



فصلنامه زمین ساخت

تابستان ۱۴۰۰، سال پنجم، شماره ۱۸

doi 10.22077/JT.2022.4752.1123

آنالیز ساختاری منطقه سیاه جکوک، جنوب شرق زاهدان، پهنه زمین درز سیستان

زهرا حسینی^۱، عبدالرضا پرتابیان^{۲*}

۱- کارشناس ارشد تکنیک- دانشکده علوم- گروه زمین شناسی- دانشگاه سیستان و بلوچستان- زاهدان- ایران

۲- استادیار تکنیک- دانشکده علوم- گروه زمین شناسی- دانشگاه سیستان و بلوچستان- زاهدان- ایران

چکیده:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۵

منطقه سیاه جکوک، در بخش شرقی پهنه جوش خورده سیستان و جنوب شرقی زاهدان واقع شده است. در این منطقه دایک‌های با روند مشخص نفوذ کرده و تحت تاثیر چین، گسل، بودیناژ قرار گرفته است. هدف این مطالعه بررسی روند دگرشکلی در این منطقه است. بدین منظور مشخصات و روابط فضایی ساختارها با یکدیگر مورد بررسی قرار گرفته، سپس با استفاده از روش بازسازی شبکه استریوگراف و دایره مور سه بعدی، وضعیت تنش در هنگام جایگیری دایکها مورد بررسی قرار گرفت. بررسی روابط قطع شدگی، اطلاعات آماری، بودین شدگی و هندسه چین خوردگی ها در منطقه، چهار مرحله اصلی دگرشکلی ناشی از یک دگرشکلی پیشرونده در منطقه را پیشنهاد می کند. بدین ترتیب که در ابتدا لایه بندی اولیه بعد از یک چین خوردگی منطقه ای از حالت افقی خارج شده و در گام دوم دایکها در امتداد سطوح ضعف آنها نفوذ کرده اند. در مرحله سوم چین ها و دایک ها تحت تاثیر مولفه برشی دچار چین خوردگی و بودیناژ شده اند. در این مرحله تغییر در فاصله و ضخامت دایکها به عنوان مناطق مقاوم، باعث تکامل متفاوت چین خوردگی، گسلش و منجر به تفکیک و تنش در منطقه شده است. در مرحله چهارم، رژیم تنشی راستگرد شمالی- جنوبی باعث توسعه گسلهای راستگرد با امتداد شمالی- جنوبی در منطقه شده است.

واژه های کلیدی: دایک، تنش، دایره مور، ترافشارش

* ایمیل: partabian_reza@science.usb.ac.ir

تلفن تماس: ۰۵۴۳۱۱۳۲۲۸۲

Structural analysis of Siah-Jakouk area, South-east Zahedan, Sistan Suture Zone

Zahra Hasanian¹, Abdolreza Partabian^{2*}

1- M.Sc. Of Tectonics – College of Science- University of Sistan and Baluchestan- Zahedan- Iran

2- Ph.D of Tectonics- College of Science- University of Sistan and Baluchestan- Zahedan- Iran

Abstract:

The Siah-Jakouk area is located in the eastern part of the Sistan Suture Zone, southeast of Zahedan. This area has been affected by faulting, folding, boudinage and dyke swarm. The main objective of this research is to display the deformation history of this area. For this purpose, the characteristics and spatial relationships of the structures were extracted, and the state of stress during the emplacement of the dykes was investigated using the 3D Mohr and stereographic methods. Statistical analysis and the cross-cutting relationships, as well as the geometry of the folding and boudinaged structures, suggest four main phases of deformation due to progressive deformation in this region. At first, the initial horizontal layering is inclined. Then the dykes penetrate along their weak surfaces, subsequently layering with parallel dykes, undergo shear component along that caused folding and boudinage. At this phase, changes in the distance and thickness of dykes as resistant areas, have led to different evolutions of folding and faulting, and strain. In the last phase of deformation, the study area is affected by the north-south right-lateral faults caused by the current north-south stress regime of the Sistan Suture Zone.

Keywords: Dyke, Stress, Moore's Circle, Transpression

**مقدمه**

بر روی کمپلکس‌های نه و رتوک قرار گرفته و شامل رسوبات پیش‌کمانی ماستریشتین تا ائوسن تشکیل شده است.

سنگ‌های منطقه مورد مطالعه شامل فیلیش‌های (ماسه سنگ، لای سنگ (siltstone) و گلسنگ (mudstone)) چین‌خورده است که مورد هجوم تعداد زیادی دایک و سیل قرار گرفته است. با توجه به وفور دایک‌ها در گرانیته زاهدان (غرب منطقه مورد مطالعه) و مناطق اطراف مطالعات متعددی بر روی آنها انجام گرفته که عبارت‌اند از: سرحدی (۱۳۹۳): دایک‌های توده لخشک (گرانیت زاهدان و غرب منطقه مورد مطالعه) را بررسی کرده و روند آنها را شمال شرق-جنوب غرب معرفی می‌کند. ایرانی (۱۳۹۳): دگرشکلی و شرایط جایگیری دایک‌های موجود در توده گرانیته شمال و شمال غرب زاهدان را مورد مطالعه قرار داده و دگرشکلی این منطقه را ناشی از زون برشی بزرگ مقیاس محدود بین گسل‌های نصرت آباد و زاهدان معرفی یک مدل ترافشارش راستگرد را برای دگرشکلی این منطقه معرفی می‌کند. فاطمیان (۱۳۹۴): دایک‌های مجموعه فلیشی شمال زاهدان را با روند غالب شمالی- جنوبی و ترکیبی از آلکالی لامپروفیر تا مافیک (بازالت) و فلسیک (آندزیت) معرفی می‌کند.

ساختارهای دگرشکلی منطقه مورد مطالعه

برداشت‌های صحرایی نشانگر ساختارهای متنوعی است که منطقه مورد مطالعه را تحت تاثیر قرار داده است؛ بنابراین در این قسمت به معرفی و نقش آنها در آشکار سازی وضعیت تکتونیک منطقه پرداخته می‌شود.

در ابتدا به منظور بررسی ساختارهای بزرگ مقیاس سعی شد تصاویر ماهواره‌ای (به طور مثال Google Earth و SASPlanet) با قدرت تفکیک مکانی بالا مورد بررسی قرار گیرد و سپس در عملیات صحرایی مشخصات فضایی ساختارها و امتداد لایه‌بندی در مقیاس رخنمون برداشت گردید.

لایه بندی:

با مطالعه دقیق تصاویر ماهواره‌ای امتداد لایه بندی بر روی نقشه زمین‌شناسی ترسیم گردید (شکل ۱) سپس با مطالعات میدانی صحت این اطلاعات مورد بررسی قرار گرفت. امتداد لایه بندی استخراج شده عمدتاً

منطقه دگرشکل شده سیاه جکوک در جنوب شرق پهنه برشی و برشی-فشارشی (Transpression) جوش خورده سیستان و ۲۰ کیلومتری جنوب شرق شهر زاهدان قرار گرفته است (Samimi et al., 2020) (شکل ۱). از ساختارهای اصلی تکتونیک که این پهنه را تحت تاثیر قرار داده است می‌توان به گسل‌های امتداد لغز شمالی جنوبی اشاره کرد (Walker and Jackson 2004). گسل‌های زاهدان و نصرت آباد از جمله گسل‌های اصلی در حاشیه شرقی و غربی پهنه جوش خورده و همچنین منطقه مورد مطالعه قرار هستند (آقاشاهی، ۱۳۸۵; Khatib, 2009).

برداشت‌های صحرایی و بررسی تصاویر ماهواره‌ای منطقه سیاه جکوک حکایت از وجود ساختارهای متعدد و متفاوتی از جمله دایک (سیل)، گسل و چین دارد که تا کنون با دقت بالا مورد مطالعه قرار نگرفته است (شکل ۱). هدف این مطالعه بررسی هندسه چین‌ها، گسل‌ها و ارتباط آنها با دایک‌ها و همچنین تحلیل واتنش در هنگام جایگیری دایک‌ها است. لذا مطالعه این منطقه با توجه به نزدیکی به گسل زاهدان و وجود ساختارهای متنوع و به طور کلی جهت آشکار سازی وضعیت تکتونیک منطقه‌ای، دارای اهمیت است.

