

تحلیل تنش دیرین در رسوب‌های افقی پلیوسن-کواترنری شمال باختر زنجان

محسن الیاسی^{۱*}، محمد محجل^۲ و فاطمه مصباحی^۳

^۱ استادیار گروه مهندسی و تکتونیک، دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، ایران

^۲ استادیار گروه تکتونیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد گروه تکتونیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

(دریافت: ۸۶،۳،۲۳، پذیرش نهایی: ۸۶،۱۰،۲۵)

چکیده

گسلش عادی روی رسوب‌های بدون چین‌خوردگی پلیوسن-کواترنری در شمال غرب زنجان با روش‌های جستجوی شبکه‌ای، روش وارون‌سازی به‌همراه تحلیل محورهای کشش و فشار، آرایش خش لغزش و وارون‌سازی چندمرحله‌ای مورد بررسی دقیق قرار گرفت. نتایج روش‌های مزبور از دیدگاه تحلیل تنش دیرین در منطقه مورد بررسی، به‌کار برده شد. نتایج به‌دست آمده از آن روش‌ها با تعیین زاویه نابرازش حدود ۱/۳۴ درجه منتهی به محاسبه تانسور تنش تقلیل یافته شد. تحلیل منطقه مورد بررسی روشن ساخت که موقعیت بزرگ‌ترین تنش تراکمی اصلی قائم و کوچک‌ترین تنش تراکمی اصلی افقی است (با روند جنوب جنوب شرق). شکل هندسی بیضوی تنش دیرین به‌صورت دوکی شکل با $\Phi = 0$ برآورد شد. زاویه اصطکاک داخلی توده‌سنگ حدود ۳۰ درجه محاسبه شد. این مقدار با رسم دایره موهر سه محوری بدون مقیاس، نشان‌دهنده چیره بودن فعالیت گسل‌های مزدوج در منطقه است.

واژه‌های کلیدی: تانسور تنش دیرین، گسل عادی، زنجان، گسل‌های مزدوج

Paleostress analysis of horizontal Plio-Quaternary deposits in the NW of Zanjan

Eliassi, M^{1.}, Mohajjel, M^{2.} and Mesbahi, F^{3.}

¹Assistant professor, Department of Engineering Geology and Tectonics, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Iran

²Assistant professor, Tectonics Group, Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran

³M.Sc. student of Tectonics Group, Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran

(Received: 13 Jun 2007, Accepted: 15 Jan 2008)

Abstract

For paleostress analysis of non- folded flat lying Pliocene-quaternary sediments in the NW of Zanjan (NW of Iran), 72 faults bearing slickenside lineations were measured. Among the measured faults, some 36 faults which show the best quality structurally and statistically were selected for analysis. All the faults showed their strike towards NE-SW and dip direction towards SE-NW. The rake of slip vector was nearly 90 degrees, which represents no strike slip components. Gypsum fibers, fault steps on the fault plane, and extensional fractures around the faults were the most important evidence for determination of fault mechanism. Accordingly, normal fault mechanism was

distinguished, showing the dominant tensional paleostress regime dynamically active in the study area.

Different methods for calculation of reduced paleostress tensor including Grid Search, Inversion Methods along with P-T Axis Analysis, Slip Linear Configuration, and Multiple Inverse Method were used. All the applied methods represent approximately the same results. Calculations of reduced stress tensors demonstrate the orientation of the greatest and the least compressional principal stress axis to be vertical and horizontal respectively. The geometrical shape of the stress ellipsoid proved to be prolate and the shape factor around zero ($\phi = 0.0$).

The internal angle of friction of the rock mass was calculated 30 degrees on the basis of R% statistically. This value was then checked out by the conjugate fault systems in the field.

All the processed data are illustrated on a 3-D unscaled Mohr diagram, showing the pole of the data distribute just on the greatest circle. Such a pattern demonstrates the dominance of the conjugate fault system activity in the study area.

Multiple Inverse Method was employed for determination of stress phases. The results occupied one unique concentrated cluster in the 4-D space, composed of orientation of the three principal stress axes and the shape factor. It was concluded that only one geometrical paleostress phase has been active in the study area.

Key words: Paleostress tensor, Normal fault, Zanjan, Conjugate faults

۱ مقدمه

فرونشست زنجان، حوضه باریک و ممتدی در غرب زنجان است که در راستای شمال غرب- جنوب شرق کشیده شده است. این فرونشست پهنه‌های کوهستانی طارم و سلطانیه در شمال شرقی و جنوب غربی را از هم جدا می‌کند و در واقع جزئی از پهنه ایران مرکزی در شمال غربی ایران است (شکل ۱).

گستره برونزد ساختار گسلش عادی در طول مسیر جاده و نیز آزادراه زنجان- میانه در ۴۵ کیلومتری شمال غرب زنجان و به طول تقریبی ۱۶ کیلومتر مشاهده می‌شود. رخنمون این گسل‌ها در محدوده مشخصی به وسعت چند کیلومتر مربع به صورت محلی است. این گسل‌ها نهشته‌های افقی پلیوسن- کواترنری را قطع کرده‌اند. این نهشته‌ها اکثراً از جنس رس، مارن و سیلت‌اند و به دلیل افقی بودن لایه‌ها و تنوع رنگ، ساختارهای بسیار زیبا و جالبی از گسلش عادی را در محل بریدگی‌ها (به‌ویژه در طول مسیر جاده قدیم و آزادراه جدید زنجان-

میانه) نمایان می‌سازند (شکل ۲).

