

برآورد میزان کوتاه‌شدگی و نقش سطوح جدایش در دگرریختی کپه‌داغ باختری (بجنورد-آشخانه)

زهرا تشکری^(۱*)، منوچهر قرشی^(۲) و محسن پورکرمانی^(۳)

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال
۲. دانشیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، پژوهشکده علوم زمین، تهران
۳. استاد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۶/۱۵

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۸/۱۵

چکیده

پهنه ساختاری-رسوبی کپه‌داغ از ژوراسیک میانی و پس از کوهزاد سیمین میانی تا ائوسن در حال فرونشینی و انباشت رسوبات بوده است و آغاز کوتاه‌شدگی در آن به برخورد کوهزاد زاگرس در پالئوژن باز می‌گردد. به منظور شناسایی کانی‌ها در سطوح جدایشی، نمونه‌هایی از واحدهای سازند شمشک و چمن بید اخذ و آزمون XRD روی آن‌ها انجام شده است. از سوی دیگر برآورد کوتاه‌شدگی در کپه‌داغ باختری و مرکزی در دو برش عرضی با روند تقریبی شمالی-جنوبی طراحی شده با استفاده از داده‌های قبلی، برداشت‌های صحرایی، نقشه‌های زمین‌شناسی و تصاویر ماهواره‌ای، در نرم‌افزار سه‌بعدی موو رسم و محاسبه شد. بررسی برش‌های رسم شده به صورت سه‌بعدی در نرم‌افزار موو که از نوآوری‌های این پژوهش محسوب می‌شود، مشخص کرد اغلب تاقدیس‌های منطقه از نوع نامتقارن هستند که این عدم تقارن به واسطه کارکرد افق‌های جدایش ایجاد شده است. نتایج آنالیزها مشخص می‌کند سازند شمشک به دلیل ضخامت و کانی‌شناسی پتانسیل بیشتری نسبت به سازند چمن بید در ایجاد سطوح جدایشی در این منطقه دارد. از سوی دیگر با استفاده از رابطه‌های هندسی عمق سطوح جدایش برای چین خوردگی‌های اصلی محاسبه شد که در اغلب آن‌ها سطح جدایشی در ترازهای پایینی سازند شمشک محاسبه شد.

واژه‌های کلیدی: کپه‌داغ باختری، سطوح جدایش، سازند شمشک و چمن بید، کوتاه‌شدگی، نرم‌افزار سه‌بعدی موو.

مقدمه

ایالت زمین‌ساختی کپه‌داغ به‌عنوان بخشی از کوهزاد آلپ-همیالیا در آسیای باختری، کمربندی چین‌خورده با راستای میانگین N120 و درازای نزدیک به ۷۰۰ کیلومتر در طول مرز سیاسی کشور ایران و ترکمنستان، از دریای کاسپین تا افغانستان گسترش یافته است

(Lyberis and Manby, 1999).
حوضه رسوبی کپه‌داغ پس از کوهزایی سیمین، که سبب بسته شدن اقیانوس تتیس کهن در تریاس پسین-ژوراسیک پیشین شد، با رسوب‌گذاری سازند کشف‌رود در یک حوضه کششی پس از برخورد در ژوراسیک میانی پدید آمد. سازند کشف‌رود با یک ناپیوستگی زاویه‌ای بر روی

* نویسنده مرتبط: Zahratashakkory@yahoo.com

اول آنکه ویژگی سطوح جدایش در این حوضه با توجه به پارامترهای کانی‌شناسی مورد بحث قرار گرفته است و همچنین به منظور بازسازی و مدل‌سازی رفتار سطح جدایشی از نرم‌افزار تخصصی MidlandValey3D Move برای اولین بار در این حوضه با توجه به سطح داده‌ها بهره گرفته شده است.

روش مطالعه

پورتقوی و همکاران (۱۳۹۰) در محدوده کپه‌داغ مرکزی و باختری ۵ برش عرضی را رسم و بررسی کرده‌اند. در این پژوهش ۲ برش عرضی ساختاری-رسوبی آنها در کپه‌داغ مرکزی و باختری (برش ۱ در خاور ۵YE و برش ۲ در باختر ۵YE) از پایه مطالعات ایشان انتخاب و براساس داده‌های میدانی و همچنین اطلاعات حاصل از پژوهش‌های جدید که در اطراف محدوده انجام شده بود به‌روزرسانی شد (شکل ۱).

چینه‌شناسی عمومی کپه‌داغ

رخنمون سنگ‌های دوران اول و سنگ‌های تریاس و ژوراسیک پیشین منحصر به حاشیه جنوبی منطقه که در ضمن حاشیه جنوبی حوضه رسوبی را نیز تشکیل می‌دهند، می‌باشد. سنگ‌های رسوبی کرتاسه و دوران سوم در حاشیه جنوبی ضخامت کمی را دارا می‌باشند (افشارحرب، ۱۳۷۳). ردیف‌های تریاس بالایی کپه‌داغ، همانند دیگر نواحی ایران، از نوع انباشته‌های شیلی و ماسه‌سنگ‌های زغال دار است که با دگرشیبی بر روی سنگ‌های کهن‌تر نشسته‌اند. همانندی ردیف‌های تریاس بالای کپه‌داغ با ردیف‌های هم‌زمان در البرز و ایران مرکزی می‌تواند نشانه پایان یافتن کافت جنوب کپه‌داغ و پیوند دوباره کپه‌داغ و صفحه ایران باشد که در این میان شیل و ماسه‌سنگ‌های تیره‌رنگ سازند کشف‌رود، به سن لیاس-باژوسین، نشانگر نهشته‌های پیش‌خشکی لیاس-ژوراسیک میانی (سازند شمشک) ایران میانی و شمالی است (آقاناتی، ۱۳۸۵).

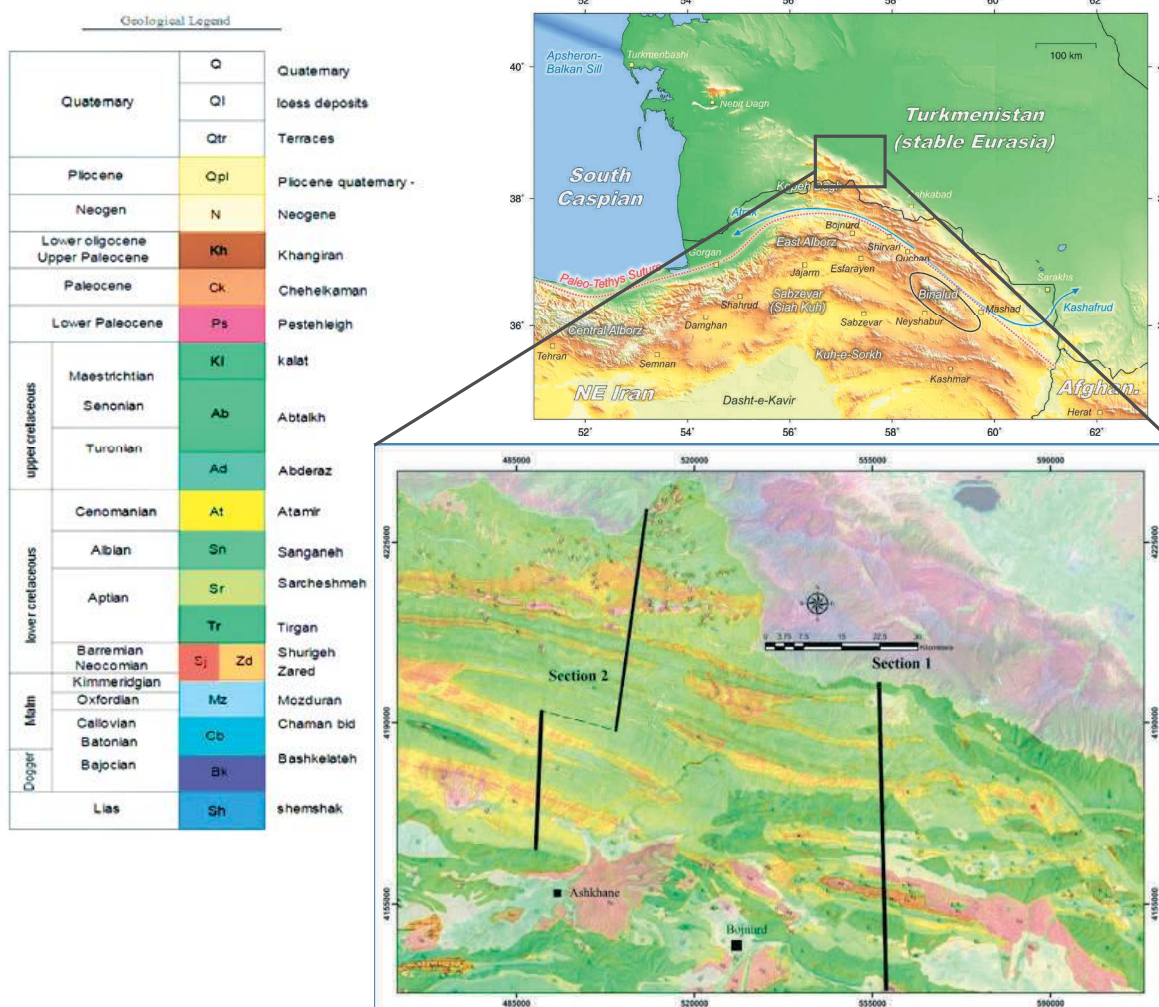
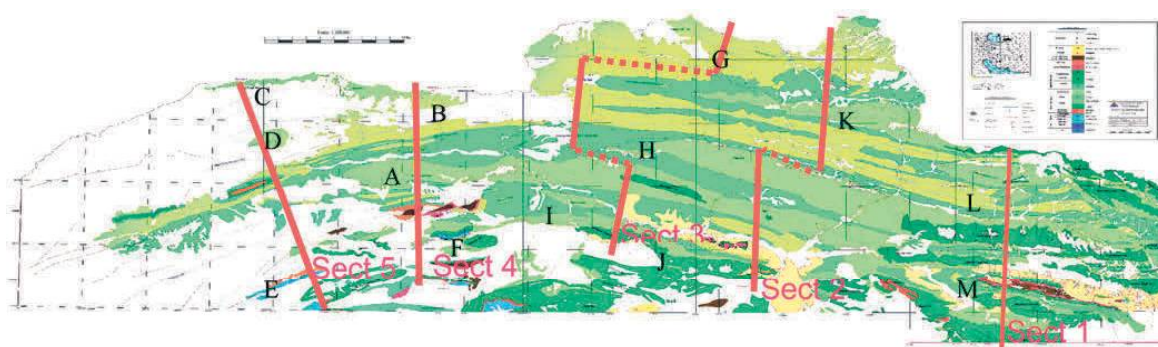
در آغاز پالئوسن پسین دریا به صورت جداگانه از شمال خاور و شمال باختر آغاز به پیشروی کرده ولی خشکی کم‌شیب و کم‌ارتفاعی در شمال بجنورد میان دو دریا وجود داشته است (افشار حرب، ۱۳۷۳). از اوایل ائوسن پسین،

