تحلیل دینامیکی و ارزیابی توان جنبشی گسل دوچاه، ایران مرکزی

محدثه عجمي'، رضا نوزعيم`*، محسن الياسي"، سعيد معدني پور ، سعيد حاج اميني"، وحيد توكلي" و كوثر شادرام"

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده زمین شناسی، دانشکدگان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران ۲. استادیار، دانشکده زمین شناسی، دانشکدگان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران ۳. دانشیار، دانشکده زمین شناسی، دانشکدگان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران ۴. استادیار، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تهران، تهران، ایران ۵. مربی، دانشکده زمین شناسی، دانشکدگان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران ۶ دانشجوی کارشناسی، ارشد، گروه زمین شناسی، دانشکه علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۷/۷)، پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۱۰/۲۰)

چکیدہ

گسل دوچاه با ظاهری خمیده و با راستای تقریبی خاوری-باختری و شیب حدود ۷۰ درجه به سمت شمال واقع در پایانه شمال باختری گسل قم-زفره، از ساختارهای جالب توجه در ایران مرکزی میباشد. تاکنون پژوهشهای متعددی بهویژه از دیدگاه رسوب شناسی و دیرینه شناسی در منطقه دوچاه صورت گرفته است؛ اما کماکان اطلاعات ساختاری از گسل دوچاه واقع در باختر استان قم (کوههای یزدان و دوچاه) بسیار اندک است. در این پژوهش با تمرکز بر اطلاعات هندسی وجنبشی گسل دوچاه و و پهنه دگرریخت شده امراف آن در سازندهای قم و قرمز فوقانی به تحلیل تنش دیرینه در این محدوده پرداخته شده است که موقعیت محور بیشینه شده اطراف آن در سازندهای قم و قرمز فوقانی به تحلیل تنش دیرینه در این محدوده پرداخته شده است که موقعیت محور بیشینه شده اطراف آن در سازندهای قم و قرمز فوقانی به تحلیل تنش دیرینه در این محدوده پرداخته شده است که موقعیت محور بیشینه تراکمی اصلی (۲۵) و محور بیشینه کششی اصلی (۵) به ترتیب برابر با ۲۰۰٬۰۰ و ۲۸۵٬۰۰ و ۲۸۵٬۰۰ به دست آمد. تحلیل هندسی و جنبشی ساختاری مرتب باگرد با گسل دوچاه و با توجه به آرایش فضایی محورهای اصلی تنش بیانگر فرانهادگی برش چپگرد بر روی برش ساختاری مرتبط با گسل دوچاه و با توجه به آرایش فضایی محورهای اصلی تنش بیانگر فرانهادگی برش چپگرد بر روی برش در (کاسپین) نسبت داد. بر مبنای شکل میدان تنش میام را می توان به خمیدگی رو به شمال گسل دوچاه و چرخش ورته منامی مرز در کاسپین) نسبت داد. بر مبنای شکل میدان تنش میانگین حاکم بر منطقه ترسیم شده است. آرایش خطهای گذر تنش بینگر بیروی آنها از رژیم تنشی کلی حاکم بر پوسته ایران است. ترایش خطهای گذر تنش بیشنگر پیروی آنها از رژیم تنشی کلی حاکم بر موسته ترایش درکتی گسلها (Potential بین و محور تنش بین گسل دوچاه و موید می محوره ای و محور تنه برای رزدیکی با و ضعیت تنش زمین ساختی حاکم بر محوره آن گسل درکتی گسله از موله در برای و پی مسین می درکتی کسل دوچاه و و محور تنش برای رزدیکی با وضعیت تنش زمین ساختی حاکم در محدوده آن گسل دارد. با توجه به موقعیت تنش زمین کسل دوچاه بیشینه نشانگر پیروی آنه گر می می درکه) راکه، راکه، پین گسل دوچاه حموره تری گسل دوز دی مرزو است. قضایی بین گسل دوچاه و محور تنش بیشه تراکمی (رم)، پینسیل حرکتی گسل دوچاه حموره تری برای مین برزه می یاین یا ی مری و می مرده ای درکه بر مرکه و مره و مرین و مین مرد و

واژههای کلیدی: تحلیل تنش، توان جنبشی، گسل دوچاه، قم، ایران مرکزی.

۱. مقدمه

بازسازی تنش دیرین در واقع تحلیل ساختارهای روی زمین است و این امکان را فراهم میکند که شرایط تنش در گذشته مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته و شرایط تنشی را که در آن زمان اعمال شده و سبب شکل گیری ساختارها شده است، بازسازی شود. با پیشرفت مطالعات صحرایی و روشهای تحلیل تنش دیرین، بررسی تکامل سنگ کره در مکان و منشأ اولیه و ثانویه تنشهای سنگ کره، ماحصل روابط بین صفحهای و توپوگرافی بزرگ مقیاس است (لوکاجیچک و همکاران، ۱۹۸۸). الگوی تنش در طول زمان تغییر میکند؛ لذا باید ساختارهایی را

شناسایی کرد که در اثر تنش های خاصی شکل می گیرند که در این راستا ساختارهای شکننده مانند گسل ها، نسبت به ساختارهای شکل پذیر کلید قابل اعتمادتری برای فهم توزیع و تکامل میدان های تنش دیرین از رویدادهای زمین ساختی فراهم می کنند. اندازه گیری تنش در زمین شناسی ساختاری نقش مهمی در پژوهش های ساختارهای شکننده دارد. اطلاعات پایه برای چنین کاری، استفاده از صفحه های گسلی و خط خش های ایجادشده بر روی صفحات گسل است (آنژلیه، ۱۹۷۹. خط خش ها، جهت و زوایای حرکت دو قطعه سنگی را نسبت به

nozaem@ut.ac.ir

دگرریختی امروز در بیشتر گستره ایران زمین، متأثر از همگرایی ورق عربی بهسمت شمال-شمال خاوری است. در این پژوهش سعی شده است با برداشت دقیق هندسی و جنبشی گسلهای موجود در پهنه دگرریخت شده گسل دوچاه و تحلیل آنها به روش وارونسازی تنش، موقعیت محورهای بیشینه تنش تراکمی اصلی (σ) و بیشینه تنش ضمن پهنه بندی منطقه از دیدگاه مناطق پایدار و ناپایدار؛ نسبت به جهت محور بیشینه تنش تراکمی اصلی (σ) امکان فعالیت گسل دوچاه با توجه به موقعیت فضایی آن نسبت به جهت محور بیشینه تنش تراکمی اصلی (σ) مورد ارزیابی قرار گیرد. لازم بهذکر است که این ارزیابی فارغ از بزرگای زلزله محتمل وقوعی میباشد و صرفاً به بررسی توان فعالیت گسل دوچاه متمر کز شده است.

