



فصلنامه زمین ساخت

تابستان ۱۳۹۸، سال سوم، شماره ۱۰

مدلسازی ژئومکانیکی چین انتشار گسلی: نگرش‌هایی از نقش چگالی بر هندسه و فرگشت تنش و کرنش، تاقدیس آیگان، البرز مرکزی

انیس السادات خلیفه سلطانی^۱، سید احمد علوی^{۲*}، محمد رضا قاسمی^۳، سید مهدی گنجیانی^۴

۱. دانشجوی دکتری زمین ساخت، گروه حوزه‌های رسوبی و نفت، دانشگاه علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۲.* استاد گروه حوزه‌های رسوبی و نفت، دانشگاه علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۳. استاد، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران.

۴. استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۷



چکیده

چین‌های مرتبط با گسل در بیشتر کمربندهای کوهستانی، منشورهای برافزایشی، کمربندهای چین و رانده و بخش‌های درون صفحه‌ای گسترش می‌یابند. گستردگی این ساختارها و اهمیت آنها در اکتشاف و استخراج منابع هیدرو کربنی و لرزه‌شناسی سبب شده است تا در ورای زمینه‌های زمین‌شناسی ساختاری نیز مورد توجه قرار گیرد. مدلسازی عددی چین‌های مرتبط با گسل با استفاده از روش اجزاء محدود می‌تواند اطلاعات ارزشمندی از تاریخچه فرگشت تنش و کرنش ارائه دهد. در همین راستا، این پژوهش با استفاده از روش اجزاء محدود، فرگشت تنش و کرنش چین انتشار گسلی آیگان را مورد بررسی قرار می‌دهد که در طی وارونگی حوضه البرز مرکزی در الیگوسن - میوسن و با فعالیت رانده‌های میانه‌بر گسل مشا ایجاد شده است. در ادامه، فرگشت تنش و کرنش در چین انتشار گسلی آیگان به کمک نمودارهای تنش تفریقی - کرنش، کرنش-زمان، تنش-زمان و پیامدهای تغییر چگالی بر هندسه کلی چین بررسی و واکاوی می‌گردد. نتایج مدلسازی نشان می‌دهد که افزایش و کاهش چگالی نقش‌چندانی در فرگشت تنش و کرنش ندارد، به گونه‌ای که تنها تغییرات اندکی در پسیال چین نمایان شده است. نتایج مدل نشان می‌دهد، افزایش و کاهش چگالی به ترتیب سبب افزایش و کاهش نیم طول موج چین می‌شود که بیانگر رابطه مستقیم بین چگالی و نیم طول موج در چین انتشار گسلی است.

کلید واژه‌ها: فرگشت تنش و کرنش، چگالی، چین انتشار گسلی، تاقدیس آیگان، البرز مرکزی.

Shaw, 2015). نخستین مدل جنبش شناختی برای چین‌های مرتبط با گسل بر پایه مهاجرت نوار شکنجی (kink-band migration) بوده است (Suppe, 1983)، و مدل‌های جنبش شناختی (Mitra, 1990; Suppe and Medwedeff, 1990; Erslev, 1991; Epard and Groshong, 1995; Homza and Wallace, 1995; Poblet and McClay, 1996; Mitra and Mount, 1998) تجربی (and Mount, 1998) و عددی (Hardy and Ford, 1997; Bernand et al., 2007; Tanner et al., 2003; Allmendinger et al., 2004; Cardozo and Aanonsen, 2009; Cardozo et al., 2011). با استفاده از روش اجزاء گسسته (Hunghe and Show, 2015; Yang et al., 2014) و اجزاء محدود (Smart et al., 2009, 2010a, 2010b, 2012b; Albertz and Lingery, 2012; Albertz and Sans, 2012; Yang et al., 2017; Simpson, 2017)، به طور گسترده‌ای روی این چینه‌وردگی‌ها انجام گرفته است.

مدلسازی عددی با استفاده از روش‌هایی همچون اجزاء محدود^۱، اجزاء مرزی^۲ و اجزاء گسسته^۳ به شبیه‌سازی ساختارهای زمین شناسی در بازه گسترده‌ای از مقیاس‌ها می‌پردازد (Liu and Dixon, 1995; Erickson, 1995; Bar-nichon and Charlier, 1996; Strayer and Hudleston, 1997; Erickson et al., 2001; Smart et al., 2004, 2009, 2010a, 2010b, 2011; Schöpfer et al., 2006, 2007a, 2007b). زمانی که رفتار مدل خطی (مواد کشسان) است، روش اجزاء مرزی برای بررسی مسائل زمین شناختی مفید است، اگرچه در این روش می‌توان رفتار غیرخطی را نیز در شبکه راه حل وارد نمود، ولی اثربخشی نتایج محاسبات کاهش می‌یابد (Smart et al., 2012b). برخلاف روش‌های اجزاء محدود و اجزاء مرزی که بر اساس مکانیک پیوسته است، روش اجزاء گسسته بر اساس مکانیک محیط‌های ناپیوسته استوار است (Cundall, 2001; Cundall and Strack, 1979)، و از آنجا که این روش برای تعداد زیادی از ذرات الگوریتم محاسبه می‌کند در این روش نمی‌توان فرگشت فضایی و مکانی تنش و کرنش را به آسانی استخراج نمود. مدلسازی اجزاء محدود، هندسه پیچیده مدل‌های واقعی و ویژگی‌های مکانیکی آنها را برای

چین‌های مرتبط با گسل، سازوکار دگرشکلی مهمی هستند که در بیشتر کمربندهای کوهستانی و کوهپایه‌ها (Boyer, 1986; Vann et al., 1986; Erslev and Mayborn, 1997; Burbank et al., 1999; Tozer et al., 2002; McClay, Corredor et al., 2005)، کمربندهای چین و رانده (Morley et al., 2011) منشورهای برافزایشی (Corredor et al., 2011) (Morley et al., 2011) (al., 2005; Morley et al., 2011) (Bump, 2003)، و در طی وارونگی حوضه (Mitra, 1993) (Okamura et al., 2007) دیده می‌شوند. چین‌های مرتبط با گسل از دیدگاه لرزه‌ای و اقتصادی به دلیل آنکه بیشتر مخازن نفت و گاز هستند، مورد توجه زمین‌شناسان قرار گرفته‌اند (Kao, 2000; Chen et al., 2001; Johnson and Segall, 2004; Guzofski et al., 2007; Lin et al., 2007; Allmendinger and Shaw, 2000). از آنجایی که این نمونه از چین‌ها هم به گونه هندسی و هم زمانی به حرکت گسل وابسته‌اند، روی هم‌رفته سه نوع اصلی از چین‌های مرتبط با گسل را می‌توان شناسایی نمود (Suppe, 1983; Suppe and Medwedeff, 1990; McClay, 2011; Hughes et al., 2014; Brandes and Tanner, 2014; Hughes and Shaw, 2015; Nabavi and Alavi, 2019b): 1) چین‌های جدایشی؛ 2) چین‌های خمگسلی؛ و 3) چین‌های انتشارگسلی، که در بازه گسترده‌ای از مقیاس‌ها می‌توانند ایجاد شوند. شکل چین در چین‌های خمگسلی با هندسه گسل، در چین‌های انتشارگسلی با هندسه گسل و نسبت لغزش به انتشارگسل، و جابه‌جایی گسل و ضخامت لایه جدایشی در چین‌های جدایشی تعیین می‌گردد (Brandes and Tanner, 2014; Hughes et al., 2014). چین‌های انتشارگسلی یکی از رایج‌ترین و مهم‌ترین رده‌های چین‌های مرتبط با گسل هستند که با انتشار رو به بالای گسل در توالی رسوبی ایجاد می‌شود که پیرو کاهش لغزش به سمت رئوس گسل‌ها، لغزش با کماتش و چین‌خوردگی واحدها در فرادیواره و رئوس این گسل‌ها همساز و متمرکز شده که با پیشیالی پرشیب یا برگشته نمایان می‌گردد (Suppe and Medwedeff, 1990; Hughes et al., 2014; Brandes and Tanner, 2014; Hughes and

