

## بررسی دگرریختی پوسته در رشته کوه‌های قوشاداغ با تحلیل داده‌های GPS، تنش زمین‌ساختی و روش تداخل‌سنجی راداری

احسان سعادت‌فر<sup>۱\*</sup> و بهزاد زمانی<sup>۲</sup>

۱. کارشناس ارشد گروه مهندسی سنجش از دور، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان، ایران

۲. دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، ایران

(دریافت: ۹۲/۱۱/۱۶، پذیرش نهایی: ۹۴/۳/۱۲)

### چکیده

زلزله سال ۱۳۹۱ اهر-ورزقان (۶/۲ ریشتر) و پس‌لرزه‌های آن نشانگر تمرکز دگرریختی و تنش در شمال غرب ایران است. برای بررسی این دگرریختی‌ها، نتایج حاصل از داده‌های GPS، تنش زمین‌ساختی مسبب دگرریختی، و تحلیل داده‌های راداری بررسی شد. تداخل‌سنجی راداری (InSAR) روشی است که در آن اختلاف فاز بین دو یا چند تصویر راداری محاسبه و اختلاف طول مسیر بر اثر اخذ تصویر از دو منظر متفاوت ایجاد می‌شود. به کمک اختلاف فاز می‌توان میزان جابه‌جایی سطح زمین را استخراج کرد. در این پژوهش روش تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنش‌گرهای پایدار برای پایش دگرریختی بین لرزه‌ای پوسته مرتبط با زمین‌لرزه اهر-ورزقان به کار گرفته شده است. در این پژوهش از ۲۰ تصویر حسگر Envisat ASAR در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ برای بررسی دگرریختی پوسته زمین در منطقه اهر-ورزقان با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنش‌گرهای پایدار استفاده شده است. نرخ دگرریختی زمین برحسب میلی‌متر بر سال، در مسیر حرکت ماهواره و بیشینه نرخ جابه‌جایی افقی ۷/۴ میلی‌متر بر سال به دست آمده است. روش وارون‌سازی تنش‌های زمین‌ساختی، امکان تعیین سمت متوسط تنش‌ها را در گسل جنوب اهر ممکن ساخته است، به طوری که متوسط تنش‌ها با سمت NW-SE یعنی با روند (۱۱۷°/۱۶°) به صورت فشارش (برای بیشینه تنش‌ها) به دست آمده است. این مسئله دلالت بر نزدیک بودن تنش بیشینه دارد و باعث شکل‌گیری و تکامل راندگی‌ها در محدوده غرب قوشاداغ شده است. نتایج تحلیل تنش، سازوکار کانونی زمین‌لرزه، و سازوکار گسل و نتایج داده‌های GPS در منطقه، همگی با تحلیل تداخل‌سنجی راداری سازگارند.

واژه‌های کلیدی: اهر-ورزقان، تداخل‌سنجی راداری، تنش، گسل، GPS

### ۱. مقدمه

مسبب دو زمین‌لرزه با بزرگی ۶/۴ و ۶/۲ (به نقل از USGS) در ۱۹ مرداد ۱۳۹۱ بوده و تاکنون کمتر بررسی شده است. در این پژوهش با بررسی تنش‌های زمین‌ساختی حاکم بر منطقه، تحلیل داده‌های راداری (نشانگر جابه‌جایی‌ها در محدوده گسل) و مقایسه آن‌ها با نتایج داده‌های GPS، نشانه‌های دگرریختی پوسته تا سال ۲۰۱۰ جست‌وجو شده است و در نهایت این نتیجه حاصل شد که دگرریختی‌ها منجر به زمین‌لرزه اهر و ورزقان شده است.

در این پژوهش با توجه به کوهستانی بودن منطقه مورد بررسی، همچنین وجود پوشش گیاهی در بسیاری از نقاط، با توجه به محدودیت‌های موجود در بررسی‌های صحرائی، از شیوه‌های راداری برای بررسی

ایران در بخش میانی کمربند آلپ-همالیا قرار گرفته است که از لرزه‌خیزترین نواحی جهان محسوب می‌شود. بیش از ۳۰ درصد زمین‌لرزه‌های دنیا در این کمربند روی می‌دهد. زلزله‌خیز بودن ایران در طول تاریخ و احتمال وقوع زلزله‌های مخرب در همه نقاط کشور در آینده، اهمیت تحقیقات لرزه‌خیزی و لرزه‌زمین‌ساختی در این کشور را دو چندان می‌کند. در آذربایجان گسل‌های متعددی وجود دارد که مهم‌ترین آن‌ها گسل تبریز، گسل سیاه‌چشمه-خوی، گسل میانه-اردبیل، گسل ارس و گسل آستارا-اردبیل است. گسل‌های ناشناس متعدد دیگری نیز در آذربایجان وجود دارد که یا تاکنون معرفی نشده‌اند یا به علت نبود رویداد زلزله‌ای مهم ناشناخته مانده‌اند. یکی از این گسل‌ها گسل جنوب اهر است که

گسل ارس و گسل‌های عمده البرز غربی در این ناحیه میرا می‌شود (بربریان و یتس، ۱۹۹۹). بنابراین، سینماتیک این گسل‌ها نسبت به هم در آذربایجان و تأثیر متقابل پایانه‌های گسلی (fault termination) آن‌ها این منطقه را تحت تأثیر خود قرار خواهد داد (کوپلی و جکسون، ۲۰۰۶). به‌طور کلی، چنین می‌توان گفت که آذربایجان شرقی از نظر مرزهای زمین‌ساختی، در بین چهار گسل امتدادلغز عمده محصور شده است. این چهار مرز شامل گسل ارس در شمال، گسل شمال تبریز در غرب، سامانه گسلی تالش و آستارا در مرز شرقی، همچنین گسل اردبیل-میانه (شکل ۱) در مرز جنوب شرقی است (زمانی و میسون، ۲۰۱۴).

