



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Spatial model of slip partitioning and Coulomb stress in the Central Alborz using radar interferometry

S. A. Adnani¹, M. Arian^{1,*}, A. Solgi¹, M. Shirazian², R. Heidari¹¹ Department of Earth Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran² Department of Surveying and Geomatics Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

ABSTRACT

Received: 08 February 2026

Reviewed: 27 March 2026

Revised: 02 June 2026

Accepted: 21 August 2026

KEYWORDS:

Interferometric Synthetic Aperture Radar

Global Navigation Satellite System

Slip-Rate Partitioning

Coulomb Failure Stress Changes

Boundary Element Method

Fault Interaction

Central Alborz

* Corresponding author

✉ mehranarian@srbiau.ac.ir

☎ (+98912) 3007525

Background and Objectives: Accurate monitoring of crustal deformation in transpressional tectonic systems is a fundamental challenge in geodynamics and seismotectonic assessment because strike-slip faulting and thrusting occur simultaneously and mechanically interact across adjacent fault segments. In the Central Alborz, oblique convergence between the Arabian and Eurasian plates has resulted in the partitioning of deformation among the Moshā–Fasham, North Tehran Thrust, Purkan–Vardij, Emamzadeh Davud, and Taleghan fault systems. Consequently, the assumption of uniform fault slip cannot adequately represent the spatial and depth-dependent heterogeneity of the deformation and stress fields. This study aims to develop an integrated framework based on remote sensing, geodesy, and fault mechanics to reconstruct the interseismic deformation field, partition the slip rate into strike-slip and dip-slip components, and calculate Coulomb failure stress changes throughout the fault network of the Central Alborz.

Methods: C-band synthetic aperture radar data acquired by Envisat from 2003 to 2012 and Sentinel-1A and Sentinel-1B from 2014 to 2022 were used to generate differential interferograms and retrieve surface displacements along the satellite line of sight. Interferometric synthetic aperture radar processing was performed in SARscape and included selecting image pairs with suitable spatial baselines, removing the topographic phase using the Shuttle Radar Topography Mission digital elevation model, applying Goldstein and adaptive filters, unwrapping the interferometric phase, and correcting orbital errors using ground control points. To assess geodetic consistency and impose boundary conditions, the eastward and northward horizontal velocity components, together with their one-sigma uncertainties, were obtained from 45 Global Positioning System and Global Navigation Satellite System stations in a Eurasia-fixed reference frame. The radar, geodetic, seismic, and fault-geometry datasets were spatially co-registered in the International Terrestrial Reference Frame 2000 using a seven-parameter Bursa–Wolf transformation. The velocity field was subsequently transformed between reference frames using the Euler pole of the Central Alborz. Twenty-two fault segments were represented in Universal Transverse Mercator Zone 39 North and discretized into regular (1 × 1)-km elements. The final model comprised 8,248 elements and 16,496 unknown parameters corresponding to the strike-slip and dip-slip components. The model was solved using the boundary element method and dislocation Green's functions for a homogeneous, isotropic elastic half-space. A crustal shear modulus of 30 gigapascals and an effective friction coefficient of 0.4 were adopted, and Coulomb failure stress changes were calculated at depths of 5, 10, and 15 km. To evaluate the consistency of the model outputs, the radar-interferometry-derived deformation field was compared with ground-based observations in areas of overlapping data coverage, while the modeled stress pattern was compared with the spatial distribution of filtered earthquake events extracted from homogenized seismic catalogs.

Findings: The slip distribution on the modeled fault surfaces does not follow a symmetric or elliptical pattern and is strongly controlled by local variations in fault dip, strike, depth, and the geometric linkage between adjacent segments. Along the

eastern section of the Mosha–Fasham fault, the left-lateral strike-slip component reached a maximum rate of approximately 4 mm/yr at shallow depths and exceeded the reverse dip-slip component, which attained a maximum of 2.4 mm/yr. At depths of 13–14 km, these components decreased to approximately 2 and 1.1 mm/yr, respectively. In contrast, the reverse component was dominant along the central section of the Mosha–Fasham fault. Along the northwestern branch of the North Tehran Thrust, the maximum reverse dip-slip rate was 1.5 mm/yr, whereas the strike-slip component did not exceed 0.2 mm/yr. The maximum positive Coulomb stress change was +0.092 bar and occurred at a depth of 10 km in the northern Damavand area. In the Fasham–Mosha zone, a correlation coefficient of approximately 0.87 was observed between the spatial pattern of stress changes and the deformation field derived from interferometric synthetic aperture radar. Furthermore, the positive stress lobes exhibited substantial spatial overlap with areas characterized by high concentrations of microearthquakes and aftershocks recorded in the homogenized seismic catalog.

Conclusion: The integration of multitemporal interferometric synthetic aperture radar observations, Global Positioning System and Global Navigation Satellite System velocities, and three-dimensional boundary-element modeling demonstrates that subsurface fault geometry and segmentation are the principal controls on the heterogeneous partitioning of slip and the concentration of interseismic stress in the Central Alborz. Compared with the assumption of uniform slip, the one-kilometer fault discretization enables localized variations in fault-motion components and zones of stress concentration to be resolved more effectively. Because the model assumes a homogeneous elastic half-space and spatially invariant mechanical parameters, the results should be interpreted as relative patterns of fault loading and mechanical interaction rather than deterministic predictions of the timing or magnitude of future earthquakes. The proposed framework provides a quantitative basis for prioritizing geodetic monitoring and improving assessments of seismic potential in Tehran and the surrounding regions.



NUMBER OF REFERENCES
33



NUMBER OF FIGURES
5



NUMBER OF TABLES
5

مقاله پژوهشی

مدل مکانی افراز لغزش و تغییرات تنش کولمب در البرز مرکزی با تداخل سنجی راداری

سید عبدالرضا عدنانی^۱، مهران آراین^{۱*}، علی سلگی^۱، مسعود شیرازیان^۲، رضا حیدری^۱

^۱ گروه علوم زمین، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۲ گروه مهندسی نقشه برداری و ژئوماتیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: پایش دقیق دگرشکلی پوسته در سامانه های ترافشارشی، به دلیل همزمانی گسلش امتدادلغز و راندگی و اندرکنش مکانیکی قطعات مجاور، یکی از مسائل بنیادی ژئودینامیک و ارزیابی لرزه زمین ساختی است. در البرز مرکزی، همگرایی مایل صفحات عربستان و اوراسیا به بخش بندی دگرشکلی میان سامانه های گسلی مشا- فشم، راندگی شمال تهران، پورکان-وردیج، امامزاده داوود و طالقان انجامیده است؛ از این رو، فرض لغزش یکنواخت نمی تواند ناهمگنی مکانی و عمقی میدان دگرشکلی و تنش را به درستی بازنمایی کند. هدف این پژوهش، توسعه چارچوبی یکپارچه بر پایه سنجش از دور، ژئودزی و مکانیک گسل برای بازسازی میدان دگرشکلی بین لرزه ای، افراز نرخ لغزش به مؤلفه های امتدادلغز و شیب لغز و محاسبه تغییرات تنش شکست کولمب در شبکه گسلی البرز مرکزی است.

تاریخ دریافت: ۱۹ بهمن ۱۴۰۴

تاریخ داوری: ۰۷ فروردین ۱۴۰۵

تاریخ اصلاح: ۱۲ خرداد ۱۴۰۵

تاریخ پذیرش: ۳۰ مرداد ۱۴۰۵

واژگان کلیدی:

تداخل سنجی راداری با دهانه مصنوعی

سامانه ناوبری ماهواره ای جهانی

افراز نرخ لغزش

تغییرات تنش شکست کولمب

روش المان‌های مرزی

اندرکنش گسل‌ها

البرز مرکزی

* نویسنده مسئول

mehranarian@srbiau.ac.ir

۰۹۱۲-۳۰۰۷۵۲۵ (۱)

روش‌ها: داده‌های راداری باند سی ماهواره انویست در بازه ۲۰۰۳-۲۰۱۲ و ماهواره‌های سنتینل-۱ ای و بی در بازه ۲۰۱۴-۲۰۲۲ برای تشکیل اینترفروگرام‌های تفاضلی و استخراج جابه‌جایی در راستای دید ماهواره به‌کار گرفته شدند. پردازش تداخل‌سنجی راداری با دهانه مصنوعی در محیط سارسکیپ شامل انتخاب زوج تصاویر دارای خط مبنای مکانی مناسب، حذف مؤلفه توپوگرافی با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی مأموریت توپوگرافی راداری شاتل، اعمال فیلترهای گلدشتاین و تطبیقی، بازکردن فاز و تصحیح خطاهای مداری با بهره‌گیری از نقاط کنترل زمینی بود. برای کنترل سازگاری ژئودتیکی و اعمال شرایط مرزی، مؤلفه‌های سرعت افقی شرقی و شمالی، همراه با عدم قطعیت‌های یک‌سیگمای ۴۵ ایستگاه سامانه موقعیت‌یابی جهانی و سامانه ناوبری ماهواره‌ای جهانی در چارچوب ثابت اوراسیا، استفاده شدند. مختصات داده‌های راداری، ژئودتیکی و لرزه‌ای و هندسه گسل‌ها با تبدیل هفت‌پارامتری بورس-ولف در چارچوب مرجع زمینی بین‌المللی ۲۰۰۰ هم‌مرجع شدند و تبدیل چارچوب میدان سرعت با استفاده از قطب اوایلر البرز مرکزی انجام گرفت. سپس ۲۲ قطعه گسلی در دستگاه مختصات کارتزین مرکاتور معکوس جهانی، زون ۳۹ شمالی، با المان‌های منظم 1×1 کیلومتر گسسته‌سازی شدند. مدل نهایی شامل ۸۲۴۸ المان و ۱۶۴۹۶ مجهول متناظر با دو مؤلفه امتدادلغز و شیب‌لغز بود که با روش المان‌های مرزی و توابع گرین نابرجایی در نیم‌فضای الاستیک همگن و ایزوتروپیک حل شد. مدول برشی پوسته ۳۰ گیگاپاسکال و ضریب اصطکاک مؤثر ۰/۴ در نظر گرفته شد و تغییرات تنش شکست کولمب در عمق‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ کیلومتری محاسبه شد. برای ارزیابی سازگاری خروجی‌ها، میدان دگرشکلی راداری با مشاهدات زمینی در نواحی دارای پوشش مشترک مقایسه و الگوی تنش با توزیع رویدادهای پالایش‌شده از کاتالوگ‌های همگن‌سازی‌شده لرزه‌ای تطبیق داده شد.

یافته‌ها: توزیع لغزش روی صفحات گسلی از الگوی متقارن و بیضوی پیروی نمی‌کند و به‌طور مشخص تحت کنترل تغییرات موضعی شیب، آزمون، عمق و پیوند هندسی قطعات است. در بخش شرقی مشا-فشم، مؤلفه امتدادلغز چپ‌گرد در ترازهای کم‌عمق به بیشینه تقریبی ۴ میلی‌متر در سال رسید و از مؤلفه شیب‌لغز معکوس با بیشینه ۲/۴ میلی‌متر در سال بزرگ‌تر بود. در عمق ۱۳ تا ۱۴ کیلومتری، این دو مؤلفه به‌ترتیب به حدود ۲ و ۱/۱ میلی‌متر در سال کاهش یافتند. در مقابل، در بخش مرکزی مشا-فشم مؤلفه معکوس غالب شد و در شاخه شمال‌غربی راندگی شمال تهران، بیشینه نرخ شیب‌لغز معکوس ۱/۵ میلی‌متر در سال بود؛ درحالی‌که مؤلفه امتدادلغز از ۰/۲ میلی‌متر در سال فراتر نرفت. بیشینه تنش مثبت برابر با ۰/۰۹۲ بار در عمق ۱۰ کیلومتری و در پهنه شمال دماوند به‌دست آمد. در پهنه فشم-مشا، ضریب همبستگی حدود ۰/۸۷ میان الگوی تغییرات تنش و میدان دگرشکلی حاصل از تداخل‌سنجی راداری با دهانه مصنوعی مشاهده شد. افزون بر این، لوب‌های تنش مثبت با نواحی پرتراکم خردلرزه‌ها و پس‌لرزه‌های ثبت‌شده در کاتالوگ همگن‌سازی‌شده، هم‌پوشانی فضایی قابل‌توجهی نشان دادند.

نتیجه‌گیری: تلفیق مشاهدات چندزمانی تداخل‌سنجی راداری با دهانه مصنوعی، سرعت‌های سامانه موقعیت‌یابی جهانی و سامانه ناوبری ماهواره‌ای جهانی و مدل‌سازی سه‌بعدی المان مرزی نشان می‌دهد که هندسه و قطعه‌بندی عمقی گسل‌ها، عامل اصلی ناهمگنی افراز لغزش و تمرکز تنش بین‌لرزه‌ای در البرز مرکزی است. شبکه‌بندی یک‌کیلومتری، در مقایسه با فرض لغزش یکنواخت، امکان آشکارسازی تغییرات موضعی مؤلفه‌های حرکتی و زون‌های تمرکز تنش را فراهم می‌کند. با توجه به فرض نیم‌فضای الاستیک همگن و ثابت بودن پارامترهای مکانیکی، نتایج باید به‌عنوان الگوی نسبی بارگذاری و اندرکنش گسل‌ها تفسیر شوند، نه پیش‌بینی قطعی زمان یا بزرگای زمین‌لرزه. این چارچوب می‌تواند مبنایی کمی برای اولویت‌بندی پایش ژئودتیکی و بهبود ارزیابی پتانسیل لرزه‌ای تهران و مناطق پیرامونی فراهم سازد.

