

# زمین سافت



دانشگاه بیرجند

شاپا: ۲۴۵۱-۴۵۶-۲۶۷۶



پاییز ۱۳۹۹، سال چهارم، شماره ۱۵

- 
- ۱ \* بررسی سازوکار چین خوردگی بر پایه الگوی شکستگی ها در پهنه فلزایی طارم، شمال باختر قزوین .....  
صادق افشار نجفی، عزیز رحیمی، مهناز رضائیان، تقی نبی
- ۲۰ \* تغییر جهت میدان تنش در پهنه گسلی کاشان در زمان نئوژن، بخش میانی پهنه ارومیه دختر .....  
سیما ناقه، میثم تدین، همایون صفایی
- ۳۵ \* بررسی ارتباط بین گسل ها و درزه ها با کانه زایی مس، با استفاده از سنجش ازدور و مغناطیس هوایی در منطقه ورزگ (شرق قاین) .....  
فرزاد قاسم پور، توران اسماعیل پور، محمود رضا هیهات، محمد مهدی خطیب
- ۵۷ \* تحلیل شکستگی ها در محدوده ی مجموعه معدنی سنگ ساختمانی لاشر، جنوب اصفهان، با تأکید بر روش دورسنجی .....  
پریتا تن زده، علی فرضی پور صائین، همایون صفایی
- ۷۹ \* تعیین دگرشکلی در پهنه برشی بهلگرد با استفاده از هندسه ساختارهای کوچک مقیاس .....  
محمد امیر علیمی
- ۹۹ \* ارزیابی نقش ساختارها در چگونگی توزیع هیدروکربور در سازندهای سروک و ایلام با استفاده از منطق فازی در ناحیه هینترلند بندرعباس .....  
فاطمه جهادگر، زهرا ملکی، علی سلگی، مهران آرین، علی سرببی

# TECTONICS

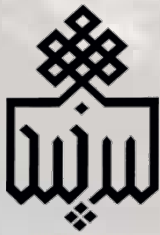


University of  
Birjand

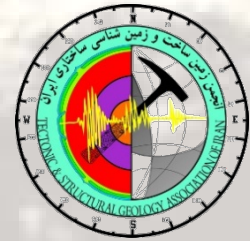
Spring 2020, Vol:15

ISSN:2676-4512

- 
- \* **Folding mechanism investigation of the Taron Metallogenic Zone based on fracture patterns, NW Qazvin** ..... 1  
Sadegh Afshar Najafi ; Aziz Rahimi ; Mahnaz Rezaeian ; Taghi Nabaei
  
  - \* **Change in direction of stress field in Kashan fault zone during Neogene, Middle part of Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc** ..... 20  
Sima Nagheh ; Meysam Tadayyon ; Homayoon Safayi
  
  - \* **Investigation of the relationship between faults and joints with copper mineralization, using Remote Sensing and magnetism in Vorezg region (east of Ghaen-Birjand)** .....35  
Farzad Ghasempour ; Tooran Esmailpour ; Mahmood Reza Heyhat ; M.Mehdi Khatib
  
  - \* **Fracture analysis in Lashotor stone quarry complex, south of Isfahan, a remote sensing approach** .....57  
Parisa Tanzadeh ; Ali Farzipour saein ; Homayoon Safaei
  
  - \* **Determination of deformation in Bahlgerd shear zone by using geometry small-scale Structures** . 79  
Mohammad Amir Alimi
  
  - \* **Evaluation of the role of structures in the distribution of hydrocarbons in Sarvak and Ilam Formations using fuzzy logic in the Bandar Abbas hinterland** ..... 99  
Fatemeh Jahadgar ;, Zahra Maleki ; Ali Solgi ; Mehran Arian ; Ali Sorbi



دانشگاه بیرجند



انجمن زمین ساخت و  
زمین شناسی ساختاری ایران

## فصلنامه زمین ساخت

پاییز ۱۳۹۹، سال چهارم، شماره ۱۵

شاپا: ۴۵۱۲-۲۶۷۶

صاحب امتیاز: دانشگاه بیرجند

مدیر مسئول: محمودرضا هیهات

سرمدیر: محمد مهدی خطیب

مدیر داخلی: فرح جلیلی

ویراستار: غلامرضا میراب شبستری

### شورای نویسندگان:

محمدرضا قاسمی، زمین شناسی ساختمانی و زمین ساخت، دانشیار پژوهشگر علوم زمین

سید سعید محمدی، پترولوژی، استاد دانشگاه بیرجند

محمودرضا هیهات، زمین شناسی ساختمانی و زمین ساخت، دانشیار دانشگاه بیرجند

علی یساقی، زمین شناسی ساختمانی و زمین ساخت، استاد دانشگاه تربیت مدرس

محمد مهدی خطیب، زمین شناسی ساختمانی و زمین ساخت، استاد دانشگاه بیرجند

بهنام رحیمی، زمین شناسی ساختمانی و زمین ساخت، استاد دانشگاه فردوسی مشهد

همایون صفایی، زمین شناسی ساختمانی و زمین ساخت، دانشیار دانشگاه اصفهان

سید احمد علوی، زمین شناسی ساختمانی و زمین ساخت، استاد دانشگاه شهید بهشتی

امور فنی: انتشارات چهاردرخت

امور چاپ و صحافی: چاپ قمر

تعداد شمارگان: ۵۰۰ نسخه

دارای پروانه انتشار ۹۳/۶۸۲ مورخ ۱۹/۱/۱۳۹۳ از وزارت فرهنگ و ارشاد

اسلامی و درجه علمی پژوهشی به شماره ۳۱۱۲۰۹/۳/۱۸/۳/۹۷ مورخ ۶/۱۲/۹۷

از وزارت علوم، تحقیقات و فناوری.

پست الکترونیکی: [tectonics@birjand.ac.ir](mailto:tectonics@birjand.ac.ir)

آدرس: خراسان جنوبی، بیرجند، دانشگاه بیرجند، دانشکده علوم، گروه زمین شناسی،

دفتر فصلنامه زمین ساخت

## سخن سردبیر

با استعانت از خداوند متعال و یاری پژوهشگران گرانقدر و تلاش همکاران محترم، اکنون سیزدهمین شماره از فصلنامه زمین ساخت به چاپ می‌رسد. پیشرفت روز افزون علوم ضرورت ارائه نتایج حاصل از پژوهش‌ها و تحقیقات زمین‌شناسی برای استفاده محققان و علاقه‌مندان را ایجاب کرده است. در این راستا فصلنامه‌های تخصصی، نقش کلیدی و اساسی در فرآیند ثبت، نشر و ارتقای سطح این پژوهش‌ها و نیز ایجاد بستر مناسب برای توسعه ارتباط میان پژوهشگران عرصه زمین‌شناسی، داشته‌اند. فصلنامه زمین ساخت، ناشر یافته‌های پژوهشگران محققان زمین‌شناسی کشور است که در راه کسب مرجعیت علمی تلاش می‌کند. حاصل کار گروه شورای نویسندگان و همکاران به صورت حداقل چهار شماره در سال منتشر می‌شود.

ضمن قدردانی و سپاسگزاری از محققین و نویسندگانی که حاصل تلاش و زحمات خود را توسط این نشریه در اختیار جویندگان علم قرار می‌دهند از دیگر دانش پژوهان و مشتاقان علم و معرفت نیز دعوت می‌نمایم که با ارسال مقالات علمی خود، ما را یاری نمایند.

محمد مهدی خطیب / پاییز ۱۳۹۹





## بررسی سازوکار چین خوردگی بر پایه الگوی شکستگی ها در پهنه فلزایی طارم، شمال باختر قزوین

صادق افشار نجفی<sup>۱</sup>، عزیز رحیمی<sup>۲\*</sup>، مهناز رضائیان<sup>۳</sup>، تقی نبی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری تکنیک، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه گلستان

۲- دانشیار گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه گلستان

۳- استادیار تکنیک، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان

۴- استادیار زمین شناسی اقتصادی، گروه زمین شناسی، دانشگاه پیام نور مرکز قزوین

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۲۰

### چکیده

پهنه فلزایی طارم از منظر ساختاری در یک طاق‌دیس با طول موج ۵۰ کیلومتر و روند محوری شمال باختری- جنوب خاوری، متشکل از واحدهای معادل سازند کرج به سن ائوسن و لایه های قرمز نئوژن قرار گرفته است. این طاق‌دیس که در فرایند کوهزایی مرتبط با تشکیل کوهزاد البرز ایجاد شده، دربرگیرنده شکستگی های متعدد باروند های شمال باختری- جنوب خاوری، شمال خاوری- جنوب باختری و خاوری- باختری است. بررسی های دقیق میان مقیاس و تحلیل های استریوگرافی شکستگی های موجود در منطقه جهت بررسی گسترش شکستگی ها در زمان چین خوردگی شامل سن نسبی آنها، توالی دگرریختی شکستگی ها در لایه های مختلف، توزیع دسته های شکستگی و تغییرات ایجاد شده در شکستگی ها در رویدادهای بعدی زمین شناختی در چند مرحله انجام شد. مقایسه الگوی شکستگی های متفاوت در لایه های چین خورده علاوه بر آشکارسازی توالی های دگرریختی شکننده، منجر به شناسایی سازوکار تشکیل چین اصلی در منطقه مورد مطالعه شد. براساس شواهد موجود در یالهای طاق‌دیس از جمله: ۱- وجود چین های فرعی در لایه های نرم تر، ۲- تشکیل شکستگی های چینه کران در مقیاس های مختلف مرتبط با رخداد برشی موازی لایه در لایه های نرم تر، و ۳- دایک زایی در شکستگی های از پیش موجود در یال چین، ترجیحاً در واحدهای نرم به ویژه در شیل های مدادی معادل سازند کرج رخ داده در حالی که در منطقه لولایی در لایه های مقاوم مثل آندزیت و بازالت تشکیل شده است. سازوکار لغزش خمشی در طاق‌دیس پهنه طارم پیشنهاد می شود.

واژه‌های کلیدی: پهنه طارم، چین خوردگی، سازوکار لغزش- خمشی، شکستگی های چینه کران



## Folding mechanism investigation of the Tarom Metallogenic Zone based on fracture patterns, NW Qazvin

Afshar Najafi .S<sup>1</sup>; Rahimi .A<sup>2\*</sup> ; Rezaeian .M<sup>3</sup> ; Nabaei .T<sup>4</sup>

<sup>۱</sup>- Ph.D student in Tectonics, Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, Golestan University.

<sup>۲</sup>- Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, Golestan University

<sup>۳</sup>- Assistant Professor, Department of Earth Sciences, Zanjan Graduate University of Basic Sciences

<sup>۴</sup>- Assistant Professor, Department of Geology, Qazvin- PNU University

### Abstract

Structurally, the Tarom Metallogenic Zone is located in an NW-SE trending anticline with 50 km wavelength, consists of the Karaj formation equivalent units and Neogene red beds. This anticline was created during the Alborz orogen formation- related phase has multiple fractures with NW-SE, NE-SW, and E-W trend. Detailed mesoscopic and microscopic investigations of the existing fractures for studying their propagations during folding, including their relative age, sequential deformation of the fractures in various beds, distribution of the fractures, and their changes during the following geological events, were performed many times. Comparison of various fracture patterns in folded layers not only illuminates the brittle deformation successions but also resulted in the detection of the main fold formation mechanism of the studied area. Based on the existing evidence at limbs of the anticline including 1- The existence of parasitic folds in soft layers, 2- Creation of layer- parallel shearing related strata-bound fractures in soft layers on various scales. Dyke intrusion into pre-existing fractures at fold limbs, preferentially has been happened in soft beds, especially in the Karaj formation equivalents pencil shales. While at the hinge zone, they have been created in hard layers, for example, andesite and basalt. The flexural slip mechanism is proposed for the Tarom Anticline.

**Keywords:** Tarom zone, Folding, Flexural slip mechanism, Stratabound Fractures



## مقدمه

تحقیق سعی بر این شد تا با استفاده از روش های میان مقیاس و استریوگرافیک تحولات جنبشی طاقدیس طارم بررسی شود. در مطالعات میدانی، ساختارهای موجود در هر منطقه از نظر آماری، هندسی، جنبشی و دینامیکی مورد مطالعه قرار می گیرند (حاجی علی بیگی و همکاران، ۱۳۸۸، Ismat, 2008; Su et al, 2014). در روش استریوگرافیک، علاوه بر ترسیم وضعیت لایه بندی و شکستگی ها، تقدم و تأخر نسل های مختلف شکستگی ها نسبت به یکدیگر و همچنین نسبت به چین نیز بررسی می شود (Ismat, 2008; Su et al, 2014). نهایتاً با تلفیق همه داده ها با منابع از پیش موجود از جمله نقشه های زمین شناسی منجر به ارائه مدل های جنبشی می شوند که برقراری ارتباط چین ها و شکستگی ها و تحلیل و تفسیر روند تحولات چین خوردگی از طریق آنها فراهم می گردد. الگوی گسترش شکستگی ها در واحدهای چین خورده با تنش های مسبب چین خوردگی ارتباط مستقیم دارد. وضعیت تنش و نوع دگرریختی توأمان با چین خوردگی براساس الگوهای شکستگی قابل بازسازی است (Su et al, 2014). روند شکستگی های مرتبط با چین خوردگی خمشی به جهت برش لغزش / جریان خمشی<sup>۱</sup> بستگی دارد (Anastasio et al., 1997; Engelder and Peacock, 2001). کرنش طولی مماسی<sup>۲</sup> شکستگی های موازی با سطح محوری چین ایجاد می کند (Srivastava and Engelder, 1990; Lemiszki et al, 1994). این شکستگی های موازی محور در اثر جریان خمشی به جای منطقه لولایی در یال چین تشکیل می شوند (Engelder and Peacock, 2001). موقعیت شکستگی های اخیر در چین خوردگی لغزش خمشی<sup>۳</sup> احتمالاً با انواع چینه کران<sup>۴</sup> در لایه های نرم مطابقت دارد. نوع، روند و فراوانی شکستگی های همزمان و یا درست قبل

پهنه<sup>۵</sup> فلززایی طارم از نظر زمین ساختی در شمال باختر پهنه<sup>۶</sup> ارومیه - دختر واقع شده است. مطالعات انجام شده در منطقه شامل بررسی توده های نفوذی، زایش دایک ها، سنگ های آتشفشانی - رسوبی، کانه زایی و کنترل ساختاری کانه زایی می باشد (Hirayama et al., 1966; Ghasemi et al., 2015). ناظمی و قطب تحریری، ۱۳۹۳، احمدی و همکاران، ۱۳۹۲). منطقه مورد مطالعه در یک طاقدیس با طول موج تقریباً ۵۰ کیلومتر و روند محوری شمال باختری - جنوب خاوری، متشکل از واحدهای معادل سازند کرج به سن ائوسن و لایه های قرمز نئوژن قرار گرفته است (شکل های ۱ و ۲). این طاقدیس که پیرو رشد کوهزاد البرز در فازهای الیگوسن، میوسن و پلیوسن (Rezaeian et al, 2012) تشکیل شده است، دربرگیرنده شکستگی های متعدد با روند های شمال باختری - جنوب خاوری، شمالی - جنوبی، شمال خاوری - جنوب باختری و خاوری - باختری است که در نقاط مختلف به ویژه در نواحی مرکزی توسط دایک های با ترکیب اسیدی، حدواسط و بازیک اشغال شده است. دایک های مذکور غالباً در واحدهای نرم واقع در یالهای چین اصلی نفوذ کرده اند و در مناطق لولایی، بیشتر در لایه های مقاوم مشاهده می شوند. وضعیت مشابهی نیز در تشکیل چین های فرعی و بلوغ ساختاری شکستگی ها در منطقه مشاهده گردید که تاکنون مورد توجه پژوهشگران قرار نگرفته است. با کنترل الگوی شکستگی ها، دایک ها و چین های فرعی در منطقه مورد مطالعه این مسئله شکل می گیرد که احتمالاً توزیع دگرریختی حاصل از چین خوردگی با سازوکار لغزش خمشی باعث ایجاد چنین الگوی ساختاری در پهنه طارم باشد. بنابراین، در این

Stratabound<sup>۴</sup>

Flexural Flow<sup>۵</sup>

Tangential Longitudinal Strain<sup>۶</sup>

Flexural Slip<sup>۳</sup>



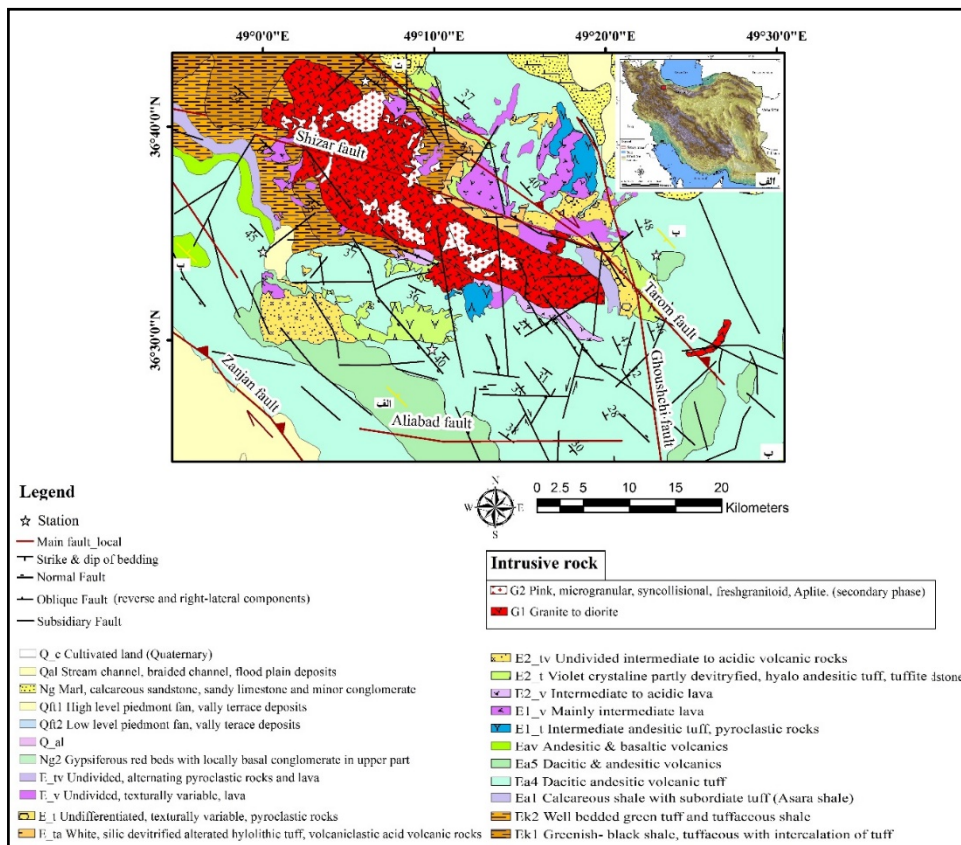
های آتشفشانی، آتشفشانی- رسوبی و نفوذی های به سن ائوسن تشکیل می دهند که پیرو رشد کوهزاد البرز در فازهای الیگوسن، میوسن و پلیوسن (Rezaeian et al., 2012) دچار دگرریختی شده است. بیشتر واحدهای آتشفشانی و آتشفشانی- آواری محدوده مورد مطالعه، معادل سازند کرج معرفی شده است (Hirayama et al., 1966)، (شکل ۱-ب)

از چین خوردگی به پارامترهایی چون چینه شناسی مکانیکی (Chester, 2003; Tavani et al., 2008)، شرایط محیطی (دما، فشار و چرخش سیالات) (Jamison, 1992; Lemiszki et al., 1994)، الگوی شکستگی های موروثی (Bergbauer and Pollard, 2004; Bellahsen et al., 2006) و میدان تنش (Hancock, 1985; Pollard and Aydin, 1988) بستگی دارد. در چین خوردگی پیشرونده، ترکیب متغیرهای اخیر باعث توزیع کرنش در سراسر یک چین شده و در نتیجه منجر به ظهور الگوهای دگرریختی می شود (Evans and Fischer, 2012). چین های خمشی<sup>۱</sup> در اثر افزایش شیب یال در پاسخ به کوتاه شدگی عرضی و متعاقب آن لغزش یک لایه بر روی لایه دیگر تشکیل می شوند. در مورد اخیر، چین نوع لغزش خمشی ایجاد می شود ولی توسط برش ساده درون لایه های ویژه، نوع جریان خمشی تشکیل می شود. و در برخی موارد ترکیبی از هر دو فرایند تشکیل می شوند (Donath & Parker, 1964). در سازوکار جریان خمشی، کرنش بیشتر در یالهای چین متمرکز می شود و کرنش خیلی کمی در منطقه لولایی ایجاد می شود. ولی در کرنش طولی مماسی عکس قضیه اخیر رخ می دهد (Evans and Fischer, 2012). از آنجایی که تمرکز ذخایر معدنی در ارتباط با توزیع دگرریختی در مناطق چین خورده مثل طارم هستند، آگاهی از سازوکار تشکیل چین ها در یک منطقه از اهمیت بالایی برخوردار است.

### زمین شناسی محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه از لحاظ جغرافیایی در شمال غرب شهرستان قزوین بین عرض های جغرافیایی ۲۵° ۳۶' و ۲۵° ۳۶' شمالی و طول های ۴۹° ۲۵'، ۴۹° ۰۰' شرقی قرار گرفته است (شکل ۱). واحدهای اصلی پهنه طارم را سنگ

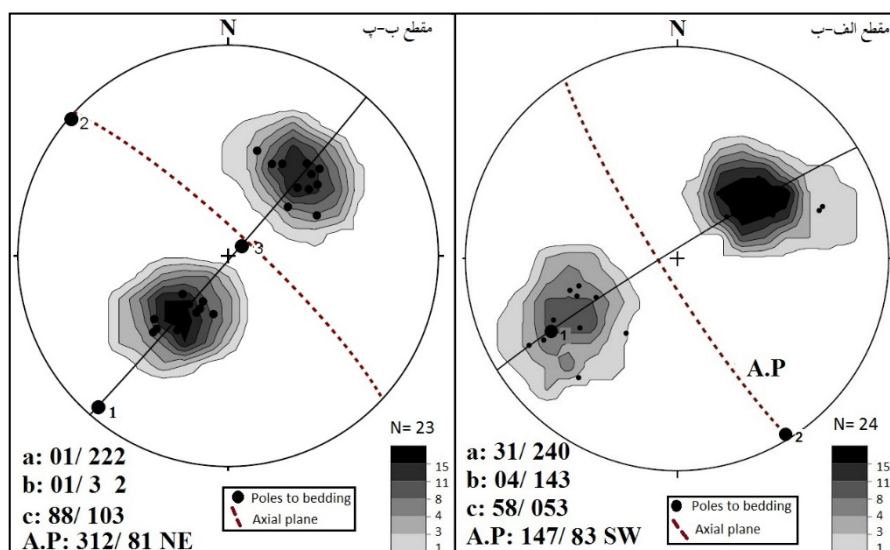




شکل ۱: الف) نقشه توپوگرافی ایران که در آن موقعیت منطقه مورد مطالعه به وسیله چهار گوش با رنگ قرمز مشخص شده است. ب) نقشه زمین شناسی محدوده مورد مطالعه براساس نقشه یکصد هزار رودبار (Nazari and Salanti, 1998).

زنجان) با طول تقریبی ۵۰ کیلومتر منطبق بر حاشیه جنوبی باختری پهنة طارم می باشد. گسل اول با طول تقریبی ۱۵۰ کیلومتر در حاشیه شمال خاوری پهنة طارم واقع شده است. وجود این گسل های مورب لغز در حاشیه پهنة طارم و حرکات تعاملی آنها موجب دگرریختی در پهنة مذکور شده که باعث فعالیت مجدد بیشتر گسل های فرعی شده است (Shabazi et al, 2019). حرکات راستالغز راسترو در هر دو گسل باعث تشکیل پهنة برشی راسترو در منطقه شده است. به طوریکه چرخش ساعتگرد منتهج از این سامانه منجر به ایجاد گسل های فرعی راسترو با روندهای شمال باختری، شمالی- جنوبی و خاوری- باختری و انواع چپروبی با روند شمال خاوری شده است. شکستگی های موجود در این سامانه با شکستگی های سامانه رایدل (Riedel) قابل توجه هستند (Shabazi et al, 2019).

بررسی آماری لایه بندی در گستره مورد مطالعه بیانگر یک چین خوردگی با روند محوری شمال باختری- جنوب خاوری است. (شکل ۲). از لحاظ مکانیکی لایه های سنگ چینه ای قابل توجه در منطقه شامل انواع مقاوم مثل گدازه های بازالتی، آندزیتی، ماسه سنگ ها با میان لایه های نرم مثل شیل و توفیت شیلی می باشد. پهنة طارم توسط دوگسل بزرگ و البته فعال به نام های گسل شمال زنجان با روند شمال باختری، شیب شمال خاوری و سازوکار معکوس با مولفه راسترو (Allen et al, 2011) و گسل طارم با روند شمال باختری، شیب شمال خاوری و سازوکار معکوس با مولفه راسترو (قطعه های جنوب خاوری آن به ترتیب با نام های گسل چورزق و پهنة گسلی نهران-سیردان معروف است) (بهارفیروزی، ۱۳۹۱؛ اردکان و همکاران، ۱۳۹۵) تحت تأثیر قرار گرفته است. گسل زنجان (گسل شمال



شکل ۲. نمایش استریوگرامی داده‌های اندازه‌گیری شده از ۴۵ تعداد صفحه لایه بندی در واحدهای چینه ای معادل سازند کرج در طاق‌دیس طارم. دو مقطع عرضی الف-ب و ب-ب شکل‌های ۳ و ۴ به همراه موقعیت سطح محوری آن که به صورت خط چین نمایش داده شده است.

ایستگاه رخنمون‌های پیوسته و طویل (بیش از ۱۵ متر) اندازه‌گیری شدند. در فرایند برداشت، وضعیت هر شکستگی به طور دقیق اندازه‌گیری شد. روابط قطع‌شدگی‌ها نیز به منظور تعیین سن نسبی شکستگی‌ها مدنظر قرار گرفتند. سپس داده‌های برداشت شده میدان‌های در هر ایستگاه جهت بررسی دقیق‌تر الگوی شکستگی‌ها به وسیله روش‌های استریوگرافی مورد ارزیابی قرار گرفتند. در روش استریوگرافی، برای هر ایستگاه توالی شکستگی‌ها توسط تهیه قطب صفحه  $\pi$  (صفحه گذرنده از قطب شکستگی‌ها) و بررسی فاصله آن نسبت به قطب لایه بندی، مطالعه شد (شکل‌های ۵، ۶ و ۷). در این روش با کاهش فاصله بین قطب صفحه  $\pi$  و قطب لایه بندی، سن شکستگی افزایش می‌یابد.

### تحلیل‌های دینامیکی و آماری

در این روش، با استفاده از نرم افزار وینتسور (Win-Tensor)، جهت تنش‌های اصلی مسبب شکستگی‌ها شامل انواع مزدوج و چینه کران و دایک‌های همروند با

### روش و داده

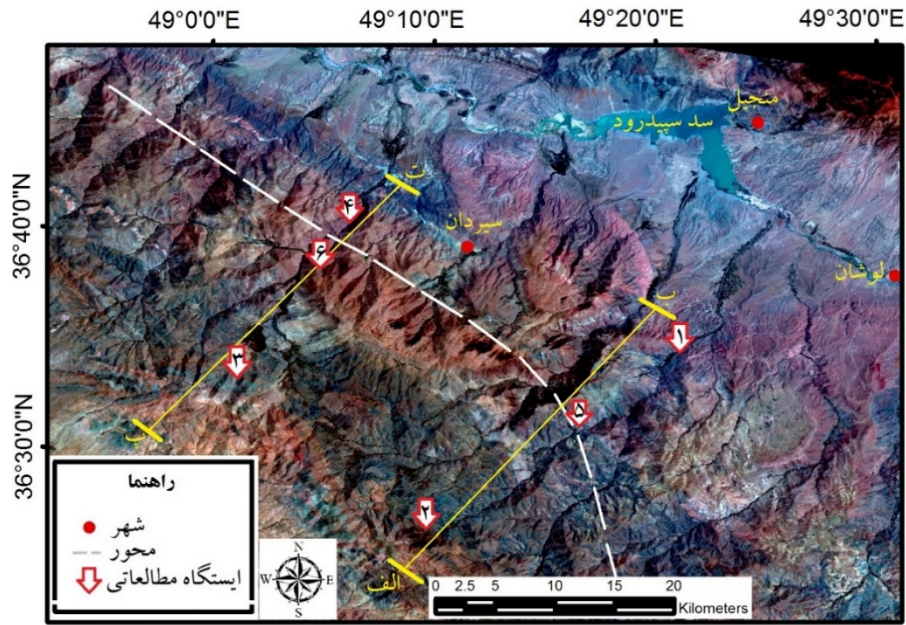
روش‌های به کار گرفته شده در این تحقیق شامل بررسی‌های میدانی میان‌مقیاس، تحلیل‌های استریوگرافی، دینامیکی و آماری می‌باشد.

### مطالعات میدانی و استریوگرافی

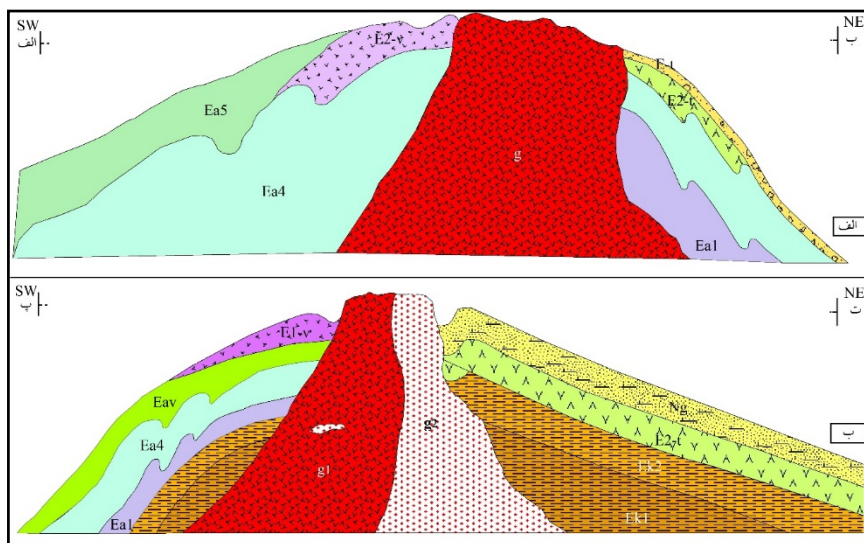
برداشت‌های میان‌مقیاس در دو مقطع عرضی و غالباً در ۶ ناحیه شامل ۲ ایستگاه در منطقه لولایی و ۴ ایستگاه در یالها انجام شد (در هر یال ۲ ایستگاه) (شکل ۳). به منظور مطالعه تغییرات هندسی چین اصلی منطقه در اعماق بیشتر، دو مقطع ساختمانی عمود بر محور طاق‌دیس بر اساس داده‌های میدانی و نقشه‌های زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ رود بار (Nazari and Salamti, 1998) و ۱/۲۵۰۰۰۰ زنجان (Stocklin and Eftekhari-Nezhad, 1969) تهیه گردید (شکل ۴). شکستگی‌های موجود در هر ایستگاه ضمن مقایسه آنها در لایه‌های با ترکیب مختلف با یکدیگر، به صورت دقیق از نظر هندسی و آماری مورد مطالعه قرار گرفتند. جهت بازتاب دقیق الگوی شکستگی‌ها، در هر

در روش آماری، بلوغ ساختاری شکستگی ها با اندازه گیری فاصله بندی آنها در لایه های نرم و سخت موجود در یالهای چین انجام شد. در مرحله بعد توسط نرم افزار اکسل نمودارهای مربوطه تهیه شدند (شکل ۱۱).

آنها محاسبه شد (شکل ۱۰). سپس جهت تنش های بدست آمده از تحلیل شکستگی ها با جهت تنش های به وجود آورنده چین مقایسه گردید.



شکل ۳: تصویر ماهواره ای لندست با ترکیب باندهای ۲۲۱ سنجنده TM به همراه ایستگاه های مطالعاتی و مقاطع عرضی. محور چین با خط سفید رنگ مشخص شده است. عارضه سرخ رنگ واقع در مرکز تصویر، توده گرانیتی سیردان را نمایش می دهد.



شکل ۴: مقاطع عرضی زمین شناسی ساختمانی از طاقدیس طارم بر اساس برداشت های صحرایی و نقشه های زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ رودبار و ۱/۲۵۰۰۰۰ زنجان. موقعیت مقاطع در اشکال ۱ و ۳ مشخص شده است.

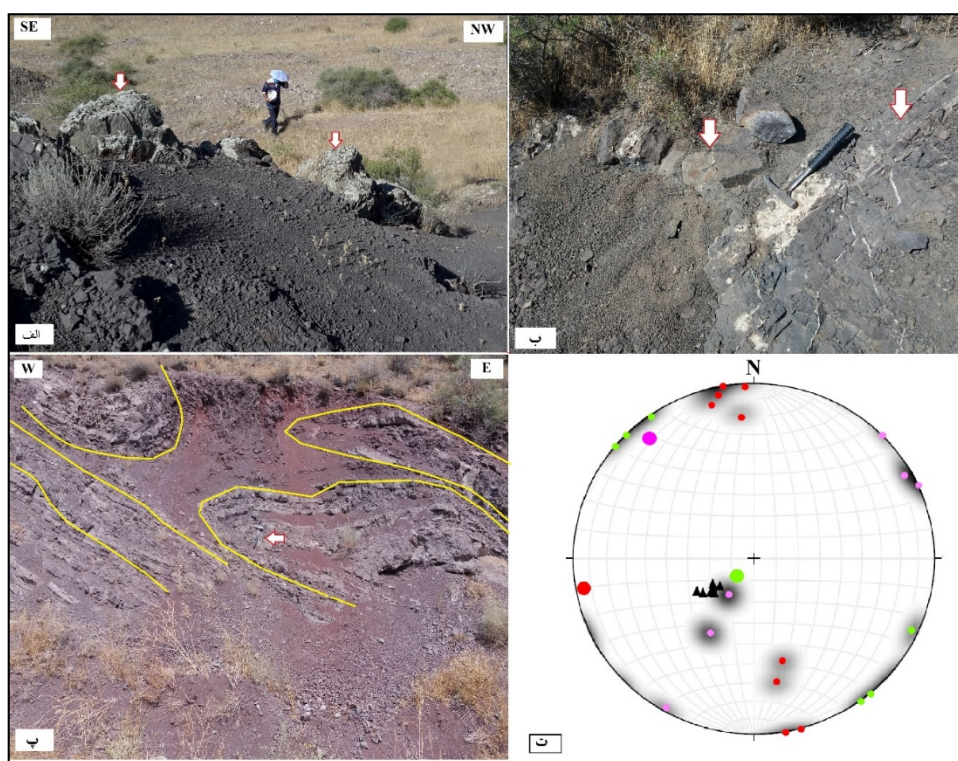




## نتایج

شده اشغال است (شکل ۵ الف- پ). شکستگی‌ها به سه دسته تقسیم شدند که براساس فاصله آنها نسبت به قطب صفحه  $\pi$  به ترتیب از قدیم به جدید شامل انواع شمال خاوری- جنوب باختری، خاوری- باختری و شمال باختری- جنوب خاوری می‌باشند (شکل ۵ ت). بررسی‌های صحرایی نشان می‌دهد که شکستگی‌های اخیر به طور یکنواخت در طاق‌دیس توزیع نشده‌اند. شواهد حاکی از آنست که تراکم آنها در یال نسبت به منطقه لولایی بیشتر است. این تفاوت، احتمالاً با توزیع ناهمگن کرنش به علت وجود اختلاف مکانیکی در لایه‌های شیلی و گدازه‌ها در زمان چین خوردگی قابل توجیه باشد.

ایستگاه ۱: اندازه‌گیری‌ها در ایستگاه اول در حوالی روستاهای قلالو و مصطفی‌لو انجام گرفت. دگرریختی در زمان چین خوردگی در این منطقه به شدت در واحد‌های نرم از جمله شیل‌های مدادی و توفیت‌های شیلی متمرکز بوده است. به طوری‌که در شمال روستای قلالو باعث تشکیل چین‌های فرعی در واحد توفیت شیلی شده و در باختر روستای مصطفی‌لو باعث تشکیل درزه‌های فراوانی شده که متعاقباً توسط سیالات ماگمایی به صورت انواع رگه‌های سیلیسی، کلسیتی و دایک‌های با ترکیب حدواسط

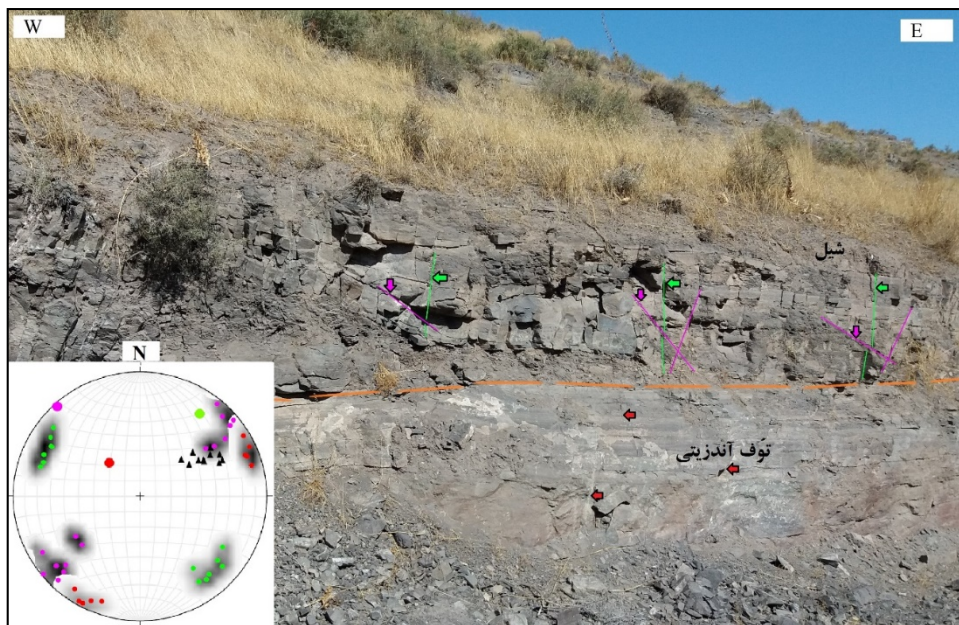


شکل ۵: ایستگاه شماره ۱، الف و ب- دایک‌های نفوذی در واحد شیل مدادی معادل سازند کرج در ارتفاعات غربی روستای مصطفی‌لو. پیکان‌ها موقعیت دایک‌ها را نشان می‌دهند. پ- چین‌های فرعی در واحد توفیت شیلی واقع در شمال روستای قلالو. نوک پیکان به مقیاس اشاره دارد. و ت- تصویر استریوگرافیک مربوط به دسته‌های مختلف شکستگی. دایره‌های سبز، قرمز و صورتی به ترتیب مبین شکستگی‌های با روند شمال خاوری، خاوری- باختری و شمال باختری می‌باشند. در این تحقیق علاوه بر این شکل، در همه اشکال دیگر، قطب لایه بندی با مثلث توپر و قطب درزه‌ها با دایره توپر مشکی نمایش داده شده است.



از انواع مزدوج برشی صفحه ای تشکیل شده اند. به دلیل عدم حضور همزمان شکستگی های چینه کران و انواع کششی در یک لایه، سن نسبی آنها از طریق تحلیل های استریو گرافیک مشخص شد. در این بررسی، قطب صفحه  $\pi$  شکستگی های کششی نسبت به انواع چینه کران به قطب لایه بندی نزدیک تر است. یعنی شکستگی های چینه کران جوانتر از انواع کششی هستند (شکل ۶).

ایستگاه ۲: برداشت ها در ایستگاه دوم که همانند نوع اول منطبق بر مقطع عرضی الف-ب می باشد، در اطراف روستاهای علی آباد و فیله ورین انجام شد و شکستگی ها در سه دسته شناسایی شدند. شواهد حاکی از قطع شدگی و جابجایی شکستگی های مزدوج برشی توسط انواع چینه کران می باشند. (شکل ۶). بر اساس تحلیل های استریو گرافی و روابط قطع شدگی، شکستگی های چینه کران بعد

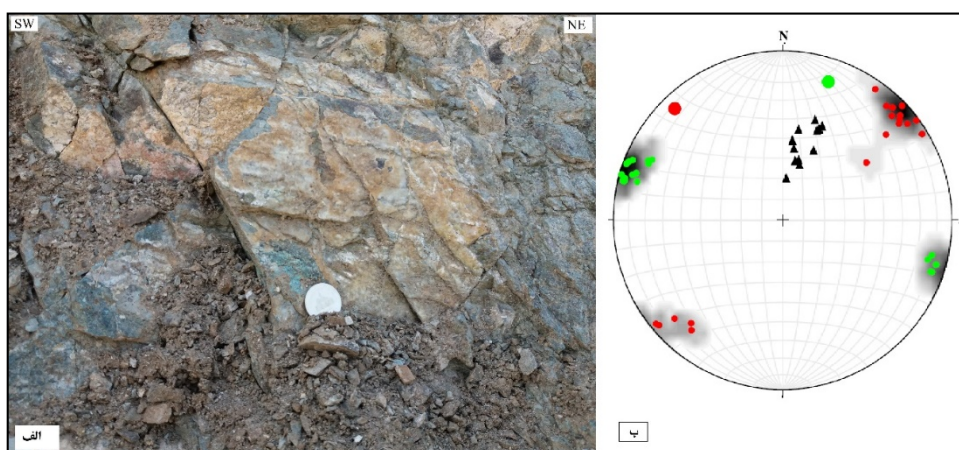


شکل ۶: ایستگاه شماره ۲، الگوی شکستگی ها از قدیم به جدید شامل

۱- شکستگی های برشی مزدوج (علائم سبز رنگ در هر دو تصویر)، ۲- شکستگی های برشی ناشی از خمش لایه ها در واحد توف آندزیتی (علائم قرمز) و ۳- شکستگی های برشی چینه کران به شکل مورب و متقاطع در مقطع (علائم صورتی) که در لایه شیلی باعث جابجایی انواع برشی مزدوج شده است.

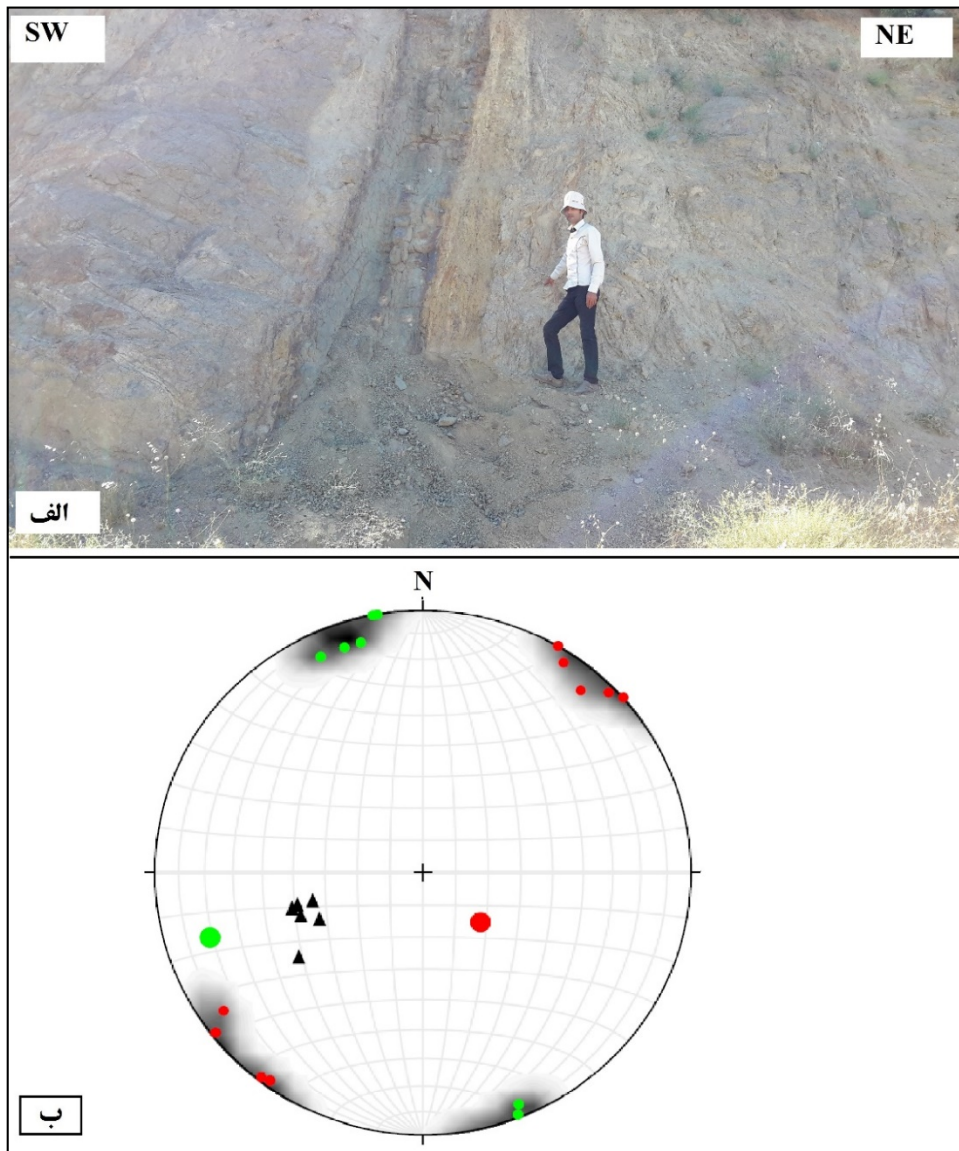
بیشتر شکستگی ها محدود به لایه توفیت شیلی می باشند و به عبارتی از نوع چینه کران هستند. توالی تشکیل شکستگی ها براساس تحلیل های استریوگرافیک نیز گویای ایجاد شکستگی های مزدوج صفحه ای در اوایل چین خوردگی است (دایره سبزرنگ در شکل ۷-ب).

ایستگاه ۳: بررسی ها در این ایستگاه در جنوب روستای چیزه انجام شد. وجود کنترل مکانیکی از جمله تراکم بالای شکستگی ها و چین های فرعی در لایه های نرم (توفیت شیلی) باعث انتخاب این ایستگاه مطالعاتی شد. شکستگی های مزدوج صفحه ای موازی لایه و برشی چینه کران محدود به لایه های نرم به خوبی شناسایی شدند (شکل ۷).



شکل ۷. ایستگاه شماره ۳، الف- شکستگی های چینه کران که در مقطع یال چین به صورت مورب و متقاطع دیده می‌شوند، ب- استریونوت مربوط به شکستگی های مذکور (مثلث قرمز) و دسته شکستگی های مزدوج صفحه ای (دایره سبز).

ایستگاه ۴: مطالعات این ایستگاه در ارتفاعات جنوبی روستای آلتین کش انجام شد. در این منطقه نیز واحدهای نرم از جمله شیل ها و توفیت ها تحت نفوذ شدید دایک های نفوذی در درزه های از پیش موجود قرار گرفته است. شکستگی ها با دو روند شمال خاوری و شمال باختری تشکیل شده اند. دسته شمال باختری نسبت به لایه بندی به صورت مورب تشکیل شده و دایک های منطقه در طول آنها نفوذ کرده است. این شکستگی ها فقط در لایه های نرم تشکیل شده و از نظر سنی جوانتر از دسته دیگر (زمینه ای) هستند (شکل ۸). تعداد دایک های نفوذی در لایه های نرم نسبت به انواع مقاوم همانند ایستگاه های دیگر بیشتر هستند. به عبارت دیگر، تراکم بالای دایک ها در این لایه ها و همروند بودن آنها با شکستگی های چینه کران، کنترل ساختاری شکستگی های اخیر بر دایک زایی استنباط می‌شود.



شکل ۸. ایستگاه شماره ۴. الف- تصویر مزوسکوپی از درزه های موجود در توفیت های شیلی که یکی از دسته ها توسط دایک ها اشغال شده است. دایره سبز و قرمز به ترتیب مبین درزه های شمال خاوری و شمال باختری هستند.

اطراف روستاهای مقانک و دیزه جین واقع شده است. جنس رخنمون در این منطقه کاملاً از توده های نفوذی با نسل های مختلف به ویژه مونزونیت (معروف به گرانیت سیردان) می باشد. توده های مذکور به شدت تحت تأثیر فازهای زمین ساختی پس از الیگوسن قرار گرفته و توسط دسته درزه های فراوان سامانمند باروندهای شمال باختری- جنوب خاوری و شمال خاوری- جنوب باختری قطع شده اند (شکل ۹-ب).

ایستگاه ۵ و ۶: بر اساس شکل ۳، هر دو ایستگاه در منطقه لولایی طاقدیس قرار دارند. ایستگاه ۵ در حوالی روستاهای محمد ده و پلنگه واقع شده که غالباً دارای لایه های صخره ساز داسیتی و آندزیتی است. ساختارهای عمده در این واحدها درزه های با شیب تقریباً قائم می باشند. لایه های توفی و شیلی با دگرریختی ضعیف، بسیار فرسایش یافته و دره ها عمدتاً از این واحدها تبعیت می کنند (شکل ۹-الف). ایستگاه ششم منطبق بر موقع عرضی پ-ت در

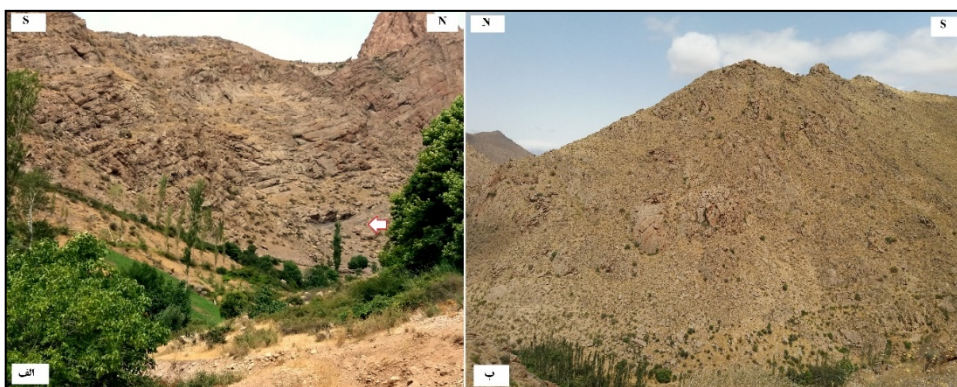




حرکت بر روی آنها می باشد که احتمالاً با فعالیت گسل های اصلی در ارتباط باشد. البته شواهد جنبشی در دسته شکستگی های دیگر از جمله در دسته (B) نیز تشکیل شده است. از آنجایی که کرنش منتهی از فعالیت گسلش، به جای ایجاد شکستگی های جدید، در صورت وجود نقاط ضعف از پیش موجود مثل شکستگی توزیع و تعدیل می شود، القای حرکت بر روی شکستگی های حاصل از چین در منطقه مورد مطالعه قابل استنباط است.

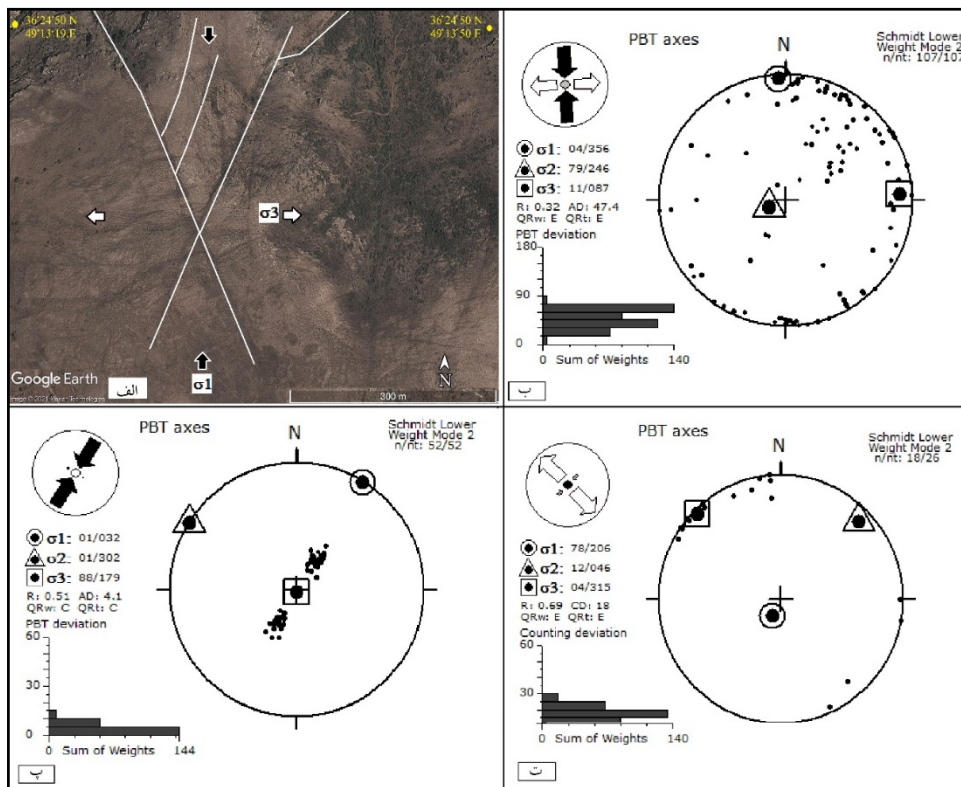
با توجه به مقاطع زمین شناسی ساختاری (شکل ۴) و تحلیل استریوگرافی (شکل ۲) و با اندازه گیری پارامترهای مربوط به چین ها (Twiss and Moores (1992)، طاقدیس طارم از نوع چین نامتقارن است. زاویه بین دو یالی طاقدیس از مقدار ۷۲ درجه در مقطع الف-ب به ۸۰ درجه در مقطع ب-پ تغییر می کند. مقدار زاویه بین یالی بر اساس طبقه بندی (Fleuty (1964 به نوع بسته (Close) تعلق دارد.

نهایتاً با توجه به داده های صحرایی و نمودارهای ترسیم شده، شکستگی های مرتبط با چین در طاقدیس طارم به سه دسته شامل دسته (A) با میانگین روندهای ۲۵ و ۳۳۰ درجه از نوع شکستگی های مزدوج، دسته (B) یا انبساطی با میانگین امتداد ۱۲۵ درجه به موازات محور چین، دسته (C) یا چینه کران با میانگین امتداد ۱۲۰ تقسیم شدند. شکستگی های اخیر بیشتر محدود به لایه های نرم از جمله توفیت شیلی هستند. نتایج حاصل از تحلیل های دینامیکی شکستگی های دسته (A) و (B) در منطقه نشانگر ارتباط آنها با ساختمان چین منطقه می باشد (شکل ۱۰). شکستگی های مذکور از لحاظ دینامیکی از جمله جهت گیری تنش های اصلی، با چین منطقه ولی از نظر جنبشی با گسل های اصلی مثل طارم و زنجان سازگار هستند. بعنوان مثال در شکل ۱۰-الف، جهت تنش های مسبب شکستگی های مزدوج (دسته A) با جهت تنش های به وجود آورنده چین منطقه سازگاری دارد، ولی شواهد جنبشی از جمله پایانه های دم اسبی، حاکی از چرخش جهات تنش و القای



شکل ۹: ایستگاه ۵ و ۶. الف- دگرریختی شدید واحدهای آندزیتی و بازالتی در منطقه لولایی واقع در ۳ کیلومتری شمال روستای محمد ده. پیکان قرمز، لایه شیلی را نشان می دهد. در این منطقه لایه های مقاوم با شکستگی های زیادی قطع شده ولی واحد شیلی به وسیله شکستگی های با فاصله زیاد قطع شده است.  
ب- خردشدگی توده گرنیتی سیردان در ایستگاه ۶ واقع در شمال خاوری روستای دیزه جین که حاصل دگرریختی منتهی از فعالیت های برهم کنشی بین گسل های زنجان و طارم است.





شکل ۱۰: الف- شکستگی های مزدوج (دسته A) با روندهای ۲۵ و ۳۳۰ درجه به همراه جهت تنش های اصلی. ب و پ- به ترتیب نشانگر جهت تنش های حاصل از دسته شکستگی های B و C. ت- دایک های نفوذی در شکستگی های موجود در لایه های نرم بال های طاقدیس طارم.

(Su et al, 2014). شکستگی های کششی قبل از انواع برشی چینه کران تشکیل می شوند، چون آنها یک فرایند متوالی در یک لایه نیستند. چون شکستگی های مذکور به طور همزمان شروع و یا تشکیل نمی شوند. گسترش هر دو نوع شکستگی اخیر توسط رفتار مکانیکی لایه های سنگی کنترل می شود (Su et al, 2014). از لحاظ مکانیکی، شکستگی های کششی در لایه های مقاوم مثل ماسه سنگ در حالی که شکستگی های برشی چینه کران در لایه های نرم مثل گل‌سنگ تشکیل می شوند. سامانه شکستگی های چینه کران با اندازه محدود و فاصله منظم در لایه های منفرد تشکیل می شوند (Odling et al, 1999). Ramsay and Huber (1987) معتقدند که در طول تکامل یک چین، لایه مقاوم تحت کرنش طولی مماسی دگرریخت می شود ولی لایه نرم متحمل کرنش برشی شدید موازی لایه می شود. به

## بحث

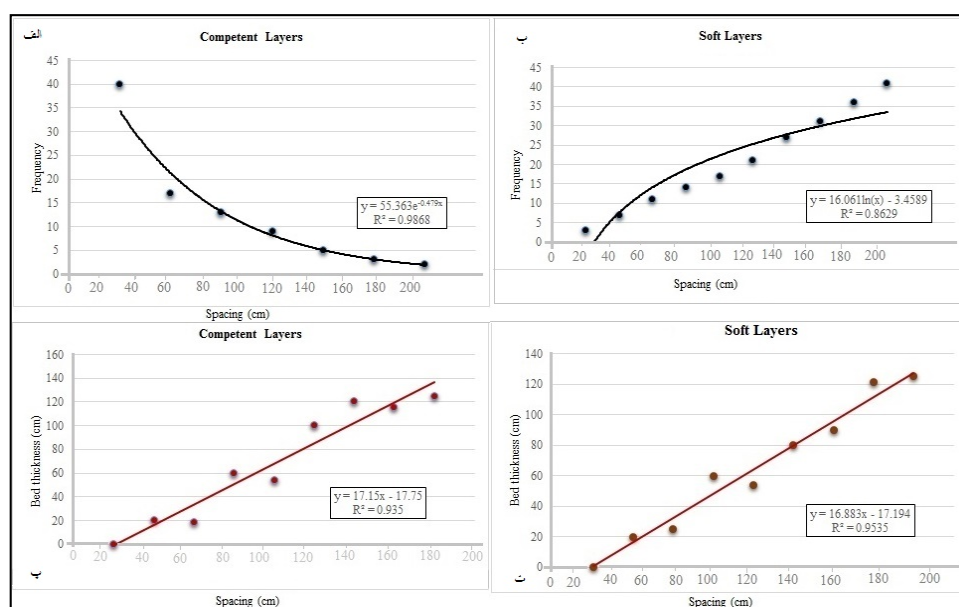
براساس تحقیقات انجام شده (Ismat, 2008; Evans and Fischer, 2012; Su et al, 2014) شکستگی یکی از روش های بررسی سازوکار تشکیل چین ها در هر منطقه می باشد. در اوایل چین خوردگی زمانی که لایه ها تقریباً افقی هستند، به دلیل فشارش افقی دو دسته شکستگی مزدوج صفحه ای عمود بر لایه بندی گسترش می یابند (Su et al, 2014). سپس با چرخش لایه ها با شیب کم، یک دسته شکستگی کششی عمود بر سطح لایه بندی تحت تنش های کششی توسعه می یابند. در ادامه با چرخش بیشتر لایه ها، کرنش برشی چیره شده و باعث گسترش دو دسته شکستگی برشی چینه کران می شوند که در مقطع عمودی نسبت به لایه بندی به صورت مورب ظاهر می شوند



می باشد. (Guerrero et al, 2015). یعنی فاصله شکستگی های مذکور با ضخامت لایه ها نسبت مستقیم داشته و عوامل دیگر مثل خصوصیات بافتی و سنگ شناختی تأثیر چندانی نداشته است. این در حالی است که در پهنه طارم شکستگی های چینه کران علاوه بر ضخامت لایه ها، تابع خصوصیات سنگ شناختی نیز می باشند (شکل ۱۱). چون نمودار فاصله بندی شکستگی های موجود در یالهای چین، در واحدهای مقاوم با تابع نمایی سازگار است و در لایه های نرم خط برازش داده ها با تابع نرمال همبستگی خوبی نشان می دهد (شکل ۱۱-الف و ب). این یعنی تحولات ساختاری کم در لایه های مقاوم و حد نهایی بلوغ ساختاری در لایه های نرم می باشد (Rives et al, 1992). این رویداد با توزیع متفاوت کرنش در واحدهای مختلف در سازوکار لغزش خمشی قابل توجه می باشد. به عبارت دیگر، لایه های نرم موجود در یالهای طاقدیس طارم نسبت به انواع مقاوم، در فرایند چین خوردگی متحمل کرنش بیشتری شده و در نتیجه از بلوغ ساختاری بالایی برخوردار هستند.

عبارت دیگر دگرریختی تحت کرنش طولی مماسی در لایه مقاوم در منطقه لولایی متمرکز می شود در حالیکه کرنش برشی موازی لایه در لایه نرم در یال چین ایجاد می شود (Evans and Fischer, 2012). وجود سازوکار جریان خمشی باعث کرنش برشی موازی لایه و در نتیجه تمرکز دگرریختی در لایه نرم می شود. همانطوری که در مباحث قبلی اشاره شد ترکیب دو سازوکار اخیر به سازوکار لغزش خمشی معروف است. (Su et al, 2014) شکستگی های برشی چینه کران منتجه از دگرریختی برشی موازی لایه را که در برخی مطالعات با مدل رایدل مقایسه شده را منطقی نمی دانند. چون نامبردگان اخیر معتقدند جهت برش در هر دو دسته شکستگی های چینه کران یکسان بوده ولی در انواع مزودج صفحه ای مربوط به اوایل چین خوردگی، متفاوت می باشد.

مطالعات آماری شکستگی های چینه کران نشانگر کنترل ضخامت لایه ها بر فاصله شکستگی های چینه کران

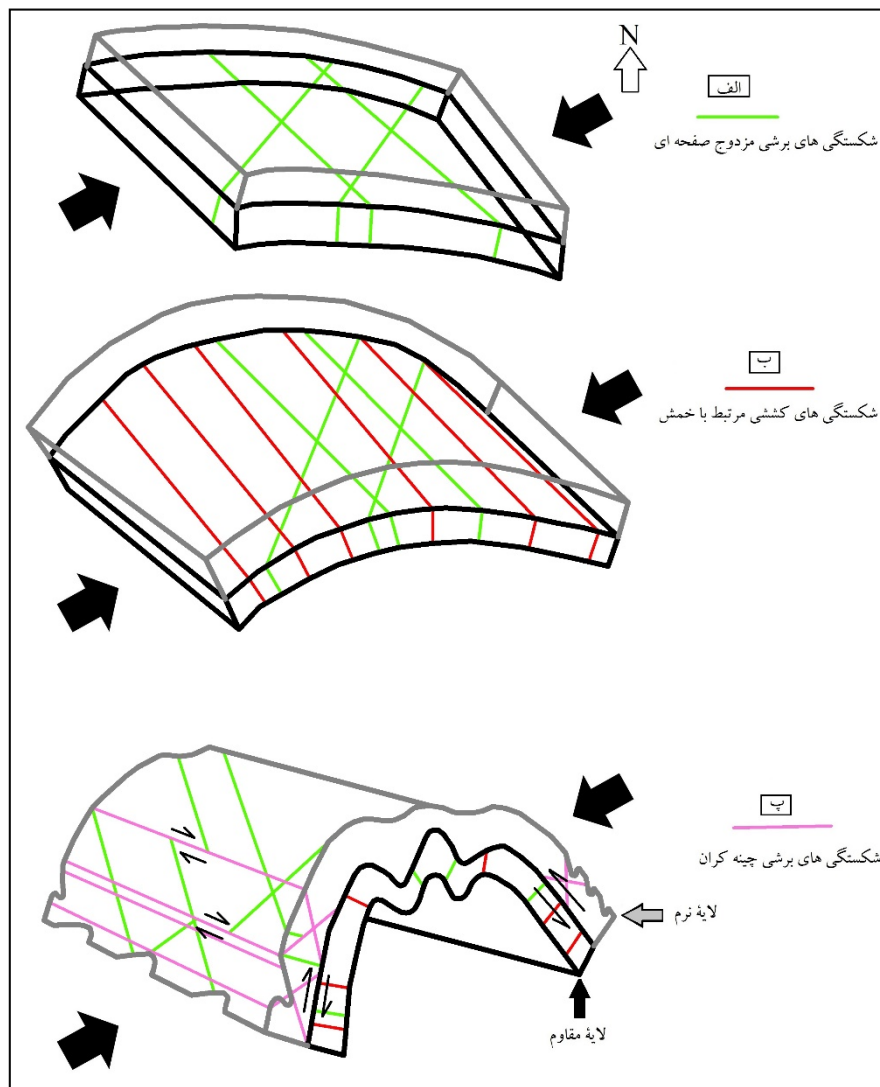


شکل ۱۱: تحلیل آماری شکستگی ها در یالهای طاقدیس طارم،

الف و ب- نمودار حاصل از فاصله بندی شکستگی ها به ترتیب در لایه های مقاوم و نرم. پ و ت- نمودار مربوط به فاصله بندی شکستگی ها نسبت به ضخامت به ترتیب در لایه های مقاوم و نرم.

در منطقه مورد مطالعه شکستگی های مرتبط با چین از نظر سنی و وضعیت تشکیل به سه دسته تقسیم می شوند. به ترتیب سنی شامل: ۱- انواع شکستگی های مزدوج صفحه ای مربوط به اوایل چین خوردگی (دسته A)، ۲- شکستگی های کششی ناشی از خمش لایه (دسته B) و ۳- شکستگی های چینه کران حاصل از برش موازی لایه هستند (دسته C) (شکل ۱۲). مهم ترین شواهد شکستگی های چینه کران در ایستگاه شماره ۳ در واحدهای توفیت شیلی قابل مشاهده می باشد (شکل ۷). در یال شمال خاوری در ایستگاه مطالعاتی اول این تحقیق، شکستگی های چینه کران در مقطع چین به صورت مورب با روند شمال باختری ظهور یافته اند. این موضوع علاوه بر شواهد میان مقیاس، توسط تحلیل های استریوگرافی آن نیز استنباط می شود. چون از نظر توالی تشکیل پس از شکستگی های مزدوج صفحه ای تشکیل شده اند.

شکستگی هایی که قبل و یا در اوایل چین تشکیل می شوند همزمان با چرخش لایه ها در زمان چین خوردگی از نظر وضعیت دچار اعوجاج می شوند. میزان این تغییرات وضعیت در مناطق مختلف بسته شرایط تشکیل چین متفاوت بوده و بررسی الگوی آنها در بازسازی شرایط تشکیل و سازوکار چین ها بسیار حائز اهمیت می باشد. به طور کلی هر چه قطب شکستگی ها از لایه ها و یا به عبارت دیگر قطب صفحه  $\pi$  از قطب لایه بندی فاصله بیشتری داشته باشد حاکی از آنست که در فاصله زمانی بیشتری از آغاز چین خوردگی تشکیل شده است. و در نهایت دگرریختی شدید لایه های نرم در یالهای طاقدیس طارم نسبت به منطقه لولایی آن و همچنین رخداد عکس این قضیه در واحدهای مقاوم حاکی از تشکیل طاقدیس طارم با سازوکار لغزش خمشی می باشد.



شکل ۱۲: تصویر شماتیک از الگوی شکستگی های مرتبط با چین،

الف- تشکیل شکستگی های برشی مزدوج صفحه ای در اوایل چین خوردگی، ب- با چرخش بیشتر لایه ها در اثر تنش های حاصل از خمش لایه ها، شکستگی های کششی ایجاد می شوند و پ- شکستگی های برشی چینه کران که در اثر برش به موازات لایه بندی تشکیل شده و باعث جابجایی در انواع مزدوج برشی می شوند.





زنجان جهت همکاری در زمینه انجام عملیات صحرایی تقدیر و تشکر می شود. از لطف و محبت سردبیر محترم مجله و پیشنهادات داوران محترم در چنین شرایط کرونایی وقت ارزشمند خویش را در جهت بهبود پیش نویس مقاله ارائه نمودند نهایت تشکر و قدردانی را داریم.

## نتیجه گیری

الگوی شکستگی های مختلف مرتبط با چین در لایه های مختلف شناسایی شدند که شامل ۱- شکستگی های مزدوج صفحه ای مربوط به اوایل تشکیل چین (دسته A)، ۲- شکستگی های کششی ناشی از خمش لایه ها (دسته B) و ۳- انواع چینه کران منتهج از برش موازی لایه (دسته C) در مراحل نهایی چین خوردگی هستند. شکستگی های چینه کران در لایه های نرم موجود در یالهای چین متمرکز هستند. رگه ها و دایک ها به شدت از شکستگی های چینه کران محدود به لایه های نرم تبعیت می کنند که جهت تنش های اصلی حاصل از آنها با جهت تنش های تشکیل دهنده طاقدیس طارم سازگار هستند. مطالعات آماری شکستگی های موجود در یالهای طاقدیس طارم حاکی از تحولات بیشتر آنها در لایه های نرم نسبت به انواع مقاوم هستند. چین های فرعی در یالهای طاقدیس طارم، در لایه های نرم مثل شیل های مدادی و توفیت های شیلی معادل سازند کرج تشکیل شده است به طوریکه لایه های مقاوم در زمان چین خوردگی دچار تغییرات خیلی شدید نشده اند. در منطقه لولایی طاقدیس، لایه های مقاوم مثل انواع گدازه ها به شدت دگرریخت و خرده شده هستند در حالیکه واحدهای نرم دگرریختی ضعیفی را متحمل شده اند. بنابراین، چین خوردگی با سازوکار لغزش خمشی طاقدیس طارم قابل استنباط است.

## سپاسگزاری

این تحقیق بخشی از رساله دکتری نویسنده اول و بر اساس حمایت های مالی دانشگاه گلستان انجام شده است. نویسندگان مقاله مراتب سپاس خود را از بخش پژوهشی و فناوری دانشگاه ابراز می دارند. همچنین از دانشگاه پیام نور مرکز قزوین و دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه



## منابع

- Bergbauer, S., Pollard, D.D., 2004. A new conceptual fold-fracture model including pre-folding joints, based on the Emigrant Gap anticline, Wyoming. *Geological Society of America Bulletin* 116, 294-307.
- Chester, J.S., 2003. Mechanical stratigraphy and fault-fold interaction, Absaroka thrust sheet, Salt River Range, Wyoming. *Journal of Structural Geology* 25, 1171-1192.
- Donath, F. A., and Parker, R. B., 1964. Folds and folding. *Bull. geol. Soc. Am.* 75, 45-62.
- Engelder, T., Peacock, D.C.P., 2001. Joint development normal to regional compression during flexural-fow folding: the Lilstock buttress anticline, Somerset, England. *Journal of Structural Geology* 23, 259-277.
- Evans, M. A., Fischer, M. P., 2012. On the distribution of fluids in folds: A review of controlling factors and processes. *Journal of Structural Geology* 44, 2- 24.
- Ghasemi-Siani, M., Mehrabi, B., Azizi, H., Maya-Wilkinson, C. and Ganerød, M., 2015. Geochemistry and geochronology of the volcano-plutonic rocks associated with the Glojehpithermal gold mineralization, NW Iran. *Open Geosci*, 7, 207-222.
- Guerriero, V., Dati, F., Giorgioni, M., Iannace, A., Mazzoli, S., Vitale, S., 2015. The role of stratabound fractures for fluid migration pathways and storage in well-bedded carbonates. *Ital. J. Geosci.*, 134, 383-395.
- Hancock, P.L., 1985. Brittle microtectonics: principles and practice. *Journal of Structural Geology* 7, 437-457.
- Hirayama, K., samimi, m., zahedi, m., Hushmand-Zadeh, A., 1966. Geology of Taroum district, western part (Zanjan area north-west Iran). *Geological Survey of Iran, Report* 8.
- Ismat, Z., 2008. Folding kinematics expressed in fracture patterns: an example from the Anti-Atlas fold belt, Morocco. *J. Struct. Geol.* 30, 1396-1404.
- Jamison, W.R., 1992. Stress controls of fold thrust style. In: McClay, K.R. (Ed.), *Thrust Tectonics*. Chapman and Hall, London, 155-164.
- احمدی، ب، مریدی فریمانی، ع، ا، حسینی، م، ۱۳۹۲. بررسی هندسی طاقدیس طارم و کنترل آن در کانسارزایی منطقه (شمال شرق زنجان)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان.
- اردکان، م، شبانیان، ا، منصف، ا، ۱۳۹۵. بررسی نقش جنبشهای سنوزویک (الیگوسن - کواترنری) در شکل گیری دره طارم. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان.
- بهارفیروزی، خ، ۱۳۷۶. بررسی زونهای آلتراسیون و زوناسیون عمودی در کانسار تپ اسکارن پورفیری مس - مولیبدن سونگون اهر، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت معلم تهران.
- حاجی علی بیگی، ح، علوی، س، ا، افتخارنژاد، ج، مختاری، م، آدابی، م، ح، ۱۳۸۷. استفاده از شکستگی‌ها در تفسیر ساختاری یک تاقدیس، مطالعه موردی: تاقدیس چناره، جنوب باختر ایران، مجله علوم زمین، ۷۴، ۳۳-۴۴.
- ناظمی، ا. و قطب تحریری، ف، ۱۳۹۳. پترولوژی، ژئوشیمی و کانی‌سازی در گرانیت‌ها و دایک‌های چیدر در جنوب غرب منجیل. دومین همایش ملی پترولوژی کاربردی، اصفهان.
- Allen, M. B., Kheirkhah, M., Emami, M. H. & Jones, S. J., 2011- Right- lateral shear across Iran and kinematic change in the Arabia-Eurasia collision zone. *Geophysical Journal international* 184, 555-574.
- Anastasio, D.J., Fisher, D.M., Messina, T.A., Holl, J.E., 1997. Kinematics of décollement folding in the Lost River Range, Idaho. *Journal of Structural Geology* 19, 355-368.
- Bellahsen, N., Fiore, P., Pollard, D.D., 2006. The role of fractures in the structural interpretation of Sheep Mountain Anticline, Wyoming. *Journal of Structural Geology* 28, 850-867.



- geochemistry of the Zehabad intermediate-sulfidation epithermal deposit, NW Iran. *Turkish J Earth Sci.* 28, 882-901.
- Srivastava, D.C., Engelder, T., 1990. Crack-propagation sequence and pore-fluid conditions during fault-bend folding in the Appalachian Valley and Ridge, central Pennsylvania. *Geological Society of America Bulletin* 102, 116-128.
- Stocklin, J. and Eftekhari-Nezhad, J., 1969. Explanatory text of Zanjan quadrangle map. G.S.I, Rep, No. D4, scale 1: 250,000.
- Su, N., Zou, L., Shen, X., Shen, F., Ren, Y., Xie, Y., Wu, J., 2014. Fracture patterns in successive folding in the western Sichuan basin, China. *Journal of Asian Earth Sciences* 81, 65-76.
- Tavani, S., Storti, F., Salvini, F., Toscano, C., 2008. Stratigraphic versus structural control on the deformation pattern associated with the evolution of the Mt. Catria anticline, Italy. *Journal of Structural Geology* 30, 664-681.
- Lemiszki, P.J., Landes, J.D., Hatcher Jr., R.D., 1994. Controls on hinge-parallel extension fracturing in single-layer tangential-longitudinal strain folds. *Journal of Geophysical Research* 99, 22027-22042.
- Nazari, H., Salamati, R., 1998. Geological map of the Rudbar. Geological Survey of Iran, scale 1/100,000.
- Pollard, D.D., Aydin, A., 1988. Progress in understanding jointing over the past century. *Geological Society of America Bulletin* 100, 1181-1204.
- Ramsay, J.G., Huber, M.I., 1987. *The Techniques of Modern Structural Geology*. In: *Folds and Fractures*, Vol. 2. Academic Press, London.
- Rezaeian, M., Carter, A., Hovius, N. and Allen, M.B., 2012. Cenozoic exhumation history of the Alborz Mountains, Iran: New constraints from low-temperature chronometry. *Tectonics*, 31(2).
- Rives, T., Razack, M., Petit, J.P., Rawnsley, K.D., 1992. Joint spacing : analogue and numerical simulations. *Journal of structural geology*, 14, 925-937.
- Shahbazi, S., Ghaderi, M., Alfonso, P., 2019. Mineralogy, alteration, and sulfur isotope



فصلنامه زمین ساخت

پاییز ۱۳۹۹، سال چهارم، شماره ۱۵

doi: 10.22077/jt.2021.3751.1092

## تغییر جهت میدان تنش در پهنه گسلی کاشان در زمان نئوژن، بخش میانی پهنه ارومیه دختر

سیما ناقه<sup>۱</sup>، میثم تدین<sup>۲\*</sup>، همایون صفایی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکترای تکنیک گروه زمین شناسی دانشگاه اصفهان

۲- استادیار، گروه زمین شناسی، دانشگاه اصفهان، ایران

۳- دانشیار بازنشسته، گروه زمین شناسی، دانشگاه اصفهان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۶

### چکیده

پهنه گسلی کاشان در ۳۰ کیلومتری جنوب شرق شهر کاشان با امتداد شمال غربی-جنوب شرقی و درازای ۸۰ کیلومتر در بخش میانی پهنه ماگمایی ارومیه-دختر گسترش یافته است. این پهنه گسلی واحدهای آتشفشانی ائوسن، توده‌های نفوذی و کربناته الیگومیوسن، واحدهای رسوبی میوسن و کواترنری را قطع کرده است. داده‌های ساختاری برداشت شده نشانگر راستای شمال غربی-جنوب شرقی و سازوکار برشی راستگرد با مولفه کوچک فشارشی برای گسل اصلی کاشان به عنوان پهنه اصلی گسلی در منطقه است. نتایج حاصل از برگردان تنش دیرین و داده‌های ساختاری برداشت شده نشانگر تغییر راستای تنش فشارشی از شمال شرقی-جنوب غربی به شمالی-جنوبی از زمان میوسن میانی به بعد است. این رژیم فشارشی شمالی-جنوبی سبب چین خوردگی و گسل خوردگی سازندهای قم و قرمز بالایی با امتداد تقریبی شرقی-غربی و همچنین ته نشست رسوبات تخریبی پلیوسن و کواترنری در منطقه به ویژه در گرابن‌هایی با امتداد شمالی-جنوبی شده است.

**واژه‌های کلیدی:** پهنه گسلی کاشان، سازوکار فشاری-برشی راستگرد، پهنه ارومیه-دختر، تنش دیرین.





## Change in direction of stress field in Kashan fault zone during Neogene, Middle part of Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc.

Nagheh .S <sup>1</sup>; Tadayon .M <sup>2\*</sup> ; Safaei .H <sup>3</sup>

<sup>۱</sup>-Sima nagheh/ PhD student in Tectonics, Department of Geology, University of

<sup>۲</sup>-Meisam tadayon/ Department of Geology, University of Isfahan

<sup>۳</sup>-Homayon safaei/ Retired from the Department of Geology, University of Isfahan

### Abstract

The Kashan fault zone is located 30 km Southeast of Kashan with strike NW-SE and 80 km length that propagated in the middle part of Urumieh-Dokhtar magmatic arc. This fault zone intersects Eocene-volcanic intrusive, Oligocene conglomerates, Oligo-Miocene carbonate masses, Neogene and Quaternary sedimentary Units. In this research, reconstruction of paleo and neo-stress and structural evolution of Kashan fault zone has been assessed. The collected structural data indicates the NW-SE trend and right-lateral transpression for main Kashan fault as the main fault zone in the region. The result of paleo-stress inversion and collected structural data indicate that after likely Middle Miocene (ca. Upper Miocene) the regional stress regime has been changed in which the direction of the maximum compression changed from NE-SW to N-S. The new N-S directed maximum compression caused the propagation of the E-W trending folds of the Neogene sediments and right-lateral kinematics of Kashan fault zone in the area. Furthermore, new N-S directed maximum compression formed the N-S trending grabens that have been filled by Pliocene and Quaternary detrital deposits.

**Keywords:** Kashan fault zone, Right lateral transpressional, Urumieh-Dokhtar zone, Paleo-stress



## مقدمه

اساس قانون دست راست (RHR) انجام و عنوان شده است. همچنین جهت شناسایی بهتر عناصر ساختاری از داده های (ETM+) ماهواره Landsat7 به شماره (۱۶۴/۳۷) که دارای ۸ باند طیفی می باشد، استفاده شده است. در این پژوهش به بازسازی تنش دیرین و تحلیل تکامل ساختاری پهنه گسلی کاشان پرداخته شده است. در این راستا به محاسبه ی موقعیت تنش بیشینه در زمان گذشته (PaleoStress) به کمک نرم افزار Daisy از روش های محاسباتی برگردان تنش همچون Montecarlo Direct Inversion و Rotax Inversion برای گسل های برداشت شده و از روش محاسبه آماری صفحه پی و محور بتا بر روی لایه بندی های برداشت شده در مطالعات صحرائی پرداخته شده است.

## زمین شناسی عمومی منطقه

پوسته قاره ای ایران مرکزی، قطعه ای جدا شده از ابرقاره گندوانا در زمان پالئوزوئیک است که امروزه به همراه پهنه های تکتونیکی البرز و سندج- سیرجان در هینترلند پهنه برخوردی زاگرس واقع شده است (Berberian and King, 1981; Hassanzadeh et al. 2008; Hassanzadeh and Wernicke, 2016). حاشیه غربی ایران مرکزی از دوره پالئوژن تا دوران میوسن مورد ماگماتیسیم و ولکانیسم حاصل از فرورانش پوسته اقیانوسی تئیس جوان به زیر پوسته قاره ای ایران مرکزی بوده است که با نام کمان ولکانیکی- ماگماتیکی ارومیه- دختر و امتداد شمال غربی- جنوب شرقی شناخته می شود (آقابائی، ۱۳۸۳ "Berberian and Berberian, 1981; Babazadeh et al. 2019; Alaminia et al. 2020). اوج فعالیت های ماگمایی در کمان ارومیه- دختر در دوران ائوسن بوده است (Babazadeh et al. 2019). حرکت کلی و بلند مدت رو به شمال صفحه قاره ای عربستان به سمت شمال از زمان کرتاسه تا کنون به همراه چرخش ملایم پاد ساعتگرد همراه بوده است که موتور دینامیکی کلیه رخدادهای تکتونیکی

مناطق با توالی سنگ- چینه ای پیوسته و خوب حفظ شده همیشه مورد توجه زمین شناسان به منظور بررسی تکامل زمین شناسی در طی زمان بوده است. حاشیه غربی پوسته قاره ای ایران مرکزی که از دوره پالئوژن میزبان فعالیت های زیاد آذرین بوده است، در مناطقی میزبان باریکه ای از واحدهای کربناته دریایی قم و رسوبات میوسن نیز است. از سوی دیگر حضور ساختارهایی با امتداد و سبک های مختلف در بخش غربی ایران مرکزی، این مناطق را به منظور بررسی تکامل تکتونیکی- چینه ای سنوزوئیک مستعد کرده است. از این رو پهنه گسلی فعال و لرزه زای کاشان در بخش میانی از کمان ولکانیکی- ماگمایی ارومیه دختر که توالی به نسبت کامل سنگ چینه ای از ائوسن تا کواترنری به همراه ساختارهای مختلف را نیز در خود جای داده است (نوگل، ۱۳۶۴؛ آمبرسیز و ملویل، ۱۳۷۰؛ وفا ۱۳۸۷)، در این پژوهش انتخاب و به منظور بازسازی تکامل تکتونیکی بعد از ائوسن آن با استفاده از برداشت های صحرائی و پراکندگی مناسب در کنار پردازش تصاویر ماهواره ای مورد بررسی قرار گرفته است. تلفیق نتایج ساختاری و چینه شناسی در بخش میانی پهنه گسلی کاشان نشان می دهد که رژیم تکتونیکی فشارشی در منطقه پس از میوسن میانی دچار تغییر جهت شده است.

## روش تحقیق

بدون شک مهم ترین بخش در هر مطالعه ی زمین شناسی، مشاهده ها و اندازه گیری های صحرائی می باشد. از این رو در این پژوهش ابتدا اقدام به برداشت وضعیت لایه بندی، گسل ها و سایر عناصر ساختاری کرده و سپس به بررسی روابط چینه شناسی آن ها پرداختیم. در مجموع وضعیت هندسی ۳۲۰ گسل و درزه برداشت و سازوکار ۷۵ گسل که دارای خش لغز بودند، تعیین گردید. شایان ذکر است که اندازه گیری ساختارها در مطالعات صحرائی بر



در جنوب و جنوب غربی منطقه مورد مطالعه قدیمی -ترین واحدهای سنگی تحت عنوان پی سنگ پالئوزوئیک رخمون دارند (شکل ۲) (زاهدی و عمیدی، ۱۳۶۴). پس از آن واحدهای آذرآواری ائوسن، بخش اعظمی از منطقه را پوشش می‌دهد. توالی گابرو، کوارتز دیوریت و مونزودیوریت متعلق به بعد از ائوسن -الیگوسن در شمال غرب روستای وش جلوه‌گر شده‌اند (زاهدی و عمیدی، ۱۳۶۴). در شمال غرب منطقه رخمون کوچکی از ماسه سنگ‌های قرمز سازند قرمز زیرین در راستای گسل کاشان توسعه یافته است که با مرزی گسلی و ناپیوسته نسبت به واحدهای ائوسن قرار گرفته است (زاهدی و عمیدی، ۱۳۶۴). در بخش مرکزی منطقه واحدهایی شامل گرانودیوریت و گرانیت و به مقدار کمتر تونالیت الیگومیوسن بوده و قسمت عمده توده نفوذی وش را تشکیل داده است (زاهدی و عمیدی، ۱۳۶۴). توده نفوذی وش واحدهای کربناتی پی سنگی پالئوزوئیک و واحدهای آتشفشانی ائوسن را قطع نموده و سبب ایجاد متامورفیسم همبری و اسکارن تا ضخامت چند صد متر را در محل تماس با واحدهای میزبان شده‌است. رخساره این دگرگونی همبری در حد آلپیت - اپیدوت هورنفلس و هورنبلند بوده است (خلعت بری جعفری و علایی، ۱۳۷۷). در بخش‌های مختلف از منطقه توزیعی از توالی‌های کربناته سازند قم با سن الیگومیوسن دیده می‌شود که با واحدهای میوسن به صورت پیوسته و با واحدهای قدیمی تر مرزی ناپیوسته و گسلی دارند (شکل ۳) (ناقه، ۱۳۹۸). در شمال غرب منطقه واحدهای زرد رنگ ماسه سنگی و کنگلومرایی سازند قرمز بالایی مشاهده می‌شوند و در مجاورت آنها واحدهای کنگلومرایی پالئوسن با مرزی گسلی نسبت به واحدهای ائوسن قرار گرفته‌اند (شکل ۲) (زاهدی و عمیدی، ۱۳۶۴). واحدهای کواترنری در شمال و شمال شرق منطقه بیشتر از تراس‌های قدیمی و مخروط افکنه‌های مرتفع تشکیل شده -اند (خلعت بری جعفری و علایی، ۱۳۷۷) (شکل ۲).

و آذرین پس از کراتاسه در پهنه‌های ساختاری ایران قلمداد شده است (Sella et al. 2002; McQuarrie et al. 2003; Tadayan et al. 2017; 2019).

برخی از محققین پهنه گسلی کاشان را قطعه‌ای از سیستم گسلی قم-زفره با سازوکار عمومی راستگرد و امتداد کلی شمال غرب- جنوب شرقی، از قم تا زفره به طول ۳۰۰ کیلومتر در نظر می‌گیرند (محجل و رهامی، ۱۳۸۸). از سوی دیگر مطالعات دورسنجی و شواهد میدانی حکایت از ادامه داشتن گسل کاشان تا جنوب شرق اردستان و مستقل بودن گسل زفره از این گسل دارند (صفایی، ۱۳۸۷; صفایی و طباطبایی منش، ۱۳۹۲; Safaei et al. 2012).

منطقه مورد مطالعه در شمال غرب اصفهان (جنوب شرق شهرستان قمصر) و در محدوده مختصاتی "۴۰,۷۸" شرقی تا "۳۳°۳۶'۳۲,۵۴" عرض شمالی و "۳۱°۵۷,۸۱" تا "۵۱°۴۵'۰۹,۱۴" طول شرقی قرار گرفته‌است (شکل ۱). رشته کوه‌های ناحیه که در واقع جزئی از پلوتون کاشان می‌باشند با راستای شمال غربی- جنوب شرقی جزئی از رشته کوه‌های ارتفاعات ارومیه- دختر می‌باشند که در واقع حاصل ماگماتیسیم ناشی از فرورائش تیتس جوان طی کوهزایی آلپ- هیمالیا به زیر صفحه ایران می‌باشند (Alavi, 1994; Davoudzadeh and Schmidt, 1984). نتایج حاصل از مطالعات سن سنجی به روش U-Pb نشان می‌دهد که توده نفوذی کاشان طی دو زمان ائوسن پایانی (Priabonian) و میوسن پیشین (Burdigalian) جای گرفته است (Khaksar et al. 2020). سنگ‌های آذرین ناحیه مورد مطالعه شامل سنگ‌های پلوتونیک کالکوالکالن مختلف با ترکیب اسیدی تا بازی هستند (e.g., Kananian et al. 2014; Berberian and King, 1981).

واحدهای سنگ چینه‌ای منطقه مورد مطالعه خلاصه وار به شرح زیر است:



کلی شرقی - غربی و واحدهای ائوسن، توسط پهنه گسلی پرشیب با امتداد شمال شرقی - جنوب غربی جابجا شده است (شکل ۴ الف). شیب این پهنه گسلی چپگرد ۷۸ درجه به سمت شمال غرب (N209, 78NW) است که مسیر رودخانه را به صورت چپگرد به میزان ۶۲۰ متر جابجا کرده است (شکل ۵ الف و ۵ ب). خش لغزها و شکستگی‌های ریدل حک شده بر روی سطح صفحات گسلی نشانگر کینماتیک غالب چپگرد به همراه مولفه کوچک نرمال است (شکل ۵ پ). در دو کیلومتری شمال شرقی همین گسل چپگرد واحدهای کربناتی سازند قم نیز به مقدار تقریباً ۹۰ متر توسط گسلی پرشیب با امتداد و شیب (N211, ۸۱NW) به صورت چپگرد بریده و جابجا شده است (شکل ۵ و ۵ ج).

در یک و نیم کیلومتری شرقی این رودخانه جابجا شده چپگرد، در حاشیه جاده آسفالته به سمت روستای تتماج، گسل‌هایی نسبتاً پرشیب با امتداد کلی شمالی - جنوبی و شیب‌های ۶۰ تا ۷۰ درجه به سمت شرق و غرب واحدهای ائوسن را بریده و گرابن‌های متوالی زیبایی را ایجاد کرده‌اند که توسط واحدهای تخریبی ماسه سنگی و کنگلومرایی پلیوسن و کواترنری پر شده است (شکل ۵ الف و ۵ د). سازوکار این دسته از گسل‌ها، که در دیگر نقاط منطقه مورد مطالعه نیز مشاهده شده‌اند، بر اساس خش لغزها و شکستگی‌های ریدل و پله‌های موجود در سطح گسل نرمال محض تشخیص داده شده است (شکل ۵ د).

شواهد ساختاری در امتداد پهنه گسلی کاشان:

پهنه گسل کاشان با امتداد شمال غربی - جنوب شرقی در میانه منطقه مورد مطالعه قطع کننده واحدهای ائوسن، اولیگوسن، الیگومیوسن و کواترنری است (شکل ۳ ب و ۱). در راستای پهنه گسل کاشان برداشت‌های ساختاری متعددی انجام گرفت که نشانگر امتداد و شیب میانگین

درهم آمیختگی شدید واحدهای سنگی و وجود گسل‌هایی با امتدادها و سازوکارهای مختلف قطع کننده واحدهای سنگی و همدیگر نشان دهنده‌ی تاثیر فازهای تکتونیکی مختلف بر این ناحیه می‌باشد (شکل ۲). گسل‌های اصلی منطقه راستای کلی شمال غرب - جنوب شرق دارند (نوگل سادات، ۱۳۶۴) که با راستای عمومی گسل‌های زاگرس مطابقت دارد (شکل ۲ و ۳ ب).

## نتایج

در این بخش به ارائه شواهد ساختاری شاخص از مطالعات صحرایی انجام گرفته در منطقه مورد مطالعه که شامل گسل‌ها و لایه بندی‌ها است در قالب شواهد ساختاری در راستای پهنه گسلی کاشان و دیگری در پیرامون آن به تفصیل پرداخته می‌شود.

شواهد ساختاری در پیرامون پهنه گسلی کاشان:

در محدوده کوه ساریان و شمال شرقی روستای تتماج واحدهای آذرآواری ائوسن و واحدهای کربناتی سازند قم توسط گسل شمال غربی - جنوب شرقی ساریان متاثر شده به گونه‌ای که گسل معکوس ساریان جنوبی با شیب به سمت شمال شرق واحدهای آذرآواری ائوسن را بر روی واحدهای سازند قم رانده است (شکل ۴ الف). فعالیت معکوس گسل ساریان جنوبی نیز سبب تشکیل ناودیس با امتداد شمال غربی - جنوب شرقی در بلافاصله فرودپواره گسل شده است (شکل ۵ الف). برداشت‌های ساختاری انجام گرفته در طول گسل ساریان جنوبی، نشانگر امتداد و شیب N309,47NE و بر اساس خش لغزهای موجود بر سطح گسل سازوکار معکوس محض آن به وضوح قابل تشخیص است (شکل ۴ ب و ۴ پ).

در سه کیلومتری جنوب شرقی گسل ساریان جنوبی، در مجاورت جاده کاشان - تتماج، رودخانه تتماج با راستای



تأثیر دو تنش فشارشی اصلی با امتداد مختلف در منطقه می-باشد. به منظور تعیین دقیق موقعیت تنش‌های مسبب دگرشکلی در منطقه، آنالیزهای برگردان استرس را بر روی گسل‌ها و لایه بندی‌های اندازه گرفته شده توسط نرم افزار Daisy انجام دادیم. نتایج برگردان تنش بر روی گسل‌ها نشانگر دو جهت گیری شمالی-جنوبی و شمال شرقی-جنوب غربی برای تنش‌های بیشینه می‌باشد (شکل ۸). عملیات بازگردانی تنش مسبب را برای داده‌های لایه‌بندی اندازه‌گیری شده برای دو روند شمال غربی-جنوب شرقی و شرقی-غربی چین خوردگی‌ها نیز انجام داده‌ایم که نتایج یکسانی را برای آنها بدست داد، به گونه‌ای که دو راستای تنش فشارشی شمالی-جنوبی و شمال شرقی-جنوب غربی را مشخص و متمایز کرده است (شکل ۹). در مورد تقدم و تاخر تنش‌های وارده بر بخش میانی پهنه گسلی کاشان بر اساس روابط قطع شدگی گسل‌ها این گونه می‌توان بیان داشت که تنش فشارشی شمال شرقی-جنوب غربی قدیمی‌تر از تنش فشارشی شمالی-جنوبی بوده است. اما در مورد سن نسبی تنش‌های وارد شده بر منطقه مورد مطالعه، بر اساس سن لایه‌های چین خورده نتایج حاکی از آن است که رژیم فشاری شمال شرقی-جنوب غربی از ائوسن پسین تا ابتدای میوسن بر منطقه حاکم بوده و به احتمال زیاد از بازه‌ی زمانی بعد از میوسن میانی جهت تنش فشارشی بیشینه به راستای تقریباً شمالی-جنوبی تغییر جهت یافته است به طوری که داده‌های صحرائی ارائه شده در بخش قبلی نیز این موضوع را به روشنی نشان می‌دهند و با نتایج مطالعات انجام گرفته در شمال این منطقه نیز مطابقت خوبی دارد (Morley et al. 2009).

شایان ذکر است که جهت تنش شمالی-جنوبی بدست آمده برای بازه زمانی بعد از میوسن میانی در این پژوهش نیز با مطالعات ساختاری و مورفوتکتونیک انجام گرفته در پهنه گسلی کاشان همسان است (مکاریان و همکاران، ۱۳۹۰: Jamali et al. 2011).

N151,73SW است (شکل ۳ ب و ۶ الف). مکانیسم حرکتی آن نیز بر اساس خش لغزها، شکستگی‌های ریدل، پله و فابریک‌های S و C از نوع امتداد لغز راستگرد با مولفه‌ی جزئی شیب لغز فشارشی با میانگین ریک خش لغز ۲۰ درجه است که سبب ایجاد ساختارهای گلواره‌ای مثبت در امتداد پهنه گسلی شده است (شکل ۶ ب و ۶ پ). بخش شمال غربی پهنه گسلی کاشان که قطع کننده واحدهای ماسه سنگی سازند قرمز زیرین است مزین به فابریک‌های S و C با موقعیت‌های هندسی  $C=110/50$   $S=55/60$  لنزهای محدود شده بین آنها شده است که نشانگر حرکت راستگرد این پهنه گسلی است (شکل ۶ پ). معماری بخش میانی پهنه اصلی گسل کاشان به گونه‌ای است که شاخه‌های پرشیب و موازی آن، واحدهای ائوسن را بر روی واحدهای الیگوسن و واحدهای الیگوسن را بر روی واحدهای کربناتی سازند قم به صورت گلواره مثبت رانده است (شکل ۳ ب).

در انتها به ارائه ویژگی‌های هندسی تعداد ۱۸ لایه‌بندی برداشت شده با پراکندگی مناسب که در مطالعه‌ی صحرائی انجام پذیرفته، پرداخته شده است (شکل ۷). تعداد ۱۰ عدد از این برداشت‌های صحرائی متعلق به لایه‌بندی واحدهای ائوسن و الیگوسن، قدیمی‌تر از میوسن، است که دارای امتداد شمال غربی-جنوب شرقی است و ۸ عدد از لایه‌بندی‌ها متعلق به واحدهای به سن میوسن هستند و دارای امتداد کلی شرقی-غربی است که در غالب نمودار گل-سرخ‌ی امتدادی این دو گروه داده نمایش داده شده است (شکل ۷).

## بحث و نتیجه گیری:

در این مطالعه به بررسی ساختارهای شکنا و شکل پذیر پرداخته شده است. داده‌های گسلی و همچنین چین خوردگی‌های منطقه تایید کننده یکدیگر و نشان دهنده‌ی



نتایج حاصل از این مطالعه با دیگر مطالعات انجام گرفته در ایران مرکزی و زاگرس مطابقت بسیار خوبی از نظر راستای تنش و زمان تغییر جهت تنش دارد. به عنوان مثال مطالعات ساختاری گسترده‌ای که در طول زاگرس انجام گرفته نشانگر تغییر راستای تنش فشارشی بیشینه از شمال شرقی-جنوب غربی به شمالی-جنوبی است در زمان میوسن بالایی است (Navabpour et al. 2007; 2008; 2010). در پهنه گسلی درونه از ایران مرکزی و زمین درز سیستان نیز تغییر راستای تنش فشارشی بیشینه از شمال شرقی-جنوب غربی به شمالی-جنوبی در زمان میوسن بالایی رخداده است (Tadayon et al. 2017; 2019; Jentzer et al. 2017). این (۲۰۱۷) که کاملاً با نتایج این پژوهش مطابقت دارد. این تغییر جهت تنش که در پهنه‌های مختلف ساختاری ایران گزارش شده، در ترکیه نیز ثبت شده است (Allen et al. 2004).

در مقیاس بزرگ تکتونیک ورقه ای، دلیل این تغییر جهت تنش را مربوط به حرکت تدریجی پادساعتگرد حول محور قائم ورقه قاره‌ای عربستان در حین همگرایی به سمت شمال می‌دانند (Sella et al. 2002; McQuarrie et al. 2002). که سبب ایجاد گسل جدید زاگرس با سازوکار امتدادلغز راستگرد و مولفه فشارشی شده است (Talebian and Jackson, 2002) که با نام سازماندهی مجدد تکتونیکی (tectonic reorganization) در تمام طول پهنه برخوردی اروپا - عربستان رخ داده است.

### سپاسگزاری:

این مقاله بخشی از نتایج پایان نامه کارشناسی ارشد نویسنده اول در دانشگاه اصفهان است، لذا از دانشگاه اصفهان جهت حمایت‌های عمل آمده سپاسگذاری می‌شود. از جناب آقای رضا خادم و خانم سلیمه ناقه که با کمال محبت در انجام برداشت‌های میدانی ما را یاری نمودند کمال سپاس را داریم.