رشته کوه قرار گرفته در جنوب شهر اهر از قرارگیری کوه‌های گوناگون در کنار هم شکل یافته که به ترتیب از شرق به غرب شامل اوغلان‌داغ، قوشه‌داغ و آیتاخلی است و در مجموع به نام رشته کوه قوشه‌داغ شهرت دارد (شکل ۲). این رشته کوه‌ها روند شرقی-غربی دارد و از نظر زمین‌شناسی سازندهای متفاوت دوران‌های مزوزویک و سنوزویک در آن‌ها برون‌زد یافته است. برخاستگی این رشته کوه نتیجه فرایندهای زمین‌ساختی توأم با فراراندگی است که ریخت‌شناسی کنونی آن را در جنوب شهر تاریخی اهر به نمایش گذاشته است.

### ۳. روش شناسی و تحلیل داده‌ها

دگرریختی‌های روی داده در پوسته زمین به شیوه‌های گوناگونی بررسی می‌شود. از جمله این روش‌ها بررسی‌های زمین‌شناسی ساختاری، بررسی‌های لرزه‌زمین‌ساختی و بررسی ژئودزی است. در این تحقیق ابتدا دگرریختی‌های اندازه‌گیری شده با داده‌های GPS در این محدوده بررسی شد. سپس، تحلیل تنش‌های مسبب این دگرریختی‌ها، همچنین تحلیل داده‌های راداری با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری بر مبنای پراکنش‌گرهای پایدار به منظور به‌دست آوردن نرخ جابه‌جایی در محدوده گسل جنوب اهر صورت پذیرفته است. در انتها، با تلفیق نتایج حاصل، نشانه‌های دگرریختی پوسته تا سال ۲۰۱۰ جست‌وجو شد. در نهایت

دگرریختی‌های پوسته استفاده شده است. با ورود ماهواره‌های راداری، روش تداخل‌سنجی راداری به منزله ابزاری مفید در اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های سطح زمین با دقتی مناسب در مقایسه با روش‌های سنتی، نظیر ترازبایی دقیق و سامانه موقعیت‌یاب جهانی، استفاده شده است. توان تفکیک زیاد و پوشش بی‌سابقه به‌دست آمده از تداخل‌سنجی راداری (InSAR: Interferometric Synthetic Apertur Radar)، ابزاری قدرت‌مند برای محققان فراهم آورده و منجر به اکتشافاتی در این زمینه شده است (گلدستین و ورنر، ۱۹۹۸؛ ماسونت و همکاران، ۱۹۹۳؛ گابریل و همکاران، ۱۹۸۹). امروزه، روش تداخل‌سنجی راداری در حکم روشی مهم و متداول برای بررسی دگرریختی‌های پوسته و زمین‌لرزه مطرح است. در تداخل‌سنجی راداری فاز تصاویر گرفته شده از زمان‌های تصویربرداری گوناگون، پیکسل به پیکسل مقایسه می‌شود و از تفاضل‌گیری بین این مقادیر تصویر تداخل‌سنج تولید می‌شود. محدودیت اصلی برای صحت اندازه‌گیری‌های تداخل‌سنجی راداری ناشی از خطای جوئی، خطای توپوگرافی، خطای مداری و همدوسی کم است (زبکر و همکاران، ۱۹۹۵). در اواخر دهه ۱۹۹۰ سعی بر کاهش محدودیت‌های روش تداخل‌سنجی راداری سنتی با پردازش چندین تصویر SAR در زمان‌های متفاوت به منظور تولید سری زمانی جابه‌جایی‌های زمین برای اهداف خاص شد (فرتی و همکاران، ۲۰۰۱). یکی از این روش‌ها شامل شناسایی پیکسل‌های پراکنش‌گر پایدار است که رفتار پراکنشی در زمان و زوایای دید متفاوت ثابت می‌ماند و امکان اندازه‌گیری مقدار جابه‌جایی سطح زمین را در حد میلی‌متر فراهم می‌آورد و به روش پراکنش‌گرهای پایدار (PS: Persistent Scattering) معروف است (هوپر، ۲۰۰۸).

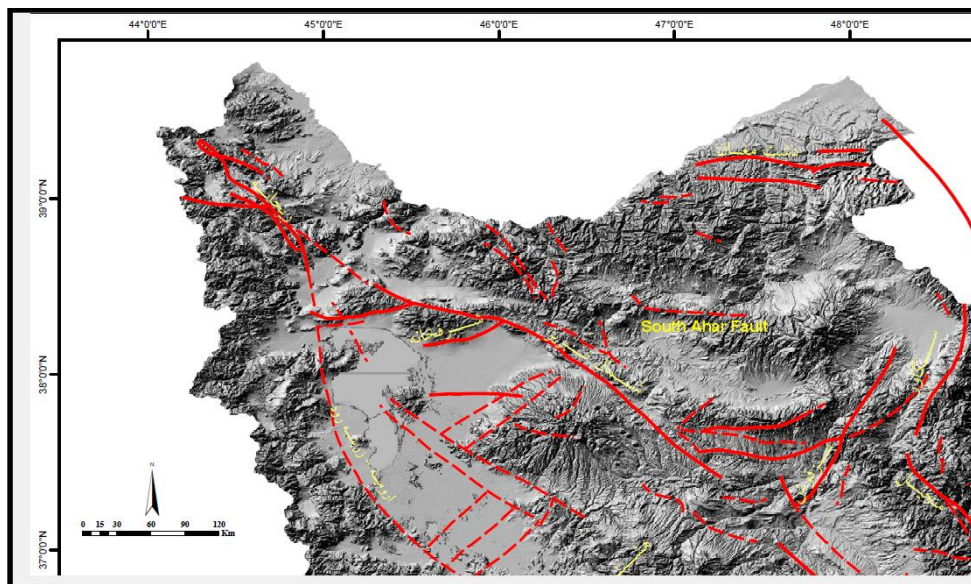
### ۲. زمین‌شناسی و زمین‌ساخت

آذربایجان ایران بین دو کوهزاد بزرگ قفقاز در شمال و زاگرس در جنوب قرار گرفته است و بسیاری از گسل‌های عمده و بزرگ از جمله گسل شمال تبریز،