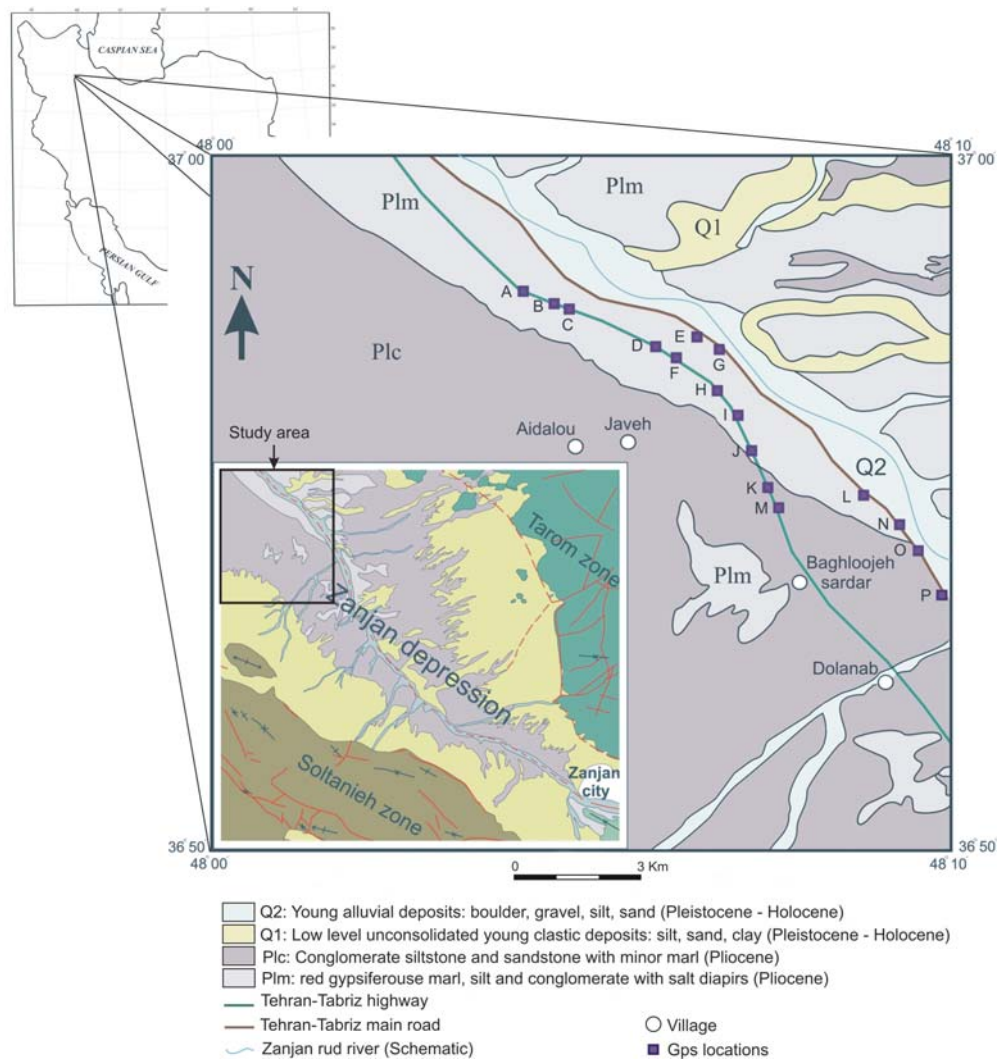
۲ ساختارهای چیره در منطقه

تنها ساختارهای مشاهده شده در رسوب‌های افقی جوان منطقه مورد بررسی تعداد زیادی ساختار گسلش نرمال در مقیاس مزوسکوپی، با جابه‌جایی در مقیاس متر است جابه‌جایی نرمال گسل‌ها از روی جابه‌جایی لایه‌ها کاملاً مشهود است (شکل ۲). همچنین در اکثر صفحات گسلی، بلورهای ژئیس به صورت جهت‌یافته رشد کرده‌اند که جهت‌یافتگی رشد این بلورها کاملاً منطبق با حرکت نرمال گسل است (شکل ۳-الف). خطوط خشن‌لغزش اندازه‌گیری شده در سطوح گسلی خشن‌دار حاکی از حرکت شیب‌لغز نرمال بدون مؤلفه راستالغز برای این سطوح گسلی است (شکل ۳-ب).

همه لایه‌های جابه‌جا شده در منطقه کاملاً افقی‌اند و هیچ چین‌خوردگی محسوسی را تحمل نکرده‌اند، لذا

لذا در نهایت از گسل‌هایی استفاده شده است که به کمک رشته‌ها و پله‌های روی صفحه گسل و به ویژه شکستگی‌های کنار گسل هیچ‌گونه تردیدی در تشخیص سازوکار گسل به وجود نیاید. محل برداشت گسل‌ها در یک محدوده مشخص صورت گرفت و موقعیت گسل‌ها نیز روی زمین با GPS تعیین شد.

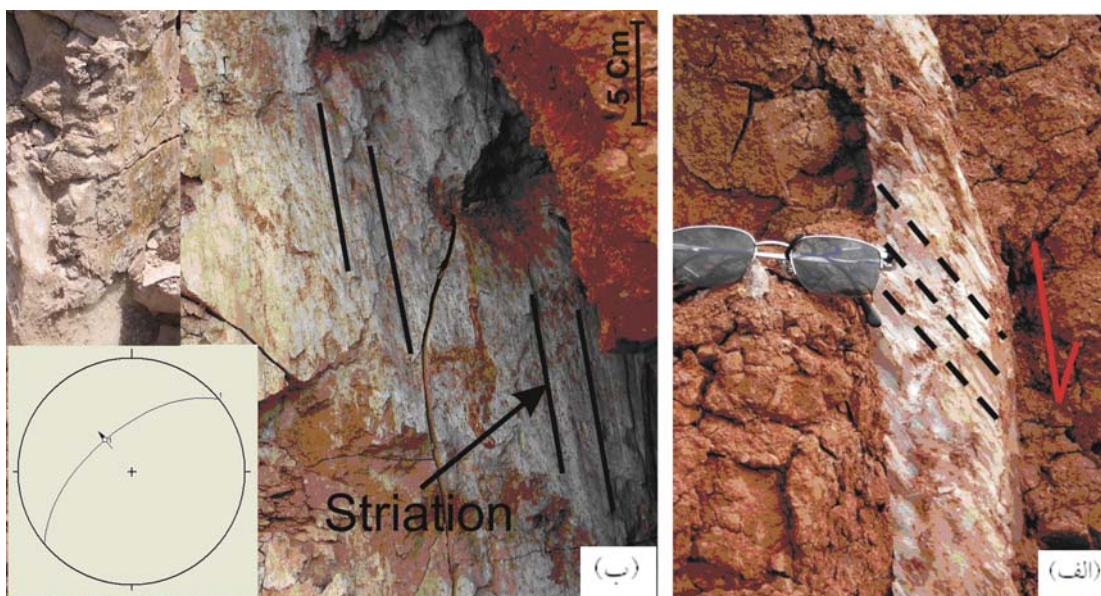
جابه‌جایی مشاهده شده با لغزش روی گسل هماهنگ است. از بین همه گسل‌های برداشت شده تعداد ۳۶ گسل عادی خش‌دار که دارای بهترین کیفیت و از نظر سازوکار در شرایط بهینه‌ای بودند در تحلیل تنش دیرین مورد استفاده قرار گرفته است (جدول ۱). از آنجا که تشخیص سازوکار دقیق گسلش تعداد راه‌حل‌های تانسور تنش دیرین را کاهش می‌دهد،



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی منطقه رخنمون گسل‌ها (برگرفته از نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰ زانجان، سازمان زمین‌شناسی کشور)، محل‌های اندازه‌گیری داده‌های گسلی با حروف بزرگ لاتینی نشان داده شده است. در گوشه پایین سمت چپ نقشه زمین‌شناسی زانجان پهنه‌بندی ساختاری نشان داده شده است.



شکل ۲. گسل‌های عادی لایه‌های جوان پلیوسن-کواترنری را قطع و جابه‌جا کرده‌اند. مسیر آزادراه زنجان-میانه، دید به سمت شمال شرق.



شکل ۳. (الف) رشد جهت‌یافته ژئیس در سطح گسل، دید به سمت شمال غرب، (ب) خطوط خش در سطح گسل، دید به سمت جنوب غرب.

جدول ۱. داده‌های گسلی و موقعیت خش لغزش‌ها.