موقعیت زمین‌شناسی

کمپ و گریفیس (Camp and Griffis 1982) با مطالعه پهنه دگرشکل شده شرق ایران این منطقه را به عنوان پهنه جوش خورده سیستان نام برده‌اند. این منطقه طی تاریخ دگرشکلی خود تاثیر وقایع تکتونیک و نفوذی‌ها آذرین قرار گرفته است. از جمله فعالیت‌های آذرین این پهنه می‌توان به سنگ‌های افیولیتی، کالک آلکالن، باتولیت‌های گرانیته-آلکان و ماگماتیسیم‌های جوان منطقه، اشاره کرد. تیروول و همکاران (Tirru et al., 1983) فعالیت‌های تکتونیک این پهنه را با سه مرحله فرورانش در زمان ائوسن میانی، همگرایی و برخورد دو بلوک عربی و اوراسیا در دوره بعد از میوسن، به تصویر کشیده‌اند. این پهنه از سه قسمت متفاوت شامل ۱- کمپلکس نه در غرب با سنگ‌های فیلیشی و مواد افیولیتی با سن کرتاسه تا ائوسن ۲- کمپلکس رتوک در شرق، شامل فیلیش‌های کرتاسه، سنگ‌های افیولیتی و ملائزهای دگرگونی ۳- حوضه سفیدابه که

دوم گسل های شمالی جنوبی هستند که دارای طول بیشتری نسبت به دسته اول بوده و علاوه بر چینه‌ها و دایک گسل های دسته اول را قطع کرده و از آنها جوانتر هستند (شکل ۱ و ۷).

دایک:

در نقشه ۱/۱۰۰،۰۰۰ زاهدان (Berberian, 1983) تمام نفوذی های آذرین در منطقه را دایک نامگذاری کرده است ولی مطالعات صحرایی و ماهواره ای این پژوهش نشان می دهد که در جنوب این منطقه این نفوذی ها به اندازه کافی ضخیم و در امتداد لایه بندی نفوذ کرده اند، لذا آنها را با عنوان دایک های ضخیم و سیل معرفی شده اند. به طور کلی امتداد دایکها شمال غرب - جنوب شرق (به جز دایک های مزدوج در مرکز و جنوب منطقه) است (شکل a5 و b5) و به موازات لایه ها قرار دارند (شکل c5 و d5). ضخامت دایکها از شمال به جنوب منطقه افزایش پیدا میکند (شکل ۱ و ۷). دایک های نفوذ کرده در قسمت میانی منطقه شامل دو دسته دایک متفاوت می شوند. دسته اول دایک های دگر شکل شده هستند که در قسمت دگرشکلی یک ساختار Z مانند را نشان می دهند. دایک ها در این قسمت Z مانند ضخیم تر از قسمت های دیگر هستند. (شکل e5 و f5 شکل ۷). دسته دوم دایک‌هایی مزدوج هستند که عمدتاً دارای روند شمال شرق - جنوب غرب و شمال غرب - جنوب شرق بوده و دایکهای قبلی و لایه بندی را قطع کرده‌اند (شکل g5، h5 و شکل ۷). دایک های مزدوج نسبت به دیگر دایک ها دارای ضخامت کمتری هستند (شکل ۴). این دو دسته دایک در راستای شمال غرب - جنوب شرق تکه تکه شده و دچار بودین شدگی شده اند (شکل ۱ و ۷).

آنالیز تنش دیرین:

پوسته بالایی شامل شکستگی های فراوانی است که می تواند مسیرهایی را برای نفوذ و جایگیری ماگما فراهم کند؛ به عبارت دیگر ماگمای نفوذ کرده در این شکستگی ها بعد از سرد شدن دایک ها را شکل می دهند (Jolly and Sanderson, 1997). الگوی توزیع فضایی دایک ها، به مقدار تنش اصلی و فشار ماگما بستگی دارد (Mondal and Mamtani, 2013). در این تحقیق سعی شده است وضعیت فضایی محورهای

دارای روند ۱۵۰ تا ۱۶۵ (شمال غرب - جنوب شرق) درجه است و تعداد کمتری تقریباً در تمام جهات دیگر می توان مشاهده کرد که مورد دوم مربوط به لایه های چین خورده و در نتیجه تغییر روند در جهت های مختلف است (شکل ۲).

چین خوردگی:

به طور کلی امتداد لایه بندی در منطقه شمال غرب - جنوب شرق می باشد ولی لایه بندی اولیه تحت تأثیر چین خوردگی قرار گرفته و این چین ها هندسه متفاوتی از لحاظ طول موج، تنگ شدگی در منطقه از خود نشان میدهند (شکل ۱ و ۳). اثر سطح محوری چینه‌عمدتاً دارای امتداد بین ۱۲۰ تا ۱۳۰ درجه است (شکل a3). با بررسی دقیقتر مشخصات چین ها در سرتاسر منطقه می توان تغییراتی از شمال غرب به جنوب شرق و از شمال به جنوب در وضعیت فضایی این چین ها مشاهده کرد. در قسمت های شمال و شمال غربی منطقه چینها بین دو دایک اصلی با روند شمال غرب - جنوب شرق با الگوی متفاوتی نسبت به دیگر قسمت های منطقه محصور شده اند. در این قسمت چین‌های با طول موج حدود ۵۰۰ متر از جنوب شرق تا ۲۰۰ متر در قسمت شمال غرب مشاهده میشود و به طور کلی به سمت شمال غرب همراه با کم شدن فاصله دایک ها تنگ تر می شوند (شکل ۱). اثر سطح محوری این ساختارها دارای روند کلی شمال غرب - جنوب شرق می باشد (شکل ۳).

گسلها:

بعد از استخراج دقیق مشخصات لایه بندی و دایک ها، مشاهده می شود که این ساختارها توسط گسل هایی با روند متفاوت جابجا شده اند (شکل ۴). گسل های منطقه عمدتاً به دو دسته اصلی و راستگرد تقسیم می شوند. دسته اول که دارای فراوانی بیشتری در منطقه است، دارای آزیموت ۱۲۰ درجه و دسته دوم با فراوانی کمتر دارای آزیموت ۱۷۵ درجه میباشند (شکل ۴a). دسته اصلی اول گسل‌های با امتداد شمال غرب - جنوب شرقی و تقریباً به موازات دایکها هستند. این گسل ها چینه‌ها را قطع کرده و عمدتاً قسمت شمال منطقه را تحت تأثیر قرار داده اند. حرکت راستگرد این گسل ها باعث ایجاد چین های کشیده شده (Drag fold) در منطقه شده است (شکل c3 و ۸) دسته



ترجیحی شکستگی‌هایی است که دایک‌ها در آن نفوذ کرده‌اند و در این حالت و $P_f > \sigma_2$ می‌باشد. در شرایطی که توزیع قطب دایک‌ها به صورت خوشه‌ای باشد، محل تجمع قطب دایک‌ها σ_3 است و با استفاده از آن می‌توان صفحات σ_1 ، σ_2 و σ_3 و زوایای θ_1 و θ_2 را به دست آورد. بر اساس مطالعات توسط جولی و سندرسون (Jolly and Sanderson, 1997) نسبت فشار رانندگی (\hat{R}) را می‌توان از معادله ۳ و نسبت تنش (\emptyset) با معادلات ۴ و ۵ محاسبه کرد و با استفاده از این اطلاعات دایره مورسه بعدی را رسم کرد.

$$۳) \hat{R} = \frac{P_f - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} = \frac{1 + \cos 2\theta_2}{2}$$

$$۴) \emptyset = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} = \frac{1 + \cos 2\theta_1}{1 + \cos 2\theta_2}$$

$$۵) \emptyset = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} = 1 - \frac{1 - \cos 2\theta_2}{1 - \cos 2\theta_1}$$

در منطقه مورد مطالعه اطلاعات میدانی دایک‌هایی که تحت تاثیر چین خوردگی قرار نگرفته‌اند بدین منظور مورد استفاده قرار گرفت. این دایک‌ها دارای امتداد غالب شمال غرب-جنوب شرق و شیب ۵۰ تا ۸۰ درجه به سمت شمال شرق می‌باشند. با پلات نقاط بر روی شبکه استریوگراف یک الگوی خوشه‌ای را می‌توان مشاهده کرد لذا مرکز این خوشه است (شکل ۶).

