

مدل سازی فیزیکی چرخش بلوک ها و نقش رسوبات شکل پذیر در تکامل ساختاری کپه داغ و زاگرس

مرضیه رستمی قطار قوئی^۱، مرتضی طالبیان^{۲*} و عباس بحرودی^۳

^۱ کارشناسی ارشد، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران.

^۲ دانشیار، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران.

^۳ دانشیار، گروه اکتشاف دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده های فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۱۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۰/۰۸/۱۰

کلیدواژه ها:

کپه داغ مرکزی

زاگرس مرکزی

مدل سازی فیزیکی

چرخش بلوک ها

گسل راستالغز راست بر

چکیده

دو کمر بند کوهزایی زاگرس و کپه داغ از نظر ساختاری شباهت های بسیاری دارند. در هر دو منطقه تاقدیس ها به وسیله گسل های عرضی با روند چیره شمال باختر-جنوب خاور بریده شده اند. راستای مایل این گسل ها نسبت به جهت تنش بیشینه، موجب چرخش پادساعت گرد بلوک ها می شود که کوتاه شدگی در عرض و کشیدگی در راستای کمر بند را در خود جای می دهد. اما گسل های راستالغز این دو منطقه تأثیر متفاوتی را بر روی محور تاقدیس ها نشان می دهد. به منظور درک بهتر تکامل ساختارهای وابسته به چرخش بلوک ها و تأثیر گسل های راستالغز بر روی کمر بند چین خورده-رانده؛ دو مدل فیزیکی با پنج بلوک مایل، با لایه های متفاوت و متناسب با چینه شناسی دو زون ساختاری، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مدل سازی آنالوگ بیانگر تأثیر لایه های شکل پذیر بر چگونگی بروز سطحی گسل ها و چرخش محور چین ها است. در منطقه زاگرس به دلیل وجود افق های شکل پذیر (همانند سازند هرمز) جابه جایی در راستای گسل های راستالغز پی سنگی عمدتاً به صورت انحنای محور چین خوردگی ها دیده می شود. اما در کپه داغ به دلیل کمتر بودن لایه های شکل پذیر این جابه جایی در سطح به صورت بریدگی محور چین ها نمایان است. رخنمون گسل ها در سطح در کپه داغ نسبت به زاگرس پیوسته تر، درازا و جابه جایی بیشتری دارد.

۱- پیش نوشتار

دگرریختی جنبه در ایران حاصل همگرایی دو صفحه عربی-اوراسیا است. میزان همگرایی بین این دو صفحه در خاور و باختر ایران متفاوت است، اما میانگین آن با نرخ همگرایی $22 \pm 5 \text{ mm/yr}$ در راستای $N85E$ است (Vernant et al., 2004). در بخش خاوری ۵۸ درجه طول جغرافیایی، بیشترین کوتاه شدگی به وسیله زون فروورانش مکران ($19/5 \pm 2 \text{ mm/yr}$) و مابقی آن (که برابر با $6/5 \pm 2 \text{ mm/yr}$ می باشد) در کمر بند چین خورده-رانده کپه داغ جای داده شده است (Vernant et al., 2004). باختر ۵۸ درجه طول جغرافیایی، دگرشکلی در کمر بند های چین خورده-رانده زاگرس و البرز توزیع شده است. میزان کوتاه شدگی در زاگرس مرکزی و ناحیه کوهستانی البرز به ترتیب $8 \pm 2 \text{ mm/yr}$ و $6/5 \pm 2 \text{ mm/yr}$ است (Vernant et al., 2004). با توجه به این مطالب، میزان کوتاه شدگی در دو منطقه مورد مطالعه کپه داغ و زاگرس کم و بیش یکسان می باشد.

ساختار چرخش پادساعت گرد بلوک ها در هر دو منطقه کپه داغ و زاگرس دیده می شود. در کپه داغ مرکزی، گسل های جنبی راستالغز راست بر به صورت مایل چین خوردگی ها را قطع می نمایند (Hollingsworth, 2008). انتهای این گسل ها با راندگی ها پایان می یابد و بیانگر این موضوع اند که گسل های راستالغز فقط در ناحیه کپه داغ محدودند و فراتر از آن ادامه نمی یابند. کوتاه شدگی در عرض و کشیدگی در امتداد کمر بند، سبب چرخش پادساعت گردی بلوک ها در کپه داغ مرکزی می گردد.

* نویسنده مسئول: مرتضی طالبیان؛ E-mail: talebian@ries.ac.ir

حقوق معنوی مقاله برای فصلنامه علوم زمین و نویسندگان مقاله محفوظ است.

doi: 10.22071/GSJ.2021.112225.1357

doi: 20.1001.1.10237429.1400.31.3.2.9

This is an open access article Under the by-nc/4.0/ License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



با استفاده از محاسبات ساده جابه جایی تجمعی بین گسل ها و چرخش مربوط به آن از زمان شروع گسلش راستالغز، کشیدگی در امتداد راستا ۳۰ کیلومتر و کوتاه شدگی عمود بر راستا ۵۰ کیلومتر در کپه داغ مرکزی محاسبه شده است (Hollingsworth, 2008). در زاگرس مرکزی نیز گسل های راستالغز موازی، سبب ایجاد چرخشی پادساعت گردی و کشیدگی در امتداد راستای کمر بند کوهزایی می گردد. میزان این چرخش با فرض ۵۰ کیلومتر کوتاه شدگی، ۱۰ تا ۲۰ درجه برآورد شده است (Talebian and Jackson, 2004).

چرخش بلوک ها با جهت کوتاه شدگی پیوسته ای در ارتباط است به طوری که چرخش بلوک ها همزمان کوتاه شدگی در راستای تنش بیشینه و کشیدگی در راستای کمر بند را موجب می شود و از آن به نام الگوی قفسه کتابی (Bookshelf) یاد می شود (Lamb, 1987; Jackson and Molnar 1990) (شکل ۱).

این پژوهش با مدل سازی فیزیکی چرخش بلوک ها در منطقه کپه داغ و زاگرس مرکزی به نقش رسوبات شکل پذیر در چگونگی چین خوردگی و چرخش محور چین ها پرداخته است.

۲- گسل های راستالغز کپه داغ

حوضه کپه داغ بر روی یک پی سنگ دگرگونی شده هرسی نین جای گرفته است (نبوی، ۱۳۵۵) که از شمال خراسان تا ترکمنستان ادامه دارد. کهن ترین سنگ های این منطقه سن دونین تا کربنیفر پایینی را دارند و در پنجره فرسایش آق در بند برونزد دارند (Ruttner et al., 1991; Lyberis et al., 1998). ستون چینه شناسی کپه داغ که بر روی آواری های آتشفشانی دونین قرار می گیرد (Robert et al., 2014) عمدتاً شامل توالی سنگ های آهکی، مارن، شیل، ماسه سنگ و تخریبی ها است. تنها در

رشد و پدیداری تاقدیس قوچان شده است. تاقدیس قوچان شامل سنگ آهک های کرتاسه و نوژن است که یک تپه بالا آمده حدود ۱۵ متری را روی دشت سیلابی به وجود آورده است. این ساختار دست کم ۱۵-۱۰ کیلومتر طول دارد و در انتهای گسل راستالغز الگوی پایانه گسلی، را شکل می دهد. با توجه به جابه جایی تجمعی ۱۵ کیلومتری روی گسل قوچان نرخ لغزش حدود ۱/۵ میلی متر در سال برای آن برآورد شده است (Hollingsworth et al., 2006). در حالی که (Shabanian, 2009) با استفاده از سن سنجی های رادیومتری که بر روی نهشته های بادزن های جابه جا شده عهد حاضر نرخ لغزش را $4/3 \pm 0/64$ میلی متر در سال پیشنهاد می نماید.

