

رمزگشایی تغییرات میدان تنش با استفاده از واکاوی زمین‌ساخت شکننده در گستره شهر بابک

لیلا عبادی^۱، سید احمد علوی^۲ و محمدرضا قاسمی^۳

دکتر، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
 استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
 دانشیار، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران
 تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۶/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۲۹

چکیده

در این مقاله بخشی از گستره شهر بابک، در شمال باختر استان کرمان مطالعه می‌شود که از دید زمین‌شناسی بخشی از ایران مرکزی و کمربند ارومیه-دختر است. واحدهای سنگی این حوضه در دوران میوسن تحت تأثیر تنش‌های فشاری با روند شمال خاوری قرار گرفته‌اند و دگرشکلی با گسترش چین‌ها و گسل‌ها با روند شمال باختری- جنوب خاوری مشخص می‌شود. هدف این مقاله رمزگشایی دگرشکلی چند مرحله‌ای و تاریخچه تنش دیرینه در بخشی از ایران مرکزی در گستره شهر بابک است و اینکه چطور ابعاد مختلف زمین‌شناسی با میدان‌های تنش در طول زمان ارتباط پیدا می‌کنند. از سوی دیگر نشان داده می‌شود که چگونه دگرشکلی‌های شکننده و تحلیل تنش دیرینه می‌تواند در تفسیر تکامل زمین‌ساخت پس از برخورد سودمند باشند. رمزگشایی توالی رویدادها دگرشکلی، که ساختارهای امروزه گستره مورد مطالعه را شکل داده‌اند؛ با استفاده از تحلیل زمین‌ساخت شکننده صورت می‌گیرد که شامل وارون‌سازی تنسور تنش است و از داده‌های لغزش گسل به دست می‌آید. از این رو مطالعه آماری روی رابطه میان میدان‌های تنش مختلف و چین‌خوردگی‌ها صورت گرفت تا از این راه، درک بهتری از تاریخ دگرشکلی فشاری حاکم بر گستره به دست آید. بازسازی سامانه‌ای زمین‌ساخت شکننده اجازه می‌دهد تا یک چرخش پادساعت‌گرد در مسیر اصلی فشارش در طول زمان مشخص شود. به طوری که دو مسیر فشاری N55E و N84E از اواخر کراتاسه تا اواخر میوسن پیش از چین‌خوردگی ایجاد شده و فشارش همزمان با چین‌خوردگی N40E در اواخر میوسن شکل گرفته است. پس از چین‌خوردگی، در پلیوسن مسیر فشارش به N29E تغییر وضعیت داد و در پایان در زمان پلیستوسن مسیر فشارش به N3E رسید. اگر چه این چرخش پادساعت‌گرد مسیر تنش فشاری، در طول زمان پیشرونده بوده است؛ تحلیل‌ها نشان می‌دهد که سه رژیم تنش مشخص؛ پیش، همزمان و پس از چین‌خوردگی وجود داشته و با رویداد فشاری منطبق است. از این رو با تحلیل تنش و مشاهدات صحرایی مشخص شد که بسیاری از گسل‌های راست‌الغز راست‌بر نسل اول به عنوان گسل‌های معکوس با روند شمال باختر- جنوب خاور در بخش جنوب باختر ایران مرکزی از ناحیه شهر بابک فعال شده‌اند. این نتایج می‌تواند توسط فرضیه تغییر چرخش پادساعت‌گرد در مسیر صفحه عربی با توجه به صفحه اوراسیا و چرخش بلوکی ایران مرکزی حمایت شود.

کلیدواژه‌ها: تنش دیرینه، زمین‌ساخت شکننده، چرخش، چین، شهر بابک.

*نویسنده مسئول: لیلا عبادی

E-mail: leilaebadi2014@yahoo.com

۱- پیش‌نوشتار

هدف از این مطالعه تحلیل زمین‌ساخت شکننده در ناحیه شهر بابک استان کرمان به منظور بازسازی تغییرات میدان تنش دیرینه است. این تحلیل با کمک داده‌های لغزش گسلی و موقعیت محور چین‌خوردگی صورت می‌گیرد؛ بدین ترتیب تکامل زمین‌ساختی بخشی از ایران مرکزی در گستره زمان مشخص خواهد شد.

حالت تنش در سنگ‌ها بیشتر توسط محورهای بیضوی تنش تعریف می‌شود که بزرگی تنش‌های اصلی را مشخص می‌کنند. در این شرایط، بزرگ‌ترین محور بیضوی تنش معرف σ_1 ، محور حدواسط معرف σ_2 و کوچک‌ترین محور معرف σ_3 است (Jaeger and Cook, 1969). جهت‌یابی و شکل بیضوی با جهت‌یابی و سوی حرکت گسل‌های گسترش یافته در گستره تعیین می‌شود (Angelier, 1994).

۲- زمین‌شناسی
 فلات ایران، حاصل دگرشکلی در کمربند کوهزایی بزرگ‌تر آلپ- هیمالیاست. اقیانوس نوتیس در پاسخ به تجزیه گندوانا شکل گرفته و صفحه اوراسیا را از صفحه عربی جدا کرده است (Hooper et al., 1994; Glennie, 2000). در الیگو- میوسن، همگرایی میان صفحه‌های عربی و اوراسیا سبب بسته شدن اقیانوس نوتیس و برخورد شد که با زمین‌ساخت فعال ایران مرکزی مشخص می‌شود (Richards, 2003). در پایان همگرایی مستمر میان صفحه‌های قاره‌ای عربی- اوراسیا سبب تکامل فلات ایران شده است (Jackson and Mckenzie, 1984; McQuarri et al., 2003; Guest et al., 2007).

بیشتر روش‌های تحلیل تنش بر پایه فرضیه والاس- بوت (Wallace, 1951; Bott, 1959) بنا شده است که فرض می‌کند لغزش موازی تنش برشی روی صفحات‌ها گسلی رخ می‌دهد (Xu et al., 2016). با استفاده از این فرضیه، مفهوم نسبت محورهای اصلی به دست می‌آید و با مشخص کردن تنسور و نسبت تنش، شکل بیضوی تنش تعریف می‌شود. بر این اساس، روش‌های تحلیل تنش دیرینه برای تعیین جهت‌یابی و بزرگی محورهای تنش ایجاد و در چهار دهه اخیر روش‌های گرافیکی مختلف، توسط پژوهشگران ارائه شده است (Carey and Brunier, 1974; Etchecopar et al., 1981; Angelier, 1989; Armijo et al., 1982; Michael, 1984; Sperner et al., 1993; Delvaux and Sperner, 2003; Sha et al., 2003; Liesa and Lisle, 2004; Sha et al., 2004; Sippel et al., 2009; Kernstocková, and Melichar, 2009; Yamaji et al., 2011). با وجود محدودیت‌های موجود در تحلیل تنش دیرینه؛ از روش وارون‌سازی به منظور تعیین جایگاه زمین‌ساختی نواحی مختلف، در بسیاری از نقاط جهان استفاده شده است که بیشتر موفقیت‌آمیز بوده است (Nemcok and Lisle, 1995; Federico et al., 2014). از سوی دیگر روش وارون‌سازی برای بررسی اثرات پس از لغزش در امتداد گسل‌های فعال نیز به کار گرفته می‌شود که جهت‌یابی محورهای اصلی تنش به سازوکار اصلی گسل نزدیک است (Huang et al., 2015; Zallohar, 2015).

گستره مورد مطالعه بخشی از کمربند ماگمایی- رسوبی ارومیه- دختر در امتداد حاشیه جنوب باختری ایران مرکزی بوده که در طی دوره کوهزایی آلپین شکل گرفته است (Alavi, 2007; Berberian et al., 1982; شکل ۱- الف). از سوی دیگر گستره بخش شمال باختری کمان ماگمایی سنوزوئیک کرمان است که این کمان، در جنوب خاوری کمربند ماگمایی- رسوبی ارومیه- دختر جای گرفته و یکی از پهنه‌های مرتبط با فرورانش پوسته اقیانوسی نوتیس به زیر پوسته ایران مرکزی است (Dercourt et al., 1986). گستره مورد مطالعه، برگه‌های زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ شهر بابک، اتار و دهج (Dimitrijevic et al., 1971a, b and c) را در

از داده‌های لغزش گسلی است. کیفیت داده‌های گردآوری شده تأثیر مستقیم روی تحلیل تنش دارد (Hippolyte et al., 2012, Shan et al., 2006). از این رو سعی شد که در این مرحله، برداشت‌ها از واحدهای سنگی با سن‌های متفاوت صورت گیرد و در بیش از ۳۹ ایستگاه بیش از ۱۱۲۰ داده ساختاری گردآوری شد. اصلی‌ترین ساختار شکننده گردآوری شده داده‌های لغزش گسل (در حدود ۸۰۲ داده) هستند که این داده‌ها شامل جهت‌یابی سطوح گسلی، خط‌خس و نشانه‌های سوی حرکت است. سوی حرکت روی صفحه گسلی از نشانه‌های کینماتیکی مانند پله‌های کانی (بیشتر کلسیت و کوارتز)، اسلیکولیت، برش ریدل، اختلاف ارتفاعی نامتقارن مشخص شد. در جاهای ممکن، موقعیت لایه‌بندی برداشت شد؛ چرا که آنها یک کلید مهم برای بازسازی شکل‌های پیش از کج‌شدگی فراهم می‌آورند. از سوی دیگر رگه‌ها و ترک‌های کششی هم به عنوان ساختاری شکننده رخنمون در گستره برداشت شدند. در این مطالعه تحلیل تنش دیرینه داده‌های لغزش گسلی، که معمولاً چندمرحله دگرشکلی را شامل می‌شوند، توسط دو روش متفاوت و نرم‌افزار مختلف صورت گرفت. این دو روش اختلافات زیادی با هم دارند؛ اما هر دو این نگرش بر پایه معیار زوایه ناهمخوانی پایین و نسبت بالای تنش برشی به تنش عادی تعریف شده‌اند. به طوری که روش وارون‌سازی چندگانه (Multiple Inverse Method) بر پایه تحلیل خوشه‌ها توسط Nemcok et al. (1999)، Yamaji (2000a and b) و Yamaji and Sato (1995) که توسط MIM (Yamaji et al., 2005) و Sato and Yamaji (2006) و Yamaji et al. (2006) برای تحلیل تنش به این روش مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین روش لغزش چندگانه (Multiple Slip Method) توسط Zallohar and Vrabec (2007) به همراه مجموعه نرم‌افزار تجاری T-Tecto برای تحلیل تنش ارائه شده است. این روش سامانه‌های گسلی ناهمگن را به چند زیرسامانه همگن تقسیم می‌کند. از سوی دیگر تنسور تنش را برای هر مرحله تنش محاسبه می‌کند. این روش بر پایه روش سنتی وارون‌سازی داده‌های لغزش گسل (Angelier (1979, 1984) پایه‌گذاری شده است؛ به طوری که مفهوم بهترین تنسور تنش را دربر می‌گیرد.

مسئله معمول در تحلیل تنش دیرینه، در شمال شهر بابک، جداسازی تنسور تنش از داده‌ها با رفتار ناهمگن است. بدبختانه در گستره مورد مطالعه، داده‌های لغزش گسل کمتر همگن است و بیشتر یک الگوی پیچیده را نشان می‌دهند که نبود همگنی مکانیکی به زمین‌ساخت چند مرحله‌ای می‌انجامد. در چنین مواردی چندین تنسور تنش در ایستگاه‌ها به دست آمد و جداسازی زیردسته‌های همگن برای بازسازی میدان‌های تنش مختلف که با رویدادهای زمین‌ساختی شناخته‌شده سازگار باشند، صورت گرفت. فرایند جدایش معمولاً بر پایه ویژگی‌های مکانیکی و کینماتیکی گسل‌ها و در ارتباط با داده‌های سن‌سنجی زمین‌ساختی صورت می‌گیرد (Lacombe, 2012; Sperner and Zweigel, 2010).

به منظور بررسی توالی سنی وقایع شکننده، از معیارهای مختلفی از جمله روابط قطع‌شدگی (شکل‌های ۲-الف، ب و ج) و توالی خط‌خس دیده شده روی سطوح گسلی (شکل‌های ۲-د و ه) استفاده شد. از سوی دیگر در ایستگاه ۳۴ نمونه‌ای ارائه شده است که نشان می‌دهد فعالیت دوباره سامانه گسلی در دو مسیر مخالف صورت گرفته است (شکل ۲-و).