مقدمه

میدان تنش پوسته تنها بازتاب نیروهای مرزی صفحات نیست، بلکه می‌تواند در مقیاس‌های ناحیه‌ای و محلی تحت تأثیر هندسه گسل‌ها، ناهمگنی‌های ساختاری، تغییرات لیتولوژیکی و نحوه اتصال قطعات گسلی قرار گیرد. بررسی‌های انجام‌شده بر پایه داده‌های نقشه جهانی تنش نشان داده‌اند که در کنار الگوهای مرتبه اول ناشی از حرکت صفحات، الگوهای مرتبه دوم و سوم تنش نیز وجود دارند که به‌ترتیب از منابع ناحیه‌ای و عوامل محلی، از جمله گسل‌های فعال و ناپیوستگی‌های مکانیکی پوسته، تأثیر می‌پذیرند [۲]. بنابراین، در یک سامانه قطعه‌بندی‌شده ترافشارشی، نمی‌توان جهت و مقدار تنش را صرفاً

سامانه‌های گسلی ترافشارشی، به‌دلیل هم‌زیستی دگرشکلی‌های امتدادلغز و فشاری، دارای اندرکنش‌های مکانیکی پیچیده‌ای هستند که به انباشت ناهمگن تنش و توزیع غیریکنواخت دگرشکلی در پوسته منجر می‌شوند [۱]. درک دقیق توزیع فضایی و زمانی این انباشت تنش، چالشی بنیادین در ژئودینامیک است؛ زیرا هندسه پیچیده گسل‌ها و افراز لغزش وابسته به عمق (Depth-dependent Slip Partitioning)، مستقیماً بر چرخه لرزه‌ای و پتانسیل وقوع زمین‌لرزه‌های آتی اثر می‌گذارد.

حدود ۰.۱ بار، در شرایطی که گسل گیرنده به آستانه گسیختگی نزدیک باشد، می‌تواند زمان‌بندی نسبی فعالیت لرزه‌ای را تغییر دهد.

علامت و مقدار (ΔCFS) به هندسه و سازوکار گسل گیرنده وابسته است؛ به‌طوری‌که یک میدان تنش واحد ممکن است برای یک صفحه گسلی موجب افزایش تمایل به گسیختگی و برای صفحه‌ای با جهت‌گیری متفاوت موجب ایجاد سایه تنش شود. از این‌رو، انطباق لوب‌های مثبت تنش با پس‌لرزه‌ها یا خردلرزه‌ها باید با در نظر گرفتن هندسه گسل گیرنده، عدم قطعیت موقعیت رویدادها و توزیع لغزش تفسیر شود [۱۱]. مدل‌های مبتنی بر انتقال تنش همچنین نشان داده‌اند که ترکیب تغییرات تنش کولمب با اطلاعات لرزه‌ای می‌تواند برای بررسی تحول مکانی-زمانی لرزه‌خیزی استفاده شود، هرچند چنین ارتباطی ماهیت احتمالاتی دارد و نباید به‌صورت پیش‌بینی قطعی زمین‌لرزه تفسیر شود [۱۲]. این رویکرد طی دهه‌های اخیر در بسیاری از زون‌های فعال لرزه‌ای جهان، از جمله گسل سان‌آندریاس، زون‌های فرورانش و مناطق ترافشارشی، توسعه یافته است [۱۳، ۱۴].

با ظهور فناوری‌های سنجش از دور فعال و تداخل‌سنجی تفاضلی راداری ($DInSAR$)، پایش دگرشکلی‌های پوسته وارد مرحله جدیدی شد. درحالی‌که کاتالوگ‌های لرزه‌ای عمدتاً موقعیت، عمق، زمان وقوع و سازوکار کانونی رویدادها را ثبت می‌کنند، داده‌های ژئودینامیکی شامل مشاهدات چندزمانی ماهواره‌ای، مانند مأموریت‌های ENVISAT و Sentinel-۱، امکان سنجش پیوسته و میلی‌متری جابه‌جایی سطحی را در طول چرخه بین‌لرزه‌ای فراهم می‌کنند [۱۵، ۱۶]. تلفیق این مشاهدات با شبکه‌های ژئودینامیکی GNSS نیز بستری قدرتمند برای تعیین نرخ لغزش، توزیع کرنش و عمق قفل‌شدگی گسل‌ها ایجاد کرده است [۱۷، ۱۸].

مطالعات جدید نشان داده‌اند که ترکیب داده‌های GNSS و $InSAR$ ، نسبت به استفاده مستقل از هریک از این سامانه‌ها، پوشش مکانی و قابلیت تفسیر میدان دگرشکلی را بهبود می‌دهد. داده‌های GNSS مؤلفه‌های سرعت را با دقت زمانی مناسب در نقاط گسسته فراهم می‌کنند، درحالی‌که $InSAR$ میدان جابه‌جایی خط دید را با تراکم مکانی بسیار بیشتر بازیابی می‌کند. مقایسه و تلفیق این دو نوع مشاهده، امکان کنترل خطاهای طول‌موج بلند، ارزیابی سازگاری میدان سرعت و ارتباط دادن گرادیان‌های دگرشکلی به ساختارهای گسلی را فراهم می‌آورد [۱۹، ۲۰]. افزون بر این، تحلیل سری‌های زمانی Sentinel-۱ نشان داده است که تغییرات امتدادلغز، عمق قفل‌شدگی و تمرکز کرنش می‌توانند در طول یک سامانه گسلی به‌شدت ناهمگن باشند و در مدل‌های مبتنی بر یک نرخ لغزش یکنواخت آشکار نشوند [۲۱، ۲۲]. این یافته‌ها از ضرورت شبکه‌بندی صفحات گسلی و حل مستقل مؤلفه‌های حرکتی در مدل‌های ژئودینامیکی پشتیبانی می‌کنند.

در فلات ایران، به‌ویژه در منطقه البرز مرکزی که تحت تأثیر همگرایی مایل صفحات عربستان و اوراسیا قرار دارد، مطالعات ساختاری و لرزه‌زمین‌ساختی متعددی انجام شده است. مطالعات [۱، ۲۳] نشان

از بردار همگرایی منطقه‌ای استنتاج کرد و لازم است اثر هندسه سه‌بعدی هر قطعه در مدل‌سازی لحاظ شود.

البرز مرکزی، به‌عنوان یکی از فعال‌ترین بخش‌های زون برخورد عربستان-اوراسیا، متأثر از فعالیت گسل‌های اصلی نظیر مشا-فشم و راندگی شمال تهران است که نقش کلیدی در ساختار تکتونیکی و لرزه‌خیزی منطقه ایفا می‌کنند [۳]. با وجود اهمیت این ساختارها، مطالعات پیشین اغلب به‌صورت تک‌منبعی یا با فرض نرخ‌های لغزش یکنواخت و مدل‌های ساده‌سازی شده انجام شده‌اند؛ از این‌رو، وضوح لازم برای تحلیل افزایش لغزش و توزیع تنش در اعماق مختلف پوسته محدود مانده است [۴].

بررسی‌های لرزه‌زمین‌ساختی پیرامون دریای خزر جنوبی نشان می‌دهند که دگرشکلی فعال در البرز از ترکیب کوتاه‌شدگی، راندگی و برش امتدادلغز حاصل می‌شود و حرکت بلوک خزر جنوبی نسبت به ایران و اوراسیا در ایجاد این الگوی پیچیده نقش دارد [۵]. در مقیاس البرز مرکزی نیز شواهد ژئومورفولوژیکی و ساختاری بیانگر آن است که دگرشکلی میان گسل‌های راندگی و امتدادلغز تقسیم می‌شود و تغییرات جهت، پیوستگی و نرخ لغزش قطعات، الگوی ترافشارشی منطقه را کنترل می‌کنند [۶]. این ویژگی‌ها ضرورت استفاده از مدل هندسی قطعه‌بندی شده را برای بازسازی میدان دگرشکلی و تنش در منطقه آشکار می‌سازند.

برای رفع این محدودیت‌ها، پژوهش حاضر بر پایه بازسازی میدان دگرشکلی بین‌لرزه‌ای با استفاده از مشاهدات چندزمانی رادار دهانه مصنوعی ($InSAR$) و مقیدسازی مدل با بردارهای سرعت GPS در چارچوب مرجع ثابت اوراسیا، همراه با هم‌مرجع‌سازی مختصات مکانی داده‌ها در چارچوب ITRF2000، بنا شده است [۴]. با بهره‌گیری از نظریه جابه‌جایی الاستیک در نیم‌فضا [۷] و روش المان‌های مرزی (BEM)، مدل سه‌بعدی و شبکه‌بندی شده‌ای از قطعات گسلی اصلی البرز مرکزی طراحی و پیاده‌سازی شده است تا توزیع فضایی و عمقی لغزش با وضوح بالا ارزیابی شود.

مطالعه رفتار لرزه‌ای و سازوکارهای انباشت تنش در پوسته‌های فعال قاره‌ای، دهه‌هاست که توجه ژئوفیزیک‌دانان و زمین‌شناسان را به خود جلب کرده است. در این راستا، توسعه مدل‌های فیزیکی برای بررسی اندرکنش گسل‌ها و چرخه لرزه‌ای از مطالعات کلاسیک مکانیک شکست آغاز شده و به مدل‌های پیشرفته ژئودینامیکی و عددی تکامل یافته است. در زمینه ارزیابی پتانسیل گسلش و تحریک لرزه‌ای، مفهوم تغییرات تنش شکست کولمب (ΔCFS) بر پایه تلفیق تغییر تنش برشی و تغییر تنش نرمال مؤثر روی گسل گیرنده توسعه یافته است. روابط تحلیلی جابه‌جایی، کرنش و تنش ناشی از منابع برشی و کششی در نیم‌فضای الاستیک همگن [۷، ۸]، زیرساخت ریاضی لازم را برای محاسبه میدان‌های دگرشکلی سطحی و درونی فراهم کردند. پس از آن، مطالعات [۹، ۱۰] نشان دادند که تغییرات کوچک تنش استاتیک، حتی در مرتبه

به صورت مکانی و زمانی یکنواخت نبوده و در مراحل مختلف میان بخش‌های داخلی و حاشیه‌ای رشته‌کوه جابه‌جا شده است [۲۶، ۲۵]. ساختار زمین‌ساختی البرز مرکزی از مجموعه‌ای از رانده‌گی‌ها و گسل‌های امتدادلغز تشکیل شده است که به طور هم‌زمان کوتاه‌شدگی مایل را جذب می‌کنند و موجب افراز دگرشکلی میان مؤلفه‌های امتدادلغز و شیب‌لغز می‌شوند (شکل ۱-الف). در جبهه جنوب‌غربی البرز، رانده‌گی‌های با روند شمال‌غربی-جنوب‌شرقی همراه با گسل‌های مایل و امتدادلغز، یک سامانه دوپلکس ترافشارشی ایجاد کرده‌اند. شواهد ترموکرونولوژیکی نشان می‌دهند که فعالیت و بازفعال شدن این ساختارها طی چند مرحله رخ داده و با تغییر جهت کوتاه‌شدگی و تمرکز دگرشکلی در جبهه جنوبی البرز همراه بوده است [۲۷]. این پیشینه چندمرحله‌ای، همراه با تغییرات محلی امتداد و شیب صفحات گسلی، می‌تواند موجب ناهمگنی نرخ لغزش و تمرکز تنش در محل اتصال قطعات گسلی شود. در گستره البرز مرکزی، شبکه پیچیده‌ای از گسل‌های لرزه‌زا شامل گسل مشا-فشم، رانده‌گی شمال تهران، گسل فیروزکوه، گسل طالقان، رانده‌گی پورکان-وردیج و گسل امامزاده داوود قرار دارد که منابع اصلی خطر لرزه‌ای برای کلان‌شهر تهران و مناطق پیرامونی محسوب می‌شوند [۳]. بررسی‌های ساختاری و ریخت‌زمین‌ساختی، ارتباط کینماتیکی میان گسل مشا-فشم و رانده‌گی شمال تهران و تغییر رفتار حرکتی قطعات مختلف این سامانه را نشان داده‌اند؛ به گونه‌ای که دگرشکلی امتدادلغز چپ‌گرد، رانده‌گی مایل و بالآمدگی موضعی در بخش‌های مختلف آن مشاهده می‌شود [۲۸]. همچنین، مطالعات ریخت‌زمین‌ساختی و دیرینه‌لرزه‌شناسی گسل طالقان نشان داده‌اند که این ساختار دارای حرکت غالب امتدادلغز چپ‌گرد همراه با مؤلفه نرمال است و در اواخر کواترنر فعالیت لرزه‌زمین‌ساختی قابل توجهی داشته است [۲۹]. در پژوهش حاضر، هندسه سه‌بعدی قطعات اصلی این سامانه گسلی با استفاده از اطلاعات زمین‌ساختی موجود استخراج و مدل‌سازی شده است (شکل ۱-ب). ویژگی‌های هندسی و کینماتیکی این قطعات، شامل طول، عرض، امتداد، شیب و نوع مؤلفه حرکتی، در جدول ۲ ارائه شده‌اند. بازنمایی مستقل این قطعات امکان بررسی اثر تغییرات هندسه محلی، قطعه‌بندی و افراز لغزش بر توزیع دگرشکلی و تنش در اعماق مختلف پوسته را فراهم می‌کند.