۲. مبانی نظری و روش مطالعه

پس از بررسی تصاویر هوایی و ماهوارههای و تهیه نقشه پایه از منطقه، عملیات صحرایی بهمنظور برداشت ساختاری از گسل های منطقه صورت گرفت. در عملیات صحرایی حدود ۱۰۰ صفحه گسلی با مشخصات دقیق هندسی و جنبشی برداشت شد. برای تحليل جنبشي گسلها معيارهاي جنبشي معرفي شده توسط پتیت (۱۹۸۷) و دابلاس (۱۹۹۸) استفاده شده است. برای تحلیل تنش دیرینه (Paleostress analysis)، پیشفرض های پایهای تنش دیرینه برای تفکیک فازهای تنش (Phases of stress) به کار رفته است که عبارتاند از: ۱) لغزش گسل.ها بر روی هم تأثیری ندارد، ۲) بردار لغزش با تنش برشی بیشینه منطبق است، ۳) میدان تنشی که سبب پویایی گسلها میشود، در طول زمان ثابت و همگن است، ۴) قطعات گسلی، دچار چرخش نشدهاند (لایل، ۱۹۹۸؛ نمکاک و لایل، انجام مطالعات دقيق تر ۱۹۹۵). برای نظیر تفکیک فازهای تنش، بهدست آوردن محورهای اصلی فشارش و کشش تنش، منطقه موردمطالعه می بایست به محدوده های کوچک تری تقسیم شود.

یکدیگر نشان میدهند و آن بهعنوان جهت بیشینه تنش برشی اعمالشده بر روی صفحه گسل در نظر گرفته می شود. در این پژوهش به منظور دستیابی به جهت محورهای اصلی تنش و شکل میدان از روش تحلیل داده های لغزش گسلی ارائه شده توسط آنژلیه (۱۹۹۰) استفاده شده است. پهنه گسلی دوچاه با ظاهری خمیده، با راستای تقریبی خاوری–باختری و شیب حدود ۷۰ درجه به سمت شمال، با طول ۱۷ کیلومتر و پهنه دگرریخت شده به پهنای تقریبی ۴ کیلومتر، در شمال باختر شهر قم قرار دارد (شکل ۱). این منطقه شامل برونزد سطحی واحدهای سنگی سنوزوییک و کواترنری میباشد. بیشترین رخنمون سنگی مربوط به سازند سرخ بالایی (Upper Red Formation) است. از مهم ترین ساختارهای منطقه می توان به گسل دوچاه و میل و تاقدیس میل اشاره کرد (شکل ۱– ب). علاوهبر اطلاعات زمین شناسی ارائه شده در نقشههای زمین شناسی تهیه شده از منطقه قم (نقشه های ۱:۲۵۰۰۰۰، ۱:۱۰۰۰۰۰ و ۲۵۰۰۰۱) توسط سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، اطلاعات مستند ساختاری و هندسی–جنبشی از منطقه دوچاه زیاد نبوده و محدود به مطالعات نوگل سادات (۱۹۸۵)، مورلی و همکاران (۲۰۰۹)، زمانی پدرام و کریمی (۱۳۹۵) و عجمی (۱۳۹۹) میباشد و بهویژه با رویکرد تحلیل تنش دیرین بسیار اندک است. با تلفیق اطلاعات و پژوهشهای فوق و همچنین یافته های عجمی (۱۳۹۹) گسل دوچاه با هندسه ای که اشاره شد، گسلی با حرکت جوان امتدادلغز چیگرد میباشد که بر روی حرکت قدیمی ترافشارشی راستگرد فرانهاده شده است. با توجه به پژوهش های ساختاری که در زمینه تنش دیرین در بخش ها مختلف ایران صورت گرفته است، ترکیب اطلاعات بهدست آمده از روش های ژئودتیکی، ژئوفیزیکی و مطالعات GPS و تلفیق آنها با دادههای ساختاری می تواند اطلاعات و نتایج ارزشمندی برای درک مدل ژئودینامیک امروزه ایران فراهم کرده و در بازسازی تاریخچه زمینساختی ایران مؤثر واقع شود. اکثر یژوهش های صورت گرفته در ایران نشان دادهاند که



(الف)



شکل ۱. الف) نقشه گسلهای فعال ایران (حسامی و همکاران، ۱۳۸۲) به همراه موقعیت برداره های GPS (ورنانت و همکاران، ۲۰۰۶ و ریلینگر و همکاران، ۲۰۰۹) در پوسته ایران. (DFS: گسل درونه، HZF: گسل زاگرس مرتفع، MFF: گسل پیشانی کوهستان). ب) نقشه زمین شناسی محدوده مورد مطالعه برگرفته از نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ (حاجیان و امامی، ۱۳۷۰) همراه با جانمایی ایستگاههای برداشت میدانی و تصاویر صحرایی.

> این محدودهها به سبب آن که امکان برداشت اطلاعات به فواصل بین آنها مناطقی است که برداشت اطلاعات در

آنها به دلیل نبود گسل خشدار یا وجود توپوگرافی خشن شکل کاملاً همگن وجود ندارد، به هم پیوسته نیستند و انجام نشده است. محدودهبندی منطقه، بر پایه پارامترهای مختلف انجام می گیرد، مانند ثابت بودن پارامتری ویژه

محیطهای که تحت کنترل گسلهای امتدادلغز هستند محورهای چرخش و میانه تنش اصلی دارای یک جهت گیری ثابت است (نزدیک به قائم تا قائم)، لذا با توجه به این موضوع می توان سایر گسلهای فرعی هر دسته را با توجه به امتداد و جهت حرکت این گسلها نسبت به گسلهای اصلی منطقه تعیین کرد.

۳. نتايج

۳-۱. هندسه و شواهد جنبشی گسلهای منطقه

گسلهای منطقه را به دو دسته گسلهای عرضی-برشی و گسل های طولی یا همان گسل های اصلی منطقه که اغلب دارای مؤلفه معکوس هستند که امتداد این دسته از گسل.ها خاورى-باخترى تا شمال باخترى-جنوب خاورى تغيير می کند، نقش اساسی در شکل گیری ساختارهای منطقه داشتهاند، می توان تقسیم کرد (شکل ۱–ب). گسل های عرضی-برشی بیشتر دارای سازکار راستالغز با امتداد شمالی-جنوبی است (شکل ۴) که این دسته از گسل ها بهعنوان ریدل،ها و آنتی ریدل،های گسل،های اصلی منطقه (گسل دوچاه و سفیدکوه) شناسایی شدهاست. یهنه گسلی سفید کوه در مرز واحدهای عضو d و e سازند قم قرار گرفته و سبب افزایش ضخامت این عضوها شده است. شواهد هندسی این گسل در سراسر منطقه قابل مشاهده و بررسی نیست ولی در دماغه تاقدیس میل نیز اثر صفحه گسلی آن قابل مشاهده است. آثار حرکت امتدادلغز هم بهصورت راستگرد و هم چپگرد در صفحه گسلی قابل مشاهده بود (شکل ۲). گسل دوچاه یکی از مهمترین گسل های منطقه است که منحنی شکل، و جهت شیب آن حدود ۷۰ درجه به سمت شمال است. طول این گسل حدود ۱۵ کیلومتر بوده که تاقدیس میل-دوچاه را از ناودیس یزدان جدا میکند. این گسل سبب جابهجایی و از بین رفتن یال جنوبی تاقدیس میل-دوچاه شده است (شکل ۳). در شکل (۶–الف) تصاویر استریوگرافیک از موقعیت گسل ها برداشت شده و نمودار پربندی (Contour diagram) قطب آنها نشان داده شده است. همچنین

