



فصلنامه زمین ساخت

تابستان ۱۴۰۲، سال هفتم، شماره ۲۶

doi 10.22077/jt.2025.8246.1189

محاسبه نقطه شکست در مناطق چین خورده به وسیله داده های ژئومکانیکی: مطالعه موردی منطقه مگو شمال غرب طبس

حمیدرضا احمدزاده^۱، زینب علی مولا^{۲*}، ابراهیم غلامی^۳، محمودرضا هیات^۴

۱- دانشجوی دکتری تکنیک، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۲- دانشجوی دکتری تکنیک، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۳- دانشیار گرایش تکنیک، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۴- دانشیار گرایش تکنیک، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

چکیده:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۸

امروزه اساس و مبنای طراحی های شبکه حفاری در مناطق دارای پتانسیل هیدروکربوری بر پایه اطلاعات دقیق ژئومکانیکی و زمین شناسی بوده و استفاده از نرم افزارهای مرتبط و تلفیق این داده ها و لحاظ نمودن آن در طراحی جزء لاینفک و اساسی می باشد. لذا لازم است قبل از انجام حفاری اکتشافی، شرایط زمین ساختی منطقه مورد ارزیابی قرار گیرد تا بهترین مکان ها برای حفاری با بازدهی بالا انتخاب گردد. در این پژوهش که در منطقه مگو در شمال غرب طبس صورت گرفت، با استفاده از مشاهدات میدانی، ویژگی های مکانیکی در صحرا و استفاده از نرم افزارهای Roclab، Win tensor، Daisy، Streonet، جهت تنش برای هر ایستگاه بدست آمد و پس از آن مقدار تنش نرمال و برشی محاسبه شد. محاسبات نشان داد که در چین خوردگی ها دایره مور به معیار شکست مور- کولمب نرسیده و به همین علت، در پال چین خوردگی ها شکست رخ نداده است. طبق محاسبات انجام شده، برای شکست در چین خوردگی ها لازم است تا مقدار σ_3 کاهش یابد و از نقطه 44 Mpa به نقطه 27.5 Mpa جابجا شود.

کلیدواژه ها: خواص ژئومکانیکی، نقطه شکست، معیار شکست مور-کولمب، منطقه مگو

*ایمیل: zeynabalimoula@birjand.ac.ir

تلفن تماس: ۰۹۱۸۱۳۸۱۵۹۴

Calculation of failure points in the folded areas using geomechanical data: A case study of Magu Northwest of Tabas region

Hamidreza Ahmadzadeh ¹, Zeynab Alimoula ^{2*}, Ebrahim Gholami ³, Mahmoudreza Hayhat⁴

1. PhD student in Tectonics, Department of Geology, Faculty of Science, University of Birjand, Birjand, Iran

2. PhD student in Tectonics, Department of Geology, Faculty of Science, University of Birjand, Birjand, Iran

3. Associate Professor of Tectonics, Department of Geology, Faculty of Science, University of Birjand, Birjand, Iran

4. Associate Professor of Tectonics, Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Birjand, Birjand, Iran

Abstract

Nowadays, the foundation and basis of drilling networks designs in areas with hydrocarbon potential are based on detailed geomechanical and geological information and the use of related software and the integration of this data and its inclusion in design is an integral and fundamental. Therefore, before exploratory drilling, it is necessary to evaluate the tectonics conditions of the area in order to select the best places for high efficiency drilling. The area studied in this research is Mago region in the northwest of Tabas. Then, using field observations, mechanical characteristics in the field, then using software such as, Stereonet, Daisy, Win tensor, Roclab, the stress field was calculated for each station, and then the normal and shear stress were obtained. Calculations showed that in the folds the failure envelope Mohre circle didn't reach the Mohr-Coulomb failure criterion, and therefore there was no failure in the fold limbs. According to the calculations, to failure in fold limbs, it is necessary to reduce the value of σ_3 and move from the point of 44 Mpa to 27.5 Mpa.

Keywords: Geomechanical properties, Failure point, Mohr-Coulomb failure criterion, Magu Region

*Email: zeynabalimoula@birjand.ac.ir

Tel: +989181381594

مقدمه

معیار شکست یکی از روابط ژئومکانیکی است که توسط محققین پیشنهاد شده است، از جمله می‌توان، معیار موهر کولمب (Coulomb, 1776)، معیار هوک و براون (Hoek and Brown, 1980)، معیار لاده اصلاح شده (Lade, 1977)، معیار ویبولس و کاک اصلاح شده (Wiebols and Cook, 1968)، معیار موگی (Mogi, 1967) و معیار دراگر-پراگر (Drucker and Prager, 1952) اشاره کرد. در بین معیارهای ذکر شده، معیارهای موهر کولمب (Mohr-Coulomb) و هوک و براون (Hoek-Brown) به دلیل سادگی و قابلیت گسترش به توده‌های سنگی، رایج‌تر هستند. این دو معیار براساس اختلاف مقدار σ_1 و σ_3 است. معیار شکست هوک براون یک سطح تسلیم تجربی است و برای پیش‌بینی شکست سنگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. ایده اصلی معیار هوک براون استفاده از سنگ بکر و اضافه کردن تعدادی ضریب به منظور کاهش خصوصیات ناشی از ناپوستگی است. این معیار دارای کاربرد گسترده در مهندسی معدن است. هوک و براون براساس مشاهدات صحرایی، خواص مکانیکی سنگ‌ها را به صورت تجربی بدست آورده‌اند (Hoek & Brown, 2019) که می‌توان با استفاده از آن مقدار تنش نرمال و برشی برای شکست در ساختارها را محاسبه نمود.

یکی از مناطق دگرریخت شده و فعال در زمین، کوهزاد آلپ هیمالیا است. این کوهزاد شامل گسل‌های امتدادلغزی است که بلوک‌های پوسته‌ای تقریباً لرزه‌ای و سخت را از هم جدا می‌کند. منطقه مورد مطالعه در خردقاره ایران مرکزی و در حاشیه‌ی شرقی گسل کلمرد در میان بلوک طبس و پهنه کاشمر-کرمان واقع شده است (شکل ۱). خردقاره ایران مرکزی بخش کوچکی از کوهزاد آلپ هیمالیا می‌باشد و به دلیل وجود گسل‌های ژرف و پی‌سنگی، عموماً طی رخدادهای کوهزایی کهن شکل گرفته است (Aghanabati, 1975; Stocklin, 1968). این بلوک‌ها چرخش و جابه‌جایی را متحمل شده‌اند (Mattei et al., 2012) و تقابل ساختاری متأثر از تغییر نوع و سوی حرکت این بلوک‌ها در طول زمان، کرنش پیچیده‌ای را تحمیل کرده است (Walker and Jackson, 2004; Nozaem et al., 2013). در منطقه مورد مطالعه گسل

کلمرد از قدیمی‌ترین گسل‌های خردقاره ایران مرکزی با طولی حدود ۳۸۰ Km و امتداد اولیه N-S در رخدادهای کوهزایی کاتانگایی، پرکامبرین پسین، شکل گرفته است. بخش شمالی گسل کلمرد، طی رخدادهای کالدونی در منطقه شیرگشت دارای خمیدگی و انحراف به سوی NNE گردیده است و حرکات کوهزایی سیمرین پیشین بر خمیدگی آن افزوده است (نبوی، ۱۳۵۵).

صمدی مقدم و همکاران (۱۳۹۴) و مومنی طارم‌سری و همکاران (۱۳۹۷) برای باورند که، تغییرات راستای تنش بر روی گسل کلمرد، عمود بر امتداد گسل کلمرد پس از دونین تا موازی بر گسل در ژوراسیک تا عهده حاضر می‌باشد. مطالعات نفو تکنیکی صمدی مقدم و همکاران (۱۳۹۴)، که بر اساس شاخص‌های مورفوتکتونیک بخش شمالی گسل کلمرد می‌باشد، این گسل را، یک گسل فعال معرفی نموده‌اند. در این پژوهش مطالعات بر روی شاخه‌های شرقی گسل کلمرد انجام گرفته و براساس داده‌های صحرایی و تحلیل دایره مور نقطه شکست برای سنگ‌های چین‌خورده محاسبه گردیده است.

زمین‌شناسی عمومی و ساختاری

منطقه‌ی مورد مطالعه در تقسیم‌بندی ساختاری ایران، در ایران مرکزی و شمال غرب بلوک طبس و ۱۰ کیلومتری شرق گسل کلمرد قرار دارد (شکل ۱). واحدهای رسوبی محدوده مورد مطالعه مربوط به سازندهای کربناته-ژپس-پکتندار و کربناته سازند نار به سن ژوراسیک فوقانی است که توسط شاخه‌های شرقی گسل کلمرد بریده شده و به صورت راستگرد جابجا شده‌اند (شکل ۲). گسل‌هایی که در محدوده‌ی مورد مطالعه قرار دارند شامل گسل کلمرد با طول ۳۸۰ کیلومتر (Ruttner et al., 1968) و سازوکار حرکتی امتدادلغز راستگرد با مؤلفه معکوس است (شیخ‌الاسلامی و زمانی، ۱۳۷۸؛ سعیدی و همکاران، ۱۳۸۱) که جابجایی افقی آن چیزی در حدود ۴۰ تا ۵۰ کیلومتر تخمین زده می‌شود (Ruttner et al., 1968). شیب این گسل 75° به سمت WNW می‌باشد (آقنابتی، ۱۳۸۳) که در شمالی‌ترین قسمت آن رسوبات کواترنری بریده شده‌اند و نشان از فعالیت جدید این گسل دارد. در بخش‌های مرکزی نیز این گسل در میان سنگ‌های پالئوزوئیک عمل کرده و در مرز این سنگ‌ها با نهشته‌های کواترنری دیده



می‌شود (سعیدی و همکاران، ۱۳۸۱).