کج‌شدگی سامانه‌ای داده‌ها روی چینه‌های چین‌خورده امکان بازسازی حالات پیش از چین‌خوردگی را می‌دهد (Saintot and Angelier, 2000 and 2002; Navabpour and Barrier, 2012). در شمال شهر بابک، رابطه سنی میان گسلش و چین‌خوردگی یکی از مهم‌ترین موضوعات است؛ چون دوره‌های شکنندگی ممکن است پیش، همزمان و یا پس از رویداد چین‌خوردگی رخ داده باشد که می‌تواند بهترین بازسازی تنش را در تاریخ گستره ارائه دهد. به این منظور چینه‌های پیش از چین‌خوردگی کج شده تا توالی رویدادها دگرشکلی پیش و پس از چین‌خوردگی در ساختارهای شکننده مشخص شود. دگرشکلی پیش از چین‌خوردگی با صفحات

بخش شمال باختری استان کرمان پوشش می‌دهد و میان طول $30^{\circ}00'$ تا $31^{\circ}00'$ شمالی و عرض $54^{\circ}30'$ تا $55^{\circ}00'$ خاوری جای گرفته است (شکل ۱-ب). داده‌های GPS نرخ دگرختی پایین ($>2 \text{ mm/yr}$) را برای گستره نشان می‌دهد (Vernant et al., 2004; Vernant and Chery, 2006).

کهن‌ترین تشکیلات چینه‌شناسی گستره، فلیش‌های کرتاسه بالایی با توالی از بیومیکرایت، ماسه‌سنگ، مارن، سیلت‌سنگ و آهک هستند. از سوی دیگر در خاور گستره رخساره فلیشی اتوسن میانی با ترکیب آهک، ماسه‌سنگ و توف آندزیتی رخنمون دارد (Dimitrijevic, 1973). پس از پایان مرحله رسوب‌گذاری، فعالیت‌های آتشفشانی - رسوبی گسترده از اواسط اتوسن تا اوایل الیگوسن آغاز می‌شود که مهم‌ترین واحدهای زمین‌شناسی گستره مورد مطالعه را شکل می‌دهد. اولین مرحله به نام مجموعه رازک در دوره اتوسن میانی - پایانی (به سن تقریبی $42/4 \pm 2$ میلیون سال، بر پایه داده‌های سن‌سنجی $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ توسط Hassanzadeh (1993) شکل می‌گیرد که با ترکیب بازالت - ریولیت، جایگاه جزایر کماتی مرتبط با فرورانش را نشان می‌دهند (Ahmad and Posht Kahi, 1993; Shahabpour, 2007).

از اواخر اتوسن تا اواسط الیگوسن رخداد آتشفشانی به نام مجموعه هزار شکل می‌گیرد که مطابق سن‌سنجی‌های روش $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ سن این مجموعه $21 \pm 1/4$ میلیون سال برآورد شده است (Hassanzadeh, 1993) و از تراکی آندزیت و تراکی‌بازالت، توف ماسه‌ای سرخ با میان‌لایه‌های لاوا و آگلومرا تشکیل شده است.

از میوسن میانی تا پایانی فعالیت‌های آذرین نفوذی جای خود را به توده‌های گرانیتویدی نوع کوه‌پنج (McInnes et al., 2005) در اندازه استوک می‌دهند که توده‌ها تا سطوح کم ژرفای پوسته نفوذ کردند و بیشتر در بخش‌های مرکزی و شمال باختری جایگزین شدند که سن این توده‌ها به روش U-Pb $4 \pm 0/4$ تا $9/2 \pm 0/4$ میلیون سال برآورد شده است (McInnes et al., 2003) و جایگاه پس از برخورد را نشان می‌دهند (Shafiei and Shahabpour, 2008).

در زمان میوسن پایانی - پلیوسن مرحله جدیدی از فعالیت‌های آذرین رخ می‌دهد که بسیار متفاوت با دوره‌های پیش است. Dimitrijevic (1973) این فعالیت‌های آذرین را به دو گروه دهج، مزاحم تقسیم‌بندی کرد. به طوری که مخروط مرکب مزاحم به سن $8/4 \pm 0/8$ تا $6/4 \pm 0/8$ میلیون سال (Hassanzadeh, 1993) با فعالیت‌های انفجاری و ایجاد برش‌های آذرآواری و کنگلومرای آتشفشانی مشخص می‌شود که بیشتر از آندزیت‌های آلکالن و تراکی آندزیت تشکیل شده است. از سوی دیگر مخروط‌های گروه دهج با ترکیب آندزیت، داسیت، ریوداسیت و ریولیت به سن تقریبی $2/8 \pm 0/2$ تا $2/8 \pm 0/2$ میلیون سال (سن‌سنجی به روش $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ توسط Hassanzadeh, 1993) جوان‌ترین مخروط‌های آتشفشانی را تشکیل داده‌اند. در مراحل پایانی تکامل کمان ماگمایی، بالازدگی و فرسایش مناطق بالازده سبب برجای گذاشتن رسوبات تخریبی ستبر بادبزنی شکل در زمان پلیوسن در کنار این بالازدگی‌ها شده است. مجموعه‌های آتشفشانی - رسوبی کهن‌تر در عهد حاضر تحت تأثیر چین‌خوردگی، گسلش، فرسایش و تخریب قرار گرفتند و حوضه شکل گرفت (Dimitrijevic, 1973). به طوری که گستره به شکل ناقطیس است و نهشته‌های فلیشی هسته آن و توالی آتشفشانی - رسوبی یال‌های این چین‌خوردگی را شکل می‌دهند.

۳- تحلیل تنش

تحلیل زمین‌ساخت شکننده، اجازه بازسازی میدان‌های تنش دیرینه تأثیرگذار در هر گستره را می‌دهد (Navabpoure et al., 2007). مراحل تحلیل تنش دیرینه شامل گردآوری داده در صحرا، جدایش داده‌ها و شناخت سنی، محاسبه میدان تنش و رده‌بندی رویدادهاست. از این رو در این مقاله با تحلیل زمین‌ساخت شکننده از جمله وارون‌سازی تنسور تنش، توالی رویدادهای دگرشکلی شکل‌دهنده ساختارهای امروزی رمزگشایی شد.

۳-۱. داده‌ها و روش تفسیر

اولین مرحله در تحلیل تنش دیرینه گردآوری داده‌ها و محاسبه تنسور تنش با استفاده

مجزا ارائه شده است (شکل های ۶، ۷ و ۸). خلاصه‌ای از روند σ_1 در تنش فشاری و راستالغز و σ_3 در تنش کششی توسط نمودار گل‌سرخ در گوشه راست هر نقشه رسم شده است (شکل های ۶، ۷ و ۸).

۳-۲. تحلیل و بحث

رژیم‌های تنش راستالغز و فشاری که از تحلیل زمین‌ساخت‌شناسی در گستره مورد مطالعه به دست آمده‌اند؛ امکان بازسازی محور تنش σ_1 را می‌دهند (شکل ۶-۷). تحلیل سامانه‌ای داده‌های گردآوری شده یک تغییر مسیر تنش را در رژیم فشاری از N84E تا N-S نشان می‌دهد (شکل ۹-الف). این تغییر جهت گیری روند محوری σ_1 با کمی اختلاف در سامانه تنش راستالغز وجود دارد؛ به طوری که در شکل ۹-ب طیف تغییرات σ_1 نمایش داده شده است. در تحلیل تنش دیرینه در گستره شهر بابک، رژیم تنش کششی نیز تشخیص داده شده است که تحلیل مسیرهای مختلف تنش تعریف شده با محور σ_3 ، تغییر روند را نشان می‌دهند و در شکل ۹-ج تغییرات تدریجی محور σ_3 ارائه شده است.

جدایش داده‌ها بر پایه رژیم‌های مختلف تنش و روابط سنی‌شان نسبت به چینه‌ها، به تفکیک توالی رویدادهای تأثیرگذار در گستره کمک می‌کند. بررسی سن چینه‌ای ایستگاه‌هایی که داده‌ها در آن نقاط گردآوری شده‌اند، نشان می‌دهد که جوان‌ترین چینه‌ها، آتشفشانی‌های نوع دهج (ایستگاه‌های ۱۴ و ۳) به سن پلیستوسن (تقریباً ۲ میلیون سال) هستند که تنها میدان تنش دیرینه تأثیرگذار روند شمالی-جنوبی دارند. پس از آن آتشفشانی‌های کوه مزاحم (ایستگاه ۳۹) به سن پلیوسن (تقریباً ۷ میلیون سال) هستند و میدان‌های تنش فشاری و راستالغز با روند شمال شمال خاور- جنوب جنوب باختر روی آن دیده می‌شود و هیچ شواهدی از تأثیر میدان‌های تنش راستالغز و فشاری با σ_1 به روند شمال خاوری- جنوب باختری وجود ندارد. بررسی سن چینه‌ای ایستگاه‌ها نشان می‌دهد که واحدهای به سن میوسن تحت تأثیر رویداد شمالی خاوری بوده‌اند. از سوی دیگر رویداد خاوری- باختری بیشتر در واحدهای ائوسن و کرتاسه تأثیرگذار بوده‌اند. این رویداد در سازندهای جوان‌تر دیده نمی‌شود.

از سوی دیگر بررسی ارتباط تنسورهای تنش کششی با تغییرات سنی واحدهای سنگی در گستره مورد مطالعه نشان می‌دهد که این میدان تنش روی واحدهایی با سن پیش از میوسن تأثیرگذار بوده است.

مهم‌ترین موضوع در این مطالعه تشخیص رویدادهای تنش پیش، همزمان و پس از چین‌خوردگی است و در بیشتر موارد سن سنجی رویدادهای زمین‌ساختی با مشاهدات چینه‌شناسی درستی چندانی ندارد. اما در نواحی که لایه‌بندی کج‌شدگی مشخصی نشان می‌دهد؛ رویدادهای شکننده را می‌توان با توجه به چین‌خوردگی تعیین سن تقریبی کرد. از این رو مطالعه آماری ساختارهای شکننده بازسازی شده می‌تواند به درک بهتر رابطه میان میدان‌های مختلف تنش و چین‌خوردگی که در طی مزوزوییک- سنوزوییک ناحیه را تحت تأثیر قرار داده‌اند، کمک کند و این روش می‌تواند توالی احتمالی رویدادها و رابطه سنی میان زمین‌ساخت شکننده و تنش را مشخص کند. در این روش از انطباق روندهای اصلی تنش با روند چیره چین‌خوردگی استفاده می‌شود. از این رو در شکل های ۱۰-ب، ج و د نمودار گل‌سرخ تنش بیشینه (σ_1) به دست آمده از رژیم‌های فشاری و راستالغز به همراه مسیر عمود به روند چین‌خوردگی رسم شده است. در تحلیل آماری لایه‌بندی‌های گستره میانگین ۴۰ شمالی درجه برای مسیر عمود به روندهای چین (FST; the orthogonal direction to the fold trends) (شکل ۱۰-الف) مشخص شد. با انطباق روند میانگین FST با روند تنش بیشینه دو رویداد فشاری و راستالغز، توالی رویدادهای دگرشکلی به ترتیب زیر مشخص شد (شکل ۱۰-ه).

احتمالاً رویداد خاوری- باختری تا خاور شمال خاوری- باختر جنوب باختر با σ_1 به روند، N55E و N84E پیش از چین‌خوردگی در گستره تأثیرگذار بوده است. این رژیم که ۱۷ درصد کل داده‌های فشاری و راستالغز را شامل می‌شود به عنوان کهن‌ترین رویداد در ناحیه شناخته می‌شود و بر اثر عملکرد گسل‌های معکوس و

گسلی عمود به لایه‌بندی مشخص می‌شود. از سوی دیگر گسل‌های عادی در چینه‌های پرشیب بیشتر شواهدی بر دگرشکلی پیش از چین‌خوردگی هستند (شکل های ۳-الف، ب و ج).

در مطالعات صحرایی به منظور درک ساختاری سریع عناصر پیش و پس از چین‌خوردگی از معیارهای مختلفی استفاده شده است که این معیارها را می‌توان در مواردی که چینه‌ها به وضوح کج شده‌اند؛ استفاده کرد و بر پایه Navabpour et al. (2007) در جایی که چینه‌ها افقی مانده‌اند (یعنی در بالای تاق‌دیس)، با توجه به چین‌خوردگی نمی‌توان رابطه سنی را مشخص کرد.

از این روش شکل‌گیری خط‌خس موازی لایه‌بندی روی گسل‌های شیب‌دار عمود به لایه‌بندی شواهدی بر گسلش پیش از چین‌خوردگی است (شکل ۳-د)، اما خط‌خس افقی روی صفحات گسل نیمه عمودی با پسوندها به شیب چینه‌های کج شده بر فعالیت گسلش پس از چین‌خوردگی دلالت دارد (شکل ۳-ه) که این گسل‌ها چینه‌های چین‌خورده را قطع کرده‌اند. مثال‌هایی از هندسه چین در ایستگاه ۲۴ فراهم شده است (شکل ۳-و).

داده‌ها نشان می‌دهد که ساختارهای شکننده در طی چین‌خوردگی شامل لغزش وارون موازی با لایه‌بندی است. از سوی دیگر در مراحل پایانی چین‌خوردگی با زاویه شیب بالای چینه‌ای، گسل‌های معکوس به منظور پایداری معیار لغزش مکانیکی خلق می‌شوند. نمونه این اشکال فشاری که در مراحل آخر چین‌خوردگی ایجاد شده است در شکل ۳-ز دیده می‌شود.

