

# تفکیک فازهای تنش دیرین با استفاده از داده‌های سطوح لغزش گسلی در منطقه خلخال

رامین صادقی<sup>۱</sup>، عبدالله سعیدی<sup>۲</sup>، مهران آرین<sup>۳</sup>، منوچهر قرشی<sup>۴</sup> و علی سلگی<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی دکترا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران  
<sup>۲</sup>استادیار، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران  
<sup>۳</sup>استاد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران  
<sup>۴</sup>دانشیار، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران  
<sup>۵</sup>دانشیار، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران  
 تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۰/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۵/۲۷

## چکیده

در این پژوهش، تفکیک فازهای تنش دیرین در منطقه خلخال با استفاده از تحلیل تنش دیرین بر پایه مطالعه داده لغزش گسلی ناهمگن و خطواره‌های لغزشی مربوطه صورت گرفته است. این داده‌ها از واحدهای سنگی ژوراسیک، کرتاسه و اتوسن برداشت شده است. برای تعیین سوی لغزش، از شاخص‌هایی چون جدایش چینه‌ای شاخص‌های ریخت‌شناسی سطح گسل، شکستگی‌های مزدوج، شکاف‌های کششی استفاده شده است. داده‌های صحرایی به کمک روش تحلیل برگشتی بررسی و مورد تفکیک قرار گرفت و مشخص شد که رژیم تنش امتدادلغز رژیم چیره در منطقه است. با انجام تفکیک فازهای تنش و مقایسه نتایج آن با داده‌های صحرایی و لرزه‌ای مشخص شد که رژیم تنش سوم با محور قائم و محور کشش شمال خاوری - جنوب باختری با داده‌های لرزه‌ای انطباق دارند و مربوط به فاز تنش جدید حاکم در منطقه است. رژیم‌های تنش اول و دوم با راستای شمال باختر - جنوب خاور و شمالی - جنوبی مربوط به تنش دیرینه است. بررسی‌های مختلف شامل تحلیل نمودار گل سرخی (رز دیاگرام) برای گسل‌های برداشت شده در هر محدوده و تحلیل آرایش ساختارهای موجود در منطقه، نشان می‌دهد عملکرد گسل‌های منطقه بیشتر به صورت امتدادلغز و امتدادلغز با مؤلفه عادی و شکل میدان تنش فازهای تفکیک شده در منطقه دوکی شکل است.

**کلیدواژه‌ها:** تفکیک فازهای تنش دیرین، چرخش، گسل‌های مزدوج، تحلیل لغزش گسل، خلخال.

\*نویسنده مسئول: رامین صادقی

E-mail: raminsadeghi54@gmail.com

## ۱- پیش‌نوشتار

شده که حاصل آن مجموعه‌ای از سنگ‌های آتشفشانی (گدازه‌ها و آذرآواری‌ها)، همراه با نهشته‌های رسوبی با ستبرای کل بیش از ۴۰۰۰ متر است (نظری و شهیدی، ۱۳۹۰). بخشی از این توالی شامل گدازه‌ها و آذرآواری‌ها با ترکیب عمومی آندزیتی - داسیتی همراه با سنگ آهک، مارن، و برخی رسوبات تخریبی است. افزون بر این مجموعه‌ای از سنگ‌های رسوبی - آتشفشانی با سن پالئوسن، اتوسن، الیگوسن و میوسن گسترش دارد (درویش‌زاده، ۱۳۸۵؛ شکل ۱).

پیشرفت دانش درباره مطالعات صحرایی و تنش دیرین نشان‌دهنده تکامل سنگ کره در مکان و زمان بوده و منشأ اولیه و ثانویه تنش‌های سنگ کره‌ای روابط میان صفحه‌ای و توپوگرافی بزرگ مقیاس است. برخی از پژوهشگران بر این باورند که الگوی تنش با زمان تغییر می‌کند؛ بنابراین باید ساختارهایی را شناسایی کرد که در اثر تنش‌های خاصی شکل می‌گیرند که در این راستا تحلیل کیفی و کمی ساختارهای شکننده مانند گسل‌ها، کلید قابل اعتمادی را برای فهم توزیع و تکامل میدان‌های تنش دیرین فراهم می‌آورد. در این مطالعه برای تحلیل داده‌ها از دو روش تحلیل محوره‌های P و T و روش دووجهی‌های عمود برهم استفاده شده است (Angelier, 1994). بازسازی تنش دیرین، تحلیل ساختارهای روی زمین است، که این روش امکاناتی را فراهم می‌سازد تا بتوان شرایط تنش را در گذشته تفسیر کرد و محیطی را که تنش در آن زمان بر آن عمل می‌کرده است، بازسازی و در نتیجه فرایندهایی را شناسایی کرد که به ایجاد ساختارها انجامیده‌اند. محاسبه تنش در زمین‌شناسی ساختاری نقش بزرگی در پژوهش‌های ساختارهای شکننده دارد. اطلاعات پایه برای چنین کاری، استفاده از صفحه‌های گسلی و خط‌خش‌های مربوط است (Angelier, 1990). خط‌خش‌ها، جهت و زوایای حرکت دو قطعه سنگی را نسبت به یکدیگر ثبت می‌کنند و آن به عنوان جهت بیشینه تنش برشی در نظر گرفته می‌شود.