در نقشه محدوده مورد مطالعه (شکل ۲)، گسل پنهان راهدار در انتهای شمالی به گسل کلمرد می‌پیوندد. گسل رباط گور نیز به صورت فرعی از گسل کلمرد منشعب شده و با امتداد شمال شرقی، پس از عبور از واحدهای کواترنری وارد واحدهای ژوراسیک شده و آن‌ها را به صورت راستگرد جابجا نموده است. گسل رانده رباط شور با امتداد N_S و شیب به سمت غرب، واحدهای تریاس را روی واحدهای کواترنری رانده است.

مراحل انجام کار

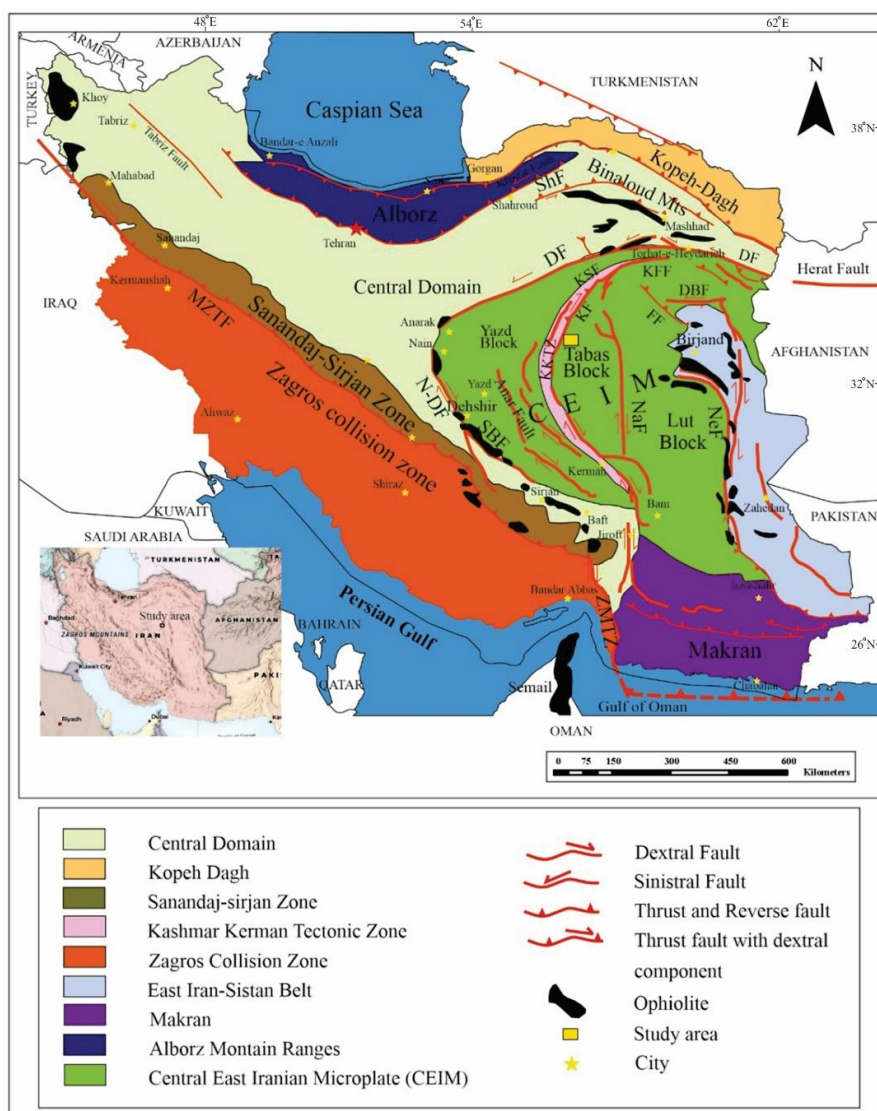
در ابتدا، با جمع‌آوری اطلاعات کلی از منطقه، بررسی مطالعات پیشین و مطالعه نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ طبس (Karimi Bavandpur and Ha-jihosaini, 2002) و حلوان (شیخ الاسلامی و زمانی، ۱۳۷۸)، این مطالعات آغاز گردید. واحدهای سنگی چینه‌ای و ساختارها با استفاده از مشاهدات صحرایی و تطابق آن با تصاویر ماهواره‌ای (Google Earth)، از گستره مورد مطالعه شناسایی شد. سپس در محیط نرم‌افزار (ArcGIS Pro) نقشه زمین‌شناسی منطقه تهیه شد. در گام بعدی، با استفاده از تفسیر تصاویر صحرایی، تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های نقشه زمین‌شناسی، مسیر پیمایش صحرایی تعیین شد. داده‌های هندسی چین‌خوردگی‌ها در ۱۱ ایستگاه برداشت گردید و سطوح محوری و محور چین‌ها به وسیله نرم‌افزار Ste-reonet 11 (Allmendinger, 2023) محاسبه شد. ریک خطوط لغزش بین لایه‌ای در ایستگاه ۲، ۱۱ اندازه‌گیری و جهت تنش توسط نرم‌افزار (Delvaux et al., 1995 & Win tensor (1997 بدست آمد. چون چین‌خوردگی‌ها در واحدهای ژیبسی-کربناته سازند مگو از نوع موازی است، باعث شده تا چین‌خوردگی با مکانیزم خمشی لغزشی ایجاد شود. خطوط لغزشی در یال‌ها در مکانیزم خمشی لغزشی، عمود بر محور چین‌خوردگی (Ram-say & Hober, 1986) و صفحه π عمود بر محور چین می‌باشد و نشان‌دهنده امتداد تنش بیشینه مسبب چین‌خوردگی است (Ramsay, 1964; Mancktelow, 1981). در این روش تنش حداکثر همواره افقی بوده و فاقد میل می‌باشد. محاسبه صفحه π چین‌ها توسط نرم‌افزار Daisy (Salvini, 1999) انجام شد. اندازه‌گیری

امتداد، شیب، ریک خطوط لغزش و جهت حرکت گسل در ایستگاه شماره ۱۲ و محاسبه جهت تنش‌های اصلی منطقه توسط نرم افزار Win tensor انجام گرفت. محاسبات ژئومکانیکی بر مبنای معیار هوک و براون در نرم‌افزار Roclab به وسیله مشاهدات میدانی واحدهای چینه‌شناسی انجام گرفت. پس از آن رسم دایره مور چین‌خوردگی‌های ایستگاه ۲ و ۱۱ و گسل اصلی ایستگاه ۱۲ توسط نرم‌افزار Win tensor براساس داده‌های ژئومکانیکی نرم‌افزار Roclab منطقه تهیه گردید. براساس مقدار داده‌های خروجی از نرم افزار Roclab مقدار تنش برشی برای گسل محاسبه گردید. مقدار تنش برشی بدست آمده در گسل در محاسبات چین‌خوردگی‌ها نیز اعمال شد و مقدار تنش مینیم برای شکست در چین‌خوردگی‌ها محاسبه گردید.

روش محاسبه تنش دیرین

تحلیل‌های تنش دیرین برای مشخص کردن تکامل ساختاری کمربندهای چین‌خورده به ویژه مناطق دارای ساختارهای تکتونیک شکننده بسیار سودمند هستند (Chang et al., 2003). با توجه به این اصل که الگوی تنش با زمان تغییر می‌کند جهت انجام مطالعات تعیین و تفکیک فازهای تنش دیرین باید از ساختارهایی که در اثر عملکرد تنش‌ها شکل گرفته و در طول زمان اثرات آنها را حفظ کرده اند استفاده شود. در این راستا تحلیل کیفی و کمی ساختارهای شکننده مانند گسل ابزار مناسبی می‌باشد (Angelier, 1990).

با توجه به اینکه اثر اعمال تنش روی واحدهای سنگی در وضعیت شکننده با آرایه‌ی منظمی از خطوط موازی (خط‌خس) در جهت حداکثر تنش برشی ثبت می‌شود (Wallace, 1951; Bott, 1959; Lisle, 1989; Angelier, 1990) و همچنین قابلیت استفاده از بعضی از شاخص‌های سینماتیکی روی صفحه‌ی گسل برای تعیین جهت لغزش (Doblas, 1998)، تنش‌های دیرین را می‌توان به وسیله تکنیک معکوس کردن و از روی جهت‌یابی خش گسلش بدست آورد. (Carey and Brunier, 1974; Etchecopar et al, 1981; Gephart and Forsyth, 1984; Angelier 1984) خش لغز مربوط به آن و سوی حرکت است که برای این کار می‌توان از علائمی چون جدایش چینه‌شناسی، چین در این روش داده‌های مورد استفاده برای معکوس‌سازی شامل



شکل ۱. نقشه بازتوسیم شده از جایگاه منطقه مطالعه در تقسیم‌بندی ساختاری ایران (بر اساس نقشه‌های

اصلاح شده توسط Allen, Jackson, & Walker, 2004; Allen, Kheirkhah, Emami, & Jones,

2011; Berberian & King, 1981; Berberian, 1983; Calzolari, Rossetti, et al., 2016;

Javadi et al. (2013); Stöcklin & Nabavi, 1973; Morley et al., 2009; Nozaem et al.,

(2018); Shafaii Moghadam & Stern, 2015) که برای اولین بار توسط تدین و همکاران (۲۰۱۸)

ترسیم شده است). موقعیت منطقه مورد مطالعه در مرز بلوک طبس و زون کاشمر-کرمان بر روی نقشه

تکتونیک ایران واقع شده است و تصویر کوچک سمت چپ (برگرفته شده از Esri, USGS)، موقعیت