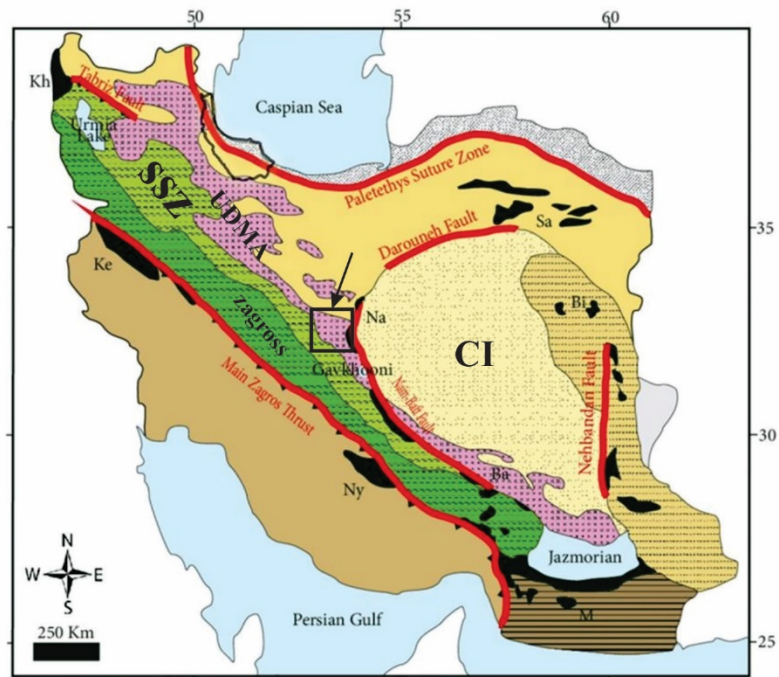


## منابع:

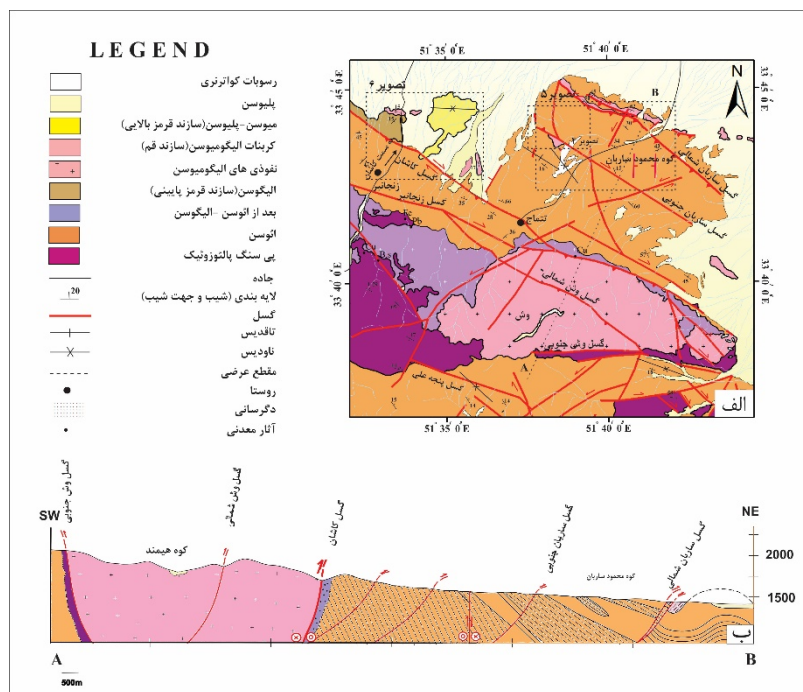
- ناقه، س.، ۱۳۹۸، تحلیل ساختارهای شکننده در بخش مرکزی پهنه ارومیه-دختر، جنوب کاشان، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان، ۱۸۹ ص.
- نبوی، م. ح.، ۱۳۵۵، دیباچه‌ای بر زمین شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین شناسی کشور، ۱۰۹ ص.
- نوگل سادات، م. ع. ا.، ۱۳۶۴، منطقه‌های برشی و خمیدگی ساختاری در ایران: دستاوردهای تحلیل ساختاری ناحیه قم، گزارش شماره ۵۵ سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی، ۵۰ ص.
- وفا، ح.، ۱۳۸۷، تحلیل ساختارهای شکننده زون ارومیه-دختر در جنوب خاور ایبانه، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه دامغان، ۱۰۰ ص.
- Alavi, M., 1994, Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran, new data and interpretations, *Tectonophysics*, 229, PP.211-238.
- Allen, M., Jackson, J. and Walker, R., 2004. Late Cenozoic reorganization of the Arabia-Eurasia collision and the comparison of short-term and long-term deformation rates. *Tectonics*, 23(2).
- Alaminia, Z., Tadayon, M., Finger, F., Lentz, D.R. and Waitzinger, M., 2020. Analysis of the infiltrative metasomatic relationships controlling skarn mineralization at the Abbas-Abad Fe-Cu Deposit, Isfahan, north Zefreh Fault, Central Iran. *Ore Geology Reviews*, 117, p.103321.
- Babazadeh, S., Ghorbani, M.R., Cottle, J.M. and Bröcker, M., 2019. Multistage tectono-magmatic evolution of the central Urumieh-Dokhtar magmatic arc, south Ardestan, Iran: Insights from zircon geochronology and geochemistry. *Geological Journal*, 54(4), pp.2447-2471.
- Berberian, F. and Berberian, M.J.Z.H.K.H.G.E., 1981. Tectono-plutonic episodes in Iran. *Zagros Hindu Kush Himalaya Geodynamic Evolution*, 3, pp.5-32.
- Berberian, M. and King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran: Reply. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18(11), pp.1764-1766.
- آقانباتی، ع.، ۱۳۷۹، پهنه‌های رسوبی- ساختاری عمده ایران (کارت پستال)، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.
- آقانباتی، ع.، ۱۳۸۳، زمین شناسی ایران، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ۵۸۶ ص.
- آمبرسز، ن. و ملویل، ج. پ.، ۱۳۷۰- تاریخ زمین لرزه‌های ایران، ترجمه ابولحسن رده، انتشارات آگاه، تهران، ۶۷۴ ص
- خلعت بری جعفری، م. و علائی مهابادی، ۱۳۷۷، نقشه زمین شناسی چهارگوش نظنز به مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰، تهران.
- زاهدی، م. و عمیدی، س. م.، ۱۳۶۴- نقشه زمین شناسی چهار گوش کاشان به مقیاس ۱/۲۵۰۰۰۰، سازمان زمین شناسی کشور، شماره F7، تهران.
- صفایی، ه.، ۱۳۸۷، مطالعه و تهیه طرح جامع پهنه بندی و آسیب پذیری ناشی از زلزله شهرستان کاشان، گزارش پایانی طرح پژوهشی، شماره ۱۰۳/۹/۴۲۲۶، دانشگاه اصفهان، ۲۳۰ ص.
- صفایی، ه. و طباطبایی منش، س. م.، تاثیر سیستم گسلی اصفهان بر پهنه های سندج- سیرجان و ارومیه دختر، فصلنامه علوم زمین، ویژه نامه دستاوردهای نوین زمین ساخت ایران، تابستان ۱۳۹۲، سال بیست و دوم، شماره ۲، ۸۸، صفحات ۵۶-۶۸.
- محجل، م. و رهامی، ز.، ۱۳۸۸، ساختار گسل راوند و نقش آن در ایجاد حوضه کششی pull-apart در کمربند آتشفشانی ارومیه- دختر، فصلنامه زمین شناسی ایران، سال سوم، شماره یازدهم، ۳۹-۴۵ ص.
- مکاریان، م.، پور کرمانی، م.، شرکتی، ش. و معتمدی، ح.، ۱۳۹۰، بررسی ساختاری چین خوردگی‌ها در بخشی از حوضه ایران مرکزی، ماهنامه علمی- تحلیلی اکتشاف و تحلیل، شماره ۷۸، ۴۸-۵۵ ص

- evolution of deformation partitioning in W-Zagros (Iran, Kermanshah). *Geophysical Journal International*, 175(2), pp.755-782.
- Navabpour, P., Angelier, J. and Barrier, E., 2010. Mesozoic extensional brittle tectonics of the Arabian passive margin, inverted in the Zagros collision (Iran, interior Fars). *Geological Society, London, Special Publications*, 330(1), pp.65-96.
- Raeesi, M., Zarifi, Z., Nilfouroushan, F., Boroujeni, S.A. and Tiampo, K., 2017. Quantitative analysis of seismicity in Iran. *Pure and Applied Geophysics*, 174(3), pp.793-833.
- Safaei, H., Tabatabaeimanesh, S. M., Hashemi, S. N., Mirlohi, A. S., Vafa, H., 2012. Structural and Petrological evidence for the continuation of the Isfahan fault system across the Urumieh-Dokhtar zone of central Iran, *Geotectonics*, 46(6), pp. 455-471.
- Sella, G.F., Dixon, T.H. and Mao, A., 2002. REVEL: A model for recent plate velocities from space geodesy. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B4), pp.ETG-11.
- Tadayon, M., Rossetti, F., Zattin, M., Nozaem, R., Calzolari, G., Madanipour, S. and Salvini, F., 2017. The post-eocene evolution of the Doruneh Fault region (central Iran): The intraplate response to the Reorganization of the Arabia-Eurasia collision zone. *Tectonics*, 36(12), pp.3038-3064.
- Tadayon, M., Rossetti, F., Zattin, M., Calzolari, G., Nozaem, R., Salvini, F., Faccenna, C. and 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), pp.1454-1479.
- Talebian, M. and Jackson, J., 2002. Offset on the Main Recent Fault of NW Iran and implications for the late Cenozoic tectonics of the Arabia-Eurasia collision zone. *Geophysical Journal International*, 150(2), pp.422-439.
- Hassanzadeh, J., Stockli, D.F., Horton, B.K., Axen, G.J., Stockli, L.D., Grove, M., Schmitt, A.K. and Walker, J.D., 2008. U-Pb zircon geochronology of late Neoproterozoic-Early Cambrian granitoids in Iran: Implications for paleogeography, magmatism, and exhumation history of Iranian basement. *Tectonophysics*, 451(1-4), pp.71-96.
- Hassanzadeh, J. and Wernicke, B.P., 2016. The Neotethyan Sanandaj-Sirjan zone of Iran as an arche type for passive margin-arc transitions. *Tectonics*, 35(3), pp.586-621.
- Jamali, F., Hessami, K. and Ghorashi, M., 2011. Active tectonics and strain partitioning along dextral fault system in Central Iran: analysis of geomorphological observations and geophysical data in the Kashan region. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(4), pp.1015-1025.
- Jentzer, M., Fournier, M., Agard, P., Omrani, J., Khatib, M.M. and Whitechurch, H., 2017. Neogene to Present paleostress field in Eastern Iran (Sistan belt) and implications for regional geodynamics. *Tectonics*, 36(2), pp.321-339.
- McQuarrie, N., Stock, J.M., Verdel, C. and Wernicke, B.P., 2003. Cenozoic evolution of Neotethys and implications for the causes of plate motions. *Geophysical research letters*, 30(20).
- Morley, C.K., Kongwung, B., Julapour, A.A., Abdolghafourian, M., Hajian, M., Waples, D., Warren, J., Otterdoom, H., Srisuriyon, K. and 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), pp.325-362.
- 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(1-4), pp.101-131.
- Navabpour, P., Angelier, J. and Barrier, E., 2008. Stress state reconstruction of oblique collision and

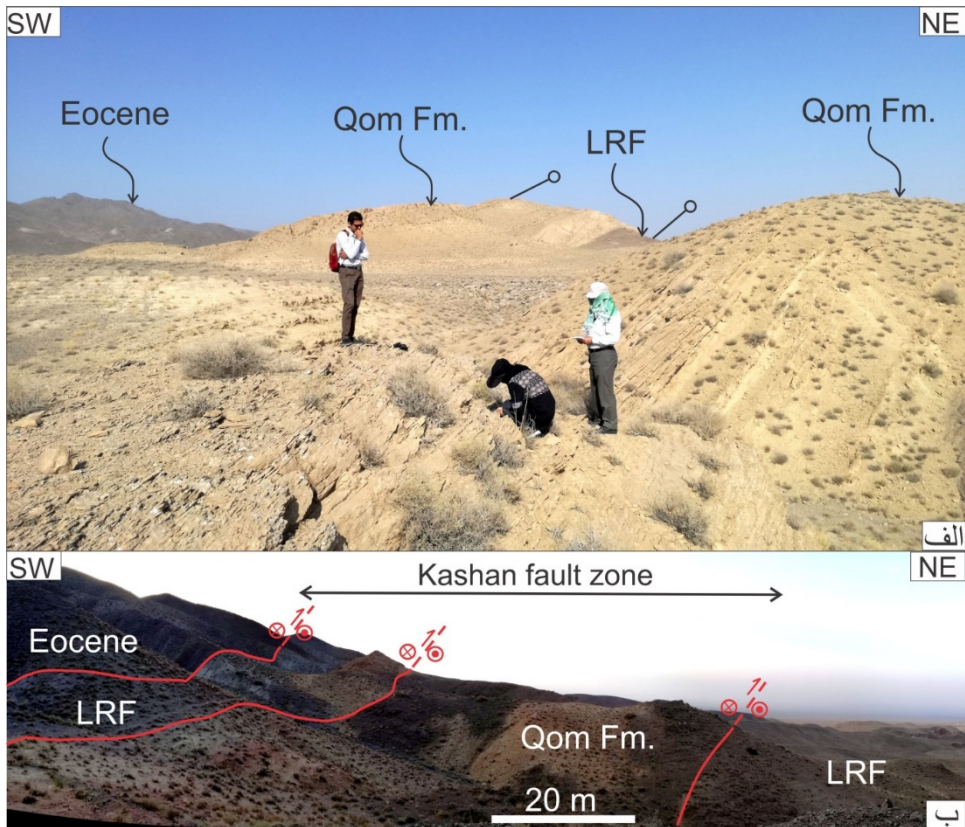




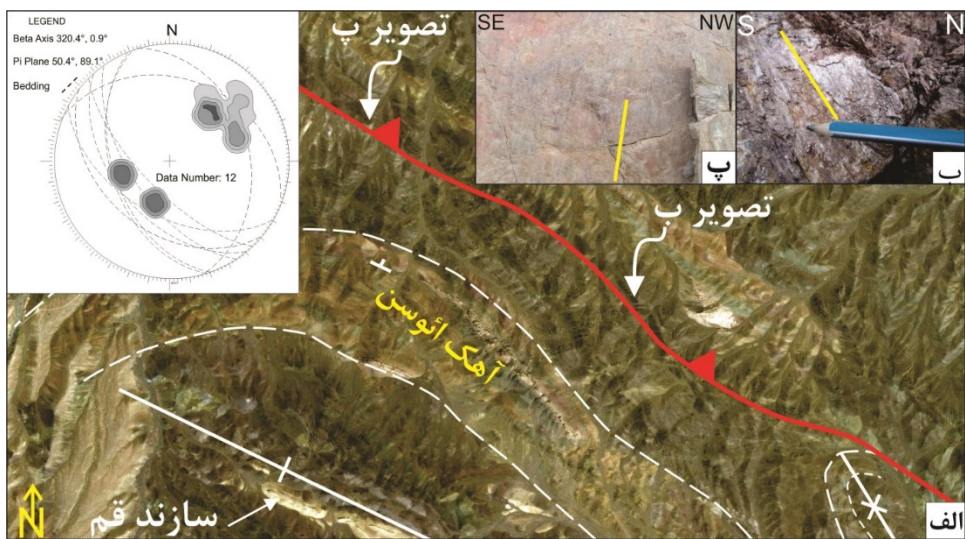
شکل ۱: موقعیت محدوده مورد مطالعه در پهنه‌های ساختاری-رسوبی ایران که با چهارگوش سیاه مشخص شده است (با تغییرات از آقناباتی ۱۳۷۹: ۱۳۸۳: نویی، ۱۳۵۵).



شکل ۲: الف- نقشه زمین شناسی ساده شده منطقه میانی پهنه گسلی کاشان به همراه ساختارها و موقعیت تصاویر بعدی (اقتباس از زاهدی و عمیدی، ۱۳۶۴). ب- مقطع عرضی ساختاری ترسیم شده در راستای شمال شرق-جنوب غرب.

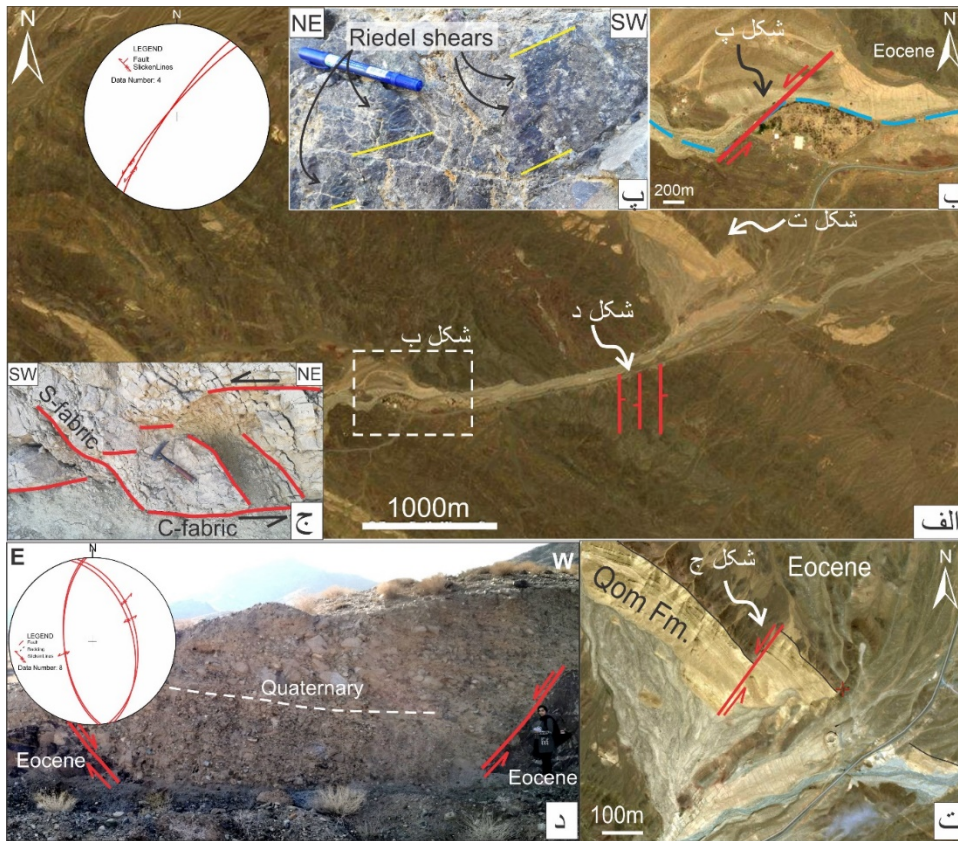


شکل ۳. الف- نمایی از واحدهای شیب‌دار آهکی قم (Qom Fm.)، واحد تخریبی سازند قرمز پایینی (LRF) و واحد آذرین ائوسن (Eocene) در سمت ارتفاعات جنوب غرب و واحد کواترنری پرکننده بخش دشت می‌باشد. ب- نمایی بانوراما از پهنه گسلی راستگرد فشارشی کاشان که واحدهای ائوسن، الیگوسن و الیگومیوسن را کنار هم قرار داده است.

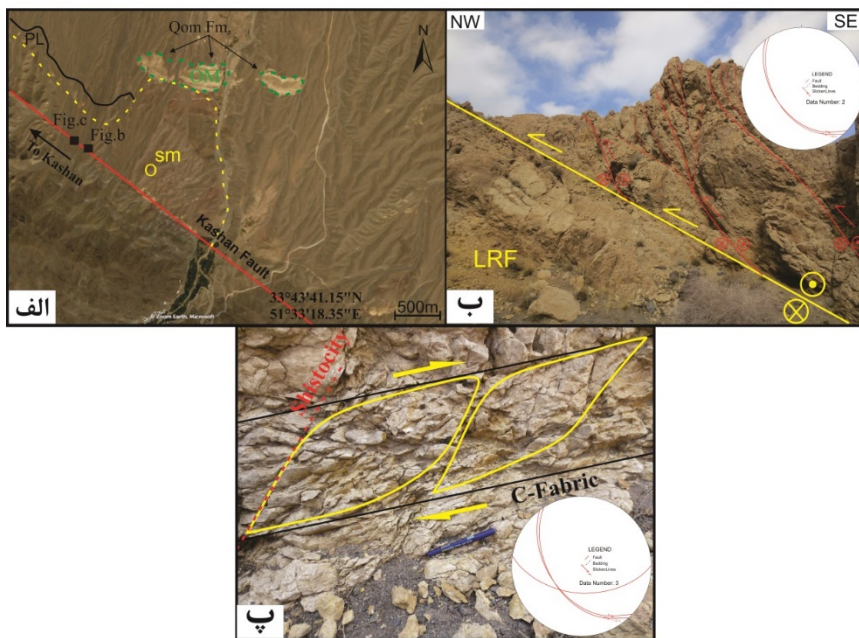


شکل ۴. الف- تصویر ماهواره‌ای از محدوده تأثیر گسل ساربان جنوبی در کوه‌های ساربان و موقعیت برداشت گسل‌های نمایش داده شده در تصاویر پ و ب همراه نمایش لایه بندی‌ها و استریونت لایه بندی به همراه موقعیت صفحه پی و محور بتا. ب- نمایش صفحه‌ی گسلی معکوس ساربان جنوبی. پ- نمایش صفحه‌ی گسلی معکوس ساربان جنوبی.

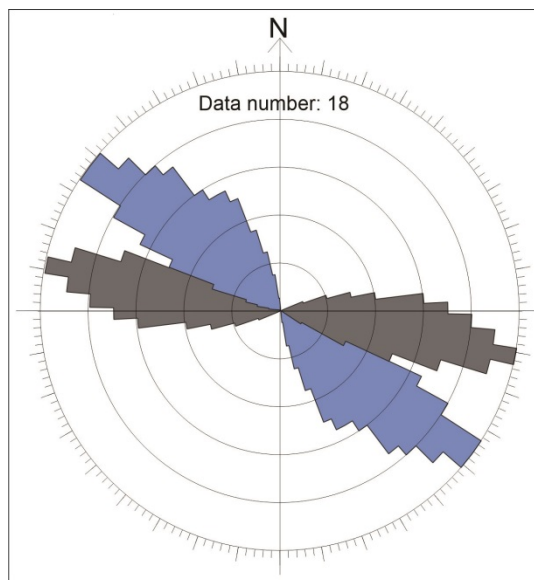




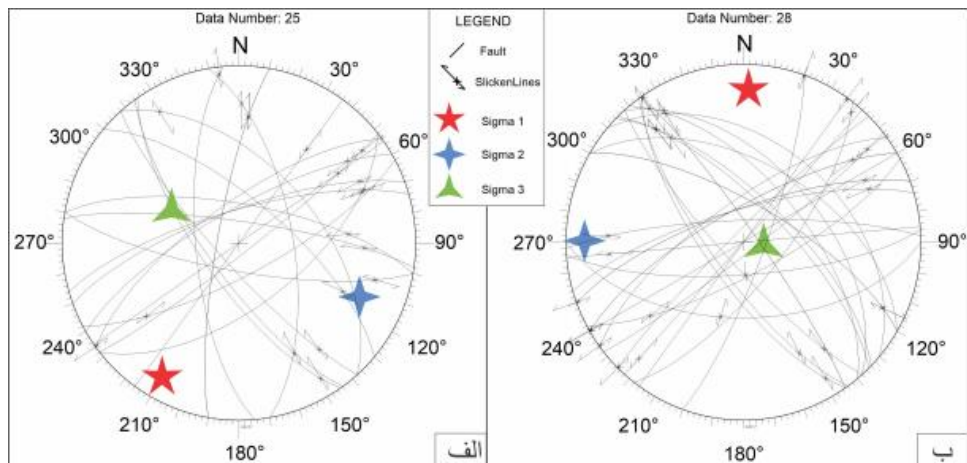
شکل ۵: الف- تصویر ماهواره ای بخش شمالی-شمال غربی محدوده مورد مطالعه و موقعیت داده ی گسلی شمال شرقی- جنوب غربی چپگرد برداشت شده به همراه استریونت آنها. ب-نمای ماهواره ای از گسل فعال شمال شرقی- جنوب غربی چپگرد که رودخانه را بریده است. پ- تصویر نزدیک از صفحه گسلی چپگرد به همراه خش لغزهای گسلی. ت- گسل شمال شرقی- جنوب غربی چپگرد شناسایی شده از تصویر ماهواره ای که جابجا کننده واحد های آهکی سازند قم است. ج-تصویر صحرایی از فابریک های S و C در پهنه گسلی با امتداد شمال شرقی- جنوب غربی با سازوکار چپگرد که جابجا کننده واحد های آهکی سازند قم است. د- گرابن شکل گرفته توسط گسل های همگرای نرمال که توسط رسوبات کواترنری پر شده است به همراه استریونت آنها.



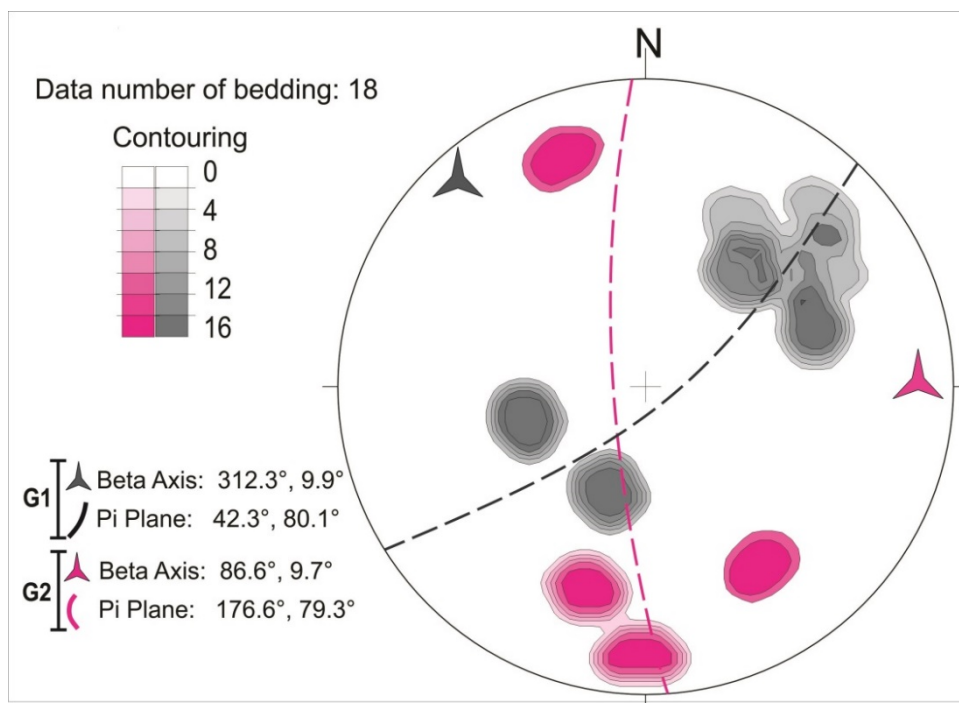
شکل ۶: ساختارهای مرتبط با بخش شمال غربی گسل کاشان الف- تصویر ماهواره ای از موقعیت داده برداشت شده به همراه موقعیت گسل کاشان ب- گسل امتدادلغز راستگرد با مولفه ی فشارشی پ- توسعه ی فابریک های C و S که نمایشگر مولفه راستگرد در امتداد پهنه گسل برشی کاشان می باشد.



شکل ۷: نمایش ۱۸ لایه بندی اندازه گیری شده در قالب نمودار گل سرخی که به دو راستای اصلی تقریباً شرقی-غربی و شمال غربی- جنوب شرقی قابل تفکیک هستند.

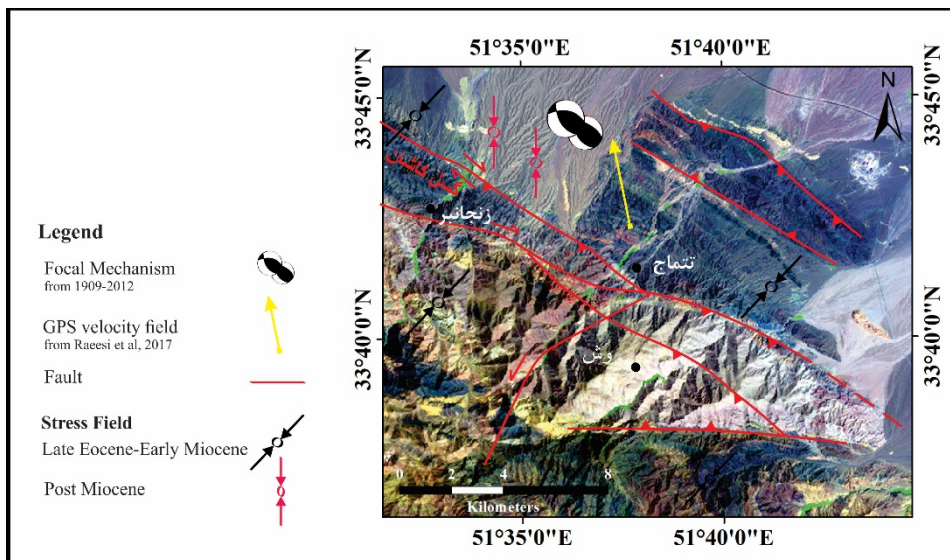


شکل ۸: نتایج حاصل از روش محاسباتی برگردان تنش دیرین از گسل‌های اندازه‌گیری شده برای تنش فشاری شمال شرقی-جنوب غربی (الف) و تنش فشاری شمالی-جنوبی (ب)، سیگما ۱ با ستاره پنج پر قرمز، سیگما ۲ با ستاره چهار پر سبز و سیگما ۳ با ستاره سه پر آبی نشان داده شده است.



شکل ۹: نمایش پراکندگی کنتور دیاگرام قطب لایه بندی‌های برداشت شده به همراه موقعیت صفحه‌ی پی (Pi) و محور بتا. نتایج نشان دهنده‌ی دو صفحه‌ی پی و محور بتا که نشان دهنده دو راستای تنش پیشینه اصلی شمالی-جنوبی و شمال شرقی-جنوب غربی مسبب چین خوردگی منطقه مورد مطالعه می باشند.





شکل ۱۰. تصویر ماهواره ای منطقه مورد مطالعه به همراه گسل های اصلی، بردارهای حرکت GPS (بر گرفته از Raeesi et al, 2017) و نتایج تنش دیرین از این پژوهش به همراه سازوکار زمین لرزه های ۲۰۱۲-۱۹۰۹.



فصلنامه زمین ساخت

پاییز ۱۳۹۹، سال چهارم، شماره ۱۵

doi: 10.22077/jt.2021.3632.1082

## بررسی ارتباط بین گسل ها و درزه ها با کانه‌زایی مس، با استفاده از سنجش از دور و مغناطیس هوایی در منطقه ورزگ (شرق قاین)

فرزاد قاسم پور<sup>۱\*</sup>، توران اسماعیل پور<sup>۲</sup>، محمودرضا هیبات<sup>۳</sup>، محمدمهدی خطیب<sup>۴</sup>

۱- کارشناسی ارشد، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۲- کارشناسی ارشد، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

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

۴- استاد، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۲۱

### چکیده

محدوده مورد بررسی در ورزگ ۱:۱۰۰،۰۰۰ قاینات، در ۱۵ کیلومتری شرق قاین، استان خراسان جنوبی واقع شده است. تفسیر داده‌های مغناطیس هوایی و استخراج خطوط‌های مغناطیسی همراه با پردازش داده‌های ماهواره‌ای دلالت بر جهت‌گیری شکستگی‌ها و عمده ساختارها به ترتیب در سه راستای مهم NW-SE, N-S و NE-SW در منطقه دارد. هدف از این تحقیق بررسی عناصر ساختاری موجود در منطقه از قبیل گسل‌ها، درزه‌ها، رگه‌ها، دایک‌ها و مشخص کردن ویژگی گسل‌های منطقه با تاکید بر پتانسیل کانه‌زایی در ارتباط با گسل‌ها و مشخص نمودن مناطق امید بخش برای اکتشاف مس در منطقه می‌باشد. اعمال یک رژیم فشاری-برشی باعث ایجاد فضای کششی و در پی آن نفوذ محلول‌های گرمابی کانه‌دار و دگرسانی‌های گسترده شده است. با توسعه رخساره شیبست سبز در منطقه سیلیس و کربنات آزاد شده و حفرات توسط مالاکیت (اکسیدمس) جایگزین شده که به طور گسترده باعث تشکیل نودل‌های مالاکیتی در داخل واحد‌های آندزیتی شده است. محل برخورد درزه‌ها و گسل‌ها در منطقه مورد مطالعه (گسل‌هایی با راستای شمال غرب- جنوب شرق و درزه‌هایی با راستای شمال شرق- جنوب غرب) دارای کانی‌سازی با عیار بالا می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: قاین، سنجش از دور، مغناطیس هوایی، کانه‌زایی، مس



## Investigation of the relationship between faults and joints with copper mineralization, using Remote Sensing and magnetism in Vorezg region (east of Ghaen-Birjand)

Ghasempour .E <sup>1\*</sup>; Esmailpour .T <sup>2</sup> ; Heyhat .M.R <sup>3</sup> ; Khatib .M.M <sup>4</sup>

1- M.Sc., Department of Geology, Faculty of Science, Birjand University, Birjand, Iran

2- M.Sc., Department of Geology, Faculty of Science, Damghan University, Damghan, Iran

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

4 - Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Birjand University, Birjand, Iran

### Abstract

The study area is located in sheet 1: 100,000 Ghaenat, 15 km east of Ghaen, South Khorasan province. Interpretation of aerial magnetic data and extraction of magnetic lines along with processing of satellite data indicate the orientation of fractures and major structures in three important directions NS NW-SE, and NE-SW in the region, respectively. The purpose of this study is to investigate the structural elements in the region such as faults, joints, veins, dikes and to determine the characteristics of faults in the region by emphasizing the mineralization potential of faults and to identify promising areas for copper exploration in the region. The application of a compressive-shear regime creates a tensile space followed by the infiltration of mineralized hydrothermal solutions and extensive alterations. With the development of green schist facies in the area, silica and carbonate are released and the cavities are replaced by malachite (copper oxide), which has led to the formation of malachite nodules within andesitic units. The junction of joints and faults in the study area (faults with northwest-southeast direction and joints with northeast-southwest direction) has high grade mineralization.

**Keywords:** Qaen, Remote Sensing, Aerial Magnetism, Mineralization, Copper



## مقدمه

سکوی ترا نصب شده است از سال 1999 میلادی تصاویر چند طیفی را به زمین مخابره می نماید (Abrams, 2002). این سنجنده در ۱۴ باند طیفی تصویربرداری می نماید. سه باند طیفی اول که با نام مرئی و فرورسرخ (مادون قرمز) نزدیک شناخته می شوند در طول موجهای بین  $0.56 - 0.86 \mu\text{m}$  با قدرت تفکیک مکانی ۱۵ متر، شش باند طیفی دوم که به تصاویر فرورسرخ کوتاه موج معروفند، در طول موجهای  $2.13 - 2.13 \mu\text{m}$  با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و پنج باند سوم که با عنوان تصاویر مادون سرخ حرارتی شناخته می شوند در طول موجهای  $11.65 - 12.5 \mu\text{m}$  با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر، دریافت می شوند (Abrams, 2002). استر نخستین سنجندهای است که دارای باندهای حرارتی با قدرت تفکیک طیفی مناسب است. این سنجنده در طول یک روز ۵۰۰ تصویر  $60 \times 60 \text{ km}$  را برداشت می کند (Ninomiya, 2005). اما این سنجنده ابزاری را در اختیار دارد که با انحراف زاویهای ( $\pm 24^\circ$ ) قابلیت گسترش عرض تصویر تا  $232$  کیلومتر را دارد (Fujisada, 1995).

سنجنده نقشه بردار موضوعی پیشرفته یا ETM+ آخرین سنجنده قرار گرفته بر روی ماهواره لندست ۷ (پرتاب شده در سال ۱۹۹۹ است) این سنجنده دارای ۸ باند طیفی است. باند ۸ پانکروماتیک بوده و قدرت تفکیک مکانی آن ۱۵ متر است. باند ۶ با قدرت تفکیک مکانی ۶۰ متر در طول موج حرارتی تصویربرداری می کند. باندهای ۱ تا ۵ و ۷ این سنجنده در محدوده  $2.35 - 2.45 \mu\text{m}$  با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر هستند. ابعاد تصاویر این سنجنده  $185 \times 185$  کیلومتر است (Lillesand et al., 2004).

تصاویر سنجنش از دور دو کاربرد عمده در اکتشاف مواد معدنی دارند (Sabins, 1999) که عبارتند از:

شرق ایران و همچنین بلوک لوت به سبب دارا بودن سیستم های گسلی وساختارهای زمین ساختی فراوان و پیچیده، همواره مورد توجه زمین شناسان بوده است. اما از آنجایی که این بلوک بسیار وسیع می باشد، بررسی های انجام شده در این پهنه به سبب پیچیده بودن تاریخ زمین ساختی آن کافی نیست. لذا با توجه به اینکه جایگاه تشکیل و فضای نهشت اکثر ذخایر در ارتباط با گسل ها وساختارهاست و به طور کلی محل برخورد گسل ها و همچنین محل برخورد شکستگی های فرعی حاصل از پهنه های برشی میتواند مکان مستعدی برای نفوذ ماگما و محلولهای کانه دار و کانه زایی باشد ( کاویانی صدر وهمکاران، ۱۳۹۴). بنابراین مطالعه ساختاری و هندسی گسل های منطقه در سطح و تعمیم آن به عمق می تواند گام موثری در اکتشاف صحیح پتانسیل های معدنی به حساب آید.

روش های دورسنجی امکان شناسایی و اکتشاف مقدماتی را برای محدوده های وسیع با دقت و سرعت بالا و هزینه پایین امکان پذیر می سازند. در واقع با پردازش داده های ماهواره ای و با مشخص کردن ساختارهای خطی، حلقوی و تعیین ارتباط آنها با واحدهای سنگ شناختی و پهنه های دگرسانی می توان به شناسایی بی هنجاریهای یک منطقه پیش از مطالعات ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی پرداخت. اطلاعات با ارزشی که از تصاویر ماهواره ای در کمترین زمان ممکن نسبت به دیگر روشهای اخذ اطلاعات زمین شناسی و اکتشافی حاصل می شود، اهمیت استفاده از این روش در اکتشاف کانسارها را بیش از پیش آشکار ساخته است (کاویانی صدر، ۱۳۹۱). نقشه برداری زاویه طیفی از کانیهای مناطق دگرسان شده و شناسایی مناطق با شکستگی بالا از مهمترین کاربردهای دورسنجی در اکتشاف مواد معدنی است. سنجنده استر که بر روی



۱ : تهیه نقشه زمین شناسی و شناسایی گسلها و شکستگی هایی که نهشته‌های معدنی را در بر دارند.

۲ : شناسایی سنگهای دگرسان شده بر اساس ویژگیهای طیفی آنها.

از کانیهای موجود در دگرسانی های ناشی از کانسارهای مس پورفیری می‌توان به بیوتیت، سریسیت، کائولینیت، اپیدوت، کلسیت و کلریت اشاره کرد (Lowel & Guilbert, 1970). بیشتر این کانیها را می‌توان با استفاده از روشهای سنجش از دور بارزسازی نمود. یکی از مزایای روش سنجش از دور به حداقل رساندن بررسی‌های سطحی، به‌ویژه در مناطق غیر قابل دسترسی بر اساس اطلاعات طیفی به دست آمده از نقاط دیگر با کانی سازی معلوم است (Abrams, 2002).

از تصاویر استر به منظور نقشه برداری از مناطق دگرسان شده استفاده نموده‌اند. این پژوهشگران از روشهای نسبت‌های بانندی، تجزیه مؤلفه‌های اصلی، ترکیبات دروغین رنگی، نقشه بردار زاویه طیفی و تجزیه طیفی کانیها به منظور بارزسازی مناطق دگرسان شده و تفکیک واحدهای سنگی استفاده نموده‌اند. به کارگیری روش تقسیم بانندی برای بارزسازی عوارض خاص در داده‌های چندطیفی مناسب است. از روش یادشده برای کاهش اثرات روشنایی خورشید، توپوگرافی و بارزسازی اطلاعات طیفی در تصاویر استفاده می‌شود (Gupta, 2003) برای شناسایی مناطق دگرسان شده گرمایی دو نشانه خوب که در تصاویر ماهواره‌های قابل شناسایی هستند وجود اکسید آهن و کانی های هیدروکسیل (اکسیژن با هیدروژن در مولکول آب، پیوند هیدروژنه برقرار کند) است (گزارش ارزیابی داده‌های ژئوشیمیائی، سازمان زمین شناسی (۱۳۸۰). و البته از ارتباط مناطق دارای شکستگی نیز می‌توان برای اکتشاف کانسارها استفاده نمود. در کانسارهای مس پورفیری، کلاهدک‌های

آهنی (گوسان) بر روی زونهای پتاسیک و فیلیک تشکیل می‌شوند و بنابراین نشانه خوبی برای شناسایی نهشته‌های پورفیری هستند. با توجه به این که کلاهدک‌های آهنی (گوسان) دارای مقادیر زیادی از اکسیدهای آهن هستند، بنابراین در تصاویر دورسنجی با استفاده از بارزسازی کانی‌های اکسیدهای آهن می‌توان به دنبال این پدیده‌ها گشت. با توجه به اینکه که سنجنده  $ETM^+$  دارای یک باند در محدوده جذب (باند ۱) و یک باند در محدوده بازتاب بالای اکسیدهای آهن است (باند ۳). انتظار می‌رود که مناطق با اکسید آهن را بهتر از سنجنده استر مشخص سازد. ولی برای بارز نمودن کانیهای رسی و مسکوویت که در دگرسانی‌های گرمایی دیده می‌شوند سنجنده استر به دلیل باندهای طیفی بیشتر مناسبتر است Kruse et al. (1992) و al. (2003) Yuhاس روش نقشه بردار زاویه طیفی را برای شناسایی کانیها با استفاده از مقایسه طیف‌های مرجع و طیف‌های استخراج شده از تصاویر ماهواره‌های معرفی کردند. هدف از این تحقیق مشخص کردن ویژگی گسل‌های منطقه با تاکید بر پتانسیل کانه‌زایی در ارتباط با گسل‌ها و مشخص نمودن مناطق امید بخش برای اکتشاف مس در منطقه وهمچنین شناسایی و تحلیل گسل‌ها، شکستگی‌ها، چین خوردگی‌ها، خطواره‌ها و ساز و کار گسلها و تأثیر گذاری این گسلها بر منطقه مورد مطالعه است.

### ویژگی‌های سنگ شناسی منطقه مورد مطالعه

واحدهای سنگی اصلی که در این محدوده رخنمون دارند عبارتند از: (جمع و همکاران، ۱۳۸۵)

- سنگ‌های رسوبی آهکی و آواری (کرتاسه پائینی تا بالائی)

- رسوبات فلیشی و توریدیتی



می‌توان به دگرسانی سربستی، کلریتی، سیلیسی، کربناته و اکسیدهای آهن اشاره نمود.

در این منطقه، کانی سازی به صورت ملاکیت، در دو واحد آندزیت بازالت مگاپورفیری و آندزیت بازالت سبز رنگ وجود دارد. کانی سازی بیشتر به صورت رگه و رگچه ای و افشان در میان گدازه‌های آندزیتی - بازالتی وجود دارد و نمود سطحی آن شامل کانی سازی افشان و خطی ملاکیت است.

### سنگ‌های آذرین خروجی

#### تناوب آگلومرا و توف خاکستری

سن واحد سنگی تناوب آگلومرا و توف خاکستری پالئوسن - ائوسن می‌باشد. این واحد در سطح رخنمون به رنگ خاکستری روشن تا کمی تیره و قطعات و زمینه بازالت تا تراکی بازالتی است که قهوه‌ای تا بنفش و حتی سبز نیز دیده می‌شود. واحد توف خاکستری در این تناوب نسبتاً نازک لایه می‌باشد به گونه‌ای که در این واحد تفکیک آگلومرا و توف امکان پذیر نمی‌باشد (شکل ۱).

- سنگ‌های آتشفشانی حدواسط تا بازیک و سنگهای آذرآواری با ترکیب آندزیت آندزیت بازالت، تراکی بازالت، توف و آگلومرا سنگ‌های آتشفشانی این محدوده مربوط به فورانهای پالئوسن - ائوسن زیرین می‌باشند.

- سنگ‌های رسوبی کنگلومرای (پالئوسن - ائوسن زیرین)

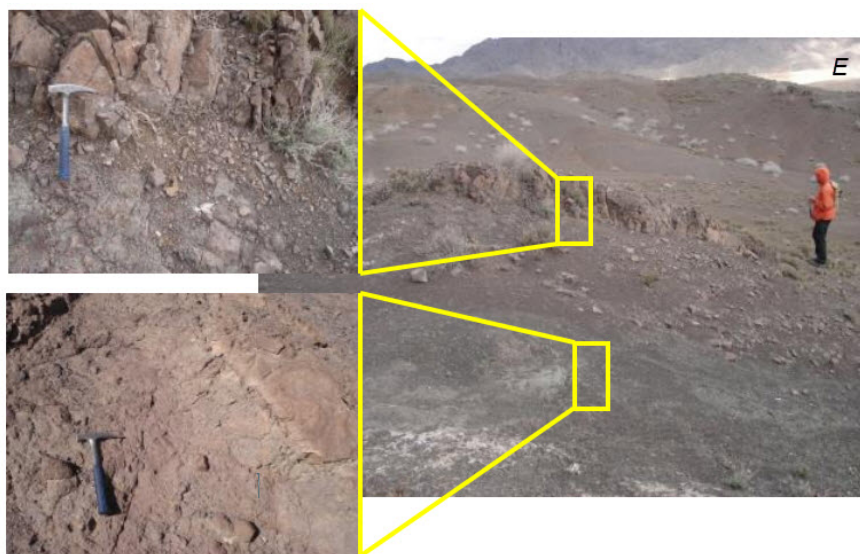
- سنگ‌های رسوبی و رسوبی آتشفشانی (ائوسن میانی - ائوسن بالایی)

- پادگانه‌های آبرفتی قدیمی و جوان (کواترنری)

- دایک آندزیتی و سیل (پالئوسن - ائوسن)

- تراورتن (پالئوسن - ائوسن)

گسترش مناطق دگرسانی در محدوده ورزگ کم بوده و غالباً در ارتباط با گسل‌های اصلی منطقه (گسل‌های شمالی - جنوبی و شمال غرب - جنوب شرق)، می‌باشند. دگرسانی‌ها عمدتاً در ارتباط با سنگ‌های آندزیتی و آندزیت بازالت هستند. از زون‌های دگرسانی در محدوده



شکل ۱: تناوبی از توف و آگلومرا در منطقه مورد مطالعه (عکس بالا سمت چپ، آگلومرا و عکس پایین سمت چپ، توف)

مانندی در قسمت‌هایی از این واحد که حاصل فرسایش است مشاهده می‌شود (جمع و همکاران، ۱۳۸۰).

### آندزیت تا آندزیت پورفیری

سن این واحد براساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ قاین، پالئوسن - ائوسن می‌باشد. این واحد تقریباً ۶۰٪ مساحت محدوده را به خود اختصاص داده است. رخنمون این واحد در سطح هوازده به رنگ قهوه‌ای و در سطح تازه بنفش متمایل به قهوه‌ای می‌باشد. این واحد سنگی دارای بافت پورفیریتیک با خمیره هیالومیکروولیتی است. بلورهای پلاژیوکلاز آن به صورت شکل‌دار و در اندازه چند میلی‌متر قابل مشاهده است. الیون و پیروکسن نیز در مقطع سنگ مشاهده شد. بلورهای الیون تا حد زیادی به سرپانتین و ایدنگسیت تبدیل شده‌اند و بلورهای فلدسپار نیز تقریباً سالم هستند. حفراتی در سنگ مشاهده می‌شود که توسط کلسیت، کلریت و زئولیت پر شده است. در بعضی قسمت‌های این واحد آندزیت پورفیری تا مگاپورفیری رخنمون دارد ولی از آنجا که وسعت این قسمت‌ها کم، ناچیز و یا به صورت تدریجی می‌باشد، قابل تفکیک نیست. شکل ۲ نمایی از رخنمون سنگی را نشان می‌دهد (جمع و همکاران، ۱۳۸۳).



شکل ۲: نمایی از رخنمون سنگی واحد آندزیت و آندزیت پورفیری (تصویر بالا سمت راست آندزیت مگاپورفیری را نشان می‌دهد)

در این واحد یک سری سیل‌ها و دایک‌های تراکی آندزیتی با روند تقریباً شمالی - جنوبی، رگچه‌هایی از کلسیت نیز مشاهده می‌شود، ولی هیچ‌گونه کانی‌سازی مس در آن رخنمون ندارد. قسمت آگلومرایی این واحد بیشتر از قطعات گرد شده و به مقدار کمتر نیز قطعات زاویه‌دار تشکیل شده است. ابعاد این قطعات از حدود چند سانتی‌متر و حداکثر ۴۰ سانتیمتر در نوسان است. قطعات زاویه‌دار معمولاً درشت و قطعات گرد شده کوچکترند.

### بازالت

سن این واحد پالئوسن - ائوسن می‌باشد که بیشتر به رنگ خاکستری دیده می‌شود. این واحد سنگی دارای بافت پورفیریتیک بوده که اغلب توسط سیلیس و بعضاً کلسیت پر شده‌اند. پرشدگی حفرات با سیلیس، باعث تشکیل آگات‌ها و نودل‌های سیلیسی شده است. این واحد سنگی حاوی الیون کاملاً اکسیده و به ندرت پیروکسن می‌باشد، و از کانی‌های ثانویه نیز سیلیس و کربنات قابل ذکر هستند.

### تراکی بازالت

این واحد سنگی دارای سن پالئوسن - ائوسن می‌باشد و بیشتر به رنگ خاکستری تیره دیده می‌شود که دارای بلورهای پلاژیوکلاز به صورت فنوکریست می‌باشد. پیروکسن و الیون نیز در سنگ دیده می‌شود، پلاژیوکلازها به نحو قابل ملاحظه‌ای دگرسان شده و به کانی‌های رسی و سریسیتی تجزیه شده‌اند. حفرات موجود در سنگ توسط سیلیس و کربنات پر شده است. حفرات زیاد موجود در سنگ که قطر آن‌ها بعضاً به ۱۰ سانتی‌متر می‌رسد، حاصل سرد شدن سریع آن می‌باشد. پر شدن ثانویه این حفرات با سیلیس باعث تشکیل آگات‌های کروی شکل شده که پس از فرسایش تراکی بازالت از آن جدا شده و در سطوح هوازده مشاهده می‌شود. حفرات تونل

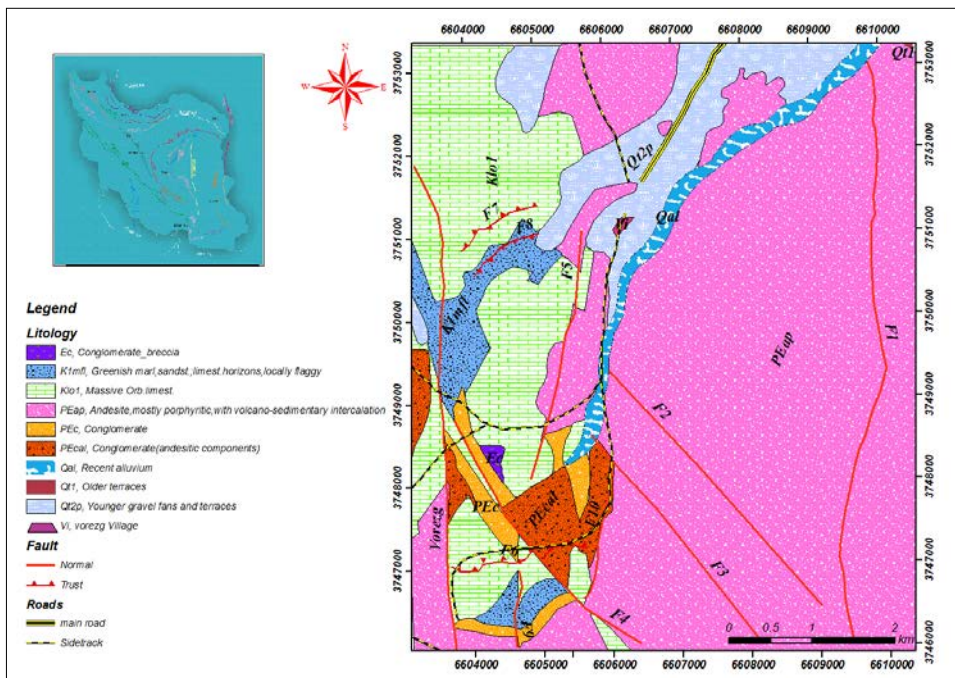
## دایک و سیل‌ها

به صورت جزئی به کانی‌های رسی و سرسیت تجزیه شده و پیروکسن‌ها نیز به صورت کامل توسط کلریت جانشین شده است. زمینه سنگ به صورت نامتجانس به کانی‌های اکسید آهن آغشته‌گی دارد. این دایک و سیل‌ها دارای روند تقریباً شمالی - جنوبی هستند که در محل کشش به سمت بالا حرکت کرده‌اند. دایک‌های آندزیتی در امتداد این شکستگی‌ها به داخل توده‌های ولکانیک قدیمی تر نفوذ کرده‌اند و در حاشیه گسل F1 و vorezg رخمون پیدا کرده‌اند. (شکل ۳) نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه (شکل ۴) (جمیع و همکاران، ۱۳۸۳).

دایک‌ها و سیل‌های مشاهده شده در منطقه از نظر پیدایش و جنس در یک گروه قرار می‌گیرند. هر دوی آنها دارای ترکیب حد واسط می‌باشند و تراکی آندزیت هستند که ضخامت آنها از چند ده سانتی متر تا ۱۰ متر نیز می‌رسد. این دایک‌ها و سیل‌ها با رنگ قرمز هماتیتهی دارای بافت پورفیریتیک با زمینه میکرولیتی و اغلب جریانی می‌باشند. بلورهای شکل دار پلاژیوکلاز با حواشی خرد شده در سنگ حضور دارند و رگچه‌های کانی اکسید آهن نیز به وفور مشاهده می‌شود. در اثر دگرسانی پلاژیوکلازها



شکل ۳. نمونه‌ای از دایک تراکی آندزیتی محدوده مورد مطالعه



شکل ۴. نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه (تصحیح شده از نقشه زمین شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ چهارگوش قاین (اشوکلین و همکاران، ۱۳۴۸)

## روش کار

جهت‌های خاص مورد نظر کاربر، واضح تر می‌کنند. برای بارزسازی خطواره‌ها در تصاویر ماهواره‌ای از دو دسته فیلتر جهت دار (Directional) و بدون جهت (Laplacian) استفاده می‌شود (Wester, 1992).

## پردازش تصاویر ETM+ و Aster

تعیین مناطق با شدت شکستگی بالا با استفاده از شاخص فاکتور خطوارگی و نسبت های بانندی ترکیبی ETM+ و Aster

### فیلترهای بدون جهت (Laplacian)

فیلترهای بدون جهت، خطواره‌ها را در تمام جهت‌ها، به جز آنهایی که در جهت حرکت فیلتر قرار دارند، آشکارسازی می‌کنند. در این روش، یک ماتریس که شامل آرایه‌هایی از ضرایب یا عوامل وزنی است، و به آن کرنل (Kernel) گفته می‌شود؛ ایجاد می‌گردد. تعداد سطر و ستون‌های موجود در این ماتریس فرد می‌باشد (۳\*۳ یا ۵\*۵) معمولاً برای تصاویر ناهموار، فیلترهایی با کرنل کوچک (۳\*۳)، و برای تصاویر هموار فیلترهایی با کرنل بزرگ (۹\*۹)، اعمال می‌شود. یک عدد صحیح مثبت، در مرکز این ماتریسها قرار می‌گیرند و عددهای ۱- و ۰ در

تهیه نقشه گسل‌ها، درزه‌ها و سایر عوارض خطی، بهترین راه برای تحلیل ساختاری خطوارگی‌ها می‌باشد. معمولاً خطوارگی‌های تصاویر ماهواره‌ای به راحتی قابل تشخیص نیستند، به همین دلیل باید آنها را با استفاده از پردازش تصاویر واضح ساخت. برای بارزسازی خطواره‌ها از فیلترهای خاصی، استفاده می‌شود. این فیلترها به لبه و حاشیه در برگیرنده تصاویر ماهواره‌ای اهمیت داده و عوارض خطی مثل شکستگی و گسلها را آشکار می‌کنند. (Lillesand and Keifer 2015) به عبارت دیگر باید گفت فیلترها در واقع ماتریسهایی هستند که تصاویر را در



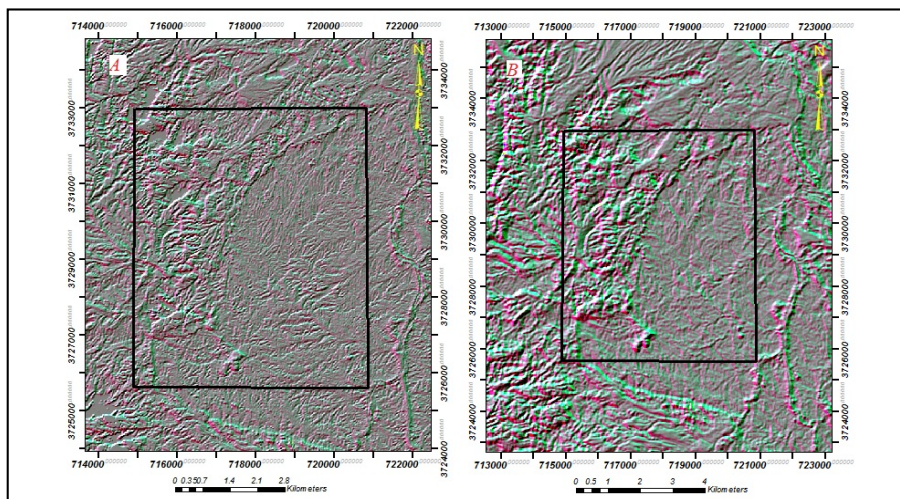
زایی در هر ناحیه‌ای گسلش و شکستگی‌های موجود می‌باشند که در واقع راهی برای نفوذ سیالات کانه دار هستند. با توجه به ترسیم گسل‌های موجود در منطقه (بر روی نقشه با مقیاس ۱/۲۵۰۰۰۰) و مشاهدات صحرائی، جهات بیشتر گسل‌های منطقه در زوایای ۳۶۰ درجه می‌باشد (شکل ۹). به منظور جدا سازی بهتر خطواره‌ها، از روش فیلترینگ تصویر ETM+ و ASTER منطقه توسط کرنل-های ماتریسی ۳×۳، در سه جهت عمده خطواره‌های منطقه (۴۵، ۹۰ و ۳۶۰ درجه) استفاده شد.

برای بارزسازی خطواره‌های منطقه از تصاویر سنجنده ETM+، در باند پانکروماتیک (باند ۸)، از سینهای ۱۵۹-۳۷ با توان تفکیک مکانی ۱۵ متر و تصاویر ASTER منطقه در باند ۱ استفاده شده است. و با استفاده از نقشه‌ی توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰۰ منطقه قاین تصحیح هندسی و سپس رادیومتریکی روی آنها صورت گرفت. فیلترهای نمایش داده شده در کرنل‌های بالا بر تصویر باند ۸ اعمال شدند، سپس سه تصویر به دست آمده در سه باند R، G و B با هم ترکیب و یک تصویر رنگی کاذب تهیه گردید. در نتیجه این عمل خطواره‌ها در هر یک از جهات با رنگ متمایز مشخص شده‌اند. (شکل ۵).

اطراف آن قرار می‌گیرند. این ماتریس در روی پنجره‌های (مربع‌های هم اندازه) از تصویر قرار می‌گیرد که حاوی  $n \times n$  پیکسل باشد. مقادیر آرایه‌های این ماتریس، در مقادیر پیکسل‌های متناظر ضرب می‌شوند. سپس عدد به دست آمده با عدد موجود در مرکز فیلتر جمع جبری می‌شود، و مقدار آن برای پیکسل مرکزی فیلتر منظور می‌شود. سپس فیلتر به اندازه‌ی یک پیکسل جابه‌جا شده و دوباره این محاسبات انجام می‌شود. در نتیجه این عمل مقادیر پیکسل‌های جدید، با مقادیر اولیه متفاوت می‌شوند و تقابل بین پیکسل‌های خطواره با پیکسل‌های زمینه بیشتر می‌شوند و بدین ترتیب خطواره‌ها واضح می‌شوند.

### فیلترهای جهت دار (Directional)

این فیلترها برای بارزسازی خطواره‌هایی که دارای روند خاصی هستند، استفاده می‌شوند و کاربرد آنها بیشتر در مسائل زمین شناسی است. عددهای موجود در کرنل، طوری انتخاب می‌شوند، که خطواره‌ها را در جهت خاصی واضحتر سازند. روش کار این فیلترها مانند فیلترهای بدون جهت است. این روش از شاخص فاکتور خطوارگی به وسیله عواملی از قبیل طول، تعداد و تقاطع خطواره‌ها در هر محدوده کنترل می‌شود. یکی از عوامل مهم مؤثر در کانه



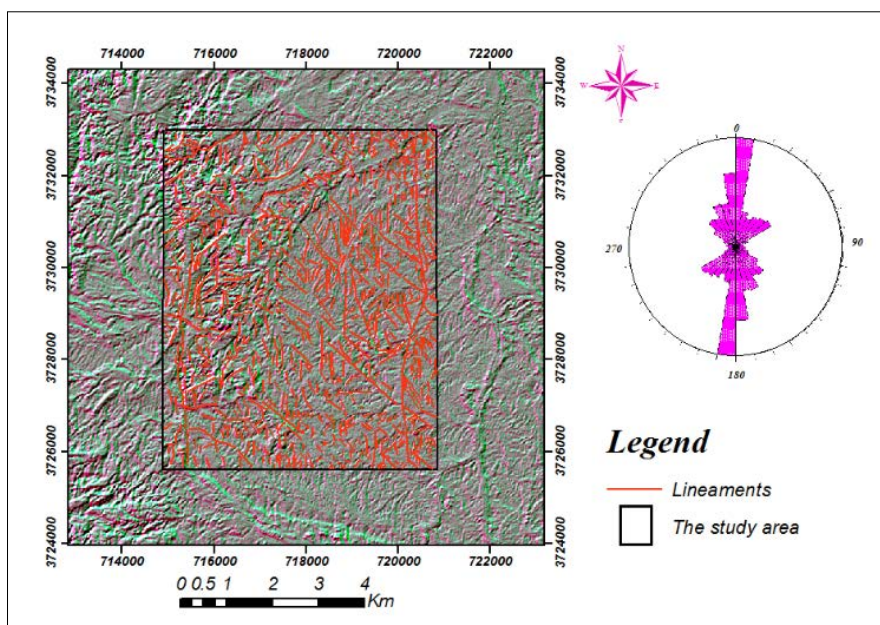
شکل ۵: بارزسازی خطواره‌های منطقه با روش فیلترینگ - تصویر RGB از سه تصویر فیلترینگ در جهت ۴۵، ۹۰، ۱۳۵ و ۳۶۰ درجه. کادر مشکی محدوده مطالعاتی را نشان می‌دهد. A تصویر ASTER و B تصویر ETM+





از اعمال فیلترهای ذکر شده تصویر تولید شده به محیط نرم افزار GIS انتقال داده شد. و خطواره‌های مختلف که در جهت‌های ذکر شده مشخص شده‌اند رسم شد و رز دیاگرام خطواره‌های رسم شده نیز رسم شده است (شکل ۶) و با انطباق این تصاویر با نقشه‌ی زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه و بازدیدهای میدانی گسل‌های اصلی منطقه مشخص شد (شکل ۲۰).

شکل ۵ خطوط در جهت شمال-جنوب را با رنگ صورتی، خطواره‌های موجود در جهت شمال شرق-جنوب غرب را با رنگ سفید، خطواره‌های موجود در جهت شرق-غرب با رنگ قرمز و خطوط در جهت شمال غرب-جنوب شرق را با رنگ سبز نشان داده است. پیمایش‌های میدانی، انطباق دو روند شمال-جنوب و شمال غرب-جنوب شرق را با گسل‌ها و شکستگی‌های منطقه به اثبات رساند. بعد



شکل ۶. شکستگی‌های رسم شده منطقه مورد مطالعه بر روی تصویر فیلتر شده رز دیاگرام آنها

شناسایی هستند وجود اکسید آهن و کانیهای هیدروکسیل است و البته از ارتباط مناطق دارای شکستگی نیز می‌توان برای اکتشاف کانسارها استفاده نمود. در کانسارهای مس پورفیری، کلاهک‌های آهنی (گوسان) بر روی زونهای پتاسیک و فیلیک تشکیل می‌شوند و بنابراین نشانه خوبی برای شناسایی نهشته‌های پورفیری هستند. مهم‌ترین کانی‌هایی که در دگرسانی‌های سطحی در ارتباط با کانه‌زایی قابلیت بارز شدگی توسط تصاویر پردازش شده را دارند کانی‌های رسی و اکسید آهن می‌باشند که حضور هر دوی این کانی‌ها با هم مد نظر قرار داده می‌شود. بدین منظور با توجه به طیف‌های انعکاسی این کانی‌ها، دو تقسیم‌بندی ۵/۷

## پردازش تصاویر Aster و ETM<sup>+</sup> برای شناسایی مناطق دگرسان شده

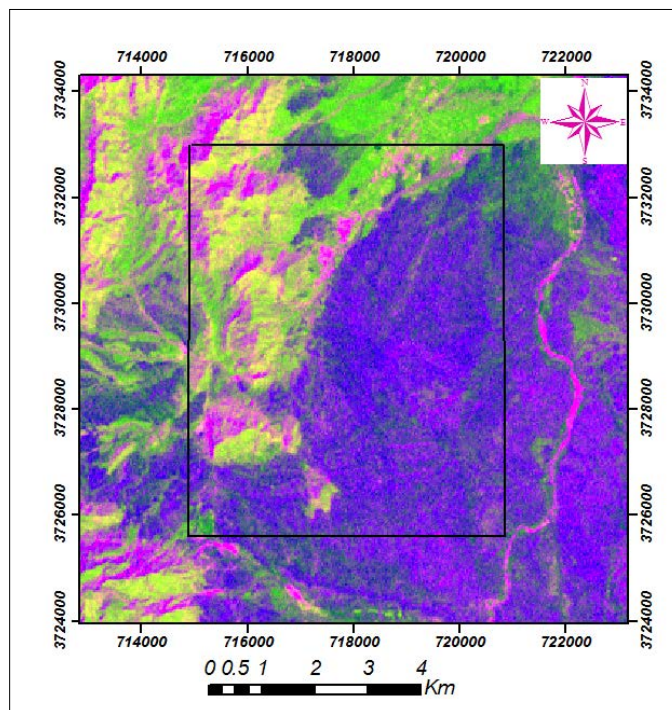
### ترکیب نسبت‌های بانندی برای یافتن مناطق دگرسانی

به کارگیری روش تقسیم‌بندی برای بارزسازی عوارض خاص در داده‌های چندطیفی مناسب است. از روش یادشده برای کاهش اثرات روشنایی خورشید، توپوگرافی و بارزسازی اطلاعات طیفی در تصاویر استفاده می‌شود. (Gupta, 2003). برای شناسایی مناطق دگرسان شده گرمابی دو نشانه خوب که در تصاویر ماهواره‌های قابل



و از تلفیق تصاویر به دست آمده از این تقسیم باندی‌ها در تصویری جداگانه به وسیله عمل جمع پیکسل‌ها تصویر دگرسانی سطحی منطقه حاصل شد. (شکل ۷).

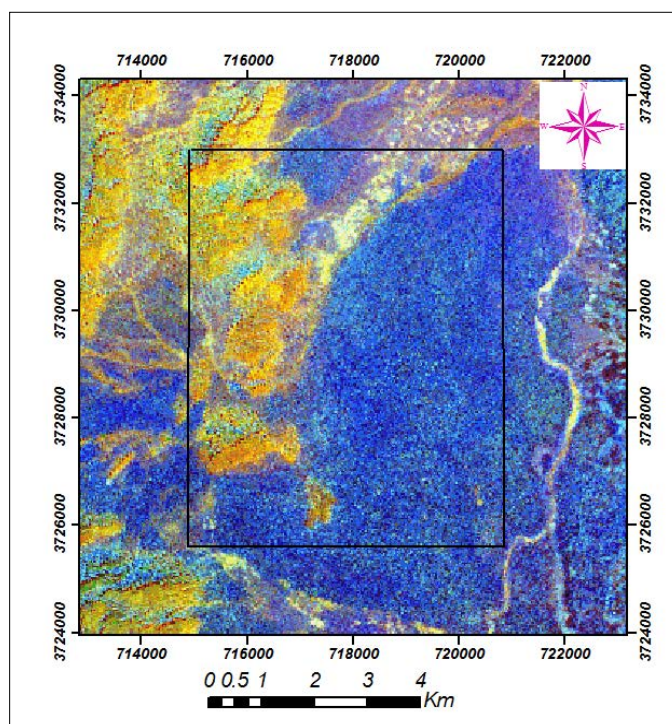
و ۳/۱ به ترتیب برای کانی‌های رسی و اکسید آهن بر روی تصویر ETM<sup>+</sup> منطقه انجام شد (Tommaso & Rubinstein, 2007). و به ترتیب در باند R و باند G قرار گرفت. و مجموع این دو نسبت باندی در باند B قرار داده شد



شکل ۷: تصویر حاصل از ترکیب نسبت‌های باندی ۳/۱، ۵/۷، و مجموع این دو نسبت در تصاویر ETM<sup>+</sup> جهت نمایش مناطق حاوی سنگ‌های بازیگ (به رنگ آبی)، مناطق دارای اکسید آهن (به رنگ قرمز صورتی) و کانی‌های هیدروکسیل‌دار (به رنگ سبزپسته ای)

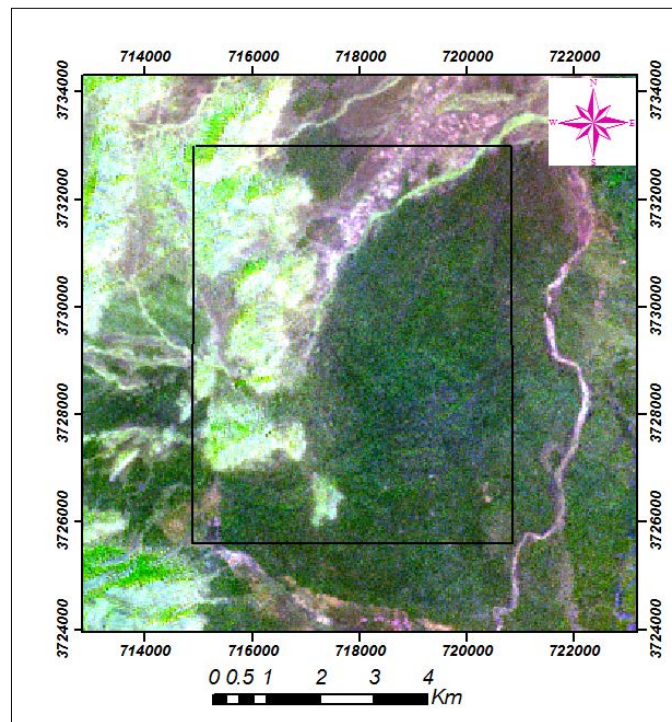
دارای رس به رنگ روشن (اغلب سفید) دیده می‌شوند (شکل ۸).

برای تصاویر استر با توجه به حضور کانیهای رسی مونتموریلونیت، کائولینیت و ایلیت و کانی سیرسیت در دگرسانیهای گرمابی از شاخص‌های طیفی موجود در منحنی طیفی این کانیها برای انتخاب نسبت باندی مناسب می‌توان استفاده نمود. برای بارزسازی کانی سیرسیت دگرسانی چیره منطقه و کانیهای رسی می‌توان از نسبتهای باندی ۴/۹ در قرمز، ۴/۶ در سبز و ۷/۶ در آبی از سنجنده استر استفاده شده است (Tommaso & Rubinstein, 2007) که در غرب تصویر مناطق دگرسان شده که توسط گسل ورزق از توده نفوذی (رنگ آبی) جدا شده است و به رنگ آجری و مناطق



شکل ۸. نسبت‌های بانندی ۴/۹ در قرمز، ۴/۶ در سبز و ۷/۶ در آبی از سنجنده استر مناطق دگرسان شده (رنگ آجری) که توسط گسل‌های اصلی از توده نفوذی (رنگ آبی) جدا شده است.

ترکیب رنگی نسبت‌های بانندی می‌تواند اطلاعات بیشتری را در ارتباط با دگرسانی‌های مختلف در اختیار قرار دهد. در شکل ۹ کانی‌های سریسیت و رسی، کلریت، اپیدوت، کلسیت و سرپانتینیت موجود در منطقه با استفاده از یک تصویر ترکیب رنگی نسبت‌های بانندی به صورت ۴/۵ در آبی، ۴/۸ در سبز و ۴/۹ در سرخ از باندهای سنجنده استر نشان داده شده است (Tommaso & Rubinstein, 2007). در این تصویر مناطق حاوی کانیهای سریسیت و رسی با پیکسل‌های روشن و در اطراف آنها کانی‌های زون پروپلیتیک با رنگ سبز دیده می‌شوند (زون دگرسانی فلیک و پروپلیتیک). در تصویر رنگی به دست آمده مناطق دارای رگه‌های کربناتی در باختر منطقه نیز بارز شده‌اند. در مجموعه افیولیتی دگرسانی‌هایی مانند ساسوریتی شدن، سرپانتینیتی شدن و وجود کلریت که طیف‌های مشابهی در محدوده باندهای استر دارند، با رنگ سبز پسته‌ای مشخص شده‌اند.



شکل ۹. تصویر ترکیب رنگی نسبتی به صورت ۴/۵ در آبی، ۴/۸ در سبز و ۴/۹ در سرخ از باندهای سنجنده استر. مناطق دگرسان شده با پیکسل‌های روشن در شرق تصویر، و در اطراف آن‌ها کانی‌های زون پروپلیتیک با رنگ سبز دیده می‌شوند. در مجموعه افیولیتی دگرسانی‌هایی مانند ساسوراتی شدن، سرپانتینی شدن و وجود کلریت که طیف‌های مشابهی در محدوده باندهای استر دارند، با رنگ سبز پسته‌ای مشخص شده‌اند. کادرسبایه رنگ محدوده مورد مطالعه می‌باشد.

## تفسیر داده‌های مغناطیسی

### داده‌های مورد استفاده

برداشت‌های ژئوفیزیک هوایی به سه روش مغناطیس‌سنجی، الکترومغناطیس و رادیومتری (اورانیوم، پتاسیم و توریم) در بخش‌هایی از شرق کشور و همچنین بخشی از برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ شهرستان قاینات صورت گرفته است.

این برداشت‌ها توسط هواپیما و با ارتفاع پرواز ۱۲۰ متر از سطح زمین و فاصله خطوط پرواز ۷۵۰۰ متر و با آزیموت  $45^{\circ}$  در منطقه و به قصد عملیات اکتشافی انجام شده است. مغناطیس‌سنج مورد استفاده در این برداشت از نوع بخار سزیم بوده که در هنگام برداشت در ارتفاع ۹۰ متری از

سطح زمین قرار داشته است. از داده‌های مغناطیس هوایی برای تفکیک بهتر همبری‌های واحدهای زمین‌شناسی و نیز بررسی تغییرات ژئوشیمیایی رخ داده در آنها استفاده می‌شود. در این روش پرتو گامای ساطع شده از عناصر اورانیم، پتاسیم و توریم به وسیله طیف سنج گاما ثبت می‌شود و از آنجا که هر واحد زمین‌شناسی ویژگی‌های پرتوزایی خاص خود را دارد، بر این اساس واحدهای زمین‌شناسی و مناطق دارای دگرسانی قابل تشخیص می‌شوند (Armstrong & Rodegheiro, 2006; Keary, 2002). داده‌های مغناطیس‌هوایی پردازش شده دارای اطلاعات با ارزشی جهت تفسیر عوارض زیر سطحی هستند (Neawsuparp et al., 2005).

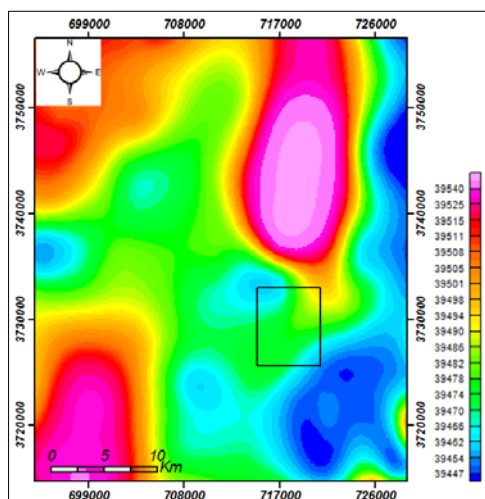
یکی از مراحل پردازش داده‌های مغناطیس‌هوایی، محاسبه اثر مغناطیسی میدان مرجع وابسته به میدان جاذبه





### فیلتر برگردان به قطب

اولین فیلتر اعمال شده، فیلتر برگردان به قطب می‌باشد. با استفاده از این فیلتر، میدان مغناطیسی از یک عرض مغناطیسی که در آن بردار میدان زمین مایل و شیب‌دار است به قطب مغناطیسی یعنی جایی که میدان القایی قائم می‌باشد، منتقل می‌گردد زیرا اگر میدان زمین مایل باشد، شکل ناهنجاری‌های مغناطیسی<sup>۳</sup> که به صورت القایی به وجود آمده‌اند؛ نسبت به منابع به وجود آورنده نامتقارن خواهد بود ولی در صورتی که میدان القایی قائم باشد، ناهنجاری‌های به وجود آمده در اثر القاء مغناطیسی بر روی منبع خودشان قرار می‌گیرند. لذا تفسیر اساسی داده‌های مغناطیس هوایی معمولاً بر روی تصاویر مختلف برگردان به قطب صورت می‌گیرد (شکل ۱۱).

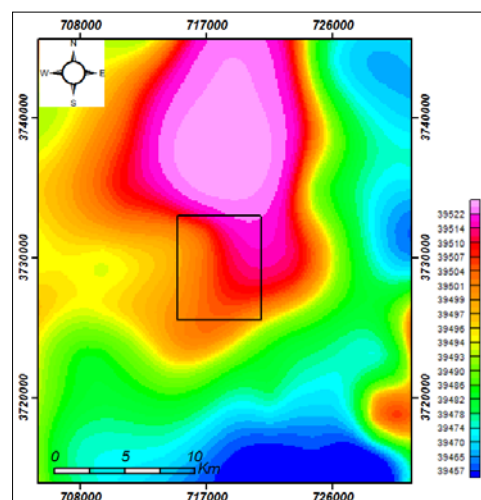


شکل ۱۱: نقشه برگردان به قطب تولید شده از شدت کل میدان مغناطیسی

اعمال این فیلتر با استفاده از زاویه میل<sup>۴</sup> و انحراف مغناطیسی صورت می‌گیرد. مقدار این زوایا در منطقه مورد

زمین (IGRF) و حذف آن از داده‌های مغناطیسی مشاهده شده (شدت کل میدان مغناطیسی) می‌باشد (Silva, 2003). با اعمال فیلترهای متفاوت بر روی اطلاعات، بررسی از جهات مختلف انجام گرفته و با در نظر گرفتن اطلاعات زمین‌شناسی، منطقه مورد تعبیر و تفسیر قرار گرفته است (شکل ۱۰).

جهت شناسایی خطواره‌های مغناطیسی منطقه مورد مطالعه، از داده‌های شدت کل میدان مغناطیسی پس از اعمال فیلترهای مختلف در مرحله پردازش استفاده شده است.

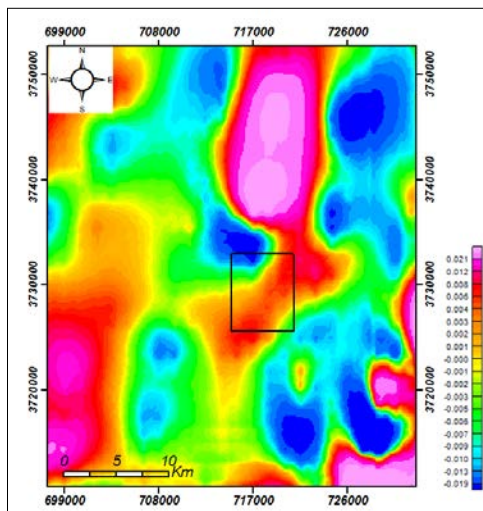


شکل ۱۰: نقشه شدت کل میدان مغناطیسی، مناطق قرمز بیانگر شدت بیشتر میدان مغناطیسی و مناطق آبی نشان دهنده شدت کم میدان است. کادر مشکی محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

<sup>۴</sup> Magnetic anomalies  
<sup>۵</sup> Declination

<sup>۱</sup> International Geomagnetic References Field  
<sup>۲</sup> Reduction To Pole  
<sup>۳</sup> Magnetic anomalies





شکل ۱۲: فیلتر بالاگذر مشتق اول قائم اعمال شده بر روی RTP که ناهنجاری‌های بزرگ از بین رفته و ناهنجاری‌های کوچک و محلی به خوبی نمایان می‌گردند. (کادر سیاه محدوده مورد مطالعه می‌باشد)

### فیلتر مشتق افقی

فیلتر مشتق افقی: این فیلتر باعث می‌شود که جابه‌جایی‌هایی که در محل توده و تجمعات مغناطیسی که ناشی از عملکرد گسل و یا توده‌های آتشفشانی صورت می‌گیرند نمایان شود. این امر باعث می‌شود که سرچشمه مغناطیسی با محیط اطراف آن کنترل شود. برای مثال رابطه خروج توده‌های ولکانیکی با گسل می‌تواند توسط این فیلتر مشخص شود (شکل ۱۳).

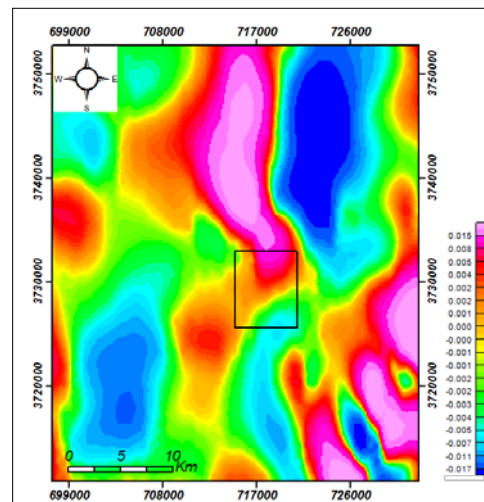
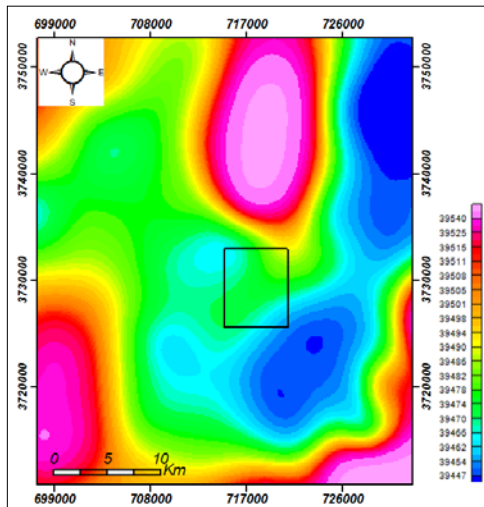
مطالعه به ترتیب ۵۰ و ۲/۶ درجه و مقدار میانگین IGRF برابر ۳۹۶۱۵/۵۸ نانوتسلا بوده است. در واقع با تطبیق واحدهای زمین شناسی و نقشه برگردان به قطب و میزان خودپذیری مغناطیسی واحدهای زمین شناسی (Clark, 1997) می‌توان ملاحظه نمود که بیشترین شدت بی‌هنجاری‌های مغناطیسی مربوط به واحدهای آندزیتی و واحدهای بازالتی، و تراکی بازالتی و دایکهای دیابازی است.

### فیلتر مشتق قائم اول

پس از اعمال فیلتر برگردان به قطب، فیلتر بالاگذر مشتق اول قائم بر داده‌ها اعمال شده است. جهت حذف اثرات ناحیه‌ای با طول موج بلند و تداخل بین ناهنجاری‌های مجاور از فیلتر مشتق قائم استفاده می‌شود. مشتق قائم در واقع یک فیلتر بالاگذر می‌باشد زیرا فرکانس‌های بالا را نسبت به فرکانس‌های پایین افزایش می‌دهد. در نتیجه اثر ناهنجاری‌های بزرگ (ناهنجاری‌های بزرگ مغناطیسی، دارای طول موج بلند و فرکانس پایین هستند)، که مربوط به منابع عمیق و منطقه‌ای می‌باشند؛ بر روی ناهنجاری‌های بزرگ از بین رفته و ناهنجاری‌های کوچک و محلی به خوبی نمایان می‌گردند (Silva, 2003 & Neawsuparp et al., 2005) (شکل ۱۲).



است، بنابراین باید انتظار بی هنجاری شدت بالا داشته باشیم که این نتیجه صحت پردازش را نیز می‌رساند.

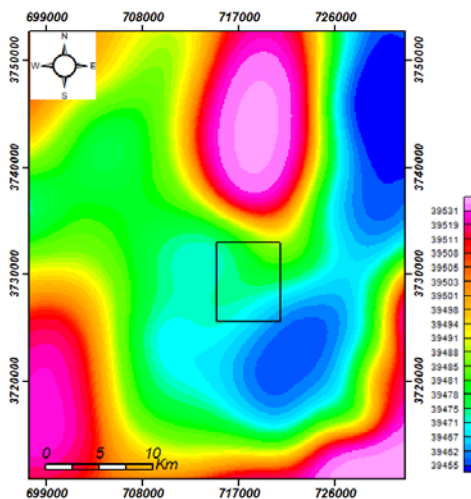


شکل ۱۳: فیلتر مشتق افقی نمایانگر اثرات گسل‌ها و توده‌های ولکانیکی بر تجمعات مغناطیسی منطقه

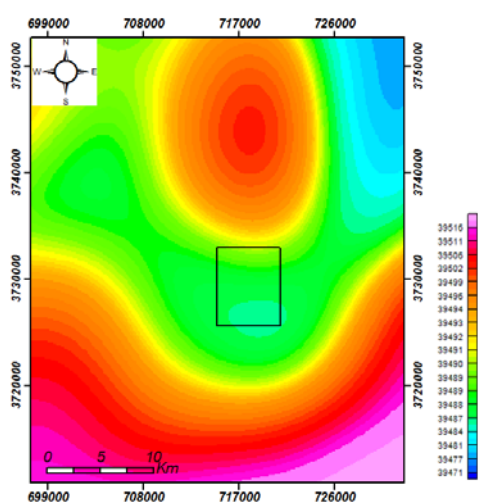
شکل ۱۴: فیلتر ادامه فراسوی ۱۰۰۰ متری

### فیلتر ادامه فراسو

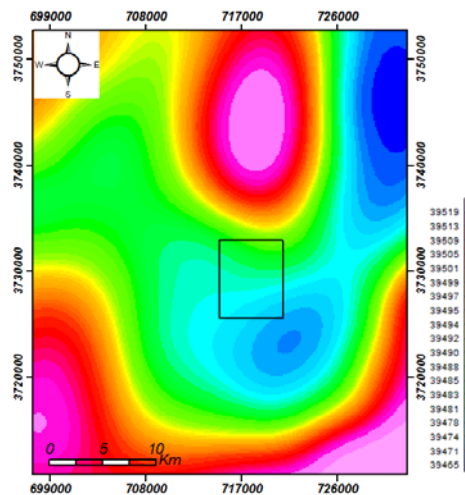
فیلتر ادامه فراسو بر روی نقشه مغناطیسی برگردان به قطب، به منظور حذف بی هنجاریهای سطحی و بارز شدن بی هنجاری های ژرف تر که تحت اثر نوفه های سطحی در داده نباشند به ارتفاع ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۴۰۰۰، ۶۰۰۰، ۸۰۰۰ متر اعمال شده است و همانطور که در شکل نشان داده شده در عمق ۸۰۰۰ متری اثر توده کامل از بین رفته است. نقشه‌های حاصل از ادامه فراسو در تصاویر ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰ و ۲۱ نشان داده شده است. با اعمال فیلتر ادامه فراسو به مقدار  $Z/2$  بی هنجاری‌های سطحی تا ژرفای  $Z/2$  رقیق شدگی پیدا می‌کند. بنابراین می‌توان بر آورد ژرفا از نقشه بی هنجاری‌های ادامه فراسو را به دست آورد. همانطور که در شکل مشخص است با افزایش ارتفاع، بی هنجاری‌های سطحی کاهش یافته است و بی هنجاری‌های ژرفی بیشتر بروز می‌نماید. با افزایش ارتفاع فیلتر فراسو میزان بروز بی هنجاری بیشتری شود. با تطبیق این بی هنجاری و واحد زمین شناسی موجود مشاهده می‌شود که این بی هنجاری بر روی سنگهای بازالتی، آندزیتی و تراکی بازالتی قرار دارد. به طور کلی این بی هنجاری مرتبط با واحدهای آندزیتی می‌باشد و از آنجا که منشأ آندزیت ها ماگمای بازالتی



شکل ۱۵: فیلتر ادامه فراسوی ۲۰۰۰ متری



شکل ۱۸: فیلتر ادامه فراسوی ۴۰۰متری



شکل ۱۶: فیلتر ادامه فراسوی ۸۰۰متری

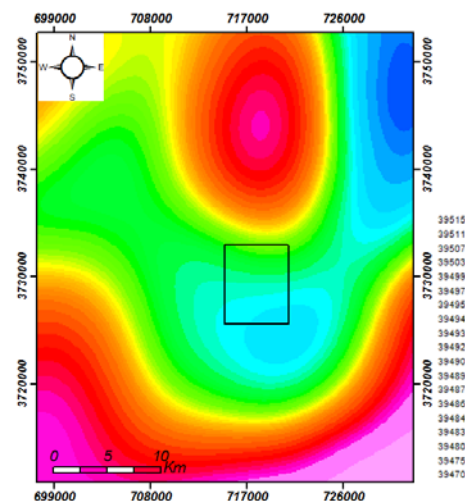
### ۳-۳: استخراج خطواره‌های مغناطیسی

در یک حالت عادی، عارضه‌های زیر منعکس کننده یک منطقه دگرشکلی در نقشه‌های مغناطیس هوایی هستند (Korhonen et al., 2004).

الف) نواحی خطی و باریک دارای مغناطیس پایین (رنگ آبی) که یکی از معمول‌ترین حالات در نقشه‌های مغناطیس‌هوایی است و معرف مناطق دارای دگرشکلی شکننده است. به عبارتی یک پهنه مغناطیسی باریک خطی با شدت پایین که به دلیل هوازدگی در طول سطح گسلش به وجود آمده و کانی‌های مغناطیسی در اثر اکسیداسیون به کانی غیر مغناطیس تبدیل گشته‌اند. دو طرف این پهنه باریک و خطی می‌تواند ویژگی مغناطیسی مشابهی داشته باشد.

ب) نواحی خطی و باریک دارای مغناطیس بالا (رنگ بنفش) که ممکن است در اثر وجود یک عامل خارجی قطع شده باشد؛ می‌تواند مربوط به کانی‌های مغناطیسی رسوب کرده در سطح گسل باشد.

پ) قطع ناگهانی در عمق منابع مغناطیسی



شکل ۱۷: فیلتر ادامه فراسوی ۶۰۰متری



ت) ناپیوستگی و جابه‌جایی در ناهنجاری‌های مغناطیسی به صورت آشفتگی که از نشان‌گرهای بسیار شاخص یک پهنه دگرشکلی می‌باشند.

ج) جابه‌جایی واضح و تند در ناهنجاری‌های مغناطیسی که نشان‌دهنده پهنه‌های برشی شکننده یا همان گسل‌ها می‌باشند.

چ) پله‌های مغناطیسی که بیان‌گر همبندی‌های دارای خردشدگی بالای واحدهای سنگی مختلف می‌باشند.

در این گونه مطالعات، وجود تغییرات یکنواخت و کم و بیش آرام در ژرفای پی‌سنگ مغناطیسی در منطقه، می‌تواند به نوعی گویای اثر ضعیف گسل‌ها در ایجاد مؤلفه جابه‌جایی قائم و یا حتی نتیجه تغییر در خواص مغناطیسی مواد ژرفایی باشد. علاوه بر این ذکر این نکته ضروری است که عموماً خصوصیات مغناطیسی مناطق دگرشکلی طی مراحل مختلف دگرگونی ممکن است دچار تغییر شوند.

در ارتباط با شناسایی شکستگی‌ها به کمک داده‌های مغناطیس‌هوایی، سه حالت کلی را می‌توان در نظر گرفت:

۱. خطواره‌های مغناطیسی استخراج شده با گسل‌های تشخیص داده شده بر روی سطح هم‌خوانی دارد (شکل‌های ۲۲ و ۲۳).

۲. برای خطواره‌های مغناطیسی شناخته شده، گسلی بر روی سطح شناسایی نشده است. در این مورد دو حالت را می‌توان در نظر گرفت؛ در حالت اول ممکن است در نظر گرفتن این خطواره‌ها به دلیل تفسیر نادرست ناهنجاری‌ها بوده باشد و در حالت دوم ممکن است خطواره مغناطیسی واقعاً وجود داشته ولی جابه‌جایی سطحی ایجاد شده با

خطواره مغناطیسی فوق دقیقاً منطبق نبوده و یا به دلیل پوشیده بودن محدوده از آبرفت و یا ماهیت سنگ‌شناسی منطقه، اصولاً برداشت نگردیده باشد.

۳. گسل‌های شناخته شده بر روی زمین که هیچ‌گونه خطواره مغناطیسی هم‌خوانی بر روی داده‌های مغناطیس هوایی برای آن‌ها در نظر گرفته نشده است. برای این مورد هم دو حالت می‌توان در نظر گرفت؛ ممکن است ناهنجاری‌های موجود بر روی نقشه گویای وجود خطواره‌ای باشند ولی در تفسیر به عمل آمده توجه کافی به آن نگردیده باشد و یا تشخیص آن دشوار بوده است. در این حالت با ترسیم گسل یا شکستگی از روی نقشه زمین‌شناسی دارای زمین مرجع<sup>۸</sup> و یا تصاویر ماهواره‌ای می‌توان این خلأ را جبران نمود. هم‌چنین امکان دارد گسل‌های شناخته شده تأثیر مهمی بر روی پی‌سنگ نداشته باشند، مثلاً در اعماق، شیبی نزدیک به افق و حالت قاشقی<sup>۹</sup> پیدا کنند که با توجه به فاصله خطوط پیمایش از همدیگر، اثر این گونه گسل‌ها ممکن است به خوبی مشخص نگردد.

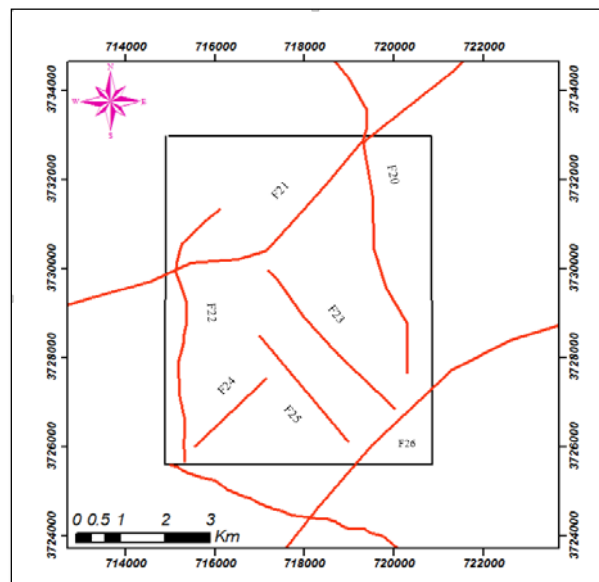
بر اساس اصولی که ذکر شد، اقدام به شناسایی و تفکیک خطواره‌های مغناطیسی در منطقه و ترسیم آن‌ها در محیط GIS گردیده است. در مورد بسیاری از خطواره‌های مغناطیسی شناسایی شده در ناحیه معدنی ورزگ، حالت اول و نیز به دلیل وجود پوشش آبرفتی در بخش‌هایی از منطقه و عملکرد فرآیندهای فرسایشی در واحدهای آتشفشانی، حالت دوم صادق است.

با توجه به همپوشانی مطلوبی که بین خطواره‌های مغناطیسی و سطحی وجود دارد، در برخی مناطق مشاهده می‌شود که وجود خطواره‌های مغناطیسی زیر سطحی با روند شمال-جنوب، دارای انطباق سطحی متناسبی نمی‌باشد

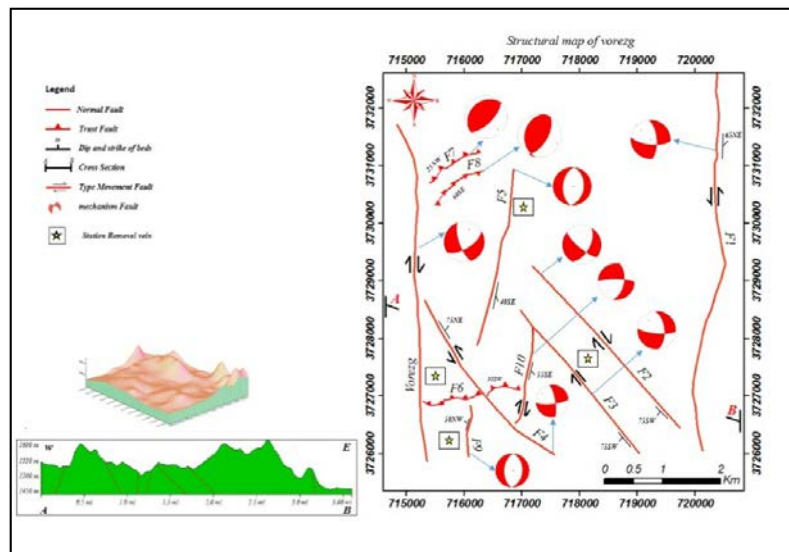


در شکل ۲۲، خطواره‌های مغناطیسی شناسایی شده در ناحیه ورزگ که با استفاده از نقشه شدت کل میدان مغناطیسی پس از اعمال فیلتر برگردان به قطب (RTP) و مشتق اول قائم وافقی به دست آمده، نشان داده شده است و منطبق بر نقشه ساختاری رسم شده در شکل ۲۳ برای گسل‌های محدوده مورد مطالعه می‌باشد.

که این امر با فرض گسلی بودن خطواره‌ها، یا به واسطه عدم رسیدن به سطح گسل‌های زیر سطحی است، یا گسلی نبودن خطواره‌های ایجاد شده است. (لازم به ذکر است که هر خطواره مغناطیسی، لزوماً گسل محسوب نمی‌شود و گاه اختلاف در لیتولوژی‌ها یا مرزهای رسوبی نیز در تحلیل‌های هومغناطیس به صورت خطواره نمود می‌یابند).



شکل ۱۹: خطواره‌های استخراج شده از نقشه‌های مغناطیسی منطقه مورد مطالعه



شکل ۲۰: نقشه ساختاری منطقه مورد مطالعه (روستای ورزگ-شرق قاین)





## نتیجه‌گیری

میدانی، عمده شکستگی‌ها منطبق بر روندهای NW-SE و NE-SW می‌باشد. گسل‌های با روند N-S که تحت تاثیر سیستم گسلی رودشور در منطقه به وجود آمده‌اند، با ایجاد یک منطقه فشاری-کششی باعث نهشته شدن عنصر مس در توده‌ی پورفیری شده‌اند. جایگیری عنصر مس در ارتباط با شکستگی‌هایی که توسط گسل‌ها در منطقه ایجاد شده‌اند باعث ایجاد متاسوماتیسم در توده پورفیری و نهشته شدن ثانویه عنصر مس در این توده شده‌اند.

تفسیر داده‌های مغناطیس‌هوائی و با اعمال فیلترهای مشتق قائم اول، مشتق افقی و ادامه فراسو اثرات توده نفوذی بر مغناطیس منطقه، و با استخراج خطوط‌های مغناطیسی در محدوده مطالعاتی با استفاده از این فیلترها، دلالت بر جهت‌گیری‌های عمده NW-SE و نیز N-S دارد. علاوه بر این، خطوط‌هایی با جهت‌گیری متوسط NE-SW در نقشه مذکور دیده می‌شوند که از فراوانی کمتری برخوردار بوده و منطبق بر گسل‌های با مؤلفه معکوس منطقه می‌باشند. با توجه تصاویر تولید شده از داده‌های مغناطیسی هوائی منطقه مورد مطالعه و استخراج خطوط‌های آنها یک تطابق نسبتاً خوب بین این خطوط‌ها و خطوط‌های مشاهده شده سر زمین و خطوط‌های استخراج شده از تصاویر ETM<sup>+</sup> و ASTER را می‌توان مشاهده کرد. عمق خطوط‌های استخراج شده از تصاویر مغناطیسی حداکثر تا ۸۰۰۰ متر می‌رسد و با توجه به تصاویر مغناطیسی و حذف خاصیت مغناطیسی توده در همین عمق می‌توان نتیجه گرفت که توده تحت تاثیر این گسل‌ها غنی از کانی مس (آزوریت) گشته است. حرکت گسل‌های موجود در منطقه در دو طرف شرق و غرب محدوده یک منطقه کششی بین این گسل‌ها (F<sub>1</sub> و Vorezg) به وجود آمده است (شکل ۲۳). از پردازش تصاویر ماهواره‌ای و اعمال فیلترهای جهت‌دار و بدون جهت به تصاویر ماهواره‌ای ETM<sup>+</sup> و ASTER و تلفیق آن با برداشت‌های صحرایی نیز، وجود گسل‌ها با راستاهای NW-SE و NE-SW و N-S به اثبات رسید و همان‌طور که عنوان شد، با برداشت‌های صحرایی، اکثر گسل‌های منطقه دارای سازوکار راستالغز راستگرد با مؤلفه نرمال و تعدادی از گسل‌ها دارای سازوکار معکوس است. علاوه بر این با تحلیل داده‌های سنجش از دور از طریق روش‌های خاص (شاخص خطوارگی) نیز، خطوط‌ها در منطقه به ترتیب دارای فراوانی در راستاهای NW-SE، NE-SW و N-S دیده می‌شوند که با استناد به پیمایش‌های



Lillesand, T. M., Schmaltz, J. E., Leale, J. E., and Nordheim, M. J., 2004. Mapping lake water clarity with Landsat images in Wisconsin, USA. *Canadian journal of remote sensing*, 30(1), 1-7.

Sabins, F. F., 1999. Remote sensing for mineral exploration *Ore geology reviews* 14(3-4), 157-183.

Lowell, J. D and Guilbert, J. M., 1970. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic geology* 65(4), 373-408.

Fujisada, H., 1995. Design and performance of ASTER instrument. In *Advanced and next-generation satellites*. International Society for Optics and Photonics 2583, 16-25.

Kruse, J. J., Strootman, E. G and Wondergem, J., 2003. Effects of amifostine on radiation-induced cardiac damage. *Acta oncologica*, 42(1), 4-9.

Armstrong, M, Rodegheiro, A., 2006. Airborne Geophysical Techniques. Coal Operators Conference. University of Wollongong and the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 113-131.

Korhonen, P. J and Luptacik, M., 2004. Eco-efficiency analysis of power plants: An extension of data envelopment analysis. *European journal of operational research* 154(2), 437-446.

Tommaso, I and Rubinstein, N., 2007. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infirnillo porphyry deposit Argentina *Ore. Geology Reviews* V 32, 275-290.

Abrams, et al., 2002. Mapping Hydrothermally Altered Rocks at Cuprite, Nevada, Using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), a New Satellite-Imaging System. *Economic Geology* (2003) 98 (5), 1019-1027.

Ninomiya, Yoshiki, Bihong Fu and Thomas J. Cudahy., 2005. "Detecting lithology with Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) multispectral thermal infrared "radiance-at-sensor" data. *Remote Sensing of Environment* 99.1-2, 127-139.

## منابع

اشتوکلین، ی.، افتخارنژاد، ج. نبوی، م. ح.، ۱۳۴۸، نقشه زمین شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ چهارگوش قاین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

کاویانی صدر، خ. (۱۳۹۱). اثر کنترل کننده های ساختاری در نهشت مواد معدنی منطقه چشمه خوری. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه بیرجند.

کاویانی صدر، خشایار. خطیب، محمدمهدی. زرین کوب، محمدمحسین. (۱۳۹۴)، اثر کنترل کننده های ساختاری در نهشت مواد معدنی منطقه چشمه خوری (شمال باختر بیرجند). فصلنامه زمین ساخت، سال بیست و چهارم، شماره ۹۵. صفحه ۳۲۳ تا ۳۳۲.

گزارش ارزیابی داده های ژئوشیمیایی در ورقه های قاین، گرمناج، آیز، سرچاه، آهنگران، شاهرخت، یزدان و کلاته، سازمان زمین شناسی (۱۳۸۰)

جمع، علیرضا. وهمکاران، گزارش بازدید و بررسی اجمالی پتانسیل های معدنی شهرستان قاین، سازمان زمین شناسی (۱۳۸۳)

جمع، علیرضا. وهمکاران، مجموعه گزارش های پتانسیل یابی و اکتشاف مقدماتی (آهن، طلا، مس و سنگهای تزئین) در شهرستان قاین - مهندسین مشاور زرناب اکتشاف (۱۳۸۵)

حسینی پاک، ع.، ۱۳۸۱. اصول اکتشافات ژئوشیمیایی، دانشگاه تهران.

Newsuparp, k. Charusiri, P. and Mayers, J., 2005. New processing of airborne magnetic and electromagnetic data and interpretation for subsurface structures in the Loei area, Northeastern Thailand. *Science Asia*, volume 31, 283-298.

Silva, A.M, Pires, A.C and McCaffery, A., 2003. Application of airborne geophysical data to mineral exploration in the uneven exposed terrains of the Rio Das Velhas greenstone belt. *Revista Brasileira de Geocincias*, volume 33, 17-28.

Gupta, Sumit, et al., 2003. "SPARK: A high-level synthesis framework for applying parallelizing compiler transformations. 16th International Conference on VLSI Design. Proceedings IEEE, 461-466.

Yuhas, R. H, Goetz, A. F. H and Boardman, J. W., 1992. Discrimination Among Semi-Arid Landscape Endmembers Using the Spectral Angle Mapper (SAM) Algorithm. Summaries of the 4th JPL Airborne. Earth Science Workshop, JPL Publication 92-41, 147.

Kruse, F. A., Kierein-Young, K. S and Boardman, J. W., 1990. Mineral mapping at Cuprite, Nevada with a 63 channel imaging spectrometer. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 56(1), 83-92.

Lillesand, Thomas, Ralph W. Kiefer, and Jonathan Chipman. Remote sensing and image interpretation. John Wiley and Sons, 2015.



فصلنامه زمین ساخت

پاییز ۱۳۹۹، سال چهارم، شماره ۱۵

doi: 10.22077/jt.2021.3796.1094

## تحلیل شکستگی ها در محدوده‌ی مجموعه معدنی سنگ ساختمانی لاشتر، جنوب اصفهان، با تأکید بر روش دورسنجی

پریسا تن زده<sup>۱</sup>، علی فرضی پور صائین<sup>۲\*</sup>، همایون صفایی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناس ارشد، گروه علوم زمین، دانشگاه اصفهان

۲- دانشیار، گروه علوم زمین، دانشگاه اصفهان

۳- دانشیار، گروه علوم زمین، دانشگاه اصفهان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۲۳

### چکیده

تهیه نقشه شدت شکستگی‌ها در معادن سنگ ساختمانی جهت مکان‌یابی موقعیت صحیح جبهه کار، کاهش میزان خردشدگی سنگ و بازدهی اقتصادی حائز اهمیت است. در این پژوهش، به بررسی شکستگی‌ها در محدوده مجموعه معدنی سنگ ساختمانی لاشتر در ۲۰ کیلومتری جنوب شهر اصفهان پرداخته است. از این رو، ابتدا شکستگی‌ها در بررسی‌های دورسنجی و برداشت‌های صحرایی شناسایی شدند که امتداد غالب شکستگی‌ها شمالی-جنوبی، شرقی-غربی و سایر شکستگی‌ها بیشتر در امتداد شمال غربی-جنوب شرقی است. در محیط Arc GIS با شبکه بندی بر شکستگی‌های شناسایی شده و با روش اسکن لاین دایره‌ای تکمیل شده برای هر شبکه میزان شدت محاسبه و از درون یابی نقاط هم‌تراز شدت شکستگی‌ها، نقشه شدت شکستگی‌ها تهیه شده است. با پیاده کردن موقعیت جبهه کارها در نقشه شدت شکستگی‌های بدست آمده بیانگر قرارگیری جبهه کارهای غیرفعال در شدت شکستگی‌های بالا است. لذا انجام چنین مطالعاتی در مراحل اولیه اکتشاف و استخراج سنگهای ساختمانی بسیار مهم و حیاتی است. همچنین با توجه به گسل کلاه قاضی با امتداد ۱۳۵ درجه و عملکرد معکوس با مؤلفه امتداد لغز راست بر، مدل ریدل منطقه رسم شد که گسل‌های منطقه، امتداد اصلی شکستگی‌های شناسایی شده تقریباً همخوانی مناسب با مدل ریدل دارد.