مانند روند کلی ساختارها، سازوکار گسل ها، سنگ میزبان یا موقعیت جغرافیایی ویژه، نزدیک بودن نقاط برداشت به هم و غیره در نظر گرفته شود. سپس برای تحلیلهای استریوگرافیک و تحلیل تنش دیرین از نرمافزارهای Faultkin و Daisy (سالوینی، ۲۰۰۴) استفاده شده است. برای به دست آوردن تنش دیرین در محیطهایی که گسلهای امتدادلغز غالب هستند، از روشی منحصر به فرد و ابداعی به نام Rotax که قطب خش لغز گسلی میباشد، استفاده شده است (وایس و وینست، ۱۹۶۵؛ سالوینی و ويتورى ، ۱۹۸۲ ؛ سالوينى و همكاران ، ۱۹۹۹ ؛ ساتو و یاماجی، ۲۰۰۶ ؛ تدین و همکاران، ۲۰۱۹؛ مومنی و همکاران، ۲۰۲۱؛ خدایرست و همکاران، ۲۰۲۱ه). در این روش پس از دسته بندی گسل.ها به گسل.های مزدوج نوع اندرسونی، موقعیت محورهای اصلی تنش و شکل میدان محاسبه میشود. از نظر هندسی خطی رو صفحه گسل وجود دارد که با بردار لغزش زاویه ۹۰ درجه ساخته و موقعیت آن با تنش اصلی میانه (σ₂) موازی می باشد که این خط همان محور چرخش یا Rotax است. گسل هایی که در شرایط یکسانی تشکیل می شوند محل تجمع محورهای چرخش آنها تقریباً یکسان است. محل تجمع محورهای چرخش محل تقریبی تنش اصلی میانه (٥) را نمایش میدهد. گسلهایی که دچار چرخش شدهاند، محل تجمع محورهای چرخش آنها در استریونت تغییر می کند که هریک از این محلهای تجمع نشاندهنده محل احتمالی میانه تنش اصلی (٥٥) است. تنش اصلی میانه (σ₂) در رژیم زمین ساختی امتدادلغز عامل اصلی ایجاد گسل،ها است و حالت تقریباً قائم پیدا می کند. در این مطالعه، معیار حداقل فاصله زاویه بین دو محور چرخش مجاور ۲۵ درجه در نظر گرفته شده است. هریک از این خوشهها مربوط به تشکیل یک مجموعه گسلی مستقل در طی یک رژیم زمین ساختی است. در مرحله بعد خوشههای محل میانه تنش اصلی بهدستآمده و با توجه به محل میانه تنش اصلی نسبت و محل بیشینه محور تراکمی و کمینه تنش اصلی بهدست آمده است. در

برداشتشده و مقدار فراوانی در روندهای غالب ترسیم شده است. بدین ترتیب بیشترین شیب گسل های عرضی-برشی چپگرد برداشتشده ۸۷ درجه و شیب گسلهای راستگرد ۸۳ درجه بوده است. برای زوایای ریک خش لغزها نیز بیشترین زاویه برداشت شده برای گسل های چیگرد ۲۵ درجه و بیشترین مقدار حدود ۷۹ درجه بوده است، در خصوص گسل های راستگرد بیشترین زاویه ریک خش لغز ۷۶ درجه و کمترین مقدار حدود ۲۰ درجه بوده است. همان طور که در شکل (۶-ب) مشخص است، بیشتر گسلهای برداشتشده سازوکار راستالغز داشتهاند و به مقدار کمتری گسل های شیب لغز برداشت شده است.

نمودار گلسرخی (rose diagram) گسلهای برداشتشده در منطقه با توجه به میزان فراوانی هر روند و با تفکیک گسلهای ترسیم شدهاند. همانطور که از نمودار گلسرخی گسلهای (شکل ۶-الف) مشخص است گسل ها به طور غالب روندهای N60E ،N20W، N70W و N30E برای گسل.های راستالغز چیگرد و در خصوص گسل.های راستگرد نیز روند غالب N40E و N90W میباشد (شکل ۴). روند غالب گسل های معکوس N88W میباشد که تطابق خوبی با روند گسل های دوچاه و سفید کوه دارد (شکل ۲ و ۳). در شکل (۶–ب) نمودار فراوانی با توجه به زاویه افتادگی و یا ریک خش لغزهای



(ب)







(ث)







شکل۳. پهنه ساختاری گسل دوچاه (الف) نمای کلی از گسل دوچاه با سازوکار معکوس با مؤلفه راستالغز چپگرد، (ب) صفحه گسلی دوچاه، (ج) شکل استرویوگرافیک گسلهای برداشتشده.



شکل ۲. نمونهای پهنههای گسلی عرضه-برشی راستگرد و چپگرد در کوههای دوچاه (الف) شکل ماهوارهای گوگلارث از پهنه گسلی راستگرد و چپگرد کوههای دوچاه، (ب) نمای کلی از پهنههای گسلی راستگرد و چپگرد کوههای دوچاه و شکل استریوگرافیک گسلهای برداشتشده، (پ و ج) صفحه گسلی راستگرد و تصاویر استریوگرافیک گسلهای برداشتشده، (ت) تصاویر استریوگرافیکی از گسلهای راستگرد و چپگرد کوههای دوچاه، (ث و چ) صفحه گسلی چپگرد و تصاویر استریوگرافیک گسلهای برداشتشده.

۳-۲. بازسازی محورهای تنش دیرین در طی یک رخداد گسلش، صفحات با جهت یابی های مختلف همگی تحت اثر یک میدان تنش معین و با یک تنسور معلوم لغزيده خواهند شد (لايل، ۱۹۹۸). نکته مهم که از اهداف استفاده از اطلاعات لغزش گسلی (fault slip data) نیز محسوب می شوند، در بهره گیری از این دادهها و بازگشت گامبه گام تا رسیدن به شرایط اولیه، زایش گسل،ها میباشد. شرایطی که مبین جهت و موقعیت محورهای اصلی تنش و شکل میدان تنش خواهد بود. شایان ذکر است که در زبان ریاضی، از ۶ مؤلفه تعریف شده در فضای سهبعدی (Three dimensional) در حال تعادل بر یک جسم، تنها رسیدن به موقعیت و جهت سه مؤلفه شناسایی شده است؛ بنابراین از چهار پارامتر معلوم تنسور تنش اصلي براي محاسبه تنسور تنش استفاده میشود. تنسوری که از این طریق محاسبه میشود و نزدیک ترین تنسور به تنسور واقعی تنش میباشد را تنسور تنش كاهش يافته (Reduced Stress Tensor) مى نامند (آنژلبه، ۱۹۹۰ و ۱۹۹۴).

این تنسور قادر به تعیین مقادیر اصلی تنش نیست، بلکه در بردارنده شکل میدان تنش و موقعیت سه محور اصلی تنش میباشد. موقعیت خش لغز روی صفحه گسل، در واقع موقعیت حداکثر تنش برشی (Maximum shear stress) اعمال شده در اثر عملکرد یک تنسور تنشی معلوم است و بهترین راهنما در رسیدن به مؤلفه های تنسور تنش محسوب بهترین راهنما در رسیدن به مؤلفه های تنسور تنش محسوب بهترین راهنما در رسیدن به مؤلفه مای محسوب بهترین راهنما در رسیدن به مؤلفه مای محسوب بهترین راهنما در رسیدن به مؤلفه مای محسوب محسوب برای مشخص کردن جهت مؤثر اعمال تنش و میدان تنش برای مشخص کردن جهت مؤثر اعمال تنش و میدان تنش بر سه فرض اساسی استوار است که هم برای شناسایی میدان تنشی که اولین بار منجر به تولید گسل در راستای صفحات ضعیف شده و هم برای فعال سازی دوباره گسل های از پیش موجود، صادق می باشد (یاماجی،

۱. لغزش در جهت موازی با حداکثر تنش برشی
۱. اعمال شده روی صفحه

جابهجایی رخ میدهد. برای این منظور لازم است سمت لغزش (اثر خش لغز) روی چند گسل (صفحات دارای خشلغز با مقیاس متوسط) با جهتیابیهای مختلف شناسایی شود.

