



فصلنامه زمین ساخت

بهار ۱۴۰۵، سال هشتم، شماره ۲۹

doi 10.22077/jt.2026.10524.1214

مقاله پژوهشی

بازتوزیع تنش ایستایی و تحریک لرزه‌ای در توالی زلزله‌های ۲۰۱۷-۲۰۱۸ کرمانشاه، زاگرس غربی

سعید زارعی^{۱*}، میراحمد کوهنورد^۲، هدایت‌الله هوادی^۲، انارگل حسینی^۲

۱. استادیار، گروه ژئوفیزیک، دانشکده علوم و فناوری نانو و زیستی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

۲. کارشناسی ارشد، گروه ژئوفیزیک، دانشکده علوم و فناوری نانو و زیستی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۱۲

چکیده:

این پژوهش تحول تنش کولمب و نقش آن در تکامل توالی لرزه‌ای ۲۰۱۷-۲۰۱۸ کرمانشاه در زاگرس غربی را بررسی می‌کند. تمرکز مطالعه بر ارزیابی انتقال تنش از زمین‌لرزه از گله ($M_w 7/3$) به گسل‌های مجاور، به‌ویژه گسل زاگرس مرتفع (HZF) و گسل پیشانی کوهستان (MFF)، و ارتباط آن با الگوی مکانی-زمانی پس‌لرزه‌ها است. داده‌های لرزه‌ای از پایگاه‌های IRSC، ISC و USGS و سازوکارهای کانونی از مدل CMT استخراج شد. تغییرات ΔCFS با در نظر گرفتن مؤلفه‌های تنش برشی و نرمال و ضریب اصطکاک مؤثر محاسبه و با توزیع پس‌لرزه‌ها و تغییرات پارامتر b -value مقایسه گردید.

نتایج نشان می‌دهد گسیختگی اصلی موجب افزایش تنش تا حدود ۰/۱ مگاپاسکال در شمال غرب HZF و امتداد جنوبی MFF شده است. بیش از ۶۵-۷۰ درصد پس‌لرزه‌ها در نواحی با ΔCFS مثبت و مرزهای فضایی آن‌ها با آستانه ۰/۰۵ مگاپاسکال انطباق قابل توجهی دارد. تحلیل زمانی بیانگر آن است که رخدادها با بزرگای متوسط پس از شوک اصلی، با بازتوزیع تنش، خوشه‌های لرزه‌ای ثانویه را در دو پهنه متمایز توسعه داده‌اند. همچنین کاهش b -value در نواحی دارای تنش مثبت، حاکی از افزایش سهم نسبی رخدادها بزرگ‌تر در این بخش‌هاست.

همبستگی فضایی-آماري میان ΔCFS ، تراکم پس‌لرزه‌ها و تغییرات b -value نشان می‌دهد تکامل این توالی عمدتاً تحت کنترل انتقال تنش ایستایی بوده و مدل‌سازی تنش کولمب می‌تواند ابزاری مؤثر برای شناسایی پهنه‌های مستعد لرزه‌زایی در زاگرس باشد.

واژه‌های کلیدی: تغییرات تنش کولمب، توالی لرزه‌ای کرمانشاه، زلزله از گله ۲۰۱۷، b -value، تحریک گسل

*ایمیل: szarei@pgu.ac.ir

تلفن تماس: ۰۹۳۶۴۷۲۵۲۳۶



Research Paper

Static Stress Redistribution and Seismic Triggering in the 2017–2018 Kermanshah Earthquake Sequence, Western Zagros

Saeed Zarei ^{1*}, MirAhmad Kouhnavard², Hedayatullah Hawadi², Anargol Hasani²

1. Assistant Professor, Department of Geophysics, Faculty of Nano and Bio Science and Technology, Persian Gulf University, Bushehr, Iran

2. M.Sc., Department of Geophysics, Faculty of Nano and Bio Science and Technology, Persian Gulf University, Bushehr, Iran

Abstract:

This study investigates Coulomb stress evolution and its role in the 2017–2018 Kermanshah seismic sequence in the western Zagros. We evaluate static stress transfer from the Mw 7.3 Ezgeleh earthquake to adjacent faults, particularly the High Zagros Fault (HZF) and the Mountain Front Fault (MFF), and examine its relationship with the spatiotemporal distribution of aftershocks. Seismic data were obtained from IRSC, ISC, and USGS catalogs, and focal mechanisms from CMT solutions. ΔCFS was calculated using shear and normal stress changes and an effective friction coefficient, and compared with aftershock patterns and b-value variations.

Results indicate that the mainshock increased Coulomb stress by up to ~ 0.1 MPa along the northwestern HZF and southern MFF. Approximately 65–70% of aftershocks occurred within zones of positive ΔCFS , with strong spatial agreement above the 0.05 MPa threshold. Moderate aftershocks contributed to secondary seismic clustering through stress redistribution. Decreased b-values within positive stress zones suggest a higher proportion of relatively larger events. The spatial–statistical correlation between ΔCFS , aftershock density, and b-value variations demonstrates that the sequence was primarily controlled by static stress transfer, highlighting the effectiveness of Coulomb stress modeling for identifying seismically susceptible zones in the Zagros.

Keywords: Coulomb stress changes; Kermanshah seismic sequence; 2017 Ezgeleh earthquake; b-value; fault triggering

*Email: szarei@pgu.ac.ir

Tel: +989364725236

۱- مقدمه

کانونی، هندسه گسیختگی و تغییر شکل هم‌لرزه‌ای آن با استفاده از داده‌های لرزه‌ای و InSAR انجام شده است (Ver-nant et al., 2018; Elliott et al., 2020; Roustaiei et al., 2018). با این حال، اغلب این پژوهش‌ها بر مدل‌سازی منبع و توزیع تغییر شکل سطحی تمرکز داشته‌اند و تحلیل کمی انتقال تنش ایستایی و ارتباط مستقیم آن با تکامل مکانی-زمانی پس‌لرزه‌ها و تغییرات آماری b -value کمتر به صورت یکپارچه بررسی شده است.

زاگرس، که هندسه بیشتر گسل‌ها شامل سامانه‌های راندگی با مؤلفه امتداد لغز است (Talebian & Jackson, 2004)، ارزیابی نقش بازتوزیع تنش در فعال‌سازی گسل‌های مجاور همچنان نیازمند تحلیل کمی دقیق است. پژوهش حاضر این خلأ را با مدل‌سازی عددی ΔCFS بر پایه حل تحلیلی اوکادا (Okada, 1992)، ارزیابی آماری هم‌پوشانی تنش مثبت با توزیع پس‌لرزه‌ها، و ترکیب نتایج با تغییرات مکانی-زمانی پارامتر b -value پوشش می‌دهد. نوآوری این مطالعه در یکپارچه‌سازی مدل‌سازی مکانیکی و شاخص‌های آماری لرزه‌خیزی برای شناسایی پهنه‌های مستعد فعال‌سازی ثانویه در توالی ۲۰۱۷-۲۰۱۸ کرمانشاه است. این رویکرد چارچوبی کمی برای بهبود ارزیابی خطر لرزه‌ای و راهبردهای پایش در زاگرس غربی فراهم می‌کند.

۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در بخش شمال‌غربی کمر بند چین خورده و رانده زاگرس، در محدوده استان کرمانشاه و مرز ایران و عراق واقع شده است. این پهنه بخشی از ناحیه فشاری فعال خاورمیانه به‌شمار می‌آید که در اثر همگرایی مایل صفحه عربی به سمت شمال شرق نسبت به صفحه اوراسیا شکل گرفته است. نرخ نسبی همگرایی در این بخش از ایران حدود ۲۵ میلی‌متر در سال برآورد شده است (Vernant et al., 2004) که بخشی از آن از طریق لغزش در گسل‌های راندگی و بخشی نیز از طریق دگرشکلی گسترده در پوسته جذب می‌شود. در نتیجه این همگرایی مداوم، زاگرس به‌عنوان یکی از فعال‌ترین کمر بندهای چین خورده قاره‌ای جهان شناخته می‌شود و از دیدگاه تکنیکی، محیطی ایده‌آل برای بررسی فرایندهای تنش و لرزه‌زایی به‌شمار می‌آید.

برهم‌کنش میان زمین‌لرزه‌ها و نقش تغییرات تنش در تکامل چرخه لرزه‌زایی یکی از موضوعات بنیادی در ژئوفیزیک تکتونیکی است. در چارچوب نظری انتقال تنش ایستایی، نشان داده شده است که گسیختگی یک گسل می‌تواند میدان تنش اطراف خود را تغییر دهد و در نتیجه، احتمال فعال‌شدن یا پایدار ماندن

تغییرات تنش کولمب (ΔCFS ; Coulomb Failure Stress) بیان می‌شود، بیانگر آن است که هر زمین‌لرزه علاوه بر آزادسازی انرژی در گسل مبدأ، موجب بازتوزیع تنش در پوسته شده و تعادل تنش-کرنش منطقه‌ای را دگرگون می‌کند. از این رو، تحلیل کمی تغییرات تنش به‌عنوان ابزاری کلیدی برای درک سازوکار تحریک لرزه‌ای و ارزیابی خطر زمین‌لرزه در پهنه‌های فعال قاره‌ای شناخته می‌شود. برهم‌کنش زمین‌لرزه‌ها و نقش تغییرات تنش در تداوم چرخه لرزه‌زایی از موضوعات محوری در ژئوفیزیک تکتونیکی است. چارچوب نظری انتقال تنش ایستایی، به‌ویژه بر پایه مفهوم تغییرات تنش کولمب (ΔCFS)، نشان می‌دهد که گسیختگی یک گسل می‌تواند با افزایش یا کاهش تنش بر روی گسل‌های مجاور، احتمال رخداد رویدادهای بعدی را کنترل کند (King et al., 1994; Stein, 1999; Toda et al., 2011). مطالعات کلاسیک بر توالی‌های Landers earthquake در سال ۱۹۹۲ و Hector Mine earthquake در سال ۱۹۹۹ نشان دادند که نواحی با ΔCFS مثبت با تمرکز پس‌لرزه‌ها همبستگی دارند (Stein et al., 1997).

نتایج مشابهی برای Chi-Chi earthquake (Lin & Stein, 2004; Toda et al., 2005) و Wenchuan earthquake در سال ۱۹۹۹ و Shan et al., 2013; Parsons et al., 2008) گزارش شده است که اعتبار این چارچوب را در محیط‌های تکتونیکی مختلف تأیید می‌کند.

در ایران، کمر بند چین خورده و رانده زاگرس به‌عنوان مرز همگرایی فعال بین صفحه عربی و ایران مرکزی، یکی از لرزه‌خیزترین پهنه‌های خاورمیانه است (Berberian, 1995; Talebian & Jackson, 2004). رخداد زمینلرزه از گله ۷/۳ (Mw) در ۱۲ نوامبر ۲۰۱۷ یکی از بزرگ‌ترین زمین‌لرزه‌های دهه اخیر زاگرس بود که مطالعات متعددی درباره سازوکار



زاگرس مرتفع هم‌خوانی دارد. پس از آن، منطقه شاهد بیش از ۶۰۰۰ پس‌لرزه در طول یک سال بود که بخش عمده‌ای از آنها در شمال و شمال‌شرق رومرکز اصلی متمرکز شدند.

در بازه کمتر از یک سال، دو زلزله نسبتاً بزرگ دیگر نیز در محدوده سرپل ذهاب در آگوست ۲۰۱۸ با بزرگای گشتاوری ۵/۹ و نوامبر ۲۰۱۸ با بزرگای گشتاوری ۶/۳ تازه‌آباد رخ دادند که به‌نوعی ادامه دینامیکی توالی لرزه‌ای از گله محسوب می‌شوند. این توالی لرزه‌ای فرصتی ارزشمند برای بررسی نقش تغییرات تنش ایستایی در تحریک گسل‌های مجاور و تداوم لرزه‌زایی منطقه فراهم کرده است.

تحلیل توزیع پس‌لرزه‌ها نشان می‌دهد که تراکم اصلی آنها در امتداد شمال‌غربی تا جنوب‌شرقی گسل HZF و بخش شمالی گسل MFF قرار دارد. همچنین بخش‌های جنوبی‌تر منطقه که دارای ΔCFS منفی بوده‌اند، کاهش قابل توجهی در فعالیت لرزه‌ای نشان داده‌اند که به‌عنوان نواحی سایه لرزه‌ای تعبیر می‌شود. این رفتار با مدل‌های جهانی انتقال تنش تطابق دارد و اهمیت مطالعه این پهنه را دوچندان می‌کند.

از نظر جغرافیایی، محدوده مورد مطالعه بین طول‌های شرقی ۴۵° تا ۴۷° و عرض‌های شمالی ۳۳° تا ۳۵° واقع شده است. این محدوده شامل شهرهای از گله، سرپل ذهاب، ثلاث باباجانی، جوانرود و گیلانغرب است. ارتفاعات رشته کوه زاگرس مرتفع با روند شمال‌غرب-جنوب‌شرق، ساختارهای چین‌خورده و دره‌های عمیق، سیمای اصلی ژئومورفولوژیکی منطقه را شکل داده‌اند.

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل کاتالوگ زمین‌لرزه‌های دستگاهی از سال ۱۹۶۰ تا ۲۰۲۴ (IRSC و ISC)، داده‌های ممان لرزه‌ای (USGS و GCMT)، و نقشه‌های زمین‌ساختی سازمان زمین‌شناسی ایران است. در مدل‌سازی هندسه گسل‌ها، به‌منظور افزایش دقت ساختاری و هم‌خوانی با چارچوب تکنیکی منطقه، علاوه بر داده‌های ساختاری میدانی، تصاویر ماهواره‌ای و مدل رقومی ارتفاع (DEM) با تفکیک‌پذیری ۳۰ متر، از نقشه‌های زمین‌شناسی و تحلیل‌های ساختاری منتشرشده در منابع معتبر از جمله نقشه‌ها و تفسیرهای ساختاری، تکامل فضایی کمربند برخوردی زاگرس در شمال‌غرب ایران، مبنای تعیین موقعیت، امتداد و هندسه گسل‌های اصلی و سامانه‌های

از نظر زمین‌ساختی، کمربند زاگرس به چند زیرپهنه اصلی تقسیم می‌شود: زاگرس مرتفع (High Zagros Zone)، زاگرس میانی (Imbricated Zone)، ناحیه پیش بوم (Sim-) Mesopotamian)، و دشت بین‌النهرین (ply Folded Belt Foredeep). محدوده کرمانشاه عمدتاً در مرز بین زاگرس مرتفع و زاگرس میانی قرار دارد که دارای ساختارهای راندگی با مؤلفه امتدادلغز است. این پهنه از دیدگاه ژئومکانیکی، منطقه انتقالی بین تغییرشکل ترد در شمال‌شرق و تغییرشکل نرم‌تر در جنوب‌غرب محسوب می‌شود. ضخامت پوسته در این ناحیه حدود ۵۰ تا ۵۵ کیلومتر است و نشان‌دهنده رفتار الاستو-پلاستیک پیچیده‌ای در اعماق میانی پوسته است (Motaghi et al., 2017).