قطع شدگی رگه‌ها توسط گسل شواهدی بر شکل‌گیری آنها پیش از گسلش است که در شکل ۴-الف نمونه‌ای ارائه شده است. از سوی دیگر در مطالعات صحرایی از موقعیت و شکل رگه‌ها استفاده شد که بیشتر موازی محور σ_1 گسترش می‌یابند و ارتباط آنها با چین‌خوردگی مشخص شد. بنا بر نظر Navabpour et al. (2007) رگه‌ها در دو هندسه مختلف نسبت به محور چین ایجاد می‌شوند. در زیردسته اول رگه عمود به محور چین است و به عنوان ساختار همزمان با چین‌خوردگی مورد تحلیل قرار می‌گیرد که در شکل ۴-ب نمونه‌ای از این ساختارها ارائه شده است. اما در زیردسته دوم رگه‌ها عمودی هستند و با محور چین زاویه حاده می‌سازند و به عنوان ساختارهای پس از چین‌خوردگی شناخته می‌شوند. در مشاهدات صحرایی در گستره شهر بابک نمونه‌ای از این دسته رگه‌ها در شکل ۴-ج ارائه شده است.

در طی پردازش وارون‌سازی، توسط نرم‌افزار T-Tecto فرایند جدایش اتوماتیک صورت گرفت تا آزمایش شود که این داده‌ها متعلق به یک رژیم دگرشکلی هستند و یا در توالی دگرشکلی ایجاد شده‌اند. دسته داده‌هایی با سطح بالای ناهمگنی با راه‌حل‌های ناپایدار منطبق هستند و شایستگی وارون‌سازی، به عنوان دسته‌های چندمرحله‌ای را دارند (Radaideh and Melichar, 2015). در ایستگاه ۶ نمونه‌ای ارائه شده است که نشان می‌دهد، افزایش ناهمگنی داده‌های وارون‌سازی، سبب تغییر در راه‌حل می‌شود (شکل ۴-د و ه). با بررسی داده‌ها، دو زیردسته گسل با میدان‌های تنش مختلف مشخص شده است. از سوی دیگر Yamaji (2000a and b) روش خوشه‌بندی را ارائه کرد. به طوری که راه‌حل‌های ارائه شده به عنوان خوشه در فضای متغیر چهاربعدی است. در مجموع، درستی هر تنسور تنش به وسیله چگالی خوشه نشان داده می‌شود.

در ادامه تحلیل، نتایج حاصل دو از نرم‌افزار با همدیگر مقایسه و بهترین تنسور تنش برای هر ایستگاه برآورد شد. به این ترتیب پالایش داده‌ها در سطح بالاتر صورت گرفت که احتمالاً به رژیم‌های تنش تأثیرگذار در گستره نزدیک‌تر هستند. از این رو در گستره مورد مطالعه با تحلیل سامانه‌ای داده‌های شکننده در بیش از ۳۹ ایستگاه، ۶۵ تنسور تنش برآورد شد که تغییر نوع رژیم و مسیر تنش را نشان می‌دهد (شکل ۵). از آنجایی که حالات تنش با اختلافات محورهای اصلی تنش مشخص می‌شود؛ تنش راستالغز از گسل‌های راست‌بر و چپ‌بر حاصل می‌شود؛ تنش فشاری از گسل معکوس به دست می‌آید؛ اما تنش کششی از رگه‌ها و گسل‌های عادی نتیجه می‌شود. بنابراین رژیم‌های تنش گوناگون با حالات مختلف محورهای تنش اصلی مشخص می‌شوند.

به منظور درک و رده‌بندی بهتر تغییرات تنش، تنسورهای تنش روی نقشه‌های

باختری، خاور شمال خاور- باختر جنوب باختر، شمال خاور- جنوب باختر، شمال خاور- جنوب باختر، شمال خاور- جنوب جنوب باختر و شمال- جنوب نشان داد که یک چرخش پادساعت‌گرد در مسیر فشارش نشان می‌دهند. احتمالاً این تغییرات در جهت‌گیری میدان تنش روی فعالیت سامانه گسل‌های راستالغز راست‌بر در گستره مؤثر بوده؛ از این رو در برخی ایستگاه‌ها شواهد فعالیت دوباره روی یک صفحه گسلی توسط توالی خط‌خش ثبت شده است (شکل ۲-ه).

در مطالعه پژوهشگران دیگر روی بخش‌های مختلف ایران مانند کپه‌داغ (Navabpour et al., 2006)، جنوب خاور زاگرس (Lacombe et al., 2006)، شمال باختر زاگرس (Navabpour et al., 2007) تغییر جهت‌یابی تنسور تنش در طول زمان گزارش شده است. به نظر می‌رسد، این تغییر در کنترل تغییرات مسیر همگرایی صفحه عربی نسبت به اوراسیا در زمان سنوزویک است. به طوری که بازسازی‌های زمین‌ساخت صفحه‌ای با استفاده از GPS توسط (McQuarri et al. (2003) و بازسازی‌های (Navabpour et al. (2007) یک تغییر را در مسیر حرکت صفحه عربی- اوراسیا با ارزش میانگین N30E در ۳۳ تا ۵۶ میلیون سال پیش، N25E در ۱۹ تا ۳۳ میلیون سال پیش، N9E در ۱۰ تا ۱۹ میلیون سال پیش و N5E در دست کم ۱۰ میلیون سال پیش نشان می‌دهد. در این مطالعه با تحلیل تنش دیرینه بر پایه زمین‌ساخت شکننده در گستره شهر بک چرخش پادساعت‌گرد در مسیر اصلی تنش فشاری در طول زمان کشف شد. از این رو تغییر مسیر تنش فشاری با پیشنهاد (McQuarri et al. (2003) از بازسازی زمین‌ساخت صفحه‌ای و تغییر مسیر مشابه دیده شده در دیگر بخش‌های ایران سازگار است. با توجه به حضور چرخش بلوکی در ایران مرکزی و تغییر مسیر همگرایی صفحه عربی- اوراسیا در طول زمان، شکل‌گیری عناصر ساختاری شکننده و چرخش در میدان تنش توجیه‌پذیر خواهد شد.

در ادامه تحلیل آماری تغییرات روند تنش با کج‌شدگی لایه‌ها به بررسی رژیم تنش کششی مؤثر در ناحیه پرداخته شده است که با مقایسه نمودار گل‌سرخ محور σ_3 با FSL موقعیت روابط زمانی میان ایجاد چین‌خوردگی و شکل‌گیری ساختارهای کششی مشخص شد. به طوری که به نظر می‌رسد که رژیم کششی شمالی- جنوبی و شمال باختری- جنوب خاوری پیش از رویداد چین‌خوردگی ایجاد شده است (شکل ۱۰-و). از سوی دیگر در بررسی‌های صحرائی شواهدی از عملکرد اولیه این رژیم پیش از سازوکار وارون بر روی یک صفحه گسل با دو نسل خط‌خش دیده شده است (شکل ۲-د). بنابراین تأثیر رژیم کششی پیش از عملکرد رژیم فشاری- برشی و ایجاد چین‌خوردگی است.

۴- نتیجه‌گیری

تحلیل تنش دیرینه با استفاده از عناصر زمین‌ساخت شکننده، در درک تکامل زمین‌ساخت و رویارویی عناصر ساختاری گستره مفید است. بازسازی زمین‌ساخت شکننده بر پایه شناخت رابطه میان توالی چین‌خوردگی و گسلس در گستره شهر بک نشان می‌دهد که سامانه‌های گسلی مختلف با رویداد دگرشکلی تأثیرگذار از اواخر مزوزویک- سنوزویک منطبق شده‌اند و تحلیل تنش دیرینه با استفاده از داده‌های لغزش گسلی تأثیر چیره زمین‌ساخت فشاری و راستالغز را نشان می‌دهد.

در گستره مورد مطالعه، با استفاده از تحلیل ساختار و تنش، انطباق توالی رویدادهای تنش دیرینه با سن چینه‌ها و مطالعه آماری، رابطه میان تنش و روند محور چین‌خوردگی مشخص شد. تنش خاوری- باختری تا خاور شمال خاور- باختری جنوب باختر با رژیم فشاری و راستالغز، کهن‌ترین رویدادهای مؤثر بر گستره هستند که این رویدادها پیش از چین‌خوردگی اصلی در گستره تأثیر و سنی پیش از اواخر میوسن دارند. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که مسیر تنش همزمان با چین‌خوردگی اصلی در اواخر میوسن- اوایل پلیوسن با روند تقریبی شمال خاوری- جنوب باختری ایجاد شده است. استمرار فرایند چین‌خوردگی و تغییر در روند تنش اصلی به شمال شمال خاور- جنوب جنوب باختر تا شمالی- جنوبی احتمالاً از اواسط پلیوسن شروع می‌شود و تا امروز ادامه دارد. رژیم تنش شمال شمال خاور تا جنوب جنوب باختر در

راستالغز ایجاد شده‌اند (شکل ۱۰-ه). در تحلیل آماری، روند میانگین σ_1 N39E برای دسته دیگری از تنسورهای تنش به دست آمد که انطباق این روند با میانگین FST در گستره نشان می‌دهد که این تنش احتمالاً همزمان با چین‌خوردگی در گستره تأثیرگذار بوده است. این میدان تنش دیرینه که ۲۵/۵ درصد داده‌های لغزش گسلی را شامل می‌شود؛ بیشتر توسط گسل‌های راستالغز ایجاد شده است. از این رو به نظر می‌رسد سازوکار برشی در شکل‌گیری چین‌خوردگی نقش مؤثری داشته است. در ادامه بررسی رابطه چین‌خوردگی و میدان‌های تنش در گستره مشخص شد که تنش‌های فشاری و راستالغز با روند N29E و N3E با تخصیص ۴۲ درصد از داده‌های برداشتی به خود، به عنوان میدان‌های تنش چیره پس از چین‌خوردگی در شکل‌گیری گستره تأثیر به سزایی داشته‌اند. در ایجاد میدان تنش N29E گسل‌های معکوس و راستالغز تقریباً تأثیر مساوی داشته‌اند؛ در حالی که ایجاد میدان تنش N3E در کنترل گسل‌های معکوس است. از این رو به نظر می‌رسد که دو رویداد فشاری با روندهای شمال شمال خاور- جنوب جنوب باختر و شمالی- جنوبی پس از چین‌خوردگی در گستره تأثیرگذار بوده است. در بازسازی تنسورهای تنش یک مسیر فشاری با روند شمال باختر- جنوب خاور با میانگین روند N147 مشخص شد که این داده‌ها هم‌روند با محور چین‌خوردگی در گستره هستند. این روند با تحلیل‌های موجود سازگار نیست و این میدان به صورت کلاسیک هنوز توصیف نشده است؛ اما به روشنی در ایستگاه‌های ۹، ۲۲ و ۲۵ دیده شده است (شکل ۶). (Navabpour et al. (2007) در مطالعات خود به این میدان تنش در زاگرس اشاره کرد و سن اوایل میوسن را برای این روند در نظر گرفت. (Lacombe et al. (2006) مسیر فشارش شمال باختری را به عنوان معمایی در زاگرس گزارش کرده‌اند. اگر چه جنبه‌های ناحیه‌ای فشارش شمال باختری هنوز مورد بحث باقی مانده است. تحلیل این میدان تنش که احتمالاً پیش از چین‌خوردگی شکل گرفته است؛ نیاز به مطالعه بیشتری در نواحی هم‌جوار دارد.

در ادامه مطالعه تنش دیرینه در گستره شهر بک سعی شده تا رابطه سنی میان رویدادهای تنش در دوره‌های متوالی مشخص شود. با توجه به پیشنهاد سن اواسط تا اواخر میوسن برای فرایند چین‌خوردگی در گستره توسط (Dimitrijevic (1973) به نظر می‌رسد که رویداد خاوری- باختری و خاور شمال خاور- باختر جنوب باختر پیش از میوسن تأثیرگذار بوده است. از سوی دیگر سنگ‌های کرتاسه تا الیگوسن تحت تأثیر این رویداد قرار گرفته‌اند. (McQuarri et al. (2003) در مطالعات خود همگرایی میان صفحه‌های عربی و اوراسیا را بیش از ۱۹ میلیون سال پیش برآورد کرده‌اند که این همگرایی می‌تواند شکل‌گیری تغییرات میدان تنش را توجیه کند.