 ۲. تودههای سنگی دارای صفحات خش لغز با جهت یابی های مختلف تحت تأثیر یک میدان تنش، لغزیده شدهاند.

۳. حرکت یک گسل اثری بر سمت لغزش صفحات گسلی دیگر ندارد.

حالت عمومی نمایش مقادیر محورهای اصلی تنش به صورت $\sigma_3 \leq \sigma_2 \leq \sigma_1$ است. تغییر موقعیت فضایی این محورها نسبت به یکدیگر، با ایجاد یک بیضوی همراه است. بیضوی نمایانگر محدوده تأثیر مؤلفههای تنش است. به همین دلیل کمی کردن بیان شکل بیضوی تنش معیار مناسبی برای نمایش تغییرات مقادیر سه محور نسبت به یکدیگر است به طوری که با توجه به تغییرات مقدار سه محور اصلی، تعاریف مختلفی برای فاکتور شکل میدان تنش ارائه می شود:

 $\phi = (\sigma 2 - \sigma 3) / (\sigma 1 - \sigma 3) \tag{1}$

این نسبت بین دو مقدار صفر تا یک نوسان می کند. شکل بیضوی بهترتیب برای این دو مقدار، با اصطلاحات دو کی (Prolate) و کلوچهای (Oblate) بیان میشود. در نوشتار کنونی این نسبت مطابق روش (Angelier) فرض شده است. فاکتور شکل، نسبت بین دو اختلاف تنش است و ارتباطی با مقادیر مطلق تنش های اصلی ندارد. در این بررسی برای تفکیک فازهای دیرین از روش وارونساز چند مرحلهای که دارای ۴ پارامتر میباشد استفاده شده است، که ۳ بعد این فضا متعلق به موقعیت محورهای اصلی تنش و بعد چهارم مربوط به فاکتور شکل بیضوی تنش است. چون منطقه مورد مطالعه بیش از یک میدان تنش را تحمل کرده است، بنابراین گسل های برداشت شده ناهمگن و متعلق به چندین نسل مختلف میباشند. در طی محاسباتی که بر پایه روش های وارونسازی انجام می گیرد، تفکیک فاز و همگن کردن این

اصلی تنش نه بهعلت تغییر موقعیت فضایی میدان تنش و بلکه بهخاطر شکل رو به شمال خمیده گسل دوچاه میباشد؛ بدین صورت که با اعمال نیروی فشارشی با راستای شمالی-جنوبی می توان انتظار ایجاد برش راستگرد در قسمتهای خاوری و ایجاد برش چپگرد در قسمتهای باختری را داشت. در این میان موقعیت فضایی تاقدیس میل و گسل راندگی موجود در جنوب تاقدیس لاچینگ با راستای شمالی-جنوبی (شکل ۱) شاهدی قوی بر وجود یک حرکت امتدادلغز چیگرد قابل توجه در ارتباط با گسل دوچاه است. بنابراین شکل کلی گسل دوچاه، گسل قم و ساختارهای پیرامونی آن مؤید تشکیل ساختار اصلی منطقه در طی یک حرکت امتدادلغز ترافشارشی راستگرد غالب بوده که با جهت گیری محور تنش اصلی بیشینه در قسمت خاوری و مرکزی گسل دوچاه سازگاری دارد که احتمالاً این حرکت از ائوسن (سازند سرخ زیرین) تا اواخر پلیوسن (عضو d سازند قم) ادامه داشته است. با این وجود بر اساس مطالعات صورت گرفته در شمال ایران مرکزی و پیرامون منطقه مورد مطالعه مانند خدایرست و همکاران (۲۰۲۰a,b) چرخش ساعتگرد ورقه خزر (کاسپین) عاملی مؤثر در فرانهادگی برش چپگرد بر روی گسل های با روند عمومی خاوری-باختری در شمالی ایران مرکزی بوده است که ممکن است این عملکرد تا گسل دوچاه را نیز تحت تأثیر قرار داده باشد. داده های حاصل از تحلیل تنش دیرین کلیه دادههای گسلی (شکل ۷) نشاندهنده موقعیت روند ۰۳۰/۰۵ محور تنش بیشینه و ۲۸۵/۰۵ برای محور کمینه تنش اصلی است. راستای شمال خاوری تنش بیشنه اصلی و موقعیت فضایی قرارگیری تاقدیس میل نسبت به گسل دوچاه؛ احتمال تحت تأثير گرفتن منطقه دوچاه و فرانهادهشده برش چپگرد بر روی برش راستگرد قدیمی را بیش از پیش تقویت می کند، گرچه این امر در قسمتهای

باختری می تواند بهدلیل خمیدگی گسل دوچاه و راستای

N70E آن تقويت شود.

برداشتشده و تحلیل دادهها با نرمافزار مشخص شده است؛ ویژگی های مربوط به هر فاز در جدول ۱ آمده است که در آن N بیانگر تعداد دادهها است. شواهد تنش ديرين نيز، سازوكار يك فشارش شمال خاوري را نشان میدهد که بهطور کامل با حرکت جدید گسل دوچاه همخوان است. نتایج نهایی در جدول ۱ و شکل ۵ آورده شده است، شکل استریوگرافیک صفحات گسلی، موقعیتمحورها فشارش وکشش، نمودار گلسرخی راستا صفحات گسلی پردازششده آنها نشانداده شده است. روند هر جفت پیکان، شکل افقی روند تنش ها در فضای سهبعدی است. موقعیت تنش های اصلی بیشینه تنش تراکمی (σ₁) و بیشیه تنش کششی (σ₃) هر فاز تنشی در محدوده های تفکیکشده در شکل ۶ نمایش داده شده است. با توجه به شکل۶ در بیشتر محدودهها، تنش میانگین در راستای شمال خاور-جنوب باختر (N30E>) است که با راستای تنش کلی حاکم بر پوسته ايران همخواني زيادي دارد (شكل ۷). اما بايد توجه داشت که موقعیت محورهای اصلی تنش محاسبهشده در منطقه دوچاه می تواند نتیجه تأثیر شکل خمیده گسل بر روند ساختارها و در نتیجه محاسبات حاصل از واکاوی آنها نیز باشد. بدین صورت که در حال حاضر روند اثر سطحی گسل دوچاه با شکل خمیده رو به شمال، در قسمت خاوری دارای روند N60W بوده که در قسمت مرکزی بهصورت تقریباً خاوری–باختری در آمده و در قسمت باختری روند تقریبی N70E بخود می گیرد. اگر این تغییر روند و خمیدگی گسل دوچاه یک ساختار پی سنگی (نسبت به واحدهای چینهای سازند قرمز زیرین، سازند قم و سازند قرمز فوقانی) و بدون تغییر در بازه زمانی پسانئوژن باشد؛ قطعاً میتواند در آرایش ساختارهای به شکل کنونی مؤثر باشد. به بیان دیگر در این صورت تغییر جهت موقعیت محورهای

فاز تنشی در هر محدوده بر پایه تعداد دادههای

دادهها مدنظر است.



