



بررسی تأثیر فرسایش لوله جداری و ضریب الاستیسیته سیمان در پدیده مچالگی یکی از میادین جنوب غربی ایران

سجاد حق شناس لاری^۱؛ سعید شاد*^۲؛ علیرضا زنگنه وار^۳

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی نفت - حفاری؛ دانشگاه صنعتی شریف

۲. استادیار؛ دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف

۳. مدیر مهندسی نفت؛ شرکت مهندسی و خدمات چاه پیمایی مهران

دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۲۴ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۲۵

واژگان کلیدی	چکیده
لوله جداری، فشار، فرسایش، مچالگی، سیمان، ضریب الاستیسیته	مچالگی یا دوپهلوی شدن لوله جداری در هنگام تولید از میادین پرفشار، به امری رایج در صنعت نفت ایران و جهان تبدیل گشته به گونه‌ای که طبق مطالعات و گزارش‌های شرکت مناطق نفت‌خیز جنوب از تعداد ۵۶ حلقه چاه حفر شده در یکی از میادین پرفشار جنوب غربی ایران، ۲۱ مورد این پدیده اتفاق افتاده که در ۱۸ مورد از آن‌ها (۳۲ درصد کلی) چاه از دست رفته است. طبق مطالعات انجام شده، عوامل مختلفی بر مچالگی لوله جداری نقش دارند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به اعمال تنش‌های نقطه‌ای به چاه و لوله‌های جداری بر اثر عوامل تکنیکی و ژئومکانیکی، خوردگی، وجود فضای خالی پشت لوله‌های جداری، جنس و کیفیت لوله جداری، جنس و نوع سیمان مورد استفاده، فشار منفذی، کیفیت سیمان شدگی و ... اشاره کرد. در این مقاله، قصد بررسی میزان تأثیر فرسایش لوله جداری و نیز ضریب الاستیسیته سیمان اطراف آن بر توزیع تنش‌های اطراف چاه، با شبیه‌سازی سیستم سازند - سیمان - جداری با نرم‌افزار شبیه‌ساز آباکوس تحت اعمال تنش‌ها و شرایط منطقه‌ای میدان مدنظر را داریم. پس از آن میزان تأثیر این عوامل را بر جابه‌جایی سیمان اطراف چاه و تنش اعمال شده به لوله جداری را بررسی خواهیم کرد. شبیه‌سازی‌های این پژوهش نشان می‌دهد میزان تأثیر فرسایش نقطه‌ای لوله جداری تأثیر بسزایی در توزیع استرس‌های نواحی اطراف چاه و جابه‌جایی‌های سیمان اطراف لوله جداری دارد در حالی که ضریب الاستیسیته سیمان نسبت به فرسایش لوله تأثیر کمتری بر نتایج داشت که در دو حالت ضریب الاستیسیته سیمان زیر ضریب الاستیسیته سازند و بالای آن قابل بررسی است.

و مسیر چاه و نیز مدل‌سازی جداری در شرایط بارهای درجا توسط یین و همکاران (Yin and Gao, 2014)، بررسی تأثیر لایه سیمانی و جنس آن بر روی فشارهای وارده بر جداری توسط دنگ (Deng, 1997)، بررسی مقاومت مچالگی بر پایه استرس‌های ژئومکانیکی و تأثیر سیال اطراف جداری توسط میرزا قربانی و همکاران (Mirzaghobanali et al., 2011) و ... را اشاره کرد. حادثه‌ترین پدیده آسیب رسیدن به جداری، پدیده مچالگی است که در اثر اعمال فشاری درون لوله، کمتر از فشار اعمالی از بیرون لوله است. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، انواع مختلف این پدیده بر اساس میزان نسبت باریکی (Ratio Slenderness D/t) و تابعی از مقاومت

۱. پیش‌گفتار

حفظ و سلامت لوله جداری، امری مهم و ضروری در هنگام حفاری به شمار می‌رود. مشکلات مربوط به جداری در بسیاری از کشورها نظیر ایران، آمریکا، چین، برزیل، مکزیک و ... وجود داشته است (Krug and Marx, 1981; Bruno, 2002; Li et al., 2003; Tao et al., 2011) و (هاشمی و همکاران، ۲۰۱۶). این مشکلات باعث بروز مسائل مختلف اقتصادی و محیط زیستی خواهند شد که در نهایت موجب بسته شدن و ترک چاه می‌شود. در چگونگی پدید آمدن این حادثه، عوامل مختلفی بررسی شده که از آن‌ها می‌توان به مطالعه تأثیر خوردگی بر میزان مقاومت لوله جداری در چاه‌های گازی توسط جاویدی و همکاران (Javidi et al., 2012)، تأثیر زاویه

میزان کمی از انحراف نیز ممکن است اتفاق بیفتد که تأثیر بسزایی در سناریوهای تولید در آینده از جمله فراز‌آوری مصنوعی، شکاف هیدرولیکی و ... دارد. چراکه اندکی انحراف در چاه باعث می‌شود رشته حفاری به سمتی متمایل شود و با ناحیه‌ای خاص از لوله جداری در تماس قرار گیرد که این پدیده علاوه بر فرسایش حاصل از خوردگی است و در این مقاله منظور صرفاً فرسایش حاصل از برخورد لوله حفاری هنگام حفاری و یا لوله جداری در هنگام راندن لوله‌های جداری پایینی است. فرسایش جداری، باعث کاهش شدید مقاومت آن می‌شود به‌گونه‌ای که این عمل موجب می‌شود تمرکز استرس‌ها در ناحیه فرسایش یافته به طرز قابل توجهی افزایش یابد که نتیجه آن بالا رفتن ریسک مچالگی است. تعادل نیرو را می‌توان به صورت نیروی نرمال، نیروی برشی و نیروی پیکره‌ای بیان کرد که معادله آن در مختصات استوانه‌ای در معادله ۱ آورده شده است که σ_r تنش شعاعی و σ_θ تنش حلقوی است (Fjar et al., 2008).

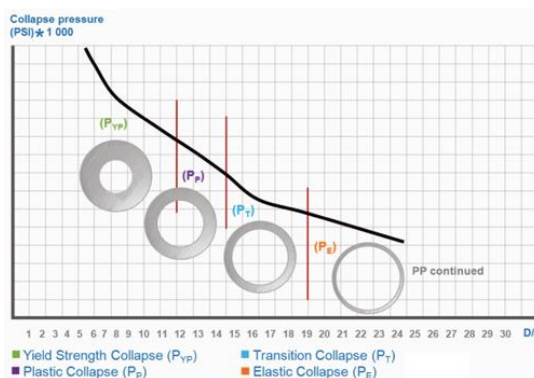
$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + \sigma f_r = 0 \quad (1)$$

برای به دست آوردن تنش حلقوی درون یک لوله آسیب‌دیده، نیازمند حل تحلیلی هستیم، چراکه معادلات معمول لام^۱ که در تجزیه و تحلیل یکپارچگی جداری به کار می‌روند برای تأثیرات ناحیه آسیب‌دیده دقت لازم را ندارند (Shen et al., 2014). بنابراین حل تحلیلی شرایط واقعی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس می‌تواند جهت کاهش خطای محاسبات متمر ثمر باشد.