چین‌خوردگی‌های متراکم و گسل‌های متعدد با امتداد کلی شمال‌غرب-جنوب‌شرق، ویژگی غالب ریخت زمین‌ساختی این منطقه‌اند. در میان این ساختارها، دو گسل اصلی نقش تعیین‌کننده‌ای در لرزه‌خیزی منطقه دارند:

الف) گسل زاگرس مرتفع (HZF) که با طول بیش از ۷۰۰ کیلومتر از ناحیه مریوان تا شمال ایلام امتداد دارد و عمدتاً رفتار راندگی با مؤلفه امتدادلغز راست‌گرد نشان می‌دهد.

ب) گسل پیشانی کوهستان (MFF) که در جنوب‌غرب کرمانشاه قرار گرفته و مرز بین زاگرس چین‌خورده و دشت بین‌النهرین را مشخص می‌کند.

افزون بر این، گسل‌های فرعی مانند گسل جوانرود، گسل گیلانغرب و گسل سومار نیز در این ناحیه فعال‌اند و در برهم‌کنش تنش‌های منطقه‌ای نقش دارند. داده‌های GPS نشان می‌دهد که نرخ لغزش این گسل‌ها حدود ۲ تا ۴ میلی‌متر در سال است (Hainze et al., 2010) که با نرخ لرزه‌ای منطقه سازگار است.

پهنه کرمانشاه یکی از لرزه‌خیزترین نواحی زاگرس است. رخداد زمین‌لرزه ویرانگر ۱۲ نوامبر ۲۰۱۷ از گله با بزرگای گشتاوری (7.3Mw) یکی از شدیدترین زلزله‌های ثبت‌شده در تاریخ معاصر ایران به‌شمار می‌آید. کانون این زمین‌لرزه در عمق حدود ۱۸ کیلومتری و در نزدیکی مرز ایران و عراق واقع شد. بر اساس نتایج تحلیل‌های ممان لرزه‌ای (USGS, 2018)، سازوکار کانونی رویداد از نوع راندگی کم‌شیب با مؤلفه امتدادلغز راست‌گرد بوده و با هندسه گسل‌های

مقدار μ' در بازه $0.4 - 0.6$ برای زاگرس گزارش شده است؛ در این پژوهش مقدار میانگین $\mu' = 0.4$ به منظور بازنمایی شرایط اصطکاکی متعارف گسل‌های فعال منطقه در نظر گرفته شد. اثر فشار منفذی از طریق ضریب اسکمپتون (B) در چارچوب تئوریک انتقال تنش لحاظ گردید؛ بر اساس مطالعات کلاسیک (King et al., 1994; Stein, 1997)، مقدار B در بازه $0.5 - 0.67$ برای شرایط نیمه‌اشباع تا بلافاصله پس از رخداد اصلی قابل انتظار است.

پارامترهای الاستیک محیط شامل مدول برشی 3×10^{10} پاسکال و ضریب پواسون 0.25 در نظر گرفته شد. شبکه محاسباتی با تفکیک افقی 1 کیلومتر تعریف گردید تا توزیع مکانی تغییرات تنش در مقیاس محلی با دقت مناسب بازسازی شود. طول، عرض و مقدار لغزش گسیختگی برای رویداد اصلی بر اساس داده‌های CMT و روابط مقیاس‌بندی تجربی لئونارد (Leonard, 2010) برآورد شد. این چارچوب امکان ارزیابی کمی هم‌پوشانی نواحی ΔCFS مثبت با توزیع پس‌لرزه‌ها و تحلیل نقش انتقال تنش ایستایی در تکامل توالی لرزه‌ای زاگرس غربی را فراهم ساخت.

۳-۳- تحلیل آماری و صحت سنجی مدل

برای بررسی همبستگی بین نتایج تنش و لرزه‌خیزی، مختصات پس‌لرزه‌ها از کاتالوگ IRSC استخراج و فیلتر زمانی- مکانی روی آنها اعمال شد (رویدادهای یک‌ساله با خطای مکانی کمتر از 5 کیلومتر).

همچنین پارامتر لرزه‌ای b-value با استفاده از روش (Aki, 1965) از داده‌های پیش و پس از زلزله اصلی محاسبه شد. b-value پارامتر مهمی در بررسی لرزه‌خیزی است که برای بررسی مجموعه از زمین لرزه‌ها بکار می‌رود. b-value رابطه معکوس با تنش دارد از آنجا که تنش عامل اصلی ایجاد زمین لرزه است، بنابراین می‌توان از b-value برای بررسی مقدار تنش

وارد استفاده کرد. روش‌های بیشترین احتمال و حداقل مربعات روش‌های برای محاسبه مقدار پارامتر b هستند. روش

حداقل مربعات با بررسی شیب خطی بر منحنی توزیع بزرگی-فرآوانی منطبق می‌شود و شیب خط به عنوان مقدار پارامتر b در نظر گرفته می‌شود. در روش بیشترین مربعات احتمال به طور عکس به میانگین بزرگا در ارتباط است و

راندگی- امتداد لغز منطقه ارائه شده توسط (Sadeghi and Yassaghi 2016) نیز استفاده شده است تا امکان بازنمایی واقع‌بینانه‌تر آرایش گسل‌ها در چارچوب همگرایی مایل عربستان-اوراسیا فراهم گردد و سازگاری هندسه مدل با شواهد زمین‌شناسی منطقه‌ای را تقویت شود.