واحدهای کهن‌تر (تریاس و یا پالئوزویک) قرار گرفته است. این دگرشیبی به‌روشنی در رخنمون‌های سطحی پنجره آق‌دربند و همچنین در نیمرخ‌های بازتاب لرزه‌ای ناحیه دیده می‌شود (Robert et al., 2014). پس از سازند کشف‌رود، ستمبرای بیش از ۷۰۰۰ متر از رسوبات تا زمان سنوزویک در این ناحیه نهشته گردیده است که در برخی موارد نبوده‌های رسوبی ناشی از خشکی‌زایی در میان آنها گزارش شده است. همه این رسوبات به سمت باختر توسط واحدهای دریایی ضخیم به سن پلیوسن پوشیده می‌شوند و به سمت خاور، به سکانس‌های قاره‌ای با سن مشابه تبدیل شده‌اند (Jackson et al., 2002; Afshar Harb, 1979).

فاز اصلی فشارش در ناحیه کپه‌داغ در زمان ائوسن پسین و در پی بسته شدن اقیانوس تیتیس جوان رخ داده است (Robert et al., 2014). از آنجاکه شکل‌گیری حوضه کپه‌داغ در یک رژیم زمین‌ساختی کششی بوده است، این گام فشارشی سبب وارونگی زمین‌ساختی حوضه و کارکرد دوباره گسل‌های بی‌سنگی و تبدیل آنها به گسل‌های وارون گردید (Berberian and King, 1981).

این حوضه براساس ویژگی‌های ساختاری به سه بخش باختری، مرکزی و خاوری در درازای خود تقسیم می‌شود (افشارحرب، ۱۳۷۳). هالینگورث و همکاران (Hollingsworth et al., 2007) براساس مطالعاتی که در این گستره انجام دادند، با توجه به ویژگی‌های زمین‌ساختی فعال، لرزه‌خیزی و برآورد آهنگ لغزش و دیگر داده‌ها، طول جغرافیایی ۵YE را به تقریب مرز میان کپه‌داغ باختری و مرکزی، همخوان با سامانه گسل‌های شمال باختر-جنوب خاور می‌دانند.

به‌طور کلی می‌توان گفت که ویژگی‌های ساختاری و میزان کوتاه‌شدگی در تمام پهنه کپه‌داغ مقداری ثابت نیست. براین اساس در پژوهش حاضر با استفاده از داده‌های صحرائی و دفتری در کپه‌داغ باختری و مرکزی تلاش خواهد شد که میزان کوتاه‌شدگی (به‌صورت سه‌بعدی و دوبعدی) مقایسه شود. علاوه بر آن با توجه به اهمیت سطوح جدایش در شکل‌گیری ساختارهای زمین‌ساختی، از دیدگاه مهندسی به ویژگی‌های سطوح گسسته در این حوضه اشاره‌ای خواهد شد. نوآوری حاصل شده در این مقاله را می‌توان در دو بخش عنوان کرد.



شکل ۱. الف) نقشه زمین‌شناسی ناحیه کپه‌داغ باختری و موقعیت برش‌های عرضی معرفی شده توسط پورتقوی و همکاران (۱۳۹۰)، ب) موقعیت برش‌های عرضی شماره ۱ و ۲ معرفی شده در این پژوهش

دریا آغاز به عقب‌نشینی کرده و تنها در نواحی سرخس و درگز تداوم دریا از ائوسن به الیگوسن گزارش شده است. از اواسط الیگوسن پیشین به بعد، دریا به‌طور کامل پس‌نشسته و فقط در زمان نئوزن حوضه‌های میان‌کوهی، شکل گرفتند. گفتنی است که ضخامت سنگ‌های لیا- الیگوسن کپه‌داغ، حدود ۶۰۰۰ متر برآورد می‌شود و با وجود تداوم ظاهری رسوب‌گذاری، مطالعه دیرینه جغرافیای کپه‌داغ، نشان می‌دهد که هم‌زمان با فازهای کوهزایی و زمین‌زایی، شواهدی از پیشروی و پسروی مکرر دریا وجود دارد.

چینه‌شناسی مکانیکی کپه‌داغ باختری و مرکزی و نتایج نمونه‌های XRD

در ناحیه کپه‌داغ باختری سازندگی که دارای ضخامت زیادی از رسوبات تبخیری که بتواند به‌عنوان افق جدایش مانند زاگرس عمل کند، وجود ندارد. اما رسوبات دیگری هستند که می‌توانند این نقش را به عهده بگیرند. برای شناسایی این سازندها نیاز است تا ضخامت، سنگ‌شناسی و حتی رفتار آنها در شرایط تنش و گرما (شرایط عمق) مورد ارزیابی قرار گیرد. براین اساس ضخامت سازندهای حوضه کپه‌داغ و جایگاه چینه‌شناسی آنها مورد بررسی قرار گرفته شده است (شکل ۲).

در رسم برش‌های ساختاری-رسوبی شناسایی رفتاری مکانیکی سازندها بسیار حائز اهمیت است. امروزه ویژگی‌های مهندسی واحدهای سنگی در حوضه‌های رسوبی شناسایی می‌شود تا بتوانند در فعالیت‌های حفاری مورد استفاده قرار گیرند. در نگاهی دیگر می‌توان از این داده‌ها در شناسایی رفتار پلاستیک و یا به‌عبارت‌دیگر شناسایی سطوح جدایش استفاده کرد (Ruh et al., 2017).

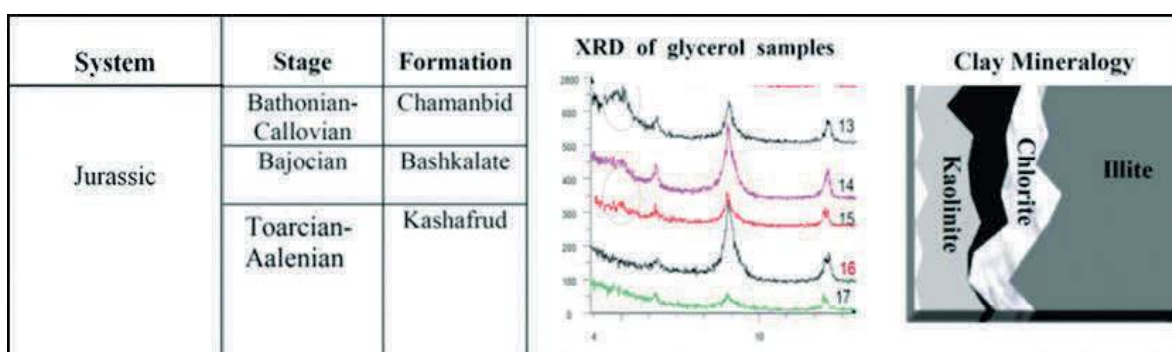
Stage	Formation	Major lithology	Thickness, m (NIOC Report, Afshar Harb, 1994)				
			Thickness in KD basin		Wells (drilled for gas exploration)		
			max	min	Khangiran 1	Gonbadli 1	Gonbadli 3
Pliocene	Aghchegil	Ag yellow limestone, yellow sandstone	19	19	lack of sedimentation		
Upper Paleocene-Eocene	Khangiran	Kh sandstone, calcareous shale	850	145			
Paleocene	Chelkaman	Chk limestone, dolomite	229	127	220	230	193
Lower Paleocene	Pesteligh	Ps shale, mudstone, sandstone	424	126	55	110	140
Maastrichtian	Kalat	Kt limestone, calcareous shale	277	145	80	70	60
Maastrichtian	Neizar	Nz glauconitic sandstone and shale	318	184	230	220	200
Santonian-Campanian	Abtalkh	Abt calcareous shale	813	140	260	140	118
Turonian-Coniacian	Abderaz	Abd white chalky limestone, calcareous shale	350	188	440	510	430
Albian-Cenomanian	Aitamir	At glauconitic sandstone, glauconitic shale	1000	73	420	480	480
Albian	Sanganeh	Sn shale	740	740	210	263	211
Aptian	Sarcheshmeh	Sr marl, thin limestone and shale	310	110	220	200	187
Neocomian-Aptian	Tirgan	Tr limestone, marl	778	31	40	30	25
Neocomian	Shurijih	Sh shale, mudstone, sandstone	1196	246	270	250	246
Oxfordian-Kimmeridian	Mozduran	Mz micritic limestone, dolomite	1440	220	drilling stopped		
Bathonian-Callovian	Chamanbid	Ch micritic limestone, marl	1722	316			
Bajocian	Bashkalate	Ba calcareous shale	460	140			
Toarcian-Aalenian	Kashafud	Ika shale, sandstone	1800	1800			
Thickness (Tertiary & Upper Cretaceous)			2411	983	1705	1760	1621
Thickness (Lower Cretaceous & Jurassic)			8446	3603	-	-	-
SUM			10857	4586	-	-	-