## ۲- روش مطالعه

از آنجا که گسل‌های خش‌دار، مراحل دگرشکلی را در طی دگرشکلی پیش‌رونده ثبت می‌کنند، یکی از بهترین عوارض برای برداشت و تحلیل هستند، به همین دلیل، در این پژوهش، توجه ویژه‌ای به آنها شده و پایه کار بر برداشت گسل‌های خش‌دار بنا نهاده شده است. پس از برداشت داده‌های گسلی و پایدار کردن آنها با استفاده از روش وارونگی چندگانه فازهای تنش عمل کرده بر منطقه پس از ژوراسیک، کرتاسه، اتوسن و نوژن، تفکیک و معرفی می‌شود. سپس برای برگرداندن ساختارها به شرایط زمان تشکیل، داده‌های گسلی چرخانده و نقشه سوی محورهای تنش اصلی افقی رسم می‌شود.

## ۲- محدوده جغرافیایی و زمین‌ساختی

گستره مورد مطالعه در محدوده‌ای با مختصات  $49^{\circ}00'00''$  تا  $47^{\circ}58'00''$  طول خاوری و  $37^{\circ}05'00''$  تا  $37^{\circ}15'00''$  عرض شمالی جای دارد (شکل ۱). بخش خاوری گستره مورد مطالعه به پهنه‌های ساحلی دریای خزر می‌رسد؛ در بخش میانی آن کوه بوغروداغ (کوهستان تالش) قرار دارد و از باختر به فلات آذربایجان و از جنوب به رودخانه قزل‌اوزن و از شمال به دشت اردبیل محدود می‌شود. در تقسیمات زمین‌شناسی ایران در پهنه ساختاری - رسوبی البرز - آذربایجان جای دارد (آق‌ناباتی، ۱۳۸۹). فازهای کششی در کوهزایی آلپی (Alpine Orogeny)، موجب گسترده‌ترین فعالیت آتشفشانی در این منطقه همزمان با بخش‌های دیگر البرز

## ۴- ایستگاه‌های مطالعاتی

با توجه به رخنمون ساختارهای صفحه‌ای و خطی در منطقه، برداشت داده‌ها به بیش از ۳۰۰ صفحه گسلی، چین، درزه و پهنه برشی با دیدگاه جنبشی و زایشی (Kinematic and Dynamic Analysis) به ویژه داده‌های لغزش گسلی (Fault Slip Data) در ۵ محدوده جغرافیایی شامل ۱۰ ایستگاه انجام گرفته است: (۱) محدوده کلور به مختصات طول جغرافیایی  $49^{\circ}54'48''$  و عرض جغرافیایی  $37^{\circ}10'46''$  (۲) محدوده هشتچین به مختصات طول جغرافیایی  $48^{\circ}22'47''$  و عرض جغرافیایی  $37^{\circ}29'29''$  (۳) محدوده سرچم به مختصات طول جغرافیایی  $48^{\circ}06'46''$  و عرض جغرافیایی  $37^{\circ}24'25''$  (۴) محدوده لعمه‌دشت به مختصات طول جغرافیایی