1. Finite elements
2. Boundary elements
3. Discrete elements



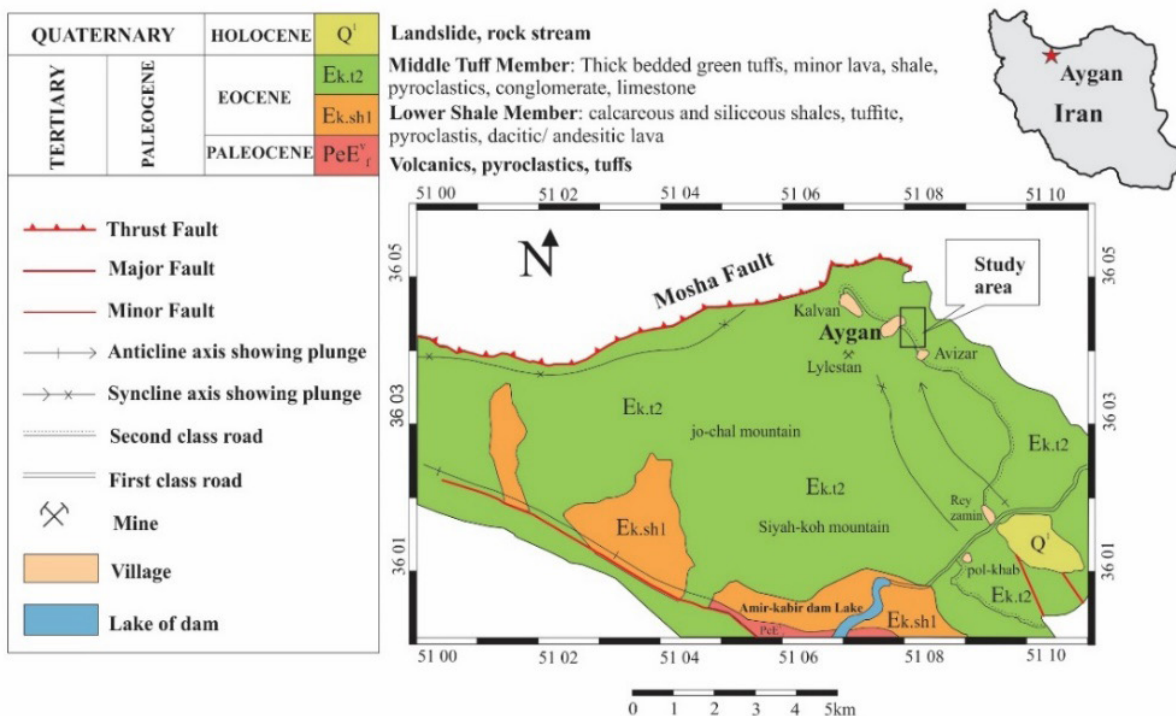
درصدی مقادیر چگالی ساخته می‌شوند. سرانجام با مقایسه نمودارها و هندسه این دو مدل جدید با نمودارها و هندسه مدل مرجع، نقش چگالی در فرگشت تنش و کرنش و هندسه چین خوردگی واکاوی می‌گردد.

۲- جایگاه زمین‌شناختی و زمین‌ساختی گستره مورد مطالعه

چین انتشارگسلی آیگان در البرز مرکزی واقع شده است (شکل-۱). رشته کوه البرز یک کمربند چین-رانده سنوزوئیک است که در جنوب دریای خزر و در شمال ایران واقع شده است. این رشته کوه بخشی از کمربند کوهزایی آلپ-همالیاست که برخاسته از همگرایی ائوسن-الیگوسن صفحه عربی اوراسیا با نرخ همگرایی 22 mm/yr می‌باشد (Alavi, 1996; Allen et al., 2003; Guest et al., 2006a). نرخ کوتاه‌شدگی شمالی-جنوبی در البرز 2 ± 5 mm/yr است (Vernant et al., 2004).

تولید واقعیت فیزیکی مدل با یکدیگر ترکیب می‌کند، و امکان ردیابی مکانی و زمانی فرگشت تنش و کرنش (در هر دو حالت کشسان و خمیری) را فراهم می‌سازد (Smart et al., 2012b). در سال‌های اخیر استفاده از نرم افزار آباکوس جهت مدلسازی عددی در میان زمین‌شناسان ساختاری رواج یافته است (Smart et al., 2012b; Zhang et al., 2012; Yang et al., 2017; Nabavi et al., 2017a, 2017b, 2018a, 2018b, 2019a; Cruz et al., 2019; Douma et al., 2019; Liu et al., 2020).

این پژوهش با استفاده از روش اجزاء محدود به مدلسازی عددی چین انتشارگسلی در تاقدیس آیگان می‌پردازد، مدلسازی در این پژوهش توسط ویژگی‌های هندسی، و مکانیکی مدل همچون چگالی، پیمایه یانگ، نسبت پواسون، زاویه اصطکاک داخلی، زاویه اتساع و چسبندگی صورت می‌گیرد. فرگشت تنش و کرنش با نمودارهای تنش و کرنش در سطح مدل مشخص می‌شود. در ادامه، برای بررسی نقش چگالی در هندسه و فرگشت تنش و کرنش چین، دو مدل جدید با افزایش و کاهش ۱۵



شکل - ۱. نقشه زمین‌شناسی-ساختاری مرزن آباد، موقعیت تاقدیس آیگان مشخص شده است (برگرفته از Vahdati Daneshmand, 2001)