شکل ۵. (الف) شکل استریوگرافیک گسلهای برداشتشده از منطقه مورد مطالعه بههمراه نمودار پربندی قطب روند آنها، (ب) نمودار کنتوری قطب گسلهای برداشتشده همراه با نمودار فراوانی زاویه ریک خشلغزها، (پ تا ج) نتایج رژیم تنش فشارشی بهدستآمده از وارونسازی دادههای سطوح گسلی خش لغزدار در ایستگاههای اندازهگیریشده (محل برداشت بر روی نقشه شکل ۷ آمده است). نتایج شامل استریوگرام سطوح گسلی خشلغزدار، موقعیت محورهای فشارشی و کششی.

σ3	σ_1	تعداد	محدوده مورد مطالعه
• 97/ • 7	• 19/12	۲٥	١
120/75	36./19	١٨	۲
220/20	• 7 • / • V	۲.	٣
Y 0//Y/	•))/•V	۳.	٤

جدول۱. پهنههای تفکیکشده با نرمافزار و میانگین موقعیت تنشهای اصلی، (N) تعداد دادههای لغزش گسلی در هر محدوده.



شکل۲. موقعیت میانگین راستای تنش اصلی تراکمی بیشینه (٥٦) در بخش های مختلف محدوده مورد مطالعه.



شکل۷. موقعیت تنش های اصلی بیشینه (۰۵/۰۳۰) و کمینه (۲۸۵/۰۵) بهدست آمده از کل دادههای گسلی در منطقه مورد مطالعه.

در خصوص سن دگرشکلی با توجه به این که همه سن دگرشکلیهای برداشتشده حداقل پس از میوسن دادههای گسلی استفاده شده، از سازند قم به سن آغازین (Post Early Miocene) میباشد که بازههای الیگومیوسن برداشت شده است، میتوان نتیجه گرفت که نزدیک به ۱۵ میلیون سال را شامل میشود. نتیجه

(شکل ۸). از آنجاکه محورهای تنش اصلی بهدست آمده در هر محدوده، میانگین میدانهای تنش کوچک و محلی در آن محدوده است و موقعیت آن در سراسر محدوده صادق نیست، این نقشه در نهایت با ساختارهای تشکیل شده در منطقه مطابقت داده شد و برای همخوانی بیشتر با میدان تنش سازنده ساختارها، اصلاحاتی بر روی آن انجام گرفت. در نقشه نهایی، خطهای گذر، تطابق خوبی با میانگین شرایط تنش و ساختارهای بزرگ زمینساختی دارند. در بیشتر نقاط، خطهای گذر محور تنش بیشینه، عمود بر اثر سطح محوری چینها و گسلهای تراستی مطابق با راستای حرکت شیبلغز و راستالغز گسل.های دوچاه، میل و دیگر گسل.ها هستند. به نظر میرسد برخی ناهماهنگیها در این روند، به سبب دگرشکلیهای محلی و فرانهاده (Superimposed) (deformation رخ داده باشد. همان گونه که اشاره شد، با چرخش دادهها و قائم کردن محور تنش میانه (σ₂)، موقعیت دادههای گسلی و محورهای تنش به موقعیت زمان تشکیل گسل، برگردانده شده است. برای سادهسازی، همه گسلها متعلق به یک دوره زمانی محدود در نظر گرفته شده و سن این دوره قابل اندازه گیری عددی نیست؛ بنابراین، خطهای گذر محورهای اصلی تنش نیز برای زمان تشکیل گسل ها رسم شده است. بدیهی است که هرگونه ناهماهنگی خطهای گذر و ساختارهای شکلگرفته در منطقه، به سبب دگرشکلی.های ناشی از چرخش ساختارها در طول تاریخ دگرشکلی و ناهمسن بودن این ساختارها با گسلها است. بر اساس نظریه لی و همكاران (۱۹۹۷)، در این نقطه اختلاف تنش صفر بوده و تنش اصلی بیشینه تراکمی و میانه، اندازه یکسانی به خود می گیرند. بنابراین، شکل میدان در این نقطه کلوچهای (Oblate) بوده و بیضوی تنش دارای تنها یک مقطع دایرهای است. دایره مور (Mohr circle) در این نقطه، به شکل دوبعدی تبدیل میشود زیرا ₀1 و ₅0 اندازه مساوی داشته و در محور تنش نرمال (σ_n) بر روی هم قرار مي گيرند.

دگرشکلی در این بازه زمانی، پدیدههایی مانند چینخوردگی، گسلش و چرخش لایهها و دیگر ساختارهای ایجادشده در منطقه است؛ بنابراین موقعیت امروزی ساختارهای قابل مشاهده در سطح زمین می تواند با موقعیت زمان تشکیل، بسیار متفاوت باشد. با توجه به این که همه برداشتها از سطح زمین انجام شده و دگرشکلی چیره سنگهای منطقه از نوع شکننده بوده و در شرایط دما و فشار کم در نزدیکی سطح زمین اعمال شده است، میتوان نظریه اندرسن را برای این بخش از پوسته بالایی معتبر دانست؛ بنابراین بر اساس نظریه اندرسن، تنش کمینه اصلی در زمان رسوب گذاری سازند قم باید افقی باشد. توجه به بررسی های آماری زاویه افتادگی خطخش های برداشت شده و محورهای اصلی تنش بهدست آمده در منطقه مورد مطالعه و بهخصوص در گسل های موجود در واحدهای جوان (مانند سازند قرمز فوقانی)، نشان میدهدکه رژیم زمینساختی راستالغز، در منطقه حاکم بوده است؛ بنابراین بر پایه تئوری اندرسن، تنش اصلی میانه (σ₂) باید قائم باشد. برای این منظور، تک تک داده های گسلی موجود در هر محدوده با توجه به میانگین میدان تنش به دست آمده در همان محدوده، به اندازهای چرخانده شده که میدان تنش میانگین جدید بهدست آمده از موقعیت جدید گسل،ها، دارای تنش اصلی ميانه قائم باشد. اين عمليات براي همه پهنهها به تفكيك انجام شد. موقعیت محورهای تنش پیش و پس از چرخش محورها با دقت ۱ درجه در جدول ۲ بهدست آمده است. در شکل ۷ موقعیت تنش های اصلی بیشینه و کمینه میانگین را در کل منطقه مورد مطالعه و به تفکیک محدودهها نشان داده شده است. در همه محدودهها، تنش اصلی میانه نزدیک به قائم است. بر این اساس میانگین زاویه چرخش برای ساختارهای گسلی کل منطقه مورد مطالعه نزدیک به ۴۰ درجه به دست آمد.

پس از چرخش دادهها، و قائمشدن محور تنش اصلی میانه (σ₂)، می توان نقشه خطهای گذر تنش را برای تنشهای افقی تنشهای اصلی بیشینه و کمینه میانگین رسم کرد

قبل از چرخش		بعد از چرخش		ذخحخش	محدوده مورد مطالعه
σ_3	σ_1	σ3	σ_1	س پر س	35 5
• 97/• 3	• 19/12	73.1.2	• \7/• 7	۲۰/۳۹	١
۱٤٧/٦٣	321.19	• 7 ٤/ • 7	۱۹۸/۰۸	٥٠/٩٨	۲
۲۲0/٤٠	• ٢ • / • ٧	•\0/•0	• ٩ • / ١٣	٤٤/١٢	٣
70//7/	• 1 1/• V	۳۰۰/۱۰	• £ • / • 0	٣.	٤

جدول۲. موقعیت محورهای تنش اصلی پیش و پس از چرخش دادهها بر اساس نظریه اندرسن.