استریوگراف خوشه‌ای ترسیم شده (شکل ۶a)، نشان دهنده $P_f < \sigma_2$ است و می‌توان محل صفحات σ_3 و σ_1 را بر روی آن نمایش داد و سپس زوایای و استخراج دایره مورسه ترسیم گردید (شکل ۶b). سپس با استفاده از این مقادیر محاسبه شده، فشار رانندگی ماگما و تنش مؤثر در هنگام جایگیری به دست آمد. با استفاده از صفحات اصلی ترسیم شده روی استریوگراف جهت گیری تنش‌های دیرین و مقدار تنش رانندگی نیز محاسبه گردید این مقادیر عبارت‌اند از:

جهت گیری تنش‌ها:

$$= 234/32\sigma_3 = 341/24\sigma_2 = 101/48\sigma_1$$

زوایای:

$$= 67\theta_2 = 54\theta_1$$

و مقدار تنش رانندگی:

$$\hat{R} = \frac{1 + \cos 2(134)}{2} = 0/27$$

تنش دیرین و همچنین مقدار تنش مؤثر و فشار ماگما در هنگام جایگیری دایک‌ها مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور از روش شبکه استریوگراف و دایره مورسه استفاده شده است (Sibson, 1992). بدین صورت که با توجه به الگوی توزیع قطب دایک‌ها در شبکه استریوگراف جهت و محل قرارگیری محورهای تنش بررسی شده و سپس با رسم دایره مورسه حالت تنش دیرین بازسازی می‌شود. به عبارت دیگر از دایک‌ها به عنوان سطوح عمود بر تنش حداقل، می‌توان برای بررسی تنش دیرین استفاده کرد (Pitcher, W.S., 1979; Bussell, 1989; Mondal and Mamtani, 2013; Sama-ni et al., 2017). روش دایره مورسه و شبکه استریوگراف یکی از موثرترین روش‌ها برای برآورد تنش دیرین و همچنین تعیین فشار ماگما در هنگام جایگیری دایک‌ها است (Sibson, 1992). در این روش براساس نوع توزیع قطب دایک‌های پلات شده (خوشه‌ای یا کمربندی)، می‌تواند جهت گیری محورهای تنش‌های اصلی (σ_1 ، σ_2 و σ_3) را محاسبه کرد (شکل ۶).

بائر و همکاران (Baer et al., 1995) در شرایط سه بعدی معادلات ۱ و ۲ را برای توصیف وضعیت تنش و فشار ماگما (P_f) ارائه دادند. \hat{R} نسبت فشار رانندگی و \emptyset نسبت تنش است.

$$1) \hat{R} = \frac{P_f - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$$

$$2) \emptyset = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$$

بر اساس این معادلات، در هنگام جایگیری و نفوذ ماگما با شرط $\hat{R} > 0$ شکستگی‌ها می‌توانند توسعه پیدا کنند. اگر $P_f = \sigma_3$ و $\hat{R} = 0$ باشد سنگ‌ها دچار شکستگی نشده یا شکستگی‌های موجود از هم باز نمی‌شوند. اگر $P_f = \sigma_1$ و $\hat{R} = 1$ آنگاه شکستگی‌ها بدون جهت یافتگی خاصی در تمام جهات توسعه پیدا می‌کنند. این روش در ابتدا توسط جولی و سندرسون (Jolly and Sanderson, 1997) جهت پیش‌بینی جهت گیری دایک‌ها در هنگام نفوذ ماگما ارائه شده است. توزیع خوشه‌ای قطب دایک‌ها نشان دهنده این است که این ساختارها در هنگام جایگیری به صورت جهت یافته نفوذ کرده‌اند و $P_f < \sigma_2$ است در حالی که توزیع کمربندی قطب‌ها نشان دهنده عدم جهت یافتگی

$$\theta = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \frac{1 + \cos(134)}{1 + \cos(108)} = 0/38$$

نتایج به دست آمده نشانگر جایگیری دایکها در شرایطی است که فشار ماگما کمتر از تنش متوسط بوده و در نتیجه توانایی ایجاد شکستگی را نداشته و دایکها در امتداد شکستگیها و مناطق ضعف از قبل موجود قبلی نفوذ کردهاند.

بحث و نتیجه گیری:

در این قسمت اطلاعات و نتایج استخراج شده از وضعیت فضایی ساختارهایی متفاوت مانند گسلها، دایکها، لایه بندی، چینها، روابط قطع شدگی (cross-cutting) و آنالیز تنش دیرین به دست آمده از دایکها برای آشکار کردن تاریخ دگرشکلی در منطقه مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به اینکه منطقه مورد مطالعه قسمتی پهنه زمین درز سیستمان است، مطالعات میدانی و گذشته (Tirull et al., 1983; Camp and Griffis, 1982) حکایت از وجود سنگهای فیلیش به عنوان زمینه اصلی با امتداد کلی شمال غرب- جنوب شرق است. وجود ساختارهایی مانند دایکهای چین خورده که عمدتاً به موازات لایه بندی نفوذ کرده اند، چین خوردگی لایه های رسوبی و گسلهای با روند متفاوت که این ساختارها را قطع کرده اند نشان از یک تاریخ تکاملی دگرشکلی در منطقه مورد مطالعه است.

تحلیل تنش دیرینه و مشخصات فضایی دایکها و سیل های نشان دهنده این است که فشار ماگما در هنگام جایگیری کمتر از تنش متوسط بوده و هنگام نفوذ ماگما در مناطق ضعف و شکستگیهای موجود در منطقه نفوذ کرده اند. علاوه بر دایکهای با امتداد کلی شمال غرب- جنوب شرق شاهد دایکهای مزدوج با ضخامت کمتر هستیم که علاوه بر روند متفاوت دایکهای قبلی و لایه بندی را قطع کرده و در مواردی خود نیز دچار چین خوردگی و بودیناژ شده اند. بنابراین این دایکها جوانتر از دسته قبلی جوانتر و هندسه آنها معرف عامل تنش تکتونیکی با امتداد شمالی- جنوبی تا شمال غرب- جنوب شرق در منطقه در هنگام جایگیری آنها است.