**واژه‌های کلیدی:** شدت شکستگی، سنگ ساختمانی، تصاویر ماهواره‌ای، GIS



## Fracture analysis in Lashotor stone quarry complex, south of Isfahan, a remote sensing approach

Tanzadeh .P<sup>1</sup>; Farzipour saein .A<sup>2\*</sup>; Safaei .H<sup>3</sup>

1- M.Sc. student, Department of Geology, University of Isfahan

2- Associate Professor, Department of Geology, University of Isfahan

3- Associate Professor, Department of Geology, University of Isfahan

### Abstract

Fracture intensity map is important in quarries for correct location of face, reduce stone crushing and economic efficiency. In this study, the fractures surveyed in Lashotor stone quarry complex, 20 km south of Isfahan city as one of the most famous building stone quarries in Iran. Strike of major fractures are N-S, E-W and others are showing mostly NW-SE strike. The fracture intensity map was drawn in Arc GIS software for identified fractures based on augmented circular scaling method. Then Faces were mapped in fracture intensity map which demonstrate inactive faces exist in high fracture intensity areas. Thus, this kind of study is very important and needed for primary stages of exploration and extraction of building stone quarries. Also, Riddle model was drawn considering Kolah- Ghazi fault with strike of 135° and reverse and dextral strike- slip components. Identified fractures are almost fitted perfectly with the Riddle system of the Kolah- Ghazi fault.

**Keywords:** Fracture intensity, Building stone, Satellite images, GIS





## مقدمه

شفیعی و همکاران (۱۳۸۹) با بررسی شکستگی‌ها در معدن سعیدی در کرمان، نوروزی و امیری (۱۳۹۰) در معدن در بخاری، دارستانی و کوهی اصفهانی (۱۳۹۰) بررسی درزه نگاری در معدن مرمیت برد شیراز، امینی و خوشرو (۱۳۹۶) در معادن تراورتن آذر شهر، یاراحمدی و همکاران، ۲۰۱۸ در معادن گرانیت سفید نظنز و معدن مرمیت کرم بنیاد دهبید پرداختند و بررسی شکستگی‌های را عاملی برای افزایش بهره‌وری و بهینه سازی تولید سنگ دانسته‌اند و همچنین شفییعی و همکاران (۱۳۸۹) در بحث اکتشاف و همچنین تعیین محل مناسب جبهه کار سنگ‌های ساختمانی قابل اهمیت دانسته است (شفیعی و همکاران، ۱۳۸۹؛ نوروزی و امیری، ۱۳۹۰؛ دارستانی و کوهی اصفهانی، ۱۳۹۰؛ امینی و خوشرو، ۱۳۹۶؛ Yarahmadi et al., 2018).

تکنیک دورسنجی (RS) در چند دهه اخیر بطور چشم‌گیری رشد کرده و بطور گسترده در زمین‌شناسی ساختمانی و زمین‌ساخت مورد استفاده قرار می‌گیرند (Masoud and Kokie, 2006; Alipour, 2009; Hashim et al., 2013., Alipour et al., 2017). از موفقیت‌های مهم در این زمینه شناسایی خط واره‌ها و تهیه نقشه از آن‌ها است (Shupe and Akhavi, 1989; Tibaldi and Ferrari, 1991; Masoud and koike, 2006; Solomon and Ghebreal, 2006; Marghany and Hashim, 2010; Hashim et al., 2013).

نرم افزار SAS.Plante با هدف مشاهده و دانلود تصاویر ماهواره‌ای با کیفیت بالا و بصورت زمین مرجع شده و بصورت سرویس‌های گوناگون Google earth, Bing Map, ... برای بررسی‌های دورسنجی بسیار مفید است ([www.sasgis.org](http://www.sasgis.org)).

سیستم اطلاعات جغرافیایی یا GIS بعنوان یک ابزار قدرتمند و مفید برای مدیریت داده‌های مکانی و تصمیم‌گیری، قابلیت جمع آوری، ذخیره، تجزیه-تحلیل و نمایش

سنگ ساختمانی ماده معدنی با ارزش و بعنوان مواد اولیه مورد استفاده در تولیدات صنعتی است و توجه به شیوه اقتصادی تولید سنگ خام از این معادن حائز اهمیت است. میزان گردش مالی این ماده معدنی در دنیا بیش از ۲۰ میلیارد دلار است که در این میان سهم ایران با توجه به ذخیره بالا (رتبه چهارم در دنیا) و تنوع انواع سنگ، کم‌تر از ۱ میلیارد دلار است در صورتی که میزان ذخایر این ماده معدنی در کشور بیش از ۳ میلیارد تن برآورد شده است بطوری که استان‌های زیادی از ایران این پتانسیل برای عملکرد مناسب وجود دارد (یاراحمدی و همکاران، ۱۳۹۶؛ وزارت صنعت، معدن و تجارت، ۱۳۹۴).

بعضی از نمونه‌های سنگ ساختمانی ایران در جهان نظیر ندارد. ایران کشوری متکی به درآمدهای نفتی و توجه به مسائل اقتصادی، فنی معادن و بکارگیری روش‌های مناسب تولید در آن‌ها این امکان را به وجود می‌آورد که به منابع درآمدی قابل اعتمادی در کنار نفت دست یافته شود (اورعی و همکاران، ۱۳۸۳). آنچه امروزه در استخراج سنگ‌ ساختمانی متداول است براساس تجربه‌ی انسانی است و میزان ناچیزی از آن فقط براساس روش‌های علمی صورت می‌گیرد (Tercan and Ozcelik, 2000) به این معنی که عملیات پی‌جویی، اکتشاف و استخراج در معادن نیاز به بررسی‌های علمی دارد که در این زمینه معدن‌داران نیز بر مکان‌یابی صحیح برای جبهه کار در معدن و کاهش ضایعات تأکید می‌کنند (اورعی و همکاران، ۱۳۸۳).

رویاری با ناپیوستگی‌ها از موارد اجتناب‌ناپذیر در بهره‌برداری از معادن سنگ ساختمانی بوده و افزایش میزان تراکم آن‌ها تأثیر عمده‌ای در بازدهی استخراج دارد (جیرسرائی، ۱۳۹۰).



## زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

محدوده‌ی مجموعه معدنی سنگ ساختمانی لاشر، براساس تقسیم‌بندی‌های ساختاری در پهنه ساختاری سنندج-سیرجان واقع شده است (شکل ۱- الف Falcon; Berberian 1995; 1969). فرایندهای زمین‌ساختی در این پهنه ابتدا رژیم زمین‌ساخت کششی و سپس طی یک واژگونی زمین‌ساختی در یک رژیم فشارشی حاصل همگرایی قرار گرفته است (شیخ‌الاسلامی، ۱۳۹۳). این پهنه از اواخر پالئوزوئیک پیشین به حوضه‌ای در حال فرونشست تبدیل شده و به علت نیروهای کششی مؤثر در فرونشست سنندج-سیرجان، رسوبات آواری و کربناتی نهشته شده است (آقنابتی، ۱۳۸۳). در این پهنه، پدیده‌های زمین-ساخت پی در پی و هم‌آهنگ با فازهای زمین‌ساختی شناخته شده در مقیاس جهانی در بیشترین مقدار است. به همین رو، این زون ناآرام‌ترین و پویاترین پهنه‌ی زمین-ساختی ایران است (آقنابتی، ۱۳۸۳). پهنه سنندج-سیرجان لبه‌های گسلی بسیار مشخصی با حوضه‌های مجاور دارد (درویش‌زاده، ۱۳۷۰). رخداد کوهزایی لارامید در ایران علاوه بر بستن نئوتیس سبب ایجاد گسل‌های معکوس با مؤلفه کمی امتداد لغز راست بر در پهنه سنندج-سیرجان شده است (Mohajjel et al., 2003). گسل اصفهان ادامه گسل کازرون گسلی دیرین و پی‌سنگی با روند شمالی-جنوبی پهنه سنندج-سیرجان را قطع کرده است (Safaei, 2009؛ شکل ۱- ب). در حاشیه و میانه این پهنه‌ی ساختاری چهار زون گسلی اصلی با عملکرد معکوس و مؤلفه امتداد لغز با راستای شمال‌غرب-جنوب شرق شناسایی شده است که زون‌های گسلی از سمت شمال شرق به سمت جنوب-غرب شامل زون گسلی حاشیه ارومیه-دختر، زون گسلی نجف‌آباد-کلاه قاضی، زون گسلی حاشیه کماتی زاینده-رود، زون گسلی اصلی زاگرس است و دسته گسل‌های فرعی بین ارومیه-دختر و زون گسلی نجف‌آباد-کلاه قاضی با عملکرد امتداد لغز راست بر با راستای شمال‌غربی-

اطلاعات جغرافیایی (مکانی) و مدل‌سازی را دارد که این اطلاعات به منظور واضح تر جلوه دادن رویدادها، پیش بینی نتایج بکار گرفته می‌شوند (داود آبادی فراهانی و امینی، ۱۳۹۲؛ صابری و همکاران، ۱۳۹۲). از مهم‌ترین ویژگی‌های این سیستم، قابلیت آن در پردازش حجم انبوهی از داده‌ها و جلوگیری از وقوع خطاهای انسانی در تهیه‌ی نقشه‌های مختلف از داده‌های مکانی است (Yousefei et al., 2007). Katz, Bonham Cater et al (1988)، Agterberg (1989)، Chung et al. (1992) از جمله کسانی هستند که از GIS جهت تعیین مناطق مطلوب استفاده نمودند (Bonham Cater et al., 1988; Agterberg, 1989; ) تلفیق GIS و RS (Katz, 1991; Chung et al., 1992). پتانسیل از داده‌های دورسنجی را به بهترین نحو افزایش می-دهد (خادمی و همکاران، ۱۳۹۳).

در این پژوهش پیش‌رو، محدوده مجموعه معدنی سنگ ساختمانی لاشر در ۲۰ کیلومتری جنوب اصفهان و بدلیل اهمیت قرارگیری موقعیت معدن و گسل‌های اطراف محدوده‌ی مورد مطالعه، با بررسی دورسنجی، شکستگی‌ها شناسایی شدند و سپس جهت غالب شکستگی‌ها، هیستوگرام طول شکستگی‌ها رسم شد و با شبکه‌بندی بر روی شکستگی‌ها و با روش اسکن لایه دایره‌ای تکمیل شده (Watkins et al, 2015) میزان شدت محاسبه شده و نقشه شدت شکستگی‌ها تهیه شده است. جهت تأیید بررسی‌های دورسنجی، برداشت‌های صحرایی صورت گرفته است و با توجه به گسل اصلی کلاه قاضی با امتداد ۱۳۵ درجه و عملکرد معکوس با مؤلفه امتداد لغز راست بر مدل ریدل منطقه رسم شد که شکستگی‌های اصلی همخوانی مناسبی با مدل ریدل دارند.

در این پژوهش با کار جدیدی که انجام داده است، شدت شکستگی‌های بالا را عامل مهمی برای موقعیت جبهه کارهای غیرفعال شده، دانسته است.

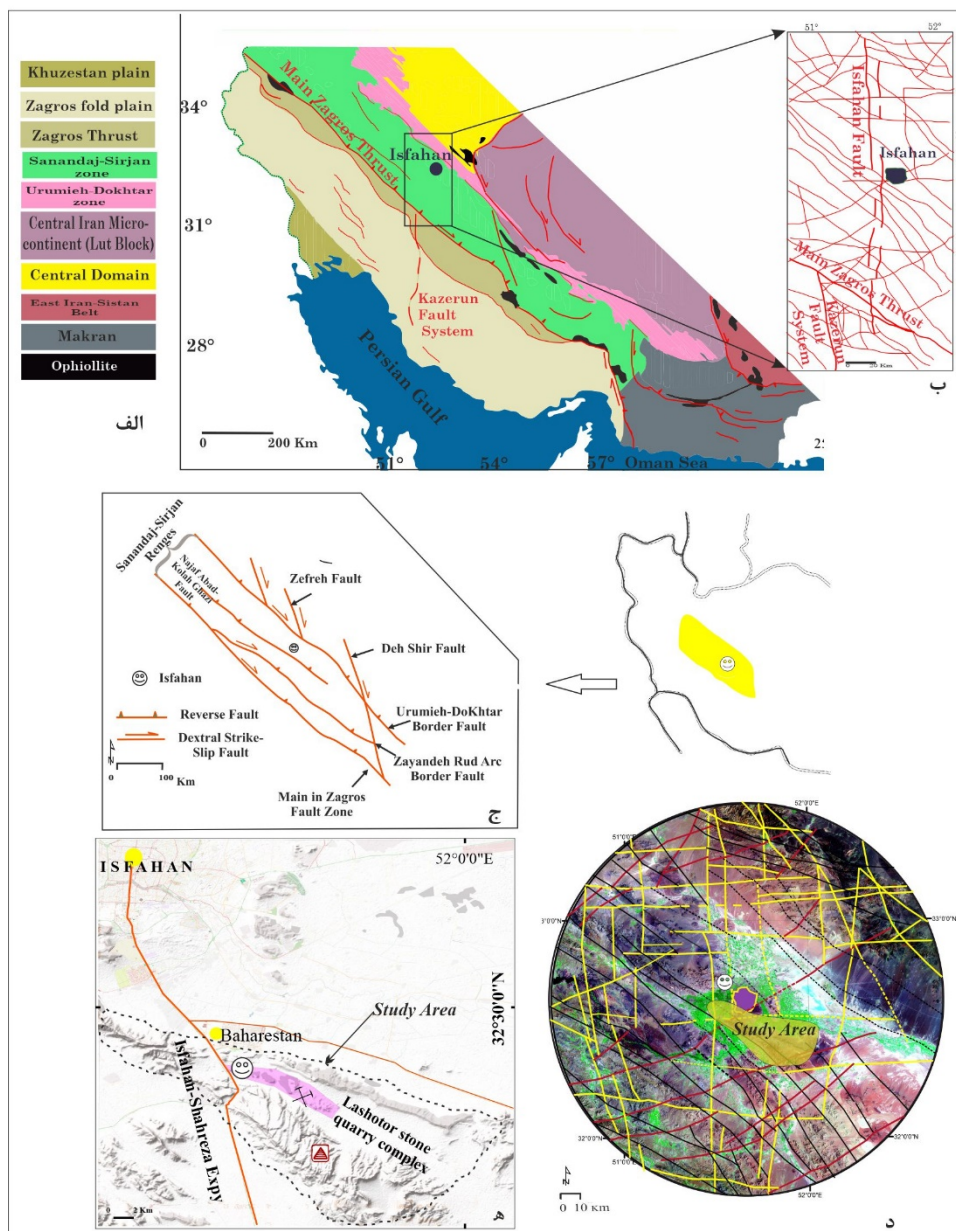


(شکل ۱-ه). براساس نقشه زمین شناسی یکصد هزار شهرضا (زاهدی، ۱۳۵۵؛ شکل ۲-الف) قدیمی ترین رسوبات مشاهده شده در منطقه شیل و ماسه سنگ متعلق به ژوراسیک پائین (گروه شمشک) است که رخنمون بسیار کمی در محدوده مورد مطالعه دارد. بارزترین توالی سنگ-شناسی در منطقه، مربوط به دوره زمانی کرتاسه است (آقاباتی، ۱۳۸۳؛ درویش زاده، ۱۳۷۰).

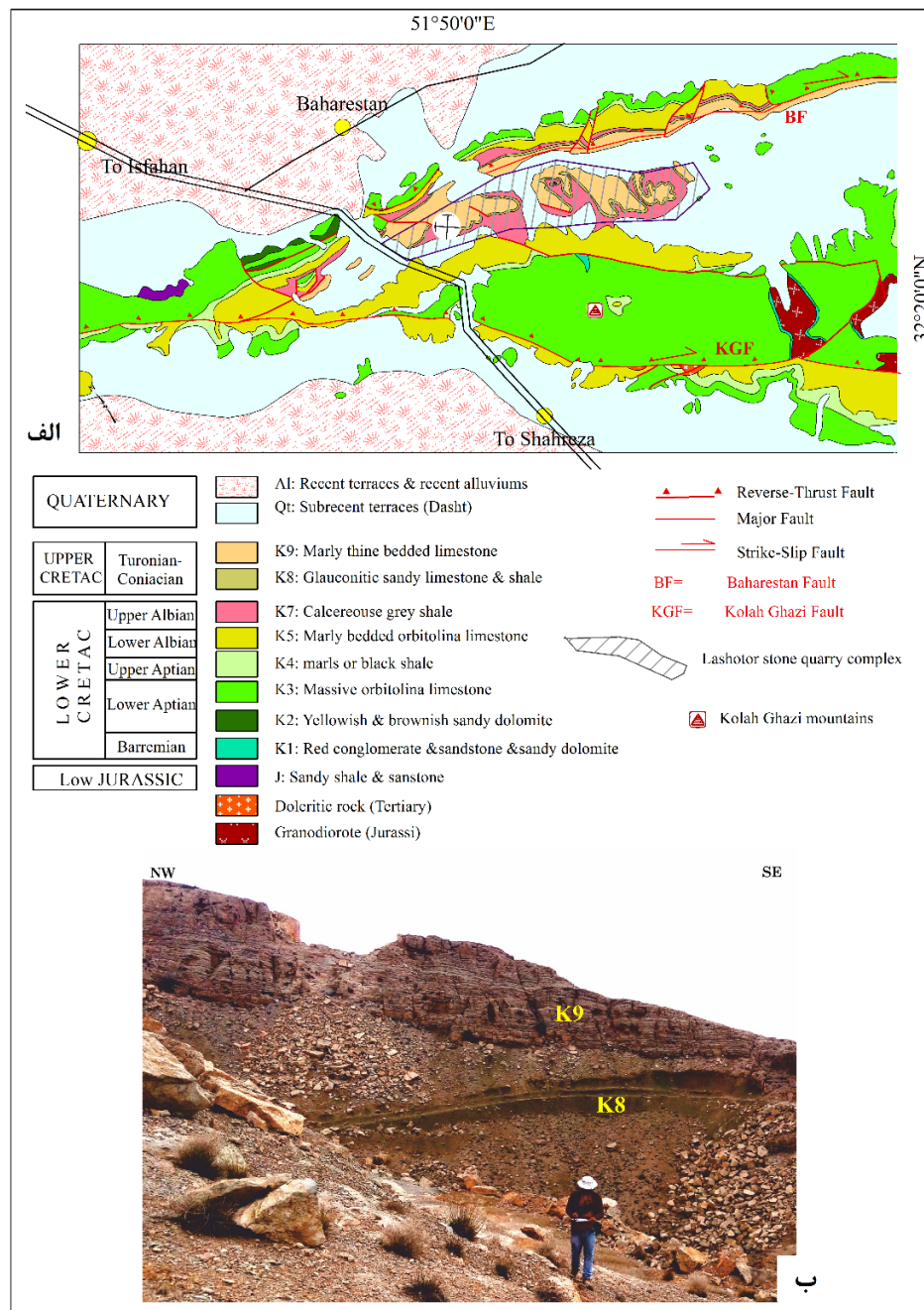
مجموعه‌ی معدنی سنگ آهک‌های کرتاسه بالایی (تورونین- کنیاسین) جهت مصارف ساختمانی استخراج می‌گردد (زاهدی، ۱۳۵۵). فوقانی ترین واحد کرتاسه در محدوده‌ی مورد مطالعه، آهک‌های نازک لایه با میان لایه-های مارنی بر روی شیل است (درویش زاده، ۱۳۷۰- شکل ۲-ب)

مجموعه معدنی بین دو گسل کلاه قاضی و بهارستان با عملکرد معکوس با مؤلفه‌ی امتداد لغز راست بر قرار گرفته است (شکل ۲-الف).

جنوب شرقی است (شکل ۱-ج Tillman et al., 1981). در محدوده ۱۰۰ کیلومتری شهر اصفهان، با تغییرات جزئی از گسل‌های شناسایی شده در پژوهش‌های قبلی و شناسایی تعدادی گسل جدید نیز گسل‌هایی با روند شرقی-غربی و شمالی-جنوبی دیده می‌شود (تاجمیر ریاحی، ۱۳۹۲؛ شکل ۱-د). وجود گسل‌های شمالی-جنوبی باعث بریدگی ارتفاعات بهارستان و کلاه قاضی شده است (صفایی، ۱۳۸۴). موازات گسل اصلی بهارستان، گسل شمال بهارستان است که بین این دو سری گسل اصلی، گسل‌های ثانویه‌ای با امتداد شمال شرقی- جنوب غربی با مؤلفه‌ی چپ بر وجود دارد (Nadimi and Konon, 2012). پهنه‌ی ساختاری سندج- سیرجان از نظر زمین شناسی اقتصادی و پراکندگی کانسارها به ویژه انواع مختلف سنگ‌های ساختمانی با ذخائر زیاد دارای اهمیت است (آقاباتی، ۱۳۸۳؛ قربانی، ۱۳۸۶). همه سنگ‌های پهنه سندج-سیرجان را می‌توان در سه واحد زمین ساختی- چینه‌نگاشتی پرکامبرین پسین- تریاس میانی، تریاس بالایی- کرتاسه و مجموعه ترشیری جای داد (آقاباتی، ۱۳۸۳). منطقه مورد مطالعه که در ۲۰ کیلومتری جنوب اصفهان قرار دارد



شکل ۱. الف - بخشی از نقشه‌ی ساختاری ایران (Falcon 1969; Berberian 1995) و موقعیت شهر اصفهان در پهنه‌ی سنندج- سیرجان، ب- نقشه‌ی گسل‌های اصلی محدوده مورد مطالعه، و اینکه گسل اصفهان ادامه‌ی گسل کازون است (Safaei, 2009) ج- تقسیم‌بندی حاشیه و میانه پهنه‌ی سنندج-سیرجان بر اثر گسل‌های اصلی (Tillman et al., 1981) و موقعیت منطقه مورد مطالعه، د- نقشه‌ی گسل‌های تصحیح شده از پژوهش‌های قبلی و شناسایی گسل‌های جدید به شعاع ۱۰۰ کیلومتری از شهر اصفهان (تاجمیر ریاحی، ۱۳۹۲) و موقعیت منطقه مورد مطالعه، ه- راه‌های ارتباطی به منطقه مورد مطالعه.



شکل ۲. نقشه زمین شناسی محدوده مورد مطالعه، برگرفته از نقشه زمین شناسی شهرضا به مقیاس ۱:۱۰۰,۰۰۰ با اصلاحات (زاهدی، ۱۳۵۵) و قرارگیری موقعیت محدوده مجموعه معدنی سنگ ساختمانی لاشتر، ب- نمایی از لایه های آهکی نازک- لایه با میان لایه های مارنی به سن تورنین بر روی شیل های سنومانین (موقعیت عکس 32°26'17" 51°49'37")



## روش کار

۱- محل تقاطع قطر هر شبکه، مرکز دایره‌ای به

شعاع  $a/2$ ،

۲- بدست آوردن مقدار  $n$  (تعداد تقاطع شکستگی با

محیط هر دایره)،

۳- محاسبه شدت شکستگی (رابطه ۱) ( $r$  شعاع

$I$  - شدت شکستگی)

$$I = n / 4r$$

(رابطه ۱)

با استفاده از روش وزن‌دهی فاصله معکوس (IDW)

برای درون‌یابی بدلیل دقت بالا (Aronoff, 1989)، نقشه

شدت شکستگی‌ها تهیه شود.

سپس جهت تأیید بررسی‌های دورسنجی، برداشت‌های

صحرایی صورت گرفت و امتداد غالب از شکستگی‌ها

تعیین شد. مدل ریدل براساس امتداد گسل کلاه قاضی با

مؤلفه امتداد لغز رسم شد.

با هدف ارزیابی عملکرد موقعیت جبهه کارها، در نقشه

شدت شکستگی‌ها پیاده شده است.

با توجه به موقعیت مجموعه معدنی سنگ ساختمانی

لاشتر و اهمیت بررسی شکستگی‌ها، ابتدا به پردازش

تصاویر ماهواره‌ای Bing maps اخذ شده از نرم‌افزار SAS

Planet و داده ETM<sup>+</sup> از ماهواره Landsat 7 جهت

شناسایی شکستگی‌ها در دو محدوده مطالعاتی I و II

پرداخته شده است (شکل ۳- الف) سپس جهت غالب

شکستگی‌ها، هیستوگرام طول شکستگی‌ها رسم شده است.

در محیط نرم‌افزار Arc GIS با شبکه‌بندی مناسب با توجه

به وسعت منطقه بر روی شکستگی‌های شناسایی شده رسم

شده است (Davy et al., 1990; Zhang and Sanderson, 1998; Volland and Kruhl, 2004; Seung-Ik et al.,

2010). بدین منظور شدت شکستگی‌ها به روش جامع

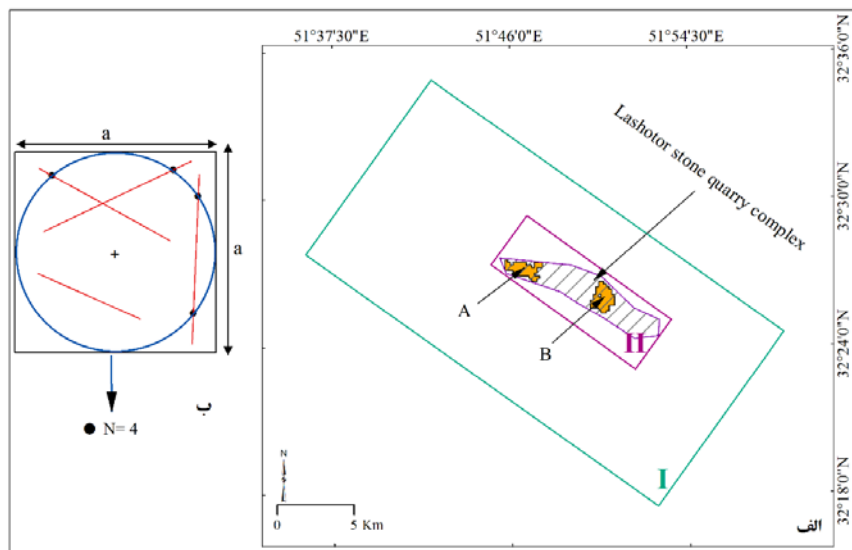
اسکن لاین دایره‌ای تکمیل شده (Watkins et al, 2015)

بدست آمده است. برای محاسبه پارامتر شدت، از روش

اسکن لاین دایره‌ای تکمیل شده (Watkins et al, 2015)

استفاده شده است. بدین منظور لازم است برای هر شبکه

ایجاد شده  $a \times a$  (شکل ۳- ب):



شکل ۳: الف- موقعیت محدوده مجموعه معدنی سنگ ساختمانی لاشتر در بررسی‌های دورسنجی و برداشت صحرایی، ب- نحوه محاسبه شدت شکستگی‌ها در هر شبکه براساس روش اسکن لاین دایره‌ای تکمیل شده (Watkins et al, 2015).

## بررسی شکستگی‌ها

## طول شکستگی‌ها

### الف- بررسی‌های دورسنجی

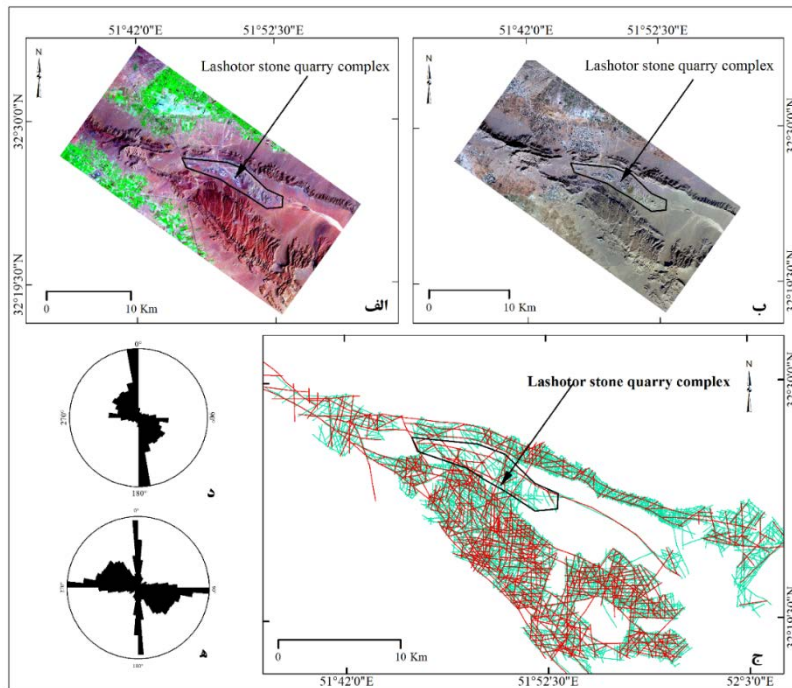
#### شناسایی شکستگی‌ها و مؤثرترین امتداد

در مطالعات دورسنجی شکستگی‌ها در دو مقیاس متفاوت مورد بررسی قرار گرفتند بدین منظور ابتدا در محدوده مطالعاتی I با تهیه تصاویر ماهواره‌ای Bing maps از نرم‌افزار (Zoom= 17) SAS Planet و داده ETM+ از ماهواره Landsat 7 و ورود هر دو داده به محیط نرم‌افزار ER mapper 7.0 شکستگی‌ها شناسایی و استخراج شدند (شکل ۴ الف، ب) و سپس برای بررسی شکستگی‌ها در مجموعه معدنی سنگ ساختمانی لاشر محدود مطالعه‌ای II با بالاترین بزرگنمایی (۲۰) از تصاویر ماهواره‌ای Bing maps

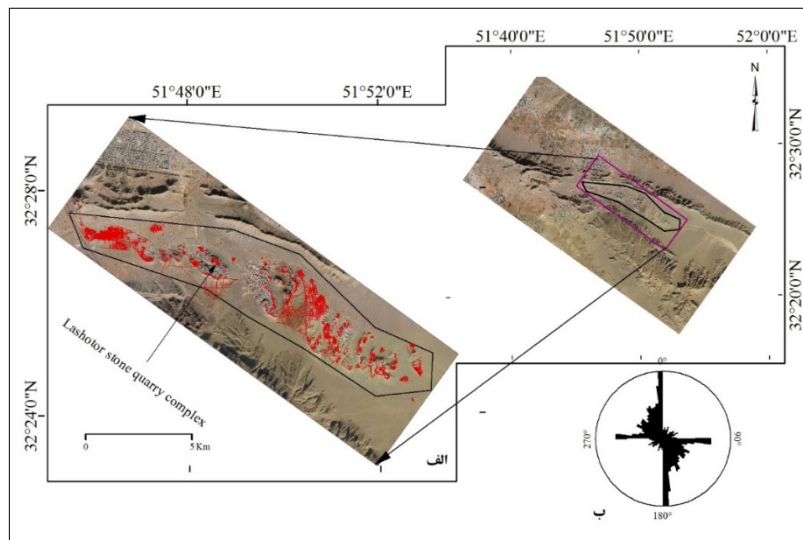
از نرم‌افزار SAS Planet خروجی گرفته و به محیط نرم‌افزار ER mapper 7.0 وارد شد (شکل ۵).

نمودار گل‌سرخ‌ی از امتداد شکستگی‌ها با وزن دهی به طول آنها ترسیم گردید (Ekneligoda & Henkel, 2006). براین اساس مؤثرترین راستا در نمودار گل‌سرخ‌ی برای محدوده مطالعاتی I برای تمامی شکستگی‌ها راستای شمالی-جنوبی (شکل ۴-د) و برای شکستگی‌هایی با طول بیشتر از ۲ کیلومتر راستای شرقی-غربی و شمالی-جنوبی است (شکل ۴-ه). مؤثرترین امتدادهای نمودار گل‌سرخ‌ی به صورت مجزا برای محدوده مجموعه معدنی سنگ ساختمانی لاشر (محدوده مطالعاتی II) شمالی-جنوبی، شرقی-غربی و بازه وسیعی از راستای شمال‌غربی-جنوب-شرقی را نشان داده است (شکل ۵-ب).

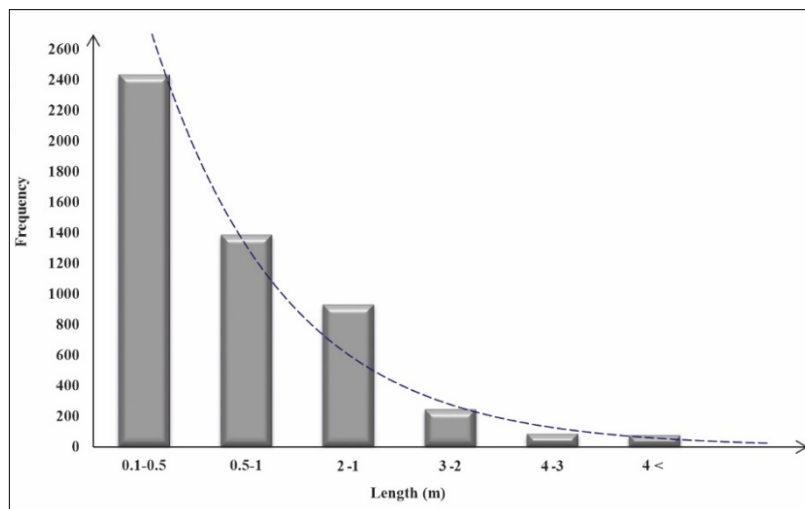
طول شکستگی‌ها یکی از ویژگی‌های مهمی برای تحلیل شکستگی‌ها است (Ekneligoda and Henkel, 2006) یکی از پارامترهای مهمی که می‌توان در مطالعات دورسنجی به بررسی آن پرداخت طول شکستگی‌ها است. با بررسی‌های دورسنجی و شناسایی شکستگی‌ها از محدوده-ی مورد مطالعه، هیستوگرام طول شکستگی تهیه شده است (شکل ۶). شکستگی‌ها براساس طول‌شان به شش دسته تقسیم شده است. هیستوگرام فراوانی طول شکستگی‌ها، الگوی نمایی منفی بهترین خط انطباق را با داده‌ها نشان می‌دهد و معادله مربوط به این خط با همبستگی ۹۳/۷٪ را در شکل ۶ نشان داده شده است، این معادله نشان می‌دهد که با افزایش طول شکستگی‌ها از تعداد شکستگی‌ها به طور لگاریتمی کاسته می‌شود که این توزیع نماینگر بلوغ ساختاری و حد نهایی توسعه شکستگی‌های ساختاری در یک ناحیه است. (Xypolias and Koukourelias, 2004)



شکل ۴: الف- داده ETM+ از ماهواره Landsat 7 با ترکیب رنگی RGB=741 در محدوده مطالعاتی I و قرارگیری محدوده‌ی معدنی سنگ ساختمانی لاشتر ب- تصاویر ماهواره‌ای Bing maps در محدوده مطالعاتی I و قرارگیری محدوده‌ی معدنی سنگ ساختمانی لاشتر ج- شکستگی‌های استخراج شده در محدوده مطالعاتی I و قرارگیری محدوده‌ی معدنی سنگ ساختمانی لاشتر د- ۱: دیاگرام گل سرخی برای تمام شکستگی‌ها که مؤثرترین راستا شمالی- جنوبی می‌باشد، ۵: دیاگرام گل سرخی برای شکستگی‌هایی با طول بیشتر از ۲ کیلومتر که مؤثرترین راستاها شمالی- جنوبی و شرقی- غربی می‌باشد.



شکل ۵: الف- تصاویر ماهواره‌ای Bing maps از نرم‌افزار SAS Planet (Zoom=20) در محدوده مطالعاتی II و قرارگیری محدوده‌ی معدنی سنگ ساختمانی لاشتر و قرارگیری محدوده‌ی مجموعه معدنی سنگ ساختمانی لاشتر و شکستگی‌های شناسایی شده ب- نمودار گل سرخی از شکستگی‌های شناسایی شده محدوده مطالعاتی II با امتدادهای شمالی- جنوبی، شرقی- غربی و بازه وسیعی شمال غربی- جنوب شرقی.

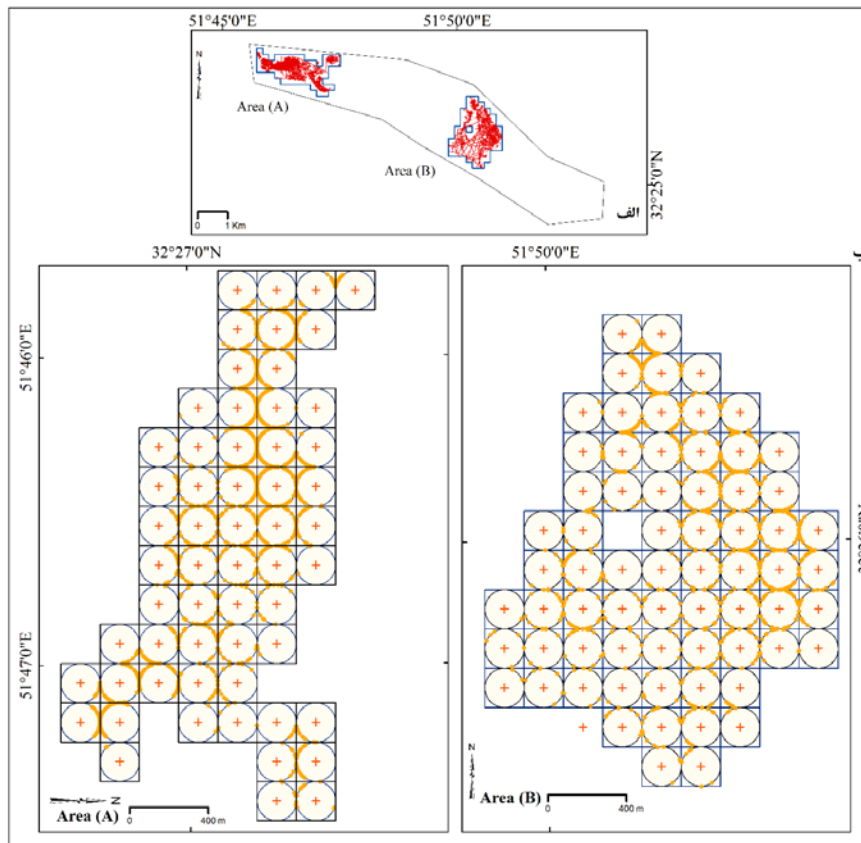


شکل ۶: هیستوگرام توزیع طول شکستگی‌های شناسایی شده با مطالعات دورسنجی برای محدوده‌ی مورد مطالعه

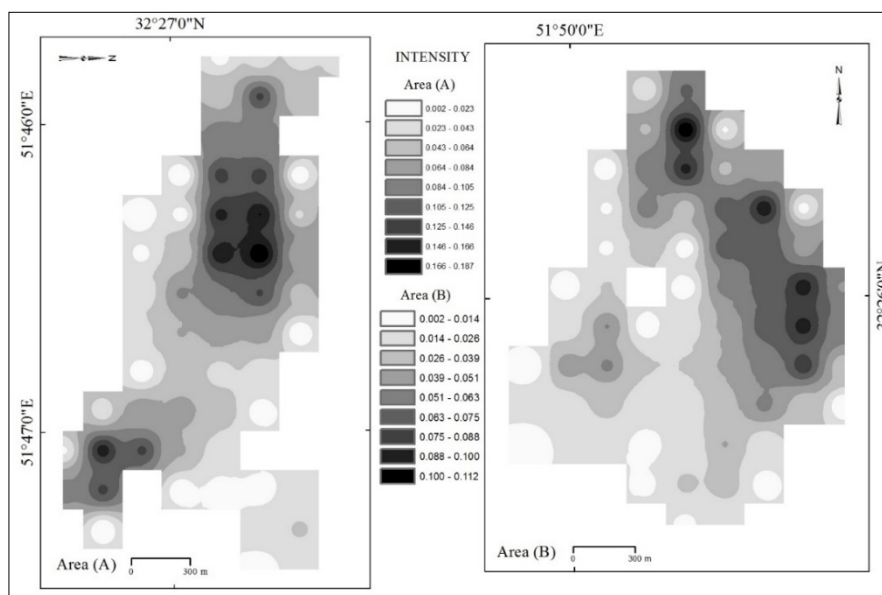
#### محاسبه شدت شکستگی‌ها

از پارامترهای کاربردی در محاسبات آماری شکستگی‌ها، شدت است. فاکتور در واحد سطح تعریف می‌شوند (Xypolias and Koukouvelas, 2004). شدت بیانگر مجموع طول شکستگی‌ها در واحد سطح می‌باشد که برای انجام این‌گونه محاسبات ابتدا باید واحد سطح تعریف کرد (حاجی و رحیمی، ۱۳۸۹). در محیط

نرم‌افزار Arc GIS با شبکه‌بندی ۲۰۰ متری در دو منطقه A و B به علت بهره‌برداری کم‌تر سنگ، کم بودن باطله‌ها و موقعیت مناسب‌تر برای محاسبه شدت شکستگی‌های شناسایی شده در بررسی‌های دورسنجی، براساس روش جامع اسکن لاین دایره‌ای تکمیل شده (Watkins et al, 2015)، شدت شکستگی‌ها برای هر شبکه بدست آمده (شکل ۷) با روش درون‌یابی (IDW) نقشه شدت شکستگی‌ها تهیه شده است (شکل ۸).



شکل ۷: الف- نقشه‌ی دو محدوده‌ی مجموعه معدنی سنگ ساختمانی لاشتر و شکستگی‌های شناسایی شده در مناطق A و B برای محاسبه شدت شکستگی‌ها. ب- شبکه‌بندی دایره‌ای تکمیل شده به شعاع ۱۰۰ متر در مناطق A و B و نمایش پارامتر (n) در هر دایره برای محاسبه شدت شکستگی‌ها.



شکل ۸: نقشه‌ی هم شدت شکستگی‌ها در مناطق A و B در محدوده مجموعه معدنی سنگ ساختمانی لاشتر



## ب- بررسی های صحرایی

آنچه که متأسفانه در مشاهدات صحرایی این مجموعه معدنی سنگ ساختمانی دیده می‌شد باطله‌های فراوان و جبهه کارهای غیر فعال است.

### گسل‌ها

براساس مشاهدات صحرایی در ایستگاه‌های ۱ و ۳ (شکل ۹) ساختار گسل مشاهده شد (شکل ۱۲). وضعیت گسل‌ها در دو ایستگاه ۱ و ۳:

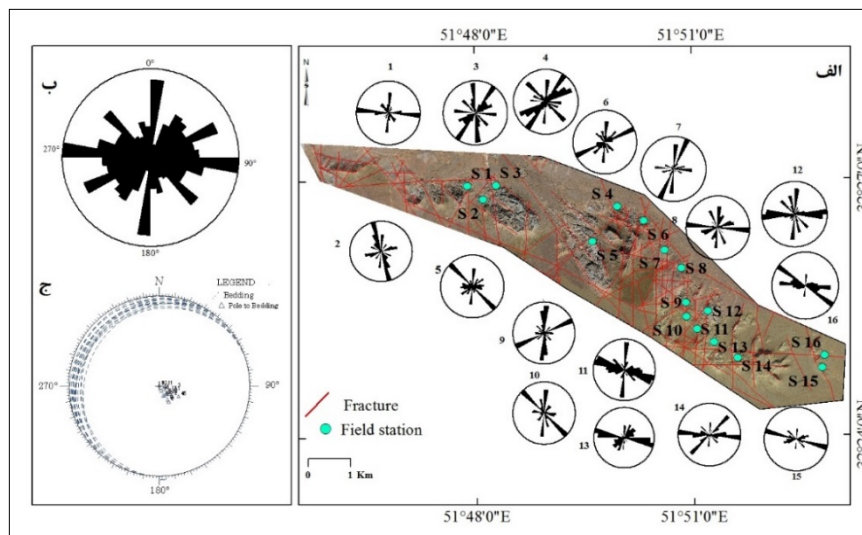
ایستگاه ۱- گسل با مشخصات 040,85SE با ریک خش‌لغز 40°NE، ساز و کار گسل امتدادلغز چپ بر با مؤلفه‌ی نرمال و  $\sigma_1: 350/31$ ،  $\sigma_2: 214/50$ ،  $\sigma_3: 94/23$  می‌باشد (شکل ۱۲-الف).

ایستگاه ۳- گسل با مشخصات 070,80SE با ریک خش‌لغز 16°NE، ساز و کار گسل امتدادلغز چپ بر با مؤلفه معکوس و  $\sigma_1: 31/18$ ،  $\sigma_2: 224/71$ ،  $\sigma_3: 122/4$  می‌باشد (شکل ۱۲-ب).

به منظور تأیید داده‌ها و برداشت های شکستگی‌ها بر اساس روش دورسنجی، در محدوده‌ی مجموعه معدنی سنگ ساختمانی لاشر در ۱۶ ایستگاه به بررسی ساختارهای درزه، گسل و لایه‌بندی پرداخته شده است و نمودار گل- سرخی شکستگی‌ها و استریوگرام گسل‌ها رسم گردید (شکل ۹-الف). در بررسی‌های صحرایی در تعدادی از ایستگاه‌ها ساختاری استیلولیت مشهود است.

### درزه‌ها و لایه‌بندی

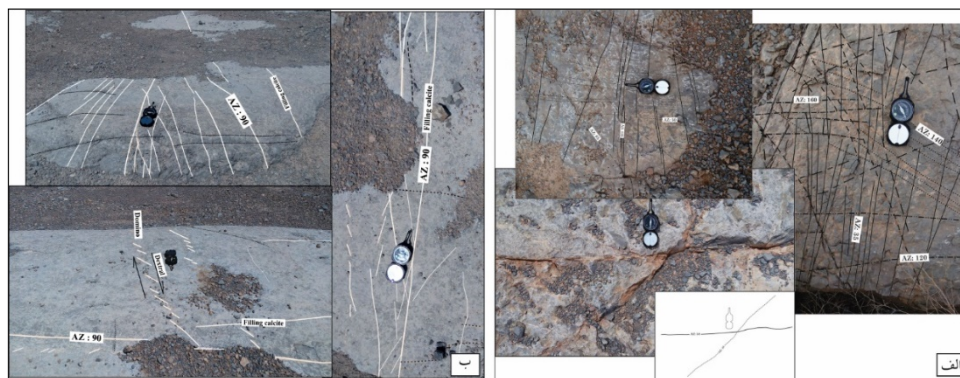
جهت‌گیری کلی شکستگی‌ها در منطقه مورد مطالعه طبق نمودار گل-سرخ‌ی دارای امتدادهای شرقی- غربی، شمالی- جنوبی، ۱۳۰ تا ۱۴۰ درجه و ۵۰ تا ۶۰ می‌باشد (شکل ۹-ب) و شیب لایه‌بندی ۱۵-۲۵ درجه به سمت شمال تا شمال غربی است (شکل ۹-ج). در شکل ۱۰ و ۱۱ نمایی از تعدادی از ایستگاه‌های برداشت راستاهای شکستگی‌های در برداشت‌های صحرایی را نشان می‌دهد.



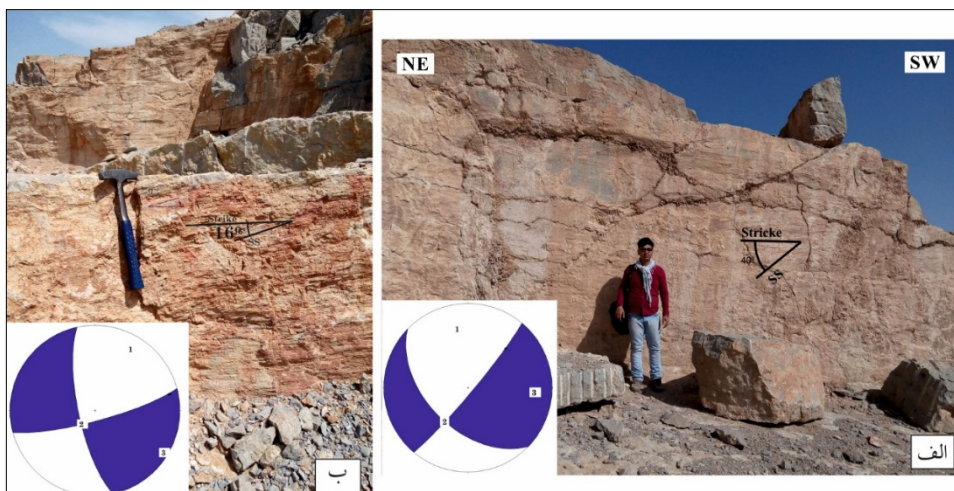
شکل ۹: الف- موقعیت ایستگاه‌ها در برداشت‌های صحرایی، نمودار گل-سرخ‌ی شکستگی‌ها، شکستگی‌های مشخص شده براساس بررسی دورسنجی در محدوده مطالعاتی I بر روی تصاویر ماهواره‌ای SAS Planet ب- استریوگرام لایه‌بندی در برداشت‌های صحرایی ج- نمودار گل-سرخ‌ی از مجموع شکستگی‌های برداشت شده در عملیات صحرایی.



شکل ۱۰: نمایی از ایستگاه‌ها در برداشت شکستگی‌ها با راستای غالب در بررسی صحرایی در مجموعه معدنی سنگ ساختمانی لاشتر الف- ایستگاه ۱ شکستگی‌های با امتداد ۹۰ درجه ب- ایستگاه ۴ شکستگی‌های با امتدادهای شمال شرقی- جنوب غربی، شمال غربی- جنوب شرقی ج- ایستگاه ۹ شکستگی‌هایی با امتداد شمالی- جنوبی و شرقی- غربی د- ایستگاه ۱۶ شکستگی‌ها با امتداد شرقی- غربی و ۱۳۰ درجه.



شکل ۱۱: نمایی نزدیک از شکستگی‌های برداشت شده در بررسی‌های صحرایی الف- ایستگاه ۴ ب- ایستگاه ۱۲



شکل ۱۲: نمایی از گسل‌های برداشت شده در مجموعه معدنی سنگ ساختمانی لاشتر الف- ایستگاه ۱- گسل با مشخصات 040,85SE با ریک خش لغز  $40^{\circ}NE$ ، ساز و کار گسل امتداد لغز چپ بر با مؤلفه‌ی نرمال ب- ایستگاه ۳- گسل با مشخصات 070,80SE با ریک خش لغز  $16^{\circ}NE$ ، ساز و کار گسل امتداد لغز چپ بر با مؤلفه

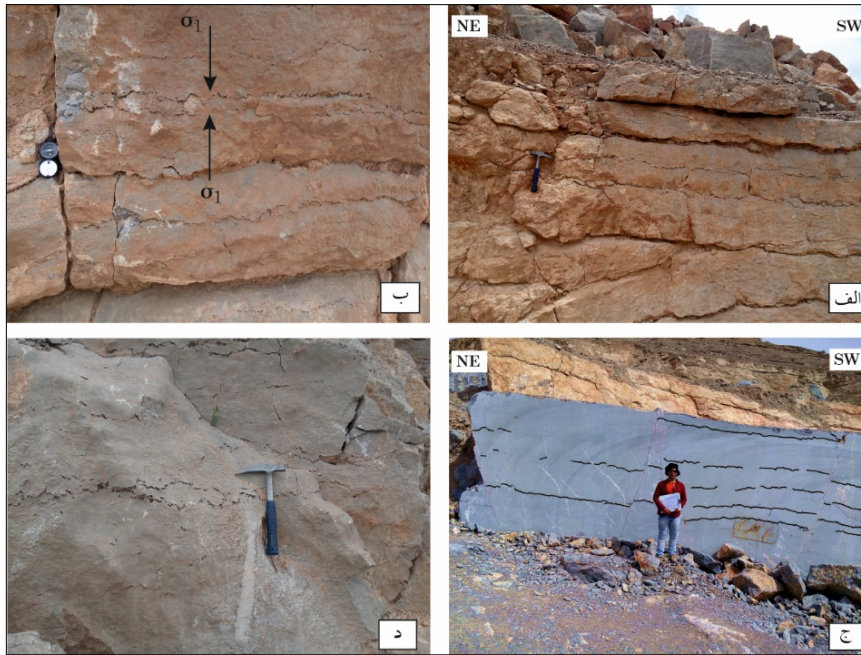
زیگزاگ، دو قطعه سنگ در هم فرو رفته و یا در هم قفل شده‌اند (Bathurst, 1991; Buxton and sibly, 1981; Larbi, 2003; Railsback, 1998). فرآیند استیلولیتی شدن در ویژگی‌های مکانیکی و مقاومتی سنگ بسیار مؤثر است (ارزانی، ۱۳۸۰؛ Larbi, 2003).

یکی از ساختارهایی که در سنگ‌های مجموعه‌ی معدنی سنگ ساختمانی لاشتر وجود دارد، ساختار استیلولیت است. که استیلولیت‌های موجود موازی با لایه بندی هستند. وجود ساختار استیلولیت در ایستگاه‌های ۶، ۱۰ و ۱۵ بسیار مشهود است (شکل ۱۳).

### استیلولیت‌ها

استیلولیت‌ها سطوح انحلالی مرتبط با تنش انقباضی یا برشی و نشان‌دهنده‌ی کاهش حجم هستند و به صورت موازی یا تقریباً موازی با سطح لایه‌بندی با دهن (تنش فشاری) رسوبات شکل می‌گیرند (McClay, 2013). استیلولیت‌های تکتونیک با زاویه زیاد نسبت به لایه‌بندی و با چین خوردگی شکل می‌گیرند (Ameen et al, 2010; McClay, 2013). استیلولیت‌ها معمولاً در سنگ‌های آهکی، دولومیتی و ماسه‌سنگ‌ها بوجود می‌آید. این الگو سطحی نامنظم و معمولاً منقطع دارد که سنگ را بریده و سطح شکل مضرسی و زیگزاگی است و امتداد این سطوح



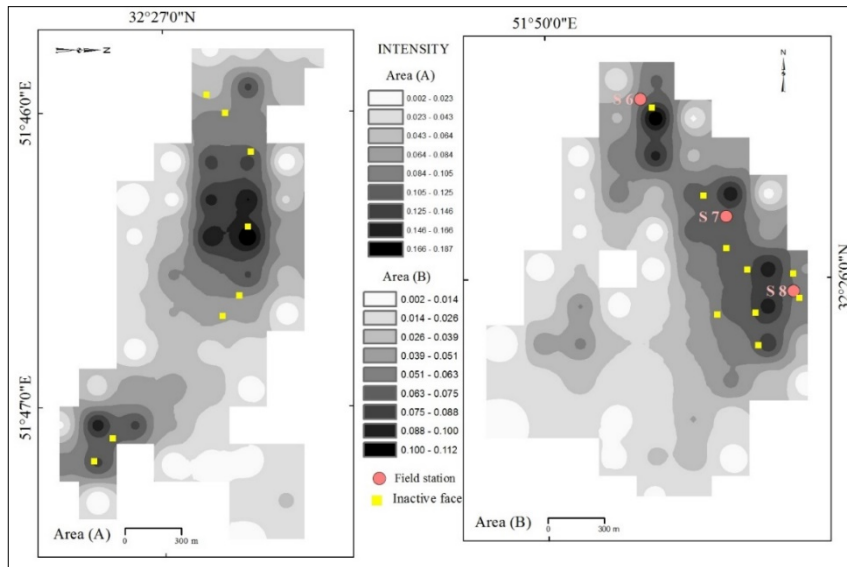


شکل ۱۳. نمایی از استیلولیت‌های موازی با لایه‌بندی در مجموعه معدنی سنگ ساختمانی لاشتر الف، ب- ایستگاه ۶ و اعمال تنش  $\sigma_1$  عمود بر سطح استیلولیت ج- ایستگاه ۱۰ د- ایستگاه ۱۵

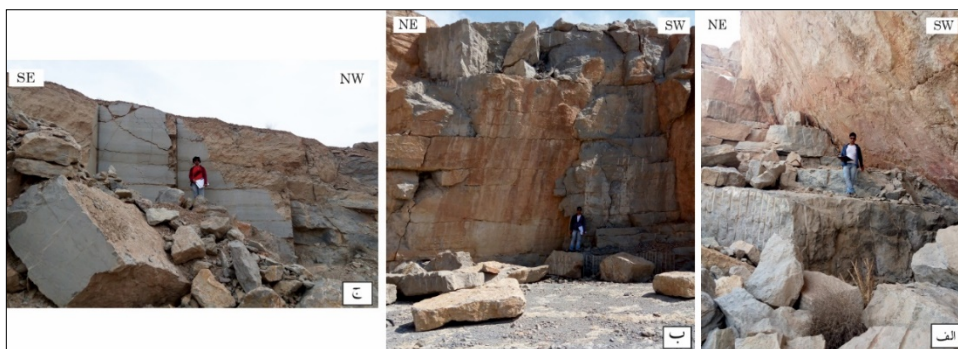
بررسی پارامترهای مختلف سنگ، نقشه شدت شکستگی‌ها جهت مکان یابی بهتر جبهه کار نیز تهیه شود تا در معادن سنگ ساختمانی، یازدهی اقتصادی صورت بگیرد. شکل ۱۵ نمایی از ایستگاه‌های S6، S7، S8 در بررسی‌های صحرایی بصورت جبهه کارهای غیرفعال و متروکه هستند.

## بحث

با پیاده کردن موقعیت جبهه کارها بر نقشه شدت شکستگی‌های تهیه شده، جبهه کارهای غیرفعال و متروکه مجموعه معدنی لاشتر در محدوده‌هایی با شدت شکستگی بالا قرار گرفته‌اند (شکل ۱۴) لذا می‌بایست در اکتشاف علاوه بر نوع لیتولوژی و قبل از استخراج سنگ ساختمانی و



شکل ۱۴: نقشه‌ی هم شدت شکستگی‌ها در مناطق A و B در محدوده مجموعه معدنی سنگ ساختمانی لاشر و موقعیت سه ایستگاه (S6, S7, S8) در برداشت‌های صحرایی و موقعیت جبهه کارهای غیر فعال براساس بررسی‌های دورسنجی و گزارش معدنی



شکل ۱۵: جبهه کارهای غیر فعال در بررسی‌های صحرایی و برداشت شکستگی‌ها و وجود باطله‌های فراوان  
الف- ایستگاه ۶ ب- ایستگاه ۷ ج- ایستگاه ۸

- ۶- دسته از گسل‌ها در شعاع ۱۰۰ کیلومتری از شهر اصفهان به صورت زیر است (صفایی، ۱۳۸۴):
- ۱- گسل‌هایی با راستای ۱۳۰-۱۴۰ درجه: عملکرد به صورت فشارشی و راست بر.
- ۲- گسل‌هایی با راستای شمالی-جنوبی: با عملکرد راست بر و کششی یا راست بر و فشارشی.
- ۳- گسل‌هایی با راستای شرقی-غربی: با عملکرد فشارشی و چپ بر.
- ۴- گسل‌هایی با راستای ۶۰-۷۰ درجه: عملکرد به دو صورت چپ بر و فشارشی یا چپ بر و کششی.
- ۵- گسل‌هایی با راستای ۲۵ الی ۴۵ درجه: عملکرد گسل‌ها بصورت چپ بر و کششی.



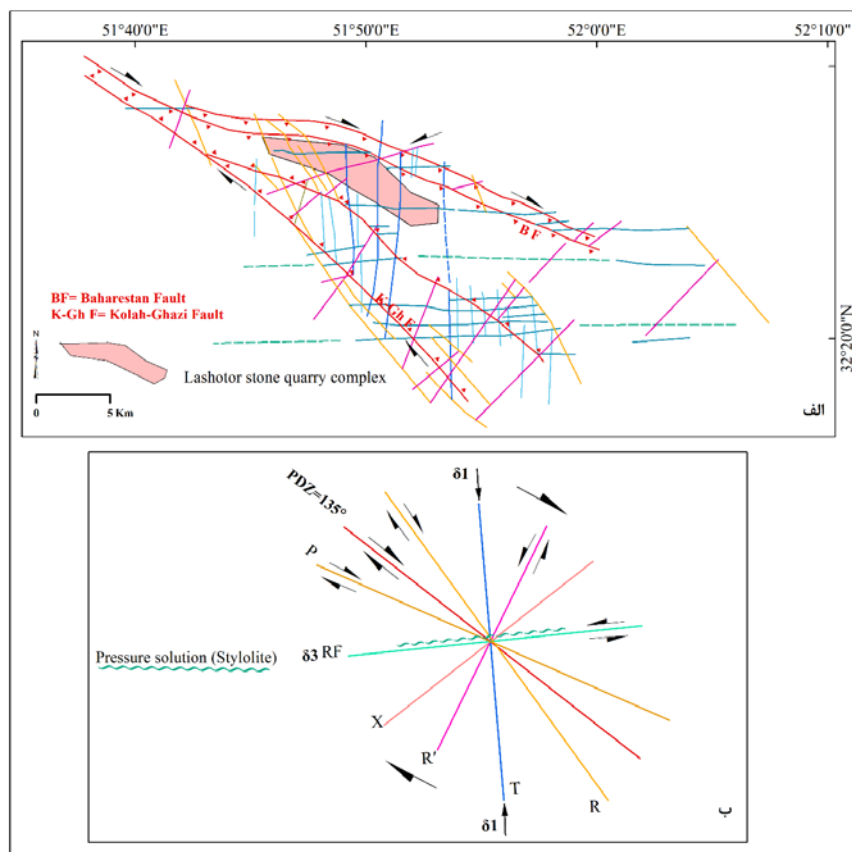


بر با مؤلفه‌ی نرمال (شکل ۱۲-الف) و گسل با مشخصات 070,80SE با عملکرد لغز چپ بر با مؤلفه معکوس (شکل ۱۲-ب) به ترتیب با مؤلفه‌های  $R'$  و  $X$  تقریباً همخوانی دارد. براساس نتایج حاصل از نمودار گل سرخی شکستگی‌ها (شکل ۴-د، شکل ۴-ه، ۵-ب، ۹-ب) از منطقه مورد مطالعه مؤثرترین امتدادها شمالی-جنوبی، شرقی-غربی و امتدادهایی با بازه وسیع ولی با اهمیت پائین تر از امتداد شمال-غربی - جنوب شرقی در مدل ریدل از لحاظ امتدادی به ترتیب با مؤلفه‌های  $T$  (موازی با 15)، موازی با  $\sigma_3$  و PDZ همخوان هستند.

۶- گسل‌هایی با راستای ۱۵۰ درجه: با عملکرد فشارشی و راست بر یا کششی و راست بر.

در محدوده‌ی مورد مطالعه، گسل‌های با امتداد شمال-غربی-جنوب شرقی با مؤلفه چپ بر هستند (Nadimi and Konon, 2012).

گسل کلاه قاضی (شکل ۱۶-الف) با امتداد ۱۳۵ درجه و عملکرد معکوس با مؤلفه امتداد لغز راست بر، بر اساس مدل ریدل برای منطقه مورد مطالعه (شکل ۱۶-ب)، گسل با مشخصات 040.85SE با عملکرد لغز چپ



شکل ۱۶. الف- نقشه‌ی ساده شده از گسل‌های شناسایی شده از منطقه مورد مطالعه و گسل بهارستان و کلاه قاضی با امتداد شمال غربی- جنوب شرقی و عملکرد معکوس با مؤلفه‌ی امتداد لغز راست بر، ب- مدل ریدل از منطقه مورد مطالعه



## نتیجه گیری

شناسایی شده در بررسی‌های صحرایی و امتداد غالب شکستگی‌ها با مدل ریدل رسم شده همخوانی دارد.

۴- موقعیت تمامی جبهه کارها براساس بررسی‌های صحرایی و دور سنجی در دو منطقه A و B نقشه شدت شکستگی‌های بدست آمده، پیاده شده است که تمامی جبهه کارهای موجود غیرفعال و متروکه هستند و با توجه به نقشه شدت شکستگی‌ها، این جبهه کارها دقیقاً در محدوده-هایی با شدت شکستگی بالا قرار گرفتند لذا می‌بایست در اکتشاف و تعیین موقعیت جبهه کارها علاوه بر نوع لیتولوژی و مشخصات مختلف بلوک‌های سنگی قبل از استخراج به بررسی شدت شکستگی‌ها نیز پرداخته شود و می‌بایست موقعیت مناسب جبهه کارها در جایی که شدت شکستگی کمتر است، انتخاب شود.

## سپاس‌گزاری

از تمامی افرادی که برای به ثمر رسیدن این پژوهش کمک ارزنده داشته‌اند، کمال تشکر و قدردانی می‌شود و همچنین نویسندگان مقاله لازم می‌دانند از سردبیر، داوران محترم و هیات تحریریه فصلنامه زمین ساخت که با ارائه راهنمایی‌های علمی ارزنده‌شان منجر به غنای بیشتر مقاله حاضر شده‌اند، نیز سپاس‌گزاری می‌شود.

۱- طبق نمودار گل سرخی شکستگی‌های حاصل از مطالعات دورسنجی از محدوده‌ی مورد مطالعه A، امتداد اصلی شکستگی‌ها شمالی-جنوبی و برای شکستگی‌های با طول بیشتر از ۲ کیلومتر امتداد اصلی شکستگی‌ها شمالی-جنوبی و شرقی-غربی است و نمودار گل سرخی شکستگی‌ها در محدوده مطالعاتی II (مجموعه معدنی سنگ ساختمانی لاشر) امتدادهای شمالی-جنوبی، شرقی-غربی و بازه وسیعی از امتدادهای شمال غربی - جنوب شرقی است. که براساس پژوهش‌های پیشین، وجود گسل-های با روند شمالی-جنوبی و شرقی-غربی در خارج از محدوده مطالعاتی باعث شکستگی‌هایی با روندهای شمالی-جنوبی و شرقی-غربی در محدوده مطالعاتی شده است و بازه وسیع از شکستگی‌ها که امتداد با اولویت کم‌تر حاصل از روند گسل کلاه قاضی و بهارستان در محدوده مطالعاتی است.

۲- طبق هیستوگرام فراوانی طول شکستگی‌های حاصل از بررسی‌های دورسنجی، الگوی نمایی منفی بهترین خط انطباق با داده‌ها است، بطوری که مقدار مربوط به این خط با همبستگی ۹۳/۷٪ است، این مقدار بیانگر این است که با افزایش طول شکستگی‌ها بطور لگاریتمی کاسته می‌شود که این توزیع نماینگر بلوغ ساختاری و حد نهایی توسعه شکستگی‌های ساختاری را در محدوده‌ی مورد مطالعه است.

۳- براساس نمودار گل سرخی حاصل از برداشت‌های صحرایی با امتدادهای اصلی شمالی-جنوبی و شرقی-غربی نمودار گل سرخی مطالعات دورسنجی را تأیید می‌کند.

۵- براساس گسل کلاه قاضی با روند ۱۳۵ درجه و عملکرد معکوس با مؤلفه‌ی امتداد لغز راست بر، دو گسل



## منابع

- امینی، الف.، خوشرو، ح.، ۱۳۹۶. تحمین حجم بلوک‌های برجای سنگ با استفاده از فاصله‌داری درزه‌ها در معدن تراورتن آذرشهر، نشریه علمی- پژوهشی مهندسی معدن، دوره ۱۲، صفحه ۱۳-۲۴.
- اورعی، ک.، سیدی، م.، حقیقت، ل.، ۱۳۸۳، کنفرانس مهندسی معدن ایران، دانشگاه تربیت مدرس.
- آقاناتی، س.ع.، ۱۳۸۳. زمین شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ۵۸۶ صفحه.
- تاجمیری‌راحی، ز.، ۱۳۹۲، بررسی سائزموکتونیک و پهنه‌بندی لرزه‌ای شهر اصفهان، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه- اصفهان، دانشکده علوم، گروه زمین‌شناسی، ۲۵۸ صفحه.
- جیرسرائی، م.، ۱۳۹۰. بررسی تأثیر پارامترهای هندسی شکستگی‌ها در مرحله اکتشاف ذخایر سنگ‌های ساختمانی و نما، جهت کاهش ضایعات و بهینه نمودن بلوک‌های استخراج شده پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی معدن، ۷۵ صفحه.
- حاجی، ع.، رحیمی، ع.، ۱۳۸۹. مطالعه الگوهای آماری فرکتالی سیستم‌های شکستگی منطقه تکنار، ایران مرکزی بر روی نقشه رسم شده از روش‌های دورسنجی، مجله علوم دانشگاه اصفهان، شماره ۱، صفحات ۱۲۶-۱۲۹.
- خادمی، ف.، پیرخراطی، ح.، شاه کرمی، س.، ۱۳۹۳، مطالعه روند افزایش خاک‌های شور اطراف دریاچه ارومیه با استفاده از GIS و RS، مجله علوم زمین، شماره ۹۴، صفحه ۹۳-۹۸.
- دارستانی، ر.، کوهی اصفهانی، و.، ۱۳۹۰. مطالعات درزه‌نگاری و بررسی ژئومکانیکی در طراحی و استخراج معادن سنگ ساختمانی، مطالعه موردی: معدن مرمریت برد شیراز، فصلنامه علمی پژوهشی زمین و منابع واحد لاهیجان، شماره ۱.
- داودی آبادی فراهانی، م.، امینی، ه.، ۱۳۹۲، استفاده از تکنیک- های دورسنجی در استخراج شکستگی‌ها در مقیاس‌های منطقه‌ای و ناحیه‌ای به منظور پهنه‌بندی مناطق مستعد لرزه‌خیزی در مطالعات اولیه ژئوتکنیکی، اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران، ۶ صفحه.
- درویش‌زاده، ع.، ۱۳۷۰. زمین‌شناسی ایران، انتشارات امیرکبیر، تهران.
- زاهدی، م.، ۱۳۵۵. نقشه زمین‌شناسی شهرضا مقیاس ۱/۱۰۰،۰۰۰، شماره ۶۳۵۴، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.
- شفیعی، ش.، عبادی، م.، ترکاشوند، م.، ۱۳۹۱. تحلیل ناپوستگی‌ها در معادن سنگ ساختمانی و اهمیت آن در بهینه- سازی استخراج (مطالعه موردی سنگ ساختمانی سعیدی، کرمان)، مجله علمی علوم‌زمین، شماره ۸۴، صفحات ۸۹-۹۸.
- شیخ‌الاسلامی، م.ر.، ۱۳۹۳، واحدهای زمین‌ساخت- چینه‌نگاری بخش جنوب خاوری پهنه خاوری سسندج- سیرجان، مجله علوم زمین، شماره ۹۵، صفحه ۲۴۳-۲۵۲.
- صابری، ع.، رنگرن، ک.، مهجوری، ر.، کشاورزی، م.ر.، ۱۳۹۲، پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی با تلفیق سنجش از دور و GIS به روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) تاقدیس کمستان استان خوزستان، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۶، ۱۰ صفحه.
- صفایی، ه.، ۱۳۸۴. گزارش نهایی طرح تحقیقاتی شناسایی و بررسی توان لرزه‌ای گسل‌های اطراف اصفهان، دانشگاه اصفهان، ۱۱۶ صفحه.
- نوروزی، الف.، امیری، ع.ر.، ۱۳۹۰، بهینه‌سازی استراتژی استخراج معدن سنگ‌تزیینی بر مبنای پارامترهای زمین‌شناسی، همایش علوم زمین، ۱۲ صفحه.



- Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 54, pp. 1585–1592.
- Buxton, T.M. & Sibley, D.F., 1981. Pressure solution features in a shallow Burled limestone, journal of sedimentary research 51.
- Chung, C.F., Jeerson, C.W. and Singer, D.A., 1992. A quantitative link among mineral deposit modeling, geoscience mapping, and exploration-resource assessment, *Economic Geology* 87, 194–197.
- Davy, PH., Sornette, A. and Sornette, D., 1990. Some consequences of a proposed fractal nature of continental faulting: *Nature* 348: 56–58.
- Falcon, N. 1969. Problems of the relationship between surface structure and deep displacements illustrated by the Zagros range. In: Kent, P.E., Satterthwaite,
- E. & Spencer, A.M. (eds) *Time and Place in Orogeny*. Geological Society, London, Special Publications, 3, 9–21.
- Ekneligoda, T.C., Henkel, H., 2006. The spacing calculator software A visual basic program to calculate spatial properties of lineaments, *Computers & geosciences* 32, 542-553.
- Hashim, M., Ahmad, S., Md Johari, M. A. and Beiravand Pour, A., 2013. Automatic lineament extraction in a heavily vegetated region using Landsat Enhanced Thematic Mapper (ETM+) imagery: *Advances in Space Research* 51: 874–890.
- Larbi, J., 2003. Effect of stylolites on the durability of building stones: two case studies, *Heron-English edition-* 48, 231-247.
- Marghany, M. and Hashim, M., 2010. Lineament mapping using multispectral remote sensing satellite data: *International Journal of the Physical Sciences* 5 (10):1501-1507.
- Masoud, A.A., Koike, K., 2011. Auto-detection and integration of tectonically significant lineaments from SRTM DEM and remotely-sensed geophysical data, *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing* 66, 818-832.
- McClay, K.R., 2013. *The mapping of geological structures*, John Wiley & Sons.
- وزارت صنعت، معدن و تجارت، ۱۳۹۴، *صنعت معدن و تجارت* به روایت آمار و اطلاعات گزارش شماره ۱۲ (عملکرد ۱۳۹۳)، دفتر آمار و فراوری داده‌ها.
- قربانی، م.، ۱۳۸۶، *زمین شناسی اقتصادی ذخائر معدنی و طبیعی ایران*، انتشارات آراین‌زمین، تهران، ۴۶۵ صفحه.
- یاراحمدی، ر.، باقرپور، ر.، طاهریان، ق.، الیویرا سوزا، ل.م.، ۱۳۹۶، *ارائه روشی برای افزایش بهره‌وری معادن سنگ ساختمانی جهت تبدیل به جای‌گزین‌های مناسب برای نفت*، مجموعه مقالات یازدهمین کنگره پیشگامان پیشرفت، ۱۶ صفحه.
- Agterberg, F.P., 1989. Computer programs for mineral exploration, *Science* 245, 76–81.
- Alipour, R., 2009. Structural analysis and Structural and seismotectonic analysis of the main recent fault zone and its effect on the Rudbar Lorestan dam site. MSc Thesis, University of Shahid Beheshti, Tehran.
- Alipour, R., Sadr, A.H. & Amini, P., 2017. The analysis of the dynamics tectonic the Morvarid fault at main recent Fault using remote sensing data and fractal analysis. *Journal of New Finding in Applied Geology* 11 (20), 125-138.
- Ameen, M.S., Buhidma, I.M. & Rahim, Z., 2010. The function of fractures and in-situ stresses in the Khuff reservoir performance, onshore fields, Saudi Arabia, *AAPG bulletin* 94, 27-60.
- Aronoff, S., 1989. *Geographic Information System: A Management Perspective*; WDL publication: Ottawa, Canada,; p. 200.
- Bathurst, R.G., 1991. Pressure-dissolution and limestone bedding: the influence of stratified cementation, cycles and events in stratigraphy, 450-463.
- Berberian, M. 1995. Master 'blind' thrust faults hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics. *Tectonophysics*, 241,193–224.
- Bonham-Carter, G.F., Agterberg, F.P. and Wright, D.F., 1988. "Integration of geological data sets for gold exploration in Nova Scotia",



- Volland, S. and Kruhl, J. H., 2004. Anisotropy quantification: the application of fractal geometry methods on tectonic fracture patterns of a Hercynian fault zone in NW-Sardinia: *Journal of Structural Geology* 26: 1489-1500.
- Watkins, H., Bond, C.E., Healy, D., Butler, R.W., 2015. Appraisal of fracture sampling methods and a new workflow to characterise heterogeneous fracture networks at outcrop, *Journal of structural geology* 72, 67-82.
- www.sasgis.org
- Xypolias, P., Koukouvelas, I., 2004. Fault trace parameters as a tool for analysing remotely sensed fault arrays: an example from the eastern Gulf of Corinth, Greece, *International journal of remote sensing* 25, 4685-4694.
- Yarahmadi, R., Bagherpour, R., Taherian, S. G., Sousa, L. M., 2018. Discontinuity modelling and rock block geometry identification to optimize production in dimension stone quarries. *Engineering Geology* 232, 22-33.
- Yousefi, H., Ehara and S., Noorollahi, Y., 2007. Geothermal potential site selection using GIS in Iran, *Thirty-Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California.
- Zhang, X. and Sanderson, D. J., 1998. Numerical study of critical behaviour of deformation and permeability of fractured rock masses: *Marine and Petroleum Geology* 15: 535-548.
- Mohajjel. M., Fergusson, C.L., and Sahand, M.R., 2003. Cretaceous-Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj-Sirjan Zone, western Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 21, 397-412.
- Nadimi, A., Konon, A., 2012. Strike-slip faulting in the central part of the Sanandaj-Sirjan Zone, Zagros orogen, Iran, *Journal of structural geology* 40, 2-16.
- Railsback, L.B., 1998. Evaluation of spacing of stylolites and its implications for self-organization of pressure dissolution, *Journal of Sedimentary Research* 68.
- Safaei, H., 2009. The continuation of the Kazerun fault system across the Sanandaj-Sirjan zone (Iran), *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 35, pp. 391-400.
- Seung-Ik, P., Young-Seog, K., Chung-Ryul, R. and Sanderson, D. J., 2010. Fractal analysis of the evolution of a fracture network in a granite outcrop, SE Korea: *Geosciences Journal* 14(2): 201-215.
- Shupe, S. M. and Akhavi, M. S., 1989. Integration of remotely sensed and GIS data for mineral exploration: Halifax Pluton area, Nova Scotia, Canada: *Geocarto International*, 4-3, p. 49-54.
- Solomon, S. and Ghebreab, G., 2006. Lineament characterization and their tectonic significance using Landsat TM data and field studies in the central highlands of Eritrea: *Journal of African Earth Sciences* 46: 371-378.
- Tercan, A.E., Ozcelik, Y., 2000. Geostatistical evaluation of dimension stone quarries. *Engineering geology* 58, p. 55-33.
- Tibaldi, A. and Ferrari, L., 1991. Multisource remotely sensed data, field checks and seismicity for the definition of active tectonics in Ecuadorian Andes: *International Journal of Remote Sensing* 12: 2343-2358.
- Tillman, J.E., Poosti, A., Rossello, S., Eckert, A., 1981. Structural evolution of Sanandaj-Sirjan ranges near Isfahan, Iran. *AAPG Bulletin* 65, pp. 674-687.





## تعیین دگرشکلی در پهنه برشی بهلگرد با استفاده از هندسه ساختارهای کوچک مقیاس

محمد امیر علیمی<sup>۱\*</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده معدن، عمران و شیمی، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۲۷

### چکیده

پهنه برشی بهلگرد در خاور ایران، فلیش‌های انوسن را در مرز با توالی افیولیتی جنوب بیرجند تحت تأثیر دگرشکلی قرار داده است. در مطالعات صحرایی منطقه، ساختارهای کوچک مقیاسی که در دگرشکلی شکنا-شکل‌پذیر ایجاد می‌شوند، به‌عنوان نشانگرهای واتنش در ارزیابی دگرشکلی محلی مورد توجه قرار گرفته است. بدین منظور ابتدا روش‌های تحلیلی مناسبی بر پایه هندسه شکستگی‌های کششی، بر گوارگی‌ها، نشانگرهای انحراف یافته و اجسام بیضی شکل اولیه به کار گرفته شده‌اند سپس این روش‌ها با هم مقایسه و محدودیت‌های استفاده از آنها بحث شده است. در مقادیر برآورد شده واتنش با استفاده از شکستگی‌های کششی و انحنای بر گوارگی، مساحت زیر منحنی فاصله-واتنش، واتنش برشی متوسط ( $\gamma$  mean) را تعیین می‌کند که بهتر است با فراسنج شدت واتنش تمرکز یافته ( $I_{loc}$ ) معرفی شود. در استفاده از بر گواره‌ها در تعیین واتنش، شناخت ارتباط این نوع فابریک‌ها با ساختارهای منطقه‌ای، تفاوت الگوهای واتنش در پهنه‌های برشی با دیواره‌های موازی و گوه‌ای شکل، انکسار بر گوارگی متأثر از رفتار سنگ‌ها اهمیت دارد و باید در مقیاس ناحیه‌ای در نظر گرفته شود. استفاده از روش‌های ترسیمی نظیر Lisle (2013) به‌علت سادگی اجرا و محاسبه فراسنج‌های واتنش برشی و تغییر حجم نسبت به روش‌های دیگر ترجیح داده می‌شود. روش‌های محاسبه میانگین داده‌های  $R_f$  به‌علت سادگی تعیین فراسنج  $R_f$  در نشانگرهای بیضی شکل و محاسبات ساده ریاضی جهت تعیین دگرشکلی در مقیاس ناحیه‌ای مناسب است. در به‌کارگیری روش‌های مختلف تعیین فراسنج‌های دگرشکلی، به‌منظور کنترل صحت فرضیات و ارزیابی دقیق واتنش می‌بایست از چندین نشانگر و روش استفاده شود.

**واژه‌های کلیدی:** شکستگی کششی، بر گوارگی، نشانگر واتنش، پهنه برشی بهلگرد، خاور ایران



# Determination of deformation in Bahlgerd shear zone by using geometry small-scale Structures

Alimi .M.A <sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>- Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Faculty of Mining, Civil and Chemistry, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

## Abstract

Behlgard shear zone in eastern Iran has deformed Eocene flysch on the border with the ophiolite sequence south of Birjand. In field studies of the region, small-scale structures that are formed in brittle-ductile deformation have been considered as strain marker for assessing local deformation. For this purpose, first analytical methods based on the geometry of pattern of extension fractures, foliations, deflection of markers and initially elliptical particles have been used then these methods are compared and the limitations of their use are discussed. In the estimated values of strain using extension fractures and the curvature of foliation, the area under the distance-strain curve determines the mean shear strain ( $\gamma_{\text{mean}}$ ), which should be introduced by parameter of the intensity of strain localization ( $I_{\text{loc}}$ ). In using foliations in determining the strain, recognizing the relationship of this type of fabric with regional structures, the difference of strain patterns in shear zones with parallel and wedge-shaped walls, foliation refraction affected by the behavior of rocks, It is important and should be considered on a regional scale. Graphical methods such as Lisle (2013) due to the simplicity and calculated parameters of shear strain and volume change as compared to other methods is preferred. Methods for calculating the mean of  $R_f$  data due to the simplicity of determining the  $R_f$  parameter in elliptical markers and simple mathematical calculations to determine deformation at the regional scale. In applying different methods for determining deformation parameters, in order to control the validity of the assumptions and accurate assessment of multiple markers and strain should be used.

**Keywords:** extension fracture, foliation, strain marker, Bahlgerd shear zone, east of Iran



## مقدمه

دشت بیرجند هم‌مرز است (شکل ۱. الف و ب). مرز پهنه برشی را گسل‌های جنوب بیرجند و بهلگرد تشکیل می‌دهند و دگرشکلی در آن شامل گسلش، چین خوردگی، برگوارگی و شکستگی‌های کششی است. حد فاصل این گسل‌ها، گسل‌های امتدادلغز چپگرد شورک (N280,75NE) و چشمه گزو (N295,70NE) به صورت هم‌روند با گسل بهلگرد قرار دارند. موقعیت هندسی گسل جنوب بیرجند در شمال روستای بوشاد، N150,80SW و خش‌لغزهای آن N330,00 اندازه‌گیری شده است. گسل بهلگرد، گسلی امتدادلغز چپگرد با مؤلفه معکوس است که ۱۴ کیلومتر طول دارد. در مقطع جاده‌ای نزدیک روستای بوشاد، موقعیت هندسی این گسل N290,80NE اندازه‌گیری شده است (شکل ۱. ب). از جمله چین‌های شاخص در منطقه چین بوشاد است که در راستای شمال باختری-جنوب خاوری کشیده شده است. با تحلیل قطب سطوح لایه بندی در یال‌های شمالی و جنوبی، محور چین N152,39 به دست آمد. در این تحقیق، با انتخاب نمونه‌هایی از نشانگرهای مختلف که در مطالعات صحرائی از پهنه برشی بهلگرد به دست آمده است فراسنج‌های دگرشکلی محاسبه شده است.

## روش‌های تعیین واتنش با استفاده از ساختارهای کوچک مقیاس در پهنه‌های برشی

در سنگ‌های دگرشکل شده در پهنه‌های برشی، ناهمگنی واتنش مشهود است بدین معنی که وضعیت واتنش نهایی از نقطه‌ای به نقطه دیگر تغییر می‌کند. این واتنش منجر به شکل‌گیری ساختارهایی می‌شود که حساس به تغییرات واتنش بوده و به طور کامل واتنش نهایی را ثبت می‌کنند.

واتنش اغلب در بخش‌های شکل‌پذیر سنگ کره انباشته می‌شود (Vauchez et al., 2012; Snyder and Kjarsgaard, 2013) و در پهنه‌های برشی بیشترین تمرکز و مقدار را دارد. سنگ‌های دگرشکل شده در این مکان‌ها از اوایل قرن ۱۹ میلادی مورد توجه محققین قرار گرفت. Ramsay (1967) تحلیل کمی واتنش با بهره‌گیری از معادلات نوین ریاضی را آغاز کرد و این موضوع توسط دیگر محققین (نظیر Ramsay and Graham, 1970; Ramberg, 1975; Coward, 1976; Cobbold, 1977; Lister and Williams, 1979; Sibson, 1977; Ramsay, 1980; Cobbold and Quinquis, 1980; Lister and Snoke, 1984) در دهه‌های ۷۰ و ۸۰ میلادی پیشرفت قابل توجهی یافت. تعیین دگرشکلی از ساختارهای کوچک مقیاس از جهت این که به سرعت در صحرا تشخیص داده می‌شوند و در نقشه‌های بزرگ مقیاس (کمتر از ۱:۱۰۰۰۰) می‌آیند، اهمیت دارند. این دسته از ساختارها اطلاعات با ارزشی از هندسه ساختارهای بزرگ مقیاس، توزیع تنش، تعیین جهت برش و تعیین مراحل دگرشکلی در اختیار ما قرار می‌دهند (Wilson and Cosgrove, 1982). چگونگی استفاده از ساختارهای کوچک مقیاس (نظیر شکستگی‌های کششی<sup>۱</sup>، برگوارگی‌ها<sup>۲</sup> و ...) در محاسبه واتنش، مقایسه روش‌ها و محدودیت‌های استفاده از آنها از اهداف این مطالعه است که با ذکر مثال‌هایی از ساختارهای مختلف در پهنه برشی بهلگرد بحث شده است.

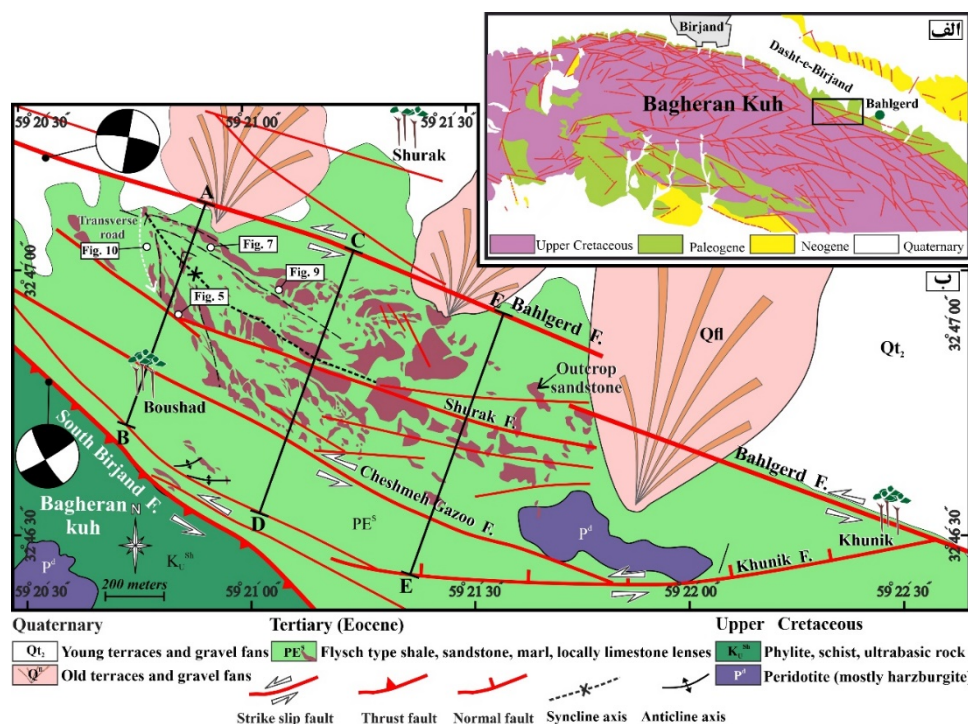
## زمین‌شناسی و زمین‌ساخت پهنه برشی بهلگرد

پهنه برشی بهلگرد در خاور ایران و جنوب رشته کوه باقران قرار دارد. منطقه از فلیش‌های ائوسن (توالی از شیل و ماسه‌سنگ) پوشیده شده است که از جنوب با توالی افیولیتی جنوب بیرجند و از شمال به رسوبات کواترنری در



چه روش‌هایی می‌توان از این ساختارها برای برآورد مقدار واتنش استفاده کرد؟ مزایا و محدودیت‌های استفاده از این روش‌ها چیست؟

ساختارهایی نظیر شکستگی‌های کششی و برگوارگی‌ها که آرایش هندسی آنها وابسته به این تغییرات هستند، برای تعیین مقدار واتنش در پهنه‌های برشی مناسبند. اما به‌راستی چگونه این ساختارها در پهنه‌های برشی شکل می‌گیرند؟



شکل ۱: الف - موقعیت پهنه برشی بهلگرد در کوهستان باقران با مستطیل نمایش داده شده است؛ ب - نقشه ساده شده واحدهای سنگ‌شناسی برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ بیرجند (افتخارنژاد، ۱۳۶۶) و گسل‌های فعال در پهنه برشی بهلگرد

### شکستگی‌های کششی

کششی، با گذر زمان در دگرشکلی پیشرونده هلالی شکل<sup>۴</sup> می‌شوند.

### الگوهای زایشی شکستگی‌های کششی

در خصوص ایجاد آرایه‌های پلکانی هلالی شکل الگوهایی ارائه شده است:

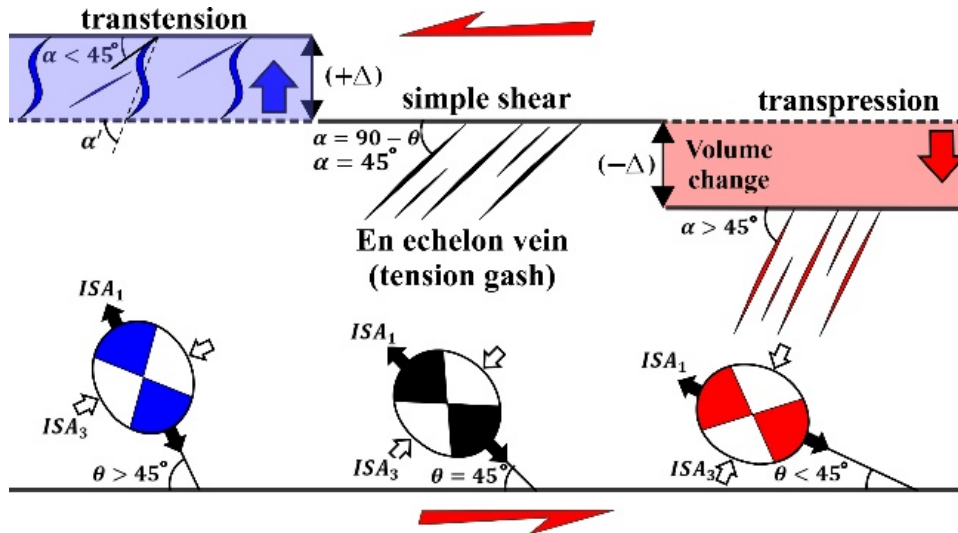
الف - الگوی چرخش غیر فعال: در پهنه‌های برشی، شکستگی‌های نوع ۱ در اثر دگرشکلی ساده پیشرونده

شکستگی‌های کششی، در پهنه‌های برشی نیمه شکننا<sup>۳</sup> ایجاد می‌شوند (Davis et al., 2012). این شکستگی‌ها در آغاز در راستای محور بیشینه تنش ( $\sigma_1$ ) یا عمود بر محور بزرگترین کشیدگی بیضوی کرنش لحظه‌ای ( $ISA_1$ ) باز می‌شوند (شکل ۲). بازشدگی این عوارض در الگوی شکستگی‌های نوع ۱ (حرکت نسبی عمود بر دیواره شکستگی) صورت می‌گیرد. آرایش پلکانی شکستگی‌های

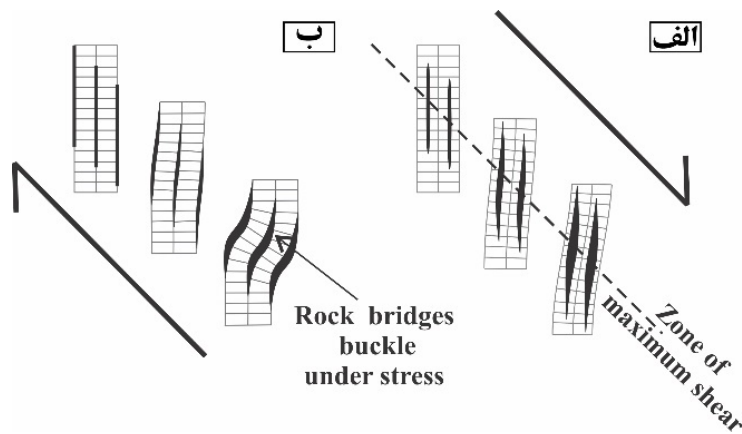
<sup>۴</sup> Sigmoidal

<sup>۳</sup> Semibrittle

می چرخند در حالی که انتهای آنها به موازات محور تنش بیشینه ( $\sigma_1$ ) رشد می کند (Beach, 1975). در این الگو انحنا شکستگی های هلالی شکل، در نتیجه چرخش متفاوت قطعات متأثر از واتنش ناهمگن در عرض پهنه برشی ایجاد می شود (Lisle, 2013) (شکل ۳. الف).



شکل ۲. آرایش شکستگی های کششی و جهت گیری ISA (محورهای کشیدگی لحظه ای) در پهنه های برشی ساده، تراکشی و توافشارشی برگرفته از (Ramsay and Huber, 1983; Fossen and Tikoff, 1993)



شکل ۳. الگوهای زايشی ایجاد آرایه های پلکانی هلالی شکل. الف- الگوی چرخش غیرفعال (Beach, 1975); ب- الگوی خمش تدریجی پل های سنگی (Nicholson and Pollard, 1985)





## محاسبه واتنش با استفاده از شکستگی‌های کششی

اولین شکستگی‌های تشکیل شده در برش ساده زاویه ۴۵ درجه ( $\alpha$ ) با دیواره برشی می‌سازند اما در مواردی زاویه اولیه کمتر یا بیشتر از این مقدار می‌باشد چرا که جهت‌گیری شکستگی‌ها در مرحله اولیه دگرشکلی علاوه بر مؤلفه برش ساده به مؤلفه برش محض نیز وابسته است. آرایش پلکانی شکستگی‌ها با صفحه برش، زاویه‌ای کمتر از ۴۵ درجه در مناطق تراکشنی و زاویه بزرگتر از ۴۵ درجه در مناطق تراکشنی می‌سازند (شکل ۲). در دگرشکلی‌های بعدی زوایای اولیه تغییر می‌کند ( $\alpha'$ ) و موجب ایجاد رگه‌های  $S$  مانند و کج شده می‌شود. در مطالعه واتنش ضروری است که تغییر در شکل و اندازه بررسی شود. دگرشکلی یک عارضه را با تغییر در زاویه برش (واتنش برشی) و تغییر اندازه را با تغییر در حجم آن (واتنش حجمی) ارزیابی می‌کنیم. برای محاسبه این فراسنج‌ها، راه‌حل‌های هندسی به صورت معادلاتی یا ترسیمی ارائه شده است که عبارتند از:

### روش Ramsay and Huber (1983)

مطابق الگوی چرخش غیرفعال، قطعات شکستگی‌های کششی در پاسخ به گرادیان<sup>۵</sup> واتنش پهنه برشی چرخش یافته و انحنا شکستگی‌ها را سبب می‌شوند. در این الگو دگرشکلی غیرفعال بوده و واتنش برشی ( $\gamma$ ) را می‌توان در هر نقطه از شکستگی هلالی شکل با استفاده از رابطه زیر بدست آورد (Ramsay and Huber, 1983).

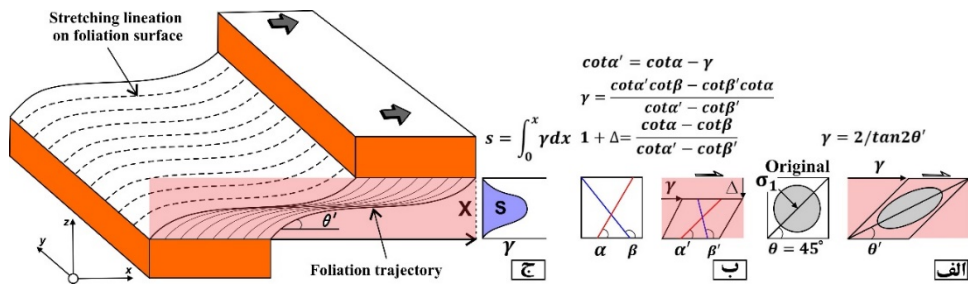
$$\cot \alpha' = \cot \alpha - \gamma \quad (\text{رابطه ۱})$$

$\alpha$ : زاویه بین شکستگی اولیه و دیواره برش؛  $\alpha'$ : زاویه بین شکستگی بعد دگرشکلی و دیواره برش در هر نقطه از انحنا شکستگی (شکل ۴. ب).

در نقاط مختلفی از انحنا رگه‌ها با تغییر آهنگ مقدار  $\alpha'$ ، ایزوگون‌های شیب ترسیم می‌شود. سپس در این نقاط با استفاده از رابطه ۱ و با در نظر گرفتن  $\alpha$ ، مقادیر واتنش برشی محاسبه می‌گردد. تغییرات واتنش برشی با مقادیر کوچک در کناره‌های دیواره برش آغاز و در مرکز به مقدار بیشینه خود می‌رسد مقدار واتنش برشی متوسط ( $\gamma$  mean) را می‌توان با استفاده از انتگرال زیر بدست آورد:

$$S = \int_0^x \gamma dx \quad (\text{رابطه ۲})$$

در این رابطه،  $x$  مقدار فاصله در عرض پهنه و  $\gamma$  واتنش برشی است. این انتگرال مساحت ( $s$ ) زیر منحنی واتنش بر حسب فاصله را محاسبه می‌کند که مقدار آن برابر میزان جابجایی کل پهنه است (Ramsay, 1980; Marshak and Mitra, 1988) (شکل ۴. ج). با دو فرض اساسی می‌توان ر فوق را بکار برد: الف- دگرشکلی در پهنه از نوع برش ساده است. ب- خط سیر فابریک‌ها بر خط سیر واتنش نهایی منطبق است.



شکل ۴: الف- در آغاز برش ساده، بر گوارگی عمود بر  $\sigma_1$  و با زاویه ۴۵ درجه ( $\theta$ ) نسبت به دیواره‌های برش تشکیل می‌شود. در طی دگرشکلی پیش‌رونده زاویه  $\theta'$  به کمتر از ۴۵ درجه می‌رسد و تابعی از واتنش نهایی است (Ramsay and Graham, 1970)؛ ب- ارتباط هندسی بین خطوط با جهت‌گیری اولیه  $\alpha$  و  $\beta$  که تحت تأثیر واتنش برشی ( $\gamma$ ) قرار گرفته است (Ramsay and Huber, 1983)؛ ج- مساحت (S) زیر منحنی فاصله-واتنش برابر واتنش برشی متوسط می‌باشد (Ramsay, 1980; Marshak and Mitra, 1988).

$\alpha'$  و بر حسب رادیان

روش (Lisle 2013)

با ترسیم خطوطی از نقاط S و T به موازات دیواره برش، w (عرض پهنه برشی) به دست می‌آید.  $d_x$  و  $d_y$  (مؤلفه‌های جابه‌جایی موازی و عمود بر پهنه برشی) خواهند بود. می‌توان مقادیر واتنش برشی ( $\gamma$ ) و تغییر حجم ( $\Delta$ ) را محاسبه کرد:

$$\gamma = d_x / w \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$\Delta = d_y / w \quad (\text{رابطه ۶})$$

مثالی از کاربرد شکستگی‌های کششی در

محاسبه واتنش

در بخش شمال باختری پهنه برشی بهلگرد، حوالی روستای بوشاد، که رخنمون‌های ماسه‌سنگی به هم‌ریختگی کمتری دارند، شکستگی‌های کششی به صورت رگه‌های اصلی متقاطع و یا آرایه‌هایی با آرایش نردبانی ایجاد شده‌اند. شکستگی‌ها در واحدهای ماسه‌سنگی فلیش‌های ائوسن دیده می‌شود که با کوارتز پر شده‌اند و در مواردی به شکل هلالی شکل در آمده‌اند (شکل ۵). در نمونه‌ای از

مطابق الگوی پل‌های چین خورده، چین‌خوردگی پل‌های مقاوم بین شکستگی‌های کششی منجر به اتساع حجمی پهنه، رشد تدریجی و انحنا شکستگی‌ها می‌شود. به منظور تعیین مقادیر واتنش برشی ( $\gamma$ ) و اتساع حجمی ( $\Delta$ ) در پهنه برشی، روشی ترسیمی توسط Lisle (2013) ارائه شده است (شکل ۶ ج):

در این روش ابتدا دایره‌ای به شعاع دلخواه رسم می‌شود. شعاع دایره (pq) را به گونه‌ای انتخاب می‌کنیم که عمود بر جهت‌گیری اولیه شکستگی باشد.

از نقطه p بر روی محیط دایره، خطی به موازات جهت‌گیری شکستگی بعد دگرشکلی (خطی که دو انتهای شکستگی را بهم متصل می‌کند) ترسیم می‌شود (qr). خط sr را که بیانگر شکستگی اولیه است مطابق روابط زیر بازسازی می‌گردد.

$$S = \frac{\sin(\alpha' - \alpha)}{\alpha' - \alpha} \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$sr = S \times qr \quad (\text{رابطه ۴})$$



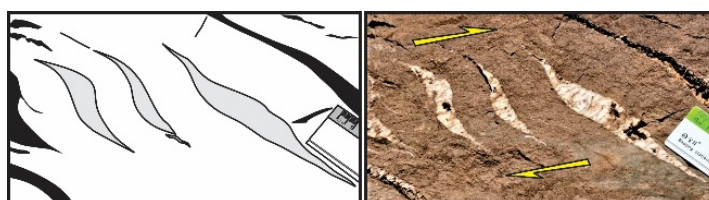
$$I_{loc} = 1 - \frac{\gamma_{mean}}{\gamma_{max}} \quad (\text{رابطه ۷})$$

شکستگی‌های کششی در نزدیکی گسل شورک، مقدار و انتش به دو روش محاسبه شده است:

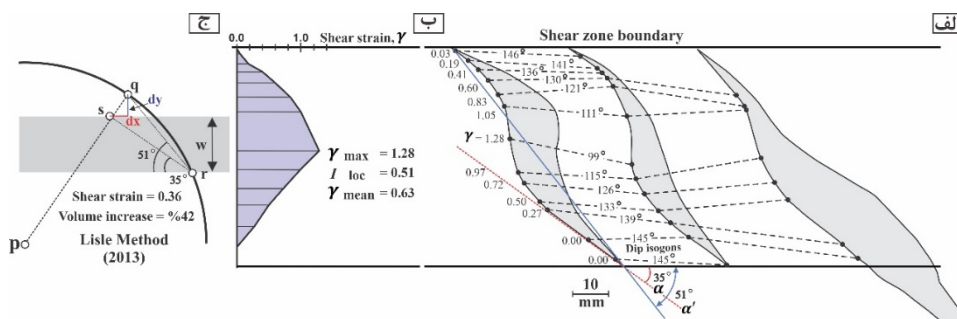
بنابراین شدت و انتش تمرکز یافته در کل پهنه ۰/۵۱ است. با بهره‌گیری از روش ترسیمی (Lisle 2013) مقادیر و انتش برشی و تغییر حجم به ترتیب ۰/۳۶ و ۴۲٪ تعیین شد (شکل ۶. ج).

مقایسه روش‌های فوق نشان می‌دهد که مقدار و انتش برشی در روش (Lisle 2013) (۰/۳۶) نسبت به روش (Ramsay and Huber 1983) (۰/۶۳) متفاوت است اما مقدار آن به شدت و انتش تمرکز یافته (۰/۵۱) نزدیک‌تر است.

ابتدا با استفاده از روش (Ramsay and Huber 1983)، در نقاط مختلفی از انحنای رگه‌ها، ایزوگون‌های شیب با مقادیر متفاوت  $\alpha'$  رسم شد. سپس در این نقاط با در نظر گرفتن  $\alpha=35^\circ$  در رابطه ۱، و انتش برشی با بیشینه مقدار ۱/۲۸ محاسبه گردید (شکل ۶. الف). با منحنی و انتش-فاصله، جابه‌جایی جانبی ۳۷ میلیمتر و و انتش متوسط ۰/۶۳ برآورد شد (شکل ۶. ب). و انتش‌های برشی محاسبه شده در این روش و انتش را به صورت موضعی در نقاطی از پهنه به دست می‌آورد از این رو می‌توان شدت این و انتش تمرکز یافته ( $I_{loc}$ ) در کل پهنه را با معادله زیر به دست آورد (Schrank et al., 2008)



شکل ۵: شکستگی‌های کششی هلالی شکل که در پهنه برشی راستگرد تشکیل شده‌اند.