- چارچوب مدل‌سازی و روابط حاکم

رویکرد این پژوهش بر پایه یک چارچوب مکانیکی و فیزیک‌محور برای افراز سه‌بعدی نرخ لغزش بر روی صفحات گسلی و متعاقب آن، کمی‌سازی اندرکنش زلزله-گسل بنا شده است. در این راستا، ابتدا میدان دگرشکلی و نرخ لغزش با استفاده از روش المان‌های مرزی (BEM) مدل‌سازی شده و سپس تغییرات تنش کولمب (ΔCFS) بر روی گسل‌های گیرنده، با استفاده از فرمولاسیون جابه‌جایی الاستیک در نیم‌فضا [۷] محاسبه شد:

دادند که دگرشکلی در این سامانه از طریق افراز تغییرشکل (Slip Partitioning) میان گسل‌های امتدادلغز چپ‌گرد، نظیر مشا-فشم، و رانده‌گی‌های پوسته‌ای، نظیر رانده‌گی شمال تهران، جذب می‌شود. اگرچه پژوهش‌های ارزشمندی درباره کینماتیک گسل‌های البرز مرکزی انجام شده است [۳، ۴، ۶] بیشتر مطالعات پیشین یا به صورت تک‌منبعی، شامل داده‌های لرزه‌شناسی، زمین‌شناسی یا ژئودزی، انجام شده‌اند یا مدل‌های سه‌بعدی شبکه‌بندی شده و متمرکز بر افراز نرخ لغزش عمقی با استفاده از روش المان‌های مرزی را ارائه نکرده‌اند. پژوهش حاضر با اتکا بر داده‌های چندزمانی InSAR و GNSS در چارچوب مرجع ITRF2000، تلاشی هدفمند برای پرکردن این خلأ روش‌شناختی در ارزیابی پتانسیل گسلش البرز مرکزی محسوب می‌شود.

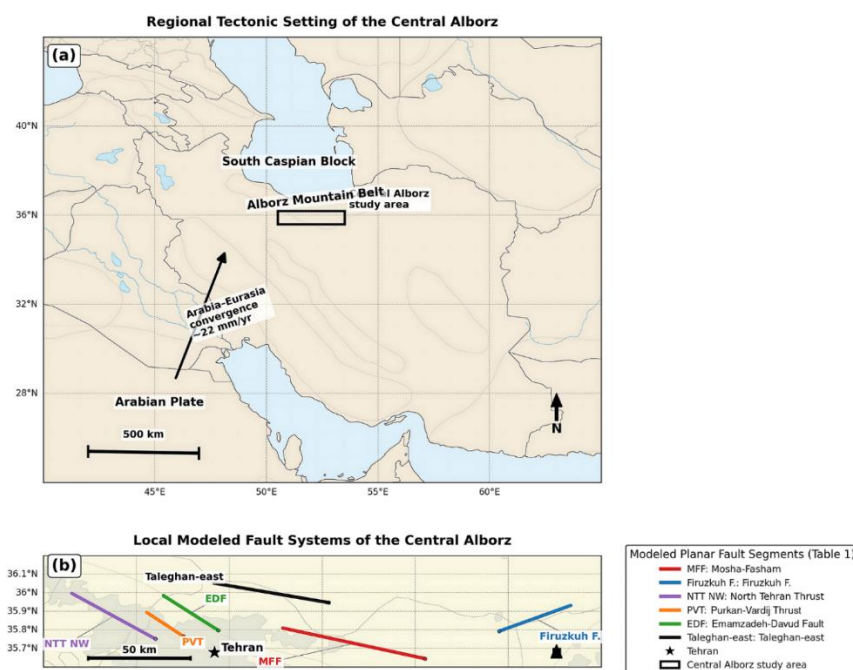
خلأ اصلی موجود، صرفاً کمبود داده نیست، بلکه فقدان چارچوبی مکانیکی و مکانی برای تبدیل مشاهدات سطحی به توزیع لغزش وابسته به عمق و سپس تبدیل آن به تغییرات تنش روی گسل‌های گیرنده است. در رویکرد پیشنهادی، مشاهدات InSAR و GPS/GNSS پس از هم‌مرجع‌سازی، به عنوان قیود کینماتیکی مدل استفاده می‌شوند؛ سپس با گسسته‌سازی هندسه سه‌بعدی گسل‌ها و بهره‌گیری از توابع گرین نابرجایی، دو مؤلفه امتدادلغز و شیب‌لغز برای هر المان محاسبه می‌شود. این ساختار امکان می‌دهد اثر هندسه محلی، قطعه‌بندی و تغییرات عمقی نرخ لغزش بر میدان تنش، جدا از اثر بارگذاری ناحیه‌ای، ارزیابی شود.

هدف اصلی این مطالعه، استخراج میدان تنش بین‌لرزه‌ای با وضوح مکانی بالا و تحلیل اندرکنش و انتقال تنش میان گسل‌ها در شرایط ترافشارشی البرز مرکزی است. در این راستا، با استفاده از مدل جابه‌جایی الاستیک اوکادا [۷، ۸]، نرخ لغزش به دو مؤلفه امتدادلغز و شیب‌لغز افراز و تغییرات آن در اعماق ۵ تا ۲۰ کیلومتری محاسبه شده است. نتایج این پژوهش، ضمن ارتقای دقت برآورد تنش در سامانه‌های ترافشارشی، بازنمایی واقع‌گرایانه‌تری از پتانسیل انتقال تنش ارائه می‌دهد و می‌تواند ابزاری کمی برای ارزیابی نسبی پتانسیل لرزه‌ای در مناطق دارای پیچیدگی ساختاری بالا باشد.

روش تحقیق

- زمین‌شناسی منطقه (Tectonic Setting)

منطقه مورد مطالعه در البرز مرکزی، بخشی از کمربند کوهزایی فعال آلپ-همیالیا است که در نتیجه همگرایی ورقه‌های عربستان و اوراسیا شکل گرفته است [۱]. مشاهدات ژئودتیکی نشان می‌دهند که این همگرایی با نرخ تقریبی ۲۲ میلی‌متر در سال ادامه دارد [۲۴] و بخشی از آن به صورت دگرشکلی ترافشارشی در کوه‌های البرز جذب می‌شود. شواهد زمین‌شناسی و ترموکرونولوژی نشان می‌دهند که برخاست، برون‌زدگی و تمرکز دگرشکلی در البرز مرکزی طی سنوزوئیک پسین



شکل ۱: (الف) چارچوب زمین‌ساختی-ساختاری منطقه البرز مرکزی و برخورد صفحات عربی-اوراسیایی؛ (ب) نمای جزئی از گسل‌های مدل‌سازی شده که هندسه قطعات گسلی (منطبق بر جدول ۲) را نشان می‌دهد.

Fig. 1: (a) Tectonic-structural setting of the Central Alborz and Arabia-Eurasia collision; (b) detailed view of the modeled faults and segment geometry corresponding to Table 2.

۲۰۰۳-۲۰۱۲ و تصاویر باند C ماهواره‌های Sentinel-1A/B در بازه ۲۰۱۴-۲۰۲۲ بود و پردازش تصاویر خام (SLC) در باند C (با طول موج ۵/۶ سانتی‌متر) در محیط پردازشی SARscape انجام شد. در این فرآیند، ابتدا زوج تصاویر راداری (به‌عنوان تصاویر Master و Slave) با در نظر گرفتن حد آستانه خط مبنای مکانی (Spatial Baseline) انتخاب شدند تا با حفظ همبستگی فاز، از بروز پدیده ناهمدوسی (Incoherency) جلوگیری شود. تصاویر راداری خام ترکیبی از اطلاعات فاز و دامنه هستند؛ از این‌رو در گام نخست، اطلاعات فاز از دامنه تفکیک شد. به‌منظور جداسازی فاز مربوط به دگرشکلی سطحی از فاز توپوگرافی، از مدل رقومی ارتفاعی (SRTM-۳ Version ۲) استفاده شد. با اعمال این مدل، اثر توپوگرافی منطقه از اینترفروگرام‌های اولیه کسر شد و در نتیجه، اینترفروگرام‌های تفاضلی (DInSAR) که مستقیماً نمایانگر تغییرات جابه‌جایی هستند، تولید شدند.

فیلترسازی فضایی، بازکردن فاز و تصحیحات مداری

اینترفروگرام‌های تفاضلی تولیدشده معمولاً حاوی نویزها و خطاهایی نظیر پرش فاز (Phase Jumps) و انحرافات مداری (Phase Ramps) هستند. برای رفع این چالش، از ترکیب فیلترهای گلدشتاین (Goldstein) و فیلترهای تطبیقی (Adaptive window) استفاده شد. استفاده از این فیلترها ضمن بهبود درون‌یابی فازها و افزایش وضوح فرنج‌های تداخل‌سنجی، ماهیت اصلی جابه‌جایی را حفظ می‌کند. در مرحله بعد، الگوریتم بازکردن فاز (Phase Unwrapping) اجرا شد تا مقادیر فاز که در بازه $-\pi$ تا $+\pi$ محصور شده‌اند، به مقادیر پیوسته و

$$\Delta CFS = \Delta \tau + \mu' \Delta \sigma_n \quad (۱)$$

در این معادله، $\Delta \tau$ تغییرات تنش برشی در جهت لغزش $\Delta \sigma_n$ ، تغییرات تنش نرمال (که مقادیر مثبت نشان‌دهنده بازشدگی یا Unclamping است) و μ' ضریب اصطکاک مؤثر است که در این مطالعه بر اساس ویژگی‌های مکانیکی پوسته، مقدار ۰/۴ برای آن در نظر گرفته شده است.

این مقدار بر پایه ملاحظات ژئودینامیکی منطقه و برای جداسازی اثرهای هندسی گسل‌ها انتخاب شده است؛ جزئیات تحلیل حساسیت در بخش ۳.۴.۳ ارائه شده است.

- شرایط مرزی کینماتیک: پردازش INSAR و تلفیق داده‌های GNSS برای مقیدسازی مدل المان مرزی و بازسازی میدان دگرشکلی بین‌لرزه‌ای، از میدان سرعت افقی مستخرج از مشاهدات یکپارچه تداخل‌سنجی رادار دهانه مصنوعی (InSAR) و GNSS استفاده شد. در پردازش‌های پایه InSAR، میزان دگرشکلی در راستای دید ماهواره (LOS) از طریق رابطه فاز-جابه‌جایی به‌دست می‌آید:

$$\Delta r = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta \phi \quad (۲)$$

که در آن λ طول موج رادار و $\Delta \phi$ فاز بازشده (Unwrapped phase) است.

شکل‌دهی اینترفروگرام تفاضلی و حذف اثر توپوگرافی

در راستای استخراج میدان جابه‌جایی از مشاهدات راداری، داده‌های InSAR مورد استفاده شامل تصاویر باند C ماهواره ENVISAT در بازه

مرکزی، مستقیماً از جدول ۱ مرجع [۴] استخراج شدند. این مؤلفه‌ها که در چارچوب مرجع ثابت اوراسیا گزارش شده بودند، به‌عنوان قیود کینماتیکی برای تعریف شرایط مرزی مدل المان مرزی مورد استفاده قرار گرفتند. به‌منظور اطمینان از سازگاری هندسی و مرجع میان مجموعه داده‌ها، مختصات ایستگاه‌ها با استفاده از تبدیل هفت‌پارامتری بورس-ولف در چارچوب ITRF2000 بیان شدند. همچنین، بردارهای سرعت GPS و میدان سرعت مدل‌شده، با اعمال تبدیل‌های مرجع متناظر، در چارچوب ITRF2000 هم‌مرجع شدند؛ به‌طوری‌که برای انتقال میدان سرعت مدل‌شده از چارچوب ثابت البرز مرکزی به ITRF2000، از قطب اوپلر البرز مرکزی نسبت به ITRF2000 استفاده شد. بدین‌ترتیب، تمامی قیود کینماتیکی پیش از ورود به مدل در یک چارچوب مرجع مشترک تعریف شدند.

مطلق فازی تبدیل شوند. کالیبراسیون نهایی مدل در مرحله پالایش و تسطیح مجدد (Refinement and Re-flattening) انجام گرفت. در این گام حیاتی، شبکه‌ای از نقاط کنترل زمینی (GCP) استخراج شد که الزاماً باید دارای سه ویژگی اساسی باشند: عدم وجود ناهم‌دوسی، فقدان خطای توپوگرافی، و عدم وقوع دگرشکلی محلی در نقطه کنترل. با اعمال این نقاط، خطاهای ناشی از لرزش ژئروسکوپ ماهواره و انحرافات مداری تصحیح شد تا مقادیر جابه‌جایی مطلق استخراج شوند.

یکپارچه‌سازی چارچوب مرجع و اعمال شرایط مرزی

پس از استخراج میدان دگرشکلی از داده‌های InSAR، مؤلفه‌های سرعت افقی GPS شامل مؤلفه شرقی (Ve) و مؤلفه شمالی (Vn)، همراه با عدم‌قطعیت‌های متناظر، برای ۴۵ ایستگاه واقع در بخش جنوبی البرز

جدول ۱: مؤلفه‌های سرعت افقی سامانه موقعیت‌یابی جهانی و عدم‌قطعیت‌های یک‌سیگما برای ۴۵ ایستگاه واقع در بخش جنوبی البرز مرکزی، در چارچوب مرجع ثابت اوراسیا، به‌عنوان شرایط مرزی کینماتیکی مدل (برگرفته از [۴]).

Table 1: Horizontal GPS velocity components and one-sigma uncertainties for 45 stations in the southern Central Alborz in a Eurasia-fixed frame, used as model boundary conditions (after Ref. [4]).