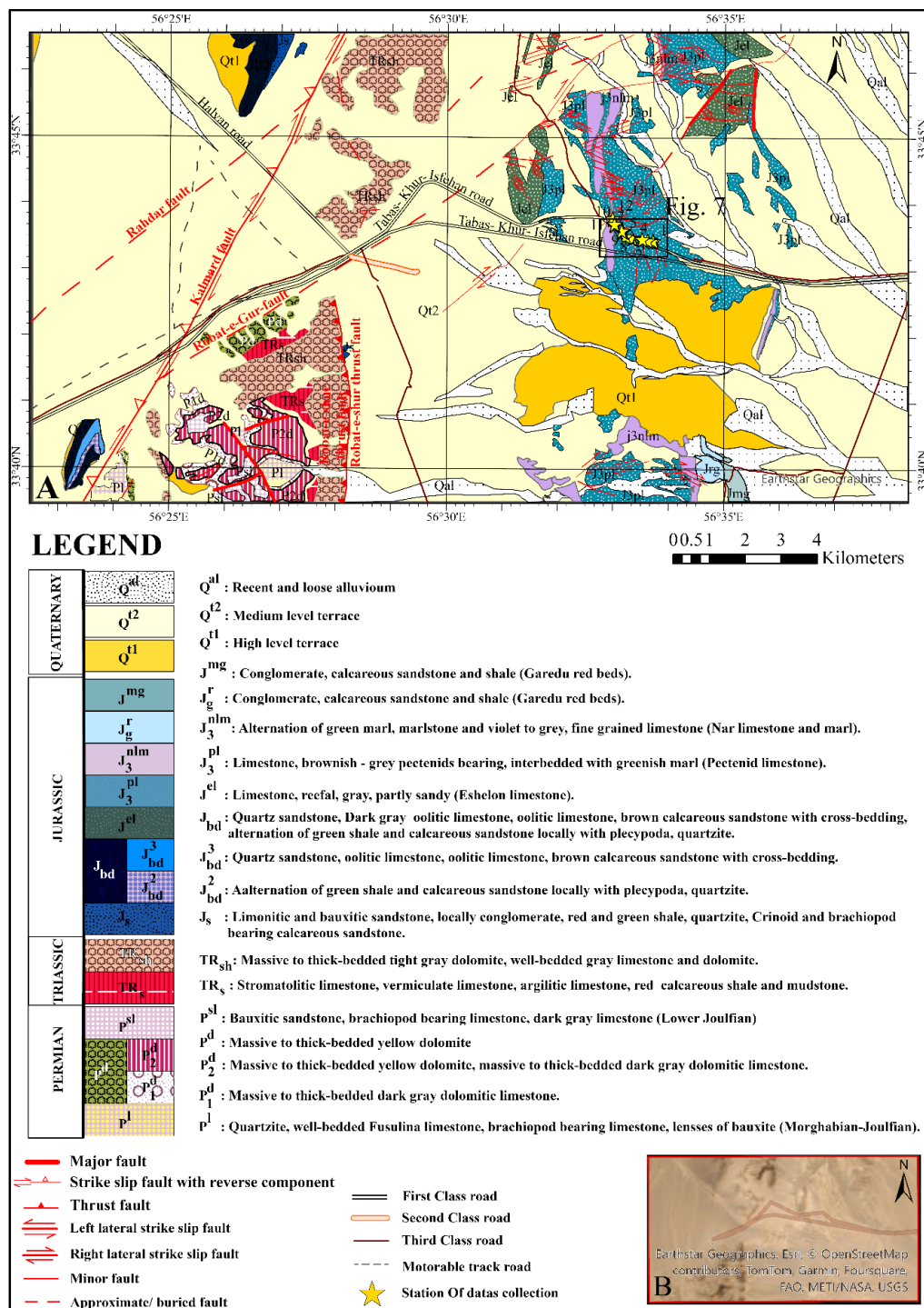
ایران در صفحات جهانی زمین‌ساختی را نمایش می‌دهد. نماد گسل‌ها به صورت، N-DF: گسل ناین-دهشیر،

NaF: گسل نایبند، NeF: گسل نه‌بندان، DBF: گسل دشت بیاض، FF: گسل فردوس، DF: گسل

درونه، KF: گسل کل‌مرد، KFF: گسل کوه فغان، KSF: گسل کوه سرهنگی، KKTZ: زون تکتونیک

کاشمر-کرمان، MZTF: گسل اصلی روراندۀ زاگرس. SBF: گسل شهربابک، ShF: گسل شاهرود،

ZMTZ: زون انتقالی زاگرس-مکران، است.

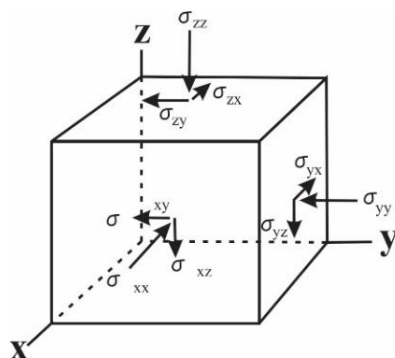


شکل ۲. نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه (بازتسیم از نقشه های زمین شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تبس Karimi Bavandpur and Hajihosaini, 2002) و حلوان (شیخ الاسلامی و زمانی، ۱۳۷۸). در نقشه A موقعیت ایستگاه ها مشخص شده است.

ریدل، قله های استیلولیتی و... کمک گرفت (Angeli-er, 1994). همچنین باید تقدم و تأخر سنی ساختارها در هر ایستگاه برداشت شود تا در تفکیک فازهای تنش از آنها استفاده گردد. در مرحله بعد نرم افزار با استفاده از دیتاهای برداشت شده از گسل ها محاسبات لازم را

موقعیت گسل، شیب و امتداد و زاویه خط های کشیده، تنوع بزرگی از سیمای نامتقارن قابل مشاهده بر روی سطح گسل از قبیل زبری یا صیقلی بودن صفحه لغزش، وجود تول مارک های زمین ساختی و پله های تجمعی کانی ها روی صفحه لغزش، شکستگی های

(خش‌لغز) و جهت بیشینه تنش برشی محاسبه شده (توسط روابط فیزیکی) حاصل می‌شود. (Carey & Bru- 1974; Angelier, 1990) مقدار زاویه ناهمخوانی را تا ۳۰ درجه قابل قبول می‌دانند و مقادیر بیش از این، بدلیل عدم پیروی از منحنی گوسی مربوط به مربوط به فازهای دیگر تنش می‌باشد.



$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_y & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}$$

$$R = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad 0 < R < 1$$

شکل ۳. تانسورهای تنش در فضای سه بعدی و رابطه شکل میدان R (Angelier, 1994)

چین ۷۲٫۵/°۱۸۰ می‌باشد. امتداد و شیب صفحه π ، ۸۹/°۲۷۰ بوده و تمایل چین به سمت غرب می‌باشد. ایستگاه ۳: در این ایستگاه امتداد و میل محور چین خوردگی ۱۷۰/°۰۰ و شیب و امتداد سطح محوری چین ۴۵/°۱۷۰ می‌باشد. امتداد و شیب صفحه π ، ۹۰/°۲۶۱ بوده و تمایل چین به سمت شرق می‌باشد. ایستگاه ۴: در این ایستگاه امتداد و میل محور چین خوردگی ۳۵۰/°۰۰ و شیب و امتداد سطح محوری چین ۳۷٫۵/°۳۵۰ می‌باشد. امتداد و شیب صفحه π ، ۹۰/°۲۵۹ بوده و تمایل چین به سمت غرب می‌باشد. ایستگاه ۵: در این ایستگاه تاقفرم و ناو فرم وجود دارد. امتداد و میل محور تاقفرم ۱۷۰/°۱۳ و شیب و امتداد سطح محوری چین ۹۰/°۳۵۰ می‌باشد. امتداد و شیب صفحه π ، ۷۸/°۲۶۱ بوده و تمایل چین به سمت غرب می‌باشد. امتداد و میل محور ناو فرم ۱۷۱/°۱۴ و شیب و امتداد سطح محوری چین ۸۷٫۵/°۱۷۰٫۳ می‌باشد. امتداد و شیب صفحه π ، ۷۸/°۲۶۱ می‌باشد. ایستگاه ۶: در این ایستگاه امتداد و میل محور چین خوردگی ۳۱۶/°۰۶ و شیب و امتداد سطح محوری چین ۶۹٫۸/°۳۱۴٫۴ می‌باشد. امتداد و شیب صفحه π ، ۸۴/°۰۴۶ بوده و تمایل چین به سمت شمال شرق می‌باشد. ایستگاه ۷: در این ایستگاه امتداد و میل محور

انجام داده و سپس تفکیک فازهای تنش دیرین در یک فضای چهاربعدی مرکب از سه موقعیت محورهای اصلی تنش (σ_1 , σ_2 , σ_3) و شکل میدان R صورت می‌گیرد (Angelier, 1984؛ شکل ۳). یکی از مشکلات چنین محاسبه ای اختلافی است که میان جهت بیشینه تنش برشی اندازه گیری شده

۵. تحلیل ساختاری

۵-۱. ویژگی‌های هندسی

اندازه گیری ویژگی‌های هندسی ساختارها در ۱۲ ایستگاه انجام گرفت (شکل‌های ۴ الی ۷ که موقعیت آن‌ها بر روی شکل ۲ و با وضوح بهتر شکل ۸ مشخص شده است). جهت شیب لایه‌بندی در منطقه مورد مطالعه به سمت E، W تا NE و SW می‌باشد (جدول ۱، شکل ۴ و ۵). امتداد سطوح محوری چین‌ها در بازه ۰° تا ۳۱۰° متغیر بوده و شیب سطوح محوری به سمت E تا NE بدست آمده است. براساس تقسیم بندی چین خوردگی‌ها بر مبنای زاویه بین یال‌ها، چین خوردگی‌ها بیشتر از نوع باز تا بسته می‌باشند. ایستگاه ۱: در این ایستگاه تاقفرم و ناو فرم وجود دارد. امتداد و میل محور تاقفرم ۰۰۳/°۰۲ و شیب و امتداد سطح محوری چین ۷۳٫۵/°۱۸۳ می‌باشد. امتداد و شیب صفحه π ، ۸۳/°۲۶۴ بوده و تمایل چین به سمت غرب می‌باشد. امتداد و میل محور ناو فرم ۱۷۲/°۱۱ و شیب و امتداد سطح محوری چین ۷۵٫۶/°۱۶۹٫۷ می‌باشد. امتداد و شیب صفحه π ، ۸۳/°۲۶۴ بوده و تمایل چین به سمت غرب می‌باشد. در این ایستگاه گسل مرتبط با چین خوردگی در یال شرقی دیده می‌شود. ایستگاه ۲: در این ایستگاه امتداد و میل محور چین خوردگی ۰۰۰/°۰۰ و شیب و امتداد سطح محوری



حرکت راستگرد می باشد (جدول ۳، شکل ۷).