## ۷- چرخش داده‌ها

بررسی‌های آماری ریک خط‌خسش‌های برداشت شده و محورهای اصلی تنش به دست آمده در واحدهای کوترنری نشان می‌دهد که با توجه به اینکه ساختار زمین‌ساختی راستالغز، ساختارهای چیره منطقه در این واحدها هستند (قرشی و آری، ۱۳۸۹). بنابراین بر پایه تئوری آندرسون، تنش اصلی میانه  $\sigma_2$  باید قائم باشد. همچنین بردارهای میانگین  $\sigma_1$  و  $\sigma_3$  به دست آمده از همه فازهای تفکیک شده این پنج محدوده در بازه زمانی کوترنر نشان می‌دهد که بردار میانگین  $\sigma_1$  در همه واحدهای کوترنر شمال باختری- جنوب خاوری است و بردار میانگین  $\sigma_3$  در این محدوده‌ها راستای شمال خاوری- جنوب باختری دارد. بر این اساس  $\sigma_2$  مربوط به میانگین تنسور تنش کاهش یافته به دست آمده برای این محدوده‌ها چرخانده می‌شود تا قائم شود. همه داده‌های لغزش گسلی نیز که در آن محدوده‌ها حضور دارند، بر پایه محور چرخش  $\sigma_2$  به کمک نرم‌افزار Tensor Win چرخانده شده و دوباره تنسور تنش کاهش یافته به دست آمده است. موقعیت محورها و میزان چرخش آنها برای هر محدوده متفاوت است. بنابراین موقعیت محورهای تنش پیش و پس از چرخش محورها برای ۵ محدوده یاد شده در جدول ۲ آمده است.

## ۸- نتیجه‌گیری

گسل‌ها، دارای دو راستای چیره شمال باختر- جنوب خاور و شمال خاور- جنوب باختر و شیب ۳۰ تا ۹۰ درجه هستند. با شمارش و درصدگیری از کل گسل‌های برداشت شده از منطقه مورد مطالعه به تفکیک سازوکار گسل‌ها مشخص شد که گسل‌های عادی و راستالغز راست‌گرد با بیشترین درصد و با اختلاف کمی گسل‌های راستالغز چپ‌گرد حضور دارند و گسل‌های وارون دارای کمترین درصد هستند.

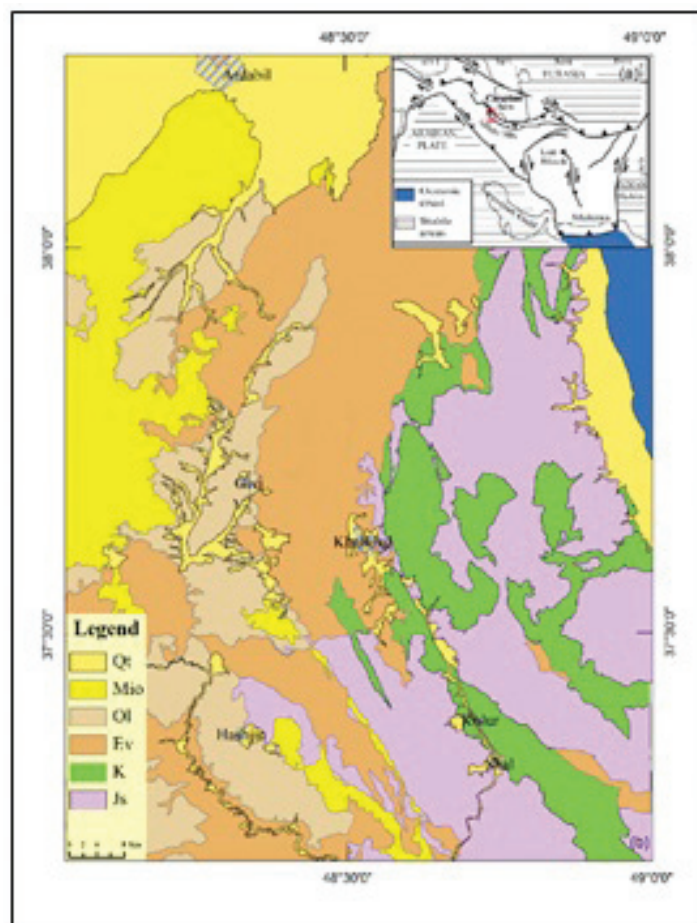
"۰۸' ۲۵' ۴۸° و عرض جغرافیایی "۲۸' ۳۶' ۳۷° ۵) محدوده گیوی به مختصات طول جغرافیایی "۳۲' ۲۶' ۴۸° و عرض جغرافیایی "۰۹' ۴۲' ۳۷° (شکل ۲). تا همه عناصر ساختاری مانند گسل‌ها، چین‌ها، درزه‌ها، پهنه‌های برشی و ... که دانسته‌هایی درباره زمین‌ساخت منطقه به دست می‌دهند، برداشت شوند (شکل ۶).

