



فراسنج های موثر در کلاس چین های جدایشی: بینش هایی از مدلسازی عددی سه بعدی اجزاء محدود

انیس السادات خلیفه سلطانی (نویسنده مسئول)^۱

^۱دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده علوم زمین، تهران aniskhs21@gmail.com

چکیده

چین های مرتبط با گسل در اکثر جایگاه های زمین ساختی و در هر دو رژیم فشارشی و کششی حضور دارند. آنها عمدتاً مخزن منابع هیدروکربنی هستند، از این رو بیشتر از سایر ساختارهای زمین شناسی، مورد توجه زمین شناسان نفت و ساختاری بوده اند، و پژوهش های بسیاری بر روی آنها انجام شده است. چین های مرتبط با گسل شامل سه عضو نهایی هستند، که عبارتند از: چین های جدایشی، گسترش-گسلی، و خم-گسلی. این پژوهش نقش هندسه گسل جدایشی، ضریب اصطکاک و زاویه اصطکاک داخلی را بر روی کلاس چین های جدایشی توسط سه سری از مدل های عددی سه بعدی مورد بررسی قرار میدهد. چینها بر اساس اینکه انحناى کمان داخلی آنها بزرگتر، برابر یا کوچکتر از انحناى کمان خارجی شان باشد به ترتیب به کلاس های ۱، ۲، و ۳ تفکیک می شوند. کلاس (۱) نیز بر اساس اینکه تغییرات ضخامت در لولا کمتر، برابر یا بزرگتر از ضخامت در یال ها باشد، به ترتیب به زیر کلاس های 1A، 1B، و 1C تقسیم می شود. نتایج این مطالعه نشان می دهد که هر سه فراسنج هندسه گسل جدایشی، ضریب اصطکاک و زاویه اصطکاک داخلی در کلاس چین های جدایشی موثر هستند؛ (۱) هندسه گسل جدایشی بالآمدگی قائم چین را کنترل می کند. (۲) با افزایش زاویه اصطکاک داخلی و کاهش ضریب اصطکاک لولای چین ضخیم و یال ها نازک می شود، به عبارت دیگر چین های کلاس (۳) حاکم می شود. برعکس زمانی که زاویه اصطکاک داخلی کاهش و ضریب اصطکاک افزایش می یابد، لولای چین نازک و یال ها ضخیم می شوند، و چین های کلاس (1A) غالب می شود.

واژه های کلیدی

کلاس چین جدایشی، مدلسازی اجزاء محدود، هندسه جدایش، ضریب اصطکاک، زاویه اصطکاک داخلی



۱. مقدمه

بیش از یک سده است که تاثیر متقابل چین خوردگی و گسلش مورد توجه زمین شناسان ساختاری قرار گرفته است [1, 2]، و مدل های جنبش شناسی کمی برای چین های مرتبط با گسل از اواسط ده ۱۹۸۰ میلادی ارائه شده است [3, 4, 5]. این چین خوردگی ها به دلیل گستردگی جایگاه زمین ساختی شان و اینکه در هر دو رژیم زمین ساختی کششی و فشارشی روی می دهند [6, 7]، و همچنین بخاطر نقش مهمی که در مهاجرت و ذخیره سازی منابع هیدروکربنی بازی می کنند [8, 9]، همواره مورد توجه زمین شناسان قرار داشته اند. آنها عمدتاً بخاطر اهمیت اقتصادی شان توسط روش های متفاوتی از جمله مطالعات میدانی و بازتاب لرزه ای، آزمایشات تجربی و مدلسازی عددی مورد مطالعه قرار گرفته اند [8, 9, 10, 11, 12, 13].

چین های مرتبط با گسل شامل سه عضو نهایی هستند: چین های جدایشی، گسترش-گسلی و خم-گسلی. چین های جدایشی در بالای سطح جدایشی در جایی که لغزش به صفر می رسد ایجاد می شوند [14, 15]. چین های جدایشی در بالای یک گسل موازی با لایه بندی و یا بر روی یک سطح جدایشی [16]، و در توالی ای از سنگ های با قوام با هسته ای کم قوام توسعه می یابد [17]. چین جدایشی تا هنگامی که مواد کم قوام به سمت مرکز تاقدیس حرکت می کنند توسعه می یابد [18]. بنابراین زمانی که مواد کم قوام به اتمام می رسد، رشد چین متوقف شده و کوتاه شدگی با توسعه گسلش راندگی جبران می شود [18].

۱.۱. طبقه بندی چین

Ramsay (1967) با تعریف سه عنصر ایزوگون شیب، ضخامت اثر محوری^۱ و ضخامت عمودی^۲ چین ها را بر اساس هندسه شان طبقه بندی نمود. این فراسنج های هندسی توسط دو خط مماس بر سطوح داخلی (کاو) و بیرونی (کوز) چین و همچنین زاویه انحراف^۳ سطح چین در نقطه مماس (α) (یعنی زاویه بین خط مماس بر لایه بیرونی و خط عمود بر اثر سطح محوری چین) تعریف می شوند (شکل-۱). بر این اساس، ایزوگون شیب خطی در سراسر لایه است که دو نقطه هم شیب را در سطوح مخالف لایه چین خورده به هم متصل می کند. ضخامت عمودی (t_α) فاصله عمودی بین دو مماس موازی است. ضخامت اثر محوری (T_α) فاصله بین دو مماس، در جهت موازی با اثر سطح محوری است (شکل-۱). دو ضخامت اندازه گیری شده T_α و t_α توسط $T_\alpha = t_\alpha \cos \alpha$ ارتباط می یابند. کلاس یک لایه چین خورده بر اساس نحوه تغییر این فراسنج های هندسی در سراسر چین از لولا تا یال، یا با افزایش مقادیر انحراف سطح (α) تعیین می شود [19].

بر این اساس ایزوگون های شیب در کلاس های ۱، ۲، و ۳ به ترتیب همگرا، موازی و واگرا هستند. ضخامت اثر محوری از لولا به یال در کلاس های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب افزایش، ثابت و کاهش می یابد (شکل-۲ و جدول-۱). کلاس (۱) بر اساس تغییرات ضخامت عمودی به زیر کلاس های 1A، 1B و 1C تقسیم می شود که به ترتیب ضخامت عمودی آنها از لولا به یال افزایش، ثابت و کاهش می یابد (شکل-۲ و جدول-۱). چین های کلاس ۲ تحت عنوان چین های مشابه^۴ نیز شناخته شده اند، زیرا شکل لایه های چین مشابه یکدیگر است. زیر کلاس 1B نیز به چین های موازی^۵ معروف هستند.