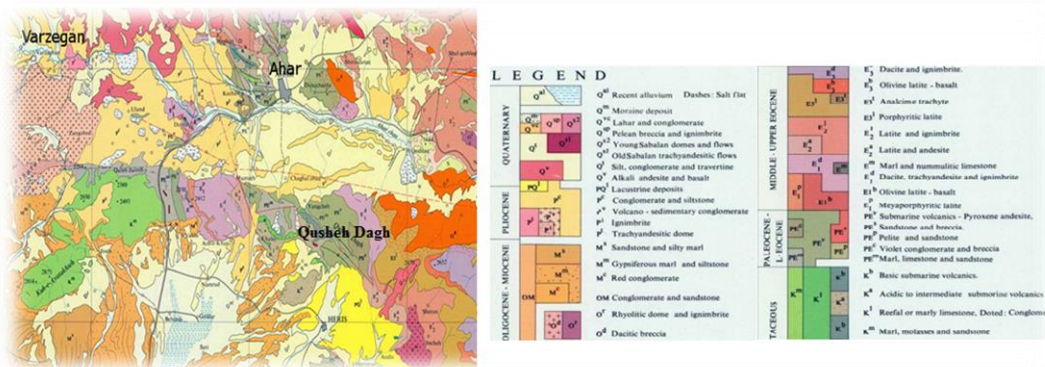
افزایش می‌یابد. علت افزایش نرخ راست‌گرد را می‌توان در نزدیک‌شدن به صفحهٔ ترکیه و گسل‌های راست‌گرد شمال آناتولی بیان کرد. در این میان متراکم‌ترین شبکهٔ مورد استفاده در محدودهٔ مورد بررسی در این پژوهش (رلینگر و همکاران، ۲۰۰۶) است که ۲ ایستگاه در محدودهٔ مورد بررسی جنوب اهر واقع شده است (شکل ۳). دگرریختی پوسته و جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری شده در این ایستگاه‌ها به ترتیب برابر با  $7/8$  و  $11/2$  میلی‌متر در سال است (میسون و همکاران، ۲۰۰۶). سمت جابه‌جایی ناشی از دگرریختی پوسته در این ایستگاه‌ها در جهت SW-NE حاصل شده است. بر مبنای نتایج داده‌های GPS در منطقهٔ جنوب اهر حرکت راست‌گرد امتدادلغزی در منطقه مشاهده می‌شود.

این نتیجه حاصل شد که این دگرریختی‌ها منجر به زمین‌لرزه‌های دوگانه‌اهر-ورزقان شده است.

۳.۱. دگرریختی‌های اندازه‌گیری شده با داده‌های GPS  
 محققان گوناگونی در ارتباط با اندازه‌گیری‌های ژئودزی با GPS در پوستهٔ ایران پژوهش کرده‌اند (میسون و همکاران، ۲۰۰۵، ۲۰۰۶؛ رلینگر و همکاران، ۲۰۰۶؛ ورنانت و چری، ۲۰۰۶؛ ورنانت و همکاران، ۲۰۰۴؛ جمور و همکاران، ۲۰۰۶؛ حسامی و همکاران، ۲۰۰۳؛ جمور و همکاران، ۲۰۱۱) که در خصوص گسل‌های موجود در منطقهٔ شمال غرب ایران حرکت راست‌گرد امتدادلغز تأکید شده است که با حرکت به سمت شمال غرب و گسل آناتولی واقع در ترکیه، نرخ سرعت آن



شکل ۱. نقشهٔ خطواره‌های مغناطیسی ناحیهٔ شمال غرب ایران (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۹).



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی محدوده شهر اهر-ورزقان (لسکویه و همکاران، ۱۳۶۸).

## ۲.۳. تحلیل تنش‌های مسبب دگرریختی‌ها

برآورد رژیم تنش زمین‌ساختی در ناحیه کمک می‌کند تا بتوان دگرریختی‌های ناحیه را در ارتباط با ساختارهای زمین‌شناسی و عوامل ایجادکننده دگرریختی‌ها، دقیق‌تر ارزیابی کرد. تشخیص جهت تنش‌هایی که عامل ایجاد دگرریختی‌ها در منطقه است، به‌خصوص در ارتباط با بررسی سازوکار جابه‌جایی گسل‌ها و زمین‌لرزه‌ها، اهمیت زیادی دارد. برآورد موقعیت تنش‌ها در ناحیه با شیوه‌های گوناگونی صورت می‌گیرد. از جمله این روش‌ها، روش تحلیلی برآورد زاویه تنش با استفاده از داده‌های لغزش گسل‌ها یا حل سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌هاست که اولین بار آنژلییر (۲۰۰۲) آن را ابداع کرد. این روش براساس محاسبه مؤلفه لغزش - تنش برشی زاویه تنش‌های متوسط زمین‌ساختی، عامل ایجاد لغزش در سطح مجموعه گسل‌های اندازه‌گیری شده یا زلزله‌های رویداده در ناحیه است و با تحلیل برگشتی محاسبه می‌شود (برای اطلاعات بیشتر به مقاله آنژلییر (۲۰۰۲) مراجعه شود).