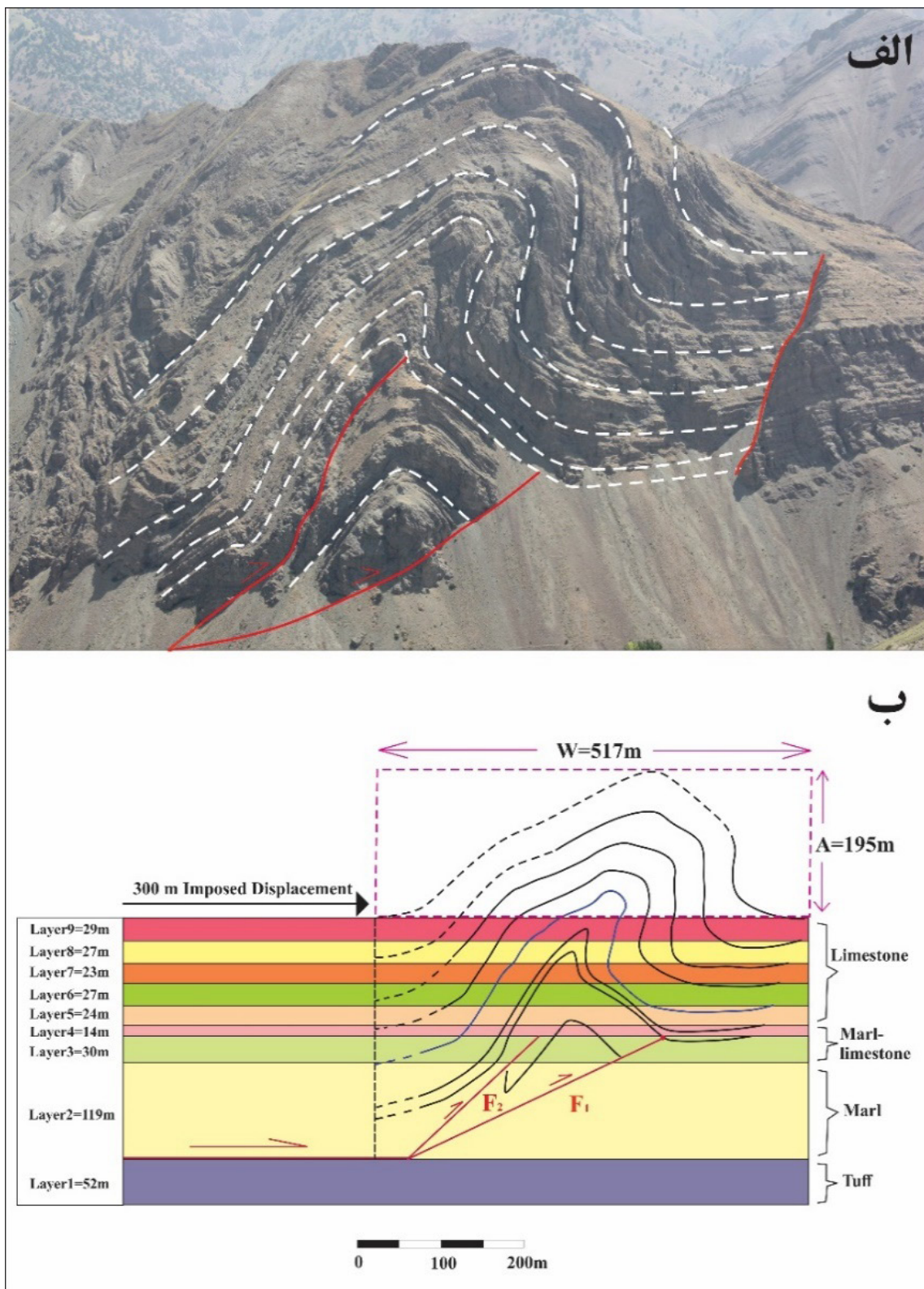
۳-مدلسازی

در این پژوهش چین انتشارگسلی آیگان با استفاده از روش اجزاء محدود و در محیط نرمافزار آباکوس (ABAQUS™) (CAE 2017; www.simulia.com) مدلسازی می‌شود. بر پایه پژوهش‌های میدانی انجام شده، طول نهایی تاقدیس آیگان نزدیک به ۵۱۷ متر است. در همین راستا، با استفاده از نرمافزار 2D Move، طول آغازین تاقدیس آیگان پیش از دگرریختی، نزدیک به ۸۱۷ متر برآورد شده است که از اینرو بیانگر کوتاه‌شدگی ۳۷ درصدی (۳۰۰ متر) آن است (شکل-۲). پیشال (forelimb) تاقدیس آیگان قائم و پس یال آن شیب متوسط دارد. این تاقدیس شامل ۹ لایه با چهار سنگ شناسی متفاوت و دو گسل F_1 و F_2 است (شکل-۲-ب و جدول-۱). گسل F_1 گسل اصلی و مسبب چین خوردگی است که جابه‌جایی در نوک آن به صفر کاهش یافته است (شیب ۲۵ درجه دارد)، ولی گسل F_2 در طی چین خوردگی امکان گسترش دارد (شیب ۴۵ درجه دارد). مدل ارائه شده در این پژوهش شامل سه گامه فرگشتی است، که در گامه اول نیروی گرانش به کل نمونه وارد می‌شود (بازه ۰-۱۰ مدلسازی)، بعد از به تعادل رسیدن مدل در گامه دوم فشار روباره برای شبیه سازی شرایط عمق تدفین به سطح فوقانی لایه نهم مدل اعمال می‌شود (بازه ۱۰-۲۰ مدلسازی) (شکل-۳)، بزرگای فشار روباره بر اساس ضخامت لایه‌های جوانتر (۲۰۴۵ متر) و چگالی متوسط (۲۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب) و از طریق رابطه: $P=\rho gh$ ، کمابیش ۵۰ مگاپاسکال محاسبه شده است. در گامه سوم گسلش و چین خوردگی حاصل از آن توسط جابه‌جایی سمت چپ مدل به میزان کوتاه‌شدگی به‌دست آمده (۳۰۰ متر) شبیه سازی می‌شود (شکل-۳).

در تمامی گامه‌ها قاعده و فرو دیواره گسل F_1 ثابت شده و از حرکت افقی و قائم آن جلوگیری شده است ($U_x = U_y = 0$)، همچنین سمت راست مدل در تمامی گامه‌ها، و سمت چپ مدل در گامه اول و دوم که نیروی گرانش و فشار روباره اعمال می‌شود، حرکت افقی ندارند ($U_x = 0$)، و در گامه سوم سمت چپ مدل به مقدار ۳۰۰ متر جابه‌جا می‌شود ($U_x = 300$) (شکل-۳). همچنین در تمامی گامه‌ها نوک گسل F_1 امکان جابه‌جایی افقی و قائم ندارد ($U_x = U_y = 0$)، ولی نوک گسل F_2 امکان گسترش دارد. ضریب اصطکاک (μ) ۰/۰۱ روی سطح گسل‌ها و ۰/۲۵ روی سطوح لایه‌بندی اعمال شده است. مش‌ها از نوع سه گوش و اندازه آنها در بازه ۱۴ تا ۵۰ متر متغیر است.

البرز از پرکامبرین پسیسن تا تریاس میانی بخشی از یک سکوی پایدار قاره‌ای (گندوانا) بوده است، و در طی این زمان رسوب‌گذاری به‌صورت پیوسته در آن صورت گرفته است (Stocklin, 1968). بعد از سیمین در اثر فاز کوه‌زایی سیمین آغازین تغییرات قابل توجهی در البرز صورت گرفته است. فاز لارامید باعث ناپیوستگی در قاعده رسوبات ترشیری البرز شده است، و در ائوسن با شروع برخورد صفحات عربی-اورسیا البرز دستخوش تغییرات جدیدی شده است (نظری و شهیدی، ۱۳۹۰).

البرز مرکزی یک ساختار رزگون (Al-Stocklin, 1974; Al-len et al., 2003; Nazari, 2006; Guest et al., 2006b; Shashi, 2008)، و بخش کوچکی از کمربند آلپ-همالیاست که تحت رژیم زمین‌ساختی حاکم در الیگوسن-میوسن دگرشکلی گسترده‌ای را به‌صورت چین‌ها و راندگی به ویژه در رسوبات سازند کرج و نیز راندگی سنگ‌های قدیمی‌تر در امتداد گسل‌های اصلی بر روی سازند کرج را تجربه کرده است (Alavi, 1996; Allen et al., 2003; Guest et al., 2006a, 2006b; Ehteshami-Moinabadi and Yassaghi, 2007; Yassaghi and Madanipour, 2008; Yas-saghi and Naeimi, 2011; Ballato et al., 2011). بنابراین همگرایی الیگوسن-میوسن باعث بسته شدن حوضه کرج، و ایجاد زمین‌ساخت واژگون (inversion tectonics) در البرز مرکزی شده است (Ehteshami-Moinabadi and Yassaghi, 2012; Ehteshami-Moinabadi and Yassaghi, 2006; Zanchi et al., 2013). در نتیجه این زمین‌ساخت واژگون، در فرادیواره و فرودیواره گسل‌های مشا و طالقان گسل‌های فرعی میانبر ایجاد شده است (Ehteshami-Moinabadi and Yassaghi, 2013)، که این گسل‌ها باعث شکل‌گیری چین‌های مرتبط با گسل در این ناحیه شده‌اند. در همین راستا، تاقدیس آیگان نمونه‌ای آشکار از یک چین انتشارگسلی در گستره مورد پژوهش است (شکل-۲-الف) که در اثر فعالیت میانبرهای فرودیواره گسل مشا شکل گرفته است (Ehteshami-Moinabadi and Yassaghi, 2007) (شکل-۱). چین خوردگی آیگان در بخش توف میانی سازند کرج واقع شده است (Vahda-ti Daneshmand, 2001) (شکل-۱). تاقدیس آیگان شامل چهار سنگ‌شناسی متفاوت است (شکل-۲-ب).

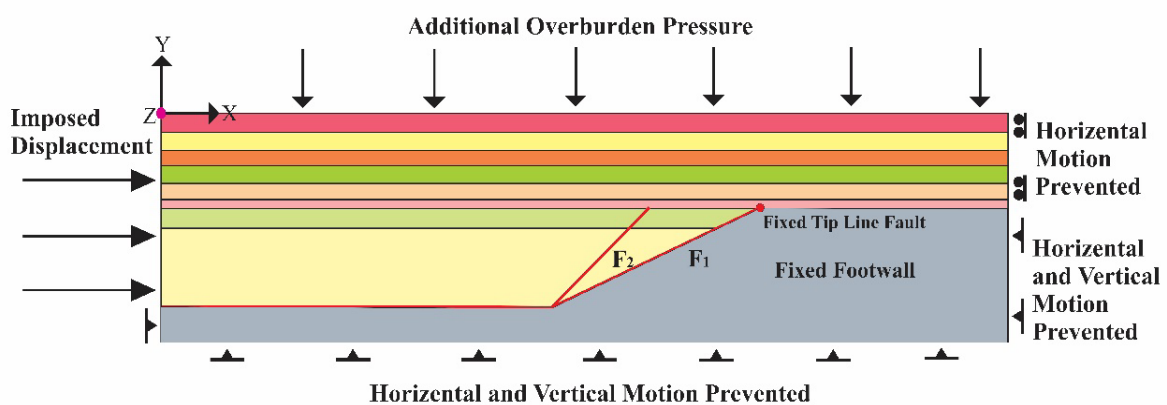


شکل ۲- الف) تصویر میدانی تاقدیس آیگان، لایه بندی (خط چین سفید)، سطوح گسلی (خطوط قرمز). ب) لایه‌های چین خورده (خطوط سیاه)، بازسازی بخش‌های فرسایش یافته (خط چین سیاه)، گسل‌های اصلی (خطوط قرمز)، لایه کلیدی برای برآورد اندازه کوتاه شدگی (خط آبی)، نمایش ضخامت و سنگ شناسی لایه‌ها، نیم طول موج (W) و دامنه چین (A) و اندازه کوتاه شدگی.