پس از گسل قوچان، گسل باغان با طولی در حدود ۷۵ کیلومتر از مهم ترین گسل های کپه داغ مرکزی و یکی از طولانی ترین گسل های این ناحیه می باشد و باعث حدود ۸ کیلومتر جابه جایی محور چین ها شده است. این گسل از دیدگاه لرزه ای فعال است، در زمین لرزه ۱ مه ۱۹۲۹ قوچان، تمام طول آن دچار گسیختگی گردید (Tchaenko, 1975). گسل باغان از شمال فاروج (خاور شیروان) تا مرز ایران و ترکمنستان ادامه یافته است. امتداد این گسل بر روی تصاویر ماهواره ای و عکس های هوایی به روشنی دیده می شود. گسل باغان در طول مسیر خود آبراهه ها و پشته های متعددی را جابه جا نموده است. در یک مورد خاص، رودخانه کرگانلی که از پهنه کوهستانی به سمت دشت شیروان در جریان است در محل برخورد با گسل باغان، حدود یک کیلومتر جابه جا شده است. انتهای جنوبی گسل باغان در دشت قوچان-شیروان به طور مستقیم امتداد نیافته و به سمت جنوب خاور تغییر راستا می دهد. این تغییر راستا موجب تغییر در سازوکار از راستالغز به معکوس می شود. گسل راستالغز با جگران از دیگر گسله های این پهنه است و نهشته های کرتاسه را، ۱۰-۱۵ کیلومتر به صورت راست بر جابه جا نموده است (Hollingsworth, 2008). گسل شکرانلو همانند دیگر گسل های راستالغز در این پهنه چین ها و واحدهای رسوبی را به صورت راست بر جابه جا نموده است. این گسل در طول خود رسوبات نوژن-کواترنری را قطع کرده و در انتهای شمال باختری خود سنگ های سازند تیرگان با سن کرتاسه را بریده است.

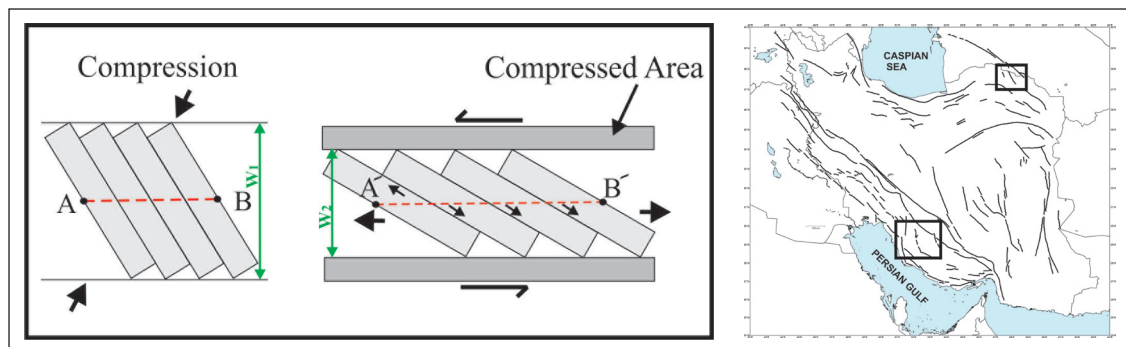
۳- گسل های راستالغز زاگرس مرکزی

کوه های زاگرس در جنوب باختری ایران یکی از لرزه خیزترین کمربندهای چین خورده-رانده در مناطق درون قاره ای می باشد و یکی از مهم ترین عناصر زمین ساخت فعال در خاورمیانه است. گسل های راندگی در زاگرس به ندرت به سطح زمین می رسند و بیشترین دانسته های ما درباره گسلش فعال از زمین لرزه ها به دست می آید. اما در زاگرس مرکزی (و شمال باختری) گسل های راستالغز سطح زمین را گسیخته اند و محور چین ها را جابه جا نموده اند (شکل ۲).

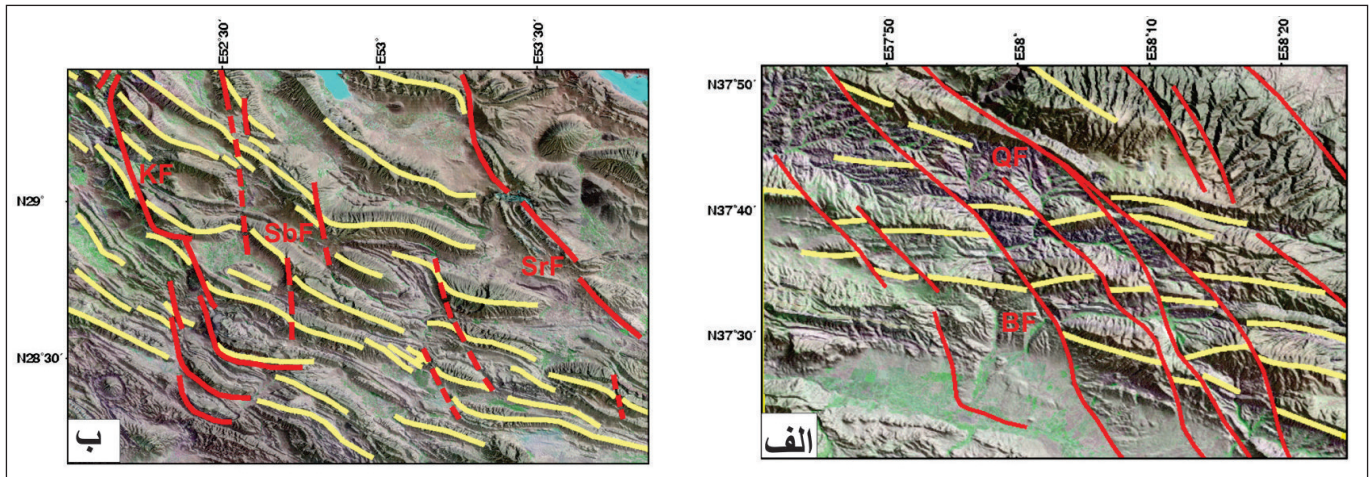
زمان تریاس میانی اندکی رسوبات تبخیری دیده می شود. در این منطقه گسل های راستالغز در طی کوهزایی آلپی فعال شده اند و فعالیت آنها تا به امروز ادامه دارد (Hollingsworth et al., 2006, Zanchi et al., 2016).