شماره	جهت شیب صفحه گسلی (درجه)	شیب صفحه گسلی (درجه)	روند خش خط (درجه)	میل خش خط (درجه)	محل برونزد گسلی
1	340	70	340	70	A*
2	325	55	325	55	A
3	315	50	315	50	A
4	340	60	340	60	A
5	325	65	325	65	B
6	160	80	160	80	B
7	180	64	180	64	B
8	170	80	170	80	C
9	340	65	340	65	C
10	338	68	338	68	C
11	338	70	338	70	C
12	150	70	150	70	C
13	320	60	320	60	C
14	155	60	155	60	E
15	355	70	355	70	F
16	330	65	330	65	G
17	155	75	155	75	G
18	150	77	150	77	G
19	347	65	347	65	H
20	187	60	187	60	H
22	180	70	180	70	I
23	175	55	175	55	J
24	25	65	25	65	J
25	205	48	205	48	J
26	170	60	170	60	K
27	220	55	220	55	L
28	210	65	210	65	M
29	210	60	210	60	M
30	180	62	180	62	N
31	165	56	165	56	O
32	335	65	335	65	O
33	160	55	160	55	P
34	180	64	180	64	P
35	160	65	160	65	P
36	160	65	160	65	P

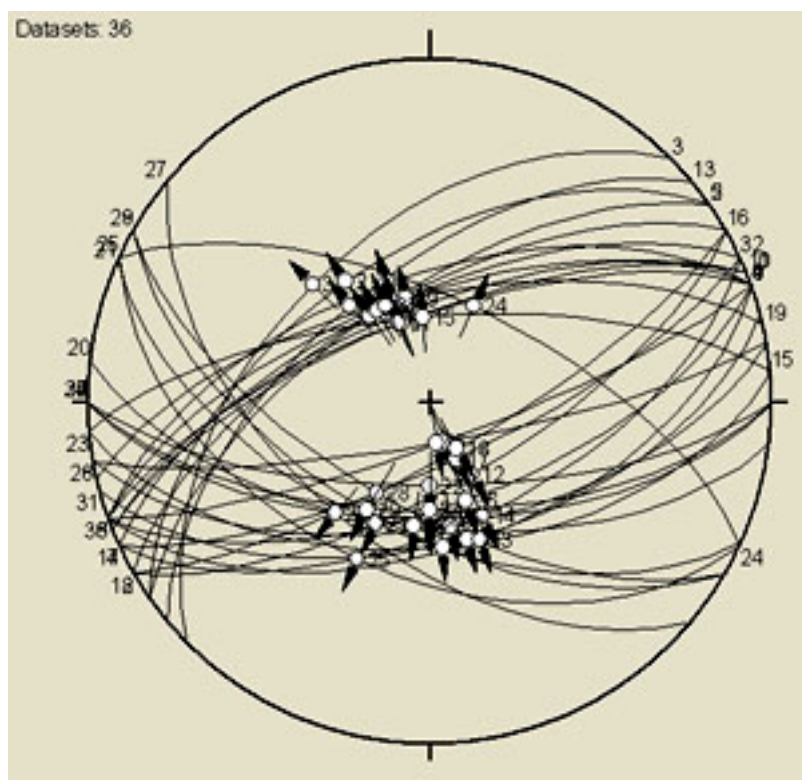
*حروف بزرگ لاتین محل برداشت نمونه‌ها را با توجه به شکل ۱ نشان می‌دهد.

همگن باشد و حرکت یک گسل تأثیری روی گسل‌های دیگر نداشته باشد، میدان تنش نیز در حین فعالیت گسل‌ها یکنواخت باشد. با توجه به اینکه در بهترین شرایط عملی همواره اندازه‌گیری‌ها دارای کمی خطا است و امکان دارد خش اندازه‌گیری شده دقیقاً روی صفحه گسل قرار نگیرد، در ابتدا تصحیحاتی در این زمینه صورت گرفت. از قطب صفحه گسل و خش گسل روی استریونت دایره بزرگی عبور داده شد و محل تلاقی آن با گسل که در واقع تصویر اورتوگرافیک خش روی صفحه گسل بود در نقش وضعیت تصحیح شده خش در نظر گرفته شد (شکل ۴). داده‌های آماده شده با مهم‌ترین شیوه‌های موفق در تحلیل تنش دیرین مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

از آنجا که این گسل‌ها جوان‌اند و لایه‌های جوان پلیوسن-کواترنری را قطع کرده‌اند، دچار پیچیدگی‌های حاصل از دگرشکلی‌های بعدی نشده‌اند و در ارتباط با بررسی‌های تنش، بستر بسیار مناسبی جهت تحلیل تنش دیرین‌اند (شکل‌های ۲ و ۸).

۳ برداشت داده‌ها

حدود ۷۳ گسل خش‌دار در منطقه مورد بررسی در ابتدا برداشت شد. از بین مجموع این داده‌ها ۳۶ داده (جدول ۱) که از مفروضات اولیه تحلیل تنش دیرین تبعیت می‌کردند و از نظر کیفیت هم در شرایط بهینه‌ای بودند استخراج شد. این مفروضات بیان می‌دارد که توزیع نمونه‌ها بایستی



شکل ۴. تصویر استریوگرافیک داده‌های گسلی، پیکان‌ها جهت حرکت فرادیواره را نسبت به فرودیواره نشان می‌دهد.

۴ روش‌های تحلیل تنش دیرین

در دستگاه مختصات فیزیکی X, Y, Z محور Z را قائم رو به پایین، محور X و Y را افقی در نظر می‌گیریم. تانسور تنش σ در حال تعادل در این دستگاه دارای شش مؤلفه است که حالت تنش را به‌طور کامل بیان می‌کند:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yz} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

به‌کار بردن تانسور فوق در مورد تحلیل تنش دیرین در گذشته زمین‌شناسی به دلیل ناتوانی محاسبه مقادیر مؤلفه‌های تنش تقریباً غیرممکن است. در شرایطی که پارامترهای مکانیکی سنگ به اندازه کافی در اختیار باشد تا حدی امکان محاسبه مؤلفه‌های تنش ممکن می‌شود (انزلیه، ۱۹۸۹). اخیراً به‌کمک ماکل دینامیکی کلسیت در حکم ابزار اندازه‌گیری چشم‌انداز امید بخشی برای محاسبه تنش دیرین مطرح شده است که فعلاً مراحل جنینی خود را طی می‌کند (گنزالس و همکاران، ۲۰۰۶)، از آنجا که با تقریب خوبی در زمان فعالیت گسل‌ها یکی از تنش‌های اصلی قائم است (اندرسون، ۱۹۵۱)، اگر $\sigma_x \geq \sigma_y$ و σ_x ، σ_y و σ_z به ترتیب موازی تنش‌های اصلی سامانه مختصات دکارتی باشد، تانسور تنش را می‌توان به‌صورت ماتریس زیر بیان کرد:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

تنش غیرانحرافی روی مقدار، موقعیت تنش برشی بیشینه و شکل میدان تنش بی‌تأثیر است و همچنین ضرب یک عدد در مؤلفه‌های تنش هیچ تأثیری روی موقعیت تنش برشی بیشینه و شکل هندسی میدان ندارد (انزلیه، ۱۹۹۴)، لذا می‌توان بر این اساس عملیات ماتریسی زیر را اجرا کرد:
عناصر داخل ماتریس را از تنش اصلی قائم کسر

می‌کند در عکس بیشینه اختلاف تنش اصلی ضرب می‌کنیم (ریتز، ۱۹۹۴). در منطقه مورد بررسی از آنجا که همه گسل‌های برداشت شده عادی‌اند، لذا براساس نظریه آندرسون $\sigma_z = \sigma_1$ خواهد بود (در این نوشتار σ_1 بیشینه تنش تراکمی اصلی، σ_2 تنش تراکمی اصلی متوسط و σ_3 کوچک‌ترین تنش تراکمی اصلی و $\sigma_x \geq \sigma_y$ است). با اعمال عملیات مزبور می‌توان نوشت:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \frac{\sigma_x - \sigma_z}{\sigma_1 - \sigma_3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sigma_y - \sigma_z}{\sigma_1 - \sigma_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