شکل ۲. جدول سنگ‌شناسی و ضخامت سازندهای رسوبی تهیه شده در حوضه کپه‌داغ (Afshar Harb, 1994)

کلریت و ۲۵ درصد کائولینیت برای چمن‌بید (شکل ۳) را نشان داده (Khormali and Amini, 2015) که با توجه به ضخامت حدود ۱۵۰۰ تا ۱۸۰۰ متر سازند کشف‌رود و همچنین سازند چمن‌بید نیز با داشتن رسوبات شیلی و ضخامت حدود ۳۰۰ تا ۱۷۰۰ متر پتانسیل بالای آن را در نقش سطوح جدایش در این حوضه مشخص می‌کند.

به منظور بررسی کانی‌شناسی این دو سازند در نزدیکی برش‌های معرفی شده، تعداد سه نمونه از سازند شمشک و ۲ نمونه از سازند چمن‌بید اخذ شد (شکل ۴). نمونه‌گیری از واحد رسوبی شمشک نشان‌دهنده میزان ۵۰ درصد کانی

براساس داده‌ها و شواهد میدانی سازند شمشک (معادل سازند کشف‌رود در بخش خاوری) با سن ژوراسیک میانی به دلیل داشتن رسوبات شیلی-ماسه‌سنگی و میان‌لایه‌های ذغالی می‌تواند به‌عنوان افق جدایش اصلی منطقه عمل کند، که ضخامت زیاد سازند شمشک، شکل‌پذیری آن را تشدید می‌کند. مطالعات XRD بر روی واحدهای سنگی سازند کشف‌رود در شمال شهر مشهد (خاور محدوده مورد بررسی) و چمن‌بید در (باختر شهر بجنورد) میزان ۵۵ درصد کانی ایلیت، ۱۵ درصد کلریت و ۲۵ درصد کائولینیت را برای سازند کشف‌رود و میزان ۵۰ درصد کانی ایلیت، ۱۵ درصد



شکل ۳. نتایج مطالعات XRD انجام شده توسط (Khormali and Amini, 2015) در حوضه کپه‌داغ بر روی سازندهای چمن بید، باش کلاته و کشف‌رود

جابجایی زیاد شده‌اند وجود نداشته باشد، زیرا با توجه به هدف این پژوهش که بازسازی این برش‌ها است، وجود چنین گسل‌هایی، بازسازی را دچار خطا خواهند کرد.

برش ۱- برش ناودیس شیخ

برش ۱ با طول حدود ۵۳ کیلومتر در خاور طول ۵۷E از ۴ کیلومتری شمال روستای نوده (۲۲ کیلومتر خاور بجنورد) آغاز شده و با روندی شمالی-جنوبی تا نزدیکی مرز ایران و ترکمنستان ادامه می‌یابد. پس از برداشت داده‌ها، برش‌ها در نرم‌افزار موو'ا به صورت دوبعدی و سه‌بعدی به‌روزرسانی و رسم شد (شکل ۶). از دیدگاه چینه‌شناسی این برش شامل توالی مزوزوییک و سنوزوییک کپه‌داغ است. در پیمایش از جنوب به سمت شمال در امتداد این برش مشخص می‌شود، واحدهای آهکی سازند تیرگان از واحدهای سیماساز اکثر ارتفاعات این منطقه می‌باشند. به‌طور کلی در بخش جنوبی برش اغلب واحدهای سنگی تیرگان و سرچشمه برونزد دارند و به سمت شمال، در هسته ناودیس‌ها، سازندهای سنگانه و آیتامیر آنها را پوشانده‌اند. در این برش رسوبات جوان‌تر از سازند آیتامیر به اندک دیده می‌شود و تنها در ناودیس شیخ، رسوبات سنوزوییک مشاهده می‌شوند. به گزارش افشار حرب (۱۳۷۳) در مرکز کپه‌داغ، ناودیس شیخ در شمال بجنورد تنها جایی است که سازند پسته‌لیق در آن حفظ شده و ۳۲۵ متر ضخامت دارد. علاوه بر آن در این برش از جنوب به سمت شمال از ضخامت سازند شوربیجه کاسته شده و به سازند زرد تبدیل می‌شود.

از دیدگاه ساختاری ساختمان‌های چین‌خورده

ایلیت، ۱۵ درصد کلریت، ۲۰ درصد کائولینیت و ۱۰ درصد مونت‌مورینولیت است. وجود این میزان کانی‌های رسی سبب خواهد شد که پارامترهای برشی این توده سنگ به‌گونه‌ای شود که در شرایط حرارت و عمق، زاویه اصطکاک داخلی آن کاهش یابد و پتانسیل ایجاد رفتار پلاستیک در این سنگ را ایجاد کند.

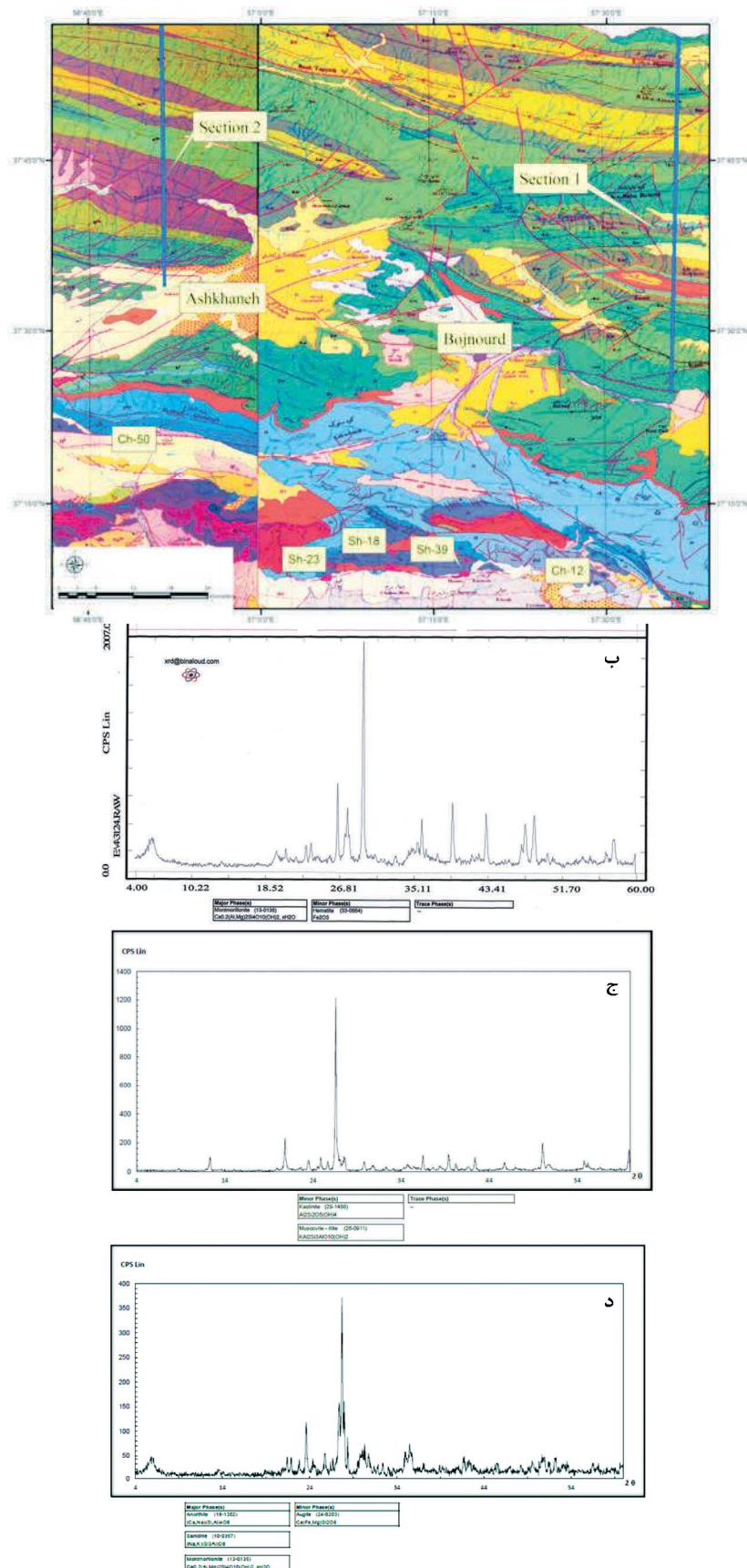
نمونه‌گیری از واحد رسوبی سازند چمن‌بید نشان‌دهنده میزان ۵۰ درصد کانی‌ایلیت، ۱۵ درصد کلریت و ۲۵ درصد کائولینیت برای این سازند است (شکل ۵). بررسی سنگ‌شناسی برخی از سازندها مانند سازند مزدوران که اغلب با وجود سنگ‌آهک‌های مقاوم شناخته می‌شود، نشان داد در برخی مناطق این سازند شامل واحدهای مارن، شیل، انیدریت و گچ هستند. به‌عنوان مثال در چاه گنبدلی ۲ سازند مزدوران شامل ۹۰۰ متر ضخامت است که تناوبی از سنگ‌های کربناته و انیدریت می‌باشد و یا در کوه قره‌خود (جنوب باختر شهر بجنورد) سازند مزدوران شامل ۱۶۰ متر مارن، شیل و سنگ‌آهک‌های نازک لایه است (افشار حرب، ۱۳۷۳). از سوی دیگر نیز مطالعات XRD بر روی واحدهای سنگی این سازند در موقعیت "37° 30' 20.3" N و "55° 38' 25.5" E نتایج مشابه سازندهای کشف‌رود و چمن بید را نشان داده است (Khormali and Amini, 2015).