کیفیت سیمان نیز، تأثیر فراوانی بر انتقال و توزیع استرس‌ها از سازند به جدار دارد. برای دو نسبت بسیار بالا و بسیار پایین نسبت پواسون سیمان، تغییرات ضریب الاستیسیته نتایج مختلفی نشان می‌دهد که این میزان به اندازه و بزرگی ضریب الاستیک سازند وابسته است (Fleckenstein et al., 2005). بنابراین کیفیت و جنس سیمان مورد استفاده نیز، باید مدنظر طراحان آن باشد که در ادامه این مقاله به بررسی تأثیرات تغییر در اندازه ضریب

تسلیم (Yield Strength) توسط مؤسسه نفت آمریکا (API Bull 5C3) به انواع زیر تقسیم می‌شود:

- مچالگی در مقاومت تسلیم (Yield strength collapse)
- مچالگی در محدوده انتقالی (Transition collapse)
- مچالگی پلاستیک (Plastic collapse)
- مچالگی الاستیک (Elastic collapse)



شکل ۱. استاندارد API Bull 5C3

مچالگی می‌تواند برحسب موقعیت و شرایط منطقه‌ای - عملیاتی، دلایل مختلفی داشته باشد که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان دلایل زیر را نام برد:

- اعمال تنش‌های نقطه‌ای به چاه و لوله‌های جداری
- بر اثر عوامل تکنونیک و ژئومکانیکی خوردگی لوله
- وجود فضای خالی یا Void پشت لوله‌های جداری
- جنس و کیفیت لوله جداری
- نوع سیمان مورد استفاده
- نوع سازند
- کیفیت سیمان شدگی

فرسایش لوله جداری اکثراً در چاه‌های جهت‌دار و یا چاه‌ها با طول زیاد اتفاق می‌افتد، چرا که فشار تماسی در ناحیه داخلی لوله جداری در این حالت به سختی قابل کنترل است. این پدیده نه تنها در چاه‌های افقی، بلکه در چاه‌های عمودی با

¹Lame Eq

بررسی تأثیر فرسایش لوله جداری و ضریب الاستیسیته سیمان در پدیده مجالگی یکی از مبادین جنوب غربی ایران

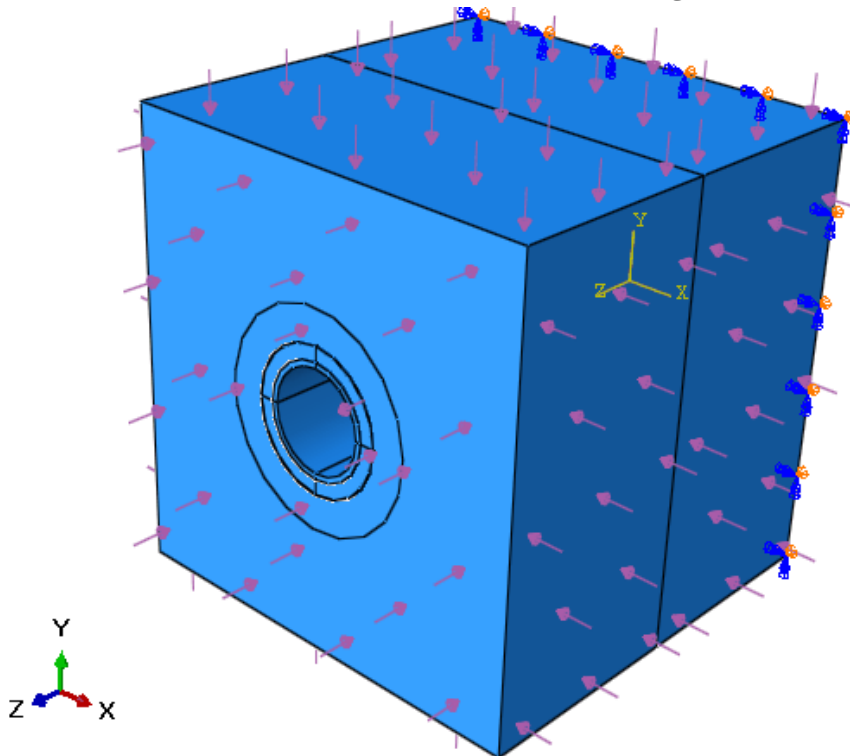
۶۶/۷۴ میلی‌متر در اطراف آن و سازند در اطراف آن به صورت مکعبی و به ابعاد یک متر در نظر گرفته شده با فرض بدنه لوله جداری به صورت کاملاً یکنواخت، دایره‌ای و بدون تغییرات ضخامت و نیز پوسته سیمانی با ضخامت یکسان و به صورت دایره‌ای شبیه‌سازی شد که شماتیک کلی آن را در شکل ۲ نشان داده شده است.

الاستیک سیمان در ابعاد کوچک‌تر از ضریب الاستیک سازند و بزرگ‌تر از آن خواهیم پرداخت.

۲. مدل‌سازی و فرضیات

۱.۲ ابعاد و هندسه

در این مدل، قصد ما به دست آوردن توزیع فشار و نیز جابه‌جایی‌ها درون سیستم سازند - سیمان - جداری بود. جداری ۹۵/۸ اینچ با ضخامت ۲۴/۱ میلی‌متر، ضخامت سیمان