۳- روش تحقیق

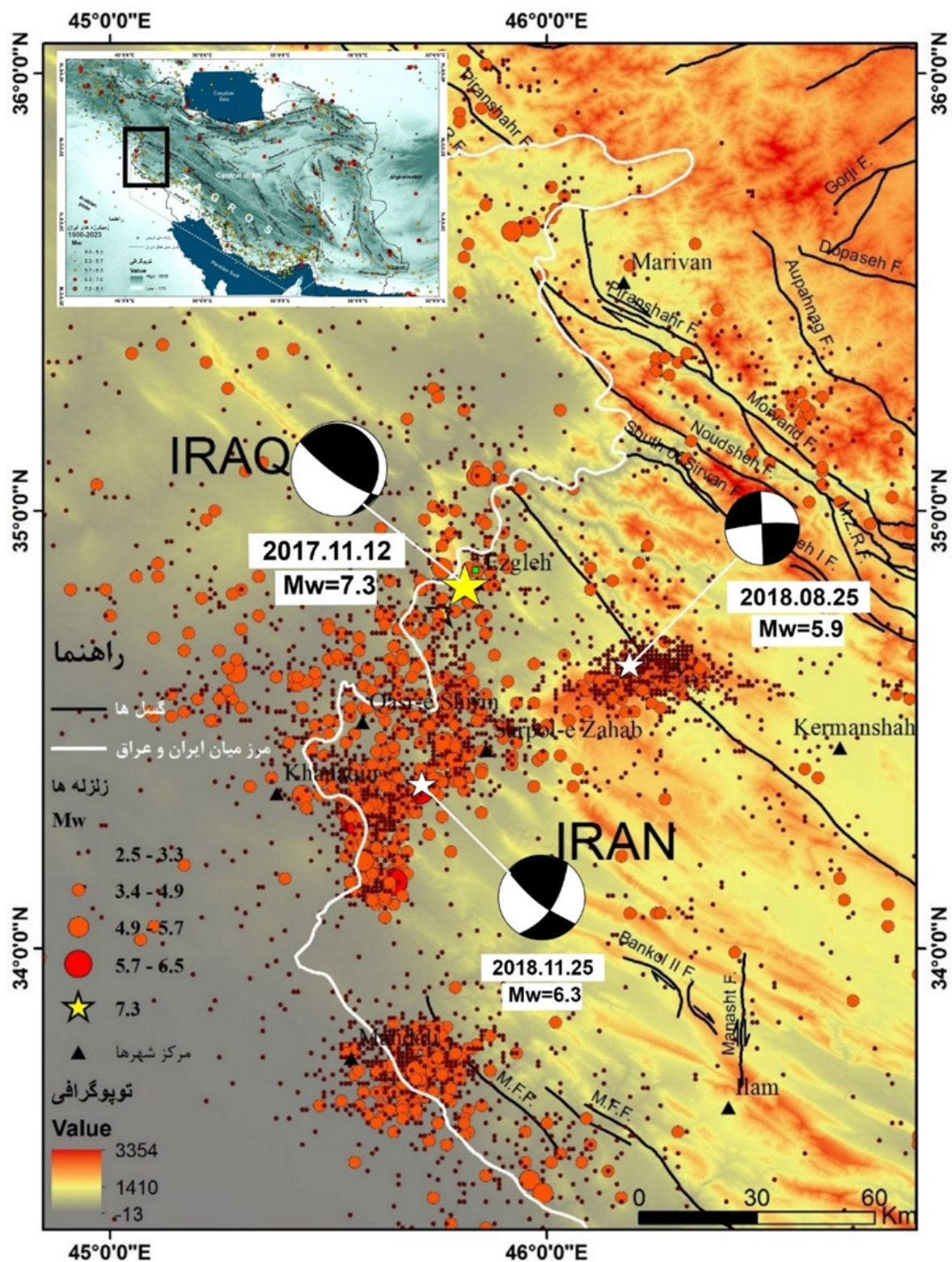
۳-۱- داده‌ها و منابع اطلاعاتی

داده‌های لرزه‌ای مورد استفاده در این پژوهش از کاتالوگ‌های مرکز لرزه‌نگاری کشوری ایران، پایگاه بین‌المللی ISC و سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده (USGS) گردآوری شد. برای هر رویداد، زمان رخداد، مختصات رومرکز، عمق، بزرگای ممان لرزه‌ای و در صورت دسترس، سازوکار کانونی استخراج گردید. سه رویداد اصلی شامل زمین‌لرزه 2017 از گله $Mw 3.7$ ؛ 12 نوامبر 2017 ، زمین‌لرزه تازه‌آباد $Mw 5.9$ ؛ 25 اوت 2018 و زمین‌لرزه سرپل‌ذهاب $Mw 6.3$ ؛ 25 نوامبر 2018 به‌عنوان منابع اصلی تغییر تنش در مدل لحاظ شدند. سازوکارهای کانونی و پارامترهای گسیختگی از پایگاه Global CMT و گزارش‌های USGS اخذ گردید.

هندسه گسل‌ها بر اساس تلفیق نقشه‌های زمین‌ساختی سازمان زمین‌شناسی ایران، نتایج ساختاری ارائه شده توسط (Nissen et al. 2019) و نیز اطلاعات تکمیلی مربوط به پارامترهای گسل و توالی پس‌لرزه‌ای در مطالعه (Asayesh et al., 2023) تعیین شد. همچنین داده‌های DEM با تفکیک‌پذیری 30 متر (SRTM) برای استخراج خطواره‌ها و کنترل هندسی مرزهای گسلی به کار رفت.

مدل‌سازی تغییر تنش کولمب با استفاده از نرم‌افزار Cou-3.4 lomb و بر پایه حل تحلیلی نیم‌فضای الاستیک همگن و ایزوتروپ (Okada, 1992) انجام شد. رابطه تغییر تنش کولمب به صورت زیر تعریف گردید:

که در آن $\Delta \tau$ تغییر تنش برشی در راستای لغزش، $\Delta \sigma_n$ تغییر تنش نرمال (مثبت در حالت کاهش فشار مؤثر) و μ' ضریب اصطکاک مؤثر است. با توجه به مطالعات پیشین (King et al., 1994; Stein, 1999; Toda et al., 2011)



شکل (۱) موقعیت تکتونیکی منطقه مطالعه، نقشه زمین لرزه های محدوده مورد مطالعه از کاتالوگ IRSC و ISC از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۳. خطوط سیاه گسلها، ستاره زرد رنگ رومکز زمین لرزه ۱۲ نوامبر ۲۰۱۷ ازگله و خط سفید مرز میان ایران و عراق را نشان می دهند. سازوکار کانونی زمین لرزه های ازگله با بزرگای گشتاوری ۷.۳، سرپل ذهاب با بزرگای گشتاوری ۶.۳، تازه آباد با بزرگای گشتاوری ۵.۹ در شکل نشان داده شده است.

جدول (۱) - پارامترهای ورودی مدل Coulomb برای زلزله‌های اصلی

پارامتر	از گله (2017)	تازه‌آباد (2018)	سرپل‌ذهاب (2018)	منبع
بزرگای (Mw)	7.3	5.9	6.3	IRSC / USGS
عمق (km)	18	12	15	CMT
طول گسل (km)	45	15	25	This study
شیب (°)	20	30	25	(Asayesh et al., (2023
امتداد (°)	326	335	340	(Asayesh et al., (2023
لغزش (mm)	$10^3 \times 2.5$	$10^3 \times 0.8$	$10^3 \times 1.2$	(Leonard (2010
μ' (اصطکاک مؤثر)	0.6–0.4	0.6–0.4	0.6–0.4	(King et al. (1994

روش خوبی برای محاسبه مقدار پارامتر b است. که مقدار آن با استفاده از رابطه ۲ زیر بدست می‌آید:

$$b = \frac{1}{\bar{M} - M_{\min}} \log e \quad (2)$$

نشان دهنده میانگین بزرگای $M_{\min}$ حداقل بزرگای در حال بررسی است. این مقدار به Mc اشاره دارد.

برای تحلیل حساسیت مدل، سه مقدار μ' (۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶) و دو عمق مؤثر (۱۵ و ۲۰ کیلومتر) آزمایش شد. تغییرات در موقعیت نواحی ΔCFS مثبت کمتر از ۵ درصد بود که نشان‌دهنده پایداری مدل است.