¹ Detachment

² Dip isogon

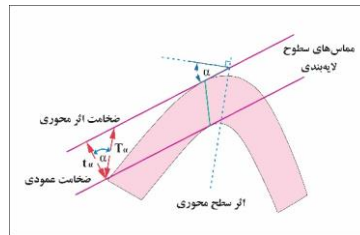
³ Axial trace thickness

⁴ Orthogonal thickness

⁵ Inclination

⁶ Similar folds

⁷ Parallel folds



شکل-۱. نمایش فراسنج های هندسی چین زاویه انحراف (α)، ضخامت اثر محوری (T_n)، ضخامت عمودی (t_n) (برگرفته از (1968) Ramsay)

۲.۱. پژوهش های قبلی

اغلب مطالعات انجام شده بر روی چین های جدایشی نقش شیب جدایش [20, 21]، سطح جدایش اضافی [22, 23]، و خصوصیات مکانیکی لایه ها [24, 25]، را مطالعه می کنند و یا به ارائه مدل های جنبش شناسی مکانیکی محدود می شوند [26]. این پژوهش قصد دارد توسط سه سری مدل اجزاء محدود سه بعدی نقش هندسه گسل جدایشی (سری A)، ضریب اصطکاک (سری B)، و زاویه اصطکاک داخلی (سری C) را بر روی هندسه و کلاس چین های جدایشی مورد بررسی قرار دهد.

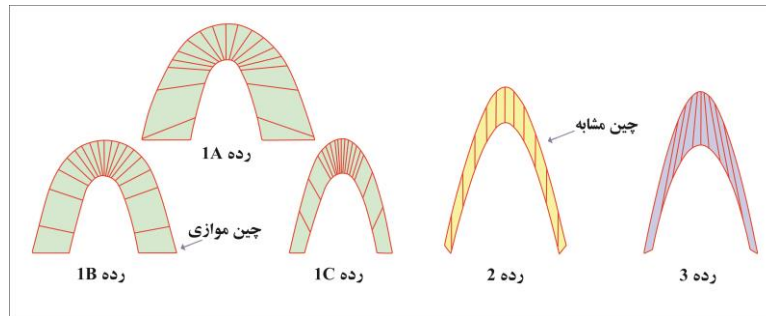
جدول ۱- تغییرات هندسه ایزوگون شیب، ضخامت عمودی، ضخامت اثر محوری از لولا به یال (برگرفته از [19]).

کلاس چین	۱A	۱B	۱C	۲	۳
ایزوگون شیب	همگرا	همگرا	همگرا	موازی	واگرا
ضخامت عمودی	افزایش	ثابت	کاهش	کاهش	کاهش
ضخامت اثر محوری	افزایش	افزایش	افزایش	ثابت	کاهش

۲. مدلسازی

این پژوهش سه سری مدل اجزاء محدود سه بعدی با رفتار کشسان-خمیرسان و در محیط نرم افزار آباکوس جهت بررسی نقش هندسه سطح جدایش، ضریب اصطکاک و زاویه اصطکاک داخلی بر هندسه و کلاس چین خوردگی جدایشی ارائه می کند. سری A نقش هندسه سطح جدایش را مورد بررسی قرار می دهد، و هندسه سطح جدایش در مدل های آن به ترتیب مستقیم، مورب و موجی شکل است (شکل-۳). در مدل هایی با سطح جدایش مستقیم (A_1) و موجی شکل (A_3) جابه جایی در جهت عمود بر سطح گسل اعمال می شود، ولی در مدلی با سطح جدایش مورب (A_2)، سطح جدایش زاویه ۷۰ درجه با جهت جابه جایی می سازد. ضخامت کل و طول همه مدل ها مشابه است، ولی به دلیل تغییرات هندسی گسل جدایشی در مدل های A_2 و A_3 عرض این مدل ها همان طور که در شکل ۳-ب نشان داده شده است، افزایش یافته است. بنابراین ابعاد و هندسه سطح جدایش در سری های B و C همانند مدل A_1 است (شکل-۳-ب). همه مدل های ارائه شده در این پژوهش شامل پنج لایه با تنوع سنگ شناسی یکسان هستند. ویژگی های سنگ شناسی مدل ها بر اساس گزارش های ارائه شده توسط شرکت نفت مناطق نفت خیز جنوب برای سازندهای زاگرس، تعیین شده است (جدول ۲-).

همانند پژوهش های قبلی [12, 13] برای محدوده رفتار کشسان مدل از قانون هوک، و برای محدوده رفتار خمیرسان مدل نیز از رابطه موهر-کولمب جهت ارتباط تنش و کرنش استفاده می شود. همچنین همانند پژوهش های پیشین [27] فشار روباره 30 Mpa برای شبیه سازی شرایط عمق تدفینی در حدود ۱/۵ کیلومتر بر سطح مدل اعمال می شود.



شکل ۲- کلاس بندی چین ها بر اساس تغییرات ایزوگون های شیب (برگرفته از Ramsay, 1967).

مدلسازی در همه مدل ها شامل سه گام است، که در گام اول نیروی گرانش به کل مدل و در گام دوم فشار روباره بر سطح مدل ها اعمال می شود، و در گام سوم نیز جابه جایی به سمت راست مدل برای شبیه سازی چین خوردگی اعمال می شود. قاعده مدل (لایه اول) در تمام گام های مدلسازی ثابت شده است (شکل ۳-الف)، و امکان حرکت در هیچ جهتی را ندارد ($U_x = U_y = U_z = 0$). سمت راست لایه های دوم تا پنجم در دو گام اول مدلسازی (شکل ۳-الف)، و سمت چپ این لایه ها در تمام گام ها اجازه حرکت و چرخش در جهت X را ندارند ($U_x = 0, U_{R1} = 0$). جلو و پشت مدل نیز در تمام گام های مدلسازی امکان حرکت و چرخش در جهت Z را ندارند ($U_z = 0, U_{R3} = 0$) (شکل ۳-الف).

در مدل های سری A و C به ترتیب مقادیر ضریب اصطکاک های ۰/۲۵ و ۰/۰۱ برای اندرکش سطوح لایه بندی و گسل تعیین شده است. مدل های سری B نقش ضریب اصطکاک در چین های جدایشی را مورد بررسی قرار می دهند. در مدل B₁ که نقش افزایش ضریب اصطکاک گسل جدایشی را مورد بررسی قرار می دهد، ضریب اصطکاک گسل از ۰/۰۱ به ۰/۱ افزایش یافته است، و در مدل B₂ که تاثیر کاهش ضریب اصطکاک لایه بندی را مورد بررسی قرار میدهد، ضریب اصطکاک لایه بندی از ۰/۲۵ به ۰/۱ کاهش یافته است، و در مدل B₃ که نقش افزایش ضریب اصطکاک لایه بندی را بررسی می کند، ضریب اصطکاک لایه بندی از ۰/۲۵ به ۰/۵ افزایش یافته است.