جدول ۱- ویژگی های مکانیکی لایه های چین (لایه یک (Yassaghi et al, 2005; Yassaghi and Salari-rad, 2005)، سایر لایه های برگرفته از اطلاعات شرکت نفت در خصوص واحدهایی با سنگ شناسی یکسان در زاگرس)

لایه ها	سنگ شناسی	ρ (kg/m ³)	(E Gpa	ν	ϕ (°)	ψ (°)	(C ₀ (Mpa
۹-۵	سنگ آهک	۳۰۰۰	۳۷	۰/۳	۳۲	۱۶	۳۵
۴-۳	مارن-آهکی	۲۹۰۰	۴۱	۰/۳	۳۲	۱۶	۳۰
۲	مارن	۲۷۰۰	۱۱/۵	۰/۳۵	۲۸	۱۴	۹/۵
۱	توف	۲۵۰۰	۱۱/۵	۰/۳۱	۴۷	۲۳/۵	۲۰/۷

ρ = density (kg/m³); E = Young's Modulus (GPa); ν = Poisson's Ratio; ϕ = Friction Angle (°); ψ = Dilatation Angle (°); C₀ = Cohesion (MPa).



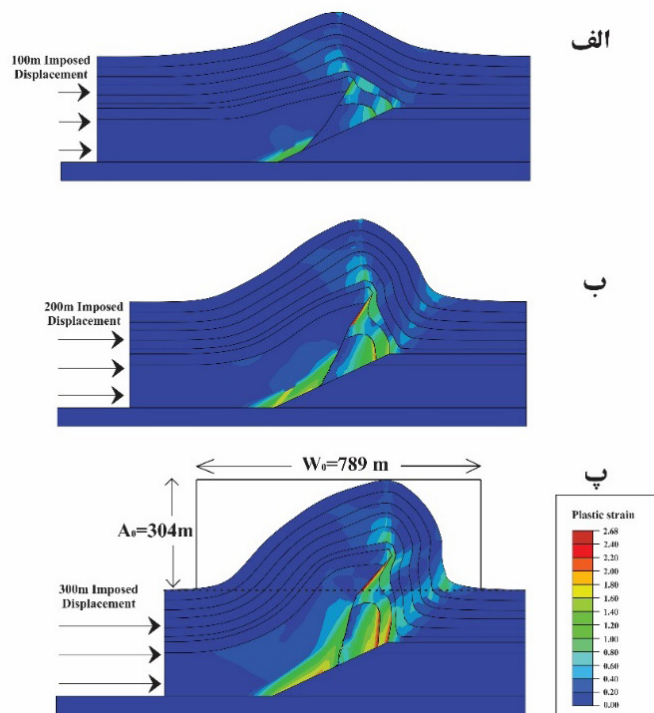
شکل ۳- شرایط مرزی و بارگذاری مدل

۴- نتایج مدل و بحث

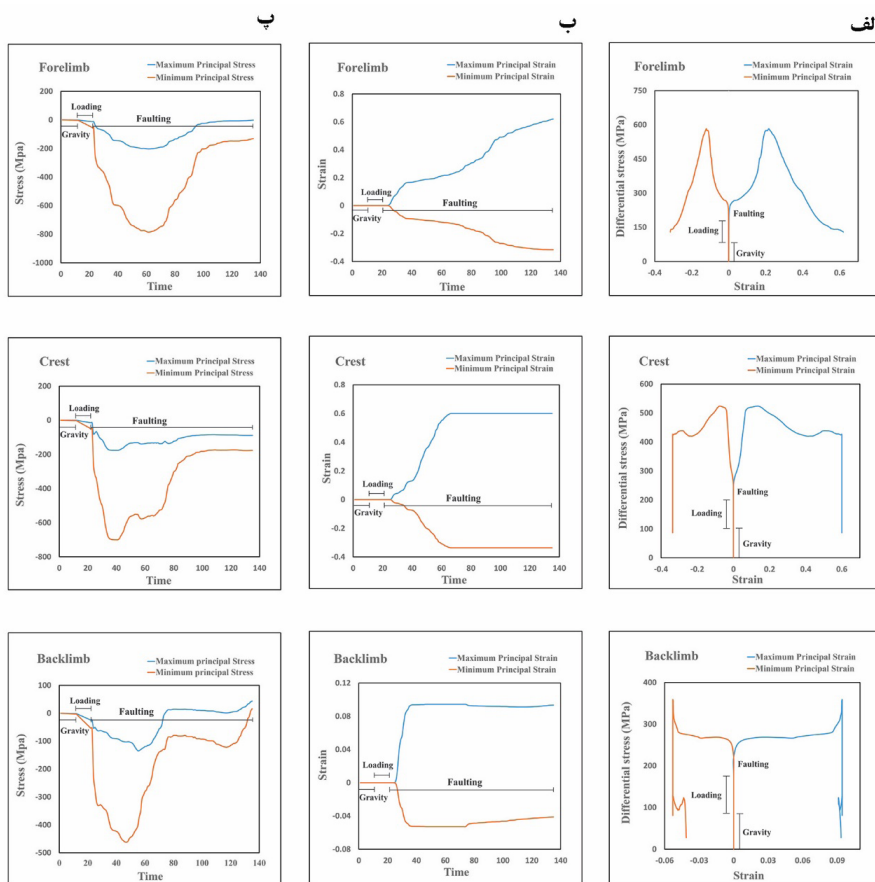
پیشیال و پسپال ترسیم شده (شکل ۵-)، نتایج نمودارها نشان می دهد بخش های گوناگون چین الگوی فرگشت تنش- کرنش مشابهی دارند، در نمودار تنش- کرنش (شکل ۵-الف)، کرنش های اصلی در گامه های اعمال نیروی گرانش و فشار روباره با وجود افزایش تنش تفریقی صفر هستند، ولی در مرحله گسلش بعد از چند ده متر جابه جایی شروع به افزایش می کنند، و در مراحل پایانی چین خوردگی با افزایش کرنش، تنش تفریقی به یکباره کاهش می یابد، بنابراین تنش تفریقی نسبت به کرنش های اصلی روندی افزایشی-کاهشی نمایش می دهد. نمودارهای کرنش- زمان نیز نتایج مشابهی نشان می دهند، در دو گامه اول کرنش های خمیرسان صفر هستند، و پس از چند ده متر جابه جایی و آغاز گسلش به یکباره افزایش می یابند، و تا انتهای دگرریختی با همین روند ادامه می یابند (شکل ۵-ب). نمودارهای تنش- زمان در مرحله اعمال نیروی گرانش تغییری در تنش های اصلی نشان نمی دهند، ولی در مرحله بار گذاری و گسلش افزایش قدر مطلق تنش های اصلی و پس از آن کاهش آنها را نشان می دهد، البته باید این مسأله را مد نظر قرار داد که تنش های فشارشی در مهندسی برخلاف زمین شناسی با علامت منفی نمایش داده می شود (شکل ۵-پ).