چین خوردگی کپه داغ توسط یک سامانه گسلی راستالغز در نواحی خاوری و مرکزی کپه داغ (ناحیه قوچان-بجنورد)، بریده و جابه جا شده است (شکل ۲). (Tchalenko, 1975) از این گسل های راستالغز تحت عنوان سامانه گسله مورب یاد می کند. این پهنه، متشکل از چندین گسل راست بر است که در راستای شمال-شمال باختر و به موازات یکدیگر قرار گرفته اند. گسل های این پهنه پس از چین خوردگی و یا تقریباً همزمان با آن فعال شده اند و بلوک باختری را نسبت به خاور، حدود ۳۰ کیلومتر به سوی شمال باختر جابه جا کرده است (نواب پور و همکاران، ۱۳۸۲). افشارحرب (۱۳۷۳) نیز با استفاده از یک ناودیس خاوری-باختری باریک و طولی که در هسته آن سازند آبدراز (کرتاسه بالایی) حفظ شده است، میزان جابه جایی این پهنه را حدود ۱۶ کیلومتر محاسبه کرده است. به این ترتیب اگر زمان آغاز گسلش را ۵ میلیون سال پیش (Blanc et al., 2003) در نظر بگیریم، میانگین نرخ جابه جایی در این پهنه حدود ۳-۶ میلی متر در سال خواهد بود. این پهنه گسلی راستالغز در پایانه شمال باختری خود به گسل اصلی کپه داغ (عشق آباد) می پیوندد و در پایانه جنوب خاوری به سمت خطواره اترک و کشف رود خمیدگی پیدا می کند. این ویژگی می تواند بیانگر وابستگی این گسل ها از نقطه نظر ساختاری به عناصر بنیادی یاد شده باشد (Tchalenko, 1975). خمش پایانه جنوب خاوری این دسته گسل ها به سمت خاور، سبب تغییر در مکانیسم آنها از راستالغز به راندگی می گردد. عملکرد این گسل ها باعث جابه جایی چین ها در پهنه گسترده ای گردیده است. مهم ترین این گسل ها در طول منطقه مورد مطالعه در کپه داغ گسل قوچان (شکل ۲) نام دارد که هم از لحاظ ساختاری و هم لرزه خیزی از عناصر اصلی گستره کپه داغ به شمار می روند. این گسل با طولی حدود ۱۳۴ کیلومتر و شبیه قائم از میان نهشته های آبرفتی دشت کواترنری قوچان می گذرد و به نظر می رسد که در محل تاقدیس قوچان نهشته های نوژن و سنگ های کرتاسه و ژوراسیک را نیز بریده است. به گمان (Tchalenko, 1975) میزان جابه جایی در طول این گسل حدود ۷ کیلومتر می باشد، در حالی که (Hollingsworth et al., 2006) میزان جابه جایی را حدود ۱۵ کیلومتر بین واحدهای سازند آبدراز در بخشی از گسل قوچان معرفی نموده است. (Shabanian, 2009) نیز جابه جایی 360 ± 50 متری را روی بادزن های پلیستوسن میانی-پایانی روی گسل قوچان معرفی نموده و آن را به عنوان جابه جایی پس از چین خوردگی در کپه داغ در نظر گرفته است.

به نظر می رسد گسل قوچان تا گسل اصلی کپه داغ امتداد می یابد. انتهای جنوب خاوری گسل با یک گسل راندگی پنهان پایان می یابد و جنبش های آن باعث



شکل ۱- موقعیت مناطق مورد مقایسه کپه داغ مرکزی و زاگرس مرکزی (سمت راست) و الگوی جنبشی قفسه کتابی (Bookshelf Model)، چرخش پادساعت گردی بلوک ها سبب ایجاد حرکت راستالغز راست بر در مرز بلوک ها گردیده است (سمت چپ). در این الگو بعد از اعمال فشردگی، پهنای منطقه کمتر شده است و طول آن افزایش یافته است (Lamb, 1987; Jackson and Molnar, 1990).



شکل ۲- مقایسه گسلش و چین‌خوردگی در کپه‌داغ (شکل الف) و زاگرس مرکزی (شکل ب). در هر دو منطقه محور چین‌ها (خطوط زرد) به‌وسیله گسل‌ها (خطوط قرمز) جابه‌جا شده‌اند. محور چین‌ها در کپه‌داغ بدون خمیدگی اما در زاگرس در نزدیکی گسل‌ها خمیده می‌شوند. گسل‌ها در کپه‌داغ پیوسته‌تر و در زاگرس قطعه قطعه‌اند. خطوط خط چین گسل‌هایی هستند که گسیختگی سطحی اندکی دارند. گسل‌های راستالغز اصلی از چپ به راست در زاگرس شامل کره بس، سبزپوشان و سروستان و در کپه‌داغ گسل‌های باغان و قوچان‌اند.

صورت گنبد‌های نمکی به سطح رسیده‌اند. مشابه این لایه‌های شکل‌پذیر از کپه‌داغ گزارش نشده است. تنها در زمان تریاس میانی اندکی رسوبات تبخیری دیده می‌شود (Robert et al., 2014).

چین‌خوردگی در زاگرس و کپه‌داغ با وجود شباهت‌ها، تفاوت‌هایی نیز دارند، یک تفاوت آشکار آنها در ابعاد چین‌خوردگی است. به طوری که وسعت زیاد زاگرس سبب تنوع بیشتر شکل‌های ریخت‌شناسی چین‌ها شده است. تفاوت نحوه برش چین‌خوردگی‌ها توسط گسل‌های راستالغز در این دو ناحیه از دیگر تفاوت‌های آنها است که موضوع این نوشتار است.

راستای گسل‌های راستالغز در دو منطقه زاگرس و کپه‌داغ شمال‌باختر - جنوب خاور است. این گسل‌ها رسوبات و چین‌خوردگی‌های که جهت غالب آنها خاوری-باختری می‌باشد را برش داده است. انتهای گسل‌ها در هر دو منطقه چرخیده و به راندگی تبدیل می‌شوند که نشان‌دهنده محدود شدن این گسل‌ها به همین مناطق و عدم گسترش آنها و همچنین می‌تواند نشان‌دهنده چرخش بلوک‌های زیرین در این مناطق باشد.

شواهد گوناگونی نشان می‌دهد که گسل عشق‌آباد و گسل اصلی جوان زاگرس به عنوان دو ساختار فعال در کپه‌داغ مرکزی و زاگرس مرکزی، الگوی دگرشکلی را کنترل می‌کنند. گسل‌های فرعی راستالغز راست‌بری در انتهای این دو گسل اصلی قرار دارند و هر یک از این گسل‌های فرعی با گسل‌های راندگی (الگوهای پایانه‌ای) پایان می‌یابند. چرخش پادساعت‌گرد گسل‌های راستالغز در کپه‌داغ و زاگرس ضمن پایان دادن به جابه‌جایی گسل‌های اصلی جوان زاگرس و عشق‌آباد این امکان را فراهم می‌سازد که بلوک‌های کپه‌داغ باختری و زاگرس باختری به سمت شمال باختر حرکت نمایند (شکل ۳).

