

## تحلیل پایداری دیواره چاه نفت با استفاده از نرم‌افزار کامسول

محمدسعید امینی<sup>۱</sup>، سعید نیکوسخن<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (نویسنده مسئول)

<sup>۲</sup> عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده‌ی مهندسی معدن

### چکیده

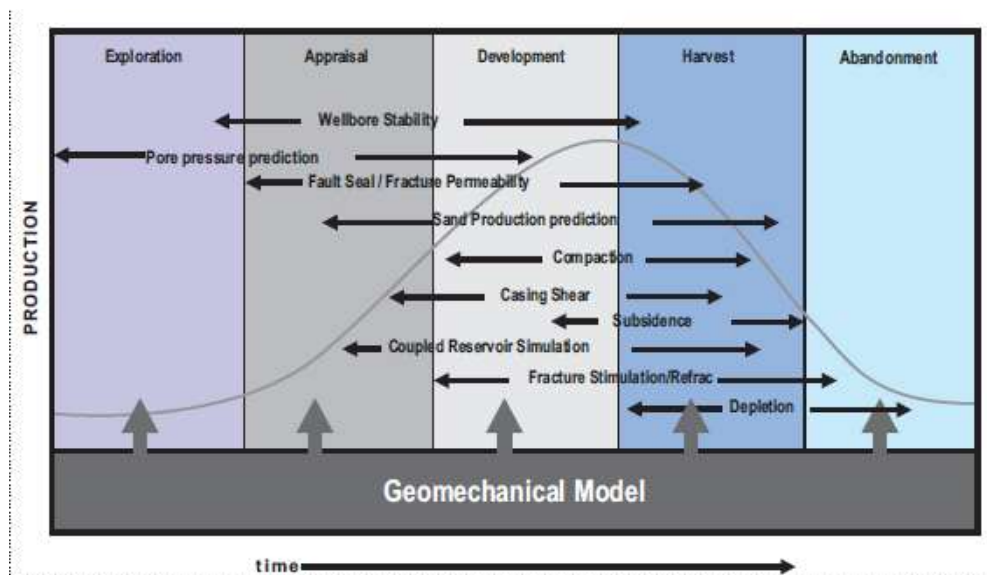
قبل از شروع حفاری، معمولاً تنش‌های موجود در سازند در وضعیت تعادل استاتیکی بوده و مقدار بسیار کمی جابه‌جایی، با فرض عدم فعالیت لرزه‌ای در اطراف سازند، وجود خواهد داشت. در چنین حالتی سه تنش اصلی به عنوان تنش‌های برجا شناخته می‌شود. بعد از حفاری، تنش‌های استاتیکی آشفته شده و موجب ناپایداری سازند و تغییر در تنش‌های برجای موجود در اطراف چاه را نشان می‌دهد. تعیین این تنش‌ها، اولین مرحله در فرآیند تحلیل پایداری دیواره چاه می‌باشد. تحلیل پایداری چاه روشی برای بهبود اقتصادی عملیات حفاری است، به منظور جلوگیری از ریزش دیواره چاه ناشی از گسیختگی برشی و شکاف هیدرولیکی ناشی از شکست کششی، طراحی فشار گل باید با دقت انجام شود. در این مقاله به تحلیل پایداری یک چاه نفت در مناطق نفتی ایران با استفاده از روش عددی نرم‌افزار کامسول پرداخته شده است. هدف از این شبیه‌سازی به دست آوردن جابه‌جایی اطراف چاه، تغییرات سرعت و فشار سیال در درون مخزن و فشار ته‌چاهی بهینه است. با توجه به نتایج بدست آمده در تحلیل پایداری چاه مورد نظر، پیش‌بینی تابع‌های شکست نشان می‌دهد که بیشترین پتانسیل ناپایداری در اطراف دهانه چاه می‌باشد. احتمال ناپایداری در اطراف دهانه چاه با افزایش فشار ته‌چاهی کاهش می‌یابد. این امر بیانگر آن است که افزایش دبی باعث کاهش فشار ته‌چاهی می‌شود، بنابراین ناحیه ناپایداری در اطراف دهانه چاه افزایش خواهد یافت.

**واژه‌های کلیدی:** تحلیل پایداری، چاه نفت، نرم‌افزار کامسول، فشار ته‌چال، تنش، جابه‌جایی، کرنش

## ۱. مقدمه

کاربرد مکانیک سنگ از سال‌ها پیش در بخشه‌ای مختلف صنعت نفت دنیا و در موضوعاتی چون شکافت هیدرولیکی، ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز، ماسه‌دهی چاه‌ها، نشست سطح زمین یا کف دریا، فعال شدن گسل‌ها، تغییر تراوایی، بهره‌دهی چاه‌ها، ازدیاد برداشت از مخازن نفت سنگین و غیره، مطرح شده و پروژه‌های زیادی در رابطه با آن تعریف گردیده است [1]. در ایران به رغم ثبت مشکلاتی نظیر مچالگی لوله جداری، تولید ماسه، بهره‌دهی چاه‌ها در مخازن شکافدار، مشکلات آینده ذخیره‌سازی گاز و غیره، مطالعات ژئومکانیکی مورد توجه جدی قرار نگرفته است. به همین دلیل اطلاعات ناچیزی در مورد خواص مکانیکی سنگ مخزن و پوش سنگ میادین هیدروکربوری موجود است. در بسیاری از میادین تولیدی کشور، هیچ‌گونه آزمایش مکانیک سنگ انجام نشده و هیچ بانک اطلاعاتی در این‌باره تهیه نگردیده است. در اکثر شرکت‌های نفتی، مراکز تحقیقاتی و دانشگاه‌های دنیا، ژئومکانیک نفت مورد توجه ویژه قرار گرفته است.

چنان که گفته شد، مکانیک سنگ در بخش‌های مختلف صنعت نفت کاربرد گسترده‌ای دارد. این قسمت بخشی از این کاربردها را عنوان کرده و مباحث شکافت هیدرولیکی، تغییر تراوایی و فعالیت گسل‌ها را با جزئیات بیشتری واکاوی می‌نماید، تا با روشن شدن اهمیت آن، شاهد حرکت جدی در زمینه جمع‌آوری اطلاعات و انجام مطالعات ژئومکانیکی در شرکت ملی نفت ایران بوده و در نهایت، مدیریت مخازن نفت و گاز کشور بهبود یابد به زبان ساده، مکانیک سنگ یا ژئومکانیک در مهندسی نفت با تأثیر تنش و مقاومت سنگ بر رفتار سازندها در نتیجه فعالیت‌های نفتی سر و کار دارد. مسائل مربوط به ژئومکانیک در تمامی دوران توسعه میادین هیدروکربوری یعنی از همان مراحل اولیه اکتشاف که سؤالات اساسی، نظیر پیش‌بینی فشار منفذی قبل از حفاری مطرح می‌شود تا مراحل ارزیابی، توسعه و استخراج میدان که اپراتور با مسائلی نظیر بهینه‌سازی پایداری چاه، جهت حفاری و پیش‌بینی بسته بودن گسل‌ها و تراوایی شکاف روبه‌رو است، عنوان می‌شود [2]. شکل (۱) نمایی از مسائل متعدد ژئومکانیکی را که در دوره‌های مختلف اکتشاف، توسعه و ترک مخزن مطرح است، نشان می‌دهد.