۴- نتایج (Results)

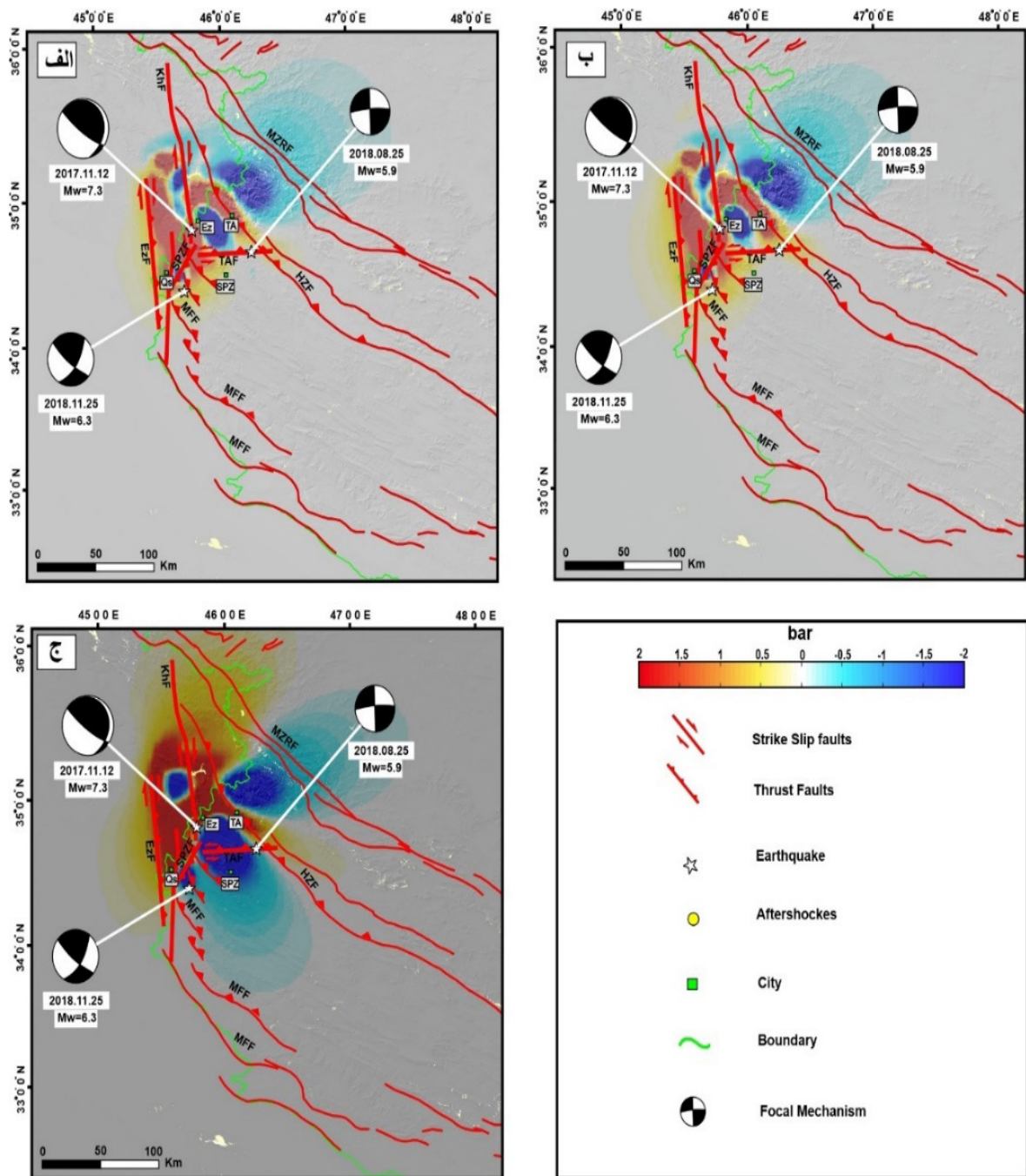
۴-۱- تغییرات تنش کولمب ناشی از زلزله ازگله

مدل‌سازی زلزله اصلی ازگله $Mw 7.3$ نشان داد که توزیع تنش در پوسته بالایی ناهمگن و جهت‌دار است. بیشترین افزایش تنش در شمال‌غرب رومرکز و امتداد گسل HZF تا حوالی جوانرود مشاهده می‌شود. در این نواحی، ΔCFS در حدود $+0.07$ تا $+0.1$ مگاپاسکال برآورد شد. در مقابل، جنوب‌شرق منطقه (حوالی گیلانغرب و قصرشیرین) دچار کاهش تنش تا حدود -0.05 مگاپاسکال گردید همانطور که در شکل (۲) دیده می‌شود محاسبات در سه مرحله برای گسل‌های ازگله (۲-الف)، گسل تازه‌آباد (شکل ۲-ب) و گسل سرپل‌ذهاب (شکل ۲-ج) محاسبه شده است و نشان می‌دهد این زلزله موجب تحریک و برانگیختن این گسل‌ها شده و می‌تواند موجب چکانش زلزله‌های تازه‌آباد و سرپل‌ذهاب شده باشد.

در شکل (۳) تغییرات تنش کولمب حاصل از زمین‌لرزه ازگله بر روی تمام گسل‌های فعال منطقه به صورت بهینه نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که تعدادی زیادی از گسل‌های شناسایی شده محدوده تحت تأثیر قرار گرفته‌اند. قسمت میانی گسل HZF، انتهای شرقی و غربی گسل تازه‌آباد (TAF)، انتهای شمال شرقی گسل سرپل‌ذهاب (SPZF)، انتهای شمالی گسل ازگله (EZF)، انتهای جنوبی گسل خانقین (KhF)، انتهای شمال غربی گسل پیشانی کوهستان (MFF) نواحی بودند که در آنها افزایش تنش اتفاق افتاده است، که در این میان افزایش تنش در انتهای شرقی گسل تازه‌آباد (TAF) منجر به زلزله‌ای تازه‌آباد با بزرگای گشتاوری ۵/۹ شد و همین‌طور افزایش تنش در انتهای جنوب غربی گسل سرپل‌ذهاب (SPZF) زمین‌لرزه سرپل‌ذهاب را با بزرگای گشتاوری ۶/۳ در پی داشته است. هر دو زمین‌لرزه تازه‌آباد و سرپل‌ذهاب در منطقه افزایش تنش واقع شده‌اند و نشان می‌دهد که رخداد زمین‌لرزه ازگله موجب چکانش این دو زمین‌لرزه شده است. افزودن رخدادهای تازه‌آباد و سرپل‌ذهاب به مدل نشان داد که الگوی تنش منطقه به‌صورت پویا تغییر یافته است. زلزله سرپل‌ذهاب موجب افزایش ΔCFS در بخش جنوبی MFF و شمالی ZFF شد.

۴-۲- همبستگی ΔCFS با پس‌لرزه‌ها و b -value

شکل (۴) بیانگر تغییرات مقدار b در نواحی مختلف است که بیشترین مقدار b را در ناحیه رومرکز زمین‌لرزه ازگله (بعد از وقوع) نشان می‌دهد که گواه کاهش وقوع رخدادهای لرزه‌ای در آن منطقه است. در نواحی غربی و جنوب شرقی رومرکز زمین‌لرزه ازگله کم‌ترین مقدار b را داریم که نشان‌دهنده افزایش بزرگای زمین‌لرزه‌های قابل رخداد