شریفی و زمانی (۱۳۸۹) با بررسی‌های صحرائی گسل جنوب اهر و وضعیت تنش را در این ناحیه محاسبه کرده‌اند. به علت ناهمگنی سازوکارهای تنش به‌دست آمده در این منطقه تحلیل تنش‌ها با تحلیل جدایش تنش‌های (stress separation) چندگانه براساس روش آنژلییر (۱۹۸۴، ۲۰۰۴) که خود بر پایه روش آماری دیلی (۱۹۷۱) استوار است روی داده‌ها صورت گرفت. این روش مجموعه‌ای ناهمگن از داده‌های صحرائی لغزش گسل‌ها را به رده‌های همگن تقسیم می‌کند که مربوط به تانسورهای تنش متفاوت است (زمانی، ۱۳۹۲). جدایش تانسورهای متفاوت تنش و رده‌های مربوط، در این شیوه بر پایه روش طبقه‌بندی دینامیک تعمیم داده شده (generalized dynamic clustering approach) صورت می‌گیرد که نخستین بار دیلی (۱۹۷۱) مطرح کرد و روشی آماری است. در این شیوه در تشخیص رده‌های داده‌های لغزش گسل، در هر مرحله تانسور تنش محاسبه می‌شود. سپس، فرایند تغییر در پارامترهای اصلی و تکرار تحلیل وارون تنش آن قدر ادامه می‌یابد تا در

مجموع حداقل بیش از ۹۰٪ مجموع داده‌ها در تحلیل و مجموع چند تانسور تنش تحلیل شده حضور داشته باشد. به علت به حداقل رسیدن روش‌های عددی و نبود نیاز به انتخاب صفحات گرهی حل سازوکارهای کانونی، در روش تحلیل وارون آنژلییر (۲۰۰۲) امکان فرآوری دسته داده‌های بزرگ و فرآوری داده‌ها با روش طبقه‌بندی دینامیک به‌طور توأم به‌وجود می‌آید. از طرفی، پالایش و جدایش داده‌ها و تفکیک حالت‌های چندگانه تنش‌های ناحیه‌ای نیز حاصل می‌شود (زمانی، ۱۳۹۲). همچنین، در این شیوه از تحلیل با انتخاب مقادیر متناسب و واقع‌بینانه مثل  $0.0m$  (متوسط آستانه پذیرفتنی برای مؤلفه لغزش تنش برشی برحسب درصد) و  $N_{acc}$  (در صد داده‌های شرکت‌کننده در تانسور تنش به دست آمده) در تحلیل، تعداد زیردسته‌ها معمولاً کم و سطوح سازگاری آن‌ها نیز با توجه به پراکندگی داده‌ها زیاد است (آنژلییر، ۲۰۰۴). در این تحقیق تحلیل با نرم‌افزار Dyngli (آنژلییر، ۲۰۰۴) صورت گرفته است. در این روش تحلیل داده‌های ورودی به نرم‌افزار، موقعیت هر کدام از گسل‌های منطقه مورد بررسی شامل شیب، جهت شیب و نیز موقعیت خش‌لغز گسل‌هاست. نتایج تحلیل نیز شامل موقعیت تنش‌ها (زاویه میل و سمت میل تنش‌های بیشینه، متوسط و کمینه و پارامترهای آماری آن‌ها) و نسبت شکلی تنش است (جدول ۱). براساس این روش در ۳ ایستگاه در غرب قوشاداغ و محدوده تأثیر راندگی جنوب اهر، گسل‌های موجود و خش‌لغزهای آن‌ها اندازه‌گیری و با روش پیش‌گفته، تحلیل شده است. نتایج این تحلیل در جدول ۱ و شکل ۴ آمده است.

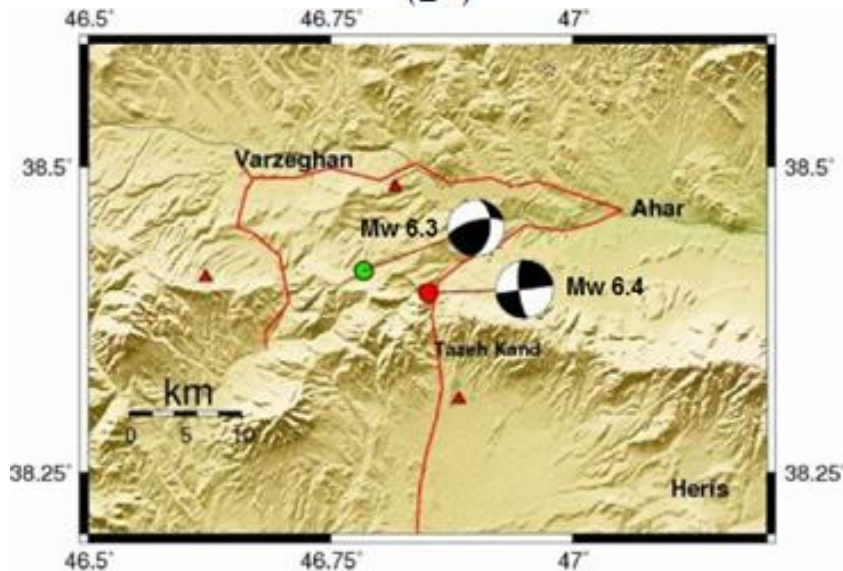
نتیجه تحلیل تنش نشان می‌دهد که بیشینه تنش زمین‌ساختی به‌صورت تنش فشارشی و باروند  $117^\circ/16^\circ$  در محدوده این گسل عمل می‌کند و خود با سازوکار راندگی به‌دست آمده در بررسی‌های صحرائی هم‌خوان است. میل تنش بیشینه ۱۶ درجه است و دلالت بر نزدیک به افق بودن تنش بیشینه دارد که عامل گسترش و تکامل راندگی‌های مکرر و انباشتگی در این محدوده است. این راندگی را شریفی و زمانی (۱۳۸۹)، به نام راندگی جنوب

متوسط آستانه پذیرفتنی برای مؤلفه لغزش تنش برشی در تحلیل است و برحسب درصد بیان می‌شود، مقدار نسبتاً زیادی دارد. مقدار زیاد (۸۵٪) برای  $\tau^*_m$  (متوسط نسبت تنش برشی به تنش برشی حداکثر) و مقدار کم  $\alpha_m$  (متوسط زاویه بین بردار تنش برشی و مؤلفه لغزش تنش برشی بر حسب درجه) دلالت بر پایدار بودن تحلیل دارد.