## ۵- محدوده‌بندی منطقه

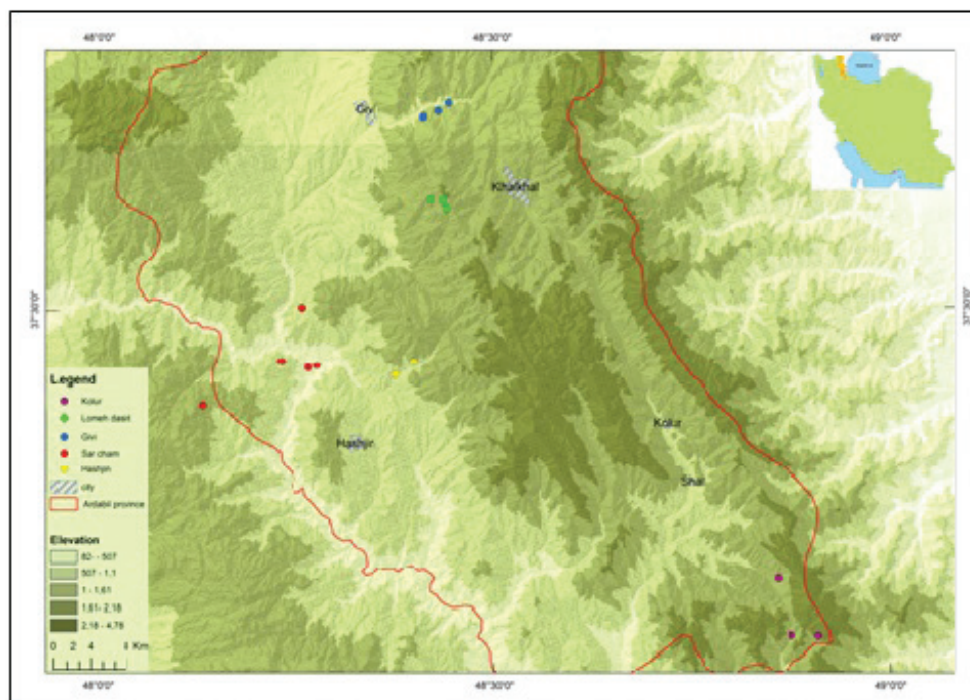
برای انجام مطالعات با بررسی نقشه‌های زمین‌شناسی و تصاویر ماهواره‌ای و انجام عملیات صحرائی ۵ محدوده را که در آنها سطوح گسلی و شکستگی‌ها دیده می‌شود، انتخاب و داده‌های صفحه شکستگی‌ها برداشت شد؛ سپس داده‌ها پردازش و ارزش‌گذاری و با استفاده از نرم‌افزارهای Fault Kin و Tectonic FP برای وارد کردن به نرم‌افزار Tensor Win آماده شد و برای هر منطقه تحلیل تنش دیرین صورت گرفت.