برش‌های ساختاری

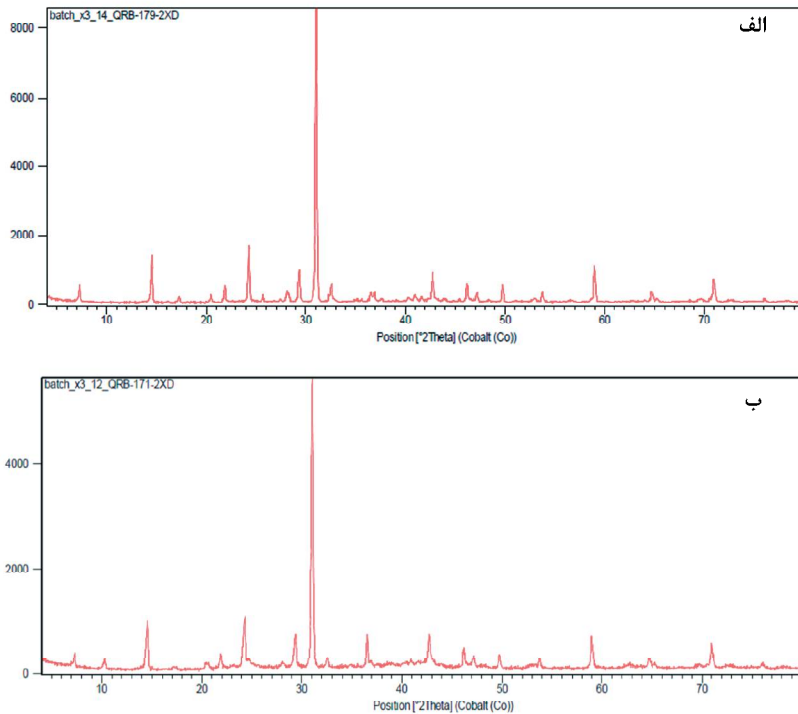
برش ۱ در کپه‌داغ مرکزی (برش ناودیس شیخ) و برش ۲ در کپه‌داغ باختری (برش آشخانه) پیمایش شده است (شکل ۱). در انتخاب این برش‌ها سعی شد از محل‌هایی استفاده شود که گسل‌های امتدادلغز اصلی و بزرگ که سبب

1. Move (Midland Valley)

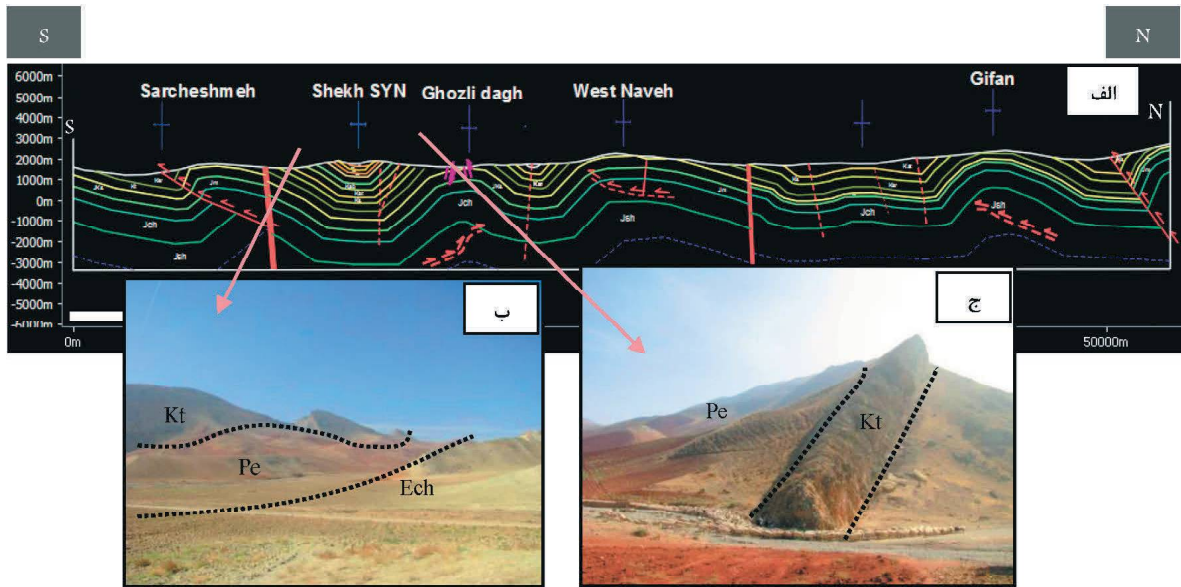
برآورد میزان کوتاه‌شدگی و نقش سطوح جدایش در دگرریختی کپه‌داغ باختری ...



شکل ۴. الف) موقعیت نمونه‌های اخذ شده در این پژوهش از سازند شمشک (کشف رود) SH و چمن بید CH نسبت به موقعیت برش‌های ۱ و ۲، ب) نتایج XRD نمونه SH-23، ج) آنالیز XRD نمونه SH-18، د) آنالیز XRD نمونه SH-39



شکل ۵. نتایج آنالیزهای XRD بر روی نمونه‌های الف (CH-50)، ب (CH-12)



شکل ۶. الف) برش بازبینی شده (رسم به روش شکن) در نرم‌افزار موو، دوبعدی، ب) نمایی از یال جنوبی ناودیس شیخ و رخنمون سازندهای کلات (Kt)، پسته‌لیق (Pe) و چهل‌کمان (Ech)-دید به باختر، ج) رخنمون سازندهای کلات و پسته‌لیق در یال شمالی ناودیس شیخ-دید به باختر

و جنوب در ارتباط با کارکرد افق‌های جدایش باشد. نکته دارای اهمیت دیگر در ارتباط با این برش، تفاوت در ژرفای ناودیس‌ها است به‌گونه‌ای که با توجه به رخنمون سازند خانگیران در ناودیس شیخ می‌توان انتظار داشت که این بخش، ژرفای بیشتری نسبت به نواحی مجاور داشته باشد. از دیگر ساختارهای مهم دیده شده در این برش گسل‌های

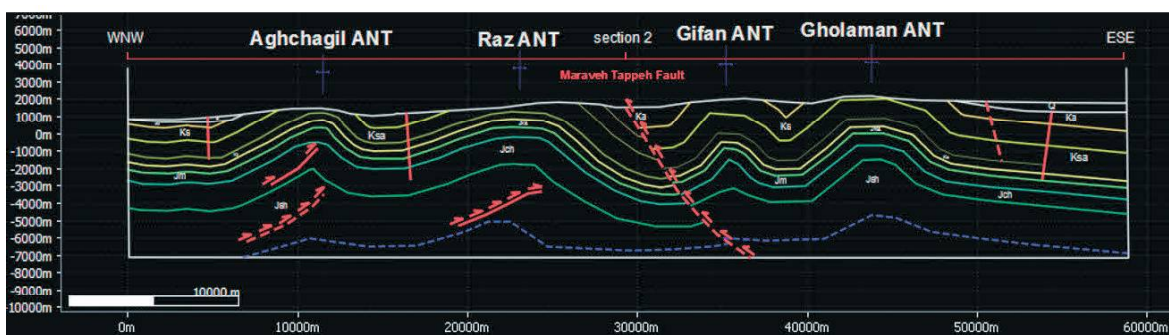
ناودیس شیخ در جنوب، ناوه باختری در مرکز و تاقدیس گیفان در شمال مهم‌ترین ساختمان‌های چین‌خورده این برش می‌باشند. تاقدیس‌های این برش اغلب نامتقارن هستند، به طوری که شیب یال جنوبی بیشتر از یال شمالی است و سبب شده تمایل تاقدیس‌ها به سمت جنوب باشد که به نظر می‌رسد این اختلاف شیب لایه‌بندی در شمال

نزدیکی مرز سیاسی ایران و ترکمنستان ادامه می‌یابد. از لحاظ چینه‌شناسی این برش تنها شامل توالی مزوزویک کپه‌داغ است و برخلاف برش ۱، واحدهای جوان‌تر از سازند آیتامیر در این برش دیده نمی‌شود (شکل ۷). واحد سنگی سازند سرچشمه، در اکثر طول برش در تاقدیس‌ها بر روی سطح زمین دیده می‌شود و در هسته ناودیس‌ها اغلب سازند آیتامیر برونزد دارد. در این برش واحدهای سنگی سازند شورپیجه به سازند زرد تبدیل شده‌اند که رخنمون آن در جنوب مکان شروع این برش دیده می‌شود (شکل ۷).