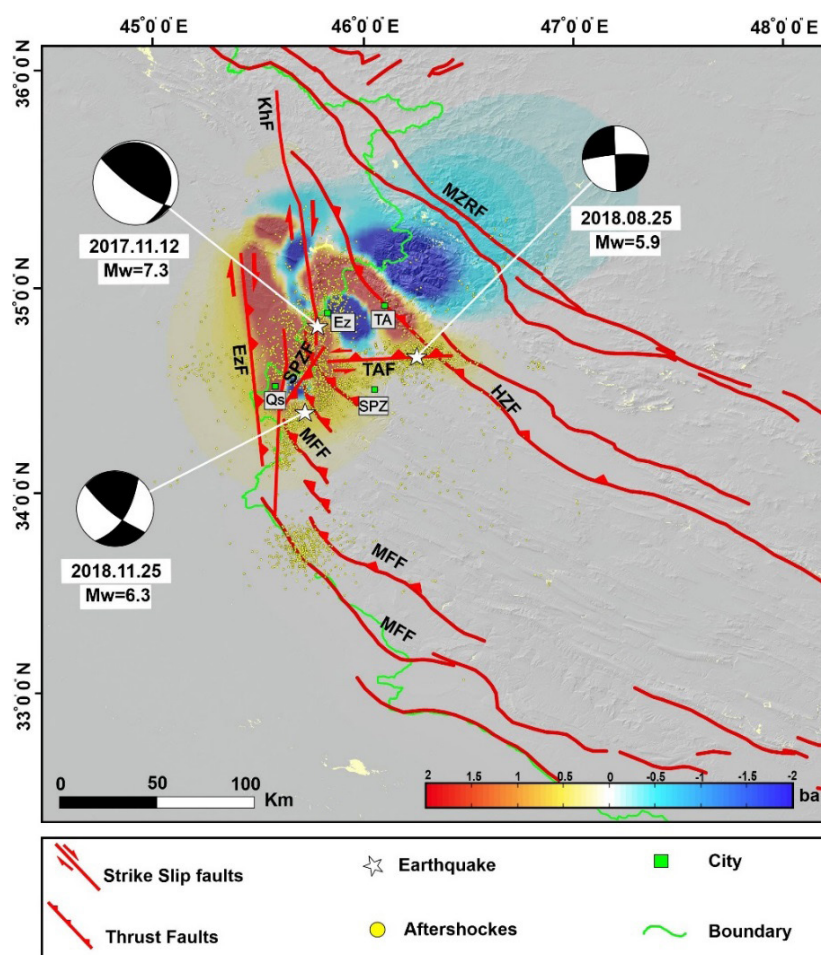
شکل (۲) تغییرات تنش کولمب حاصل از زمینلرزه ۱۲ نوامبر ۲۰۱۷ ازگله. برای انجام محاسبات گسل های الف) ازگله (EZF)، ب) تازه آباد (Tazeh Abad Fault=TAF) و ج) گسل سرپل ذهاب (SPZF=Sar-Pole Zahab Fault) به عنوان صفحه گیرنده در نظر گرفته شده است. عمق محاسبات ۱۰ کیلومتر است. ستاره‌های سفید رنگ رومرکز زمینلرزه‌های ازگله ($M_w = 3/7$)، تازه آباد ($M_w = 5/9$) و سرپل ذهاب ($M_w = 6/3$) را نشان می‌دهند. خطوط قرمز کسلها، خط سبز رنگ مرز میان ایران و عراق و شکلهای مربعی سبز رنگ شهرها را نشان می‌دهند.

ای است که توان لرزه خیزی بالایی دارد و می‌تواند در آینده شاهد وقوع زمین لرزه‌های بزرگی باشد. تحلیل مکانی نشان داد حدود ۶۹ درصد از پس‌لرزه‌ها در نواحی دارای ΔCFS مثبت رخ داده‌اند. شاخص همبستگی مکانی بین تراکم لرزه‌ای و نقشه تنش برابر با ۰/۶۵ به‌دست آمد. مقدار میانگین b قبل از زلزله اصلی حدود ۱/۱ بود که پس از رخداد اصلی به ۰/۸ کاهش یافت. بیشترین کاهش b در نواحی با ΔCFS مثبت مشاهده شد. جدول (۲) خلاصه مقادیر کمی به‌دست‌آمده از تحلیل‌های تنش و b -value را ارائه می‌دهد.

تحلیل‌های حاصل از مدل‌سازی تنش کولمب در توالی

می‌باشد. همچنین در نواحی شمال شرق و جنوب غرب محدوده مورد مطالعه شاهد افزایش مقدار b و در نتیجه کاهش وقوع رخدادهای لرزه‌ای در آینده هستیم. در شکل (۴)، محدوده‌ای که بصورت دایره زرد رنگ نشان داده شده شاهد کم‌ترین مقدار b است که می‌تواند منطقه کاندید برای زمین لرزه‌های آینده باشد.

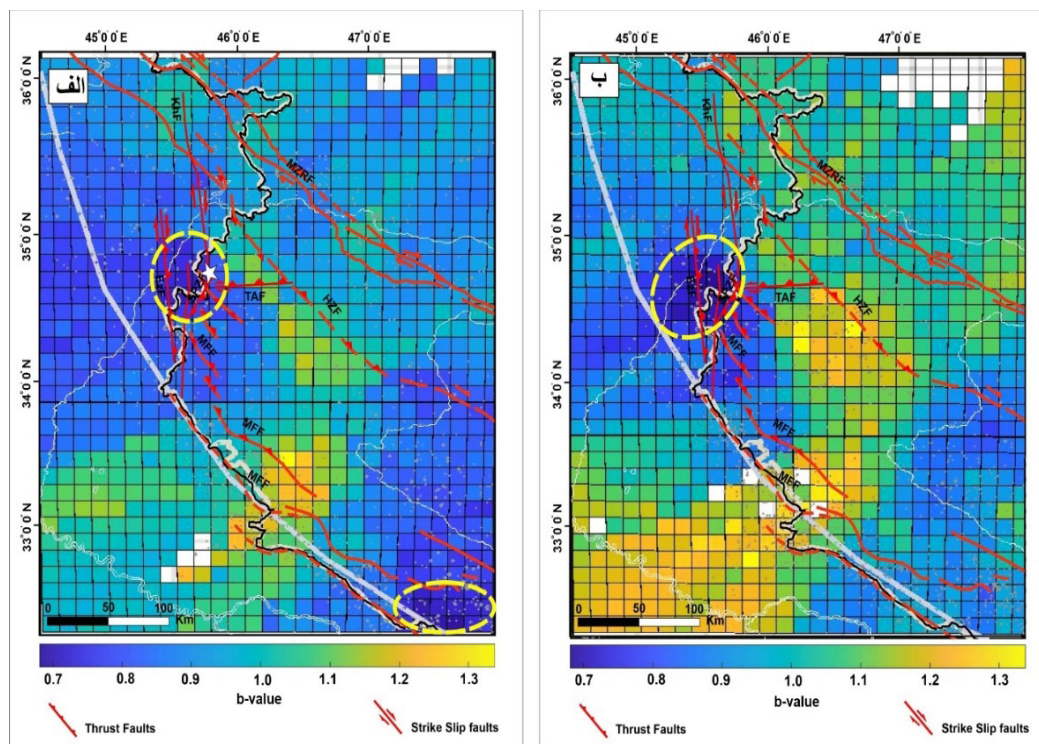
با توجه به بررسی‌های که روی زمین لرزه‌های از گله، تازه آباد و سرپل ذهاب انجام شد می‌توان چنین نتیجه گرفت که منطقه‌ای که در شکل (۴) بصورت دایره زرد رنگ نشان داده شده که بخش‌های از گله، سرپل ذهاب و بخشی از غرب از گله واقع در خاک عراق را شامل می‌شود، منطقه



شکل (۳): تغییرات تنش کولمب حاصل از زمین لرزه از گله با بزرگای گشتاوری ۷/۳ به همراه پس لرزه‌های بعد از این زمین لرزه. تغییرات تنش ایجاد شده بر روی گسل‌های فعال منطقه پیرو این زمین لرزه. گسل‌های زاگرس مرتفع، تازه آباد، سرپل ذهاب، از گله، پیشانی کوهستان و خانقین گسل‌های هستند که در آنها افزایش تنش اتفاق افتاده است.