اهر معرفی کرده‌اند. سوی حرکت این سامانه نیز بر پایه بررسی‌های صحرایی حرکت فرادیواره را رو به شمال نشان داده است (شکل ۵). نسبت شکلی تنش ۰/۴۸ به‌دست آمده است و دلالت بر عملکرد رژیم تنش امتدادلغزی در این محدوده دارد. زاویه میل تنش‌های متوسط و کمینه به ترتیب ۴۰ و ۴۵ درجه و این نیز تأییدی بر غلبه رژیم امتدادلغزی در این ناحیه است.  $\omega_m$  که



(الف)

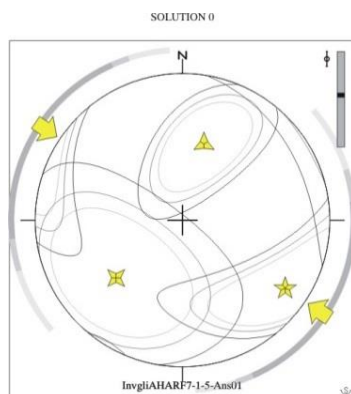


(ب)

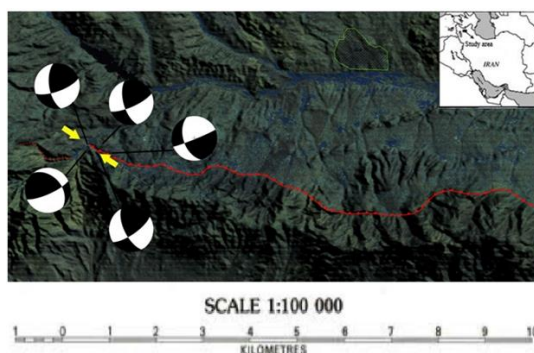
شکل ۳. (الف) شبکه ژئودزی دائمی GPS در منطقه آذربایجان که نمایشگر جابه‌جایی غالب پوسته در جهت شمال تا شمال غرب است (میسون و همکاران، ۲۰۰۶) و (ب) سازوکار کانونی زلزله اهر- ورزقان که سازوکار زلزله اول امتدادلغز و زلزله دوم رانده با مؤلفه امتدادلغز است. با در نظر گرفتن میزان دقت مرکز زلزله‌ها ملاحظه می‌شود که هر دو زلزله در ارتباط با گسل جنوب اهر روی داده است.

**جدول ۱.** نتایج تحلیل تنش زمین‌ساختی در غرب قوشاداغ و محدوده تأثیر راندگی جنوب اهر.  $W_{acc}$ : آستانه پذیرفتنی برای مؤلفه لغزش تنش برشی برحسب درصد،  $N_{acc}$ : درصد داده‌های شرکت‌کننده در تانسور تنش به دست آمده،  $\sigma_1$ : سمت میل تنش بیشینه،  $\sigma_2$ : سمت میل تنش متوسط،  $\sigma_3$ : سمت میل تنش کمینه، نسبت شکلی تنش  $(\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3))$ ،  $\omega_m$ : متوسط آستانه پذیرفتنی برای مؤلفه لغزش تنش برشی برحسب درصد،  $\tau^*_m$ : متوسط نسبت تنش برشی به تنش حداکثر (Angelier, 2002).

$W_{acc}$ %	$N_{acc}$ %	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\Phi$	$\omega_m$ %	$\tau^*_m$	$\alpha_m$
۴۵	۸۰	۱۱۷/۱۶	۲۲۱/۴۰	۴۵/۰۱	۰/۴۸	۸۰	۸۵	۱۶°



**شکل ۴.** نتیجه محاسبه تانسور تنش به روش تحلیلی در محدوده راندگی جنوب اهر. پیکان‌ها نشانگر حداکثر روند تنش اصلی است. بیضی‌ها محدوده دقت و هم‌خوانی تانسور تنش را نشان می‌دهد.



**شکل ۵.** گسترش راندگی جنوب اهر، سازوکار صفحات گسلی، همچنین جهت‌گیری رژیم‌های تنش تحلیل شده. سوی حرکت این سامانه بر پایه بررسی‌های صحرائی حرکت فرادایواره را رو به شمال نشان می‌دهد.

حرکت نسبی پراکنش‌گرها و تغییر در زاویه دید حس‌گر ایجاد می‌شود. با این حال اگر پراکنش‌گری انرژی قابل توجهی نسبت به پراکنش‌گرهای دیگر در فاصله یک پیکسل زمینی بازگشت دهد، نبود همبستگی فاز به مقدار زیادی کاهش می‌یابد. این پیکسل‌ها پراکنش‌گر پایدار نامیده می‌شود. پراکنش‌گرهای پایدار ممکن است گوشه‌های ساختمان یا تخته‌سنگ‌های بزرگ باشد که بازتاب بسیار قوی به سمت حس‌گر دارد. در این پژوهش به‌منظور به‌دست آوردن نقاط پراکنش‌گرهای پایدار، با

**۳.۳. تحلیل داده‌های راداری با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنش‌گرهای پایدار**  
روش تداخل‌سنجی راداری روشی مفید در پایش جابه‌جایی‌های سطح زمین است. به‌رغم مزیت‌های این روش در مقایسه با دیگر روش‌های پایش جابه‌جایی، دارای محدودیت‌هایی از جمله نبود همبستگی زمانی و مکانی است که کارایی آن را در بعضی موارد کاهش می‌دهد. نبود همبستگی، به علت مجموع توزیع همه پراکنش‌گرها در فاصله یک پیکسل زمینی، ناشی از

از اینکه تصاویر پیرو، پیکسل به پیکسل متناظر با تصویر پایه شد، تصاویر را می‌توان پیکسل به پیکسل در هم ضرب کرد تا اختلاف فاز هر دو پیکسل متناظر محاسبه شود. این اختلاف فاز در تصویر تداخل سنج نمایش داده می‌شود. بعد از تولید تداخل سنج‌ها، خطای انحنای زمین با استفاده از اطلاعات خط مبنای مکانی محاسبه و از تداخل سنج‌ها حذف می‌شود. در این پژوهش پس از اجرای مراحل یاد شده، خطای توپوگرافی زمین با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی SRTM با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر تصحیح شده است. در مرحله بعد به منظور انتخاب اولیه پیکسل‌های نامزد PS از فیلترهای گوناگونی می‌توان بهره گرفت که مرسوم‌ترین آن‌ها استفاده از پراکنندگی دامنه است. پس از انتخاب پیکسل‌های اولیه، از تحلیل فاز به منظور شناسایی پیکسل‌های PS نهایی استفاده می‌شود. پس از انتخاب نقاط پراکنش گره‌های پایدار مقادیر فاز بازیابی نشده، بازیابی می‌شود. برای کسب اطلاعات بیشتر در مورد نحوه بازیابی فاز به هوپر و همکاران (۲۰۰۷) رجوع شود. در نهایت مؤلفه‌های همبسته و ناهمبسته در مکان از جمله خطای مداری، خطای زاویه دید و خطای جو برآورد و از فاز بازیابی شده کم می‌شود.