## ۶- تفکیک فازهای تنش

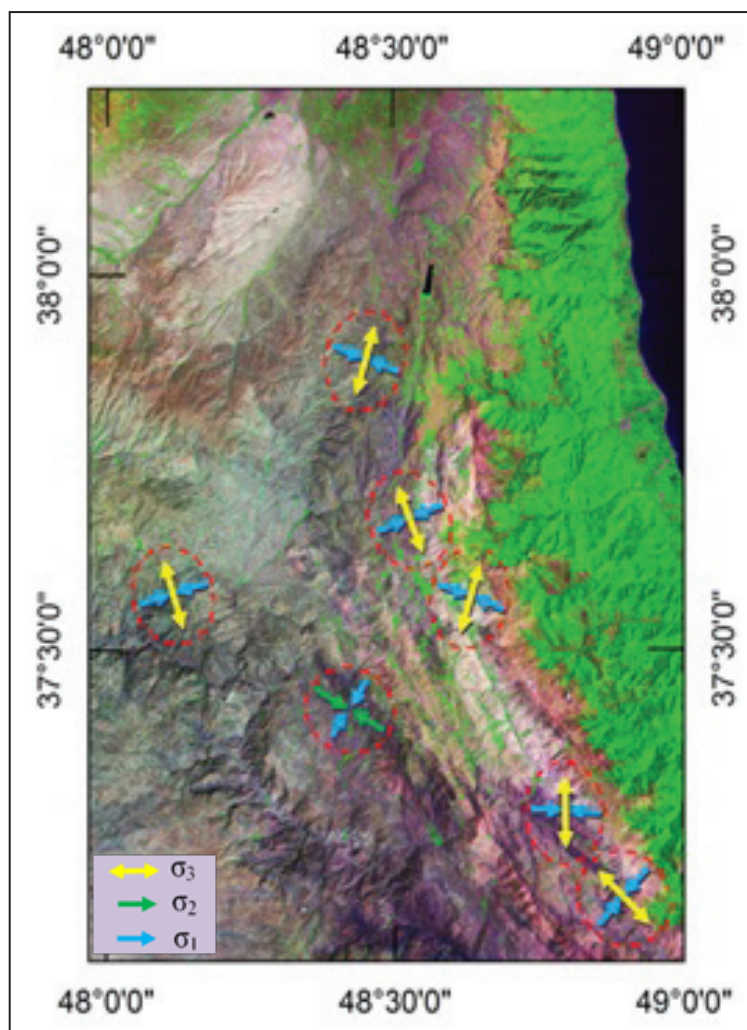
پس از پهنه‌بندی منطقه مورد مطالعه، در هر محدوده پس از پردازش داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Win Tensor به تفکیک فازهای تنش پرداخته شد. فاز تنشی در هر محدوده بر پایه تعداد داده‌های برداشت شده و تحلیل داده‌ها با نرم‌افزار مشخص شده است؛ ویژگی‌های مربوط به هر فاز در جدول ۱ آمده است که در آن N بیانگر تعداد داده‌ها و R نسبت اختلاف تنش و نشان‌دهنده شکل بیضوی میدان تنش است و شکل میدان در حالت استاندارد به صورت  $R = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$  تعریف می‌شود. شکل موقعیت تنش‌های اصلی بیشینه  $\sigma_1$  و کمینه  $\sigma_3$  در هر فاز تنشی را در محدوده‌های تفکیک شده نمایش داده شده است. هر جفت پیکان عمود بر هم، تنش‌های اصلی کوچک و بزرگ هر فاز را نشان می‌دهد.



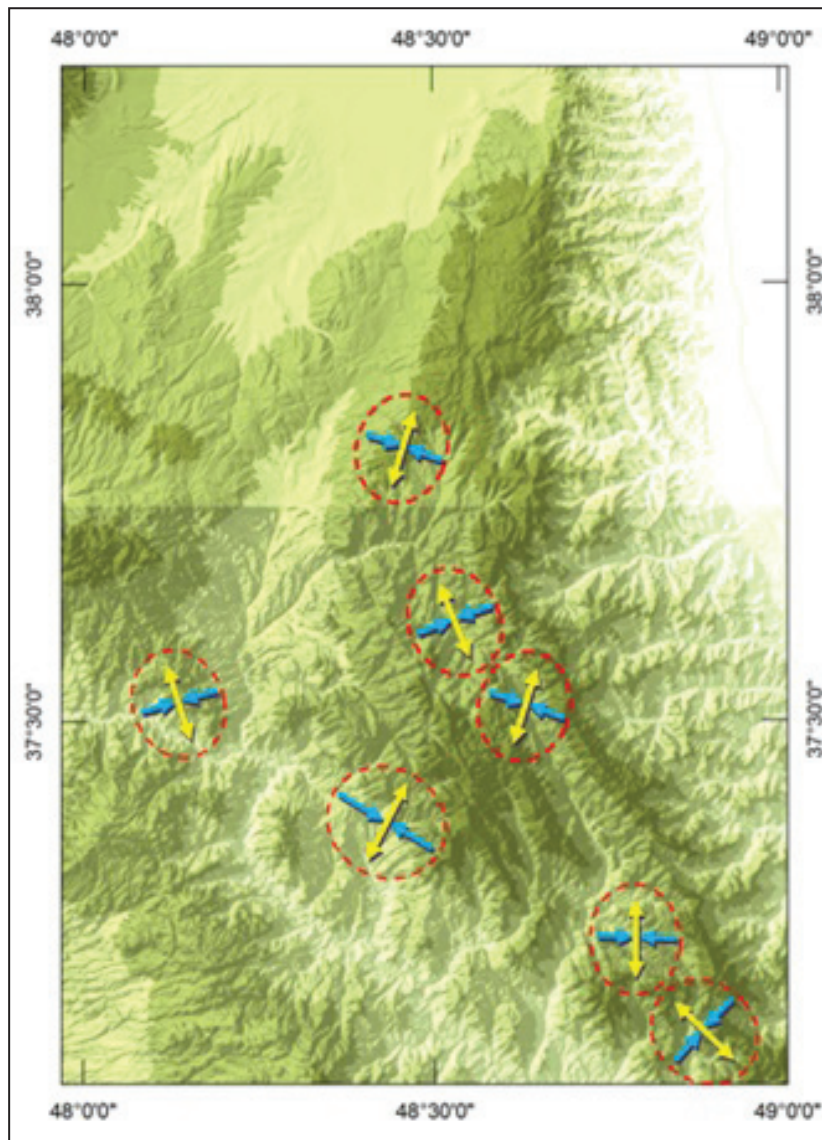
شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و نقشه زمین‌شناسی گستره مورد مطالعه.