نام ایستگاه Station	طول جغرافیایی (°E) Longitude	عرض جغرافیایی (°N) Latitude	سرعت شرق (mm/yr) East velocity Ve	سرعت شمال (mm/yr) North velocity Vn	خطای شرقی σe (mm/yr)	خطای شمالی σn (mm/yr)
ABAL	۵۱/۹۸۶	۳۵/۷۹۳	-۱/۱۷	۰/۹۶	۰/۵۲	۰/۵۱
*ABAP	۵۱/۹۸۷	۳۵/۷۹۳	-۱/۸۴	۰/۹۵۸	۰/۵۸	۰/۵۸
AMIN	۵۲/۵۸۶	۳۵/۷۰۱	-۲/۰۱	۰/۸۲۰	۰/۴۷	۰/۴۶
*BLDH	۵۱/۸۲۹	۳۶/۲۰۸	-۲/۰۲	۰/۹۳۶	۰/۴۹	۰/۳۱
*GARM	۵۱/۶۴۶	۳۵/۹۸۵	-۲/۱۸	۱۰/۴۱	۰/۲۰	۰/۳۶
HELI	۵۲/۳۰۵	۳۶/۲۰۶	-۲/۵۷	۰/۹۶۸	۰/۵۸	۰/۵۶
MEHR	۵۲/۱۵۷	۳۵/۸۶۸	-۱/۷۹	۰/۸۵۲	۰/۵۲	۰/۵۲
MF02	۵۱/۷۹۷	۳۵/۸۰۱	-۱/۰۴	۱۰/۰۰	۰/۳۳	۰/۳۳
MF07	۵۲/۰۰۸	۳۵/۸۹۷	-۰/۴۸	۰/۸۳۷	۰/۳۳	۰/۳۴
MF09	۵۱/۸۳۳	۳۶/۲۰۵	-۲/۱۵	۰/۹۸۷	۰/۳۶	۰/۳۶
MF10	۵۱/۳۰۴	۳۶/۳۹۴	-۲/۶۲	۱۱/۰۸	۰/۴۶	۰/۴۷
MF12	۵۱/۳۱۵	۳۶/۱۵۰	-۱/۲۳	۱۱/۶۳	۰/۵۴	۰/۵۴
MF15	۵۱/۶۱۳	۳۵/۹۸۸	-۲/۴۶	۱۱/۲۶	۰/۳۳	۰/۳۳
PLOR	۵۲/۰۶۴	۳۵/۸۵۰	-۲/۳۹	۰/۹۱۲	۰/۲۳	۰/۲۹
*POOL	۵۱/۵۷۴	۳۶/۴۰۳	-۲/۴۲	۰/۹۱۲	۰/۳۹	۰/۳۳
TN07	۵۱/۹۹۴	۳۵/۷۶۳	-۱/۸۳	۰/۹۳۴	۰/۴۷	۰/۴۸
*ABSD	۵۲/۰۹۱	۳۵/۶۶۱	-۲/۰۰	۰/۷۹۵	۰/۱۴	۰/۱۹
*AKHT	۵۰/۶۰۱	۳۵/۵۸۸	-۱/۷۷	۱۱/۳۱	۰/۲۴	۰/۱۸
*ARNG	۵۱/۰۷۵	۳۵/۹۲۸	-۱/۶۹	۱۰/۶۱	۰/۲۳	۰/۲۱
BOOM	۵۱/۸۱۲	۳۵/۷۳۰	-۱/۷۰	۱۰/۲۲	۰/۳۶	۰/۳۴
DAMA	۵۲/۰۵۹	۳۵/۷۰۱	-۱/۷۰	۰/۹۲۶	۰/۳۸	۰/۳۸
*FOIM	۵۱/۱۶۶	۳۵/۴۰۹	-۱/۶۰	۱۲/۸۲	۰/۷۳	۰/۷۴

نام ایستگاه Station	طول جغرافیایی (°E) Longitude	عرض جغرافیایی (°N) Latitude	سرعت شرق V _e (mm/yr) East velocity	سرعت شمال V _n (mm/yr) North velocity	خطای شرقی σ _e (mm/yr)	خطای شمالی σ _n (mm/yr)
*FOPM	۵۰/۸۴۰	۳۵/۷۶۵	-۱/۶۶	۱۱/۳۶	۰/۳۷	۰/۲۰
*GTCL	۵۱/۴۱۰	۳۵/۸۸۲	-۲/۴۳	۱۰/۷۶	۰/۵۵	۰/۵۵
*HSGD	۵۰/۷۴۷	۳۶/۰۰۷	-۲/۰۵	۱۱/۰۱	۰/۱۸	۰/۲۱
MF03	۵۱/۸۸۵	۳۵/۶۴۹	-۱/۴۸	۱۰/۵۰	۰/۳۲	۰/۳۲
MF04	۵۲/۱۱۷	۳۵/۲۵۸	-۱/۹۸	۱۱/۲۷	۰/۳۶	۰/۳۶
MF05	۵۱/۲۷۷	۳۵/۴۹۳	-۰/۷۴	۱۱/۷۸	۰/۴۴	۰/۴۳
MF13	۵۰/۶۳۲	۳۶/۰۰۹	-۱/۲۱	۱۱/۱۲	۰/۴۴	۰/۴۴
MF16	۵۱/۶۶۵	۳۵/۷۲۴	-۱/۲۵	۱۱/۵۳	۰/۳۳	۰/۳۳
MF17	۵۱/۱۰۸	۳۵/۷۵۳	-۱/۵۱	۱۰/۴۷	۰/۳۲	۰/۳۳
*PLZI	۵۱/۹۷۱	۳۵/۶۳۰	-۰/۶۳	۰۹/۲۵	۰/۲۵	۰/۳۱
*RTCL	۵۱/۷۱۱	۳۵/۵۷۴	-۱/۲۸	۱۰/۵۱	۰/۳۰	۰/۱۹
TANG	۵۲/۰۴۳	۳۵/۴۹۲	-۰/۹۰	۰۹/۵۹	۰/۳۶	۰/۳۶
*TEHN	۵۱/۳۳۴	۳۵/۶۹۷	-۱/۱۵	۱۰/۵۲	۰/۳۱	۰/۳۰
TEHR	۵۱/۳۸۶	۳۵/۷۴۷	-۰/۷۲	۱۲/۵۳	۰/۷۹	۰/۷۵
TF01	۵۱/۲۵۷	۳۵/۸۱۲	-۱/۶۸	۱۲/۴۸	۰/۴۲	۰/۴۲
TF09	۵۱/۴۲۵	۳۵/۸۳۳	-۱/۳۳	۱۲/۱۶	۰/۵۰	۰/۵۰
TF16	۵۱/۵۲۲	۳۵/۷۷۴	-۱/۷۷	۱۱/۹۶	۰/۴۱	۰/۴۱
TF20	۵۱/۵۶۸	۳۵/۸۰۸	-۳/۲۷	۱۱/۰۴	۰/۵۱	۰/۵۲
*TLGN	۵۰/۷۴۵	۳۶/۱۴۴	-۲/۸۴	۱۱/۴۳	۰/۴۸	۰/۳۷
TN01	۵۱/۰۰۰	۳۵/۴۹۳	-۱/۱۰	۱۲/۷۹	۰/۷۰	۰/۷۰
TN04	۵۱/۴۰۹	۳۵/۴۹۵	-۱/۳۴	۱۲/۸۹	۰/۴۶	۰/۴۷
TN05	۵۱/۵۱۵	۳۵/۶۳۳	-۰/۳۸	۱۱/۰۱	۰/۴۹	۰/۵۰
TN06	۵۱/۷۲۴	۳۵/۵۵۰	-۰/۵۲	۱۰/۹۱	۰/۴۰	۰/۴۰

– مدل سازی عددی و افراز نرخ لغزش

به منظور شبیه سازی رفتار سه بعدی گسل های البرز مرکزی، از مدل سازی المان مرزی (BEM) استفاده شد. انتخاب روش المان های مرزی (BEM) در این پژوهش نسبت به روش های جایگزین نظیر المان های محدود (FEM)، بر پایه سازگاری ذاتی این الگوریتم با تئوری جابه جایی در نیم فضای الاستیک [۷] استوار است. در روش BEM، تنها سطوح ناپیوستگی (صفحات گسلی) گسسته سازی می شوند که این امر ضمن کاهش چشمگیر ابعاد ماتریس مجهولات نسبت به شبکه بندی حجمی (Volume Meshing) در FEM، امکان مدل سازی محیط های نیم فضای بی نهایت را بدون ایجاد خطاهای مرزی مصنوعی (Edge Effects) فراهم می آورد. همچنین، از آنجا که هدف اصلی این مطالعه بررسی اثرات هندسه سه بعدی گسل ها در یک محیط کشسان همگن و ایزوتروپیک در فاز بین لرزه ای است و ارزیابی ناهمگنی های پیچیده

رئولوژیک یا پلاستیک (که معمولاً نیازمند روش FEM است) مد نظر قرار ندارد، رویکرد BEM بهینه ترین ابزار محاسباتی برای افراز نرخ لغزش محسوب می شود. با توجه به وسعت منطقه مطالعاتی (UTM Zone ۳۹N)، مختصات کروی به یک محیط کارترین در نیم فضا تبدیل شد. پس از گسسته سازی (Discretization) صفحات گسلی، نرخ لغزش در راستای امتداد (Strike-slip) و شیب (Dip-slip) در مرکز هر یک از ۸۲۴۸ المان شبکه محاسبه شد. در این مرحله، با توجه به معلوم بودن شرایط مرزی کینماتیک، یک دستگاه معادلات با ابعاد ۱۶۴۹۶×۱۶۴۹۶ برای تعیین پارامترهای مجهول نایرجایی (Slip distribution) تشکیل گردید و با استفاده از توابع گرین نیم فضا حل شد. مشخصات هندسی ۲۲ قطعه گسل، از جمله گسل های مشا-فشم و راندگی شمال تهران (NTT)، بر اساس پردازش داده های زمین ساختی و پروفیل های عرضی منطقه [۱، ۳۰، ۳۱] در جدول ۲ آورده شده است

جدول ۲: مشخصات هندسی و کینماتیکی قطعات گسلی مدل شده در البرز مرکزی (برگرفته از منابع [۱، ۳۰، ۳۱، ۳۳]).

Table 2: Geometric and kinematic characteristics of the modeled fault segments in the Central Alborz (after Refs. [1, 30, 31, 33]).

نام قطعه گسلی Fault segment	طول (km) Length	عرض (km) Width	آزیموت (°) Azimuth
MFFeast	۷۱/۶۰۰	۱۲/۷۷۰	۲۸۵
MFFe-deep	۷۱/۶۰۰	۳/۳۱۰	۲۸۵
MFFcentral	۶۳/۰۰۰	۱۰/۹۸۷	۲۹۶
MFFc-deep	۶۳/۰۰۰	۶/۶۲۰	۲۹۶
MFFwest	۴۵/۰۰۰	۱۲/۷۷۰	۲۶۸
MFFw-deep	۴۵/۰۰۰	۳/۳۱۰	۲۶۸
Firuzkuh F.	۳۸/۰۰۰	۱۲/۱۸۵	۶۶
NTT NW	۴۹/۰۰۰	۱۱/۶۹۵	۳۰۴
PVT	۲۳/۰۰۰	۹/۴۶۵	۳۰۹
PVT deep	۲۳/۰۰۰	۱۳/۹۴۸	۳۰۹
EDF	۳۳/۷۵۳	۱۳/۸۵۶	۳۰۸
EDF deep	۳۳/۷۵۳	۳/۹۱۶	۳۰۸
EDF west	۲۵/۰۰۰	۱۳/۸۵۶	۲۷۵
EDF w-deep	۲۵/۰۰۰	۳/۹۱۶	۲۷۵
Taleghan-MFF	۱۲/۱۲۱	۱۲/۰۰۷	۱۲۱
Taleghan-east	۵۶/۸۱۸	۱۲/۰۴۶	۲۸۲
Taleghan-central-e	۱۸/۱۸۲	۱۲/۰۴۶	۲۹۹
Taleghan-central-w	۱۵/۹۰۹	۱۲/۰۴۶	۲۷۷
Taleghan-west	۴۹/۲۴۲	۱۲/۰۴۶	۸۸
NTT-west	۲۸/۲۴۴	۱۳/۸۵۶	۲۵۴
NTT-center	۲۴/۰۰۰	۱۲/۴۲۳	۲۶۰
NTT-east	۹/۶۰۰	۱۲/۴۲۳	۲۷۹

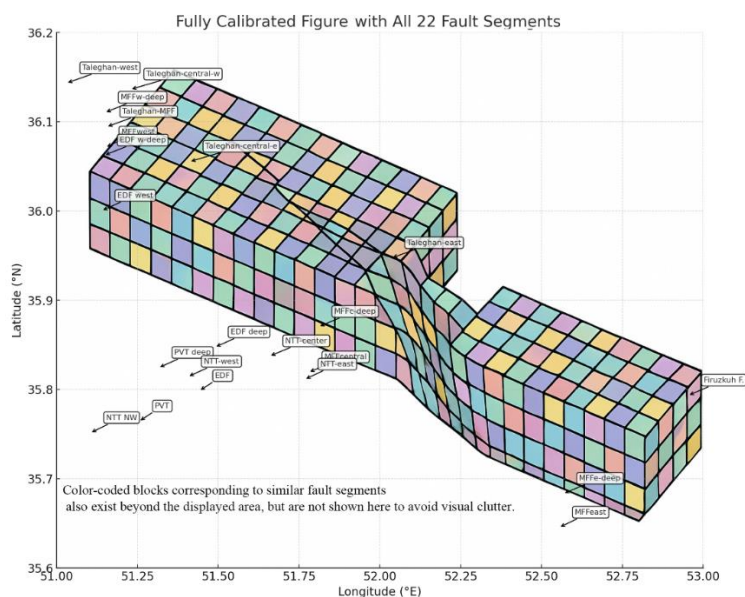
$$\sigma_{ij} = \lambda \epsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \epsilon_{ij} \quad (3)$$

در این معادله، σ_{ij} تانسور تنش، ϵ_{ij} تانسور کرنش، δ_{ij} دلتای کرونکر و پارامترهای λ و μ ثابت‌های لامه هستند که در این پژوهش برای پوسته البرز مرکزی، ثابت برشی (μ) برابر با ۳۰ گیگاپاسکال فرض شده است.