تحلیل جنبشی و حرکتی

از شرق به غرب، امتداد سطوح محوری چین ها از N-S به NW-SE متغیر می باشد. سوی حرکت ساختارها از شرق به غرب و در جهت خلاف شیب سطوح محوری می باشد. امتداد صفحات π ، از ایستگاه ۱ تا ۱۱ به ترتیب از E-W به NE-SW تغییر می یابد که نشان دهنده تغییرات جهت تنش هم زمان با چین خوردگی در منطقه می باشد (شکل ۸). براساس خطوط لغزش بین لایه ای، جهت و میل میدان تنش از ایستگاه ۲ به ۱۱ براساس اندازه گیری لغزش روی سطح لایه بندی به ترتیب $۰۹۰^{\circ}/۰۹^{\circ}$ و $۰۷۰^{\circ}/۰۹^{\circ}$ می باشد که تغییرات میدان تنش از شرق به غرب را نمایش می دهد. تغییرات در میل محور چین ها در ایستگاه ۱، ۲ و ۱۱ از شمال به جنوب، نشان دهنده سوگیری متفاوت در جهت تنش منطقه می باشد. جهت تنش بیشینه منطقه براساس گسل اصلی در ایستگاه ۱۲، دارای روند و میل $۱۰۴^{\circ}/۲۷^{\circ}$ می باشد. براساس صفحات π و گسل اصلی منطقه مورد مطالعه، امتداد تنش بیشینه در منطقه، از E-W تا NE-SW می باشد (شکل ۸). در نزدیکی گسل اصلی صفحه π دارای امتداد NE-SW می باشد در حالیکه با فاصله گرفتن از گسل و به سمت شرق صفحات π امتداد E-W می گیرند.

جهت تنش بر روی گسل اصلی در ایستگاه ۱۲، WNW-ESE می باشد. براساس مطالعات صمدی مقدم و همکاران (۱۳۹۴) و مومنی طارمیری و همکاران (۱۳۹۷)، میدان تنش در واحدهای ژوراسیک فوقانی در این زمان در حال تغییر بصورت پادساعتگرد از عمود بر گسل کلمرد تا موازی با گسل کلمرد بوده است که این تغییرات نیز در منطقه مشاهده می گردد.

تعیین پارامترهای ژئومکانیکی

برای تعیین پارامترهای ژئومکانیکی واحدهای رسوبی از داده های صحرایی و نرم افزار Rocklab استفاده شد. ورودی نرم افزار شامل: شاخص های کیفیت توده سنگ هوک-براون (مقاومت تک محوری سنگ بکر، شاخص GSI، ثابت m_i مقاومت سنگ، فاکتور ساختاری و خروجی نرم افزار شامل: معیار مقاومت هوک-براون و شاخص های مقاومت مور-کولمب (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) برای ترسیم پوش مقاومت مور-کولمب می باشد.

چین خوردگی $۱۵۳^{\circ}/۱۲^{\circ}$ و شیب و امتداد سطح محوری چین $۸۷,۵^{\circ}/۳۳,۷^{\circ}$ می باشد. امتداد و شیب صفحه π ، $۷۸^{\circ}/۲۴۳^{\circ}$ می باشد.

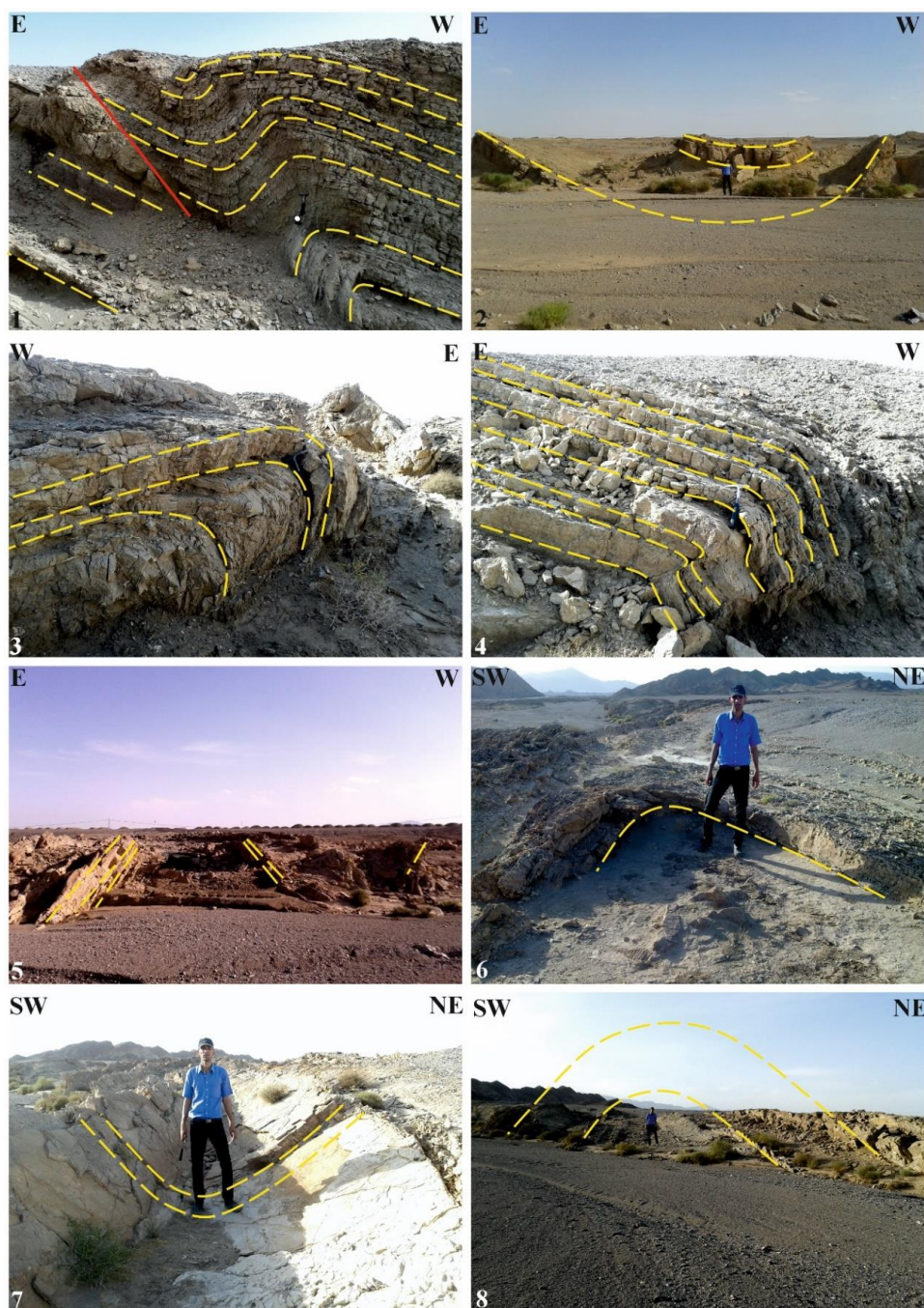
ایستگاه ۸: در این ایستگاه امتداد و میل محور چین خوردگی $۱۴۹^{\circ}/۲۱^{\circ}$ و شیب و امتداد سطح محوری چین $۹۰^{\circ}/۱۵۰^{\circ}$ می باشد. امتداد و شیب صفحه π ، $۶۹^{\circ}/۲۴۰^{\circ}$ می باشد.

ایستگاه ۹: در این ایستگاه تاقدفرم و ناوفرم وجود دارد. امتداد و میل محور تاقدفرم $۳۱۶^{\circ}/۰۲^{\circ}$ و شیب و امتداد سطح محوری چین $۸۵^{\circ}/۳۱۵,۹^{\circ}$ می باشد. امتداد و شیب صفحه π ، $۸۷^{\circ}/۰۴۴^{\circ}$ بوده و تمایل چین به سمت غرب می باشد. امتداد و میل محور ناوفرم $۳۱۳^{\circ}/۰۳^{\circ}$ و شیب و امتداد سطح محوری چین $۸۲,۵^{\circ}/۱۳۴,۱^{\circ}$ می باشد. امتداد و شیب صفحه π ، $۸۷^{\circ}/۰۴۴^{\circ}$ می باشد.

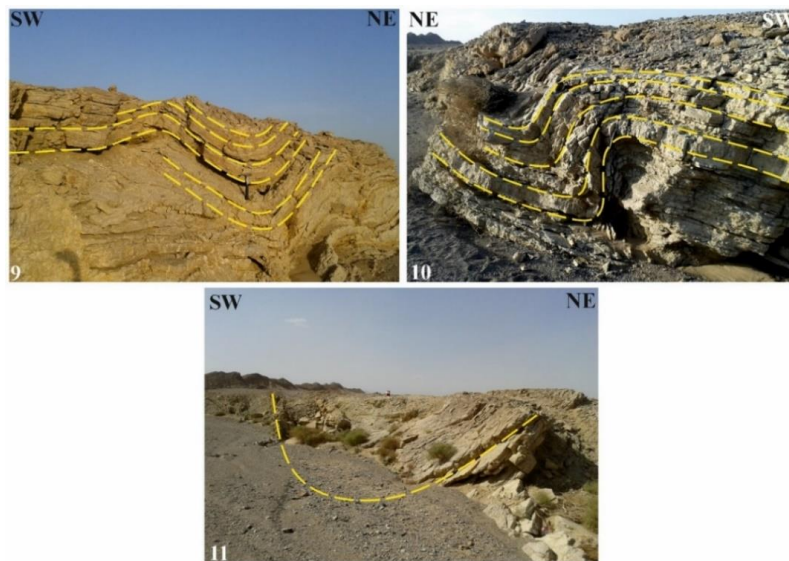
ایستگاه ۱۰: در این ایستگاه تاقدفرم و ناوفرم وجود دارد. امتداد و میل محور تاقدفرم $۱۵۶^{\circ}/۰۳^{\circ}$ و شیب و امتداد سطح محوری چین $۷۰^{\circ}/۳۳۶,۴^{\circ}$ می باشد. امتداد و شیب صفحه π ، $۸۹^{\circ}/۰۶۴^{\circ}$ بوده و تمایل چین به سمت غرب می باشد. امتداد و میل محور ناوفرم $۳۳۲^{\circ}/۰۴^{\circ}$ و شیب و امتداد سطح محوری چین $۷۴,۹^{\circ}/۳۳۱,۳^{\circ}$ می باشد. امتداد و شیب صفحه π ، $۸۹^{\circ}/۰۶۴^{\circ}$ بوده و تمایل چین به سمت شمال شرق می باشد. در این ایستگاه، گسل در محل لولای چین خوردگی شکستگی هایی دیده می شود که در ادامه پیشرفت چین خوردگی و حرکت به سمت غرب این بر روی این شکستگی ها جابجایی دیده می شود.