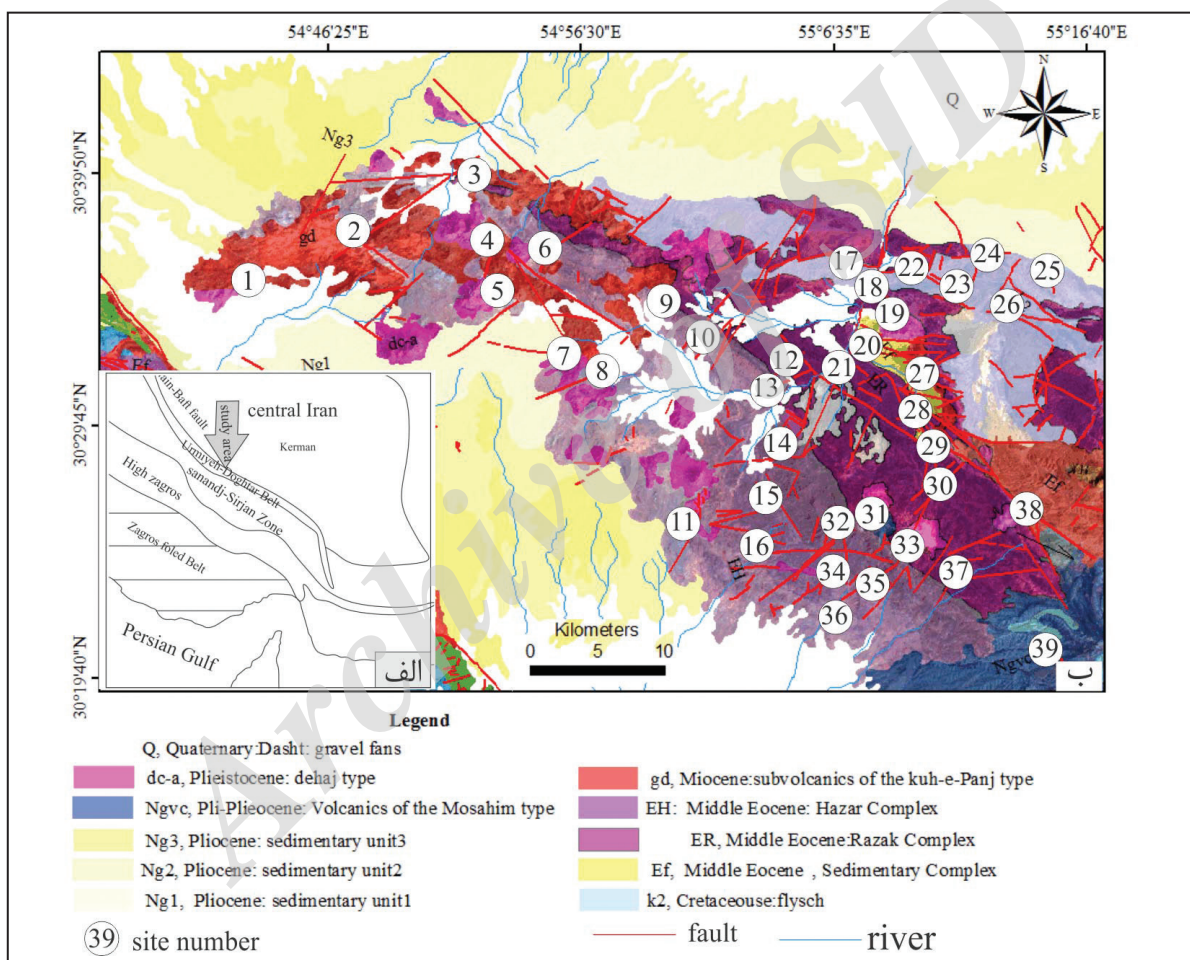
همزمان با فرایند چین‌خوردگی رویداد تنش فشاری و راستالغز با روند شمال خاور- جنوب باختر در گستره ظاهر می‌شود که با توجه به سن چین‌خوردگی این رویداد احتمالاً در اواخر میوسن رخ داده است. این زمان با کمی اختلاف با برخورد صفحه عربی به اوراسیا با مسیر شمال خاوری- جنوب باختری سازگار است. در ادامه مطالعات تحولات ساختاری و زمین‌ساختی در گستره مشخص شد که رویداد تنش با روند ۱۵ شمال شمال خاور- جنوب جنوب باختر در پلیوسن شکل گرفته است و می‌تواند شاهدهی بر ادامه همگرایی صفحه‌ها باشد. در پایان با توجه به اثرگذاری رویداد شمالی- جنوبی روی واحدهایی آتشفشانی به سن پلیستوسن، احتمالاً این رویداد به عنوان آخرین مرحله تأثیرگذار شناخته می‌شود. در مطالعات (Vernant et al. (2004) و (Vernant and Chery (2006) با استفاده از GPS و بازسازی‌های زمین‌ساختی توسط (McQuarri et al. (2003) یک رویداد فشاری با روند شمالی- جنوبی در عهد حاضر مشخص شد که این مرحله تنش با نتایج پژوهش‌های دیگر سازگار است.

بنابراین می‌توان پیشنهاد داد که رژیم فشاری N55E و N84E پیش از میوسن وجود داشته است و با فشارش N39E همزمان با چین‌خوردگی در اواخر میوسن- اوایل پلیوسن دنبال می‌شود. استمرار تغییرات تنش مؤثر بر تکامل گستره، با N29E در پلیوسن و در پایان تنش بیشینه با روند N3E در پلیستوسن شناخته می‌شود. بنابراین، می‌توان تغییرات روند σ_1 را از دید سنی (از قدیم به جدید) به صورت خاوری-

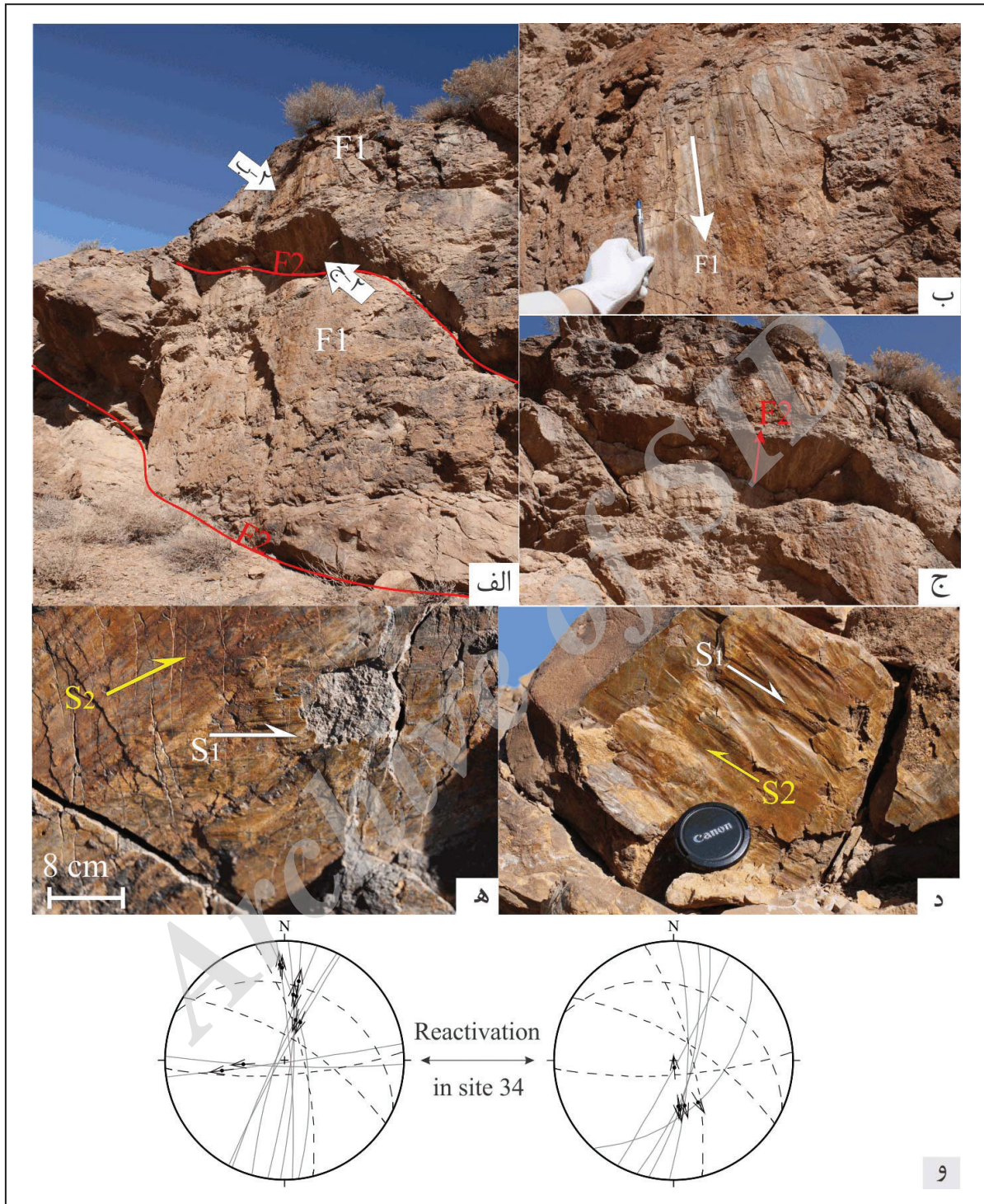
قضاوت در مورد این رویداد وجود ندارد. رویداد شمال باختری را نمی‌توان به ساختارهای تحلیل شده در گستره، ارتباط داد و احتمالاً با ساختارهای دیگر مرتبط است. در گستره مورد مطالعه، بازسازی سامانه‌ای رژیم زمین‌ساخت شکننده چرخش پادساعت‌گرد را در مسیر اصلی تنش فشاری در طول زمان نشان می‌دهد. احتمالاً چرخش بلوکی در ایران مرکزی و تغییر مسیر همگرایی صفحه عربی نسبت به اوراسیا تغییر روند تنش بیشینه را در طول زمان کنترل کرده‌اند. این تغییر، شباهت زیادی با مشاهدات نگارندگان مختلف در دیگر بخش‌های ایران دارد.

اواسط پلیوسن تکامل گستره را کنترل کرده و تنش شمال-جنوبی از زمان پلیستوسن و پس از چین‌خوردگی در گستره تأثیرگذار بوده به عنوان یک رژیم تنش راست‌الغز و فشاری در تکامل گستره نقش داشته است.

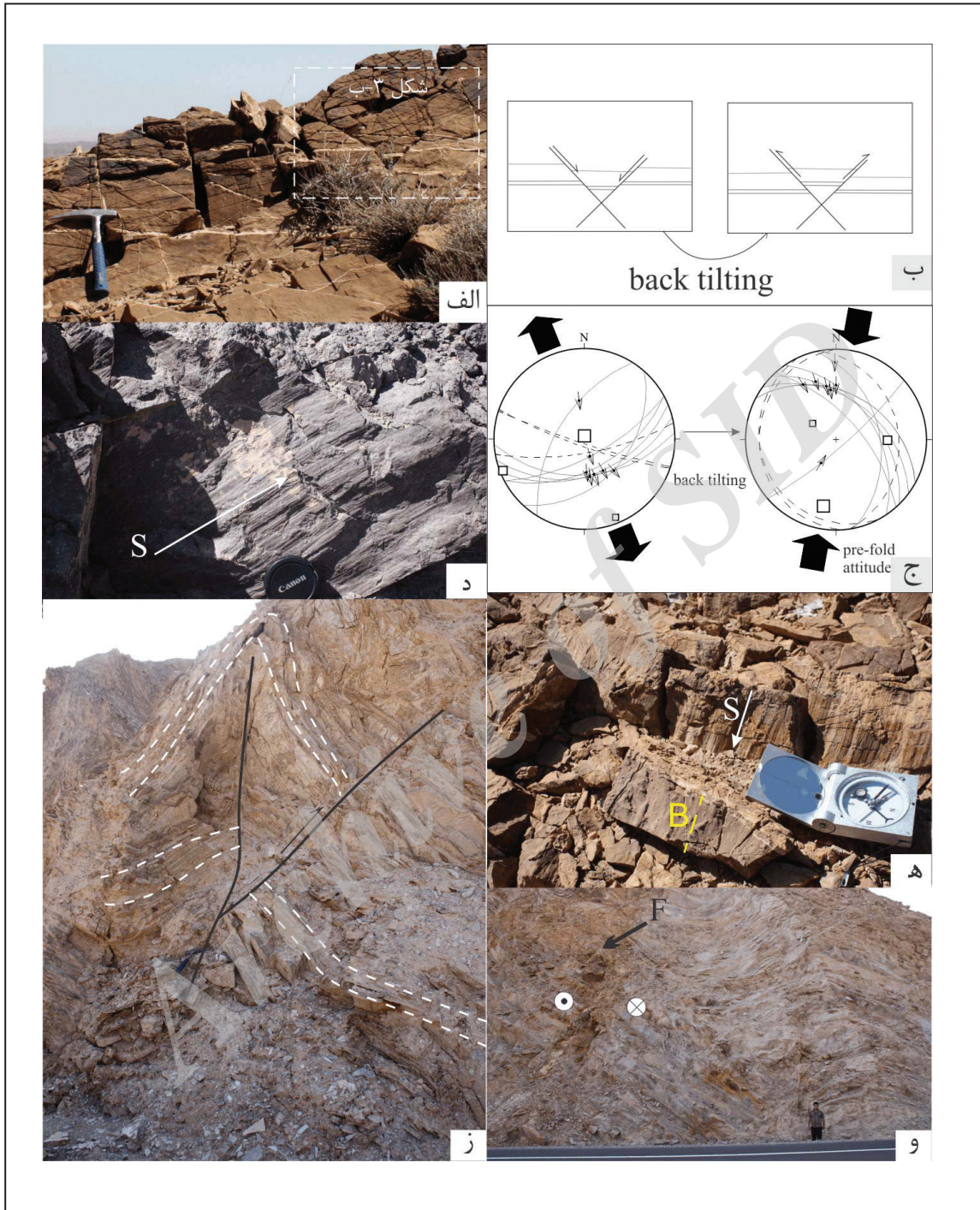
در برخی از ایستگاه‌ها، رژیم فشاری با روند شمال باختری-جنوب خاوری شناخته شده که تقریباً موازی با محور چین‌خوردگی در ناحیه است و به نظر می‌رسد که این میدان تنش پیش از رویداد چین‌خوردگی شکل گرفته باشد. از آنجایی که دانش کمی در مورد این میدان تنش وجود دارد و با توجه به روند خاص آن نسبت به ساختارهای گستره اجازه