- تحلیل تنش و ارزیابی سازگاری داده‌ها و خروجی مدل

ارزیابی چارچوب مدل‌سازی توسعه‌یافته در این پژوهش در دو سطح مکمل انجام شد. در سطح نخست، هم‌خوانی فضایی الگوی تغییرات تنش کولمب محاسبه‌شده با توزیع مکانی لرزه‌خیزی منطقه بررسی شد.

مشخصات کامل هندسی و شبکه‌بندی هر ۲۲ قطعه، شامل مختصات آغازین، مختصه قائم مرکز صفحه گسل، آزیموت، شیب، طول، عرض و تعداد المان‌ها در راستای طول و شیب، در جدول مکمل S1 ارائه شده است. نمای سه‌بعدی و نحوه شبکه‌بندی این قطعات در محیط نیم‌فضای الاستیک جهت محاسبات تغییرات تنش، در شکل ۲ به تصویر کشیده شده است. این پارامترها به‌عنوان ورودی‌های اصلی در الگوریتم المان مرزی جهت مدل‌سازی رفتار گسلی به‌کار گرفته شده‌اند. برای محاسبه تغییرات تنش در اعماق ۵، ۱۰ و ۱۵ کیلومتری، ابتدا تانسور گرادیان جابه‌جایی محاسبه و سپس با استفاده از قانون هوک تعمیم‌یافته به تانسور نرخ تنش تبدیل شد:



شکل ۲: نمای سه بعدی هندسه و شبکه بندی ۲۲ قطعه گسلی در البرز مرکزی؛ بلوک های رنگی، المان های ۱×۱ کیلومتری مدل المان مرزی در نیم فضای الاستیک را نشان می دهند.

Fig. 2: Three-dimensional geometry and gridding of 22 fault segments in the Central Alborz; colored blocks denote the 1 × 1 km boundary elements in the elastic half-space model.

کنترل سازگاری ژئودتیکی میدان *INSAR* با مشاهدات *GPS/GNSS* در مرحله پردازش ژئودتیکی و پیش از استفاده از داده ها به عنوان قیود کینماتیکی مدل، مؤلفه های قابل مقایسه میدان سرعت حاصل از پردازش داده های *INSAR* با بردارهای سرعت افقی ثبت شده در ایستگاه های *GPS/GNSS* واقع در محدوده مطالعه مقایسه شدند. این مقایسه پس از هم مرجع سازی مجموعه داده ها در چارچوب *ITRF2000* و در نقاط دارای پوشش مکانی مشترک انجام گرفت. از آنجا که مشاهدات *GPS/GNSS* استخراج اولیه میدان دگرشکلی *INSAR* نقشی نداشتند، این داده ها به عنوان مشاهدات زمینی مستقل از سامانه اندازه گیری *INSAR* برای کنترل سازگاری میدان دگرشکلی به کار گرفته شدند.

هم خوانی کلی جهت و دامنه بردارهای حاصل از *INSAR* با مشاهدات *GPS/GNSS*، سازگاری میدان دگرشکلی استخراج شده از داده های راداری با اندازه گیری های ژئودتیکی زمینی را نشان داد. پس از انجام این کنترل، میدان های هم مرجع شده *INSAR* و *GPS/GNSS* به عنوان قیود کینماتیکی برای تعریف شرایط مرزی و حل مدل المان مرزی (*BEM*) مورد استفاده قرار گرفتند.

در مجموع، مقایسه های انجام شده نشان می دهند که داده های ژئودتیکی ورودی در چارچوب مرجع مشترک از سازگاری مناسبی برخوردارند و الگوی تغییرات تنش کولمب محاسبه شده نیز با توزیع فضایی لرزه خیزی منطقه هم خوانی قابل توجهی دارد. این شواهد از مناسب بودن چارچوب تلفیقی *INSAR/GNSS-BEM* برای بررسی افزایش نرخ لغزش، باز توزیع تنش و پتانسیل نسبی گسیختگی در سامانه گسلی ترافشارشی البرز مرکزی حمایت می کنند. خلاصه مراحل پردازش، یکپارچه سازی داده های ورودی و خروجی های هدف در هر یک از گام های مدل سازی در جدول ۳ ارائه شده است.

در سطح دوم، سازگاری میدان دگرشکلی استخراج شده از داده های *INSAR* با مشاهدات زمینی *GPS/GNSS* مورد ارزیابی قرار گرفت. این دو مقایسه به ترتیب برای بررسی سازگاری فضایی خروجی مدل با شواهد لرزه ای و کنترل کیفیت ژئودتیکی میدان دگرشکلی ورودی انجام شدند.

ارزیابی لرزه شناختی و تطابق فضایی با خرد لرزه خیزی

به منظور بررسی میزان هم خوانی فضایی زون های تغییر تنش با الگوی لرزه خیزی منطقه، خروجی های تغییر تنش کولمب ΔCFS با توزیع مکانی رویدادهای ثبت شده در کاتالوگ های لرزه ای مقایسه شدند. در این راستا، داده های ارائه شده از سوی مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله (*IIIES*)، مرکز لرزه شناسی اروپا-مدیترانه (*EMSC*) و سازمان زمین شناسی ایالات متحده (*USGS*) با یکدیگر تطبیق داده و همگن سازی شدند تا اختلاف های احتمالی میان مشخصات مکانی رویدادها کاهش یابد و مجموعه ای سازگارتر از موقعیت روزمرکز زمین لرزه ها و پس لرزه ها حاصل شود. سپس با استفاده از ابزارهای محاسباتی *ZMAP*، داده های لرزه ای پالایش و رویدادهای نامرتبط یا دارای کیفیت مکانی نامناسب از مجموعه مورد تحلیل کنار گذاشته شدند.

مقایسه نتایج نشان داد که بخش هایی از زون های دارای تغییر تنش کولمب مثبت، با بیشینه حدود $(0.092+)$ بار در عمق ۱۰ کیلومتری، با نواحی دارای تراکم بیشتر خرد لرزه ها و پس لرزه ها هم پوشانی فضایی قابل توجهی دارند. این هم خوانی به عنوان شاهدی منطقه ای از سازگاری الگوی فضایی تغییرات تنش محاسبه شده با توزیع لرزه خیزی مشاهده شده در نظر گرفته شد.

جدول ۳: چارچوب پردازش داده‌ها و مراحل محاسباتی مدل‌سازی تنش در البرز مرکزی.

Table 3: Data-processing framework and computational stages of stress modeling in the Central Alborz.

خروجی مدل Model output	داده‌های ورودی Input data	مرحله پردازش Processing stage
مدل هندسی سه‌بعدی شبکه‌بندی شده (۲۲ قطعه) Gridded three-dimensional geometric model (22 segments)	نقشه‌های زمین‌ساختی و پروفیل‌های عرضی Tectonic maps and cross-sections	آماده‌سازی هندسی Geometric preparation
میدان جابه‌جایی و دگرشکلی سطحی (LOS) Surface displacement and deformation field (LOS)	تصاویر ماهواره‌های Sentinel-۱ و ENVISAT ENVISAT and Sentinel-1 satellite imagery	پردازش ژئودتیک InSAR InSAR geodetic processing
مجموعه داده‌های مکانی و کینماتیکی هم‌مرجع شده در چارچوب ITRF۲۰۰۰ Co-registered spatial and kinematic datasets in ITRF2000	مختصات داده‌های InSAR، GPS/GNSS و لرزه‌ای، هندسه گسل‌ها و بردارهای سرعت افقی GPS/GNSS Coordinates of InSAR, GPS/GNSS, and seismic data; fault geometry; and horizontal GPS/GNSS velocity vectors	هم‌مرجع‌سازی مکانی و کینماتیکی Spatial and kinematic co-registration
ارزیابی هم‌خوانی جهت و دامنه میدان دگرشکلی InSAR با مشاهدات ژئودتیک زمینی Assessment of the agreement in direction and magnitude between the InSAR deformation field and ground-based geodetic observations	مؤلفه‌های قابل مقایسه میدان دگرشکلی InSAR و بردارهای سرعت GPS/GNSS هم‌مرجع شده در نواحی دارای پوشش مکانی مشترک Comparable components of the InSAR deformation field and co-registered GPS/GNSS velocity vectors in areas of shared spatial coverage	کنترل سازگاری ژئودتیک Geodetic consistency check
توزیع نرخ لغزش افزایش یافته به مؤلفه‌های امتدادلغز و شیب‌لغز و بازسازی میدان دگرشکلی بین‌لرزه‌ای Slip-rate distribution partitioned into strike-slip and dip-slip components and reconstruction of the interseismic deformation field	مدل هندسی سه‌بعدی شبکه‌بندی شده، میدان‌های هم‌مرجع شده InSAR و GPS/GNSS و عدم قطعیت‌های مشاهداتی Gridded three-dimensional geometric model, co-registered InSAR and GPS/GNSS fields, and observational uncertainties	اعمال شرایط مرزی و حل مدل المان مرزی (BEM) Application of boundary conditions and solution of the boundary element model (BEM)
توزیع تغییرات تنش کولمب (ΔCFS) در سه تراز عمقی Distribution of Coulomb stress changes (ΔCFS) at three depth levels	نرخ‌های لغزش افزایش یافته، هندسه گسل‌های گیرنده و پارامترهای مکانیکی مدل Partitioned slip rates, receiver-fault geometry, and model mechanical parameters	محاسبه تغییرات تنش کولمب با فرمول‌بندی نابرجایی الاستیک (۱۹۸۵) Calculation of Coulomb stress changes using an elastic-dislocation formulation (1985)

نتایج و بحث

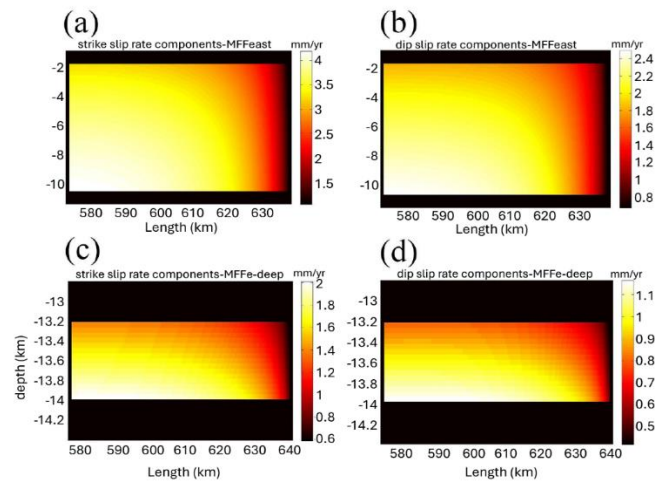
- افزایش نرخ لغزش در اعماق پوسته (Depth-dependent Slip Partitioning)

با حل دستگاه معادلات در مدل المان مرزی (BEM) و اعمال میدان سرعت کینماتیک منطقه البرز مرکزی به عنوان شرایط مرزی، میدان دگرشکلی بین‌لرزه‌ای در ۸۲۴۸ المان شبکه (با ابعاد 1×1 کیلومتر) بازسازی شد. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که در سیستم ترفشارشی البرز، توزیع نرخ لغزش بر روی سطح گسل‌ها از الگوی متقارن و بیضوی کلاسیک پیروی نمی‌کند؛ بلکه به شدت تحت تأثیر اندرکنش گسل‌ها و ناهمگنی هندسی قرار دارد. به عنوان نمونه‌های بارز این افزایش لغزش، توزیع مکانی مؤلفه‌های امتدادلغز و شیب‌لغز بر روی صفحات بخش شرقی گسل مشاف‌ششم (MFFeast) و شاخه شمال‌غربی راندگی شمال تهران (NTT NW) به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. بر اساس خروجی مدل (شکل ۳)، توزیع لغزش در بخش شرقی گسل مشاف‌ششم نشان‌دهنده ماهیت توأمان چپ‌گرد و معکوس در تمامی المان‌ها است. با این وجود، نرخ لغزش چپ‌گرد در این سگمنت (با بیشینه تقریبی ۴ میلی‌متر در سال در ترازهای سطحی) به‌طور

قابل توجهی بر مؤلفه شیب‌لغز معکوس (با بیشینه تقریبی ۲/۴ میلی‌متر در سال) غلبه دارد. این اختلاف در اعماق پوسته نیز حفظ می‌شود؛ به‌طوری‌که در اعماق ۱۳ تا ۱۴ کیلومتری، لغزش امتدادی به ۲ میلی‌متر در سال و لغزش شیبی به حدود ۱/۱ میلی‌متر در سال افت می‌کند. در مقابل، تحلیل‌ها نشان می‌دهد که در بخش مرکزی این گسل، پویایی تغییر کرده و مؤلفه معکوس بر مؤلفه امتدادی غلبه می‌یابد.