ایستگاه ۱۱: در این ایستگاه امتداد و میل محور چین خوردگی $۱۷۲^{\circ}/۱۰^{\circ}$ و شیب و امتداد سطح محوری چین $۷۹,۸^{\circ}/۱۷۰,۲^{\circ}$ می باشد. امتداد و شیب صفحه π ، $۸۱^{\circ}/۲۶۲^{\circ}$ بوده و تمایل چین به سمت غرب می باشد. ایستگاه ۱۲: امتداد و شیب گسل $۸۰^{\circ}/۰۶۰^{\circ}$ و ریک خطوط لغزش ۱۵° به سمت N بر روی صفحه گسلی بوده و حرکت بر روی این گسل براساس پله ایجاد شده بر روی صفحه گسل (Willis and Willis, 1934; Tjia, 1968) به صورت راستگرد با مؤلفه معکوس می باشد (جدول ۲، شکل ۶).

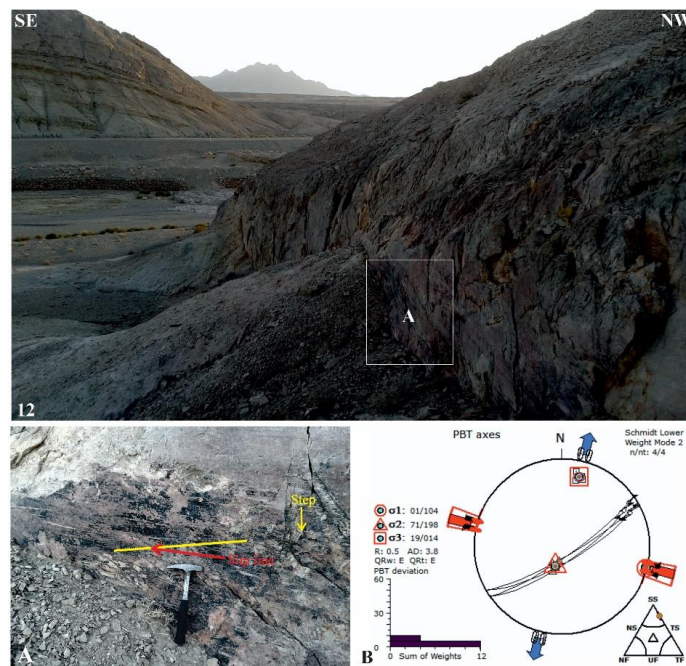
در ایستگاه ۲ و ۱۱ لغزش بین لایه ای دارای زاویه ریک ۷۰° الی ۹۰° روی لایه بندی می باشد. لغزش لایه ها در ایستگاه ۲ دارای حرکت چپگرد و در ایستگاه ۱۱ دارای



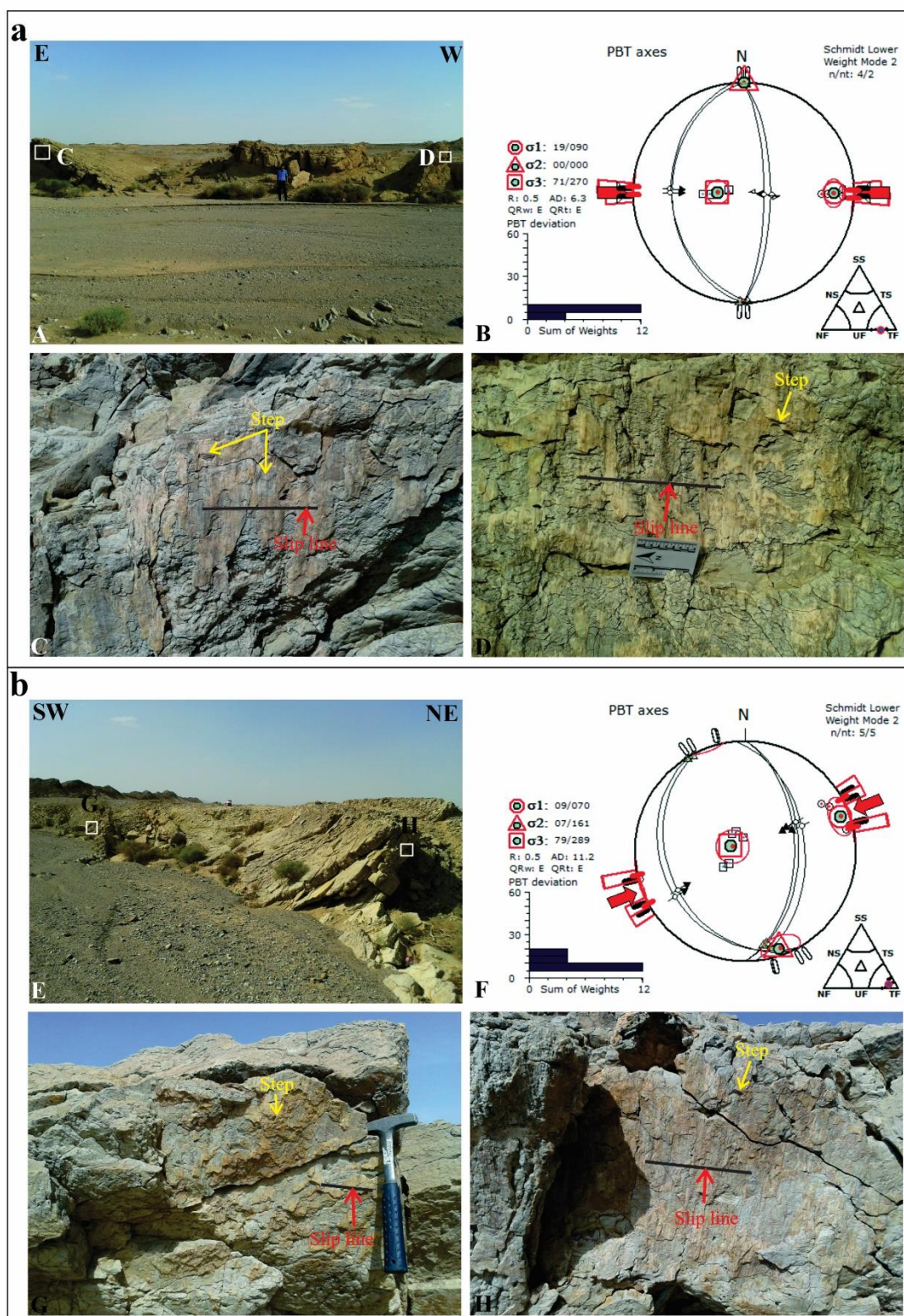
شکل ۴. تصاویر صحرایی چین‌خوردگی‌ها در ایستگاه‌های ۱ تا ۸ در واحدهای کربناته پکتندار (J_3^{Pl}) را نشان می‌دهد (محل ایستگاه‌ها در شکل شماره ۲ و ۸ نمایش داده شده است). نام ایستگاه‌ها در گوشه پایین سمت چپ هر قسمت نوشته شده است).



شکل ۵. تصاویر صحرایی چین خوردگی‌ها در ایستگاه‌های ۹ تا ۱۱ در واحدهای کربناته پکتین‌دار (J_3^{Pl}) را نشان می‌دهد. محل ایستگاه‌ها در شکل شماره ۲ و ۸ نمایش داده شده است. نام ایستگاه‌ها در گوشه پایین سمت چپ هر قسمت نوشته شده است).



شکل ۶. ایستگاه گسل اصلی منطقه مورد مطالعه (ایستگاه ۱۲) با حرکت امتدادلغز راستگرد با مؤلفه معکوس را نشان می‌دهد. (محل ایستگاه‌ها در شکل شماره ۲ و ۸ نمایش داده شده است. نام ایستگاه‌ها در گوشه پایین سمت چپ هر قسمت نوشته شده است).



شکل ۲. موقعیت محورهای اصلی جنبشی بر اساس داده‌های خطوط لغزش بین لایه‌ای در ایستگاه ۲ (ABCD) و ایستگاه ۱۱ (EFGH) را نمایش می‌دهد.



