, A., Salamati, R., Shafei, A., Soleymani, S. & Vernant, P., 2006- Active transtension inside central Alborz: A new insight into northern Iran-southern Caspian geodynamics, *Geology*, 34, 477-480.
- Stocklin, J., 1974a- Northern Iran: Alborz Mountains, in Spencer, A.M., ed., Mesozoic-Cenozoic orogenic belts; data for orogenic studies; Alpine-Himalayan orogens, Geological Society Special Publication, London, 4, 213-234
- Talebian, M., Ghorashi, M., Nazari, H., (In press)- Seismotectonic map of the central Alborz
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Chery, J., Bayer, R., Djamour, Y., Masson, F., Nankali, H., Ritz, J.F., Sedighi, M. & Tavakoli, F., 2004b- Deciphering oblique shortening of central Alborz in Iran using geodetic data, *Earth and Planetary Science Letters*, 223, 177-185.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M. R., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R., Tavakoli, F., Chéry, J., 2004a- Present-day crustal deformation and plate kinematics in Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman, *Geophysical Journal International*, 157, 381-398
- Zhang, J., 1996- Continuous GPS measurments of crustal deformation in southern California, Ph.D. dissertation, Univ. of Calif., San Diego.
- Zhang, J., Bock, Y., Johnson, H., Fang, P., Genrich, J., Williams, S., Wdowinski, S., Behr, J., 1997- Southern California Permanent GPS geodetic array: Error analysis of daily position estimates and site velocities, *Journal of Geophysical Research*, 102, 18035-18055