شکل∧ نقشه ساختارها، تغییرات فاکتور شکل میدان در محدوده مورد مطالعه و خطهای گذر تنشهای اصلی افقی، خطهای سیاهرنگ، محور چینها را نمایش میدهند.

انجامشده، برآوردهای گوناگونی برای انتخاب در ازای بخشی از گسل که جنبش دوباره مییابد برای هر پهنه لرزهزمین ساختی وجود دارد. در این پژوهش امکان حرکت این گسل در آینده به روش لی و همکاران (۱۹۹۷) برآورد شده است. بر پایه این روش، ارتباط میان محور بیشینه تراکمی اصلی (σ₁) در میدان تنش جدید زمينساختي حاكم و هندسه گسل مورد توجه قرارگرفته و پس از برآورد متغیر FMP (Fault Movement Potential)، احتمال لرزه خیزی گسل بر آورد می شود. پتانسیل حرکتی گسل، بر پایه رابطه میان ویژگیهای هندسی گسل و رژیم تنش زمینساختی یک منطقه ارزیابی میشود. سوگیری سطوح گسلی در سامانه گسلی مزدوج، به وسیله محورهای تنش تعیین میشود (آنژلیه، ۱۹۷۹). زیرا عامل تشکیل گسل.ها و حرکت در امتداد آنها، حركات زمين ساختى است كه متأثر از سوگیری تنشرها است. پتانسیل حرکتی گسل رابطه

۳-۳. محاسبه توان جنبشی گسل خاستگاه بیشتر زمین لرزه ها جنبش گسل هاست و زمین لرزه ها یکی از پدیده های حاصل از تکوین زمین شناسی یک ناحیه به شمار می آیند. گسل دوچاه یکی از مهم ترین گسل های منطقه است؛ که با راستای تقریبی خاوری -باختری و شیب حدود ۲۰ درجه به سمت شمال و طولی حدود ۱۵ کیلومتر واقع در پایانه شمال باختری گسل قم-زفره واقع شده است. اگرچه، تا به حال از این گسل فعالیت لرزه ای خاصی ثبت نشده است (زمین لرزه های بزرگ) و به اصطلاح غیر فعال بوده است ولی با توجه قطع شدگی لایه های کو اتر نر تو سط این گسل و محل قرار گیری این گسل در پایانه گسل قم-زفره مستعد ترین گسل برای فعالیت در آینده نزدیک و ایجاد زمین لرزه های به شمار می آید.

برای ارزیابی میزان فعالیت یک گسل از نظر لرزهخیزی معیارهای متفاوتی ارائه شده است. در بررسیهای تجربی

نزدیک با تنش زمینساختی (σ)، هندسه صفحه گسل (G) و ویژگیهای فیزیکی محیط درونی دو بلوک گسل (P) دارد. پتانسیل حرکتی گسل یا FMP با متغیرهای زیر بیان میشود:

 $FMP=f(G,P,\sigma)$

(٢)

محیطهای زمین شناسی به طور کلی غیرهمگن و بسیار پیچیده هستند، ولی در طی مطالعات آماری می توان این محیطها را به صورت همگن و مشابه در نظر گرفت. با این فرض به منظور ساده سازی محاسبات، محیط زمین شناسی پیرامون گسل مانند یک محیط همگن، مشابه و الاستیک (کشسان) در نظر گرفته می شود؛ بنابراین FMP به صورت زیر قابل بیان است (لی و همکاران، ۱۹۹۷):

$$FMP=f(G, \sigma) \tag{7}$$

تغییر در زاویه شیب گسل، منجر به تغییرات قابل توجه در فاصله زمان بازگشت میان رویدادهای لرزهای جداگانه و مقدار انرژی لرزهای میشود؛ در برخی از زوایای شیب، فعالیت لرزهای گسل از بین میرود یا بسیار اندک میشود (لوکاجیچک و همکاران، ۱۹۸۸). این در حالی است که اگر زاویه میان بیشینه تنش تراکمی اصلی و قطب صفحه گسل میان ۲۰ تا ۷۰ درجه باشد، گسلها توانایی بالایی برای لغزش و حرکت پیدا میکنند (لی و همکاران، ۱۹۹۷؛ لوکاجیچک و همکاران، ۱۹۸۸).

از دیدگاه مکانیکی مهمترین عاملی که باعث حرکت گسلهایی که از پیش موجود را تحت تأثیر قرار میدهند، عبارتاند از:

الف) اختلاف میان بیشینه محور تراکمی (σ₁) و بیشینه محور کششی اصلی (σ₃) که قطر دایره مور را مشخص میکند. ب) میانگین مجموع بیشینه محور تراکمی (σ₁) و بیشینه محور کششی اصلی (σ₃) که مرکز دایره مور مشخص میکند.

زاویه میان خط عمود وارد بر صفحه گسل(قطب گسل) و σ₁ بهصورت θ تعریف میشود. اگر جهت قطب گسل ۲₃، زاویه میل آن β₁، جهت گیری بیشینه محور تراکمی ۲₃ و زاویه میل آن β₂ باشد، میتوان θ را از رابطه زیر حساب کرد.

 $\cos\theta = \cos\beta_1 \cos\beta_2 \cos(\gamma_1 - \gamma_2) + \sin\beta_1 \sin\beta_2 \tag{(f)}$

اگر زاویه θ بین ۳۰ تا ۹۰ درجه باشد، گسل می تواند بلغزد و اگر که θ مساوی با ۶۰ درجه باشد، لغزش گسل راحت تر صورت می گیرد. اگر θ کوچک تر از ۳۰ درجه باشد، گسل نمی تواند بلغزد (لی و همکاران، ۱۹۹۷) برای بیان رابطه میان پتانسیل حرکتی گسل و زاویه θ، پتانسیل حرکتی گسل، به عنوان یک عامل مرتبط با فاکتور یادشده به صورت زیر بیان می شود (لی و همکاران، ۱۹۹۷):

 $FMP = \begin{cases} \theta = \theta \in [0^{\circ}, 30^{\circ}] \\ (\theta - 30^{\circ})/30^{\circ} \ \theta a \in [30^{\circ}, 60^{\circ}] \\ 1 - ((\theta - 60^{\circ})/30^{\circ})) \ \theta \in [60^{\circ}, 90^{\circ}] \end{cases}$ $FMP = (\theta - 30^{\circ})/30^{\circ} \\ \theta = 40^{\circ} \\ FMP = (40^{\circ} - 60^{\circ})/30^{\circ}) \\ FMP = 0.33 \end{cases}$

(۵)

با توجه به توضیحات فوق و نتایج حاصله از سوگیری تنش های زمین ساختی برای گسل دوچاه، امکان تحلیل متغیر "توان حرکتی گسل" امکان پذیر است. برای این منظور با محاسبه زاویه 6 و موقعیت فضایی صفحه عمود بر صفحه گسل دوچاه، متغیر FMP محاسبه شده است. نتایج این محاسبات در جدول ۳ با سوی تنش محاسبه شده از داده های لغزش گسلی و در جدول ۴ با سوی تنش تحلیل شده است (شکل ۹). با توجه به این مسئله که در براورد میدان تنش دیرین با کمک روش تنسور تنش کاهشیافته (Reduced Stress Tensor) نمی توانیم بازه زمانی برای هر فاز تنشی تعیین کنیم؛ در نتیجه نمی توانیم برای مقدار FMP یک بازه زمانی مشخص را تعیین کرد.