در این روش نرخ جابه‌جایی به دست آمده از تصاویر راداری استفاده شده، در مسیر دید ماهواره به دست آمده است. شکل ۶ پراکنندگی نقاط پراکنش گره‌های پایدار به روش PS را نشان می‌دهد که مقدار جابه‌جایی پوسته زمین بر حسب میلی‌متر بر سال است. مقادیر منفی نشان‌دهنده حرکت جابه‌جایی دورشونده از مسیر دید ماهواره است. لازم به ذکر است در مناطقی که تراکم نقاط پراکنش گره‌های پایدار بیشتر باشد، دقت برآورد نرخ متوسط جابه‌جایی نیز زیاد خواهد بود.

نقشه پربند برای داده‌های جابه‌جایی به دست آمده از نتایج روش پراکنش گره‌های پایدار در شکل ۷ نشان داده شده است که میزان جابه‌جایی پوسته را نمایش می‌دهد. این نقشه با استفاده از داده‌های نقاط پراکنش گره‌های پایدار به دست آمده است که منحنی میزان‌ها نشانگر نرخ جابه‌جایی در نقاط گوناگون منطقه است.

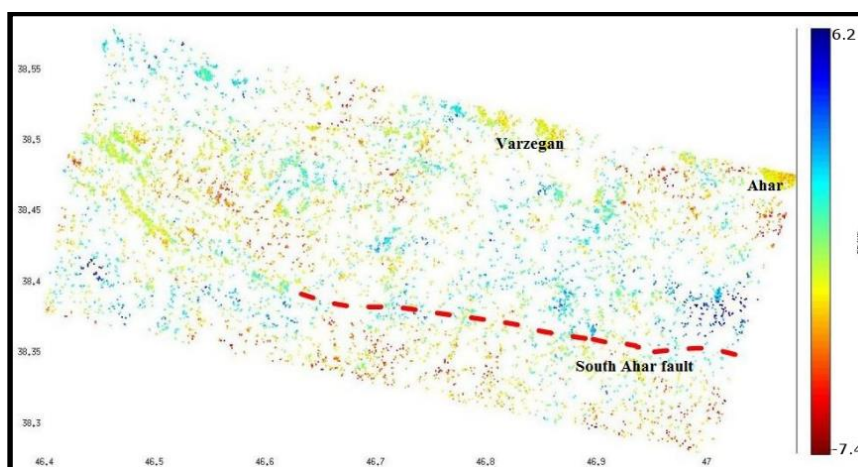
توجه به کوهستانی بودن منطقه اهر- ورزقان از روش تداخل سنجی راداری بر مبنای پراکنش گره‌های پایدار استفاده می‌شود که در دانشگاه استنفورد ارائه شده است (StaMPS). یکی از روش‌های پراکنش گره‌های پایدار است که پیکسل‌های PS را در نواحی پوشیده از گیاه با صحت زیادی تعیین می‌کند (هوپر، ۲۰۰۸). این روش به منظور تشخیص نقاط PS از تحلیل فاز و دامنه استفاده می‌کند. روش‌های دیگر پراکنش گره‌های پایدار به منظور شناسایی جابه‌جایی‌ها از مدل خاصی استفاده می‌کنند، در حالی که روش StaMPS نیازمند هیچ مدلی برای نرخ جابه‌جایی در زمان نیست.

در این تحقیق به منظور بررسی نرخ تغییرات گسل اهر- ورزقان از ۲۰ داده راداری حس گر ENVISAT ASAR استفاده شده است که طول موج این حس گر ۵/۶ سانتی‌متر و زاویه فرود سیگنال ۲۳/۵ درجه نسبت به حالت قائم است. همه تصاویر اخذ شده در گذر پایین و در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ قرار دارد. با توجه به اینکه عمر حس گر Envisat ASAR تا سال ۲۰۱۰ است، تا این زمان تصاویر در دسترس قرار دارد. همچنین، به علت محدودیت مالی طرح و ممکن نبودن تهیه تصاویر از حس گره‌های دیگر، در این پژوهش به بررسی دگرریختی‌های زمین قبل از زمین‌لرزه اهر- ورزقان پرداخته شده است.

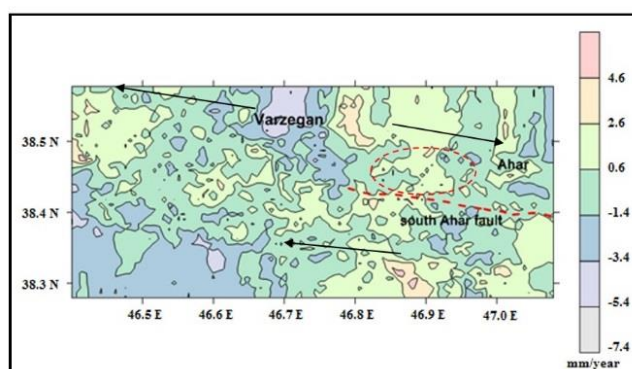
الگوریتم پراکنش گره‌های پایدار روی سری زمانی تداخل سنج‌هایی صورت می‌گیرد که نسبت به تصویر پایه تولید شده است. تصویر پایه به گونه‌ای انتخاب می‌شود که مجموع نبود همبستگی که تابع خط مبنای مکانی، خط مبنای زمانی و بسامد مرکزی دوپلر است، در همه تداخل سنج‌ها کمینه شود (هوپر، ۲۰۰۶). نامیزانی تصاویر به طور اساسی به خاطر اختلاف در زمان شروع تصویربرداری ایجاد می‌شود. در فرایند ثبت هندسی همه تصاویر پیرو نسبت به تصویر پایه ثبت هندسی می‌شود. در مرحله بعد تصاویر پیرو بر اساس پارامترهای به دست آمده از مرحله ثبت هندسی، روی گرید تصویر پایه نمونه‌برداری مجدد می‌شود. در نتیجه این مرحله، تصاویر پایه و پیرو پیکسل به پیکسل روی هم منطبق می‌شود. پس