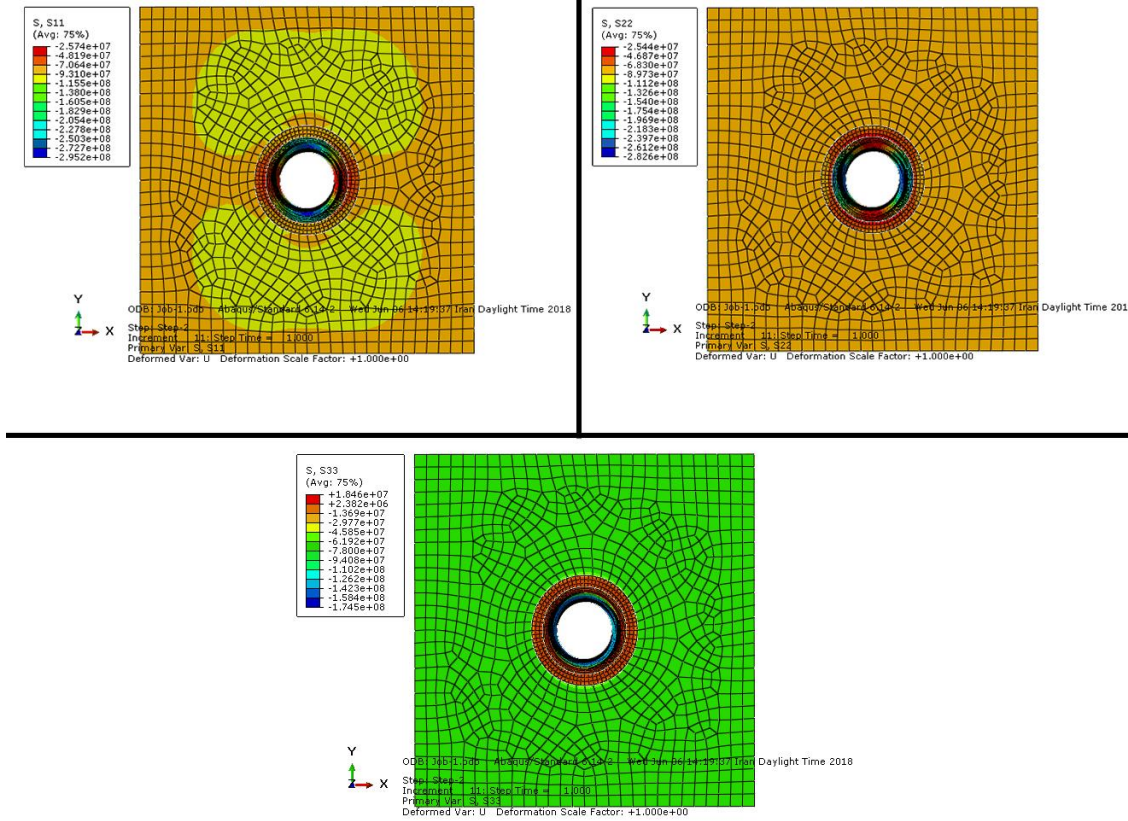


شکل ۲. شماتیک کلی هندسه سازند - سیمان - جداری

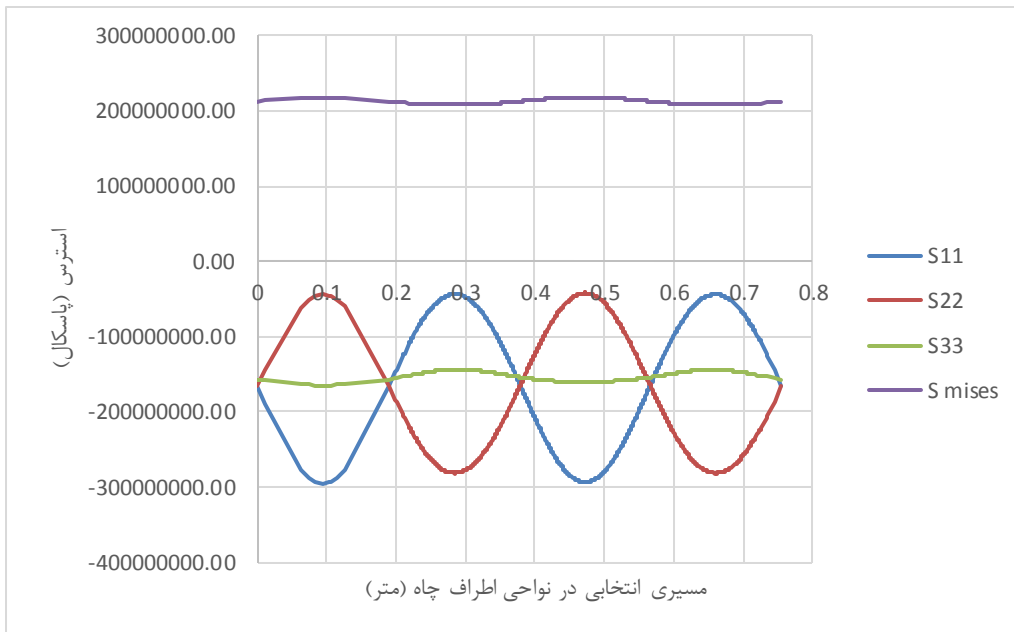
شماره ۳، پروفایل تنش‌های ماکزیمم و مینیمم استرس و نیز استرس قائم را در شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد. شکل شماره ۴ نیز میزان تنش‌های اصلی و تنش فان مایزس را در مسیری انتخابی در نواحی اطراف لوله جداری نشان می‌دهد. شکل شماره ۵، میزان جابجایی در همان مسیر انتخابی را نشان می‌دهد.

۲.۲ تخمین تنش‌های اعمال شده به مدل

به منظور تعیین بارهای قائم، افقی بیشینه و کمینه اعمالی به مدل شبیه‌سازی شده تخمینی از بارهای اعمالی با توجه به وزن گل، لیتولوژی سازند و مشخصات الاستیک و پلاستیک آن محاسبه شد که در ادامه به آن خواهیم پرداخت. شکل

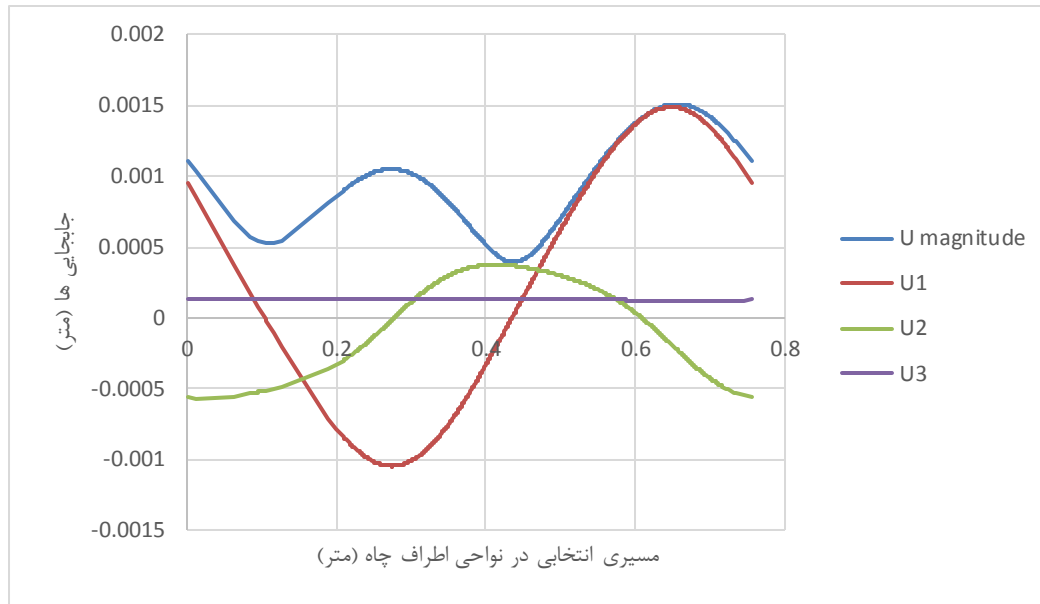


شکل ۳. پروفایل توزیع تنش‌های اصلی در مدل شبیه‌سازی شده.



شکل ۴. توزیع تنش‌های اصلی و تنش فان مایزس در مسیر دایره‌ای انتخابی در اطراف لوله جداري.

بررسی تأثیر فرسایش لوله جداری و ضریب الاستیسیته سیمان در پدیده مجالگی یکی از مبادین جنوب غربی ایران



شکل ۵. توزیع جابجایی کلی و جابجایی در راستای محورهای X, Y و Z در مسیر دایره‌ای انتخابی در اطراف لوله جداری.

جدول ۱. میانگین دانسیته سازندها بر مبنای لیتولوژی هر یک.

نام سازند	چگالی میانگین (gr/cm^3)	عمق حدودی (متر)
آجاجاری	2.54	سطح
میشان	2.57	2500
گچساران ۷	2.34	2700
گچساران ۶	2.31	2850
گچساران ۵	2.31	
گچساران ۳ و ۴	2.26	3000
گچساران ۲	2.15	
پوش سنگ	2.25	3110
آسماری	2.62	3163

تخمین مقدار تنش افقی کمینه: طبق قاعده کلی، اگر وزن گل درون چاه، موجب شکست سازند و هرزروی شود، میزان فشار هیدرواستاتیکی آن با میزان فشار کمینه برابری می‌کند (Ward and Andreassen, 1997; Zoback, 2010). بنابراین، با توجه به اطلاعات گزارش‌های روزانه حفاری در این میدان، که میزان حداکثر وزن گل را 154 pcf ارائه داده است، میزان گرادیان شکست به مقدار 0.247 Mpa/m تخمین

تخمین مقدار تنش قائم: مؤلفه تنش قائم اعمالی بر روی سازند، از طریق نمودارهای معین کننده لیتولوژی و تخمین ضخامت هر سازند و از طریق انتگرال گیری از سطح زمین تا عمق مورد نظر، طبق فرمول زیر قابل محاسبه است:

$$S_v = \int_z^0 \rho_z g dz \cong \bar{\rho} g z \quad (2)$$

که در آن g شتاب ثقل زمین، چگالی سازند است. اگرچه چگالی سنگ‌های رسوبی بین 2 gr/cm^3 تا 3 gr/cm^3 تغییر می‌کند، اما به طور میانگین می‌توان مقدار آن را 2.5 gr/cm^3 در نظر گرفت.

با توجه به وجود لایه‌های مارل، انیدریت، نمک و لایم-استون در سازندهای میدان مدنظر، مقادیر متوسط دانسیته طبق جدول شماره ۱ برای هر سازند وجود دارد.

طبق جدول زیر، میزان گرادیان فشار هیدرواستاتیک سازندی، به صورت میانگین و حدودی، مقدار 0.251 Mpa/m به دست آمد که با توجه به عمق حدودی سازندهای گچساران ۲-۴ در چاه مورد نظر، میزان فشار قائم، مقدار $75/5$ مگاپاسکال محاسبه شد.

زده شد که با توجه به عمق موجود، فشار کمینه در حدود ۷۴ Mpa محاسبه شد.

تعیین مقدار تنش افقی بیشینه: با ساده‌سازی قانون تعمیم یافته تنش مؤثر در کرنش‌های حجمی^۲ (Nur and Byerlee, 1971) و با فرض کوچک بودن استرس‌های القا شده دمایی (σ^{AT})، اختلاف کم فشاری بین گل و سازند و کوچک بودن استحکام کششی سنگ و ناچیز در نظر گرفتن میزان مینیمم استرس حلقوی به معادلات زیر خواهیم رسید:

$$\sigma_{\theta\theta}^{\min} = 3S_{h\min} - S_{H\max} - 2P_p = 0 \quad (3)$$

و یا:

$$S_{H\max} = 3S_{h\min} - 2P_p \quad (4)$$

که در آن θ انحراف از مینیمم استرس افقی، P_p بیانگر فشار منفذی، $\sigma_{\theta\theta}^{\min}$ مینیمم استرس حلقوی، $S_{h\min}$ استرس افقی کمینه و $S_{H\max}$ استرس افقی بیشینه است. طبق گزارش‌های روزانه حفاری مطالعه شده در میدان مدنظر، مقادیر زیادی هرزروی سیمان و سیال حفاری گزارش شده که حاکی از وجود شکاف‌های ریزی است که در دهانه چاه و حین حفاری رخ می‌دهد.

بنابراین، استفاده از معادله شماره ۴ در این میدان با فرضیات ذکر شده برای تخمین استرس افقی ماکسیمم بلامانع است. گرادیان فشار منفذی از بخش‌های ۴ تا پوش سنگ حدود ۰/۰۲۲ Mpa/m می‌باشد که با توجه به عمق مدنظر، میزان آن مقدار ۶۶ Mpa به دست آمد. بنابراین و با جایگذاری فشار منفذی و استرس مینیمم افقی در فرمول بالا، مقدار ماکسیمم استرس افقی، در حدود ۹۰ Mpa به دست آمد.

۳.۲ مدل المان محدود

فرضیات زیر در سیستم سیمان-جداری در نظر گرفته

شد:

- تنش‌های لحاظ شده در این شبیه‌سازی، تنش‌های اولیه هستند (با در نظر گرفتن تنش‌های افقی و قائم) و اثر تولید بر آن در نظر گرفته نشده است.
- توزیع تنش‌ها و نیز جابجایی‌های مدل شبیه‌سازی شده در دو بازه زمانی یک ثانیه (جمعاً دو ثانیه) به صورت خطی اعمال می‌شوند به گونه‌ای که پس از ۲ ثانیه مدل به تعادل رسیده و توزیع بارها صورت گرفته است.

- مواد به صورت ایزوتروپیک هستند.

- مدل به صورت جابه‌جایی محدود در جهت محور Z و قابلیت جابه‌جایی در جهت محورها X و Y در نظر گرفته شده است. همچنین توزیع تنش‌ها و شماتیک کلی آن در شکل شماره ۲ آورده شده است.

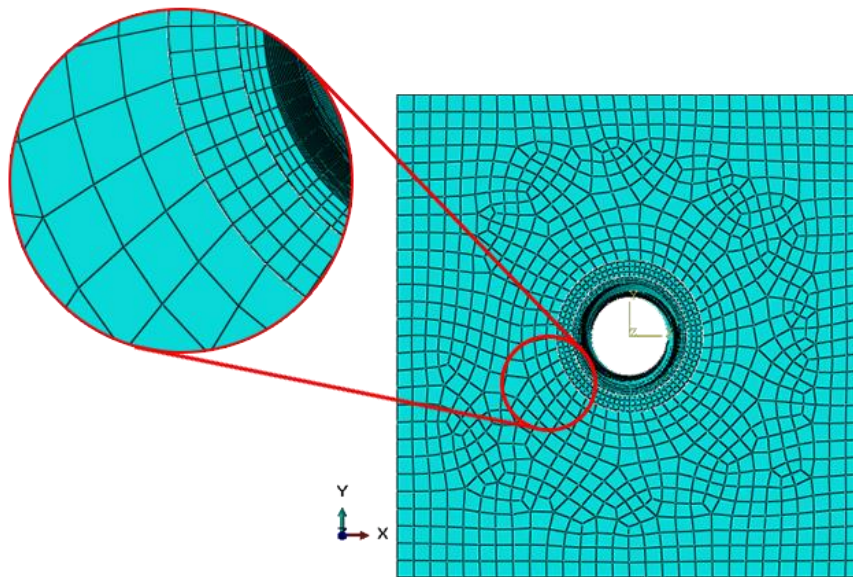
- جداری به صورت لوله‌ای در نظر گرفته شده که دارای طول بی‌نهایت است و تنها برشی از آن شبیه سازی شد.

- به منظور کاهش تأثیر استرس‌های محلی^۳ (Ladeveze, 1985; Ieşan and Scalia, 2007; Birsan, 1997)، عرض سازند در مقایسه با قطر دهانه چاه بسیار بزرگ‌تر در نظر گرفته شد
- پلاستیسیته سیمان با مدل موهر کلمب، جداری با فان مایزس و سازند با دراکرپراگر (با سخت‌شدگی) شبیه‌سازی شد.

در نتایج این شبیه‌سازی، از مدل‌سازی سه‌بعدی استفاده شده تا توزیع تنش‌ها در راستای X، Y و Z شبیه‌سازی گردد. همچنین به دلیل حساسیت‌های نواحی اطراف چاه، میزان مش‌بندی در نزدیکی حفره در اندازه‌های کوچک در نظر گرفته شده و رفته‌رفته با فاصله گرفتن از دهانه چاه، اندازه‌ها بزرگ‌تر خواهند شد (شکل ۶).

^۲ Generalized Effective Stress Law

^۳ Local Formation Stress



شکل ۶. شماتیک کلی شبکه‌بندی مدل ساخته شده.

همکاران در بررسی تأثیر فرسایش جداری بر مقاومت مچالگی منطبق است (Shen et al. 2014). نتایج حاصل از مطالعه این گروه نشان داد که در شرایطی که از اثر دما صرف‌نظر شود، استرس وارده به لوله جداری و سیمان پیرامونی به کیفیت سیمان و لوله جداری بستگی دارد. به گونه‌ای که در حالتی که لوله جداری و سیمان پیرامونی دچار فرسایش شده باشد، میزان استرس وارد شده به سیستم فرسایش یافته در نقاط فرسایش بیشتر است. به گونه‌ای که در این نقاط امکان ایجاد شرایط مچالگی فراهم آید. به‌طور کلی مطالعه کنونی و مطالعه شن و همکاران هر دو مؤید این مطلب هستند که در نقاط فرسایش تجمیع استرس صورت پذیرفته و این افزایش ناهمگونی توزیع استرس موجبات شکست یا مچالگی را فراهم می‌آورد. نتایج مطالعه کنونی بیانگر افزایش استرس در سیستم فرسایش یافته به میزانی نزدیک به ۶۸ درصد است. همچنین اشکال شماره ۹ و ۱۰ به ترتیب میزان توزیع تنش فان مایزس و جابجایی کلی را در دو حالت مینا و لوله فرسایش یافته در مسیری دلخواه و در راستای عمق چاه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است بیشینه تنش فان مایزس بین دو لایه سازندی و بیشینه جابجایی‌ها در دو لایه بالایی و پایینی است که در لایه بالایی این مقدار به دلیل نرمی سازند بیشتر است.

۳. نتایج شبیه‌سازی

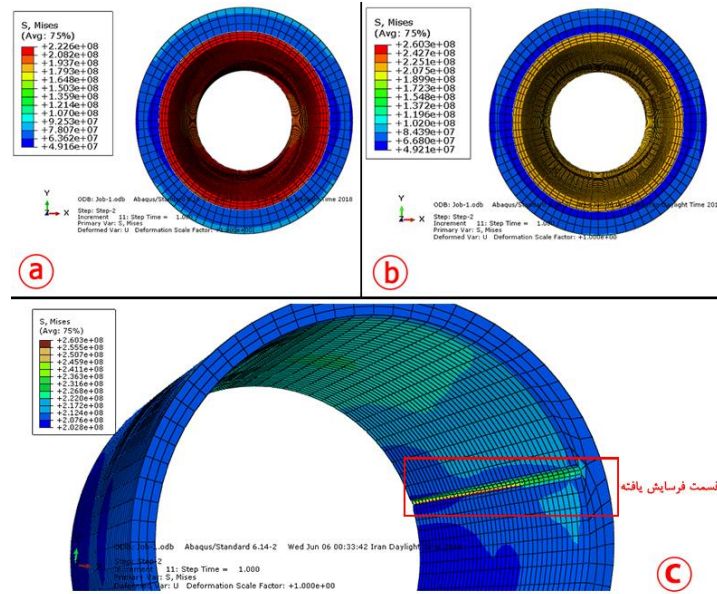
۱.۳ تأثیر فرسایش جداری بر توزیع تنش‌ها

در این قسمت، با فرض ثابت بودن همه مشخصات و تنها فرسایش قسمتی از لوله جداری و مقایسه آن با وقتی که لوله کاملاً سالم باشد، شبیه‌سازی انجام شد (مشخصات موارد مورد بررسی در جدول ۲ آورده شده است). در شبیه‌سازی این عامل، همان‌طور که در شکل‌های زیر مشخص است، ابتدا قسمتی از هندسه لوله جداری به عمق ۱ میلی‌متر حذف و در طول هندسه گسترش داده شده^۴ است؛ این موضوع وابسته به زمان نیست و در واقع تأثیر آن را بر توزیع تنش‌ها و جابجایی‌ها در هنگام وقوع فرسایش سنجیده شده است. این موضوع در واقعیت نیز به وفور بر اثر برخورد اجسام سخت همچون لوله‌های حفاری، لوله‌های جداری و ابزار درون چاهی اتفاق می‌افتد که در صنعت حفاری با در نظر گرفتن ضریب ایمنی در انتخاب ضخامت و جنس لوله‌ها نادیده گرفته می‌شود و میزان آن نیز اندازه‌گیری نمی‌شود. نتایج حاصل در شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب توزیع ناهمگون استرس فان مایزس در اطراف چاه و افزایش میزان تنش‌ها در محل فرسایش یافته و نیز میزان جابجایی سیمان اطراف لوله جداری را نشان می‌دهد که با روند کلی آن با نتایج حاصل از مطالعات شن و

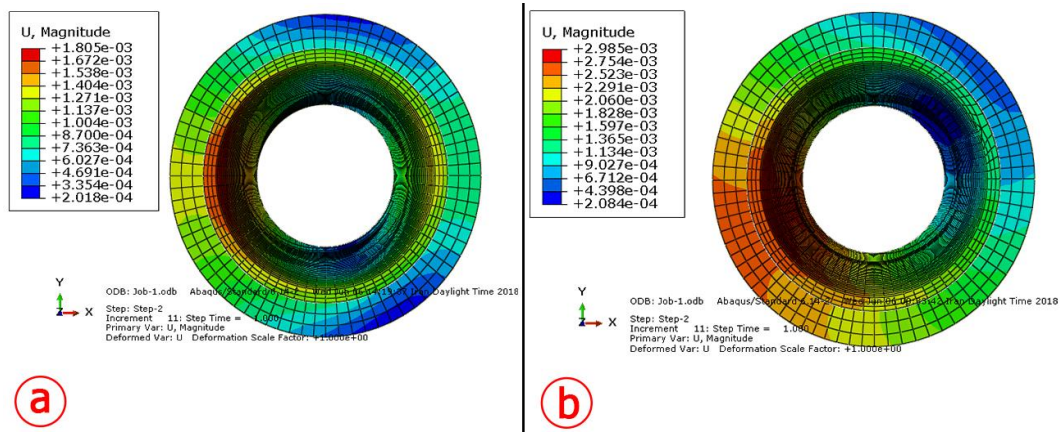
^۴ Cut Extrude

جدول ۲. مشخصات الاستیک و پلاستیک و شرایط موارد مورد بررسی در شبیه‌سازی‌ها.

شماره	مدول یانگ سیمان (Gpa)	نسبت پواسون سیمان	فشار افقی کمینه (Mpa)	فشار افقی بیشینه (Mpa)	فشار درون لوله (Mpa)	وضعیت لوله جداری
مورد اول	۲۱	۰,۲۵	۷۴	۹۰	۲۲	سالم
مورد دوم	۲۱	۰,۲۵	۷۴	۹۰	۲۲	فرسایش یافته

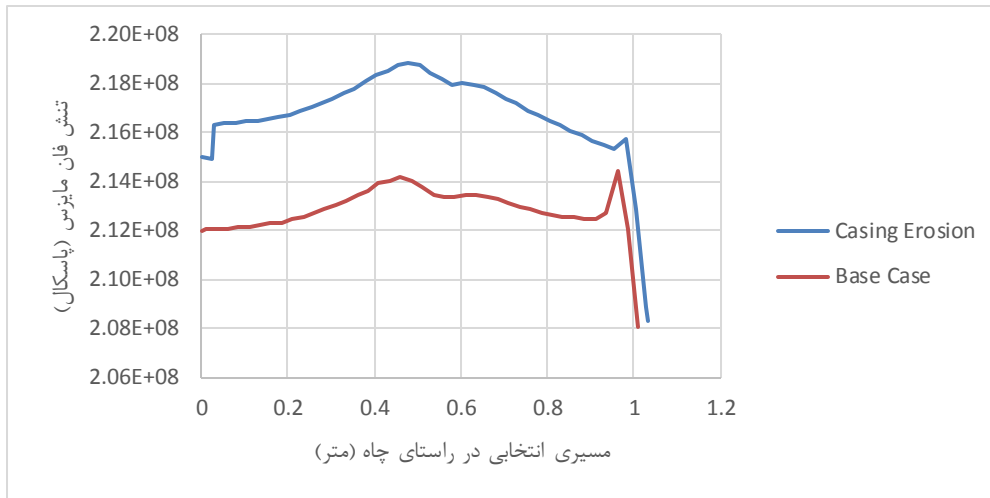


شکل ۷. مقایسه توزیع تنش فان مایزس در حالت فرسایش یافته (b و c) با حالت ایده آل (a) در شرایط یکسان. همان‌طور که مشخص است، میزان تنش فان مایزس در حالتی که لوله به صورت سطحی از درون فرسایش یافته از 2.22×10^8 به 2.6×10^8 رسیده که ۱۷٪ رشد را نشان می‌دهد.

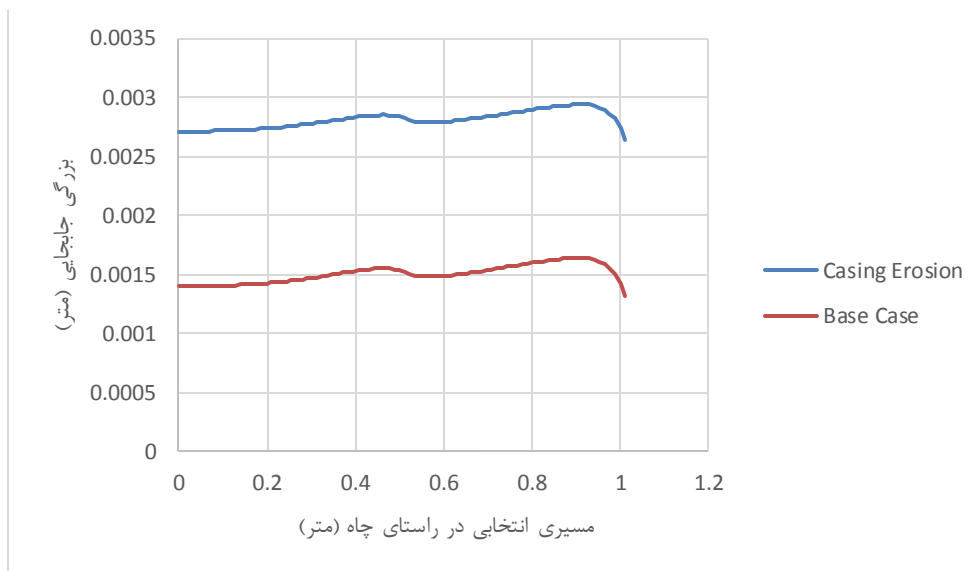


شکل ۸. مقایسه میزان جابجایی کلی درون سیمان اطراف جداری در حالت فرسایش یافته (b) با حالت ایده آل (a) در شرایط یکسان. فرسایش درون جداری همچنین باعث افزایش قابل ملاحظه جابجایی کلی سیمان اطراف جداری شده است، به‌گونه‌ای که این میزان به مقدار حدودی ۱/۲ میلی‌متر (۶۵ درصد) تغییر داشته است.

بررسی تأثیر فرسایش لوله جداری و ضریب الاستیسیته سیمان در پدیده مچالگی یکی از مبادین جنوب غربی ایران



شکل ۹. توزیع تنش فان مایزس در راستای عمق چاه و در مسیری انتخابی. همان‌طور که مشخص است فرسایش تأثیر بسزایی بر توزیع تنش فان مایزس داشته است.



شکل ۱۰. جابجایی‌های ناشی از فرسایش لوله جداری به میزان حدودی ۶۰ درصدی در این شکل در مقایسه با حالت مبنا مشهود است.

افزایش می‌یابد که مطلوب نیست اما در ضریب الاستیسیته-های سیمان بیش از ضریب الاستیسیته سازند این مقدار برعکس است. روند کلی تغییرات تنش فان مایزس در صورت ایجاد این تغییرات با نتایج مطالعات ژانگ و همکاران منطبق است (Zhang et al., 2016). جدول شماره ۳ مشخصات چهار نوع سیمان مورد استفاده در شبیه‌سازی با فرض مقدار ثابت ضریب الاستیسیته سازند ($E = 8 \text{ Gpa}$) و تغییر در ضریب الاستیسیته سیمان را نشان می‌دهد که نتایج

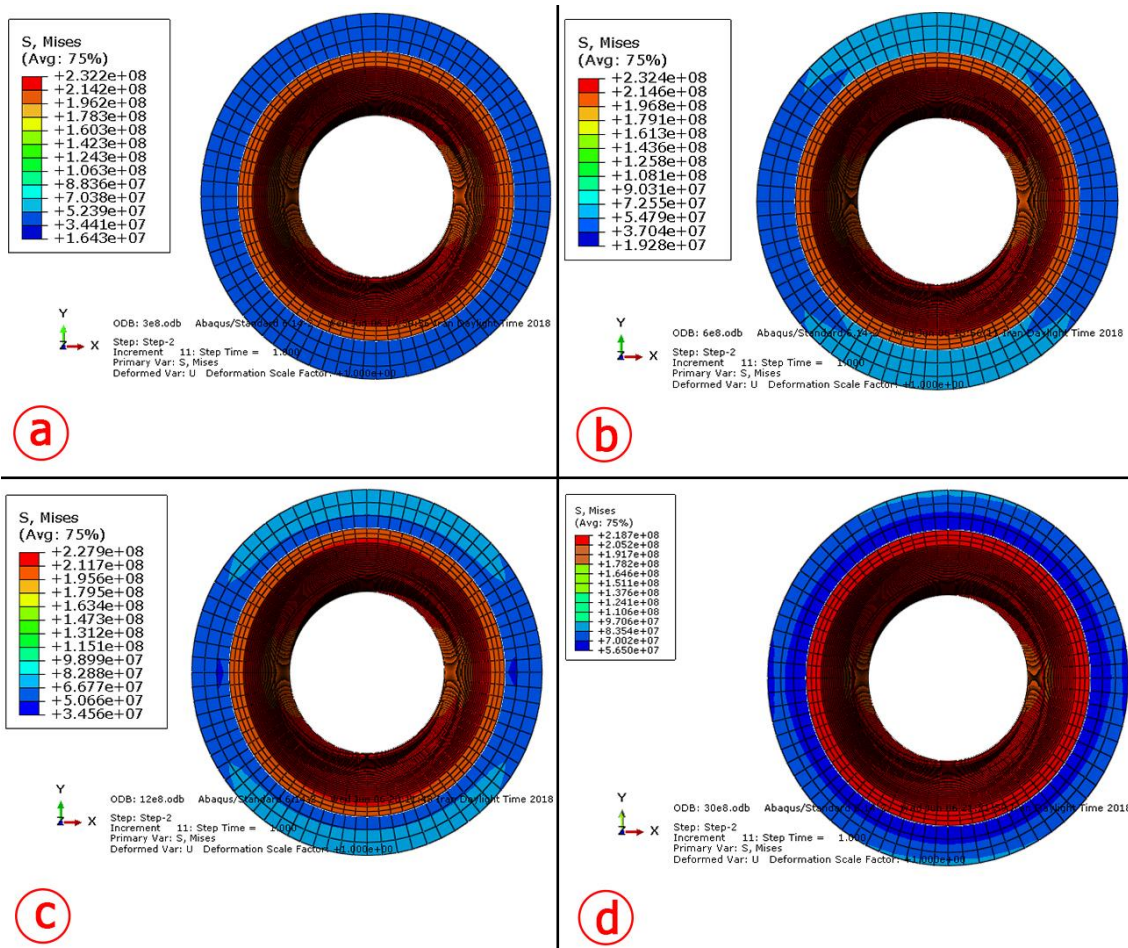
۲.۳ تأثیر ضریب الاستیسیته بر توزیع تنش‌ها

تأثیر مقدار ضریب الاستیسیته در توزیع تنش‌ها در مدل‌سازی را می‌توان به دو قسمت تقسیم‌بندی کرد. در صورتی که ضریب الاستیسیته سیمان مقداری بسیار کمتر از ضریب الاستیسیته سازند باشد، با افزایش مقدار ضریب الاستیسیته سیمان میزان استرس فان مایزس درون لوله جداری نیز

شبهه‌سازی‌ها در شکل شماره ۱۱ آورده شده است. همچنین راستایی انتخابی و در طول عمق چاه را نشان می‌دهد. شکل شماره ۱۲، نمودار کیفی توزیع تنش فان مایزس در

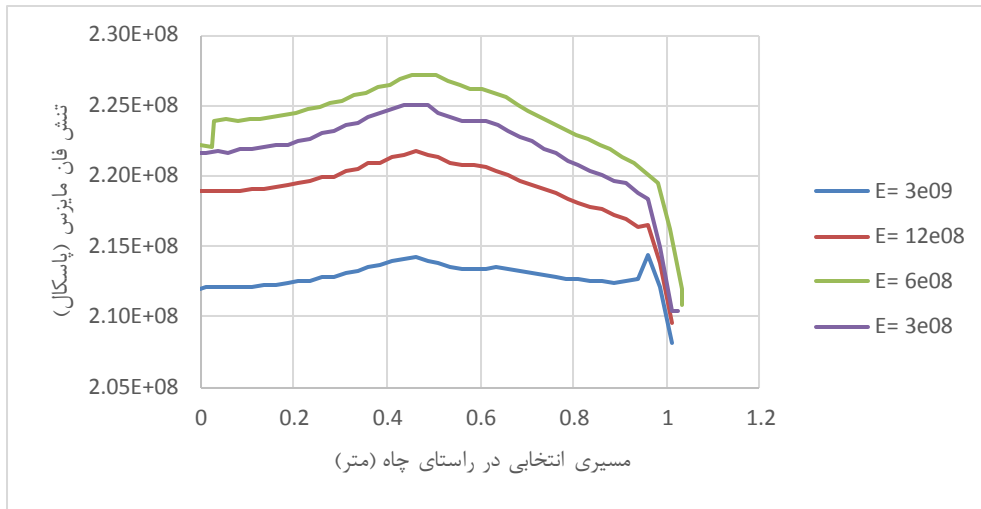
جدول ۳. داده‌های ورودی به شبهه‌سازی‌ها با فرض تغییر در ضریب الاستیک سیمان

شماره	مدول یانگ سیمان (Gpa)	نسبت پواسون سیمان	فشار افقی کمینه (Mpa)	فشار افقی بیشینه (Mpa)	فشار درون لوله (Mpa)	وضعیت لوله جداری
مورد اول	۳	۰/۲۵	۷۴	۹۰	۲۲	سالم
مورد دوم	۶	۰/۲۵	۷۴	۹۰	۲۲	سالم
مورد سوم	۱۲	۰/۲۵	۷۴	۹۰	۲۲	سالم
مورد چهارم	۳۰	۰/۲۵	۷۴	۹۰	۲۲	سالم



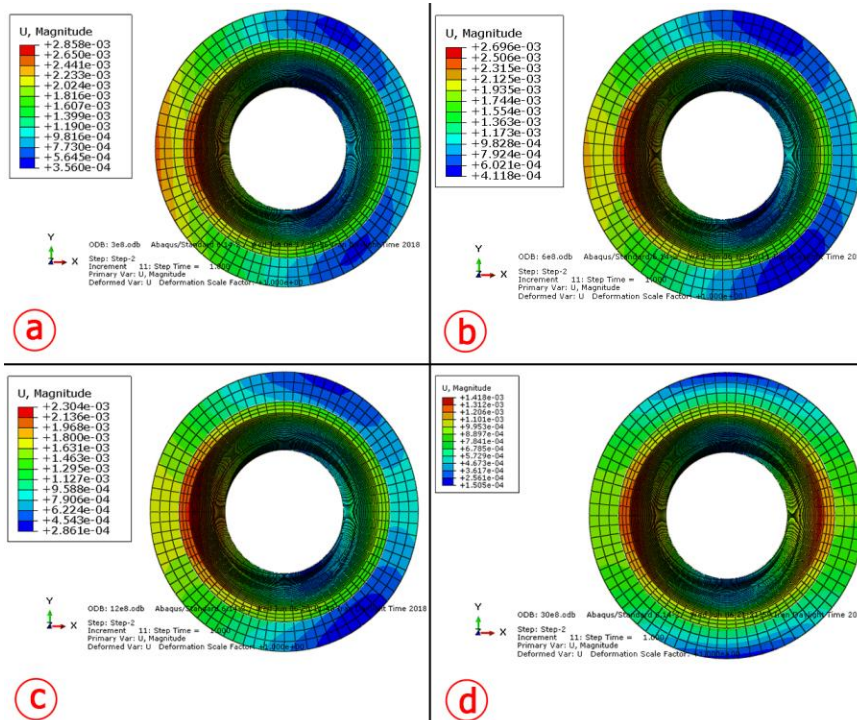
شکل ۱۱. مقایسه توزیع تنش فان مایزس در شرایط یکسان و با ضرایب الاستیسیته مختلف (به ترتیب ضرایب الاستیسیته در حالت های a, b, c و d مقدار ۳، ۶، ۱۲ و ۳۰ گیگا پاسکال). بیشینه تأثیر در توزیع تنش سیمان در این مقایسه نسبت به حالت سیمان با ضریب الاستیسیته حدود ۲۱ گیگا پاسکال (شکل شماره ۴- a) حدود ۵٪ است.

بررسی تأثیر فرسایش لوله جداری و ضریب الاستیسیته سیمان در پدیده مجالگی یکی از مبادین جنوب غربی ایران



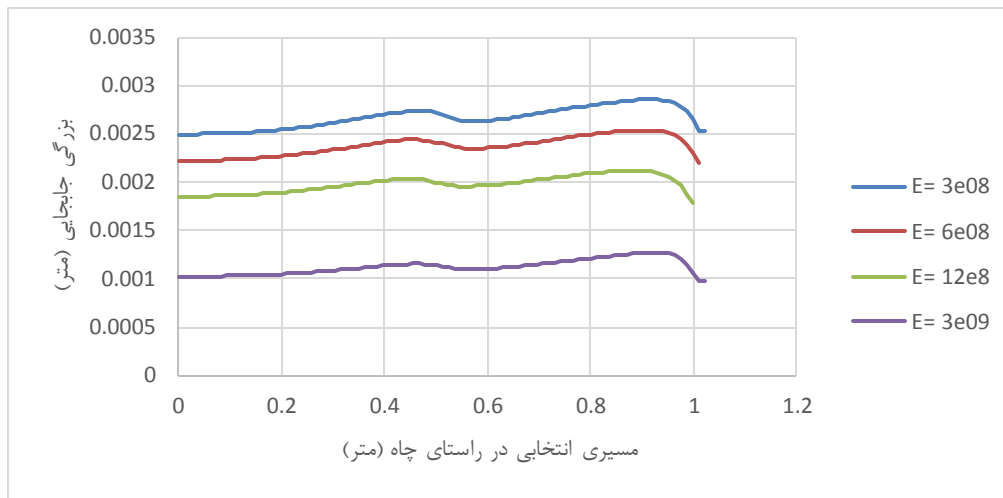
شکل ۱۲. مقایسه توزیع تنش فان مایزس در شرایط یکسان و با ضرایب الاستیسیته مختلف (ضرایب الاستیسیته سیمان به مقدار ۳، ۶، ۱۲ و ۳۰ گیگا پاسکال). تغییرات توزیع تنش فان مایزس در این حالت چیزی در حدود ۵ درصد است.

همچنین تأثیر ضریب الاستیک سیمان بر روی میزان جابجایی کل سیمان اطراف لوله جداری در شبیه‌سازی‌ها سنجیده شد که نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد (شکل شماره ۱۳ و ۱۴).



شکل ۱۳. مقایسه میزان جابجایی کل سیمان اطراف جداری در شرایط یکسان و با ضرایب الاستیسیته مختلف (به ترتیب ضرایب الاستیسیته در حالت‌های a, b, c و d مقدار ۳، ۶، ۱۲ و ۳۰ گیگا پاسکال). بیشینه تأثیر در میزان جابجایی سیمان در این مقایسه

نسبت به حالت سیمان با ضریب الاستیسیته حدود ۲۱ گیگا پاسکال (شکل شماره ۸- a) حدود ۵۸٪ است.



شکل ۱۴. مقایسه میزان جابجایی کل سیمان اطراف جداری در شرایط یکسان و با ضرایب الاستیسیته مختلف (ضرایب الاستیسیته با مقدار ۳، ۶، ۱۲ و ۳۰ گیگا پاسکال). بیشینه تأثیر در میزان جابجایی سیمان در این مقایسه نسبت به حالت سیمان با ضریب الاستیسیته حدود ۲۱ گیگا پاسکال (شکل شماره ۱۰ و در حالت مینا) حدود ۵۸٪ است.

۴. نتیجه‌گیری

عوامل مختلفی از جمله فرسایش لوله جداری و نیز کیفیت سیمان بر پدیده مچالگی نقش دارند که نتایج زیر از بررسی و شبیه‌سازی نقش هرکدام بر این پدیده در میدان مورد مطالعه به دست آمد:

الاستیسیته سازند است برعکس عمل می‌کند. همچنین میزان تأثیر ضریب الاستیک سیمان بر توزیع تنش‌های وارده بر لوله جداری با فرض عدم فرسایش لوله، در مقایسه با تأثیر لوله فرسایش یافته ناچیز است (تغییرات تنش فان مایزس در فرسایش ۱۷٪ مشاهده شد در صورتی که این میزان در تأثیر ضریب الاستیک حدود ۵٪ به دست آمد).

- با افزایش ضریب الاستیک سیمان اطراف لوله جداری، میزان جابجایی کلی آن نیز کاهش می‌یابد و این امر تابع ضریب الاستیک سازند نیست.

- فرسایش و نایکنواختی تأثیر بسیار زیادی بر افزایش ریسک مچالگی دارد، به‌گونه‌ای که با فرسایش تنها حدود ۱ میلی‌متری از ضخامت لوله، با تمرکز تنش‌ها در نقطه‌ای خاص و برهم زدن این تعادل، میزان تنش فان مایزس در آن قسمت ۱۷ درصد رشد داشت.

- فرسایش لوله همچنین موجب برهم خوردن میزان جابجایی‌های سیمان اطراف لوله نیز شد به‌گونه‌ای که این مقدار در برخی نقاط تا ۶۵ درصد افزایش داشت.

- افزایش ضریب الاستیسیته سیمان تا زمانی که مقدار آن بسیار کمتر از ضریب الاستیسیته سازند باشد موجب افزایش تنش فان مایزس وارده بر لوله جداری می‌شود اما این پدیده برای زمانی که مقدار ضریب الاستیسیته سیمان بیشتر از ضریب

۵. مراجع

- Bîrsan, M. (2007). "On Saint-Venant's principle in the theory of Cosserat elastic shells." International journal of engineering science **45**(2-8): 187-198.
- Bruno, M. S. (2002). "Geomechanical and decision analyses for mitigating compaction-related casing damage." SPE drilling & completion **17**(03): 179-188.
- Deng, J.-g. (1997). "Simulation experiment on effects of cement mantle features on casing loading." JOURNAL-UNIVERSITY OF PETROLEUM CHINA NATURAL SCIENCE EDITION **21**: 24-28.
- Fjar, E., R. M. Holt, A. Raaen, R. Risnes and P. Horsrud (2008). Petroleum related rock mechanics, Elsevier.
- Fleckenstein, W., A. Eustes, W. Rodriguez, A. Berger and F. Sanchez (2005). Cemented casing: the true stress picture. AADE National Technical Conference and Exhibition, Houston, USA, 5-7 April 2005.
- Ieşan, D. and A. Scalia (1997). "On Saint Venant's principle for microstretch elastic bodies." International journal of engineering science **35**(14): 1277-1290.
- Javidi, M., M. Saeedikhani and R. Omid (2012). "Failure analysis of a gas well tubing due to corrosion: a case study." Journal of failure analysis and prevention **12**(5): 550-557.
- Krug, G. and C. Marx (1981). "Collapse resistance of casing under pressure, loads." Oil Gas J. (United States) **79**.
- Ladeveze, P. (1985). On Saint-Venant's principle in elasticity. Studies in Applied Mechanics, Elsevier. **12**: 3-34.
- Li, X., F. Mitchum, M. Bruno, P. Pattillo and S. Willson (2003). Compaction, subsidence, and associated casing damage and well failure assessment for the Gulf of Mexico shelf Matagorda Island 623 field. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers.
- Mirzaghobanali, A., N. Fathianpour, H. Ghasemzadeh and M. Salarian (2011). "A new approach in casing collapse design using the geomechanical model and heaviest drilling fluid." Petroleum Science and Technology **29**(18): 1948-1962.
- Nur, A. and J. D. Byerlee (1971). "An exact effective stress law for elastic deformation of rock with fluids." Journal of Geophysical Research **76**(26): 6414-6419.
- Shen, Z., F. E. Beck and K. Ling (2014). "The Mechanism of Wellbore Weakening in Worn Casing-Cement-Formation System." Journal of Petroleum Engineering **2014**.
- Tao, W., Y. Shenglai, Z. Weihong, B. Wanjiang, L. Min, L. Yu, Z. Yuan, Z. Jin, Z. Wei and C. Lan (2011). "Law and countermeasures for the casing damage of oil production wells and water injection wells in Tarim Oilfield." Petroleum Exploration and Development **38**(3): 352-361.

Ward, C. and E. Andreassen (1997). Pressure while drilling data improves reservoir drilling performance. SPE/IADC drilling conference, Society of Petroleum Engineers .

Yin, F. and D. Gao (2014). "Mechanical analysis and design of casing in directional well under in-situ stresses." Journal of Natural Gas Science and Engineering **20**: 285-291.

Zhang, H., B. Sun, G. Yan, Z. Wang and M. Huang (2016). "Distribution laws and effects analysis of casing external pressure taking elastic parameters matching into account." Petroleum **2**(1): 108-115.

Zoback, M. D. (2010). Reservoir geomechanics, Cambridge University Press .

هاشمی، ص؛ سلیمانی، ب؛ ناصری کریموند، ف؛ (۱۳۹۴). "بررسی دلایل مچالگی لوله‌های جداری و تغییرات فشار سازندی زون ۴ بخش ۷ سازند گچساران در میدان نفتی مارون" پژوهش نفت ۲۵(۲): ۵۴-۶۵.