۳. نتایج

در اینجا سه سری مدل سه بعدی اجزاء محدود کشسان-خمیرسان جهت بررسی نقش هندسه سطح جدایش، ضریب اصطکاک و زاویه اصطکاک داخلی در هندسه و کلاس چین خوردگی های جدایشی ارائه می شود. نتایج مدل ها به شرح زیر است.

جدول ۱- ویژگی های مکانیکی مواد استفاده شده برای مدلسازی چین های مرتبط با گسل سه بعدی.

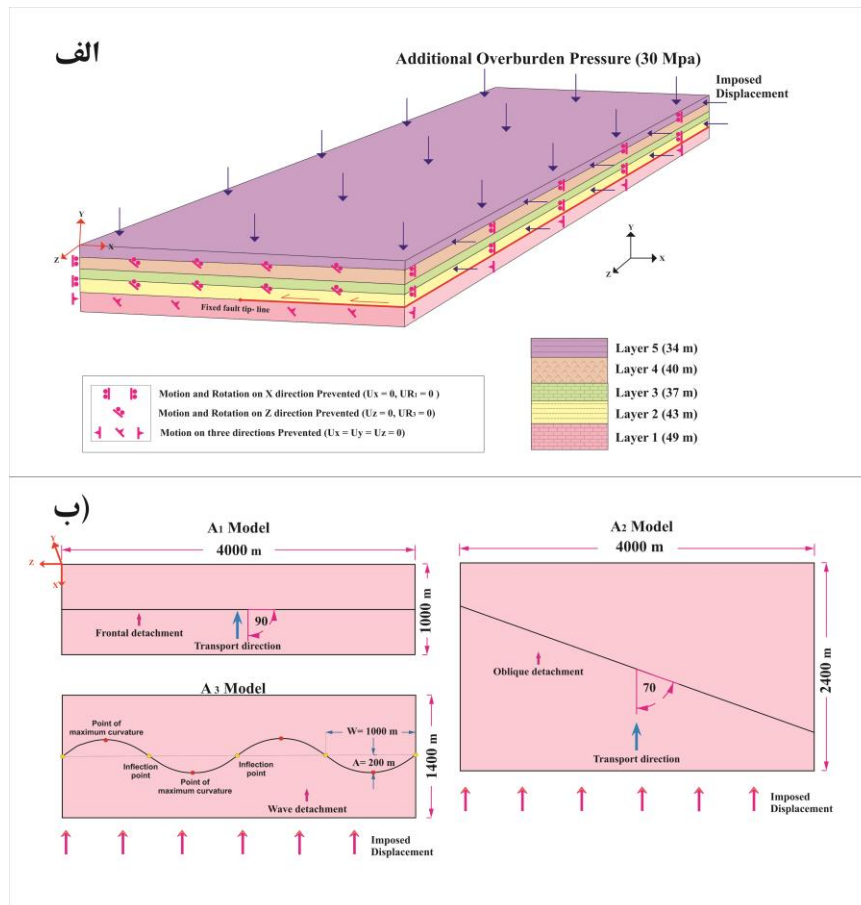
لایه	ρ	E	ν	ϕ	ψ	C ₀
۵	۲۷۰۰	۱۱،۵	۰/۳۵	۲۲/۵	۱۱/۲۵	۹/۵
۴	۳۰۰۰	۳۷،۵	۰/۳	۳۲/۵	۱۶/۲۵	۳۵
۳	۲۵۵۰	۴۵	۰/۳	۲۵	۱۲/۵	۳۰
۲	۲۴۰۰	۲۷	۰/۳۸	۲۶/۸	۱۳/۴	۱۳
۱	۲۶۴۰	۳۰	۰/۳۵	۳۱/۵	۱۵/۷۵	۱۵

۱.۳. ارزیابی نقش هندسه سطح جدایش (سری A)

مدل های A₁ تا A₃ جهت بررسی نقش هندسه سطح جدایش در فراسنج های هندسی و کلاس چین های جدایشی ارائه شده اند (شکل های ۴، ۵ و ۶ و جدول ۳). مدل A₁ یک چین جدایشی با سطح جدایشی مستقیم و عمود بر جابه جایی را شبیه سازی می کند (شکل ۴). کرنش خمیرسان در نوک سطح جدایش متمرکز شده، و به سمت سطوح محوری چین توسعه می یابد (شکل ۴-الف). هندسه این چین متقارن است، و هندسه آن در سرتاسر چین، یعنی در تمام برش های عرضی مشابه یکدیگر است (شکل ۴-ب). ایزوگون های شیب جهت

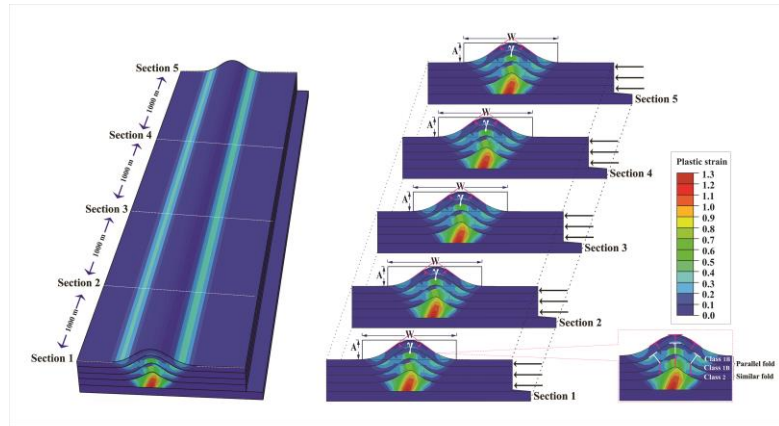


تعیین کلاس چین خوردگی بر اساس طبقه بندی Ramsay (1967) برای لایه های سوم تا پنجم این مدل ترسیم شده است. نتایج نشان می دهد که کلاس چین در لایه های پنجم و چهارم 1B است، که معادل چین های موازی است، و در لایه سوم به کلاس ۲ تغییر می کند که معادل چین های مشابه است (شکل ۴-).