است. داده‌های تحلیل شده در این پژوهش مربوط به فاصله زمانی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ است. از این رو، این میزان جابه‌جایی‌ها مربوط به قبل از رویداد زمین‌لرزه‌های مرداد ۱۳۹۱ و در واقع مربوط به زمان تجمع تنش در سطح گسل است. در بخش‌های قفل شده سطح گسل که کمترین جابه‌جایی‌ها را در شکل ۷ نشان می‌دهد و به تقریب با بیضی سرخ‌رنگ خط‌چین نشان داده شده است، تجمع تنش‌ها در طول سال‌ها صورت گرفته و در مدل لغزش چسبنده با آزاد شدن تنش‌ها در سال ۲۰۱۲ و رویداد زمین‌لرزه همراه بوده است. بررسی‌های میدانی صورت گرفته و نقشه کردن محدوده گسیختگی‌ها پس از زمین‌لرزه رویداده نیز این مسئله را تأیید می‌کند (شکل ۸) و نشان می‌دهد گسیختگی‌ها در فاصله روستای گوی‌درق در شمال غرب هریس تا روستای زنگ‌آباد در جنوب شهر ورزقان که تقریباً بخش‌های قفل شده گسل را تشکیل می‌دهد به طول حدود ۲۲ کیلومتر گسترش دارد و در صحرا قابل شناسایی است.

بررسی سازوکار این گسل با نتایج به دست آمده از پراکنش گره‌های پایدار در این پژوهش در همه بخش‌های گسل، سازوکار امتدادلغزی راست‌گرد را نشان می‌دهد. دگرریختی مجموع جابه‌جایی و واتنش در پوسته است که خود تابعی از مقدار و سمت تنش زمین‌ساختی عمل‌کننده در یک منطقه است. با بررسی نتایج روش پراکنش گره‌های پایدار، مقدار جابه‌جایی پوسته در این پژوهش ۷/۴ میلی‌متر بر سال به دست آمده است و سمت جابه‌جایی‌ها نیز با سمت‌گیری تنش‌های تحلیل شده از داده‌های گسل‌ها انطباق خوبی نشان می‌دهد. توضیح اینکه نرخ جابه‌جایی به دست آمده از تصاویر حس‌گر Envisat ASAR در گذر پایین، به علت نبود هیچ‌گونه تصویری در گذر بالا در تاریخ‌های مورد بررسی، فقط در مسیر دید ماهواره به دست آمده است. از این رو، اختلاف جهت‌های یاد شده مربوط به این مسیرهاست. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که بیشترین جابه‌جایی‌ها در فاصله شهرهای ورزقان و هریس متمرکز



شکل ۶. نقاط پراکنش گره‌های پایدار شناسایی شده در منطقه گسل جنوب اهر با استفاده از روش پراکنش گره‌های پایدار (PS).



شکل ۷. نقشه پربند برای جابه‌جایی به دست آمده از نتایج روش پراکنش گره‌های پایدار که منحنی میزان‌ها، مقدار جابه‌جایی پوسته را نشان می‌دهد.





شکل ۸. گسیختگی زمین در اثر رویداد زلزله مرداد ۱۳۹۱.

#### ۴. نتیجه گیری

در این پژوهش تحلیل داده‌های GPS و برآورد جهت تنش‌های زمین‌ساختی مسبب دگرریختی‌ها در منطقه اهر- ورزقان واقع در شمال غرب ایران صورت گرفته است. همچنین، از روش تداخل‌سنجی راداری با استفاده از تصاویر راداری حس گر Envisat ASAR در منطقه مورد بررسی برای به دست آوردن مقدار جابه‌جایی‌ها و دگرریختی پوسته به روش PS-StaMPS استفاده شده است. در نهایت، نتایج به دست آمده مقایسه شد تا وضعیت دگرریختی در این منطقه مشخص شود.

با توجه به کوهستانی بودن منطقه مورد بررسی و پوشش جنگلی در بسیاری نقاط و محدودیت‌های موجود در بررسی‌های صحرایی از شیوه‌های راداری برای بررسی دگرریختی‌های پوسته استفاده شده است. در واقع، به علت توان شناسایی پیکسل‌های PS در مناطق غیرشهری با روش پراکنش‌گرهای پایدار به روش StaMPS، از این روش به منظور به دست آوردن نرخ جابه‌جایی پوسته زمین استفاده شده است. نرخ جابه‌جایی به دست آمده با استفاده از روش پراکنش‌گرهای پایدار ۷/۴ میلی‌متر بر سال است و جابه‌جایی در راستای دید ماهواره به دست آمده است. جابه‌جایی‌های به دست آمده از تحلیل داده‌های GPS در محدوده مورد بررسی را رلینگر و همکاران (۲۰۰۶) برای دو ایستگاه اندازه‌گیری ۷/۸ و ۱۱/۲ میلی‌متر بر سال به دست آورده‌اند که در جهت NE-SW حاصل شده است و در مقایسه با نتایج روش پراکنش‌گرهای پایدار، مقادیر مشابهی نشان می‌دهد.