در ماتریس فوق نسبت تفاوت تنش نشان‌دهنده شکل بیضوی میدان تنش است. اگر در حالت استاندارد شکل میدان را به‌صورت $\Phi = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$ تعریف کنیم (بیشپ، ۱۹۶۶)، می‌توان نتیجه گرفت:

$$\sigma = \begin{bmatrix} -(1 - \Phi) & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

پس می‌توان به‌جای شش مؤلفه تانسور تنش در حالت تعادل تانسور ساده شده‌تری با چهار مؤلفه شامل موقعیت محورهای اصلی تنش و شکل میدان را برای بررسی حالت تنش مطرح کرد. چنین تانسوری را تانسور تنش تقلیل یافته (reduced stress tensor) می‌گویند که در عمل برای بررسی تنش دیرین نزدیک‌ترین تانسور به تانسور واقعی تنش است. به‌منظور تحلیل تنش دیرین مجموعه گسل‌های خوش‌دار بهترین ابزار به‌حساب می‌آیند، زیرا وجود خود شکستگی نشان‌دهنده چیره شدن مؤلفه تنش به چسبندگی سنگ، و وجود خط خش و جهت آن به‌ترتیب مؤید فائق آمدن تنش تنش برشی بیشینه بر مقاومت برشی و

به این نکته اشاره می‌شود که در طراحی این روش، سازوکار گسلش مد نظر قرار نمی‌گیرد، لذا در نهایت دو تانسور مکمل برای دو سامانه تنش کششی و تراکمی ارائه می‌شود. با توجه به عوارض زمین‌شناسی می‌توان نوع تانسور را انتخاب کرد. در منطقه مورد بررسی با توجه به گسترش فراوان گسل‌های نرمال رژیم تنشی از نوع کششی حاکم است، لذا تانسور تنش تقلیل یافته به صورت زیر انتخاب می‌شود:

قائم: σ_1

$\sigma_2: 200,00$

$\sigma_3: 110,00$

$\Phi = 0.0$

به این ترتیب بزرگ‌ترین تنش تراکمی قائم و شکل میدان کاملاً دوکی شکل است. شکل میدان تنش یکی از عامل‌های مهم در کنترل موقعیت تنش برشی بیشینه است (انزلیه، ۱۹۹۴). در منطقه مورد بررسی چون مقدار کوچک‌ترین تنش تراکمی با تنش تراکمی متوسط مساوی است، موقعیت آنها در مقطع دایره‌ای شناور است و موقعیت تنش برشی حداکثر با موقعیت بزرگ‌ترین تنش تراکمی کنترل می‌شود. واضح است که تحت این شرایط، گسل‌های نرمال نمی‌توانند دارای مؤلفه راستالغز باشند.

۲-۴ روش وارون‌سازی

هر تانسور تنش S دارای دو مؤلفه است:

- یک مؤلفه تنش همسانگرد (isotropic) معادل تنش لیتواستاتیک (تنش غیر انحرافی) یا تنش میانگین βI (β تنش لیتواستاتیک، I ماتریس واحد).

- یک مؤلفه تنش انحرافی (deviatoric) αD (α ثابت ماده و D تنش انحرافی).

با معلوم بودن α, β, D حالت تنش دقیقاً معلوم می‌شود. از آنجا که محاسبه مقادیر تنش رخ داده در گذشته، در حال حاضر تقریباً غیرممکن است، لذا در قالب

سازوکار گسلش است. نکته مهم در تحلیل تنش دیرین در دست داشتن معیاری است که براساس آن بتوان از درستی تانسور به دست آمده اطمینان حاصل کرد. با اتکا به نظریه والاس (۱۹۵۱) و بات (۱۹۵۹) خط‌خس در راستای تنش برشی حداکثر قرار می‌گیرد. این معیار بسیار خوبی است. ابتدا از راه محاسبه و حل تانسور تنش به‌طور نظری موقعیت تنش برشی بیشینه تعیین می‌شود و سپس با موقعیت خش گسل برداشت شده روی زمین مورد مقایسه قرار می‌گیرد. این اختلاف زاویه، زاویه نابرازش (misfit angle) نامیده می‌شود (انزلیه، ۱۹۹۰). هر چه این زاویه کوچک‌تر باشد تانسور به دست آمده به تانسور واقعی نزدیک‌تر است. در عمل بیشتر پژوهشگران با توجه به سازوکار گسل، این زاویه را تا ۳۰ درجه مورد قبول قرار داده‌اند.

۴-۱ روش جستجوی شبکه‌ای (grid search method)

در این روش به کمک رایانه به آزمون روند σ_1 از صفر تا ۳۶۰ درجه و به میل آن از صفر تا ۹۰ درجه عدد داده می‌شود و به‌طور همزمان به ریک σ_2 روی صفحه‌ای که قطب آن σ_1 باشد نیز از صفر تا ۱۸۰ درجه عدد داده می‌شود (رامسای، ۲۰۰۰). برای مشخص کردن شکل میدان هم به Φ از صفر تا ۱ عدد داده می‌شود. بنابراین تعداد بسیار زیادی تانسور تنش تقلیل یافته به‌طور محاسبه‌ای تولید و زاویه نابرازش برای هر یک تعیین و ذخیره می‌شود. واضح است تانسوری که دارای کمترین زاویه نابرازش باشد در حکم بهترین تانسور معرفی می‌شود. در منطقه مورد بررسی نتایج حاصل از روش جستجوی شبکه به صورت زیر اعلام می‌شود:

Tensor 1	Tensor 2
Sigma 3: 245/90	Sigma 3: 110/00
Sigma 2: 200/00	Sigma 2: 200/00
Sigma 1: 110/00	Sigma 1: 245/90
$\Phi = 1.0$	$\Phi = 0.0$

$$\sigma_1: 162/90$$

$$\sigma_2: 038/00$$

$$\sigma_3: 127/00$$

به منظور تکمیل ساختن عضوهای ماتریس تنش دیرین تقلیل یافته با رسم دایره موهر بدون مقیاس، شکل میدان تنش معادل را نیز تعیین می‌کنیم.

۳-۴ دایره موهر بدون مقیاس

از آنجا که در حال حاضر مقادیر تنش‌های اصلی رخ داده در گذشته تقریباً غیر قابل محاسبه است، لذا می‌توان از رابطه نرمال کردن مؤلفه‌های تنش برای به دست آوردن مؤلفه تنش نرمال نسبی (σ_{nr}) و مؤلفه تنش برشی نسبی (τ_r) استفاده کرد (رامسای، ۲۰۰۰).

$$\sigma_{nr} = \frac{\sigma_n - \sigma_1}{\sigma_1 - \sigma_3} = (\Phi m^2 + n^2) \quad (8)$$

$$\tau_r^2 = \frac{\tau}{\sigma_1 - \sigma_3} = \Phi^2 l^2 - m^2 + (1 - \Phi)^2 m^2 n^2 + n^2 l^2 \quad (9)$$

در معادلات فوق l, m, n به ترتیب کسینوس‌های هادی قطب صفحه گسل در دستگاه مختصات $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ است. پس از رسم محورهای اصلی تنش دیرین و قطب هر صفحه گسل روی استریونت و محاسبه کسینوس‌های هادی آن و به کمک معادلات فوق در دستگاه مختصات دکارتی، تنش نرمال نسبی و تنش برشی نسبی را پیاده می‌کنیم. در منطقه مورد بررسی همه نقاط پیاده می‌شود و سپس سه دایره را طوری رسم می‌کنیم تا بهترین پوشش را به وجود آورد (شکل ۶).