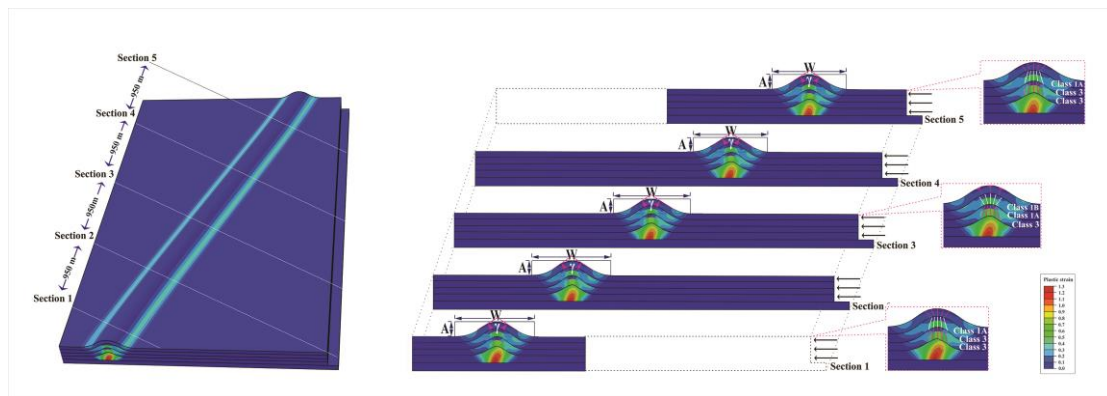


شکل ۳-۱-الف. شرایط مرزی و بارگذاری مدل ها. ب) هندسه سطح جدایش مدل های سری A.

مدل A₂ نقش سطح جدایش مورب را مورد بررسی قرار می دهد، و سطح جدایش آن با مرزهای مدل که معادل جهت انتقال زمین ساختی است، زاویه های ۷۰° می سازد (شکل ۵-). توزیع کرنش خمیرسان در سرتاسر این مدل همانند مدل A₁ است (شکل ۵-). ایزوگون های شیب جهت تعیین کلاس چین خوردگی برای برش های ۱، ۳ و ۵ مدل A₂ ترسیم شده است (شکل ۵-). نتایج نشان می دهد که در برش های ۱ و ۵ کلاس چین در لایه پنجم به 1A تغییر یافته، و در لایه های سوم و چهارم به کلاس ۳ تغییر یافته است (شکل ۵-). در برش مرکزی (۳) نیز کلاس چین در لایه پنجم همانند مدل مرجع است، در حالی که در لایه چهارم به 1A و در لایه سوم به ۳ تغییر یافته است (شکل ۶-۷). بررسی تغییرات فراسنج های هندسی چین نیز نشان می دهد. دامنه و نیم-طول موج چین از برش ۱ به ۴ نسبت به مدل A₁ کاهش یافته در حالی که زاویه بین یالی افزایش ناچیزی نشان می دهد (شکل ۵- و جدول ۳-). در برش ۵ دامنه و نیم-طول موج دوباره افزایش یافته و زاویه بین یالی نسبت به مدل A₁ کاهش یافته است. علاوه بر این در نمای سه بعدی مدل یک چرخش کوچک در پایانه های مدل قابل شناسایی است، که می تواند ناشی از هندسه مورب سطح جدایش باشد (شکل ۵-).



شکل-۴. توزیع کرنش خمیرسان و هندسه نهایی مدل A₁



شکل-۵. توزیع کرنش خمیرسان و هندسه نهایی در نمای سه بعدی و برش های عرضی مدل A₂

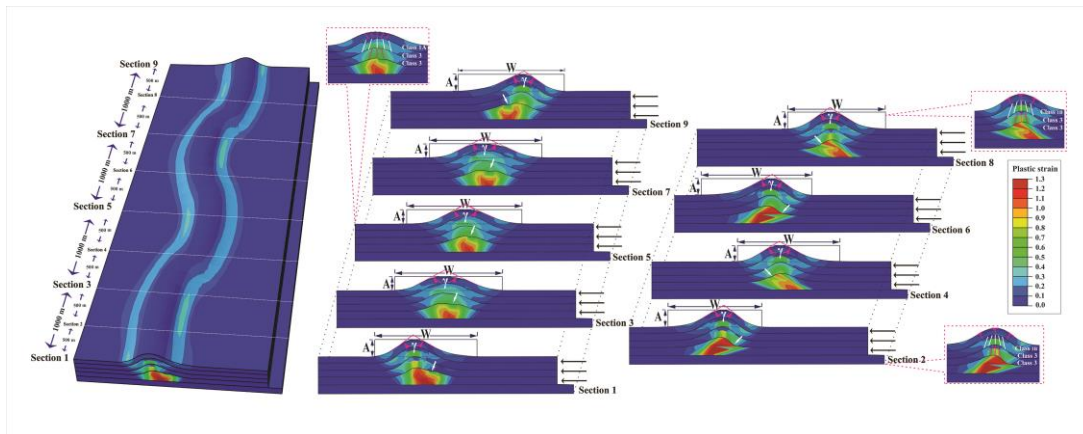
جدول-۳. فراسنج های هندسی مدل های A₁، A₂ و A₃

مدل	A ₁			A ₂			A ₃		
	W (m)	A (m)	γ (°)	W (m)	A (m)	γ (°)	W (m)	A (m)	γ (°)
برش ۱	۴۵۹	۹۵	۱۰۸	۴۴۵	۸۲	۱۱۷	۵۶۰	۹۳	۱۱۳
برش ۲	۴۵۹	۹۵	۱۰۸	۴۲۰	۷۸	۱۱۷	۵۱۳	۹۴	۱۱۲
برش ۳	۴۵۹	۹۵	۱۰۸	۴۱۴	۷۶	۱۱۸	۵۸۹	۷۶	۱۲۸
برش ۴	۴۵۹	۹۵	۱۰۸	۴۰۲	۷۶	۱۱۸	۵۶۱	۸۹	۱۲۰
برش ۵	۴۵۹	۹۵	۱۰۸	۴۴۱	۷۹	۱۱۶	۶۳۱	۷۷	۱۲۹
برش ۶	-	-	-	-	-	-	۶۰۵	۹۰	۱۱۷
برش ۷	-	-	-	-	-	-	۶۱۶	۷۶	۱۲۹
برش ۸	-	-	-	-	-	-	۵۳۶	۹۳	۱۱۴
برش ۹	-	-	-	-	-	-	۵۸۱	۹۲	۱۱۹

اختصارات: W- نیم- طول موج، A- دامنه، γ ؛ زاویه بین یالی.