نکته قابل توجه اینکه سمت جابه‌جایی‌هایی که در

شکل ۷ نشان داده شده است و در جهت پیکان افزایش می‌یابد، سازوکار جابه‌جایی راست‌گردی برای منطقه نشان می‌دهد که با سازوکار راست‌گردی مشاهده شده در صحرا برای گسیختگی‌های ناشی از زلزله و نیز سازوکار راست‌گردی به دست آمده از حل سازوکار کانونی زمین‌لرزه (با بزرگی ۶/۲)، همچنین جهت‌گیری تنش‌های تحلیل شده به خوبی هم‌خوانی دارد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که نتایج به دست آمده از تحلیل داده‌های راداری به خوبی جابه‌جایی‌های پوسته و دگرریختی‌های رویداده را بازتاب می‌دهد و می‌توان از این اطلاعات در حکم پیش‌نشانگرهای زمین‌لرزه استفاده کرد.

#### مراجع

- سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۹، نقشه گسل‌های اصلی البرز باختری و آذربایجان، پایگاه ملی داده‌های علوم زمین کشور.
- شریفی، ر. و زمانی، ب.، ۱۳۸۹، معرفی راندگی جنوب اهر و بررسی رژیم تنش تکنونیک پهنه اطراف گسل، چهاردهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، ارومیه.
- زمانی، ب.، ۱۳۹۲، مدل زمین‌ساخت فلات آذربایجان (شمال گسل تبریز و جنوب ارس)، م. علوم زمین، بهار ۹۲، ۲۲(۸۷)، ۴۱-۵۰.
- لسکویه، ج. ل.، ریو، ر. و بابا خانی، ع. ر.، ۱۳۶۸، نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰، اهر، انتشارات سازمان زمین‌شناسی ایران.

- Angelier, J., 1984, Tectonic analyses of fault slip data sets, *J. Geoph. Res.*, 89(B7), 5835-5848.
- Angelier, J., 2002, Inversion of earthquake focal mechanisms to obtain the seismotectonic stress (a new method free of choice among nodal planes), *geophys. J. Int.*, 150, 588-609.
- Angelier, J., 2004, Inversion of earthquake focal mechanisms to reconstruct multiple seismotectonic stress regimes: refining and separation processes, *Geophy. Research Abst.*, 6, 03901, 588-609.
- Berberian, M. and Yeats, R. S., 1999, Patterns of historical earthquake rupture in the Iranian plateau, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89, 120-139.
- Copley, A. and Jackson, J., 2006, Active tectonics of the Turkish–Iranian Plateau, *Tectonics*, 25, 210-229.
- Diday, E., 1971, *Dynamic clustering method*, 345p., Springer.
- Jamour, Y., Vernant, P., Nankali, H. and Tavakoli, F., 2011, NW Iran-eastern Turkey present-day kinematics: results from the Iranian permanent GPS network, *Earth and Planetary Science Letters*, 37, 0-34.
- Jamour, Y., Nankali, H. and Rahimi, Z., 2006, Iranian permanent network, *GIM International*, September 2006, 20(9).
- Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F., 2001, Permanent scatterers in SAR interferometry, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 39(1), 8-20.
- Gabriel, K., Goldstein, R. M. and Zebker, H. A., 1989, Mapping small elevation changes over large areas: differential interferometry, *Journal of Geophysical Research*, 94, 9183-9191.
- Goldstein, R. and Werner, C., 1998, Radar interferogram filtering for geophysical applications, *geophysical research letters*, 25(21), 4035-4038.
- Hessami, K., Pantosti, D., Tabassi, H., Shabani, E., Abbassi, M., Feghhi, K. and Soleymani, S., 2003, Paleoearthquakes and slip rates of the North Tabriz fault, NW Iran: preliminary results, *tectonophysics* submitted.
- Hooper, A., 2008, A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches, *Geophysical Research Letters*, 35, 81-88.
- Hooper, A., 2006, Persistent scatterer radar interferometry for crustal deformation studies and modeling of volcanic deformation, *Phd thesis*, Stanford University.
- Hooper, A., Zebker, H. and Chen, L., 2007, Phase unwrapping in three dimensions with application to InSAR time series, *J. Opt. Soc. Am. Image Sci.*, 24, 2737-2747.
- Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K. and Rabaute, T., 1993, The displacement of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, *Nature*, 364, 138-142.
- Masson, F., Djamour, Y., Van Gorp, S., Chéry, J., Tatar, M., Tavakoli, F., Nankali, H. and Vernant, P., 2006, Extension in NW Iran driven by the motion of the South Caspian Basin *Earth and Planetary Science Letters*, 252, 180-188.
- Masson, F., Chery, J., Martinod, J., Hatzfeld, D., Vernant, P., Tavakoli, F. and Ghafori-Ashtiani, M., 2005, Seismic versus aseismic deformation in Iran inferred from earthquake and geodetic data, *Geophys. J. Int.*, 160, 217-226.
- Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., Ozener, H., Kadirov, F., Guliev, I., Stepanyan, R., Nadariya, M., Hahubia, G., Mahmoud, S., Sakr, K., ArRajehi, A., Paradissis, D., Al-Aydrus, A., Prilepin, M., Guseva, T., Evren, E., Dmitrova, A., Filikov, S. V., Gomez, F., Al-Ghazzi, R. and Karam, G., 2006, GPS constraints on continental deformation in the Africa–Arabia–Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions, *J. Geophysical Research Solid Earth*, 111.
- Vernant, P. and Chery, J., 2006, Low fault friction in Iran implies localized deformation for the Arabia–Eurasia collision zone, *Earth Planetary Science Letters*, 246, 197-206.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M. R., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R., Tavakoli, F. and Chery, J., 2004, Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman, *Geophysical J. International*, 157, 381-398.
- Zamani, B. and Masson, F., 2014, Recent tectonics of East (Iranian) Azerbaijan from stress state reconstructions, *journal of tectonophysics*, 611(25), 61-82.
- Zebker, H., Rosen, P., Goldstein, R., Gabriel, A. and Werner, C., 1995, On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: the Landers earthquake, *Journal of Geophysical Research*, 99(B10), 19617-19634.