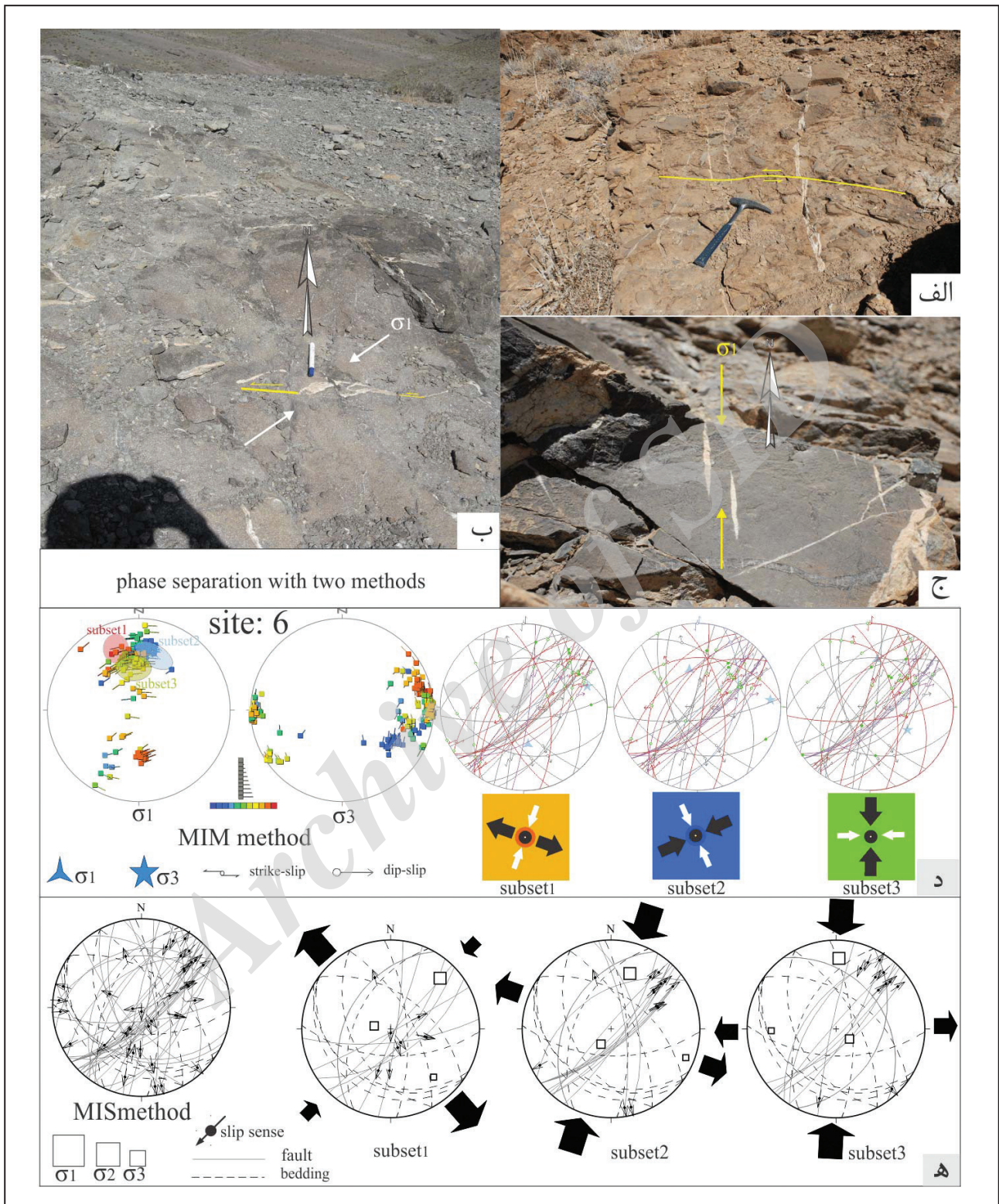
شکل ۱- الف) موقعیت گستره در زمین‌شناسی ایران؛ ب) نقشه زمین‌شناسی گستره برگرفته از Dimitrijevic et al. (1971. a, b and c) به همراه موقعیت ایستگاه‌های برداشت صحرائی.



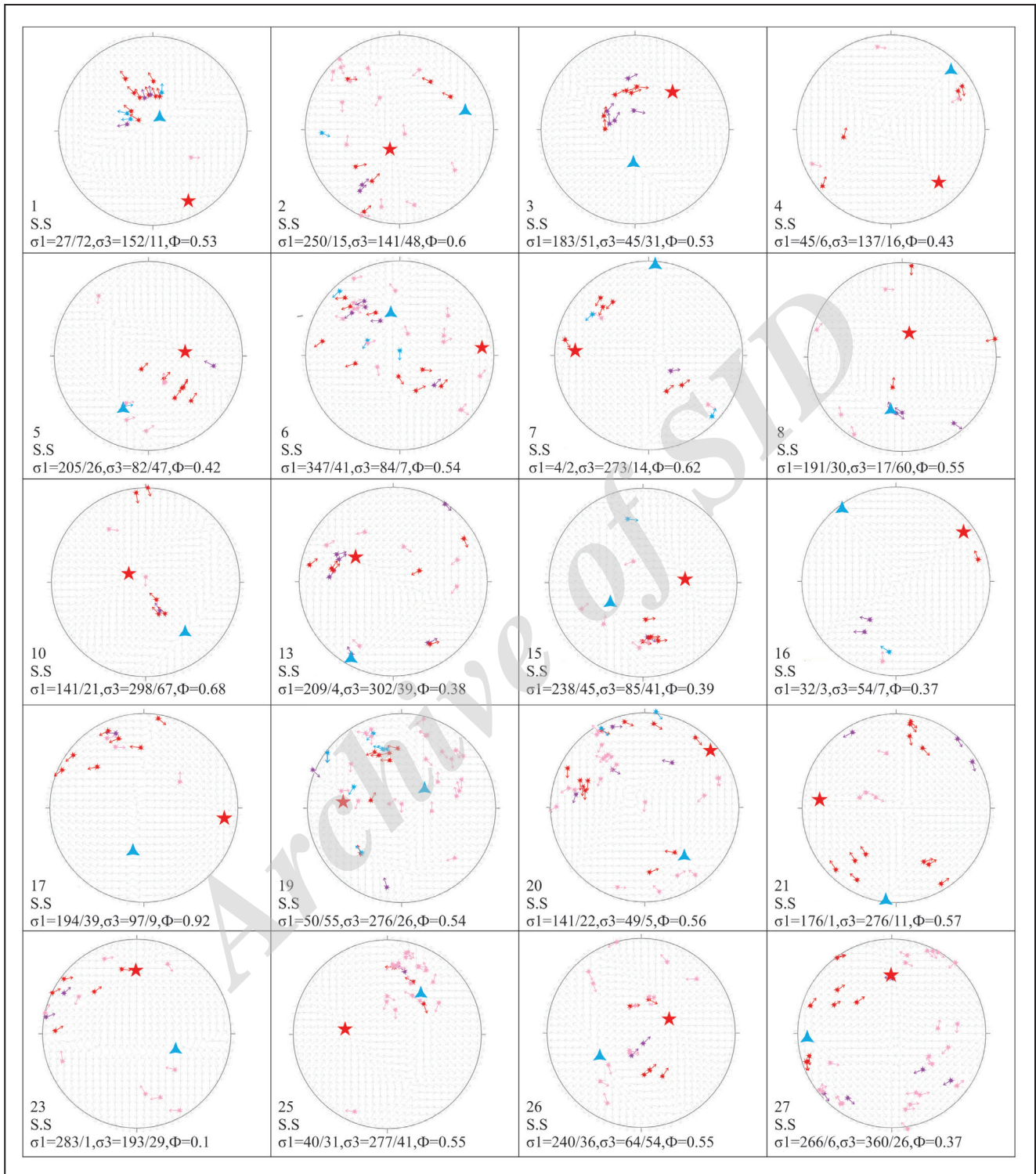
شکل ۲- الف) روابط قطع‌شدگی دو صفحه گسل در واحدهای فلیشی ایستگاه ۲۰. دید به سوی شمال خاور؛ ب) نمای بزرگ‌تر گسل نسل اول با سازوکار عادی؛ ج) نمای بزرگ‌تر گسل نسل دوم، سازوکار معکوس؛ د) قطع‌شدگی دو خط خش روی یک صفحه گسلی. نسل اول حرکت عادی و نسل دوم حرکت معکوس را نشان می‌دهد. دید به سوی شمال خاور؛ ه) قطع‌شدگی دو خط خش روی یک صفحه گسلی، نسل اول حرکت راست‌الغز راست‌بر و نسل دوم حرکت معکوس را نشان می‌دهد. دید به سوی شمال؛ و) تحلیل فعالیت دوباره گسل‌های با استفاده از نرم‌افزار T-Tecto در ایستگاه ۳۴.



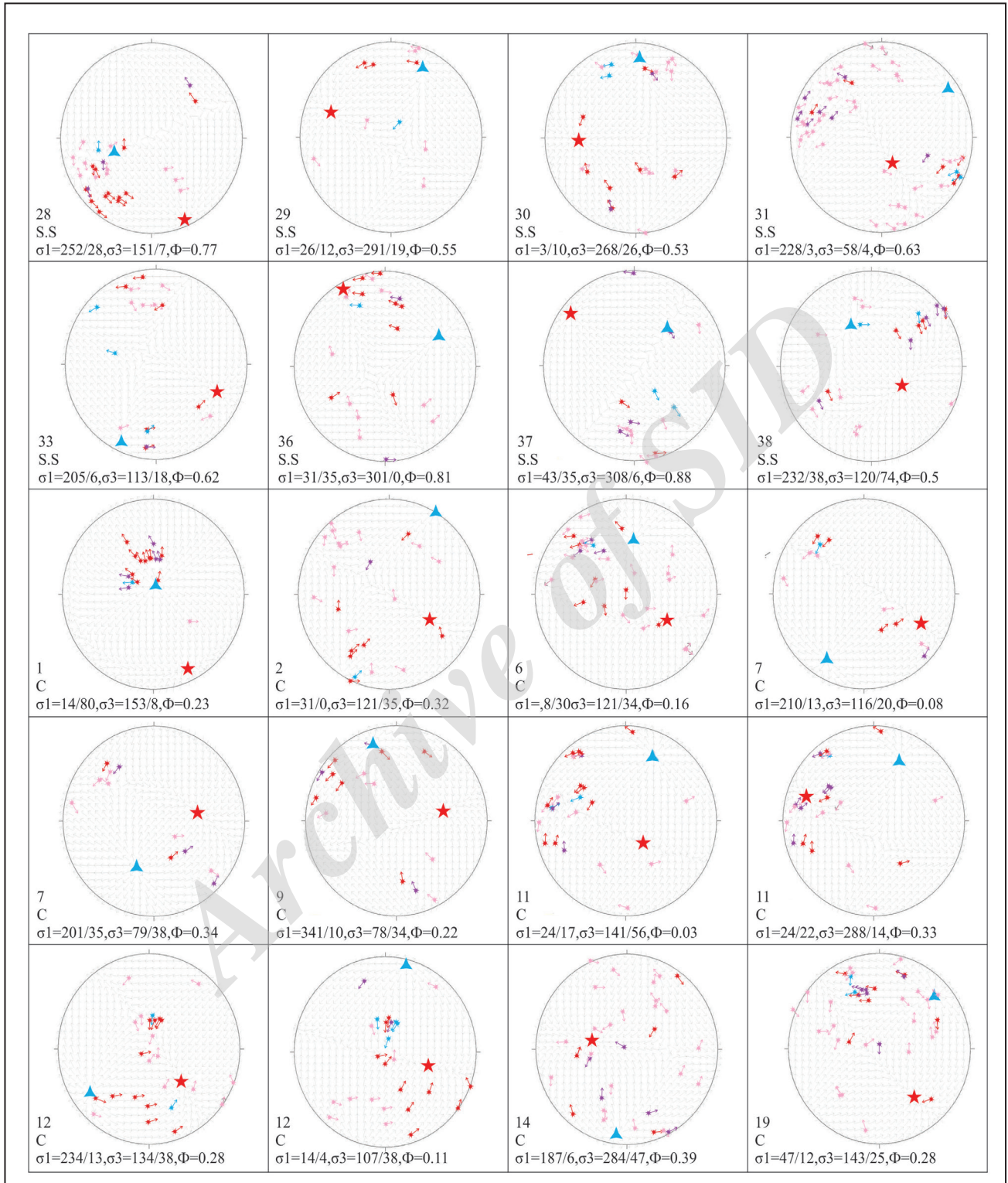
شکل ۳- الف) شکستگی‌های مزدوج روی سطح لایه‌بندی در واحدهای فلیشی کرتاسه در ایستگاه ۱۷. دید به سوی شمال باختر؛ ب) نمایش نمادین شکل الف، به طوری که سازوکار گسل مزدوج پس از چین خوردگی به صورت عادی است؛ ج) تغییر میدان تنش پس از چرخش لایه‌بندی؛ د) لغزش پیش از چین خوردگی در واحدهای آتشفشانی در ایستگاه ۳۰، دید به سوی جنوب باختر؛ ه) لغزش همزمان با چین خوردگی در واحدهای آهکی در ایستگاه ۱۸، دید به سوی باختر؛ و) گسل راست‌الغز پس از چین خوردگی در ایستگاه ۲۴، دید به سوی خاور؛ ز) شکل‌گیری گسلش پس از چین خوردگی در هسته چین، در ایستگاه ۲۰، دید به سوی شمال.