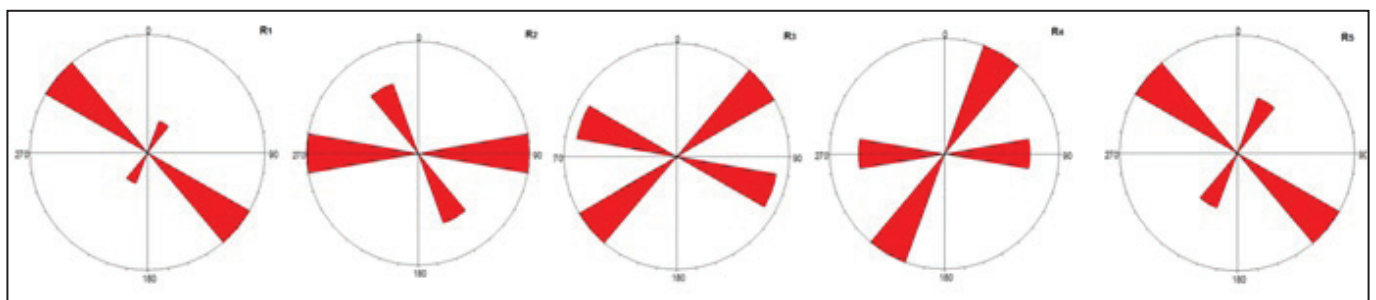
شکل ۲- موقعیت ایستگاه‌های برداشت شده.



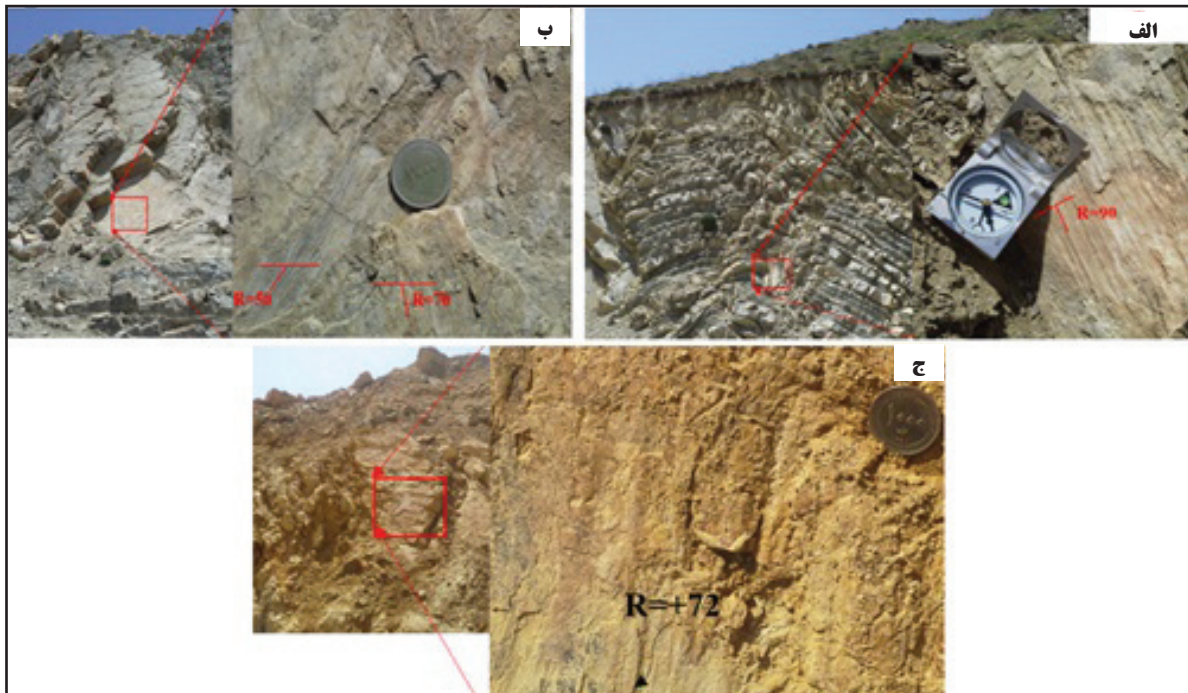
شکل ۳- موقعیت میانگین تنش‌های اصلی در هر محدوده.