موجب گسترش میدان تنش به سمت جنوب و شرق شدند. ترکیب نقشه‌های ΔCFS و پارامتر b -value نشان داد که دو پهنه عمده با تنش مثبت و مقادیر پایین b (کمتر از ۰/۸) در شمال غرب و جنوب منطقه وجود دارد که به عنوان نواحی مستعد برای فعالیت لرزه‌ای آینده قابل شناسایی هستند. این هم‌پوشانی بیانگر تداوم انتقال تنش در سیستم گسلی زاگرس

لرزه‌ای کرمانشاه نشان می‌دهد که زلزله اصلی از گله (۷Mw/۳) موجب افزایش قابل توجه تنش ایستایی در بخش شمال غربی منطقه شد و تمرکز کرنش در امتداد گسل‌های اصلی را به همراه داشت. رخداد‌های ثانویه، به ویژه زلزله‌های تازه‌آباد و سرپل ذهاب، نقش مؤثری در بازتوزیع این تنش‌ها در گسل‌های MFF و ZFF ایفا کردند و



شکل (۴): الف نشان دهنده مقدار b -value قبل از زمین لرزه از گله در بازه زمانی ابتدای ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۷/۱۱/۱۰ است. نواحی که بصورت دایره‌های زرد رنگ نشان داده شده مناطق است که کم ترین مقدار b را شاهد بوده و کم بودن مقدار b در این مناطق گواه بالا بودن توان لرزه خیزی این مناطق است که می تواند نواحی کاندید برای زمین لرزه های آینده باشد، همانطور که در منطقه از گله شاهد زمین لرزه از گله در ۱۲ نوامبر ۲۰۱۷ میلادی با بزرگای گشتاوری ۷/۳ بودیم. ب) نشان دهنده تغییرات مقدار b -value در نواحی مختلف منطقه مورد مطالعه بعد از رخداد زمین لرزه های از گله، تازه آباد و سرپل ذهاب می باشد. رنگ آبی مناطق کاهش مقدار b و رنگ زرد مناطق افزایش مقدار b را نشان می دهد. ناحیه که به صورت دایره زرد رنگ نشان داده شده دارای کم ترین مقدار b است، و می تواند منطقه کاندید برای وقوع زمین لرزه های آینده باشد. گسل های منطقه به صورت خطوط قرمز نشان داده شده است. خط سیاه مرز کشور ایران و خطوط قرمز گسلهای فعال را نشان می دهد. این شکل از داده های لرزه ای IRSC و USGS در بازه زمانی ابتدای ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۱/۰۷/۲۶ بعد از تصحیحات لازم با استفاده از نرم افزار Z.map ترسیم شده است.

هم‌پوشانی بالای نواحی دارای ΔCFS مثبت با تراکم پس‌لرزه‌ها و کاهش هم‌زمان پارامتر b -value نشان می‌دهد که توزیع لرزه‌خیزی پس از رخداد اصلی از گله تابع مستقیم بازتوزیع تنش در پوسته بوده است. این یافته با مطالعات کلاسیک انتقال تنش در سایر توالی‌های لرزه‌ای مانند Landers–Hector Mine در کالیفرنیا (Stein et al.,

و پتانسیل بالای لرزه‌زایی در این دو بخش کلیدی است.

۵. بحث (Discussion)

نتایج مدل‌سازی تغییرات تنش کولمب در توالی لرزه‌ای کرمانشاه (۲۰۱۷–۲۰۱۸) شواهد روشنی از نقش انتقال تنش ایستایی در کنترل الگوی لرزه‌خیزی منطقه ارائه می‌دهد.

جدول (۲) - خلاصه مقادیر کمی محاسبه‌شده از مدل تنش و داده‌های لرزه‌ای

تفسیر لرزه خیزی	تغییر b	b-value بعد	b-value قبل	درصد پس‌لرزه‌ها در $\Delta CFS > 0$	ΔCFS (MPa)	زیرپهنه تحلیلی در محدوده مطالعاتی (شکل ۴)
تمرکز تنش مثبت و افت پتانسیل بالا	-0.3	0.8	1.1	72%	+0.10	بخش شمالی HZF در محدوده دایره زرد
تنش منفی؛ کاهش احتمالی	+0.1	1.1	1.0	31%	-0.04	بخش جنوبی HZF در محدوده مطالعاتی
همبستگی مثبت تنش و افت b	-0.3	0.9	1.2	68%	+0.06	بخش مرکزی MFF در محدوده مطالعاتی
پتانسیل متوسط تا بالا	-0.2	0.9	1.1	64%	+0.05	بخش شمالی ZFF در محدوده مطالعاتی
همگرایی تنش و افت b	-0.3	0.8	1.1	69%	—	کل محدوده تحلیل (دایره زرد شکل ۴)

که برخی دیگر تضعیف شوند.

بررسی روند زمانی توالی لرزه‌ای نیز نشان داد که رخداد‌های بعدی (تازه‌آباد و سرپل‌ذهاب در سال ۲۰۱۸) در مناطقی اتفاق افتادند که در مدل زلزله از گله دارای ΔCFS مثبت بودند. این موضوع تداوم انتقال تنش در طول زمان و نقش زلزله اصلی در تحریک گسل‌های مجاور را تأیید می‌کند. به عبارت دیگر، توالی کرمانشاه را می‌توان نمونه‌ای از یک «سیستم لرزه‌ای آشاری» دانست که در آن هر رخداد، زمینه را برای وقوع بعدی فراهم کرده است.

از دیدگاه تکتونیکی، نتایج این پژوهش تأکید می‌کند که بخش شمال‌غربی زاگرس به‌ویژه در مرز میان زاگرس مرتفع و زاگرس میانی در حال تجربه تمرکز کرنش مداوم است. داده‌های GPS نیز چنین روندی را با نرخ همگرایی حدود ۲۵ میلی‌متر در سال تأیید می‌کنند است (Vernant et al., 2004).

از سوی دیگر، باید به محدودیت‌های مدل نیز اشاره کرد. نخست، مدل تنش کولمب بر پایه فرض نیم‌فضای الاستیک همگن بنا شده است، در حالی که در واقعیت، ناهمگنی‌های لیتولوژیکی و دمایی در پوسته زاگرس می‌توانند بر توزیع واقعی تنش اثر بگذارند. دوم، پارامتر اصطکاک مؤثر (μ) به صورت ثابت در نظر گرفته شد، در حالی که در طبیعت این پارامتر در طول زمان و مکان متغیر است. سوم، داده‌های هندسی گسل‌ها در برخی بخش‌ها بر پایه تفسیرهای سطحی هستند و عدم قطعیت در شیب یا عمق گسل ممکن است بر دقت مطلق ΔCFS اثر بگذارد.

با وجود این محدودیت‌ها، هم‌سویی نتایج مدل با شواهد

Chi-Chi (1997)، Toda et al., (2011) و Wenchi-Lushan در چین (Lin.X et al., 2019) هم‌خوانی دارد و نشان می‌دهد که رفتار مکانیکی گسل‌های زاگرس نیز از الگوی مشابهی پیروی می‌کند.

یکی از نکات کلیدی در این پژوهش، پایداری الگوی تنش در محدوده گسل زاگرس مرتفع (HZF) است؛ به گونه‌ای که بخش‌های شمالی این گسل در تمام مدل‌های تک‌رویدادی و تجمعی دارای مقادیر مثبت ΔCFS باقی مانده‌اند. این پایداری می‌تواند بیانگر تمرکز کرنش فعال و انباشت انرژی الاستیک در این بخش باشد که احتمالاً در آینده مستعد گسیختگی بزرگ‌تری است. به علاوه، تغییرات b-value در همان نواحی کاهش معنی‌داری نشان داد (تا حدود ۰/۳ واحد)، که به صورت تجربی با افزایش خطر لرزه‌ای مرتبط دانسته می‌شود. چنین هم‌زمانی میان کاهش b-value و افزایش تنش، به‌ویژه در زاگرس، برای نخستین بار در این مقیاس مورد تأیید قرار گرفته است.