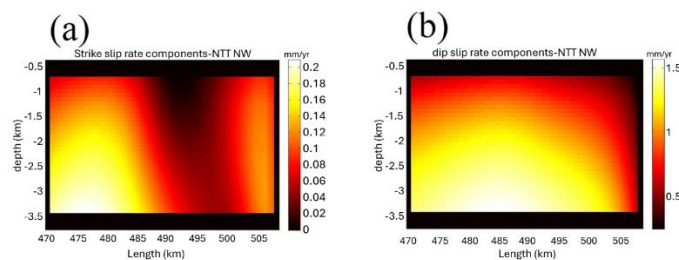
رفتار کینماتیک در راندگی شمال تهران (شکل ۴) تضاد آشکاری با گسل مشاف‌ششم دارد. خروجی‌ها نشان می‌دهد که اگرچه هر دو مؤلفه لغزش حضور دارند، اما دگرشکلی فشاری در این قطعه حاکم مطلق است؛ به‌طوری‌که نرخ لغزش شیب‌لغز معکوس به بیشینه ۱/۵ میلی‌متر در سال می‌رسد، در حالی که نرخ لغزش امتدادلغز چپ‌گرد بسیار ناچیز بوده و از ۰/۲ میلی‌متر در سال فراتر نمی‌رود.

(نقشه‌های توزیع لغزش سایر قطعات گسلی، در بخش اطلاعات تکمیلی در Supplementary Figures S1-S13 ارائه شده‌اند. همچنین مقادیر کمی بیشینه نرخ‌های لغزش برای تمامی ۲۲ قطعه گسل در جدول ۴ خلاصه شده است).



شکل ۳: توزیع نرخ لغزش در بخش شرقی گسل مشا-فشم (MFFeast): (الف) و (ب) مؤلفه‌های امتدادلغز چپ‌گرد و شیب‌لغز معکوس در بخش کم‌عمق؛ (ج) و (د) مؤلفه‌های متناظر در بخش عمقی.

Fig. 3: Slip-rate distribution on the eastern Mosha-Fasham fault (MFFeast): (a) and (b) shallow left-lateral strike-slip and reverse dip-slip components; (c) and (d) corresponding components at depth.



شکل ۴: توزیع نرخ لغزش در شاخه شمال‌غربی راندگی شمال تهران: (الف) مؤلفه امتدادلغز و (ب) مؤلفه شیب‌لغز معکوس.

Fig. 4: Slip-rate distribution on the northwestern branch of the North Tehran Thrust (NTT NW): (a) strike-slip component and (b) reverse dip-slip component.

جدول ۴: پارامترهای کینماتیکی و بیشینه نرخ‌های لغزش افزاشده در ۲۲ قطعه گسلی البرز مرکزی براساس مدل BEM.

Table 4: Kinematic parameters and maximum partitioned slip rates for 22 Central Alborz fault segments derived from the BEM model.

شناسه مدل	نام فارسی قطعه	مؤلفه غالب	بیشینه امتدادلغز (mm/yr)	بیشینه شیب‌لغز (mm/yr)
Model ID	Fault segment	Dominant component	Max strike-slip	Max dip-slip
MFFeast	گسل مشا-فشم (بخش شرقی) Mosha-Fasham fault (eastern section)	امتدادلغز چپ‌گرد + معکوس Left-lateral strike-slip + reverse	۴/۰	۲/۴ (معکوس) Reverse
MFFe-deep	گسل مشا-فشم (بخش شرقی-عمقی) Mosha-Fasham fault (eastern deep section)	امتدادلغز چپ‌گرد + معکوس Left-lateral strike-slip + reverse	۲/۰	۱/۱ (معکوس) Reverse
MFFcentral	گسل مشا-فشم (بخش مرکزی) Mosha-Fasham fault (central section)	شیب‌لغز معکوس + چپ‌گرد Reverse dip-slip + left-lateral	۱/۳	۳/۵ (معکوس) Reverse
MFFc-deep	گسل مشا-فشم (بخش مرکزی-عمقی) Mosha-Fasham fault (central deep section)	شیب‌لغز معکوس + چپ‌گرد Reverse dip-slip + left-lateral	۰/۸	۱/۸ (معکوس) Reverse
MFFwest	گسل مشا-فشم (بخش غربی) Mosha-Fasham fault (western section)	امتدادلغز چپ‌گرد + معکوس Left-lateral strike-slip + reverse	۴/۸	۰/۹ (معکوس) Reverse
MFFw-deep	گسل مشا-فشم (بخش غربی-عمقی) Mosha-Fasham fault (western deep section)	امتدادلغز چپ‌گرد + معکوس Left-lateral strike-slip + reverse	۲/۱	۰/۵ (معکوس) Reverse
Firuzkuh F.	گسل فیروزکوه Firuzkuh fault	امتدادلغز چپ‌گرد + نرمال Left-lateral strike-slip + normal	۳/۶	۰/۰۶ (نرمال) Normal

شناسه مدل Model ID	نام فارسی قطعه Fault segment	مؤلفه غالب Dominant component	بیشینه امتدادلغز (mm/yr) Max strike-slip	بیشینه شیب‌لغز (mm/yr) Max dip-slip
NTT NW	راندگی شمال تهران (شاخه شمال‌غربی) North Tehran Thrust (northwestern branch)	شیب‌لغز معکوس + چپ‌گرد Reverse dip-slip + left-lateral	۰/۲	۱۰۵ (معکوس) Reverse
PVT	راندگی پورکان-وردیج (بخش سطحی) Purkan-Vardij Thrust (surface section)	شیب‌لغز معکوس + چپ‌گرد Reverse dip-slip + left-lateral	۰/۳۸	۲۰۲ (معکوس) Reverse
PVT deep	راندگی پورکان-وردیج (بخش عمقی) Purkan-Vardij Thrust (deep section)	شیب‌لغز معکوس + چپ‌گرد Reverse dip-slip + left-lateral	۰/۳۰	۲۰۱ (معکوس) Reverse
EDF	گسل امامزاده داوود (بخش سطحی) Emamzadeh Davud fault (surface section)	شیب‌لغز معکوس + چپ‌گرد Reverse dip-slip + left-lateral	۰/۵۵	۲۰۸ (معکوس) Reverse
EDF deep	گسل امامزاده داوود (بخش عمقی) Emamzadeh Davud fault (deep section)	شیب‌لغز معکوس + چپ‌گرد Reverse dip-slip + left-lateral	۰/۱۲	۱۰۷ (معکوس) Reverse
EDF west	گسل امامزاده داوود (بخش غربی) Emamzadeh Davud fault (western section)	امتدادلغز چپ‌گرد $\approx$ معکوس Left-lateral strike-slip $\approx$ reverse	۲/۱	۱۰۹ (معکوس) Reverse
EDF w-deep	گسل امامزاده داوود (بخش غربی-عمقی) Emamzadeh Davud fault (western deep section)	امتدادلغز چپ‌گرد $\approx$ معکوس Left-lateral strike-slip $\approx$ reverse	۱/۰	۱۰۰ (معکوس) Reverse
Taleghan-MFF	گسل طالقان-مشا-فشم Taleghan-Mosha-Fasham fault	امتدادلغز چپ‌گرد + معکوس Left-lateral strike-slip + reverse	۰/۴۸	۰۰۲۲ (معکوس) Reverse
Taleghan-east	گسل طالقان (بخش شرقی) Taleghan fault (eastern section)	امتدادلغز چپ‌گرد + معکوس Left-lateral strike-slip + reverse	۲/۷	۰۰۵۷ (معکوس) Reverse
Taleghan-central-e	گسل طالقان (بخش مرکزی-شرقی) Taleghan fault (central-eastern section)	امتدادلغز چپ‌گرد + معکوس Left-lateral strike-slip + reverse	۰/۴۹	۰۰۱۵ (معکوس) Reverse
Taleghan-central-w	گسل طالقان (بخش مرکزی-غربی) Taleghan fault (central-western section)	امتدادلغز چپ‌گرد + معکوس Left-lateral strike-slip + reverse	۲/۰	۰۰۶۰ (معکوس) Reverse
Taleghan-west	گسل طالقان (بخش غربی) Taleghan fault (western section)	امتدادلغز چپ‌گرد + معکوس Left-lateral strike-slip + reverse	۶/۲	۱۰۰ (معکوس) Reverse
NTT-west	راندگی شمال تهران (بخش غربی) North Tehran Thrust (western section)	امتدادلغز چپ‌گرد + معکوس Left-lateral strike-slip + reverse	۲/۸	۰۰۲۵ (معکوس) Reverse
NTT-center	راندگی شمال تهران (بخش مرکزی) North Tehran Thrust (central section)	امتدادلغز چپ‌گرد + معکوس Left-lateral strike-slip + reverse	۳/۶	۰۰۸۸ (معکوس) Reverse
NTT-east	راندگی شمال تهران (بخش شرقی) North Tehran Thrust (eastern section)	امتدادلغز چپ‌گرد + معکوس Left-lateral strike-slip + reverse	۱/۹	۰۰۶۸ (معکوس) Reverse

مدل الاستیک بر تفسیر (ΔCFS) اثر می‌گذارند. توزیع مکانی تغییرات تنش کولمب در عمق‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ کیلومتری در شکل ۵ نشان داده شده است.

– نقش هندسه سه‌بعدی و افراز لغزش در توزیع تنش یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که در سامانه‌های ترافشارشی با پیچیدگی ساختاری بالا نظیر البرز مرکزی، توزیع تنش بیش از آنکه صرفاً تحت کنترل بارگذاری تکتونیکی منطقه‌ای (Regional tectonic loading) باشد، به شدت تابع هندسه محلی گسل‌هاست. نتایج حاصل از مدل‌سازی حاکی از آن است که در محیط‌های ترافشارشی، متغیرهای هندسی سه‌بعدی شامل تغییرات شیب، آزمون و تلاقی قطعات گسلی در عمق، نقش مسلط را در انتقال تنش ایفا می‌کنند

– تغییرات تنش کولمب (ΔCFS) و هم‌خوانی با لرزه‌خیزی خرد تحلیل تغییرات تنش کولمب (ΔCFS) بر روی ۲۲ قطعه گسلی نشان داد که توزیع تنش به شدت تحت تأثیر هندسه محلی گسل‌ها قرار دارد. بیشینه تغییر تنش مثبت برابر با $+0.092$ بار در عمق ۱۰ کیلومتری و در پهنه شمال دماوند محاسبه شد. در محدوده فشم-مشا، ضریب همبستگی مکانی میان الگوی تغییرات تنش و میدان دگرشکلی حاصل از InSAR حدود ۰.۸۷ بود. همچنین، بخشی از لوب‌های تنش مثبت با نواحی پرتراکم خردلرزه‌ها و پس‌لرزه‌های کاتالوگ همگن شده هم‌پوشانی داشت. این هم‌خوانی فضایی با وجود یک ارتباط مکانیکی سازگار است، اما به‌تنهایی رابطه علی یا تحریک قطعی زمین‌لرزه را اثبات نمی‌کند؛ زیرا عدم قطعیت مکان‌یابی رویدادها، هندسه گسل گیرنده و فرض‌های

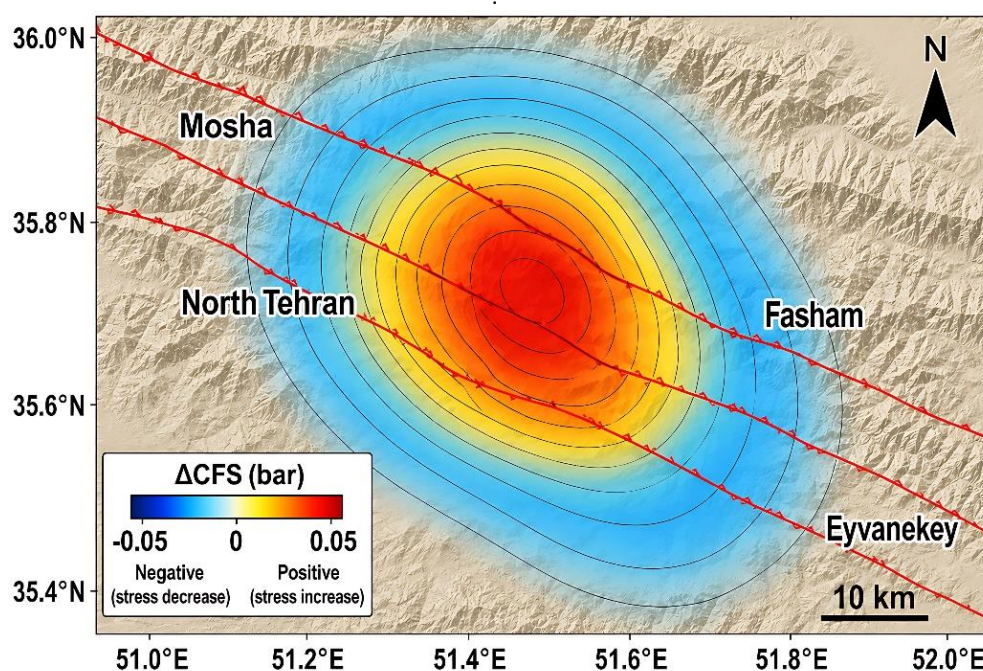
به صورت هندسه یکنواخت فرض می شود. در حالی که این رویکرد یکپارچه در شرایط فقدان داده اجتناب ناپذیر است، اعمال آن در محیط های ترافشارشی پیچیده ای نظیر البرز مرکزی می تواند منجر به خطای محاسباتی در تخمین انباشت تنش محلی شود.