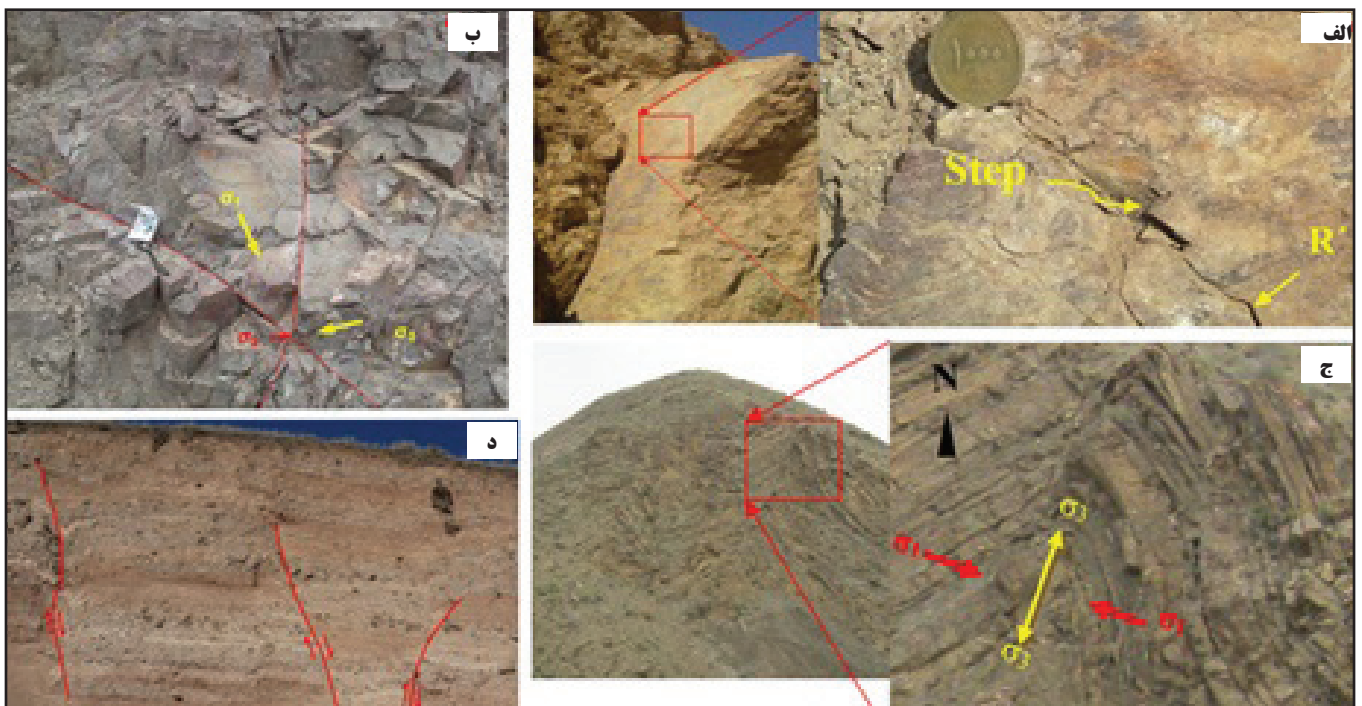
شکل ۴- موقعیت تنش‌های اصلی پس از چرخش داده‌ها در هر محدوده.



شکل ۵- نمودار گل سرخی گسل‌های برداشت شده برای ۵ محدوده تفکیک شده.



شکل ۶- میزان زاویه ریک و خط‌خش گسلی در سطح گسل؛ الف و ب) گسل و خط‌خش در آهک‌های کرتاسه در محدوده کلور؛ ج) سطح گسل و خط‌خش در آهک‌های کرتاسه در محدوده لعمه‌دشت را نشان می‌دهد.



شکل ۷- الف) شکستگی R' به همراه پله‌های گسلی در سطح گسل؛ ب) درزه‌های مزدوج در بازالت‌های اتوسن در محدوده سرچم (پورکرمانی و معتمدی، ۱۳۸۱)؛ ج) چین‌جناغی در سنگ‌های آذرین اتوسن راستای تنش‌های اصلی را در محدوده هشتچین نشان می‌دهد؛ د) گسل‌های عادی در رسوبات نوژن در محدوده لعمه‌دشت.