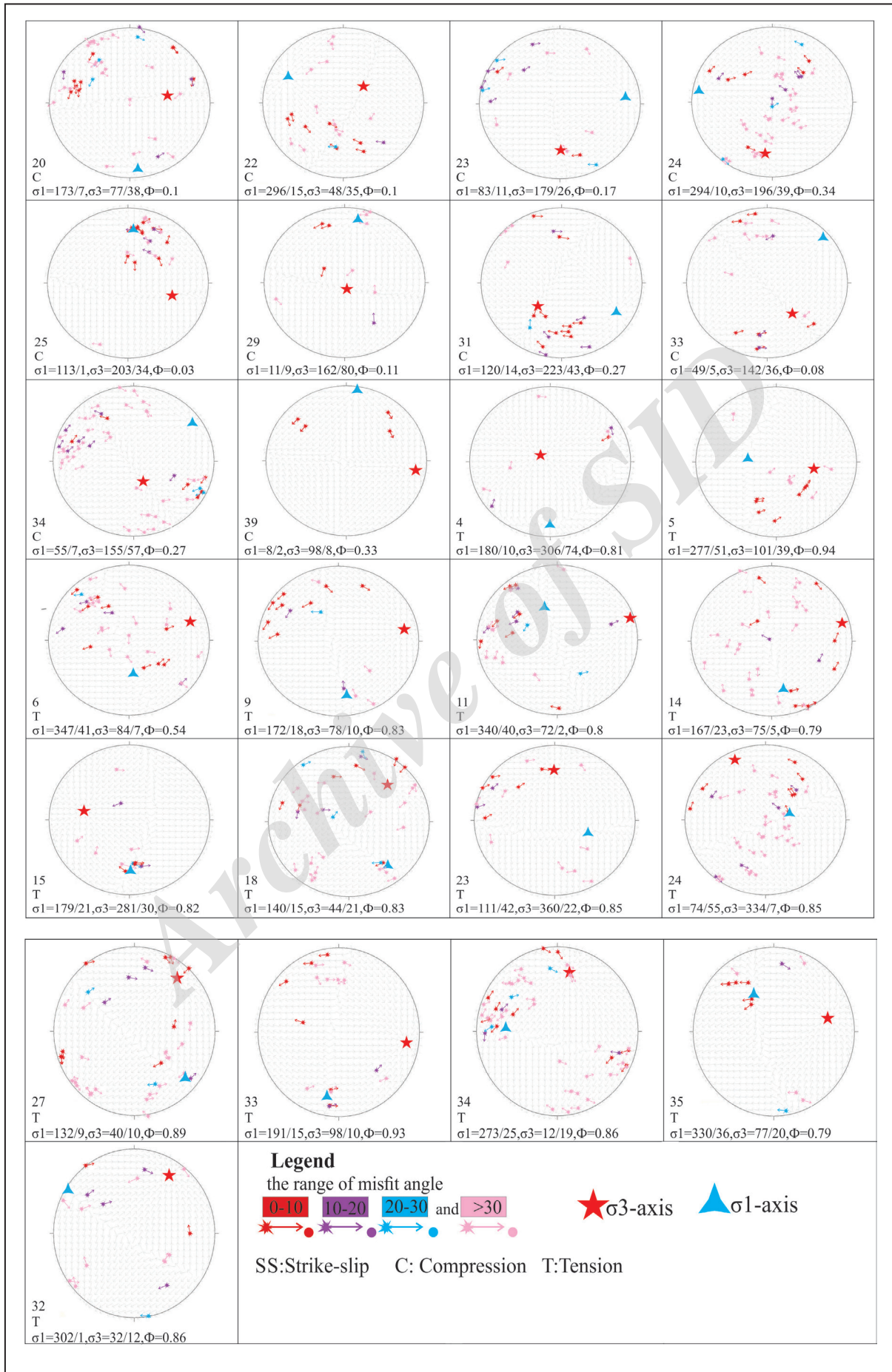
شکل ۴- الف) جابه‌جایی رگه در ایستگاه ۳۸ توسط گسل که شهادی بر شکل‌گیری گسلش پس از رگه است. دید به سوی خاور؛ ب) شکل‌گیری رگه سیگموئیدال شکل که برای تعیین سوی تنش بیشینه همزمان با چین‌خوردگی، استفاده شده است در ایستگاه ۱۲. دید به سوی شمال؛ ج) استفاده از رگه برای تعیین سوی تنش بیشینه پس از چین‌خوردگی، در ایستگاه ۳۲. دید به سوی خاور. د و ه) جدایش تنسورهای تنش با دو روش متفاوت در ایستگاه ۶؛ در شکل د روش خوشه‌بندی با متد وارون‌سازی چندگانه ارائه شده که توسط نرم‌افزار MIM تحلیل شده است؛ در حالی که در شکل ه نتایج حاصل از تحلیل داده‌ها در ایستگاه ۶ با استفاده از نرم‌افزار T-Tecto نمایش داده شده که بر پایه متد لغزش چندگانه تعریف شده است.

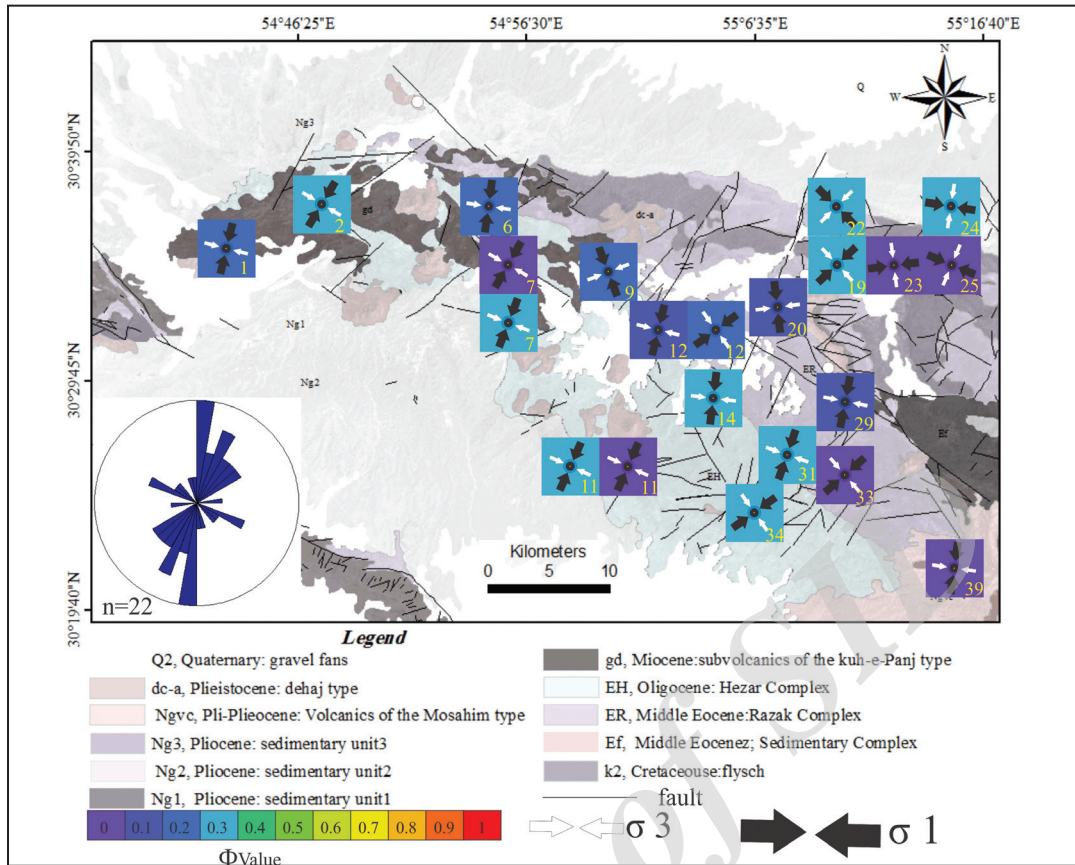


شکل ۵- تحلیل تنش داده‌های صحرایی با استفاده از نرم‌افزار MIM در ۳۹ ایستگاه و ایجاد ۶۵ تنسور تنش. نتایج حاصل از تحلیل بر پایه نوع تنش به راستالغز (S.S)، فشاری (C) و کششی (T) تفکیک شده‌اند. اعداد ردیف اول شماره ایستگاه‌های برداشتی را نشان می‌دهند.