۵- مدل‌سازی فیزیکی

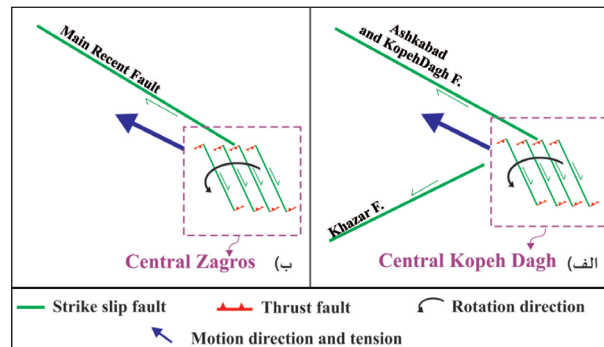
همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، لایه‌های شکل‌پذیر متعددی در ستون چینه‌شناسی زاگرس وجود دارند که چین‌خوردگی و گسلش را کنترل می‌نمایند. اما مهم‌ترین آنها سازند نمکی هرمز است. لایه‌های شکل‌پذیر در کپه‌داغ به میزان بسیار کمتری دیده شده‌اند. بنابراین برای مدل‌سازی این دو منطقه از دو نوع مواد شکل‌پذیر و شکننده برای مناطق دارای مواد تبخیری و فاقد مواد تبخیری استفاده شده است.

اگر چه روند عمومی ساختارها، شمال باختری-جنوب خاوری است ولی به دلیل وجود رسوبات شکل‌پذیر میوسن و عملکرد گسل‌های پی‌سنگی و همچنین وجود گنبد‌های نمکی، تغییراتی در روند کلی چین‌ها به وجود آمده است. در زاگرس مرکزی به نظر می‌رسد که این تغییر روندها در ارتباط با گسل‌های راستالغز و وجود لایه‌های شکل‌پذیر باشند. سازند نمکی هرمز شناخته‌شده‌ترین لایه شکل‌پذیر در بخش زیرین پوشش رسوبی است. افزودن بر آن وجود رسوبات گچی-انیدریتی وابسته به سازندهای دالان (پرمین)، دشتک و کنگان (تریاس)، هیث و گوتیا (ژوراسیک بالا)، از عوامل مؤثر در کاهش و جلوگیری از گسلش سطحی هستند. بخش عمده سازند تبخیری گچساران (میوسن)، که بالاترین و یکی از مهم‌ترین لایه‌های شکل‌پذیر است در زاگرس مرکزی فرسایش یافته است.

همانند کپه‌داغ مرکزی، گسل‌های عرضی مهم همچون کازرون، کره بس، سبزپوشان و سروستان (شکل ۲) از باختر به خاور در لرزه‌خیزی زاگرس مرکزی نقش به سزایی دارند و محور تاقدیس‌ها را به‌طور راست‌بر جابه‌جا نموده‌اند. گسل پی‌سنگی کازرون با طول ۱۲۵ کیلومتر و شبیه نزدیک به شاقولی، یکی از طولانی‌ترین گسل‌های راستالغز در زاگرس مرکزی می‌باشد که در مرز باختری حوضه نمکی هرمز در منطقه زاگرس، ساختارهای این منطقه را به صورت راست‌بر خمیده و جابه‌جا نموده است. (Walpersdorf et al., 2006) براساس داده‌های شبکه GPS نرخ لغزش بر روی مجموعه گسل‌های کازرون، کره بس و سبزپوشان را 2 ± 6 میلی‌متر در سال پیشنهاد می‌نماید. گسل کره بس دارای زاویه ۴۵ درجه‌ای با راستای چین‌خوردگی است که میزان جابه‌جایی از ۶ کیلومتر به ۲ کیلومتر در انتهای پهنه گسل کاهش می‌یابد (Bahroudi and Talbot, 2003). یکی از مهم‌ترین شواهد دگرریختی در طول پهنه گسلی سبزپوشان خمش محور چین‌ها است که امتداد آنها را از 100° - 90° را در طول پهنه به 140° - 120° رسانده است. گسل راستالغز سروستان که به تقریب به موازات گسل‌های عرضی کازرون و کره بس است با حرکت راست‌بری خود موجب خمیدگی و تغییر روند محور تاقدیس‌ها در مجاورت خود شده است.

۴- مقایسه رسوب‌گذاری و چین‌خوردگی حوضه کپه‌داغ با زاگرس

یکی از تفاوت‌های اصلی این دو حوضه وجود حجم قابل توجه رسوبات تبخیری در زاگرس است که در زیر رسوبات پالئوزویک (سازند نمکی هرمز) قرار گرفته‌اند و به



شکل ۳- چرخش پادساعت گردی گسل‌های راستالغز فرعی در دو منطقه کپه داغ و زاگرس در انتهای گسل‌های اصلی. الف) کپه داغ مرکزی. ب) زاگرس مرکزی.

۵-۱. ویژگی‌های مواد مورد استفاده

ماسه کوارتزی خشک، با دانه‌بندی ریزتر از ۴۰۰ میکرون به عنوان لایه‌های مقاوم (Competent) براساس معیار شکست کولمب (Coulomb failure criterion) عمل می‌کند و نمایان‌گر رسوبات شکننده (Brittle sediments)، برای شبیه‌سازی رفتار اصطکاکی رسوبات غیرتبخیری در پوسته بالایی، استفاده می‌شود. ماسه خشک دارای مقاومت و چسبندگی پایین می‌باشد که تحت تنش برشی ایجاد گسلش و چین‌خوردگی می‌کند. دانه‌بندی ماسه کوارتزی نیز حائز اهمیت می‌باشد. هر چه دانه‌بندی ماسه زاویه‌دار و درشت دانه باشد، زاویه اصطکاک داخلی آن بیشتر و هر چه ریز دانه‌تر باشد دارای زاویه اصطکاک داخلی کوچک‌تر است. زاویه اصطکاک داخلی ماسه از ۳۱ الی ۴۰ درجه ($\phi = 31^\circ - 40^\circ$) است که این زاویه برای ماسه با دانه‌های که از الک با مش ۵۰ عبور داده شده، حدود ۳۴ درجه می‌باشد. ضریب اصطکاک داخلی برای مواد شکننده‌ای مثل ماسه کوارتزی برابر $0.6 - 0.84$ ($\mu = \tan \phi$) می‌باشد (Krantz, 1991) که ضریب اصطکاک داخلی برای ماسه با این اندازه دانه برابر 0.67 شده است. از مزایای ماسه کوارتزی خشک، به مقاومت چسبندگی پایین، در دسترس بودن آن نسبت به مواد دیگر و ارزان بودن آن می‌توان اشاره نمود. ماسه کوارتزدار به دلیل شکننده بودن، پیشانی دگرریختی کوچک‌تری را ایجاد می‌نماید.