همه داده‌ها روی دایره‌ای با قطر بیشترین اختلاف تنش متمرکز شده است که نشان می‌دهد میدان تنش دوکی شکل و در نتیجه $\Phi = 0$ است (رامسای، ۲۰۰۰).

تانسور تنش تقلیل یافته (T) امکان بررسی تنش وجود دارد. در تانسور تنش تقلیل یافته ثابت‌های α و β کاملاً دلخواه انتخاب می‌شوند زیرا موقعیت محورهای اصلی تنش و جهت آنها نه با جمع کردن با میانگین تنش و نه با ضرب کردن در تانسور تنش، هیچ تغییری نخواهد کرد (انزلیه و همکاران، ۱۹۸۲) مقادیر دلخواه را می‌توان با پیروی از انزلیه و گوگول (۱۹۷۹) به صورت زیر در نظر گرفت:

$$T_{11} + T_{22} + T_{33} = 0 \quad \text{و} \quad T_{11}^2 + T_{22}^2 + T_{33}^2 = \frac{3}{2} \quad (5)$$

در روابط فوق محورهای ۱، ۲ و ۳ به ترتیب با محورهای x, y و z منطبق است. یکی از راه‌حل‌ها به صورت زیر است (انزلیه، ۱۹۹۰):

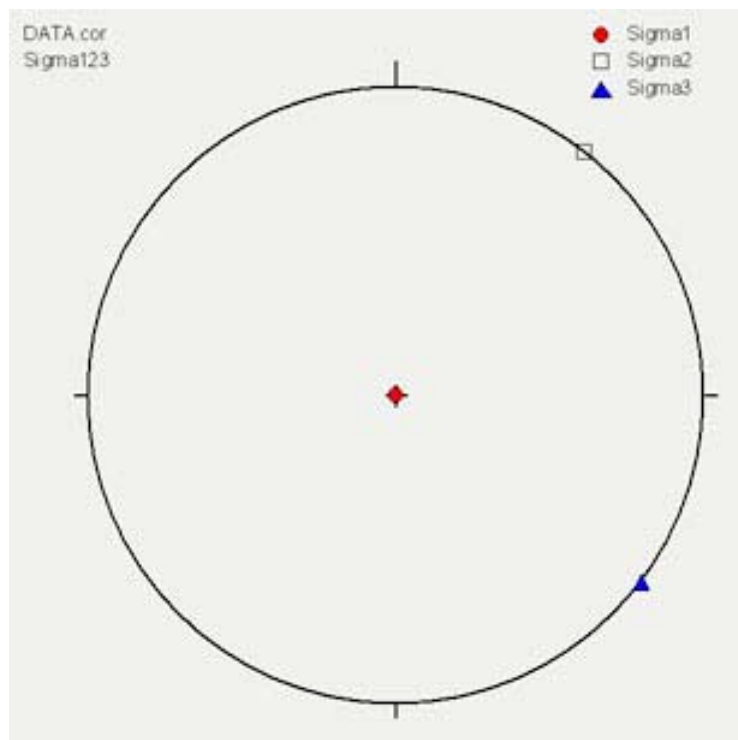
$$T_{11} = \cos[x] \quad \text{و} \quad T_{33} = \cos\left[x + \frac{4\pi}{3}\right] \quad \text{و} \quad T_{22} = \cos\left[x + \frac{2\pi}{3}\right] \quad (6)$$

با انتخاب مناسب α و β در شرایط فوق می‌توان تانسور تنش را به صورت تقلیل یافته به شکل زیر نمایش داد:

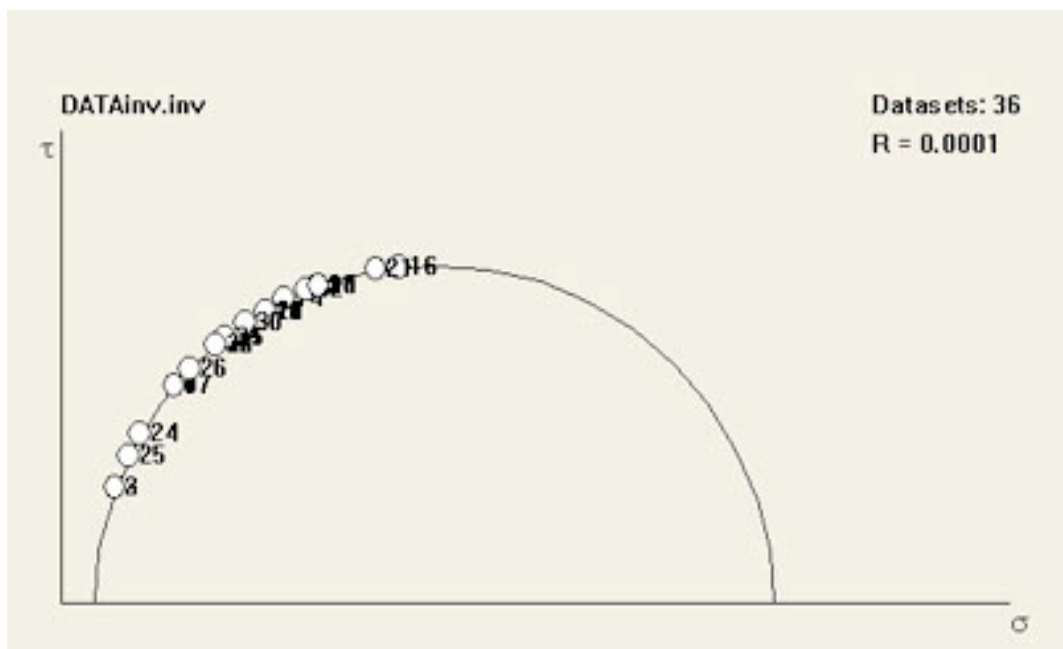
$$T = \begin{bmatrix} \cos[x] & a & b \\ a & \cos\left[x + \frac{2\pi}{3}\right] & c \\ b & c & \cos\left[x + \frac{4\pi}{3}\right] \end{bmatrix} \quad (7)$$

پارامترهای تانسور تنش تقلیل یافته با داشتن مجموعه‌ای از گسل‌های خش‌دار قابل بررسی است. روش فوق در مورد گسل‌های خش‌دار منطقه مورد بررسی به کار برده شد (شکل ۵).

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود موقعیت محورهای اصلی تنش به صورت زیر اعلام می‌شود:



شکل ۵. تصویر استریوگرافیک محورهای اصلی تنش براساس روش وارون‌سازی.