گسل	موقعیت بیشینه محور تراکمی (σ ₁)	قطب گسل	θ	FMP
دوچاه	۰۳۰/۰٥	۱۸۰/۲۰	٤٠ درجه	•/٣٣

جدول۳. مقادیر FMP محاسبهشده برای گسل دوچاه در محدوده مورد مطالعه بر پایه سامانه تنش محاسبهشده از دادههای لغزش گسلی.



شکل۹. تصویر استریوگرافیک از موقعیت فضایی میانگین گسل دوچاه، محور اصلی تنش بیشینه تراکمی (٥₁) و مقدار زاویه θ.

۴. نتيجه گيري

– براساس تحلیل تنش صورتگرفته موقعیت محور تنشهای اصلی بیشینه (σ₁) و کمینه (σ₃) بهترتیب برابر با ۰۳۰/۰۵ و ۲۸۵/۰۵ بوده شکل میدان تنش بهصورت کلوچهای (R~0.7) میباشد.

- در منطقه مورد مطالعه تمامی گسل های برداشت شده سوی حرکت امتدادلغز با مؤلفه کوچک تر معکوس را نشان میدهند. با توجه به تئوری اندرسون تنش اصلی میانه (σ₂) نسبت به دو تنش اصلی بیشینه (σ₁) و کمینه (σ₀) دارای زاویه میل بیشتری است. همچنین بیشتر محدوده های دارای زاویه میل بیشتری است. همچنین بیشتر محدوده های نشان میدهد منطقه تحت کنترل سیستم های راستالغز بوده است.

– با توجه به جهت گیری میدانهای تنش بهدست آمده و شکل هندسی گسل دوچاه و نوش برشهای ثبتشده بر روی آن (شکل ۶) می توان دو فرضیه را مطرح کرد:

الف) این که دو رژیم تنشی در منطقه تفکیک کرد که در رژیم تنشی اول جهت بیشینه تنش تراکمی (σ) بهصورت SE-NW و در رژیم تنشی دوم SW-NE بهدست آمده است. که احتمالاً رژیم تنشی اول قدیمی تر بوده و موجب برش راستالغز راستگرد غالب همراه با برخاستگی در منطقه گشته و این رژیم تنشی تا اواخر پلیوسن ادامه داشته است. در ادامه با توجه به چرخش ساعتگرد ورقه نزش در این منطقه تغییر کرده و بهصورت SW-NE در آمده است که حاصل آن تغییر در سوی گیری میدان تنش و احتمالاً فرانهاده شدن برش چپگرد بر روی حرکت راستگرد قدیمی به ویژه در قسمتهای میانی و باختری گشته است.

ب) با اعمال نیروی فشارشی در راستای عمومی شمالی جنوبی و با توجه خمش رو به شمال گسل دوچاه، در سمت خاور موجب اعمال برش راستگرد و در قسمت

باختری موجب ایجاد برش چپگرد گشته است. براساس شواهد موجود به باور نگارندگان هر دو احتمال یا ترکیب از هر دو حالت فوق میتواند در منطقه دوچاه در ایجاد دو نوع برش مؤثر باشد.

- موقعیت محور تنش اصلی بیشینه (σ₁) در منطقه دوچاه با روند کوتاه شدگی کلی پوسته ایران در ایران مرکزی و نقشه تنش جهانی مربوط به منطقه ایران تقریباً موازی است و هماهنگی قابل قبولی دارد.

- به نظر میرسد، ساختارهای منطقه که هماهنگی خوبی با روند خطهای گذر محورهای تنش نشان میدهند، دارای تاریخچه دگرشکلی کوتاهتر و همزمان با تشکیل گسلها بودهاند، چراکه پس از چرخش محورهای تنش همچنان هماهنگی خود را با خطهای گذر حفظ کردهاند. از سوی دیگر، همان گونه که اشاره شد، ساختارهایی که با خطهای گذر، هماهنگ نیستند، احتمالاً پیش و یا پس از زمان تشکیل گسلها نیز دچار دگرشکلی شدهاند.

– با بررسی نتایج بهدست آمده از تحلیل تنش و

margin, Journal of Geodynamics.

- Lee, C. F., Hou, J. J. and Ye, H., 1997, The movement potential of the major faults in Hong Kong area, Episodes, 20(4), 227. 231.
- Lisle, R. J., 1998, Romsa: a Basic program for palaeostress analysis using fault-striation data. Computers, Geosciences, 14, 255–259.
- Lokajicek, T., Spicak, A. and Waniek, L., 1988, Tectonic stress orientationand the seismic regime of a single fault: Tectonophysics. 152, 297-302.
- Morley, C., Kongwung, B., Jalalpour, A., Abdolghafourian, M. and Hajian, M., 2009, structural development of a major Cenozoic basin and transpressionsl belt in central Iran: The central Basin in the Qom-Saveh area. Geosphere, 5, 325–362.
- Moumeni, M., Nozaem, R. and Dehbozorgi, M., 2021, Quantitative assessment of the relative tectonic activity using the analytical hierarchy process in the northwestern margin of the Lut Block, Central Iran, Journal of Asian Earth Sciences, Volume 206, 2021,104607,
- Nemcock, M. and L isle, R. J., 1995, A Stress Inversion Procedure for Polyphase Fault Slip Data Sets, Structural Geology Journal of, 17(10), 1453-1445.

اندازه گیری موقعیت فضایی محور اصلی تنش بیشینه تراکمی (σ₁) و زاویه آن با قطب گسل دوچاه، پتانسیل حرکتی گسل دوچاه (FMP) برابر با ۰/۳۳ بهدست آمد که نشانگر پتانسیل پایین این گسل برای فعالیت می باشد.

مراجع حاجیان، ج. و امامی، م. ه.، ۱۳۷۰، چهارگوشه زمینشناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ ، قم، انتشارات سازمان زمینشناسی و اکتشافات معدنی کشور. حسامی، خ.، جمالی، ف. و طبسی، ه.، ۱۳۸۲، نقشه گسل های فعال ایران، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله. مهندسی زلزله. زمانی پدرام، م. و کریمی، ح. ر.، ۱۳۹۵، نقشهی زمانی پدرام، م. و کریمی، ح. ر.، ۱۳۹۵، نقشهی نقشهی مازمان زمینشناسی و اکتشافات معدنی کشور. عجمی، م.، ۱۳۹۹، تحلیل هندسی-جنبشی وتنش دیرین در منطقه دوچاه، میل و لاچینگ، غرب قم. پایاننامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ۱۷۴ صفحه.