سیلیکون (PDMS)، با چگالی ۹۷۰ کیلوگرم بر متر مکعب به عنوان یک ماده کشسان، ماده مناسبی برای شبیه‌سازی رفتارهای انعطاف‌پذیر از لایه‌های تبخیری و یا شیلی در طبیعت است و آهنگ کرنش آن متناسب با میزان تنش اعمالی می‌باشد از این ماده برای مدل‌سازی لایه‌های غیرمقاوم (Incompetent) استفاده شده است.

۵-۲. آماده‌سازی مدل

در این پژوهش، گسل‌های پی سنگی و تأثیر آنها در دگرشکلی پوشش رسوبی، مورد بررسی قرار گرفته است. مدل‌ها در جعبه‌ماسه‌ای به طول ۴۰ و عرض ۲۰ سانتی‌متر اجرا گردیده است (شکل ۴). مواد مدل به دو بخش تقسیم می‌شود. بخش اول، از ۵ بلوک چوبی با ابعاد 25×8 سانتی‌متری با زاویه ۶۰ درجه در دستگاه مدل‌سازی قرار داده شد و بخش دوم، روی بلوک‌های سخت رسوباتی به ستبرای ۲ سانتی‌متری قرار می‌گیرند که به وسیله لایه‌نازک نشانگر (ماسه رنگی) پوشیده شده است (شکل ۵). به دلیل چرخش بلوک‌ها دیواره جانبی قرار داده نشده است. بلوک‌های سخت نسبت به محور عمودی (همانند الگو جنبشی قفسه کتابی) می‌چرخد، که سبب ایجاد گسلش راستالغز در طول بلوک‌ها می‌شود. چرخش بلوک‌ها بر اثر نیروی فشارشی که از یک سمت به مدل اعمال می‌شود، شکل می‌گیرد. این بلوک‌های چوبی به صورت موازی در کنار هم دیگر قرار گرفته‌اند و در اثر حرکت دیواره متحرک و چرخش پادساعت گردی بلوک‌ها گسلش راستالغز راست‌بر در پی سنگ (مشابه طبیعت) ایجاد می‌نمایند.

در بخش اولیه مدل‌سازی، با توجه به ویژگی‌های رسوبات که در بالا به آنها اشاره شد، دو مدل با شرایط پی سنگی یکسان و تنها تفاوت آنها در لایه شکننده (مانند رسوبات کپه داغ، فاقد مواد تبخیری) و شکل‌پذیر (مانند رسوبات زاگرس، دارای مواد تبخیری) طراحی گردید؛ در مدل اول بر روی بلوک‌ها لایه‌های ماسه کوارتزدار و در مدل دوم در میان بلوک‌های چرخشی و لایه‌های ماسه‌ای از یک لایه جدایشی سیلیکونی (PDMS) استفاده شده است (شکل ۴).

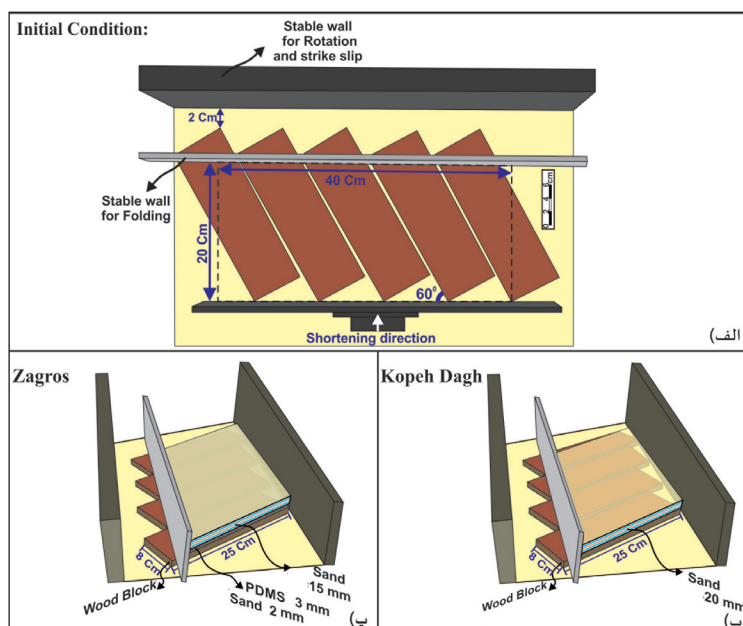
۵-۳. اعمال نیرو و تغییر شکل پیشرونده در مدل‌ها

نرخ حرکت صفحه متحرک در هر دو مدل حدود 0.3 میلی‌متر در دقیقه به ازای کوتاه‌شدگی کلی از یک سو به مدل اعمال می‌گردد. در ابتدا، چین‌خوردگی در کنار دیواره ثابت شکل می‌گیرد اما بعد از ۲ سانتی‌متر کوتاه‌شدگی، بلوک‌ها شروع به چرخش نموده و گسل‌های راستالغز شروع به شکل‌گیری می‌کنند. با ادامه فشردگی، این گسل‌ها، چین‌خوردگی‌ها را بریده و جابه‌جا می‌نماید. فشردگی ۵ سانتی‌متری که برابر با ۲۵ درصد کوتاه‌شدگی است، در $2/5$ ساعت با این نرخ حرکتی سبب چرخش بلوک‌ها می‌شود. سه ساختار در طول این مدل ایجاد می‌گردد:

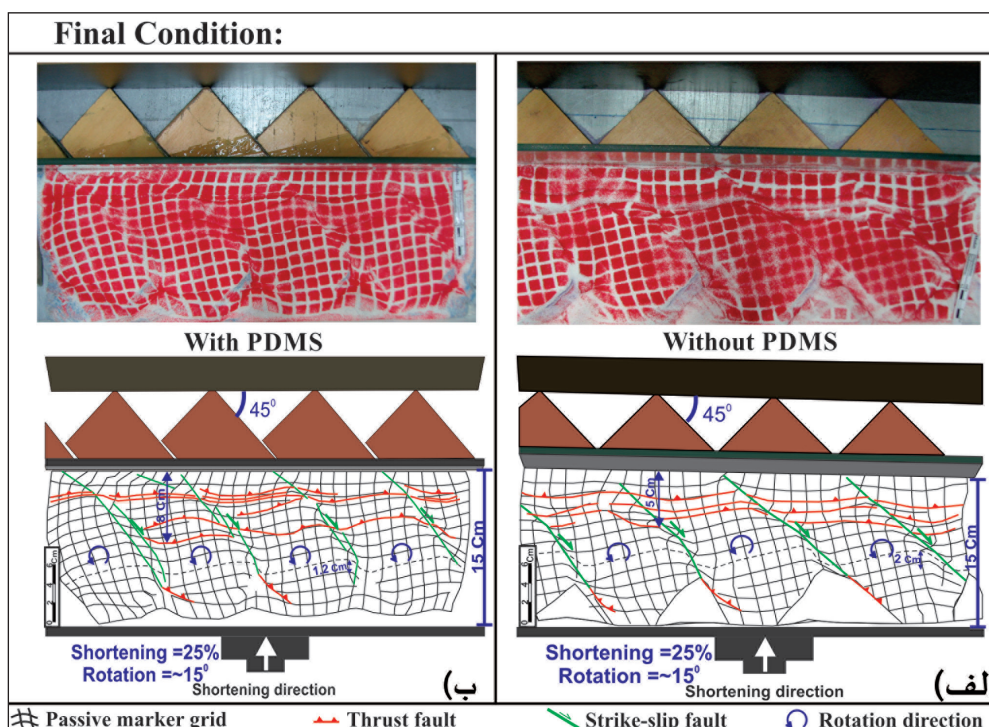
۱- کوتاه‌شدگی پیش از چرخش گسل پی سنگی (حدود ۲ سانتی‌متر) که موجب تشکیل چین‌خوردگی می‌شود. ۲- چرخش پادساعت گردی گسل‌های پی سنگی، که سبب می‌شود بلوک‌ها ۱۵ درجه بچرخند. ۳- گسل‌های راستالغز راست‌بری که بر اثر چرخش بلوک‌ها ایجاد می‌گردد.

همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، گسل‌های راستالغز به صورت مایل در دستگاه و گسل‌های رانندگی در انتهای گسل راستالغز شکل گرفته است. میزان حرکت و کوتاه‌شدگی گسل رانندگی وابسته به میزان حرکت راستالغزی در گسل وابسته به آن می‌باشد؛ اما از آنجایی که میزان جابه‌جایی راستالغز هر چقدر به انتهای گسل نزدیکتر می‌شویم کمتر می‌شود، بنابراین میزان لغزش گسل رانندگی انتهایی همیشه کمتر از بیشینه جابه‌جایی راستالغز است. بر اثر اعمال کوتاه‌شدگی ۲۰ درصدی به مدل، چرخش پادساعت گردی حدود ۱۵ درجه‌ای در بلوک‌ها دیده می‌شود (شکل ۵).

یکی از تفاوت‌های این دو مدل، چگونگی ظهور گسل‌های راستالغز در سطح است (شکل ۵). گسل‌های راستالغز در مدل کپه داغ به صورت پیوسته می‌باشد؛ در حالی که در مدل زاگرس به صورت قطعه قطعه به سطح منتقل شده‌اند که دلیل آن وجود لایه شکل‌پذیر می‌باشد. از تفاوت‌های دیگر این دو مدل می‌توان به میزان جابه‌جایی راست‌بری منتقل شده به سطح نمونه که در کپه داغ به دلیل ماده غیرتبخیری بیشتر از مدل زاگرس که دارای مواد تبخیری است، اشاره نمود. همچنین میزان پیشروی چین‌خوردگی در مدل دارای مواد تبخیری بیشتر می‌باشد. ثابت‌ها و متغیرات مدل‌ها را می‌توان در جدول ۱ مشاهده نمود.



شکل ۴- مدل چرخش گسل های پی سنگی پیش از دگرشکلی. (الف) نمای سطحی و ابعاد مدل. (ب) نمای جانبی از ستبرای لایه های متفاوت در مدل کپه داغ (فاقد سیلیکون). (پ) نمای جانبی از ستبرای لایه های متفاوت در مدل زاگرس (دارای سیلیکون).



شکل ۵- مدل چرخش گسل های پی سنگی پس از ۲۵ درصد کوتاه شدگی. گسل های راستالغز به موازات بلوک ها و چین ها نزدیک به دیواره ثابت ایجاد شده است. (الف) تصویر مدل و شکل نمادین از مدل کپه داغ (فاقد سیلیکون)، میزان پیشروی چین ۵ سانتی متر و ۲ سانتی متر جابه جایی راست بر (ب) تصویر مدل و شکل نمادین از مدل زاگرس (دارای سیلیکون)، میزان پیشروی چین ۸ سانتی متر و ۱/۲ سانتی متر جابه جایی راست بر. چرخش پادساعت گردی ۱۵ درجه ای بعد از اتمام کوتاه شدگی مدل دیده می شود و الگویی پایانه ای راندگی در انتهای گسل راستالغز شکل می گیرد.

جدول ۱- مقایسه بین ویژگی‌های مدل در دو منطقه کپه‌داغ (بدون لایه شکل‌پذیر) و زاگرس (با لایه شکل‌پذیر).

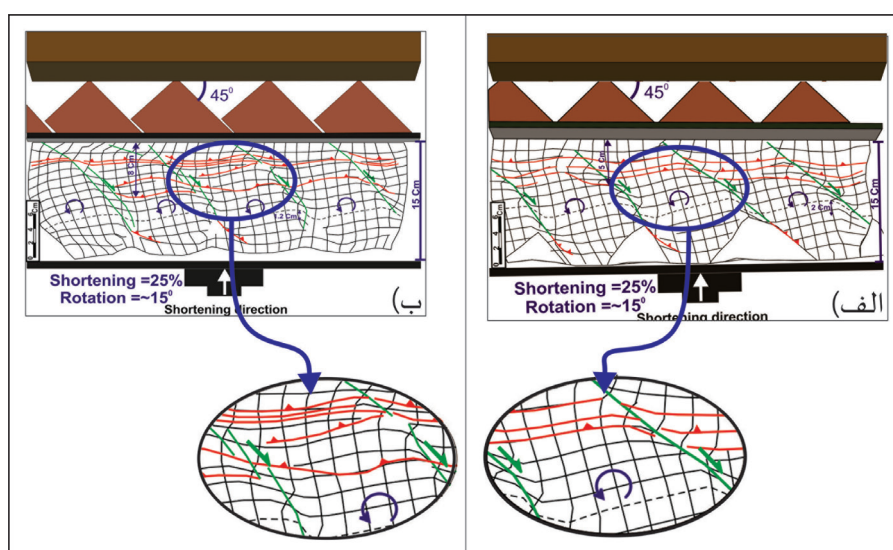
ویژگی‌های مقایسه‌ای	کپه‌داغ	زاگرس
طول مدل (Cm)	۴۰	۴۰
عرض مدل (Cm)	۲۰	۲۰
کوتاه‌شدگی (%)	۲۵	۲۵
زاویه اولیه بلوک‌ها (°)	۶۰	۶۰
زاویه نهایی بعد از اتمام مدل (°)	۴۵	۴۵
میزان چرخش (°)	۱۵	۱۵
میزان جابه‌جایی راست بر (Cm)	۲	۱/۲
میزان پیشروی چین (Cm)	۵	۸

۶- بحث

نمکی هرمز از پی‌سنگی دگرگونی جدا شده‌اند، اما مشاهده مستقیمی از وجود این لایه در ژرفا گزارش نشده است. نتایج مدل‌سازی فیزیکی در دو منطقه زاگرس و کپه‌داغ، تفاوت در سبک دگرشکلی دو منطقه را آشکار می‌سازد و با وجود لایه شکل‌پذیر در زاگرس همخوانی دارد.