چینهای موجود در منطقه از دو جنبه مقیاس و هندسه قابل تفکیک و طبقه بندی هستند که دارای توضیح

متفاوتی در منطقه است. دسته اول چینهای متقارن با طول موج بزرگ و دسته دوم چینهای با طول موج کوتاه تر به صورت مجزا و گاهی بر روی یال شمالی چینهای بزرگتر شکل گرفته اند و یک الگوی Z مانند که می تواند شواهدی بر مولفه برشی راستگرد باشد را نشان می دهند (شکل ۸b و ۹c). به طور کلی چین خوردگی در در منطقه را می توان با یک روند تکاملی که در ابتدا اعمال تنش در جهت عمود بر لایه بندی باعث چین خوردگی متقارن شده و سپس با تغییر تنش به برش راستگرد به موازات لایه بندی باعث شکل گیری چینهای نامتقارن و در ادامه با افزایش چین خوردگی، گسلها دامنه های پرشیب چینها را قطع کرده اند، توصیف کرد (شکل ۳f). دسته دیگر وجود چینهای کشیده (Drag fold) است که در کنار دایکها و گسلها شکل گرفته و نشان از حرکت برشی در امتداد این ساختارها است. (شکل ۳c و ۸). همراه بر لایه بندی سنگهای رسوبی دایکهایی که بین این سنگها نفوذ کرده اند نیز دچار چین خوردگی برشی شده اند. شاید در گام نخست اینچنین به نظر برسد که دایکها در دو منطقه ضعف که با یکدیگر زاویه می سازند نفوذ کرده اند و این ساختارها حاصل چین خوردگی نمی باشند. برای پاسخ به این مشکل می توان به شواهدی مانند چین خوردگی همزمان لایه بندی به همراه دایکها و تبعیت آنها از قسمت های چین خورده دایک اشاره کرد (شکل ۳e) و دوم اینکه هندسه دایکها و شبه به چینهای همجوار است (شکل ۸ و ۹). به طور کلی شدت چین خوردگی از شمال به جنوب کاهش پیدا کرده و در جنوب منطقه لایه بندی و نفوذیها به صورت شمال غرب- جنوب شرق بدون چین خوردگی هستند. تعدادی از دایکهای با امتداد شمال غرب- جنوب شرق دچار بودین شدگی شده اند و در قسمت هایی به شکل ساختارهای برشی مانند ساختارهای سیگما و دلتا دچار دگرشکلی شده اند. تمامی این نشانه ها حکایت از برش خوردگی در امتداد این ساختارها دارد. این شواهد را می توان در تعدادی از دایکها چین خورده نیز مشاهده کرد که بعد از چین خوردگی دچار کشش و بودین شده اند. به عبارت دیگر این کشیدگی به موازات امتداد لایه بندی رخ داده که خود می تواند شواهدی بر برش

توان مرحله دوم را نفوذ دایک‌ها در امتداد لایه بندی دانست.

۳- مرحله سوم را می‌توان چین خوردگی لایه بندی به همراه دایک‌ها در منطقه دانست. به عبارت دیگر بعد از نفوذ دایک‌ها، در ابتدا مولفه فشارش شمال شرق - جنوب غرب و در ادامه با افزایش مولفه برشی راستگرد باعث چین خوردگی لایه‌های اولیه و سپس ایجاد چین‌های نامتقارن در منطقه شده است. در این مرحله دایک‌ها به عنوان لایه‌های مقاوم در مقابل لایه‌های رسوبی با مقاومت کمتر باعث کنترل چین خوردگی در منطقه شده‌اند. به عبارت دیگر در این مرحله لایه‌های با مقاومت بالا مانند دایک‌های مقاوم و ضخیم و فیلیش‌های نازک با مقاومت کمتر در یک رژیم برشی راستگرد دچار چین خوردگی میشوند ولی چین خوردگی اولیه ناشی از مولفه فشارشی مربوط به لایه بندی است ولی در چین خوردگی ناشی از مولفه برشی و دایک‌های با ضخامت کم به همراه لایه بندی دچار چین خوردگی شده و در قسمت‌هایی دایک‌های مقاوم عمدتاً به موازات سطوح برش دچار کشیدگی و بودین شدن شده‌اند.

در این مرحله مطابق با تغییرات تنش دایک‌های مزدوج که در زونهای برشی مزدوج ناشی تنش تکنونیک شمالی - جنوبی تا شمال شرق - جنوب غرب نفوذ کرده و ساختارهای قدیمی تر را قطع می‌کنند. شواهد دگرشکلی دایک‌ها مزدوج نشان دهنده این واقعیت است که این ساختارها بعد از نفوذ تحت تاثیر مولفه ای برشی ناشی از تراشکاری راستگرد دچار چین خوردگی و بودیناژ شده‌اند.

۴- مرحله چهارم به عنوان آخرین مرحله دگرشکلی با گسل‌های طولانی و امتداد لغز راستگرد شمالی جنوبی مشخص می‌شود. که گسلها تمامی ساختارهای قدیمی تر را قطع کرده به خوبی رژیم تنش راستگرد امروزی پهنه زمین درز سیستان را که دارای امتداد شمالی - جنوبی است را بازگو می‌کند (Kashani et al., 2019).

در این قسمت لازم به ذکر است با توجه به اینکه ۴ مرحله متفاوت را برای دگرشکلی منطقه تعریف شده است ولی این مراحل به صورت پیوسته رخ داده و معرف یک دگرشکلی پیشرونده پهنه زمین درز سیستان

خوردگی با امتداد شمال غرب - جنوب شرق بعد از نفوذ دایک‌ها و چین خوردگی آنها باشد. (شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰)

تفکیک و اتنش (strain partitioning)

نقشه ساختاری حاصل از اطلاعات به دست آمده منطقه (شکل ۷) نشانگر تفکیک منطقه به سه قسمت با الگوی دگرشکلی متفاوت است که می‌توان حاصل یک تفکیک و اتنش (Strain partitioning) در منطقه دانست. این تفکیک عمدتاً به علت وجود دایک‌ها با ضخامت و فاصله متفاوت از هم به عنوان مناطقی که در مقابل دگرشکلی مقاومت می‌کنند می‌توان پیشنهاد داد. بدین صورت که در قسمت شمالی (منطقه ۱) دایک‌ها با فاصله زیادتر و ضخامت کمتر از هم قرار گرفته‌اند و به عنوان مناطق مقاوم باعث تمرکز تنش و شکل گیری چینهای با طول موج بزرگ و زاویه بین یالی پهن مابین خود شده‌اند. در مرکز (منطقه ۲) به علت کم تر شدن فاصله بین دایک‌ها، چین‌ها دارای زاویه بین یالی تنگتر و طول موج کوتاهتر هستند. با توجه به اینکه تعداد دایک‌ها، ضخامت (که در قسمت جنوب منطقه عملاً تبدیل به سیل شده‌اند) تراکم آنها در قسمت جنوب و جنوب شرقی بیشتر است. این ویژگی دایک‌ها باعث شده است در قسمت جنوبی شاهد چین خوردگی کمتر و یا بدون چین خوردگی باشیم (منطقه ۳) لذا می‌توان منطقه مورد مطالعه را به ۳ قسمت که دارای دگرشکلی متفاوتی هستند تقسیم کرد (شکل ۷).

روند دگرشکلی منطقه:

با توجه به اطلاعات به دست آمده، ۵ مرحله برای تکامل دگرشکلی در منطقه پیشنهاد می‌گردد.

۱- با توجه به مدل تکنونیک تیرول و همکاران (Tirull et al., 1983) برای پهنه زمین درز سیستان در آخرین مراحل تکامل حوضه در منطقه مورد مطالعه، لایه‌های اولیه بر اثر مولفه فشارشی شمال شرق - جنوب غرب) تحت تاثیر یک چین بزرگ مقیاس با امتداد شمال غرب - جنوب شرق قرار گرفته و از حالت افقی خارج می‌شود. منطقه مورد مطالعه قسمتی از یال شمال شرقی این چین امتداد بندی شمال غرب - جنوب شرق است.

۲- با توجه اطلاعات حاصل از آنالیز تنش دیرین و اینکه دایک‌ها در امتداد لایه بندی نفوذ کرده‌اند می



Tectonic implication of geomorphometric analyses along the Saravan Fault: evidence of a difference in tectonic movements between the Siestan Suture Zone and Makran Mountain Belt. *Journal of Mountain Science*, 16(5), 1023-1034.

Khatib, M. M., 2009. Activity evaluation of Zahedan fault by morphotectonic invariant, East of Iran. *International conference on geology and seismology* 76.

Mondal, T. K., Mamtani, M. A., 2013. 3-D Mohr circle construction using vein orientation data from Gadag (southern India)–Implications to recognize fluid pressure fluctuation. *Journal of Structural Geology*, 56, 45-56.

Pitcher, W.S., 1979. The nature, ascent and emplacement of granitic magmas. *Journal of the Geological Society, London* 136, 627–662.