جدول ۱. ویژگی های هندسی و جنبشی چین خوردگی ها

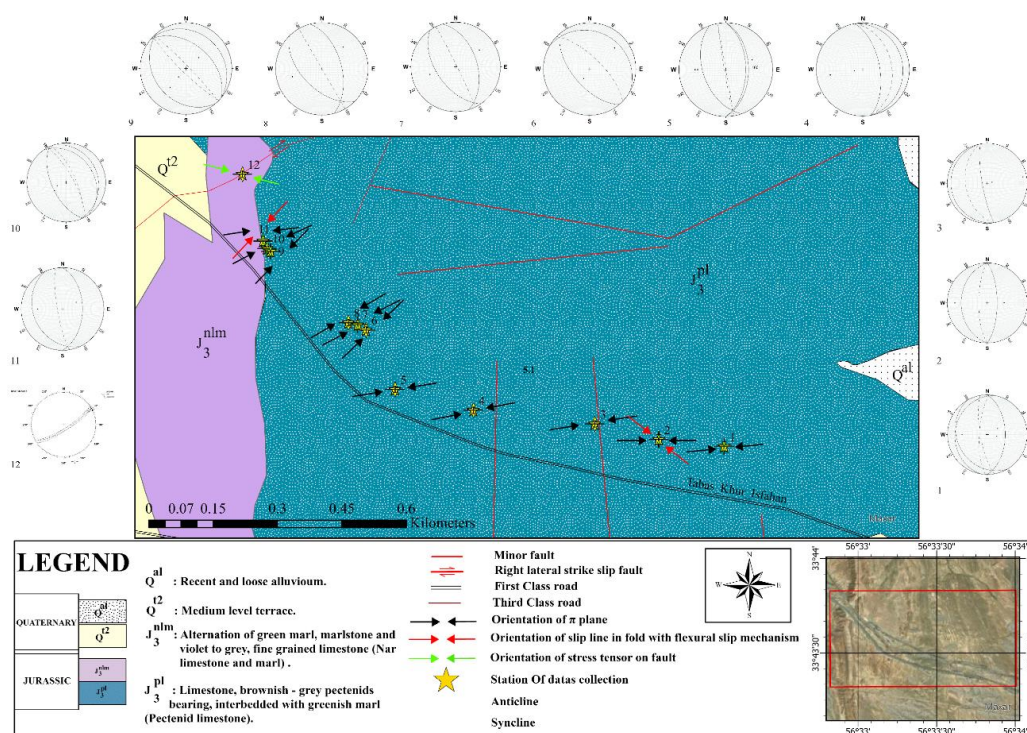
Station No.	Limb 1		Limb 2		Fold Axis		Axial Plane		Pi (π) Plane	
	Dip	Strike	Dip	Strike	Trend	Plunge	Dip	Strike	Dip	Strike
1	20	190	53	000	003	02	73.5	183	83	264
	25	150	53	000	172	11	75.6	169.7		
2	35	180	70	000	000	00	72.5	180	89	270
3	10	170	80	170	170	00	45	170	90	261
4	60	350	15	350	350	00	37.5	350	90	259
5	50	160	50	000	170	13	90	350	78	261
	50	340	55	000	171	14	87.5	170.3		
6	60	140	20	300	316	06	69.8	314.4	84	046
7	55	145	50	343	153	12	87.5	333.7	78	243
8	55	135	55	345	149	21	90	150	69	240
9	30	140	20	310	316	02	85	315.9	87	044
	30	140	45	310	313	03	82.5	134.1		
10	60	155	20	340	156	03	70	336.4	89	064
	60	155	30	325	332	04	74.9	331.3		
11	30	155	50	000	172	10	79.8	170.2	81	262

جدول ۲. ویژگی های هندسی و جنبشی گسل اصلی منطقه مورد مطالعه

Station	Fault Plane		Slip Line		Slip	$\sigma 1$		$\sigma 2$		$\sigma 3$	
	Dip	Dip-Dir	Azim.	Plunge	Sense	Trend	Plunge	Trend	Plunge	Trend	Plunge
12	80	150	15	63	ID	194	01	198	71	19	14
	75	150	14	64	ID						
	80	145	10	57	ID						
	75	145	19	60	ID						

جدول ۳. ویژگی های هندسی و جنبشی لغزش بین لایه ای در چین خوردگی های منطقه مورد مطالعه

Station	Bedding		Slip Line		Slip	$\sigma 1$	
	Dip	Dip-Dir	Azim.	Plunge	Sense	Trend	Plunge
2	70	90	69	95	IS	092	00
	35	270	34	273	IS		
	75	90	75	95	IS		
	35	265	34	270	IS		
11	53	90	50	62	ID	070	09
	25	240	25	237	ID		
	50	90	46	60	ID		
	30	245	30	240	ID		
	45	85	43	66	ID		



شکل ۸. نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه به همراه جهت تنش در هر ایستگاه بر اساس محور π چین خوردگی ها (فلش های مشکی رنگ)، خطوط لغزش بین لایه های (فلش های قرمز رنگ) و ریک لغزش گسل (فلش سبز رنگ)

گسل ۰.۵ بدست آمده است در حالی که رژیم تنش بر روی گسل اصلی از نوع امتدادلغز و در چین خوردگی ها از نوع شیب لغز با مؤلفه معکوس می باشد. بر طبق رابطه ۱، چون σ_3 در صورت کسر قرار دارد، با نزدیک شدن مقدار σ_2 به σ_1 شاهد بزرگ شدن فاکتور شکل میدان خواهیم بود. در نتیجه فاکتور شکل میدان تابع مقدار σ_2 خواهد بود. از طرفی طبق رابطه ۱ و ۲، مقدار تنش های اصلی به زاویه کسینوس هادی ارتباط دارد. برای منطقه مورد مطالعه مقدار کسینوس زاویه هادی برای تنش اصلی $\sigma_2 = 90^\circ$ بوده (شکل ۱۱) که مقدار کمی آن ۰ خواهد شد. در نتیجه می توان تنش در سه بعد را به صورت صفحه ای و برابر با اختلاف تنش σ_1 و σ_3 در نظر گرفت.

در دایره مور شکل ۱۰ الف و ب، اختلاف تنش σ_1 و σ_3 بر روی محور تنش نرمال برابر با ۵۶ Mpa می باشد در صورتی که در شکل ۱۰ ج، این اختلاف به ۸۱ Mpa رسیده است.

با وارد نمودن مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی به نرم افزار Win tensor مقدار σ_3 MAX برای دو واحد سنگی کربناته پکتن دار و کربناته سازند نار بدست آمد. مقدار چسبندگی در کربناته پکتن دار مگو ۶ MPa، زاویه اصطکاک داخلی 22° و ماکزیمیم تنش اصلی σ_3 دارای مقدار ۴۴ MPa بدست آمد. همچنین در کربناته سازند نار مقدار چسبندگی ۴ Mpa، زاویه اصطکاک داخلی 31° و ماکزیمیم تنش اصلی σ_3 دارای مقدار ۱۹ Mpa می باشد (شکل ۹ و ۱۰). داده های ایستگاه ۲ و ۱۱ (شکل ۱۰؛ الف، ب) به پوش مور ترسیم شده نرسیده اند و به همین خاطر شکستی در یال های چین خوردگی در این دو ایستگاه دیده نمی شود، در صورتی که در ایستگاه ۱۲ (شکل ۱۰؛ ج) از پوش مور عبور کرده و گسل اصلی منطقه را شکل داده است.

از این اصل از مکانیک سنگ برای برابر هم قرار دادن روابط ویژگی های ژئومکانیکی چین خوردگی و گسل در منطقه استفاده گردید که در ادامه درباره آن بحث شده است.

بحث

مقدار فاکتور شکل میدان برای چین خوردگی ها و



رابطه ۱: محاسبه مقدار تنش نرمال (Ramay, 1986)

$$\sigma_n = \sigma_1 l^2 + \sigma_2 m^2 + \sigma_3 n^2$$

رابطه ۲: محاسبه مقدار تنش برشی (Ramay, 1986)

$$\tau^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 l^2 m^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 m^2 n^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 n^2 l^2$$

27.5 جابجا شود.

ج) با توجه به این که در منطقه با فاکتور شکل میدان یکسان، ساختارهای متفاوتی دیده می شود، مقدار فاکتور شکل تابع مقدار کمی σ_2 نمی باشد، در نتیجه مقدار کمی آن رژیم منطقه را تعیین نمی نماید و در مطالعات تنش دیرین باید مورد توجه قرار گیرد. (د) تغییرات میدان تنش در پاسخ به مقدار σ_1 و σ_3 اتفاق می افتد و مقدار مقدار فاکتور شکل تابع مقدار کمی σ_2 نمی باشد، در نتیجه مقدار کمی آن رژیم منطقه را تعیین نمی نماید و در مطالعات تنش دیرین باید مورد توجه قرار گیرد.

مقدار تنش نرمال برای شکست در چین خوردگی ها از رابطه ۳ قابل محاسبه است:

رابطه ۳: رابطه گسیختگی مور-کولمب (کولمب، ۱۷۷۶)

$$\tau = \sigma_n \tan \phi + C_0$$

$$\tau = 81 \times \tan(31) + 4 = 52.6 \text{ Mpa}$$

با قرار دادن مقدار تنش برشی گسل در چین خوردگی ها می توانیم مقدار تنش نرمال لازم برای شکست را

$$52.6 = \sigma_n \times \tan(21) + 6$$

$$52.6 - 6 = \sigma_n \times 0.4$$

$$46.6 = 0.4 \sigma_n$$

$$\sigma_{n \text{ Magu}} = 116.5 \text{ Mpa}$$

چون نقطه انتهایی برای تنش بیشینه 100 Mpa می باشد، مقدار جابجایی دایره مور به سمت راست به این صورت قابل محاسبه است:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 116.5 \text{ Mpa} - 44 \text{ Mpa} = 72.5 \text{ Mpa}$$