NW-SE امتدادلغزی است که اغلب کارکرد راستگرد را نشان می‌دهند. همچنین در کیلومتر ۱۰ این برش نیز، گسل اصلی راندگی دیده می‌شود که در این محل سبب راندگی آهک‌های تیرگان بر روی مارن‌های سبزه سازند سرچشمه شده است. به‌طور کلی گسل‌های امتدادلغز با روند NW-SE به فراوانی در این برش دیده می‌شود به‌خصوص با گذر از ناودیس شیخ به سمت شمال تراکم این گسل‌ها افزایش می‌یابد.

برش ۲- برش آشخانه

این برش از ۱۲ کیلومتری شمال باختر شهر آشخانه آغاز شده و پس از طی حدود ۶۰ کیلومتر به سمت شمال تا

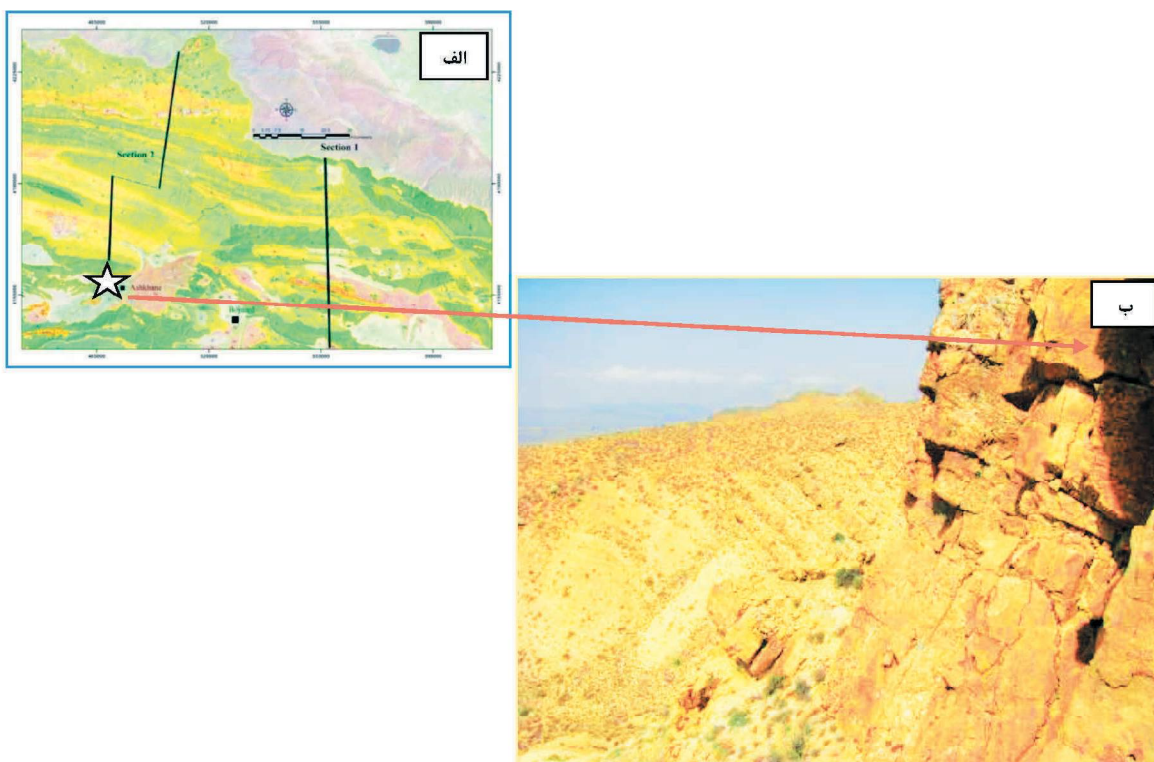


شکل ۷. برش بازبینی شده که تا افق ژوراسیک به روش شکن در نرم‌افزار موو رسم شده است

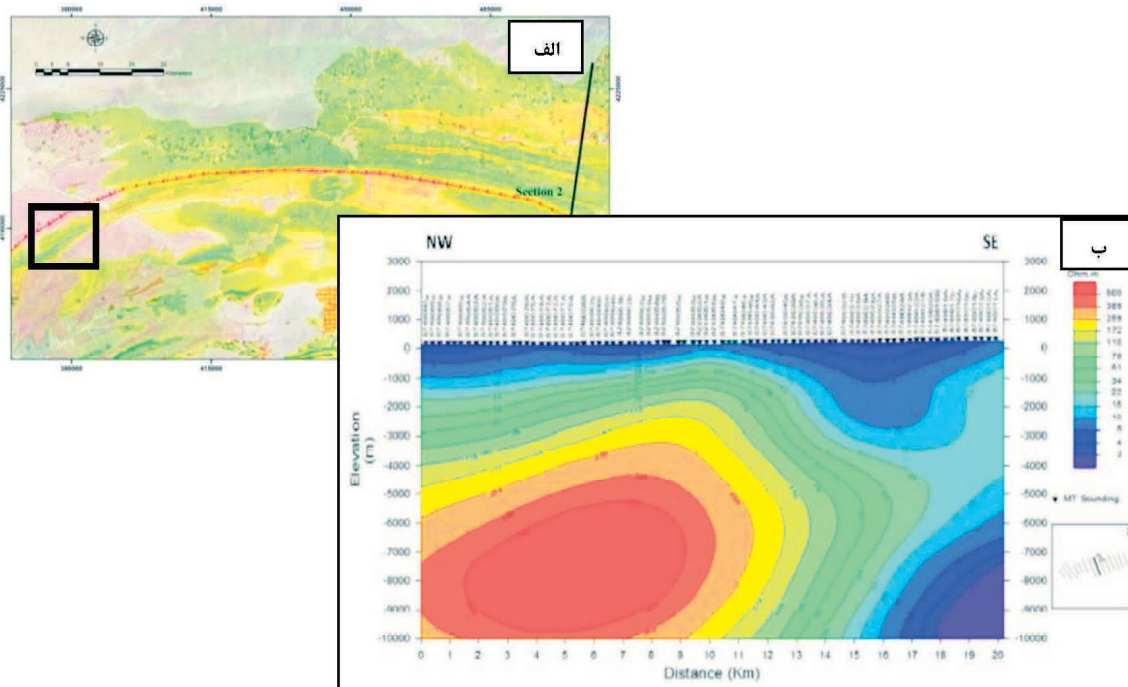
تشکیل حوضه رسوبی نقش داشته است یاد می‌کند که در آخرین مراحل زمین‌ساختی به‌صورت معکوس و یا راندگی عمل کرده است. به‌منظور شناسایی ویژگی‌های این گسل در عمق نیاز به داده‌های زیرسطحی می‌باشد که در این پژوهش از مطالعات هاشمی و همکاران (۱۳۹۳) استفاده شده است. ایشان در منطقه کردند (شکل ۸) با بررسی مدل وارون حاصل از مدل‌سازی دوبعدی، ۱۵ پروفیل رسم کرده است و سعی در آشکارسازی گسل مراوه‌تپه به روش مگنتوتلوریک داشته است. نتایج حاصل شده، ساختارهای زمین‌شناسی را به‌صورت لایه‌ای (لایه‌بندی) و با چین خوردگی که نمایانگر تاقدیس و ناودیس‌ها هستند، نشان داد. همچنین اثر گسل مراوه‌تپه در جنوب پروفیل رسم شده (شکل ۹-ب)، با فرارگیری لایه‌های با مقاومت ویژه بالا بر روی لایه‌های با مقاومت ویژه پایین مشاهده می‌شود که به‌وسیله آن می‌توان رفتار این گسل پی‌سنگی را تا عمق (۱۰۰۰۰- متر) و همچنین تاقدیس شمالی این گسل را پیش‌بینی کرد.

از دیدگاه ساختاری ساختمان‌های آقچیل، راز، غلامان و گیفان از ساختمان‌های اصلی این برش می‌باشند. براساس برش رسم شده مشخص است که ساختمان‌های جنوبی (تاقدیس‌های آقچیل و راز) نامتقارن است و شیب لایه‌بندی شمالی آنها بیشتر از یال جنوبی می‌باشد (برخلاف تاقدیس‌های برش ۱) ولی به سمت شمال، تاقدیس غلامان شباهت‌هایی مانند تاقدیس گیفان در برش ۱ دارد. در این برش نیز کماکان طول موج تاقدیس‌ها متفاوت می‌باشد و نشان‌دهنده عملکرد افق‌های متعدد جدایش در چین‌خوردگی است. عدم تقارن تاقدیس‌ها سمت یکسانی نداشته و برخلاف برش ۱ سمت تقارن‌ها متفاوت است.