مدل A_3 جهت بررسی سطح جدایش موجی شکل ارائه شده است (شکل-۶). به دلیل تغییرات هندسی شدید در سرتاسر این مدل، تعداد برش های عرضی در این مدل از ۴ به ۹ افزایش یافته است. در این مدل توزیع کرنش خمیرسان همانند سایر مدل ها در نوک گسل جدایشی متمرکز شده و به سمت سطوح محوری توسعه می یابد (شکل-۶). در برش های فرد (برش های ۱، ۳، ۵، ۷، ۹) یک فرورفتگی در سطح لایه دوم مشاهده می شود، و در برش های ۲ و ۶ که از مرکز بخش های کاو سطح جدایش عبور می کنند، توزیع کرنش خمیرسان توسعه یک راندگ به سوی یال پشتی چین را نشان می دهد (شکل-۶). برعکس آن در برش های ۴ و ۸ که از مرکز بخش های کوژ سطح جدایش عبور می کنند، توزیع کرنش خمیرسان توسعه یک راندگی به سوی یال جلویی چین را نشان می دهد (شکل-۶). ایزوگون های شیب برای برش های ۲، ۵ و ۸ ترسیم شده است. نتایج نشان می دهد در برش های ۲ و ۸ کلاس چین خوردگی در لایه های سوم و چهارم به کلاس ۳ تغییر یافته است، ولی کلاس چین خوردگی لایه پنجم همان IB باقی مانده است (همانند مدل A_1) (شکل-۶). در حالی که در برش ۵ کلاس چین در لایه پنجم نیز به کلاس $1A$ تغییر یافته است، و در دو لایه سوم و چهارم همانند سایر بخش های چین، به کلاس ۳ تغییر نموده است (شکل-۶). از برش های فرد که از نقاط عطف سطح جدایش عبور می کند، به سوی برش های زوج که از مرکز بخش های کوژ و کاو سطح جدایش عبور می کند، میزان دامنه افزایش می یابد، در حالی که نیم- طول موج و زاویه بین یالی کاهش نشان می دهد (شکل-۶ و جدول-۳).



شکل ۶- توزیع کرنش خمیرسان و هندسه نهایی در نمای سه بعدی و برش های عرضی مدل A_3 چین جدایشی.

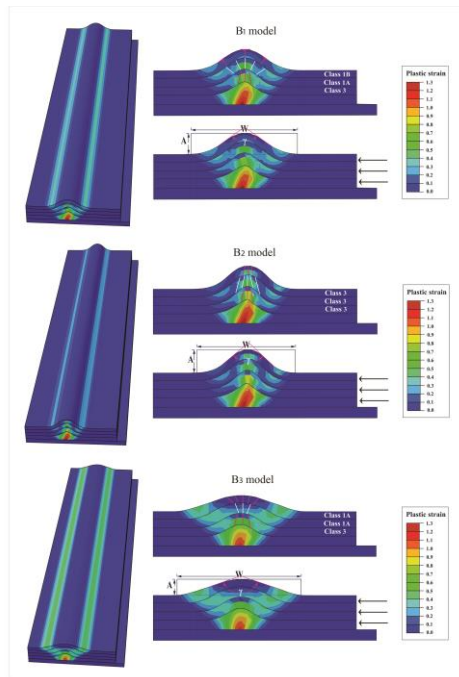
۱.۳. ارزیابی نقش ضریب اصطکاک (سری B)

مدل های سری B جهت بررسی نقش ضریب اصطکاک ارائه شده اند (شکل-۷). در مدل B_1 جهت بررسی نقش ضریب اصطکاک سطح جدایش ضریب اصطکاک گسل از ۰/۰۱ به ۰/۱ افزایش یافته است (شکل-۷ الف). در مدل های B_2 و B_3 که تاثیر کاهش و افزایش ضریب اصطکاک لایه بندی را مورد بررسی قرار می دهند، به ترتیب ضریب اصطکاک لایه بندی از ۰/۲۵ به ۰/۱ و ۰/۵ تغییر یافته است (شکل-۷ ب و ج). در هر سه مدل توزیع کرنش خمیرسان و هندسه چین در سرتاسر مدل یکسان است و توزیع کرنش خمیرسان همانند مدل مرجع A_1 است (شکل های ۴ و ۷). در مدل B_1 کلاس چین در لایه پنجم همانند مدل مرجع است، ولی در لایه چهارم به $1A$ و در لایه سوم به ۳ تغییر می کند (شکل-۷). دامنه چین در این مدل نسبت به مدل مرجع کاهش یافته است، در حالی که نیم- طول موج و زاویه بین یالی در آن افزایش یافته است (شکل-۷ و جدول-۴). در مدل B_2 نیم- طول موج و زاویه بین یالی کاهش یافته ولی دامنه چین افزایش قابل توجهی نشان می دهد (چین تنگتر شده) (شکل-۷ و جدول-۴). برعکس در مدل B_3 نیم- طول موج و زاویه بین یالی به طور قابل توجهی افزایش یافته، در حالی که دامنه چین کاهش قابل توجهی نشان می دهد (چین پهنتر شده) (شکل-۷ و جدول-۴). در مدل B_2 کلاس چین خوردگی در تمام لایه ها به ۳ تغییر یافته است، در حالی که در مدل B_3 کلاس لایه چهارم و پنجم به $1A$ و کلاس لایه سوم به سه تغییر یافته است (شکل-۷).



۱.۳. ارزیابی نقش زاویه اصطکاک داخلی (سری C)

مدل‌های سری C جهت بررسی نقش زاویه اصطکاک داخلی ارائه شده اند (شکل-۸). در مدل‌های C₁ و C₂ زاویه اصطکاک داخلی به ترتیب ۲۰ درصد افزایش و کاهش یافته است (شکل-۸). همانند ضریب اصطکاک تغییرات فراسنج‌های هندسی در سرتاسر مدل‌های سری C ثابت است. در مدل C₁ زاویه بین یالی و نیم طول موج کاهش یافته است در حالی که دامنه چین افزایش یافته است (شکل-۸). کلاس چین در لایه‌ها پنجم همانند مدل مرجع (A₁) است، ولی در لایه‌های سوم و چهارم کلاس چین به ۳ تغییر یافته است (شکل-۸). در مدل C₁ کرنش خمیرسان در هسته چین افزایش یافته است، برعکس در مدل C₂ میزان کرنش خمیرسان در سطوح محوری چین افزایش یافته است (شکل-۸)، و زاویه بین یالی و نیم طول موج چین نیز افزایش یافته، در حالی که دامنه چین کاهش یافته است. کلاس چین در لایه‌های پنجم و چهارم به کلاس 1A و در لایه سوم به کلاس ۳ تغییر یافته است (شکل-۸).