در این پژوهش، برای غلبه بر این محدودیت، با بهره گیری از داده های دقیق میدان سرعت توأم GNSS و InSAR، افزایش نرخ لغزش (Slip) Partitioning به صورت شبکه بندی شده (المان های 1×1 کیلومتر) در اعماق اعمال شد. این مدل سازی الاستیک سه بعدی (Gridded 3D BEM) نشان داد که در محیط های ترافشارشی، توزیع لغزش در طول گسل هرگز متقارن و یکنواخت نیست. خروجی های مدل (اشکال ۳ و ۴) نشان می دهد که مؤلفه های امتداد لغز و شیب لغز در بخش های مختلف یک گسل واحد (نظیر گسل مشا-فشم) دچار دگرگونی شدیدی می شوند؛ به طوری که در بخش های شرقی و غربی مشا مؤلفه چپ گرد، و در بخش مرکزی آن مؤلفه معکوس غلبه دارد.

به عبارت دیگر، افزایش پیچیده لغزش به مؤلفه های امتدادی و معکوس (همان طور که در اشکال ۳ و ۴ نشان داده شد)، باعث ایجاد زون های انباشت ناهمگن تنش می شود. این نتیجه تأیید می کند که برای درک صحیح اندرکنش گسل ها و ارزیابی واقع گرایانه ریسک لرزه ای در مناطق ترافشارشی، استفاده از مدل سازی های کینماتیک دقیق بر پایه داده های InSAR و در نظر گرفتن ناهمگنی های هندسی با روش المان مرزی (BEM) کاملاً ضروری است.

- بحث و تفسیر

مزیت مدل سازی کینماتیک سه بعدی در رژیم های ترافشارشی یکی از اهداف کلیدی این پژوهش، ارتقای دقت برآورد تنش در سامانه های ترافشارشی و عبور از محدودیت های مدل های کلاسیک بود. در بسیاری از ارزیابی های مرتبط با تغییرات تنش کولمب (ΔCFS)، به ویژه برای رویدادهای تاریخی یا مناطق فاقد داده های ژئودتیک مترکم، توزیع لغزش و ابعاد گسیختگی گسل غالباً بر اساس روابط تجربی [۳۲] و



شکل ۵: تغییرات تنش کولمب مدل شده در عمق های ۵، ۱۰ و ۱۵ کیلومتری؛ رنگ های گرم و سرد به ترتیب افزایش و کاهش تنش را نشان می دهند.
Fig. 5: Modeled Coulomb stress changes at depths of 5, 10, and 15 km; warm and cool colors indicate stress increase and decrease, respectively.

جدول ۵: دامنه تغییرات تنش کولمب و موقعیت بیشینه تنش در ترازهای عمقی مدل.

Table 5: Range of Coulomb stress changes and location of maximum stress at the modeled depth levels.

عمق (km) Depth	بیشینه ΔCFS (bar) Maximum	کمینه ΔCFS (bar) Minimum	پهنه بیشینه Peak zone	ضریب اصطکاک Friction
۵	۰.۰۸۱+	۰.۰۳۵-	مشا-فشم Moshafasham	۰.۴
۱۰	۰.۰۹۲+	۰.۰۶۶-	شمال دماوند North Damavand	۰.۴
۱۵	۰.۰۴۷+	۰.۱۸۸-	جنوب بومهن South Bumehen	۰.۴

تلاقی راندگی شمال تهران با گسل مشا) نقش مسلطی در مدیریت و بازتوزیع بارگذاری تنش دارد.

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که انتقال تنش کولمب به تغییرات شیب و آزیموت در عمق و کینماتیک قطعات گسلی حساس است. تمرکز تنش مثبت تا ۰۰۹۲ بار در اعماق میانی پوسته مشاهده شد و در محدوده فشم-مشا هم‌خوانی مکانی نسبتاً بالایی ($R \approx 0.87$) با میدان دگرشکلی و تراکم خردلرزه‌ها داشت. باین‌حال، این انطباق باید به‌عنوان شاهد سازگاری فضایی مدل تفسیر شود، نه اثبات یک رابطه علی مستقیم.

بنابراین، هم‌پوشانی نواحی دارای (ACFS) مثبت با بخشی از لرزه‌خیزی ثبت شده، از مفیدبودن مدل شبکه‌بندی شده برای شناسایی الگوهای نسبی بارگذاری پشتیبانی می‌کند. این خروجی‌ها برای مقایسه و اولویت‌بندی پایش گسل‌ها مناسب‌اند، اما به‌سبب فرض نیم‌فضای همگن، ثابت‌بودن پارامترهای مکانیکی و عدم قطعیت داده‌های لرزه‌ای، نباید به‌صورت پیش‌بینی قطعی خطر یا زمان گسیختگی تفسیر شوند.

حساسیت پارامترهای فیزیکی و ارزیابی مدل الاستیک

یکی از ابعاد مهم در ارزیابی تغییرات تنش کولمب (ACFS)، درک حساسیت خروجی‌ها نسبت به متغیرهای فیزیکی نظیر ضریب اصطکاک مؤثر (μ') است. در این پژوهش، انتخاب ضریب اصطکاک مؤثر معادل ۰/۴ بر پایه ملاحظات ژئودینامیکی و متدولوژیک صورت گرفت: نخست، این مقدار تطابق بالایی با استانداردهای ژئودینامیکی و مطالعات پیشین لرزه‌زمین‌ساختی در پوسته البرز مرکزی دارد. دوم، بررسی‌ها در محیط‌های ترافشارشی نشان می‌دهد که اگرچه تغییرات در ضریب اصطکاک می‌تواند بر مقادیر مطلق تنش محاسباتی تأثیرگذار باشد، اما توزیع فضایی و الگوی کلی مناطق قفل‌شدگی، بیش از آنکه تابع تغییرات جزئی اصطکاک باشد، تحت کنترل مستقیم هندسه سه‌بعدی گسل‌ها و نحوه افراز لغزش قرار دارد. سوم، ثابت در نظر گرفتن این پارامتر به ما اجازه داد تا اثرات ناشی از پیچیدگی‌های هندسی شبکه گسلی را با وضوح بیشتری ایزوله و تحلیل کنیم.

از سوی دیگر، در ارتباط با انتخاب پلتفرم مدل‌سازی محیطی، باید میان فازهای مختلف چرخه لرزه‌ای تمایز قائل شد. اگرچه مدل‌های لایه‌ای ویسکوالاستیک برای بررسی پدیده‌هایی نظیر ریلکسیشن‌های پس‌لرزه‌ای (Post-seismic relaxation) کارایی بالایی دارند، اما پژوهش حاضر بر فاز بین‌لرزه‌ای (Interseismic) و انباشت تنش ناشی از قفل‌شدگی تدریجی گسل‌ها متمرکز است. در این فاز، به‌ویژه در رژیم‌های ترافشارشی با نرخ دگرریختی مشخص نظیر البرز، استفاده از مدل الاستیک سه‌بعدی (BEM) در یک محیط نیم‌فضا، رویکردی کاملاً توجیه‌پذیر، کارآمد و استاندارد است. در چنین محیط‌هایی با پیچیدگی ساختاری بالا، ناهمگنی‌های هندسی گسل‌ها نقش بسیار پررنگ‌تری نسبت به تغییرات رئولوژیکی اعماق زیرین، در بازتوزیع تنش پوسته فوقانی ایفا می‌کنند. از این‌رو، به‌کارگیری مدل کینماتیک الاستیک بر

این افراز دقیق سه‌بعدی، قادر به شناسایی زون‌های قفل‌شدگی و ناهمگنی‌های لغزشی در طول قطعات گسلی است که مدل‌های مبتنی بر لغزش یکپارچه از درک آن‌ها بازمی‌مانند. نتایج حاکی از آن است که در سامانه‌های ترافشارشی، ناهمگنی‌های ناشی از هندسه گسلی (تغییرات شیب، آزیموت و تلاقی قطعات) مستقیماً الگوهای پیچیده لغزش را کنترل می‌کنند و استفاده از مدل‌سازی کینماتیک ناهمگن برای ارزیابی واقع‌گرایانه چرخه لرزه‌ای در این مناطق کاملاً ضروری است.

در مقایسه با مطالعات ژئودیتیک پیشگام اخیر، تفاوت و نوآوری این مدل‌سازی برجسته‌تر می‌شود. برای نمونه، مطالعه [۱۴] با تلفیق داده‌های InSAR/GNSS به ارزیابی انباشت کرنش و پتانسیل لرزه‌ای در پایانه‌های گسیختگی پرداخته است، اما تمرکز آن عمدتاً بر سیستم‌های امتدادلغز (مانند زون گسلی آناطولی شرقی) استوار است. از سوی دیگر، پژوهش [۱۸] با بهره‌گیری از وارون‌سازی مقید به تنش، مدل‌های قفل‌شدگی (Fault coupling) را برای مرز بلوک‌های بزرگ مقیاس (نظیر فلات تبت) ارائه کرده است. با این وجود، در محیط‌های ترافشارشی با پیچیدگی ساختاری بالا نظیر البرز مرکزی، سینماتیک بلوک‌محور یکپارچه به‌تنهایی پاسخگو نیست. تفاوت بنیادین مدل ارائه‌شده در این پژوهش با مطالعات مذکور، در افراز لغزش وابسته به عمق (Depth-dependent slip partitioning) در قالب یک شبکه سه‌بعدی متراکم (المان‌های 1×1 کیلومتر) با استفاده از روش المان مرزی (BEM) است. این رویکرد، ضمن لحاظ کردن هم‌زمان مؤلفه‌های امتدادی و معکوس در مدل‌سازی، اثبات می‌کند که در سیستم‌های ترافشارشی، ناهمگنی‌های هندسی محلی قطعات گسلی (مانند تغییرات موضعی شیب و نقاط تلاقی) نقش مسلط‌تری نسبت به سینماتیک عمومی بلوک‌ها در توزیع و انباشت تنش‌های الاستیک ایفا می‌کنند.

مزایای شبکه‌بندی سه‌بعدی در برابر فرض لغزش یکنواخت

در بسیاری از مطالعات کلاسیک انتقال تنش، به دلیل فقدان داده‌های دقیق ژئودیتیک زیرسطحی (به‌ویژه برای زلزله‌های تاریخی)، از معادلات تجربی [۳۲] استفاده می‌شود که لغزش را به‌صورت یکنواخت در سطح گسل توزیع می‌کنند. این فرض ساده‌کننده، باعث ایجاد نویز ساختاری در مدل شده و به دلیل اثر هموارسازی (Smoothing effect)، منجر به نادیده گرفته شدن غلظت‌های تنش موضعی در طول گسل می‌شود.

در مقابل، مدل‌سازی شبکه‌بندی شده در این پژوهش، با اعمال شبکه‌بندی 1×1 کیلومتر بر روی صفحات گسلی البرز مرکزی، نشان داد که توزیع تنش در مناطق ترافشارشی به‌شدت تابع تغییرات موضعی راستا و شیب گسل‌هاست. برای مثال، غلظت تنش $+0.092$ بار در عمق ۱۰ کیلومتری بخش شرقی (و شمال شرقی) گسل مشا-فشم، دقیقاً در زون‌هایی شناسایی شد که در صورت استفاده از مدل‌های لغزش یکنواخت، پنهان باقی می‌ماندند. نتایج حاصل حاکی از آن است که در محیط‌های ترافشارشی، ناهمگنی هندسه سه‌بعدی گسل‌ها (نظیر منطقه

تأمین مالی: این پژوهش فاقد حمایت مالی سازمانی یا گرنت پژوهشی بوده است.

دسترس‌پذیری داده‌ها: داده‌های پشتیبان یافته‌های این پژوهش، با درخواست از نویسنده مسئول قابل دریافت است.

ملاحظات اخلاقی: این مطالعه شامل مشارکت‌کننده انسانی یا حیوان آزمایشگاهی نیست؛ بنابراین اخذ کد اخلاق برای آن موضوعیت نداشته است.

بیانیه استفاده از هوش مصنوعی: ابزارهای هوش مصنوعی صرفاً برای ویرایش زبانی و نگارشی و تنظیم ظاهری استفاده شده‌اند و در تولید داده‌ها، مدل‌سازی، تحلیل علمی، تفسیر نتایج یا نتیجه‌گیری نقشی نداشته‌اند. مسئولیت کامل محتوای علمی و نسخه نهایی بر عهده نویسندگان است.

منابع و مآخذ

- [1] Allen MB, Ghassemi MR, Shahrabi M, Qorashi M. Accommodation of late Cenozoic oblique shortening in the Alborz range, northern Iran. *J Struct Geol.* 2003;25(5):659-672. doi:10.1016/S0191-8141(02)00064-0.
- [2] Heidbach O, Reinecker J, Tingay M, Müller B, Sperner B, Fuchs K, et al. Plate boundary forces are not enough: Second- and third-order stress patterns highlighted in the World Stress Map database. *Tectonics.* 2007; 26(6): TC6014. doi:10.1029/2007TC002133.
- [3] Ashtari M, Hatzfeld D, Kamalian N. Microseismicity in the region of Tehran. *Tectonophysics.* 2005;395(3-4):193-208. doi:10.1016/j.tecto.2004.09.011.
- [4] Djamour Y, Vernant P, Bayer R, Nankali HR, Ritz JF, Hinderer J, et al. GPS and gravity constraints on continental deformation in the Alborz mountain range, Iran. *Geophys J Int.* 2010; 183(3): 1287-1301. doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04811.x.
- [5] Jackson J, Priestley K, Allen M, Berberian M. Active tectonics of the South Caspian Basin. *Geophys J Int.* 2002;148(2):214-245. doi:10.1046/j.1365-246X.2002.01005.x.
- [6] Ritz JF, Nazari H, Ghassemi A, Salamati R, Shafei A, Solaymani S, et al. Active transtension inside Central Alborz: A new insight into northern Iran-southern Caspian geodynamics. *Geology.* 2006;34(6):477-480. doi:10.1130/G22319.1.
- [7] Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull Seismol Soc Am.* 1985;75(4):1135-1154. doi:10.1785/BSSA0750041135.
- [8] Okada Y. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull Seismol Soc Am.* 1992;82(2):1018-1040. doi:10.1785/BSSA0820021018.
- [9] King GCP, Stein RS, Lin J. Static stress changes and the triggering of earthquakes. *Bull Seismol Soc Am.* 1994;84(3):935-953. doi:10.1785/BSSA0840030935.