در مقابل، بخش‌های جنوبی منطقه (به‌ویژه در امتداد گیلانغرب و قصرشیرین) کاهش تنش منفی را تجربه کردند که همراه با افزایش b-value و کاهش نرخ لرزه‌خیزی بوده است. این نواحی از دیدگاه لرزه‌زمین‌ساختی در وضعیت «سایه لرزه‌ای» قرار دارند و در بازه زمانی کوتاه مدت احتمال فعالیت مجدد در آنها پایین است. این رفتار ناهمگن در یک پهنه تکتونیکی فشاری مانند زاگرس، نشان‌دهنده پیچیدگی دینامیکی میدان تنش و نقش هندسه گسل‌ها در بازتوزیع نیروهاست. زاویه تقاطع گسل‌های فرعی با گسل‌های اصلی و تفاوت در شیب و امتداد آنها سبب می‌شود که برخی نواحی انرژی بیشتری از شوک اصلی جذب کنند، در حالی



سپاس‌گزاری

بدین وسیله مراتب سپاس و قدرانی خود را از جناب آقای دکتر شبیر اشکپور عضو محترم هیئت علمی دانشگاه خلیج فارس اعلام می‌نمایم که با راهنمای‌های علمی و ارزشمندشان بستر مناسبی برای انجام این پژوهش فراهم ساختند.

منابع

- Aki, K., 1965. Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits. *Bull. Earthquake Research Institute* 43, 237-239.
- Hainzle, S., Zoller, G., and Wang, R., 2010. Impact of the receiver fault distribution on aftershock activity, *Journal of Geophysical research: Solid Earth* 115, B05307.
- King, G. C. P., Stein, R. S., and Jian Lin., 1994. Static stress changes and the triggering of earthquakes. *Bulletin - Seismological Society of America* 84, 935-953.
- Leonard, M., 2010. Earthquake fault scaling: self-consistent relating of rupture length, width, average Displacement, and moment release, *Bulletin - Seismological Society of America* 100, 1971-1988.
- Lin, X., R. C., and Zeng, X., 2019. Repture processes and coulomb stress changes of the 2017 Mw 6.5 Jiuzhaigou and 2013 Mw 6.6 Lushan earthquakes, *Earth, planets and Space*, 71, 106.
- Ma, K. F., Chan, C. H., and Stein, R. S., 2005. Response of seismicity to Coulomb stress triggers and shadows of the 1999 Mw 7.6 ChiChi, Taiwan, earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(B05S19).
- Motaghi, K., Shabanian, E., and F. K., 2017. Underplating along the northern portion of the Zagros suture zone, Iran. *Geophysical Journal*

لرزه‌ای، روند تغییرات b -value و الگوی پس‌لرزه‌ها نشان می‌دهد که مدل به‌خوبی توانسته رفتار واقعی سیستم لرزه‌ای منطقه را بازتاب دهد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌سازی تنش کولمب ابزاری قدرتمند برای شناسایی نواحی مستعد گسیختگی در زاگرس است و می‌تواند به‌عنوان بخشی از چارچوب پایش خطر لرزه‌ای در غرب ایران به کار گرفته شود.

۶- نتیجه‌گیری (Conclusions)

این مطالعه تحول تنش کولمب و سازوکار برهم‌کنش گسل‌ها را در توالی لرزه‌ای کرمانشاه (۲۰۱۷-۲۰۱۸) ارزیابی کرده است. نتایج نشان می‌دهد زمین‌لرزه از گله (M_w 7.3) موجب افزایش معنی‌دار تنش ایستایی در شمال غرب گسل مبدأ و در امتداد گسل زاگرس مرتفع (HZF) شده است؛ بیشینه ΔCFS حدود ۰/۱ مگاپاسکال برآورد شد که هم‌پوشانی بالایی با تمرکز پس‌لرزه‌ها دارد.

با لحاظ کردن رویدادهای ثانویه سرپل‌ذهاب و تازه‌آباد، بازتوزیع تدریجی تنش و شکل‌گیری دو پهنه اصلی افزایش تنش در شمال غرب و جنوب منطقه آشکار شد. حدود ۷۰ درصد پس‌لرزه‌ها در نواحی با ΔCFS مثبت رخ داده‌اند و کاهش هم‌زمان b -value از حدود ۱/۱ به ۰/۸ بیانگر افزایش پتانسیل لرزه‌زایی در این پهنه‌هاست.

تطابق فضایی بالای ΔCFS با توزیع پس‌لرزه‌ها نشان می‌دهد که این توالی از سازوکار انتقال تنش ایستایی تبعیت می‌کند و رخدادهای بعدی عمدتاً در نتیجه تحریک گسل‌های مجاور بوده‌اند؛ رفتاری که با الگوهای مشاهده‌شده در توالی‌های بزرگ جهانی سازگار است. بر این اساس، بخش شمال‌غربی HZF و همچنین قسمت‌هایی از گسل پیشانی کوهستان (MFF) به‌عنوان پهنه‌های با اولویت بالاتر خطر لرزه‌ای مطرح می‌شوند.

ترکیب تحلیل ΔCFS و b -value چارچوبی کارآمد برای شناسایی نواحی مستعد گسیختگی در زاگرس فراهم می‌کند. با وجود محدودیت‌های مدل‌سازی، نتایج حاضر بینشی کمی از پویایی تنش در زاگرس غربی ارائه داده و می‌تواند در بهبود ارزیابی خطر و راهبردهای پایش لرزه‌ای منطقه به کار گرفته شود.



- States Geological Survey Earthquake Catalog. <https://earthquake.usgs.gov/>
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abassi, M. R., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, M., Bayer, R., Tavakoli, F., and Chéry, J., 2004. Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman. *Geophysical Journal International* 157(1), 381–398.
- International 210(1), 375–389.
- Nissen, E., Ghods, A., Barnhart, W. D., Bergman, E., Hayes, G. P., Jamal-Reyhani, M., Nemati, M., Tatar, M., Benz, H. M., Shahvar, P., Talebian, M., and Chen, L. 2019. The 12 November 2017 Mw 7.3 Ezgeleh–Sarpol-e Zahab (Iran) earthquake and active tectonics of the Lurestan arc. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 124(2), 2124–2152.
- Okada, S. (1992). Internal Deformation Due To Shear And Tensile Faults in a Half-Space *Bulletin of the Seismological Society of America* 82(2), 1018–1040.
- Sadeghi, S. and Yassaghi, A., 2016. Spatial evolution of the Zagros collision zone in Kurdistan, NW Iran: constraints on Arabia–Eurasia oblique convergence. *Solid Earth* 7, 659–672.
- Stein, R., 1999. The role of stress transfer in earthquake occurrence, *Nature* 402, 605–609
- Stein, R. S., Barka, A. A., and Dieterich, J. H., 1997. Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering, *Geophysical Journal International* 604–594 , (3)128
- Stein, R. S., King, G. C. P., and Lin, J., 1992. Change in failure stress on the southern San Andreas fault system caused by the 1992 Magnitude=7.4 Landers earthquake. *Science* 258(5086), 1328–1332.
- Toda, S., Stein, R., Sevilgen, V., and Lin, J., 2011. Coulomb 3.3 Graphic-rich deformation and stress-change software for earthquake, tectonic, and volcano research and teaching-user guide. USGS Open-File Report 2011–1060.
- USGS. 2018. Moment tensor solution of the 12 November 2017 Iran–Iraq earthquake. United