این پژوهش یک مدل کشسان-خمیری (elasto-plastic) دو بعدی با روش حل استاتیک برای تاقدیس آنگان ارائه می نماید. در این مدل تنش و کرنش در محدوده رفتار کشسان مدل توسط رابطه هوک (Hook's law) در حالت کرنش صفحه ای (plane strain)، و در محدوده رفتار تسلیم و خمیرسان بر پایه معیار موهر-کولومب (Mohr-Coulomb criterion) پیوند می یابند. فرگشت هندسی این مدل در جابه جایی های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ متر در شکل ۴- نمایش داده شده است، نیم طول موج و دامنه چین به ترتیب ۷۸۹ و ۳۰۴ متر هستند (شکل ۴-). به دلیل فرسایش لایه های فوقانی امکان اندازه گیری دقیق طول موج و دامنه چین وجود ندارد، و این امر مقایسه مدل با طبیعت را مشکل ساخته، با این حال هندسه کلی مدل با نمونه طبیعی مطابقت چشم گیری نشان می دهد، زاویه پیش یال مدل همانند مدل طبیعی قائم است، همچنین زاویه پس یال آن نیز برابر با مدل طبیعی است (۴۵ درجه). تنها طول موج و دامنه آن بزرگتر از مدل طبیعی است (شکل های ۲ و ۴).

نمودارهای تنش- کرنش برای لایه ششم مدل در سه ناحیه قله،



شکل - ۴. فرگشت کرنش خمیری در جابه‌جایی‌های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ متر (W_0 نیم طول موج چین، A_0 دامنه چین).



شکل - ۵. نمودارهای فرگشت تنش و کرنش. الف. نمودار تنش تفریقی-کرنش‌های اصلی در سه بخش پیشیال، قله و پس‌یال. ب. نمودار کرنش-زمان در سه بخش پیش‌یال، قله و پس‌یال. پ. نمودار تنش-زمان در سه بخش پیش‌یال، قله و پس‌یال. مراحل بارگذاری، اعمال نیروی گرانش و گسایش مشخص شده است.

تنش و کرنش در چین انتشارگسلی به تغییر این فراسنج وابسته نیست، و با عوامل دیگری کنترل می‌شود.

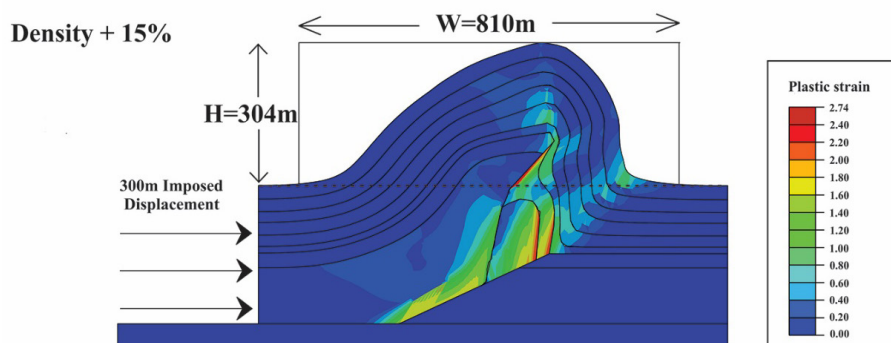
۵- نتیجه گیری

مدلسازی عددی دو بعدی تاقدیس آیکان به روش اجزاء محدود نتایج زیر را ارائه می‌کند: (۱) فرگشت تنش و کرنش در بخش‌های قله، پیش یال و پس یال چین مشابه است. (۲) تغییرات تنش تفریقی نسبت به کرنش‌های اصلی در طی چین خوردگی روندی افزایشی-کاهشی دارد. (۳) کرنش‌های اصلی در گامه‌های اعمال نیروی گرانش و بارگذاری صفر و بعد از چند ده متر جابه‌جایی مدل شروع به افزایش می‌کند. (۴) تنش‌های اصلی در تاریخچه چین خوردگی روندی افزایشی-کاهشی دارد. (۵) فرگشت تنش و کرنش در چین انتشارگسلی به چگالی وابسته نیست. (۶) افزایش چگالی سبب افزایش نیم طول موج و کاهش آن سبب کاهش نیم طول موج چین می‌شود، در حالی که تغییر آن در دامنه چین تأثیری ندارد.

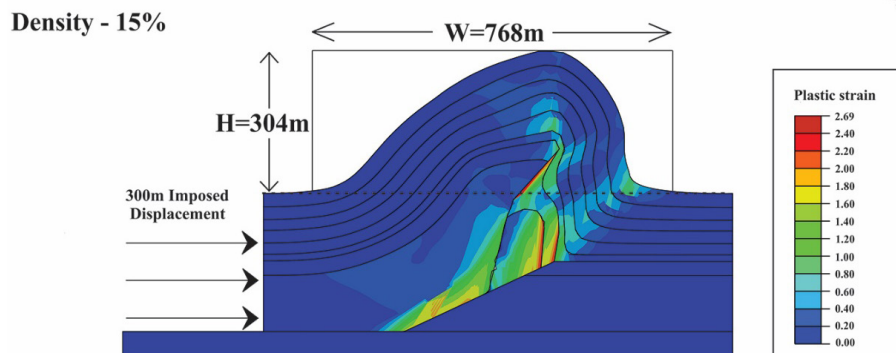
جهت بررسی نقش چگالی در فرگشت تنش و کرنش، و هندسه چین، در دو مدل جدید چگالی لایه‌های مختلف در کل مدل ۱۵ درصد افزایش و کاهش می‌یابد، نتایج این دو مدل نشان می‌دهد که افزایش و کاهش چگالی تأثیری در اندازه دامنه چین ندارد، ولی افزایش آن سبب افزایش نیم طول موج چین (۲۱ متر) و کاهش آن سبب کاهش آن (۲۱ متر) می‌شود (شکل ۶-۶). به عبارت دیگر افزایش چگالی سبب افزایش مساحت چین و کاهش آن سبب کاهش مساحت چین می‌شود، و این امر را این گونه می‌توان توجیه نمود، که سنگ‌هایی که چگالی بیشتری دارند نسبت به سنگ‌هایی با چگالی کمتر در زمان تراکم کمتر دچار کاهش حجم خواهند شد.

مقایسه نمودارهای تنش-کرنش دو مدل جدید با مدل مرجع نشان می‌دهد که افزایش و کاهش چگالی نقش چندانی در فرگشت تنش و کرنش ندارد، و تنها باعث کاهش ناگهانی کرنش‌های اصلی خمیرسان در پس یال در زمان ۸۰ مدلسازی می‌شود (شکل‌های ۷ و ۸). بنابراین الگوی فرگشت