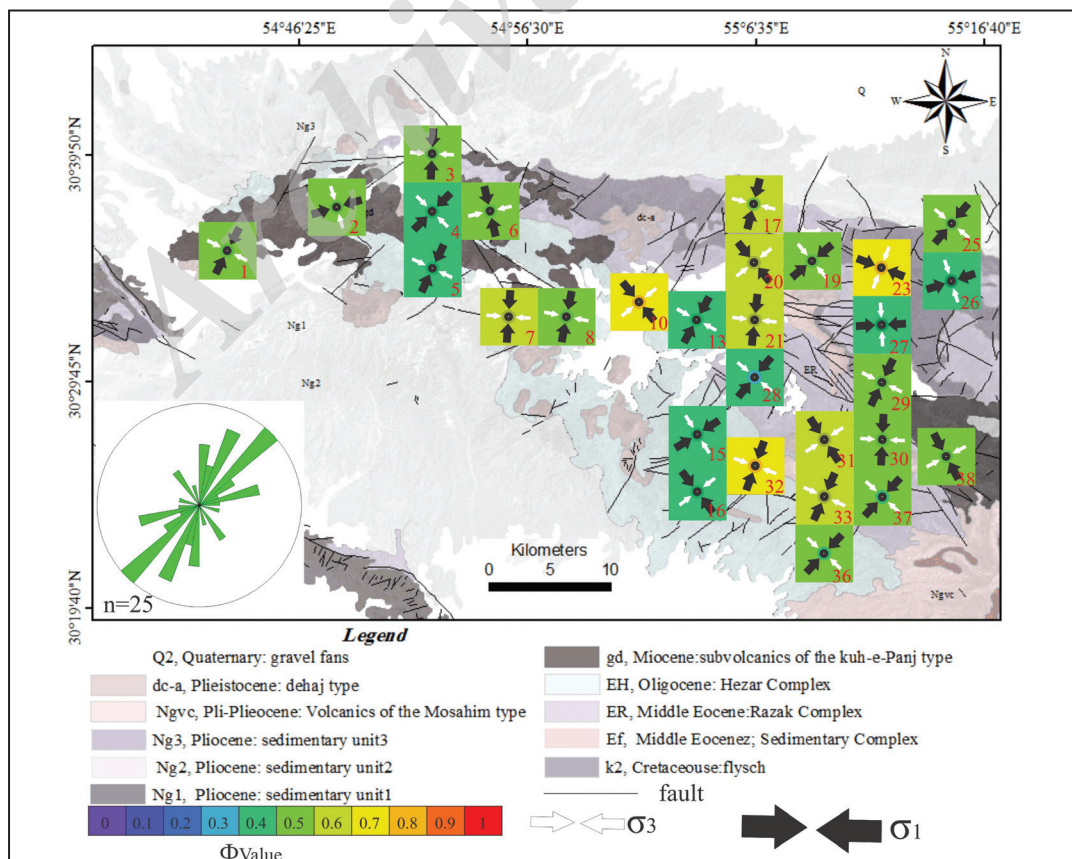


ادامه شکل ۵

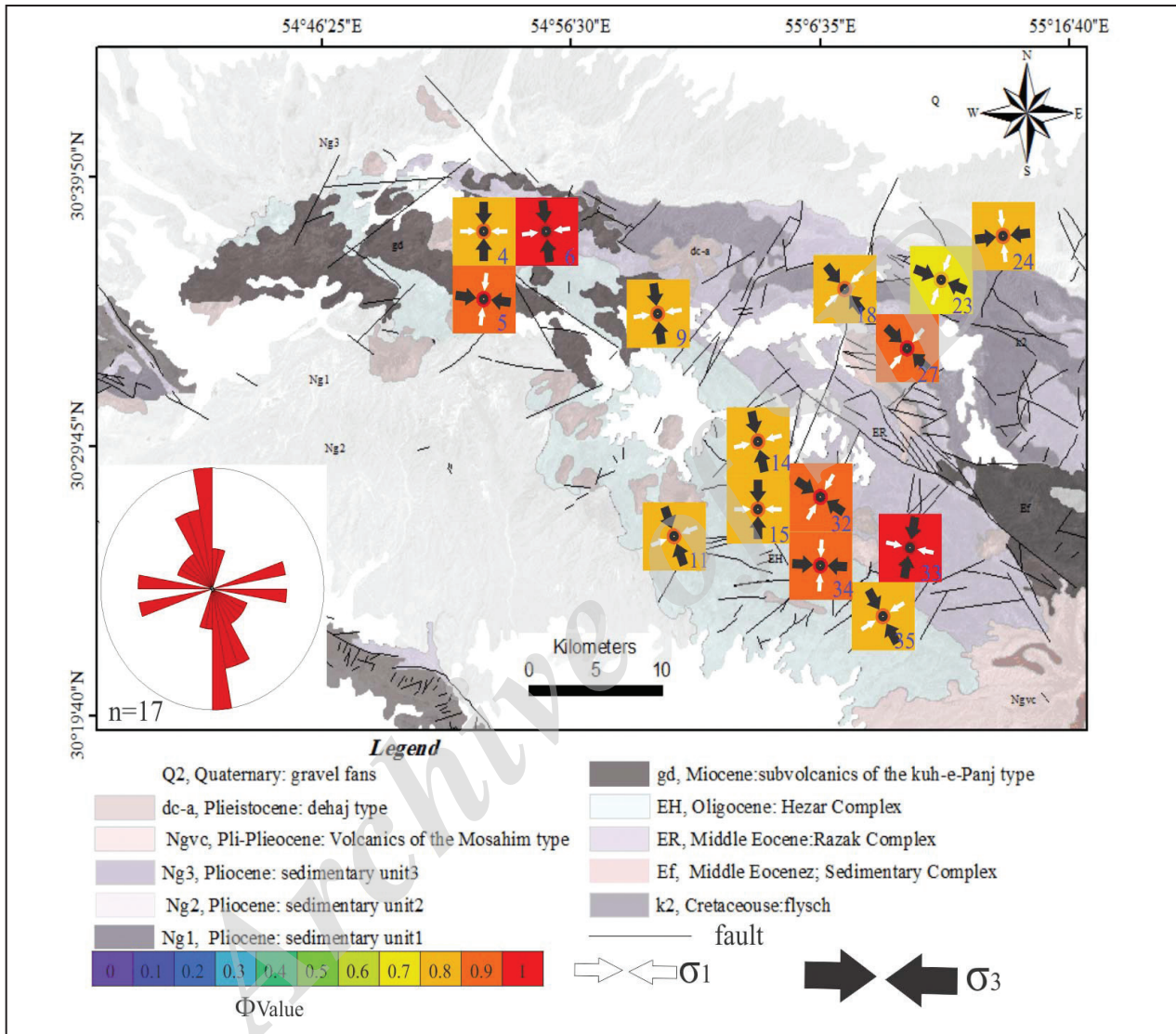




شکل ۶- نقشه پراکندگی تنشورهای تنش فشاری در گستره مورد مطالعه به همراه نمودار گل سرخی σ_1 تنشورهای فشاری به دست آمده در گوشه چپ نقشه.

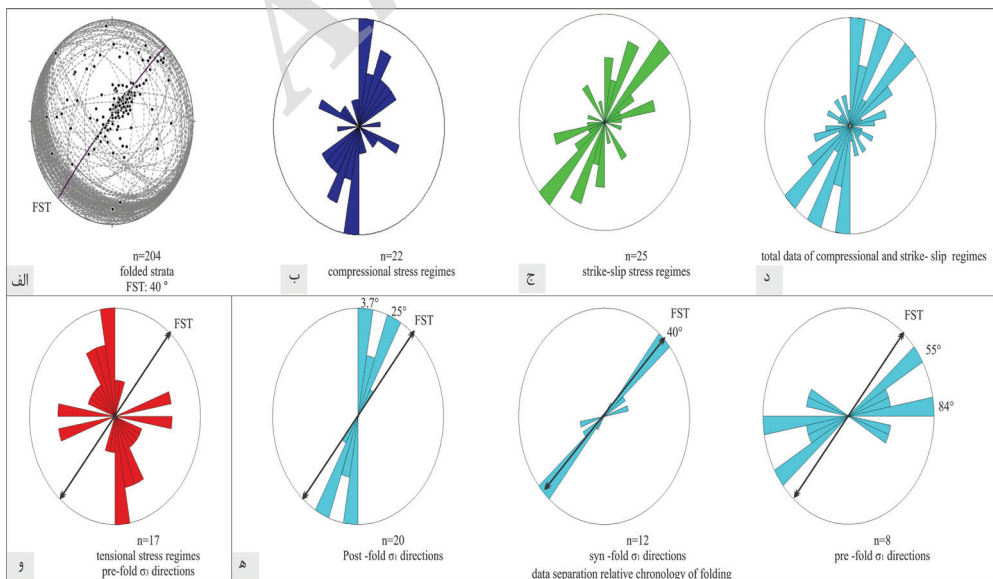
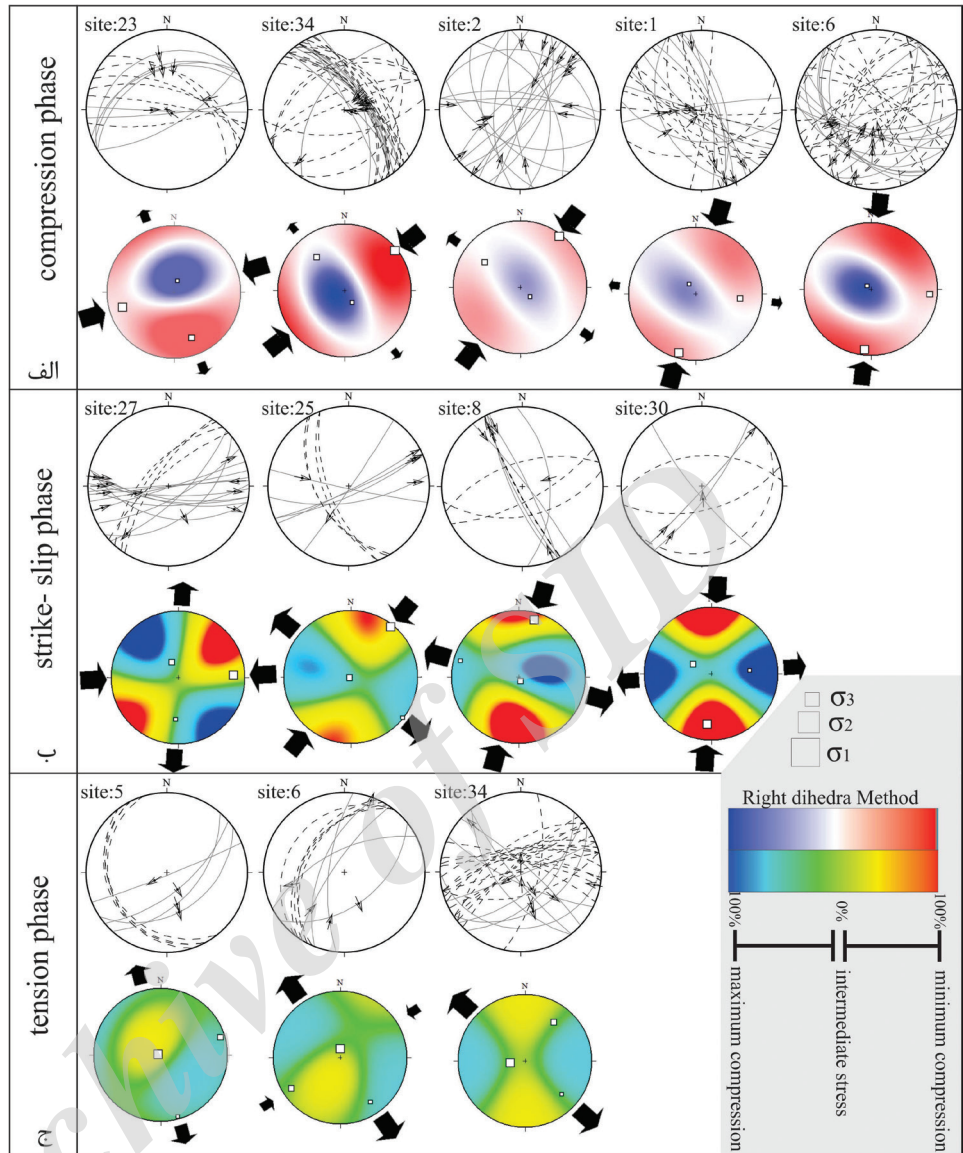


شکل ۷- نقشه پراکندگی تنشورهای تنش راستالغز در گستره مورد مطالعه به همراه نمودار گل سرخی σ_1 تنشورهای راستالغز به دست آمده در گوشه چپ نقشه.



شکل ۸- نقشه پراکندگی تنش‌های تنش کششی در گستره مورد مطالعه به همراه نمودار گل سرخی σ_3 تنسورهای کششی به دست آمده در گوشه چپ نقشه.

شکل ۹- الف) تغییر روند تنش فشاری در گستره؛
 ب) نمایش تغییرات جهت‌گیری σ_1 در تنش
 راست‌الغز؛ ج) جهت‌گیری‌های متفاوت σ_3 در گستره
 در طول زمان. ردیف اول در هر گروه موقعیت
 گسل و لایه‌بندی را نشان می‌دهد. در ردیف دوم
 نتایج حاصل از تحلیل داده‌ها با متد دست راست
 نمایش داده شده است.



شکل ۱۰- الف) لایه‌بندی‌ها در گستره
 و موقعیت مسیر عمود به روندهای
 چین (FST; the orthogonal di-
 rection) to the fold trends
 ب) نمودار گل سرخی σ_1 در تنش فشاری؛
 ج) نمودار گل سرخی σ_1 در تنش راست‌الغز؛
 د) نمودار گل سرخی σ_1 هر دو تنش
 فشاری و راست‌الغز؛ ه) جدایش میدان‌های
 تنش با توجه به موقعیت‌شان نسبت به FST؛
 و) نمودار گل سرخی σ_3 در تنش کششی
 و انطباق آن با FST