$$100 \text{ Mpa} - 72.5 = 27.5 \text{ Mpa}$$

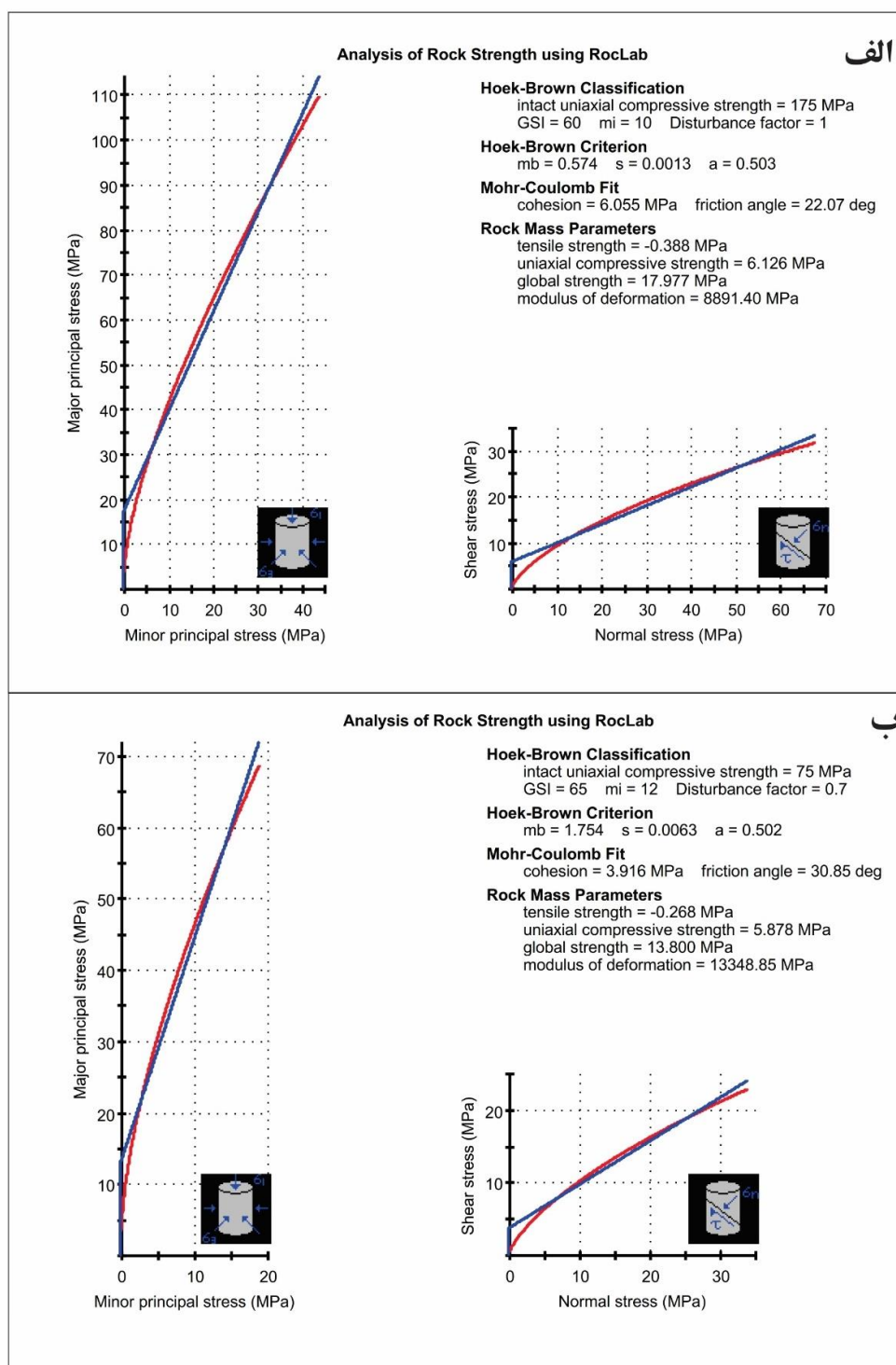
برای شکست در چین خوردگی ها لازم است تا مقدار تنش مینیمم از نقطه 44 Mpa به نقطه 27.5 Mpa جابجا شود تا پوش مقاومت از دایره مور عبور کند و شکست در چین خوردگی رخ دهد.

نتیجه گیری

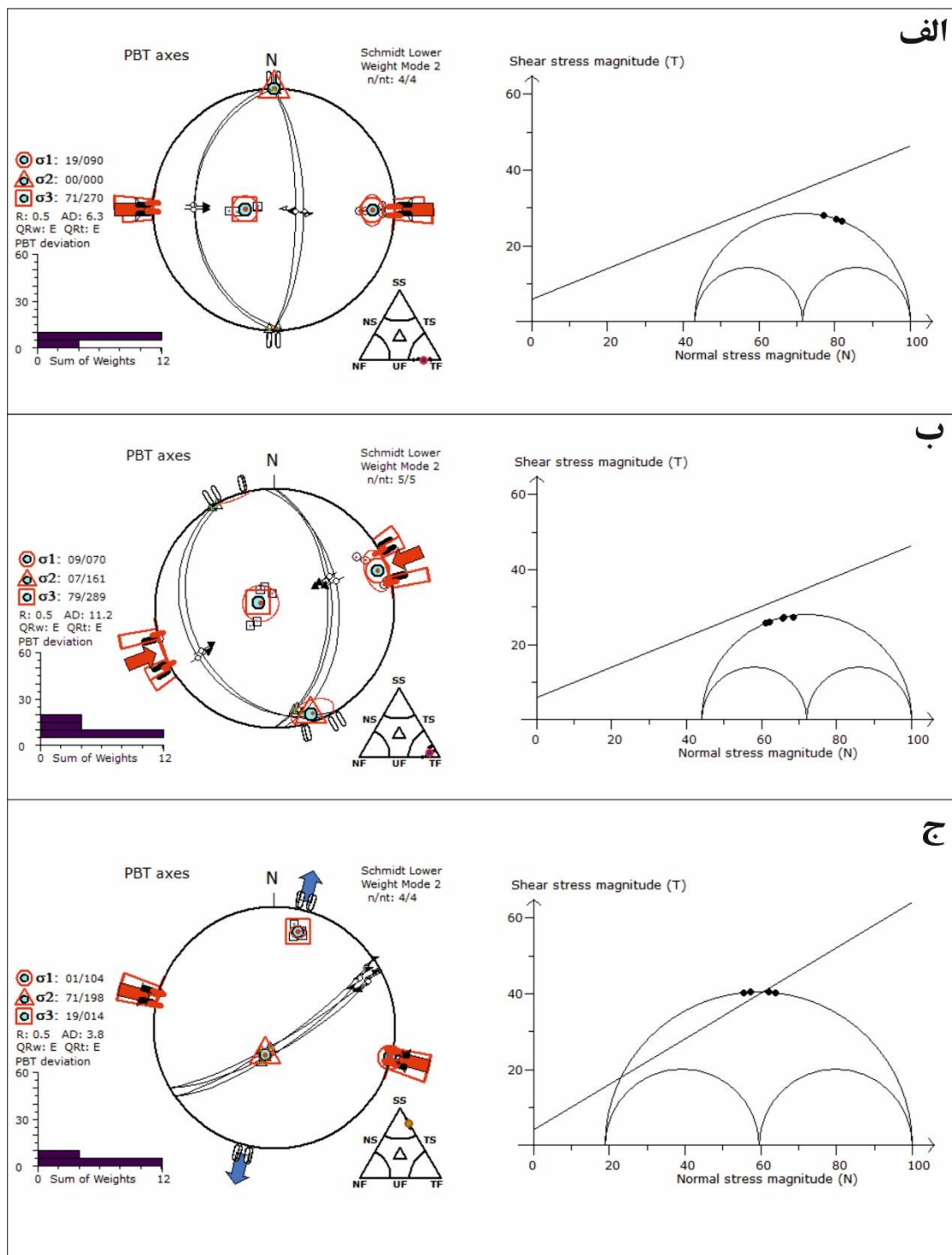
براساس مطالعات صحرایی و پردازش داده ها نتایج زیر حاصل گردید:

الف) چین خوردگی های منطقه طی زمان ژوراسیک با جهت تنش بیشینه اصلی تقریباً شرقی - غربی با آزیموت و میل $19^\circ/0.9^\circ$ ، $0.9^\circ/0.7^\circ$ و $0.1^\circ/1.0^\circ$ شکل گرفته است.

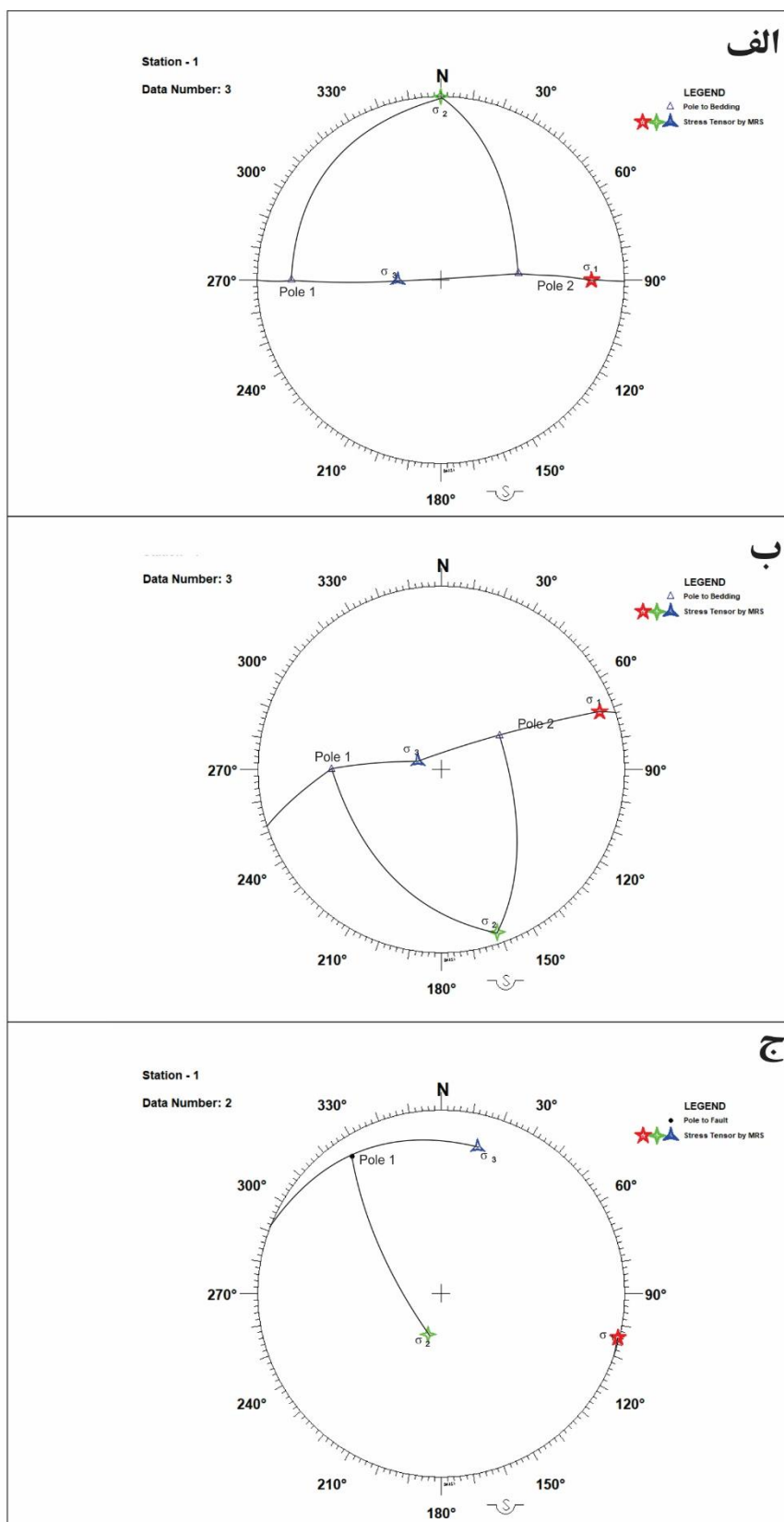
ب) برای شکست در چین خوردگی ها منطقه لازم است تا مقدار تنش مینیمم از نقطه 44 Mpa به نقطه Mpa