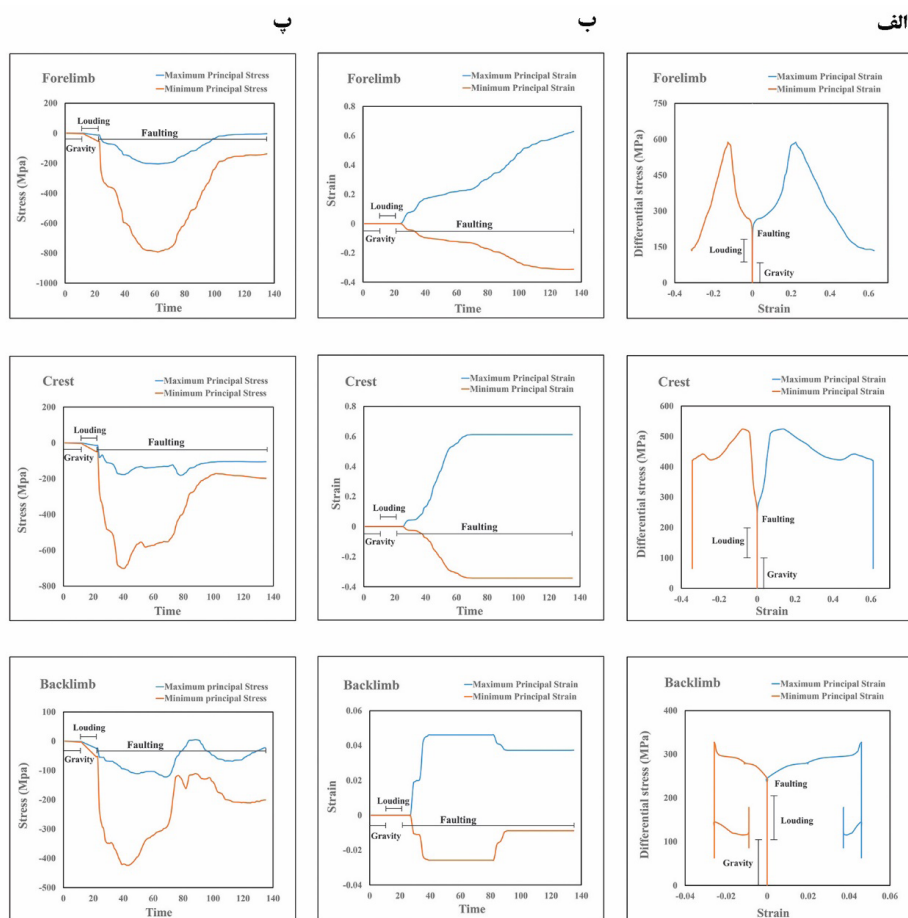
الف



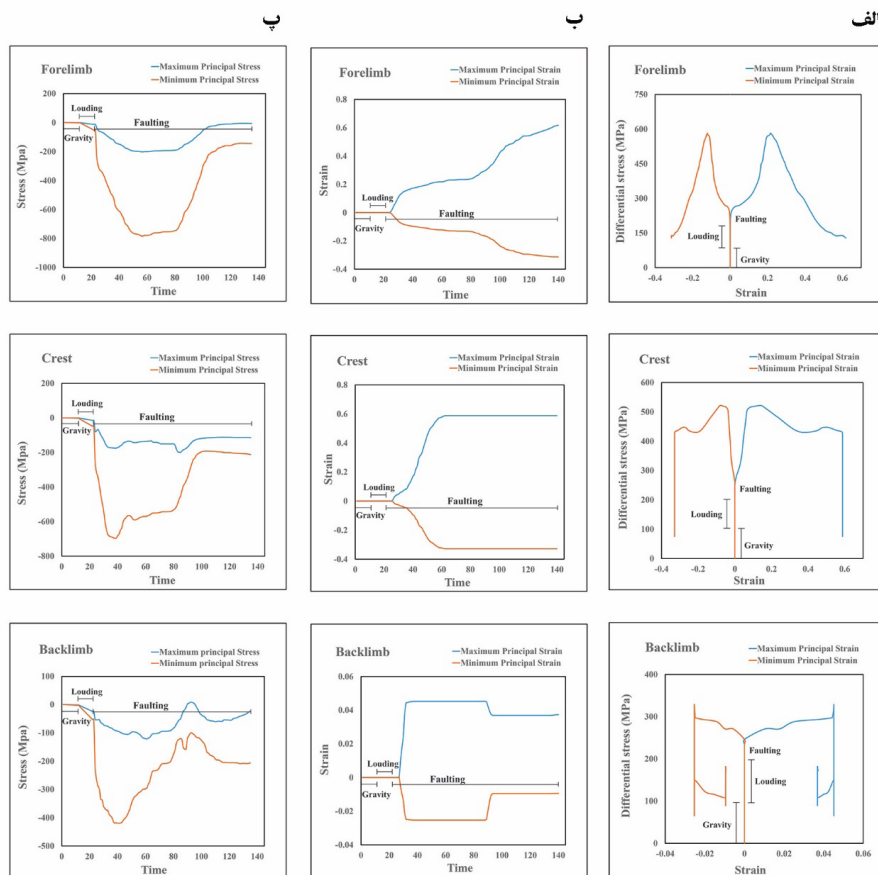
ب



شکل ۶- تغییرات هندسه چین الف. افزایش چگالی. ب. کاهش چگالی



شکل ۷- نمودارهای فرگشت تنش - کرنش در مدلی که چگالی آن ۱۵ درصد افزایش یافته است. الف. نمودار تنش تفریقی - کرنش‌های اصلی در سه بخش پیش یال، قله و پس یال. ب. نمودار کرنش - زمان در سه بخش پیش یال، قله و پس یال. پ. نمودار تنش - زمان در سه بخش پیش یال، قله و پس یال. مراحل بارگذاری، اعمال نیروی گرانش و گسلس مشخص شده است.



شکل ۸- نمودارهای فرگشت تنش- کرنش در مدلی که چگالی آن ۱۵ درصد کاهش یافته است. الف. نمودار تنش تفریقی- کرنش های اصلی در سه بخش پیش یال، قله و پس یال. ب. نمودار کرنش- زمان در سه بخش پیش یال، قله و پس یال. پ. نمودار تنش- زمان در سه بخش پیش یال، قله و پس یال. مراحل بارگذاری، اعمال نیروی گرانش و گسلش مشخص شده است.

۶- تشکر و قدردانی

نیرومند که به موجب راهنمایی هایشان سبب بهبود این مقاله گردیدند، و همچنین از جناب آقای مهندس علی حسین بالام کمال تشکر و قدردانی خود را ابراز می دارند.

نویسندگان این مقاله از جناب آقای دکتر سید توحید نبوی، جناب آقای دکتر محسن احتشامی معین آبادی، جناب آقای دکتر حسین طالبی، جناب آقای دکتر حامد



منابع

نظری، ح.، شهیدی، ع.، ۱۳۹۰. زمین ساخت البرز، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

Reference:

- Alavi, M., 1996. Tectonostratigraphic synthesis and structural style of the Alborz mountain system in northern Iran. *Journal of Geodynamics*, 21, 1–33
- Albertz, M., Lingrey, S., 2012. Critical state finite element models of contractional fault-related folding: part 1. Mechanical analysis. *Tectonophysics* 576–577, 133–149
- Albertz, M., Sanz, P.F., 2012. Critical state finite element models of contractional fault-related folding: part 2. Mechanical analysis. *Tectonophysics* 576–577, 150–170
- Allen, M.B., Ghassemi, M.R., Shahrabi, M. and Qorashi, M., 2003. Accommodation of Late Cenozoic oblique shortening in the Alborz Range, Northern Iran. *Journal of Structural Geology*, 25, 659–672
- Allmendinger, R.W., 1998. Inverse and forward numerical modeling of trishear fault propagation folds. *Tectonics* 17, 640–656
- Allmendinger, R.W., Shaw, J.H., 2000. Estimation of fault propagation distance from fold shape: implications for earthquake hazard assessment. *Geology* 28, 1099–1102
- Allmendinger, R.W., Zapata, T., Manceda, R., Dzelalija, F., 2004. Trishear kinematic modeling of structures, with examples from the Neuquén Basin, Argentina. In: McClay, K.R. (Ed.), *Thrust Tectonics and Hydrocarbon Systems AAPG Mem.* 82, 356–371
- Ballato, P., Uba, C.E., Landgraf, A., Strecker, M.R., Sudo, M., Stockli, D.F., Friedrich, A. and Tabatabaei, S.H., 2011. Arabia-Eurasia continental collision: Insights from late Tertiary foreland basin evolution in the Alborz mountains, northern Iran. *Geological Society of America Bulletin*, v. 123, p. 106–131
- Barnichon, J.D., Charlier, R., 1996. Finite element modelling of the competition between shear bands in the early stages of thrusting: strain localization analysis and constitutive law influence. In: Buchanan, P.G., Nieuwland, D.A. (Eds.), *Modern Developments in Structural Interpretation, Validation, and Modelling: Geological Society of London Special Publication*, 99, pp. 235–250
- Bernard, S., Avouac, J.-P., Dominguez, S., Simoes, M., 2007. Kinematics of fault-related folding derived from sandbox experiments. *J. Geophys. Res.* 112, B03S12
- Boyer, S.E., 1986. Styles of folding within thrust sheets: examples from the Appalachian and Rocky Mountains of the USA and Canada. *J. Struct. Geol.* 8, 325–339
- Brandes, C., Tanner, D.C., 2014. Fault-related folding: A review of kinematic models and their applications. *Earth-Science Reviews* 138, 352–370
- Bump, A.P., 2003. Reactivation, trishear modelling, and folded basement in Laramide uplifts: implications for the origins of intra-continental faults. *GSA Today* 2003, 4–10
- Burbank, D.W., McLean, J.K., Bullen, M., Abdrahmatov, K.Y., Miller, M.M., 1999. Partitioning of intermontane basins by thrust-related folding, Tien Shan, Kyrgyzstan. *Basin Res.* 11, 75–92
- Cardozo, N., 2005. Trishear modelling of fold bedding data along a topographic profile. *J. Struct. Geol.* 27, 495–502
- Cardozo, N., Aanonsen, S., 2009. Optimized trishear inverse modeling. *J. Struct. Geol.* 31, 546–560
- Cardozo, N., Jackson, C.A.-L., Whipp, P.S., 2011. Determining the uniqueness of best-fit trishear models. *J. Struct. Geol.* 33, 1063–1078
- Chen, W.-S., Huang, B.-S., Chen, Y.-G., Lee, Y.-H., Yang, C.-N., Lo, C.-H., Chang, H.-C., Sung, Q.-C., Huang, N.-W., Lin, C.-C., Sung, S.-H., Lee, K.-J., 2001. 1999 Chi-Chi earthquake: a case study on the role of thrust-ramp structures for generating earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 91, 986–994
- Corredor, F., Shaw, J.H., Bilotti, F., 2005. Structural styles in the deep-water fold and thrust belts of the Niger Delta. *AAPG Bull.* 89, 753–780
- Cruz, L., Vásquez Serrano, A., Fitz-Díaz, E., Hudleston, P., 2019. Quantifying frictional variations and erosion in the Mexican fold-thrust belt. *Journal of Structural Geology*, 120, 1–13
- Cundall, P.A., 2001. A discontinuous future for numerical modeling in geomechanics? *Geotechnical Engineering* 149, 41–47
- Cundall, P.A., Strack, O.D.L., 1979. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique* 29, 47–65
- Douma, L. A.N.R., Regelink, J. A., Bertotti, G., Boersma, Q. D., 2019. The mechanical contrast between layers controls fracture containment in layered rocks. *Journal of Structural Geology*, 127, 103856
- Ehteshami-Moinabadi, M. Yassaghi, A. 2013. Oblique inversion, a model for Oligocene-Miocene tectonics of south Central Alborz. *Researches in Earth Sciences*, Vol.4, No. 15, p. 32-50 in Persian with English Abstract
- Ehteshami-Moinabadi, M. Yassaghi, A., 2007. Geometry and kinematics of the Mosha Fault, south central Alborz Range, Iran: An example of basement involved thrusting. *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 29, p. 928–938
- Ehteshami-Moinabadi, M., Yassaghi, A. and Amini, A., 2012. Mesozoic basin inversion in Central Alborz, evidence from the Taleqan-Gajereh-Lar Paleograbens. *Journal of Geopersia*, v. 2(2), p. 43–63
- Epard, J.-L., Groshong, R.H., 1995. Kinematic model of detachment folding including limb rotation, fixed hinges and layer-parallel strain. *Tectonophysics* 247, 85–103
- Erickson, S.G., 1995. Mechanics of triangle zones and passive-roof duplexes: implications of finite-element models. *Tectonophysics* 245, 1–11
- Erickson, S.G., Strayer, L.M., Suppe, J., 2001. Initiation and reactivation of faults during movement over a thrust-fault ramp: numerical mechanical models. *Jour-*