Pollard, D.D., 1987. Elementary fracture mechanics applied to the structural interpretation of dykes. In *Mafic Dyke Swarms* (Halls, H.C.; Fahig, W.F.; editors). Geological Association of Canada, Special Paper 34: 5-24.

Sadeghian, M., Bouchez, J. L., Nedelec, A., Siqueira, R., & Valizadeh, M. V., 2005. The granite pluton of Zahedan (SE Iran): a petrological and magnetic fabric study of a syntectonic sill emplaced in a transtensional setting. *Journal of Asian Earth Sciences*, 25(2), 301-327.

Samani, B., and Kolahi-Azar, A. P., 2017. Stress state and fluid pressure analyses using ultramafic dykes and calcite veins, SW Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(5), 96.

Samimi, S., Gholami, E., Khatib, M. M., Madanipour, S., & Lisker, F., 2020. Transpression and Exhumation of Granitoid Plutons along the Northern Part of the Nehbandan Fault System in the Siestan Suture Zone, Eastern Iran. *Geotectonics*, 54(1).

Sibson, R.H., 1992. Implications of fault-valve behavior for rupture nucleation and recurrence, *Tectonophysics*, 18, 1031–1042.

Tirrul, R.I.R., Bell, R.J., Griffis., Camp, V.E., 1983. The Siestan suture zone of eastern Iran, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 94, 134 – 150.

Walker, R. Jackson, J., 2004. Active tectonics and late Cenozoic strain distribution in central and eastern Iran. *Tectonics* 23, TC5010.

در این منطقه است.

تشکر و قدردانی: نگارندگان از سردبیر محترم فصلنامه زمین ساخت و همچنین داوران محترم که در ارتقا علمی این مقاله نقش مائری ایفا کرده اند تشکر و قدر دانی می کنند. این پژوهش از حمایت های مادی و معنوی دانشگاه سیستان و بلوچستان بهره مند شده است.

منابع:

آقاشاهی. س، ۱۳۸۵. لرزه زمین ساخت و توان لرزه زایی گسل زاهدان پایان نامه کارشناسی ارشد تکتونیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان.

ایرانی، ز، ۱۳۹۳. بررسی ساختاری نحوه جایگیری دایک های موجود در توده گرانیتی شمال و شمال غرب زاهدان. پایان نامه کارشناسی ارشد: دانشگاه سیستان و بلوچستان.

سرحدی، ن، ۱۳۹۳. پتروگرافی دایک های گرانیتوئیدی لخشک. پایان نامه کارشناسی ارشد: دانشگاه سیستان و بلوچستان.

فاطمیان، م، ۱۳۹۴. پترولوژی و نحوه جایگیری دایک های موجود در مجموعه فلیشی شمال زاهدان. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه سیستان و بلوچستان.

کرد، م، قاسمی، ح، صادقیان، م، ۱۳۸۳. پتروگرافی، ژئوشیمی و پترولوژی دایک های موجود در توده گرانیتی زاهدان. همایش انجمن زمین شناسی.

Baer, G., 1995. Fracture propagation and magma flow in segmented dykes: field evidence and fabric analyses, Maktesh Ramon, Israel. In *Physics and Chemistry of Dykes* (Baer, G.; Heimann, A.; editors). Balkema: 125-140.

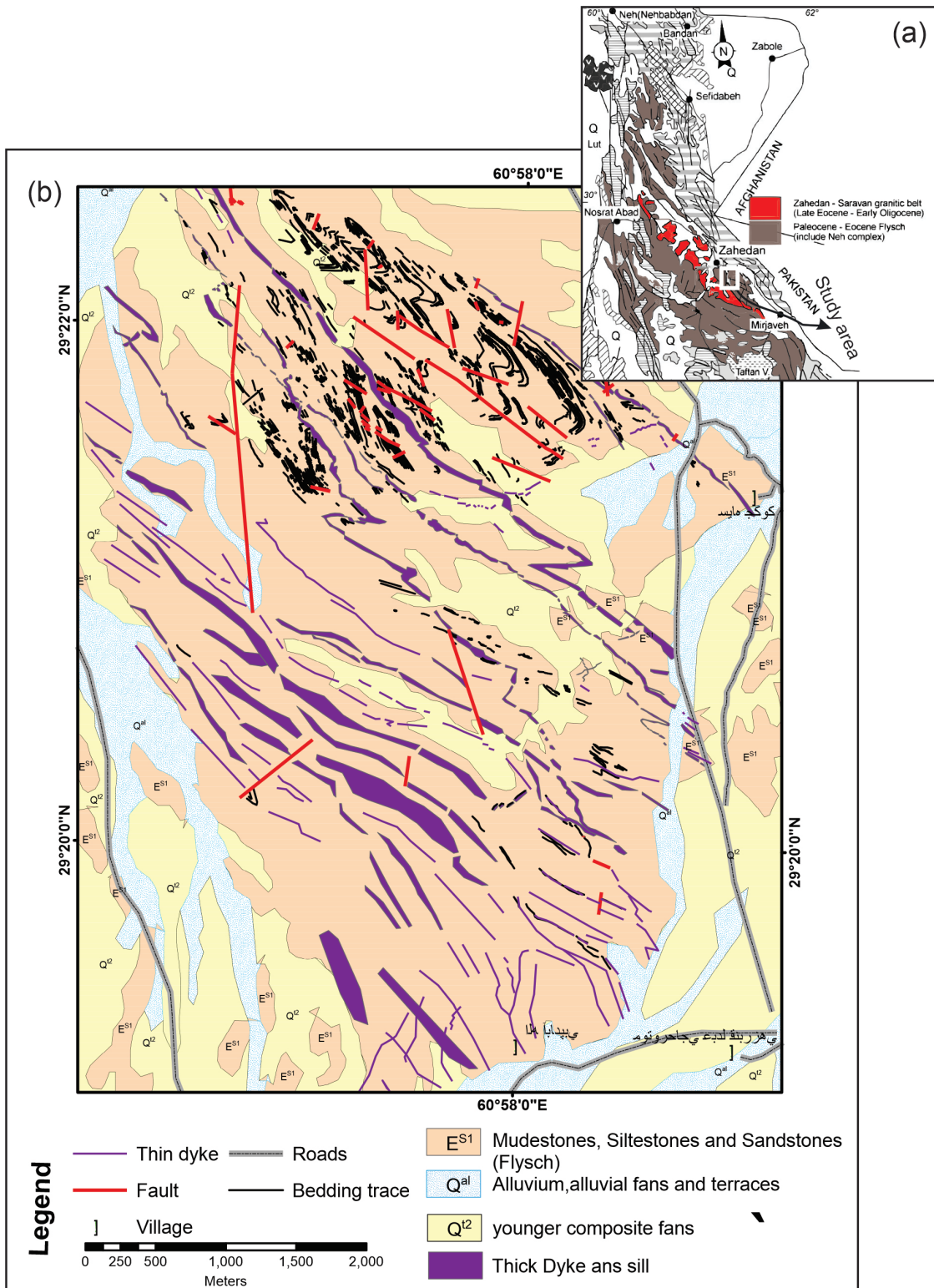
Berberian, M., 1983. Geological map of Zahedan 1/100000. Geological survey of Iran

Bussell, M. A., 1989. A simple method for the determination of the dilation direction of intrusive sheets. *Journal of Structural Geology*, 11(6), 679-687.

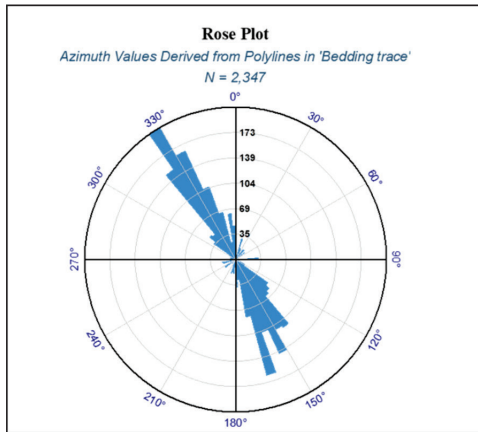
Camp, V.E., Griffis, R.J., 1982. Character, genesis and tectonic setting of igneous rocks in the Siestan Suture Zone, Eastern Iran. *Lithos* 15, 221–239.