شکل ۶. الف- ایزوگون‌های شیب برای سه شکستگی کششی ترسیم و و انتش برشی با رابطه (۱) محاسبه شده است؛ ب- با استفاده از منحنی فاصله-و انتش در عرض پهنه برشی، و انتش برشی متوسط ۰/۶۳ برآورد شد؛ ج- با بازسازی ترسیمی به روش (Lisle 2013) و انتش برشی ۰/۳۶ و افزایش حجمی ۴۲٪ تعیین شد

## برگوارگی

مقاومت کمتر (شیل) با زاویه‌ای حاده نسبت به آن قرار می‌گیرند. اگرچه عده‌ای از محققین معتقدند در تاریخچه واتنش پیشرونده صفحات کلیواژ و XY موازی هم باقی نمی‌مانند (Williams, 1976; Hobbs et al., 1982)، اما حداکثر انحراف بین برگوارگی و مسیر صفحه XY در برش ساده حدود ۵ درجه است (Ghosh, 1975) و در مواردی که دگرریختی غیر هم محور ( $w_k < 1$ ) باشد، این میزان به ۲ درجه کاهش می‌یابد (Ghosh, 1982). در هر صورت چنین انحرافات در صحرا قابل اندازه‌گیری نیست.

### الگوی برگوارگی و محاسبه واتنش

جهت‌گیری برگوارگی‌ها در عرض پهنه برشی به صورت نظام‌مند تغییر می‌کند. نخست صفحه برگواره با زاویه ۴۵ درجه نسبت به پهنه برشی آرایش می‌یابد سپس به تدریج از نزدیکترین راه به سوی جهت بیشینه طولیل‌شدگی می‌چرخد و در مرکز پهنه برشی به موازات صفحه برش نزدیک می‌شود و حتی در مناطقی که واتنش برشی بالاست چین می‌خورد (شکل ۴. الف). الگوی خمیدگی برگواره از حاشیه به سمت مرکز در پهنه‌های برشی اساس محاسبه واتنش است که به آسانی در رخنمون‌ها قابل مشاهده می‌باشد. ارتباط مستقیمی بین کاهش زاویه بین برگوارگی و صفحه برش ( $\theta$ ) و افزایش شدت واتنش به سمت مرکز پهنه وجود دارد که با معادله زیر قابل بررسی است (Ramsay and Graham, 1970).

$$\gamma = 2 / \tan 2\theta' \quad (\text{رابطه ۸})$$

$\gamma$ : واتنش برشی و  $\theta'$ : زاویه بین محور بزرگ بیضی واتنش ( $S_1 = e_1 + 1$ ) یا همان اثر برگوارگی با جهت برش

برگوارگی از جمله ساختارهای ثانویه‌ای است که در پهنه‌های برشی شکل‌پذیر و شکننا-شکل‌پذیر به فراوانی یافت می‌شود. حتی از دیرباز ارتباط زایشی بین چین و برگوارگی نیز شناخته شده است بدین صورت که از جمله ساختارهای همراه چین، کلیواژ<sup>۷</sup> سطح محوری است که به موازات سطح محوری چین‌ها شکل می‌گیرد. چین و کلیواژ به‌طور همزمان یا به‌صورت تدریجی در یک رویداد دگرشکلی پیشرونده واحد شکل می‌گیرند و از نزدیکترین راه به سوی جهت بیشینه درازشدگی می‌چرخند. استفاده از شکل طبیعی کلیواژ در سنگها و تغییرات جهت آن، اطلاعات ارزشمندی را از مقدار واتنش بدون وجود شاخص‌های واتنش مهیا می‌کند (Treagus, 1983). از آنجا که تبیین علت ایجاد برگوارگی در سنگ‌های دگرگونی و دگرشکل یافته از جهت زایشی دشوار است در این تحقیق واژه برگوارگی به صورت عمومی به کار رفته و شامل کلیواژ و شیستوارگی<sup>۸</sup> است.

### ارتباط بین برگوارگی و واتنش

ظهور برگوارگی در طی اولین مرحله دگرشکلی همواره مورد توجه محققین بوده است چراکه تقریباً موازی با صفحه XY بیضوی نهایی واتنش قرار می‌گیرد (Cloos, 1947; Siddans, 1972; Wood, 1974; Tullis and Wood, 1975). شواهدی از این ارتباط با استفاده از دیگر شاخص‌های واتنش نیز به دست آمده است (Sorby, 1853). این بدان معناست که کوتاه‌شدگی اصلی عمود بر صفحات برگوارگی خواهد بود. برگوارگی در لایه‌های با مقاومت بیشتر (ماسه سنگ) عمود بر لایه بندی و در لایه‌های با



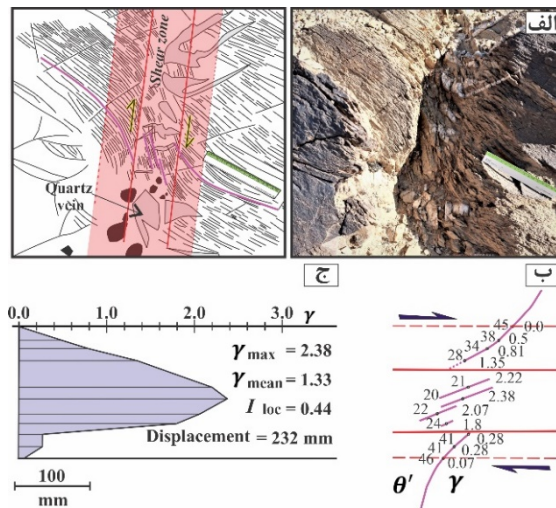
### محاسبه واتنش در مقیاس مزوسکوپی

در پهنه برشی بهلگرد، در رخنمونی از واحدهای ماسه‌سنگی فلیش‌های ائوسن نمونه‌ای انتخاب شده است که شامل برگوارگی‌ها می‌باشد (شکل ۷. الف). با استفاده از انحنای برگوارگی ایزوگون‌های شیب در نقاط مختلف از مسیر برگواره تعیین شد سپس زاویه بین ایزوگون‌ها و سطح برش ( $\theta'$ ) به دست آمد و با استفاده از رابطه (۸) مقدار واتنش برشی محاسبه گردید (شکل ۷. ب). واتنش برشی متوسط با استفاده از مساحت زیر منحنی فاصله-واتنش  $1/33$  تعیین شد (شکل ۷. ج). مقدار واتنش برشی بیشینه و شدت واتنش تمرکز یافته در این نمونه به ترتیب  $2/38$  و  $0/44$  برآورد گردید.

است. مسیر برگوارگی که صفحه XY بیضوی نهایی واتنش را بازگو می‌کند، فرصتی را مهیا می‌سازد تا مقدار کل واتنش و تغییرات آن در عرض پهنه تخمین زده شود. اگر در برش عرضی عمود بر پهنه برشی، مقادیر  $\theta'$  با استفاده از خط سیر برگوارگی تعیین شود، واتنش برشی در هر نقطه محاسبه می‌گردد.

### مثالی از کاربرد برگوارگی در محاسبه واتنش

جهت تعیین واتنش، از تغییر جهت گیری برگوارگی در عرض پهنه در دو مقیاس مزوسکوپی<sup>۹</sup> و ماکروسکوپی<sup>۱۰</sup> استفاده شده است:



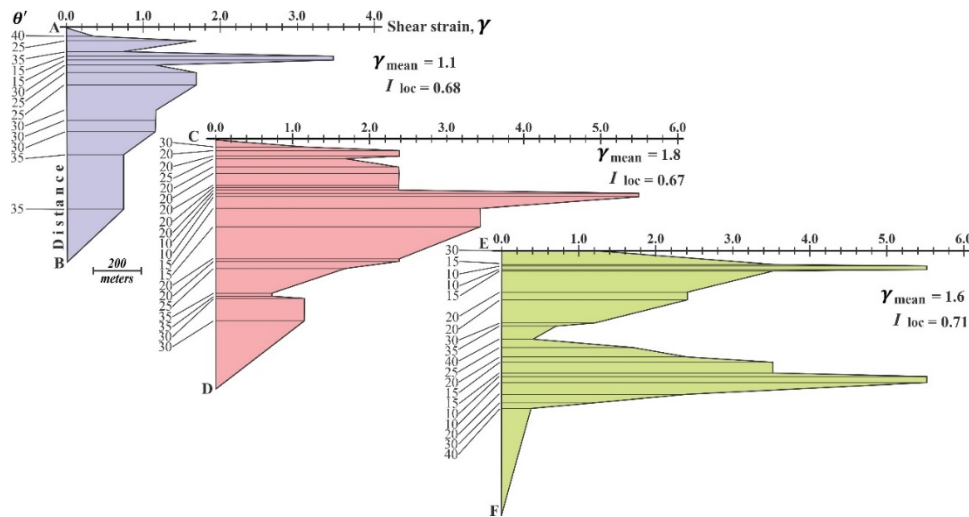
شکل ۷. الف- رخنمون پهنه برشی راستگرد در منطقه بوشاد که در آن انحنای برگوارگی در واحدهای ماسه سنگی مشهود است؛ ب- زاویه بین برگوارگی و سطح برش ( $\theta'$ ) اندازه‌گیری و واتنش برشی ( $\gamma$ ) با رابطه (۸) محاسبه شده است؛ ج- با رسم منحنی فاصله-واتنش در نیمرخ عرضی پهنه برشی، واتنش میانگین  $1/33$  تعیین شده است.



## محاسبه واتنش در مقیاس ماکروسکوپی

آمده‌اند. زاویه بین امتداد برگواری و راستای گسل بهلگرد (N290) تعیین شد سپس با استفاده از رابطه (۱) مقادیر  $\gamma$  به دست آمد. منحنی فاصله-واتنش مقدار واتنش برشی متوسط را در عرض پهنه تعیین می‌کند (شکل ۸ و جدول ۱).

در این پژوهش در سه مقطع AB، CD و EF عمود بر گسل بهلگرد پیمایش صحرایی انجام شده (شکل ۱) و برگواری در واحدهای ماسه‌سنگی برداشت و به نقشه در



شکل ۸: تعیین واتنش برشی با استفاده از انحنای برگواری در پهنه برشی بهلگرد. در مقاطع عرضی AB، CD و EF، با رسم منحنی فاصله-واتنش مقادیر واتنش برشی متوسط به دست آمده است. در هر موقعیت زاویه بین برگواری و سطح برش ( $\theta'$ ) اندازه‌گیری و واتنش برشی ( $\gamma$ ) با رابطه (۸) محاسبه شده است.

باشد. اختلاف بین مقادیر واتنش برشی متوسط در مقاطع ترسیمی زیاد است اما مقادیر شدت واتنش محلی بسیار نزدیک هم هستند. به منظور انتخاب مقدار واتنش برشی متوسط یا شدت واتنش محلی، مقدار درجه بیضی بودن (R) در پهنه برشی بهلگرد نیز با استفاده از روابط Krantz (۱۹۹۵) محاسبه شده است:

$$S_{H \max} = (1 - \gamma \tan \varphi)^{-1/2} \quad (\text{رابطه ۹})$$

$$S_{H \min} = (1 + \gamma \cot \varphi)^{-1/2} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

جدول ۱: مقادیر واتنش برشی در پهنه برشی بهلگرد

مقطع	$\gamma_{\max}$	$\gamma_{\text{mean}}$	$I_{\text{loc}}$	Lateral displacement(m)
AB	۳/۴۶	۱/۱	۰/۶۸	۱۰۵۰
CD	۵/۵	۱/۸	۰/۶۷	۱۸۸۶
EF	۵/۵	۱/۶	۰/۷۱	۱۷۶۲
mean		۱/۵	۰/۶۸	۱۵۶۶

مطابق شکل ۸ در منحنی فاصله-واتنش تقارن در عرض پهنه برشی وجود ندارد و این منحنی با قله‌هایی همراه است که متأثر از تغییرات واتنش می‌باشد. به نظر می‌رسد این تغییرات در خصوص مقطع EF ناشی از زیر پهنه‌های برشی



مفید هستند. چنانچه امکان اندازه گیری خطوط (اثر سطوح لایه بندی، دایک ها و سطح محوری چین) در دو جهت متفاوت در داخل و خارج پهنه برشی وجود داشته باشد (شکل ۴. ب) در این صورت می توان مقدار واتنش برشی و حجمی را با استفاده از معادلات زیر به دست آورد (Ramsay, 1980):

$$\gamma = \frac{\cot \alpha' \cot \beta - \cot \beta' \cot \alpha}{\cot \alpha' - \cot \beta'} \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

$$1 + \Delta = \frac{\cot \alpha - \cot \beta}{\cot \alpha' - \cot \beta'} \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

$\alpha$  و  $\beta$ : زاویه اولیه خطوط با دیواره های برش.

$\alpha'$  و  $\beta'$ : زاویه خطوط با دیواره های برشی بعد از دگرشکلی

تغییر حجم ( $\Delta$ ) در روش (Ramsay 1980) با فرض واتنش مستوی محاسبه شده است که در این صورت  $\Delta$  معادل با تغییر مساحت بیضی واتنش در صفحه XZ خواهد بود که در آن X به موازات برش و Z عرض پهنه برشی می باشد. بنابراین تغییر مساحت وابسته به مؤلفه برش محض وارده بر پهنه برشی نیز خواهد بود (شکل ۴. ج).

### مثالی از کاربرد جابه جاشدگی رگه ها در محاسبه واتنش

در این تحقیق ماسه سنگ های رخنمون یافته در پهنه برشی بهلگرد نمونه ای انتخاب شد که شامل دسته رگه های کششی و شکستگی های کششی هلالی شکل می باشد

$$R = \frac{S_{H \max}}{S_{H \min}} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

در این رابطه ( $\gamma$ ): واتنش برشی؛ ( $\phi$ ): زاویه بین محور طولی بیضی واتنش نهایی و جهت برش؛  $S_{H \max}$ : کشیدگی افقی بیشینه و  $S_{H \min}$ : کشیدگی افقی حداقل.

مقدار  $\phi$  در پهنه برشی بهلگرد با استفاده از زاویه بین محور چین بوشاد (N152, 39) و گسل بهلگرد (N290) ۴۲ درجه تعیین شد و مقدار درجه بیضی بودن پهنه مطابق جدول ۲ مشخص گردید:

جدول ۲: فراسنج های محاسبه شده با روابط Krantz (1995)

$\gamma_{\text{mean}}$	$I_{\text{loc}}$	$\phi$	$S_{H \max}$	$S_{H \min}$	R (Krantz, 1995)
۱/۵		۴۲	$\infty$		ممکن نیست
	۰/۶۸	۴۲	۱/۶	۰/۷۵	۲/۱

با توجه به وضعیت هندسی قرارگیری ساختارها در پهنه برشی بهلگرد، درجه بیضی بودن این پهنه با در نظر گرفتن مقدار واتنش برشی برابر ۰/۶۸ قابل محاسبه است. به منظور اطمینان از این نتیجه در یک مقطع عرضی در مسیر ترانشه جاده آسفالته بوشاد، مقدار درجه بیضی بودن پهنه با استفاده از نودول های شیلی واقع در ماسه سنگ های ائوسن نیز محاسبه شده است (جدول ۴).

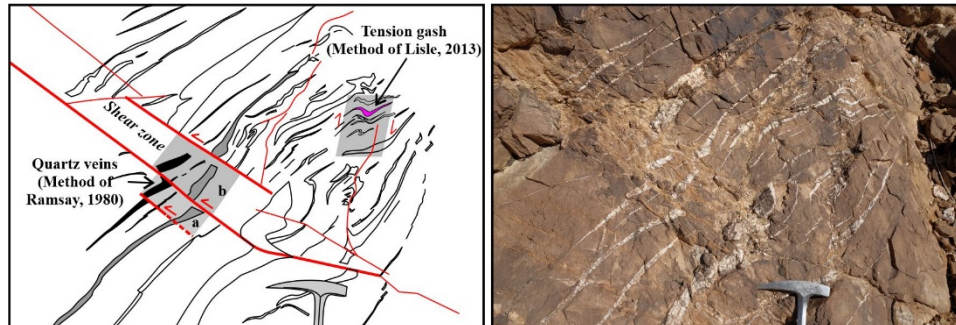
### ۵- جابه جاشدگی نشانگرها

سنجش کمی واتنش نهایی حاصل از دگرشکلی با استفاده از نشانگرهای انحراف یافته<sup>۱</sup> در پهنه های برشی

<sup>۱</sup>Deflection of marker

همانطوری که ملاحظه می‌شود مقادیر واتنش برشی محاسبه شده در هر دو روش به هم نزدیک هستند. اما تغییرات حجمی در روش Ramsay (1980) مقادیر بالاتری را نشان می‌دهد.

(شکل ۹). با استفاده از جابه‌جاشدگی دو دسته رگه کششی و معادلات (۱۲) و (۱۳)، واتنش برشی و تغییر حجم با روش Ramsay (1980) محاسبه و نتایج با شکستگی‌های کششی در روش Lisle (2013) مقایسه شده است (جدول ۳).



شکل ۹: نمونه‌ای از رخنمون پهنه‌های برشی مزدوج (برش راستگرد و چپگرد) در واحد ماسه‌سنگی انوسن در پهنه برشی بهلگرد. در این رخنمون واتنش برشی با استفاده از جابه‌جاشدگی رگه‌های کوارتز به روش Ramsay (1980) و نیز با استفاده از شکستگی‌های کششی به روش Lisle (2013) محاسبه شده است.

جدول ۳: محاسبه واتنش برشی و تغییر حجم در پهنه برشی بهلگرد مطابق با شکل ۹.

پهنه برشی	زیر پهنه	روش رمزی (۱۹۸۰)					روش لایل (۲۰۱۳)				
		$\alpha$	$\alpha'$	$\beta$	$\beta'$	$\gamma$	$\Delta$	$\alpha$	$\alpha'$	$\gamma$	$\Delta$
۲	a	۶۷	۵۷	۷۰	۸۴	۰/۳۵	۰/۸۸				
	b	۷۰	۶۰	۷۰	۶۵	۰/۳۶	۱				
	متوسط					۰/۳۶	۰/۹۴	۴۵	۷۰	۰/۳۸	۰/۵۲

داشته‌اند، بدست می‌آید. روش‌های متفاوتی بر پایه تجزیه و تحلیل‌های  $R_f/\phi'$  (جهت یافتگی ذرات گرشکل شده و  $R_f$ : نسبت بیضی بودن) ارائه شده است (Ramsay and Huber, 1983) که اصولاً وقت گیر هستند. از این‌رو برای بررسی عملی واتنش در مقیاس ناحیه‌ای روش‌های سریعی

### نشانه‌های بیضی یا دایره‌ای شکل اولیه

حقیقت آنست که همیشه در موقعیتی نیستیم که بتوانیم مقادیر واتنش برشی ( $\gamma$ ) را اندازه‌گیری کنیم اما می‌توان نسبت بیضی بودن ( $R$ ) را محاسبه کرد. این فراسنج واتنش با استفاده از نشانگرهایی که ابتدا شکل دایره‌ای یا بیضی



سپس مقدار  $R_f$  برای هر بیضی محاسبه گردید. در پایان میانگین ریاضی، هندسی و هماهنگ داده‌ها مطابق جدول ۴ به دست آمد.

با استفاده از میانگین داده‌های ریاضی<sup>۱۲</sup>، هندسی<sup>۱۳</sup> و هماهنگ<sup>۱۴</sup> به کار می‌روند که امکان استفاده از اطلاعات بیشتر ولی با دقت کمتر را در بعد ناحیه‌ای به محقق می‌دهد. در یک روش برای هر بیضی طول محور بزرگ  $(1+e_1)$  و طول محور کوچک  $(1+e_2)$  را به دست می‌آید سپس مقدار  $R_f$  از تقسیم طول بزرگ بر طول کوچک بیضی محاسبه می‌شود. روابط زیر برای محاسبه میانگین‌های ریاضی، هندسی و هماهنگ پیشنهاد شده است (Lisle, 1977):

$$R_f = \frac{R_{f_1} + R_{f_2} + \dots + R_{f_n}}{n} \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

$$G = (R_{f_1} \times R_{f_2} \times \dots \times R_{f_n})^{1/n} \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

$$H = \frac{n}{R_{f_1}^{-1} + R_{f_2}^{-1} + \dots + R_{f_n}^{-1}} \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

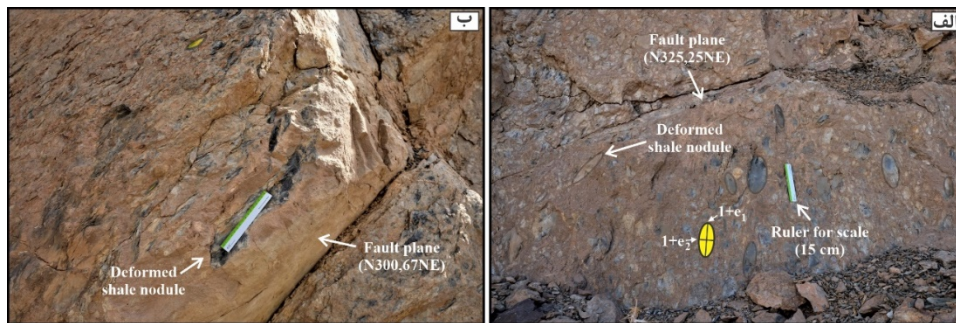
### مثالی از کاربرد نودول‌های شیلی در محاسبه واتنش

در مسیر جاده آسفالت‌ه بوشاد، نودول‌های شیلی در واحدهای ماسه‌سنگی ائوسن برون‌زدگی دارند. این نودول‌ها به صورت بیضی بوده و جهت یافتگی منظمی را نشان می‌دهند (شکل ۱۰). طول این رخنمون ۴۳۰ متر است که به موازات یال جنوبی چین بوشاد پیمایش شده است (شکل ۱). با فرض اینکه نودول‌های ابتدایی نیز بیضی شکل بوده‌اند می‌توان مقادیر  $R_f$  را محاسبه کرد. در این تحقیق طول محور بزرگ و کوچک ۲۰۰ بیضی اندازه‌گیری شد

Harmonic mean <sup>۱۴</sup>

Arithmetic mean <sup>۱۲</sup>

Geometric mean <sup>۱۳</sup>



شکل ۱۰: الف- نودول‌های شیل دگرشکل شده در ماسه‌سنگ‌های ائوسن که برای تعیین نسبت بیضی بودن واتنش در پهنه برشی به‌لگرد استفاده شده‌اند. ب- نودول‌های شیل دگرشکل شده که در نزدیکی گسل طویل‌شدگی بیشتری را نشان می‌دهد. جدول ۴. مقادیر نسبت بیضی بودن واتنش میانگین.

الگوی واتنش غالب مدنظر است دور از انتظار نیست و بسته به دقت مطالعه باید آنرا پذیرفت.

### بحث

در این پژوهش از روش‌هایی که مبتنی بر الگوهای زایشی و هندسی ساختارهاست جهت تعیین دگرشکلی در پهنه‌های برشی استفاده شده است. قابل ذکر است که روش‌های کنونی تعیین واتنش تنها برای پهنه‌های برشی شکل‌پذیر و شکننا-شکل‌پذیر کاربرد دارند. از آنجایی که رگه‌های کششی و برگوارگی در پهنه‌های برشی و نشانگرهای بیضی شکل در طبیعت به فراوانی یافت می‌شوند تمایل محققین برای استفاده از این روش‌ها را دوچندان می‌کند. سنجش دگرشکلی در مثال‌هایی از پهنه برشی به‌لگرد نشان داد که پاره‌ای از نتایج برای نمونه‌های یکسان متفاوت هستند. این موضوع تعجب آور نیست چراکه فرضیاتی که برای به‌کارگیری روش‌ها در نظر گرفته شده است متفاوتند. بنابراین تصمیم‌گیری در انتخاب روش مناسب نیاز به جمع‌آوری داده‌های اضافی و حتی تغییر در الگوی انتخابی خواهد داشت.

جدول ۴. مقادیر نسبت بیضی بودن واتنش میانگین.

میانگین	R (Lisle, 1977)	R (Krantz, 1995)
ریاضی	۱/۹۹	
هندسی	۱/۹۲	
هماهنگ	۱/۸۵	
مقاطع عرضی		۲/۱

نسبت بیضی بودن واتنش به‌دست آمده از روش Krantz (1995) با مقادیر روش Lisle (1977) اندکی اختلاف دارد که این تفاوت ناشی از بهره‌گیری از فراسنج‌های مورد استفاده در روش‌هاست چرا که به‌عنوان مثال واتنش برشی استفاده شده در روابط Krantz (1995) میانگین واتنش در پهنه برشی در امتداد مقاطع انتخابی است که با استفاده از برگوارگی تعیین شده‌اند و انتخاب مقاطع دیگر بر مقدار واتنش میانگین تأثیر خواهند گذاشت. همچنین روش سریع Lisle (2013) نیز دقت چندانی ندارد اگرچه به‌نظر این محقق میانگین هماهنگ نزدیک‌تر به مقدار واقعی بیضی واتنش زمین‌ساختی است. در هر صورت این خطاها در مقیاس ماکروسکوپی که در آن





## ارزیابی شکستگی‌های کششی در محاسبه واتنش

الف- در برآورد واتنش برشی با استفاده از شکستگی‌های کششی انتخاب الگو تأثیرگذار خواهد بود. روش Ramsay and Huber (1983) واتنش برشی متوسط ( $\gamma_{mean}$ ) را تخمین می‌زند که نسبت به روش (Lisle 2013) از مقادیر بالاتری برخوردار است. به نظر می‌رسد در این روش معرفی فراسنج شدت واتنش تمرکز یافته در کل پهنه ( $I_{loc}$ ) در بیان دگرشکلی مناسب‌تر باشد. اما انتخاب کدام روش پیشنهاد می‌شود؟ یک اصل مهم در انتخاب روش اندازه‌گیری واتنش آنست که واتنش به دست آمده بیانگر واتنش کل نمونه باشد. برای این منظور دانه نسبت به زمینه بایستی فعال در نظر گرفته شود یعنی دانه در خلال واتنش مقاوم باشد و زمینه واتنش پیدا کند (یساقی، ۱۳۹۸). این اصل در روش (Lisle 2013) در نظر گرفته شده است.

ب- (Lisle 2013) راه حلی ترسیمی ارائه داده است که سنجش واتنش برشی را آسان‌تر و با سرعت بیشتر انجام می‌دهد.

ج- روش (Lisle 2013)، برآوردی از تغییرحجم را با استفاده از شکستگی‌های کششی امکان‌پذیر می‌سازد که یک مزیت محسوب می‌شود.

د- تعیین واتنش برشی متوسط با استفاده از منحنی فاصله-واتنش، بر دگرشکلی در شرایط برش ساده پایه‌ریزی شده اما همیشه برش ساده به تنهایی بر منطقه حاکم نیست. بنابراین باید به منظور کنترل صحت این فرض از روش‌های دیگری برای ارزیابی واتنش برشی استفاده کنیم.

## ارزیابی بر گوارگی در محاسبه واتنش

در تعیین واتنش با استفاده از برگوارگی در مقیاس ماکروسکوپی به نظر می‌رسد توجه به نکات زیر ضروری باشد:

الف- اصل کلی در خصوص صفحات برگوارگی اینست که به موازات صفحه XY بیضوی واتنش نهایی جهت‌گیری می‌شوند. امروزه اثبات شده است که صفحه برگوارگی موازی صفحه محوری چین قرار می‌گیرد. اگر چین و کلیواژ در اثر نیروهای برشی واحدی ایجاد و توسعه یافته باشند انتظار ارتباط هندسی مشخص را داریم اما اگر چین‌ها و کلیواژ قبل از پهنه برشی ایجاد شده باشند ارتباط هندسی بین آنها حفظ می‌شود اما ممکن است کلیواژ ناشی از عملکرد پهنه برشی موازی سطح محوری چین‌ها نباشد در این صورت استفاده از کلیواژ سطح محوری چین راه حل صحیحی در اختیار ما قرار نمی‌دهد.

ب- مسیر برگوارگی انکساری (تغییر جهت صفحات برگوارگی در گذر از لایه‌های با ویسکوزیته متفاوت) که به خصوص در یال‌های چین متداول است، جدا از خط سیر واقعی برگوارگی متأثر از پهنه برشی می‌باشد. از این رو در مقاطع ترسیمی می‌بایست این داده‌ها شناسایی و حذف شوند.

ج- با تمام محدودیت‌های ذکر شده، نکته قابل توجه اینست که در برش ساده پیشرونده (دگرشکلی غیر هم محور) برگوارگی‌های مادی از حالت اولیه خارج شده و از نزدیک‌ترین مکان به سمت صفحه برش می‌چرخد در این میان اگرچه ممکن است انحرافات کوچکی در جهت‌گیری برگوارگی‌ها به صورت محلی ایجاد شود اما خط سیر کلی برگوارگی‌ها منطبق بر الگوی ذکر شده در پهنه‌های برشی خواهد بود.

د- در پهنه‌های برشی با دیواره‌های ناموازی (گوه‌ای) الگوی انحنای خط سیر برگوارگی متقارن نیست و بسته به



شکستگی‌های کششی، انحناهای فابریک موجود در سنگ‌ها، میزان جابه‌جاشدگی نشانگرها نشان داد که:

الف- در مقادیر برآورد شده واتنش با استفاده از شکستگی‌های کششی هلالی شکل، تفاوت‌های جزئی وجود دارد که این موضوع به فرضیات در نظر گرفته شده در روابط هندسی ارائه شده توسط محققین بر می‌گردد. روش Ramsay and Huber (1983) واتنش برشی متوسط ( $\gamma_{mean}$ ) را تخمین می‌زند که پیشنهاد می‌شود با فراسنج شدت واتنش تمرکز یافته در کل پهنه ( $I_{loc}$ ) ارائه شده توسط Schrank et al (2008) تعدیل شود. ضمن آنکه در تعیین واتنش با استفاده از شکستگی‌های کششی، روش Lisle (2013) به علت سادگی و سرعت در اجرا و محاسبه اطلاعات مفید دیگری (نظیر تغییر حجم) در اولویت است.

ب- بهره‌گیری از انحناهای برگوارگی جهت تعیین واتنش در مقیاس مزوسکوپی روش مفید و کارآمدی است و می‌توان از آن در تعیین الگوی واتنش غالب در مقیاس ناحیه‌ای نیز استفاده کرد. با وجود این شناخت ارتباط فابریک‌ها با ساختارهای منطقه‌ای، تفاوت الگوهای واتنش در پهنه‌های برشی با دیواره‌های موازی یا گوه‌ای شکل، انکسار برگوارگی متأثر از رفتار سنگ‌ها از جمله ملاحظات است که به دشواری‌های مطالعه در مقیاس ناحیه‌ای می‌افزاید. در روش‌های ارائه شده، اگرچه مساحت زیر منحنی فاصله-واتنش، واتنش برشی متوسط را تعیین می‌کند اما در اینجا نیز تعیین فراسنج شدت واتنش تمرکز یافته در کل پهنه ( $I_{loc}$ ) پیشنهاد می‌شود چراکه مقدار آن در مقاطع مختلف از پهنه برشی تفاوت ناچیزی را نشان می‌دهد.

ج- در پهنه برشی بهلگرد، مقایسه روش‌های میزان جابه‌جاشدگی نشانگرها و شکستگی‌های کششی در تعیین واتنش برشی مقادیر یکسانی را بدست می‌دهد.

زاویه گوه و میزان واتنش برشی متفاوت خواهد بود (Mandal et al., 2002).

ه- توجه به پیوستگی داده‌ها و دقت اندازه‌گیری  $\theta$  در مقیاس مزوسکوپی مهم است زیرا اختلاف بسیار کوچک در مقدار  $\theta$  تفاوت‌های بزرگی در میزان واتنش برشی به وجود می‌آورد که ممکن است سبب تغییر در منحنی فاصله-واتنش شود و هنگام محاسبه جابه‌جایی کلی و واتنش برشی میانگین خطاهای محاسبه‌ای بزرگی ایجاد کند.

### ارزیابی نشانگرهای بیضی شکل در محاسبه واتنش

در خصوص نشانگرهای بیضی شکل در پهنه برشی بهلگرد باید اذعان داشت که:

الف- میزان واتنش محاسبه شده در نودول‌های شیل نمی‌تواند بیانگر میزان واتنشی باشد که کل توده سنگ متحمل شده است چراکه نودول‌های شیل (نامقاوم) در زمینه ماسه سنگ (مقاوم) قرار گرفته و به صورت غیرفعال عمل می‌کند در این حالت میزان واتنش نودول‌ها بیشتر از زمینه خواهد بود.

ب- از آنجاکه نسبت بیضی بودن واتنش نهایی ( $R$ ) می‌بایست در صفحه  $XZ$  اندازه‌گیری شود تا بیشترین مقدار را داشته باشد در رخنمون‌هایی که نودول‌های شیل مطالعه شده‌اند امکان شناسایی این صفحات امکان‌پذیر نبوده است.

### نتیجه‌گیری

هندسده ساختارها در پهنه‌های برشی ابزار مناسبی در تعیین فراسنج‌های واتنش می‌باشند. اندازه‌گیری کمی واتنش برشی در پهنه برشی بهلگرد با انتخاب نمونه‌هایی از

د- در خصوص نشانگرهای بیضی شکل، با وجود اینکه نمی‌توان برآورد دقیقی از واتنش زمین‌ساختی با میانگین‌گیری از  $R_f$  ها داشت اما در مقیاس ناحیه‌ای می‌توان با برداشت اطلاعات بیشتر ولی با دقت کمتر، از روش‌های سریع برای اندازه‌گیری میانگین نسبت بیضی بودن واتنش بهره جست که در پهنه برشی بهلگرد این مقدار به مقدار بدست آمده از روش Krantz (1995) نزدیک است.

از آنجا که روابط هندسی ارائه شده توسط محققین مختلف بر پایه فرضیاتی بنا نهاده شده است و شرایط برای تمامی مکان‌ها یکسان نمی‌باشد از این رو پیشنهاد می‌شود در صورت در دسترس بودن نمونه مناسب در صحرا، به‌منظور صحت سنجی نتایج از چندین روش برای ارزیابی واتنش برشی استفاده شود.



- Krantz, R.W., 1995. The transpressional strain model applied to strike-slip, oblique-convergent and oblique-divergent deformation. *Journal of Structural Geology* 17 (8), 1125-1127.
- Lisle, R.J., 1977. Estimation of tectonic strain ratio from the mean shape of deformed elliptical markers. *Geol. Nijnb* 56, 140-144.
- Lisle, R.J., 2013. Shear zone deformation determined from sigmoidal tension gashes. *Journal of Structural Geology* 50, 35-43.
- Lister, G.S. and Snoko, A.W., 1984. S-C mylonites. *Journal of Structural Geology* 6, 617-638.
- Lister, G.S. and Williams, P.F., 1979. Fabric development in shear zones: theoretical controls and observed phenomena. *Journal of Structural Geology* 1, 283-297.
- Mandal, N., Samanta, S.K. and Chakraborty, C., 2002. Flow and strain pattern at termination of tapered shear zones. *Journal of Structural Geology* 24, 297-309.
- Marshak, S., and Mitra, G., 1988. Basic methods of structural geology. Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- Nicholson, R. and Pollard, D., 1985. Dilation and linkage of echelon cracks. *Journal of Structural Geology* 7, 583-590.
- Ramberg, H., 1975. Particle paths, displacement and progressive strain applicable to rocks. *Tectonophysics* 28, 1-37.
- Ramsay, J.G. and Graham R.H., 1970. Strain variation in shear belts. *Canadian Journal of Earth Sciences* 7 (3), 786-813.
- Ramsay, J.G. and Huber, M.I., 1983. The techniques of modern structural geology. Volume 1: Strain analysis. Academic Press, London, 307 p.
- Ramsay, J.G., 1980. Shear zone geometry: a review. *Journal of Structural Geology* 2, 83-99.
- Schrank, C.E., Handy, M.R. and Fousseis, F., 2008. Multiscaling of shear zones and the evolution of
- افتخارنژاد، ج.، ۱۳۶۶. نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورقه بیرجند. سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- یساقی، ع.، ۱۳۹۸. مبانی دگرشکلی در زمین ساخت، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس.
- Beach, A., 1975. The geometry of en-echelon vein arrays. *Tectonophysics* 28, 245-263.
- Cloos, E., 1947. Oolite deformation in South Mountain fold Maryland. *Geological Society of America Bulletin*. 58, ۸۴۳-۹۱۸.
- Cobbold, P.R. and Quinquis, H., 1980. Development of sheath folds in shear regions. *Journal of Structural Geology* 2, 119-126.
- Cobbold, P.R., 1977. Description and origin of banded deformation structures. I. Regional strain, local perturbations and deformation bands. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 14, 1721-1731.
- Coward, M.P., 1976. Strain within ductile shear zones. *Tectonophysics* 34, 181-197.
- Davis, G.H., Reynolds, S.J. and Kluth, Ch.F., 2012. Structural geology of rocks and regions. J. Wiley and Sons press, 861 p.
- Fossen, H., Tikoff, B., 1993. The deformation matrix for simultaneous simple shearing, pure shearing, and volume change, and its application to transpression/transension tectonics. *Journal of Structural Geology*. 15, 413-422.
- Ghosh, S.K., 1975. Distortion of planar structures around rigid spherical bodies. *Tectonophysics* 28, 185-208.
- Ghosh, S.K., 1982. The problem of shearing along axial plane foliations. *Journal of Structural Geology* 4, 63-67.
- Hobbs, B.E., Means, W.D. and Williams, P. F., 1982. The relationship between foliation and strain: an experimental investigation. *Journal of Structural Geology* 4, 411-428.

## منابع



the brittle-to-viscous transition in continental crust. *Journal of Geophysical Research* 113, B01407.

Sibson, R.H., 1977. Fault rocks and fault mechanisms. *J. Geol. Soc. Lond.* 133, 191–213.

Siddans, A.W.B., 1972. Slaty cleavage - a review of research since 1815. *Earth-Science Reviews* 8, 205-232.

Snyder, D.B. and Kjarsgaard, B.A., 2013. Mantle roots of major Precambrian shear zones inferred from structure of the Great Slave Lake shear zone, Northwest Canada. *Lithosphere* 5, 539–546.

Sorby, H.C., 1853. On the origin of slaty cleavage. *Edinburgh New Philosophical Journal*. J 55, 137-148.

Treagus, S.H., 1983. A theory of finite strain variation through contrasting layers, and its





## ارزیابی نقش ساختارها در چگونگی توزیع هیدروکربور در سازندهای سروک و ایلام با استفاده از منطق فازی در ناحیه هینترلند بندرعباس

فاطمه جهادگر<sup>۱</sup>، زهرا ملکی<sup>۲\*</sup>، علی سلگی<sup>۳</sup>، مهران آرین<sup>۴</sup>، علی سربی<sup>۵</sup>

۱- دانشجوی دکتری تکنیک، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

۲- استادیار گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

۳- دانشیار گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

۴- استاد گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

۵- استادیار گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۱۸

### چکیده

سازندهای سروک و ایلام در حوضه رسوبی زاگرس به عنوان سازندهایی با قابلیت مخزنی شناخته می شوند. بیش از نیمی از میدین هیدروکربوری در حوضه زاگرس در افق های سروک و ایلام دارای هیدروکربور است. در این تحقیق به منظور شناسایی مناطق دارای پتانسیل هیدروکربوری برای افق های سروک و ایلام در ناحیه هینترلند بندرعباس پارامترهایی نظیر رخنمون سازندها، گسل های اصلی، دیاپیرهای نمکی، نقشه های هم ضخامت و حجم رسوبات فوقانی سازندها از نقشه زمین شناسی منطقه و نیز داده های چاه استخراج گردید. با طراحی یک شبکه استنتاجی بین داده ها و منطق فازی مناطق با پتانسیل بالای هیدروکربوری برای افق های سروک و ایلام در ناحیه هینترلند بندرعباس شناسایی گردیدند. این ناحیه به لحاظ پتانسیل اکتشافی در افق های مخزنی سروک و ایلام به عنوان یک منطقه با قابلیت نسبتاً ضعیف شناسایی شد. به گونه ای که ۶۸ درصد از منطقه هینترلند دارای پتانسیل هیدروکربوری پایین، ۱۸ درصد دارای پتانسیل هیدروکربوری متوسط و تنها ۱۴ درصد دارای پتانسیل هیدروکربوری بالایی جهت اکتشاف در افق سروک و ایلام می باشند. این درحالی است که با در نظر گرفتن اثر تاقدیس ها درصد های یاد شده برای مناطق با پتانسیل بالای هیدروکربوری به ۴٫۳ درصد کاهش پیدا کرد. که مجموعاً به نظر می رسد تاقدیس های گشو جنوبی، بستانه، کیسن، نمک غربی و سورو در افق های سروک و ایلام دارای پتانسیل هیدروکربوری هستند.

**واژه های کلیدی:** توزیع هیدروکربور، منطق فازی، عوامل زمین ساختی، سازند سروک و ایلام



## Evaluation of the role of structures in the distribution of hydrocarbons in Sarvak and Ilam Formations using fuzzy logic in the Bandar Abbas hinterland

Fateme Jahadgar<sup>1</sup>, Zahra Maleki<sup>2\*</sup>, Ali Solgi<sup>3</sup>, Mehran Arian<sup>4</sup>, Ali Sorbi<sup>5</sup>

۱- PhD student of Tectonics, Department of Geology, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

۲- Assistant Professor, Department of Geology, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

۳- Associate Professor, Department of Geology, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

۴- Professor, Department of Geology, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

۵- Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of basic sciences, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran

### Abstract

The Sarvak and Ilam Formations in the Zagros sedimentary basin are known as hydrocarbon reservoir formations. More than half of the hydrocarbon fields in the Zagros Basin on the Sarvak and Ilam horizons contain hydrocarbons. In this research, to identify areas with hydrocarbon potential of the horizon of Sarvak and Ilam at Bandar Abbas hinterland, parameters such as outcrops of formations, main faults, salt plugs, isopach maps and upper sediment volume of formations from the geological map of the region and well data were extracted. With designing a network inference among data and using Fuzzy logic method with the high hydrocarbons, potential of the Sarvak and Ilam horizons were identified in the Bandar Abbas hinterland. This area identified as a relatively weak area in terms of exploratory potential in Sarvak and Ilam reservoir horizons. 68% of the hinterland region has low hydrocarbon potential, 18% has medium hydrocarbon potential and only 14% has high hydrocarbon potential for exploration in Sarvak and Ilam horizons. However, considering the effect of anticlines, the mentioned percentages for areas with high hydrocarbon potential reduced to 4.3%. Together, it seems that the anticlines of South Gashu, Bastaneh, Kish, West Namak and Suru have hydrocarbon potential in Sarvak and Ilam horizons.

**Keywords:** hydrocarbon distribution, fuzzy logic, structural factors, Sarvak and Ilam Formations



## مقدمه

زمین شناسی، ژئوشیمی و ژئوفیزیک را با یک دیگر ترکیب و انطباق نسبتاً خوبی بین نقشه نهایی تولید شده و میادین نفت و گاز منطقه مورد مطالعه ملاحظه نمودند.

امین زاده (Aminzadeh, 1992) معتقد است با توجه به چند رشته ای بودن اکتشاف نفت و قوانین حاکم بر آن ها می توان با ترکیب این دو عامل سیستم های خبره را برای حل مشکلات دشوار اکتشافی بکار گرفت. لذا با استفاده از شبکه های منطق فازی و ادغام منابع دانش مختلف می توان برای عملیات اکتشاف بهره گرفت.

در این مطالعه شناسایی مناطق دارای پتانسیل بالای اکتشافی برای افق های مخزنی سروک و ایلام با عملگرهای فازی و تلفیق آن ها بر مبنای روش های متکی بر دانش با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی انجام پذیرفت و مناطق مناسب معرفی گردید. از جمله نقاط قوت این مطالعه می توان به ارزیابی افق مخزنی مشخص در گستره مطالعاتی وسیع اشاره نمود. بدین منظور با تلفیق داده های زمین شناسی و چاه ها همچون رخنمون سطحی واحدهای اثرگذار، گسل های اصلی، حجم رسوبات فوقانی بر روی سازندهای مهم نظیر کژدمی، سروک، ایلام، گورپی و پابده به همراه تغییرات ضخامت هر یک از افق ها، مناطق دارای پتانسیل شناسایی شدند. این مطالعه در منطقه هینترلند بندرعباس انجام گرفت.

## زمین شناسی و چینه شناسی منطقه

منطقه مورد مطالعه محدوده ای از جنوب زاگرس است، که حد خاوری آن گسله زندان- میناب وحد جنوبی آن حد جبهه چین های زاگرس است که از درون خلیج فارس عبور می کند. از نگاه تکتونیکی، ساختارهای ناحیه بیشتر تناوبی از تاقدیس ها و ناودیس های موازی اند که روند عمومی آنها کم و بیش خاوری — باختری است. با این وجود، در مجاورت با گنبد های نمکی سری هرمز

صنعت نفت جهت انجام عملیات اکتشاف، مطالعات متعددی همچون زمین شناسی، ژئوشیمی و ژئوفیزیک را برای دست یابی به اطلاعاتی که وجود هیدروکربور در منطقه را با احتمال بالاتری به اثبات برساند، انجام میدهد. در واقع عملیات اکتشاف نفت مبتنی بر تصمیم گیری چند معیاره بوده و پیش از انجام عملیات حفاری بین اطلاعات بدست آمده از مطالعات ارتباط برقرار نموده و مناسب ترین مکان را پیشنهاد می دهند. منطق فازی که بر مبنای تصمیم گیری چندمعیاره است؛ اولین بار در سال ۱۹۶۵ توسط پروفیسور لطفی عسگرزاده معرفی گردید ( Lotfi, ۱۹۶۵). این منطق بر خلاف دیگر منطق های دو ارزشی که تنها بر روی درستی و نادرستی یک موضوع بحث می کنند یک منطق چند ارزشی است. برای اکتشاف هیدروکربور فاکتورهای متعددی ارزیابی می شود اما با این حال وجود یا عدم وجود هیدروکربور در یک منطقه را نمی توان با قطعیت کامل تعیین نمود لذا اکتشاف نفت نیز چند ارزشی محسوب می شود. به عبارت بهتر در اکتشاف اولویت بندی بر مبنای احتمال وجود هیدروکربور صورت می پذیرد و با در نظر گرفتن فاکتورهای مختلف اکتشافی، مناطق می توانند در اولویت اکتشافی پایین تا بسیار بالا تقسیم بندی شوند.

تاکنون محققین متعددی با استفاده از تصمیم گیری چندمعیاره و منطق فازی اقدام به شناسایی و پتانسیل یابی مناطق دارای ارزش اکتشافی نموده اند ( Abd Latef and Kahar, 2008; Jagadish and Rao, 2010; Bingham et al., 2012 and 2011; Tounsi, 2005; Malczewski, 1991; Barrell, 2000b; An et al., 1991; Gao et al., 2000; Zargani et al., 2003; Liping, 2011; Liu et al., 2008; Carranza, 2002; Aminzadeh, 1994; Amiri et al., 2015).

امیری و همکاران (Amiri et al., 2015) در تهیه نقشه پتانسیل هیدروکربوری با استفاده از جی ای اس داده های



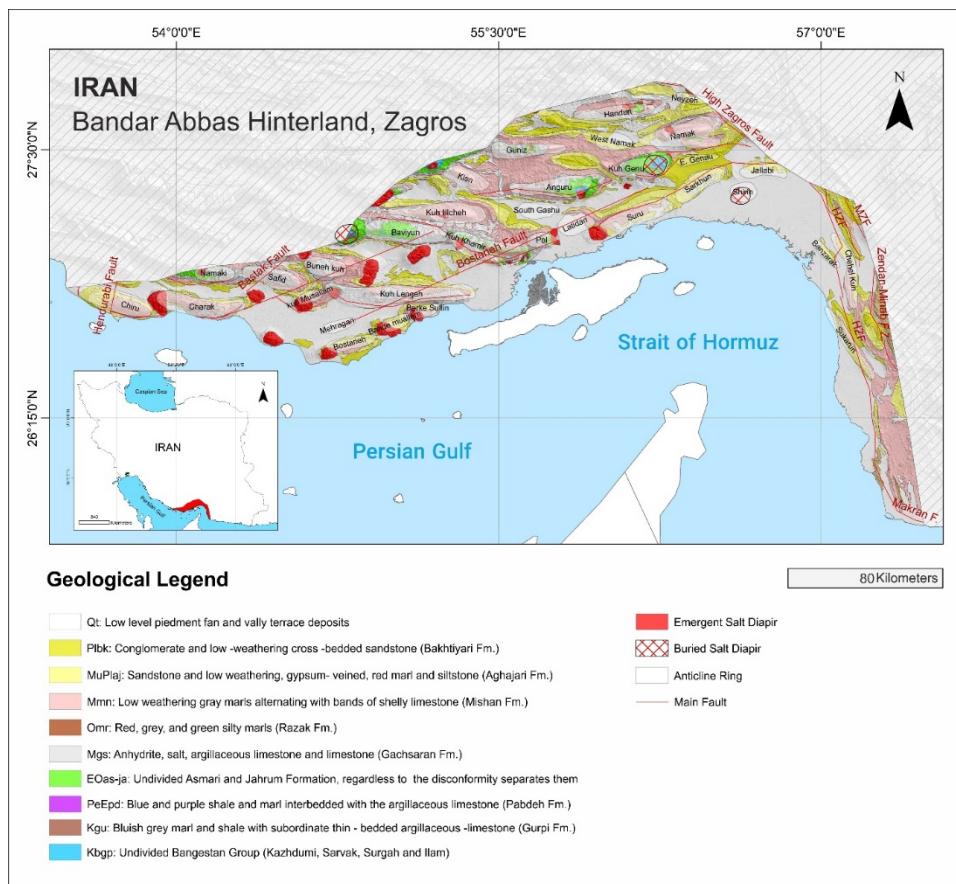
میشان از ویژگی های این ناحیه است. وجود سازند گچساران، چشمه های نفتی، گچ ترش، چشمه های آبگرم گوگردی از ویژگی های هینترلند بندرعباس و نشانگر وجود میدان های هیدروکربنی در این ناحیه است (آقانباتی، ۱۳۸۵).

تغییراتی در روند چین ها دیده می شود. بیشترین تغییر در مجاورت گسل میناب دیده می شود که حرکت های امتداد لغز و شیب لغز آن تغییرات قابل توجهی در روند چین ها ایجاد نموده است (شکل ۱).

غالب تاقدیس های این ناحیه به جز شش مورد کلی از رسوبات گروه فارس پوشیده شده اند و ضخامت قشر رسوبی در این ناحیه به مراتب بیشتر از ناحیه فارس است و از این جهت با فروافتادگی دزفول شباهت دارد. تاقدیس های این ناحیه دارای تفاوت هایی در راستای محوری هستند و می توان آن ها را در سه دسته مورد بررسی قرار داد: دسته اول تاقدیس هایی که امتداد محوری به موازات تراست زاگرس دارند، مانند: تاقدیس فراقون، تاقدیس گهکم و تاقدیس خوش. دسته دوم تاقدیس هایی که امتداد محوری آن ها به موازات گسله زندان-میناب است، مانند: تاقدیس های میناب، کریان و مهمانی. و بین امتداد محوری دسته اول و دسته دوم یک زاویه ۱۲۰ درجه قابل استنباط است. و دسته سوم تاقدیس هایی هستند که امتداد آن ها در کنترل گسله های پی سنگ است و این دسته دربرگیرنده تاقدیس های غالب منطقه است. اکثریت تاقدیس های هینترلند بندرعباس دارای راستای محوری خاوری-باختری و شمال خاوری- جنوب باختری هستند که در تضاد با امتداد کلی تاقدیس های زاگرس که شمال باختری- جنوب خاوری شناخته شده اند می باشد (مطیعی، ۱۳۷۴).

### چینه شناسی منطقه مورد مطالعه

از نگاه سنگ چینه ای بخشی از ترادف های ترشیاری (بوردیگالین- پلیستوسن) هینترلند بندرعباس، از نظر رخساره و ستبرای شباهت هایی با فروافتادگی دزفول دارد (آقانباتی، ۱۳۸۵). با این وجود تغییر رخساره سازند گچساران گاهی به سازند رازک و گاهی به سازند مول و نیز وجود پاره سازند سنگ آهک گوری در قاعده سازند



شکل ۱. نقشه زمین شناسی و ساختارهای مهم در منطقه هینترلند بندرعباس (با تغییر از طباطبایی ۱۹۹۷)

## روش تحقیق

توابع عضویت فازی، امتیاز فازی به هر لایه اطلاعاتی تعلق گرفت و با تلفیق نقشه های فازی شده با یکدیگر به کمک شبکه استنتاجی طراحی شده و عملگرهای فازی، مناطق با پتانسیل بالای اکتشافی برای افق های سروک و ایلام شناسایی و معرفی گردیدند.

## بررسی فاکتورهای مؤثر و نحوه انتخاب آنها

### رخنمون سازندها

بدیهی است در مناطقی که سازندهایی با قابلیت سنگ منشا، مخزن و پوش سنگ و یا سازندهای قدیمی تر از آن رخنمون سطحی داشته باشند آن منطقه فاقد ارزش هیدروکربوری برای افق مذکور خواهد بود. از آنجایی که سیستم هیدروکربوری مورد بررسی در این مطالعه شامل سازندهای کژدمی با قابلیت سنگ منشا، سازندهای سروک و ایلام با قابلیت سنگ مخزن و سازندهای گورپی و پایده با

هدف از این مطالعه شناسایی مناطق مستعد تولید هیدروکربور توسط سازند کژدمی به عنوان سنگ منشا، سازندهای ایلام و سروک به عنوان سنگ مخزن و سازندهای گورپی و پایده به عنوان پوش سنگ می باشد. به عبارت بهتر در این تحقیق تلاش شده است تا مناطقی که سنگ منشا، مخزن و پوش سنگ دارای شرایط مناسبی به منظور انباشت هیدروکربور هستند شناسایی و به عنوان مناطق با ارزش معرفی شوند. بدین جهت فاکتورهای اثر گذار نظیر رخنمون سازندها، گنبد های نمکی، گسل ها، ضخامت سازندها و نیز حجم رسوبات فوقانی سازندها از نقشه زمین شناسی منطقه و اطلاعات چاه های حفاری شده استخراج گردید.

بدین منظور لایه های اطلاعاتی هینترلند بندرعباس بر اساس نظر کارشناسی و اهمیتشان امتیاز دهی شدند. سپس با استفاده از





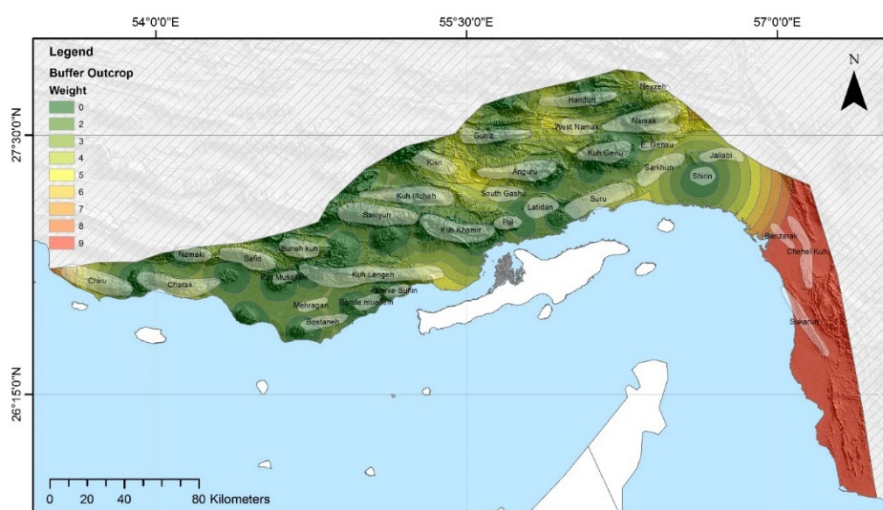
قرار گرفتن در عمق تدفین کم را نیز از آن ها بگیرد. به عبارتی حرکت رو به بالای نمک ژرفای تدفین سنگ منشا را کاهش می دهد و این امر منجر می شود که سنگ منشا از بلوغ کافی جهت تولید هیدروکربور برخوردار نشود. همچنین افزایش تخلخل و تراوایی پوش سنگ هنگام بالا آمدن توده نمک منجر به کاهش قابلیت سنگ پوشش خواهد شد. حرکت رو به بالای توده نمک کاهش ضخامت پوش سنگ را نیز به دنبال خواهد داشت (Davis, and Engelder, 1987; Szabo and Kheradpir, 1987). با توجه موارد یاد شده می توان دریافت که در حرکت صعودی نمک، پوش سنگ و سنگ منشا در شرایط خوبی قرار نمی گیرند. لذا گنبد ها به عنوان دومین عامل مهم مخرب برای انباشت هیدروکربور در نظر گرفته شد. گنبد های نمکی همچون رخنمون سازندها با دور شدن از آن ها پتانسیل هیدروکربوری افزایش می یابد. لذا مناطقی که در نزدیکی گنبد های نمکی هستند امتیاز صفر و مناطقی که در فاصله به مراتب دورتری هستند حداکثر امتیاز ۹ در نظر گرفته شد. از آنجایی که رخنمون سطحی سازندها و نیز گنبد های نمکی تاثیر مخرب دارند و با دور شدن از آن ها پتانسیل افزایش می یابد لذا این دو مورد با هم تلفیق و به عنوان نقشه واحد در نظر گرفته شدند (شکل ۲).

قابلیت پوش سنگ می باشد. لذا در مناطقی که سازندهای کژدمی، ایلام، سروک، گورپی، پابده و سازندهای قدیمی تر از آن ها رخنمون داشته باشند آن مناطق فاقد ارزش هیدروکربوری خواهند بود.

از نقشه زمین شناسی ناحیه هیتترلند در مناطقی که سازندهای پابده، گورپی، ایلام، سروک، گروه بنگستان، کژدمی و واحدهای قدیمی تر دارای رخنمون بودند، استخراج گردید. با دور شدن از این رخنمون ها پتانسیل تولید هیدروکربور برای سازندهای کژدمی و نیز پتانسیل مخزنی سازندهای سروک و ایلام (گروه بنگستان) افزایش می یابد. لذا مناطقی که در نزدیکی این رخنمون ها هستند امتیاز صفر و مناطقی که در فاصله به مراتب دورتری هستند حداکثر امتیاز ۹ در نظر گرفته شد.

### گنبد های نمکی

در منطقه هیتترلند بندرعباس گنبد های نمکی متعددی حضور دارند. حرکت روبه بالای گنبد های نمکی می تواند لایه های رسوبی به ویژه سنگ های منشا را تا آن حد بالا بیاورد که تحت تاثیر فرسایش فیزیکی قرار بگیرند و علاوه بر کاهش ضخامت سنگ های منشا، توان زایشی هیدروکربور به دلیل

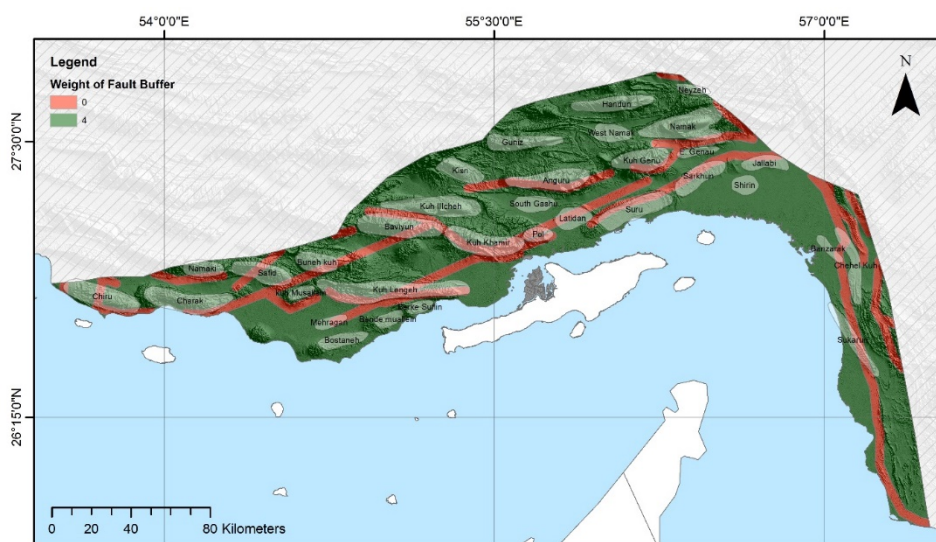


شکل ۲: نقشه حریم بندی فاصله از رخنمون ها به همراه امتیاز و اهمیت آن ها (مناطق سبز رنگ مناطق با کمترین اهمیت و مناطق قرمز رنگ مناطق با بالاترین اهمیت) گسل ها

## گسل ها

گسل های اصلی منطقه اقدام به تهیه نقشه فاصله از گسل ها گردید. مناطق با فاصله کمتر از ۲ کیلومتر از گسل به عنوان مناطق با پتانسیل کمتر و امتیاز صفر و مناطق با فاصله بیشتر ۲ کیلومتر از گسل به عنوان مناطق با پتانسیل بیش تر اکتشافی در نظر گرفته شدند و به آن امتیاز ۴ تعلق گرفت (شکل ۳). با فاصله گرفتن از گسل ها پتانسیل اکتشافی افزایش خواهد یافت.

هینترلند بندرعباس دارای گسل های پی سنگی و عمقی فراوانی است. گسل های بستک و بستانه از جمله مهم ترین و اثرگذار ترین گسل های این منطقه محسوب می شوند. عملکرد گسل های این منطقه به همراه فعالیت دیاپیرهای نمکی تغییر سبک چین خوردگی و نیز تغییر روند ساختارهای تاقدیسی را به همراه داشته است. لذا با استخراج



شکل ۳. نقشه حریم بندی فاصله از گسل ها به همراه امتیاز و اهمیت آن

and van der Pluijm, 1999, Rosas et al. (2006), مناطق (Spratt et al., 2004; Stephens, 2001 and 2009) با ضخامت زیاد بیانگر بخش عمیق حوضه و نواحی با ضخامت کم بیانگر بخش کم عمق تر حوضه در زمان رسوبگذاری می باشند (Pirouz et al, 2008). رسوبگذاری در بخش عمیق حوضه در زمان نهشته شدن سازند هایی با قابلیت سنگ منشا می تواند شرایط مناسبی جهت حفظ و انباشت مواد آلی را در گذشته ایجاد نموده باشد. لذا مناطق با ضخامت زیاد سازند کژدمی علاوه بر دارا بودن مواد آلی مناسب می توانند پتانسیل بالاتری نیز جهت تولید هیدروکربور داشته باشند. این درحالی است که قرارگیری سازندها با قابلیت مخزنی در بخش عمیق می تواند منجر به

## نقشه های هم ضخامت

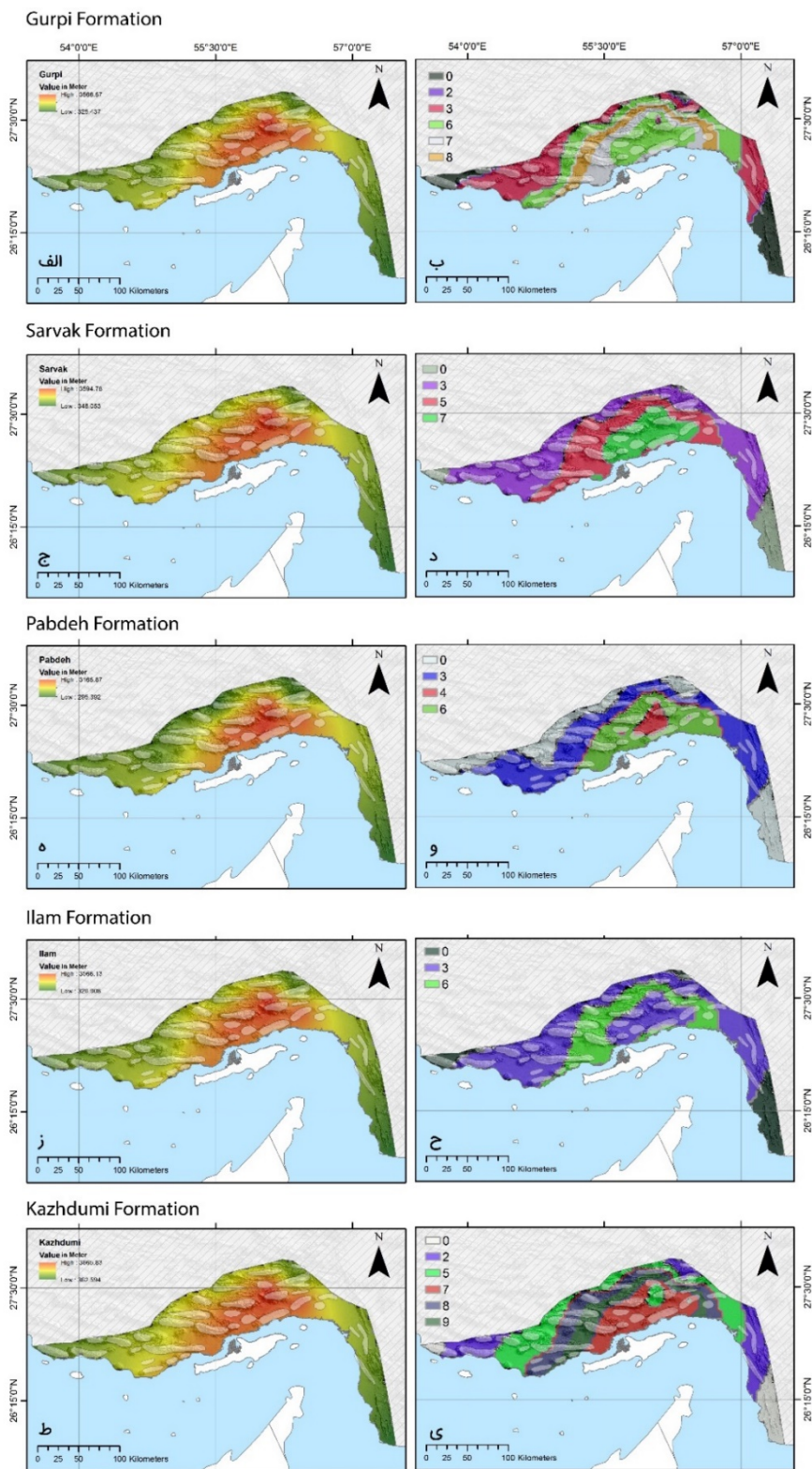
نقشه های هم ضخامت ابزار مهم و اثر گذاری هستند که به وسیله آن می توان چگونگی روند رسوبگذاری و پالئوژئوگرافی حوضه رسوبی در یک ناحیه را مشخص نمود. Kay (۱۹۴۵) برای نخستین بار از نقشه های هم ضخامت به منظور ارزیابی توالی ساختاری استفاده نمود (Howell and van der Pluijm, 1999). نقشه های هم ضخامت بالا آمدگی ها و فرونشست حوضه ناشی از تحولات پی سنگ را به خوبی بازگو می کنند (Setudehnia, 1978; Bahroudi and Talbot, 2003) Howell, Calvert (1974, Cheng-Long Shaw, 1996



جدول ۱. امتیازهای تعلق گرفته به سازندهای گورپی، سروک، پابده، ایلام و کژدمی بر اساس تغییرات ضخامت

سازند سروک		سازند کژدمی	
امتیاز	ضخامت (متر)	امتیاز	ضخامت (متر)
۵	۱۰۰-۰	۳	۵۰-۰
۶	۲۰۰-۱۰۰	۵	۱۰۰-۵۰
۴	۳۰۰-۲۰۰	۶	۱۵۰-۱۰۰
۳	۴۰۰-۳۰۰	۸	۲۰۰-۱۵۰
سازند ایلام		۹	۲۵۰-۲۰۰
سازند گورپی		سازند پابده	
امتیاز	ضخامت (متر)	امتیاز	ضخامت (متر)
۴	۵۰-۰	۲	۵۰-۰
۵	۱۰۰-۵۰	۳	۱۰۰-۵۰
سازند پابده		۴	۱۵۰-۱۰۰
امتیاز	ضخامت (متر)	۵	۲۰۰-۱۵۰
۱	۳۰۰-۰	۶	۲۵۰-۲۰۰
۳	۶۰۰-۳۰۰	۷	۳۰۰-۲۵۰
۴	۹۰۰-۶۰۰	۸	۴۰۰-۳۰۰
۲	۱۳۰۰-۹۰۰		

کاهش تخلخل سازندها و نیز کاهش پتانسیل مخزنی شود. همچنین بالا آمدگی ها علاوه بر اینکه می تواند منجر به فرسایش شود، اثرات مخربی را بر روی سنگ منشا و پوش سنگ خواهد داشت. این اثرات می تواند شامل عدم تجمع مواد آلی و یا ایجاد شرایط اکسیداسیون و تخریب مواد آلی را به دنبال داشته باشد. اگرچه بالا آمدگی می تواند منجر به افزایش تخلخل و محفوظ ماندن تخلخل اولیه در سنگ های مخزن گردد با این حال در ارزش گذاری هر یک از سازندهای کژدمی، سروک، ایلام، گورپی و پابده موارد یاد شده لحاظ گردید. براین اساس لایه های ایجاد شده متناسب با اهمیتشان بر اساس تغییرات ضخامت مطابق جدول (۱) امتیاز دهی شدند (شکل ۴).



شکل ۴. نقشه حجم رسوبات فوقانی به همراه امتیازهای تعلق گرفته به آن برای سازندهای گورپی، سروک، پابده، ایلام و کزدومی



## نقشه رسوبات فوقانی سازندها

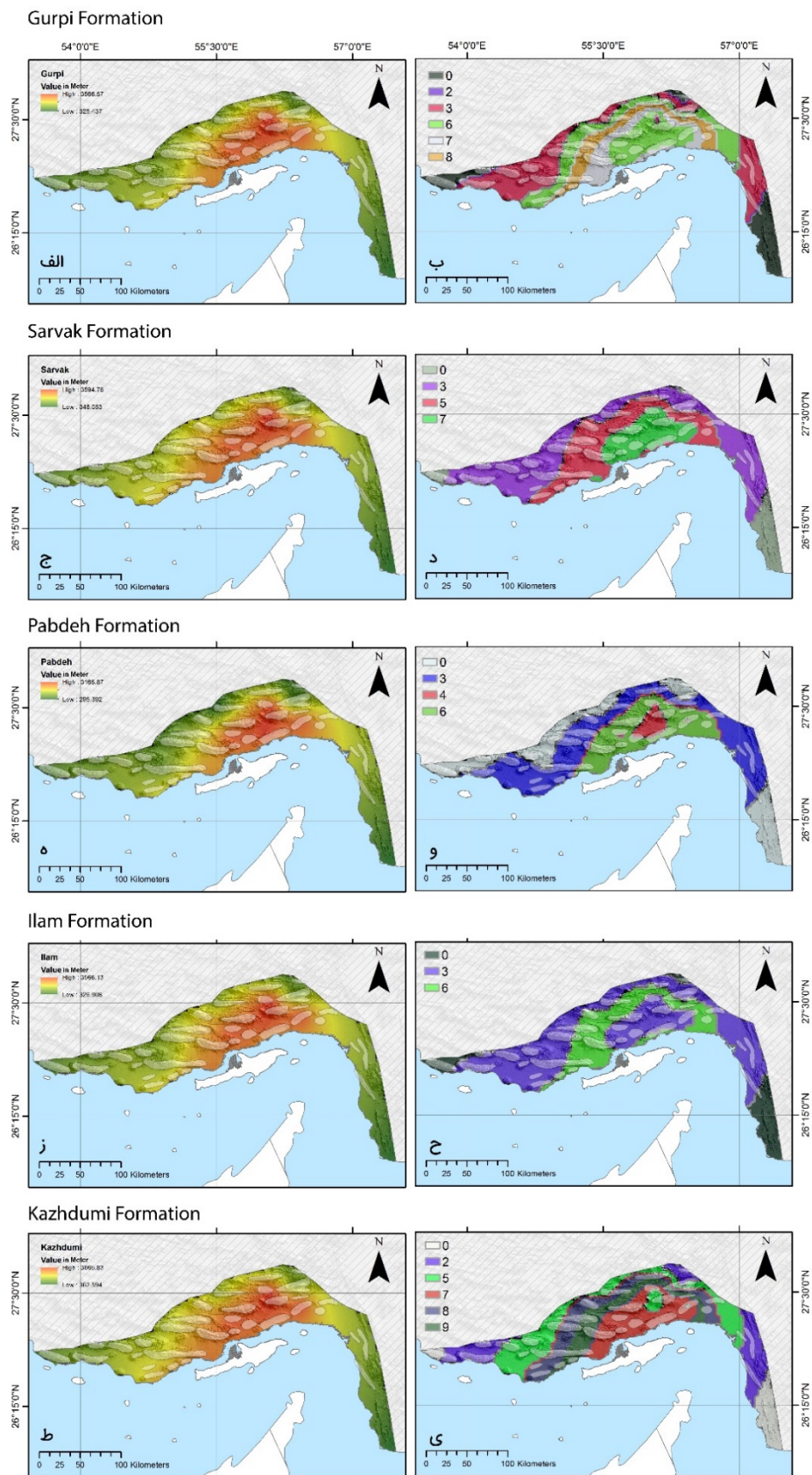
جدول ۲: امتیازهای تعلق گرفته به سازندهای گورپی، سروک، پابده، ایلام و کژدمی بر اساس ضخامت رسوبات فوقانی هر سازند

سازند سروک		سازند کژدمی	
امتیاز	ضخامت رسوبات فوقانی (متر)	امتیاز	ضخامت رسوبات فوقانی (متر)
۰	۱۰۰۰ - ۰	۰	۱۰۰۰ - ۰
۳	۲۰۰۰ - ۱۰۰۰	۲	۱۵۰۰ - ۱۰۰۰
۷	۳۰۰۰ - ۲۰۰۰	۵	۲۰۰۰ - ۱۵۰۰
۵	۴۰۰۰ - ۳۰۰۰	۸	۲۵۰۰ - ۲۰۰۰
سازند ایلام		۹	۳۰۰۰ - ۲۵۰۰
امتیاز	ضخامت رسوبات فوقانی (متر)	۷	۳۵۰۰ - ۳۰۰۰
۰	۱۰۰۰ - ۰	۵	۴۰۰۰ - ۳۵۰۰
۳	۲۰۰۰ - ۱۰۰۰	سازند گورپی	
۶	۳۰۰۰ - ۲۰۰۰	امتیاز	ضخامت رسوبات فوقانی (متر)
۳	۴۰۰۰ - ۳۰۰۰	۰	۱۰۰۰ - ۰
سازند پابده		۳	۱۵۰۰ - ۱۰۰۰
امتیاز	ضخامت رسوبات فوقانی (متر)	۶	۲۰۰۰ - ۱۵۰۰
۰	۱۰۰۰ - ۰	۸	۲۵۰۰ - ۲۰۰۰
۳	۲۰۰۰ - ۱۰۰۰	۷	۳۰۰۰ - ۲۵۰۰
۶	۳۰۰۰ - ۲۰۰۰	۶	۳۵۰۰ - ۳۰۰۰
۴	۴۰۰۰ - ۳۰۰۰	۲	۴۰۰۰ - ۳۵۰۰

حجم رسوبات فوقانی نهشته شده بر روی سازندهای کژدمی، سروک، ایلام، گورپی و پابده معیار دیگری است که در این مطالعه لحاظ گردید و با استفاده از داده های چاه های حفاری شده در ناحیه هینترلند حجم فوقانی رسوبات استخراج و نقشه های مربوطه تهیه شدند. از آنجایی که تغییر در عمق تدفین سنگ منشا تاثیر مستقیمی بر روی بلوغ ماده آلی و نیز تولید هیدروکربور خواهد داشت از این رو جهت بررسی سازند کژدمی به عنوان سنگ منشا شناخته شده در زاگرس، نقشه حجم رسوبات فوقانی برای سازند کژدمی تهیه گردید. ارزش دهی به سازندهای کژدمی، سروک، ایلام، پابده و گورپی بر مبنای پارامترهایی نظیر عمق پنجره نفت زایی و نیز عمق دیاژنز، کاتازنز و متاژنز انجام پذیرفت. همچنین با توجه به حجم رسوبات فوقانی سازندها اثر رخنمون سازندها نیز به صورت غیر مستقیم لحاظ می گردد و مناطقی که حجم رسوبات فوقانی کاهش می یابد بیانگر نزدیک بودن به سطح زمین می باشد.

حجم رسوبات نهشته شده بر روی سازندهای سروک و ایلام می تواند کنترل کننده تخلخل و شکستگی های موجود در مخزن باشد، این موضوع نیز برای سنگ های پوشش نیز صدق می کند. براین اساس لایه های ایجاد شده متناسب با اهمیتشان بر اساس ضخامت رسوبات فوقانی هر سازند مطابق جدول (۲) امتیاز دهی شدند (شکل ۵).





شکل ۵: نقشه حجم رسوبات فوقانی به همراه امتیازهای تعلق گرفته به آن برای سازندهای گورپی، سروک، پابده، ایلام و کژدمی



## مدل فازی

شناسایی بالاترین ارزش عضویت برای هر یک از معیارهای ورودی را داشته باشیم، مفید خواهد بود.

$$\mu_{Combine} = \text{Max}(\mu_A, \mu_B, \mu_C, \dots) \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این رابطه  $\mu_A, \mu_B, \mu_C, \dots$  به ترتیب مقادیر عضویت فازی گنگ برای نقشه های A, B, C, ... در یک موقعیت بخصوص از هر نقشه می باشند.

### عملگر AND

این عملگر با استفاده از رابطه (۲) تعریف می شود (Tangestani, 2003). عملگر AND حداقل مقدار را از مجموعه فازی در نظر می گیرد. هنگامی که برای اثبات فرضیه ای باید چندین فاکتور با هم حضور داشته باشند و یا بخواهیم حداقل ویژگی مشترک را برای معیارهای ورودی شناسایی کنیم از عملگر AND استفاده می شود.

$$\mu_{Combine} = \text{Min}(\mu_A, \mu_B, \mu_C, \dots) \quad (\text{رابطه ۲})$$

در این رابطه  $\mu_A, \mu_B, \mu_C, \dots$  به ترتیب مقادیر عضویت فازی گنگ برای نقشه های A, B, C, ... در یک موقعیت بخصوص از هر نقشه می باشند.

### عملگر SUM

این عملگر با استفاده از رابطه (۳) تعریف می شود (Tangestani, 2003). منظور از عملگر SUM، جمع جبری نیست و نباید با جمع وزن ها اشتباه گرفته شود. به عبارت بهتر در این روش فرض بر این است ورودی مطلوب تر بهتر است و اثر فزاینده بر روی پیکسل ها دارد.

$$\mu_{Combine} = 1 - \prod_{f=1}^n (1 - \mu_f) \quad (\text{رابطه ۳})$$

در منطق فازی، میزان عضویت یک عنصر در یک مجموعه، با مقداری در بازه یک (عضویت کامل) تا صفر (عدم عضویت کامل) تعریف می شود (An et al. 1991; Novriadi et al. 2006, Tangestani 2009, de Gruijter et al. 2011). درجه عضویت معمولاً با یک تابع عضویت بیان می شود که شکل تابع می تواند بصورت خطی، غیرخطی، پیوسته و یا ناپیوسته باشد (Bonham-Carter, 1991). در مدل فازی، به هر یک از پیکسلها در هر نقشه فاکتور مقداری بین صفر تا یک اختصاص داده می شود که بیانگر میزان مناسب بودن محل پیکسل از دیدگاه معیار مربوطه برای هدف مورد نظر می باشد. پس از تشکیل نقشه های مربوط به هر یک از فاکتورها، مقادیر عضویت موجود در آنها به کمک عملگرهای فازی با یکدیگر ترکیب می شوند. پنج عملگر فازی که می تواند برای تلفیق نقشه های فاکتور سودمند باشد، عبارتند از: Gamma و Product، SUM، AND، OR.

### عملگرهای فازی

پس از تهیه نقشه های مدل فازی، لازم است تلفیق نقشه ها با استفاده از عملگرهای فازی انجام گیرد. انتخاب عملگرهای فازی مناسب جهت تلفیق لایه های مختلف با توجه به ارتباط و برهم کنش عوامل مربوط به لایه ها انجام می گیرد (Tangestani, 2003).

### عملگر OR

این عملگر با استفاده از رابطه (۱) تعریف می شود (Tangestani, 2003). عملگر OR حداکثر مقدار را از مجموعه فازی در نظر میگیرد. به عبارت بهتر خوشینانه ترین حالت را در نظر میگیرد. این عملگر هنگامی که قصد

## عملگر Gamma

عملکرد عملگر های AND، SUM و GAMMA استفاده گردید.

اثر عملگر AND: ابتدا فاکتور نقشه های هم ضخامت و نقشه های رسوبات فوقانی سازندها به تفکیک هر سازند و جداگانه با استفاده از عملگر AND تلفیق شدند. با توجه به اینکه ویژگی های مشترک برای ورودی های نقشه هم ضخامت و نقشه رسوبات فوقانی برای هر سازند مد نظر است لذا با استفاده از عملگر AND مناطق مشترک و دارای اهمیت برای سازندهای کژدمی، سروک، ایلام، گورپی و پابده به طور جداگانه تلفیق گردیدند. همچنین فاکتورهای فاصله از گسل و رخنمون سازندها نیز با استفاده از عملگر AND تلفیق شدند (شکل ۷).

این عملگر با استفاده از رابطه (۴) تعریف می شود (Tangestani, 2003). عملگر Gamma حاصل ترکیب فازی SUM و Product بوده که اگر مقدار  $\gamma$  در رابطه (۴) برابر ۱ باشد خروجی برابر با SUM خواهد بود و اگر مقدار  $\gamma$  برابر ۰ باشد خروجی برابر با Product خواهد بود. همچنین مقادیر بین ۰ و ۱ شامل OR و AND خواهد بود.

(رابطه ۴)

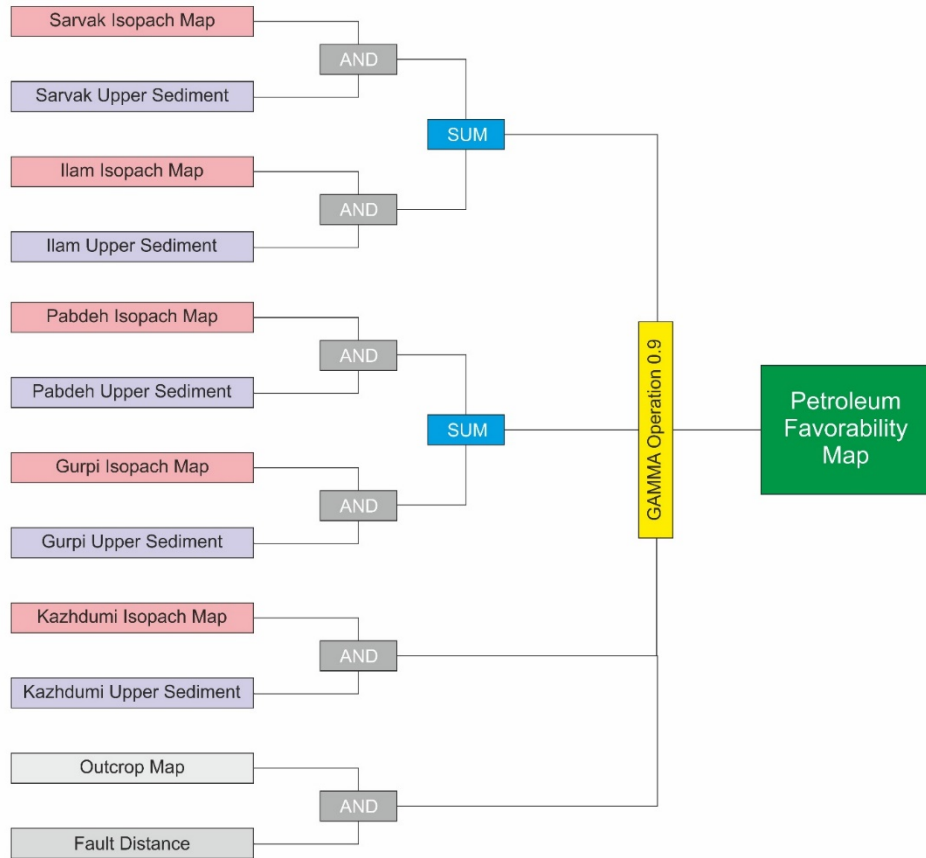
$$\mu_{Combine} = \left( \prod_{f=1}^n \mu_f^{1-\gamma} \right) \times \left( 1 - \prod_{f=1}^n (1 - \mu_i)^\gamma \right)$$

تعیین صحیح و آگاهانه  $\gamma$  منجر به ارائه خروجی های سازگار با هدف خواهد شد. در واقع تعیین این مقدار تصمیم گیری اهداف اکتشافی را به بهترین نحو بازگو می نماید.

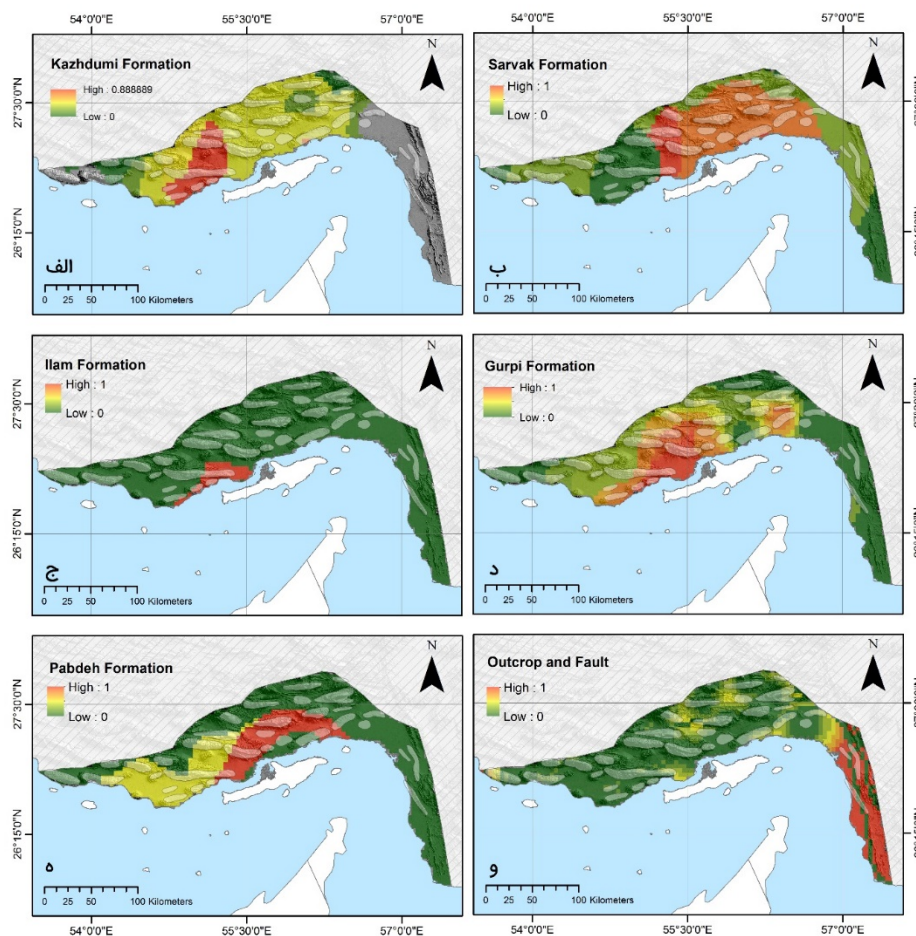
## تلفیق نقشه ها و طراحی شبکه های استنتاجی فازی

معمولاً نمی توان کلیه لایه های مورد نیاز را تنها با یک عملگر تلفیق نمود. به همین دلیل اغلب جهت تلفیق لایه های اطلاعاتی مختلف در روش فازی به جای استفاده از یک عملگر، شبکه های استنتاج فازی با استفاده از عملگرهای مختلف ایجاد می شود. در شبکه استنتاجی بجای اینکه کلیه نقشه های فاکتور در یک مرحله تلفیق شوند. فاکتورها بر اساس دانش کارشناسی، ماهیت و نقش هر یک از آنها در تعیین مکان های دارای پتانسیل اکتشافی و ارتباط آنها با یکدیگر، کلاس بندی شده و لایه های اطلاعاتی مربوطه در مراحل مختلف تلفیق می گردند.

در این مطالعه شبکه استنتاجی به گونه ای طراحی شده است که خروجی نهایی به صورت محافظه کارانه ارائه شود (شکل ۶). انتخاب عملگر فازی با توجه به منطق های مختلف می تواند متفاوت باشد. در شبکه استنتاجی طراحی شده از



شکل ۶: شبکه استنتاجی طراحی شده به منظور دستیابی به نقشه پتانسیل هیدروکربوری افق های سروک و ایلام



شکل ۷: تلفیق نقشه های فازی شده با استفاده از عملگر AND در ناحیه هیسترنند بندرعباس (مناطق قرمز رنگ بیانگر نواحی با پتانسیل بالا برای افق های مختلف می باشند) الف) تلفیق نقشه های همضخامت و حجم رسوبات فوقانی سازند کژدمی (ب) تلفیق نقشه های همضخامت و حجم رسوبات فوقانی سازند سروک (ج) تلفیق نقشه های همضخامت و حجم رسوبات فوقانی سازند ایلام (د) تلفیق نقشه های همضخامت و حجم رسوبات فوقانی سازند گورپی (ه) تلفیق نقشه های همضخامت و حجم رسوبات فوقانی سازند پابده (و) تلفیق نقشه های گسل های اصلی و رخنمون سازندها

از عملگر SUM باعث می شود که اثر سازندهای ایلام و سروک و سازندهای پابده و گورپی جداگانه و بصورت مکمل هم لحاظ شوند. به عبارتی دو سازند سروک و ایلام همچنین دو سازند گورپی و پابده اثر افزایشی روی هم دارند و دسترس همزمان به هر دو سازند مزیتی به حساب می آید (شکل ۸).

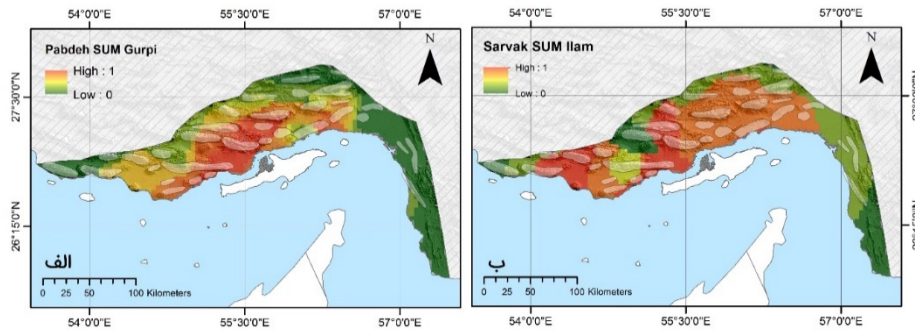
اثر عملگر GAMMA: در صورت استفاده از عملگر SUM اگر در یک پیکسل چندین پارامتر دخالت داشته باشند اثر افزایشی این عملگر باعث می شود وجود پارامترها با مقدار کم نیز

اثر عملگر SUM: در این مطالعه سازندهای سروک و ایلام به عنوان سازندهایی با قابلیت مخزنی، سازندهای گورپی و پابده به عنوان پوش سنگ مطرح هستند. از آنجایی که سازندهای سروک و ایلام به عنوان سنگ مخزن مکمل یکدیگراند لذا نقشه خروجی هر یک از این سازندها که در مرحله قبل با تلفیق نقشه های همضخامت و رسوبات فوقانی با عملگر AND ایجاد گردیده بود در این مرحله با استفاده از عملگر SUM تلفیق شدند. این عمل نیز برای سازندهای گورپی و پابده با قابلیت پوش سنگی نیز لحاظ گردید. استفاده

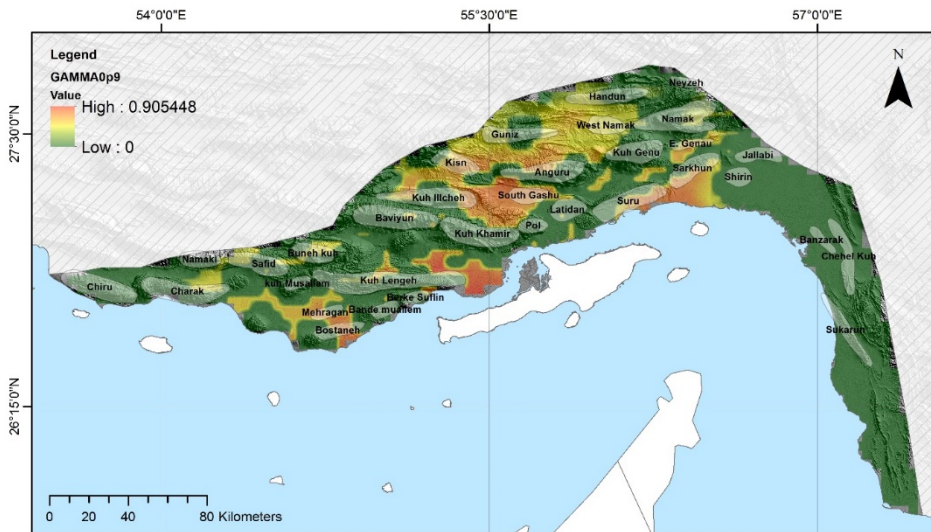


هیدروکربوری افق های سروک و ایلام برای منطقه هینترلند بندرعباس بدست آمد (شکل ۹).

افزایش یابد لذا برای خشتی کردن این اثر از عملگر GAMMA استفاده گردید. در نهایت نقشه های پتانسیل سنگ مخزن، منشا و پوش سنگ با عملگر GAMMA تلفیق و نقشه پتانسیل



شکل ۸: نقشه های توزیع مناطق دارای پتانسیل با قابلیت پوش سنگ و سنگ مخزن بودن افق مورد مطالعه در ناحیه هینترلند بر مبنای نقشه های هم ضخامت و رسوبات فوقانی و بدون در نظر گرفتن گسل ها و رخنمون سازندها به همراه مراحل تلفیق و تهیه نقشه ها (مناطق قرمز رنگ بیانگر نواحی با پتانسیل بالا می باشند) الف) نقشه مناطق مستعد برای پوش سنگ افق سروک و ایلام (ب) نقشه مناطق مستعد برای سنگ مخزن



شکل ۹: نقشه پتانسیل هیدروکربوری افق های سروک و ایلام در ناحیه هینترلند بندرعباس با در نظر گرفتن اثر گسل ها و رخنمون ها

(شکل ۹) مشخص گردید که ۶۸ درصد از منطقه هینترلند دارای پتانسیل هیدروکربوری بسیار پایین، ۱۸ درصد دارای پتانسیل هیدروکربوری متوسط و تنها ۱۴ درصد دارای پتانسیل

### نتایج حاصل از تلفیق نقشه ها و شبکه استتاجی

با تعیین محدوده برای مناطق دارای پتانسیل بالا، متوسط و پایین نقشه پتانسیل هیدروکربوری افق های سروک و ایلام



### نتیجه گیری

با توجه به اینکه در بسیاری از این تاق‌دیس‌ها حفاری انجام شده است. در بسیاری موارد همخوانی مناسبی میان نقشه حاصل از شبکه استنتاجی با میداین دارای هیدروکربور در افق سروک و ایلام مشاهده شد برای نمونه می‌توان به وجود هیدروکربور در تاق‌دیس گشو جنوبی در افق سروک اشاره نمود. لذا می‌توان دریافت که منطق فازی به عنوان یک منطق چند ارزشی اگر شبکه استنتاجی مناسبی متناسب با داده‌های ورودی برای آن تهیه شود می‌تواند مناطق با پتانسیل بالای اکتشافی را به بهترین شکل ممکن شناسایی نماید. به عبارت دیگر منطق فازی این امکان را فراهم می‌سازد تا تحلیل‌های متفاوت از داده‌ها که ناشی از نظرات متفاوت در خصوص پدیده‌های اکتشافی است را با هم تلفیق نمود و هم زمان نقشه پتانسیل واحدی با قابلیت در نظر گرفتن دیدگاه‌های مختلف تهیه نمود.

هیدروکربوری بالایی جهت اکتشاف در افق سروک و ایلام می‌باشند. این درحالی است که با در نظر گرفتن اثر تاق‌دیس‌ها درصد‌های یاد شده برای مناطق با پتانسیل بالای هیدروکربوری به ۴,۳ درصد کاهش پیدا کرد.

با توجه به شکل ۸ که بیانگر مناطق مستعد سنگ مخزن و پوش سنگ می‌باشد و نیز شکل ۷ الف که وضعیت مناطق مستعد سازند کژدمی جهت سنگ منشا بودن را نشان می‌دهد به نظر می‌رسد پتانسیل مخزنی سروک و ایلام در منطقه هیتزلند بر خلاف دیگر مناطق زاگرس نسبتاً پایین بوده و سازندهای سروک و ایلام به جز در بخش‌های میانی دارای پتانسیل هیدروکربوری بالایی نمی‌باشند.

با توجه به شبکه استنتاجی طراحی شده به نظر می‌رسد تاق‌دیس‌های گشو جنوبی، بستانه، کیسن، نمک غربی و سورو در افق‌های سروک و ایلام دارای پتانسیل هیدروکربوری هستند.



## منابع

- De, G.J.J., Walvoert, D.J.J. and Bragato, G., 2011. Application of fuzzy logic to Boolean models for digital soil assessment. *Journal of Geoderma*, 166, 15–33.
- Falcon, N.L., 1961. Major earth-flexing in me Zagros Mountains of southwest Iran. *Quarterly Journal Geological Society of London*, 117, 367-376.
- Falcon, N.L., 1974. Southern Iran: Zagros Mountains: in Mesozoic-Cenozoic orogenic belts, Data for orogenic studies: Alpine-Himalayan Orogens. *Geol. Soc. Lond., Sepe. Publ.*, 4, 199-211.
- Falcon, N.L., 1976. The geology of northeast margin of Arabian basement shield. *Adv. Sci. Lond.*, 31-42.
- Gao, H., Chen, Z., Osadetz, K.G., Hannigan, P. and Watson, C., 2000. A pool-based model of the spatial distribution of undiscovered petroleum resources. *Math. Geol.*, 32, 725–749.
- Hayens, S.J. and Mcquillan H., 1974. Evolution of the Zagros suture zone, southern Iran. *Geological Society of America Bulletin*, 85, 739-744.
- Hessami, K., Koyi, H.A. and Talbot, C.J., 2001a. The significance of strike-slip faulting in the basement of the Zagros fold and thrust belt. *Journal of Petroleum Geology*, 24, 5–28.
- Howell, P.D. and Van Der Pluijm B.A., 1999. Structural sequences and styles of subsidence in the Michigan basin. *Geological Society of America Bulletin*, 111, 7, 974–991.
- Jagadish, C.M. and Rao, N.A., 2010. Role of Remote Sensing and GIS to Provide Geological Input for Hydrocarbon Exploration – A Case Study on Godavari Basin Rajahmundry. Paper presented at the 8th Biennial International Conference and Exposition on Petroleum Geophysics, Hyderabad.
- Jahani, S., 2009. Salt Tectonic, Folding and Fault- ing in eastern Fars and southern Offshore Provinces (Iran). PhD. Thesis, Cergy-Pontoise University.
- Kay, G.M., 1945. Paleogeographic and palinspastic maps. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 29, 426–450.
- Liping, Y., 2011. Study on the Relationship between Fault System and Oil-Gas Sedimentary in Junggar Basin Based on GIS. Paper presented at the Power and Energy Engineering Conference, Wuhan.
- Lotfi, A.Z., 1965, Fuzzy sets. *Information and Control* 8 (3), 338–353.
- آفانباتی، ع.، ۱۳۸۵. زمین شناسی ایران، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- مطیعی، ه.، ۱۳۷۴. زمین شناسی نفت زاگرس ۱ و ۲، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- Abd Latef, M.Z and Kahar, R.B., 2008. Oil and gas exploration in Ethiopia using GIS. Paper presented at the Map Asia Conference, Kuala Lumpur.
- Aminzadeh, F., 1994. Applications of fuzzy expert systems in integrated oil exploration. *Computers and Electrical Engineering*, 20, 89-97.
- Amiri, M.A., Karimi M. and Sarab A.A., 2015. Hydrocarbon resources potential mapping using the evidential belief functions and GIS, Ahvaz/Khuzestan Province, southwest Iran. *Arab J Geosci* 8, 3929–3941.
- An, P., Moon, W.M. and Rencz, A., 1991. Application of fuzzy set theory for integration of geological, geophysical and remote sensing data. *Canadian Journal of Exploration Geophysics*, 27, 1-11.
- Bahroudi, A. and Talbot C.J., 2003. The configuration of the basement beneath the Zagros Basin. *Journal of Petroleum Geology*, 26, 257-282.
- Barrll, K.A., 2000b. GIS: The Exploration and Exploitation Tool in Coburn. T.C. & YARUS J.M., eds., *AAPG Computer Applications in Geology*, Geographic information systems in petroleum exploration and development, 4, 237-248.
- Berberian, M. 1995. Master blind thrust faults hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics. *Tectonophysics*, 241, 193–224.
- Calvert, W.L., 1974. Sub-Trenton structure of Ohio, with views on isopach maps and stratigraphic sections as basis for structural myths in Ohio, Illinois, New York, Pennsylvania, West Virginia, and Michigan. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 58, 957–972.
- Davis, D.M. and Engelder, T., 1987. Thin-skinned deformation over salt, in LERCH I. & O'BRIEN J.J. (eds.), *Dynamical geology of salt and related structures*. Academic Press Inc., New york, 301-337.