در این برش به طرز چشمگیری از شدت گسلش امتدادلغز با روند NW-SE کاسته شده است. مهم‌ترین گسل موجود در این برش گسل بزرگ مراوه‌تپه است که در شمال تاقدیس راز سبب جابجایی و قرارگیری واحدهای سازند آیتامیر در کنار (یا در روی؟) سازند سرچشمه شده است. افشار حرب (۱۳۷۳) از این گسل به‌عنوان یک ساختار پی‌سنگی که در



شکل ۸. الف) رخنمون سازند زرد در کوه دوچنگ (ستاره سفید رنگ) در شمال خاور شهر آشخانه نسبت به موقعیت برش‌های عرضی در این پژوهش، ب) نمایی از واحدهای آهکی و آهک مارنی سازند زرد در کوه دوچنگ-دید به باختر



شکل ۹. الف) موقعیت انجام مطالعات مگنتوتلوریک (مربع مشکی رنگ) توسط هاشمی و همکاران (۱۳۹۳) نسبت به برش ۲، ب) نتیجه مدل وارون دویعدی مگنتوتلوریک در ساختمان کردند (مد TE)

موازنه و بازسازی برش‌ها

(شکل ۱۰). طول این برش پس از بازسازی حدود ۵۹ کیلومتر محاسبه شد که براین اساس میزان کوتاه‌شدگی حدود ۱۱ درصد برآورد می‌شود. نکته قابل توجه در این برش تداوم رسوب‌گذاری و ضخامت زیاد رسوبات در ناودیس شیخ (در حدود ۵۰۰۰ متر تا سر سازند شمشک) است که این امر نشان‌دهنده تداوم رسوب‌گذاری تا سازند خانگیران که جوان‌ترین رسوبات دریایی منطقه است، می‌باشد.

موازنه برش ۲

این برش با قرار دادن خط نشانه در انتهای جنوبی آن از ابتدای برش تا ناودیس شمال غلامان که لایه‌ها به تقریب افقی هستند بازسازی شد (شکل ۱۱). طول برش بازسازی شده حدود ۶۴ کیلومتر و میزان کوتاه‌شدگی به دست آمده حدود هشت درصد برآورد شده است.

بحث

همان‌طور که در قبل گفته شد، از دیدگاه چینه‌شناسی و رفتار مکانیکی سازندها مشخص است که سازندهای مزوزوئیک با توجه به کانی‌شناسی و ضخامت می‌توانند نقش سطوح جدایش یا فراکنش را بازی کنند. نتایج حاصل از مطالعات XRD در کپه‌داغ مشخص کرد سازندهای با سن ژوراسیک (کشف‌رود، شمشک و گاهی سازند مزدوران در کپه‌داغ خاوری با توجه به سنگ‌شناسی) و همچنین سازندهای سرچشمه، سنگانه و آیتامیر پتانسیل ایجاد سطوح جدایش در این منطقه را دارند. ستبرای این سری از رسوبات در برخی مناطق به ۴۰۰۰ متر می‌رسد و کمترین ستبرای آن چیزی در حدود ۲۰۰۰ متر است. رسوبات این سری متشکل از مارن، شیل و ماسه‌سنگ است که قابلیت بازی نقش سطوح جدایش را دارد.

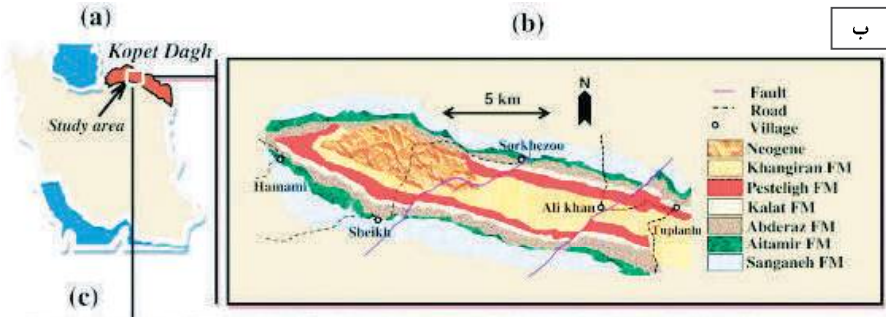
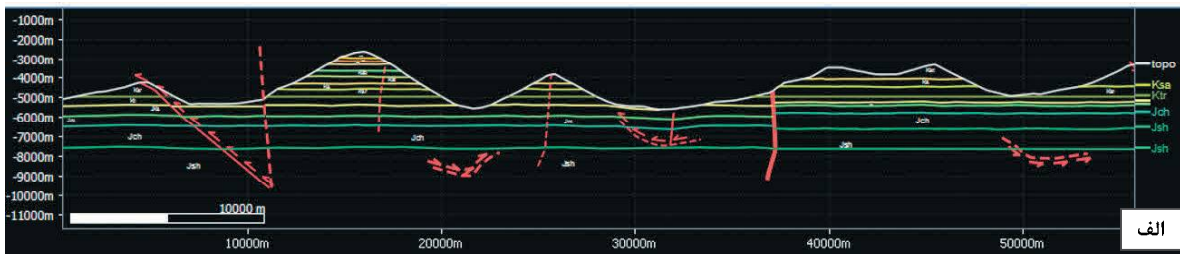
پس از رسم برش‌های ساختاری و بازسازی آنها برای محاسبه عمق تا سطح جدایش از آن برش‌ها استفاده شده است. در این محاسبات از مدل‌سازی ۳ بعدی برش‌ها در نرم‌افزار (موو) استفاده شده است (نوآوری پژوهش حاضر)

موازنه برش‌ها، امکان آزمودن اعتبار هندسه ساختاری رسم شده در یک برش عرضی را فراهم می‌آورد (Dahlstorm, 1969; Elliot, 1983). روش موازنه برش‌های عرضی در مطالعه کمربندهای دگرشکل شده‌ای که در آنها دگرشکلی گسترده‌ای در لایه‌های سنگی بالایی یک گسل جدا کننده یا جدایش^۲ نیمه افقی رخ داده است، ارزش بالایی دارد (Rodgers, 1949, 1963). دگرشکلی‌های دارای سطح جدایش، علاوه بر آنکه در کمربندهای چین خورده-رانده به وجود می‌آیند و کوتاه‌شدگی پوسته با تشکیل گسل‌های رانده و چین‌های وابسته به آن همراه است (Hossack, 1979)، در سرزمین‌های کافتی یا کششی که در آن نازک‌شدگی پوسته با تشکیل گسل‌های عادی و چین‌های مربوط به آن همراه است، نیز رخ می‌دهد (Gibbs, 1983, 1984; Wernicke and Burchfiel, 1982). در این پژوهش از روش موازنه طولی برش عرضی ساختاری برای موازنه برش‌های عرضی استفاده شده که در آن موازنه طول برش با تاکید بر حفظ طول و یکنواختی لایه انجام می‌گیرد (Marshak and Woodward, 1988). منظور از حفظ طول لایه، این است که طول یک مرز در برش عرضی در جریان دگرشکلی تغییر نمی‌کند. به عبارت دیگر اگر تمامی جزئیات سنگ‌های دگرریخت شده در ترازمندی برش، در نظر گرفته شود، این امر پیچیده می‌شود. بنابراین بازسازی و ترازمندی نیاز به سطح معینی از ساده‌سازی دارد. به این ترتیب برش‌های رسم شده در این پژوهش که به روش شکن^۳ رسم شده بودند، با قرار دادن خط نشانه در انتهای جنوبی برش‌ها و پیاده کردن طول مرز سازندها و گسل‌های مربوطه با توجه به ثابت در نظر گرفتن ضخامت لایه‌ها در نرم‌افزار تخصصی موو به حالت اولیه برگردانده شده است. در مرحله بعد، این برش‌ها با توجه به ماهیت و ویژگی‌های هر لایه، ضخامت لایه و جابجایی در راستای گسل‌ها بازسازی شده است.

موازنه برش ۱

برش ۱ که با طول تقریبی ۵۳ کیلومتر رسم شده بود با قرار دادن خط نشانه^۴ در انتهای جنوبی آن بازسازی شد

1. Detachment
2. Decollement
3. Kink
4. Pin line



شکل ۱۰. الف) بازسازی برش شماره ۱ در نرم افزار تخصصی موو-به ضخامت حدود ۵ کیلومتری رسوبات در ناودیس شیخ توجه شود، ب) تصویر ماهواره‌ای و نقشه زمین‌شناسی ساده شده از ناودیس شیخ که رسوبات نفوژن در آن برونزد دارد



شکل ۱۱. بازسازی برش شماره ۲ در نرم افزار تخصصی موو

شکل ۱۲). بر این اساس سر سازند تیرگان (سن کرتاسه) به عنوان سر سازند مبنا انتخاب شده است. با استفاده از الزامات هندسی، عمق تا سطح جدایش (Z) بر اساس محاسبه مساحت زیر سطح چین خورده (S) تا خط عطف، طول مستقیم (L1) و طول چین خورده (L0) در

تاقدیس‌هایی که امکان محاسبه این فاکتور وجود دارد، محاسبه شد (جدول ۱). محاسبه‌های انجام شده در تاقدیس جنوبی منطقه (گوزلی داغ) سطوح جدایش را در واحدهای چمن‌بید (سن ژوراسیک میانی) نشان می‌دهد اما به سمت شمال، تاقدیس‌ها این واحد را در سازندهای ژرف‌تر و در