شکل ۹. ویژگی‌های مکانیکی واحدهای سنگی در نرم‌افزار Roclab در منطقه مورد مطالعه الف، کربناته پکتین‌دار مگو ب، کربناته سازند نار



شکل ۱۰. تصویر استریوگرافیک و دایره مور الف) خطوط لغزش بین لایه‌ای ایستگاه ۲، ب) خطوط لغزش بین لایه‌ای ایستگاه ۱۱، ج) گسل اصلی منطقه در ایستگاه ۱۲



شکل ۱۱. اندازه گیری زاویه بین محورهای تنش و قطب صفحه لغزش (کسینوس های هادی) در ایستگاه های

الف) ۲، ب) ۱۱، ج) ۱۲

منابع:

- asia collision zone. *Geophysical Journal International*, 184(2), 555-574.
4. Allmendinger R. W., (2023). Available online: <https://www.rickallmendinger.net/>. Dept. of Earth & Atmospheric Sciences 3128 Snee Hall Cornell University Ithaca, NY 14853-1504 USA.
5. Berberian, M. (1983). The southern Caspian: a compressional depression floored by a trapped, modified oceanic crust. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20(2), 163-183.
6. Berberian, M., & King, G. C. P. (1981). Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran: Reply. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18(11), 1764-1766.
7. Calzolari, G., Rossetti, F., Della Seta, M., Nozaem, R., Olivetti, V., Balestrieri, M. L., Cosen-tino, D., Faccenna, C., Stuart, F. M. & Vignaroli, G. (2016). Spatio-temporal evolution of intraplate strike-slip faulting: The Neogene–Quaternary Kuh-e-Faghan Fault, central Iran. *Bulletin*, 128(3-4), 374-396.
8. Coulomb, C. A. (1776). *Essai sur une application des règles des maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture*, vol. 7. Paris: Mém Math Phys Acad Roy Sci par divers Savants.
9. Delvaux, D., Moeys, R., Stapel, G., Melnikov, A., & Ermikov, V. (1995). Palaeostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, Central Asia, Part I. Palaeozoic and Mesozoic pre-rift evolution. *Tectonophysics*, 252(1-4), 61-101.
10. Delvaux, D., Moeys, R., Stapel, G., Petit, C., Levi, K., Miroshnichenko, A., Ruzhich, V., & San'kov, V. (1997). Paleostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, central Asia, Part 2. Cenozoic rifting. *Tectonophysics*, 282(1-4), 1-38.
۱. آقانباتی، علی، (۱۳۸۳). زمین‌شناسی ایران سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران ۷۰۸ صفحه.
۲. سعیدی، عبدالله، قاسمی، محمدرضا، قریشی، منوچهر، نواب‌پور، پیمان، فریدی، محمد، حق‌پور، نگار، رضائیان، مهناز، (۱۳۸۱). بررسی زمین‌ساخت و لرزه زمین‌ساخت بلوک طبس، گزارش داخلی، سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۶۲ صفحه.
۳. شیخ‌الاسلامی، محمدرضا، زمانی، مسعود، (۱۳۷۸). نقشه زمین‌شناسی حلوان، مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی کشور.
۴. صمدی‌مقدم، رنعا، ده‌بزرگی، مریم، نوزعیم، رضا، محجل، محمد، (۱۳۹۴). ارزیابی نئوتکتونیک گسل کلمرد با استفاده از GIS، منطقه شیرگشت (ایران مرکزی). *نشریه جغرافیا و توسعه*، ۱۴(۴۵)، ۱۵۹-۱۸۰.
۵. کریمی باوندپور، علیرضا، حاجی حسینی، ابوالفضل، (۲۰۰۲). نقشه زمین‌شناسی طبس، مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی کشور.
۶. مومنی طارمسری، محمد، ده‌بزرگی، مریم، نوزعیم، رضا، و یساقی، علی، (۱۳۹۷). تحلیل هندسی-جنبشی پهنه گسلی کلمرد در شمال ازبک‌کوه، ایران مرکزی. *علوم زمین*، ۲۸ (۱۰۹)، ۲۴۵-۲۵۴.
۷. نبوی، محمدحسن، (۱۳۵۵). *دیاچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران*. انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۰۹ صفحه.
1. Aghanabati, S. A. (1975). *Étude géologique de la région de Kalmard (W. Tabas) (Iran central): stratigraphie et tectonique* (Doctoral dissertation, Université Scientifique et Médicale de Grenoble).
2. Allen, M., Jackson, J., & Walker, R. (2004). Late Cenozoic reorganization of the Arabia-Eurasia collision and the comparison of short-term and long-term deformation rates. *Tectonics*, 23, TC2008. <https://doi.org/10.1029/2003TC001530>.
3. Allen, M. B., Kheirkhah, M., Emami, M. H., & Jones, S. J. (2011). Right-lateral shear across Iran and kinematic change in the Arabia—Eur-



- Warren, J., Otterdoorn, H., Srisuriyon, K., & Kazemi, H. (2009). Structural development of a major late Cenozoic basin and transpressional belt in central Iran: The Central Basin in the Qom-Saveh area. *Geosphere*, 5(4), 325-362.
20. Nozaem, R., Mohajjel, M., Rossetti, F., Della Seta, M., Vignaroli, G., Yassaghi, A., Salvini, F., & Eliassi, M. (2013). Post-Neogene right-lateral strike-slip tectonics at the north-western edge of the Lut Block (Kuh-e-Sarhangi Fault), Central Iran. *Tectonophysics*, 589, 220-233.
21. Ramsay, J. G. (1986). The techniques of modern structural geology. *The Techniques of Modern Structural Geology, Folds and Fractures*, 2, 309-700.
22. Ruttner, A. (1968). Geology of the Shirgesht area (Tabas area, east Iran). *Geological survey of Iran*, 4, 1-133.
23. Salvini, F., Billi, A., & Wise, D. U. (1999). Strike-slip fault-propagation cleavage in carbonate rocks: the Mattinata Fault Zone, Southern Apennines, Italy. *Journal of Structural Geology*, 21(12), 1731-1749.
24. Stocklin, J. (1968). Structural history and tectonics of Iran: a review. *AAPG bulletin*, 52(7), 1229-1258.
25. Shafaii Moghadam, H., & Stern, R. J. (2015). Ophiolites of Iran: Keys to understanding the tectonic evolution of SW Asia:(II) Mesozoic ophiolites. *Journal of Asian Earth Sciences*, 100, 31-59.
26. Tadayon, M., Rossetti, F., Zattin, M., Calzolari, G., Nozaem, R., Salvini, F., Faccenna, C., & Khodabakhshi, P. (2019). The long-term evolution of the Doruneh Fault region (Central Iran): A key to understanding the spatio-temporal tectonic evolution in the hinterland of the Zagros convergence zone. *Geological Journal*, 54(3), 1454-1479.
11. Drucker, D. C., & Prager, W. (1952). Soil mechanics and plastic analysis or limit design. *Quarterly of applied mathematics*, 10(2), 157-165.
12. Hoek, E., & Brown, E. T. (1980). Empirical strength criterion for rock masses. *Journal of the geotechnical engineering division*, 106(9), 1013-1035.
13. Hoek, E., & Brown, E. T. (2019). The Hoek-Brown failure criterion and GSI-2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(3), 445-463.
14. Javadi, H. R., Ghassemi, M. R., Shahpasandzadeh, M., Guest, B., Ashtiani, M. E., Yassaghi, A. L. I., & Kouhpeyma, M. (2013). History of faulting on the Doruneh Fault System: Implications for the kinematic changes of the Central Iranian Microplate. *Geological Magazine*, 150(4), 651-672.
15. Lade, P. V. (1977). Elasto-plastic stress-strain theory for cohesionless soil with curved yield surfaces. *International journal of solids and structures*, 13(11), 1019-1035.
16. Mancktelow, N. S. (1981). A least-squares method for determining the best-fit point maximum, great circle, and small circle to nondirectional orientation data. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 13, 507-521.
17. Mattei, M., Cifelli, F., Muttoni, G., Zanchi, A., Berra, F., Mossavvari, F., & Eshraghi, S. A. (2012). Neogene block rotation in central Iran: Evidence from paleomagnetic data. *Bulletin*, 124(5-6), 943-956.
18. Mogi, K. (1967). Effect of the intermediate principal stress on rock failure. *Journal of Geophysical Research*, 72(20), 5117-5131.
19. Morley, C. K., Kongwung, B., Julapour, A. A., Abdolghafourian, M., Hajian, M., Waples, D.,

27. Tjia, H.D. (1968). Fault-plane markings. In XXIII International Geological Congress, Prague, Czechoslovakia, 13, 279-284.
28. Walker, R., & Jackson, J. (2004). Active tectonics and late Cenozoic strain distribution in central and eastern Iran. *Tectonics*, 23(5).
29. Wiebols, G. A., & Cook, N. G. W. (1968, November). An energy criterion for the strength of rock in polyaxial compression. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 5(6), 529-549. Pergamon.
30. Willis, B., Willis, R., 1934. *Geologic Structures*. McGraw-Hill, 420 pp.