Jolly R.J.H, Sanderson D.J., 1997. A Mohr circle reconstruction for the opening of a pre-existing fracture. *J Structural Geology* 19:887-892.

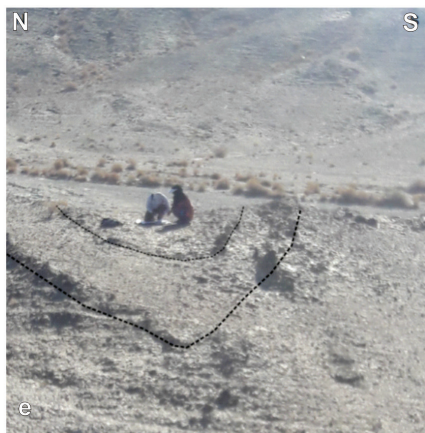
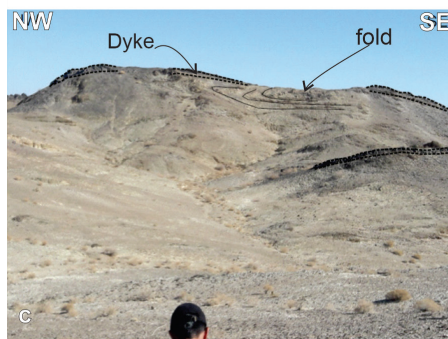
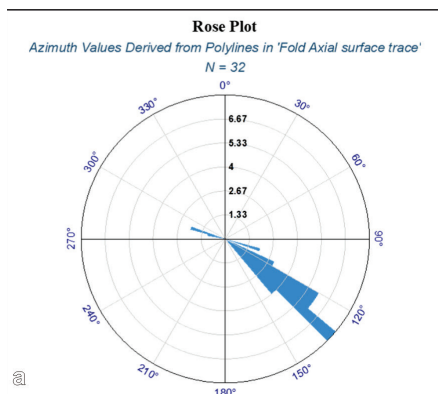
Kashani, R., Partabian, A., Nourbakhsh, A., 2019.



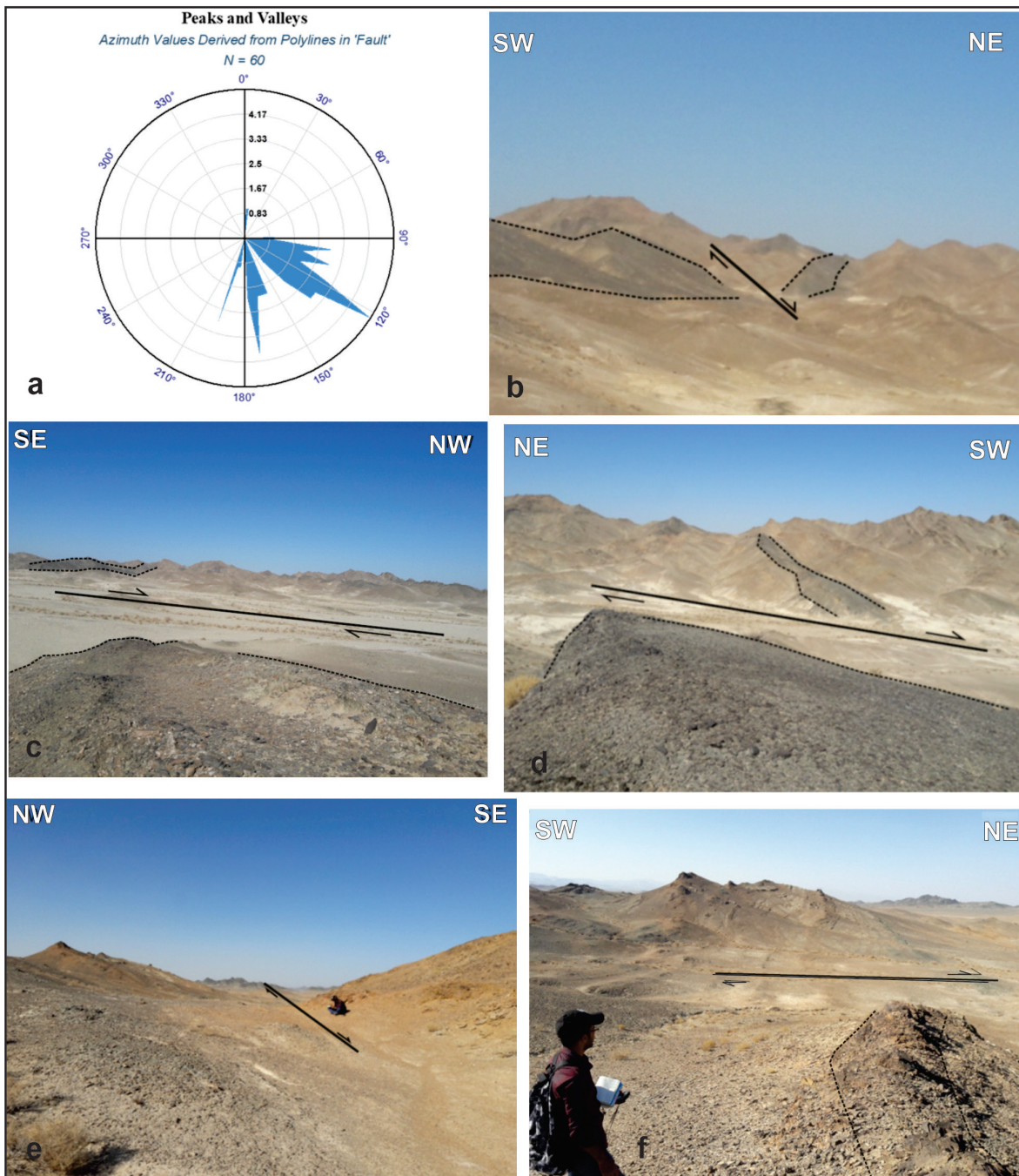
شکل ۱: (a) پهنه زمین درز سیستان (b) زمین شناسی منطقه مورد مطالعه (با تغییرات از نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ زاهدان (Berberian, 1983))