- Journal of Structural Geology 23, 11–23
- Erslev, E.A., 1991. Trishear fault-propagation folding. *Geology* 19, 617–620
- Erslev, E.A., Mayborn, K.R., 1997. Multiple geometries and modes of fault-propagation folding in the Canadian thrust belt. *J. Struct. Geol.* 19, 321–335
- fault-related fold: the Bargy anticline, France. 44th U.S. Rock Mechanics Symposium, ARMA Paper 10–201
- Guest, B., Axen, G.J., Lam, P.S. and Hassanzadeh, J., 2006b. Late Cenozoic shortening in the west central Alborz Mountain, northern Iran, by combined conjugate strike slip and thin-skinned deformation. *Geosphere*, v. 2, p. 35–52
- Guest, B., Stockli, D.F., Grove, M., Axen, G.J., Lam, P.S. and Hassanzadeh, J., 2006a. Thermal histories from the central Alborz Mountains, northern Iran: Implications for the spatial and temporal distribution of deformation in northern Iran. *Geological Society of America Bulletin*, v. 118, p. 1507 – 1521
- Guzofski, C.A., Shaw, J.H., Lin, G., Shearer, P.M., 2007. Seismically active wedge structure beneath the Coalinga anticline, San Joaquin basin, California. *J. Geophys. Res.* 112, B03S05
- Hardy, S., Ford, M., 1997. Numerical modelling of trishear fault propagation folding. *Tectonics* 16, 841–854
- 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
- Hughes, A.N., Shaw, J.H., 2015. Insights into the mechanics of fault-propagation folding styles. *GSA Bulletin*, 127(11-12), pp.1752-1765
- Hughes, A.N., Benesh, N.P., Shaw, J.H., 2014. Factors that control the development of fault-bend versus fault-propagation folds: Insights from mechanical models based on the discrete element method (DEM). *Journal of Structural Geology* 68, 121-141
- Johnson, K.M., Segall, P., 2004. Imaging the ramp-décollement geometry of the Chelungpu fault using coseismic GPS displacements from the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake. *Tectonophysics* 378, 123–139
- Kao, H., 2000. The Chi-Chi earthquake sequence: active out-of-sequence thrust faulting in Taiwan. *Science* 288, 2346–2349
- Lin, M.L., Wang, C.P., Chen, W.S., Yang, C.N., Jeng, F.S., 2007. Inference of trishear-faulting processes from deformed pre-growth and growth strata. *J. Struct. Geol.* 29, 1267–1280
- Liu, S., Dixon, J.M., 1995. Localization of duplex thrust-ramps by buckling: analog and numerical modelling. *Journal of Structural Geology* 17, 875–886
- Liu, X., Eckert, A., Connolly, P., Thornton, D., 2020. Visco-elastic parasitic folding: Influences on the resulting porosity distribution. *Journal of Structural Geology* 130, 103892
- McClay, K., 2011. Introduction to thrust fault-related folding. In: McClay, K., Shaw, J.H., Suppe, J. (Eds.), *Thrust-fault Related Folding AAPG Mem.* 94, 1–19
- 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)
- Mitra, S., 1990. Fault-propagation folds: geometry, kinematic evolution, and hydrocarbon traps. *AAPG Bull.* 74, 921–945
- Mitra, S., 1993. Geometry and kinematic evolution of inversion structures. *AAPG Bull.* 77, 1159–1191
- Mitra, S., Mount, V.S., 1998. Foreland basement involved structures. *AAPG Bull.* 82, 70–109
- Morley, C.K., King, R., Hillis, R., Tingay, M., Backe, G., 2011. Deepwater fold and thrust belt classification, tectonics, structure and hydrocarbon prospectivity: a review. *Earth Sci. Rev.* 104, 41–91
- Nabavi, S.T., Alavi, S.A., 2019b. A meso-scale faulted multi-detachment fold, Khahr area, Kerman, Iran. *International Journal of Earth Sciences* 108, 885–886
- Nabavi, S.T., Alavi, S.A., Javanbakht, H., 2019a. The Dinevar transtensional pull-apart basin, NW Zagros Mountains, Iran: a geological study and comparison to 2D finite element elastic models. *International Journal of Earth Sciences* 108, 329–346
- Nabavi, S.T., Alavi, S.A., Maerten, F., 2018b. 2D finite-element elastic models of transtensional pull-apart basins. *Comptes Rendus Geoscience* 350, 222–230
- Nabavi, S.T., Alavi, S.A., Mohammadi, S., Ghassemi, M.R., 2018a. Mechanical evolution of transpression zones affected by fault interactions: Insights from 3D elasto-plastic finite element models. *Journal of Structural Geology* 106, 19–40
- Nabavi, S.T., Alavi, S.A., Mohammadi, S., Ghassemi, M.R., Frehner, M., 2017b. Analysis of transpression within contractional fault steps using finite-element method. *Journal of Structural Geology* 96, 1–20
- Nabavi, S.T., Diaz-Azpiroz, M., Talbot, C.J., 2017a. Inclined transpression in the Neka Valley, eastern Alborz, Iran. *International Journal of Earth Sciences* 106, 1815–1840
- Okamura, Y., Ishiyama, T., Yanagisawa, Y., 2007. Fault-related folds above the source fault of the 2004 mid-Niigata Prefecture earthquake, in a fold-and-thrust belt caused by basin inversion along the eastern margin of the Japan Sea. *J. Geophys. Res.* 112, B03S08. Poblet, J., McClay, K., 1996. Geometry and kinematics of single-layer detachment folds. *AAPG Bull.* 80, 1085–1109
- Poblet, J., McClay, K., 1996. Geometry and kinematics of single-layer detachment folds. *AAPG Bull.* 80, 1085–1109
- Schöpfer, M.P.J., Childs, C., Walsh, J.J., 2006. Localization of normal faults in multilayer sequences. *Journal of Structural Geology* 28, 816–833
- Schöpfer, M.P.J., Childs, C., Walsh, J.J., 2007a. Two-dimensional distinct element modeling of the structure and growth of normal faults in multilayer sequences: 1. Model calibration, boundary conditions, and selected results. *Journal of Geophysical Research* 112, B10401, <http://dx.doi.org/10.1029/2006JB004902>
- Schöpfer, M.P.J., Childs, C., Walsh, J.J., 2007b. Two-dimensional distinct element modeling of the structure and growth of normal faults in multilayer sequences: 2. Impact of confining pressure and strength contrast on fault zone geometry and growth. *Journal*