پایه داده‌های InSAR، ابزاری دقیق و بهینه برای شناسایی زون‌های پرخطر لرزه‌ای در البرز مرکزی فراهم کرده است.

نتیجه‌گیری

تلفیق مشاهدات چندزمانی InSAR، سرعت‌های GPS/GNSS و مدل‌سازی سه‌بعدی المان مرزی نشان داد که هندسه و قطعه‌بندی عمقی گسل‌ها کنترل اصلی را بر ناهمگنی افراز لغزش و تمرکز تنش بین‌لرزه‌ای در البرز مرکزی اعمال می‌کنند. مدل شبکه‌بندی شده 1×1 کیلومتری آشکار کرد که مؤلفه‌های امتدادلغز و شیب‌لغز در طول و عمق یک گسل یکنواخت نیستند؛ برای نمونه، در بخش شرقی مشا-فشم بیشینه نرخ‌های امتدادلغز و شیب‌لغز به ترتیب حدود ۴ و ۲۰۴ میلی‌متر در سال بود، درحالی‌که در شاخه شمال‌غربی راندگی شمال تهران مؤلفه معکوس با بیشینه ۱۰۵ میلی‌متر در سال غالب شد.

بیشینه (ΔCFS) مثبت برابر با ۰۰۰۹۲ بار در عمق ۱۰ کیلومتری و پهنه شمال دماوند به‌دست آمد و در محدوده فشم-مشا هم‌خوانی مکانی نسبتاً بالایی ($R^2 \approx 0.87$) میان میدان تنش، دگرشکلی InSAR و تراکم لرزه‌خیزی مشاهده شد. با توجه به فرض نیم‌فضای الاستیک همگن، ثابت‌بودن پارامترهای مکانیکی و عدم قطعیت موقعیت رویدادها، این نتایج الگوهای نسبی بارگذاری و اندرکنش گسل‌ها را نشان می‌دهند و نباید به‌عنوان پیش‌بینی قطعی زمان، مکان یا بزرگای زمین‌لرزه تفسیر شوند.

مشارکت نویسندگان

سید عبدالرضا عدنانی: مفهوم‌پردازی، گردآوری و پردازش داده‌ها، مدل‌سازی، تحلیل، تهیه شکل‌ها و نگارش پیش‌نویس اولیه؛ مهران آرین: سرپرستی علمی، مفهوم‌پردازی، طراحی روش، اعتبارسنجی و بازبینی انتقادی؛ علی سلگی: مشاوره زمین‌شناسی ساختاری، اعتبارسنجی هندسه گسل‌ها و بازبینی علمی؛ مسعود شیرازیان: مشاوره ژئودزی، GNSS و هم‌مرجع‌سازی داده‌ها و بازبینی روش؛ رضا حیدری: مشاوره لرزه‌شناسی، ارزیابی کاتالوگ‌ها و تفسیر لرزه‌زمین‌ساختی. همه نویسندگان نسخه نهایی را خوانده و با ارسال آن موافقت کرده‌اند.

تشکر و قدردانی

این مقاله برگرفته از رساله دکتری ثبت‌شده در گروه علوم زمین، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی است. شماره ثبت رساله ۱۲۳۹۴۸۱۰۰۵۷۳۹۲۳۰۷۲۰۲۱۱۶۲۷۹۹۷۹۴ و تاریخ تصویب/ثبت آن ۰۷/۱۴۰۲ است. پژوهش حاضر حمایت مالی سازمانی دریافت نکرده و هزینه‌های آن به‌صورت شخصی تأمین شده است.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

- observations (2015-2020). *J Geophys Res Solid Earth*. 2022; 127(1):e2021JB022892. doi:10.1029/2021JB022892.
- [22] Kang S, Ji L, Zhu L, Liu C, Zhang W, Li N, et al. Study of the interseismic deformation and locking depth along the Xidatan-Dongdadan segment of the East Kunlun Fault Zone based on Sentinel-1 interferometry. *Remote Sens*. 2023;15(19):4666. doi:10.3390/rs15194666.
- [23] Berberian M. Contribution to the seismotectonics of Iran (Part II). Tehran: Geological Survey of Iran; 1976. Report No. 39.
- [24] Vernant P, Nilforoushan F, Hatzfeld D, Abbassi MR, Vigny C, Masson F, et al. Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman. *Geophys J Int*. 2004;157(1):381-398. doi:10.1111/j.1365-246X.2004.02222.x.
- [25] Axen GJ, Lam PS, Grove M, Stockli DF, Hassanzadeh J. Exhumation of the west-central Alborz Mountains, Iran, Caspian subsidence, and collision-related tectonics. *Geology*. 2001;29(6):559-562. doi:10.1130/0091-7613(2001)029<0559:EOTWCA>2.0.CO;2.
- [26] Rezaeian M, Carter A, Hovius N, Allen MB. Cenozoic exhumation history of the Alborz Mountains, Iran: New constraints from low-temperature chronometry. *Tectonics*. 2012;31(2):TC2004. doi:10.1029/2011TC002974.
- [27] Ballato P, Stockli DF, Ghassemi MR, Landgraf A, Strecker MR, Hassanzadeh J, et al. Accommodation of transpressional strain in the Arabia-Eurasia collision zone: New constraints from (U-Th)/He thermochronology in the Alborz Mountains, northern Iran. *Tectonics*. 2013;32(1):1-18. doi:10.1029/2012TC003159.
- [28] Landgraf A, Ballato P, Strecker MR, Friedrich A, Tabatabaei SH, Shahpasandzadeh M. Fault-kinematic and geomorphic observations along the North Tehran Thrust and Moshafasham Fault, Alborz Mountains, Iran. *Geophys J Int*. 2009;177(2):676-690. doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04089.x.
- [29] Nazari H, Ritz JF, Salamati R, Shafei A, Ghassemi A, Michelot JL, et al. Morphological and palaeoseismological analysis along the Taleghan Fault, Central Alborz, Iran. *Geophys J Int*. 2009;178(2):1028-1041. doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04173.x.
- [30] Zanchi A, Berra F, Mattei M, Ghassemi MR, Sabouri J. Inversion of the Shahrud fault system (eastern Alborz, Iran): A kinematic approach. *Tectonophysics*. 2006;414(1-4):145-161. doi:10.1016/j.tecto.2005.10.019.
- [31] Guest B, Axen GJ, Lam PS, Hassanzadeh J. Late Cenozoic shortening in the west-central Alborz Mountains, northern Iran, by combined conjugate strike-slip and thin-skinned deformation. *Geosphere*. 2006;2(1):35-52. doi:10.1130/GES00019.1.
- [32] Wells DL, Coppersmith KJ. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull Seismol Soc Am*. 1994;84(4):974-1002. doi:10.1785/BSSA0840040974.
- [10] Stein RS. The role of stress transfer in earthquake occurrence. *Nature*. 1999; 402(6762):605-609. doi:10.1038/45144.
- [11] Harris RA. Introduction to special section: Stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard. *J Geophys Res Solid Earth*. 1998; 103(B10): 24347-24358. doi:10.1029/98JB01576.
- [12] Toda S, Stein RS, Richards-Dinger K, Bozkurt SB. Forecasting the evolution of seismicity in southern California: Animations built on earthquake stress transfer. *J Geophys Res Solid Earth*. 2005;110(B5):B05S16. doi:10.1029/2004JB003415.
- [13] Freed AM. Earthquake triggering by static, dynamic, and postseismic stress transfer. *Annu Rev Earth Planet Sci*. 2005;33:335-367. doi:10.1146/annurev.earth.33.092203.122505.
- [14] Cheloni D, Famiglietti NA, Akinci A, Caputo R, Vicari A. Modeling the 2023 Türkiye earthquakes and strain accumulation along the East Anatolian Fault Zone: Insights from InSAR, GNSS, and small-magnitude seismicity, with implications for the seismic potential at rupture terminations. *Remote Sens*. 2025;17(13):2270. doi:10.3390/rs17132270.
- [15] Liu H, Xie L, Zhao G, Ali E, Xu W. A joint InSAR-GNSS workflow for correction and selection of interferograms to estimate high-resolution interseismic deformations. *Satell Navig*. 2023;4(1):14. doi:10.1186/s43020-023-00105-6.
- [16] Cai J, Wen Y, He K, Wang X, Xu C. Strain partitioning, interseismic coupling, and shallow creep along the Ganzi-Yushu fault from Sentinel-1 InSAR data. *Geophys Res Lett*. 2024;51(21):e2024GL111469. doi:10.1029/2024GL111469.
- [17] Sobouti A, Samiei Esfahany S, Sharifi MA, Abolghasem AM, Bahroudi A, Friedrich AM. Kinematics of the western Makran subduction zone: Insights from InSAR analysis of interseismic coupling. *J Geophys Res Solid Earth*. 2025; 130(9): e2025JB031167. doi:10.1029/2025JB031167.
- [18] Zhao D, Qu C, Shan X, Gong W, Weng H, Chen H, et al. An updated fault coupling model along major block-bounding faults on the eastern and northeastern Tibetan Plateau from a stress-constrained inversion of GPS and InSAR data. *J Geophys Res Solid Earth*. 2024; 129(4): e2023JB028483. doi:10.1029/2023JB028483.
- [19] Lazos I, Papanikolaou I, Sboras S, Fomelis M, Pikridas C. Geodetic upper crust deformation based on primary GNSS and InSAR data in the Strymon Basin, northern Greece-correlation with active faults. *Appl Sci*. 2022;12(18):9391. doi:10.3390/app12189391.
- [20] Maubant L, Radiguet M, Pathier E, Doin MP, Cotte N, Kazachkina E, et al. Interseismic coupling along the Mexican subduction zone seen by InSAR and GNSS. *Earth Planet Sci Lett*. 2022;586:117534. doi:10.1016/j.epsl.2022.117534.
- [21] Zhao D, Qu C, Bürgmann R, Gong W, Shan X, Qiao X, et al. Large-scale crustal deformation, slip-rate variation, and strain distribution along the Kunlun Fault (Tibet) from Sentinel-1 InSAR



علی سلگی دانشیار زمین‌شناسی ساختاری در گروه علوم زمین واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی است. حوزه‌های پژوهشی او تکتونیک، تحلیل ساختاری، مناطق برشی، شکستگی‌ها، تکتونیک جنب‌ها و تفسیر هندسه و کینماتیک سامانه‌های گسلی است.

Ali Solgi — Associate Professor of Structural Geology, Department of Earth Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. Email: a.solgi@srbiau.ac.ir



مسعود شیرازیان استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری و ژئوماتیک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی است. علایق پژوهشی او ژئودزی هندسی، نقشه‌برداری ژئودتیک، GNSS، ژئودینامیک، ناوبری و تلفیق سنجش از دور با اندازه‌گیری‌های ژئودتیکی است.

Masoud Shirazian — Assistant Professor, Department of Surveying and Geomatics Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran. ORCID: 0000-0002-4013-0729; Email: m.shirazian@sru.ac.ir



رضا حیدری استادیار زلزله‌شناسی و ژئوفیزیک در گروه علوم زمین واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی است. حوزه‌های تخصصی او لرزه‌شناسی، ژئوفیزیک، تحلیل کاتالوگ‌های زمین‌لرزه، لرزه‌زمین‌ساخت و ارزیابی ارتباط میان ساختارهای فعال و الگوهای لرزه‌خیزی است.

Reza Heidari — Assistant Professor of Seismology and Geophysics, Department of Earth Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. Email: r-heidari@srbiau.ac.ir

[33] Amini A, Emami MH. Tectonic evolution and structural features of Central Alborz. Tehran: Geological Survey of Iran; 1993.

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



سید عبدالرضا عدنانی پژوهشگر دکتری زمین‌شناسی-تکتونیک در واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی است. حوزه فعالیت پژوهشی او شامل ژئودزی، ژئودینامیک، نقشه‌برداری هیدروگرافی، زمین‌ساخت فعال، پردازش داده‌های تداخل‌سنجی راداری، تلفیق داده‌های ژئودتیکی و لرزه‌ای و مدل‌سازی تغییرات تنش کولمب در سامانه‌های گسلی پیچیده است.

S. Abdolreza Adnani — Department of Earth Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. ORCID: 0009-0000-1293-6939; Email: s.adnani@iau.ac.ir



مهران آراین استاد زمین‌شناسی ساختاری در گروه علوم زمین واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی است. زمینه‌های تخصصی او زمین‌شناسی ساختاری، تحلیل حوضه، زمین‌ساخت ایران، ساختارهای گسلی و کاربرد داده‌های زمین‌شناسی در تفسیر تکامل تکتونیکی است.

Mehran Arian — Professor of Structural Geology, Department of Earth Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. ORCID: 0000-0002-4574-5116; Email: mehranarian@srbiau.ac.ir

Citation (Vancouver): Nobakht S.A, Ali Abbaspour R, Chehregan A. [Improving the Accuracy of PDR Based Indoor Positioning in Emergency Scenarios by Modeling Complex Human Movement Behaviors]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2026; 4(1): 171-188

<https://doi.org/10.22061/jrsgr.2026.113440.1137>



COPYRIGHTS

© 2026 The Author(s). This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)