شکل ۶. دایره موهر بدون مقیاس برای داده‌های منطقه مورد بررسی.

$$\bar{S} = \frac{\bar{R}}{|\bar{R}|} \quad (11)$$

$$R\% = \frac{2|\bar{R}| - n}{n} * 100 \quad (12)$$

در روابط فوق $\sum xi, \sum yi, \sum zi$ به ترتیب مجموع کسینوس‌های هادی قطب‌های گسل با دستگاه مختصات X, Y, Z است. اگر محور عرض‌ها برحسب پارامتر $|\bar{R}|$ و محور طول‌ها برحسب تغییرات زاویه اصطکاک داخلی مدرج شود نقطه ماکزیموم نمودارهای حاصل زاویه اصطکاک داخلی توده‌سنگ در زمان فعالیت سامانه گسلی را نشان می‌دهد (اسپرینر و همکاران، ۱۹۹۳). بر این اساس، در منطقه مورد بررسی زاویه اصطکاک داخلی ۳۰ درجه به دست آمد (شکل ۹).

با توجه به زاویه اصطکاک داخلی متوسط برای توده‌سنگ و در نظر گرفتن نوع سنگ‌های منطقه مورد بررسی تک‌تک گسل‌ها می‌توانند نوسان نسبتاً وسیعی داشته باشند. با توجه به نتیجه به دست آمده و با توجه به شکل ۸ به وضوح می‌توان دریافت که اکثریت قریب به اتفاق گسل‌های منطقه در شرایط گسل‌های مزدوج قرار می‌گیرند. به این نکته مهم نیز اشاره می‌شود که در مورد این گونه گسل‌ها، محور تنش اصلی متوسط روی صفحه گسل قرار دارد و این موضوع به خوبی روی دایره موهر مشاهده می‌شود (شکل ۶).

۴-۶ روش آرایش خط خش

بردارهای ویژه ماتریس موقعیت خط خش‌های گسلی برای تعیین موقعیت محورهای اصلی تنش و مقادیر ویژه وابسته به آن بردارهای ویژه برای تعیین شکل میدان تنش به کار برده می‌شود (والبرجر، ۱۹۹۶). به کمک فرمول بات (بات، ۱۹۵۹)، طرحی از پراکنندگی خطوط لغزش به کمک رایانه برحسب شکل میدان‌های گوناگون رسم

۴-۴ روش تعیین موقعیت محورهای فشار (p) و محورهای کشش (T)

در این روش صفحه گسل و قطب گسل را روی استریونت رسم می‌کنیم و سپس با رسم دایره بزرگی که از قطب گسل و خش گسلش عبور می‌کند، موقعیت محور P و T را مشخص می‌سازیم.

(مارت و آلمندینگر، ۱۹۹۰) در منطقه مورد بررسی توزیع محورهای فشار و کشش با این روش تعیین شد (شکل ۷).

همان‌طور که در تصویر شکل ۷ مشاهده می‌شود موقعیت محورهای اصلی کرنش افزایشی به صورت میانگین برداری در منطقه مورد بررسی به صورت زیر اعلام می‌شود:

$$P: 315/89$$

$$T: 169/01$$

$$B: 079/00$$

۴-۵ گسل‌های مزدوج

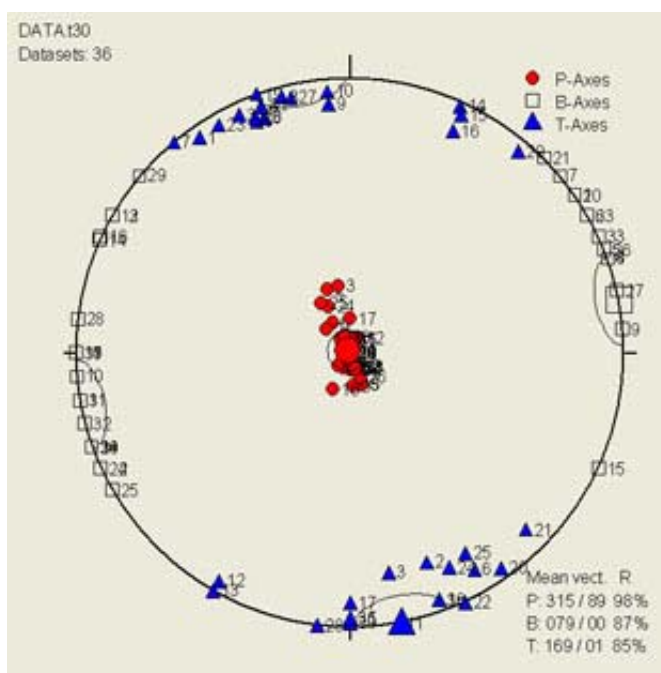
شکل ظاهری بسیاری از گسل‌های مشاهده شده در منطقه به صورت مزدوج (conjugate faults) است (شکل ۸).

به منظور اثبات مزدوج بودن گسل‌های منطقه، ابتدا زاویه اصطکاک داخلی توده‌سنگ در حین فعالیت سامانه گسل‌ها مورد بررسی قرار گرفت. سپس پارامتر $R\%$ تعیین شد. این عدد توزیع داده‌ها را در فضا بین صفر تا ۱۰۰٪ نشان می‌دهد (صفر پراکنندگی تصادفی و ۱۰۰٪ معرف پراکنندگی خوشه‌ای است). طول جمع برداری $|\bar{R}|$ و موقعیت بردار میانگین \bar{S} از روابط زیر قابل محاسبه است (اسپرینر و همکاران، ۱۹۹۳):

$$|\bar{R}| = \sqrt{(\sum xi)^2 + (\sum yi)^2 + (\sum zi)^2} \quad (10)$$

داده‌های گسلی منطقه مورد بررسی تعمیم داده شد که نتایج آن به شکل تصویر استریوگرافیک ارائه شده است (شکل ۱۰).

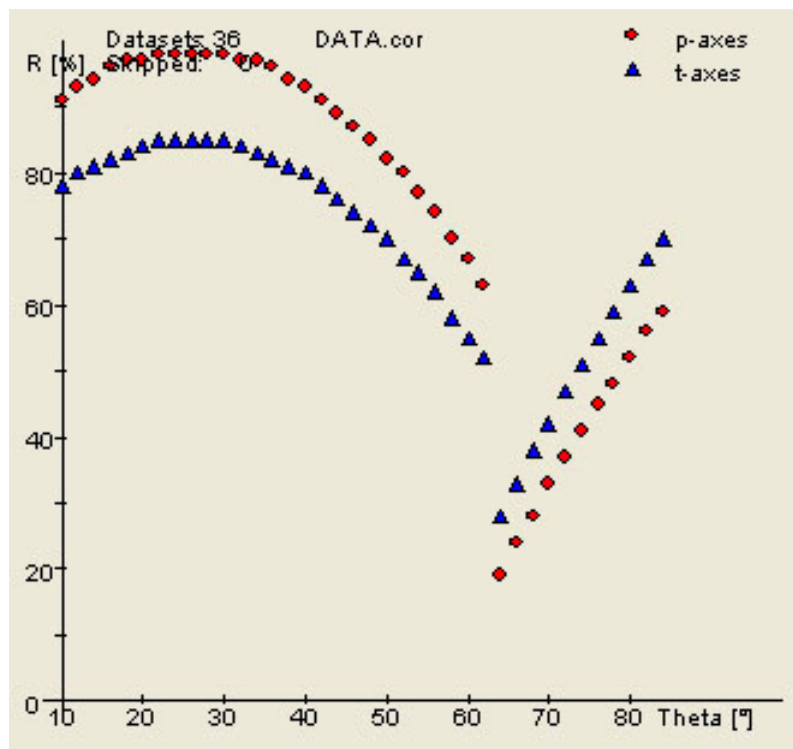
می‌شود و با موقعیت‌های اندازه‌گیری شده همان کمیت‌ها مورد مقایسه قرار می‌گیرد. زاویه بین خش برداشت شده و مؤلفه تنش برشی بیشینه در شرایطی که به حداقل ممکن برسد بهترین حالت را ارائه می‌کند. این روش روی