- of Geophysical Research 112, B10404, <http://dx.doi.org/10.1029/2006JB004903>
- Shahidi, A., 2008. Evolution tectonique du Nord de L Iran (Alborz et Kopet- Dagh) depuis Le Mesozoique. Ph.D These, Universite Pierre et Marie Curie (Paris .500), 6pp
- Simpson, G., 2017. Practical Finite Element Modeling in Earth Science Using Matlab. Wiley Blackwell. pp, .272
- Smart, K.J., Ferrill, D.A., Morris, A.P., 2009. Impact of interlayer slip on fracture prediction from geomechanical models of fault-related folds. American Association of Petroleum Geologists Bulletin 93, 1447–1458
- Smart, K.J., Ferrill, D.A., Morris, A.P., Bichon, B.J., Riha, D.S., Huyse, L., 2010a. Geomechanical modeling of an extensional fault-propagation fold: Big Brushy Canyon monocline, Sierra Del Carmen, Texas. American Association of Petroleum Geologists Bulletin 94, 221–240
- Smart, K.J., Ferrill, D.A., Morris, A.P., McGinnis, R.N., 2010b. Geomechanical modeling of a reservoir-scale
- Smart, K.J., Ferrill, D.A., Morris, A.P., McGinnis, R.N., 2012b. Geomechanical modelling of stress and strain evolution during contractional fault-related folding. Tectonophysics 576–577, 171–196
- Smart, K.J., Wyrick, D.Y., Ferrill, D.A., 2011. Discrete element modeling of Martian pit formation in response to extensional fracturing and dilational normal faulting. Journal of Geophysical Research – Planets 116, .E04005, <http://dx.doi.org/10.1029/2010JE003742>
- Stocklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran. American Association Petroleum Geologists Bulletin, 1258- 1229, 7/52
- Stocklin, J., 1974. Northern Iran; Alborz Mountains., Geol.Soc.Lon. Special pub., 234- 213, 4
- Storti, F., Poblet, J., 1997. Growth stratal architectures associated to decollement folds and fault-propagation folds. Inferences on fold kinematics. Tectonophysics .282, 353–373
- Strayer, L.M., Hudleston, P.J., 1997. Numerical modeling of fold initiation at thrust ramps. Journal of .Structural Geology 19, 551–566
- Suppe, J., 1983. Geometry and kinematics of fault-bend folding. American Journal of Science 283, 684-.721
- Suppe, J., Medwedeff, D.A., 1990. Geometry and kinematics of fault-propagation folding. Eclogae Geol. .Helv. 83, 409-454
- Tanner, D.C., Behrmann, J.H., Dresmann, H., 2003. Three-dimensional retro-deformation of the Lechtal Nappe, Northern Calcareous Alps. J. Struct. Geol. 25, .737–748
- Tozer, R.S.J., Butler, R.W.H., Corrado, S., 2002. Comparing thin- and thick-skinned tectonic models of the Central Apennines, Italy. EGU Stephan Mueller Spec. .Publ. Ser. 1, 181–194
- Vahdati- Daneshmand, F., 2001. Geological map of Marzan- Abad, Iran. Geological survey of Iran, Scale .1: 100,000
- Vann, I.R., Graham, R.H., Hayward, A.B., 1986. The structure of mountain fronts. J. Struct. Geol. 8, 215–.227
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Chery, J., Bayer, R., Djamour, Y., Masson, F., Nankali, H., Ritz., J. F., Sedighi., M., Tavakoli, F., 2004. Deciphering oblique shortening of central Alborz in Iran using geodetic .data. Geology
- Yang, X., Peel, F.J., Sanderson, D.J., McNeill, L.C., 2017. Episodic growth of foldthrust belts: Insights from Finite Element Modelling, Journal of Structural .Geology. 102, 113-129
- Yang, X., Peel, F.J., Sanderson, D.J., McNeill, L.C., Episodic growth of foldthrust belts: Insights from Finite Element Modelling, Journal of Structural Geology .(2017), doi: 10.1016/j.jsg.2017.07.012
- Yang, Y.R., Hu, J.C., Lin, M.L., 2014. Evolution of coseismic fault-related folds induced by the Chi-Chi earthquake: A case study of the Wufeng site, Central Taiwan by using 2D distinct element modeling. Journal of Asian Earth Sciences 79, 130–143
- Yassaghi, A. and Madanipour, S., 2008. Influence of a transverse basement fault on along-strike variations in the geometry of an inverted normal fault: Case study of the Mosha Fault, Central Alborz Range, Iran. Journal of Structural Geology, v. 30, p. 1507-1519
- Yassaghi, A. and Naeimi, A., 2011. Structural analysis of the Gachsar sub-zone in central Alborz range; constrain for inversion tectonics followed by the range transverse faulting. International journal of earth sciences, v. 100, p. 1237-1249
- Zanchi, A., Zanchetta, S., Berra, F., Mattei, M., Garzanti, E., Molyneux, S., Nawab, A., Sabouri, J., 2009. The EoCimmerian (Late? Triassic) orogeny in north Iran. In: Brunet, M.F., Wilmsen, M., Granath, J.W. (Eds.), South Caspian to Central Iran Basins. Geological Society, London, Special Publications, 312: 31-55
- Zhang, Y., Karrecha, A., Schaub, P. M., Regenauer-Lieb, K., Poulet, T., Cleverley, J. S., 2012. Modelling of deformation around magmatic intrusions with application to gold-related structures in the Yilgarn Craton, Western Australia. Tectonophysics. 526–529, .133-146

Geomechanical modelling of fault-propagation fold: insights from the role of density on the geometry, and stress and strain evolution, Ayegan anticline, Central Alborz

Anis Khalife- Soltani ¹, Seyed Ahmad Alavi ^{*1}, Mohammad Reza Ghassemi², Seyed Mehdi Ganjiani³

1. Phd student in Tectonics, Department of sedimentary and oil basins, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

2. Professor, Department of sedimentary and oil basins, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

3. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.



Abstract:

Fault-related folds extend across most of mountain belts, accretionary prisms, fold-and-thrust belts, and intraplate portions. The widespread importance of such structures in the exploration and extraction of hydrocarbon resources and also seismological aspects had led to consideration beyond the structural geology studies. Numerical modeling of fault-related folds using finite element method can provide valuable information on the stress and strain evolution. In this regard, present study considers the stress and strain evolution of the Aygan fault-propagation fold, which has evolved from footwall shortcut thrusts of the Mosha fault during inversion of the central Alborz basin in Oligocene-Miocene, using finite element method. In the following, the evolution of stress and strain in the Aygan fault-propagation fold considers and analyses using differential stress-strain, strain-time, and stress-time diagrams, and also effects of density change on fold geometry. The modelling results show that increasing and decreasing of density doesn't play a significant role in stress and strain evolution, so that only slight variations appeared on backlimb. The model results, however, show that increasing and decreasing of density results in increasing and decreasing of half-wavelength, that indicate a direct relationship between density and half-wavelength in the fault-propagation fold.

Keywords: Stress and Strain evolution, Density, Fault-propagation fold, Ayegan anticline, Central Alborz.