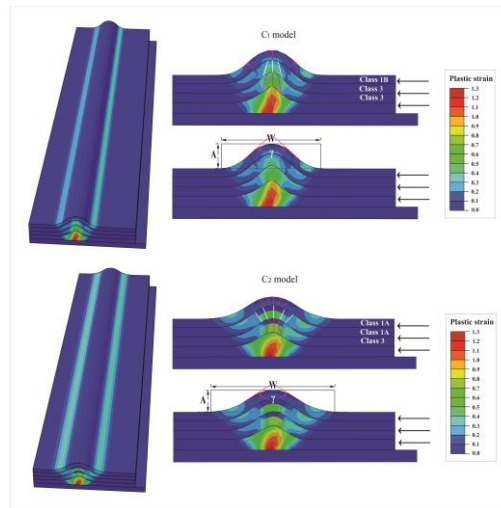


شکل ۷- توزیع کرنش خمیرسان و هندسه نهایی در نمای سه بعدی و برش‌های عرضی مدل‌های سری B.

جدول ۳- فراسنج‌های هندسی مدل‌های سری B و C.

مدل	W (m)	A (m)	γ (°)
مدل B ₁	۴۷۴	۹۴	۱۰۹
مدل B ₂	۴۳۹	۱۰۲	۹۷
مدل B ₃	۵۵۴	۷۳	۱۴۲
مدل C ₁	۴۰۶	۱۰۰	۹۷
مدل C ₂	۵۰۵	۸۸	۱۱۵
مدل D ₁	۳۶۱	۱۰۸	۸۹
مدل D ₂	۶۱۷	۶۳	۱۵۴

اختصارات: W؛ نیم-طول موج، A؛ دامنه، γ ؛ زاویه بین یالی.

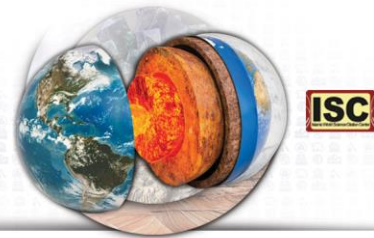


شکل ۸- توزیع کرنش خمیرسان و هندسه نهایی در نمای سه بعدی و برش های عرضی مدل های سری C.

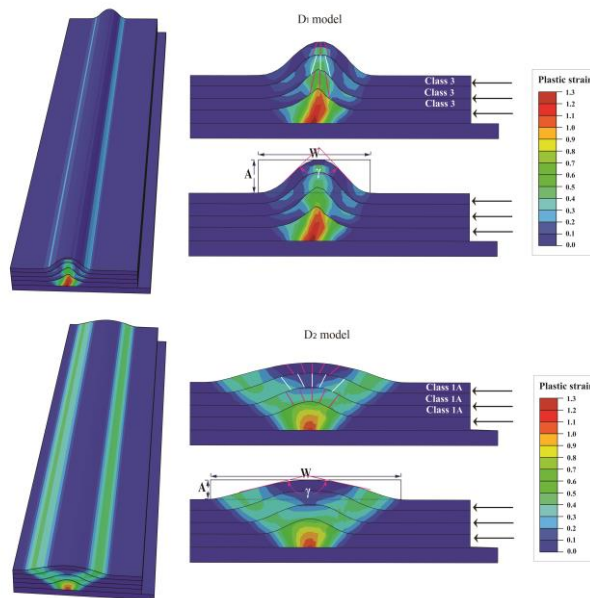
۴. بحث

در اینجا سه سری مدل سه بعدی اجزاء محدود جهت بررسی نقش هندسه گسل جدایشی، ضریب اصطکاک و زاویه اصطکاک بر روی معماری چین های جدایشی ارائه شده است. نتایج نشان می دهد که هر سه فراسنج مورد مطالعه در هندسه نهایی چین های جدایشی موثر هستند.

نتایج بررسی تاثیر ضریب اصطکاک نشان می دهد که با افزایش ضریب اصطکاک دامنه چین کاهش می یابد، در حالی که زاویه بین یالی و نیم طول موج چین افزایش می یابد، یعنی چین ملایمتری نسبت به مدل مرجع تولید می شود (شکل ۷- و جدول ۳-). این نتایج همانند نتایج تاثیر کاهش زاویه اصطکاک داخلی است (شکل ۸- و جدول ۳-)، و افزایش زاویه اصطکاک داخلی و کاهش ضریب اصطکاک نیز تاثیر مشابه ولی برعکس بر روی هندسه چین دارند (شکل های ۷- و ۸- و جدول ۳-). بر این اساس دو مدل ترکیبی دیگر ارائه شده است، و فراسنج هایی که تاثیر یکسان در هندسه چین دارند به صورت همزمان در مدل ها تغییر داده می شود. به عبارت دیگر در مدل D₂ به طور همزمان زاویه اصطکاک داخلی افزایش (۰/۲۰٪) و ضریب اصطکاک لایه بندی کاهش (از ۰/۲۵ به ۰/۱) می یابد (شکل ۹-). هر دو این فراسنج ها موجب افزایش دامنه، و کاهش نیم- طول موج و زاویه بین یالی چین می شوند. بنابراین انتظار می رود در مدل ترکیبی این تغییرات تشدید شود. برعکس در مدل D₂ زاویه اصطکاک داخلی کاهش (۰/۲۰٪) و ضریب اصطکاک لایه بندی افزایش (از ۰/۲۵ به ۰/۵) می یابد (شکل ۹-). این فراسنج ها نیز موجب کاهش دامنه، و افزایش نیم- طول موج و زاویه بین یالی چین می شوند، و انتظار می رود در مدل ترکیبی D₂ این تغییرات تشدید شود. نتایج بدست آمده نیز این انتظار را برآورده می سازد، و نشان می دهد که این تغییرات در مدل های ترکیبی نسبت به مدل های قبل تشدید شده است (شکل های ۷- و ۹- و جدول ۳-). علاوه بر این کلاس چین خوردگی در مدل های ترکیبی نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است (شکل ۹-) و نشان می دهد، که در مدل D₁ کلاس چین در همه لایه های مورد مطالعه (لایه های سوم، چهارم و پنجم) به کلاس ۳ و در D₂ کلاس تمام لایه های مورد مطالعه به کلاس 1A تغییر نموده است. همان گونه که پیشتر گفته شد، کلاس ۳ معرف چینی با نازک شدگی در یال و ضخیم شدگی در لولاست، و برعکس کلاس 1A معرف ضخیم شدگی در یال ها و نازک شدگی در لولای چین است. بنابراین در مدل ترکیبی D₁ با افزایش زاویه اصطکاک داخلی و کاهش ضریب اصطکاک لایه بندی یال های چین نسبت به مدل مرجع نازک شده، و برعکس در مدل ترکیبی D₂ با کاهش زاویه اصطکاک داخلی و افزایش ضریب اصطکاک لایه بندی یال های چین ضخیم شده است (شکل ۹-). این نتایج با پژوهش (Finch et al (2003) سازگار است، آنها تاثیر مقاومت پوشش رسوبی بر هندسه چین های گسترش گسلی را توسط مدلسازی اجزاء گسسته مورد بررسی قرار دادند، و دریافتند که پوشش رسوبی کم قوام تر پهنه دگرشکلی پهن تری تولید می کند، در حالی با افزایش قوام پوشش رسوبی وسعت پهنه دگرشکلی کمتر می شود، یا چین باریکتر می شود [28]. Hardy and Finch (2006) پژوهش مشابهی با استفاده از مدلسازی اجزاء گسسته بر روی



چین های گسترش گسلی انجام دادند، و نتایج مشابهی گرفتند. آنها دریافتند که یک پوشش رسوبی ضعیف همگن یک تک شیب ملایم تولید می‌کند، در حالی که یک پوشش رسوبی قوی تر تک شیب پرشیب‌تری تولید می‌کند [29].