- Angelier, J., 1979, Determination of the mean principal direction of stresses for a given fault population. Tectonophysics, 56, 17-26.
- Angelier, J., 1990, Inversion of field data in fault tectonics to obtain the regional stress. III. A new rapid direct inversion method by analyticalmeans. 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. chaper J., 4, pp. 53-100.
- Angelier, J., 1994, Fault slip Analysis & paleostress reconstruction edited by Hancock, P.L. 1994 -Continental Deformation, pergamon press Ltd. Chapter, 4, 53-100.
- Doblas, M., 1998, Slickenside kinematic indicators. Tectonophysics 295, 187–197.
- Khodaparast, S., Madanipour, S., Nozaem, R. and Hessami, K. 2020a, Structural evidence on strike slip Kinematic inversion of the Kushke-Nosrat Fault zone, Central Iran. Geopersia, 10, 195–209.
- Khodaparast, S., Madanipour, S., Enkelmann, E., Nozaem, R. and Hessami, K., 2020b, Fault inversion in central Iran: evidence of post Pliocene intracontinental left lateral kinematics at the northern Iranian Plateau

- Nogole-Sadat, M.A.A., 1985, Les zones de decrochmentel Les virgations in Iran, consequences des resultats de LL de la region de Qom. Geol Surv Iran Rep 1–201.
- Petit, J. P., 1987, Criteria for the sense of movement on fault surfaces in brittle rocks. Journal of Structural Geology 9, 597–608.
- Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., Ozener, H., Kadirov, F., Guliev, I., Stepanyan, R., Nadariya, M., Hahubia, G., Mahmoud, S., Sakr, K., ArRajehi, A., Paradissis, D., Al-Aydrus, A., Prilepin, M., Guseva, T., Evren, E., Dmitrotsa, A., Filikov, S. V., Gomez, F., Al-Ghazzi, R. and Karam, G., 2006, GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. J. Geophys. Res. 111, B05411.
- Sato, k. and Yamaji, A., 2006, Uniform distribution of points on a hypersphere for improving the resolution of stress tensor inversion. Journal of structural geology, 28(6), 972-979.
- Salvini, F., 2004, Daisy 4.1. The Structural Data Integrated System Analyzer. Available at Software University of Roma Tre, Roma.
- Salvini, F. and Vittori, E., 1982, Analisi strutturale della linea Olevano-Antrodoco-Posta (Ancona-Anzio Auct.): metodologia di studio delle deformazioni fragili e presentazione del tratto meridionale. Memorie della Societa Geologica Italiana 24, 337–355.
- Salvini, F., Billi, A. and Wise, D. U., 1999,

Strike-slip fault-propagation cleavage in carbonate rocks: the Mattinata Fault Zone, Southern Apennines, Italy. J. Struct. Geol. 21, 1731–1749.

- Tadayon, M., Rossetti, F., Zattin, M., Calzolari, G., Nozaem, R., Salvini, F. and Khodabakhshi, P., 2019, The long-term evolution of the Doruneh Fault region M. Moumeni et al. Journal of Asian Earth Sciences 206 (2021) 104607 17 (Central Iran): A key to understanding the spatio-temporal tectonic evolution in the hinterland of the Zagros convergence zone. Geol. J. 54, 1454–1479.
- Vernant, P. H., Nilforoushan, F., Chery, J., Bayer, R., Dlamour, Y., Masson, F., Nankali, H., Ritz, J. F., sedighi, M. and Tavakoli, F., 2004a, Deciphering oblique shortening of central Alborz in Iran using geodetic data, Earth and planetary science letters 223: 177-185.
- Vernant, Ph., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M. R., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayser, R., Tavakoli, F. and Chery, J., 2004b, persent day curstal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and nortern Oman, Geophyscial Journal International, 157(1),381-398.
- Yamaji, A., 2000, The multiple inverse methods: a new technique to separate stresses from heterogeneous fault-slip data. Journal of Structural Geology 22, 441-4.
- Wise, D. U. and Vincent, R. J., 1965, Rotation axis method for detecting conjugate planes in calcite petrofabric. Am. J. Sci. 263, 289–301.

Paleostrees analysis and Evaluation of Movement potential of Dochah Fault, Central Iran

Ajami, M.¹, Nozaem, R.^{2*}, Eliassi, M.³, Madanipour, S.⁴, Haj Amini, S.⁵, Tavakoli, V.³ and Shadram, K.⁶

M.Sc. Graduated, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran
Assistant Professor, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran
Associate Professor, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran
Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
Instructor, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran
M.Sc. Student, Department of Geology, Faculty of Science, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

(Received: 29 Sep 2021, Accepted: 10 Jan 2022)

Summary

Qom region is one the significant area insight of geological features in Central Iran. Several researches have studied about the Cenozoic strata in terms of sedimentology, Stratigraphy and paleontology but, few structural detail data are available from this area. The most important exposure of the rock unites at the west of the Qom city is related to the Eocene volcanics, Lower Red, Qom and Upper Red Formations. Major structures at this area are Kamar Kuh and Mil anticlines, Yazdan syncline, Dochah and Sefid Kuh faults. Dochah Fault with E-W trending and $\sim 70^{\circ}$ dipping to the northward placed at the northwest termination of Qom-Zefreh Fault as a recent sinistral strike slip fault. This fault with ~15 km length separate Mil anticline from Yazdan syncline and eliminates the southern limb of Dochah overturned anticline. In this study, we focused on the Dochah Fault damaged zone in order to paleostress analysis using geometric and kinematic characteristics of fault slip data, which is achieved from the deformed Qom and Upper Red Formations. For this purpose, 100 fault slip data with precise and accurate geometric and kinematic characteristics have been measured in the field and analyzed with software Dasiy and Rotax methods. In order to determine the sense of shearing of the faults, the criteria of Petit (1987) and Doblas (1998) have been used. While the trend of the major structures is east-west but, most of slip data is related the transverse oblique slip faults, because the Dochah Fault passes through the soft materials of Lower Red Formation and consequently it is not possible or too hard to find the slicken line. Meanwhile, our results indicate the magnitudes of the axes of the maximum and minimum principal stress (σ_1, σ_3) as 030/05 and 285/05, Geometric and kinetic structural analysis related to the dochah fault and according to the spatial arrangement of the main stress axes indicate the readiness of the left-hand section on the right-hand section, especially in the western parts of the region (Caspian) attributed. oblate shape of field stress ellipsoid shape (R~0.7). Based on the field stress ellipsoid shape and the rotation of the fault data regarding the Anderson's theory for the compressive stress regime, the stress transition trajectory map has been prepared. The arrangement of maximum stress trajectories is consistent with the general stress regime in the Iranian crust and is consistent with the activity of the Dochah Fault. Different criteria have been proposed to evaluate the activity of a fault in terms of seismicity. In experimental studies, there are various estimates for selection of the part of the fault that the movement rediscovers for each tectonic seismic zone. Here, the possibility of moving Dochah Fault has been estimated by the method of Lee et al. (1997). In this method, the angular relationship between maximum principal stress axis (σ 1) and the pole of the fault plane considered in order to evaluate the Fault Movement Potential (FMP) based on equation "FMP=f (G, σ)". The angle between maximum principal stress axis (σ 1) and the pole of Dochah Fault (θ) is equal to ~40° and so FMP=0.33 based on equation FMP= $(\theta - 30^\circ) / (30^\circ)$ if $\theta \in [30^\circ, 60^\circ]$. This value of FMP indicates the low seismic potential of Dochah fault for movement and creating earthquakes.

Keywords: Paleostress Analysis, Movement potential, Dochah Fault, Qom, Central Iran.

^{*} Corresponding author: