

مدل سازی عددی چین خوردگی میدان نفتی لالی (جنوب باختر ایران) با استفاده از روش المان محدود

نسرین کیانی زاده^۱، بهزاد زمانی^۲، علی کدخدایی^۲
^۱ کارشناسی ارشد زمین شناسی گرایش تکتونیک، دانشگاه تبریز
^۲ استادیار گروه زمین شناسی، دانشگاه تبریز
 Nasrin_kianizadeh@yahoo.com

دریافت دی ۱۳۹۳، پذیرش اردیبهشت ۱۳۹۴

چکیده

در این مقاله یک مدل دو بعدی از میدان نفتی لالی و گسل های یال شمالی و جنوبی آن بر مبنای روابط المان محدود و با نرم افزار ABAQUS انجام یافته است. در این مدل نتایج ژئودزی از شبکه های ژئودینامیک منطقه و مقدار تنش های تکتونیکی به عنوان قیود وارد مساله شده اند و سازندهای مختلف میدان با خصوصیات الاستیک در نظر گرفته شده است. سطح گسل با المان های تماسی پوشیده شده است که اجازه لغزش، نفوذ و تغییر شکل را دارند و با توجه به این خصوصیات به خوبی می توانند تغییرات در سطح گسل را نشان دهند. نتایج مدل سازی با معیارهای زمین شناسی (نتایج ژئودزی) مقایسه گردیده که هماهنگی مناسبی بین نتایج و معیارهای صحت سنجی مشاهده می شود. نتایج با ضریب اصطکاک های مختلف با نرخ جابجایی ایستگاه های GPS مقایسه شده که هماهنگی در ضریب اصطکاک ۰/۰۲ مشهودتر است. نرخ جابجایی سالیانه گسل یال جنوبی در دو حالت ضریب اصطکاک ۰/۰۲ و ۰/۱ به ترتیب ۶/۳ و ۱۱ میلی متر بر سال به دست آمده است. نتایج حاصل از مدل سازی همچنین نشان داد که گسل در عمق های مختلف جابجایی های متفاوتی داشته و در اعماق کمتر، جابجایی بیشتری داراست و محل به هم پیوستن گسل های یال شمالی و جنوبی تاقدیس لالی که بیشترین تنش ها را در خود متمرکز کرده اند، محل بحرانی و تمرکز تنش گسل به شمار می رود.

کلمات کلیدی: مدل سازی عددی، المان محدود، میدان نفتی لالی، چین خوردگی

۱. مقدمه

در دنیای امروزی، داده‌ها آنقدر زیادند و مسائل آنقدر در هم تنیده‌اند، که بدون استفاده از مدل نمایاندن، تنظیم و پردازش داده‌ها، مطالعات و مشاهدات مشکل است. با گسترش و پیشرفت علوم زمین و همچنین علوم نوین مانند علم رایانه و نیز به‌کارگیری هر چه بیشتر علوم ریاضی و آمار در علوم زمین، نرم‌افزارهای گوناگون برای مدل‌سازی طراحی و ساخته شده است. در این راستا مدل‌سازی مخزن و گسل‌های میادین نفتی از اهمیت فراوانی برخوردار می‌باشد.

امروزه مدل‌سازی به عنوان یک ابزار با توانایی‌های محاسباتی گسترده و با هزینه کم به عنوان یکی از رایج‌ترین و پذیرفته‌ترین ابزار تحلیل در آمده است و محققین زیادی در مورد حالت‌های خاص این مدل‌سازی کار کرده‌اند. در سال ۱۹۷۹، نخستین مدل‌سازی‌های عددی گسل بر مبنای روش اجزای محدود توسط ریچاردسون (Richardson) به صورت دوبعدی تهیه شد. کایا و ونگ (Caia & Wang) در سال ۲۰۰۱ مدلی دوبعدی با استفاده از روش اجزای محدود و نرم‌افزار آباکوس از گسل سن آندریاس ارائه دادند، این مدل یکی از نخستین مدل‌هایی بود که پوسته را به دو بخش الاستیک و ویسکوالاستیک تقسیم کرد. لینچ (Lynch) (در سال ۲۰۰۲ رساله دکترای خود را با موضوع مدل‌های المان محدود از چرخه زمین‌لرزه در نواحی گسل‌های امتدادلغز به انجام رسانید. در این مورد هم قطعه‌ای از گسل سن آندریاس موضوع کار مدل‌سازی بود .

تمپلتون (Templeton) در سال ۲۰۰۹ نیز رساله دکترای خود را با کار روی اثرات تغییر شکل‌های غیر الاستیک خارج از صفحه گسل بر روی دینامیک گسلش در دانشگاه هاروارد به انجام رساند، این تحقیق روی گسل سن گابریل به روش المان محدود و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام یافته است. در این تحقیق مدل به صورت دوبعدی بوده و مدل رفتاری گسل مدل ضعیف‌شدگی با لغزش در نظر گرفته شده است.

بارانی (Barani) در سال ۲۰۱۲ به تأثیر زون جدایشی روی چین‌خوردگی لایه‌های سنگی با استفاده از المان محدود غیرخطی پرداخته است. در این پژوهش برای خواص لایه‌های سنگی از مدل پلاستیسیته موهر-کولمب غیرخطی استفاده شده است. در پژوهش حاضر یک مدل دو بعدی از میدان نفتی لالی و گسل‌های یال شمالی و جنوبی آن بر مبنای روابط المان محدود و با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS، تهیه و تحلیل شده است .

ABAQUS یک نرم‌افزار مهندسی بر اساس روش المان محدود است که توانایی حل مسائل از مثال‌های خطی ساده تا شبیه‌سازی‌های غیرخطی پیشرفته را دارا می‌باشد. ABAQUS شامل یک مجموعه بسیار گسترده از انواع المان‌ها می‌باشد. همچنین یک مجموعه‌ی قدرتمند است که شامل بسیاری از خواص مکانیکی مواد مانند فلزات، لاستیک، انواع بتن، مواد ژئوتکنیک مانند انواع خاک و سنگ و ... می‌باشد. تقریباً کلیه‌ی نرم‌افزارهای عددی تولید شده، نرم‌افزارهای قوی هستند. در این میان ABAQUS بسیاری از نقاط ضعف و اشکالات نرم‌افزارهای اجزا محدود دیگر را ندارد و سهولت در استفاده، مدل‌سازی قوی، تحلیل دقیق و سرعت بالای این نرم‌افزار، آن را به یک نرم‌افزار اجزای محدود متفاوت تبدیل کرده است.

۲. تکتونیک میدان نفتی لالی

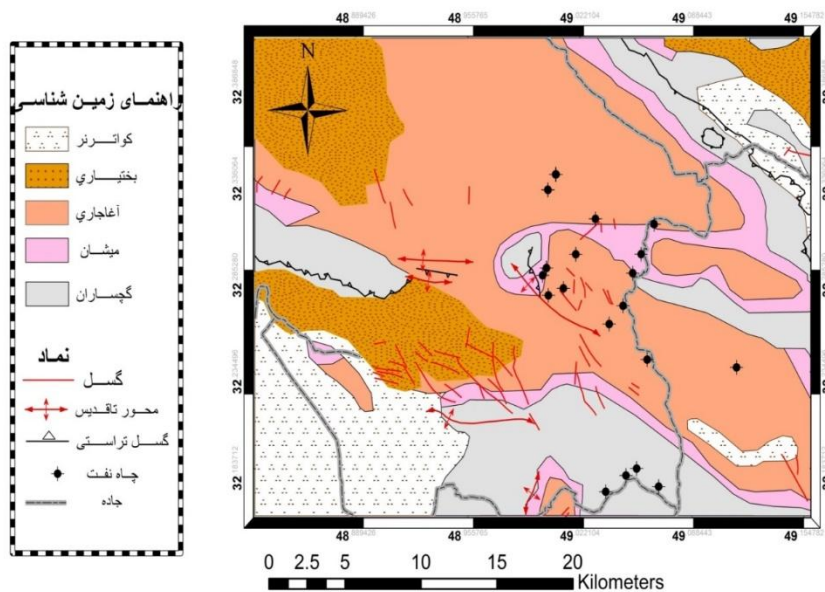
کمربند چین خورده زاگرس به صورت رشته کوهی به طول تقریبی ۱۸۰۰ کیلومتر و بر روی سکوی آرام قاره ای عربستان تشکیل شده است (Hessami et al, 2001). این کمربند به خاطر دارا بودن چین‌های بزرگ، منظم و جوان و همچنین ذخایر هیدروکربنی موجود در بسیاری از چین‌ها و تاقدیس‌های آن، به عنوان یکی از بزرگترین ایالت‌های هیدروکربنی اثبات شده جهان به شمار می‌آید (شرکتی، ۱۳۷۴). فروافتادگی دزفول، در بخش مرکزی زاگرس چین خورده قرار گرفته است و یک ایالت

نفتی غنی است که تقریباً ۸٪ از مخازن نفتی جهان را در بر می گیرد. ساختار کلی فروبار دزفول در ارتباط با گسل های پی سنگ پیرامون آن می باشد.

فروبار دزفول در میان سه پدیده مهم ساختاری گسل چپ بر بالا رود، گسل پیشانی کوهستان (Mountain Frontal Fault) و خطواره راست بر کازرون جای دارد. شکل گیری فروبار دزفول به عنوان یک پدیده ساختاری در جنوب باختری ایران و بخشی از پیش گودال (Foredeep) زاگرس به عملکرد توأم خطواره راست بر قطر - کازرون و گسل چپ بر بالا رود نسبت داده می شود (آقائباتی، ۱۳۸۳). از ویژگی های فروبار دزفول، عدم رخنمون سازند آسماری است و تنها استثنا در این مورد تاقدیس کوه آسماری در شمال باختری آن می باشد و مهمترین میدان های نفتی کشور در این پهنه واقع شده اند.

محدوده مورد مطالعه میدان نفتی لالی که بخشی از کمربند ساده چین خورده زاگرس می باشد، بر اساس تقسیم بندی مطیعی (مطیعی، ۱۳۷۴)، در فروبار دزفول قرار گرفته است. زون زاگرس چین خورده مشتمل بر تاقدیس هایی است که در اکثر آنها محوری در امتداد شمال غربی - جنوب شرقی دارند. این میدان در فاصله ۴۰ کیلومتری شمال غرب مسجد سلیمان واقع و رخنمون های سطحی میدان از سازندهای گچساران، میشان، آجاجاری و بختیاری تشکیل شده است و به سمت پایین شامل سازندهای آسماری، پابده، گورپی، گروه بنگستان، گروه خامی، سازند دشتک و رسوبات پالئوزویک زیرین می باشد (شکل ۱). این میدان از سمت شمال شرق به میدان کمرشاه، از سمت غرب به میدان لب سفید، از جنوب به میدان زیلایی، از جنوب شرق به میدان کارون محدود می شود (شکل ۲). میدان های زیلایی و کارون نزدیکترین میادین به میدان نفتی لالی می باشند.

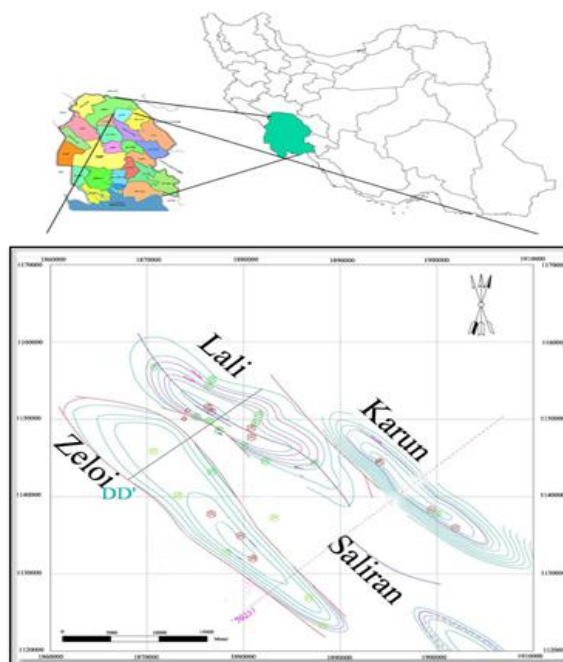
تاقدیس لالی یک چین باز تا ملایم، نامتقارن و با سطح محوری خمیده است. روند محور در بخش باختری N 5W و در مرکز میدان N 50W است که در نزدیکی بخش خاوری به N 65W تبدیل شده و در بخش خاوری به N 30W می رسد (رمضانی و همکاران، ۱۳۸۹). وجود گسل معکوس در یال جنوب باختری تاقدیس به اثبات رسیده است. بدین ترتیب در یک بیان کلی تاقدیس زیر سطحی لالی را می توان یک چین مرتبط با گسل تراستی (McClay, 2003) در نظر گرفت. یک گسل تراستی بزرگ با شیبی به سمت جنوب غرب یال شمالی را تحت تأثیر قرار داده و گسل معکوسی با شیبی تند به سمت شمال نیز یال جنوبی را تحت تأثیر قرار داده است و باعث شکل گیری ساختمان فرا خاسته (Pop up) گردیده است (شکل ۳ الف و ب). تاقدیس لالی نمودی از یک ساختار بالا جسته (Pop Up) در فروافتادگی دزفول است که هندسه ای کاملاً نامتقارن دارد. به نظر می رسد یال جنوبی تاقدیس با توجه به شیب زیاد آن بسیار پیچیده تر از گونه ای باشد که در مقطع برش DD' (شکل ۳ الف و ب) نمایش داده شده است.



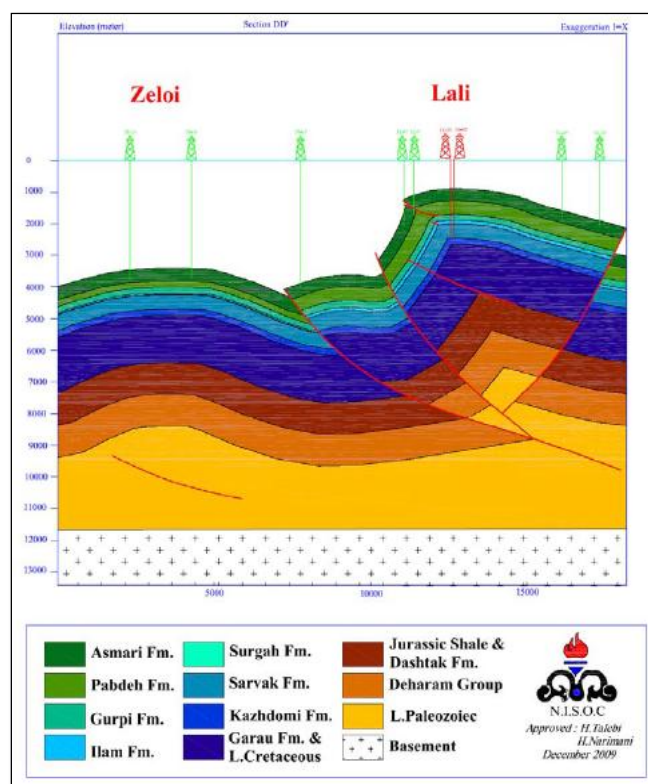
شکل ۱- نقشه زمین شناسی و ساختاری میدان لالی



شکل ۲- تصویر موقعیت میدان نسبت به میداین هم جوار (برگرفت از محمودی، ۱۳۹۱).



شکل ۳ (الف) - محل برش‌های ساختاری در میدان‌های لالی، زیلویی و کارون (برگرفته از طالبی و نریمانی، ۱۳۸۸). دواير قرمز و سبز موقعیت چاه‌های منطقه را نشان می‌دهد.



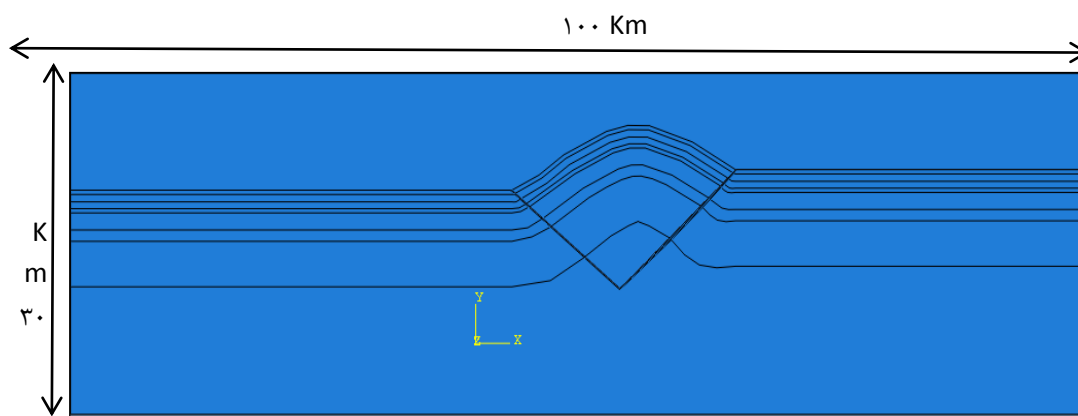
شکل ۳ (ب) - چگونگی تأثیر گسل در میدان لالی برش DD' (برگرفته از طالبی-نریمانی-۱۳۸۸).

۳. مدل المان محدود

۱-۳ هندسه مدل

در این بخش داده‌های لازم و انگاره‌های ساده کننده در برپا سازی مدل دوبعدی میدان نفتی لالی شناسایی و بررسی می‌شوند. با توجه به اینکه گسل‌های تراستی در جهت موازات خود تغییرات زیادی از نظر رفتاری ندارند (ملک‌زاده، ۱۳۹۰)، بنابراین

می توان در مدل سازی این نوع گسل ها از مدل های دوبعدی و از نوع استرین مسطح استفاده کرد. مدل مورد استفاده در این مطالعه از یک سطح دکولمان و مجموعه ای از سازندهای زمین شناسی با رفتارهای متفاوت است. در این مدل سعی شده است که از یک لایه موسوم به پی سنگ که دارای ویژگی های فیزیکی تعریف شده در زمین شناسی است، استفاده شود. از مهم ترین ویژگی یک پی سنگ، در مقایسه با سازندهای رسوبی، داشتن سختی زیاد است. الگوی دوبعدی دربردارنده میدان نفتی لالی، دو گسل یال جنوبی و شمالی میدان نفتی لالی و بخشی از ناحیه پیرامون آن می باشد. به علت تعدد زیاد سازندهای مشابه در میدان لالی، سازندهای مشابه از نظر جنس یک لایه در نظر گرفته شده و ساده سازی و مدل شده اند. باید توجه داشت در مدل سازی ناحیه سطحی، می بایست به اندازه کافی بزرگ اختیار شود تا از اندرکنش اثرات مرزی با آشفته گی های تنش در پیرامون منطقه گسلش جلوگیری گردد. از سوی دیگر، این ناحیه نباید تحت تأثیر آشفته گی های برآمده از گسل ها و گسیختگی های بیرونی قرار گیرد. از این رو، باید فاصله مناسب میان مرزهای ناحیه تا گسل های منطقه منظور گردد. بنابراین بر اساس مقاطع عرضی که از میدان نفتی لالی تهیه شده است (طالبی و نریمانی، ۱۳۸۸)، الگوی مدل در نرم افزار آباکوس ساخته شد. بر این پایه، ابعاد ناحیه سطحی الگوی دوبعدی با طول ۱۰۰ کیلومتر و عرض ۳۰ کیلومتر انتخاب گردید (شکل ۴). در این مدل سازی در هر سازند خصوصیات فیزیکی با المان های موجود در آن سازند تعریف شده است و در جدول ۱ پارامترهای مربوط به تعریف سازندها آمده است.



شکل ۴- هندسه مدل

جدول ۱- پارامترهای مربوط به تعریف سازندها

منابع	مدول یانگ (N/Km ³)	نسبت پواسون	چگالی (Kg/Km ³)	ضخامت لایه (m)	نام سازند
آزمایش های ژئومکانیکی (سازمان آب منطقه ای اصفهان، ۱۳۸۳)	1200×10^{12}	۰/۳	$2/34 \times 10^{12}$	۲۰۰۰	گروه فارس
محاسبه با داده های لاگ میدان	$20/28100 \times 10^{12}$	۰/۳	$2/469 \times 10^{12}$	۳۷۶/۵	آسماری
	$4200834/6 \times 10^6$	۰/۳۲	$2/469 \times 10^{12}$	۴۳۲	پابده- گورپی

	6753635×10^6	۰/۳۲	$2/5166 \times 10^{12}$	۱۰۰۰	ایلام- سروک
آزمایش های ژئومکانیکی (سازمان آب منطقه ای اصفهان، ۱۳۸۳)	66000×10^{12}	۰/۲	$2/46 \times 10^{12}$	۱۷۵	سورگاه- کزدمی
	38000×10^{12}	۰/۱۸	$2/62 \times 10^{12}$	۱۵۰۰	گروه خامی
	77000×10^{12}	۰/۲۵	$2/46 \times 10^{12}$	۱۰۰۰	دشتک
	34300×10^{12}	۰/۳۴	$2/5 \times 10^{12}$	۴۰۰۰	سازندهای پالئوزوییک زیرین
					در مدل سازی شرکت ندارد
					پی سنگ

۳-۲ گسل

از نظر شکل هندسی، از آنجا که هدف ایجاد مدلی است که شکل واقعی میدان را تا حد امکان بازسازی کند لذا سعی شد پارامترهای هندسی گسل با توجه به مطالعات گروه های مختلف زمین شناس در این ناحیه، به مدل وارد شود و با توجه به اینکه شیب گسل با تحلیل داده های زیرسطحی مانند نقشه های UGC، داده های لاگ، تصاویر FMI و... (طالبی و نریمانی، ۱۳۸۸، محمودی، ۱۳۹۱)، در حدود ۴۰ درجه تخمین زده شد، این زاویه در جهت مناسب به گسل شبیه سازی شده و در مدل اعمال شده است.

همچنین لازم است بر اساس اصول مکانیک گسل را که به عنوان یک ناپیوستگی در مدل عمل می کند، با یک خصوصیت رفتاری اصطکاکی تعریف نماییم.

روابط رفتاری مختلفی توسط محققان برای بیان اصطکاک در سنگ ارائه شده است که عبارت اند از: قانون کولمب (Lynch, 2002)، قانون بایرلی، قانون ضعیف شدگی با لغزش (Templeton, 2009) و قانون اصطکاکی نرخ و حالت (Tullis, 1995; Chen & Lapusta, 2008). دو گسل یال شمالی و جنوبی میدان لالی با زاویه ۴۰ درجه توسط المان های تماسی (جفت های تماسی) در مدل جاسازی شدند این المان ها توانایی لغزش، تغییر شکل - نفوذ و انتقال حرارت را دارند و از قانون کولمب پیروی می کنند.

رابطه کولمب به صورت زیر بیان می شود:

در این رابطه

T : استرس برشی بر روی سطح گسل می باشد.

μ : ضریب اصطکاک

σ_n : استرس نرمال می باشد.

$$\Delta CF = \Delta \tau + \mu(\Delta \sigma_n + \Delta p)$$

معادله ۱

با توجه به نبود اطلاعات کافی از پارامترهای اصطکاکی گسل های میدان لالی، این پارامترها با توجه به مطالعات انجام شده بر روی گسل های ایران تخمین زده شده است (Vernant & Chéry, 2006).

۳-۳ شرایط مرزی

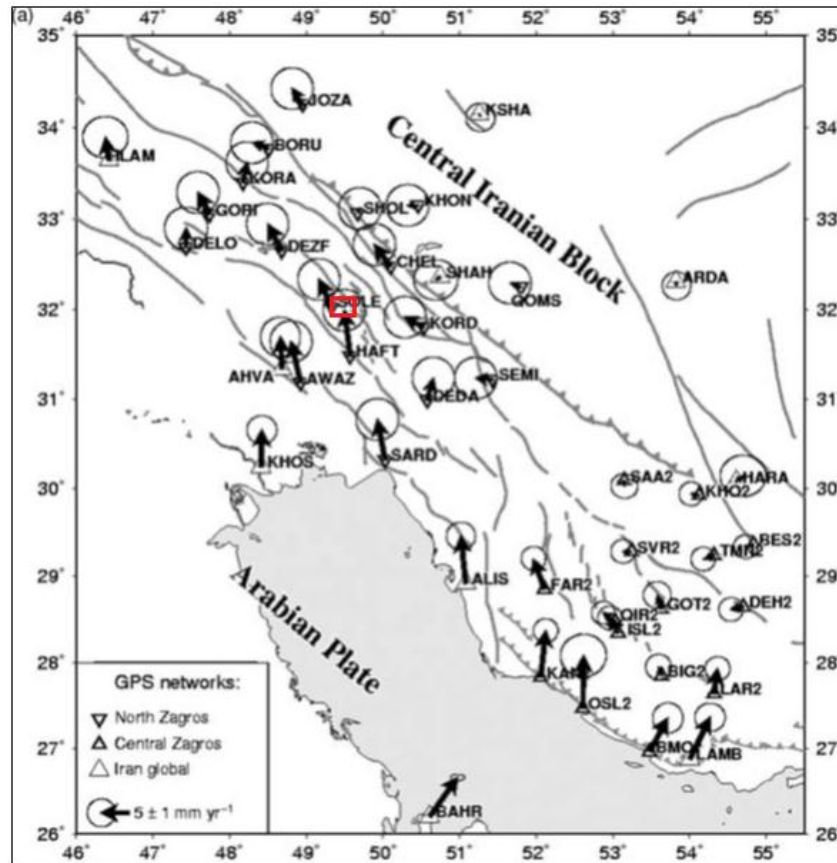
پس از برپاسازی الگوی دو بعدی، می‌بایست آن را به شرایط مرزی مناسب مقید ساخت. در این تحقیق، به‌منظور شبیه‌سازی وضعیت تکتونیکی در جنوب فلات ایران و در ساختار لالی تحت رژیم ژئودینامیکی عهد حاضر، شرایط مرزی، سرعت تغییر شکل، در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن این شرایط مرزی، اثرات کلیه نیروهای تکتونیکی، که در سطوح مختلف بر روی پوسته اعمال می‌شوند، در مدل‌سازی در نظر گرفته می‌شوند. در این بخش، سرعت حرکت پوسته بر روی مرزهای شمال شرق و جنوب غربی مدل مورد مطالعه، بر اساس مطالعات ژئودزی انجام گرفته (Walpersdorf et al, 2006)، بر روی تغییر شکل جنوب غرب ایران، تعیین شده است. به‌منظور مطالعه توزیع تغییر شکل در جنوب غرب پوسته ایران، Walpersdorf, 2006، مطالعه گسترده‌ای بر مبنای سامانه موقعیت‌یاب جهانی در جنوب غرب انجام داده‌اند. در این مطالعه، دو شبکه در سراسر زاگرس نصب شده است (شکل ۵). نزدیک‌ترین ایستگاه‌ها به محدوده میدان نفتی لالی ایستگاه‌های SolE و HAFT می‌باشند. در این مطالعه هر یک از ایستگاه‌ها حداقل برای مدت ۴۸ ساعت مورد مطالعه قرار گرفته است. مقادیر سرعت پوسته در هر یک از ایستگاه‌ها نسبت به بلوک مرکزی ایران، محاسبه شده و نتایج به‌دست آمده در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- مقادیر سرعت پوسته در ایستگاه‌های اندازه‌گیری تغییر شکل پوسته نسبت به بلوک مرکزی ایران. موقعیت جغرافیایی سایت‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است (Walpersdorf, 2006). مقادیر مثبت سرعت در جهت موافق نسبت به بلوک مرکزی و مقادیر منفی در خلاف جهت می‌باشند.

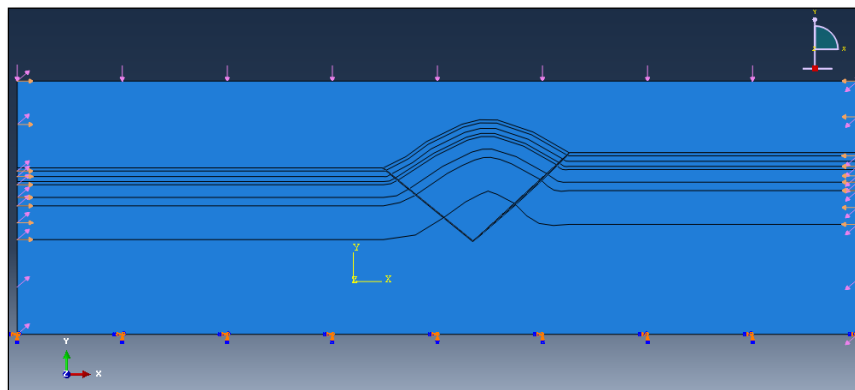
سایت	مؤلفه شرقی سرعت (E) (میلی متر در سال)	مؤلفه شمالی سرعت (E) (میلی متر در سال)
MIAN	-۰/۰۶	۱/۳۴
ILAM	-۰/۶۵	۳/۹۸
Delo	۰/۰۲	۳/۳۱
GoRi	-۲/۰۵	۳/۷۵
BijA	-۰/۴۶	۰/۲۴
KoRA	۰/۷۰	۳/۴۴
Khos	۰/۱۴	۶/۲۷
BoRu	-۲/۸۹	۱/۰۵
DezF	-۲/۴۵	۴/۵۸
AHVA	-۰/۲۹	۵/۵۶
AWAZ	-۱/۶۶	۷/۱۲
JozA	-۱/۸۴	۲/۷۱
SolE	-۲/۱۹	۴/۷۱
HAFT	-۱/۰۲	۷/۹۶
SHOL	۰/۴۰	۰/۷۲
GHAR	-۰/۲۶	۰/۲۸
SARD	-۱/۳۲	۶/۸۸
CHEL	-۲/۸۰	۳/۷۵
KHON	-۱/۸۲	-۰/۰۶
KRD2	-۳/۲۵	۱/۷۱
DEDA	۱/۰۵	۳/۸۵
BAHR	۴/۸۳	۶/۷۴
SHAH	-۰/۷۹	-۰/۵۶

ALIS	-۰/۸۷	۸/۱۷
KSHA	۰/۲۱	-۰/۶۰
TEHN	-۰/۷۸	-۳/۰۲
TEHR	۰/۸۱	-۱/۲۷
SEMI	-۲/۹۳	۰/۱۹
NOSH	-۲/۱۰	-۳/۰۹
QOMS	-۱/۹۰	۰/۷۵
KAN2	۰/۸۷	۸/۱۰
FAR2	-۱/۸۸	۵/۳۲
OSL2	۰/۱۱	۹/۱۶
QLR2	-۲/۰۸	۱/۵۳
ISL2	-۱/۴۲	۲/۶۰
SAA2	۰/۰۳	-۰/۹۲
SVR2	-۱/۴۸	۰/۰۴

جهت بزرگترین تنش‌های افقی تکنونیک‌کی که با توجه به مدل‌سازی گسل‌ها و شکستگی‌های منطقه و بدست آوردن جهت شیب و امتداد آنها و رسم نمودار گل سرخی مربوط به امتداد گسل‌های منطقه به دست آمده است (Akbar & Sapru, 1994). بر اساس جهت بزرگترین تنش‌های افقی، مقدار تنش افقی محاسبه شده با روابط پروالاستیک با زاویه ۴۰ درجه به دو یال عمودی مدل و در قسمت بالای مدل تنش عمودی وارد شد. بر اساس مقاطع عرضی که از میدان لالی با استفاده از داده‌های زیر سطحی تهیه و ترسیم شد (طالبی و نریمانی، ۱۳۸۸) پی‌سنگ در عمق حدود ۱۲ کیلومتری قرار گرفته است. به این ترتیب مدل در محدوده پی‌سنگ ثابت در نظر گرفته شده، بدین صورت که هیچ‌گونه حرکت و دورانی در هیچ راستایی ندارد (شکل ۶).



شکل ۵- میدان های سرعتی مرکز و شمال زاگرس به سمت بلوک مرکزی ایران، مقیاس بردار سرعتی ۵ میلی متر بر سال را نشان می دهد. محدوده مطالعاتی در شکل نشان داده شده است (برگرفته از Walpersdorf et al, 2006).

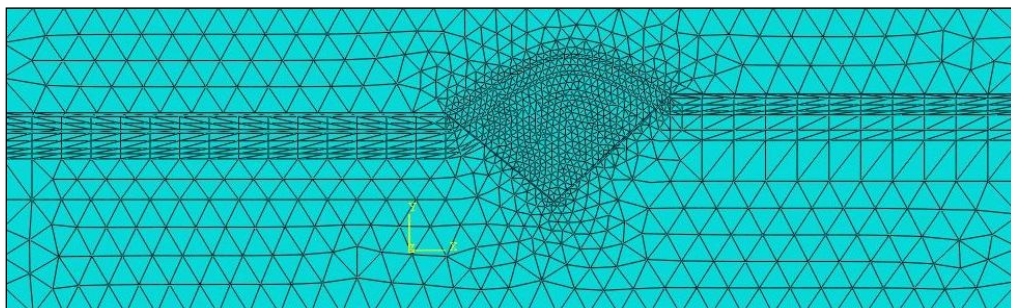


شکل ۶- نحوه بارگذاری و شرایط مرزی مدل.

۳-۴ مش بندی

مرحله مش بندی اساس روش المان محدود است که هدف آن مش بندی قطعات می باشد و عمده هزینه، زمان و حجم کار را به خود اختصاص می دهد. به بیان دیگر بیش از ۷۰ تا ۸۰ درصد سختی کار و زمان صرف شده در یک تحلیل، مربوط به این مرحله می باشد. مش بندی به نوعی تضمین کننده دقت جواب (و نه صحت آن) است، به این معنی که اگر مش بندی به صورت اصولی و با رعایت نکات ضروری انجام شود، دقت کار تضمین شده خواهد بود. به منظور کاهش زمان تحلیل و در عین حال افزایش دقت جواب ها، ابعاد المان ها متغیر در نظر گرفته شده اند. یعنی در بخش های نزدیک به ساختار چین خورده ابعاد المانها

کوچک اختیار شده (۶۰۰ متر) تا دقت مدل در این بخش زیاد باشد، ولی با فاصله گرفتن از گسل و نزدیک شدن به مرزها، ابعاد المانها بزرگتر تعریف شده است (در حدود ۲ کیلومتر). نحوه المان بندی با چندین بار تغییرات در اندازه المانها و کنترل نتایج حاصله تعیین شده است و سعی شده است هم دقت جوابها مدنظر قرار گیرد و هم زمان صرف شده برای تحلیل مدل بهینه شود (شکل ۷).



شکل ۷- نحوه مش بندی مدل

۳-۵ آنالیز مدل

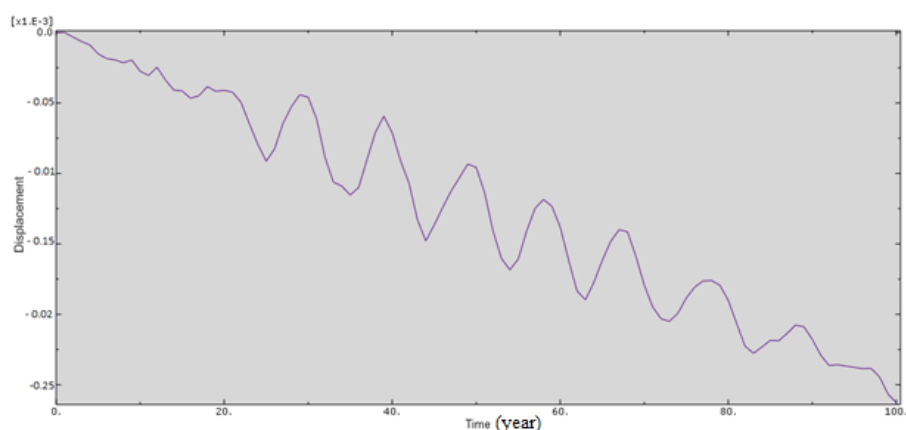
صحت یک مدل سازی عددی همیشه می بایست با مقایسه با یک مدل سازی تجربی یا تحلیلی ارزیابی شود (مدل سازی پیشرو- forward modeling) و مقایسه یک مدل عددی با مدل عددی دیگر مفهوم ندارد. دقت و صحت از جمله مفاهیمی هستند که وجود آنها در کنار یکدیگر و دانستن دقیق مفهوم هر یک از آنها و تفاوتشان، از جمله الزامات دست یابی به نتایج قابل قبول با استفاده از یک نرم افزار المان محدود است. برای کنترل مدل مورد مطالعه و انجام مدل سازی پیشرو، نتایج به دست آمده از مدل سازی با مشاهدات ژئودزی مربوط به تغییر شکل های کوتاه مدت مقایسه و مطابقت داده شده است. بدین منظور نتایج به دست آمده جهت کنترل با نتایج مشاهدات صحرائی در دو ایستگاه Sole و HAFT، یعنی نزدیک ترین ایستگاهها به منطقه مورد مطالعه مقایسه شده است.

جدول ۳- مقایسه نتایج مدل سازی با قرائت ایستگاه های GPS. (VN) مؤلفه شمالی سرعت و (VE) مؤلفه شرقی سرعت.

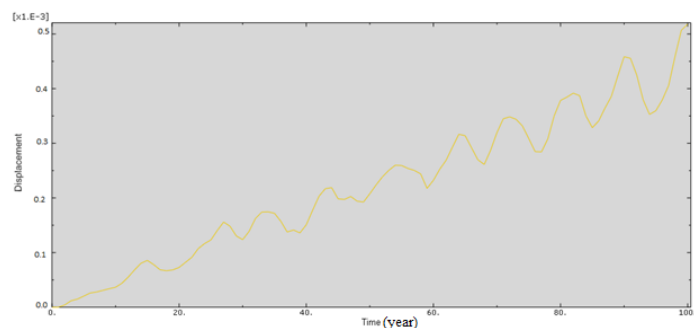
ایستگاه	نتایج حاصل از قرائت ایستگاهها (mm/year)		نتایج حاصل از مدل سازی عددی (mm/yaer)	
	VE	VN	VE	VN
Sole	۴/۷۱	-۲/۱۹	۵/۱	-۲/۶
HAFT	۷/۹۶	-۱/۰۲		

به منظور به دست آوردن ضریب اصطکاک مناسب برای گسل های میدان لالی مقادیر اصطکاک متفاوتی که برای گسل های ایران در مطالعات قبلی به دست آمده (Vernant & Chéry, 2006)، به مدل وارد شد. مقایسه بین آزمون های انجام شده و نرخ های جابجایی به دست آمده از مدل و مقایسه آنها با نتایج جابجایی های حاصل از روش های ژئودزی نشان می دهد که وقتی که ضریب اصطکاک گسل ها $\mu = 0.02$ در نظر گرفته شود مناسب ترین مدل عددی بدست خواهد آمد. در شکل و شکل میزان جابجایی منحنی های تغییر مکان در امتداد X و Y بر حسب زمان برای مقیاسی از زمان

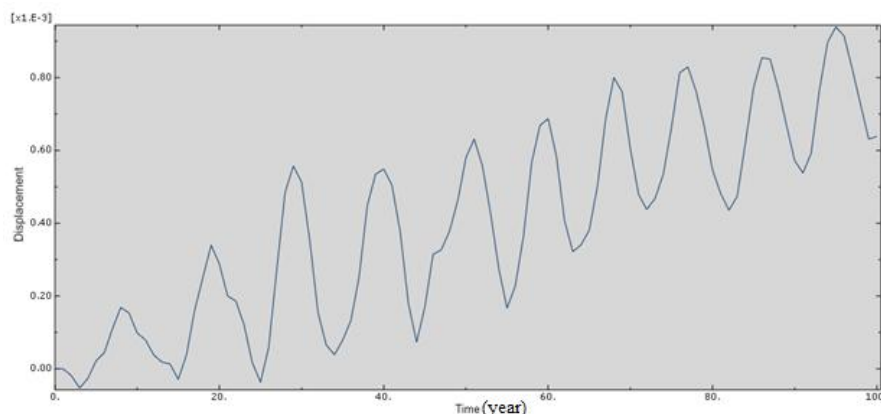
زمین شناسی (بازه زمانی ۱۰۰ سال) بر روی چین نشان داده شده است. علاوه بر نرخ تغییر شکل در روی چین، میزان جابجایی سالانه گسل نیز می تواند بررسی شود. در این راستا ده نقطه روی گسل یال جنوبی انتخاب شد و جابجایی سالیانه آن نقاط در دو حالت ضریب اصطکاک استاتیکی ۰/۰۲ و ۰/۱ برداشت شد و با میانگین گیری، نرخ جابجایی سالیانه گسل، به ترتیب ۶/۳ و ۱۱ میلی متر بر سال به دست آمد (شکل ۱۰ و شکل ۱۱). همان طور که در که در صحت یک مدل سازی عددی همیشه می بایست با مقایسه با یک مدل سازی تجربی یا تحلیلی ارزیابی شود (مدل سازی پیشرو - forward modeling) و مقایسه یک مدل عددی با مدل عددی دیگر مفهوم ندارد. دقت و صحت از جمله مفاهیمی هستند که وجود آنها در کنار یکدیگر و دانستن دقیق مفهوم هر یک از آنها و تفاوتشان، از جمله الزامات دستیابی به نتایج قابل قبول با استفاده از یک نرم افزار المان محدود است. برای کنترل مدل مورد مطالعه و انجام مدل سازی پیشرو، نتایج به دست آمده از مدل سازی با مشاهدات ژئودزی مربوط به تغییر شکل های کوتاه مدت مقایسه و مطابقت داده شده است. بدین منظور نتایج به دست آمده جهت کنترل با نتایج مشاهدات صحرایی در دو ایستگاه Sol E و HAFT یعنی نزدیک ترین ایستگاه ها به منطقه مورد مطالعه مقایسه شده است. جدول نشان داده شده نتایج حاصل از مدل سازی با نتایج حاصل از ژئودزی مطابقت دارد، به این ترتیب صحت مدل کنترل و با توجه به مقایسه مقادیر، قابل قبول است.



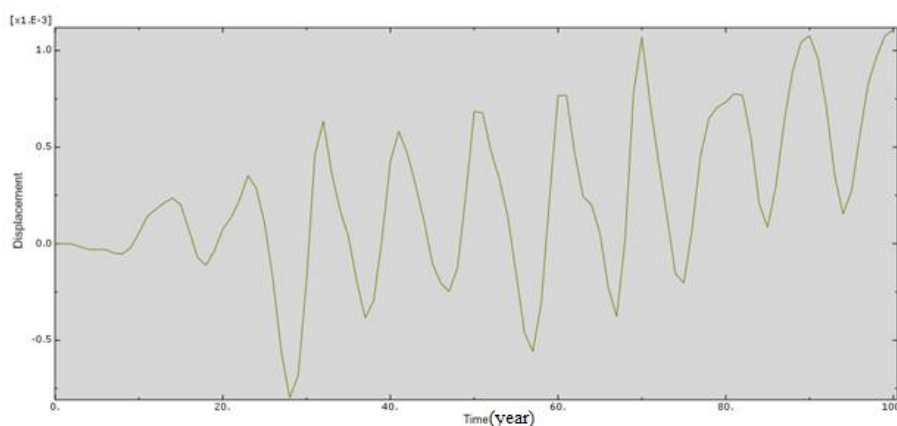
شکل ۸- جابجایی بر روی چین خوردگی در راستای X. محور افقی زمان بر حسب سال و محور عمودی جابجایی بر حسب کیلومتر را نشان می دهد.



شکل ۹- جابجایی بر روی چین خوردگی در راستای Y. محور افقی زمان بر حسب سال و محور عمودی جابجایی بر حسب کیلومتر را نشان می دهد.



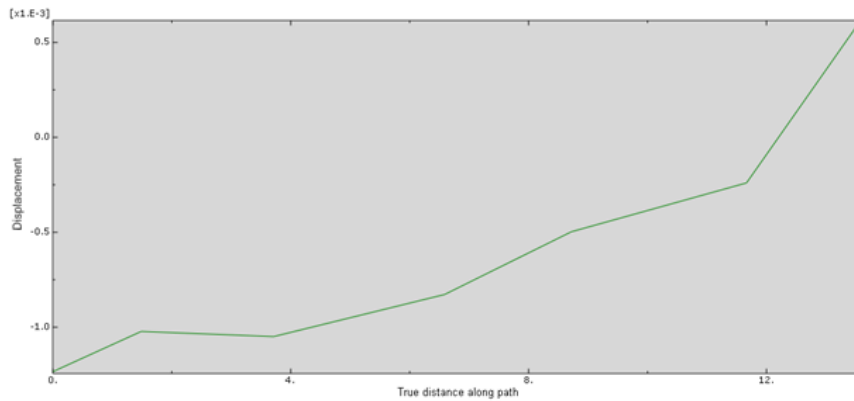
شکل ۱۰- نرخ حرکت گسل یال جنوبی با ضریب اصطکاک $0.2/0$. محور افقی زمان بر حسب سال و محور عمودی جابجایی بر حسب کیلو متر را نشان می دهد.



شکل ۱۱- نرخ حرکت گسل یال جنوبی میدان لالی با ضریب اصطکاک $0.1/0$. محور افقی زمان بر حسب سال و محور عمودی جابجایی بر حسب کیلو متر را نشان می دهد.

۳-۶ اثر عمق گسل

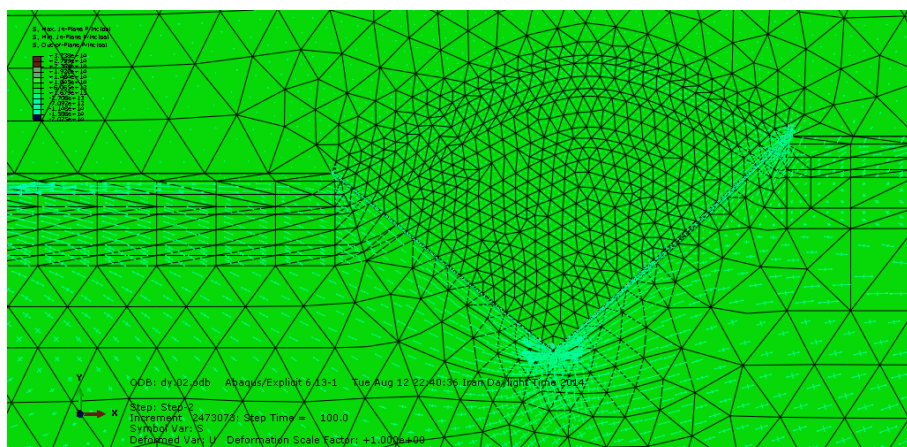
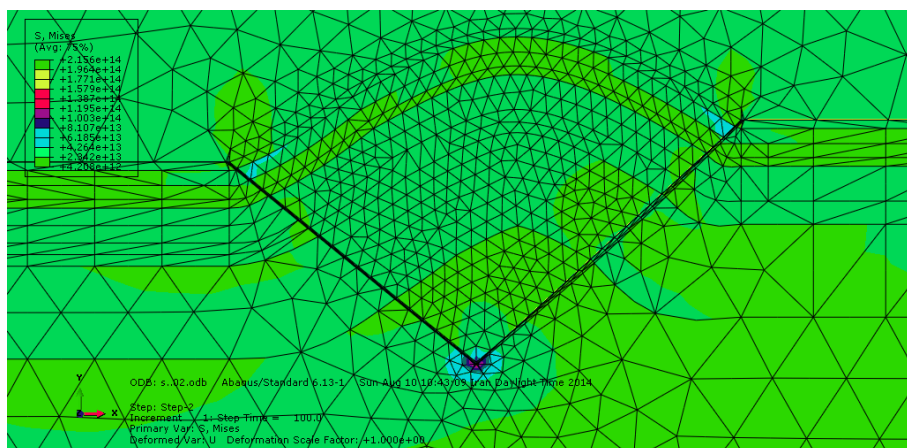
بررسی نتایج مدل سازی حاصله نشان می دهد جابجایی های گسل در عمق های مختلف، در اعماق کمتر، مقدار بیشتری را به خود اختصاص داده است. بنابراین برخلاف گسل تراستی که بر روی زمین پیدا هستند و جابجایی مستقیماً به مقدار لغزش وابسته است، جابجایی در گسل یال جنوبی میدان لالی که به صورت زیر سطحی و پنهان می باشد، علاوه بر مقدار لغزش به عمق آنها ارتباط دارد. شکل میزان جابجایی در طول گسل از قسمت پایین به سمت بالای گسل را نشان می دهد، همان طور که در شکل ۱۲ مشخص است با کاهش عمق نمودار جابجایی با شیب بیشتری تغییر می کند که با نظریه تکتونیک نازک پوسته (Hatzfeld et al., 2010, Mouthereau et al 2007, Yamato et al 2011) در زاگرس مطابقت دارد. با در نظر گرفتن نظریه تکتونیک نازک پوسته در زاگرس تراست هایی که در عمق کمتر عمل می کنند، جابجایی بیشتری دارند و در مقایسه با افزایش عمق و نزدیک شدن به پی سنگ جابجایی گسل های تراستی کمتر می شود.



شکل ۱۲- نرخ جابجایی در طول گسل از عمق بیشتر به کمتر

۳-۷ تأثیر تنش ها بر میدان نفتی لالی

در شکل نمایشی از کنتورهای تنش و مؤلفه افقی تنش آمده است. نتایج مدل سازی حاصل نشان می دهد که مؤلفه افقی تنش مقادیری بزرگ تر از مؤلفه قائم تنش دارد و محل به هم پیوستن گسل های یال شمالی و جنوبی تاقدیس لالی که بیشترین تنش ها را در خود متمرکز کرده اند، محل بحرانی و تمرکز تنش گسل نسبت به نقاط دیگر گسل به شمار می رود. همان گونه که مدل سازی عددی انجام گرفته تایید می کند، پهنه گسلی در مقایسه با سازندهای اطراف، تنش کمتری را متحمل می شود که آشکارا به دلیل سست بودن ناحیه گسلی و ناتوانی آن در تحمل تنش های بالاست و مقاومت بیشتر سازندها نسبت به ناحیه گسلی است.



شکل ۱۳- کنتورهای تنش و مؤلفه افقی در چین لالی، افزایش تنش در محل بهم پیوستن دو گسل مشاهده می شود.

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از روش عددی بر اساس روش المان محدود چین‌خوردگی میدان نفتی لالی مدل‌سازی شده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان می‌دهد که در تحلیل‌هایی که ضریب اصطکاک $0/02$ در نظر گرفته شده است هماهنگی بیشتری بین نتایج حاصل از مدل‌سازی و معیارهای زمین‌شناسی وجود دارد. همچنین نرخ جابجایی سالانه گسل یال جنوبی در دو حالت ضریب اصطکاک $0/02$ و $0/1$ به ترتیب $6/3$ و 11 میلی‌متر بر سال به دست آمد. گسل یال جنوبی میدان نفتی لالی در عمق‌های مختلف جابجایی‌های متفاوتی داشته و در اعماق کمتر، جابجایی بیشتری داراست. بنابراین، این برخلاف گسل تراستی پیدا که جابجایی مستقیماً به مقدار لغزش وابسته است، جابجایی آن، در گسل‌های زیر سطحی علاوه بر لغزش به عمق آنها وابسته است. نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان می‌دهد که محل به هم‌پیوستن گسل‌های یال شمالی و جنوبی تاقدیس لالی در عمق، محل بحرانی و تمرکز تنش گسل به شمار می‌رود. همان‌گونه که مدل‌سازی عددی انجام گرفته تایید می‌کند، پهنه گسلی در مقایسه با سازندهای اطراف، تنش کمتری را متحمل می‌شود که آشکارا به دلیل خرد بودن سنگ‌ها در ناحیه گسلی و ناتوانی آن در تحمل تنش‌های بالاست.

تشکر و قدردانی

از آقایان دکتر مختاری و دکتر ندیمی بخاطر داوری مقاله سپاسگزاری می‌گردد. این تحقیق با همکاری و حمایت شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب انجام شده که بدین وسیله تشکر و قدردانی می‌شود.

۵. منابع

- [۱]- آفانباتی، ع.، ۱۳۸۳، زمین شناسی ایران، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی ایران.
- [۲]- رضانی، ع.، علوی، س.ا.، حاجی علی بیگی، ح.، طالبی، ح.، ۱۳۸۹، تحلیل ساختاری و شکستگی های میدان نفتی لالی، پایان نامه کارشناسی ارشد، رشته تکتونیک، دانشگاه علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۴۰ صفحه.
- [۳]- شرکتی، ش.، ۱۳۸۴، تکتونیک پوشش رسوبی و پی سنگ در کمربند کوهزایی زاگرس، نکاتی در زمینه مدل سازی هندسی دگرشکلی، شرکت ملی نفت ایران، مدیریت اکتشاف.
- [۴]- طالبی، ح.، نریمانی، ح.، ۱۳۸۸، ارتباط ساختاری تاقدیس های زیلویی، لالی و کارون. شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب.
- [۵]- محمودی، ح.، ۱۳۹۱، مطالعه تکمیلی و تهیه مدل زمین شناسی مخزن بنگستان میدان لالی. گزارش شرکت مناطق نفت خیز جنوب.
- [۶]- مطیعی، ه.، ۱۳۷۴، زمین شناسی نفت زاگرس، انتشارات سازمان زمین شناسی کشور، جلد اول ۵۸۹ صفحه.
- [۷]- ملک زاده، ز.، ۱۳۹۰، گسل های تراستی پنهان و مخاطرات ژئوتکنیکی. سی امین گردهمایی علوم زمین.
- [8]- Akbar M. and A. Sapru, 1994, In-Situ Stresses in the Subsurfaces of Arabian Peninsula and their Effect on Fracture Morphology and Permeability, 6th Abu-Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference 16-19 Oct. 1994, Abu-Dhabi UAE.
- [9]- Barani, O., 2012, The Effect of Lower Detachment Zone on Buckle Folds Geometry, Journal of Structural Engineering and Geotechnics. v.2(1), p. 43-47.
- [10]- Caia, Y. and C.Y Wang, 2001, Testing fault models with numerical simulation: example from central califprnia. Tectonophysics, v. 343, P. 233-238.
- [11]- Chen, T. and N. Lapusta. 2008. Rate and state friction laws can explain scaling of small repeating earthquakes. Journal of Geophysical research.
- [12]- Hajjalibeigi H., S.A Alavi, J. Eftekharneshad, M. Mokhtari, and M.H. Adabi, 2011, Signatures of the Balarud deep seated fault zone in Khushab anticline, SW Iran, An integrated study. Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran, v.22, p. 33-49.
- [13]- Hatzfeld D. and P. Molnar, 2010, Comparisons of the kinematics and deep structure of the zagros and Himalaia and of the Iranian and Tibetan plateause and Geodynamics implications, Geophysical, 2009 RG000304, p.1-48.
- [14]- Hessami K., H.A Koyi, and C. Talbot, 2001, The significance of strick slip faulting in the basement of me Zagros fold-thrust belt. Journal of petroleum Geology, v. 24,P. 5-28.
- [15]- Lynch J. C., 2002, Finite element models of earthquake cycle in mature strike- slipe fault zone. University of California Berkeley.
- [16]- McClay K.R., 2003, Structural Geology for Petroleum Exploration. Lecture Notes, 503p.
- [17]- Mouthereau M., J. Tensi, N. Bellahsen, O. Lacombe, T. Boisgrollier, S. Kargas, 2007, Tertiary sequence of deformation in a thin-skinned/ thick-skinned collision belt: The Zagros Folded Belt (Fars, Iran), Tectonics, v.26.TC 5006, doi:10.1029/2007TC 002098.1-28.
- [18]- Richardson R.M., S.C Solomon and N.H. Sleep, 1979. Tectonic stress in the plates. Rev. Geophys. V.17, p. 981-1019.
- [8]- Sarkarinejad K. and A. Azizi, 2008, Slip partitioning and inclined dextral transpression along the Zagros Thrust System, Iran. Journal of Structural Geology, v.30, p. 116-136.
- [19]- Templeton E., 2009, Effect of inelastic off-fault deformation on the dynamics of earthquake rupture and branch fault activation. PhD thesis. Harvard University, Massachsetts.
- [20]- Tullis, T.E., 1995, Rock friction and its implications for earthquake prediction examined via models of Parkfield earthquakes, in Earthquake prediction: The Scientific Challengeproc. Natl. Acad. Sci. USA: National Academy of sciences in Irvine, CA.
- [21]- Walopersdorf, A., D. Hatzfeld, H. Nankali, F. Tavakoli, F. Nilforoushan, M. Tatar, P. Vernant, J. Chéry, F. and Masson, 2006, Difference in the GPS deformation pattern of North and Central zagros, Geophys. J. Int, v.167, p. 1077-1088
- [22]- Vernant, P. Chéry, J. 2006. Low fault friction in Iran implies localized deformation for the Arabia-Eurasia collision zone. Earth and Planetary Science Letters, v. 246, p. 197-206.
- [23]- Yamato, P., B. Kaus, F. Mouthereau, S. Castelltort, 2011, Dynamic constraints on the crustal- scale rheology of the zagros fold belt ,Iran, Geology ,v.39, no. 9 .p. 815- 818, doi:10.1130/G321361.