جدول ۱- تعداد فازهای تفکیک شده، موقعیت محورهای اصلی، اندازه فاکتور شکل میدان و اعداد گسل‌های مربوط به هر فاز.

Station	Phases	Sigma1		Sigma3		R	N
		Trend	Plunge	Trend	Plunge		
1	1	075	08	344	05	0.5	87
	3	248	10	343	10	0.6	23
2	1	330	00	86	060	0.7	21
	2	236	19	067	71	0.59	26
3	1	100	07	191	05	0.5	171
4	1	076	08	345	05	0.5	128
5	1	147	26	024	08	0.44	26
	5	068	74	201	11	0.5	34

جدول ۲- موقعیت تنش‌های اصلی پیش و پس از چرخش داده‌ها بر پایه تئوری اندرسون

Station	Before Rotation		After Rotation		Rotation size (degree)
	$\sigma_1$	$\sigma_3$	$\sigma_1$	$\sigma_3$	
1	04/068	01/338	00/068	00/338	-5
2	06/132	78/253	00/132	00/042	76
3	04/082	01/172	00/262	00/172	-5
4	06/281	12/190	00/281	00/011	10
5	05/273	23/005	00/274	00/004	10

## کتابنگاری

- آفانباتی، س.ع.، ۱۳۸۹- زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶ ص.
- پورکرمانی، م. و معتمدی، ح.، ۱۳۸۱- روش‌های اساسی زمین‌شناسی ساختمانی ترجمه کتاب Basic Methods of Structural geology نوشته استیفن مارشاک، گوتام میترا، انتشارات دانشگاه شهید بهشتی، ۵۰۳ ص.
- درویش زاده، ع.، ۱۳۸۵، زمین‌شناسی ایران (چینه‌شناسی، تکتونیک، دگرگونی و ماگماتیسزم): امیرکبیر، ۴۳۴ ص.
- قرشی، م. و آرین، م.، ۱۳۸۹- تکتونیک ایران: انتشارات مربع آبی، ۳۳۶ ص.
- نظری، ح. و شهیدی، ع.، ۱۳۹۰- زمین ساخت البرز: پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۹۷ ص.

## References

- Angelier, J., 1990- Inversion of field data in fault tectonics to obtain the regional stress. III. A new rapid direct inversion method by analytical means. Geophys. J. Int., 103, 363- 376.
- Angelier, J., 1994- Fault Slip Analysis and Paleostress reconstruction In Hancock, P. I. 1994. Continental Deformation, pergamon press Ltd. chapter J., 4, pp. 53-100.

## Separation of paleostress phases using fault slip data in the Khalkhal region

R. Sadeghi<sup>1\*</sup>, A. Saidi<sup>2</sup>, M. Arian<sup>3</sup>, M. Ghorashi<sup>4</sup> and A. Solgi<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Ph.D. Student, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Assistant Professor, Research Institute for Earth Sciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

<sup>3</sup>Professor, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>4</sup>Associate Professor, Research Institute for Earth Sciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

<sup>5</sup>Associate Professor, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: 2015 January 13

Accepted: 2016 August 17

### Abstract

In this study, separation of paleostress phases in the Khalkhal region has been done using paleostress analysis based on heterogeneous fault slip data and related slip lineations. The data have been measured and collected from the Jurassic, Cretaceous and Eocene units. To determine the sense of shear or slip, indices such as stratigraphic separation across the faults, kinematic indicators on fault surfaces, conjugate fractures, and tensile cracks were used. The data were analyzed with the help of inversion method. The results indicate that strike-slip regime is dominant in the region. Constraining the stress phases and comparison with the field and seismic data revealed that the third stress regime is characterized by a vertical  $\sigma_2$  and a NE-SW extension related to the modern stress regime, which is also compatible with the seismic data. The first and second phases of stress prevailed along NW-SE and N-S directions related to the paleostress regimes. Various investigations, including rose diagram analysis of faults and arrangement of structures show that the faults in the region are dominantly strike-slip and strike-slip with normal component, and the shape of the stress field in the region is prolate.

**Keywords:** Palaeostress phase separation, Rotation, Conjugate faults, Slip fault analysis, Khalkhal.

For Persian Version see pages 297 to 302

\*Corresponding author: R. Sadeghi; E-mail: raminsadeghi54@gmail.com