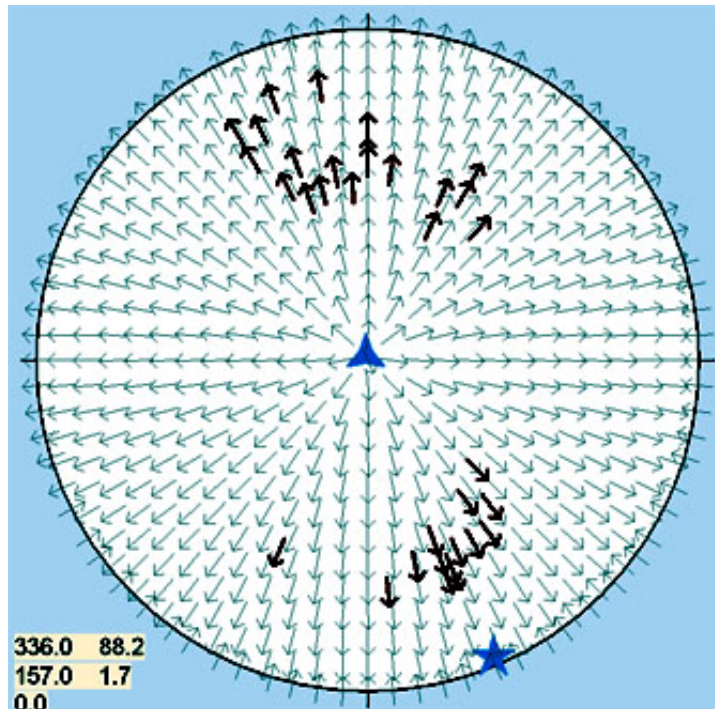
شکل ۷. تصویر استریوگرافیک محورهای فشار و کشش.



شکل ۸. گسل‌های مزدوج، مسیر آزادراه زنجان- میانه، دید به سمت جنوب شرق.



شکل ۹. نمودار تغییرات زاویه اصطکاک داخلی برحسب R%



شکل ۱۰. تصویر استریوگرافیک خط خش‌های گسلی برداشت شده (پیکان‌های پررنگ) و خط خش‌های محاسبه شده (پیکان‌های کم‌رنگ) در منطق مورد بررسی.

استریوگرام سمت چپ و با یک موقعیت، محور σ_1 را نشان می‌دهد. به‌طور همزمان روی استریونت دوم دایره بزرگی ظاهر می‌شود که نشانه‌های هم‌رنگ با استریونت قبلی دارای تمرکزی معرف موقعیت محور σ_3 هستند. از آنجا که شکل میدان (Φ) بین صفر تا ده تغییر می‌کند این فاصله به یازده قسمت مساوی با فاصله یک‌دهم یکدیگر تقسیم شده است، یعنی هر قسمت رنگ نشان‌دهنده تغییر یک‌دهم شکل میدان است. رنگ بنفش نمایش‌گر $\Phi = 0$ (بیضوی دوکی شکل) و رنگ سرخ نمایش‌گر $\Phi = 1$ (بیضوی کلوچه‌ای شکل) است. در منطقه مورد بررسی برای با به‌کارگیری روش پیش‌گفته، موقعیت محورهای اصلی و شکل میدان تعیین شد (شکل ۱۱).

همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود عضوهای تانسور تنش تقلیل یافته به‌صورت زیر اعلام می‌شود:

$$\Phi = 0/03 \text{ و } \sigma_3 = 164/4, \sigma_1 = 349/86$$

شکل میدان، دوکی است و منطقه مورد بررسی بیش از یک فاز تنش را پشت‌سر نگذاشته است. نکته بسیار مهم که در این پژوهش می‌بایستی به آن توجه شود زاویه بسیار پایین ونوسانات بسیار کم زاویه نابرازش است (شکل ۱۲).

همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، نوسانات زاویه نابرازش بین صفر تا $3/9$ درجه، و میانگین حسابی آن $1/34$ درجه است. به‌طور عملی این زاویه را پژوهشگران گوناگون تا 30 درجه مورد قبول قرار داده‌اند. این نشان‌دهنده حالت بسیار آرمانی منطقه مورد بررسی است.

۵ نتیجه‌گیری

به کمک روش‌های کلاسیک وارون‌سازی و روش‌های نوین، عضوهای چهارگانه ماتریس تنش تقلیل یافته در

در این روش می‌توان پس از به‌دست آوردن بهترین وضعیت تانسور تنش، عضوهای ماتریس تنش تقلیل یافته را اعلام کرد. موقعیت محورهای اصلی تنش دیرین و شکل میدان تنش در منطقه مورد بررسی به‌صورت زیر اعلام می‌شود:

$$\Phi = 0/0 \text{ و } \sigma_3 = 157/2, \sigma_1 = 336/88$$

۴-۷ روش وارون‌سازی چندمرته‌ای

می‌توان همه گسل‌هایی را که دارای عضوهای یکسانی در فضای چهاربعدی تانسور تنش تقلیل یافته هستند، در حکم یک فاز تنش در نظر گرفت. به‌عبارت دیگر هرگاه موقعیت محورهای اصلی تنش و شکل میدان تنش در فضای چهاربعدی تانسور مزبور حالت خوشه‌ای داشته باشند، به‌مثابه یک فاز تلقی می‌شوند.

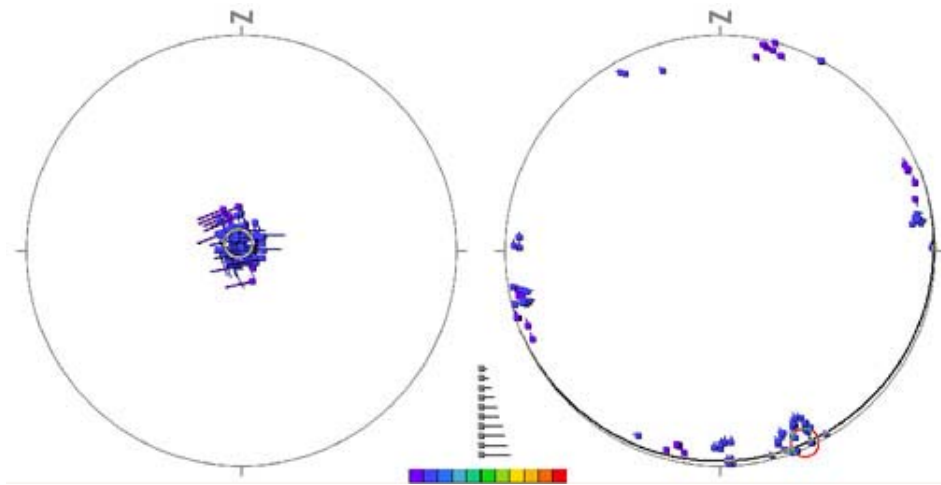
مجموعه گسل‌های برداشت شده روی زمین در طول زمان تحت تأثیر فازهای متفاوت تنش قرار می‌گیرد، به‌عبارت دیگر داده‌ها ناهمگن‌اند و لازم است تا به طریقی فازها از یکدیگر تفکیک شوند. اگر در یک مجموعه گسل برداشت شده، N گسل وجود داشته باشد و بخواهیم آن را به K زیرمجموعه تقسیم کنیم، تعداد راه‌حل‌های موجود از رابطه زیر تبعیت خواهد کرد (یاماچی، ۲۰۰۰):