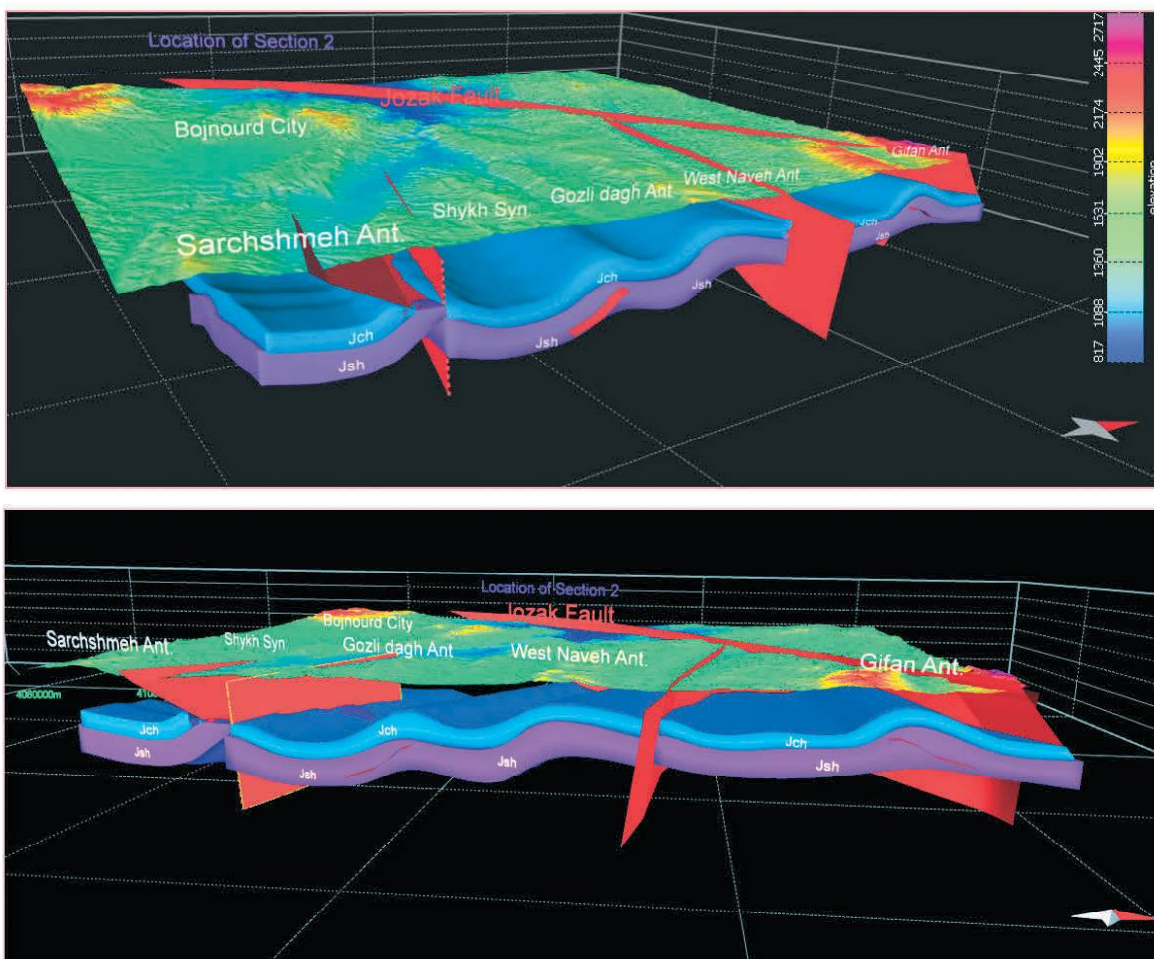
مختلف واحدهای سنگی با حرکت راست بر شده‌اند ولی در برش ۲ این سامانه از گسل‌ها دیده نمی‌شوند.

از دیدگاه رسوبی در کپه‌داغ مرکزی در ناحیه ناودیس شیخ رسوبات سنوزوئیک قابل مشاهده است و پس از بازسازی ضخامتی در حدود ۵ کیلومتر را نشان می‌دهند، این در حالی است که در برش ۲ رسوبات جوان‌تر از سازند آیتامیر برونزد ندارد. همچنین در برش ۱ سازند شورپیچه در طول برش دیده می‌شود ولی در برش ۲ سازند زرد جایگزین آن سازند در ناحیه شده است.

طول برش ۱ پس از بازسازی حدود ۵۹ کیلومتر محاسبه شد که براین اساس میزان کوتاه‌شدگی حدود ۱۱ درصد در کپه‌داغ مرکزی و در برش ۲ حدود ۶۴ کیلومتر و میزان کوتاه‌شدگی به دست آمده حدود هشت درصد برآورد شده است.

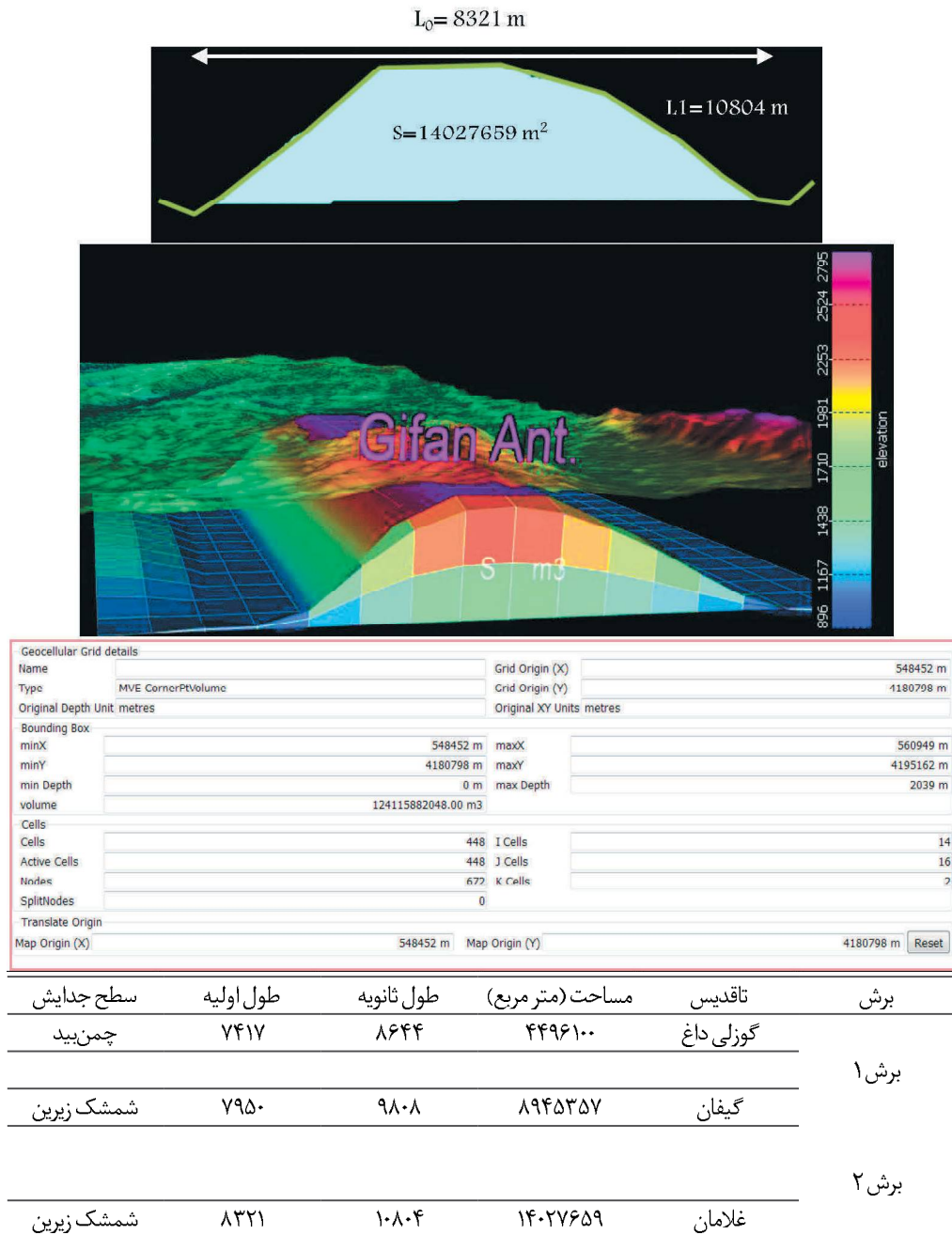
واحدهای سازند کشف‌رود (و یا معادل آن شمشک) مشخص کرده‌اند که این موضوع از شباهت‌های دو برش رسم شده ۱ و ۲ در این منطقه می‌باشد.

مقایسه دو برش عرضی رسم شده در کپه‌داغ باختری و مرکزی در فاصله حدود ۵۰ کیلومتر از یکدیگر نشان می‌دهد تفاوت‌های مشخصی از دیدگاه ساختاری و رسوبی در این دو زیر پهنه وجود دارد. به طوری که در جنوب کپه‌داغ مرکزی (برش ۱) چین‌ها گرایش به جنوب دارند ولی در کپه‌داغ باختری (برش ۲) گرایش چین‌ها به سمت شمال است. در شمال گسل مراوه‌تپه در برش ۲ چین‌ها کمی به سمت جنوب گرایش دارند که مانند برش ۱ است. از سوی دیگر در برش ۱ گسل‌های امتدادلغز شمال باختر-جنوب خاور به فراوانی دیده می‌شوند که سبب جابجایی در مقیاس‌های



شکل ۱۲. مدل‌های سه‌بعدی از برش‌های ترسیمی تهیه شده براساس داده‌های موجود در این پژوهش در نرم‌افزار 3D Move

جدول ۱. نحوه محاسبه عمق سطح جدایش در تاقدیس‌های انتخاب شده در برش‌های ۱ و ۲ به تفکیک و ارائه نمونه از تاقدیس غلامان در محاسبه هندسی به حالت دوبعدی و تاقدیس گیفان به صورت سه‌بعدی در نرم‌افزار Move



نتیجه‌گیری

که در فاصله حدود ۵۰ تا ۶۰ کیلومتری از یکدیگر در خاور طول ۵۷ E و باختر آن (مرز میان کپه‌داغ باختری و مرکزی براساس مطالعات (Hollingsworth et al., 2007) قرار گیرند. سپس پس از رسم برش‌ها و بررسی ساختارهای زمین‌ساختی، این برش‌ها در نرم‌افزار موو بازسازی به صورت دوبعدی و سه‌بعدی رسم شده و میزان کوتاه‌شدگی در آن‌ها

رسم برش‌های عرضی و بازسازی آنها اطلاعات ارزشمندی را در خصوص ساختارهای زمین‌ساختی، نحوه رسوب‌گذاری و ویژگی‌های مکانیکی رسوبات در اختیار قرار می‌دهد. در این پژوهش ۲ برش عرضی رسم شده توسط پورتقوی و همکاران (۱۳۹۰) در کپه‌داغ باختری و مرکزی انتخاب و به‌روزرسانی شد. برش‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند

در زمان فشارش نیز محل و شکل چین‌خوردگی‌ها را کنترل کند. براساس این مطالعات با افزایش عمق شیب این گسل پی‌سنگی در ژرف به سمت شمال-شمال باختر بوده و تا ژرفای ۱۰۰۰۰- متر اختلاف زیادی در مقدار شیب آن دیده نمی‌شود.