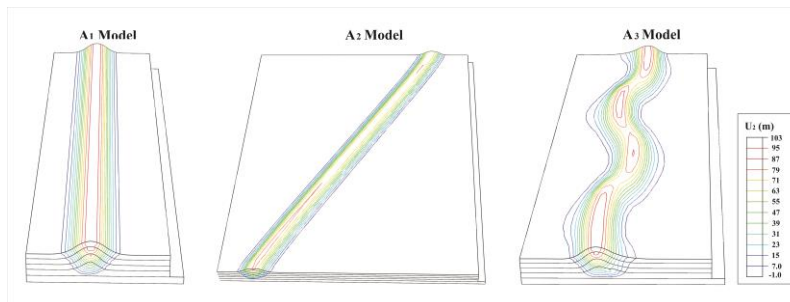
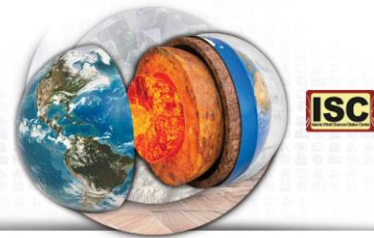
شکل ۹- توزیع کرنش خمیرسان و هندسه نهایی در نمای سه بعدی و برش‌های عرضی مدل‌های سری D.

ما خطوط تراز بالآمدگی قائم (U_2) را برای مدل‌های این پژوهش ترسیم کردیم (شکل ۱۰-۱)، و مشاهده کردیم رابطه مستقیم بین هندسه سطح جدایش و خطوط تراز بالآمدگی وجود دارد. چین‌های جدایشی بر سطح جدایش مستقیم چین‌های بدون پلانژ تولید می‌کند، چین‌های جدایشی با سطح جدایش مورب چین‌های پلانژدار تولید می‌کنند، و چین‌های جدایشی با سطح جدایش موجی شکل یک توالی از تاقدیس و ناودیس‌های دو پلانژه ایجاد می‌کنند، به طوری که قله تاقدیس بر روی نقاط بیشینه انحنای سطح جدایش، و خط القعر ناودیس‌ها بر نقاط عطف سطح جدایش ایجاد می‌شوند. برای آزمایشی نتایج ما یک مدل ترکیبی دیگر اجرا کردیم، که سطح جدایش آن هم موجی شکل و هم مورب بود. این مدل با نتایج قبلی سازگار بود، به عبارت دیگر بیشینه بالآمدگی در بالای نقاط بیشینه انحنای سطح جدایش، و کمینه بالآمدگی را در بالای نقاط عطف یا زینی سطح جدایش ایجاد شد. در واقع این خطوط همانند مدل‌های پیشین بازتابی از هندسه مورب و موجی شکل سطح جدایش زیرین است (شکل ۱۱-۱).

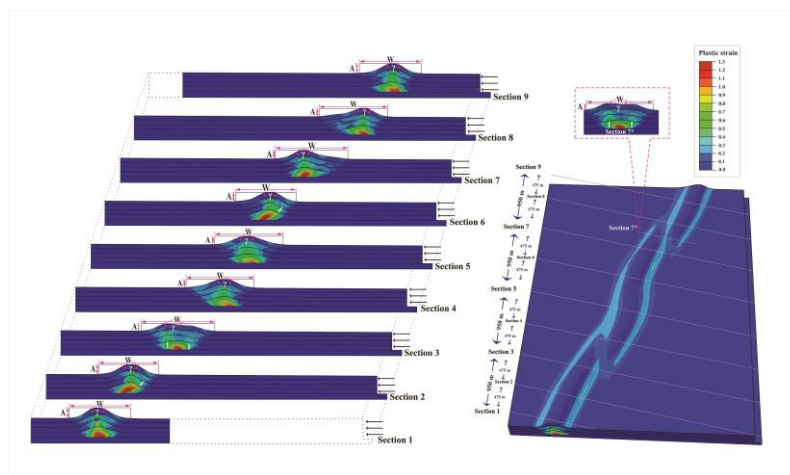
۵. نتیجه‌گیری

این پژوهش توسط سه سری مدل اجزاء محدود سه بعدی تاثیر فراسنج‌های هندسه جدایش، ضریب اصطکاک و زاویه اصطکاک داخلی را بر روی هندسه و کلاس چین‌های جدایشی مورد بررسی قرار داد، یافته‌های این پژوهش عبارتند:

- ۱- بالآمدگی و ریخت‌شناسی چین‌های جدایشی توسط هندسه گسل‌های جدایشی کنترل می‌شود؛ گسل‌های جدایشی مستقیم و مورب به ترتیب چین‌های جدایشی بدون پلانژ و پلانژدار ایجاد می‌کنند، همچنین یک گسل‌های جدایشی موجی شکل یک توالی از تاقدیس‌ها و ناودیس‌های دو پلانژه تولید می‌کند، به طوری که قله تاقدیس‌ها بر روی نقاط بیشینه انحنای سطح جدایش، و خط القعر ناودیس‌ها بر روی نقاط عطف سطح جدایش توسعه می‌یابند.
- ۲- افزایش زاویه اصطکاک داخلی و کاهش ضریب اصطکاک موجب افزایش ضخامت لولا و کاهش ضخامت یال‌های چین می‌شوند، به عبارت دیگر چین‌های کلاس ۳ را حاکم می‌دهند. برعکس آن با کاهش زاویه اصطکاک داخلی و افزایش ضریب اصطکاک چین‌های کلاس 1A که لولاهای نازک و یال‌های ضخیم دارند غالب می‌شوند.



شکل - ۱۰. خطوط تراز بالاآمدگی (U_2) مدل های سری A.



شکل - ۱۱. مدل ترکیبی D_3 با سطح جدایش مورب و موجی شکل.