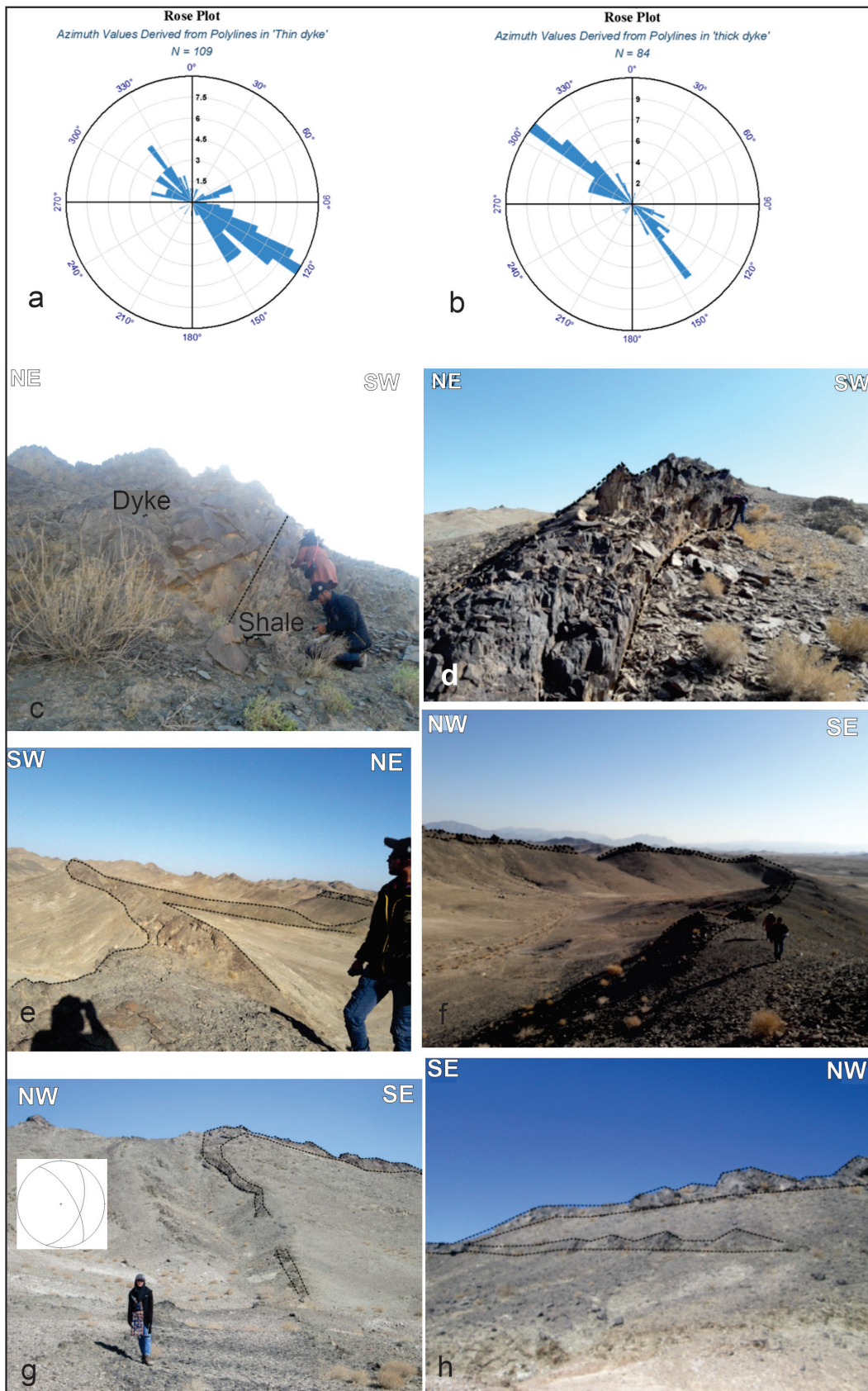
شکل ۲: امتداد لایه های فیلسی. راست: تصویر میدانی. چپ: رز دیاگرام امتداد لایه ها



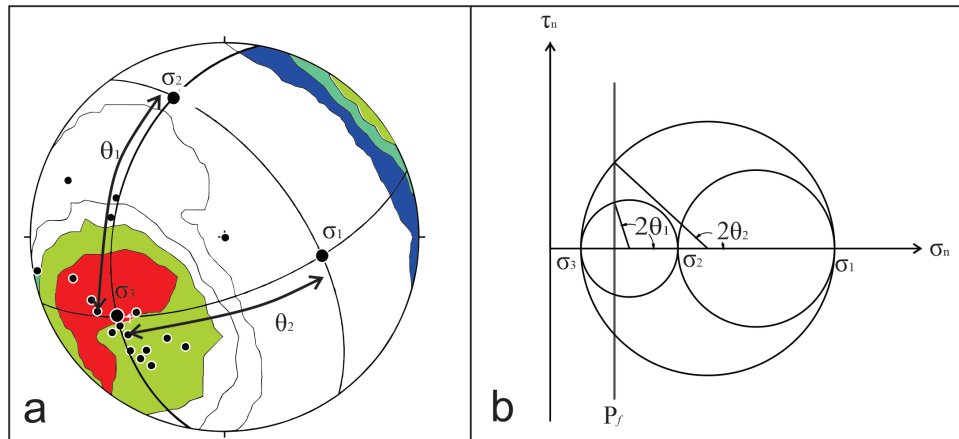
شکل ۳: چین خوردگی در منطقه مورد مطالعه. (a) رز دیاگرام امتداد سطح محوری چین ها (b) چین خوردگی با سطح محوری شمال شرق - جنوب غرب (c) چین خوردگی کشیده (drag fold) در کنار دایک. (c و d) چین خوردگی (f) گسل خوردگی چپ گرد پهلوی چین



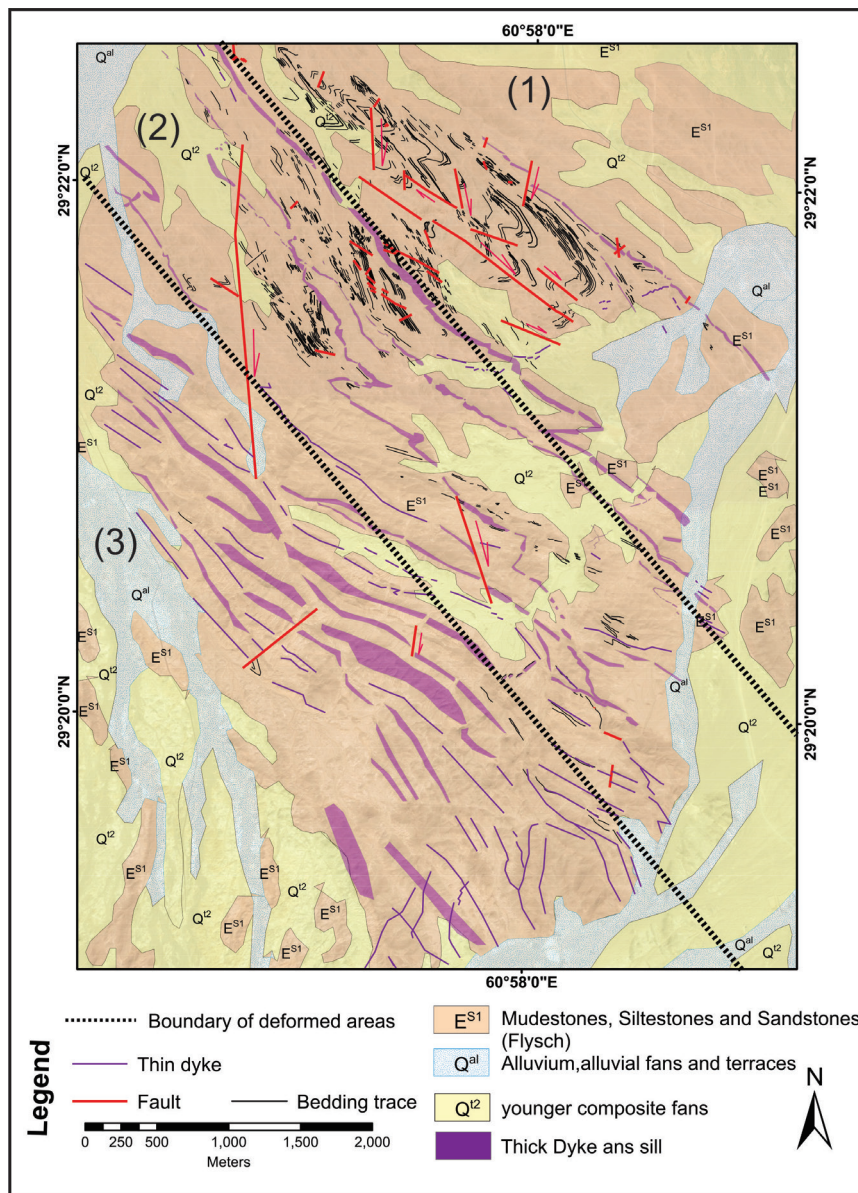
شکل ۴: گسل خوردگی در منطقه مورد مطالعه. a: رزدیاگرام گسل‌های منطقه b، c و d: گسل‌های راستگرد که دایک‌های منطقه را بریده و جابجا کرده‌اند. e و f: گسل‌های راستگرد که باعث جابجایی لایه بندی و چین‌ها شده‌اند.



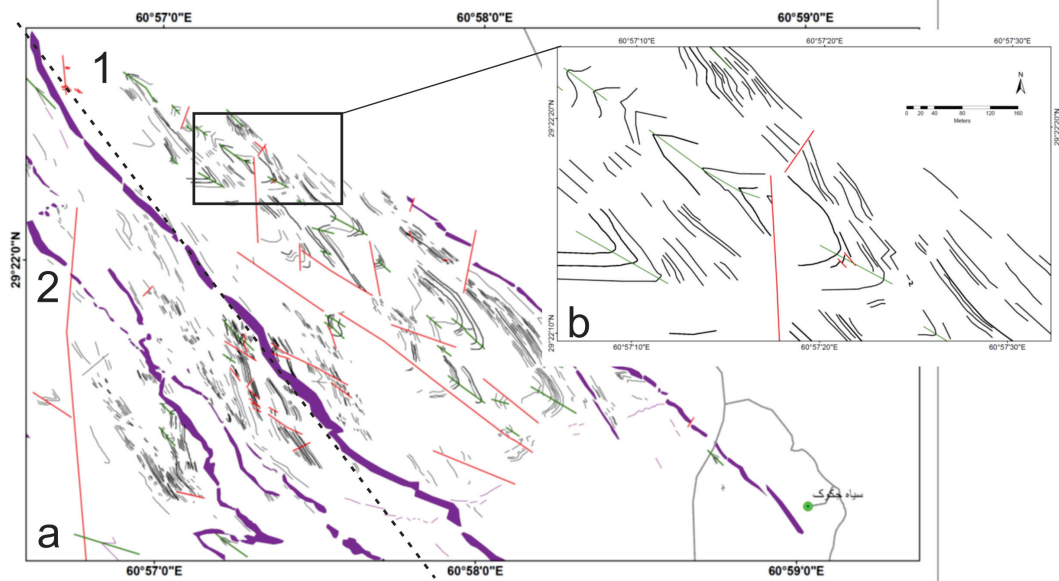
شکل ۵: دایک های منطقه مورد مطالعه. (a) رزداگرام دایک های با ضخامت کم (b) رزداگرام دایک های با ضخامت زیادتر. c و d: دایک های به موازات لایه بندی. (e و f) دایک های چین خورده. (g و h) دایک های مزدوج



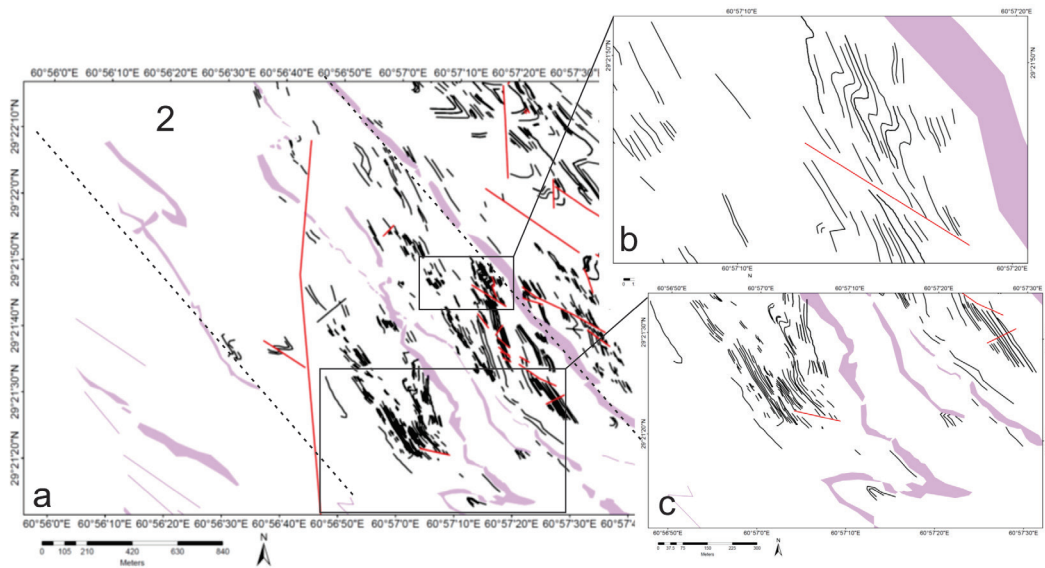
شکل ۶: تعیین پارامترهای مشخصات فضایی تنش‌های اصلی و زوایای بین آنها با استفاده از دایره مور و شبکه استریوگراف (a). شبکه استریوگراف که قطب دایک‌ها بر روی آن پلات شده است. (b) پارامترهای استخراج شده از استریوگراف در دایره مور سه بعدی برای برآورد فشار ماگما در منطقه مورد مطالعه.



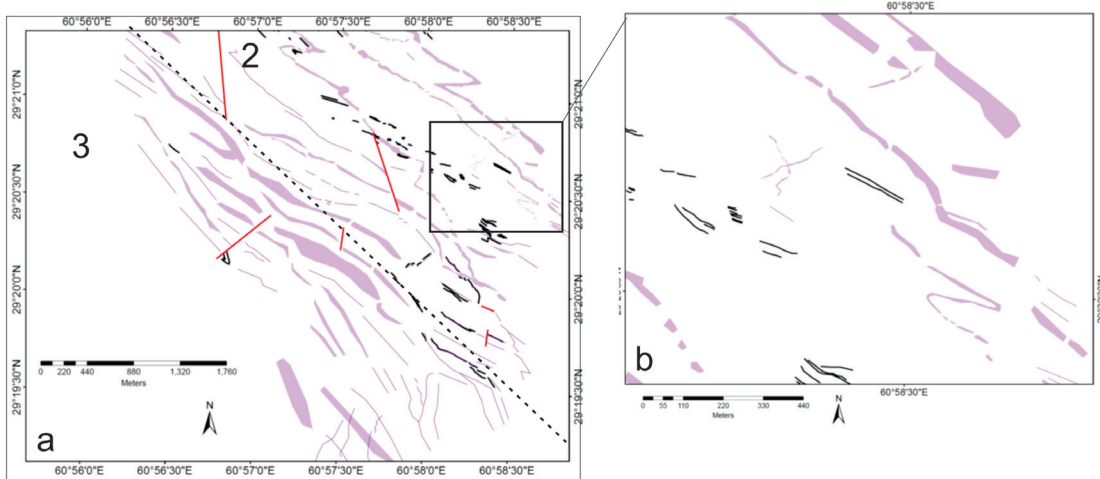
شکل ۷: نقشه ساختاری و زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه. خطوط نقطه چین مناطق دگرشکلی سه گانه که بر اساس ضخامت دایک‌ها و سیل‌ها، فاصله آنها از هم و چین خوردگی از هم تفکیک شده‌اند. (زمینه، تصویر ماهواره ای SASPlanet)



شکل ۸: منطقه ۱ و ۲ که توسط خط چین از هم جدا شده اند. (a) منطقه ۱ دگرشکلی: ما بین دو دایک با چین های باز و طول موج بلند. (b) چین های برشی Z شکل (نشانهگر برش راستگرد)، چین خوردگی همزمان با تنگ شدگی زاویه بین یالی به طرف شمال غرب، گسل خوردگی قوس داخلی چین و جابجایی چین ها توسط گسل.



شکل ۹: منطقه دگرشکلی ۲. (a) در این قسمت عمدتاً توسط چین خوردگی های با طول موج کوتاه تر از منطقه ۱ و چسبیده به دایک ها مشخص می شود. (b) چین های Z شکل ناشی از حرکت راستگرد در مجاورت دایک. (c) چین خوردگی همزمان دایک و لایه بندی. در این قسمت دایک به همراه لایه بندی چین خورده در پهلوی میانی دچار بودین شدگی شده است.



شکل ۱۰: منطقه ۲ و ۳ دگرشکلی (a) منطقه ۳ عمدتاً تحت تأثیر دایک و سیل با ضخامت زیاد قرار گرفته است. این ساختارها توسط دایک-های مزدوج قطع شده‌اند. لایه بندی به موازات دایک و سیل است. (b) دگرشکلی دایک چین خورده و دایک مزدوج.