$$NCK = \frac{N!}{K!(N-K)!} \quad (13)$$

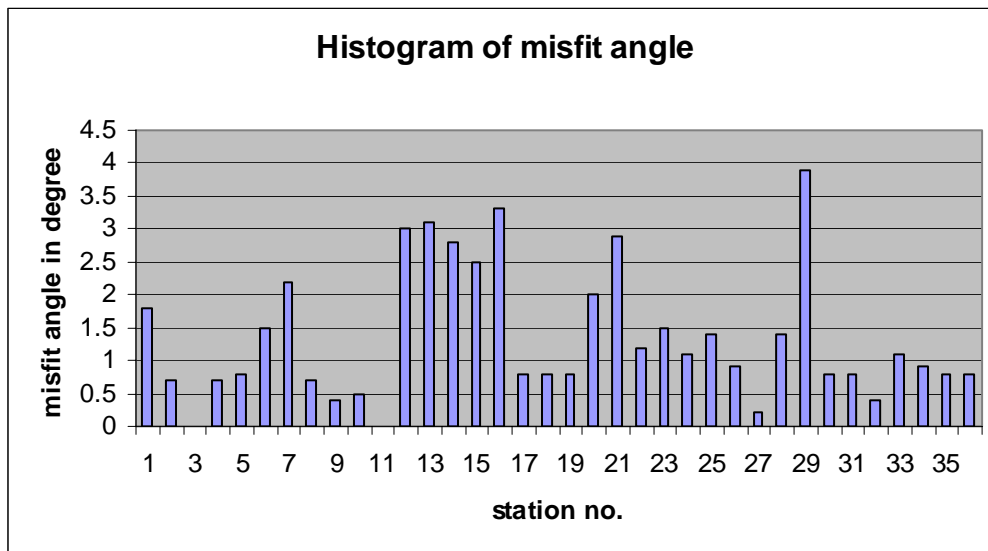
پس ابتدا داده‌های گسلی خش‌دار را برای تعیین موقعیت محورهای اصلی تنش و شکل میدان با یکی از روش‌های یاد شده حل می‌کنیم، داده‌هایی که یک وضعیت خوشه‌ای به‌خود می‌گیرند در حکم یک زیرگروه دارای یک فاز مشخص، از بقیه داده‌ها تفکیک می‌شوند. برای اینکه به‌طور همزمان موقعیت محورها و شکل میدان لحاظ شود، راه‌حل‌ها را به‌شکل نشانه‌های میله شکل روی دو استریونت و با طیف رنگ‌های مرئی نیوتونی می‌توان نمایش داد (یاماچی، ۲۰۰۰). داده‌های خوشه‌ای در

مقطع دایره‌ای موقعیت تصادفی به خود می‌گیرند. براساس نتایج به‌دست آمده، منطقه بیش از یک فاز تنشی پشت‌سر نگذاشته است. با رسم دایره‌های موهر بدون مقیاس و با توجه به بررسی‌های سینماتیک معلوم شد که اکثریت قریب به اتفاق گسل‌های منطقه در شرایط تنشی گسل‌های مزدوج قرار دارند.

منطقه تحقیق مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت و بیشینه تنش تراکمی اصلی با موقعیت قائم و کوچک‌ترین تنش تراکمی با موقعیت SSE و میل صفر تعیین شد. شکل میدان تنش دیرین در همه روش‌ها دوکی شکل شناسایی شد و این نشان می‌دهد که دگرریختی‌های منطقه برپایه موقعیت σ_1 کنترل شده است و دو تنش اصلی دیگر روی



شکل ۱۱. استریوگرام سمت چپ موقعیت محور σ_1 و استریوگرام سمت راست موقعیت محور σ_3 را نشان می‌دهد (نشانه دایره‌ای). طیف رنگین تغییرات شکل میدان از دوکی (رنگ بنفش) به کلوچه‌ای (رنگ سرخ) را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲. نمودار ستونی نوسانات زاویه نابرازش.

- Wallace, R. E., 1951, Geometry of shearing stress and relation to faulting. *J. Geol.*, **59**, 118-130.
- Wallbrecher, E., 1986, Tektonisch und Gefügeanalytische Arbeitsweisen. graphische, Rechnerische und Statistische Verfahren. 244 S.-220 Abb., Enke. Stuttgart.
- Wallbrecher, et al. 1996, Estimation of the shape factor of a paleostress ellipsoid by comparison with theoretical slickenside pattern and application of an eigenvalue method, *Tectonophysics*, **255**, 177-187.
- Yamaji, A., 2000, The multiple inverse method applied to mesoscale faults in midquaternary fore-arc sediments near the triple junction off central Japan, *J. Struct. Geol.*, **22**, 429-440.
- منابع
سازمان زمین‌شناسی ایران، ۱۳۸۳، نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ زنجان، زمین‌شناسی توسط: حاجیان، زاهدی و همکاران.
- Anderson, E. M., 1951, The Dynamic of faulting and dyke formation with application to Britain. Oliver & Boyd, Edinburgh, UK.
- Angelier, J., 1989, From orientation to magnitudes in paleostress determination using fault slip data, *J. Struct. Geol.*, **11**(1/2) 37.
- Angelier, J., 1990, Inversion of field data in fault tectonics to obtain the regional stress. A new rapid method by analytical means, *Geophys. J. Int.*, **103**, 363-376.
- Angelier, J., 1994, Continental deformation, edited by Hancock, P. L, Chap. 4 Pergamon Press.
- Angelier, J., and Goguel, J., 1979, Su rune methode simple de determination des axes Principaux des contraintes pour une population de failles, *CR, Acad. Sci. Paris.*, **288**, 307-310.
- Angelier, J., et al, 1982, Inversion of field data in fault tectonics to obtain the regional stress-single phase fault population: a new method of computing the stress tensor. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, **69**, 607-621.
- Bishop, A. W., 1966, The strength of soils as engineering material. *Geotechnique*, **16**, 91-128.
- Bott, M. J., 1959, The mechanics of oblique slip faulting. *Geol. Mag.*, **96**, 109-117
- Gonzalez. J. M.-Casado, et al, 2006, Calcite e-twins markers of recent tectonics: insight from quaternary karstic deposits from SE Spain, *J. Struct. Geol.*, **28**, 1084-1092.
- Marret, R., and Allmendinger, R. W., 1990, Kinematic analysis of fault slip data, *J. Struct. Geol.*, **12**, 973-986.
- Ramsay, J. G., and Lisle, R. J., 2000, The Techniques of Modern Structural Geology, Vol. 3, Academic Press.
- Ritz, J. F., 1994, Determining the slip vector by graphical construction: Use of a simplified representation of the stress tensor, *J. Struct. Geol.*, **16**, 737-741.
- Sperner, B., Ratschbacher, IL. Ott, R., 1993, Fault stress analysis: A Turbo-Pascal Program package for graphical presentation and reduced stress tensor Calculation, *Comput. Geosci.*, **19** (9), 1361-1388.