در کپه‌داغ، محور تاقدیس‌ها به طور مشخص در راستای گسل‌های راستالغز جابه‌جا شده‌اند اما در زاگرس تاقدیس‌ها حالت خمیدگی سینوسی شکل دارند و در مجاورت گسل‌ها از زاویه محور آنها با گسل کاسته می‌شود. میزان جابه‌جایی سطحی گسل‌های مدل زاگرس کمتر (حدود ۴۰ درصد کمتر) از گسل‌های مدل کپه‌داغ است (شکل‌های ۵ و ۶).

چگونگی ارتباط چین‌خوردگی با ویژگی‌های چینه‌شناسی، ما را در درک بهتر تکامل ساختاری یک منطقه یاری می‌نماید. کمربند چین‌خورده-رانده در دو منطقه کپه‌داغ و زاگرس مرکزی، از دیدگاه چرخش بلوک‌ها، میزان جابه‌جایی و برش ایجاد شده توسط گسل‌های راستالغز پی‌سنگی و نمود آن در سطح، تفاوت‌ها و شباهت‌هایی دارند. چرخش پادساعت‌گردی در هر دو منطقه دیده می‌شود که بر اثر کوتاه‌شدگی در راستای عمود بر کمربند چین‌خورده-رانده و مایل بودن گسل‌های راستالغز نسبت به راستای کوتاه‌شدگی به وجود آمده است. یکی از تفاوت‌های اصلی این دو زون ساختاری، تفاوت در میزان لایه‌های شکل‌پذیر (نمک و گچ) است. شواهد بیانگر این است که برخلاف کپه‌داغ، رسوبات زاگرس به وسیله سازند

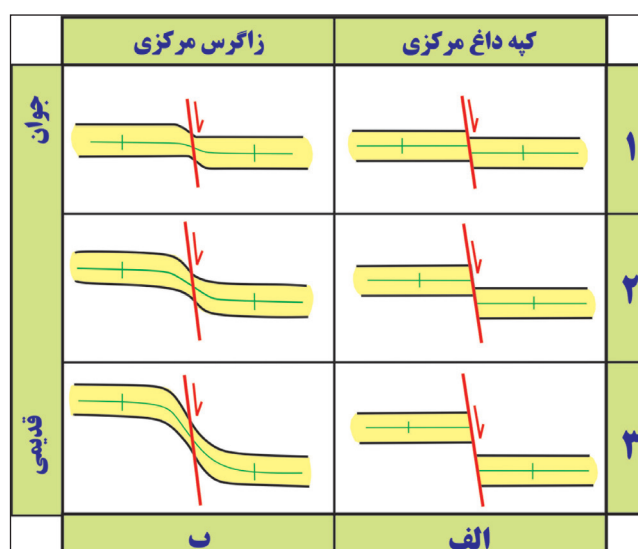


شکل ۶- مقایسه کپه‌داغ مرکزی با زاگرس مرکزی و جزئیات مدل. در هر دو منطقه بر اثر چرخش پادساعت‌گردی، حرکت راست‌بری در بلوک‌ها ایجاد گردیده است. الف) در کپه‌داغ مرکزی محور چین‌خوردگی صاف و گسل‌ها ممتد هستند. ب) در زاگرس مرکزی محور چین‌خوردگی‌ها به صورت S شکل و گسل‌ها انشالان می‌باشند.

این شواهد بیانگر این است که تمامی جابه‌جایی در راستای گسل‌های ژرف زاگرس به سطح نمی‌رسد و بخشی از آن به وسیله رسوبات نرم و شکل‌پذیر جذب می‌شود، در حالی که در کپه داغ به نظر می‌رسد که بخش قابل توجهی از آن به سطح می‌رسد. تفاوت در چینه‌شناسی دو منطقه همچنین موجب شده است که نمود سطحی گسله‌ها در دو منطقه متفاوت باشد. در کپه داغ مرکزی گسل‌های راستالغز راست‌بر پیوسته‌اند و درازای بیشتری دارند ولی در زاگرس مرکزی گسل‌های راستالغز به صورت ان‌شلان یا قطعه قطعه سبب خمیدگی محور چین‌ها در تاقدیس‌ها می‌شوند (به عنوان مثال گسل سبزپوشان). پیشروی جبهه چین‌خوردگی در مدل زاگرس بیشتر از کپه داغ (حدود ۶۰ در صد) است که به نظر می‌رسد مرتبط با وجود لایه شکل‌پذیر

(نمک هم‌رمز) باشد.

نتایج مدل‌سازی همچنین آشکار می‌سازد که میزان جابه‌جایی سطحی در طول یک گسل با سن ساختار نیز ارتباط دارد. در هر دو مدل محور چین‌های قدیمی‌تر (نزدیک به دیواره ثابت مدل) جابه‌جایی بیشتری را نشان می‌دهند و هر چه به انتهای جوان‌تر گسلش نزدیک می‌شویم، چین‌ها نیز جوان‌تر و میزان جابه‌جایی کاهش می‌یابد (شکل ۷). بنابراین اگر میزان جابه‌جایی در راستای یک گسل پی‌سنگی ثابت هم باشد (که اغلب نیست) اما چگونگی نمود آن در سطح بستگی به زمان تشکیل ساختارهای سطحی دارد که در یک کمربند کوهزایی اغلب به سمت جبهه کوهستان جوان‌تر می‌شوند.



شکل ۷- شکل ساده شده از تأثیر گسل راستالغز راست بر بر جابه‌جایی تاقدیس‌های کپه داغ و زاگرس. الف) در کپه داغ در اثر حرکت راستالغز گسل محور تاقدیس بریده و جابه‌جا می‌شود. ب) در زاگرس در اثر حرکت راستالغز گسل محور تاقدیس می‌چرخد (و سرانجام بریده می‌شود).

۷- نتیجه‌گیری

شیوه دگر شکلی در زاگرس و کپه داغ به کمک مدل‌سازی فیزیکی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. نتایج این مدل‌سازی‌ها تفاوت چینه‌شناسی این دو منطقه و نقش آن در تکامل ساختاری را آشکار می‌سازد. بر اساس مقایسه مدل‌سازی‌ها به نظر می‌رسد که خمش محور چین‌ها در زاگرس در ارتباط با وجود لایه‌های شکل‌پذیر در ستون چینه‌شناسی منطقه است. از سوی دیگر، نبود خمیدگی سینوسی محور چین‌ها می‌تواند با نبود یا کمبود نسبی لایه‌های شکل‌پذیر در کپه داغ مرتبط باشد. این مدل‌سازی همچنین بیانگر این است که سن تشکیل یک چین‌خوردگی با میزان

جابه‌جایی آن به وسیله یک گسل پی‌سنگی مرتبط است و به‌سوی جبهه کوهستان، چین‌خوردگی‌ها جوان‌تر شده و محور آنها جابه‌جایی کمتری در راستای گسل‌های عرضی از خود نمایش می‌دهند.