افق‌های جدایش میانی در هنگام چین‌خوردگی فعال شده و تا حدودی هندسه چین‌خوردگی را تحت تأثیر قرار داده‌اند، ازجمله این تأثیرات می‌توان به گسترش تاقدیس‌های اقماری اشاره کرد. همچنین بررسی عمق سطوح جدایش براساس محاسبات هندسی در تاقدیس‌هایی که امکان محاسبه این پارامتر وجود داشت، نشان می‌دهد از سوی جنوب به سمت شمال سطح جدایش اصلی در ساختمان‌های شکل گرفته به سازندهای ژرف‌تر انتقال یافته است. بر این اساس سازند چمن‌بید به‌عنوان افق جدایش در بخش جنوبی برش‌های ترسیم شده و سازند کشف‌رود (معادل آن سازند شمشک) در بخش‌های شمالی، به‌عنوان افق جدایش نقش بازی می‌کنند.

بازسازی برش‌های عرضی نشان داد در برش ۱ میزان کوتاه‌شدگی حدود ۱۱ درصد و در برش ۲ میزان کوتاه‌شدگی به ۸ درصد می‌رسد. این کاهش میزان کوتاه‌شدگی با افزایش عرض پهنه کپه‌داغ به سمت باختر تطابق دارد. این مقدار کوتاه‌شدگی در مقایسه با کمربند کوهزایی زاگرس با بخش پیشانی آن که کوتاه‌شدگی حدود ۶ درصد را نشان می‌دهد (Sherketi et al., 2006) قابل مقایسه است.

منابع

- افشار حرب، ع.، ۱۳۷۳. زمین‌شناسی کپه‌داغ، انتشارات زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۶۰۶.
- آقانباتی، ع.، ۱۳۸۵. زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ISBN-۹۶۴-۶۱۷۸۱۳-۸-۶۱۹، ۶۱۰.
- پور تقوی، ا.ن.، پور کرمانی، م.، قرابیگلی، غ و شرکتی، ش.، ۱۳۹۰. الگوی چین‌خوردگی در بخش باختری کمربند چین‌خورده کپه‌داغ. فصلنامه علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، بهار ۹۳، ۱۵۳-۱۶۰.
- هاشمی، ن.، قائد رحمتی، ر.، مرادزاده، ع.، خوجم

محاسبه شده است. همچنین سطوح فراکنش با توجه به اهمیتی که در رسم برش‌های ساختاری دارند مورد بررسی قرار گرفته‌اند و سعی شد با دیدگاه مهندسی رفتار این سازندها بررسی و در نهایت در تاقدیس‌ها با توجه به داده‌های در دسترس عمق سطوح جدایش پیش‌بینی شود. نتایج حاصل از این تحقیق عبارت است از:

سازند شمشک (کشف‌رود) براساس نمونه‌های اخذ شده در این پژوهش و نتایج آنالیز XRD پتانسیل بیشتری نسبت به سازند چمن‌بید به‌عنوان سطوح جدایشی دارد. اغلب چین‌های محدوده مورد مطالعه از نوع نامتقارن هستند که به نظر می‌رسد عدم تقارن به‌واسطه کارکرد افق‌های جدایش ایجاد شده است. گرایش عمومی ساختارهای کپه‌داغ مرکزی در برش ۱ به‌سوی جنوب است، اما در کپه‌داغ باختری، در جنوب گسل مراوه‌تپه گرایش رو به شمال و در نزدیکی مرز ترکمنستان گرایش چین‌های بزرگ کمی به جنوب است. اما با توجه به طول زیاد تاقدیس‌ها، قرارگیری آنها در امتداد هم و قرارگیری گسل‌های مهم در امتداد چین‌خوردگی، می‌توان به این نکته پی‌برد که گسل‌های پی‌سنگی که چین‌خوردگی هرسی‌نین را کنترل کرده‌اند در چین‌خوردگی جوان‌تر ناحیه نیز نقش داشته‌اند. اختلاف ژرفای ناودیس‌ها در منطقه که در برش‌ها مشهود است احتمالاً در ارتباط نزدیک با عملکرد گسل‌های امتدادلغز و با خاستگاه ژرف می‌باشد که تأیید این موضوع نیاز به بررسی‌های بیشتر و داده‌های زیرسطحی دارد.

مقایسه برش ۱ و ۲ رسم شده از دیدگاه گسل خوردگی نشان می‌دهد در برش ۱ به فراوانی گسل‌های امتدادلغز شمال باختر-جنوب خاور با کارکرد راست‌بر دیده می‌شود که به نظر می‌رسد بخشی از کوتاه‌شدگی در عرض کپه‌داغ را در خود جبران می‌کنند. اما در برش ۲ این گسل‌ها بسیار اندک می‌باشند.

گسل مراوه‌تپه که به‌عنوان یک ساختار پی‌سنگی در تشکیل حوضه رسوبی نقش داشته است در آخرین مراحل زمین‌ساختی به‌صورت معکوس و یا راندگی عمل کرده و بررسی برش‌های مگنتوتلوریک نشان داد این گسل علاوه بر آنکه در ایجاد حوضه رسوب‌گذاری نقش داشته، توانسته

- Caspian basin. *Geophysics Journal International*, 148, 214-245.
- Khormali, F. and Amini, A., 2015. Claymineralogy of the Jurassic-Tertiary rocks of the Kopet Dagh basin (northeastern IRAN): Implications for paleoclimate. *Acta Geodyn. Geomater*, 4, 180, 387-398.
 - Lyberis, N. and Manby, G., 1999. Oblique to orthogonal convergence across the Turan block in the Post-Miocene. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 83, 1135-1160.
 - Marshak, S. and Woodward, N., 1988. Basic methods of structural geology. (Introduction to cross section balancing), 299-318.
 - Robert, A.M.M., Letouzey, J., Kavooosi, M.A., Sherkati, S., Müller, C., Vergés, J. and Aghababei, A., 2014. Structural evolution of the Kopeh Dagh 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.
 - Rodgers, J., 1949. Evolution of thought on structure of middle and southern Appalachian. *Advancing the World of Petroleum Geosciences Bulletin*, 33, 8, 1643-1654.
 - Rodgers, J., 1963. Mechanics of Appalachian forland folding in Pennsylvania and west Virginia. *American Association of Petroleum Geosciences Bulletin*. 46, 8, 1527-1563.
 - Ruh, J. and Verges, J., 2017. Effects of reactivated extensional basement faults on structural evolution of fold-and-thrust belts: Insights from numerical modelling applied to the Kopet Dagh Mountains. *Tectonophysics*, 493-511.
 - Sherkati, S., Letouzey, J. and Frizon de Lamotte, D., 2006. Central Zagros fold-thrust belt (Iran): New insights from seismic data, field
 - لی، ا.، نجاتی کلاته، ع و ایوبی، م.، ۱۳۹۳. آشکارسازی گسل رورانده مراوه تپه با استفاده از وارون سازی داده‌های مگنتوتلوریک. مجموعه مقالات شانزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، اردیبهشت ۱۳۹۳، ۹۸-۱۰۲.
 - Afshar Harb, A., 1979. The stratigraphy, tectonics and petroleum geology of Kopet Dagh region, northern Iran. Ph.D. thesis, Imperial College, London, 316.
 - Afshar Harb, A., 1994. Geology of KD. In: Hushmandza-deh, A. (Ed.), *Treatise on the Geology of Iran*. Geological Survey of Iran, Tehran, 275 (in Persian).
 - Berberian, M. and King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18, 210-265.
 - Dahlstrom, C.D.A., 1969. Balanced cross sections. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 6, 743-757.
 - Elliot, D., 1983. The construction of balanced cross-sections. *Journal of Structural Geology*, 5, 101.
 - Gibbs, A.D., 1983. Balanced cross-section construction from seismic sections areas of extensional tectonics. *Journal of Structural Geology*, 5, 153-160.
 - Gibbs, A.D., 1984. Structural evolution of extensional basin margins. *Journal of Geological Society of London*, 141, 609-620.
 - Hollingsworth, J., 2007. Active tectonics of NEIran. Ph.D. thesis, Queen's College, University of Cambridge, 239.
 - Hossack, J., 1979. The use of balanced cross-sections in the calculation of orogenic contraction: A review. *Journal of the Geological Society*, 136, 705-711.
 - Jackson, J., Priestley, K., Allen, M. and Jackson, M., 2002. Active tectonic of the south