- exploration plays beyond the Sigsbee Escarpment in the central Gulf of Mexico: GCSSEPM Foundation 21st Annual Bob F. Perkins Research Conference, 129-158.
- Stephens, B.P., 2009. Basement controls on subsurface geologic patterns and coastal geomorphology across the northern Gulf of Mexico: Implications for subsidence studies and coastal restoration: Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions, 59, 729-751.
- Stocklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran. AAPG Bulletin, 52, 165 pp.
- Szabo, F. and Kheradpir, A., 1978. Permian and Triassic Stratigraphy Zagros Basin SW Iran. Jour. Petroleum Geology, 2, 57-82.
- Tabatabai, H., 1997. Integration interpretation of basement fault and geological maps Zagros area. Scale 1:1000000. National Iranian Oil Company, Exploration Directorate.
- Taghizadeh, F.F., Afsari, N. and Sodoudi, F., 2015. Crustal Thickness of Iran Inferred from Converted Waves. Pure and Applied Geophysics, 172, 309.
- Tangestani, M., 2009. A comparative study of Dempster-Shafer and fuzzy models for landslide susceptibility mapping using a GIS: An experience from Zagros Mountains, SW Iran. Journal of Asian Earth Sciences, 35, 66-73.
- Tangestani, M., 2003. Landslide susceptibility mapping using the fuzzy gamma operation in a GIS, Kakan catchment area, Iran. Map India Conference.
- Tounsi, M., 2005. An approximate reasoning based technique for oil assessment. Expert. Syst. Appl., 29, 485-491.
- Yassaghi, A., 2006. Integration of Landsat Image Interpretation and Geomagnetic Data on Verification of Deep-Seated Transverse Fault Lineaments in SE Zagros, Iran. International Journal of Remote Sensing, 27, 4529-4544.
- Zargani, S.S., Vaughan, R.A. and Missallati, A.A., 2003. Spatial integration of geological datasets for predictive hydrocarbon studies in Murzuq basin, SW Libya. Paper presented at the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toulouse.
- Malczewski, J., 1999. GIS and Multicriteria Decision Analysis. John Wiley and Sons, Toronto.
- Motamedi, H. and Tahmasebi, A., 2009. master plan of Hydrocarbon exploration, Fars area. NIOC, (unpublished report).
- Motamedi, H., Sherkati, S. and Sepehr, M., 2012. Structural style variation and its impact on hydrocarbon traps in central Fars, southern Zagros folded belt, Iran. Journal of Structural Geology, 37, 124-133.
- Novriadi, H.P.M. and Darijanto, T., 2006. Applying Fuzzy Logic Method in mineral potential mapping for epithermal gold mineralization in the Island of flores, East Nusa Tenggara using geographical information systems (GIS). Proceeding of 9th International Symposium on Mineral Exploration, 62-68.
- Okwu, M.O. and Nwachukwu, A.N., 2018. A review of fuzzy logic applications in petroleum exploration, production and distribution operations. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 9, 1555-1568.
- Pirouz, M., Bahroudi, A., Ghasemi, M.R. and Saeidi, A., 2008. Structural Evolution of the Basement and Activity of Salt Structures in Firuzabad Area, Fars. Geosciences, 17, 68, 40-55.
- Rosas, S., Fontbote, L. and Tankard, A., 2006. Tectonic evolution and paleogeography of the Mesozoic Pucará Basin, central Peru. Journal of South American Earth Sciences, 24, 1, 1-24.
- Setudehnia, A., 1978. The Mesozoic sequence in southwest Iran and adjacent areas. Journal of Petroleum Geology, 1, 3- 42.
- Shaw, C.L., 1996. Stratigraphic Correlation and Isopach Maps of the Western Taiwan Basin. TAO, 7, 333-360.
- Spratt, D.A., Dixon, J.M. and Beattie, E.T., 2004. Changes in structural style controlled by lithofacies contrast across transverse carbonate bank marginsd Canadian Rocky Mountains and scaled physical models, in: McClay, K.R. (Ed.), Thrust Tectonics and Hydrocarbon Systems. AAPG Memoir, 82, 259-275.
- Stephens, B.P., 2001. Basement controls on hydrocarbon systems, depositional pathways, and

# زمین سافت



دانشگاه بیرجند



شاپا: ۴۵۱۲-۲۶۷۶

پاییز ۱۳۹۹، سال چهارم، شماره ۱۵

- 
- ۱ \* بررسی سازوکار چین خوردگی بر پایه الگوی شکستگی ها در پهنه فلزایی طارم، شمال باختر قزوین .....  
صادق افشار نجفی، عزیز رحیمی، مهناز رضائیان، تقی نبی
- ۲۰ \* تغییر جهت میدان تنش در پهنه گسلی کاشان در زمان نئوژن، بخش میانی پهنه ارومیه دختر .....  
سیما ناقه، میثم تدین، همایون صفایی
- ۳۵ \* بررسی ارتباط بین گسل ها و درزه ها با کانه‌زایی مس، با استفاده از سنجش ازدور و مغناطیس هوایی در منطقه ورزگ (شرق قاین) .....  
فرزاد قاسم پور، توران اسماعیل پور، محمود رضا هیهات، محمد مهدی خطیب
- ۵۷ \* تحلیل شکستگی ها در محدوده‌ی مجموعه معدنی سنگ ساختمانی لاشر، جنوب اصفهان، با تأکید بر روش دورسنجی .....  
پریسا تن زده، علی فرضی پور صائین، همایون صفایی
- ۷۹ \* تعیین دگرشکلی در پهنه برشی بهلگرد با استفاده از هندسه ساختارهای کوچک مقیاس .....  
محمد امیر علیمی
- ۱۰۰ \* ارزیابی نقش ساختارها در چگونگی توزیع هیدروکربور در سازندهای سروک و ایلام با استفاده از منطق فازی در ناحیه هیئت‌رند بندرعباس .....  
فاطمه جهادگر، زهرا ملکی، علی سلگی، مه‌رآن آرن، علی سربی



# TECTONICS

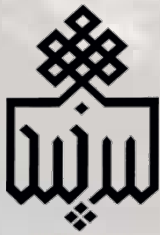


University of  
Birjand

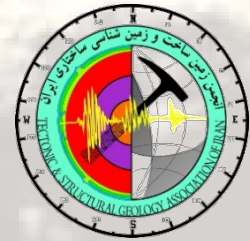
Spring 2020, Vol:15

ISSN:2676-4512

- 
- \* **Folding mechanism investigation of the Taron Metallogenic Zone based on fracture patterns, NW Qazvin** ..... 1  
Sadegh Afshar Najafi ; Aziz Rahimi ; Mahnaz Rezaeian ; Taghi Nabaei
  - \* **Change in direction of stress field in Kashan fault zone during Neogene, Middle part of Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc** ..... 20  
Sima Nagheh ; Meysam Tadayyon ; Homayoon Safayi
  - \* **Investigation of the relationship between faults and joints with copper mineralization, using Remote Sensing and magnetism in Vorezg region (east of Ghaen-Birjand)** .....35  
Farzad Ghasempour ; Tooran Esmailpour ; Mahmood Reza Heyhat ; M.Mehdi Khatib
  - \* **Fracture analysis in Lashotor stone quarry complex, south of Isfahan, a remote sensing approach** .....57  
Parisa Tanzadeh ; Ali Farzipour saein ; Homayoon Safaei
  - \* **Determination of deformation in Bahlgerd shear zone by using geometry small-scale Structures** . 79  
Mohammad Amir Alimi
  - \* **Evaluation of the role of structures in the distribution of hydrocarbons in Sarvak and Ilam Formations using fuzzy logic in the Bandar Abbas hinterland** ..... 100  
Fatemeh Jahadgar ;, Zahra Maleki ; Ali Solgi ; Mehran Arian ; Ali Sorbi



دانشگاه بیرجند



انجمن زمین ساخت و  
زمین شناسی ساختاری ایران

## فصلنامه زمین ساخت

پاییز ۱۳۹۹، سال چهارم، شماره ۱۵

شاپا: ۴۵۱۲-۲۶۷۶

صاحب امتیاز: دانشگاه بیرجند

مدیر مسئول: محمودرضا هیهات

سرمدیر: محمد مهدی خطیب

مدیر داخلی: فرح جلیلی

ویراستار: غلامرضا میراب شبستری

### شورای نویسندگان:

محمدرضا قاسمی، زمین شناسی ساختمانی و زمین ساخت، دانشیار پژوهشگر علوم زمین

سید سعید محمدی، پترولوژی، استاد دانشگاه بیرجند

محمودرضا هیهات، زمین شناسی ساختمانی و زمین ساخت، دانشیار دانشگاه بیرجند

علی یساقی، زمین شناسی ساختمانی و زمین ساخت، استاد دانشگاه تربیت مدرس

محمد مهدی خطیب، زمین شناسی ساختمانی و زمین ساخت، استاد دانشگاه بیرجند

بهنام رحیمی، زمین شناسی ساختمانی و زمین ساخت، استاد دانشگاه فردوسی مشهد

همایون صفایی، زمین شناسی ساختمانی و زمین ساخت، دانشیار دانشگاه اصفهان

سید احمد علوی، زمین شناسی ساختمانی و زمین ساخت، استاد دانشگاه شهید بهشتی

امور فنی: انتشارات چهاردرخت

امور چاپ و صحافی: چاپ قمر

تعداد شمارگان: ۵۰۰ نسخه

دارای پروانه انتشار ۹۳/۶۸۲ مورخ ۱۳۹۳/۱/۱۹ از وزارت فرهنگ و ارشاد

اسلامی و درجه علمی پژوهشی به شماره ۹۷/۳/۱۸/۳۱۱۲۰۹ مورخ ۹۷/۱۲/۶

از وزارت علوم، تحقیقات و فناوری.

پست الکترونیکی: [tectonics@birjand.ac.ir](mailto:tectonics@birjand.ac.ir)

آدرس: خراسان جنوبی، بیرجند، دانشگاه بیرجند، دانشکده علوم، گروه زمین شناسی،

دفتر فصلنامه زمین ساخت

## سخن سردبیر

با استعانت از خداوند متعال و یاری پژوهشگران گرانقدر و تلاش همکاران محترم، اکنون سیزدهمین شماره از فصلنامه زمین ساخت به چاپ می‌رسد. پیشرفت روز افزون علوم ضرورت ارائه نتایج حاصل از پژوهش‌ها و تحقیقات زمین‌شناسی برای استفاده محققان و علاقه‌مندان را ایجاب کرده است. در این راستا فصلنامه‌های تخصصی، نقش کلیدی و اساسی در فرآیند ثبت، نشر و ارتقای سطح این پژوهش‌ها و نیز ایجاد بستر مناسب برای توسعه ارتباط میان پژوهشگران عرصه زمین‌شناسی، داشته‌اند. فصلنامه زمین ساخت، ناشر یافته‌های پژوهشگران محققان زمین‌شناسی کشور است که در راه کسب مرجعیت علمی تلاش می‌کند. حاصل کار گروه شورای نویسندگان و همکاران به صورت حداقل چهار شماره در سال منتشر می‌شود.

ضمن قدردانی و سپاسگزاری از محققین و نویسندگانی که حاصل تلاش و زحمات خود را توسط این نشریه در اختیار جویندگان علم قرار می‌دهند از دیگر دانش پژوهان و مشتاقان علم و معرفت نیز دعوت می‌نمایم که با ارسال مقالات علمی خود، ما را یاری نمایند.

محمد مهدی خطیب / پاییز ۱۳۹۹



فصلنامه زمین ساخت

پاییز ۱۳۹۹، سال چهارم، شماره ۱۵

doi: 10.22077/jt.2021.3915.1097

## بررسی سازوکار چین خوردگی بر پایه الگوی شکستگی ها در پهنه فلزایی طارم، شمال باختر قزوین

صادق افشار نجفی<sup>۱</sup>، عزیز رحیمی<sup>۲\*</sup>، مهناز رضائیان<sup>۳</sup>، تقی نبی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری تکنیک، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه گلستان

۲- دانشیار تکنیک، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه گلستان

۳- استادیار تکنیک، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان

۴- استادیار زمین شناسی اقتصادی، گروه زمین شناسی، دانشگاه پیام نور مرکز قزوین

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۲۰

### چکیده

پهنه فلزایی طارم از منظر ساختاری در یک طاقدیس با طول موج ۵۰ کیلومتر و روند محوری شمال باختری- جنوب خاوری، متشکل از واحدهای معادل سازند کرج به سن ائوسن و لایه های قرمز نئوژن قرار گرفته است. این طاقدیس که در فرایند کوهزایی مرتبط با تشکیل کوهزاد البرز ایجاد شده، دربرگیرنده شکستگی های متعدد باروند های شمال باختری- جنوب خاوری، شمال خاوری- جنوب باختری و خاوری- باختری است. بررسی های دقیق میان مقیاس و تحلیل های استریوگرافی شکستگی های موجود در منطقه جهت بررسی گسترش شکستگی ها در زمان چین خوردگی شامل سن نسبی آنها، توالی دگرریختی شکستگی ها در لایه های مختلف، توزیع دسته های شکستگی و تغییرات ایجاد شده در شکستگی ها در رویدادهای بعدی زمین شناختی در چند مرحله انجام شد. مقایسه الگوی شکستگی های متفاوت در لایه های چین خورده علاوه بر آشکارسازی توالی های دگرریختی شکننده، منجر به شناسایی سازوکار تشکیل چین اصلی در منطقه مورد مطالعه شد. براساس شواهد موجود در یالهای طاقدیس از جمله: ۱- وجود چین های فرعی در لایه های نرم تر، ۲- تشکیل شکستگی های چینه کران در مقیاس های مختلف مرتبط با رخداد برشی موازی لایه در لایه های نرم تر، و ۳- دایک زایی در شکستگی های از پیش موجود در یال چین، ترجیحاً در واحدهای نرم به ویژه در شیل های مدادی معادل سازند کرج رخ داده در حالی که در منطقه لولایی در لایه های مقاوم مثل آندزیت و بازالت تشکیل شده است. سازوکار لغزش خمشی در طاقدیس پهنه طارم پیشنهاد می شود.

واژه های کلیدی: پهنه طارم، چین خوردگی، سازوکار لغزش- خمشی، شکستگی های چینه کران



## Folding mechanism investigation of the Tarom Metallogenic Zone based on fracture patterns, NW Qazvin

Afshar Najafi .S<sup>1</sup>; Rahimi .A<sup>2\*</sup> ; Rezaeian .M<sup>3</sup> ; Nabaei .T<sup>4</sup>

1- Ph.D student in Tectonics, Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, Golestan University.

2- Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, Golestan University

3- Assistant Professor, Department of Earth Sciences, Zanjan Graduate University of Basic Sciences

4- Assistant Professor, Department of Geology, Qazvin- PNU University

### Abstract

Structurally, the Tarom Metallogenic Zone is located in an NW-SE trending anticline with 50 km wavelength, consists of the Karaj formation equivalent units and Neogene red beds. This anticline was created during the Alborz orogen formation- related phase has multiple fractures with NW-SE, NE-SW, and E-W trend. Detailed mesoscopic and microscopic investigations of the existing fractures for studying their propagations during folding, including their relative age, sequential deformation of the fractures in various beds, distribution of the fractures, and their changes during the following geological events, were performed many times. Comparison of various fracture patterns in folded layers not only illuminates the brittle deformation successions but also resulted in the detection of the main fold formation mechanism of the studied area. Based on the existing evidence at limbs of the anticline including 1- The existence of parasitic folds in soft layers, 2- Creation of layer- parallel shearing related strata-bound fractures in soft layers on various scales. Dyke intrusion into pre-existing fractures at fold limbs, preferentially has been happened in soft beds, especially in the Karaj formation equivalents pencil shales. While at the hinge zone, they have been created in hard layers, for example, andesite and basalt. The flexural slip mechanism is proposed for the Tarom Anticline.

**Keywords:** Tarom zone, Folding, Flexural slip mechanism, Stratabound Fractures





## مقدمه

تحقیق سعی بر این شد تا با استفاده از روش های میان مقیاس و استریوگرافیک تحولات جنبشی طاقدیس طارم بررسی شود. در مطالعات میدانی، ساختارهای موجود در هر منطقه از نظر آماری، هندسی، جنبشی و دینامیکی مورد مطالعه قرار می گیرند (حاجی علی بیگی و همکاران، ۱۳۸۸، Ismat, 2008; Su et al, 2014). در روش استریوگرافیک، علاوه بر ترسیم وضعیت لایه بندی و شکستگی ها، تقدم و تأخر نسل های مختلف شکستگی ها نسبت به یکدیگر و همچنین نسبت به چین نیز بررسی می شود (Ismat, 2008; Su et al, 2014). نهایتاً با تلفیق همه داده ها با منابع از پیش موجود از جمله نقشه های زمین شناسی منجر به ارائه مدل های جنبشی می شوند که برقراری ارتباط چین ها و شکستگی ها و تحلیل و تفسیر روند تحولات چین خوردگی از طریق آنها فراهم می گردد. الگوی گسترش شکستگی ها در واحدهای چین خورده با تنش های مسبب چین خوردگی ارتباط مستقیم دارد. وضعیت تنش و نوع دگرریختی توأمان با چین خوردگی براساس الگوهای شکستگی قابل بازسازی است (Su et al, 2014). روند شکستگی های مرتبط با چین خوردگی خمشی به جهت برش لغزش / جریان خمشی<sup>۱</sup> بستگی دارد (Anastasio et al., 1997; Engelder and Peacock, 2001). کرنش طولی مماسی<sup>۲</sup> شکستگی های موازی با سطح محوری چین ایجاد می کند (Srivastava and Engelder, 1990; Lemiszki et al, 1994). این شکستگی های موازی محور در اثر جریان خمشی به جای منطقه لولایی در یال چین تشکیل می شوند (Engelder and Peacock, 2001). موقعیت شکستگی های اخیر در چین خوردگی لغزش خمشی<sup>۳</sup> احتمالاً با انواع چینه کران<sup>۴</sup> در لایه های نرم مطابقت دارد. نوع، روند و فراوانی شکستگی های همزمان و یا درست قبل

پهنه<sup>۵</sup> فلززایی طارم از نظر زمین ساختی در شمال باختر پهنه<sup>۶</sup> ارومیه - دختر واقع شده است. مطالعات انجام شده در منطقه شامل بررسی توده های نفوذی، زایش دایک ها، سنگ های آتشفشانی - رسوبی، کانه زایی و کنترل ساختاری کانه زایی می باشد (Hirayama et al., 1966; Ghasemi et al., 2015). ناظمی و قطب تحریری، ۱۳۹۳، احمدی و همکاران، ۱۳۹۲). منطقه مورد مطالعه در یک طاقدیس با طول موج تقریباً ۵۰ کیلومتر و روند محوری شمال باختری - جنوب خاوری، متشکل از واحدهای معادل سازند کرج به سن ائوسن و لایه های قرمز نئوژن قرار گرفته است (شکل های ۱ و ۲). این طاقدیس که پیرو رشد کوهزاد البرز در فازهای الیگوسن، میوسن و پلیوسن (Rezaeian et al, 2012) تشکیل شده است، دربرگیرنده شکستگی های متعدد با روند های شمال باختری - جنوب خاوری، شمالی - جنوبی، شمال خاوری - جنوب باختری و خاوری - باختری است که در نقاط مختلف به ویژه در نواحی مرکزی توسط دایک های با ترکیب اسیدی، حدواسط و بازیک اشغال شده است. دایک های مذکور غالباً در واحدهای نرم واقع در یالهای چین اصلی نفوذ کرده اند و در مناطق لولایی، بیشتر در لایه های مقاوم مشاهده می شوند. وضعیت مشابهی نیز در تشکیل چین های فرعی و بلوغ ساختاری شکستگی ها در منطقه مشاهده گردید که تاکنون مورد توجه پژوهشگران قرار نگرفته است. با کنترل الگوی شکستگی ها، دایک ها و چین های فرعی در منطقه مورد مطالعه این مسئله شکل می گیرد که احتمالاً توزیع دگرریختی حاصل از چین خوردگی با سازوکار لغزش خمشی باعث ایجاد چنین الگوی ساختاری در پهنه طارم باشد. بنابراین، در این

Stratabound<sup>۴</sup>

Flexural Flow<sup>۱</sup>

Tangential Longitudinal Strain<sup>۲</sup>

Flexural Slip<sup>۳</sup>

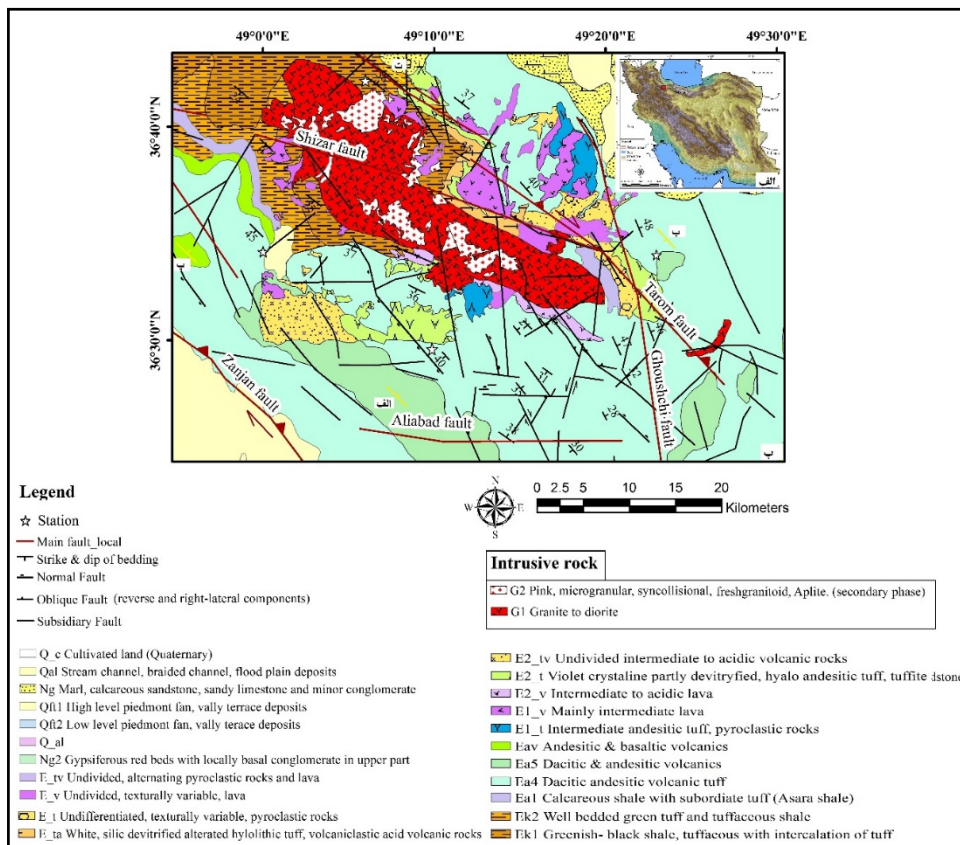


های آتشفشانی، آتشفشانی- رسوبی و نفوذی های به سن ائوسن تشکیل می دهند که پیرو رشد کوهزاد البرز در فازهای الیگوسن، میوسن و پلیوسن (Rezaeian et al., 2012) دچار دگرریختی شده است. بیشتر واحدهای آتشفشانی و آتشفشانی- آواری محدوده مورد مطالعه، معادل سازند کرج معرفی شده است (Hirayama et al., 1966)، (شکل ۱-ب)

از چین خوردگی به پارامترهایی چون چینه شناسی مکانیکی (Chester, 2003; Tavani et al., 2008)، شرایط محیطی (دما، فشار و چرخش سیالات) (Jamison, 1992; Lemiszki et al., 1994)، الگوی شکستگی های موروثی (Bergbauer and Pollard, 2004; Bellahsen et al., 2006) و میدان تنش (Hancock, 1985; Pollard and Aydin, 1988) بستگی دارد. در چین خوردگی پیشرونده، ترکیب متغیرهای اخیر باعث توزیع کرنش در سراسر یک چین شده و در نتیجه منجر به ظهور الگوهای دگرریختی می شود (Evans and Fischer, 2012). چین های خمشی<sup>۱</sup> در اثر افزایش شیب یال در پاسخ به کوتاه شدگی عرضی و متعاقب آن لغزش یک لایه بر روی لایه دیگر تشکیل می شوند. در مورد اخیر، چین نوع لغزش خمشی ایجاد می شود ولی توسط برش ساده درون لایه های ویژه، نوع جریان خمشی تشکیل می شود. و در برخی موارد ترکیبی از هر دو فرایند تشکیل می شوند (Donath & Parker, 1964). در سازوکار جریان خمشی، کرنش بیشتر در یالهای چین متمرکز می شود و کرنش خیلی کمی در منطقه لولایی ایجاد می شود. ولی در کرنش طولی مماسی عکس قضیه اخیر رخ می دهد (Evans and Fischer, 2012). از آنجایی که تمرکز ذخایر معدنی در ارتباط با توزیع دگرریختی در مناطق چین خورده مثل طارم هستند، آگاهی از سازوکار تشکیل چین ها در یک منطقه از اهمیت بالایی برخوردار است.

### زمین شناسی محدوده مورد مطالعه

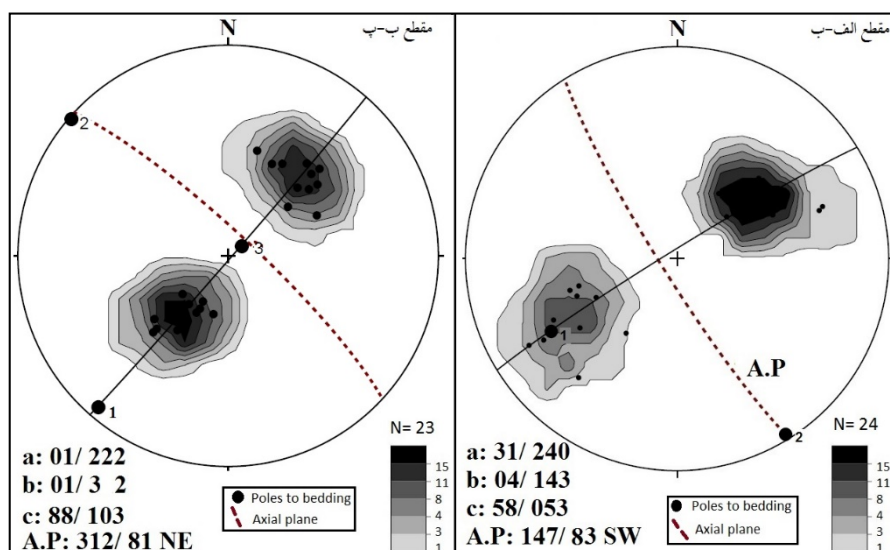
محدوده مورد مطالعه از لحاظ جغرافیایی در شمال غرب شهرستان قزوین بین عرض های جغرافیایی ۲۵° ۳۶' و ۲۵° ۳۶' شمالی و طول های ۴۹° ۲۵' ، ۴۹° ۰۰' شرقی قرار گرفته است (شکل ۱). واحدهای اصلی پهنه طارم را سنگ



شکل ۱: الف) نقشه توپوگرافی ایران که در آن موقعیت منطقه مورد مطالعه به وسیله چهار گوش با رنگ قرمز مشخص شده است. ب) نقشه زمین شناسی محدوده مورد مطالعه براساس نقشه یکصد هزار رودبار (Nazari and Salamti, 1998).

زنجان) با طول تقریبی ۵۰ کیلومتر منطبق بر حاشیه جنوبی باختری پهنة طارم می باشد. گسل اول با طول تقریبی ۱۵۰ کیلومتر در حاشیه شمال خاوری پهنة طارم واقع شده است. وجود این گسل های مورب لغز در حاشیه پهنة طارم و حرکات تعاملی آنها موجب دگرریختی در پهنة مذکور شده که باعث فعالیت مجدد بیشتر گسل های فرعی شده است (Shabazi et al, 2019). حرکات راستالغز راسترو در هر دو گسل باعث تشکیل پهنة برشی راسترو در منطقه شده است. به طوریکه چرخش ساعتگرد منتهج از این سامانه منجر به ایجاد گسل های فرعی راسترو با روندهای شمال باختری، شمالی- جنوبی و خاوری- باختری و انواع چپروبی با روند شمال خاوری شده است. شکستگی های موجود در این سامانه با شکستگی های سامانه رایدل (Riedel) قابل توجه هستند (Shabazi et al, 2019).

بررسی آماری لایه بندی در گستره مورد مطالعه بیانگر یک چین خوردگی با روند محوری شمال باختری- جنوب خاوری است. (شکل ۲). از لحاظ مکانیکی لایه های سنگ چینه ای قابل توجه در منطقه شامل انواع مقاوم مثل گدازه های بازالتی، آندزیتی، ماسه سنگ ها با میان لایه های نرم مثل شیل و توفیت شیلی می باشد. پهنة طارم توسط دوگسل بزرگ و البته فعال به نام های گسل شمال زنجان با روند شمال باختری، شیب شمال خاوری و سازوکار معکوس با مولفه راسترو (Allen et al, 2011) و گسل طارم با روند شمال باختری، شیب شمال خاوری و سازوکار معکوس با مولفه راسترو (قطعه های جنوب خاوری آن به ترتیب با نام های گسل چورزق و پهنة گسلی نهران-سیردان معروف است) (بهارفیروزی، ۱۳۹۱؛ اردکان و همکاران، ۱۳۹۵) تحت تأثیر قرار گرفته است. گسل زنجان (گسل شمال



شکل ۲: نمایش استریوگرامی داده‌های اندازه‌گیری شده از ۴۵ تعداد صفحه لایه بندی در واحدهای چینه ای معادل سازند کرج در طاق‌دیس طارم. دو مقطع عرضی الف-ب و ب-پ شکل های ۳ و ۴ به همراه موقعیت سطح محوری آن که به صورت خط چین نمایش داده شده است.

## روش و داده

ایستگاه رخنمون‌های پیوسته و طویل (بیش از ۱۵ متر) اندازه‌گیری شدند. در فرایند برداشت، وضعیت هر شکستگی به طور دقیق اندازه‌گیری شد. روابط قطع‌شدگی‌ها نیز به منظور تعیین سن نسبی شکستگی‌ها مدنظر قرار گرفتند. سپس داده‌های برداشت شده میدان‌های در هر ایستگاه جهت بررسی دقیق‌تر الگوی شکستگی‌ها به وسیله روش‌های استریوگرافی مورد ارزیابی قرار گرفتند. در روش استریوگرافی، برای هر ایستگاه توالی شکستگی‌ها توسط تهیه قطب صفحه  $\pi$  (صفحه گذرنده از قطب شکستگی‌ها) و بررسی فاصله آن نسبت به قطب لایه بندی، مطالعه شد (شکل‌های ۵، ۶ و ۷). در این روش با کاهش فاصله بین قطب صفحه  $\pi$  و قطب لایه بندی، سن شکستگی افزایش می‌یابد.

## تحلیل‌های دینامیکی و آماری

در این روش، با استفاده از نرم افزار وینتسور (Win-Tensor)، جهت تنش‌های اصلی مسبب شکستگی‌ها شامل انواع مزدوج و چینه کران و دایک‌های همروند با

روش‌های به کار گرفته شده در این تحقیق شامل بررسی‌های میدانی میان مقیاس، تحلیل‌های استریوگرافی، دینامیکی و آماری می‌باشد.

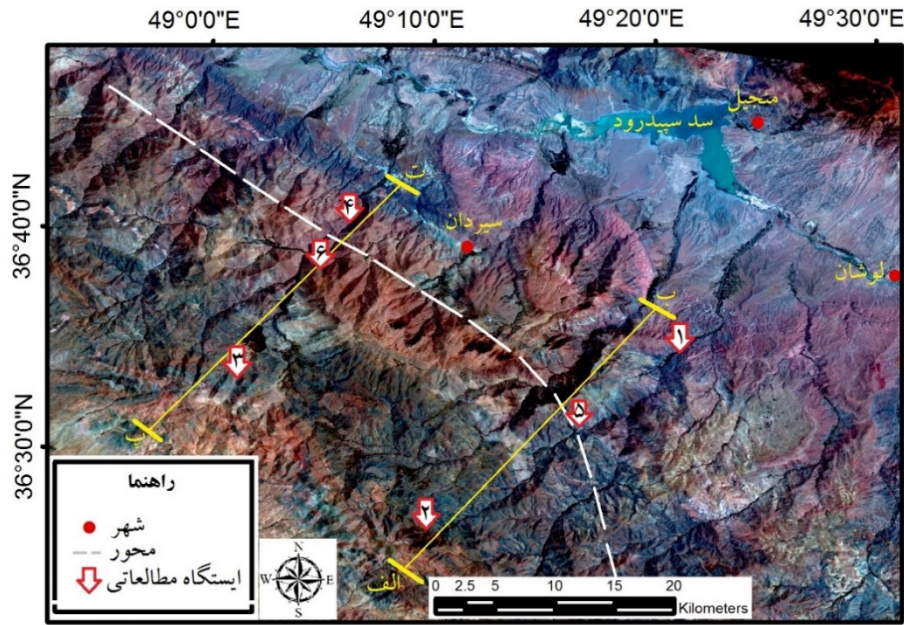
## مطالعات میدانی و استریوگرافی

برداشت‌های میان مقیاس در دو مقطع عرضی و غالباً در ۶ ناحیه شامل ۲ ایستگاه در منطقه لولایی و ۴ ایستگاه در یالها انجام شد (در هر یال ۲ ایستگاه) (شکل ۳). به منظور مطالعه تغییرات هندسی چین اصلی منطقه در اعماق بیشتر، دو مقطع ساختمانی عمود بر محور طاق‌دیس بر اساس داده‌های میدانی و نقشه‌های زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ رود بار (Nazari and Salamti, 1998) و ۱/۲۵۰۰۰۰ زنجان (Stocklin and Eftekhari-Nezhad, 1969) تهیه گردید (شکل ۴). شکستگی‌های موجود در هر ایستگاه ضمن مقایسه آنها در لایه‌های با ترکیب مختلف با یکدیگر، به صورت دقیق از نظر هندسی و آماری مورد مطالعه قرار گرفتند. جهت بازتاب دقیق الگوی شکستگی‌ها، در هر

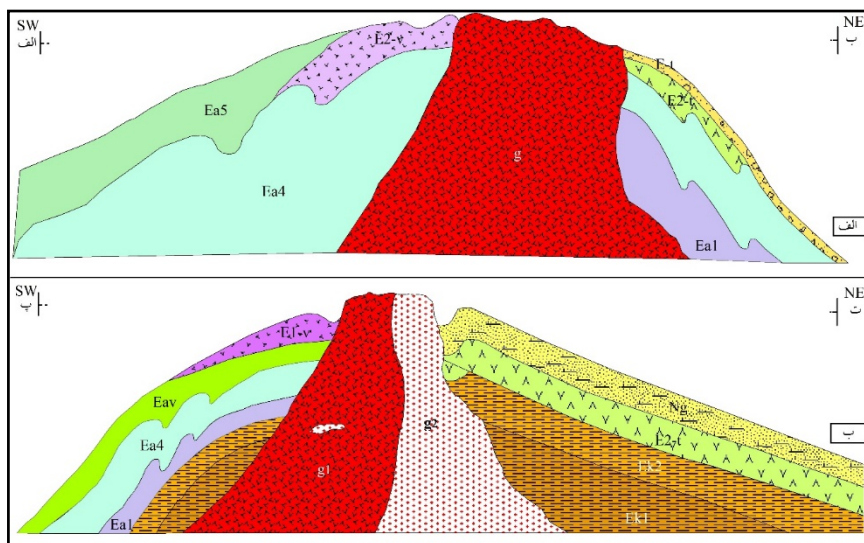


در روش آماری، بلوغ ساختاری شکستگی ها با اندازه گیری فاصله بندی آنها در لایه های نرم و سخت موجود در یالهای چین انجام شد. در مرحله بعد توسط نرم افزار اکسل نمودارهای مربوطه تهیه شدند (شکل ۱۱).

آنها محاسبه شد (شکل ۱۰). سپس جهت تنش های بدست آمده از تحلیل شکستگی ها با جهت تنش های به وجود آورنده چین مقایسه گردید.



شکل ۳: تصویر ماهواره ای لندست با ترکیب باندهای ۲۲۱ سنجنده TM به همراه ایستگاه های مطالعاتی و مقاطع عرضی. محور چین با خط سفید رنگ مشخص شده است. عارضه سرخ رنگ واقع در مرکز تصویر، توده گرانیتی سیردان را نمایش می دهد.



شکل ۴: مقاطع عرضی زمین شناسی ساختمانی از طاقدیس طارم بر اساس برداشت های صحرایی و نقشه های زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ رودبار و ۱/۲۵۰۰۰۰ زنجان. موقعیت مقاطع در اشکال ۱ و ۳ مشخص شده است.

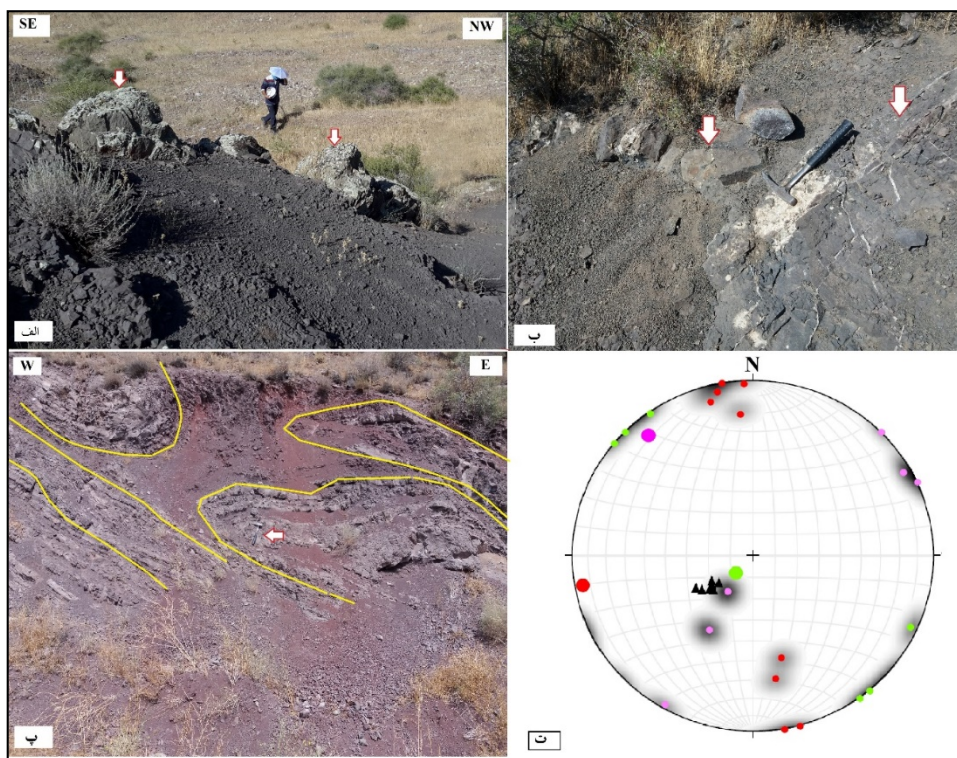




## نتایج

شده اشغال است (شکل ۵ الف- پ). شکستگی‌ها به سه دسته تقسیم شدند که براساس فاصله آنها نسبت به قطب صفحه  $\pi$  به ترتیب از قدیم به جدید شامل انواع شمال خاوری- جنوب باختری، خاوری- باختری و شمال باختری- جنوب خاوری می‌باشند (شکل ۵ ت). بررسی‌های صحرایی نشان می‌دهد که شکستگی‌های اخیر به طور یکنواخت در طاق‌دیس توزیع نشده‌اند. شواهد حاکی از آنست که تراکم آنها در یال نسبت به منطقه لولایی بیشتر است. این تفاوت، احتمالاً با توزیع ناهمگن کرنش به علت وجود اختلاف مکانیکی در لایه‌های شیلی و گدازه‌ها در زمان چین خوردگی قابل توجیه باشد.

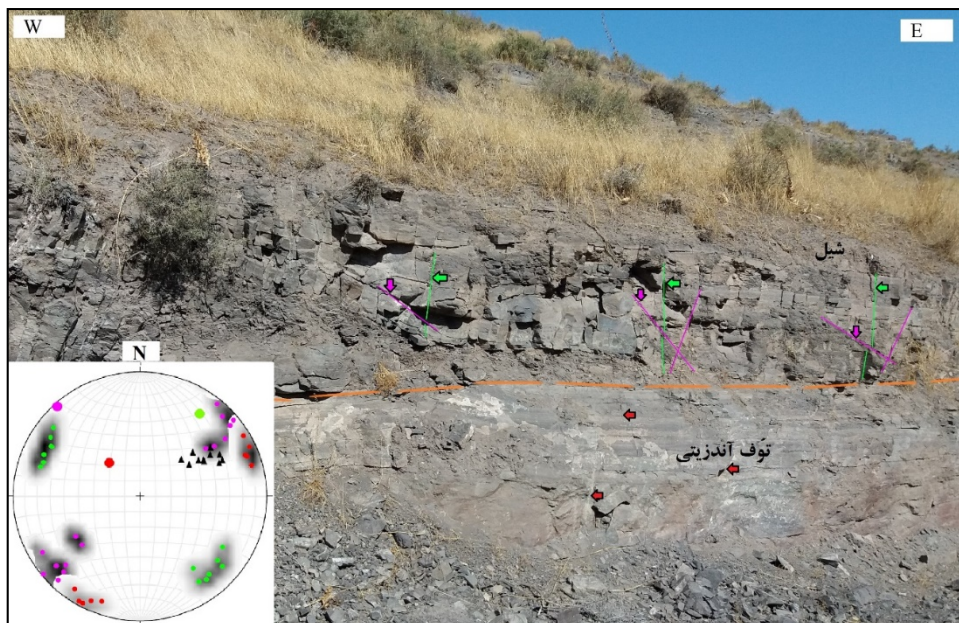
ایستگاه ۱: اندازه‌گیری‌ها در ایستگاه اول در حوالی روستاهای قلالو و مصطفی‌لو انجام گرفت. دگرریختی در زمان چین خوردگی در این منطقه به شدت در واحد‌های نرم از جمله شیل‌های مدادی و توفیت‌های شیلی متمرکز بوده است. به طوری‌که در شمال روستای قلالو باعث تشکیل چین‌های فرعی در واحد توفیت شیلی شده و در باختر روستای مصطفی‌لو باعث تشکیل درزه‌های فراوانی شده که متعاقباً توسط سیالات ماگمایی به صورت انواع رگه‌های سیلیسی، کلسیتی و دایک‌های با ترکیب حدواسط



شکل ۵: ایستگاه شماره ۱، الف و ب- دایک‌های نفوذی در واحد شیل مدادی معادل سازند کرج در ارتفاعات غربی روستای مصطفی‌لو. پیکان‌ها موقعیت دایک‌ها را نشان می‌دهند. پ- چین‌های فرعی در واحد توفیت شیلی واقع در شمال روستای قلالو. نوک پیکان به مقیاس اشاره دارد. و ت- تصویر استریوگرافیک مربوط به دسته‌های مختلف شکستگی. دایره‌های سبز، قرمز و صورتی به ترتیب مبین شکستگی‌های با روند شمال خاوری، خاوری- باختری و شمال باختری می‌باشند. در این تحقیق علاوه بر این شکل، در همه اشکال دیگر، قطب لایه بندی با مثلث توپر و قطب درزه‌ها با دایره توپر مشکی نمایش داده شده است.

از انواع مزدوج برشی صفحه ای تشکیل شده اند. به دلیل عدم حضور همزمان شکستگی های چینه کران و انواع کششی در یک لایه، سن نسبی آنها از طریق تحلیل های استریو گرافیک مشخص شد. در این بررسی، قطب صفحه  $\pi$  شکستگی های کششی نسبت به انواع چینه کران به قطب لایه بندی نزدیک تر است. یعنی شکستگی های چینه کران جوانتر از انواع کششی هستند (شکل ۶).

ایستگاه ۲: برداشت ها در ایستگاه دوم که همانند نوع اول منطبق بر مقطع عرضی الف-ب می باشد، در اطراف روستاهای علی آباد و فیله ورین انجام شد و شکستگی ها در سه دسته شناسایی شدند. شواهد حاکی از قطع شدگی و جابجایی شکستگی های مزدوج برشی توسط انواع چینه کران می باشند. (شکل ۶). بر اساس تحلیل های استریو گرافی و روابط قطع شدگی، شکستگی های چینه کران بعد

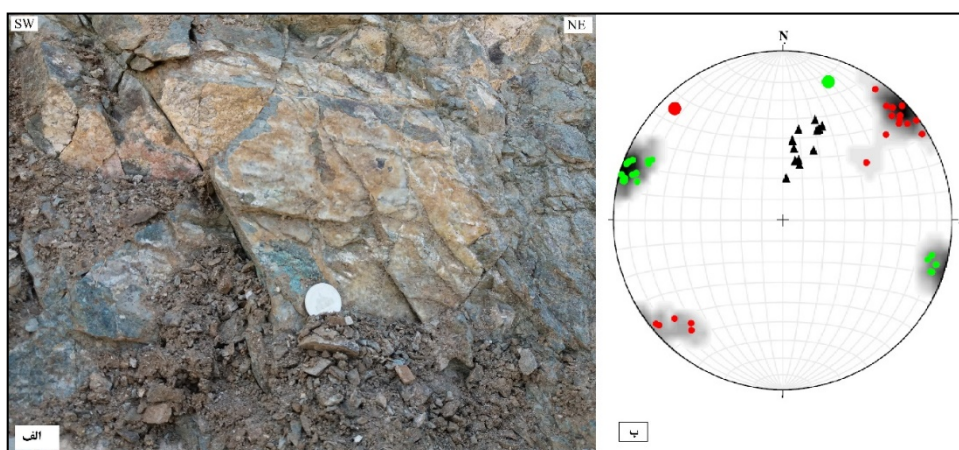


شکل ۶: ایستگاه شماره ۲، الگوی شکستگی ها از قدیم به جدید شامل

۱- شکستگی های برشی مزدوج (علائم سبز رنگ در هر دو تصویر)، ۲- شکستگی های برشی ناشی از خمش لایه ها در واحد توف آندزیتی (علائم قرمز) و ۳- شکستگی های برشی چینه کران به شکل مورب و متقاطع در مقطع (علائم صورتی) که در لایه شیلی باعث جابجایی انواع برشی مزدوج شده است.

بیشتر شکستگی ها محدود به لایه توفیت شیلی می باشند و به عبارتی از نوع چینه کران هستند. توالی تشکیل شکستگی ها براساس تحلیل های استریوگرافیک نیز گویای ایجاد شکستگی های مزدوج صفحه ای در اوایل چین خوردگی است (دایره سبزرنگ در شکل ۷-ب).

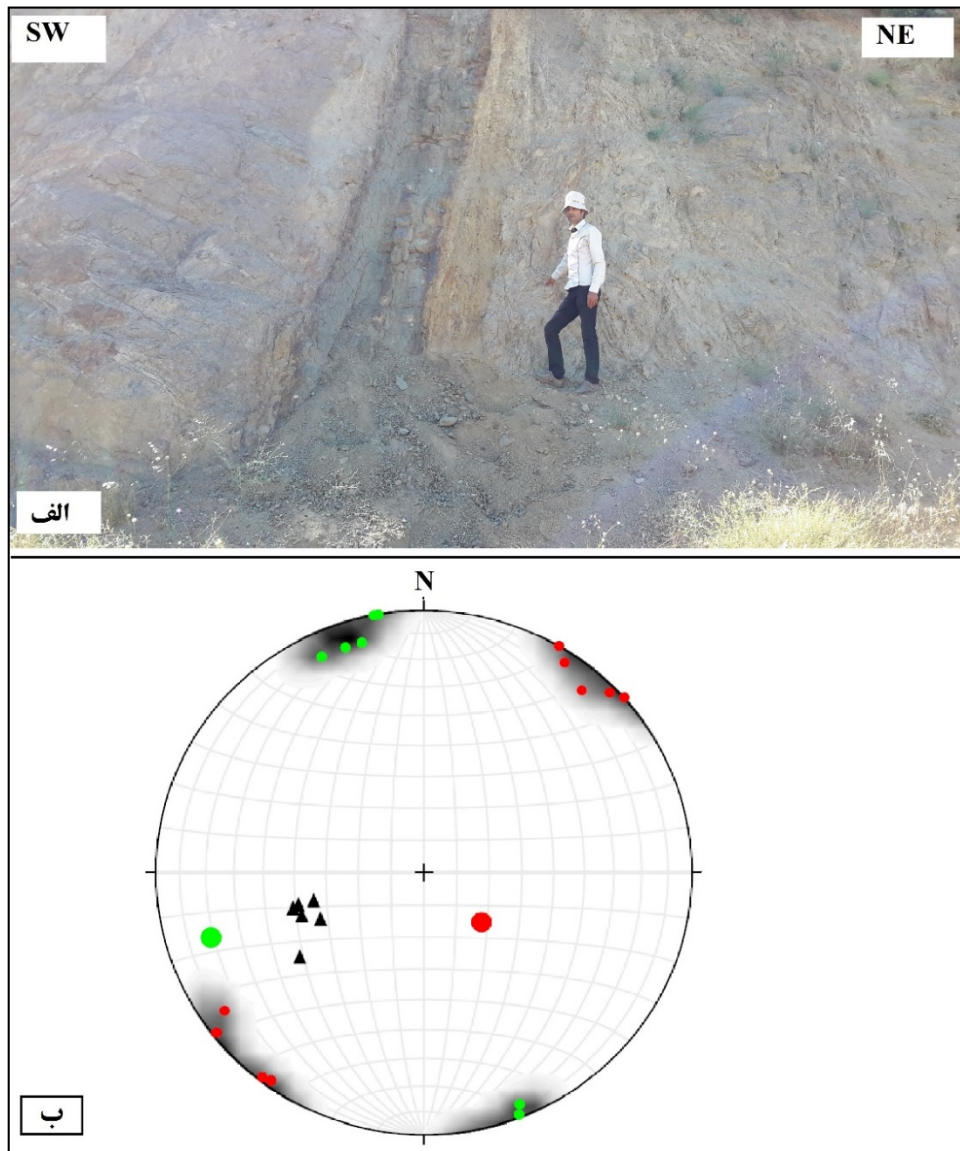
ایستگاه ۳: بررسی ها در این ایستگاه در جنوب روستای چیزه انجام شد. وجود کنترل مکانیکی از جمله تراکم بالای شکستگی ها و چین های فرعی در لایه های نرم (توفیت شیلی) باعث انتخاب این ایستگاه مطالعاتی شد. شکستگی های مزدوج صفحه ای موازی لایه و برشی چینه کران محدود به لایه های نرم به خوبی شناسایی شدند (شکل ۷).



شکل ۷. ایستگاه شماره ۳، الف- شکستگی های چینه کران که در مقطع یال چین به صورت مورب و متقاطع دیده می‌شوند، ب- استریونوت مربوط به شکستگی های مذکور (مثلث قرمز) و دسته شکستگی های مزدوج صفحه ای (دایره سبز).

ایستگاه ۴: مطالعات این ایستگاه در ارتفاعات جنوبی روستای آلتین کش انجام شد. در این منطقه نیز واحدهای نرم از جمله شیل ها و توفیت ها تحت نفوذ شدید دایک های نفوذی در درزه های از پیش موجود قرار گرفته است. شکستگی ها با دو روند شمال خاوری و شمال باختری تشکیل شده اند. دسته شمال باختری نسبت به لایه بندی به صورت مورب تشکیل شده و دایک های منطقه در طول آنها نفوذ کرده است. این شکستگی ها فقط در لایه های نرم تشکیل شده و از نظر سنی جوانتر از دسته دیگر (زمینه ای) هستند (شکل ۸). تعداد دایک های نفوذی در لایه های نرم نسبت به انواع مقاوم همانند ایستگاه های دیگر بیشتر هستند. به عبارت دیگر، تراکم بالای دایک ها در این لایه ها و همروند بودن آنها با شکستگی های چینه کران، کنترل ساختاری شکستگی های اخیر بر دایک زایی استنباط می‌شود.





شکل ۸. ایستگاه شماره ۴. الف- تصویر مزوسکوپی از درزه های موجود در توفیت های شیلی که یکی از دسته ها توسط دایک ها اشغال شده است. دایره سبز و قرمز به ترتیب مبین درزه های شمال خاوری و شمال باختری هستند.

اطراف روستاهای مقانک و دیزه جین واقع شده است. جنس رخنمون در این منطقه کاملاً از توده های نفوذی با نسل های مختلف به ویژه مونزونیت (معروف به گرانیت سیردان) می باشد. توده های مذکور به شدت تحت تأثیر فازهای زمین ساختی پس از الیگوسن قرار گرفته و توسط دسته درزه های فراوان سامانمند باروندهای شمال باختری- جنوب خاوری و شمال خاوری- جنوب باختری قطع شده اند (شکل ۹-ب).

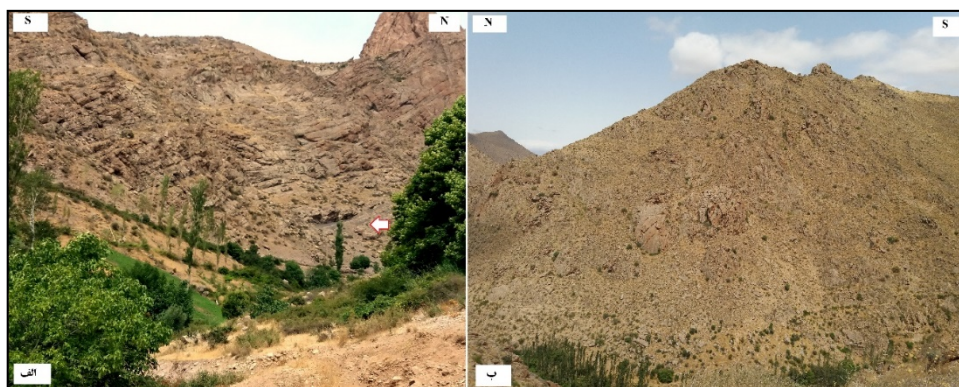
ایستگاه ۵ و ۶: بر اساس شکل ۳، هر دو ایستگاه در منطقه لولایی طاقدیس قرار دارند. ایستگاه ۵ در حوالی روستاهای محمد ده و پلنگه واقع شده که غالباً دارای لایه های صخره ساز داسیتی و آندزیتی است. ساختارهای عمده در این واحدها درزه های با شیب تقریباً قائم می باشند. لایه های توفی و شیلی با دگرریختی ضعیف، بسیار فرسایش یافته و دره ها عمدتاً از این واحدها تبعیت می کنند (شکل ۹-الف). ایستگاه ششم منطبق بر موقع عرضی پ-ت در



حرکت بر روی آنها می باشد که احتمالاً با فعالیت گسل های اصلی در ارتباط باشد. البته شواهد جنبشی در دسته شکستگی های دیگر از جمله در دسته (B) نیز تشکیل شده است. از آنجایی که کرنش منتهی به فعالیت گسلش، به جای ایجاد شکستگی های جدید، در صورت وجود نقاط ضعف از پیش موجود مثل شکستگی توزیع و تعدیل می شود، القای حرکت بر روی شکستگی های حاصل از چین در منطقه مورد مطالعه قابل استنباط است.

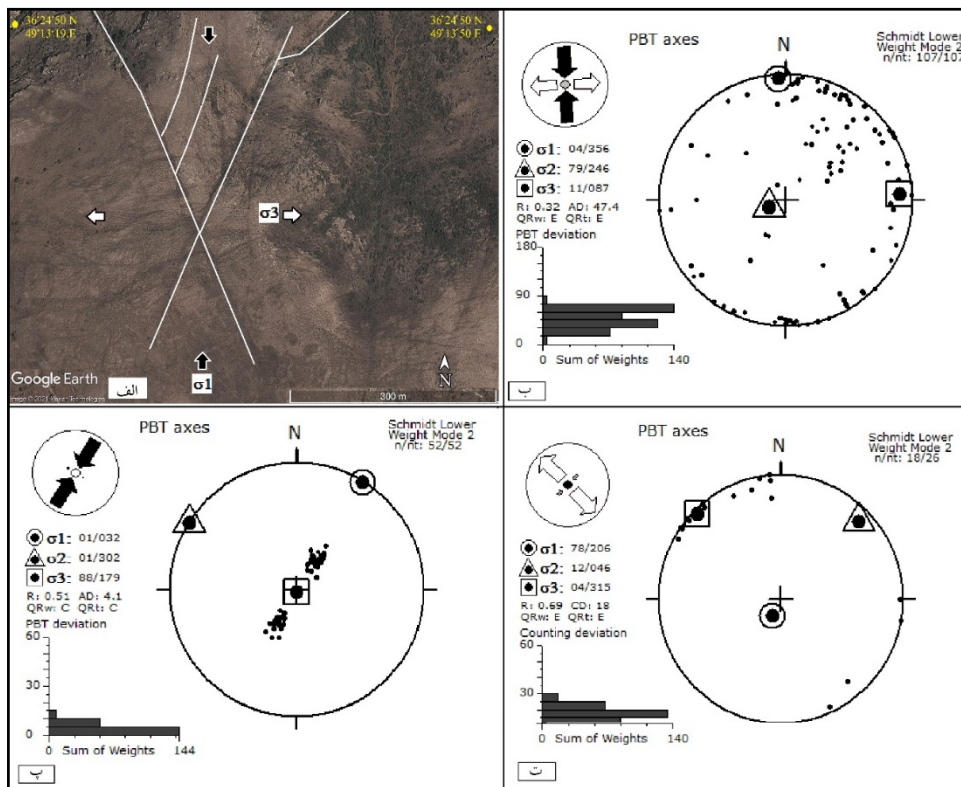
با توجه به مقاطع زمین شناسی ساختاری (شکل ۴) و تحلیل استریوگرافی (شکل ۲) و با اندازه گیری پارامترهای مربوط به چین ها (Twiss and Moores (1992)، طاقدیس طارم از نوع چین نامتقارن است. زاویه بین دو یالی طاقدیس از مقدار ۷۲ درجه در مقطع الف-ب به ۸۰ درجه در مقطع ب-پ تغییر می کند. مقدار زاویه بین یالی بر اساس طبقه بندی (Fleuty (1964 به نوع بسته (Close) تعلق دارد.

نهایتاً با توجه به داده های صحرایی و نمودارهای ترسیم شده، شکستگی های مرتبط با چین در طاقدیس طارم به سه دسته شامل دسته (A) با میانگین روندهای ۲۵ و ۳۳۰ درجه از نوع شکستگی های مزدوج، دسته (B) یا انبساطی با میانگین امتداد ۱۲۵ درجه به موازات محور چین، دسته (C) یا چینه کران با میانگین امتداد ۱۲۰ تقسیم شدند. شکستگی های اخیر بیشتر محدود به لایه های نرم از جمله توفیت شیلی هستند. نتایج حاصل از تحلیل های دینامیکی شکستگی های دسته (A) و (B) در منطقه نشانگر ارتباط آنها با ساختمان چین منطقه می باشد (شکل ۱۰). شکستگی های مذکور از لحاظ دینامیکی از جمله جهت گیری تنش های اصلی، با چین منطقه ولی از نظر جنبشی با گسل های اصلی مثل طارم و زنجان سازگار هستند. بعنوان مثال در شکل ۱۰-الف، جهت تنش های مسبب شکستگی های مزدوج (دسته A) با جهت تنش های به وجود آورنده چین منطقه سازگاری دارد، ولی شواهد جنبشی از جمله پایانه های دم اسبی، حاکی از چرخش جهات تنش و القای



شکل ۹: ایستگاه ۵ و ۶. الف- دگرریختی شدید واحدهای آندزیتی و بازالتی در منطقه لولایی واقع در ۳ کیلومتری شمال روستای محمد ده. پیکان قرمز، لایه شیلی را نشان می دهد. در این منطقه لایه های مقاوم با شکستگی های زیادی قطع شده ولی واحد شیلی به وسیله شکستگی های با فاصله زیاد قطع شده است.  
ب- خردشدگی توده گرنیتی سیردان در ایستگاه ۶ واقع در شمال خاوری روستای دیزه جین که حاصل دگرریختی منتهی به فعالیت های برهم کنشی بین گسل های زنجان و طارم است.





شکل ۱۰: الف- شکستگی های مزدوج (دسته A) با روندهای ۲۵ و ۳۳۰ درجه به همراه جهت تنش های اصلی. ب و پ- به ترتیب نشانگر جهت تنش های حاصل از دسته شکستگی های B و C. ت- دایک های نفوذی در شکستگی های موجود در لایه های نرم بال های طاقدیس طارم.

(Su et al, 2014). شکستگی های کششی قبل از انواع برشی چینه کران تشکیل می شوند، چون آنها یک فرایند متوالی در یک لایه نیستند. چون شکستگی های مذکور به طور همزمان شروع و یا تشکیل نمی شوند. گسترش هر دو نوع شکستگی اخیر توسط رفتار مکانیکی لایه های سنگی کنترل می شود (Su et al, 2014). از لحاظ مکانیکی، شکستگی های کششی در لایه های مقاوم مثل ماسه سنگ در حالی که شکستگی های برشی چینه کران در لایه های نرم مثل گل‌سنگ تشکیل می شوند. سامانه شکستگی های چینه کران با اندازه محدود و فاصله منظم در لایه های منفرد تشکیل می شوند (Odling et al, 1999). Ramsay and Huber (1987) معتقدند که در طول تکامل یک چین، لایه مقاوم تحت کرنش طولی مماسی دگرریخت می شود ولی لایه نرم متحمل کرنش برشی شدید موازی لایه می شود. به

## بحث

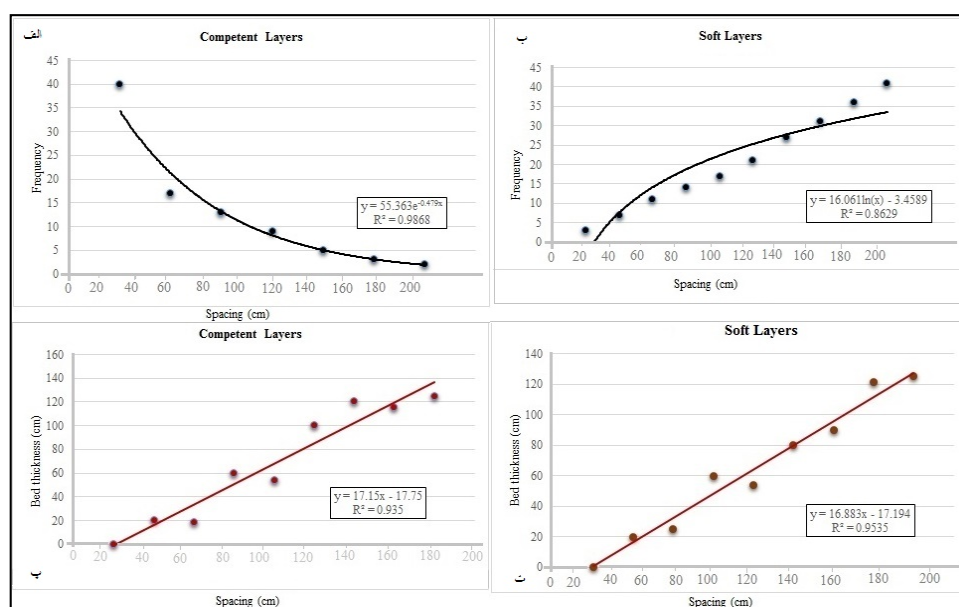
براساس تحقیقات انجام شده (Ismat, 2008; Evans and Fischer, 2012; Su et al, 2014) شکستگی یکی از روش های بررسی سازوکار تشکیل چین ها در هر منطقه می باشد. در اوایل چین خوردگی زمانی که لایه ها تقریباً افقی هستند، به دلیل فشارش افقی دو دسته شکستگی مزدوج صفحه ای عمود بر لایه بندی گسترش می یابند (Su et al, 2014). سپس با چرخش لایه ها با شیب کم، یک دسته شکستگی کششی عمود بر سطح لایه بندی تحت تنش های کششی توسعه می یابند. در ادامه با چرخش بیشتر لایه ها، کرنش برشی چیره شده و باعث گسترش دو دسته شکستگی برشی چینه کران می شوند که در مقطع عمودی نسبت به لایه بندی به صورت مورب ظاهر می شوند



می باشد. (Guerrero et al, 2015). یعنی فاصله شکستگی های مذکور با ضخامت لایه ها نسبت مستقیم داشته و عوامل دیگر مثل خصوصیات بافتی و سنگ شناختی تأثیر چندانی نداشته است. این در حالی است که در پهنه طارم شکستگی های چینه کران علاوه بر ضخامت لایه ها، تابع خصوصیات سنگ شناختی نیز می باشند (شکل ۱۱). چون نمودار فاصله بندی شکستگی های موجود در یالهای چین، در واحدهای مقاوم با تابع نمایی سازگار است و در لایه های نرم خط برازش داده ها با تابع نرمال همبستگی خوبی نشان می دهد (شکل ۱۱-الف و ب). این یعنی تحولات ساختاری کم در لایه های مقاوم و حد نهایی بلوغ ساختاری در لایه های نرم می باشد (Rives et al, 1992). این رویداد با توزیع متفاوت کرنش در واحدهای مختلف در سازوکار لغزش خمشی قابل توجه می باشد. به عبارت دیگر، لایه های نرم موجود در یالهای طاقدیس طارم نسبت به انواع مقاوم، در فرایند چین خوردگی متحمل کرنش بیشتری شده و در نتیجه از بلوغ ساختاری بالایی برخوردار هستند.

عبارت دیگر دگرریختی تحت کرنش طولی مماسی در لایه مقاوم در منطقه لولایی متمرکز می شود در حالیکه کرنش برشی موازی لایه در لایه نرم در یال چین ایجاد می شود (Evans and Fischer, 2012). وجود سازوکار جریان خمشی باعث کرنش برشی موازی لایه و در نتیجه تمرکز دگرریختی در لایه نرم می شود. همانطوری که در مباحث قبلی اشاره شد ترکیب دو سازوکار اخیر به سازوکار لغزش خمشی معروف است. (Su et al, 2014). شکستگی های برشی چینه کران منتجه از دگرریختی برشی موازی لایه را که در برخی مطالعات با مدل رایدل مقایسه شده را منطقی نمی دانند. چون نامبردگان اخیر معتقدند جهت برش در هر دو دسته شکستگی های چینه کران یکسان بوده ولی در انواع مزودج صفحه ای مربوط به اوایل چین خوردگی، متفاوت می باشد.

مطالعات آماری شکستگی های چینه کران نشانگر کنترل ضخامت لایه ها بر فاصله شکستگی های چینه کران



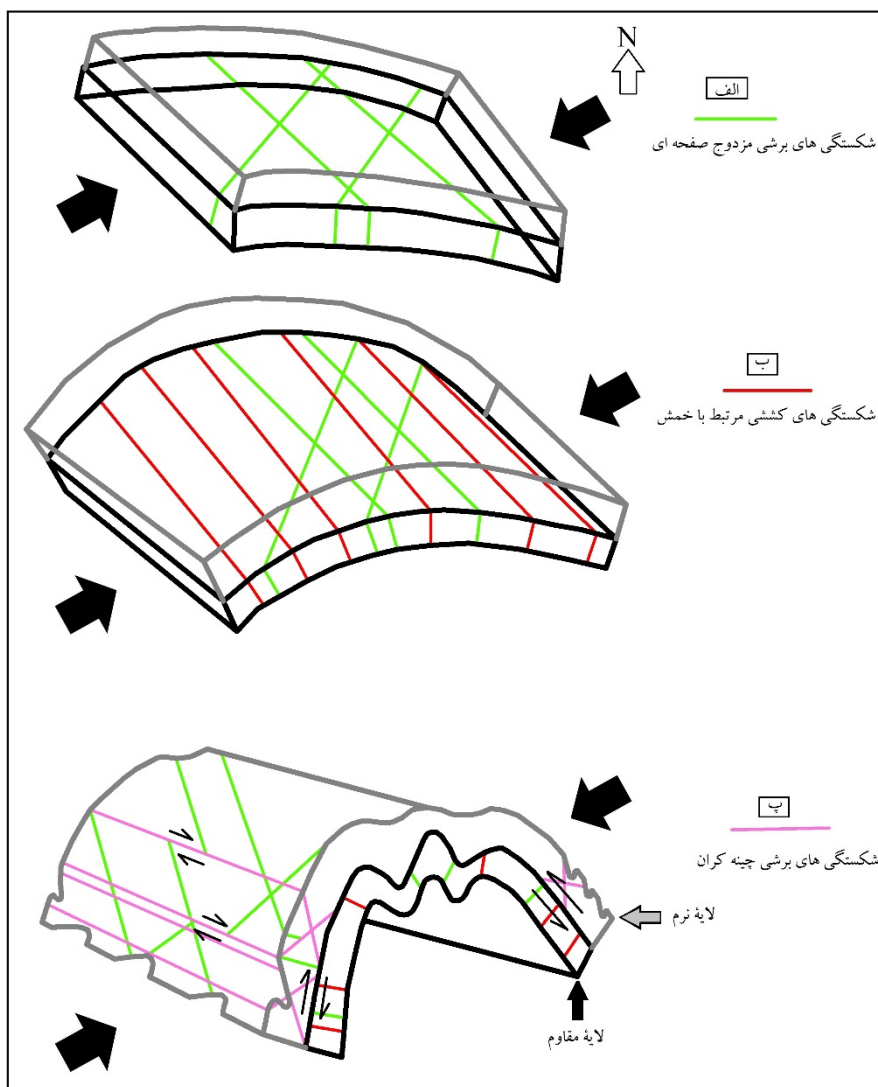
شکل ۱۱: تحلیل آماری شکستگی ها در یالهای طاقدیس طارم،

الف و ب- نمودار حاصل از فاصله بندی شکستگی ها به ترتیب در لایه های مقاوم و نرم. پ و ت- نمودار مربوط به فاصله بندی شکستگی ها نسبت به ضخامت به ترتیب در لایه های مقاوم و نرم.



در منطقه مورد مطالعه شکستگی های مرتبط با چین از نظر سنی و وضعیت تشکیل به سه دسته تقسیم می شوند. به ترتیب سنی شامل: ۱- انواع شکستگی های مزدوج صفحه ای مربوط به اوایل چین خوردگی (دسته A)، ۲- شکستگی های کششی ناشی از خمش لایه (دسته B) و ۳- شکستگی های چینه کران حاصل از برش موازی لایه هستند (دسته C) (شکل ۱۲). مهم ترین شواهد شکستگی های چینه کران در ایستگاه شماره ۳ در واحدهای توفیت شیلی قابل مشاهده می باشد (شکل ۷). در یال شمال خاوری در ایستگاه مطالعاتی اول این تحقیق، شکستگی های چینه کران در مقطع چین به صورت مورب با روند شمال باختری ظهور یافته اند. این موضوع علاوه بر شواهد میان مقیاس، توسط تحلیل های استریوگرافی آن نیز استنباط می شود. چون از نظر توالی تشکیل پس از شکستگی های مزدوج صفحه ای تشکیل شده اند.

شکستگی هایی که قبل و یا در اوایل چین تشکیل می شوند همزمان با چرخش لایه ها در زمان چین خوردگی از نظر وضعیت دچار اعوجاج می شوند. میزان این تغییرات وضعیت در مناطق مختلف بسته شرایط تشکیل چین متفاوت بوده و بررسی الگوی آنها در بازسازی شرایط تشکیل و سازوکار چین ها بسیار حائز اهمیت می باشد. به طور کلی هر چه قطب شکستگی ها از لایه ها و یا به عبارت دیگر قطب صفحه  $\pi$  از قطب لایه بندی فاصله بیشتری داشته باشد حاکی از آنست که در فاصله زمانی بیشتری از آغاز چین خوردگی تشکیل شده است. و در نهایت دگرریختی شدید لایه های نرم در یالهای طاقدیس طارم نسبت به منطقه لولایی آن و همچنین رخداد عکس این قضیه در واحدهای مقاوم حاکی از تشکیل طاقدیس طارم با سازوکار لغزش خمشی می باشد.



شکل ۱۲: تصویر شماتیک از الگوی شکستگی های مرتبط با چین،

لف- تشکیل شکستگی های برشی مزدوج صفحه ای در اوایل چین خوردگی، ب- با چرخش بیشتر لایه ها در اثر تنش های حاصل از خمش لایه ها، شکستگی های کششی ایجاد می شوند و پ- شکستگی های برشی چینه کران که در اثر برش به موازات لایه بندی تشکیل شده و باعث جابجایی در انواع مزدوج برشی می شوند.



زنجان جهت همکاری در زمینه انجام عملیات صحرایی تقدیر و تشکر می شود. از لطف و محبت سردبیر محترم مجله و پیشنهادات داوران محترم در چنین شرایط کرونایی وقت ارزشمند خویش را در جهت بهبود پیش نویس مقاله ارائه نمودند نهایت تشکر و قدردانی را داریم.

## نتیجه گیری

الگوی شکستگی های مختلف مرتبط با چین در لایه های مختلف شناسایی شدند که شامل ۱- شکستگی های مزدوج صفحه ای مربوط به اوایل تشکیل چین (دسته A)، ۲- شکستگی های کششی ناشی از خمش لایه ها (دسته B) و ۳- انواع چینه کران منتهج از برش موازی لایه (دسته C) در مراحل نهایی چین خوردگی هستند. شکستگی های چینه کران در لایه های نرم موجود در یالهای چین متمرکز هستند. رگه ها و دایک ها به شدت از شکستگی های چینه کران محدود به لایه های نرم تبعیت می کنند که جهت تنش های اصلی حاصل از آنها با جهت تنش های تشکیل دهنده طاقدیس طارم سازگار هستند. مطالعات آماری شکستگی های موجود در یالهای طاقدیس طارم حاکی از تحولات بیشتر آنها در لایه های نرم نسبت به انواع مقاوم هستند. چین های فرعی در یالهای طاقدیس طارم، در لایه های نرم مثل شیل های مدادی و توفیت های شیلی معادل سازند کرج تشکیل شده است به طوریکه لایه های مقاوم در زمان چین خوردگی دچار تغییرات خیلی شدید نشده اند. در منطقه لولایی طاقدیس، لایه های مقاوم مثل انواع گدازه ها به شدت دگرریخت و خرده شده هستند در حالیکه واحدهای نرم دگرریختی ضعیفی را متحمل شده اند. بنابراین، چین خوردگی با سازوکار لغزش خمشی طاقدیس طارم قابل استنباط است.

## سپاسگزاری

این تحقیق بخشی از رساله دکتری نویسنده اول و بر اساس حمایت های مالی دانشگاه گلستان انجام شده است. نویسندگان مقاله مراتب سپاس خود را از بخش پژوهشی و فناوری دانشگاه ابراز می دارند. همچنین از دانشگاه پیام نور مرکز قزوین و دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه





## منابع

- Bergbauer, S., Pollard, D.D., 2004. A new conceptual fold-fracture model including pre-folding joints, based on the Emigrant Gap anticline, Wyoming. *Geological Society of America Bulletin* 116, 294-307.
- Chester, J.S., 2003. Mechanical stratigraphy and fault-fold interaction, Absaroka thrust sheet, Salt River Range, Wyoming. *Journal of Structural Geology* 25, 1171-1192.
- Donath, F. A., and Parker. R. B., 1964. Folds and folding. *Bull. geol. Soc. Am.* 75, 45-62.
- Engelder, T., Peacock, D.C.P., 2001. Joint development normal to regional compression during flexural-fow folding: the Lilstock buttress anticline, Somerset, England. *Journal of Structural Geology* 23, 259-277.
- Evans, M. A., Fischer, M. P., 2012. On the distribution of fluids in folds: A review of controlling factors and processes. *Journal of Structural Geology* 44, 2- 24.
- Ghasemi-Siani, M., Mehrabi, B., Azizi, H., Maya-Wilkinson, C. and Ganerød, M., 2015. Geochemistry and geochronology of the volcano-plutonic rocks associated with the Glojehpithermal gold mineralization, NW Iran. *Open Geosci*, 7, 207-222.
- Guerriero, V., Dati, F., Giorgioni, M., Iannace, A., Mazzoli, S., Vitale, S., 2015. The role of stratabound fractures for fluid migration pathways and storage in well-bedded carbonates. *Ital. J. Geosci.*, 134, 383-395.
- Hancock, P.L., 1985. Brittle microtectonics: principles and practice. *Journal of Structural Geology* 7, 437-457.
- Hirayama, K., samimi, m., zahedi, m., Hushmand-Zadeh, A., 1966. *Geology of Taroum district, western part (Zanjan area north-west Iran)*. Geological Survey of Iran, Report 8.
- Ismat, Z., 2008. Folding kinematics expressed in fracture patterns: an example from the Anti-Atlas fold belt, Morocco. *J. Struct. Geol.* 30, 1396-1404.
- Jamison, W.R., 1992. Stress controls of fold thrust style. In: McClay, K.R. (Ed.), *Thrust Tectonics*. Chapman and Hall, London, 155-164.
- احمدی، ب، مریدی فریمانی، ع، ا، حسینی، م، ۱۳۹۲. بررسی هندسی طاقدیس طارم و کنترل آن در کانسارزایی منطقه (شمال شرق زنجان)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان.
- اردکان، م، شبانیان، ا، منصف، ا، ۱۳۹۵. بررسی نقش جنبشهای سنوزویک (الیگوسن - کواترنری) در شکل‌گیری دره طارم. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان.
- بهارفیزی، خ، ۱۳۷۶. بررسی زونهای آلتراسیون و زوناسیون عمودی در کانسار تپ اسکارن پورفیری مس - مولیبدن سونگون اهر، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت معلم تهران.
- حاجی علی بیگی، ح، علوی، س، ا، افتخارنژاد، ج، مختاری، م، آدابی، م، ح، ۱۳۸۷. استفاده از شکستگی‌ها در تفسیر ساختاری یک تاقدیس، مطالعه موردی: تاقدیس چناره، جنوب باختر ایران، مجله علوم زمین، ۷۴، ۳۳-۴۴.
- ناظمی، ا. و قطب تحریری، ف، ۱۳۹۳. پترولوژی، ژئوشیمی و کانی‌سازی در گرانیت‌ها و دایک‌های چیدر در جنوب غرب منجیل. دومین همایش ملی پترولوژی کاربردی، اصفهان.
- Allen, M. B., Kheirkhah, M., Emami, M. H. & Jones, S. J., 2011- Right- lateral shear across Iran and kinematic change in the Arabia-Eurasia collision zone. *Geophysical Journal international* 184, 555-574.
- Anastasio, D.J., Fisher, D.M., Messina, T.A., Holl, J.E., 1997. Kinematics of décollement folding in the Lost River Range, Idaho. *Journal of Structural Geology* 19, 355-368.
- Bellahsen, N., Fiore, P., Pollard, D.D., 2006. The role of fractures in the structural interpretation of Sheep Mountain Anticline, Wyoming. *Journal of Structural Geology* 28, 850-867.



- geochemistry of the Zehabad intermediate-sulfidation epithermal deposit, NW Iran. *Turkish J Earth Sci.* 28, 882-901.
- Srivastava, D.C., Engelder, T., 1990. Crack-propagation sequence and pore-fluid conditions during fault-bend folding in the Appalachian Valley and Ridge, central Pennsylvania. *Geological Society of America Bulletin* 102, 116-128.
- Stocklin, J. and Eftekhari-Nezhad, J., 1969. Explanatory text of Zanjan quadrangle map. G.S.I, Rep, No. D4, scale 1: 250,000.
- Su, N., Zou, L., Shen, X., Shen, F., Ren, Y., Xie, Y., Wu, J., 2014. Fracture patterns in successive folding in the western Sichuan basin, China. *Journal of Asian Earth Sciences* 81, 65-76.
- Tavani, S., Storti, F., Salvini, F., Toscano, C., 2008. Stratigraphic versus structural control on the deformation pattern associated with the evolution of the Mt. Catria anticline, Italy. *Journal of Structural Geology* 30, 664-681.
- Lemiszki, P.J., Landes, J.D., Hatcher Jr., R.D., 1994. Controls on hinge-parallel extension fracturing in single-layer tangential-longitudinal strain folds. *Journal of Geophysical Research* 99, 22027-22042.
- Nazari, H., Salamati, R., 1998. Geological map of the Rudbar. Geological Survey of Iran, scale 1/100,000.
- Pollard, D.D., Aydin, A., 1988. Progress in understanding jointing over the past century. *Geological Society of America Bulletin* 100, 1181-1204.
- Ramsay, J.G., Huber, M.I., 1987. *The Techniques of Modern Structural Geology*. In: *Folds and Fractures*, Vol. 2. Academic Press, London.
- Rezaeian, M., Carter, A., Hovius, N. and Allen, M.B., 2012. Cenozoic exhumation history of the Alborz Mountains, Iran: New constraints from low-temperature chronometry. *Tectonics*, 31(2).
- Rives, T., Razack, M., Petit, J.P., Rawnsley, K.D., 1992. Joint spacing : analogue and numerical simulations. *Journal of structural geology*, 14, 925-937.
- Shahbazi, S., Ghaderi, M., Alfonso, P., 2019. Mineralogy, alteration, and sulfur isotope



فصلنامه زمین ساخت

پاییز ۱۳۹۹، سال چهارم، شماره ۱۵

doi: 10.22077/jt.2021.3751.1092

## تغییر جهت میدان تنش در پهنه گسلی کاشان در زمان نئوژن، بخش میانی پهنه ارومیه دختر

سیما ناقه<sup>۱</sup>، میثم تدین<sup>۲\*</sup>، همایون صفایی<sup>۳</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری تکنیک، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه گلستان
- ۲- دانشیار تکنیک، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه گلستان
- ۳- استادیار تکنیک، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان
- ۴- استادیار زمین شناسی اقتصادی، گروه زمین شناسی، دانشگاه پیام نور مرکز قزوین

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۶

### چکیده

پهنه گسلی کاشان در ۳۰ کیلومتری جنوب شرق شهر کاشان با امتداد شمال غربی-جنوب شرقی و درازای ۸۰ کیلومتر در بخش میانی پهنه ماگمایی ارومیه-دختر گسترش یافته است. این پهنه گسلی واحدهای آتشفشانی اتوسن، توده‌های نفوذی و کرناته الیگومیوسن، واحدهای رسوبی میوسن و کواترنری را قطع کرده است. داده‌های ساختاری برداشت شده نشانگر راستای شمال غربی-جنوب شرقی و سازوکار برشی راستگرد با مولفه کوچک فشارشی برای گسل اصلی کاشان به عنوان پهنه اصلی گسلی در منطقه است. نتایج حاصل از برگردان تنش دیرین و داده‌های ساختاری برداشت شده نشانگر تغییر راستای تنش فشارشی از شمال شرقی-جنوب غربی به شمالی-جنوبی از زمان میوسن میانی به بعد است. این رژیم فشارشی شمالی-جنوبی سبب چین خوردگی و گسل خوردگی سازندهای قم و قرمز بالایی با امتداد تقریبی شرقی-غربی و همچنین ته نشست رسوبات تخریبی پلیوسن و کواترنری در منطقه به ویژه در گرابن‌هایی با امتداد شمالی-جنوبی شده است.

**واژه‌های کلیدی:** پهنه گسلی کاشان، سازوکار فشاری-برشی راستگرد، پهنه ارومیه-دختر، تنش دیرین.



## Change in direction of stress field in Kashan fault zone during Neogene, Middle part of Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc.

Nagheh .S<sup>1</sup>; Tadayyon .M<sup>2\*</sup>; Safayi .H<sup>3</sup>; Nabaei .T<sup>4</sup>

1-Sima nagheh/ PhD student in Tectonics, Department of Geology, University of

2-Meisam tadayon/ Department of Geology, University of Isfahan

3-Homayon safaie/ Retired from the Department of Geology, University of Isfahan

### Abstract

The Kashan fault zone is located 30 km Southeast of Kashan with strike NW-SE and 80 km length that propagated in the middle part of Urumieh-Dokhtar magmatic arc. This fault zone intersects Eocene-volcanic intrusive, Oligocene conglomerates, Oligo-Miocene carbonate masses, Neogene and Quaternary sedimentary Units. In this research, reconstruction of paleo and neo-stress and structural evolution of Kashan fault zone has been assessed. The collected structural data indicates the NW-SE trend and right-lateral transpression for main Kashan fault as the main fault zone in the region. The result of paleo-stress inversion and collected structural data indicate that after likely Middle Miocene (ca. Upper Miocene) the regional stress regime has been changed in which the direction of the maximum compression changed from NE-SW to N-S. The new N-S directed maximum compression caused the propagation of the E-W trending folds of the Neogene sediments and right-lateral kinematics of Kashan fault zone in the area. Furthermore, new N-S directed maximum compression formed the N-S trending grabens that have been filled by Pliocene and Quaternary detrital deposits.

**Keywords:** Kashan fault zone, Right lateral transpressional, Urumieh-Dokhtar zone, Paleo-stress



## مقدمه

اساس قانون دست راست (RHR) انجام و عنوان شده است. همچنین جهت شناسایی بهتر عناصر ساختاری از داده های (ETM+) ماهواره Landsat7 به شماره (۱۶۴/۳۷) که دارای ۸ باند طیفی می باشد، استفاده شده است. در این پژوهش به بازسازی تنش دیرین و تحلیل تکامل ساختاری پهنه گسلی کاشان پرداخته شده است. در این راستا به محاسبه ی موقعیت تنش بیشینه در زمان گذشته (PaleoStress) به کمک نرم افزار Daisy از روش های محاسباتی برگردان تنش همچون Montecarlo Direct Inversion و Rotax Inversion برای گسل های برداشت شده و از روش محاسبه آماری صفحه پی و محور بتا بر روی لایه بندی های برداشت شده در مطالعات صحرائی پرداخته شده است.

## زمین شناسی عمومی منطقه

پوسته قاره ای ایران مرکزی، قطعه ای جدا شده از ابرقاره گندوانا در زمان پالئوزوئیک است که امروزه به همراه پهنه های تکتونیکی البرز و سندج- سیرجان در هینترلند پهنه برخوردی زاگرس واقع شده است (Berberian and King, 1981; Hassanzadeh et al. 2008; Hassanzadeh and Wernicke, 2016). حاشیه غربی ایران مرکزی از دوره پالئوژن تا دوران میوسن مورد ماگماتیسم و ولکانیسم حاصل از فرورانش پوسته اقیانوسی تئیس جوان به زیر پوسته قاره ای ایران مرکزی بوده است که با نام کمان ولکانیکی- ماگماتیکی ارومیه- دختر و امتداد شمال غربی- جنوب شرقی شناخته می شود (آقاناتی، ۱۳۸۳ "Berberian and Berberian, 1981; Babazadeh et al. 2019; Alaminia et al. 2020). اوج فعالیت های ماگمایی در کمان ارومیه- دختر در دوران ائوسن بوده است (Babazadeh et al. 2019). حرکت کلی و بلند مدت رو به شمال صفحه قاره ای عربستان به سمت شمال از زمان کرتاسه تا کنون به همراه چرخش ملایم پاد ساعتگرد همراه بوده است که موتور دینامیکی کلیه رخداد های تکتونیکی

مناطق با توالی سنگ- چینه ای پیوسته و خوب حفظ شده همیشه مورد توجه زمین شناسان به منظور بررسی تکامل زمین شناسی در طی زمان بوده است. حاشیه غربی پوسته قاره ای ایران مرکزی که از دوره پالئوژن میزبان فعالیت های زیاد آذرین بوده است، در مناطقی میزبان باریکه ای از واحدهای کربناته دریایی قم و رسوبات میوسن نیز است. از سوی دیگر حضور ساختارهایی با امتداد و سبک های مختلف در بخش غربی ایران مرکزی، این مناطق را به منظور بررسی تکامل تکتونیکی- چینه ای سنوزوئیک مستعد کرده است. از این رو پهنه گسلی فعال و لرزه زای کاشان در بخش میانی از کمان ولکانیکی- ماگمایی ارومیه دختر که توالی به نسبت کامل سنگ چینه ای از ائوسن تا کواترنری به همراه ساختارهای مختلف را نیز در خود جای داده است (نوگل، ۱۳۶۴؛ آمبرسیز و ملویل، ۱۳۷۰؛ وفا ۱۳۸۷)، در این پژوهش انتخاب و به منظور بازسازی تکامل تکتونیکی بعد از ائوسن آن با استفاده از برداشت های صحرائی و پراکندگی مناسب در کنار پردازش تصاویر ماهواره ای مورد بررسی قرار گرفته است. تلفیق نتایج ساختاری و چینه شناسی در بخش میانی پهنه گسلی کاشان نشان می دهد که رژیم تکتونیکی فشارشی در منطقه پس از میوسن میانی دچار تغییر جهت شده است.

## روش تحقیق

بدون شک مهم ترین بخش در هر مطالعه ی زمین شناسی، مشاهده ها و اندازه گیری های صحرائی می باشد. از این رو در این پژوهش ابتدا اقدام به برداشت وضعیت لایه بندی، گسل ها و سایر عناصر ساختاری کرده و سپس به بررسی روابط چینه شناسی آن ها پرداختیم. در مجموع وضعیت هندسی ۳۲۰ گسل و درزه برداشت و سازوکار ۷۵ گسل که دارای خش لغز بودند، تعیین گردید. شایان ذکر است که اندازه گیری ساختارها در مطالعات صحرائی بر



در جنوب و جنوب غربی منطقه مورد مطالعه قدیمی -ترین واحدهای سنگی تحت عنوان پی سنگ پالئوزوئیک رخنمون دارند (شکل ۲) (زاهدی و عمیدی، ۱۳۶۴). پس از آن واحدهای آذرآواری ائوسن، بخش اعظمی از منطقه را پوشش می‌دهد. توالی گابرو، کوارتز دیوریت و مونزودیوریت متعلق به بعد از ائوسن -الیگوسن در شمال غرب روستای وش جلوه‌گر شده‌اند (زاهدی و عمیدی، ۱۳۶۴). در شمال غرب منطقه رخنمون کوچکی از ماسه سنگ‌های قرمز سازند قرمز زیرین در راستای گسل کاشان توسعه یافته است که با مرزی گسلی و ناپیوسته نسبت به واحدهای ائوسن قرار گرفته است (زاهدی و عمیدی، ۱۳۶۴). در بخش مرکزی منطقه واحدهایی شامل گرانودیوریت و گرانیت و به مقدار کمتر تونالیت الیگومیوسن بوده و قسمت عمده توده نفوذی وش را تشکیل داده است (زاهدی و عمیدی، ۱۳۶۴). توده نفوذی وش واحدهای کربناتی پی سنگی پالئوزوئیک و واحدهای آتشفشانی ائوسن را قطع نموده و سبب ایجاد متاورفیس همبری و اسکارن تا ضخامت چند صد متر را در محل تماس با واحدهای میزبان شده‌است. رخساره این دگرگونی همبری در حد آلپیت - اپیدوت هورنفلس و هورنبلند بوده است (خلعت بری جعفری و علایی، ۱۳۷۷). در بخش‌های مختلف از منطقه توزیعی از توالی‌های کربناته سازند قم با سن الیگومیوسن دیده می‌شود که با واحدهای میوسن به صورت پیوسته و با واحدهای قدیمی تر مرزی ناپیوسته و گسلی دارند (شکل ۳) (ناقه، ۱۳۹۸). در شمال غرب منطقه واحدهای زرد رنگ ماسه سنگی و کنگلومرایی سازند قرمز بالایی مشاهده می‌شوند و در مجاورت آنها واحدهای کنگلومرایی پالئوسن با مرزی گسلی نسبت به واحدهای ائوسن قرار گرفته‌اند (شکل ۲) (زاهدی و عمیدی، ۱۳۶۴). واحدهای کواترنری در شمال و شمال شرق منطقه بیشتر از تراس‌های قدیمی و مخروط افکنه‌های مرتفع تشکیل شده -اند (خلعت بری جعفری و علایی، ۱۳۷۷) (شکل ۲).

و آذرین پس از کراتاسه در پهنه‌های ساختاری ایران قلمداد شده است (Sella et al. 2002; McQuarrie et al. 2003; Tadayan et al. 2017; 2019).

برخی از محققین پهنه گسلی کاشان را قطعه‌ای از سیستم گسلی قم-زفره با سازوکار عمومی راستگرد و امتداد کلی شمال غرب- جنوب شرقی، از قم تا زفره به طول ۳۰۰ کیلومتر در نظر می‌گیرند (محجل و رهامی، ۱۳۸۸). از سوی دیگر مطالعات دورسنجی و شواهد میدانی حکایت از ادامه داشتن گسل کاشان تا جنوب شرق اردستان و مستقل بودن گسل زفره از این گسل دارند (صفایی، ۱۳۸۷; صفایی و طباطبایی منش، ۱۳۹۲; Safaei et al. 2012).

منطقه مورد مطالعه در شمال غرب اصفهان (جنوب شرق شهرستان قمصر) و در محدوده مختصاتی "۴۰,۷۸" شرقی تا "۳۳°۳۶ تا ۳۳°۴۵'۳۲,۵۴" عرض شمالی و "۳۱°۵۷,۸۱" تا "۵۱°۴۵'۰۹,۱۴" طول شرقی قرار گرفته‌است (شکل ۱). رشته کوه‌های ناحیه که در واقع جزئی از پلوتون کاشان می‌باشند با راستای شمال غربی- جنوب شرقی جزئی از رشته کوه‌های ارتفاعات ارومیه- دختر می‌باشند که در واقع حاصل ماگماتیسیم ناشی از فرورائش تیتس جوان طی کوهزایی آلپ- هیمالیا به زیر صفحه ایران می‌باشند (Alavi, 1994; Davoudzadeh and Schmidt, 1984). نتایج حاصل از مطالعات سن سنجی به روش U-Pb نشان می‌دهد که توده نفوذی کاشان طی دو زمان ائوسن پایانی (Priabonian) و میوسن پیشین (Burdigalian) جای گرفته است (Khaksar et al. 2020). سنگ‌های آذرین ناحیه مورد مطالعه شامل سنگ‌های پلوتونیک کالکوالکالن مختلف با ترکیب اسیدی تا بازی هستند (e.g., Kananian et al. 2014; Berberian and King, 1981).

واحدهای سنگ چینه‌ای منطقه مورد مطالعه خلاصه وار به شرح زیر است:



کلی شرقی - غربی و واحدهای ائوسن، توسط پهنه گسلی پرشیب با امتداد شمال شرقی - جنوب غربی جایجا شده است (شکل ۴ الف). شیب این پهنه گسلی چپگرد ۷۸ درجه به سمت شمال غرب (N209, 78NW) است که مسیر رودخانه را به صورت چپگرد به میزان ۶۲۰ متر جایجا کرده است (شکل ۵ الف و ۵ ب). خش لغزها و شکستگی‌های ریدل حک شده بر روی سطح صفحات گسلی نشانگر کینماتیک غالب چپگرد به همراه مولفه کوچک نرمال است (شکل ۵ پ). در دو کیلومتری شمال شرقی همین گسل چپگرد واحدهای کربناتی سازند قم نیز به مقدار تقریباً ۹۰ متر توسط گسلی پرشیب با امتداد و شیب (N211, 81NW) به صورت چپگرد بریده و جایجا شده است (شکل ۵ و ۵ ج).

در یک و نیم کیلومتری شرقی این رودخانه جایجا شده چپگرد، در حاشیه جاده آسفالته به سمت روستای تتماج، گسل‌هایی نسبتاً پرشیب با امتداد کلی شمالی - جنوبی و شیب‌های ۶۰ تا ۷۰ درجه به سمت شرق و غرب واحدهای ائوسن را بریده و گرابن‌های متوالی زیبایی را ایجاد کرده‌اند که توسط واحدهای تخریبی ماسه سنگی و کنگلومرایی پلوسن و کوآترنری پر شده است (شکل ۵ الف و ۵ د). سازوکار این دسته از گسل‌ها، که در دیگر نقاط منطقه مورد مطالعه نیز مشاهده شده اند، بر اساس خش لغزها و شکستگی‌های ریدل و پله‌های موجود در سطح گسل نرمال محض تشخیص داده شده است (شکل ۵ د).

شواهد ساختاری در امتداد پهنه گسلی کاشان:

پهنه گسل کاشان با امتداد شمال غربی - جنوب شرقی در میانه منطقه مورد مطالعه قطع کننده واحدهای ائوسن، اولیگوسن، الیگومیوسن و کوآترنری است (شکل ۳ ب و ۱). در راستای پهنه گسل کاشان برداشت‌های ساختاری متعددی انجام گرفت که نشانگر امتداد و شیب میانگین

درهم آمیختگی شدید واحدهای سنگی و وجود گسل‌هایی با امتدادها و سازوکارهای مختلف قطع کننده واحدهای سنگی و همدیگر نشان دهنده‌ی تاثیر فازهای تکتونیکی مختلف بر این ناحیه می‌باشد (شکل ۲). گسل‌های اصلی منطقه راستای کلی شمال غرب - جنوب شرق دارند (نوگل سادات، ۱۳۶۴) که با راستای عمومی گسل‌های زاگرس مطابقت دارد (شکل ۲ و ۳ ب).

## نتایج

در این بخش به ارائه شواهد ساختاری شاخص از مطالعات صحرایی انجام گرفته در منطقه مورد مطالعه که شامل گسل‌ها و لایه بندی‌ها است در قالب شواهد ساختاری در راستای پهنه گسلی کاشان و دیگری در پیرامون آن به تفصیل پرداخته می‌شود.

شواهد ساختاری در پیرامون پهنه گسلی کاشان:

در محدوده کوه ساریان و شمال شرقی روستای تتماج واحدهای آذرآواری ائوسن و واحدهای کربناتی سازند قم توسط گسل شمال غربی - جنوب شرقی ساریان متاثر شده به گونه‌ای که گسل معکوس ساریان جنوبی با شیب به سمت شمال شرق واحدهای آذرآواری ائوسن را بر روی واحدهای سازند قم رانده است (شکل ۵ الف). فعالیت معکوس گسل ساریان جنوبی نیز سبب تشکیل ناودیس با امتداد شمال غربی - جنوب شرقی در بلافاصله فرودپواره گسل شده است (شکل ۵ الف). برداشت‌های ساختاری انجام گرفته در طول گسل ساریان جنوبی، نشانگر امتداد و شیب N309,47NE و بر اساس خش لغزهای موجود بر سطح گسل سازوکار معکوس محض آن به وضوح قابل تشخیص است (شکل ۴ ب و ۴ پ).

در سه کیلومتری جنوب شرقی گسل ساریان جنوبی، در مجاورت جاده کاشان - تتماج، رودخانه تتماج با راستای

تأثیر دو تنش فشارشی اصلی با امتداد مختلف در منطقه می-باشد. به منظور تعیین دقیق موقعیت تنش‌های مسبب دگرشکلی در منطقه، آنالیزهای برگردان استرس را بر روی گسل‌ها و لایه بندی‌های اندازه گرفته شده توسط نرم افزار Daisy انجام دادیم. نتایج برگردان تنش بر روی گسل‌ها نشانگر دو جهت گیری شمالی-جنوبی و شمال شرقی-جنوب غربی برای تنش‌های بیشینه می‌باشد (شکل ۸). عملیات بازگردانی تنش مسبب را برای داده‌های لایه‌بندی اندازه‌گیری شده برای دو روند شمال غربی-جنوب شرقی و شرقی-غربی چین خوردگی‌ها نیز انجام داده‌ایم که نتایج یکسانی را برای آنها بدست داد، به گونه‌ای که دو راستای تنش فشارشی شمالی-جنوبی و شمال شرقی-جنوب غربی را مشخص و متمایز کرده است (شکل ۹). در مورد تقدم و تاخر تنش‌های وارده بر بخش میانی پهنه گسلی کاشان بر اساس روابط قطع شدگی گسل‌ها این گونه می‌توان بیان داشت که تنش فشارشی شمال شرقی-جنوب غربی قدیمی‌تر از تنش فشارشی شمالی-جنوبی بوده است. اما در مورد سن نسبی تنش‌های وارد شده بر منطقه مورد مطالعه، بر اساس سن لایه‌های چین خورده نتایج حاکی از آن است که رژیم فشاری شمال شرقی-جنوب غربی از ائوسن پسین تا ابتدای میوسن بر منطقه حاکم بوده و به احتمال زیاد از بازه‌ی زمانی بعد از میوسن میانی جهت تنش فشارشی بیشینه به راستای تقریباً شمالی-جنوبی تغییر جهت یافته است به طوری که داده‌های صحرائی ارائه شده در بخش قبلی نیز این موضوع را به روشنی نشان می‌دهند و با نتایج مطالعات انجام گرفته در شمال این منطقه نیز مطابقت خوبی دارد (Morley et al. 2009).

شایان ذکر است که جهت تنش شمالی-جنوبی بدست آمده برای بازه زمانی بعد از میوسن میانی در این پژوهش نیز با مطالعات ساختاری و مورفوتکتونیک انجام گرفته در پهنه گسلی کاشان همسان است (مکاریان و همکاران، ۱۳۹۰: Jamali et al. 2011).

N151,73SW است (شکل ۳ ب و ۶ الف). مکانیسم حرکتی آن نیز بر اساس خش لغزها، شکستگی‌های ریدل، پله و فابریک‌های S و C از نوع امتداد لغز راستگرد با مولفه‌ی جزئی شیب لغز فشارشی با میانگین ریک خش لغز ۲۰ درجه است که سبب ایجاد ساختارهای گلواره‌ای مثبت در امتداد پهنه گسلی شده است (شکل ۶ ب و ۶ پ). بخش شمال غربی پهنه گسلی کاشان که قطع کننده واحدهای ماسه سنگی سازند قرمز زیرین است مزین به فابریک‌های S و C با موقعیت‌های هندسی  $C=110/50$   $S=55/60$  لنزهای محدود شده بین آنها شده است که نشانگر حرکت راستگرد این پهنه گسلی است (شکل ۶ پ). معماری بخش میانی پهنه اصلی گسل کاشان به گونه‌ای است که شاخه‌های پرشیب و موازی آن، واحدهای ائوسن را بر روی واحدهای الیگوسن و واحدهای الیگوسن را بر روی واحدهای کربناتی سازند قم به صورت گلواره مثبت رانده است (شکل ۳ ب).

در انتها به ارائه ویژگی‌های هندسی تعداد ۱۸ لایه‌بندی برداشت شده با پراکندگی مناسب که در مطالعه‌ی صحرائی انجام پذیرفته، پرداخته شده است (شکل ۷). تعداد ۱۰ عدد از این برداشت‌های صحرائی متعلق به لایه‌بندی واحدهای ائوسن و الیگوسن، قدیمی‌تر از میوسن، است که دارای امتداد شمال غربی-جنوب شرقی است و ۸ عدد از لایه‌بندی‌ها متعلق به واحدهای به سن میوسن هستند و دارای امتداد کلی شرقی-غربی است که در غالب نمودار گل-سرخ‌ی امتدادی این دو گروه داده نمایش داده شده است (شکل ۷).

## بحث و نتیجه گیری:

در این مطالعه به بررسی ساختارهای شکنا و شکل پذیر پرداخته شده است. داده‌های گسلی و همچنین چین خوردگی‌های منطقه تایید کننده یکدیگر و نشان دهنده‌ی



نتایج حاصل از این مطالعه با دیگر مطالعات انجام گرفته در ایران مرکزی و زاگرس مطابقت بسیار خوبی از نظر راستای تنش و زمان تغییر جهت تنش دارد. به عنوان مثال مطالعات ساختاری گسترده‌ای که در طول زاگرس انجام گرفته نشانگر تغییر راستای تنش فشارشی بیشینه از شمال شرقی-جنوب غربی به شمالی-جنوبی است در زمان میوسن بالایی است (Navabpour et al. 2007; 2008; 2010). در پهنه گسلی درونه از ایران مرکزی و زمین درز سیستان نیز تغییر راستای تنش فشارشی بیشینه از شمال شرقی-جنوب غربی به شمالی-جنوبی در زمان میوسن بالایی رخداده است (Tadayon et al. 2017; 2019; Jentzer et al. 2017) که کاملاً با نتایج این پژوهش مطابقت دارد. این تغییر جهت تنش که در پهنه‌های مختلف ساختاری ایران گزارش شده، در ترکیه نیز ثبت شده است (Allen et al. 2004).

در مقیاس بزرگ تکتونیک ورقه ای، دلیل این تغییر جهت تنش را مربوط به حرکت تدریجی پادساعتگرد حول محور قائم ورقه قاره‌ای عربستان در حین همگرایی به سمت شمال می‌دانند (Sella et al. 2002; McQuarrie et al. 2003) که سبب ایجاد گسل جدید زاگرس با سازوکار امتدادلغز راستگرد و مولفه فشارشی شده است (Talebian and Jackson, 2002) که با نام سازماندهی مجدد تکتونیکی (tectonic reorganization) در تمام طول پهنه برخوردی اروپا - عربستان رخ داده است.

### سپاسگزاری:

این مقاله بخشی از نتایج پایان نامه کارشناسی ارشد نویسنده اول در دانشگاه اصفهان است، لذا از دانشگاه اصفهان جهت حمایت‌های عمل آمده سپاسگذاری می‌شود. از جناب آقای رضا خادم و خانم سلیمه ناقه که با کمال محبت در انجام برداشت‌های میدانی ما را یاری نمودند کمال سپاس را داریم.



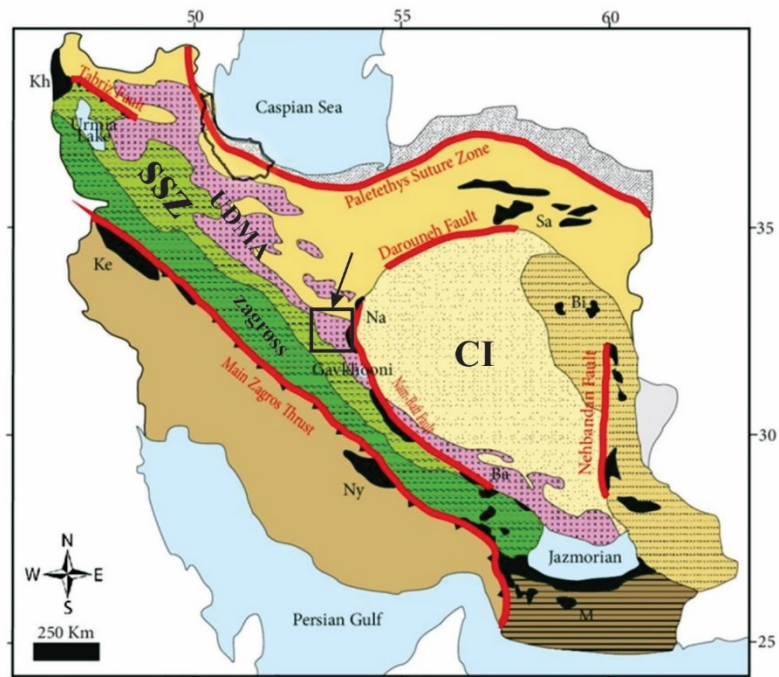
## منابع:

- ناقه، س.، ۱۳۹۸، تحلیل ساختارهای شکننده در بخش مرکزی پهنه ارومیه-دختر، جنوب کاشان، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان، ۱۸۹ ص.
- نبوی، م. ح.، ۱۳۵۵، دیباچه‌ای بر زمین شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین شناسی کشور، ۱۰۹ ص.
- نوگل سادات، م. ع. ا.، ۱۳۶۴، منطقه‌های برشی و خمیدگی ساختاری در ایران: دستاوردهای تحلیل ساختاری ناحیه قم، گزارش شماره ۵۵ سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی، ۵۰ ص.
- وفا، ح.، ۱۳۸۷، تحلیل ساختارهای شکننده زون ارومیه-دختر در جنوب خاور ایبانه، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه دامغان، ۱۰۰ ص.
- Alavi, M., 1994, Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran, new data and interpretations, *Tectonophysics*, 229, PP.211-238.
- Allen, M., Jackson, J. and Walker, R., 2004. Late Cenozoic reorganization of the Arabia-Eurasia collision and the comparison of short-term and long-term deformation rates. *Tectonics*, 23(2).
- Alaminia, Z., Tadayon, M., Finger, F., Lentz, D.R. and Waitzinger, M., 2020. Analysis of the infiltrative metasomatic relationships controlling skarn mineralization at the Abbas-Abad Fe-Cu Deposit, Isfahan, north Zefreh Fault, Central Iran. *Ore Geology Reviews*, 117, p.103321.
- Babazadeh, S., Ghorbani, M.R., Cottle, J.M. and Bröcker, M., 2019. Multistage tectono-magmatic evolution of the central Urumieh-Dokhtar magmatic arc, south Ardestan, Iran: Insights from zircon geochronology and geochemistry. *Geological Journal*, 54(4), pp.2447-2471.
- Berberian, F. and Berberian, M.J.Z.H.K.H.G.E., 1981. Tectono-plutonic episodes in Iran. *Zagros Hindu Kush Himalaya Geodynamic Evolution*, 3, pp.5-32.
- Berberian, M. and King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran: Reply. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18(11), pp.1764-1766.
- آقانباتی، ع.، ۱۳۷۹، پهنه‌های رسوبی- ساختاری عمده ایران (کارت پستال)، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.
- آقانباتی، ع.، ۱۳۸۳، زمین شناسی ایران، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ۵۸۶ ص.
- آمبرسز، ن. و ملویل، ج. پ.، ۱۳۷۰- تاریخ زمین لرزه‌های ایران، ترجمه ابولحسن رده، انتشارات آگاه، تهران، ۶۷۴ ص
- خلعت بری جعفری، م. و علائی مهابادی، ۱۳۷۷، نقشه زمین شناسی چهارگوش نظنز به مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰، تهران.
- زاهدی، م. و عمیدی، س. م.، ۱۳۶۴- نقشه زمین شناسی چهار گوش کاشان به مقیاس ۱/۲۵۰۰۰۰، سازمان زمین شناسی کشور، شماره F7، تهران.
- صفایی، ه.، ۱۳۸۷، مطالعه و تهیه طرح جامع پهنه بندی و آسیب پذیری ناشی از زلزله شهرستان کاشان، گزارش پایانی طرح پژوهشی، شماره ۱۰۳/۹/۴۲۲۶، دانشگاه اصفهان، ۲۳۰ ص.
- صفایی، ه. و طباطبایی منش، س. م.، تاثیر سیستم گسلی اصفهان بر پهنه های سندج- سیرجان و ارومیه دختر، فصلنامه علوم زمین، ویژه نامه دستاوردهای نوین زمین ساخت ایران، تابستان ۱۳۹۲، سال بیست و دوم، شماره ۲، ۸۸، صفحات ۵۶-۶۸.
- محجل، م. و رهامی، ز.، ۱۳۸۸، ساختار گسل راوند و نقش آن در ایجاد حوضه کششی pull-apart در کمربند آتشفشانی ارومیه- دختر، فصلنامه زمین شناسی ایران، سال سوم، شماره یازدهم، ۳۹-۴۵ ص.
- مکاریان، م.، پور کرمانی، م.، شرکتی، ش. و معتمدی، ح.، ۱۳۹۰، بررسی ساختاری چین خوردگی‌ها در بخشی از حوضه ایران مرکزی، ماهنامه علمی- تحلیلی اکتشاف و تحلیل، شماره ۷۸، ۴۸-۵۵ ص

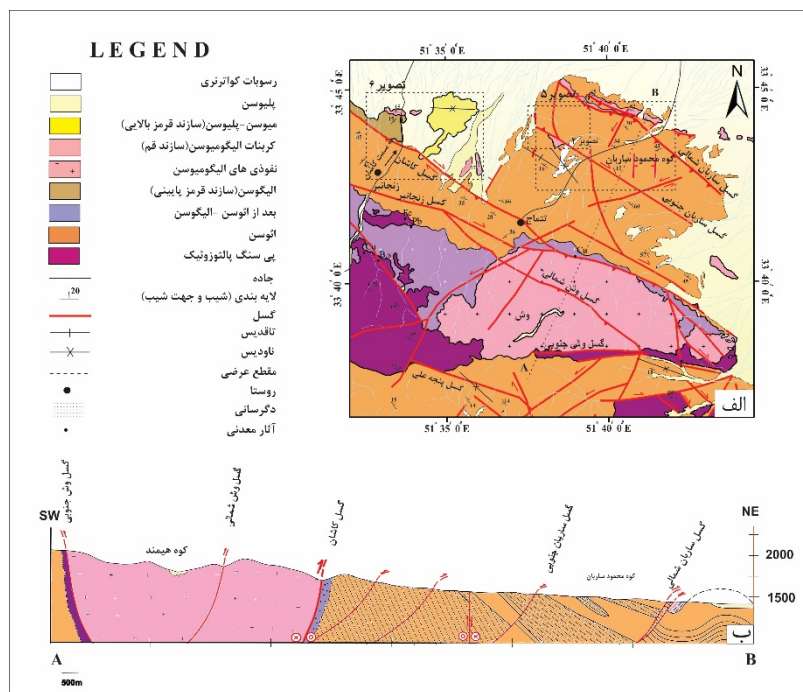




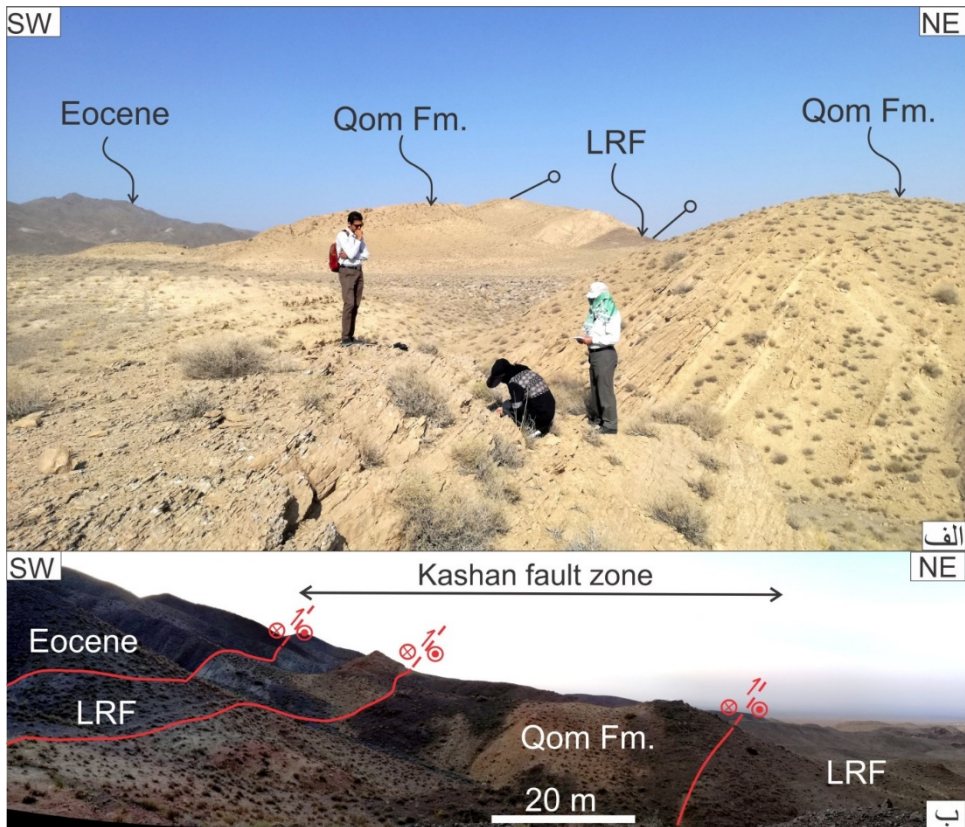
- evolution of deformation partitioning in W-Zagros (Iran, Kermanshah). *Geophysical Journal International*, 175(2), pp.755-782.
- Navabpour, P., Angelier, J. and Barrier, E., 2010. Mesozoic extensional brittle tectonics of the Arabian passive margin, inverted in the Zagros collision (Iran, interior Fars). *Geological Society, London, Special Publications*, 330(1), pp.65-96.
- Raeesi, M., Zarifi, Z., Nilfouroushan, F., Boroujeni, S.A. and Tiampo, K., 2017. Quantitative analysis of seismicity in Iran. *Pure and Applied Geophysics*, 174(3), pp.793-833.
- Safaei, H., Tabatabaeimanesh, S. M., Hashemi, S. N., Mirlohi, A. S., Vafa, H., 2012. Structural and Petrological evidence for the continuation of the Isfahan fault system across the Urumieh-Dokhtar zone of central Iran, *Geotectonics*, 46(6), pp. 455-471.
- Sella, G.F., Dixon, T.H. and Mao, A., 2002. REVEL: A model for recent plate velocities from space geodesy. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B4), pp.ETG-11.
- Tadayon, M., Rossetti, F., Zattin, M., Nozaem, R., Calzolari, G., Madanipour, S. and Salvini, F., 2017. The post-eocene evolution of the Doruneh Fault region (central Iran): The intraplate response to the Reorganization of the Arabia-Eurasia collision zone. *Tectonics*, 36(12), pp.3038-3064.
- Tadayon, M., Rossetti, F., Zattin, M., Calzolari, G., Nozaem, R., Salvini, F., Faccenna, C. and 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), pp.1454-1479.
- Talebian, M. and Jackson, J., 2002. Offset on the Main Recent Fault of NW Iran and implications for the late Cenozoic tectonics of the Arabia-Eurasia collision zone. *Geophysical Journal International*, 150(2), pp.422-439.
- Hassanzadeh, J., Stockli, D.F., Horton, B.K., Axen, G.J., Stockli, L.D., Grove, M., Schmitt, A.K. and Walker, J.D., 2008. U-Pb zircon geochronology of late Neoproterozoic-Early Cambrian granitoids in Iran: Implications for paleogeography, magmatism, and exhumation history of Iranian basement. *Tectonophysics*, 451(1-4), pp.71-96.
- Hassanzadeh, J. and Wernicke, B.P., 2016. The Neotethyan Sanandaj-Sirjan zone of Iran as an arche type for passive margin-arc transitions. *Tectonics*, 35(3), pp.586-621.
- Jamali, F., Hessami, K. and Ghorashi, M., 2011. Active tectonics and strain partitioning along dextral fault system in Central Iran: analysis of geomorphological observations and geophysical data in the Kashan region. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(4), pp.1015-1025.
- Jentzer, M., Fournier, M., Agard, P., Omrani, J., Khatib, M.M. and Whitechurch, H., 2017. Neogene to Present paleostress field in Eastern Iran (Sistan belt) and implications for regional geodynamics. *Tectonics*, 36(2), pp.321-339.
- McQuarrie, N., Stock, J.M., Verdel, C. and Wernicke, B.P., 2003. Cenozoic evolution of Neotethys and implications for the causes of plate motions. *Geophysical research letters*, 30(20).
- Morley, C.K., Kongwung, B., Julapour, A.A., Abdolghafourian, M., Hajian, M., Waples, D., Warren, J., Otterdoom, H., Srisuriyon, K. and 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), pp.325-362.
- 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(1-4), pp.101-131.
- Navabpour, P., Angelier, J. and Barrier, E., 2008. Stress state reconstruction of oblique collision and



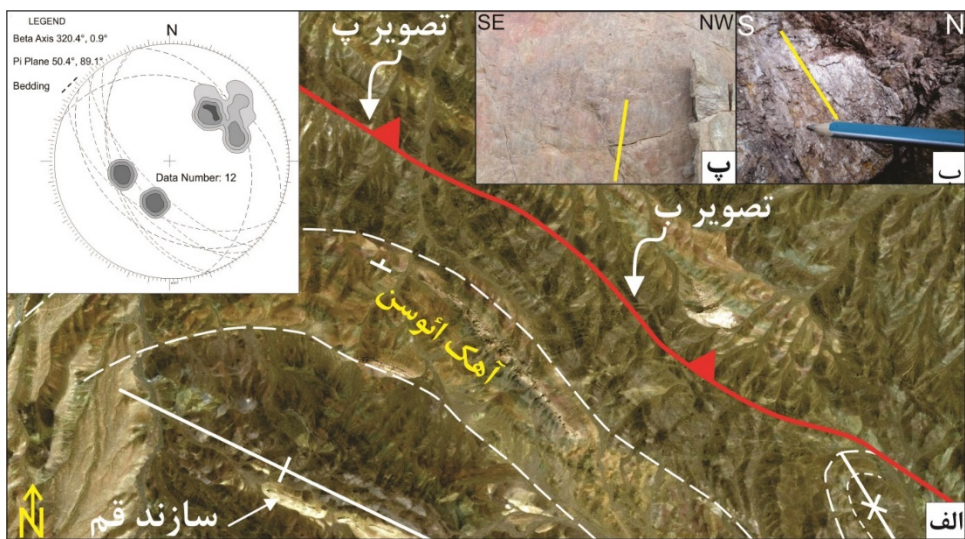
شکل ۱: موقعیت محدوده مورد مطالعه در پهنه‌های ساختاری-رسوبی ایران که با چهارگوش سیاه مشخص شده است (با تغییرات از آقناباتی ۱۳۷۹: ۱۳۸۳: نویی، ۱۳۵۵).



شکل ۲: الف- نقشه زمین شناسی ساده شده منطقه میانی پهنه گسلی کاشان به همراه ساختارها و موقعیت تصاویر بعدی (اقتباس از زاهدی و عمیدی، ۱۳۶۴). ب- مقطع عرضی ساختاری ترسیم شده در راستای شمال شرق-جنوب غرب.

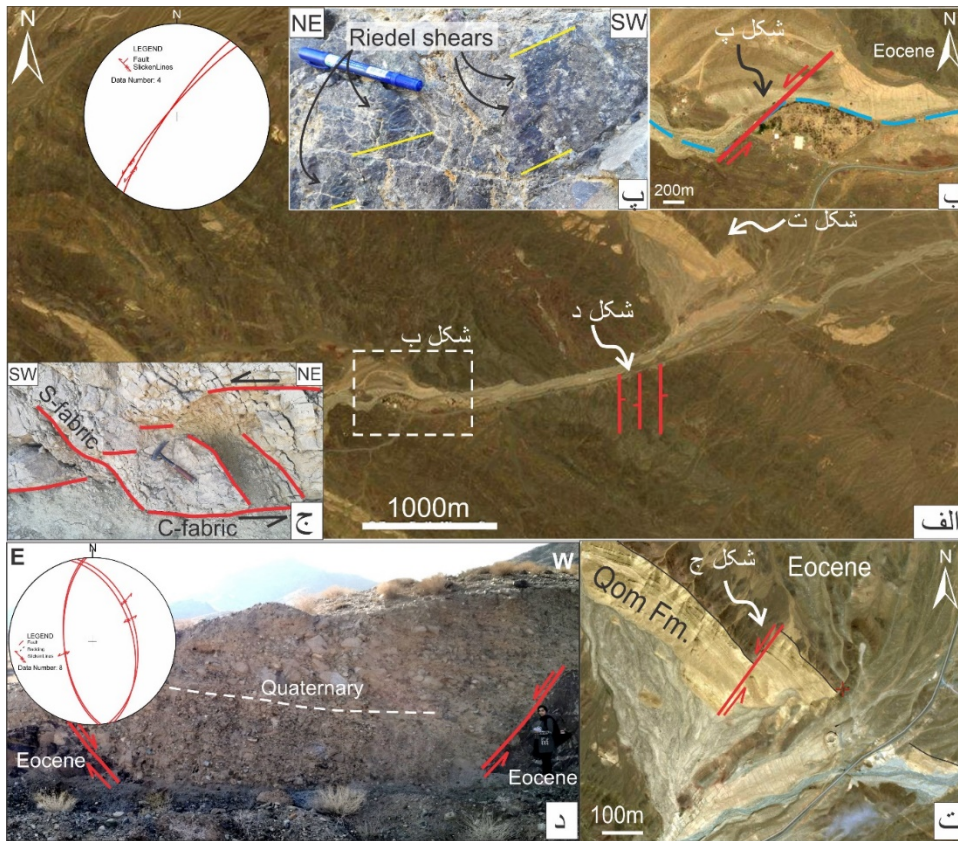


شکل ۳. الف- نمایی از واحدهای شیبدار آهکی قم (Qom Fm.)، واحد تخریبی سازند قرمز پایینی (LRF) و واحد آذرین ائوسن (Eocene) در سمت ارتفاعات جنوب غرب و واحد کواترنری پرکننده بخش دشت می باشد. ب- نمایی بانوراما از پهنه گسلی راستگرد فشارشی کاشان که واحدهای ائوسن، الیگوسن و الیگومیوسن را کنار هم قرار داده است.

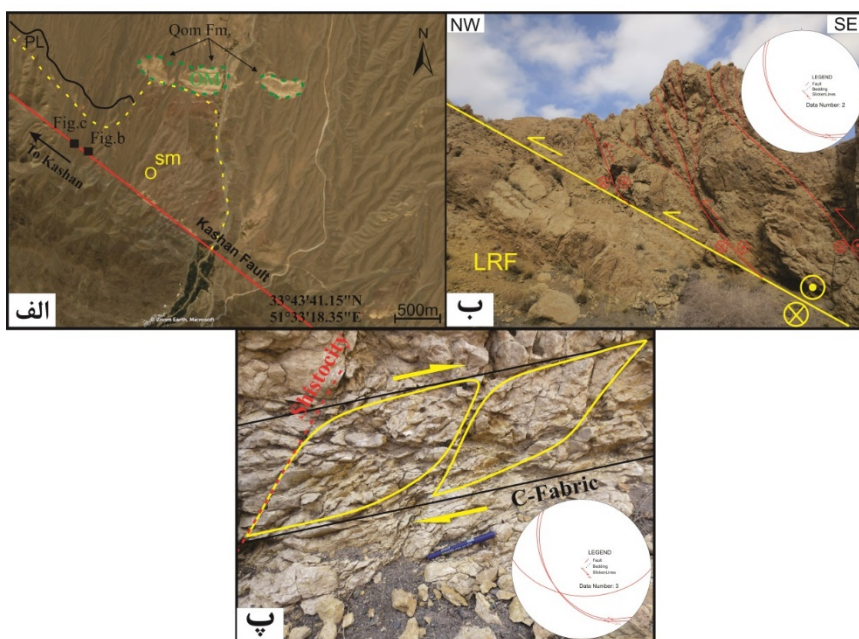


شکل ۴. الف- تصویر ماهواره‌ای از محدوده تأثیر گسل ساربان جنوبی در کوه‌های ساربان و موقعیت برداشت گسل‌های نمایش داده شده در تصاویر ب و پ به همراه نمایش لایه بندی‌ها و استریونت لایه بندی به همراه موقعیت صفحه پی و محور بتا. ب- نمایش صفحه‌ی گسلی معکوس ساربان جنوبی. پ- نمایش صفحه‌ی گسلی معکوس ساربان جنوبی.

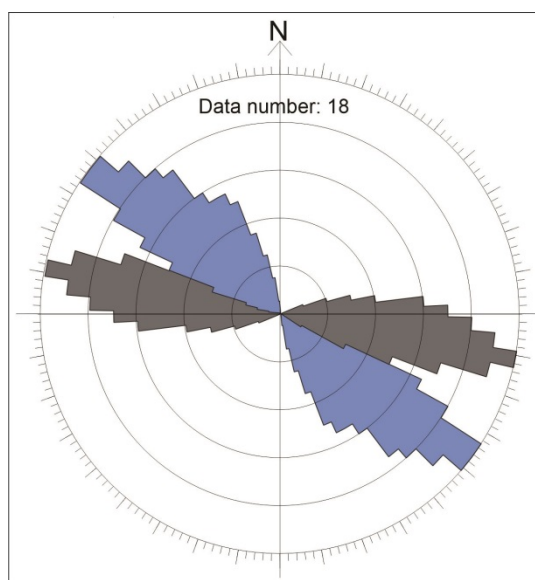




شکل ۵: الف- تصویر ماهواره ای بخش شمالی-شمال غربی محدوده مورد مطالعه و موقعیت داده ی گسلی شمال شرقی- جنوب غربی چپگرد برداشت شده به همراه استریونت آنها. ب-نمای ماهواره ای از گسل فعال شمال شرقی- جنوب غربی چپگرد که رودخانه را بریده است. پ- تصویر نزدیک از صفحه گسلی چپگرد به همراه خش لغزهای گسلی. ت- گسل شمال شرقی- جنوب غربی چپگرد شناسایی شده از تصویر ماهواره ای که جابجا کننده واحد های آهکی سازند قم است. ج-تصویر صحرایی از فابریک های S و C در پهنه گسلی با امتداد شمال شرقی- جنوب غربی با سازوکار چپگرد که جابجا کننده واحد های آهکی سازند قم است. د- گرابن شکل گرفته توسط گسل های همگرای نرمال که توسط رسوبات کواترنری پر شده است به همراه استریونت آنها.

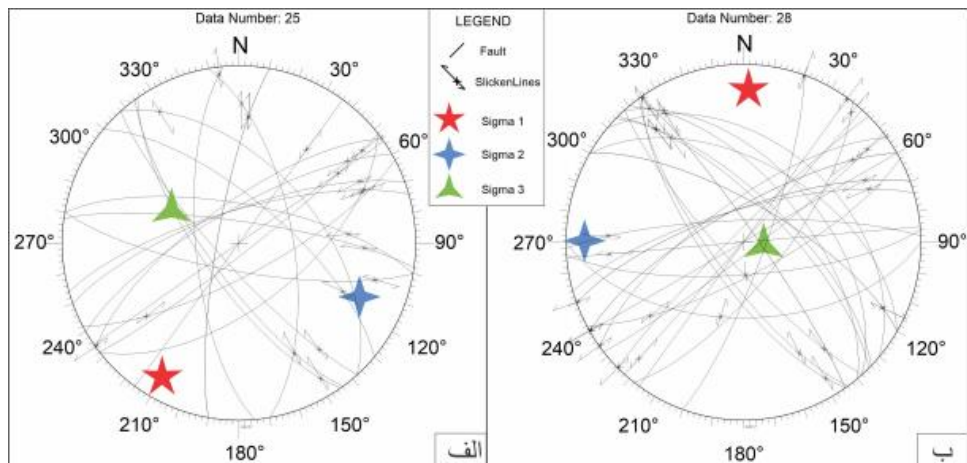


شکل ۶: ساختارهای مرتبط با بخش شمال غربی گسل کاشان الف- تصویر ماهواره ای از موقعیت داده برداشت شده به همراه موقعیت گسل کاشان ب- گسل امتدادلغز راستگرد با مولفه ی فشارشی پ- توسعه ی فابریک های C و S که نمایشگر مولفه راستگرد در امتداد پهنه گسل برشی کاشان می باشد.

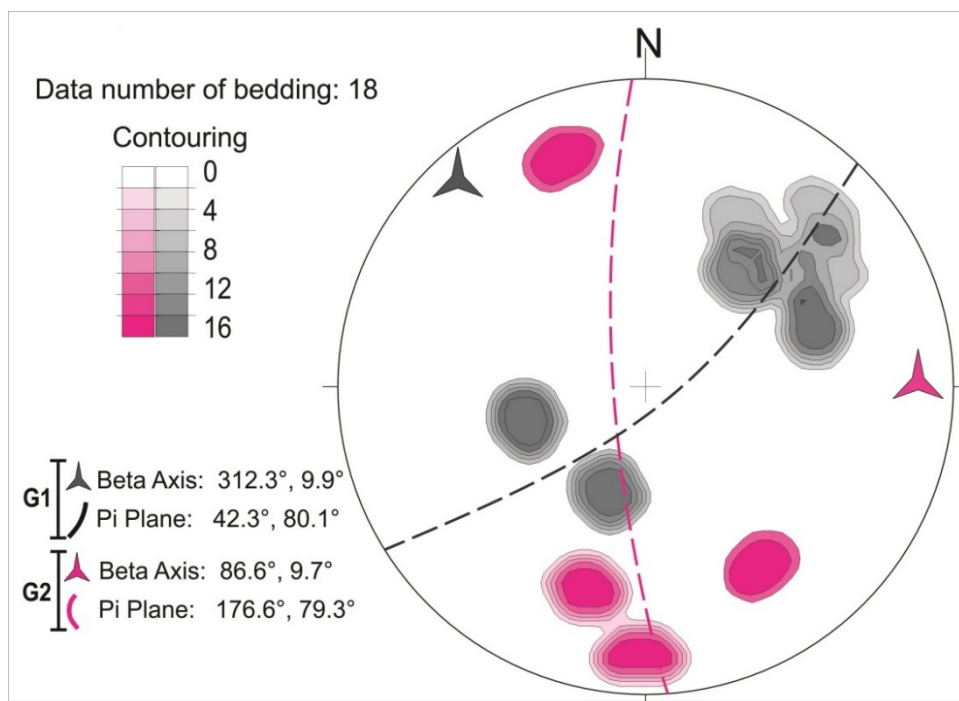


شکل ۷: نمایش ۱۸ لایه بندی اندازه گیری شده در قالب نمودار گل سرخی که به دو راستای اصلی تقریباً شرقی-غربی و شمال غربی- جنوب شرقی قابل تفکیک هستند.

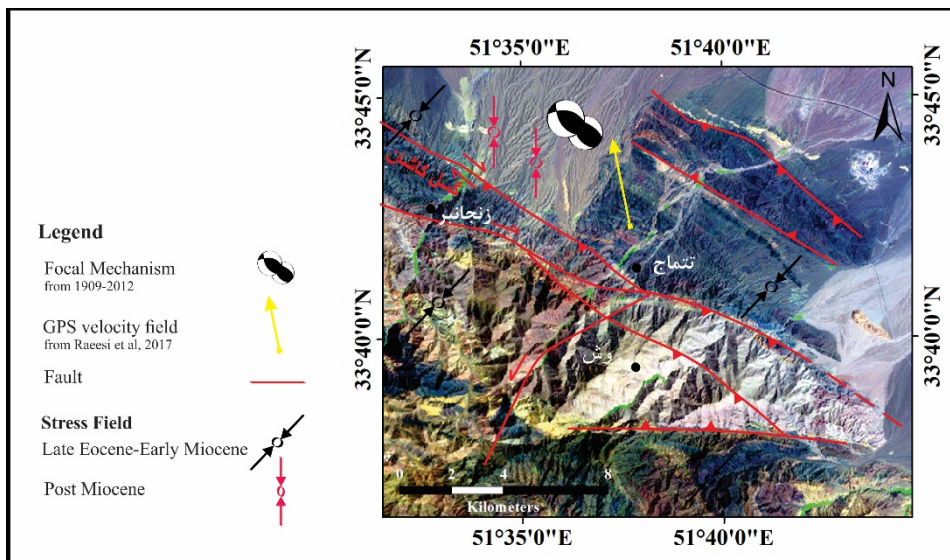




شکل ۸: نتایج حاصل از روش محاسباتی برگردان تنش دیرین از گسل‌های اندازه‌گیری شده برای تنش فشاری شمال شرقی-جنوب غربی (الف) و تنش فشاری شمالی-جنوبی (ب)، سیگما ۱ با ستاره پنج پر قرمز، سیگما ۲ با ستاره چهار پر سبز و سیگما ۳ با ستاره سه پر آبی نشان داده شده است.



شکل ۹: نمایش پراکنندگی کنتور دیاگرام قطب لایه بندی‌های برداشت شده به همراه موقعیت صفحه‌ی پی (Pi) و محور بتا. نتایج نشان دهنده‌ی دو صفحه‌ی پی و محور بتا که نشان دهنده دو راستای تنش پیشینه اصلی شمالی-جنوبی و شمال شرقی-جنوب غربی مسبب چین خوردگی منطقه مورد مطالعه می باشند.



شکل ۱۰. تصویر ماهواره ای منطقه مورد مطالعه به همراه گسل های اصلی، بردارهای حرکت GPS (بر گرفته از Raeesi et al, 2017) و نتایج تنش دیرین از این پژوهش به همراه سازوکار زمین لرزه های ۲۰۱۲-۱۹۰۹.



فصلنامه زمین ساخت

پاییز ۱۳۹۹، سال چهارم، شماره ۱۵

doi: 10.22077/jt.2021.3632.1082

## بررسی ارتباط بین گسل ها و درزه ها با کانه‌زایی مس، با استفاده از سنجش از دور و مغناطیس‌هوائی در منطقه ورزگ (شرق قاین)

فرزاد قاسم پور<sup>۱\*</sup>، توران اسماعیل پور<sup>۲</sup>، محمودرضا هیبات<sup>۳</sup>، محمدمهدی خطیب<sup>۴</sup>

۱- کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۲- کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

۳- دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۴- استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۲۱

### چکیده

محدوده مورد بررسی در ورزگ ۱:۱۰۰،۰۰۰ قاینات، در ۱۵ کیلومتری شرق قاین، استان خراسان جنوبی واقع شده است. تفسیر داده‌های مغناطیس‌هوائی و استخراج خطوط‌های مغناطیسی همراه با پردازش داده‌های ماهواره‌ای دلالت بر جهت‌گیری شکستگی‌ها و عمده ساختارها به ترتیب در سه راستای مهم NW-SE, N-S و NE-SW در منطقه دارد. هدف از این تحقیق بررسی عناصر ساختاری موجود در منطقه از قبیل گسل‌ها، درزه‌ها، رگه‌ها، دایک‌ها و مشخص کردن ویژگی گسل‌های منطقه با تاکید بر پتانسیل کانه‌زایی در ارتباط با گسل‌ها و مشخص نمودن مناطق امید بخش برای اکتشاف مس در منطقه می‌باشد. اعمال یک رژیم فشاری-برشی باعث ایجاد فضای کششی و در پی آن نفوذ محلول‌های گرمابی کانه‌دار و دگرسانی‌های گسترده شده است. با توسعه رخساره شیب‌سبز در منطقه سیلیس و کربنات آزاد شده و حفرات توسط مالاکیت (اکسیدمس) جایگزین شده که به طور گسترده باعث تشکیل نودل‌های مالاکیتی در داخل واحد‌های آندزیتی شده است. محل برخورد درزه‌ها و گسل‌ها در منطقه مورد مطالعه (گسل‌هایی با راستای شمال غرب- جنوب شرق و درزه‌هایی با راستای شمال شرق- جنوب غرب) دارای کانی‌سازی با عیار بالا می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: قاین، سنجش از دور، مغناطیس‌هوائی، کانه‌زایی، مس



## Investigation of the relationship between faults and joints with copper mineralization, using Remote Sensing and magnetism in Vorezg region (east of Ghaen-Birjand)

Ghasempour .E <sup>1\*</sup>; Esmailpour .T <sup>2</sup> ; Heyhat .M.R <sup>3</sup> ; Khatib .M.M <sup>4</sup>

1- M.Sc., Department of Geology, Faculty of Science, Birjand University, Birjand, Iran

2- M.Sc., Department of Geology, Faculty of Science, Damghan University, Damghan, Iran

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

4 - Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Birjand University, Birjand, Iran

### Abstract

The study area is located in sheet 1: 100,000 Ghaenat, 15 km east of Ghaen, South Khorasan province. Interpretation of aerial magnetic data and extraction of magnetic lines along with processing of satellite data indicate the orientation of fractures and major structures in three important directions NS NW-SE, and NE-SW in the region, respectively. The purpose of this study is to investigate the structural elements in the region such as faults, joints, veins, dikes and to determine the characteristics of faults in the region by emphasizing the mineralization potential of faults and to identify promising areas for copper exploration in the region. The application of a compressive-shear regime creates a tensile space followed by the infiltration of mineralized hydrothermal solutions and extensive alterations. With the development of green schist facies in the area, silica and carbonate are released and the cavities are replaced by malachite (copper oxide), which has led to the formation of malachite nodules within andesitic units. The junction of joints and faults in the study area (faults with northwest-southeast direction and joints with northeast-southwest direction) has high grade mineralization.

**Keywords:** Qaen, Remote Sensing, Aerial Magnetism, Mineralization, Copper



سکوی ترا نصب شده است از سال 1999 میلادی تصاویر چند طیفی را به زمین مخابره می نماید (Abrams, 2002). این سنجنده در ۱۴ باند طیفی تصویربرداری می نماید. سه باند طیفی اول که با نام مرئی و فرورسرخ (مادون قرمز) نزدیک شناخته می شوند در طول موجهای بین  $0.56 - 0.86 \mu\text{m}$  با قدرت تفکیک مکانی ۱۵ متر، شش باند طیفی دوم که به تصاویر فرورسرخ کوتاه موج معروفند، در طول موجهای  $2.13 - 2.13 \mu\text{m}$  با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و پنج باند سوم که با عنوان تصاویر مادون سرخ حرارتی شناخته می شوند در طول موجهای  $11.65 - 12.5 \mu\text{m}$  با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر، دریافت می شوند (Abrams, 2002). استر نخستین سنجندهای است که دارای باندهای حرارتی با قدرت تفکیک طیفی مناسب است. این سنجنده در طول یک روز ۵۰۰ تصویر  $60 \times 60 \text{ km}$  را برداشت می کند (Ninomiya, 2005). اما این سنجنده ابزاری را در اختیار دارد که با انحراف زاویههای ( $\pm 24^\circ$ ) قابلیت گسترش عرض تصویر تا  $232$  کیلومتر را دارد (Fujisada, 1995).

سنجنده نقشه بردار موضوعی پیشرفته یا ETM+ آخرین سنجنده قرار گرفته بر روی ماهواره لندست ۷ (پرتاب شده در سال ۱۹۹۹ است) این سنجنده دارای ۸ باند طیفی است. باند ۸ پانکروماتیک بوده و قدرت تفکیک مکانی آن ۱۵ متر است. باند ۶ با قدرت تفکیک مکانی ۶۰ متر در طول موج حرارتی تصویربرداری می کند. باندهای ۱ تا ۵ و ۷ این سنجنده در محدوده  $2.35 - 2.45 \mu\text{m}$  با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر هستند. ابعاد تصاویر این سنجنده  $185 \times 185$  کیلومتر است (Lillesand et al., 2004).

تصاویر سنجنش از دور دو کاربرد عمده در اکتشاف مواد معدنی دارند (Sabins, 1999) که عبارتند از:

شرق ایران و همچنین بلوک لوت به سبب دارا بودن سیستم های گسلی وساختارهای زمین ساختی فراوان و پیچیده، همواره مورد توجه زمین شناسان بوده است. اما از آنجایی که این بلوک بسیار وسیع می باشد، بررسی های انجام شده در این پهنه به سبب پیچیده بودن تاریخ زمین ساختی آن کافی نیست. لذا با توجه به اینکه جایگاه تشکیل و فضای نهشت اکثر ذخایر در ارتباط با گسل ها وساختارهاست و به طور کلی محل برخورد گسل ها و همچنین محل برخورد شکستگی های فرعی حاصل از پهنه های برشی میتواند مکان مستعدی برای نفوذ ماگما و محلولهای کانه دار و کانه زایی باشد ( کاویانی صدر وهمکاران، ۱۳۹۴). بنابراین مطالعه ساختاری و هندسی گسل های منطقه در سطح و تعمیم آن به عمق می تواند گام موثری در اکتشاف صحیح پتانسیل های معدنی به حساب آید.

روش های دورسنجی امکان شناسایی و اکتشاف مقدماتی را برای محدوده های وسیع با دقت و سرعت بالا و هزینه پایین امکان پذیر می سازند. در واقع با پردازش داده های ماهواره ای و با مشخص کردن ساختارهای خطی، حلقوی و تعیین ارتباط آنها با واحدهای سنگ شناختی و پهنه های دگرسانی می توان به شناسایی بی هنجاریهای یک منطقه پیش از مطالعات ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی پرداخت. اطلاعات با ارزشی که از تصاویر ماهواره ای در کمترین زمان ممکن نسبت به دیگر روشهای اخذ اطلاعات زمین شناسی و اکتشافی حاصل می شود، اهمیت استفاده از این روش در اکتشاف کانسارها را بیش از پیش آشکار ساخته است (کاویانی صدر، ۱۳۹۱). نقشه برداری زاویه طیفی از کانیهای مناطق دگرسان شده و شناسایی مناطق با شکستگی بالا از مهمترین کاربردهای دورسنجی در اکتشاف مواد معدنی است. سنجنده استر که بر روی





۱ : تهیه نقشه زمین‌شناسی و شناسایی گسلها و شکستگی‌هایی که نهشته‌های معدنی را در بر دارند.

۲ : شناسایی سنگهای دگرسان شده بر اساس ویژگیهای طیفی آنها.

از کانیهای موجود در دگرسانی‌های ناشی از کانسارهای مس پورفیری می‌توان به بیوتیت، سریسیت، کائولینیت، اپیدوت، کلسیت و کلریت اشاره کرد (Lowel & Guilbert, 1970). بیشتر این کانیها را می‌توان با استفاده از روشهای سنجش از دور بارزسازی نمود. یکی از مزایای روش سنجش از دور به حداقل رساندن بررسی‌های سطحی، به‌ویژه در مناطق غیر قابل دسترسی بر اساس اطلاعات طیفی به دست آمده از نقاط دیگر با کانی‌سازی معلوم است (Abrams, 2002).

از تصاویر استر به منظور نقشه برداری از مناطق دگرسان شده استفاده نموده‌اند. این پژوهشگران از روشهای نسبت‌های بانندی، تجزیه مؤلفه‌های اصلی، ترکیبات دروغین رنگی، نقشه بردار زاویه طیفی و تجزیه طیفی کانیها به منظور بارزسازی مناطق دگرسان شده و تفکیک واحدهای سنگی استفاده نموده‌اند. به کارگیری روش تقسیم بانندی برای بارزسازی عوارض خاص در داده‌های چندطیفی مناسب است. از روش یادشده برای کاهش اثرات روشی خورشید، توپوگرافی و بارزسازی اطلاعات طیفی در تصاویر استفاده می‌شود (Gupta, 2003) برای شناسایی مناطق دگرسان شده گرمایی دو نشانه خوب که در تصاویر ماهواره‌های قابل شناسایی هستند وجود اکسید آهن و کانی‌های هیدروکسیل (اکسیژن با هیدروژن در مولکول آب، پیوند هیدروژنه برقرار کند) است (گزارش ارزیابی داده‌های ژئوشیمیایی، سازمان زمین‌شناسی (۱۳۸۰). و البته از ارتباط مناطق دارای شکستگی نیز می‌توان برای اکتشاف کانسارها استفاده نمود. در کانسارهای مس پورفیری، کلاهدک‌های

آهنی (گوسان) بر روی زونهای پتاسیک و فیلیک تشکیل می‌شوند و بنابراین نشانه خوبی برای شناسایی نهشته‌های پورفیری هستند. با توجه به این که کلاهدک‌های آهنی (گوسان) دارای مقادیر زیادی از اکسیدهای آهن هستند، بنابراین در تصاویر دورسنجی با استفاده از بارزسازی کانی‌های اکسیدهای آهن می‌توان به دنبال این پدیده‌ها گشت. با توجه به اینکه که سنجنده  $ETM^+$  دارای یک باند در محدوده جذب (باند ۱) و یک باند در محدوده بازتاب بالای اکسیدهای آهن است (باند ۳). انتظار می‌رود که مناطق با اکسید آهن را بهتر از سنجنده استر مشخص سازد. ولی برای بارز نمودن کانیهای رسی و مسکوویت که در دگرسانی‌های گرمایی دیده می‌شوند سنجنده استر به دلیل باندهای طیفی بیشتر مناسبتر است Kruse et al. (1992) و Yuhas et al. (2003). روش نقشه بردار زاویه طیفی را برای شناسایی کانیها با استفاده از مقایسه طیف‌های مرجع و طیف‌های استخراج شده از تصاویر ماهواره‌های معرفی کردند. هدف از این تحقیق مشخص کردن ویژگی‌های گسل‌های منطقه با تاکید بر پتانسیل کانه‌زایی در ارتباط با گسل‌ها و مشخص نمودن مناطق امید بخش برای اکتشاف مس در منطقه وهمچنین شناسایی و تحلیل گسل‌ها، شکستگی‌ها، چین خوردگی‌ها، خطواره‌ها و ساز و کار گسلها و تأثیر گذاری این گسلها بر منطقه مورد مطالعه است.

### ویژگی‌های سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه

واحدهای سنگی اصلی که در این محدوده رخنمون دارند عبارتند از: (جمع و همکاران، ۱۳۸۵)

- سنگ‌های رسوبی آهکی و آواری (کرتاسه پائینی تا بالائی)

- رسوبات فلیشی و توریدیتی

می‌توان به دگرسانی سربستی، کلریتی، سیلیسی، کربناته و اکسیدهای آهن اشاره نمود.

در این منطقه، کانی سازی به صورت ملاکیت، در دو واحد آندزیت بازالت مگاپورفیری و آندزیت بازالت سبز رنگ وجود دارد. کانی سازی بیشتر به صورت رگه و رگچه ای و افشان در میان گدازه‌های آندزیتی - بازالتی وجود دارد و نمود سطحی آن شامل کانی سازی افشان و خطی ملاکیت است.

### سنگ‌های آذرین خروجی

#### تناوب آگلومرا و توف خاکستری

سن واحد سنگی تناوب آگلومرا و توف خاکستری پالتوسن - ائوسن می‌باشد. این واحد در سطح رخنمون به رنگ خاکستری روشن تا کمی تیره و قطعات و زمینه بازالت تا تراکی بازالتی است که قهوه‌ای تا بنفش و حتی سبز نیز دیده می‌شود. واحد توف خاکستری در این تناوب نسبتاً نازک لایه می‌باشد به گونه‌ای که در این واحد تفکیک آگلومرا و توف امکان پذیر نمی‌باشد (شکل ۱).

- سنگ‌های آتشفشانی حدواسط تا بازیک و سنگهای آذرآواری با ترکیب آندزیت آندزیت بازالت، تراکی بازالت، توف و آگلومرا سنگ‌های آتشفشانی این محدوده مربوط به فورانهای پالتوسن - ائوسن زیرین می‌باشند.

- سنگ‌های رسوبی کنگلومرای (پالتوسن - ائوسن زیرین)

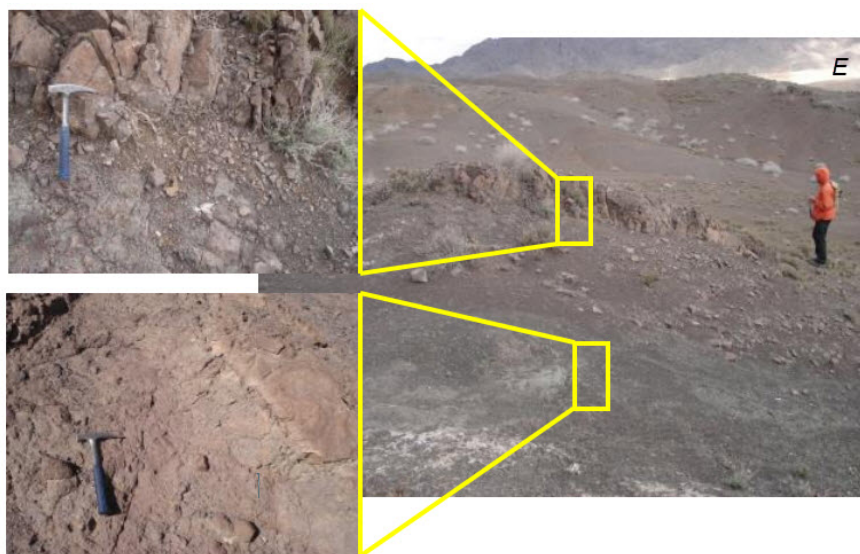
- سنگ‌های رسوبی و رسوبی آتشفشانی (ائوسن میانی - ائوسن بالایی)

- پادگانه‌های آبرفتی قدیمی و جوان (کواترنری)

- دایک آندزیتی و سیل (پالتوسن - ائوسن)

- تراورتن (پالتوسن - ائوسن)

گسترش مناطق دگرسانی در محدوده ورزگ کم بوده و غالباً در ارتباط با گسل‌های اصلی منطقه (گسل‌های شمالی - جنوبی و شمال غرب - جنوب شرق)، می‌باشند. دگرسانی‌ها عمدتاً در ارتباط با سنگ‌های آندزیتی و آندزیت بازالت هستند. از زون‌های دگرسانی در محدوده



شکل ۱: تناوبی از توف و آگلومرا در منطقه مورد مطالعه (عکس بالا سمت چپ، آگلومرا و عکس پایین سمت چپ، توف)

مانندی در قسمت‌هایی از این واحد که حاصل فرسایش است مشاهده می‌شود (جمع و همکاران، ۱۳۸۰).

### آندزیت تا آندزیت پورفیری

سن این واحد براساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ قاین، پالئوسن - ائوسن می‌باشد. این واحد تقریباً ۶۰٪ مساحت محدوده را به خود اختصاص داده است. رخنمون این واحد در سطح هوازده به رنگ قهوه‌ای و در سطح تازه بنفش متمایل به قهوه‌ای می‌باشد. این واحد سنگی دارای بافت پورفیریتیک با خمیره هیالومیکروولیتی است. بلورهای پلاژیوکلاز آن به صورت شکل‌دار و در اندازه چند میلی‌متر قابل مشاهده است. الیون و پیروکسن نیز در مقطع سنگ مشاهده شد. بلورهای الیون تا حد زیادی به سرپانتین و ایدنگسیت تبدیل شده‌اند و بلورهای فلدسپار نیز تقریباً سالم هستند. حفراتی در سنگ مشاهده می‌شود که توسط کلسیت، کلریت و زئولیت پر شده است. در بعضی قسمت‌های این واحد آندزیت پورفیری تا مگاپورفیری رخنمون دارد ولی از آنجا که وسعت این قسمت‌ها کم، ناچیز و یا به صورت تدریجی می‌باشد، قابل تفکیک نیست. شکل ۲ نمایی از رخنمون سنگی را نشان می‌دهد (جمع و همکاران، ۱۳۸۳).



شکل ۲: نمایی از رخنمون سنگی واحد آندزیت و آندزیت پورفیری (تصویر بالا سمت راست آندزیت مگاپورفیری را نشان می‌دهد)

در این واحد یک سری سیل‌ها و دایک‌های تراکی آندزیتی با روند تقریباً شمالی - جنوبی، رگچه‌هایی از کلسیت نیز مشاهده می‌شود، ولی هیچ‌گونه کانی‌سازی مس در آن رخنمون ندارد. قسمت آگلومرایی این واحد بیشتر از قطعات گرد شده و به مقدار کمتر نیز قطعات زاویه‌دار تشکیل شده است. ابعاد این قطعات از حدود چند سانتی‌متر و حداکثر ۴۰ سانتیمتر در نوسان است. قطعات زاویه‌دار معمولاً درشت و قطعات گرد شده کوچکترند.

### بازالت

سن این واحد پالئوسن - ائوسن می‌باشد که بیشتر به رنگ خاکستری دیده می‌شود. این واحد سنگی دارای بافت پورفیریتیک بوده که اغلب توسط سیلیس و بعضاً کلسیت پر شده‌اند. پرشدگی حفرات با سیلیس، باعث تشکیل آگات‌ها و نودل‌های سیلیسی شده است. این واحد سنگی حاوی الیون کاملاً اکسیده و به ندرت پیروکسن می‌باشد، و از کانی‌های ثانویه نیز سیلیس و کربنات قابل ذکر هستند.

### تراکی بازالت

این واحد سنگی دارای سن پالئوسن - ائوسن می‌باشد و بیشتر به رنگ خاکستری تیره دیده می‌شود که دارای بلورهای پلاژیوکلاز به صورت فنوکریست می‌باشد. پیروکسن و الیون نیز در سنگ دیده می‌شود، پلاژیوکلازها به نحو قابل ملاحظه‌ای دگرسان شده و به کانی‌های رسی و سریسیتی تجزیه شده‌اند. حفرات موجود در سنگ توسط سیلیس و کربنات پر شده است. حفرات زیاد موجود در سنگ که قطر آن‌ها بعضاً به ۱۰ سانتی‌متر می‌رسد، حاصل سرد شدن سریع آن می‌باشد. پر شدن ثانویه این حفرات با سیلیس باعث تشکیل آگات‌های کروی شکل شده که پس از فرسایش تراکی بازالت از آن جدا شده و در سطوح هوازده مشاهده می‌شود. حفرات تونل

## دایک و سیل‌ها

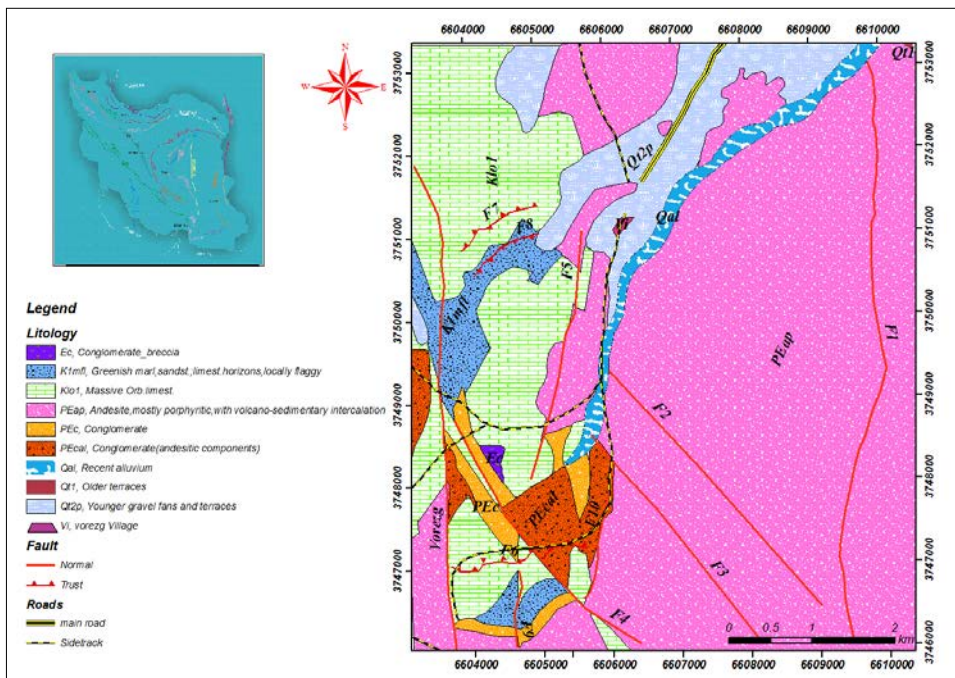
به صورت جزئی به کانی‌های رسی و سرسیت تجزیه شده و پیروکسن‌ها نیز به صورت کامل توسط کلریت جانشین شده است. زمینه سنگ به صورت نامتجانس به کانی‌های اکسید آهن آغشته‌گی دارد. این دایک و سیل‌ها دارای روند تقریباً شمالی - جنوبی هستند که در محل کشش به سمت بالا حرکت کرده اند. دایک‌های آندزیتی در امتداد این شکستگی‌ها به داخل توده‌های ولکانیک قدیمی تر نفوذ کرده اند و در حاشیه گسل F1 و vorezg رخمون پیدا کرده‌اند. (شکل ۳) نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه (شکل ۴) (جمیع و همکاران، ۱۳۸۳).

دایک‌ها و سیل‌های مشاهده شده در منطقه از نظر پیدایش و جنس در یک گروه قرار می‌گیرند. هر دوی آنها دارای ترکیب حد واسط می‌باشند و تراکی آندزیت هستند که ضخامت آنها از چند ده سانتی متر تا ۱۰ متر نیز می‌رسد. این دایک‌ها و سیل‌ها با رنگ قرمز هماتیتهی دارای بافت پورفیریتیک با زمینه میکرولیتی و اغلب جریانی می‌باشند. بلورهای شکل دار پلاژیوکلاز با حواشی خرد شده در سنگ حضور دارند و رگچه‌های کانی اکسید آهن نیز به وفور مشاهده می‌شود. در اثر دگرسانی پلاژیوکلازها



شکل ۳. نمونه‌ای از دایک تراکی آندزیتی محدوده مورد مطالعه





شکل ۴. نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه (تصحیح شده از نقشه زمین شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ چهارگوش قاین (اشوکلین و همکاران، ۱۳۴۸)

## روش کار

جهت‌های خاص مورد نظر کاربر، واضح تر می‌کنند. برای بارزسازی خطواره‌ها در تصاویر ماهواره‌ای از دو دسته فیلتر جهت دار (Directional) و بدون جهت (Laplacian) استفاده می‌شود (Wester, 1992).

## پردازش تصاویر ETM+ و Aster

تعیین مناطق با شدت شکستگی بالا با استفاده از شاخص فاکتور خطوارگی و نسبت های بانندی ترکیبی ETM+ و Aster

### فیلترهای بدون جهت (Laplacian)

فیلترهای بدون جهت، خطواره‌ها را در تمام جهت‌ها، به جز آنهایی که در جهت حرکت فیلتر قرار دارند، آشکارسازی می‌کنند. در این روش، یک ماتریس که شامل آرایه‌هایی از ضرایب یا عوامل وزنی است، و به آن کرنل (Kernel) گفته می‌شود؛ ایجاد می‌گردد. تعداد سطر و ستون‌های موجود در این ماتریس فرد می‌باشد (۳\*۳ یا ۵\*۵) معمولاً برای تصاویر ناهموار، فیلترهایی با کرنل کوچک (۳\*۳)، و برای تصاویر هموار فیلترهایی با کرنل بزرگ (۹\*۹)، اعمال می‌شود. یک عدد صحیح مثبت، در مرکز این ماتریسها قرار می‌گیرند و عددهای ۱- و ۰ در

تهیه نقشه گسل‌ها، درزه‌ها و سایر عوارض خطی، بهترین راه برای تحلیل ساختاری خطوارگی‌ها می‌باشد. معمولاً خطوارگی‌های تصاویر ماهواره‌ای به راحتی قابل تشخیص نیستند، به همین دلیل باید آنها را با استفاده از پردازش تصاویر واضح ساخت. برای بارزسازی خطواره‌ها از فیلترهای خاصی، استفاده می‌شود. این فیلترها به لبه و حاشیه در برگیرنده تصاویر ماهواره‌ای اهمیت داده و عوارض خطی مثل شکستگی و گسلها را آشکار می‌کنند. (Lillesand and Keifer 2015) به عبارت دیگر باید گفت فیلترها در واقع ماتریسهایی هستند که تصاویر را در



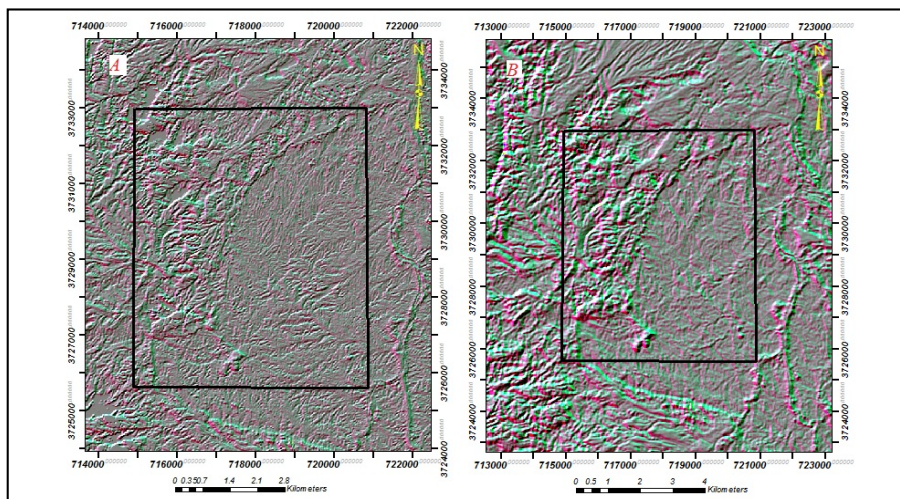
زایی در هر ناحیه‌ای گسلش و شکستگی‌های موجود می‌باشند که در واقع راهی برای نفوذ سیالات کانه دار هستند. با توجه به ترسیم گسل‌های موجود در منطقه (بر روی نقشه با مقیاس ۱/۲۵۰۰۰۰) و مشاهدات صحرائی، جهات بیشتر گسل‌های منطقه در زوایای ۳۶۰ درجه می‌باشد (شکل ۹). به منظور جدا سازی بهتر خطواره‌ها، از روش فیلترینگ تصویر ETM+ و ASTER منطقه توسط کرنل-های ماتریسی ۳×۳، در سه جهت عمده خطواره‌های منطقه (۴۵، ۹۰ و ۳۶۰ درجه) استفاده شد.

برای بارزسازی خطواره‌های منطقه از تصاویر سنجنده ETM+، در باند پانکروماتیک (باند ۸)، از سینهای ۱۵۹-۳۷ با توان تفکیک مکانی ۱۵ متر و تصاویر ASTER منطقه در باند ۱ استفاده شده است. و با استفاده از نقشه‌ی توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰۰ منطقه قاین تصحیح هندسی و سپس رادیومتریک روی آنها صورت گرفت. فیلترهای نمایش داده شده در کرنل‌های بالا بر تصویر باند ۸ اعمال شدند، سپس سه تصویر به دست آمده در سه باند R، G و B با هم ترکیب و یک تصویر رنگی کاذب تهیه گردید. در نتیجه این عمل خطواره‌ها در هر یک از جهات با رنگ متمایز مشخص شده‌اند. (شکل ۵).

اطراف آن قرار می‌گیرند. این ماتریس در روی پنجره‌های (مربع‌های هم اندازه) از تصویر قرار می‌گیرد که حاوی  $n \times n$  پیکسل باشد. مقادیر آرایه‌های این ماتریس، در مقادیر پیکسل‌های متناظر ضرب می‌شوند. سپس عدد به دست آمده با عدد موجود در مرکز فیلتر جمع جبری می‌شود، و مقدار آن برای پیکسل مرکزی فیلتر منظور می‌شود. سپس فیلتر به اندازه‌ی یک پیکسل جابه‌جا شده و دوباره این محاسبات انجام می‌شود. در نتیجه این عمل مقادیر پیکسل‌های جدید، با مقادیر اولیه متفاوت می‌شوند و تقابل بین پیکسل‌های خطواره با پیکسل‌های زمینه بیشتر می‌شوند و بدین ترتیب خطواره‌ها واضح می‌شوند.

### فیلترهای جهت دار (Directional)

این فیلترها برای بارزسازی خطواره‌هایی که دارای روند خاصی هستند، استفاده می‌شوند و کاربرد آنها بیشتر در مسائل زمین شناسی است. عددهای موجود در کرنل، طوری انتخاب می‌شوند، که خطواره‌ها را در جهت خاصی واضحتر سازند. روش کار این فیلترها مانند فیلترهای بدون جهت است. این روش از شاخص فاکتور خطوارگی به وسیله عواملی از قبیل طول، تعداد و تقاطع خطواره‌ها در هر محدوده کنترل می‌شود. یکی از عوامل مهم مؤثر در کانه

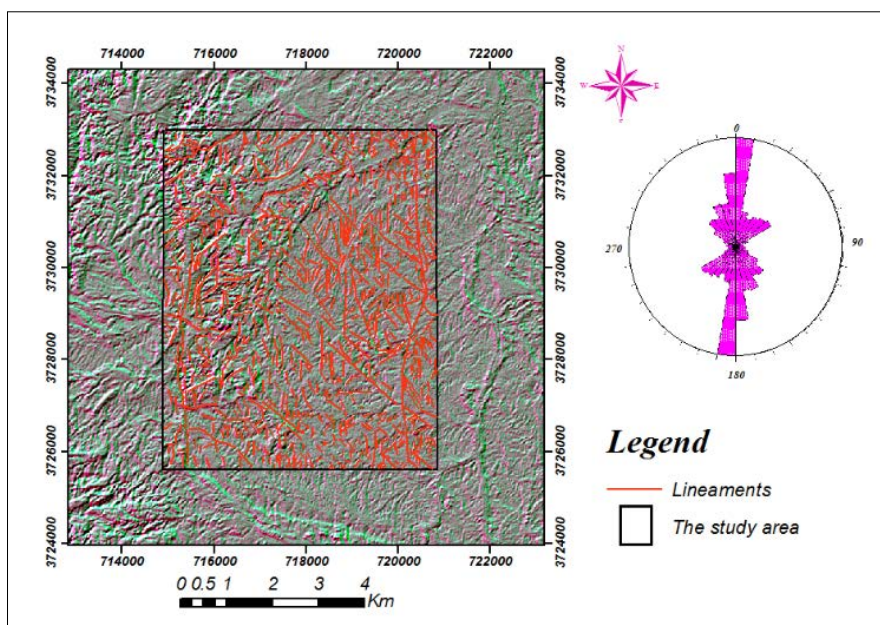


شکل ۵: بارزسازی خطواره‌های منطقه با روش فیلترینگ - تصویر RGB از سه تصویر فیلترینگ در جهت ۴۵، ۹۰، ۱۳۵ و ۳۶۰ درجه. کادر مشکی محدوده مطالعاتی را نشان می‌دهد. A تصویر ASTER و B تصویر ETM+



از اعمال فیلترهای ذکر شده تصویر تولید شده به محیط نرم افزار GIS انتقال داده شد. و خطواره‌های مختلف که در جهت‌های ذکر شده مشخص شده‌اند رسم شد و رز دیاگرام خطواره‌های رسم شده نیز رسم شده است (شکل ۶) و با انطباق این تصاویر با نقشه‌ی زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه و بازدیدهای میدانی گسل‌های اصلی منطقه مشخص شد (شکل ۲۰).

شکل ۵ خطوط در جهت شمال-جنوب را با رنگ صورتی، خطواره‌های موجود در جهت شمال شرق-جنوب غرب را با رنگ سفید، خطواره‌های موجود در جهت شرق-غرب با رنگ قرمز و خطوط در جهت شمال غرب-جنوب شرق را با رنگ سبز نشان داده است. پیمایش‌های میدانی، انطباق دو روند شمال-جنوب و شمال غرب-جنوب شرق را با گسل‌ها و شکستگی‌های منطقه به اثبات رساند. بعد



شکل ۶. شکستگی‌های رسم شده منطقه مورد مطالعه بر روی تصویر فیلتر شده رز دیاگرام آنها

شناسایی هستند وجود اکسید آهن و کانیهای هیدروکسیل است و البته از ارتباط مناطق دارای شکستگی نیز می‌توان برای اکتشاف کانسارها استفاده نمود. در کانسارهای مس پورفیری، کلاهک‌های آهنی (گوسان) بر روی زونهای پتاسیک و فیلیک تشکیل می‌شوند و بنابراین نشانه خوبی برای شناسایی نهشته‌های پورفیری هستند. مهم‌ترین کانی‌هایی که در دگرسانی‌های سطحی در ارتباط با کانه‌زایی قابلیت بارز شدگی توسط تصاویر پردازش شده را دارند کانی‌های رسی و اکسید آهن می‌باشند که حضور هر دوی این کانی‌ها با هم مد نظر قرار داده می‌شود. بدین منظور با توجه به طیف‌های انعکاسی این کانی‌ها، دو تقسیم‌بندی ۵/۷

## پردازش تصاویر Aster و ETM<sup>+</sup> برای شناسایی مناطق دگرسان شده

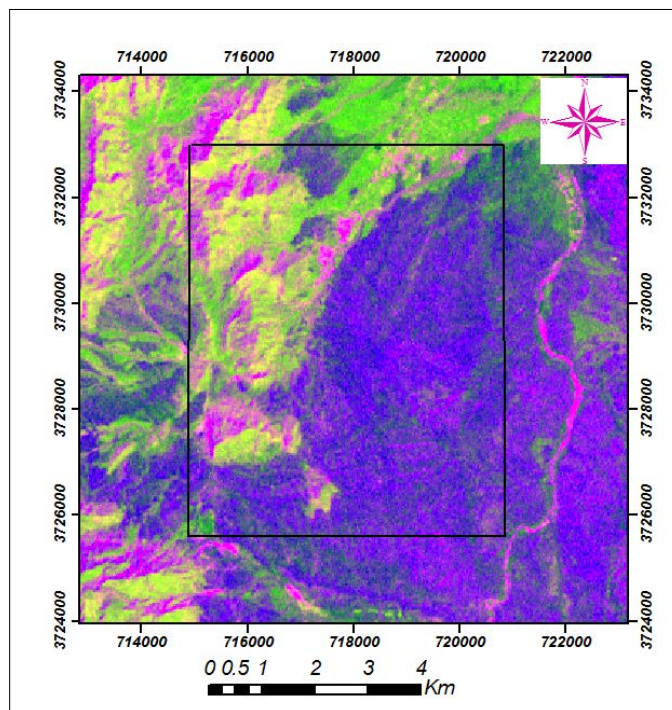
### ترکیب نسبت‌های بانندی برای یافتن مناطق دگرسانی

به کارگیری روش تقسیم‌بندی برای بارزسازی عوارض خاص در داده‌های چندطیفی مناسب است. از روش یادشده برای کاهش اثرات روشنایی خورشید، توپوگرافی و بارزسازی اطلاعات طیفی در تصاویر استفاده می‌شود. (Gupta, 2003). برای شناسایی مناطق دگرسان شده گرمابی دو نشانه خوب که در تصاویر ماهواره‌های قابل



و از تلفیق تصاویر به دست آمده از این تقسیم باندی‌ها در تصویری جداگانه به وسیله عمل جمع پیکسل‌ها تصویر دگرسانی سطحی منطقه حاصل شد. (شکل ۷).

و ۳/۱ به ترتیب برای کانی‌های رسی و اکسید آهن بر روی تصویر ETM<sup>+</sup> منطقه انجام شد (Tommaso & Rubinstein, 2007). و به ترتیب در باند R و باند G قرار گرفت. و مجموع این دو نسبت باندی در باند B قرار داده شد

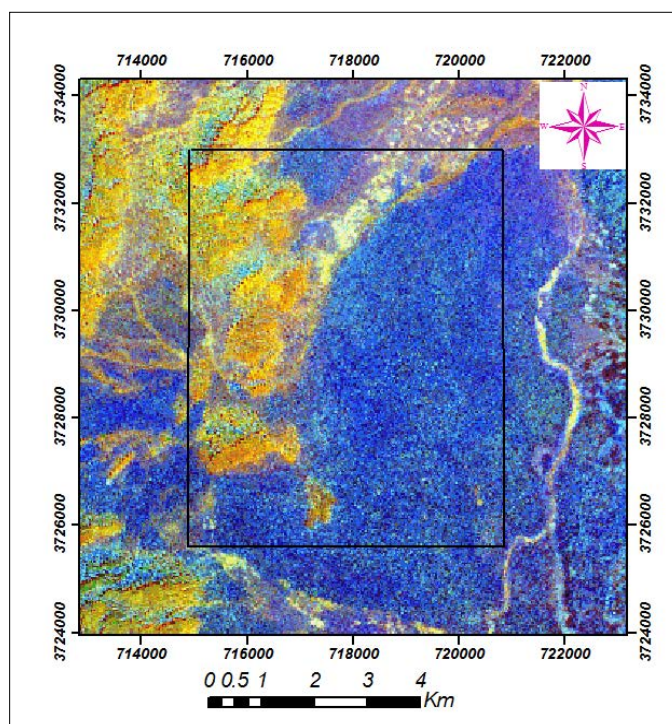


شکل ۷: تصویر حاصل از ترکیب نسبت‌های باندی ۳/۱، ۵/۷، و مجموع این دو نسبت در تصاویر ETM<sup>+</sup> جهت نمایش مناطق حاوی سنگ‌های بازیگ (به رنگ آبی)، مناطق دارای اکسید آهن (به رنگ قرمز صورتی) و کانی‌های هیدروکسیل‌دار (به رنگ سبزپسته ای)

دارای رس به رنگ روشن (اغلب سفید) دیده می‌شوند (شکل ۸).

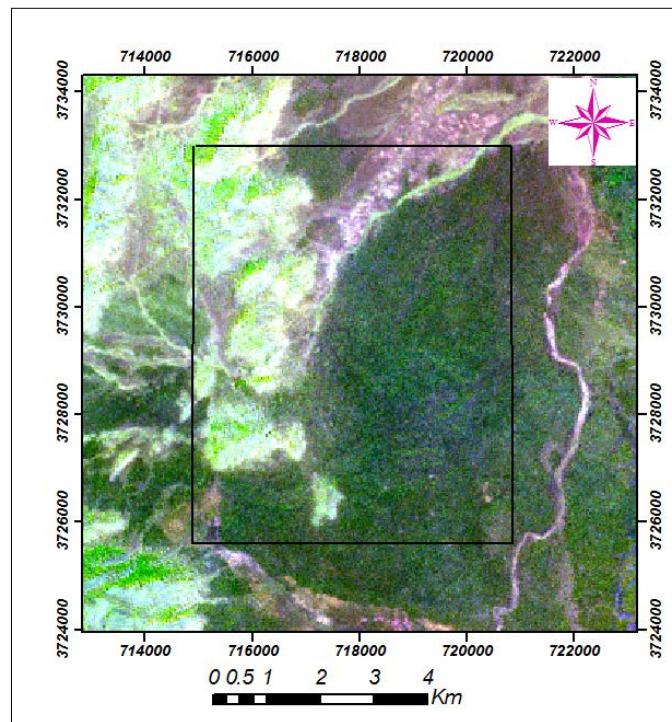
برای تصاویر استر با توجه به حضور کانیهای رسی مونتموریلونیت، کائولینیت و ایلیت و کانی سیرسیت در دگرسانیهای گرمابی از شاخص‌های طیفی موجود در منحنی طیفی این کانیها برای انتخاب نسبت باندی مناسب می‌توان استفاده نمود. برای بارزسازی کانی سیرسیت دگرسانی چیره منطقه و کانیهای رسی می‌توان از نسبتهای باندی ۴/۹ در قرمز، ۴/۶ در سبز و ۷/۶ در آبی از سنجنده استر استفاده شده است (Tommaso & Rubinstein, 2007) که در غرب تصویر مناطق دگرسان شده که توسط گسل ورزق از توده نفوذی (رنگ آبی) جدا شده است و به رنگ آجری و مناطق





شکل ۸. نسبت‌های بانندی ۴/۹ در قرمز، ۴/۶ در سبز و ۷/۶ در آبی از سنجنده استر مناطق دگرسان شده (رنگ آجری) که توسط گسل‌های اصلی از توده نفوذی (رنگ آبی) جدا شده است.

ترکیب رنگی نسبت‌های بانندی می‌تواند اطلاعات بیشتری را در ارتباط با دگرسانی‌های مختلف در اختیار قرار دهد. در شکل ۹ کانی‌های سریسیت و رسی، کلریت، اپیدوت، کلسیت و سرپانتینیت موجود در منطقه با استفاده از یک تصویر ترکیب رنگی نسبت‌های بانندی به صورت ۴/۵ در آبی، ۴/۸ در سبز و ۴/۹ در سرخ از باندهای سنجنده استر نشان داده شده است (Tommaso & Rubinstein, 2007). در این تصویر مناطق حاوی کانیهای سریسیت و رسی با پیکسل‌های روشن و در اطراف آنها کانی‌های زون پروپلیتیک با رنگ سبز دیده می‌شوند (زون دگرسانی فلیک و پروپلیتیک). در تصویر رنگی به دست آمده مناطق دارای رگه‌های کربناتی در باختر منطقه نیز بارز شده‌اند. در مجموعه افیولیتی دگرسانی‌هایی مانند ساسوریتی شدن، سرپانتینیتی شدن و وجود کلریت که طیف‌های مشابهی در محدوده باندهای استر دارند، با رنگ سبز پسته‌ای مشخص شده‌اند.



شکل ۹: تصویر ترکیب رنگی نسبتی به صورت ۴/۵ در آبی، ۴/۸ در سبز و ۴/۹ در سرخ از باندهای سنجنده استر. مناطق دگرسان شده با پیکسل‌های روشن در شرق تصویر، و در اطراف آن‌ها کانی‌های زون پروپلیتیک با رنگ سبز دیده می‌شوند. در مجموعه افیولیتی دگرسانی‌هایی مانند ساسوراتی شدن، سرپانتینی شدن و وجود کلریت که طیف‌های مشابهی در محدوده باندهای استر دارند، با رنگ سبز پسته‌ای مشخص شده‌اند. کادرسبایه رنگ محدوده مورد مطالعه می‌باشد.

## تفسیر داده‌های مغناطیسی

### داده‌های مورد استفاده

برداشت‌های ژئوفیزیک هوایی به سه روش مغناطیس‌سنجی، الکترومغناطیس و رادیومتری (اورانیوم، پتاسیم و توریم) در بخش‌هایی از شرق کشور و همچنین بخشی از برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ شهرستان قاینات صورت گرفته است.

این برداشت‌ها توسط هواپیما و با ارتفاع پرواز ۱۲۰ متر از سطح زمین و فاصله خطوط پرواز ۷۵۰۰ متر و با آزیموت  $45^{\circ}$  در منطقه و به قصد عملیات اکتشافی انجام شده است. مغناطیس‌سنج مورد استفاده در این برداشت از نوع بخار سزیم بوده که در هنگام برداشت در ارتفاع ۹۰ متری از

سطح زمین قرار داشته است. از داده‌های مغناطیس هوایی برای تفکیک بهتر همبندی‌های واحدهای زمین‌شناسی و نیز بررسی تغییرات ژئوشیمیایی رخ داده در آنها استفاده می‌شود. در این روش پرتو گامای ساطع شده از عناصر اورانیم، پتاسیم و توریم به وسیله طیف سنج گاما ثبت می‌شود و از آنجا که هر واحد زمین‌شناسی ویژگی‌های پرتوزایی خاص خود را دارد، بر این اساس واحدهای زمین‌شناسی و مناطق دارای دگرسانی قابل تشخیص می‌شوند (Armstrong & Rodegheiro, 2006; Keary, 2002). داده‌های مغناطیس‌هوایی پردازش شده دارای اطلاعات با ارزشی جهت تفسیر عوارض زیر سطحی هستند (Neawsuparp et al., 2005).

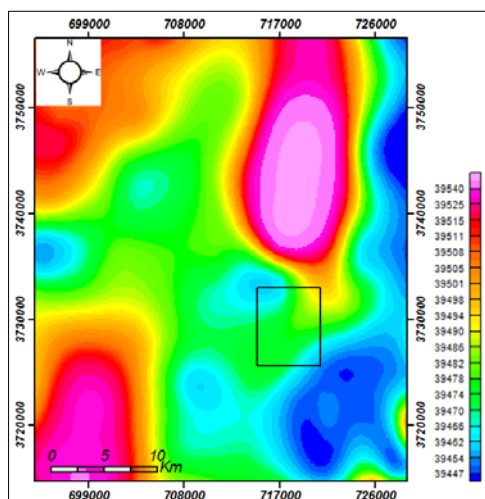
یکی از مراحل پردازش داده‌های مغناطیس‌هوایی، محاسبه اثر مغناطیسی میدان مرجع وابسته به میدان جاذبه





### فیلتر برگردان به قطب

اولین فیلتر اعمال شده، فیلتر برگردان به قطب می‌باشد. با استفاده از این فیلتر، میدان مغناطیسی از یک عرض مغناطیسی که در آن بردار میدان زمین مایل و شیب‌دار است به قطب مغناطیسی یعنی جایی که میدان القایی قائم می‌باشد، منتقل می‌گردد زیرا اگر میدان زمین مایل باشد، شکل ناهنجاری‌های مغناطیسی<sup>۳</sup> که به صورت القایی به وجود آمده‌اند؛ نسبت به منابع به وجود آورنده نامتقارن خواهد بود ولی در صورتی که میدان القایی قائم باشد، ناهنجاری‌های به وجود آمده در اثر القاء مغناطیسی بر روی منبع خودشان قرار می‌گیرند. لذا تفسیر اساسی داده‌های مغناطیس هوایی معمولاً بر روی تصاویر مختلف برگردان به قطب صورت می‌گیرد (شکل ۱۱).

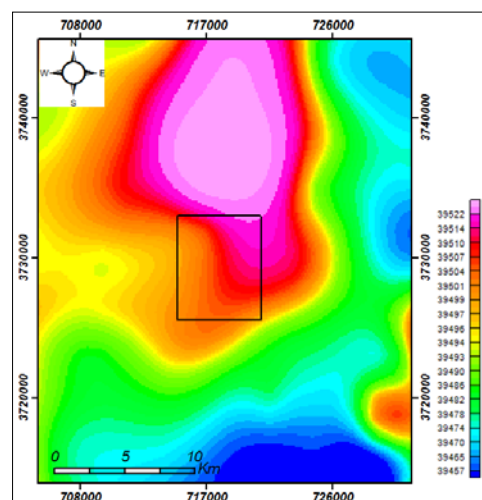


شکل ۱۱: نقشه برگردان به قطب تولید شده از شدت کل میدان مغناطیسی

اعمال این فیلتر با استفاده از زاویه میل<sup>۴</sup> و انحراف مغناطیسی صورت می‌گیرد. مقدار این زوایا در منطقه مورد

زمین (IGRF) و حذف آن از داده‌های مغناطیسی مشاهده شده (شدت کل میدان مغناطیسی) می‌باشد (Silva, 2003). با اعمال فیلترهای متفاوت بر روی اطلاعات، بررسی از جهات مختلف انجام گرفته و با در نظر گرفتن اطلاعات زمین‌شناسی، منطقه مورد تعبیر و تفسیر قرار گرفته است (شکل ۱۰).

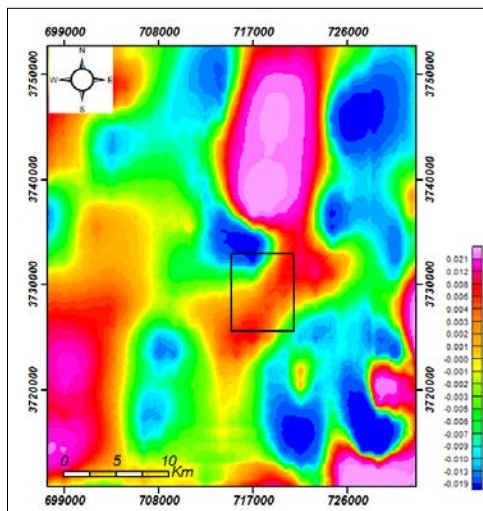
جهت شناسایی خطواره‌های مغناطیسی منطقه مورد مطالعه، از داده‌های شدت کل میدان مغناطیسی پس از اعمال فیلترهای مختلف در مرحله پردازش استفاده شده است.



شکل ۱۰: نقشه شدت کل میدان مغناطیسی، مناطق قرمز بیانگر شدت بیشتر میدان مغناطیسی و مناطق آبی نشان دهنده شدت کم میدان است. کادر مشکی محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

<sup>۴</sup> Magnetic anomalies  
<sup>۵</sup> Declination

<sup>۱</sup> International Geomagnetic References Field  
<sup>۲</sup> Reduction To Pole  
<sup>۳</sup> Magnetic anomalies



شکل ۱۲: فیلتر بالاگذر مشتق اول قائم اعمال شده بر روی RTP که ناهنجاری‌های بزرگ از بین رفته و ناهنجاری‌های کوچک و محلی به خوبی نمایان می‌گردند. (کادر سیاه محدوده مورد مطالعه می‌باشد)

#### فیلتر مشتق افقی

فیلتر مشتق افقی: این فیلتر باعث می‌شود که جابه‌جایی‌هایی که در محل توده و تجمعات مغناطیسی که ناشی از عملکرد گسل و یا توده‌های آتشفشانی صورت می‌گیرند نمایان شود. این امر باعث می‌شود که سرچشمه مغناطیسی با محیط اطراف آن کنترل شود. برای مثال رابطه خروج توده‌های ولکانیکی با گسل می‌تواند توسط این فیلتر مشخص شود (شکل ۱۳).

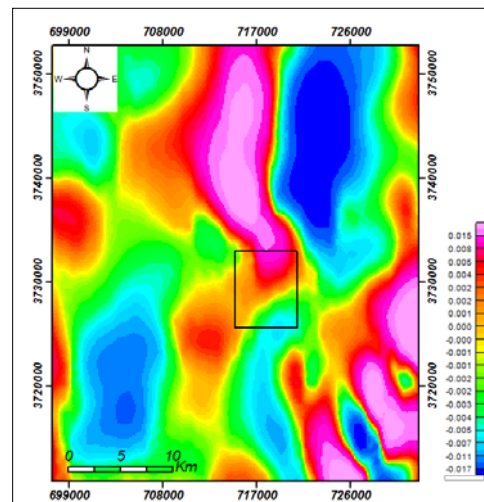
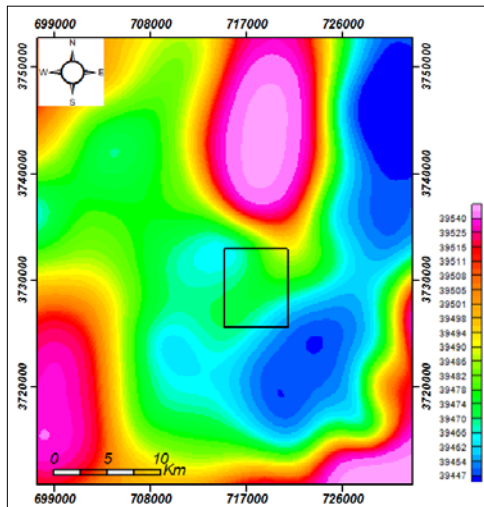
مطالعه به ترتیب ۵۰ و ۲/۶ درجه و مقدار میانگین IGRF برابر ۳۹۶۱۵/۵۸ نانوتسلا بوده است. در واقع با تطبیق واحدهای زمین شناسی و نقشه برگردان به قطب و میزان خودپذیری مغناطیسی واحدهای زمین شناسی (Clark, 1997) می‌توان ملاحظه نمود که بیشترین شدت بی‌هنجاری‌های مغناطیسی مربوط به واحدهای آندزیتی و واحدهای بازالتی، و تراکی بازالتی و دایکهای دیابازی است.

#### فیلتر مشتق قائم اول

پس از اعمال فیلتر برگردان به قطب، فیلتر بالاگذر مشتق اول قائم بر داده‌ها اعمال شده است. جهت حذف اثرات ناحیه‌ای با طول موج بلند و تداخل بین ناهنجاری‌های مجاور از فیلتر مشتق قائم استفاده می‌شود. مشتق قائم در واقع یک فیلتر بالاگذر می‌باشد زیرا فرکانس‌های بالا را نسبت به فرکانس‌های پایین افزایش می‌دهد. در نتیجه اثر ناهنجاری‌های بزرگ (ناهنجاری‌های بزرگ مغناطیسی، دارای طول موج بلند و فرکانس پایین هستند)، که مربوط به منابع عمیق و منطقه‌ای می‌باشند؛ بر روی ناهنجاری‌های بزرگ از بین رفته و ناهنجاری‌های کوچک و محلی به خوبی نمایان می‌گردند (Silva, 2003 & Neawsuparp et al., 2005) (شکل ۱۲).



است، بنابراین باید انتظار بی هنجاری شدت بالا داشته باشیم که این نتیجه صحت پردازش را نیز می‌رساند.

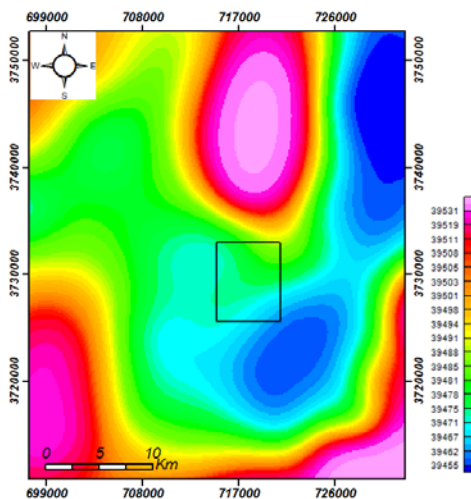


شکل ۱۳: فیلتر مشتق افقی نمایانگر اثرات گسل‌ها و توده‌های ولکانیکی بر تجمعات مغناطیسی منطقه

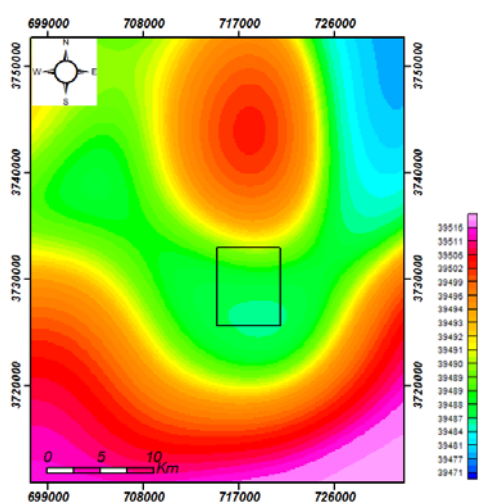
شکل ۱۴: فیلتر ادامه فراسوی ۱۰۰۰ متری

### فیلتر ادامه فراسو

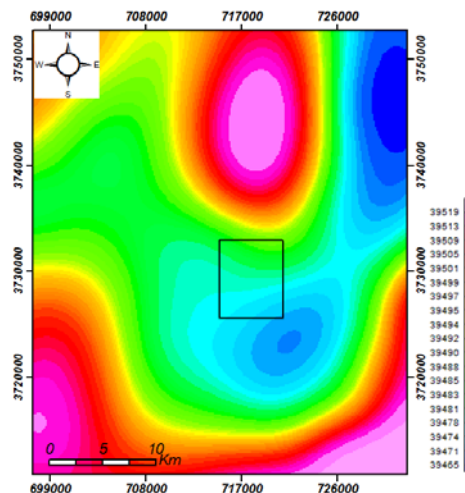
فیلتر ادامه فراسو بر روی نقشه مغناطیسی برگردان به قطب، به منظور حذف بی هنجاریهای سطحی و بارز شدن بی هنجاری های ژرف تر که تحت اثر نوفه های سطحی در داده نباشند به ارتفاع ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۴۰۰۰، ۶۰۰۰، ۸۰۰۰ متر اعمال شده است و همانطور که در شکل نشان داده شده در عمق ۸۰۰۰ متری اثر توده کامل از بین رفته است. نقشه‌های حاصل از ادامه فراسو در تصاویر ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰ و ۲۱ نشان داده شده است. با اعمال فیلتر ادامه فراسو به مقدار  $Z/2$  بی هنجاری‌های سطحی تا ژرفای  $Z/2$  رقیق شدگی پیدا می‌کند. بنابراین می‌توان بر آورد ژرفا از نقشه بی هنجاری‌های ادامه فراسو را به دست آورد. همانطور که در شکل مشخص است با افزایش ارتفاع، بی هنجاری‌های سطحی کاهش یافته است و بی هنجاری‌های ژرفی بیشتر بروز می‌نماید. با افزایش ارتفاع فیلتر فراسو میزان بروز بی هنجاری بیشتری شود. با تطبیق این بی هنجاری و واحد زمین شناسی موجود مشاهده می‌شود که این بی هنجاری بر روی سنگهای بازالتی، آندزیتی و تراکی بازالتی قرار دارد. به طور کلی این بی هنجاری مرتبط با واحدهای آندزیتی می‌باشد و از آنجا که منشأ آندزیت ها ماگمای بازالتی



شکل ۱۵: فیلتر ادامه فراسوی ۲۰۰۰ متری



شکل ۱۸: فیلتر ادامه فراسوی ۴۰۰متری



شکل ۱۶: فیلتر ادامه فراسوی ۸۰۰متری

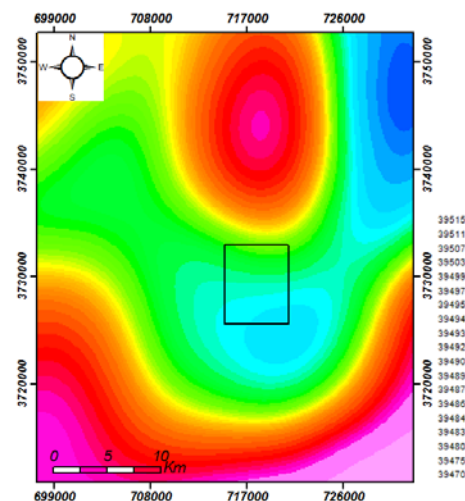
### ۳-۳: استخراج خطواره‌های مغناطیسی

در یک حالت عادی، عارضه‌های زیر منعکس کننده یک منطقه دگرشکلی در نقشه‌های مغناطیس هوایی هستند (Korhonen et al., 2004).

الف) نواحی خطی و باریک دارای مغناطیس پایین (رنگ آبی) که یکی از معمول‌ترین حالات در نقشه‌های مغناطیس‌هوایی است و معرف مناطق دارای دگرشکلی شکننده است. به عبارتی یک پهنه مغناطیسی باریک خطی با شدت پایین که به دلیل هوازدگی در طول سطح گسلش به وجود آمده و کانی‌های مغناطیسی در اثر اکسیداسیون به کانی غیر مغناطیس تبدیل گشته‌اند. دو طرف این پهنه باریک و خطی می‌تواند ویژگی مغناطیسی مشابهی داشته باشد.

ب) نواحی خطی و باریک دارای مغناطیس بالا (رنگ بنفش) که ممکن است در اثر وجود یک عامل خارجی قطع شده باشد؛ می‌تواند مربوط به کانی‌های مغناطیسی رسوب کرده در سطح گسل باشد.

پ) قطع ناگهانی در عمق منابع مغناطیسی



شکل ۱۷: فیلتر ادامه فراسوی ۶۰۰متری



ت) ناپیوستگی و جابه‌جایی در ناهنجاری‌های مغناطیسی به صورت آشفتگی که از نشان‌گرهای بسیار شاخص یک پهنه دگرشکلی می‌باشند.

ج) جابه‌جایی واضح و تند در ناهنجاری‌های مغناطیسی که نشان‌دهنده پهنه‌های برشی شکننده یا همان گسل‌ها می‌باشند.

چ) پله‌های مغناطیسی که بیان‌گر همبندی‌های دارای خردشدگی بالای واحدهای سنگی مختلف می‌باشند.

در این گونه مطالعات، وجود تغییرات یکنواخت و کم و بیش آرام در ژرفای پی‌سنگ مغناطیسی در منطقه، می‌تواند به نوعی گویای اثر ضعیف گسل‌ها در ایجاد مؤلفه جابه‌جایی قائم و یا حتی نتیجه تغییر در خواص مغناطیسی مواد ژرفایی باشد. علاوه بر این ذکر این نکته ضروری است که عموماً خصوصیات مغناطیسی مناطق دگرشکلی طی مراحل مختلف دگرگونی ممکن است دچار تغییر شوند.

در ارتباط با شناسایی شکستگی‌ها به کمک داده‌های مغناطیس‌هواپی، سه حالت کلی را می‌توان در نظر گرفت:

۱. خطواره‌های مغناطیسی استخراج شده با گسل‌های تشخیص داده شده بر روی سطح هم‌خوانی دارد (شکل‌های ۲۲ و ۲۳).

۲. برای خطواره‌های مغناطیسی شناخته شده، گسلی بر روی سطح شناسایی نشده است. در این مورد دو حالت را می‌توان در نظر گرفت؛ در حالت اول ممکن است در نظر گرفتن این خطواره‌ها به دلیل تفسیر نادرست ناهنجاری‌ها بوده باشد و در حالت دوم ممکن است خطواره مغناطیسی واقعاً وجود داشته ولی جابه‌جایی سطحی ایجاد شده با

خطواره مغناطیسی فوق دقیقاً منطبق نبوده و یا به دلیل پوشیده بودن محدوده از آبرفت و یا ماهیت سنگ‌شناسی منطقه، اصولاً برداشت نگردیده باشد.

۳. گسل‌های شناخته شده بر روی زمین که هیچ‌گونه خطواره مغناطیسی هم‌خوانی بر روی داده‌های مغناطیس‌هواپی برای آن‌ها در نظر گرفته نشده است. برای این مورد هم دو حالت می‌توان در نظر گرفت؛ ممکن است ناهنجاری‌های موجود بر روی نقشه گویای وجود خطواره‌ای باشند ولی در تفسیر به عمل آمده توجه کافی به آن نگردیده باشد و یا تشخیص آن دشوار بوده است. در این حالت با ترسیم گسل یا شکستگی از روی نقشه زمین‌شناسی دارای زمین مرجع<sup>۸</sup> و یا تصاویر ماهواره‌ای می‌توان این خلأ را جبران نمود. همچنین امکان دارد گسل‌های شناخته شده تأثیر مهمی بر روی پی‌سنگ نداشته باشند، مثلاً در اعماق، شیبی نزدیک به افق و حالت قاشقی<sup>۹</sup> پیدا کنند که با توجه به فاصله خطوط پیمایش از همدیگر، اثر این گونه گسل‌ها ممکن است به خوبی مشخص نگردد.

بر اساس اصولی که ذکر شد، اقدام به شناسایی و تفکیک خطواره‌های مغناطیسی در منطقه و ترسیم آن‌ها در محیط GIS گردیده است. در مورد بسیاری از خطواره‌های مغناطیسی شناسایی شده در ناحیه معدنی ورزگ، حالت اول و نیز به دلیل وجود پوشش آبرفتی در بخش‌هایی از منطقه و عملکرد فرآیندهای فرسایشی در واحدهای آتشفشانی، حالت دوم صادق است.

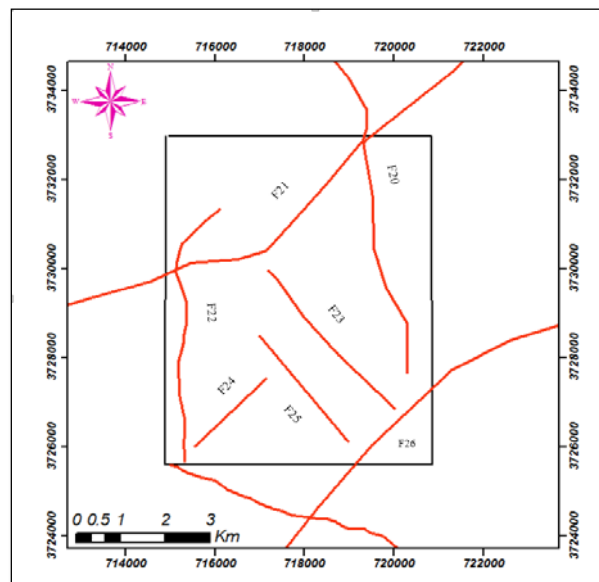
با توجه به همپوشانی مطلوبی که بین خطواره‌های مغناطیسی و سطحی وجود دارد، در برخی مناطق مشاهده می‌شود که وجود خطواره‌های مغناطیسی زیر سطحی با روند شمال-جنوب، دارای انطباق سطحی متناسبی نمی‌باشد



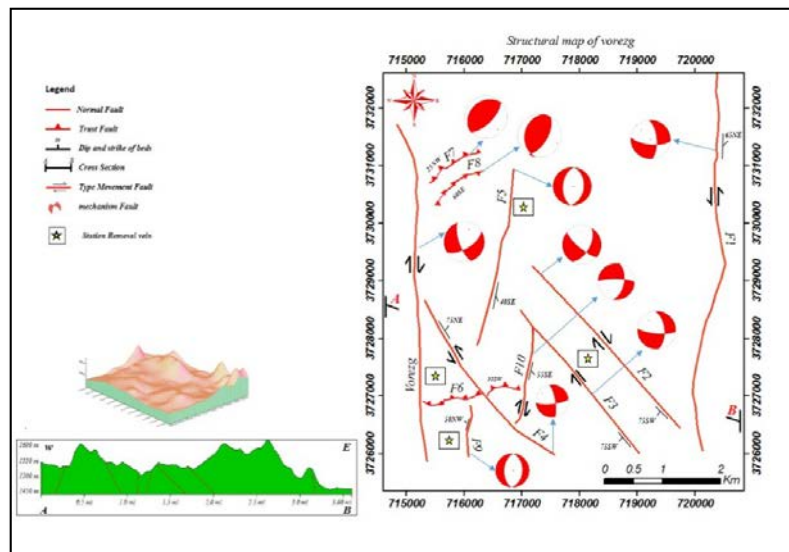


در شکل ۲۲، خطواره‌های مغناطیسی شناسایی شده در ناحیه ورزگ که با استفاده از نقشه شدت کل میدان مغناطیسی پس از اعمال فیلتر برگردان به قطب (RTP) و مشتق اول قائم وافقی به دست آمده، نشان داده شده است و منطبق بر نقشه ساختاری رسم شده در شکل ۲۳ برای گسل‌های محدوده مورد مطالعه می‌باشد.

که این امر با فرض گسلی بودن خطواره‌ها، یا به واسطه عدم رسیدن به سطح گسل‌های زیر سطحی است، یا گسلی نبودن خطواره‌های ایجاد شده است. (لازم به ذکر است که هر خطواره مغناطیسی، لزوماً گسل محسوب نمی‌شود و گاه اختلاف در لیتولوژی‌ها یا مرزهای رسوبی نیز در تحلیل‌های هومغناطیس به صورت خطواره نمود می‌یابند).



شکل ۱۹: خطواره‌های استخراج شده از نقشه‌های مغناطیسی منطقه مورد مطالعه



شکل ۲۰: نقشه ساختاری منطقه مورد مطالعه (روستای ورزگ-شرق قاین)



## نتیجه‌گیری

میدانی، عمده شکستگی‌ها منطبق بر روندهای NW-SE و NE-SW می‌باشد. گسل‌های با روند N-S که تحت تاثیر سیستم گسلی رودشور در منطقه به وجود آمده‌اند، با ایجاد یک منطقه فشاری-کششی باعث نهشته شدن عنصر مس در توده‌ی پورفیری شده‌اند. جایگیری عنصر مس در ارتباط با شکستگی‌هایی که توسط گسل‌ها در منطقه ایجاد شده‌اند باعث ایجاد متاسوماتیسم در توده پورفیری و نهشته شدن ثانویه عنصر مس در این توده شده‌اند.

تفسیر داده‌های مغناطیس‌هوائی و با اعمال فیلترهای مشتق قائم اول، مشتق افقی و ادامه فراسو اثرات توده نفوذی بر مغناطیس منطقه، و با استخراج خطوط‌های مغناطیسی در محدوده مطالعاتی با استفاده از این فیلترها، دلالت بر جهت‌گیری‌های عمده NW-SE و نیز N-S دارد. علاوه بر این، خطوط‌هایی با جهت‌گیری متوسط NE-SW در نقشه مذکور دیده می‌شوند که از فراوانی کمتری برخوردار بوده و منطبق بر گسل‌های با مؤلفه معکوس منطقه می‌باشند. با توجه تصاویر تولید شده از داده‌های مغناطیسی هوائی منطقه مورد مطالعه و استخراج خطوط‌های آنها یک تطابق نسبتاً خوب بین این خطوط‌ها و خطوط‌های مشاهده شده سر زمین و خطوط‌های استخراج شده از تصاویر ETM<sup>+</sup> و ASTER را می‌توان مشاهده کرد. عمق خطوط‌های استخراج شده از تصاویر مغناطیسی حداکثر تا ۸۰۰۰ متر می‌رسد و با توجه به تصاویر مغناطیسی و حذف خاصیت مغناطیسی توده در همین عمق می‌توان نتیجه گرفت که توده تحت تاثیر این گسل‌ها غنی از کانی مس (آزوریت) گشته است. حرکت گسل‌های موجود در منطقه در دو طرف شرق و غرب محدوده یک منطقه کششی بین این گسل‌ها (F<sub>1</sub> و Vorezg) به وجود آمده است (شکل ۲۳). از پردازش تصاویر ماهواره‌ای و اعمال فیلترهای جهت‌دار و بدون جهت به تصاویر ماهواره‌ای ETM<sup>+</sup> و ASTER و تلفیق آن با برداشت‌های صحرایی نیز، وجود گسل‌ها با راستاهای NW-SE و NE-SW و N-S به اثبات رسید و همان‌طور که عنوان شد، با برداشت‌های صحرایی، اکثر گسل‌های منطقه دارای سازوکار راستالغز راستگرد با مؤلفه نرمال و تعدادی از گسل‌ها دارای سازوکار معکوس است. علاوه بر این با تحلیل داده‌های سنجش از دور از طریق روش‌های خاص (شاخص خطوارگی) نیز، خطوط‌ها در منطقه به ترتیب دارای فراوانی در راستاهای NW-SE، NE-SW و N-S دیده می‌شوند که با استناد به پیمایش‌های



Lillesand, T. M., Schmaltz, J. E., Leale, J. E., and Nordheim, M. J., 2004. Mapping lake water clarity with Landsat images in Wisconsin, USA. *Canadian journal of remote sensing*, 30(1), 1-7.

Sabins, F. F., 1999. Remote sensing for mineral exploration *Ore geology reviews* 14(3-4), 157-183.

Lowell, J. D and Guilbert, J. M., 1970. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic geology* 65(4), 373-408.

Fujisada, H., 1995. Design and performance of ASTER instrument. In *Advanced and next-generation satellites*. International Society for Optics and Photonics 2583, 16-25.

Kruse, J. J., Strootman, E. G and Wondergem, J., 2003. Effects of amifostine on radiation-induced cardiac damage. *Acta oncologica*, 42(1), 4-9.

Armstrong, M, Rodegheiro, A., 2006. Airborne Geophysical Techniques. Coal Operators Conference. University of Wollongong and the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 113-131.

Korhonen, P. J and Luptacik, M., 2004. Eco-efficiency analysis of power plants: An extension of data envelopment analysis. *European journal of operational research* 154(2), 437-446.

Tommaso, I and Rubinstein, N., 2007. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infirnillo porphyry deposit Argentina *Ore. Geology Reviews* V 32, 275-290.

Abrams, et al., 2002. Mapping Hydrothermally Altered Rocks at Cuprite, Nevada, Using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), a New Satellite-Imaging System. *Economic Geology* (2003) 98 (5), 1019-1027.

Ninomiya, Yoshiki, Bihong Fu and Thomas J. Cudahy., 2005. "Detecting lithology with Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) multispectral thermal infrared "radiance-at-sensor" data. *Remote Sensing of Environment* 99.1-2, 127-139.

## منابع

اشتوکلین، ی.، افتخارنژاد، ج. نبوی، م. ح.، ۱۳۴۸، نقشه زمین شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ چهارگوش قاین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

کاویانی صدر، خ. (۱۳۹۱). اثر کنترل کننده های ساختاری در نهشت مواد معدنی منطقه چشمه خوری. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه بیرجند.

کاویانی صدر، خشایار. خطیب، محمدمهدی. زرین کوب، محمدرحیم. (۱۳۹۴)، اثر کنترل کننده های ساختاری در نهشت مواد معدنی منطقه چشمه خوری (شمال باختر بیرجند). فصلنامه زمین ساخت، سال بیست و چهارم، شماره ۹۵. صفحه ۳۲۳ تا ۳۳۲.

گزارش ارزیابی داده های ژئوشیمیایی در ورقه های قاین، گرمناج، آیز، سرچاه، آهنگران، شاهرخت، یزدان و کلاته، سازمان زمین شناسی (۱۳۸۰)

جمع، علیرضا. وهمکاران، گزارش بازدید و بررسی اجمالی پتانسیل های معدنی شهرستان قاین، سازمان زمین شناسی (۱۳۸۳)

جمع، علیرضا. وهمکاران، مجموعه گزارش های پتانسیل یابی و اکتشاف مقدماتی (آهن، طلا، مس و سنگهای تزئین) در شهرستان قاین - مهندسین مشاور زرناب اکتشاف (۱۳۸۵)

حسینی پاک، ع.، ۱۳۸۱. اصول اکتشافات ژئوشیمیایی، دانشگاه تهران.

Newsuparp, k. Charusiri, P. and Mayers, J., 2005. New processing of airborne magnetic and electromagnetic data and interpretation for subsurface structures in the Loei area, Northeastern Thailand. *Science Asia*, volume 31, 283-298.

Silva, A.M, Pires, A.C and McCaffery, A., 2003. Application of airborne geophysical data to mineral exploration in the uneven exposed terrains of the Rio Das Velhas greenstone belt. *Revista Brasileira de Geocincias*, volume 33, 17-28.

Gupta, Sumit, et al., 2003. "SPARK: A high-level synthesis framework for applying parallelizing compiler transformations. 16th International Conference on VLSI Design. Proceedings IEEE, 461-466.

Yuhas, R. H, Goetz, A. F. H and Boardman, J. W., 1992. Discrimination Among Semi-Arid Landscape Endmembers Using the Spectral Angle Mapper (SAM) Algorithm. Summaries of the 4th JPL Airborne. Earth Science Workshop, JPL Publication 92-41, 147.

Kruse, F. A., Kierein-Young, K. S and Boardman, J. W., 1990. Mineral mapping at Cuprite, Nevada with a 63 channel imaging spectrometer. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 56(1), 83-92.

Lillesand, Thomas, Ralph W. Kiefer, and Jonathan Chipman. Remote sensing and image interpretation. John Wiley and Sons, 2015.



فصلنامه زمین ساخت

پاییز ۱۳۹۹، سال چهارم، شماره ۱۵

doi: 10.22077/jt.2021.3796.1094

## تحلیل شکستگی ها در محدوده‌ی مجموعه معدنی سنگ ساختمانی لاشتر، جنوب اصفهان، با تأکید بر روش دورسنجی

پریسا تن زده<sup>۱</sup>، علی فرضی پور صائین<sup>۲\*</sup>، همایون صفایی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناس ارشد، گروه علوم زمین، دانشگاه اصفهان

۲- دانشیار، گروه علوم زمین، دانشگاه اصفهان

۳- دانشیار، گروه علوم زمین، دانشگاه اصفهان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۲۳

### چکیده

تهیه‌ی نقشه شدت شکستگی‌ها در معادن سنگ ساختمانی جهت مکان‌یابی موقعیت صحیح جبهه کار، کاهش میزان خردشدگی سنگ و بازدهی اقتصادی حائز اهمیت است. در این پژوهش، به بررسی شکستگی‌ها در محدوده مجموعه معدنی سنگ ساختمانی لاشتر در ۲۰ کیلومتری جنوب شهر اصفهان پرداخته است. از این رو، ابتدا شکستگی‌ها در بررسی‌های دورسنجی و برداشت‌های صحرایی شناسایی شدند که امتداد غالب شکستگی‌ها شمالی-جنوبی، شرقی-غربی و سایر شکستگی‌ها بیشتر در امتداد شمال غربی-جنوب شرقی است. در محیط Arc GIS با شبکه بندی بر شکستگی‌های شناسایی شده و با روش اسکن لاین دایره‌ای تکمیل شده برای هر شبکه میزان شدت محاسبه و از درون یابی نقاط هم‌تراز شدت شکستگی‌ها، نقشه شدت شکستگی‌ها تهیه شده است. با پیاده کردن موقعیت جبهه کارها در نقشه شدت شکستگی‌های بدست آمده بیانگر قرارگیری جبهه کارهای غیرفعال در شدت شکستگی‌های بالا است. لذا انجام چنین مطالعاتی در مراحل اولیه اکتشاف و استخراج سنگهای ساختمانی بسیار مهم و حیاتی است. همچنین با توجه به گسل کلاه قاضی با امتداد ۱۳۵ درجه و عملکرد معکوس با مؤلفه امتداد لغز راست بر، مدل ریدل منطقه رسم شد که گسل‌های منطقه، امتداد اصلی شکستگی‌های شناسایی شده تقریباً همخوانی مناسب با مدل ریدل دارد.

**واژه‌های کلیدی:** شدت شکستگی، سنگ ساختمانی، تصاویر ماهواره‌ای، GIS





## Fracture analysis in Lashotor stone quarry complex, south of Isfahan, a remote sensing approach

Tanzadeh .P <sup>1</sup>; Farzipour saein .A <sup>2\*</sup> ; Safaei .H <sup>3</sup>

1- M.Sc. student, Department of Geology, University of Isfahan

2- Associate Professor, Department of Geology, University of Isfahan

3- Associate Professor, Department of Geology, University of Isfahan

### Abstract

Fracture intensity map is important in quarries for correct location of face, reduce stone crushing and economic efficiency. In this study, the fractures surveyed in Lashotor stone quarry complex, 20 km south of Isfahan city as one of the most famous building stone quarries in Iran. Strike of major fractures are N-S, E-W and others are showing mostly NW-SE strike. The fracture intensity map was drawn in Arc GIS software for identified fractures based on augmented circular scaling method. Then Faces were mapped in fracture intensity map which demonstrate inactive faces exist in high fracture intensity areas. Thus, this kind of study is very important and needed for primary stages of exploration and extraction of building stone quarries. Also, Riddle model was drawn considering Kolah- Ghazi fault with strike of 135° and reverse and dextral strike- slip components. Identified fractures are almost fitted perfectly with the Riddle system of the Kolah- Ghazi fault.

**Keywords:** Fracture intensity, Building stone, Satellite images, GIS



## مقدمه

شفیعی و همکاران (۱۳۸۹) با بررسی شکستگی‌ها در معدن سعیدی در کرمان، نوروزی و امیری (۱۳۹۰) در معدن در بخاری، دارستانی و کوهی اصفهانی (۱۳۹۰) بررسی درزه نگاری در معدن مرمیت برد شیراز، امینی و خوشرو (۱۳۹۶) در معدن تراورتن آذر شهر، یاراحمدی و همکاران، ۲۰۱۸ در معدن گرانت سفید نظنز و معدن مرمیت کرم بنیاد دهیید پرداختند و بررسی شکستگی‌های را عاملی برای افزایش بهره‌وری و بهینه سازی تولید سنگ دانسته‌اند و همچنین شفییعی و همکاران (۱۳۸۹) در بحث اکتشاف و همچنین تعیین محل مناسب جبهه کار سنگ‌های ساختمانی قابل اهمیت دانسته است (شفیعی و همکاران، ۱۳۸۹؛ نوروزی و امیری، ۱۳۹۰؛ دارستانی و کوهی اصفهانی، ۱۳۹۰؛ امینی و خوشرو، ۱۳۹۶؛ Yarahmadi et al., 2018).

تکنیک دورسنجی (RS) در چند دهه اخیر بطور چشم‌گیری رشد کرده و بطور گسترده در زمین‌شناسی ساختمانی و زمین‌ساخت مورد استفاده قرار می‌گیرند (Masoud and Kokie, 2006; Alipour, 2009; Hashim et al., 2013., Alipour et al., 2017). از موفقیت‌های مهم در این زمینه شناسایی خط واره‌ها و تهیه نقشه از آن‌ها است (Shupe and Akhavi, 1989; Tibaldi and Ferrari, 1991; Masoud and koike, 2006; Solomon and Ghebreal, 2006; Marghany and Hashim, 2010; Hashim et al., 2013).

نرم افزار SAS.Plante با هدف مشاهده و دانلود تصاویر ماهواره‌ای با کیفیت بالا و بصورت زمین مرجع شده و بصورت سرویس‌های گوناگون Google earth, Bing Map, ... برای بررسی‌های دورسنجی بسیار مفید است ([www.sasgis.org](http://www.sasgis.org)).

سیستم اطلاعات جغرافیایی یا GIS بعنوان یک ابزار قدرتمند و مفید برای مدیریت داده‌های مکانی و تصمیم‌گیری، قابلیت جمع آوری، ذخیره، تجزیه-تحلیل و نمایش

سنگ ساختمانی ماده معدنی با ارزش و بعنوان مواد اولیه مورد استفاده در تولیدات صنعتی است و توجه به شیوه اقتصادی تولید سنگ خام از این معادن حائز اهمیت است. میزان گردش مالی این ماده معدنی در دنیا بیش از ۲۰ میلیارد دلار است که در این میان سهم ایران با توجه به ذخیره بالا (رتبه چهارم در دنیا) و تنوع انواع سنگ، کم‌تر از ۱ میلیارد دلار است در صورتی که میزان ذخایر این ماده معدنی در کشور بیش از ۳ میلیارد تن برآورد شده است بطوری که استان‌های زیادی از ایران این پتانسیل برای عملکرد مناسب وجود دارد (یاراحمدی و همکاران، ۱۳۹۶؛ وزارت صنعت، معدن و تجارت، ۱۳۹۴).

بعضی از نمونه‌های سنگ ساختمانی ایران در جهان نظیر ندارد. ایران کشوری متکی به درآمدهای نفتی و توجه به مسائل اقتصادی، فنی معادن و بکارگیری روش‌های مناسب تولید در آن‌ها این امکان را به وجود می‌آورد که به منابع درآمدی قابل اعتمادی در کنار نفت دست یافته شود (اورعی و همکاران، ۱۳۸۳). آنچه امروزه در استخراج سنگ‌ ساختمانی متداول است براساس تجربه‌ی انسانی است و میزان ناچیزی از آن فقط براساس روش‌های علمی صورت می‌گیرد (Tercan and Ozcelik, 2000) به این معنی که عملیات پی‌جویی، اکتشاف و استخراج در معادن نیاز به بررسی‌های علمی دارد که در این زمینه معدن‌داران نیز بر مکان‌یابی صحیح برای جبهه کار در معدن و کاهش ضایعات تأکید می‌کنند (اورعی و همکاران، ۱۳۸۳).

رویاری با ناپیوستگی‌ها از موارد اجتناب‌ناپذیر در بهره‌برداری از معادن سنگ ساختمانی بوده و افزایش میزان تراکم آن‌ها تأثیر عمده‌ای در بازدهی استخراج دارد (جیرسرائی، ۱۳۹۰).



## زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

محدوده‌ی مجموعه معدنی سنگ ساختمانی لاشر، براساس تقسیم‌بندی‌های ساختاری در پهنه ساختاری سنندج-سیرجان واقع شده است (شکل ۱- الف Falcon; Berberian 1995; 1969). فرایندهای زمین‌ساختی در این پهنه ابتدا رژیم زمین‌ساخت کششی و سپس طی یک واژگونی زمین‌ساختی در یک رژیم فشارشی حاصل همگرایی قرار گرفته است (شیخ‌الاسلامی، ۱۳۹۳). این پهنه از اواخر پالئوزوئیک پیشین به حوضه‌ای در حال فرونشست تبدیل شده و به علت نیروهای کششی مؤثر در فرونشست سنندج-سیرجان، رسوبات آواری و کربناتی نهشته شده است (آقنابتی، ۱۳۸۳). در این پهنه، پدیده‌های زمین-ساخت پی در پی و هم‌آهنگ با فازهای زمین‌ساختی شناخته شده در مقیاس جهانی در بیشترین مقدار است. به همین رو، این زون ناآرام‌ترین و پویاترین پهنه‌ی زمین-ساختی ایران است (آقنابتی، ۱۳۸۳). پهنه سنندج-سیرجان لبه‌های گسلی بسیار مشخصی با حوضه‌های مجاور دارد (درویش‌زاده، ۱۳۷۰). رخداد کوهزایی لارامید در ایران علاوه بر بستن نئوتیس سبب ایجاد گسل‌های معکوس با مؤلفه کمی امتداد لغز راست بر در پهنه سنندج-سیرجان شده است (Mohajjel et al., 2003). گسل اصفهان ادامه گسل کازرون گسلی دیرین و پی‌سنگی با روند شمالی-جنوبی پهنه سنندج-سیرجان را قطع کرده است (Safaei, 2009؛ شکل ۱- ب). در حاشیه و میانه این پهنه‌ی ساختاری چهار زون گسلی اصلی با عملکرد معکوس و مؤلفه امتداد لغز با راستای شمال‌غرب-جنوب شرق شناسایی شده است که زون‌های گسلی از سمت شمال شرق به سمت جنوب-غرب شامل زون گسلی حاشیه ارومیه-دختر، زون گسلی نجف‌آباد-کلاه قاضی، زون گسلی حاشیه کماتی زاینده-رود، زون گسلی اصلی زاگرس است و دسته گسل‌های فرعی بین ارومیه-دختر و زون گسلی نجف‌آباد-کلاه قاضی با عملکرد امتداد لغز راست بر با راستای شمال‌غربی-

اطلاعات جغرافیایی (مکانی) و مدل‌سازی را دارد که این اطلاعات به منظور واضح تر جلوه دادن رویدادها، پیش بینی نتایج بکار گرفته می‌شوند (داود آبادی فراهانی و امینی، ۱۳۹۲؛ صابری و همکاران، ۱۳۹۲). از مهم‌ترین ویژگی‌های این سیستم، قابلیت آن در پردازش حجم انبوهی از داده‌ها و جلوگیری از وقوع خطاهای انسانی در تهیه‌ی نقشه‌های مختلف از داده‌های مکانی است (Yousefei et al., 2007). Katz, Bonham Cater et al (1988)، Agterberg (1989)، Chung et al. (1992) از جمله کسانی هستند که از GIS جهت تعیین مناطق مطلوب استفاده نمودند (Bonham Cater et al., 1988; Agterberg, 1989; ) تلفیق GIS و RS (Katz, 1991; Chung et al., 1992). پتانسیل از داده‌های دورسنجی را به بهترین نحو افزایش می-دهد (خادمی و همکاران، ۱۳۹۳).

در این پژوهش پیش‌رو، محدوده مجموعه معدنی سنگ ساختمانی لاشر در ۲۰ کیلومتری جنوب اصفهان و بدلیل اهمیت قرارگیری موقعیت معدن و گسل‌های اطراف محدوده‌ی مورد مطالعه، با بررسی دورسنجی، شکستگی‌ها شناسایی شدند و سپس جهت غالب شکستگی‌ها، هیستوگرام طول شکستگی‌ها رسم شد و با شبکه‌بندی بر روی شکستگی‌ها و با روش اسکن لایه دایره‌ای تکمیل شده (Watkins et al, 2015) میزان شدت محاسبه شده و نقشه شدت شکستگی‌ها تهیه شده است. جهت تأیید بررسی‌های دورسنجی، برداشت‌های صحرایی صورت گرفته است و با توجه به گسل اصلی کلاه قاضی با امتداد ۱۳۵ درجه و عملکرد معکوس با مؤلفه امتداد لغز راست بر مدل ریدل منطقه رسم شد که شکستگی‌های اصلی همخوانی مناسبی با مدل ریدل دارند.

در این پژوهش با کار جدیدی که انجام داده است، شدت شکستگی‌های بالا را عامل مهمی برای موقعیت جبهه کارهای غیرفعال شده، دانسته است.

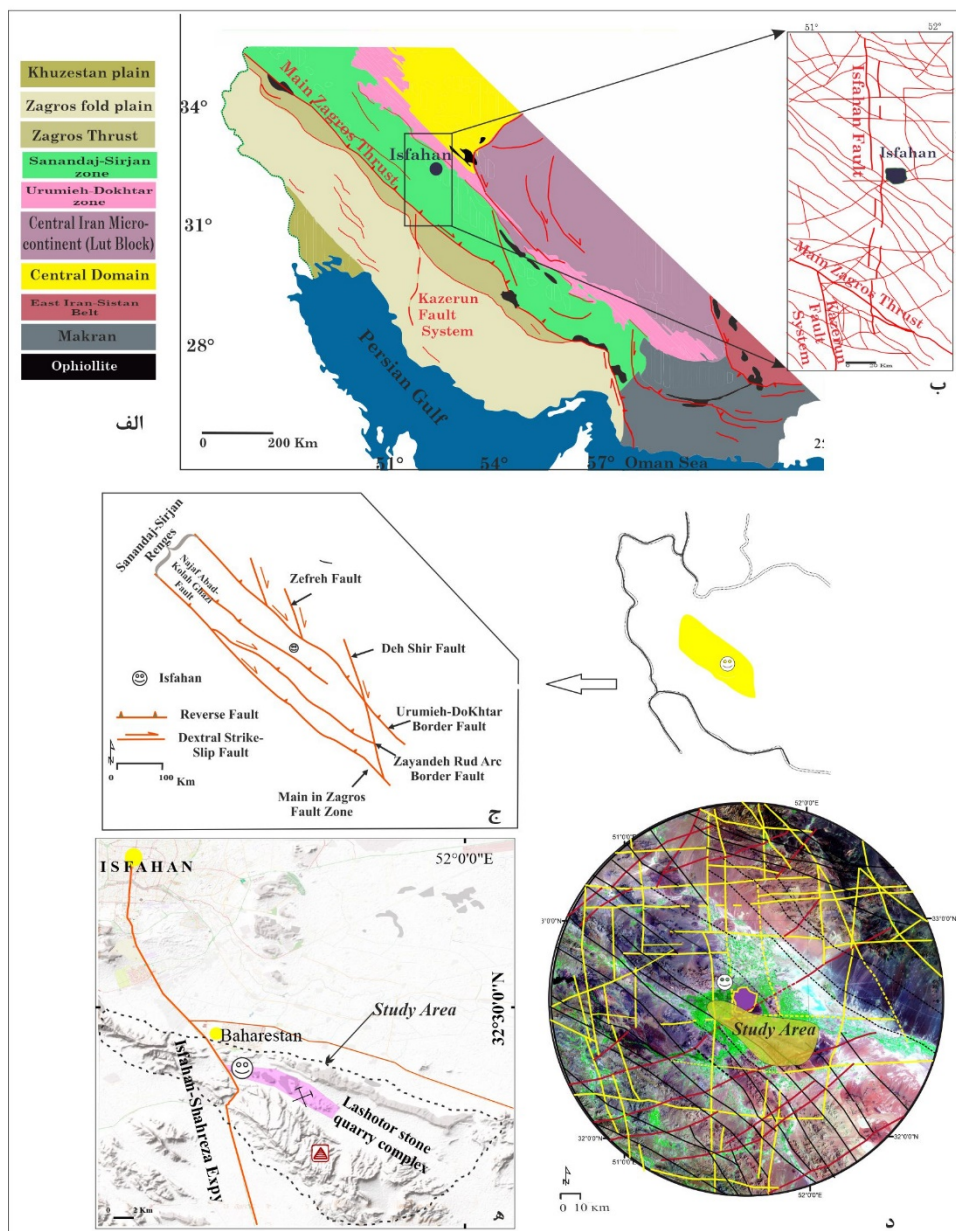


(شکل ۱-ه). براساس نقشه زمین شناسی یکصد هزار شهرضا (زاهدی، ۱۳۵۵؛ شکل ۲-الف) قدیمی ترین رسوبات مشاهده شده در منطقه شیل و ماسه سنگ متعلق به ژوراسیک پائین (گروه شمشک) است که رخنمون بسیار کمی در محدوده مورد مطالعه دارد. بارزترین توالی سنگ-شناسی در منطقه، مربوط به دوره زمانی کرتاسه است (آقانباتی، ۱۳۸۳؛ درویش زاده، ۱۳۷۰).

مجموعه‌ی معدنی سنگ آهک‌های کرتاسه بالایی (تورونین- کنیاسین) جهت مصارف ساختمانی استخراج می‌گردد (زاهدی، ۱۳۵۵). فوقانی ترین واحد کرتاسه در محدوده‌ی مورد مطالعه، آهک‌های نازک لایه با میان لایه-های مارنی بر روی شیل است (درویش زاده، ۱۳۷۰- شکل ۲-ب)

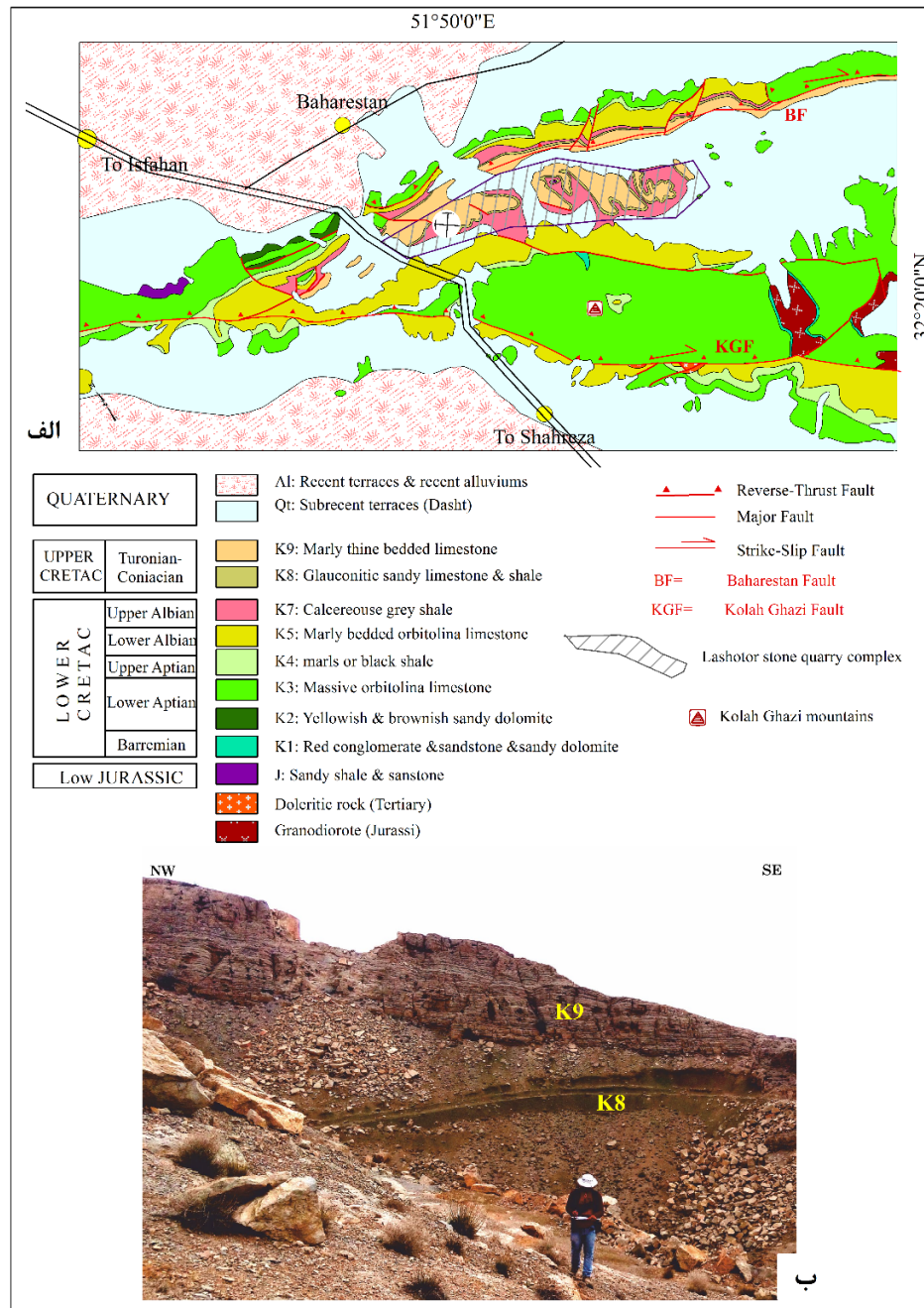
مجموعه معدنی بین دو گسل کلاه قاضی و بهارستان با عملکرد معکوس با مؤلفه‌ی امتداد لغز راست بر قرار گرفته است (شکل ۲-الف).

جنوب شرقی است (شکل ۱-ج Tillman et al., 1981). در محدوده ۱۰۰ کیلومتری شهر اصفهان، با تغییرات جزئی از گسل‌های شناسایی شده در پژوهش‌های قبلی و شناسایی تعدادی گسل جدید نیز گسل‌هایی با روند شرقی-غربی و شمالی-جنوبی دیده می‌شود (تاجمیر ریاحی، ۱۳۹۲؛ شکل ۱-د). وجود گسل‌های شمالی-جنوبی باعث بریدگی ارتفاعات بهارستان و کلاه قاضی شده است (صفایی، ۱۳۸۴). موازات گسل اصلی بهارستان، گسل شمال بهارستان است که بین این دو سری گسل اصلی، گسل‌های ثانویه‌ای با امتداد شمال شرقی- جنوب غربی با مؤلفه‌ی چپ بر وجود دارد (Nadimi and Konon, 2012). پهنه‌ی ساختاری سندج- سیرجان از نظر زمین شناسی اقتصادی و پراکندگی کانسارها به ویژه انواع مختلف سنگ‌های ساختمانی با ذخائر زیاد دارای اهمیت است (آقانباتی، ۱۳۸۳؛ قربانی، ۱۳۸۶). همه سنگ‌های پهنه سندج-سیرجان را می‌توان در سه واحد زمین ساختی- چینه‌نگاشتی پرکامبرین پسین- تریاس میانی، تریاس بالایی-کرتاسه و مجموعه ترشیری جای داد (آقانباتی، ۱۳۸۳). منطقه مورد مطالعه که در ۲۰ کیلومتری جنوب اصفهان قرار دارد



شکل ۱. الف - بخشی از نقشه‌ی ساختاری ایران (Falcon 1969; Berberian 1995) و موقعیت شهر اصفهان در پهنه‌ی سنندج- سیرجان، ب- نقشه‌ی گسل‌های اصلی محدوده مورد مطالعه، و اینکه گسل اصفهان ادامه‌ی گسل کازون است (Safaei, 2009) ج- تقسیم‌بندی حاشیه و میانه پهنه‌ی سنندج-سیرجان بر اثر گسل‌های اصلی (Tillman et al., 1981) و موقعیت منطقه مورد مطالعه، د- نقشه‌ی گسل‌های تصحیح شده از پژوهش‌های قبلی و شناسایی گسل‌های جدید به شعاع ۱۰۰ کیلومتری از شهر اصفهان (تاجمیر ریاحی، ۱۳۹۲) و موقعیت منطقه مورد مطالعه، هـ- راه‌های ارتباطی به منطقه مورد مطالعه.





شکل ۲. نقشه زمین شناسی محدوده مورد مطالعه، برگرفته از نقشه زمین شناسی شهرضا به مقیاس ۱:۱۰۰,۰۰۰ با اصلاحات (زاهدی، ۱۳۵۵) و قرارگیری موقعیت محدوده مجموعه معدنی سنگ ساختمانی لاشتر، ب- نمایی از لایه‌های آهکی نازک- لایه با میان لایه‌های مارنی به سن تورنین بر روی شیل‌های سنومانین (موقعیت عکس 32°26'17" 51°49'37")



## روش کار

۱- محل تقاطع قطر هر شبکه، مرکز دایره‌ای به

شعاع  $a/2$ ،

۲- بدست آوردن مقدار  $n$  (تعداد تقاطع شکستگی با

محیط هر دایره)،

۳- محاسبه شدت شکستگی (رابطه ۱) ( $r$  شعاع

$I$  - شدت شکستگی)

$$I = n / 4r$$

(رابطه ۱)

با استفاده از روش وزن‌دهی فاصله معکوس (IDW)

برای درون‌یابی بدلیل دقت بالا (Aronoff, 1989)، نقشه شدت شکستگی‌ها تهیه شود.

سپس جهت تأیید بررسی‌های دورسنجی، برداشت‌های

صحرائی صورت گرفت و امتداد غالب از شکستگی‌ها

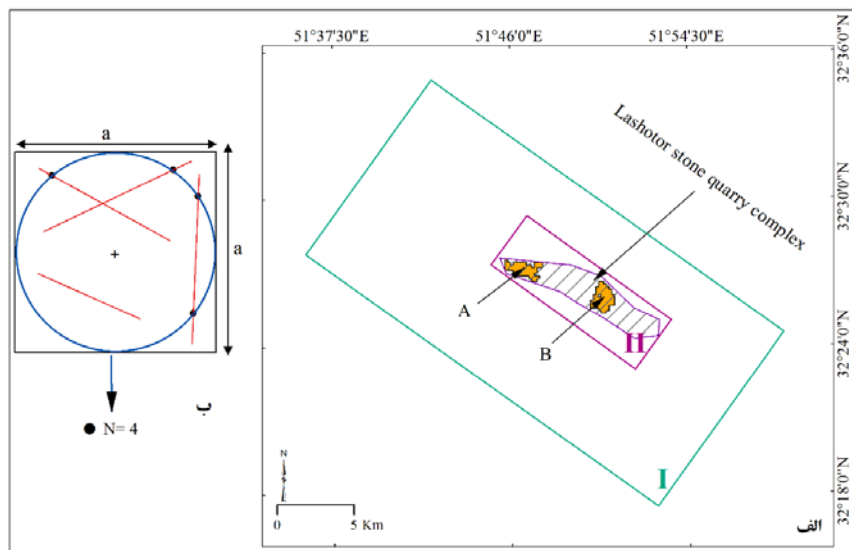
تعیین شد. مدل ریدل براساس امتداد گسل کلاه قاضی با

مؤلفه امتداد لغز رسم شد.

با هدف ارزیابی عملکرد موقعیت جبهه کارها، در نقشه

شدت شکستگی‌ها پیاده شده است.

با توجه به موقعیت مجموعه معدنی سنگ ساختمانی لاشتر و اهمیت بررسی شکستگی‌ها، ابتدا به پردازش تصاویر ماهواره‌ای Bing maps اخذ شده از نرم‌افزار SAS Planet و داده ETM<sup>+</sup> از ماهواره Landsat 7 جهت شناسایی شکستگی‌ها در دو محدوده مطالعاتی I و II پرداخته شده است (شکل ۳- الف) سپس جهت غالب شکستگی‌ها، هیستوگرام طول شکستگی‌ها رسم شده است. در محیط نرم‌افزار Arc GIS با شبکه‌بندی مناسب با توجه به وسعت منطقه بر روی شکستگی‌های شناسایی شده رسم شده است (Davy et al., 1990; Zhang and Sanderson, 1998; Volland and Kruhl, 2004; Seung-Ik et al., 2010). بدین منظور شدت شکستگی‌ها به روش جامع اسکن لاین دایره‌ای تکمیل شده (Watkins et al, 2015) بدست آمده است. برای محاسبه پارامتر شدت، از روش اسکن لاین دایره‌ای تکمیل شده (Watkins et al, 2015) استفاده شده است. بدین منظور لازم است برای هر شبکه ایجاد شده  $a \times a$  (شکل ۳- ب):



شکل ۳: الف- موقعیت محدوده مجموعه معدنی سنگ ساختمانی لاشتر در بررسی‌های دورسنجی و برداشت صحرائی، ب- نحوه محاسبه شدت شکستگی‌ها در هر شبکه براساس روش اسکن لاین دایره‌ای تکمیل شده (Watkins et al, 2015).

## بررسی شکستگی‌ها

## طول شکستگی‌ها

### الف- بررسی‌های دورسنجی

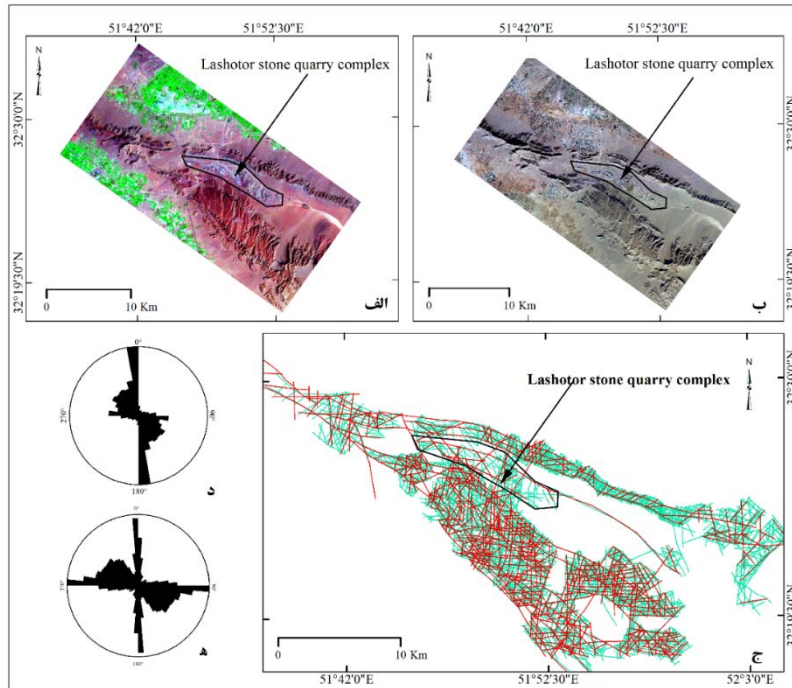
#### شناسایی شکستگی‌ها و مؤثرترین امتداد

در مطالعات دورسنجی شکستگی‌ها در دو مقیاس متفاوت مورد بررسی قرار گرفتند بدین منظور ابتدا در محدوده مطالعاتی I با تهیه تصاویر ماهواره‌ای Bing maps از نرم‌افزار (Zoom= 17) SAS Planet و داده ETM+ از ماهواره Landsat 7 و ورود هر دو داده به محیط نرم‌افزار ER mapper 7.0 شکستگی‌ها شناسایی و استخراج شدند (شکل ۴ الف، ب) و سپس برای بررسی شکستگی‌ها در مجموعه معدنی سنگ ساختمانی لاشر محدود مطالعه‌ی II با بالاترین بزرگنمایی (۲۰) از تصاویر ماهواره‌ای Bing maps

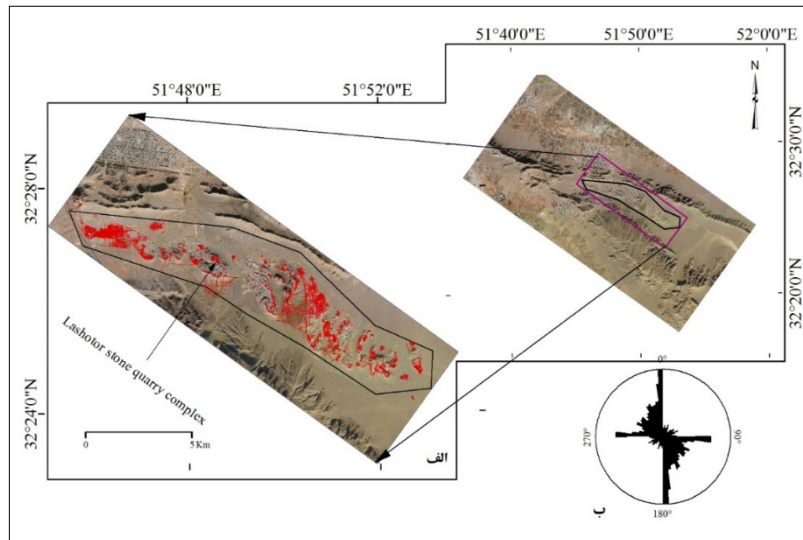
از نرم‌افزار SAS Planet خروجی گرفته و به محیط نرم‌افزار ER mapper 7.0 وارد شد (شکل ۵).

نمودار گل‌سرخ‌ی از امتداد شکستگی‌ها با وزن دهی به طول آنها ترسیم گردید (Ekneligoda & Henkel, 2006). براین اساس مؤثرترین راستا در نمودار گل‌سرخ‌ی برای محدوده مطالعاتی I برای تمامی شکستگی‌ها راستای شمالی- جنوبی (شکل ۴-د) و برای شکستگی‌هایی با طول بیشتر از ۲ کیلومتر راستای شرقی- غربی و شمالی- جنوبی است (شکل ۴-ه). مؤثرترین امتدادهای نمودار گل‌سرخ‌ی به صورت مجزا برای محدوده مجموعه معدنی سنگ ساختمانی لاشر (محدوده مطالعاتی II) شمالی- جنوبی، شرقی- غربی و بازه وسیعی از راستای شمال-غربی- جنوب-شرقی را نشان داده است (شکل ۵-ب).

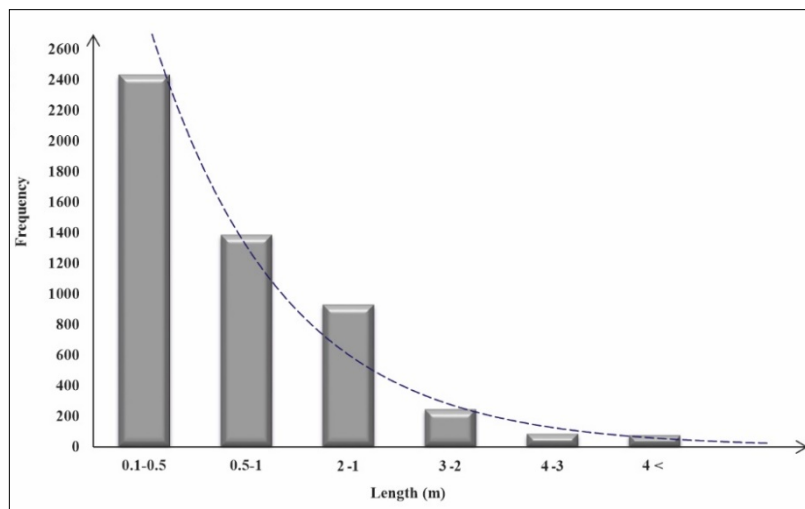
طول شکستگی‌ها یکی از ویژگی‌های مهمی برای تحلیل شکستگی‌ها است (Ekneligoda and Henkel, 2006) یکی از پارامترهای مهمی که می‌توان در مطالعات دورسنجی به بررسی آن پرداخت طول شکستگی‌ها است. با بررسی‌های دورسنجی و شناسایی شکستگی‌ها از محدوده-ی مورد مطالعه، هیستوگرام طول شکستگی تهیه شده است (شکل ۶). شکستگی‌ها براساس طول‌شان به شش دسته تقسیم شده است. هیستوگرام فراوانی طول شکستگی‌ها، الگوی نمایی منفی بهترین خط انطباق را با داده‌ها نشان می‌دهد و معادله مربوط به این خط با همبستگی ۹۳/۷٪ را در شکل ۶ نشان داده شده است، این معادله نشان می‌دهد که با افزایش طول شکستگی‌ها از تعداد شکستگی‌ها به طور لگاریتمی کاسته می‌شود که این توزیع نماینگر بلوغ ساختاری و حد نهایی توسعه شکستگی‌های ساختاری در یک ناحیه است. (Xypolias and Koukourilas, 2004)



شکل ۴: الف- داده ETM+ از ماهواره Landsat 7 با ترکیب رنگی RGB=741 در محدوده مطالعاتی I و قرارگیری محدوده‌ی معدنی سنگ ساختمانی لاشتر ب- تصاویر ماهواره‌ای Bing maps در محدوده مطالعاتی I و قرارگیری محدوده‌ی معدنی سنگ ساختمانی لاشتر ج- شکستگی‌های استخراج شده در محدوده مطالعاتی I و قرارگیری محدوده‌ی معدنی سنگ ساختمانی لاشتر د- ۱: دیاگرام گل سرخی برای تمام شکستگی‌ها که مؤثرترین راستا شمالی- جنوبی می‌باشد، ۵: دیاگرام گل سرخی برای شکستگی‌هایی با طول بیشتر از ۲ کیلومتر که مؤثرترین راستاها شمالی- جنوبی و شرقی- غربی می‌باشد.



شکل ۵: الف- تصاویر ماهواره‌ای Bing maps از نرم‌افزار SAS Planet (Zoom=20) در محدوده مطالعاتی II و قرارگیری محدوده‌ی معدنی سنگ ساختمانی لاشتر و قرارگیری محدوده‌ی مجموعه معدنی سنگ ساختمانی لاشتر و شکستگی‌های شناسایی شده ب- نمودار گل سرخی از شکستگی‌های شناسایی شده در محدوده مطالعاتی II با امتدادهای شمالی- جنوبی، شرقی- غربی و بازه وسیعی شمال غربی- جنوب شرقی.



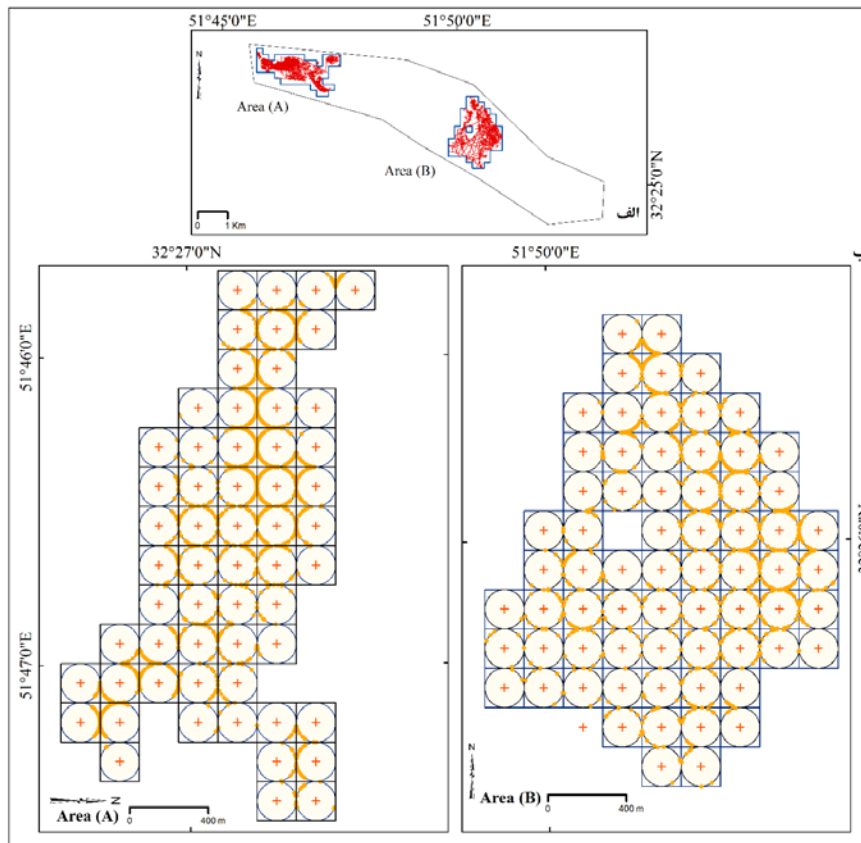
شکل ۶: هیستوگرام توزیع طول شکستگی‌های شناسایی شده با مطالعات دورسنجی برای محدوده‌ی مورد مطالعه

#### محاسبه شدت شکستگی‌ها

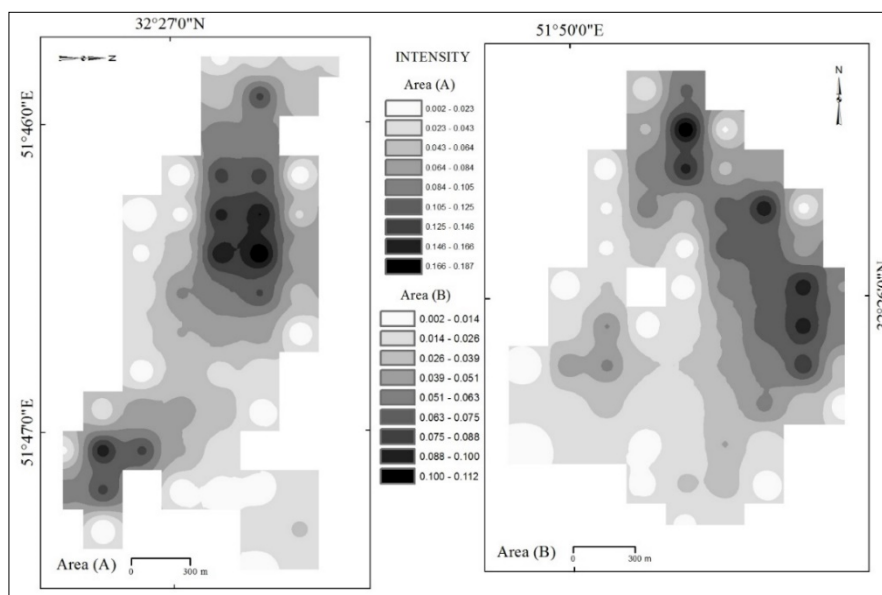
از پارامترهای کاربردی در محاسبات آماری شکستگی‌ها، شدت است. فاکتور در واحد سطح تعریف می‌شوند (Xypolias and Koukouvelas, 2004). شدت بیانگر مجموع طول شکستگی‌ها در واحد سطح می‌باشد که برای انجام این‌گونه محاسبات ابتدا باید واحد سطح تعریف کرد (حاجی و رحیمی، ۱۳۸۹). در محیط

نرم‌افزار Arc GIS با شبکه‌بندی ۲۰۰ متری در دو منطقه A و B به علت بهره‌برداری کم‌تر سنگ، کم بودن باطله‌ها و موقعیت مناسب‌تر برای محاسبه شدت شکستگی‌های شناسایی شده در بررسی‌های دورسنجی، براساس روش جامع اسکن لاین دایره‌ای تکمیل شده (Watkins et al, 2015)، شدت شکستگی‌ها برای هر شبکه بدست آمده (شکل ۷) با روش درون‌یابی (IDW) نقشه شدت شکستگی‌ها تهیه شده است (شکل ۸).





شکل ۷: الف- نقشه‌ی دو محدوده‌ی مجموعه معدنی سنگ ساختمانی لاشتر و شکستگی‌های شناسایی شده در مناطق A و B برای محاسبه شدت شکستگی‌ها. ب- شبکه‌بندی دایره‌ای تکمیل شده به شعاع ۱۰۰ متر در مناطق A و B و نمایش پارامتر (n) در هر دایره برای محاسبه شدت شکستگی‌ها.



شکل ۸: نقشه‌ی هم شدت شکستگی‌ها در مناطق A و B در محدوده مجموعه معدنی سنگ ساختمانی لاشتر

## ب- بررسی های صحرایی

آنچه که متأسفانه در مشاهدات صحرایی این مجموعه معدنی سنگ ساختمانی دیده می‌شد باطله‌های فراوان و جبهه کارهای غیر فعال است.

### گسل‌ها

براساس مشاهدات صحرایی در ایستگاه‌های ۱ و ۳ (شکل ۹) ساختار گسل مشاهده شد (شکل ۱۲). وضعیت گسل‌ها در دو ایستگاه ۱ و ۳:

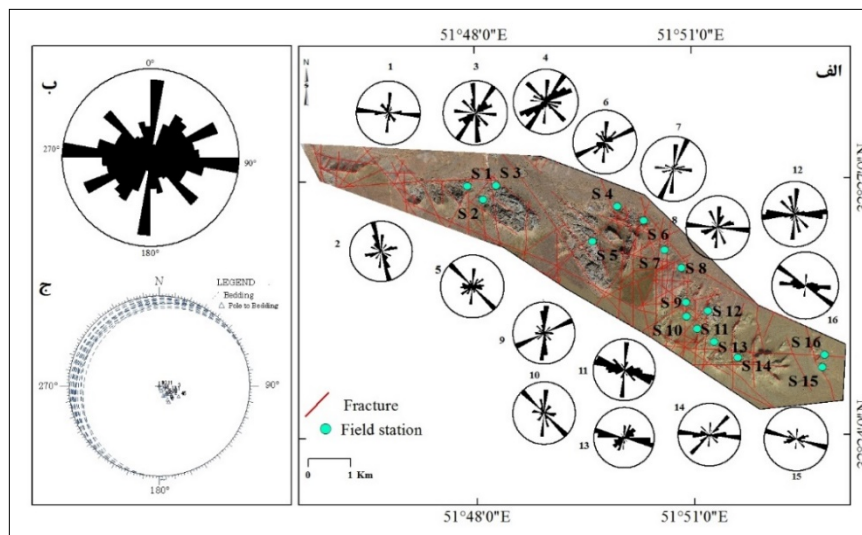
ایستگاه ۱- گسل با مشخصات 040,85SE با ریک خش‌لغز 40°NE، ساز و کار گسل امتدادلغز چپ بر با مؤلفه‌ی نرمال و 350/31 $\sigma_1$ ، 214/50 $\sigma_2$ ، 94/23 $\sigma_3$  می‌باشد (شکل ۱۲-الف).

ایستگاه ۳- گسل با مشخصات 070,80SE با ریک خش‌لغز 16°NE، ساز و کار گسل امتدادلغز چپ بر با مؤلفه معکوس و 31/18 $\sigma_1$ ، 224/71 $\sigma_2$ ، 122/4 $\sigma_3$  می‌باشد (شکل ۱۲-ب).

به منظور تأیید داده‌ها و برداشت های شکستگی‌ها بر اساس روش دورسنجی، در محدوده‌ی مجموعه معدنی سنگ ساختمانی لاشر در ۱۶ ایستگاه به بررسی ساختارهای درزه، گسل و لایه‌بندی پرداخته شده است و نمودار گل- سرخی شکستگی‌ها و استریوگرام گسل‌ها رسم گردید (شکل ۹-الف). در بررسی‌های صحرایی در تعدادی از ایستگاه‌ها ساختاری استیلولیت مشهود است.

## درزه‌ها و لایه‌بندی

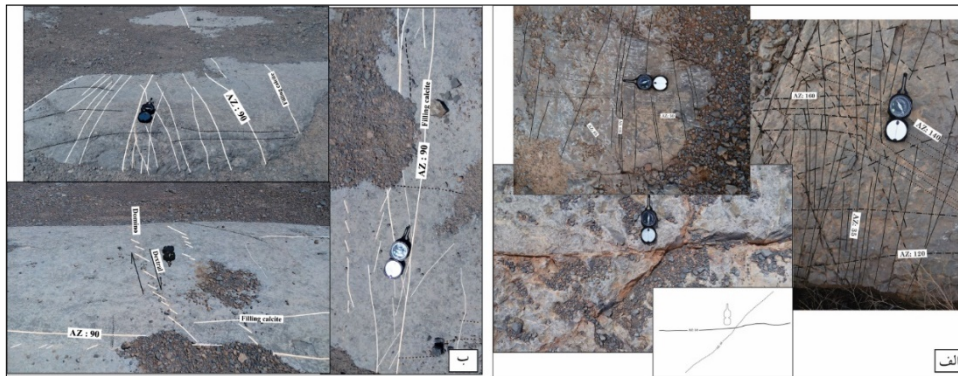
جهت‌گیری کلی شکستگی‌ها در منطقه مورد مطالعه طبق نمودار گل-سرخ‌ی دارای امتدادهای شرقی- غربی، شمالی- جنوبی، ۱۳۰ تا ۱۴۰ درجه و ۵۰ تا ۶۰ می‌باشد (شکل ۹-ب) و شیب لایه‌بندی ۱۵-۲۵ درجه به سمت شمال تا شمال غربی است (شکل ۹-ج). در شکل ۱۰ و ۱۱ نمایی از تعدادی از ایستگاه‌های برداشت راستاهای شکستگی‌های در برداشت‌های صحرایی را نشان می‌دهد.



شکل ۹: الف- موقعیت ایستگاه‌ها در برداشت‌های صحرایی، نمودار گل-سرخ‌ی شکستگی‌ها، شکستگی‌های مشخص شده بر اساس بررسی دورسنجی در محدوده مطالعاتی I بر روی تصاویر ماهواره‌ای SAS Planet ب- استریوگرام لایه‌بندی در برداشت‌های صحرایی ج- نمودار گل-سرخ‌ی از مجموع شکستگی‌های برداشت شده در عملیات صحرایی.

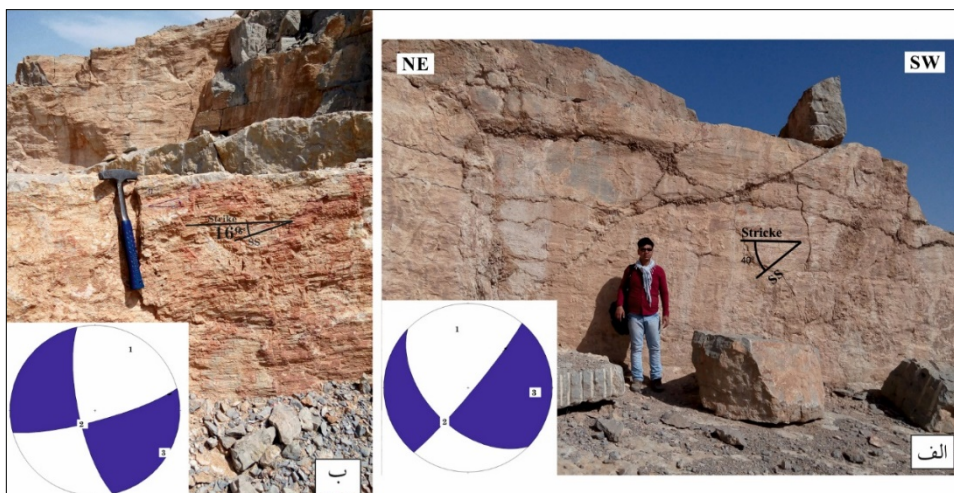


شکل ۱۰: نمایی از ایستگاه‌ها در برداشت شکستگی‌ها با راستای غالب در بررسی صحرایی در مجموعه معدنی سنگ ساختمانی لاشتر الف- ایستگاه ۱ شکستگی‌های با امتداد ۹۰ درجه ب- ایستگاه ۴ شکستگی‌های با امتدادهای شمال شرقی- جنوب غربی، شمال غربی- جنوب شرقی ج- ایستگاه ۹ شکستگی‌هایی با امتداد شمالی- جنوبی و شرقی- غربی د- ایستگاه ۱۶ شکستگی‌ها با امتداد شرقی- غربی و ۱۳۰ درجه.



شکل ۱۱: نمایی نزدیک از شکستگی‌های برداشت شده در بررسی‌های صحرایی الف- ایستگاه ۴ ب- ایستگاه ۱۲





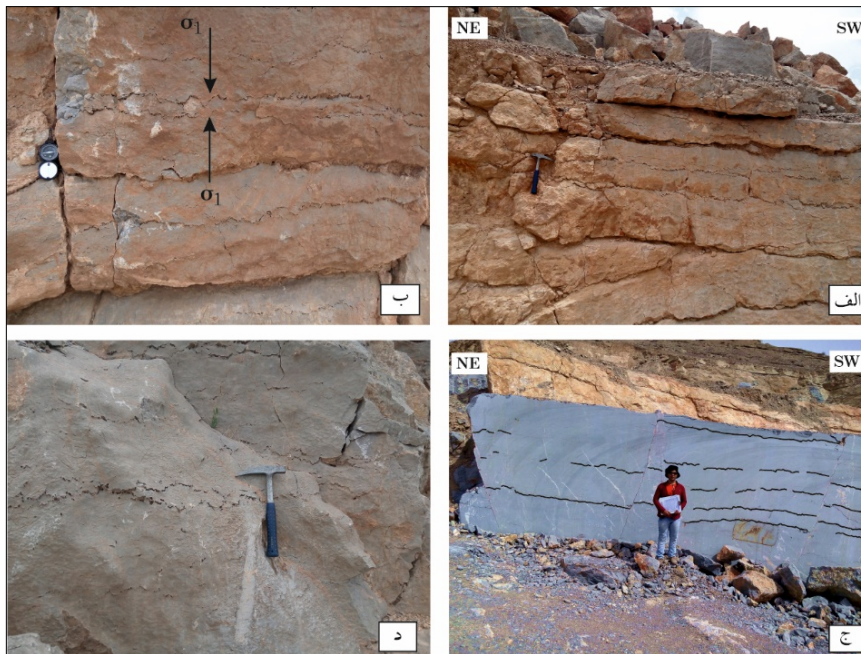
شکل ۱۲: نمایی از گسل‌های برداشت شده در مجموعه معدنی سنگ ساختمانی لاشتر الف- ایستگاه ۱- گسل با مشخصات 040,85SE با ریک خش لغز  $40^{\circ}NE$ ، ساز و کار گسل امتدادلغز چپ بر با مؤلفه‌ی نرمال ب- ایستگاه ۳- گسل با مشخصات 070,80SE با ریک خش لغز  $16^{\circ}NE$ ، ساز و کار گسل امتدادلغز چپ بر با مؤلفه

زیگزاگ، دو قطعه سنگ در هم فرو رفته و یا در هم قفل شده‌اند ( Bathurst, 1991; Buxton and sibly, 1981; )  
(Larbi, 2003; Railsback, 1998). فرآیند استیلولیتی شدن در ویژگی‌های مکانیکی و مقاومتی سنگ بسیار مؤثر است (ارزانی، ۱۳۸۰؛ Larbi, 2003).

یکی از ساختارهایی که در سنگ‌های مجموعه‌ی معدنی سنگ ساختمانی لاشتر وجود دارد، ساختار استیلولیت است. که استیلولیت‌های موجود موازی با لایه بندی هستند. وجود ساختار استیلولیت در ایستگاه‌های ۶، ۱۰ و ۱۵ بسیار مشهود است (شکل ۱۳).

## استیلولیت‌ها

استیلولیت‌ها سطوح انحلالی مرتبط با تنش انقباضی یا برشی و نشان‌دهنده‌ی کاهش حجم هستند و به صورت موازی یا تقریباً موازی با سطح لایه‌بندی با دهن (تنش فشاری) رسوبات شکل می‌گیرند (McClay, 2013). استیلولیت‌های تکتونیک با زاویه زیاد نسبت به لایه‌بندی و با چین خوردگی شکل می‌گیرند (Ameen et al, 2010; McClay, 2013). استیلولیت‌ها معمولاً در سنگ‌های آهکی، دولومیتی و ماسه‌سنگ‌ها بوجود می‌آید. این الگو سطحی نامنظم و معمولاً منقطع دارد که سنگ را بریده و سطح شکل مضرسی و زیگزاگی است و امتداد این سطوح



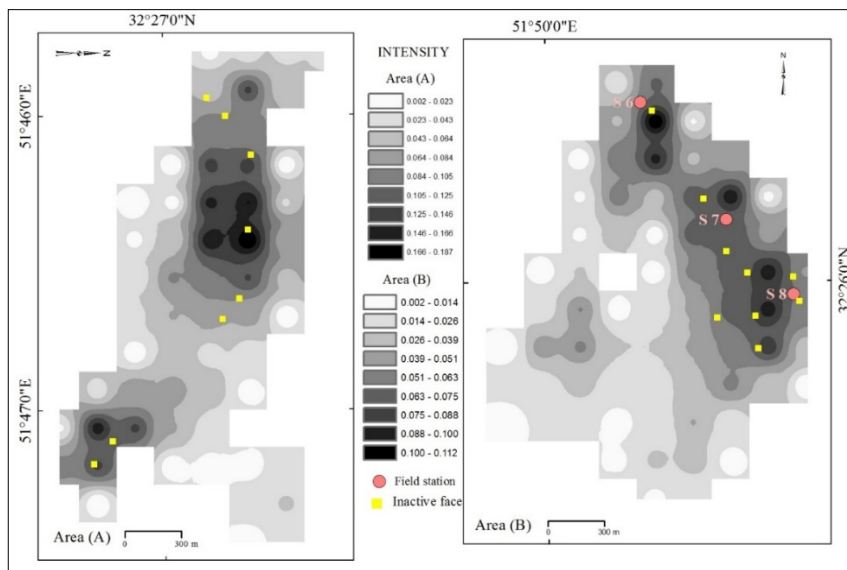
شکل ۱۳. نمایی از استیلولیت‌های موازی با لایه‌بندی در مجموعه معدنی سنگ ساختمانی لاشتر الف، ب- ایستگاه ۶ و اعمال تنش  $\sigma_1$  عمود بر سطح استیلولیت ج- ایستگاه ۱۰ د- ایستگاه ۱۵

بررسی پارامترهای مختلف سنگ، نقشه شدت شکستگی‌ها جهت مکان‌یابی بهتر جبهه کار نیز تهیه شود تا در معادن سنگ ساختمانی، یازدهی اقتصادی صورت بگیرد. شکل ۱۵ نمایی از ایستگاه‌های S6، S7، S8 در بررسی‌های صحرایی بصورت جبهه کارهای غیرفعال و متروکه هستند.

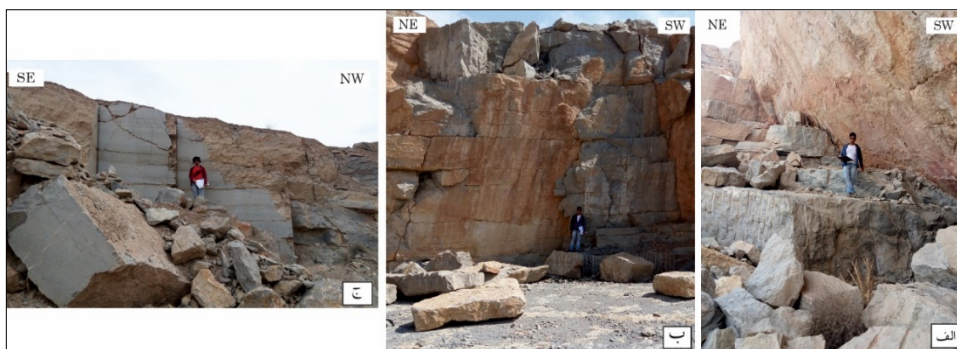
### بحث

با پیاده کردن موقعیت جبهه کارها بر نقشه شدت شکستگی‌های تهیه شده، جبهه کارهای غیرفعال و متروکه مجموعه معدنی لاشتر در محدوده‌هایی با شدت شکستگی بالا قرار گرفته‌اند (شکل ۱۴) لذا می‌بایست در اکتشاف علاوه بر نوع لیتولوژی و قبل از استخراج سنگ ساختمانی و





شکل ۱۴: نقشه‌ی هم شدت شکستگی‌ها در مناطق A و B در محدوده مجموعه معدنی سنگ ساختمانی لاشر و موقعیت سه ایستگاه (S6, S7, S8) در برداشت‌های صحرایی و موقعیت جبهه کارهای غیر فعال براساس بررسی‌های دورسنجی و گزارش معدنی



شکل ۱۵: جبهه کارهای غیر فعال در بررسی‌های صحرایی و برداشت شکستگی‌ها و وجود باطله‌های فراوان  
الف- ایستگاه ۶ ب- ایستگاه ۷ ج- ایستگاه ۸

- ۶- دسته از گسل‌ها در شعاع ۱۰۰ کیلومتری از شهر اصفهان به صورت زیر است (صفایی، ۱۳۸۴):
- ۳- گسل‌هایی با راستای شرقی-غربی: با عملکرد فشارشی و چپ بر.
- ۱- گسل‌هایی با راستای ۱۳۰-۱۴۰ درجه: عملکرد به صورت فشارشی و راست بر.
- ۲- گسل‌هایی با راستای شمالی-جنوبی: با عملکرد راست بر و کششی یا راست بر و فشارشی.
- ۴- گسل‌هایی با راستای ۶۰-۷۰ درجه: عملکرد به دو صورت چپ بر و فشارشی یا چپ بر و کششی.
- ۵- گسل‌هایی با راستای ۲۵ الی ۴۵ درجه: عملکرد گسل‌ها بصورت چپ بر و کششی.

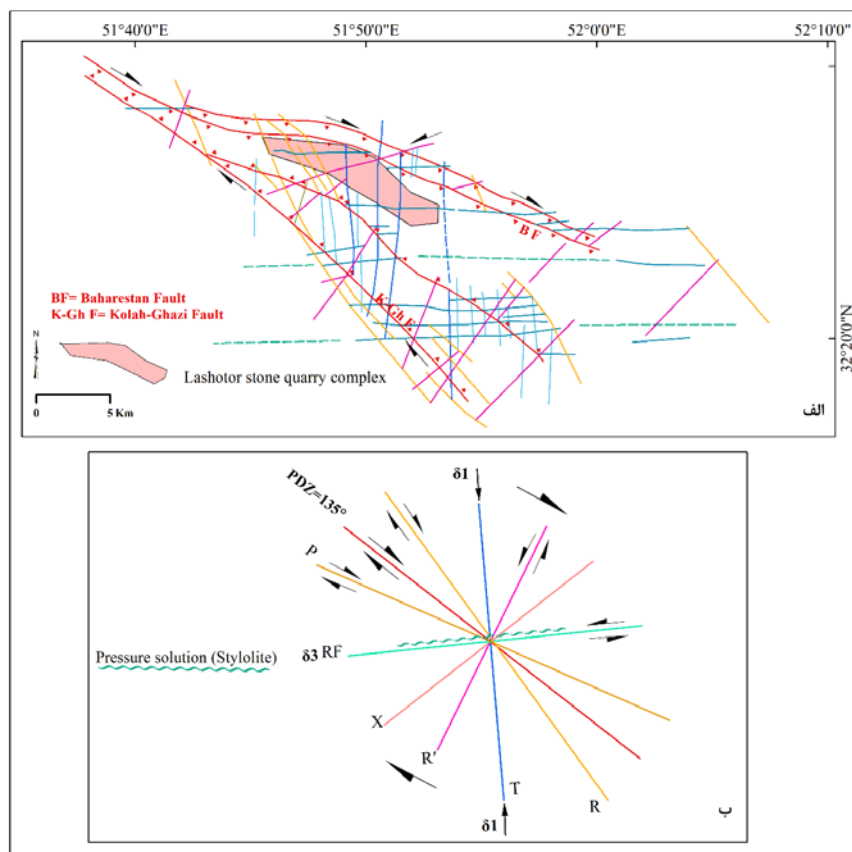


بر با مؤلفه‌ی نرمال (شکل ۱۲-الف) و گسل با مشخصات 070,80SE با عملکرد لغز چپ بر با مؤلفه معکوس (شکل ۱۲-ب) به ترتیب با مؤلفه‌های  $R'$  و  $X$  تقریباً همخوانی دارد. براساس نتایج حاصل از نمودار گل سرخی شکستگی‌ها (شکل ۴-د، شکل ۴-ه، ۵-ب، ۹-ب) از منطقه مورد مطالعه مؤثرترین امتدادها شمالی-جنوبی، شرقی-غربی و امتدادهایی با بازه وسیع ولی با اهمیت پائین تر از امتداد شمال-غربی - جنوب شرقی در مدل ریدل از لحاظ امتدادی به ترتیب با مؤلفه‌های  $T$  (موازی با  $1\sigma$ )، موازی با  $3\sigma$  و PDZ همخوان هستند.

۶- گسل‌هایی با راستای  $150^\circ$  درجه: با عملکرد فشارشی و راست بر یا کششی و راست بر.

در محدوده‌ی مورد مطالعه، گسل‌های با امتداد شمال-غربی-جنوب شرقی با مؤلفه چپ بر هستند (Nadimi and Konon, 2012).

گسل کلاه قاضی (شکل ۱۶-الف) با امتداد  $135^\circ$  درجه و عملکرد معکوس با مؤلفه امتداد لغز راست بر، بر اساس مدل ریدل برای منطقه مورد مطالعه (شکل ۱۶-ب)، گسل با مشخصات 040.85SE با عملکرد لغز چپ



شکل ۱۶. الف- نقشه‌ی ساده شده از گسل‌های شناسایی شده از منطقه مورد مطالعه و گسل بهارستان و کلاه قاضی با امتداد شمال غربی- جنوب شرقی و عملکرد معکوس با مؤلفه‌ی امتداد لغز راست بر، ب- مدل ریدل از منطقه مورد مطالعه



## نتیجه گیری

شناسایی شده در بررسی‌های صحرایی و امتداد غالب شکستگی‌ها با مدل ریدل رسم شده همخوانی دارد.

۴- موقعیت تمامی جبهه کارها براساس بررسی‌های صحرایی و دور سنجی در دو منطقه A و B نقشه شدت شکستگی‌های بدست آمده، پیاده شده است که تمامی جبهه کارهای موجود غیرفعال و متروکه هستند و با توجه به نقشه شدت شکستگی‌ها، این جبهه کارها دقیقاً در محدوده-هایی با شدت شکستگی بالا قرار گرفتند لذا می‌بایست در اکتشاف و تعیین موقعیت جبهه کارها علاوه بر نوع لیتولوژی و مشخصات مختلف بلوک‌های سنگی قبل از استخراج به بررسی شدت شکستگی‌ها نیز پرداخته شود و می‌بایست موقعیت مناسب جبهه کارها در جایی که شدت شکستگی کمتر است، انتخاب شود.

## سپاس‌گزاری

از تمامی افرادی که برای به ثمر رسیدن این پژوهش کمک ارزنده داشته‌اند، کمال تشکر و قدردانی می‌شود و همچنین نویسندگان مقاله لازم می‌دانند از سردبیر، داوران محترم و هیات تحریریه فصلنامه زمین ساخت که با ارائه راهنمایی‌های علمی ارزنده‌شان منجر به غنای بیشتر مقاله حاضر شده‌اند، نیز سپاس‌گزاری می‌شود.

۱- طبق نمودار گل سرخی شکستگی‌های حاصل از مطالعات دورسنجی از محدوده‌ی مورد مطالعه A، امتداد اصلی شکستگی‌ها شمالی-جنوبی و برای شکستگی‌های با طول بیشتر از ۲ کیلومتر امتداد اصلی شکستگی‌ها شمالی-جنوبی و شرقی-غربی است و نمودار گل سرخی شکستگی‌ها در محدوده مطالعاتی II (مجموعه معدنی سنگ ساختمانی لاشر) امتدادهای شمالی-جنوبی، شرقی-غربی و بازه وسیعی از امتدادهای شمال غربی - جنوب شرقی است. که براساس پژوهش‌های پیشین، وجود گسل-های با روند شمالی-جنوبی و شرقی-غربی در خارج از محدوده مطالعاتی باعث شکستگی‌هایی با روندهای شمالی-جنوبی و شرقی-غربی در محدوده مطالعاتی شده است و بازه وسیع از شکستگی‌ها که امتداد با اولویت کم‌تر حاصل از روند گسل کلاه قاضی و بهارستان در محدوده مطالعاتی است.

۲- طبق هیستوگرام فراوانی طول شکستگی‌های حاصل از بررسی‌های دورسنجی، الگوی نمایی منفی بهترین خط انطباق با داده‌ها است، بطوری که مقدار مربوط به این خط با همبستگی ۹۳/۷٪ است، این مقدار بیانگر این است که با افزایش طول شکستگی‌ها بطور لگاریتمی کاسته می‌شود که این توزیع نماینگر بلوغ ساختاری و حد نهایی توسعه شکستگی‌های ساختاری را در محدوده‌ی مورد مطالعه است.

۳- براساس نمودار گل سرخی حاصل از برداشت‌های صحرایی با امتدادهای اصلی شمالی-جنوبی و شرقی-غربی نمودار گل سرخی مطالعات دورسنجی را تأیید می‌کند.

۵- براساس گسل کلاه قاضی با روند ۱۳۵ درجه و عملکرد معکوس با مؤلفه‌ی امتداد لغز راست بر، دو گسل



## منابع

- امینی، الف.، خوشرو، ح.، ۱۳۹۶. تحمین حجم بلوک‌های برجای سنگ با استفاده از فاصله‌داری درزه‌ها در معدن تراورتن آذرشهر، نشریه علمی- پژوهشی مهندسی معدن، دوره ۱۲، صفحه ۱۳-۲۴.
- اورعی، ک.، سیدی، م.، حقیقت، ل.، ۱۳۸۳، کنفرانس مهندسی معدن ایران، دانشگاه تربیت مدرس.
- آقاناتی، س.ع.، ۱۳۸۳. زمین شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ۵۸۶ صفحه.
- تاجمیری‌راحی، ز.، ۱۳۹۲، بررسی سائزموکتونیک و پهنه‌بندی لرزه‌ای شهر اصفهان، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه- اصفهان، دانشکده علوم، گروه زمین‌شناسی، ۲۵۸ صفحه.
- جیرسرائی، م.، ۱۳۹۰. بررسی تأثیر پارامترهای هندسی شکستگی‌ها در مرحله اکتشاف ذخایر سنگ‌های ساختمانی و نما، جهت کاهش ضایعات و بهینه نمودن بلوک‌های استخراج شده پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی معدن، ۷۵ صفحه.
- حاجی، ع.، رحیمی، ع.، ۱۳۸۹. مطالعه الگوهای آماری فرکتالی سیستم‌های شکستگی منطقه تکنار، ایران مرکزی بر روی نقشه رسم شده از روش‌های دورسنجی، مجله علوم دانشگاه اصفهان، شماره ۱، صفحات ۱۲۶-۱۲۹.
- خادمی، ف.، پیرخراطی، ح.، شاه کرمی، س.، ۱۳۹۳، مطالعه روند افزایش خاک‌های شور اطراف دریاچه ارومیه با استفاده از GIS و RS، مجله علوم زمین، شماره ۹۴، صفحه ۹۳-۹۸.
- دارستانی، ر.، کوهی اصفهانی، و.، ۱۳۹۰. مطالعات درزه‌نگاری و بررسی ژئومکانیکی در طراحی و استخراج معادن سنگ ساختمانی، مطالعه موردی: معدن مرمریت برد شیراز، فصلنامه علمی پژوهشی زمین و منابع واحد لاهیجان، شماره ۱.
- داودی آبادی فراهانی، م.، امینی، ه.، ۱۳۹۲، استفاده از تکنیک- های دورسنجی در استخراج شکستگی‌ها در مقیاس‌های منطقه‌ای و ناحیه‌ای به منظور پهنه‌بندی مناطق مستعد لرزه‌خیزی در مطالعات اولیه ژئوتکنیکی، اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران، ۶ صفحه.
- درویش‌زاده، ع.، ۱۳۷۰. زمین‌شناسی ایران، انتشارات امیرکبیر، تهران.
- زاهدی، م.، ۱۳۵۵. نقشه زمین‌شناسی شهرضا مقیاس ۱/۱۰۰،۰۰۰، شماره ۶۳۵۴، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.
- شفیعی، ش.، عبادی، م.، ترکاشوند، م.، ۱۳۹۱. تحلیل ناپوستگی‌ها در معادن سنگ ساختمانی و اهمیت آن در بهینه- سازی استخراج (مطالعه موردی سنگ ساختمانی سعیدی، کرمان)، مجله علمی علوم زمین، شماره ۸۴، صفحات ۹۸-۸۹.
- شیخ الاسلامی، م.ر.، ۱۳۹۳، واحدهای زمین‌ساخت- چینه‌نگاری بخش جنوب خاوری پهنه خاوری سسندج- سیرجان، مجله علوم زمین، شماره ۹۵، صفحه ۲۴۳-۲۵۲.
- صابری، ع.، رنگرن، ک.، مهجوری، ر.، کشاورزی، م.ر.، ۱۳۹۲، پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی با تلفیق سنجش از دور و GIS به روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) تاقدیس کمستان استان خوزستان، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۶، ۱۰ صفحه.
- صفایی، ه.، ۱۳۸۴. گزارش نهایی طرح تحقیقاتی شناسایی و بررسی توان لرزه‌ای گسل‌های اطراف اصفهان، دانشگاه اصفهان، ۱۱۶ صفحه.
- نوروزی، الف.، امیری، ع.ر.، ۱۳۹۰، بهینه‌سازی استراتژی استخراج معدن سنگ‌تزیینی بر مبنای پارامترهای زمین‌شناسی، همایش علوم زمین، ۱۲ صفحه.



- Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 54, pp. 1585–1592.
- Buxton, T.M. & Sibley, D.F., 1981. Pressure solution features in a shallow Burled limestone, journal of sedimentary research 51.
- Chung, C.F., Jeerson, C.W. and Singer, D.A., 1992. A quantitative link among mineral deposit modeling, geoscience mapping, and exploration-resource assessment, *Economic Geology* 87, 194–197.
- Davy, PH., Sornette, A. and Sornette, D., 1990. Some consequences of a proposed fractal nature of continental faulting: *Nature* 348: 56–58.
- Falcon, N. 1969. Problems of the relationship between surface structure and deep displacements illustrated by the Zagros range. In: Kent, P.E., Satterthwaite,
- E. & Spencer, A.M. (eds) *Time and Place in Orogeny*. Geological Society, London, Special Publications, 3, 9–21.
- Ekneligoda, T.C., Henkel, H., 2006. The spacing calculator software A visual basic program to calculate spatial properties of lineaments, *Computers & geosciences* 32, 542-553.
- Hashim, M., Ahmad, S., Md Johari, M. A. and Beiravand Pour, A., 2013. Automatic lineament extraction in a heavily vegetated region using Landsat Enhanced Thematic Mapper (ETM+) imagery: *Advances in Space Research* 51: 874–890.
- Larbi, J., 2003. Effect of stylolites on the durability of building stones: two case studies, *Heron-English edition*- 48, 231-247.
- Marghany, M. and Hashim, M., 2010. Lineament mapping using multispectral remote sensing satellite data: *International Journal of the Physical Sciences* 5 (10):1501-1507.
- Masoud, A.A., Koike, K., 2011. Auto-detection and integration of tectonically significant lineaments from SRTM DEM and remotely-sensed geophysical data, *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing* 66, 818-832.
- McClay, K.R., 2013. *The mapping of geological structures*, John Wiley & Sons.
- وزارت صنعت، معدن و تجارت، ۱۳۹۴، *صنعت معدن و تجارت* به روایت آمار و اطلاعات گزارش شماره ۱۲ (عملکرد ۱۳۹۳)، دفتر آمار و فراوری داده‌ها.
- قربانی، م.، ۱۳۸۶، *زمین شناسی اقتصادی ذخائر معدنی و طبیعی ایران*، انتشارات آراین‌زمین، تهران، ۴۶۵ صفحه.
- یاراحمدی، ر.، باقرپور، ر.، طاهریان، ق.، الیویرا سوزا، ل.م.، ۱۳۹۶، *ارائه روشی برای افزایش بهره‌وری معادن سنگ ساختمانی جهت تبدیل به جای‌گزین‌های مناسب برای نفت*، مجموعه مقالات یازدهمین کنگره پیشگامان پیشرفت، ۱۶ صفحه.
- Agterberg, F.P., 1989. Computer programs for mineral exploration, *Science* 245, 76–81.
- Alipour, R., 2009. Structural analysis and Structural and seismotectonic analysis of the main recent fault zone and its effect on the Rudbar Lorestan dam site. MSc Thesis, University of Shahid Beheshti, Tehran.
- Alipour, R., Sadr, A.H. & Amini, P., 2017. The analysis of the dynamics tectonic the Morvarid fault at main recent Fault using remote sensing data and fractal analysis. *Journal of New Finding in Applied Geology* 11 (20), 125-138.
- Ameen, M.S., Buhidma, I.M. & Rahim, Z., 2010. The function of fractures and in-situ stresses in the Khuff reservoir performance, onshore fields, Saudi Arabia, *AAPG bulletin* 94, 27-60.
- Aronoff, S., 1989. *Geographic Information System: A Management Perspective*; WDL publication: Ottawa, Canada,; p. 200.
- Bathurst, R.G., 1991. Pressure-dissolution and limestone bedding: the influence of stratified cementation, cycles and events in stratigraphy, 450-463.
- Berberian, M. 1995. Master 'blind' thrust faults hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics. *Tectonophysics*, 241,193–224.
- Bonham-Carter, G.F., Agterberg, F.P. and Wright, D.F., 1988. "Integration of geological data sets for gold exploration in Nova Scotia",





- Volland, S. and Kruhl, J. H., 2004. Anisotropy quantification: the application of fractal geometry methods on tectonic fracture patterns of a Hercynian fault zone in NW-Sardinia: *Journal of Structural Geology* 26: 1489-1500.
- Watkins, H., Bond, C.E., Healy, D., Butler, R.W., 2015. Appraisal of fracture sampling methods and a new workflow to characterise heterogeneous fracture networks at outcrop, *Journal of structural geology* 72, 67-82.
- www.sasgis.org
- Xypolias, P., Koukouvelas, I., 2004. Fault trace parameters as a tool for analysing remotely sensed fault arrays: an example from the eastern Gulf of Corinth, Greece, *International journal of remote sensing* 25, 4685-4694.
- Yarahmadi, R., Bagherpour, R., Taherian, S. G., Sousa, L. M., 2018. Discontinuity modelling and rock block geometry identification to optimize production in dimension stone quarries. *Engineering Geology* 232, 22-33.
- Yousefi, H., Ehara and S., Noorollahi, Y., 2007. Geothermal potential site selection using GIS in Iran, *Thirty-Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California.
- Zhang, X. and Sanderson, D. J., 1998. Numerical study of critical behaviour of deformation and permeability of fractured rock masses: *Marine and Petroleum Geology* 15: 535-548.
- Mohajjel. M., Fergusson, C.L., and Sahand, M.R., 2003. Cretaceous-Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj-Sirjan Zone, western Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 21, 397-412.
- Nadimi, A., Konon, A., 2012. Strike-slip faulting in the central part of the Sanandaj-Sirjan Zone, Zagros orogen, Iran, *Journal of structural geology* 40, 2-16.
- Railsback, L.B., 1998. Evaluation of spacing of stylolites and its implications for self-organization of pressure dissolution, *Journal of Sedimentary Research* 68.
- Safaei, H., 2009. The continuation of the Kazerun fault system across the Sanandaj-Sirjan zone (Iran), *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 35, pp. 391-400.
- Seung-Ik, P., Young-Seog, K., Chung-Ryul, R. and Sanderson, D. J., 2010. Fractal analysis of the evolution of a fracture network in a granite outcrop, SE Korea: *Geosciences Journal* 14(2): 201-215.
- Shupe, S. M. and Akhavi, M. S., 1989. Integration of remotely sensed and GIS data for mineral exploration: Halifax Pluton area, Nova Scotia, Canada: *Geocarto International*, 4-3, p. 49-54.
- Solomon, S. and Ghebreab, G., 2006. Lineament characterization and their tectonic significance using Landsat TM data and field studies in the central highlands of Eritrea: *Journal of African Earth Sciences* 46: 371-378.
- Tercan, A.E., Ozcelik, Y., 2000. Geostatistical evaluation of dimension stone quarries. *Engineering geology* 58, p. 55-33.
- Tibaldi, A. and Ferrari, L., 1991. Multisource remotely sensed data, field checks and seismicity for the definition of active tectonics in Ecuadorian Andes: *International Journal of Remote Sensing* 12: 2343-2358.
- Tillman, J.E., Poosti, A., Rossello, S., Eckert, A., 1981. Structural evolution of Sanandaj-Sirjan ranges near Isfahan, Iran. *AAPG Bulletin* 65, pp. 674-687.



## تعیین دگرشکلی در پهنه برشی بهلگرد با استفاده از هندسه ساختارهای کوچک مقیاس

محمد امیر علیمی<sup>۱\*</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده معدن، عمران و شیمی، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۲۷

### چکیده

پهنه برشی بهلگرد در خاور ایران، فلیش‌های انوسن را در مرز با توالی افیولیتی جنوب بیرجند تحت تأثیر دگرشکلی قرار داده است. در مطالعات صحرایی منطقه، ساختارهای کوچک مقیاسی که در دگرشکلی شکنا-شکل‌پذیر ایجاد می‌شوند، به‌عنوان نشانگرهای واتنش در ارزیابی دگرشکلی محلی مورد توجه قرار گرفته است. بدین منظور ابتدا روش‌های تحلیلی مناسبی بر پایه هندسه شکستگی‌های کششی، بر گوارگی‌ها، نشانگرهای انحراف یافته و اجسام بیضی شکل اولیه به کار گرفته شده‌اند سپس این روش‌ها با هم مقایسه و محدودیت‌های استفاده از آنها بحث شده است. در مقادیر برآورد شده واتنش با استفاده از شکستگی‌های کششی و انحنای بر گوارگی، مساحت زیر منحنی فاصله-واتنش، واتنش برشی متوسط ( $\gamma$  mean) را تعیین می‌کند که بهتر است با فراسنج شدت واتنش تمرکز یافته (Iloc) معرفی شود. در استفاده از بر گواره‌ها در تعیین واتنش، شناخت ارتباط این نوع فابریک‌ها با ساختارهای منطقه‌ای، تفاوت الگوهای واتنش در پهنه‌های برشی با دیواره‌های موازی و گوه‌ای شکل، انکسار بر گوارگی متأثر از رفتار سنگ‌ها اهمیت دارد و باید در مقیاس ناحیه‌ای در نظر گرفته شود. استفاده از روش‌های ترسیمی نظیر (Lisle 2013) به‌علت سادگی اجرا و محاسبه فراسنج‌های واتنش برشی و تغییر حجم نسبت به روش‌های دیگر ترجیح داده می‌شود. روش‌های محاسبه میانگین داده‌های  $R_f$  به‌علت سادگی تعیین فراسنج  $R_f$  در نشانگرهای بیضی شکل و محاسبات ساده ریاضی جهت تعیین دگرشکلی در مقیاس ناحیه‌ای مناسب است. در به‌کارگیری روش‌های مختلف تعیین فراسنج‌های دگرشکلی، به‌منظور کنترل صحت فرضیات و ارزیابی دقیق واتنش می‌بایست از چندین نشانگر و روش استفاده شود.

**واژه‌های کلیدی:** شکستگی کششی، بر گوارگی، نشانگر واتنش، پهنه برشی بهلگرد، خاور ایران



# Determination of deformation in Bahlgerd shear zone by using geometry small-scale Structures

Alimi .M.A <sup>1\*</sup>

1- Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Faculty of Mining, Civil and Chemistry, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

## Abstract

Behlgard shear zone in eastern Iran has deformed Eocene flysch on the border with the ophiolite sequence south of Birjand. In field studies of the region, small-scale structures that are formed in brittle-ductile deformation have been considered as strain marker for assessing local deformation. For this purpose, first analytical methods based on the geometry of pattern of extension fractures, foliations, deflection of markers and initially elliptical particles have been used then these methods are compared and the limitations of their use are discussed. In the estimated values of strain using extension fractures and the curvature of foliation, the area under the distance-strain curve determines the mean shear strain ( $\gamma_{mean}$ ), which should be introduced by parameter of the intensity of strain localization ( $I_{loc}$ ). In using foliations in determining the strain, recognizing the relationship of this type of fabric with regional structures, the difference of strain patterns in shear zones with parallel and wedge-shaped walls, foliation refraction affected by the behavior of rocks, It is important and should be considered on a regional scale. Graphical methods such as Lisle (2013) due to the simplicity and calculated parameters of shear strain and volume change as compared to other methods is preferred. Methods for calculating the mean of  $R_f$  data due to the simplicity of determining the  $R_f$  parameter in elliptical markers and simple mathematical calculations to determine deformation at the regional scale. In applying different methods for determining deformation parameters, in order to control the validity of the assumptions and accurate assessment of multiple markers and strain should be used.

**Keywords:** extension fracture, foliation, strain marker, Bahlgerd shear zone, east of Iran

دشت بیرجند هم‌مرز است (شکل ۱. الف و ب). مرز پهنه برشی را گسل‌های جنوب بیرجند و بهلگرد تشکیل می‌دهند و دگرشکلی در آن شامل گسلش، چین خوردگی، برگوارگی و شکستگی‌های کششی است. حد فاصل این گسل‌ها، گسل‌های امتدادلغز چپگرد شورک (N280,75NE) و چشمه گزو (N295,70NE) به صورت هم‌روند با گسل بهلگرد قرار دارند. موقعیت هندسی گسل جنوب بیرجند در شمال روستای بوشاد، N150,80SW و خش‌لغزهای آن N330,00 اندازه‌گیری شده است. گسل بهلگرد، گسلی امتدادلغز چپگرد با مؤلفه معکوس است که ۱۴ کیلومتر طول دارد. در مقطع جاده‌ای نزدیک روستای بوشاد، موقعیت هندسی این گسل N290,80NE اندازه‌گیری شده است (شکل ۱. ب). از جمله چین‌های شاخص در منطقه چین بوشاد است که در راستای شمال باختری-جنوب خاوری کشیده شده است. با تحلیل قطب سطوح لایه بندی در یال‌های شمالی و جنوبی، محور چین N152,39 به دست آمد. در این تحقیق، با انتخاب نمونه‌هایی از نشانگرهای مختلف که در مطالعات صحرائی از پهنه برشی بهلگرد به دست آمده است فراسنج‌های دگرشکلی محاسبه شده است.

### روش‌های تعیین واتنش با استفاده از ساختارهای کوچک مقیاس در پهنه‌های برشی

در سنگ‌های دگرشکل شده در پهنه‌های برشی، ناهمگنی واتنش مشهود است بدین معنی که وضعیت واتنش نهایی از نقطه‌ای به نقطه دیگر تغییر می‌کند. این واتنش منجر به شکل‌گیری ساختارهایی می‌شود که حساس به تغییرات واتنش بوده و به‌طور کامل واتنش نهایی را ثبت می‌کنند.

واتنش اغلب در بخش‌های شکل‌پذیر سنگ کره انباشته می‌شود (Vauchez et al., 2012; Snyder and Kjarsgaard, 2013) و در پهنه‌های برشی بیشترین تمرکز و مقدار را دارد. سنگ‌های دگرشکل شده در این مکان‌ها از اوایل قرن ۱۹ میلادی مورد توجه محققین قرار گرفت. Ramsay (1967) تحلیل کمی واتنش با بهره‌گیری از معادلات نوین ریاضی را آغاز کرد و این موضوع توسط دیگر محققین (نظیر Ramsay and Graham, 1970; Ramberg, 1975; Coward, 1976; Cobbold, 1977; Lister and Williams, 1979; Sibson, 1977; Ramsay, 1980; Cobbold and Quinquis, 1980; Lister and Snoke, 1984) در دهه‌های ۷۰ و ۸۰ میلادی پیشرفت قابل توجهی یافت. تعیین دگرشکلی از ساختارهای کوچک مقیاس از جهت این که به سرعت در صحرا تشخیص داده می‌شوند و در نقشه‌های بزرگ مقیاس (کمتر از ۱:۱۰۰۰۰) می‌آیند، اهمیت دارند. این دسته از ساختارها اطلاعات با ارزشی از هندسه ساختارهای بزرگ مقیاس، توزیع تنش، تعیین جهت برش و تعیین مراحل دگرشکلی در اختیار ما قرار می‌دهند (Wilson and Cosgrove, 1982). چگونگی استفاده از ساختارهای کوچک مقیاس (نظیر شکستگی‌های کششی<sup>۱</sup>، برگوارگی‌ها<sup>۲</sup> و ...) در محاسبه واتنش، مقایسه روش‌ها و محدودیت‌های استفاده از آنها از اهداف این مطالعه است که با ذکر مثال‌هایی از ساختارهای مختلف در پهنه برشی بهلگرد بحث شده است.

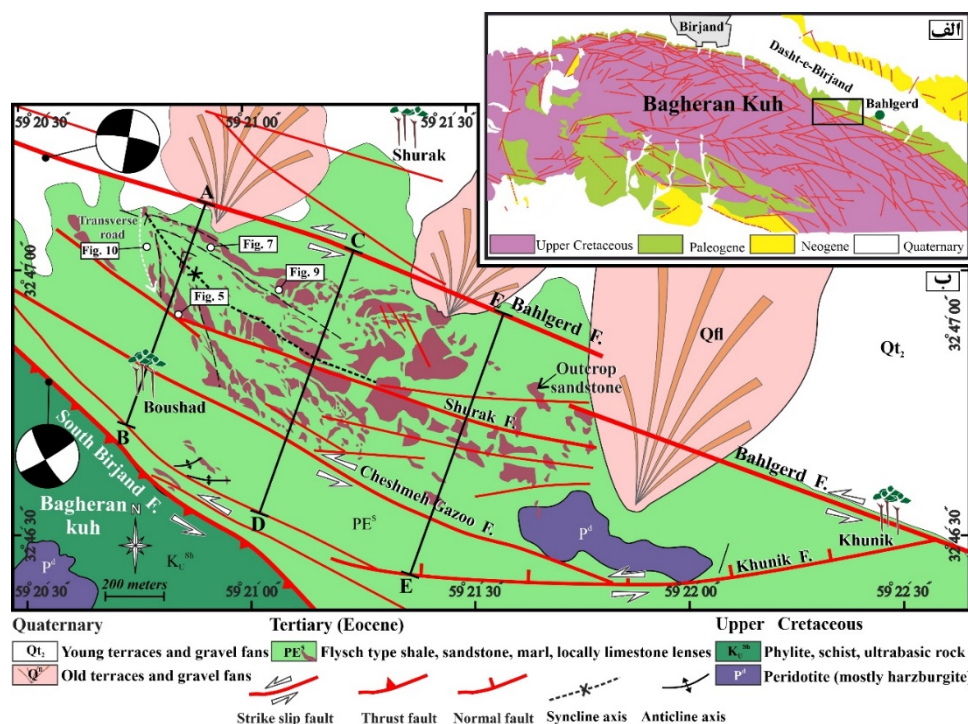
### زمین‌شناسی و زمین‌ساخت پهنه برشی بهلگرد

پهنه برشی بهلگرد در خاور ایران و جنوب رشته کوه باقران قرار دارد. منطقه از فلیش‌های ائوسن (توالی از شیل و ماسه‌سنگ) پوشیده شده است که از جنوب با توالی افیولیتی جنوب بیرجند و از شمال به رسوبات کواترنری در



چه روش‌هایی می‌توان از این ساختارها برای برآورد مقدار واتنش استفاده کرد؟ مزایا و محدودیت‌های استفاده از این روش‌ها چیست؟

ساختارهایی نظیر شکستگی‌های کششی و برگوارگی‌ها که آرایش هندسی آنها وابسته به این تغییرات هستند، برای تعیین مقدار واتنش در پهنه‌های برشی مناسبند. اما به‌راستی چگونه این ساختارها در پهنه‌های برشی شکل می‌گیرند؟



شکل ۱: الف - موقعیت پهنه برشی بهلگرد در کوهستان باقران با مستطیل نمایش داده شده است؛ ب - نقشه ساده شده واحدهای سنگ‌شناسی برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ بیرجند (افتخارنژاد، ۱۳۶۶) و گسل‌های فعال در پهنه برشی بهلگرد

### شکستگی‌های کششی

کششی، با گذر زمان در دگرشکلی پیشرونده هلالی شکل<sup>۴</sup> می‌شوند.

شکستگی‌های کششی، در پهنه‌های برشی نیمه شکننا<sup>۳</sup> ایجاد می‌شوند (Davis et al., 2012). این شکستگی‌ها در آغاز در راستای محور بیشینه تنش ( $\sigma_1$ ) یا عمود بر محور بزرگترین کشیدگی بیضوی کرنش لحظه‌ای ( $ISA_1$ ) باز می‌شوند (شکل ۲). بازشدگی این عوارض در الگوی شکستگی‌های نوع ۱ (حرکت نسبی عمود بر دیواره شکستگی) صورت می‌گیرد. آرایش پلکانی شکستگی‌های

### الگوهای زایشی شکستگی‌های کششی

در خصوص ایجاد آرایه‌های پلکانی هلالی شکل الگوهای ارائه شده است:

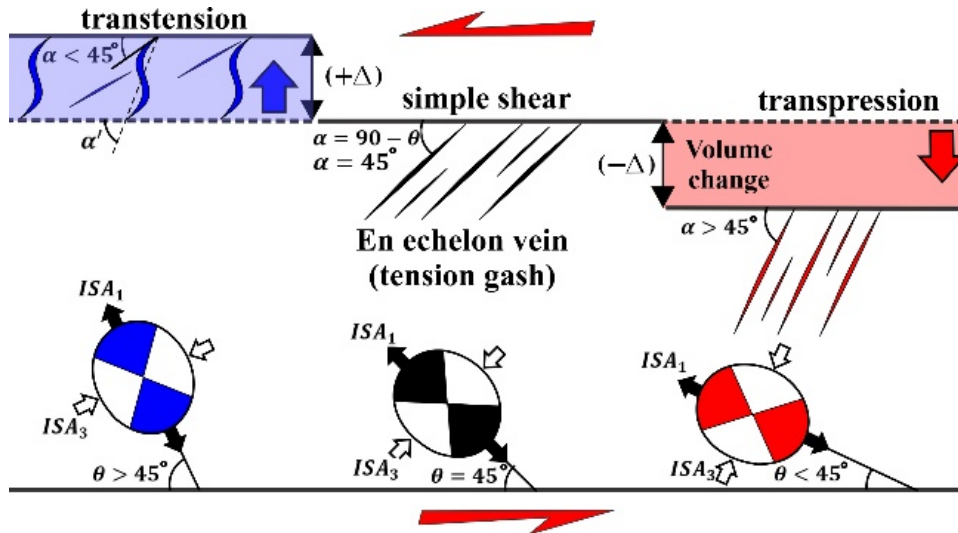
الف - الگوی چرخش غیر فعال: در پهنه‌های برشی، شکستگی‌های نوع ۱ در اثر دگرشکلی ساده پیشرونده

<sup>۴</sup> Sigmoidal

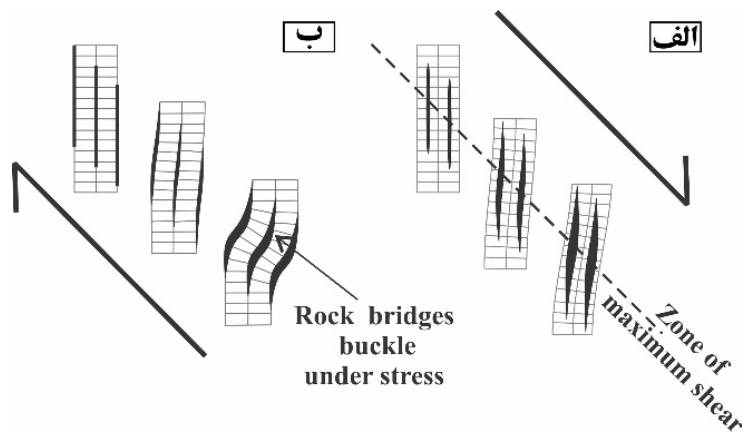
<sup>۳</sup> Semibrittle



می چرخند در حالی که انتهای آنها به موازات محور تنش بیشینه ( $\sigma_1$ ) رشد می کند (Beach, 1975). در این الگو انحنا شکستگی های هلالی شکل، در نتیجه چرخش متفاوت قطعات متأثر از واتنش ناهمگن در عرض پهنه برشی ایجاد می شود (Lisle, 2013) (شکل ۳. الف).



شکل ۲. آرایش شکستگی های کششی و جهت گیری ISA (محورهای کشیدگی لحظه ای) در پهنه های برشی ساده، تراکشی و توافشارشی برگرفته از (Ramsay and Huber, 1983; Fossen and Tikoff, 1993)



شکل ۳. الگوهای زاغی ایجاد آرایه های پلکانی هلالی شکل. الف- الگوی چرخش غیرفعال (Beach, 1975); ب- الگوی خمش تدریجی پل های سنگی (Nicholson and Pollard, 1985)



## محاسبه واتنش با استفاده از شکستگی‌های کششی

اولین شکستگی‌های تشکیل شده در برش ساده زاویه ۴۵ درجه ( $\alpha$ ) با دیواره برشی می‌سازند اما در مواردی زاویه اولیه کمتر یا بیشتر از این مقدار می‌باشد چرا که جهت‌گیری شکستگی‌ها در مرحله اولیه دگرشکلی علاوه بر مؤلفه برش ساده به مؤلفه برش محض نیز وابسته است. آرایش پلکانی شکستگی‌ها با صفحه برش، زاویه‌ای کمتر از ۴۵ درجه در مناطق تراکشنی و زاویه بزرگتر از ۴۵ درجه در مناطق تراکشنی می‌سازند (شکل ۲). در دگرشکلی‌های بعدی زوایای اولیه تغییر می‌کند ( $\alpha'$ ) و موجب ایجاد رگه‌های  $S$  مانند و کج شده می‌شود. در مطالعه واتنش ضروری است که تغییر در شکل و اندازه بررسی شود. دگرشکلی یک عارضه را با تغییر در زاویه برش (واتنش برشی) و تغییر اندازه را با تغییر در حجم آن (واتنش حجمی) ارزیابی می‌کنیم. برای محاسبه این فراسنج‌ها، راه‌حل‌های هندسی به صورت معادلاتی یا ترسیمی ارائه شده است که عبارتند از:

### روش Ramsay and Huber (1983)

مطابق الگوی چرخش غیرفعال، قطعات شکستگی‌های کششی در پاسخ به گرادیان<sup>۵</sup> واتنش پهنه برشی چرخش یافته و انحنا شکستگی‌ها را سبب می‌شوند. در این الگو دگرشکلی غیرفعال بوده و واتنش برشی ( $\gamma$ ) را می‌توان در هر نقطه از شکستگی هلالی شکل با استفاده از رابطه زیر بدست آورد (Ramsay and Huber, 1983).

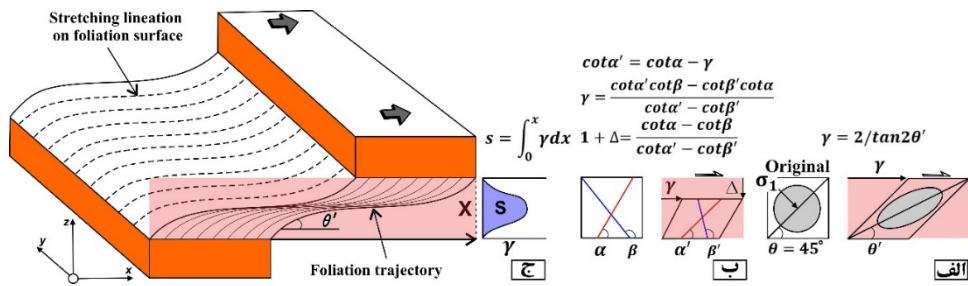
$$\cot \alpha' = \cot \alpha - \gamma \quad (\text{رابطه ۱})$$

$\alpha$ : زاویه بین شکستگی اولیه و دیواره برش؛  $\alpha'$ : زاویه بین شکستگی بعد دگرشکلی و دیواره برش در هر نقطه از انحنا شکستگی (شکل ۴. ب).

در نقاط مختلفی از انحنا رگه‌ها با تغییر آهنگ مقدار  $\alpha'$ ، ایزوگون‌های شیب ترسیم می‌شود. سپس در این نقاط با استفاده از رابطه ۱ و با در نظر گرفتن  $\alpha$ ، مقادیر واتنش برشی محاسبه می‌گردد. تغییرات واتنش برشی با مقادیر کوچک در کناره‌های دیواره برش آغاز و در مرکز به مقدار بیشینه خود می‌رسد مقدار واتنش برشی متوسط ( $\gamma$  mean) را می‌توان با استفاده از انتگرال زیر بدست آورد:

$$S = \int_0^x \gamma dx \quad (\text{رابطه ۲})$$

در این رابطه،  $x$  مقدار فاصله در عرض پهنه و  $\gamma$  واتنش برشی است. این انتگرال مساحت ( $s$ ) زیر منحنی واتنش بر حسب فاصله را محاسبه می‌کند که مقدار آن برابر میزان جابجایی کل پهنه است (Ramsay, 1980; Marshak and Mitra, 1988) (شکل ۴. ج). با دو فرض اساسی می‌توان ر فوق را بکار برد: الف- دگرشکلی در پهنه از نوع برش ساده است. ب- خط سیر فابریک‌ها بر خط سیر واتنش نهایی منطبق است.



شکل ۴: الف- در آغاز برش ساده، بر گوارگی عمود بر  $\sigma_1$  و با زاویه  $45^\circ$  درجه  $(\theta)$  نسبت به دیواره‌های برش تشکیل می‌شود. در طی دگرشکلی پیش‌رونده زاویه  $\theta'$  به کمتر از  $45^\circ$  درجه می‌رسد و تابعی از واتنش نهایی است (Ramsay and Graham, 1970)؛ ب- ارتباط هندسی بین خطوط با جهت‌گیری اولیه  $\alpha$  و  $\beta$  که تحت تأثیر واتنش برشی ( $\gamma$ ) قرار گرفته است (Ramsay and Huber, 1983)؛ ج- مساحت (S) زیر منحنی فاصله-واتنش برابر واتنش برشی متوسط می‌باشد (Ramsay, 1980; Marshak and Mitra, 1988).

$\alpha'$  و بر حسب رادیان

روش (Lisle 2013)

با ترسیم خطوطی از نقاط S و T به موازات دیواره برش، w (عرض پهنه برشی) به دست می‌آید.  $d_x$  و  $d_y$  (مؤلفه‌های جابه‌جایی موازی و عمود بر پهنه برشی) خواهند بود. می‌توان مقادیر واتنش برشی ( $\gamma$ ) و تغییر حجم ( $\Delta$ ) را محاسبه کرد:

$$\gamma = d_x / w \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$\Delta = d_y / w \quad (\text{رابطه ۶})$$

مثالی از کاربرد شکستگی‌های کششی در

محاسبه واتنش

در بخش شمال باختری پهنه برشی بهلگرد، حوالی روستای بوشاد، که رخنمون‌های ماسه‌سنگی به هم‌ریختگی کمتری دارند، شکستگی‌های کششی به صورت رگه‌های اصلی متقاطع و یا آرایه‌هایی با آرایش نردبانی ایجاد شده‌اند. شکستگی‌ها در واحدهای ماسه‌سنگی فلیش‌های ائوسن دیده می‌شود که با کوارتز پر شده‌اند و در مواردی به شکل هلالی شکل در آمده‌اند (شکل ۵). در نمونه‌ای از

مطابق الگوی پل‌های چین خورده، چین خوردگی پل‌های مقاوم بین شکستگی‌های کششی منجر به اتساع حجمی پهنه، رشد تدریجی و انحنا شکستگی‌ها می‌شود. به منظور تعیین مقادیر واتنش برشی ( $\gamma$ ) و اتساع حجمی ( $\Delta$ ) در پهنه برشی، روشی ترسیمی توسط Lisle (2013) ارائه شده است (شکل ۶ ج):

در این روش ابتدا دایره‌ای به شعاع دلخواه رسم می‌شود. شعاع دایره (pq) را به گونه‌ای انتخاب می‌کنیم که عمود بر جهت‌گیری اولیه شکستگی باشد.

از نقطه p بر روی محیط دایره، خطی به موازات جهت‌گیری شکستگی بعد دگرشکلی (خطی که دو انتهای شکستگی را بهم متصل می‌کند) ترسیم می‌شود (qr). خط sr را که بیانگر شکستگی اولیه است مطابق روابط زیر بازسازی می‌گردد.

$$S = \frac{\sin(\alpha' - \alpha)}{\alpha' - \alpha} \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$sr = S \times qr \quad (\text{رابطه ۴})$$



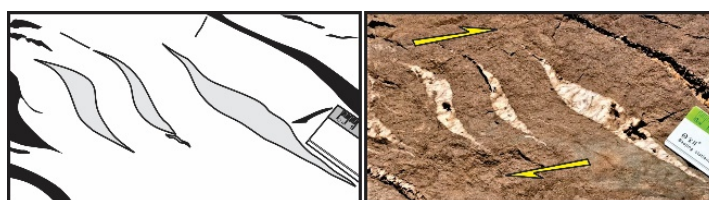
$$I_{loc} = 1 - \frac{\gamma_{mean}}{\gamma_{max}} \quad (\text{رابطه ۷})$$

شکستگی‌های کششی در نزدیکی گسل شورک، مقدار و انتش به دو روش محاسبه شده است:

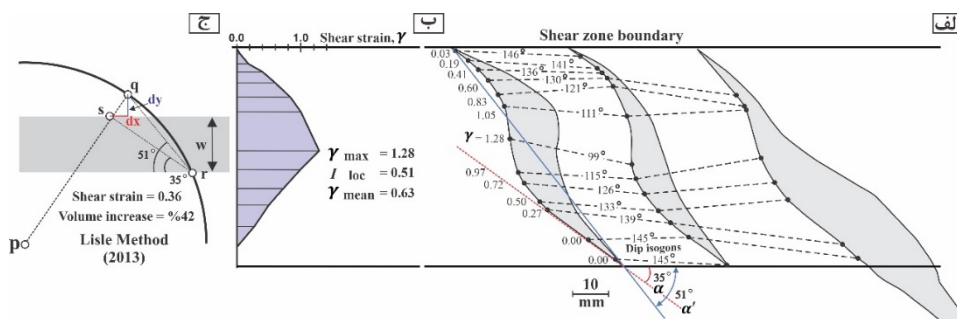
بنابراین شدت و انتش تمرکز یافته در کل پهنه ۰/۵۱ است. با بهره‌گیری از روش ترسیمی (Lisle 2013) مقادیر و انتش برشی و تغییر حجم به ترتیب ۰/۳۶ و ۴۲٪ تعیین شد (شکل ۶. ج).

مقایسه روش‌های فوق نشان می‌دهد که مقدار و انتش برشی در روش (Lisle 2013) (۰/۳۶) نسبت به روش (Ramsay and Huber 1983) (۰/۶۳) متفاوت است اما مقدار آن به شدت و انتش تمرکز یافته (۰/۵۱) نزدیک‌تر است.

ابتدا با استفاده از روش (Ramsay and Huber 1983)، در نقاط مختلفی از انحنای رگه‌ها، ایزوگون‌های شیب با مقادیر متفاوت  $\alpha'$  رسم شد. سپس در این نقاط با در نظر گرفتن  $\alpha=35^\circ$  در رابطه ۱، و انتش برشی با بیشینه مقدار ۱/۲۸ محاسبه گردید (شکل ۶. الف). با منحنی و انتش-فاصله، جابه‌جایی جانبی ۳۷ میلیمتر و و انتش متوسط ۰/۶۳ برآورد شد (شکل ۶. ب). و انتش‌های برشی محاسبه شده در این روش و انتش را به صورت موضعی در نقاطی از پهنه به دست می‌آورد از این رو می‌توان شدت این و انتش تمرکز یافته ( $I_{loc}$ ) در کل پهنه را با معادله زیر به دست آورد (Schrank et al., 2008)



شکل ۵: شکستگی‌های کششی هلالی شکل که در پهنه برشی راستگرد تشکیل شده‌اند.