References

- Ahmad, T. and Posht Kuhi, M., 1993- Geochemistry and petrogenesis of Urumiah–Dokhtar volcanic belt around Nain and Rafsanjan area; a preliminary study: treatise on the geology of Iran. Iranian Ministry of Mines and Metals, p 90.
- Alavi, M., 2007- Structures of the Zagros fold-thrust belt in, *American Journal of Science*, 307: 1064–1095.
- Angelier, J., 1979- Determination of the mean principal directions of stress for a given fault population. *Tectonophysics*, 56: T17-T26.
- Angelier, J., 1984- Tectonic analysis of fault slip data sets. *Journal of Geophysical Research*, 89: 5835-5848.
- Angelier, J., 1989- From orientation to magnitudes in paleostress determinations using fault slip data. *Journal of Structural Geology*, 11:37-50.
- Angelier, J., 1994- Fault slip analysis and paleostress reconstruction. In: Hancock, P.L. (Ed.), *Continental Deformation*. Pergamon, Oxford, pp. 101–120.
- Armijo, R., Carey, E. and Cisternas, A., 1982- The inverse problem in microtectonics and the separation of tectonic phases. *Tectonophysics*, 82: 145-160.
- Berberian, F., Muir, I. D., Pankhurst, R. J. and Berberian, M., 1982- Late Cretaceous and early Miocene Andean type plutonic activity in northern Makran and central Iran. *Journal of Geological Society of London*, 139: 605–614.
- Bott, M. H. P., 1959- The mechanisms of oblique slip faulting. *Geological Magazine*, 96: 109-117.
- Carey, E. and Brunier, B., 1974- Analyse théorique et numérique d'un modèle mécanique élémentaire appliqué à l'étude d'une population de failles. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris D279*, 891-894.
- Delvaux, D. and Sperner, B., 2003- Stress tensor inversion from fault kinematic indicators and focal mechanism data: the TENSOR program. In: Nieuwland, D. (Ed.), *New Insights into Structural Interpretation and Modelling*. Geological Society London, Special Publications, 212: 75–100.
- Dercourt, J., Zonenshain, L., Ricou, L. E., Kazmin, G., LePichon, X., Knipper, A. L., Grandjacquet, C., Sbertshikov, I. M., Geysant, J., Lepvrier, C., Pechersky, D. H., Boulin, J., Sibuet, J. C., Savostin, L. A., Sorokhtin, O., Westphal, M., Bazhenov, M. L., Lauer, J. P. and Biju-Duval, B., 1986- Geological evolution of the Tethys belt from the Atlantic to Pamirs since the Lias. *Tectonophysics*, 123:241–315.
- Dimitrijevic, M. D., 1973- Geology of the Kerman region. Geological Survey of Iran, Report, 52: 334p.
- Dimitrijevic, M. D., Dimitrijevic, M. N. and Diordjevic, M., 1971a- Geological map of Anar (sheet no. 7051, scale: 1/100,000). Geological Survey of Iran.
- Dimitrijevic, M. D., Dimitrijevic, M. N. and Diordjevic, M., 1971b- Geological map of Dehaj (sheet no. 6951 scale: 1/100,000). Geological Survey of Iran.
- Dimitrijevic, M. D., Dimitrijevic, M. N. and Diordjevic, M. 1971c- Geological map of shaher-e-Babak (sheet no. 7050, scale: 1/100,000) Geological Survey of Iran.
- Etchecopar, A., Vasseur, G. and Daigniers, M., 1981- An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensors from fault striation analysis. *Journal of Structural Geology*, 3:51-65.
- Federico, L., Crispini, L., Vigo, A. and Capponi, G., 2014- Unravelling polyphase brittle tectonics through multi-software fault-slip analysis: the case of the Voltri Unit Western Alps (Italy). *Journal of Structural Geology*, 175–193.
- Glennie, K. W. 2000- Cretaceous tectonic evolution of Arabia's eastern plate margin: A tale of two oceans, in *Middle East models of Jurassic/Cretaceous carbonate systems*. SEPM (Society for Sedimentary Geology) special public, 69: 9-20.
- Guest, B, Guest, A. and Axen, G. J., 2007- Continental and oceanic lithosphere in mutual compression: lithospheric buckling as a mechanism for uplift and subsidence in northern Iran and the south Caspian. *Global and Planetary Change*, 58: 435-53.
- Hassanzadeh, J., 1993- Metallogenic and tectono-magmatic events in the SE sector of the Cenozoic active continental margin of Iran (Shahre- Babak area, Kerman province). Unpublished Ph.D. thesis, University of California, Los Angeles, p 204.
- Hippolyte, J. C., Bergerat, F., Gordon, M. B., Bellier, O. and Espurt, N., 2012- Keys and pitfalls in mesoscale fault analysis and paleostress reconstructions, the use of Angelier's methods. *Tectonophysics*: 581, 144–162.
- Hooper, R. J., Baron, I., Hatcher, R. D. and Agah, S., 1994- The development of the southern Tethyan margin in Iran after the break-up of Gondwana- Implications for the Zagros hydrocarbon province. *Geoscience (Geological Survey of Iran)*: 4, 72-85.
- Huang, X., Shi, W., Chen, P. and Li, H., 2015- Superposed deformation in the Helanshan Structural Belt: Implications for Mesozoic intercontinental deformation of the North China Plate. *Journal of Asian Earth Sciences*, 114: 140–15.
- Jackson, J. and McKenzie, D., 1984- Active tectonics of the Alpine–Himalayan Belt between western Turkey and Pakistan. *Geophysical Journal Review Astros Society*, 77: 185–264.
- Jaeger, J. C. and Cook, N. G. W., 1969- *Fundamentals of Rock Mechanics*. Methuen, London. 250 p.
- Kernstocková, M. and Melichar, R., 2009- Numerical paleostress analysis the limits of automation, *Trab. Geol.*, 29:399–403.
- Lacombe, O., 2012- Do fault slip data inversions actually yield “paleostresses” that can be compared with contemporary stresses? A critical discussion, *C. R. Geoscience*, 344: 159–173.
- Lacombe, O., Mouthereau, F., Kargar, Sh. and Meyer, B., 2006- Late Cenozoic and modern stress fields in the western Fars (Iran): implications for the tectonic and kinematic evolution of central Zagros. *Tectonics*, 25: TC1003. Doi: 10.1029/2005TC001831.
- Liesa, C. L. and Lisle, R. J., 2004- Reliability of methods to separate stress tensors from heterogeneous fault-slip data. *Journal of Structural Geology*, 26: 559–572.
- McInnes, B. I. A., Evans, N. J., Belousova E. and Griffin, W. L., 2003- Porphyry copper deposits of the Kerman belt, Iran: timing of mineralization and exhumation processes. *CSIRO Sci. Res. Rep.* 41.
- McInnes, B. I. A., Evans, N. J., Fu, F. Q. and Garwin, S., 2005- Application of thermo chronology to hydrothermal ore deposits. *Review Mineral Geochemist* 58:467–498.

- McQuarri, N., Stock, J. M. M., Verdel, C. and Wernicke, B. P., 2003- Cenozoic evolution of Neotethys and implications for the causes of plate motions. *Geophysics Research Letters*, 30: 20-23.
- Michael, A. J., 1984- Determination of stress from slip data: faults and folds. *Journal of Geophysical Research*, 89: 11517-11526.
- Navabpour, P., and Barrier, E., 2012- Stress states in the Zagros fold-and-thrust belt from passive margin to collisional tectonic setting. *Tectonophysics*, 581: 76–83.
- Navabpour, P., Angelier, J. and Barrier, E., 2007- Cenozoic post-collisional brittle tectonic history and stress reorientation in the High Zagros Belt (Iran, Fars Province) *Tectonophysics*, 432: 101–131.
- Navabpour, P., Heydarzadeh, Gh., Mafi, A., Sheikholeslami, M. R. and Haghypour, N., 2006- A preface to the paleostress reorientations in the Kopet-Dagh after Triassic. *Geosci. J. Geol. Surv. Iran* 15 (59), 176–183 (in Farsi).
- Nemcok, M. and Lisle, R. J., 1995- A stress inversion procedure for polyphase fault/slip data sets. *Journal of Structural Geology*, 17: 1445-1453.
- Nemcok, M., Kovac, D. and Lisle, R. J., 1999- A stress inversion procedure for polyphase calcite twin and fault/slip data sets. *Journal of Structural Geology*, 21: 597-611.
- Radaideh, O. M. A. and Melichar, R., 2015- Tectonic paleostress fields in the southwestern part of Jordan: New insights from the fault slip data in the southeastern flank of the Dead Sea Fault Zone, *Tectonics*, 34, doi: 10.1002/2015TC003919.
- Richards, J. P., 2003- Tectono-Magmatic Precursors for Porphyry Cu-(Mo-Au) Deposit Formation. *Economic Geology*, 98: 1515-1533.
- Saintot, A. and Angelier, J., 2000- Plio-Quaternary paleostress regimes and relation to structural development in the Kertch-Taman peninsulas (Ukraine and Russia). *Journal of Structural Geology*, 22: 1049–1064.
- Saintot, A. and Angelier, J., 2002- Tectonic paleostress fields and structural evolution of the NW-Caucasus fold-and-thrust belt from Late Cretaceous to Quaternary. *Tectonophysics*, 357:1–31.
- Sato, K. and Yamaji, A., 2006- Embedding stress difference in parameter space for stress tensor inversion. *Journal of Structural Geology*, 28: 957-971.
- Sha, J., Suen, H. and Lin, G., 2003- Separation of polyphase fault/slip data: an objective-function algorithm based on hard division. *Journal of Structural Geology*, 25: 829-840.
- Sha, Y. and Lin, G., Li, Z., 2004- A stress inversion procedure for automatic recognition of polyphase fault/slip data sets. *Journal of Structural Geology*, 26: 919-925.
- Shafiei, B. and Shahabpour, J., 2008- Gold distribution in porphyry copper deposits of Kerman region, Southeastern Iran. (*Geosciences*) *Geological Survey of Iran*, 19:247–260.
- Shahabpour, J., 2007- Island-arc affinity of the Central Iranian Volcanic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30: 652–665.
- Shan, Y., Lin, G., Li, Z. and Zhao, C., 2006- Influence of measurement errors on stress estimated from single-phase fault/slip data. *Journal of Structural Geology*, 28: 943-951.
- Sippel, J., Scheck-Wenderoth, M., Reicherter, K., Mazur, S., 2009- Paleostress states at the south-western margin of the central European Basin System: application of fault-slip analysis to unravel a polyphase deformation pattern. *Tectonophysics*, 470: 129–146.
- Sperner, B. and Zweigel, P., 2010- A plea for more caution in fault–slip analysis, *Tectonophysics*, 482: 29–41.
- Sperner, B., Ratschbacher, L. and Ott, R., 1993- Fault-striae analysis: A Turbo Pascal program package for graphical presentation and reduced stress tensor calculation. *Computer Geosciences*, 19: 1361–1388.
- Vernant, P. and Chéry, J., 2006- Mechanical modeling of oblique convergence in the Zagros, Iran. *Geophysical Journal International*, 165: 991-1002.
- Vernant, Ph., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M. R., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., 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: 381–398.
- Wallace, R. E., 1951- Geometry of shearing stress and relation to faulting. *Journal of Geology*, 59: 118-130.
- Xu, X., Tang, S. and Lin, S., 2016- Paleostress inversion of fault-slip data from the Jurassic to Cretaceous Huangshan Basin and implications for the tectonic evolution of southeastern China. *Journal of Geodynamics*, 98: 31–52.
- Yamaji, A. and Sato, K., 2005- MI Viewer, Version 4.10. Division of Earth and Planetary Sciences, Kyoto University, Kyoto.
- Yamaji, A., 2000a- Multiple inverse method applied to mesoscale faults in mid-Quaternary sediments near the triple trench junction off central Japan. *Journal of Structural Geology*, 22: 429-440.
- Yamaji, A., 2000b- The multiple inverse method: a new technique to separate stresses from heterogeneous fault-slip data. *Journal of Structural Geology*, 22: 441-452.
- Yamaji, A., Otsubo, M. and Sato, K., 2006- Paleostress analysis using the Hough transform for separating stresses from heterogeneous fault-slip data. *Journal of Structural Geology*, 28: 980-990.
- Yamaji, A., Sato, K. and Otsubo, M., 2005- Multiple Inverse Method Main Processor, Version 5.31. Division of Earth and Planetary Sciences, Kyoto University, Kyoto.
- Yamaji, A., Sato, K. and Otsubo, M., 2011- Multiple Inverse Method Software Package, Main Processor version 6.2, User's Guide, Division of Earth and Planetary Sciences, Kyoto University, Kyoto.
- Zalohar, J. and Vrabc, M., 2007- Paleostress analysis of heterogeneous fault-slip data: the gauss method. *Journal of Structural Geology*, 29: 1798-1810.
- Zalohar, J., 2015- On a new law of faulting along tectonic wedges: Gust explanation of the preferred (paleo) stress states in the Earth's crust, *Journal of Structural Geology*, 77: 107-125.

Deciphering the stress field changes in Shahr-e-Babak area using brittle tectonic analysis

L. Ebadi^{1*}, S. A. Alavi² and M. R. Ghassemi³

¹Ph.D., Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

²Professor, Department of Geology, Faculty of Earth sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

³Associate Professor, Research Institute for Earth Sciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

Received: 2016 September 10

Accepted: 2016 December 19

Abstract

In this paper a part of the Shahr-e-Babak area in NW-Kerman is studied, which is geologically located in Central Iran and Urumiyeh- Dokhtar Belt. The basin was strongly affected by compression in Miocene times, in which deformation is characterized by development of NW-SE trending fold and thrust belt. In this paper, we aim at deciphering polyphase deformation and paleostress history of part of the Central Iran in the Shahr-e-Babak area, and that how various geological aspects may be related to a stress field that has been reoriented through time. Also, we indicate how the brittle deformation studies and paleostress analyses may contribute in the interpretations of the post-collisional tectonic evolution of this area. In this paper, by using systematic brittle tectonic analyses, including stress tensor inversion from fault-slip data, we decipher the succession of deformational events that resulted in present-day structures. Therefore, a statistical view of the brittle tectonic reconstructions taken as a whole leads one to better understand the relationships between the different stress fields and folding events that governed the history of compression in this area. The systematic reconstruction of brittle tectonic regimes led us to characterize an anticlockwise change in the main direction of compression through time. Thus, it can be seen that the late Cretaceous to late Miocene pre-folding N055° and N084° compression was followed by syn-folding N040° compression in the Miocene. The Miocene compression then continued into the Pliocene post-folding N029° direction, and changed afterward to the Pleistocene-Recent post-folding N003° direction. Although this general anticlockwise rotation of compression has probably been progressive through time, our data suggest three distinct stress regimes that (1) predate, (2) are contemporaneous with, and (3) post-date the more consistent compressional stress regime of the folding and thrusting process. According to this reconstruction, it is confirmed that many local right-lateral strike-slip faults were reactivated from NW-SE reverse faults in the Shahr-e-Babak area of SW Central Iran. These results could properly support the hypothesis of a significant anticlockwise change in the movement direction of the Arabian plate with respect to the Eurasian plate and block rotation in Central Iran.

Keywords: Paleostress, Brittle tectonic, Rotation, Fold, Shahr-e-Babak.

For Persian Version see pages 81 to 96

*Corresponding author: L. Ebadi; E-mail: leilaebadi2014@yahoo.com

Archived