منابع

- [1] Rich, J. L. 1934. Mechanics of low-angled overthrust faulting as illustrated by Cumberland thrust block Virginia, Kentucky and Tennessee. Bull. Am. Ass. Petrol. Geol. 18, 1584-1596
- [2] Rettger, R.E., 1935. Experiments on soft-rock deformation. AAPG Bull. 19, 271-292.
- [3] Suppe, J., 1983. Geometry and kinematics of fault-bend folding. Am. J. Sci. 283, 684-721.
- [4] Suppe, J., Medwedeff, D.A., 1990. Geometry and kinematics of fault-propagation folding. Eclogae Geol. Helv. 83, 409-454.
- [5] Mitra, S., 2003. A unified kinematic model for the evolution of detachment folds. Journal of Structural Geology 25, 1659-1673
- [6] Mitra, S., 1993. Geometry and kinematic evolution of inversion structures. AAPG Bull. 77, 1159-1191.
- [7] Ford, M., Williams, E.A., Artoni, A., Vergés, J., Hardy, S., 1997. Progressive evolution of a fault-related fold pair from growth strata geometries, Sant Llorenç de Morunys, SE Pyrenees. J. Struct. Geol. 19, 413-441.
- [8] Mitra, S., 1990. Fault-propagation folds: geometry, kinematic evolution, and hydrocarbon traps. AAPG Bull. 74, 921-945.
- [9] McClay, K.R., 1995. The geometries and kinematics of inverted fault systems: a review of analogue model studies. In: Buchanan, J.G., Buchanan, P.G. (Eds.), Basin Inversion Geol. Soc. Spec. Publ. 88, 97-118 (London). doi:10.1144/GSL.SP.1995.088.01.07
- [10] Storti, F., Poblet, J., 1997. Growth stratal architectures associated to decollement folds and fault-propagation folds. Inferences on fold kinematics. Tectonophysics. 282, 353-373.
- [11] Allmendinger, R.W., 1998. Inverse and forward numerical modeling of trishear fault propagation folds. Tectonics. 17, 640-656.



- [12] Khalifeh-Soltani, A., Alavi, A., Ghassemi, M. R., and Ganjiani, M. (2021a). Influence of mechanical parameters and overburden pressure on the mechanical evolution of fault propagation folds: insights from 2D finite-element elastic-plastic models applied to the Ayegan anticline, central Alborz. *Geopersia* 11 (1), 101–114. doi:10.22059/GEOPE.2020.297014.648530
- [13] Khalifeh-Soltani, A., Alavi, A., Ghassemi, M. R., and Ganjiani, M. (2021b). Geomechanical modelling of fault-propagation folds: estimating the influence of the internal friction angle and friction coefficient. *Tectonophysics* 815, 228992. doi:10.1016/j.tecto.2021.228992
- [14] Poblet, J., Hardy, S., 1995. Reverse modelling of detachment folds: application to the Pica del Aguila anticline in the South Central Pyrenees (Spain). *Journal of Structural Geology*. 17, 1707-1724.
- [15] Poblet, J., McClay, K., Storti, F., Muñoz, J.A., 1997. Geometries of syntectonic sediments associated with single-layer detachment folds. *Journal of Structural Geology*. 19, 369-381.
- [16] Poblet, J., McClay, K., 1996. Geometry and kinematics of single-layer detachment folds. *AAPG Bull.* 80, 1085–1109.
- [17] Homza, T.X., Wallace, W.K., 1995. Geometric and kinematic models for detachment folds with fixed and variable detachment depths. *J. Struct. Geol.* 17, 575–588.
- [18] Stewart, S.A., 1996. Influence of detachment layer thickness on style of thin-skinned shortening. *Journal of Structural Geology* 18, 1271-1274.
- [19] Ramsay, J. G. (1967). *Folding and fracturing of rocks*. New York: McGraw-Hill, 568.
- [20] Zhou, Z., Mei, L., Liu, J., Zheng, J., Chen, L. and Hao, S., 2018. Continentward-dipping detachment fault system and asymmetric rift structure of the Baiyun Sag, northern South China Sea. *Tectonophysics*, 726, 121-136.
- [21] Gan, F., He, B. and Qin, Z., 2020. Hydrological response and soil detachment rate from dip/anti-dip slopes as a function of rock strata dip in karst valley revealed by rainfall simulations. *Journal of Hydrology*, 581, 124416. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124416.
- [22] Hansberry, R. L., King, R., Collins, A.S. and Morley, C.K., 2014. Complex structure of an upper-level shale detachment zone: Khao Khwang fold and thrust belt, Central Thailand. *Journal of Structural Geology* 67, 140-153.
- [23] Morley, C.K. and Jitmahantakul, S., 2020. Secondary detachments within carbonates of the Saraburi Group, Triassic Khao Khwang fold and Thrust Belt, Thailand. *Journal of Structural Geology*, 140, 104162. doi.org/10.1016/j.jsg.2020.104162.
- [24] Cui, J., Jia, D., Yin, H., Chen, Z., Li, Y., Wang, M., Fan, X., Shen, L., Sun, C., Li, Z., Ma, D. and Zhang, Y., 2020. Corrigendum to “The influence of a weak upper ductile detachment on the Longmen Shan fold-and-thrust belt (eastern margin of the Tibetan Plateau): Insights from sandbox experiments” [*J.Asian Earth Sci.* 198 (2020) 104220]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 200, 104507.
- [25] Vasquez-Serrano, A., Nieto-Samaniego, A.F., Rangel-Granados, E., Alaniz-Alvarez, S. and Olmos-Mmoya, M.D.J.P., 2021. Architecture of an upper-level weak detachment zone: Mexican Fold and Thrust Belt, central Mexico. *Journal of Structural Geology*, 148, 104361.
- [26] Lutz, B.M., Ketcham, R.A., Axen, G.J., Beyene, M.A., 189 Wells, M.L., Wijk, J.W.V., Stockli, D.F. and Ross, J.I., 2021. Thermo-kinematic modeling of detachment-dominated extension, northeastern Death Valley area, USA: Implications for mid-crustal thermal-rheological evolution. *Tectonophysics*, 808, 228755.
- [27] Khalifeh-Soltani, A., Ghassemi, M. R., Alavi, A., and Ganjiani, M. (2023). Parameters controlling the geometry of detachment and fault-bend folds: insights from 3D finiteelement models applied to the Ahwaz anticline in the Dezful Embayment, SW Iran. *Petroleum Geol.* 46 (2), 157–190.
- [28] Finch, E., Hardy, S., Gawthorpe, R., 2003. Discrete element modelling of contractional fault-propagation folding above rigid basement fault blocks. *Journal of Structural Geology*. 25, 515–528.
- [29] Hardy, S., Finch, E., 2006. Discrete element modelling of the influence of cover strength on basement-involved fault-propagation folding. *Tectonophysics*. 415, 225–238.