شکل ۶. الف- ایزوگون‌های شیب برای سه شکستگی کششی ترسیم و و انتش برشی با رابطه (۱) محاسبه شده است؛ ب- با استفاده از منحنی فاصله-و انتش در عرض پهنه برشی، و انتش برشی متوسط ۰/۶۳ برآورد شد؛ ج- با بازسازی ترسیمی به روش (Lisle 2013) و انتش برشی ۰/۳۶ و افزایش حجمی ۴۲٪ تعیین شد

## برگوارگی

مقاومت کمتر (شیل) با زاویه‌ای حاده نسبت به آن قرار می‌گیرند. اگرچه عده‌ای از محققین معتقدند در تاریخچه واتنش پیشرونده صفحات کلیواژ و XY موازی هم باقی نمی‌مانند (Williams, 1976; Hobbs et al., 1982)، اما حداکثر انحراف بین برگوارگی و مسیر صفحه XY در برش ساده حدود ۵ درجه است (Ghosh, 1975) و در مواردی که دگرریختی غیر هم محور ( $w_k < 1$ ) باشد، این میزان به ۲ درجه کاهش می‌یابد (Ghosh, 1982). در هر صورت چنین انحرافات در صحرا قابل اندازه‌گیری نیست.

### الگوی برگوارگی و محاسبه واتنش

جهت‌گیری برگوارگی‌ها در عرض پهنه برشی به صورت نظام‌مند تغییر می‌کند. نخست صفحه برگواره با زاویه ۴۵ درجه نسبت به پهنه برشی آرایش می‌یابد سپس به تدریج از نزدیکترین راه به سوی جهت بیشینه طولیل‌شدگی می‌چرخد و در مرکز پهنه برشی به موازات صفحه برش نزدیک می‌شود و حتی در مناطقی که واتنش برشی بالاست چین می‌خورد (شکل ۴. الف). الگوی خمیدگی برگواره از حاشیه به سمت مرکز در پهنه‌های برشی اساس محاسبه واتنش است که به آسانی در رخنمون‌ها قابل مشاهده می‌باشد. ارتباط مستقیمی بین کاهش زاویه بین برگوارگی و صفحه برش ( $\theta$ ) و افزایش شدت واتنش به سمت مرکز پهنه وجود دارد که با معادله زیر قابل بررسی است (Ramsay and Graham, 1970).

$$\gamma = 2 / \tan 2\theta' \quad (\text{رابطه ۸})$$

$\gamma$ : واتنش برشی و  $\theta'$ : زاویه بین محور بزرگ بیضی واتنش ( $1+e_1=S_1$ ) یا همان اثر برگوارگی با جهت برش

برگوارگی از جمله ساختارهای ثانویه‌ای است که در پهنه‌های برشی شکل‌پذیر و شکننا-شکل‌پذیر به فراوانی یافت می‌شود. حتی از دیرباز ارتباط زایشی بین چین و برگوارگی نیز شناخته شده است بدین صورت که از جمله ساختارهای همراه چین، کلیواژ<sup>۷</sup> سطح محوری است که به موازات سطح محوری چین‌ها شکل می‌گیرد. چین و کلیواژ به‌طور همزمان یا به صورت تدریجی در یک رویداد دگرشکلی پیشرونده واحد شکل می‌گیرند و از نزدیکترین راه به سوی جهت بیشینه درازشدگی می‌چرخند. استفاده از شکل طبیعی کلیواژ در سنگها و تغییرات جهت آن، اطلاعات ارزشمندی را از مقدار واتنش بدون وجود شاخص‌های واتنش مهیا می‌کند (Treagus, 1983). از آنجا که تبیین علت ایجاد برگوارگی در سنگ‌های دگرگونی و دگرشکل یافته از جهت زایشی دشوار است در این تحقیق واژه برگوارگی به صورت عمومی به کار رفته و شامل کلیواژ و شیستوارگی<sup>۸</sup> است.

### ارتباط بین برگوارگی و واتنش

ظهور برگوارگی در طی اولین مرحله دگرشکلی همواره مورد توجه محققین بوده است چراکه تقریباً موازی با صفحه XY بیضوی نهایی واتنش قرار می‌گیرد (Cloos, 1947; Siddans, 1972; Wood, 1974; Tullis and Wood, 1975). شواهدی از این ارتباط با استفاده از دیگر شاخص‌های واتنش نیز به دست آمده است (Sorby, 1853). این بدان معناست که کوتاه‌شدگی اصلی عمود بر صفحات برگوارگی خواهد بود. برگوارگی در لایه‌های با مقاومت بیشتر (ماسه سنگ) عمود بر لایه بندی و در لایه‌های با





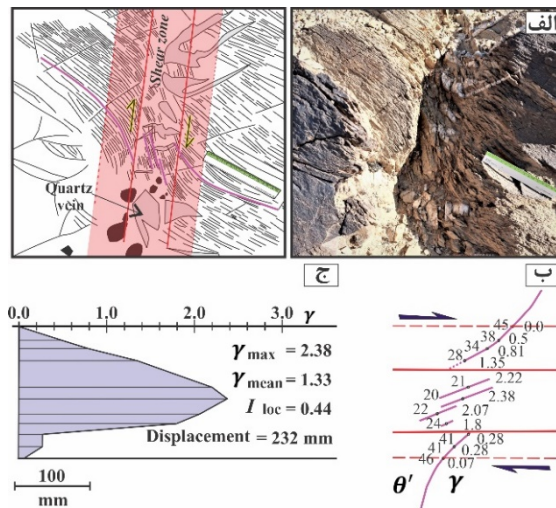
### محاسبه واتنش در مقیاس مزوسکوپی

در پهنه برشی بهلگرد، در رخنمونی از واحدهای ماسه‌سنگی فلیش‌های ائوسن نمونه‌ای انتخاب شده است که شامل برگوارگی‌ها می‌باشد (شکل ۷. الف). با استفاده از انحنای برگوارگی ایزوگون‌های شیب در نقاط مختلف از مسیر برگواره تعیین شد سپس زاویه بین ایزوگون‌ها و سطح برش ( $\theta'$ ) به دست آمد و با استفاده از رابطه (۸) مقدار واتنش برشی محاسبه گردید (شکل ۷. ب). واتنش برشی متوسط با استفاده از مساحت زیر منحنی فاصله-واتنش  $1/33$  تعیین شد (شکل ۷. ج). مقدار واتنش برشی بیشینه و شدت واتنش تمرکز یافته در این نمونه به ترتیب  $2/38$  و  $0/44$  برآورد گردید.

است. مسیر برگوارگی که صفحه XY بیضوی نهایی واتنش را بازگو می‌کند، فرصتی را مهیا می‌سازد تا مقدار کل واتنش و تغییرات آن در عرض پهنه تخمین زده شود. اگر در برش عرضی عمود بر پهنه برشی، مقادیر  $\theta'$  با استفاده از خط سیر برگوارگی تعیین شود، واتنش برشی در هر نقطه محاسبه می‌گردد.

### مثالی از کاربرد برگوارگی در محاسبه واتنش

جهت تعیین واتنش، از تغییر جهت گیری برگوارگی در عرض پهنه در دو مقیاس مزوسکوپی<sup>۹</sup> و ماکروسکوپی<sup>۱۰</sup> استفاده شده است:

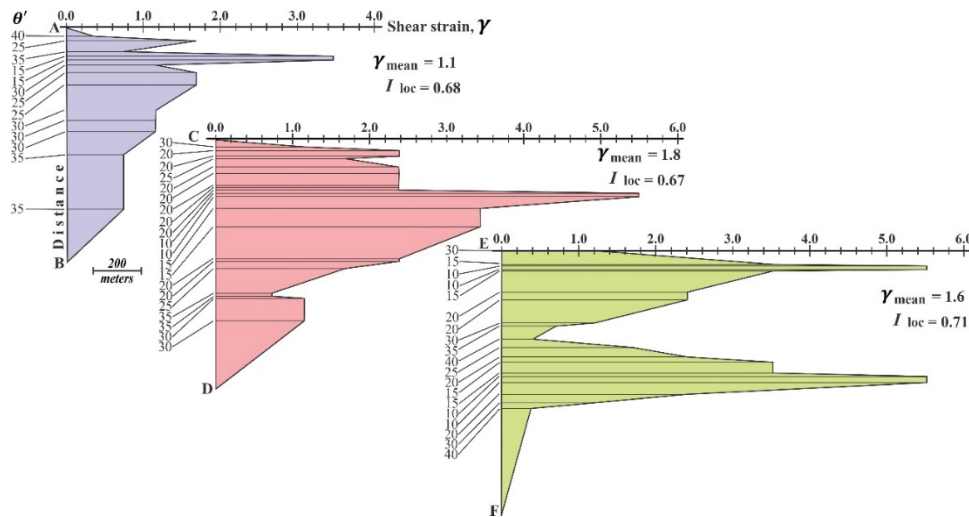


شکل ۷. الف- رخنمون پهنه برشی راستگرد در منطقه بوشاد که در آن انحنای برگوارگی در واحدهای ماسه سنگی مشهود است؛ ب- زاویه بین برگوارگی و سطح برش ( $\theta'$ ) اندازه‌گیری و واتنش برشی ( $\gamma$ ) با رابطه (۸) محاسبه شده است؛ ج- با رسم منحنی فاصله-واتنش در نیمرخ عرضی پهنه برشی، واتنش میانگین  $1/33$  تعیین شده است.

## محاسبه واتنش در مقیاس ماکروسکوپی

آمده‌اند. زاویه بین امتداد برگواری و راستای گسل بهلگرد (N290) تعیین شد سپس با استفاده از رابطه (۱) مقادیر  $\gamma$  به دست آمد. منحنی فاصله-واتنش مقدار واتنش برشی متوسط را در عرض پهنه تعیین می‌کند (شکل ۸ و جدول ۱).

در این پژوهش در سه مقطع AB، CD و EF عمود بر گسل بهلگرد پیمایش صحرائی انجام شده (شکل ۱) و برگواری در واحدهای ماسه‌سنگی برداشت و به نقشه در



شکل ۸: تعیین واتنش برشی با استفاده از انحنای برگواری در پهنه برشی بهلگرد. در مقاطع عرضی AB، CD و EF، با رسم منحنی فاصله-واتنش مقادیر واتنش برشی متوسط به دست آمده است. در هر موقعیت زاویه بین برگواری و سطح برش ( $\theta'$ ) اندازه‌گیری و واتنش برشی ( $\gamma$ ) با رابطه (۸) محاسبه شده است.

باشد. اختلاف بین مقادیر واتنش برشی متوسط در مقاطع ترسیمی زیاد است اما مقادیر شدت واتنش محلی بسیار نزدیک هم هستند. به منظور انتخاب مقدار واتنش برشی متوسط یا شدت واتنش محلی، مقدار درجه بیضی بودن (R) در پهنه برشی بهلگرد نیز با استفاده از روابط Krantz (1995) محاسبه شده است:

$$S_{H \max} = (1 - \gamma \tan \varphi)^{-1/2} \quad (\text{رابطه ۹})$$

$$S_{H \min} = (1 + \gamma \cot \varphi)^{-1/2} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

جدول ۱: مقادیر واتنش برشی در پهنه برشی بهلگرد

مقطع	$\gamma_{\max}$	$\gamma_{\text{mean}}$	$I_{\text{loc}}$	Lateral displacement(m)
AB	۳/۴۶	۱/۱	۰/۶۸	۱۰۵۰
CD	۵/۵	۱/۸	۰/۶۷	۱۸۸۶
EF	۵/۵	۱/۶	۰/۷۱	۱۷۶۲
mean		۱/۵	۰/۶۸	۱۵۶۶

مطابق شکل ۸ در منحنی فاصله-واتنش تقارن در عرض پهنه برشی وجود ندارد و این منحنی با قله‌هایی همراه است که متأثر از تغییرات واتنش می‌باشد. به نظر می‌رسد این تغییرات در خصوص مقطع EF ناشی از زیر پهنه‌های برشی



مفید هستند. چنانچه امکان اندازه گیری خطوط (اثر سطوح لایه بندی، دایک ها و سطح محوری چین) در دو جهت متفاوت در داخل و خارج پهنه برشی وجود داشته باشد (شکل ۴. ب) در این صورت می توان مقدار واتنش برشی و حجمی را با استفاده از معادلات زیر به دست آورد (Ramsay, 1980):

$$\gamma = \frac{\cot \alpha' \cot \beta - \cot \beta' \cot \alpha}{\cot \alpha' - \cot \beta'} \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

$$1 + \Delta = \frac{\cot \alpha - \cot \beta}{\cot \alpha' - \cot \beta'} \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

$\alpha$  و  $\beta$ : زاویه اولیه خطوط با دیواره های برش.

$\alpha'$  و  $\beta'$ : زاویه خطوط با دیواره های برشی بعد از دگرشکلی

تغییر حجم ( $\Delta$ ) در روش (Ramsay 1980) با فرض واتنش مستوی محاسبه شده است که در این صورت  $\Delta$  معادل با تغییر مساحت بیضی واتنش در صفحه XZ خواهد بود که در آن X به موازات برش و Z عرض پهنه برشی می باشد. بنابراین تغییر مساحت وابسته به مؤلفه برش محض وارده بر پهنه برشی نیز خواهد بود (شکل ۴. ج).

### مثالی از کاربرد جابه جاشدگی رگه ها در محاسبه واتنش

در این تحقیق ماسه سنگ های رخنمون یافته در پهنه برشی بهلگرد نمونه ای انتخاب شد که شامل دسته رگه های کششی و شکستگی های کششی هلالی شکل می باشد

$$R = \frac{S_{H \max}}{S_{H \min}} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

در این رابطه ( $\gamma$ ): واتنش برشی؛ ( $\phi$ ): زاویه بین محور طولی بیضی واتنش نهایی و جهت برش؛  $S_{H \max}$ : کشیدگی افقی بیشینه و  $S_{H \min}$ : کشیدگی افقی حداقل.

مقدار  $\phi$  در پهنه برشی بهلگرد با استفاده از زاویه بین محور چین بوشاد (N152, 39) و گسل بهلگرد (N290) ۴۲ درجه تعیین شد و مقدار درجه بیضی بودن پهنه مطابق جدول ۲ مشخص گردید:

جدول ۲: فراسنج های محاسبه شده با روابط Krantz (1995)

$\gamma_{\text{mean}}$	$I_{\text{loc}}$	$\phi$	$S_{H \max}$	$S_{H \min}$	R (Krantz, 1995)
۱/۵		۴۲	$\infty$		ممکن نیست
	۰/۶۸	۴۲	۱/۶	۰/۷۵	۲/۱

با توجه به وضعیت هندسی قرارگیری ساختارها در پهنه برشی بهلگرد، درجه بیضی بودن این پهنه با در نظر گرفتن مقدار واتنش برشی برابر ۰/۶۸ قابل محاسبه است. به منظور اطمینان از این نتیجه در یک مقطع عرضی در مسیر ترانشه جاده آسفالتی بوشاد، مقدار درجه بیضی بودن پهنه با استفاده از نودول های شیلی واقع در ماسه سنگ های ائوسن نیز محاسبه شده است (جدول ۴).

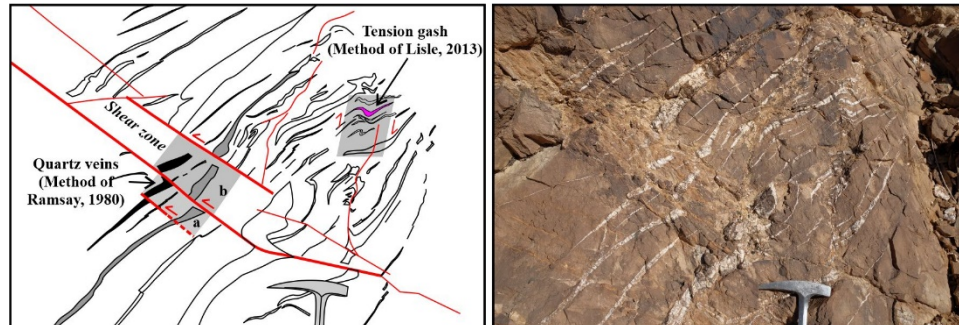
### ۵- جابه جاشدگی نشانگرها

سنجش کمی واتنش نهایی حاصل از دگرشکلی با استفاده از نشانگرهای انحراف یافته<sup>۱</sup> در پهنه های برشی

<sup>۱</sup>Deflection of marker

همانطوری که ملاحظه می‌شود مقادیر واتنش برشی محاسبه شده در هر دو روش به هم نزدیک هستند. اما تغییرات حجمی در روش Ramsay (1980) مقادیر بالاتری را نشان می‌دهد.

(شکل ۹). با استفاده از جابه‌جاشدگی دو دسته رگه کششی و معادلات (۱۲) و (۱۳)، واتنش برشی و تغییر حجم با روش Ramsay (1980) محاسبه و نتایج با شکستگی‌های کششی در روش Lisle (2013) مقایسه شده است (جدول ۳).



شکل ۹: نمونه‌ای از رخنمون پهنه‌های برشی مزدوج (برش راستگرد و چپگرد) در واحد ماسه‌سنگی انوسن در پهنه برشی بهلگرد. در این رخنمون واتنش برشی با استفاده از جابه‌جاشدگی رگه‌های کوارتز به روش Ramsay (1980) و نیز با استفاده از شکستگی‌های کششی به روش Lisle (2013) محاسبه شده است.

جدول ۳: محاسبه واتنش برشی و تغییر حجم در پهنه برشی بهلگرد مطابق با شکل ۹.

پهنه برشی	زیر پهنه	روش رمزی (۱۹۸۰)					روش لایل (۲۰۱۳)				
		$\alpha$	$\alpha'$	$\beta$	$\beta'$	$\gamma$	$\Delta$	$\alpha$	$\alpha'$	$\gamma$	$\Delta$
۲	a	۶۷	۵۷	۷۰	۸۴	۰/۳۵	۰/۸۸				
	b	۷۰	۶۰	۷۰	۶۵	۰/۳۶	۱				
متوسط						۰/۳۶	۰/۹۴	۴۵	۷۰	۰/۳۸	۰/۵۲

داشته‌اند، بدست می‌آید. روش‌های متفاوتی بر پایه تجزیه و تحلیل‌های  $R_f/\phi'$  (جهت یافتگی ذرات گرشکل شده و  $R_f$ : نسبت بیضی بودن) ارائه شده است (Ramsay and Huber, 1983) که اصولاً وقت گیر هستند. از این‌رو برای بررسی عملی واتنش در مقیاس ناحیه‌ای روش‌های سریعی

### نشانه‌های بیضی یا دایره‌ای شکل اولیه

حقیقت آنست که همیشه در موقعیتی نیستیم که بتوانیم مقادیر واتنش برشی ( $\gamma$ ) را اندازه‌گیری کنیم اما می‌توان نسبت بیضی بودن ( $R$ ) را محاسبه کرد. این فراسنج واتنش با استفاده از نشانگرهایی که ابتدا شکل دایره‌ای یا بیضی



سپس مقدار  $R_f$  برای هر بیضی محاسبه گردید. در پایان میانگین ریاضی، هندسی و هماهنگ داده‌ها مطابق جدول ۴ به دست آمد.

با استفاده از میانگین داده‌های ریاضی<sup>۱۲</sup>، هندسی<sup>۱۳</sup> و هماهنگ<sup>۱۴</sup> به کار می‌روند که امکان استفاده از اطلاعات بیشتر ولی با دقت کمتر را در بعد ناحیه‌ای به محقق می‌دهد. در یک روش برای هر بیضی طول محور بزرگ  $(1+e_1)$  و طول محور کوچک  $(1+e_2)$  را به دست می‌آید سپس مقدار  $R_f$  از تقسیم طول بزرگ بر طول کوچک بیضی محاسبه می‌شود. روابط زیر برای محاسبه میانگین‌های ریاضی، هندسی و هماهنگ پیشنهاد شده است (Lisle, 1977):

$$R_f = \frac{R_{f_1} + R_{f_2} + \dots + R_{f_n}}{n} \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

$$G = (R_{f_1} \times R_{f_2} \times \dots \times R_{f_n})^{1/n} \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

$$H = \frac{n}{R_{f_1}^{-1} + R_{f_2}^{-1} + \dots + R_{f_n}^{-1}} \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

### مثالی از کاربرد نودول‌های شیلی در محاسبه واتنش

در مسیر جاده آسفالت‌ه بوشاد، نودول‌های شیلی در واحدهای ماسه‌سنگی ائوسن برون‌زدگی دارند. این نودول‌ها به صورت بیضی بوده و جهت یافتگی منظمی را نشان می‌دهند (شکل ۱۰). طول این رخنمون ۴۳۰ متر است که به موازات یال جنوبی چین بوشاد پیمایش شده است (شکل ۱). با فرض اینکه نودول‌های ابتدایی نیز بیضی شکل بوده‌اند می‌توان مقادیر  $R_f$  را محاسبه کرد. در این تحقیق طول محور بزرگ و کوچک ۲۰۰ بیضی اندازه‌گیری شد

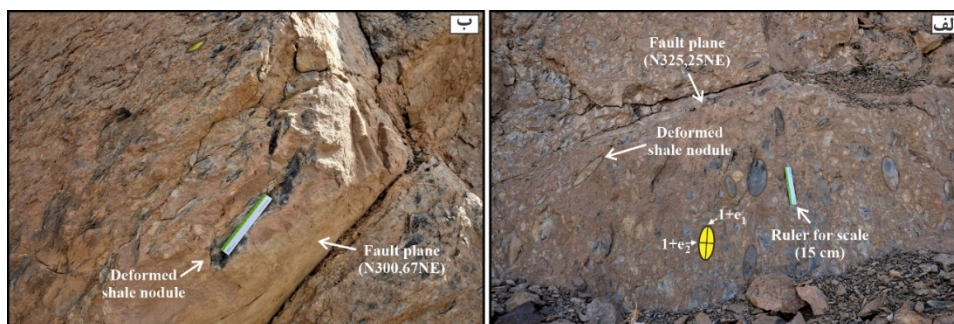
Harmonic mean<sup>۱۴</sup>

Arithmetic mean<sup>۱۲</sup>

Geometric mean<sup>۱۳</sup>







شکل ۱۰. الف- نودول‌های شیل دگرشکل شده در ماسه‌سنگ‌های ائوسن که برای تعیین نسبت بیضی بودن واتنش در پهنه برشی بهلگرد استفاده شده‌اند. ب- نودول‌های شیل دگرشکل شده که در نزدیکی گسل طویل شدگی بیشتری را نشان می‌دهد. جدول ۴. مقادیر نسبت بیضی بودن واتنش میانگین.

الگوی واتنش غالب مدنظر است دور از انتظار نیست و بسته به دقت مطالعه باید آن را پذیرفت.

### بحث

در این پژوهش از روش‌هایی که مبتنی بر الگوهای زایشی و هندسی ساختارهاست جهت تعیین دگرشکلی در پهنه‌های برشی استفاده شده است. قابل ذکر است که روش‌های کنونی تعیین واتنش تنها برای پهنه‌های برشی شکل‌پذیر و شکننا-شکل‌پذیر کاربرد دارند. از آنجایی که رگه‌های کششی و برگوارگی در پهنه‌های برشی و نشانگرهای بیضی شکل در طبیعت به فراوانی یافت می‌شوند تمایل محققین برای استفاده از این روش‌ها را دوچندان می‌کند. سنجش دگرشکلی در مثال‌هایی از پهنه برشی بهلگرد نشان داد که پاره‌ای از نتایج برای نمونه‌های یکسان متفاوت هستند. این موضوع تعجب آور نیست چراکه فرضیاتی که برای به کارگیری روش‌ها در نظر گرفته شده است متفاوتند. بنابراین تصمیم‌گیری در انتخاب روش مناسب نیاز به جمع‌آوری داده‌های اضافی و حتی تغییر در الگوی انتخابی خواهد داشت.

جدول ۴. مقادیر نسبت بیضی بودن واتنش میانگین.

میانگین	R (Lisle, 1977)	R (Krantz, 1995)
ریاضی	۱/۹۹	
هندسی	۱/۹۲	
هماهنگ	۱/۸۵	
مقاطع عرضی		۲/۱

نسبت بیضی بودن واتنش به دست آمده از روش Krantz (1995) با مقادیر روش Lisle (1977) اندکی اختلاف دارد که این تفاوت ناشی از بهره‌گیری از فرانسج‌های مورد استفاده در روش‌هاست چرا که به عنوان مثال واتنش برشی استفاده شده در روابط Krantz (1995) میانگین واتنش در پهنه برشی در امتداد مقاطع انتخابی است که با استفاده از برگوارگی تعیین شده‌اند و انتخاب مقاطع دیگر بر مقدار واتنش میانگین تأثیر خواهند گذاشت. همچنین روش سریع Lisle (2013) نیز دقت چندانی ندارد اگرچه به نظر این محقق میانگین هماهنگ نزدیک‌تر به مقدار واقعی بیضی واتنش زمین‌ساختی است. در هر صورت این خطاها در مقیاس ماکروسکوپی که در آن



## ارزیابی شکستگی‌های کششی در محاسبه واتنش

در تعیین واتنش با استفاده از برگوارگی در مقیاس ماکروسکوپی به نظر می‌رسد توجه به نکات زیر ضروری باشد:

الف- اصل کلی در خصوص صفحات برگوارگی اینست که به موازات صفحه XY بیضوی واتنش نهایی جهت‌گیری می‌شوند. امروزه اثبات شده است که صفحه برگوارگی موازی صفحه محوری چین قرار می‌گیرد. اگر چین و کلیواژ در اثر نیروهای برشی واحدی ایجاد و توسعه یافته باشند انتظار ارتباط هندسی مشخص را داریم اما اگر چین‌ها و کلیواژ قبل از پهنه برشی ایجاد شده باشند ارتباط هندسی بین آنها حفظ می‌شود اما ممکن است کلیواژ ناشی از عملکرد پهنه برشی موازی سطح محوری چین‌ها نباشد در این صورت استفاده از کلیواژ سطح محوری چین راه حل صحیحی در اختیار ما قرار نمی‌دهد.

ب- مسیر برگوارگی انکساری (تغییر جهت صفحات برگوارگی در گذر از لایه‌های با ویسکوزیته متفاوت) که به خصوص در یال‌های چین متداول است، جدا از خط سیر واقعی برگوارگی متأثر از پهنه برشی می‌باشد. از این رو در مقاطع ترسیمی می‌بایست این داده‌ها شناسایی و حذف شوند.

ج- با تمام محدودیت‌های ذکر شده، نکته قابل توجه اینست که در برش ساده پیشرونده (دگرشکلی غیر هم محور) برگوارگی‌های مادی از حالت اولیه خارج شده و از نزدیک‌ترین مکان به سمت صفحه برش می‌چرخد در این میان اگرچه ممکن است انحرافات کوچکی در جهت‌گیری برگوارگی‌ها به صورت محلی ایجاد شود اما خط سیر کلی برگوارگی‌ها منطبق بر الگوی ذکر شده در پهنه‌های برشی خواهد بود.

د- در پهنه‌های برشی با دیواره‌های ناموازی (گوه‌ای) الگوی انحنای خط سیر برگوارگی متقارن نیست و بسته به

الف- در برآورد واتنش برشی با استفاده از شکستگی‌های کششی انتخاب الگو تأثیرگذار خواهد بود. روش Ramsay and Huber (1983) واتنش برشی متوسط ( $\gamma$  mean) را تخمین می‌زند که نسبت به روش (Lisle 2013) از مقادیر بالاتری برخوردار است. به نظر می‌رسد در این روش معرفی فراسنج شدت واتنش تمرکز یافته در کل پهنه ( $I_{loc}$ ) در بیان دگرشکلی مناسب‌تر باشد. اما انتخاب کدام روش پیشنهاد می‌شود؟ یک اصل مهم در انتخاب روش اندازه‌گیری واتنش آنست که واتنش به دست آمده بیانگر واتنش کل نمونه باشد. برای این منظور دانه نسبت به زمینه بایستی فعال در نظر گرفته شود یعنی دانه در خلال واتنش مقاوم باشد و زمینه واتنش پیدا کند (یساقی، ۱۳۹۸). این اصل در روش (Lisle 2013) در نظر گرفته شده است.

ب- (Lisle 2013) راه حلی ترسیمی ارائه داده است که سنجش واتنش برشی را آسان‌تر و با سرعت بیشتر انجام می‌دهد.

ج- روش (Lisle 2013)، برآوردی از تغییرحجم را با استفاده از شکستگی‌های کششی امکان‌پذیر می‌سازد که یک مزیت محسوب می‌شود.

د- تعیین واتنش برشی متوسط با استفاده از منحنی فاصله-واتنش، بر دگرشکلی در شرایط برش ساده پایه‌ریزی شده اما همیشه برش ساده به تنهایی بر منطقه حاکم نیست. بنابراین باید به منظور کنترل صحت این فرض از روش‌های دیگری برای ارزیابی واتنش برشی استفاده کنیم.

## ارزیابی برگوارگی در محاسبه واتنش



زاویه گوه و میزان واتنش برشی متفاوت خواهد بود (Mandal et al., 2002).

شکستگی‌های کششی، انحناى فابریک موجود در سنگ‌ها، میزان جابه‌جاشدگی نشانگرها نشان داد که:

ه- توجه به پیوستگی داده‌ها و دقت اندازه‌گیری  $\theta'$  در مقیاس مزوسکوپی مهم است زیرا اختلاف بسیار کوچک در مقدار  $\theta'$  تفاوت‌های بزرگی در میزان واتنش برشی به وجود می‌آورد که ممکن است سبب تغییر در منحنی فاصله-واتنش شود و هنگام محاسبه جابه‌جایی کلی و واتنش برشی میانگین خطاهای محاسبه‌ای بزرگی ایجاد کند.

### ارزیابی نشانگرهای بیضی شکل در محاسبه واتنش

در خصوص نشانگرهای بیضی شکل در پهنه برشی بهلگرد باید اذعان داشت که:

الف- میزان واتنش محاسبه شده در نودول‌های شیل نمی‌تواند بیانگر میزان واتنشی باشد که کل توده سنگ متحمل شده است چراکه نودول‌های شیل (نامقاوم) در زمینه ماسه سنگ (مقاوم) قرار گرفته و به صورت غیرفعال عمل می‌کند در این حالت میزان واتنش نودول‌ها بیشتر از زمینه خواهد بود.

ب- از آنجا که نسبت بیضی بودن واتنش نهایی ( $R$ ) می‌بایست در صفحه  $XZ$  اندازه‌گیری شود تا بیشترین مقدار را داشته باشد در رخنمون‌هایی که نودول‌های شیل مطالعه شده‌اند امکان شناسایی این صفحات امکان‌پذیر نبوده است.

### نتیجه‌گیری

هندسه ساختارها در پهنه‌های برشی ابزار مناسبی در تعیین فراسنج‌های واتنش می‌باشند. اندازه‌گیری کمی واتنش برشی در پهنه برشی بهلگرد با انتخاب نمونه‌هایی از

الف- در مقادیر برآورد شده واتنش با استفاده از شکستگی‌های کششی هلالی شکل، تفاوت‌های جزئی وجود دارد که این موضوع به فرضیات در نظر گرفته شده در روابط هندسی ارائه شده توسط محققین بر می‌گردد. روش Ramsay and Huber (1983) واتنش برشی متوسط ( $\gamma_{mean}$ ) را تخمین می‌زند که پیشنهاد می‌شود با فراسنج شدت واتنش تمرکز یافته در کل پهنه ( $I_{loc}$ ) ارائه شده توسط Schrank et al (2008) تعدیل شود. ضمن آنکه در تعیین واتنش با استفاده از شکستگی‌های کششی، روش Lisle (2013) به علت سادگی و سرعت در اجرا و محاسبه اطلاعات مفید دیگری (نظیر تغییر حجم) در اولویت است.

ب- بهره‌گیری از انحناى برگوارگی جهت تعیین واتنش در مقیاس مزوسکوپی روش مفید و کارآمدی است و می‌توان از آن در تعیین الگوی واتنش غالب در مقیاس ناحیه‌ای نیز استفاده کرد. با وجود این شناخت ارتباط فابریک‌ها با ساختارهای منطقه‌ای، تفاوت الگوهای واتنش در پهنه‌های برشی با دیواره‌های موازی یا گوه‌ای شکل، انکسار برگوارگی متأثر از رفتار سنگ‌ها از جمله ملاحظات است که به دشواری‌های مطالعه در مقیاس ناحیه‌ای می‌افزاید. در روش‌های ارائه شده، اگرچه مساحت زیر منحنی فاصله-واتنش، واتنش برشی متوسط را تعیین می‌کند اما در اینجا نیز تعیین فراسنج شدت واتنش تمرکز یافته در کل پهنه ( $I_{loc}$ ) پیشنهاد می‌شود چراکه مقدار آن در مقاطع مختلف از پهنه برشی تفاوت ناچیزی را نشان می‌دهد.

ج- در پهنه برشی بهلگرد، مقایسه روش‌های میزان جابه‌جاشدگی نشانگرها و شکستگی‌های کششی در تعیین واتنش برشی مقادیر یکسانی را بدست می‌دهد.



د- در خصوص نشانگرهای بیضی شکل، با وجود اینکه نمی‌توان برآورد دقیقی از واتنش زمین‌ساختی با میانگین‌گیری از  $R_f$  ها داشت اما در مقیاس ناحیه‌ای می‌توان با برداشت اطلاعات بیشتر ولی با دقت کمتر، از روش‌های سریع برای اندازه‌گیری میانگین نسبت بیضی بودن واتنش بهره جست که در پهنه برشی بهلگرد این مقدار به مقدار بدست آمده از روش Krantz (1995) نزدیک است.

از آنجا که روابط هندسی ارائه شده توسط محققین مختلف بر پایه فرضیاتی بنا نهاده شده است و شرایط برای تمامی مکان‌ها یکسان نمی‌باشد از این رو پیشنهاد می‌شود در صورت در دسترس بودن نمونه مناسب در صحرا، به‌منظور صحت سنجی نتایج از چندین روش برای ارزیابی واتنش برشی استفاده شود.





## منابع

- Krantz, R.W., 1995. The transpressional strain model applied to strike-slip, oblique-convergent and oblique-divergent deformation. *Journal of Structural Geology* 17 (8), 1125–1127.
- Lisle, R.J., 1977. Estimation of tectonic strain ratio from the mean shape of deformed elliptical markers. *Geol. Nijnb* 56, 140-144.
- Lisle, R.J., 2013. Shear zone deformation determined from sigmoidal tension gashes. *Journal of Structural Geology* 50, 35-43.
- Lister, G.S. and Snoke, A.W., 1984. S-C mylonites. *Journal of Structural Geology* 6, 617–638.
- Lister, G.S. and Williams, P.F., 1979. Fabric development in shear zones: theoretical controls and observed phenomena. *Journal of Structural Geology* 1, 283–297.
- Mandal, N., Samanta, S.K. and Chakraborty, C., 2002. Flow and strain pattern at termination of tapered shear zones. *Journal of Structural Geology* 24, 297–309.
- Marshak, S., and Mitra, G., 1988. Basic methods of structural geology. Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- Nicholson, R. and Pollard, D., 1985. Dilation and linkage of echelon cracks. *Journal of Structural Geology* 7, 583-590.
- Ramberg, H., 1975. Particle paths, displacement and progressive strain applicable to rocks. *Tectonophysics* 28, 1–37.
- Ramsay, J.G. and Graham R.H., 1970. Strain variation in shear belts. *Canadian Journal of Earth Sciences* 7 (3), 786-813.
- Ramsay, J.G. and Huber, M.I., 1983. The techniques of modern structural geology. Volume 1: Strain analysis. Academic Press, London, 307 p.
- Ramsay, J.G., 1980. Shear zone geometry: a review. *Journal of Structural Geology* 2, 83–99.
- Schrank, C.E., Handy, M.R. and Fousseis, F., 2008. Multiscaling of shear zones and the evolution of
- افتخارنژاد، ج.، ۱۳۶۶. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورقه بیرجند. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- یساقی، ع.، ۱۳۹۸. مبانی دگرشکلی در زمین‌ساخت، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس.
- Beach, A., 1975. The geometry of en-echelon vein arrays. *Tectonophysics* 28, 245-263.
- Cloos, E., 1947. Oolite deformation in South Mountain fold Maryland. *Geological Society of America Bulletin*. 58, 843-918.
- Cobbold, P.R. and Quinquis, H., 1980. Development of sheath folds in shear regions. *Journal of Structural Geology* 2, 119–126.
- Cobbold, P.R., 1977. Description and origin of banded deformation structures. I. Regional strain, local perturbations and deformation bands. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 14, 1721–1731.
- Coward, M.P., 1976. Strain within ductile shear zones. *Tectonophysics* 34, 181–197.
- Davis, G.H., Reynolds, S.J. and Kluth, Ch.F., 2012. Structural geology of rocks and regions. J. Wiley and Sons press, 861 p.
- Fossen, H., Tikoff, B., 1993. The deformation matrix for simultaneous simple shearing, pure shearing, and volume change, and its application to transpression/transension tectonics. *Journal of Structural Geology*. 15, 413–422.
- Ghosh, S.K., 1975. Distortion of planar structures around rigid spherical bodies. *Tectonophysics* 28, 185-208.
- Ghosh, S.K., 1982. The problem of shearing along axial plane foliations. *Journal of Structural Geology* 4, 63-67.
- Hobbs, B.E., Means, W.D. and Williams, P. F., 1982. The relationship between foliation and strain: an experimental investigation. *Journal of Structural Geology* 4, 411-428.



the brittle-to-viscous transition in continental crust. *Journal of Geophysical Research* 113, B01407.

Sibson, R.H., 1977. Fault rocks and fault mechanisms. *J. Geol. Soc. Lond.* 133, 191–213.

Siddans, A.W.B., 1972. Slaty cleavage - a review of research since 1815. *Earth-Science Reviews* 8, 205-232.

Snyder, D.B. and Kjarsgaard, B.A., 2013. Mantle roots of major Precambrian shear zones inferred from structure of the Great Slave Lake shear zone, Northwest Canada. *Lithosphere* 5, 539–546.

Sorby, H.C., 1853. On the origin of slaty cleavage. *Edinburgh New Philosophical Journal*. J 55, 137-148.

Treagus, S.H., 1983. A theory of finite strain variation through contrasting layers, and its



## ارزیابی نقش ساختارها در چگونگی توزیع هیدروکربور در سازندهای سروک و ایلام با استفاده از منطق فازی در ناحیه هینترلند بندرعباس

فاطمه جهادگر<sup>۱</sup>، زهرا ملکی<sup>۲\*</sup>، علی سلگی<sup>۳</sup>، مهران آرین<sup>۴</sup>، علی سربی<sup>۵</sup>

۱- دانشجوی دکتری تکنیک، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

۲- استادیار گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

۳- دانشیار گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

۴- استاد گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

۵- استادیار گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۱۸

### چکیده

سازندهای سروک و ایلام در حوضه رسوبی زاگرس به عنوان سازندهایی با قابلیت مخزنی شناخته می شوند. بیش از نیمی از میدین هیدروکربوری در حوضه زاگرس در افق های سروک و ایلام دارای هیدروکربور است. در این تحقیق به منظور شناسایی مناطق دارای پتانسیل هیدروکربوری برای افق های سروک و ایلام در ناحیه هینترلند بندرعباس پارامترهایی نظیر رخنمون سازندها، گسل های اصلی، دیاپیرهای نمکی، نقشه های هم ضخامت و حجم رسوبات فوقانی سازندها از نقشه زمین شناسی منطقه و نیز داده های چاه استخراج گردید. با طراحی یک شبکه استنتاجی بین داده ها و منطق فازی مناطق با پتانسیل بالای هیدروکربوری برای افق های سروک و ایلام در ناحیه هینترلند بندرعباس شناسایی گردیدند. این ناحیه به لحاظ پتانسیل اکتشافی در افق های مخزنی سروک و ایلام به عنوان یک منطقه با قابلیت نسبتاً ضعیف شناسایی شد. به گونه ای که ۶۸ درصد از منطقه هینترلند دارای پتانسیل هیدروکربوری پایین، ۱۸ درصد دارای پتانسیل هیدروکربوری متوسط و تنها ۱۴ درصد دارای پتانسیل هیدروکربوری بالایی جهت اکتشاف در افق سروک و ایلام می باشند. این درحالی است که با در نظر گرفتن اثر تاقدیس ها درصد های یاد شده برای مناطق با پتانسیل بالای هیدروکربوری به ۴٫۳ درصد کاهش پیدا کرد. که مجموعاً به نظر می رسد تاقدیس های گشو جنوبی، بستانه، کیسن، نمک غربی و سورو در افق های سروک و ایلام دارای پتانسیل هیدروکربوری هستند.

**واژه های کلیدی:** توزیع هیدروکربور، منطق فازی، عوامل زمین ساختی، سازند سروک و ایلام



## Evaluation of the role of structures in the distribution of hydrocarbons in Sarvak and Ilam Formations using fuzzy logic in the Bandar Abbas hinterland

Fateme Jahadgar<sup>1</sup>, Zahra Maleki<sup>2\*</sup>, Ali Solgi<sup>3</sup>, Mehran Arian<sup>4</sup>, Ali Sorbi<sup>5</sup>

1- PhD student of Tectonics, Department of Geology, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Geology, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

3- Associate Professor, Department of Geology, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

4- Professor, Department of Geology, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

5- Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of basic sciences, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran

### Abstract

The Sarvak and Ilam Formations in the Zagros sedimentary basin are known as hydrocarbon reservoir formations. More than half of the hydrocarbon fields in the Zagros Basin on the Sarvak and Ilam horizons contain hydrocarbons. In this research, to identify areas with hydrocarbon potential of the horizon of Sarvak and Ilam at Bandar Abbas hinterland, parameters such as outcrops of formations, main faults, salt plugs, isopach maps and upper sediment volume of formations from the geological map of the region and well data were extracted. With designing a network inference among data and using Fuzzy logic method with the high hydrocarbons, potential of the Sarvak and Ilam horizons were identified in the Bandar Abbas hinterland. This area identified as a relatively weak area in terms of exploratory potential in Sarvak and Ilam reservoir horizons. 68% of the hinterland region has low hydrocarbon potential, 18% has medium hydrocarbon potential and only 14% has high hydrocarbon potential for exploration in Sarvak and Ilam horizons. However, considering the effect of anticlines, the mentioned percentages for areas with high hydrocarbon potential reduced to 4.3%. Together, it seems that the anticlines of South Gashu, Bastaneh, Kish, West Namak and Suru have hydrocarbon potential in Sarvak and Ilam horizons.

**Keywords:** hydrocarbon distribution, fuzzy logic, structural factors, Sarvak and Ilam Formations



## مقدمه

زمین شناسی، ژئوشیمی و ژئوفیزیک را با یک دیگر ترکیب و انطباق نسبتاً خوبی بین نقشه نهایی تولید شده و میادین نفت و گاز منطقه مورد مطالعه ملاحظه نمودند.

امین زاده (Aminzadeh, 1992) معتقد است با توجه به چند رشته ای بودن اکتشاف نفت و قوانین حاکم بر آن ها می توان با ترکیب این دو عامل سیستم های خبره را برای حل مشکلات دشوار اکتشافی بکار گرفت. لذا با استفاده از شبکه های منطق فازی و ادغام منابع دانش مختلف می توان برای عملیات اکتشاف بهره گرفت.

در این مطالعه شناسایی مناطق دارای پتانسیل بالای اکتشافی برای افق های مخزنی سروک و ایلام با عملگرهای فازی و تلفیق آن ها بر مبنای روش های متکی بر دانش با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی انجام پذیرفت و مناطق مناسب معرفی گردید. از جمله نقاط قوت این مطالعه می توان به ارزیابی افق مخزنی مشخص در گستره مطالعاتی وسیع اشاره نمود. بدین منظور با تلفیق داده های زمین شناسی و چاه ها همچون رخنمون سطحی واحدهای اثرگذار، گسل های اصلی، حجم رسوبات فوقانی بر روی سازندهای مهم نظیر کژدمی، سروک، ایلام، گورپی و پابده به همراه تغییرات ضخامت هر یک از افق ها، مناطق دارای پتانسیل شناسایی شدند. این مطالعه در منطقه هینترلند بندرعباس انجام گرفت.

## زمین شناسی و چینه شناسی منطقه

منطقه مورد مطالعه محدوده ای از جنوب زاگرس است، که حد خاوری آن گسله زندان- میناب وحد جنوبی آن حد جبهه چین های زاگرس است که از درون خلیج فارس عبور می کند. از نگاه تکتونیکی، ساختارهای ناحیه بیشتر تناوبی از تاقدیس ها و ناودیس های موازی اند که روند عمومی آنها کم و بیش خاوری — باختری است. با این وجود، در مجاورت با گنبد های نمکی سری هرمز

صنعت نفت جهت انجام عملیات اکتشاف، مطالعات متعددی همچون زمین شناسی، ژئوشیمی و ژئوفیزیک را برای دست یابی به اطلاعاتی که وجود هیدروکربور در منطقه را با احتمال بالاتری به اثبات برساند، انجام میدهد. در واقع عملیات اکتشاف نفت مبتنی بر تصمیم گیری چند معیاره بوده و پیش از انجام عملیات حفاری بین اطلاعات بدست آمده از مطالعات ارتباط برقرار نموده و مناسب ترین مکان را پیشنهاد می دهند. منطق فازی که بر مبنای تصمیم گیری چندمعیاره است؛ اولین بار در سال ۱۹۶۵ توسط پروفیسور لطفی عسگرزاده معرفی گردید ( Lotfi, 1965). این منطق بر خلاف دیگر منطق های دو ارزشی که تنها بر روی درستی و نادرستی یک موضوع بحث می کنند یک منطق چند ارزشی است. برای اکتشاف هیدروکربور فاکتورهای متعددی ارزیابی می شود اما با این حال وجود یا عدم وجود هیدروکربور در یک منطقه را نمی توان با قطعیت کامل تعیین نمود لذا اکتشاف نفت نیز چند ارزشی محسوب می شود. به عبارت بهتر در اکتشاف اولویت بندی بر مبنای احتمال وجود هیدروکربور صورت می پذیرد و با در نظر گرفتن فاکتورهای مختلف اکتشافی، مناطق می توانند در اولویت اکتشافی پایین تا بسیار بالا تقسیم بندی شوند.

تاکنون محققین متعددی با استفاده از تصمیم گیری چندمعیاره و منطق فازی اقدام به شناسایی و پتانسیل یابی مناطق دارای ارزش اکتشافی نموده اند ( Abd Latef and Kahar, 2008; Jagadish and Rao, 2010; Bingham et al., 2012 and 2011; Tounsi, 2005; Malczewski, 1991; Barrell, 2000b; An et al., 1991; Gao et al., 2000; Zargani et al., 2003; Liping, 2011; Liu et al., 2008; Carranza, 2002; Aminzadeh, 1994; Amiri et al., 2015).

امیری و همکاران (Amiri et al., 2015) در تهیه نقشه پتانسیل هیدروکربوری با استفاده از جی ای اس داده های





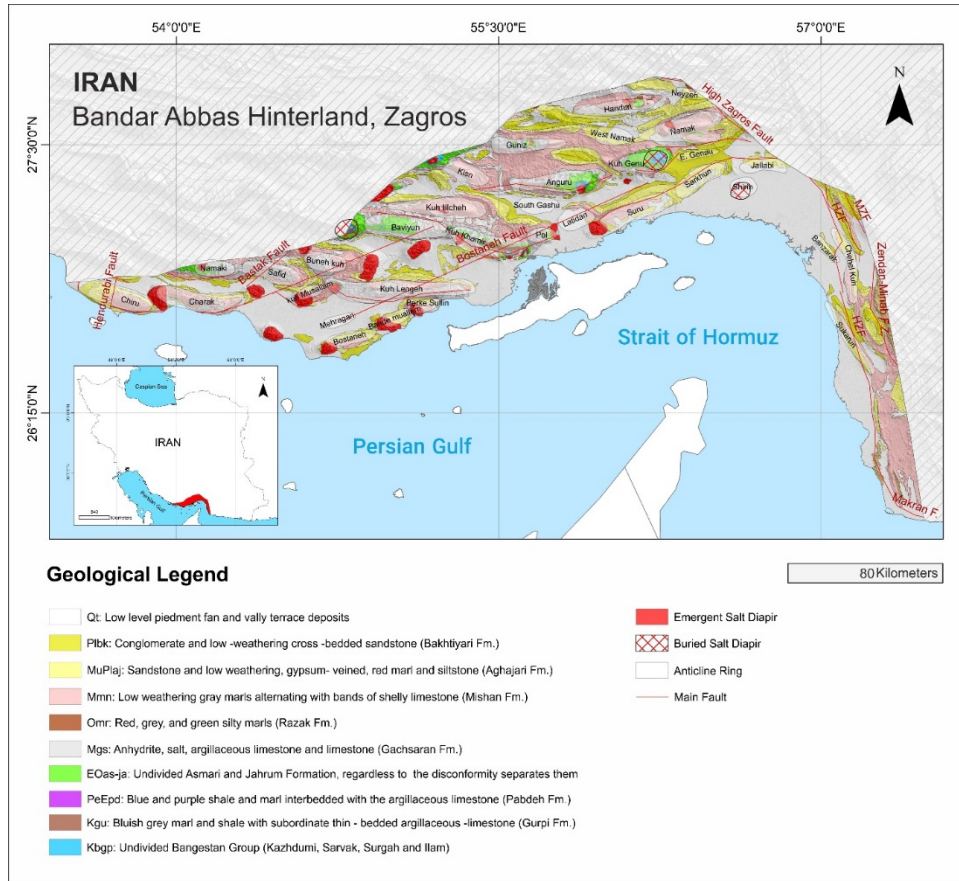
میشان از ویژگی های این ناحیه است. وجود سازند گچساران، چشمه های نفتی، گچ ترش، چشمه های آبگرم گوگردی از ویژگی های هینترلند بندرعباس و نشانگر وجود میدان های هیدروکربنی در این ناحیه است (آقانباتی، ۱۳۸۵).

تغییراتی در روند چین ها دیده می شود. بیشترین تغییر در مجاورت گسل میناب دیده می شود که حرکت های امتداد لغز و شیب لغز آن تغییرات قابل توجهی در روند چین ها ایجاد نموده است (شکل ۱).

غالب تاقدیس های این ناحیه به جز شش مورد کلی از رسوبات گروه فارس پوشیده شده اند و ضخامت قشر رسوبی در این ناحیه به مراتب بیشتر از ناحیه فارس است و از این جهت با فروافتادگی دزفول شباهت دارد. تاقدیس های این ناحیه دارای تفاوت هایی در راستای محوری هستند و می توان آن ها را در سه دسته مورد بررسی قرار داد: دسته اول تاقدیس هایی که امتداد محوری به موازات تراست زاگرس دارند، مانند: تاقدیس فراقون، تاقدیس گهکم و تاقدیس خوش. دسته دوم تاقدیس هایی که امتداد محوری آن ها به موازات گسله زندان-میناب است، مانند: تاقدیس های میناب، کریان و مهمانی. و بین امتداد محوری دسته اول و دسته دوم یک زاویه ۱۲۰ درجه قابل استنباط است. و دسته سوم تاقدیس هایی هستند که امتداد آن ها در کنترل گسله های پی سنگ است و این دسته دربرگیرنده تاقدیس های غالب منطقه است. اکثریت تاقدیس های هینترلند بندرعباس دارای راستای محوری خاوری-باختری و شمال خاوری- جنوب باختری هستند که در تضاد با امتداد کلی تاقدیس های زاگرس که شمال باختری- جنوب خاوری شناخته شده اند می باشد (مطیعی، ۱۳۷۴).

### چینه شناسی منطقه مورد مطالعه

از نگاه سنگ چینه ای بخشی از ترادف های ترشیاری (بوردیگالین- پلیستوسن) هینترلند بندرعباس، از نظر رخساره و ستبرای شباهت هایی با فروافتادگی دزفول دارد (آقانباتی، ۱۳۸۵). با این وجود تغییر رخساره سازند گچساران گاهی به سازند رازک و گاهی به سازند مول و نیز وجود پاره سازند سنگ آهک گوری در قاعده سازند



شکل ۱: نقشه زمین شناسی و ساختارهای مهم در منطقه هینترلند بندرعباس (با تغییر از طباطبایی ۱۹۹۷)

## روش تحقیق

توابع عضویت فازی، امتیاز فازی به هر لایه اطلاعاتی تعلق گرفت و با تلفیق نقشه های فازی شده با یکدیگر به کمک شبکه استنتاجی طراحی شده و عملگرهای فازی، مناطق با پتانسیل بالای اکتشافی برای افق های سروک و ایلام شناسایی و معرفی گردیدند.

## بررسی فاکتورهای مؤثر و نحوه انتخاب آنها

### رخنمون سازندها

بدیهی است در مناطقی که سازندهایی با قابلیت سنگ منشا، مخزن و پوش سنگ و یا سازندهای قدیمی تر از آن رخنمون سطحی داشته باشند آن منطقه فاقد ارزش هیدروکربوری برای افق مذکور خواهد بود. از آنجایی که سیستم هیدروکربوری مورد بررسی در این مطالعه شامل سازندهای کژدمی با قابلیت سنگ منشا، سازندهای سروک و ایلام با قابلیت سنگ مخزن و سازندهای گورپی و پایده با

هدف از این مطالعه شناسایی مناطق مستعد تولید هیدروکربور توسط سازند کژدمی به عنوان سنگ منشا، سازندهای ایلام و سروک به عنوان سنگ مخزن و سازندهای گورپی و پایده به عنوان پوش سنگ می باشد. به عبارت بهتر در این تحقیق تلاش شده است تا مناطقی که سنگ منشا، مخزن و پوش سنگ دارای شرایط مناسبی به منظور انباشت هیدروکربور هستند شناسایی و به عنوان مناطق با ارزش معرفی شوند. بدین جهت فاکتورهای اثر گذار نظیر رخنمون سازندها، گنبد های نمکی، گسل ها، ضخامت سازندها و نیز حجم رسوبات فوقانی سازندها از نقشه زمین شناسی منطقه و اطلاعات چاه های حفاری شده استخراج گردید.

بدین منظور لایه های اطلاعاتی هینترلند بندرعباس بر اساس نظر کارشناسی و اهمیتشان امتیاز دهی شدند. سپس با استفاده از

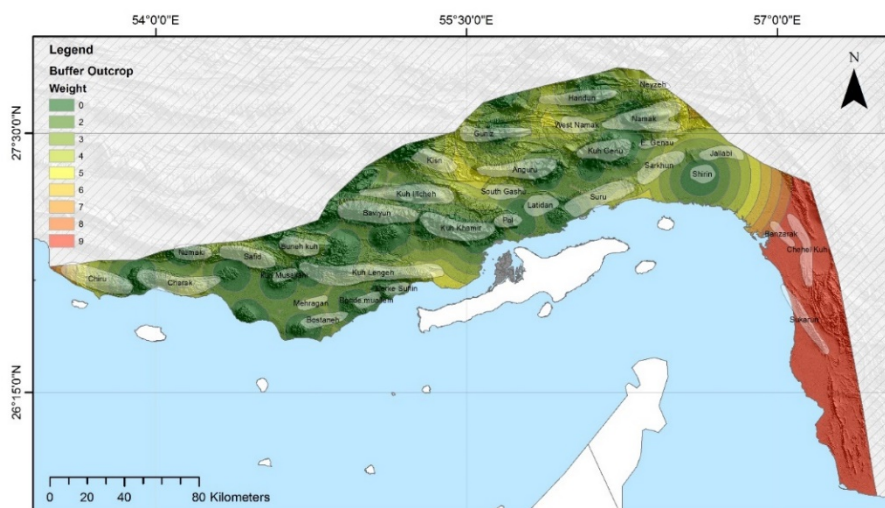
قرار گرفتن در عمق تدفین کم را نیز از آن ها بگیرد. به عبارتی حرکت رو به بالای نمک ژرفای تدفین سنگ منشا را کاهش می دهد و این امر منجر می شود که سنگ منشا از بلوغ کافی جهت تولید هیدروکربور برخوردار نشود. همچنین افزایش تخلخل و تراوایی پوش سنگ هنگام بالا آمدن توده نمک منجر به کاهش قابلیت سنگ پوشش خواهد شد. حرکت رو به بالای توده نمک کاهش ضخامت پوش سنگ را نیز به دنبال خواهد داشت (Davis, and Engelder, 1987; Szabo and Kheradpir, 1987). با توجه موارد یاد شده می توان دریافت که در حرکت صعودی نمک، پوش سنگ و سنگ منشا در شرایط خوبی قرار نمی گیرند. لذا گنبد ها به عنوان دومین عامل مهم مخرب برای انباشت هیدروکربور در نظر گرفته شد. گنبد های نمکی همچون رخنمون سازندها با دور شدن از آن ها پتانسیل هیدروکربوری افزایش می یابد. لذا مناطقی که در نزدیکی گنبد های نمکی هستند امتیاز صفر و مناطقی که در فاصله به مراتب دورتری هستند حداکثر امتیاز ۹ در نظر گرفته شد. از آنجایی که رخنمون سطحی سازندها و نیز گنبد های نمکی تاثیر مخرب دارند و با دور شدن از آن ها پتانسیل افزایش می یابد لذا این دو مورد با هم تلفیق و به عنوان نقشه واحد در نظر گرفته شدند (شکل ۲).

قابلیت پوش سنگ می باشد. لذا در مناطقی که سازند های کژدمی، ایلام، سروک، گورپی، پابده و سازندهای قدیمی تر از آن ها رخنمون داشته باشند آن مناطق فاقد ارزش هیدروکربوری خواهند بود.

از نقشه زمین شناسی ناحیه هیتزلند در مناطقی که سازند های پابده، گورپی، ایلام، سروک، گروه بنگستان، کژدمی و واحدهای قدیمی تر دارای رخنمون بودند، استخراج گردید. با دور شدن از این رخنمون ها پتانسیل تولید هیدروکربور برای سازند کژدمی و نیز پتانسیل مخزنی سازندهای سروک و ایلام (گروه بنگستان) افزایش می یابد. لذا مناطقی که در نزدیکی این رخنمون ها هستند امتیاز صفر و مناطقی که در فاصله به مراتب دورتری هستند حداکثر امتیاز ۹ در نظر گرفته شد.

### گنبد های نمکی

در منطقه هیتزلند بندرعباس گنبد های نمکی متعددی حضور دارند. حرکت روبه بالای گنبد های نمکی می تواند لایه های رسوبی به ویژه سنگ های منشا را تا آن حد بالا بیاورد که تحت تاثیر فرسایش فیزیکی قرار بگیرند و علاوه بر کاهش ضخامت سنگ های منشا، توان زایشی هیدروکربور به دلیل

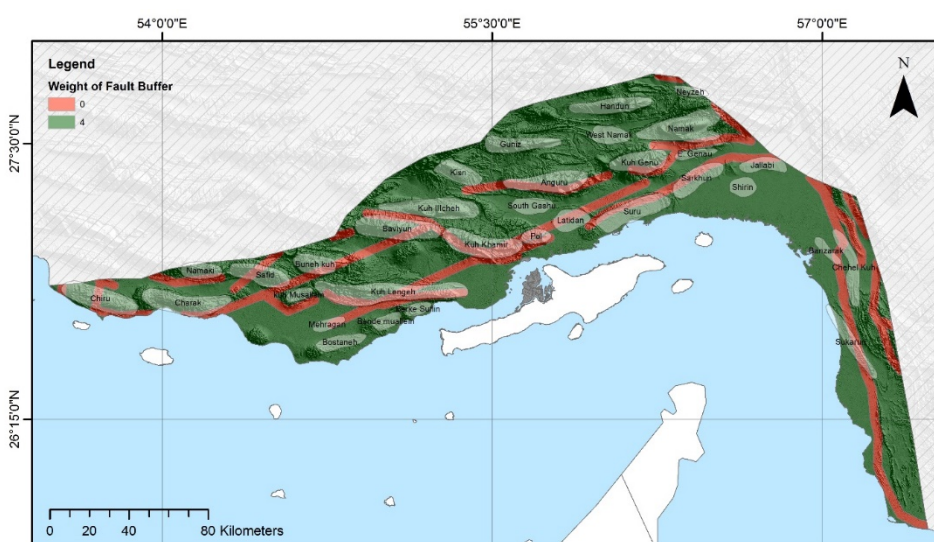


شکل ۲: نقشه حریم بندی فاصله از رخنمون ها به همراه امتیاز و اهمیت آن ها (مناطق سبز رنگ مناطق با کمترین اهمیت و مناطق قرمز رنگ مناطق با بالاترین اهمیت) گسل ها

## گسل ها

گسل های اصلی منطقه اقدام به تهیه نقشه فاصله از گسل ها گردید. مناطق با فاصله کمتر از ۲ کیلومتر از گسل به عنوان مناطق با پتانسیل کمتر و امتیاز صفر و مناطق با فاصله بیشتر ۲ کیلومتر از گسل به عنوان مناطق با پتانسیل بیش تر اکتشافی در نظر گرفته شدند و به آن امتیاز ۴ تعلق گرفت (شکل ۳). با فاصله گرفتن از گسل ها پتانسیل اکتشافی افزایش خواهد یافت.

هینترلند بندرعباس دارای گسل های پی سنگی و عمقی فراوانی است. گسل های بستک و بستانه از جمله مهم ترین و اثرگذار ترین گسل های این منطقه محسوب می شوند. عملکرد گسل های این منطقه به همراه فعالیت دیاپیرهای نمکی تغییر سبک چین خوردگی و نیز تغییر روند ساختارهای تاقدیسی را به همراه داشته است. لذا با استخراج



شکل ۳. نقشه حریم بندی فاصله از گسل ها به همراه امتیاز و اهمیت آن

and van der Pluijm, 1999, Rosas et al. (2006), مناطق (Spratt et al., 2004; Stephens, 2001 and 2009 با ضخامت زیاد بیانگر بخش عمیق حوضه و نواحی با ضخامت کم بیانگر بخش کم عمق تر حوضه در زمان رسوبگذاری می باشند (Pirouz et al, 2008). رسوبگذاری در بخش عمیق حوضه در زمان نهشته شدن سازندهایی با قابلیت سنگ منشا می تواند شرایط مناسبی جهت حفظ و انباشت مواد آلی را در گذشته ایجاد نموده باشد. لذا مناطق با ضخامت زیاد سازند کژدمی علاوه بر دارا بودن مواد آلی مناسب می توانند پتانسیل بالاتری نیز جهت تولید هیدروکربور داشته باشند. این درحالی است که قرارگیری سازندها با قابلیت مخزنی در بخش عمیق می تواند منجر به

## نقشه های هم ضخامت

نقشه های هم ضخامت ابزار مهم و اثر گذاری هستند که به وسیله آن می توان چگونگی روند رسوبگذاری و پالئوژئوگرافی حوضه رسوبی در یک ناحیه را مشخص نمود. Kay (1945) برای نخستین بار از نقشه های هم ضخامت به منظور ارزیابی توالی ساختاری استفاده نمود (Howell and van der Pluijm, 1999). نقشه های هم ضخامت بالا آمدگی ها و فرونشست حوضه ناشی از تحولات پی سنگ را به خوبی بازگو می کنند (Setudehnia, 1978; Bahroudi and Talbot, 2003) Howell, Calvert (1974, Cheng-Long Shaw, 1996

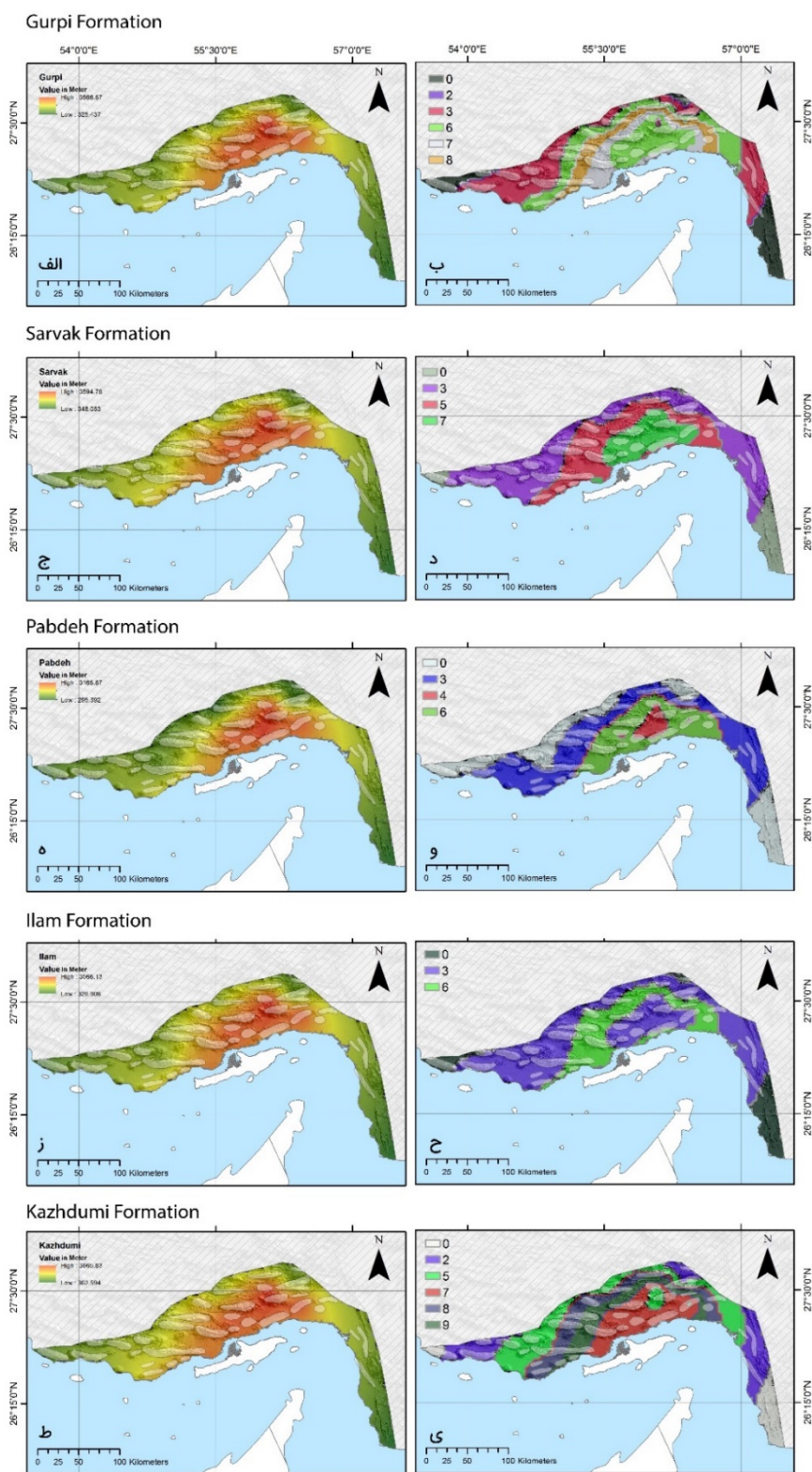


جدول ۱: امتیازهای تعلق گرفته به سازندهای گورپی، سروک، پابده، ایلام و کژدمی بر اساس تغییرات ضخامت

سازند سروک		سازند کژدمی	
امتیاز	ضخامت (متر)	امتیاز	ضخامت (متر)
۵	۱۰۰-۰	۳	۵۰-۰
۶	۲۰۰-۱۰۰	۵	۱۰۰-۵۰
۴	۳۰۰-۲۰۰	۶	۱۵۰-۱۰۰
۳	۴۰۰-۳۰۰	۸	۲۰۰-۱۵۰
سازند ایلام		۹	۲۵۰-۲۰۰
سازند گورپی		سازند سروک	
امتیاز	ضخامت (متر)	امتیاز	ضخامت (متر)
۴	۵۰-۰	۲	۵۰-۰
۵	۱۰۰-۵۰	۳	۱۰۰-۵۰
سازند پابده		۴	۱۵۰-۱۰۰
امتیاز	ضخامت (متر)	۵	۲۰۰-۱۵۰
۱	۳۰۰-۰	۶	۲۵۰-۲۰۰
۳	۶۰۰-۳۰۰	۷	۳۰۰-۲۵۰
۴	۹۰۰-۶۰۰	۸	۴۰۰-۳۰۰
۲	۱۳۰۰-۹۰۰		

کاهش تخلخل سازندها و نیز کاهش پتانسیل مخزنی شود. همچنین بالا آمدگی ها علاوه بر اینکه می تواند منجر به فرسایش شود، اثرات مخربی را بر روی سنگ منشا و پوش سنگ خواهد داشت. این اثرات می تواند شامل عدم تجمع مواد آلی و یا ایجاد شرایط اکسیداسیون و تخریب مواد آلی را به دنبال داشته باشد. اگرچه بالا آمدگی می تواند منجر به افزایش تخلخل و محفوظ ماندن تخلخل اولیه در سنگ های مخزن گردد با این حال در ارزش گذاری هر یک از سازندهای کژدمی، سروک، ایلام، گورپی و پابده موارد یاد شده لحاظ گردید. براین اساس لایه های ایجاد شده متناسب با اهمیتشان بر اساس تغییرات ضخامت مطابق جدول (۱) امتیاز دهی شدند (شکل ۴).





شکل ۴. نقشه حجم رسوبات فوقانی به همراه امتیازهای تعلق گرفته به آن برای سازندهای گورپی، سروک، پابده، ایلام و کزدمی



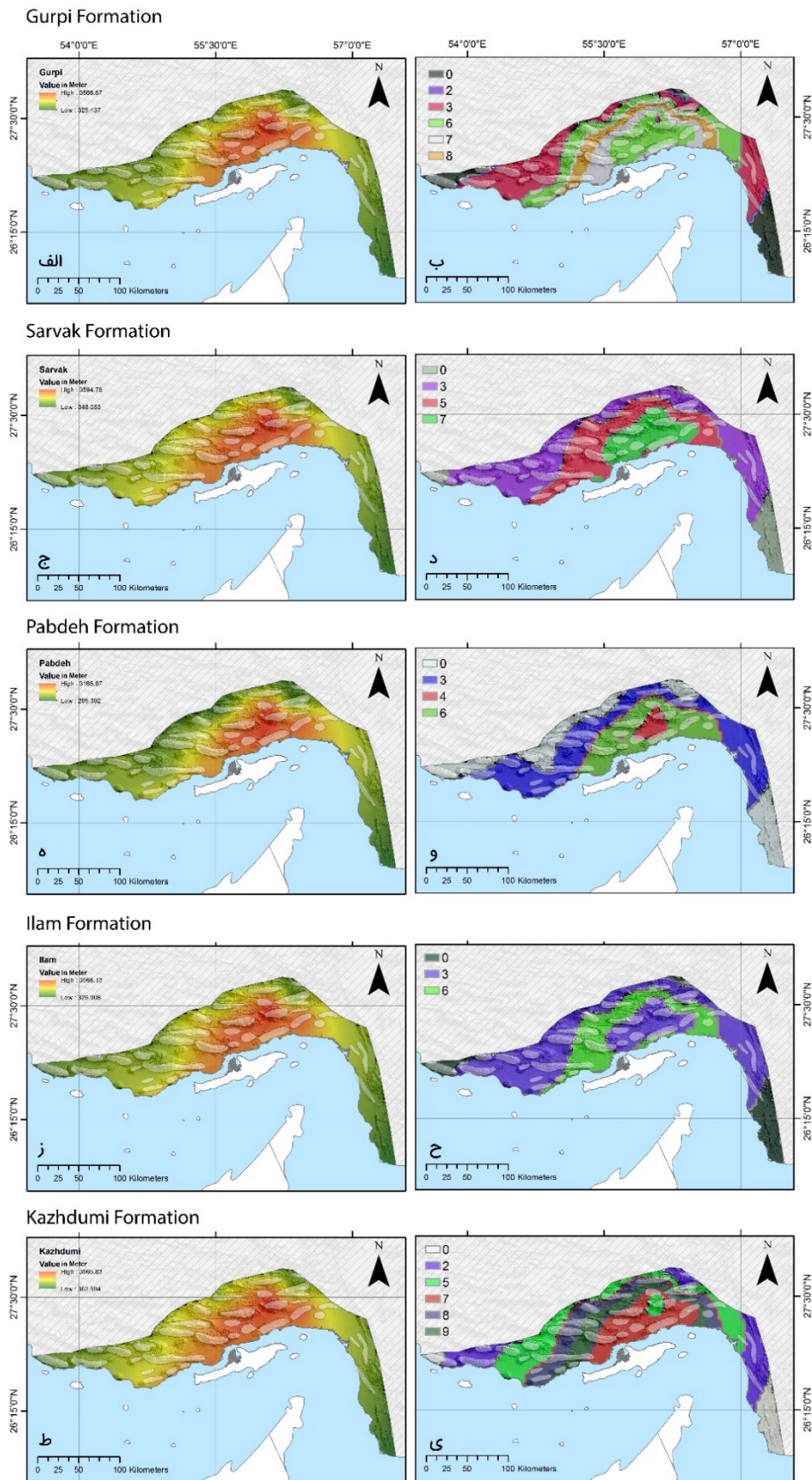
## نقشه رسوبات فوقانی سازندها

جدول ۲: امتیازهای تعلق گرفته به سازندهای گورپی، سروک، پابده، ایلام و کژدمی بر اساس ضخامت رسوبات فوقانی هر سازند

سازند سروک		سازند کژدمی	
امتیاز	ضخامت رسوبات فوقانی (متر)	امتیاز	ضخامت رسوبات فوقانی (متر)
۰	۱۰۰۰-۰	۰	۱۰۰۰-۰
۳	۲۰۰۰-۱۰۰۰	۲	۱۵۰۰-۱۰۰۰
۷	۳۰۰۰-۲۰۰۰	۵	۲۰۰۰-۱۵۰۰
۵	۴۰۰۰-۳۰۰۰	۸	۲۵۰۰-۲۰۰۰
سازند ایلام		۹	۳۰۰۰-۲۵۰۰
امتیاز	ضخامت رسوبات فوقانی (متر)	۷	۳۵۰۰-۳۰۰۰
۰	۱۰۰۰-۰	۵	۴۰۰۰-۳۵۰۰
۳	۲۰۰۰-۱۰۰۰	سازند گورپی	
۶	۳۰۰۰-۲۰۰۰	امتیاز	ضخامت رسوبات فوقانی (متر)
۳	۴۰۰۰-۳۰۰۰	۰	۱۰۰۰-۰
سازند پابده		۳	۱۵۰۰-۱۰۰۰
امتیاز	ضخامت رسوبات فوقانی (متر)	۶	۲۰۰۰-۱۵۰۰
۰	۱۰۰۰-۰	۸	۲۵۰۰-۲۰۰۰
۳	۲۰۰۰-۱۰۰۰	۷	۳۰۰۰-۲۵۰۰
۶	۳۰۰۰-۲۰۰۰	۶	۳۵۰۰-۳۰۰۰
۴	۴۰۰۰-۳۰۰۰	۲	۴۰۰۰-۳۵۰۰

حجم رسوبات فوقانی نهشته شده بر روی سازندهای کژدمی، سروک، ایلام، گورپی و پابده معیار دیگری است که در این مطالعه لحاظ گردید و با استفاده از داده های چاه های حفاری شده در ناحیه هینترلند حجم فوقانی رسوبات استخراج و نقشه های مربوطه تهیه شدند. از آنجایی که تغییر در عمق تدفین سنگ منشا تاثیر مستقیمی بر روی بلوغ ماده آلی و نیز تولید هیدروکربور خواهد داشت از این رو جهت بررسی سازند کژدمی به عنوان سنگ منشا شناخته شده در زاگرس، نقشه حجم رسوبات فوقانی برای سازند کژدمی تهیه گردید. ارزش دهی به سازندهای کژدمی، سروک، ایلام، پابده و گورپی بر مبنای پارامترهایی نظیر عمق پنجره نفت زایی و نیز عمق دیاژنز، کاتازنز و متاژنز انجام پذیرفت. همچنین با توجه به حجم رسوبات فوقانی سازندها اثر رخنمون سازندها نیز به صورت غیر مستقیم لحاظ می گردد و مناطقی که حجم رسوبات فوقانی کاهش می یابد بیانگر نزدیک بودن به سطح زمین می باشد.

حجم رسوبات نهشته شده بر روی سازندهای سروک و ایلام می تواند کنترل کننده تخلخل و شکستگی های موجود در مخزن باشد، این موضوع نیز برای سنگ های پوشش نیز صدق می کند. براین اساس لایه های ایجاد شده متناسب با اهمیتشان بر اساس ضخامت رسوبات فوقانی هر سازند مطابق جدول (۲) امتیاز دهی شدند (شکل ۵).



شکل ۵: نقشه حجم رسوبات فوقانی به همراه امتیازهای تعلق گرفته به آن برای سازندهای گورپی، سروک، پابده، ایلام و کژدومی

## مدل فازی

شناسایی بالاترین ارزش عضویت برای هر یک از معیارهای ورودی را داشته باشیم، مفید خواهد بود.

$$\mu_{Combine} = \text{Max}(\mu_A, \mu_B, \mu_C, \dots) \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این رابطه  $\mu_A, \mu_B, \mu_C, \dots$  به ترتیب مقادیر عضویت فازی گنگ برای نقشه های A, B, C, ... در یک موقعیت بخصوص از هر نقشه می باشند.

### عملگر AND

این عملگر با استفاده از رابطه (۲) تعریف می شود (Tangestani, 2003). عملگر AND حداقل مقدار را از مجموعه فازی در نظر می گیرد. هنگامی که برای اثبات فرضیه ای باید چندین فاکتور با هم حضور داشته باشند و یا بخواهیم حداقل ویژگی مشترک را برای معیارهای ورودی شناسایی کنیم از عملگر AND استفاده می شود.

$$\mu_{Combine} = \text{Min}(\mu_A, \mu_B, \mu_C, \dots) \quad (\text{رابطه ۲})$$

در این رابطه  $\mu_A, \mu_B, \mu_C, \dots$  به ترتیب مقادیر عضویت فازی گنگ برای نقشه های A, B, C, ... در یک موقعیت بخصوص از هر نقشه می باشند.

### عملگر SUM

این عملگر با استفاده از رابطه (۳) تعریف می شود (Tangestani, 2003). منظور از عملگر SUM، جمع جبری نیست و نباید با جمع وزن ها اشتباه گرفته شود. به عبارت بهتر در این روش فرض بر این است ورودی مطلوب تر بهتر است و اثر فزاینده بر روی پیکسل ها دارد.

$$\mu_{Combine} = 1 - \prod_{f=1}^n (1 - \mu_f) \quad (\text{رابطه ۳})$$

در منطق فازی، میزان عضویت یک عنصر در یک مجموعه، با مقداری در بازه یک (عضویت کامل) تا صفر (عدم عضویت کامل) تعریف می شود (An et al. 1991; Novriadi et al. 2006, Tangestani 2009, de Gruijter et al. 2011). درجه عضویت معمولاً با یک تابع عضویت بیان می شود که شکل تابع می تواند بصورت خطی، غیرخطی، پیوسته و یا ناپیوسته باشد (Bonham-Carter, 1991). در مدل فازی، به هر یک از پیکسلها در هر نقشه فاکتور مقداری بین صفر تا یک اختصاص داده می شود که بیانگر میزان مناسب بودن محل پیکسل از دیدگاه معیار مربوطه برای هدف مورد نظر می باشد. پس از تشکیل نقشه های مربوط به هر یک از فاکتورها، مقادیر عضویت موجود در آنها به کمک عملگرهای فازی با یکدیگر ترکیب می شوند. پنج عملگر فازی که می تواند برای تلفیق نقشه های فاکتور سودمند باشد، عبارتند از: Product، SUM، AND، OR، و Gamma.

### عملگرهای فازی

پس از تهیه نقشه های مدل فازی، لازم است تلفیق نقشه ها با استفاده از عملگرهای فازی انجام گیرد. انتخاب عملگرهای فازی مناسب جهت تلفیق لایه های مختلف با توجه به ارتباط و برهم کنش عوامل مربوط به لایه ها انجام می گیرد (Tangestani, 2003).

### عملگر OR

این عملگر با استفاده از رابطه (۱) تعریف می شود (Tangestani, 2003). عملگر OR حداکثر مقدار را از مجموعه فازی در نظر میگیرد. به عبارت بهتر خوشبینانه ترین حالت را در نظر میگیرد. این عملگر هنگامی که قصد





## عملگر Gamma

عملکرد عملگر های AND، SUM و GAMMA استفاده گردید.

اثر عملگر AND: ابتدا فاکتور نقشه های هم ضخامت و نقشه های ر سوبات فوقانی سازندها به تفکیک هر سازند و جداگانه با استفاده از عملگر AND تلفیق شدند. با توجه به اینکه ویژگی های مشترک برای ورودی های نقشه هم ضخامت و نقشه رسوبات فوقانی برای هر سازند مد نظر است لذا با استفاده از عملگر AND مناطق مشترک و دارای اهمیت برای سازندهای کژدمی، سروک، ایلام، گورپی و پابده به طور جداگانه تلفیق گردیدند. همچنین فاکتورهای فاصله از گسل و رخنمون سازندها نیز با استفاده از عملگر AND تلفیق شدند (شکل ۷).

این عملگر با استفاده از رابطه (۴) تعریف می شود (Tangestani, 2003). عملگر Gamma حاصل ترکیب فازی SUM و Product بوده که اگر مقدار  $\gamma$  در رابطه (۴) برابر ۱ باشد خروجی برابر با SUM خواهد بود و اگر مقدار  $\gamma$  برابر ۰ باشد خروجی برابر با Product خواهد بود. همچنین مقادیر بین ۰ و ۱ شامل OR و AND خواهد بود.

(رابطه ۴)

$$\mu_{Combine} = \left( \prod_{f=1}^n \mu_f^{1-\gamma} \right) \times \left( 1 - \prod_{f=1}^n (1 - \mu_i)^\gamma \right)$$

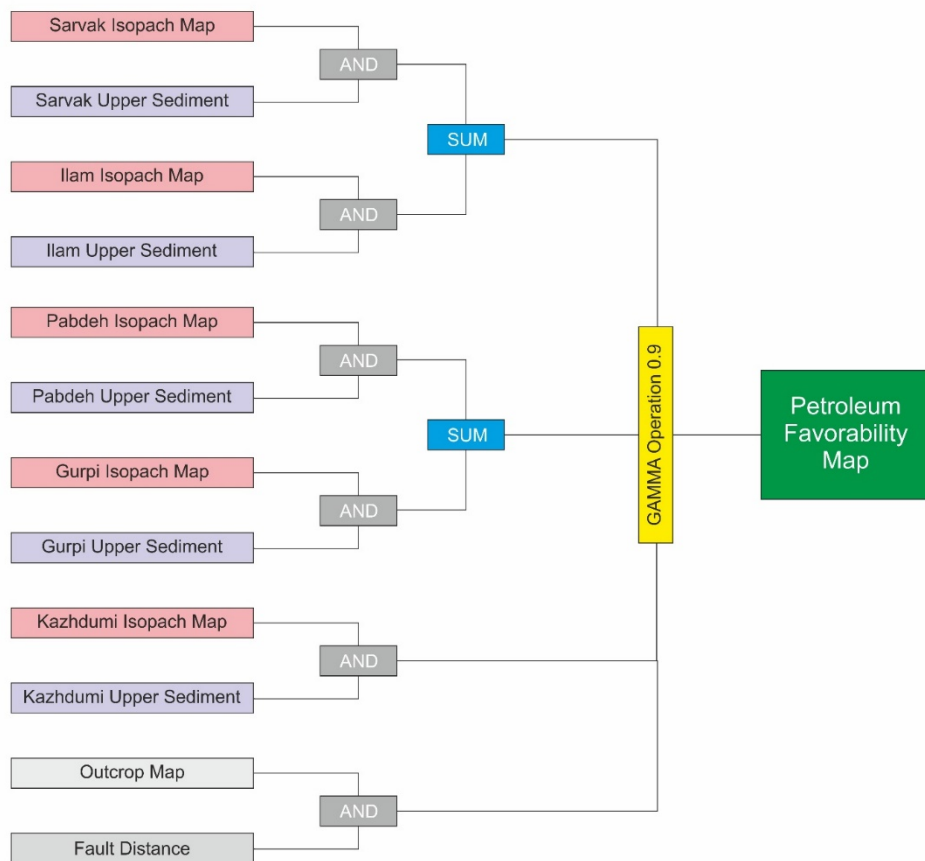
تعیین صحیح و آگاهانه  $\gamma$  منجر به ارائه خروجی های سازگار با هدف خواهد شد. در واقع تعیین این مقدار تصمیم گیری اهداف اکتشافی را به بهترین نحو بازگو می نماید.

## تلفیق نقشه ها و طراحی شبکه های استنتاجی فازی

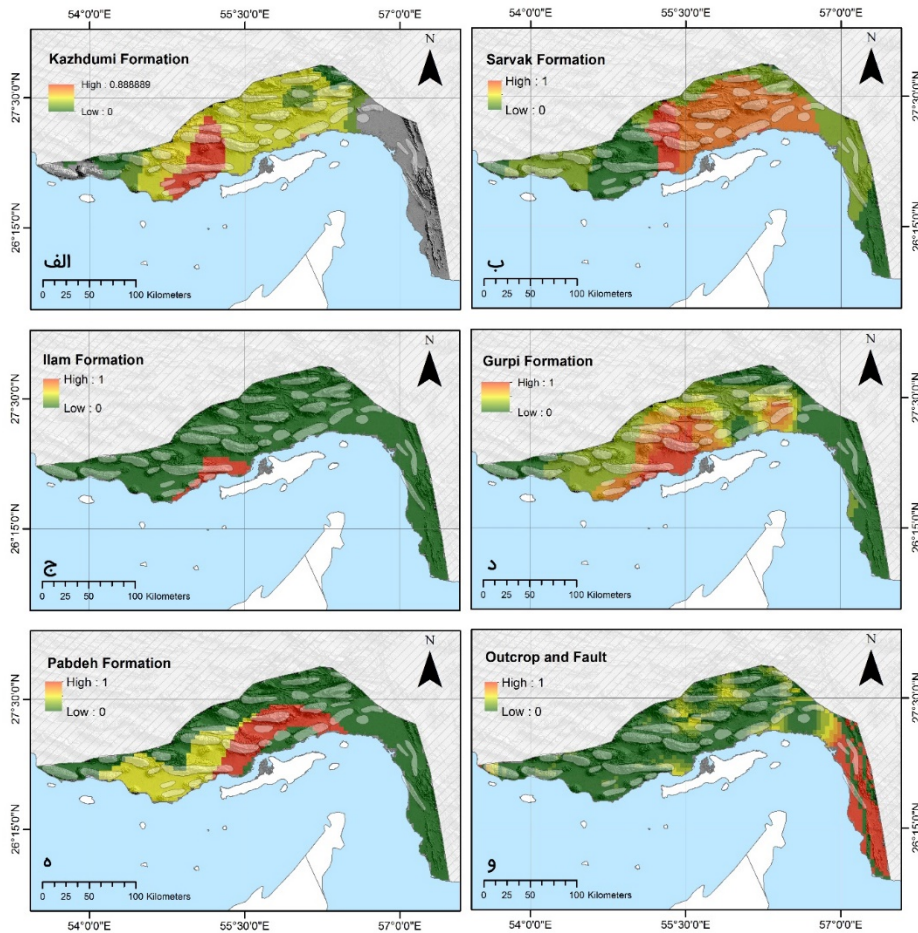
معمولاً نمی توان کلیه لایه های مورد نیاز را تنها با یک عملگر تلفیق نمود. به همین دلیل اغلب جهت تلفیق لایه های اطلاعاتی مختلف در روش فازی به جای استفاده از یک عملگر، شبکه های استنتاج فازی با استفاده از عملگرهای مختلف ایجاد می شود. در شبکه استنتاجی بجای اینکه کلیه نقشه های فاکتور در یک مرحله تلفیق شوند. فاکتورها بر اساس دانش کارشناسی، ماهیت و نقش هر یک از آنها در تعیین مکان های دارای پتانسیل اکتشافی و ارتباط آنها با یکدیگر، کلاس بندی شده و لایه های اطلاعاتی مربوطه در مراحل مختلف تلفیق می گردند.

در این مطالعه شبکه استنتاجی به گونه ای طراحی شده است که خروجی نهایی به صورت محافظه کارانه ارائه شود (شکل ۶). انتخاب عملگر فازی با توجه به منطق های مختلف می تواند متفاوت باشد. در شبکه استنتاجی طراحی شده از





شکل ۶: شبکه استنتاجی طراحی شده به منظور دستیابی به نقشه پتانسیل هیدروکربوری افق های سروک و ایلام



شکل ۷: تلفیق نقشه های فازی شده با استفاده از عملگر AND در ناحیه هیسترنند بندرعباس (مناطق قرمز رنگ بیانگر نواحی با پتانسیل بالا برای افق های مختلف می باشند) الف) تلفیق نقشه های همضخامت و حجم رسوبات فوقانی سازند کژدمی (ب) تلفیق نقشه های همضخامت و حجم رسوبات فوقانی سازند سروک (ج) تلفیق نقشه های همضخامت و حجم رسوبات فوقانی سازند ایلام (د) تلفیق نقشه های همضخامت و حجم رسوبات فوقانی سازند گورپی (ه) تلفیق نقشه های همضخامت و حجم رسوبات فوقانی سازند پابده (و) تلفیق نقشه های گسل های اصلی و رخنمون سازندها

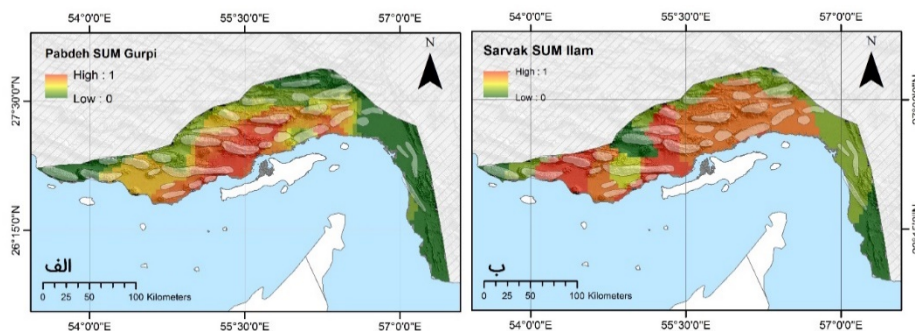
از عملگر SUM باعث می شود که اثر سازندهای ایلام و سروک و سازندهای پابده و گورپی جداگانه و بصورت مکمل هم لحاظ شوند. به عبارتی دو سازند سروک و ایلام همچنین دو سازند گورپی و پابده اثر افزایشی روی هم دارند و دسترس همزمان به هر دو سازند مزیتی به حساب می آید (شکل ۸).

اثر عملگر GAMMA: در صورت استفاده از عملگر SUM اگر در یک پیکسل چندین پارامتر دخالت داشته باشند اثر افزایشی این عملگر باعث می شود وجود پارامترها با مقدار کم نیز

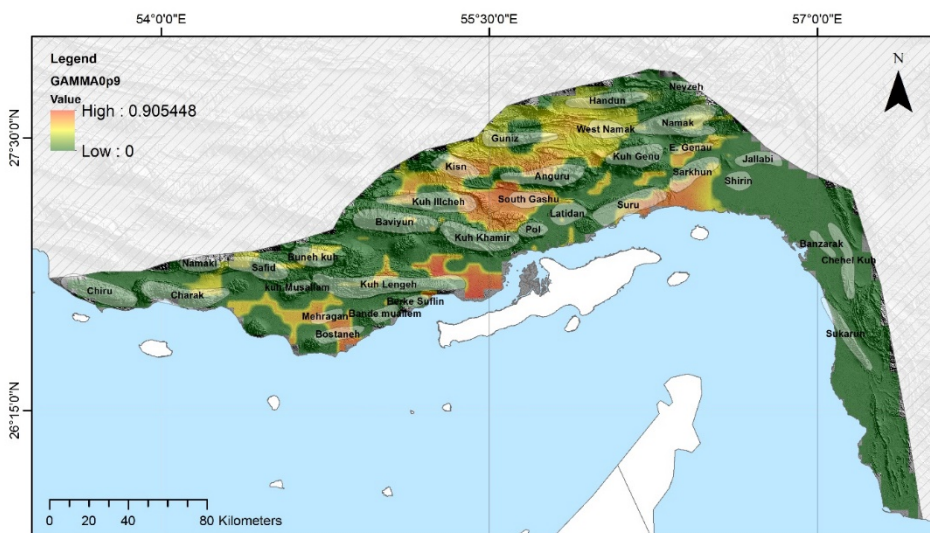
اثر عملگر SUM: در این مطالعه سازندهای سروک و ایلام به عنوان سازندهایی با قابلیت مخزنی، سازندهای گورپی و پابده به عنوان پوش سنگ مطرح هستند. از آنجایی که سازندهای سروک و ایلام به عنوان سنگ مخزن مکمل یکدیگراند لذا نقشه خروجی هر یک از این سازندها که در مرحله قبل با تلفیق نقشه های همضخامت و رسوبات فوقانی با عملگر AND ایجاد گردیده بود در این مرحله با استفاده از عملگر SUM تلفیق شدند. این عمل نیز برای سازندهای گورپی و پابده با قابلیت پوش سنگی نیز لحاظ گردید. استفاده

هیدروکربوری افق های سروک و ایلام برای منطقه هینترلند بندرعباس بدست آمد (شکل ۹).

افزایش یابد لذا برای خشی کردن این اثر از عملگر GAMMA استفاده گردید. در نهایت نقشه های پتانسیل سنگ مخزن، منشا و پوش سنگ با عملگر GAMMA تلفیق و نقشه پتانسیل



شکل ۸: نقشه های توزیع مناطق دارای پتانسیل با قابلیت پوش سنگ و سنگ مخزن بودن افق مورد مطالعه در ناحیه هینترلند بر مبنای نقشه های هم ضخامت و رسوبات فوقانی و بدون در نظر گرفتن گسل ها و رخنمون سازندها به همراه مراحل تلفیق و تهیه نقشه ها (مناطق قرمز رنگ بیانگر نواحی با پتانسیل بالا می باشند) (الف) نقشه مناطق مستعد برای پوش سنگ افق سروک و ایلام (ب) نقشه مناطق مستعد برای سنگ مخزن



شکل ۹: نقشه پتانسیل هیدروکربوری افق های سروک و ایلام در ناحیه هینترلند بندرعباس با در نظر گرفتن اثر گسل ها و رخنمون ها

(شکل ۹) مشخص گردید که ۶۸ درصد از منطقه هینترلند دارای پتانسیل هیدروکربوری بسیار پایین، ۱۸ درصد دارای پتانسیل هیدروکربوری متوسط و تنها ۱۴ درصد دارای پتانسیل

نتایج حاصل از تلفیق نقشه ها و شبکه استتاجی

با تعیین محدوده برای مناطق دارای پتانسیل بالا، متوسط و پایین نقشه پتانسیل هیدروکربوری افق های سروک و ایلام



### نتیجه گیری

با توجه به اینکه در بسیاری از این تاقدیس ها حفاری انجام شده است. در بسیاری موارد همخوانی مناسبی میان نقشه حاصل از شبکه استنتاجی با میداین دارای هیدروکربور در افق سروک و ایلام مشاهده شد برای نمونه می توان به وجود هیدروکربور در تاقدیس گشو جنوبی در افق سروک اشاره نمود. لذا می توان دریافت که منطق فازی به عنوان یک منطق چند ارزشی اگر شبکه استنتاجی مناسبی متناسب با داده های ورودی برای آن تهیه شود می تواند مناطق با پتانسیل بالای اکتشافی را به بهترین شکل ممکن شناسایی نماید. به عبارت دیگر منطق فازی این امکان را فراهم می سازد تا تحلیل های متفاوت از داده ها که ناشی از نظرات متفاوت در خصوص پدیده های اکتشافی است را با هم تلفیق نمود و هم زمان نقشه پتانسیل واحدی با قابلیت در نظر گرفتن دیدگاه های مختلف تهیه نمود.

هیدروکربوری بالایی جهت اکتشاف در افق سروک و ایلام می باشند. این درحالی است که با در نظر گرفتن اثر تاقدیس ها درصد های یاد شده برای مناطق با پتانسیل بالای هیدروکربوری به ۴,۳ درصد کاهش پیدا کرد.

با توجه به شکل ۸ که بیانگر مناطق مستعد سنگ مخزن و پوش سنگ می باشد و نیز شکل ۷ الف که وضعیت مناطق مستعد سازند کژدمی جهت سنگ منشا بودن را نشان می دهد به نظر می رسد پتانسیل مخزنی سروک و ایلام در منطقه هیتزلند بر خلاف دیگر مناطق زاگرس نسبتا پایین بوده و سازندهای سروک و ایلام به جز در بخش های میانی داری پتانسیل هیدروکربوری بالایی نمی باشند.

با توجه به شبکه استنتاجی طراحی شده به نظر می رسد تاقدیس های گشو جنوبی، بستانه، کیسن، نمک غربی و سورو در افق های سروک و ایلام دارای پتانسیل هیدروکربوری هستند.



- De, G.J.J., Walvoert, D.J.J. and Bragato, G., 2011. Application of fuzzy logic to Boolean models for digital soil assessment. *Journal of Geoderma*, 166, 15–33.
- Falcon, N.L., 1961. Major earth-flexing in me Zagros Mountains of southwest Iran. *Quarterly Journal Geological Society of London*, 117, 367-376.
- Falcon, N.L., 1974. Southern Iran: Zagros Mountains: in Mesozoic-Cenozoic orogenic belts, Data for orogenic studies: Alpine-Himalayan Orogens. *Geol. Soc. Lond., Sepc. Publ.*, 4, 199-211.
- Falcon, N.L., 1976. The geology of northeast margin of Arabian basement shield. *Adv. Sci. Lond.*, 31-42.
- Gao, H., Chen, Z., Osadetz, K.G., Hannigan, P. and Watson, C., 2000. A pool-based model of the spatial distribution of undiscovered petroleum resources. *Math. Geol.*, 32, 725–749.
- Hayens, S.J. and Mcquillan H., 1974. Evolution of the Zagros suture zone, southern Iran. *Geological Society of America Bulletin*, 85, 739-744.
- Hessami, K., Koyi, H.A. and Talbot, C.J., 2001a. The significance of strike-slip faulting in the basement of the Zagros fold and thrust belt. *Journal of Petroleum Geology*, 24, 5–28.
- Howell, P.D. and Van Der Pluijm B.A., 1999. Structural sequences and styles of subsidence in the Michigan basin. *Geological Society of America Bulletin*, 111, 7, 974–991.
- Jagadish, C.M. and Rao, N.A., 2010. Role of Remote Sensing and GIS to Provide Geological Input for Hydrocarbon Exploration – A Case Study on Godavari Basin Rajahmundry. Paper presented at the 8th Biennial International Conference and Exposition on Petroleum Geophysics, Hyderabad.
- Jahani, S., 2009. Salt Tectonic, Folding and Fault- ing in eastern Fars and southern Offshore Provinces (Iran). PhD. Thesis, Cergy-Pontoise University.
- Kay, G.M., 1945. Paleogeographic and palinspastic maps. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 29, 426–450.
- Liping, Y., 2011. Study on the Relationship between Fault System and Oil-Gas Sedimentary in Junggar Basin Based on GIS. Paper presented at the Power and Energy Engineering Conference, Wuhan.
- Lotfi, A.Z., 1965, Fuzzy sets. *Information and Control* 8 (3), 338–353.
- آفانباتی، ع.، ۱۳۸۵. زمین شناسی ایران، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- مطیعی، ه.، ۱۳۷۴. زمین شناسی نفت زاگرس ۱ و ۲، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- Abd Latef, M.Z and Kahar, R.B., 2008. Oil and gas exploration in Ethiopia using GIS. Paper presented at the Map Asia Conference, Kuala Lumpur.
- Aminzadeh, F., 1994. Applications of fuzzy expert systems in integrated oil exploration. *Computers and Electrical Engineering*, 20, 89-97.
- Amiri, M.A., Karimi M. and Sarab A.A., 2015. Hydrocarbon resources potential mapping using the evidential belief functions and GIS, Ahvaz/Khuzestan Province, southwest Iran. *Arab J Geosci* 8, 3929–3941.
- An, P., Moon, W.M. and Rencz, A., 1991. Application of fuzzy set theory for integration of geological, geophysical and remote sensing data. *Canadian Journal of Exploration Geophysics*, 27, 1-11.
- Bahroudi, A. and Talbot C.J., 2003. The configuration of the basement beneath the Zagros Basin. *Journal of Petroleum Geology*, 26, 257-282.
- Barrll, K.A., 2000b. GIS: The Exploration and Exploitation Tool in Coburn. T.C. & YARUS J.M., eds., *AAPG Computer Applications in Geology*, Geographic information systems in petroleum exploration and development, 4, 237-248.
- Berberian, M. 1995. Master blind thrust faults hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics. *Tectonophysics*, 241, 193–224.
- Calvert, W.L., 1974. Sub-Trenton structure of Ohio, with views on isopach maps and stratigraphic sections as basis for structural myths in Ohio, Illinois, New York, Pennsylvania, West Virginia, and Michigan. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 58, 957–972.
- Davis, D.M. and Engelder, T., 1987. Thin-skinned deformation over salt, in LERCH I. & O'BRIEN J.J. (eds.), *Dynamical geology of salt and related structures*. Academic Press Inc., New york, 301-337.





- exploration plays beyond the Sigsbee Escarpment in the central Gulf of Mexico: GCSSEPM Foundation 21st Annual Bob F. Perkins Research Conference, 129-158.
- Stephens, B.P., 2009. Basement controls on subsurface geologic patterns and coastal geomorphology across the northern Gulf of Mexico: Implications for subsidence studies and coastal restoration: Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions, 59, 729-751.
- Stocklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran. AAPG Bulletin, 52, 165 pp.
- Szabo, F. and Kheradpir, A., 1978. Permian and Triassic Stratigraphy Zagros Basin SW Iran. Jour. Petroleum Geology, 2, 57-82.
- Tabatabai, H., 1997. Integration interpretation of basement fault and geological maps Zagros area. Scale 1:1000000. National Iranian Oil Company, Exploration Directorate.
- Taghizadeh, F.F., Afsari, N. and Sodoudi, F., 2015. Crustal Thickness of Iran Inferred from Converted Waves. Pure and Applied Geophysics, 172, 309.
- Tangestani, M., 2009. A comparative study of Dempster-Shafer and fuzzy models for landslide susceptibility mapping using a GIS: An experience from Zagros Mountains, SW Iran. Journal of Asian Earth Sciences, 35, 66-73.
- Tangestani, M., 2003. Landslide susceptibility mapping using the fuzzy gamma operation in a GIS, Kakan catchment area, Iran. Map India Conference.
- Tounsi, M., 2005. An approximate reasoning based technique for oil assessment. Expert. Syst. Appl., 29, 485-491.
- Yassaghi, A., 2006. Integration of Landsat Image Interpretation and Geomagnetic Data on Verification of Deep-Seated Transverse Fault Lineaments in SE Zagros, Iran. International Journal of Remote Sensing, 27, 4529-4544.
- Zargani, S.S., Vaughan, R.A. and Missallati, A.A., 2003. Spatial integration of geological datasets for predictive hydrocarbon studies in Murzuq basin, SW Libya. Paper presented at the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toulouse.
- Malczewski, J., 1999. GIS and Multicriteria Decision Analysis. John Wiley and Sons, Toronto.
- Motamedi, H. and Tahmasebi, A., 2009. master plan of Hydrocarbon exploration, Fars area. NIOC, (unpublished report).
- Motamedi, H., Sherkati, S. and Sepehr, M., 2012. Structural style variation and its impact on hydrocarbon traps in central Fars, southern Zagros folded belt, Iran. Journal of Structural Geology, 37, 124-133.
- Novriadi, H.P.M. and Darijanto, T., 2006. Applying Fuzzy Logic Method in mineral potential mapping for epithermal gold mineralization in the Island of flores, East Nusa Tenggara using geographical information systems (GIS). Proceeding of 9th International Symposium on Mineral Exploration, 62-68.
- Okwu, M.O. and Nwachukwu, A.N., 2018. A review of fuzzy logic applications in petroleum exploration, production and distribution operations. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 9, 1555-1568.
- Pirouz, M., Bahroudi, A., Ghasemi, M.R. and Saeidi, A., 2008. Structural Evolution of the Basement and Activity of Salt Structures in Firuzabad Area, Fars. Geosciences, 17, 68, 40-55.
- Rosas, S., Fontbote, L. and Tankard, A., 2006. Tectonic evolution and paleogeography of the Mesozoic Pucará Basin, central Peru. Journal of South American Earth Sciences, 24, 1, 1-24.
- Setudehnia, A., 1978. The Mesozoic sequence in southwest Iran and adjacent areas. Journal of Petroleum Geology, 1, 3- 42.
- Shaw, C.L., 1996. Stratigraphic Correlation and Isopach Maps of the Western Taiwan Basin. TAO, 7, 333-360.
- Spratt, D.A., Dixon, J.M. and Beattie, E.T., 2004. Changes in structural style controlled by lithofacies contrast across transverse carbonate bank marginsd Canadian Rocky Mountains and scaled physical models, in: McClay, K.R. (Ed.), Thrust Tectonics and Hydrocarbon Systems. AAPG Memoir, 82, 259-275.
- Stephens, B.P., 2001. Basement controls on hydrocarbon systems, depositional pathways, and