این مطالعه همچنین اهمیت مدل‌سازی فیزیکی برای درک بهتر ساختار یک منطقه را یاد آور می‌شود. به کمک مدل‌سازی فیزیکی می‌توان با استفاده از شواهد سطحی به ساختار زمین‌ساختی و چینه‌ای ژرف آن منطقه دست یافت و به برخی از ابهامات در مورد تفاوت‌های ظاهری مناطق مختلف پاسخ داد.

کتابنگاری

افشارحرب، ع.، ۱۳۷۳- زمین شناسی کپه داغ، سازمان زمین شناسی کشور. طرح تدوین کتاب زمین شناسی ایران، شماره ۱۱، ۲۷۵ ص.

نبوی، م. ح.، ۱۳۵۵- دیباچه ای بر زمین شناسی ایران، سازمان زمین شناسی کشور، ۱۰۹ ص، تهران.

نواب پور، پ.، سعیدی، ع.، قاسمی، م. ر.، ۱۳۸۲- زمین ساخت پویای باختر کوهستان شتری، فصلنامه علمی پژوهشی علوم زمین، پاییز و زمستان ۸۲، سال یازدهم، شماره ۵۰-۴۹، ص ۱۷۶-۱۸۳.

References

- Bahroudi, A., and Talbot, C. J., 2003-The configuration of the basement beneath the Zagros Basin. *Journal of petroleum geology*, 26(3), 257-282, <https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.2003.tb00030.x>.
- Blanc, E. P., Allen, M. B., Inger, S., and Hassani, H., 2003-Structural styles in the Zagros simple folded zone, Iran. *Journal of the Geological Society*, 160(3), 401-412, <https://doi.org/10.1144/0016-764902-110>.
- Hollingsworth, J., 2008- Active tectonics of NE Iran (Doctoral dissertation, University of Cambridge), 239P.
- Hollingsworth, J., Jackson, J., Walker, R., Gheitanchi, M. R., and Bolourchi, M. J., 2006- Strike-slip faulting, rotation, and along-strike elongation in the KopehDagh mountains, NE Iran. *Geophysical Journal International*, 166(3), 1161-1177, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.02983.x>.
- Jackson, J., and Molnar, P., 1990- Active faulting and block rotations in the western Transverse Ranges, California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 95(B13), 22073-22087, <https://doi.org/10.1029/JB095iB13p22073>.
- Krantz, R.W., 1991- Measurements of friction coefficients and cohesion for faulting and fault reactivation in laboratory models using sand and sandmixtures. *Tectonophysics*, 188, 203-207, [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(91\)90323-K](https://doi.org/10.1016/0040-1951(91)90323-K).
- Lamb, S. H., 1987- A model for tectonic rotations about a vertical axis. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, v. 84, pp.75-86, [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(87\)90178-6](https://doi.org/10.1016/0012-821X(87)90178-6).
- Lyberis, N., Manby, G., Poli, J.T., Kalougin, V., Yousouphocaev, H. and Ashirov, T., 1998- Post-Triassic evolution of the southern margin of the Turan plate. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science*, 326(2), pp.137-143.
- Shabanian, E., 2009- Active tectonic study in northeast Iran: contribution of the KopehDagh and Binalud mountains to the accommodation of the Arabia-Eurasia convergence (Doctoral dissertation, Université Paul Cézanne-Aix-Marseille III).
- Robert, A. M., Letouzey, J., Kavosi, M. A., Sherkati, S., Müller, C., Vergés, J., and Aghababaei, A., 2014- Structural evolution of the KopehDagh fold-and-thrust belt (NE Iran) and interactions with the South Caspian Sea Basin and Amu Darya Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 57, 68-87, <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.05.002>.
- Ruttner, A.W., Brandner, R. and Kirchner, E., 1991- Geology of the Aghdarband area (kopetDagh, NE-Iran). *Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt*, 38, pp.7-79.
- Talebian, M., and Jackson, J., 2004-A reappraisal of earthquake focal mechanisms and active shortening in the Zagros mountains of Iran. *Geophysical Journal International*, 156(3), 506-526, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02092.x>.
- Tchalenko, J. S., 1975- Seismicity and structure of the KopetDagh (Iran, USSR). *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 278(1275), 1-28, <https://doi.org/10.1098/rsta.1975.0019>.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M. R., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R., Tavakoli, F., and Chéry, J., 2004- Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman. *Geophys. J. Int.* 157, 381-398, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02222.x>.
- Walpersdorf, A., Hatzfeld, D., Nankali, H., Tavakoli, F., Nilforoushan, F., Tatar, M., Vernant, P., Chery, J., Masson, F., 2006- Difference in the GPS deformation pattern of North and Central Zagros (Iran). *Geophys. J. Int.* 167, 1077-1088, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03147.x>.

Zanchi, A., Zanchetta, S., Balini, M., Ghassemi, M. R., 2016- Oblique convergence during the Cimmerian collision: evidence from the Triassic Aghdarband Basin, NE Iran. *Gondwana Research*, 38, 149-170, <https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.11.008>.

Original Research Paper

Physical modeling of block rotation and the role of ductile sediments in the structural evolution of Kopeh Dagh and Zagros

M. Rostami Ghatarghoei¹, M. Talebian^{2*} and A. Bahroudi³

¹ M.Sc., Research Institute for Earth Sciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

² Associate Professor, Research Institute for Earth Sciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

³ Associate Professor, Exploration Department, School of Mining Engineering, University College of Engineering, Tehran University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2017 January 02

Accepted: 2021 March 31

Available online: 2021 November 01

Keywords:

Central Kopeh Dagh

Central Zagros

Physical modeling

Block Rotation

Strike Slip Fault

ABSTRACT

The two orogenic belts of Zagros and Kopeh Dagh have many structural similarities. In both regions, the anticlines are intersected by transverse faults with a predominant northwest-southeast trend. The oblique orientation of these faults with respect to the direction of maximum stress causes the blocks to rotate counterclockwise, which results shortening in width and elongation along the belt. However, the strike-slip faults of these two regions show different effects on the axis of the anticlines. In order to better understand the evolution of block-rotating structures and the effect of strike-slip faults on the fold-thrusted belt; two physical models consist of five blocks, with different layers representing the general stratigraphy of the two zones, were investigated. The results of physical modeling show the effect of ductile layers on the surface expression of the faults as well as rotation of the fold axis. In the Zagros region, due to the presence of ductile horizons (such as the Hormoz formation), fault offset at depth is mainly seen as the curvature of the fold axis at the surface. However, in Kopeh Dagh, due to lack of ductile layers, this displacement is transferred to the surface and sharply offset fold axis. Surface faulting in Kopeh Dagh is more continuous, with longer faults and higher displacement, comparing to the Zagros.

* Corresponding author: M. Talebian; E-mail: talebian@ries.ac.ir

G.S. Journal. All rights reserved.

doi: 10.22071/GSJ.2021.112225.1357

doi: 20.1001.1.10237429.1400.31.3.2.9



This is an open access article Under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)