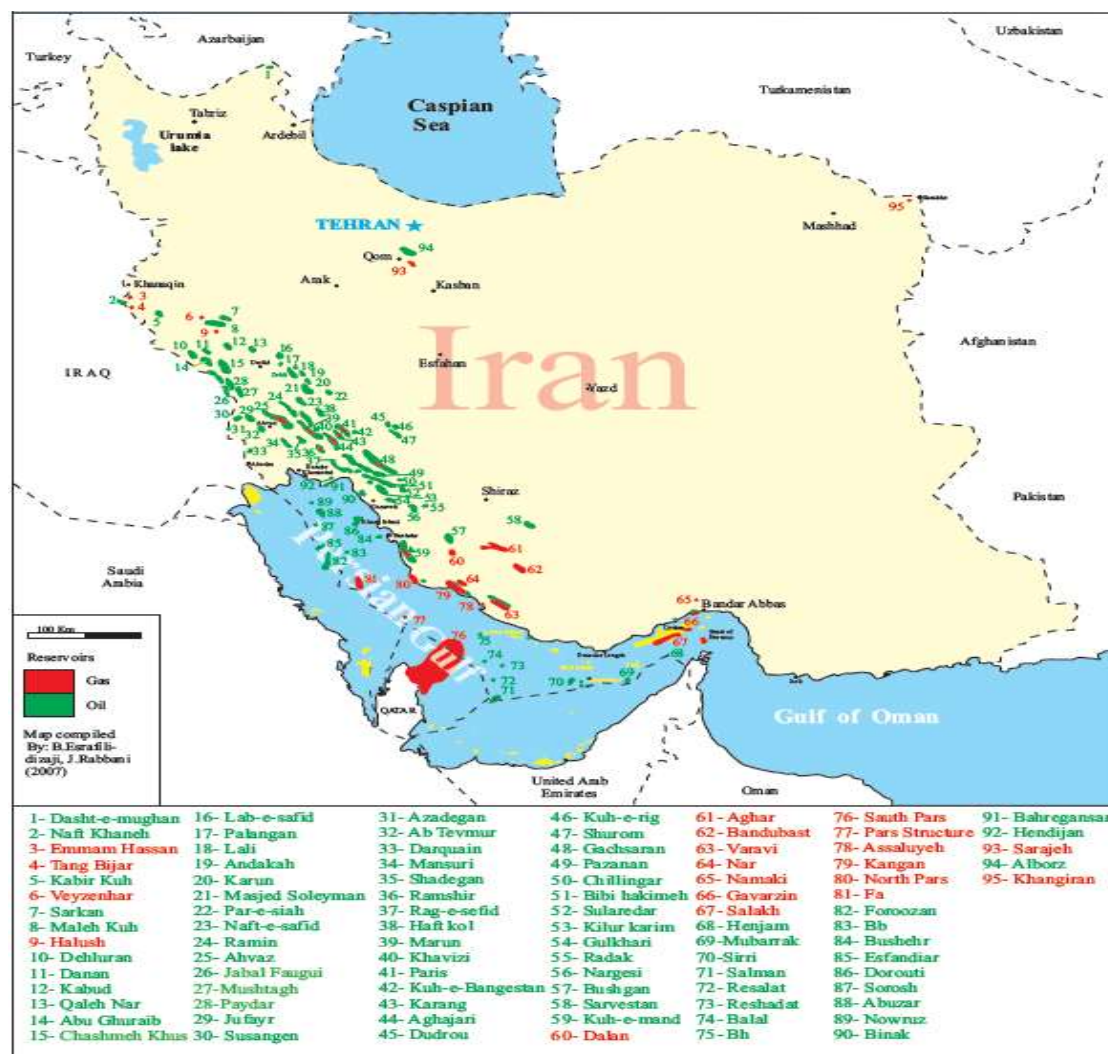


شکل ۱- نمایی از مسائل متعدد ژئومکانیکی در دوره‌های مختلف اکتشاف، توسعه و ترک مخزن [۲]

علاوه بر اهمیت زیاد ژئومکانیک در مدیریت مخزن و در مسایلی نظیر پایداری چاه، تولید ماسه، شکاف هیدرولیکی و نشست زمین، اخیراً علاقه روز افزونی به توسعه رابطه بین شبیه‌سازهای جریان سیال و مدل‌های ژئومکانیکی نیز به وجود آمده است [۲].

محققان زیادی به تحلیل پایداری چاه‌های نفتی پرداخته‌اند: محمد دانیالی و همکاران به تحلیل پایداری دیواره چاه نفت در حفاری فروتعدالی به وسیله نرم افزار آباکوس به تحلیل استاتیکی و بررسی پایداری دیواره چاه در عملیات حفاری فروتعدالی در سنگ مخزن آسماری میدان نفتی پرداخته شده است. بر اساس نتایج مدلسازی‌های انجام شده مشخص شده است که، اگر فشار گل اعمال شده به این چاه کمتر از ۲۲ مگاپاسکال باشد چاه وارد ناحیه پلاستیک شده و دیواره چاه ریزش می‌کند [۳]. شیرین آبادی و همکاران نیز به تحلیل پایداری چاه در یکی از میادین نفت ایران پرداختند نتایج حاصل از بررسی نمودارها نشان می‌دهد که در چاه قائم و افقی شیل ناپایدارتر و کربنات پایدارتر از بقیه لایه‌ها هستند و همچنین چاه قائم (برای لایه های یکسان) نسبت به چاه افقی وضعیت پایداری بهتری نشان می‌دهد [۴]. کوچکی و همکاران به تحلیل پایداری چاه نفت سازند آسماری مخزن کوپال پرداختند که فشار و وزن گل حفاری در آغاز حرکت پلاستک دیواره چاه و همچنین آغاز گسیختگی برشی در دیواره چاه، برای سازند سنگ آهک، مخزن به دست آمده است. همچنین تحلیل پایداری چاه در امتدادهای قائم، تنش افقی حداقل و تنش افقی حداکثر، انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد، مقدار حداکثر جابجایی در جهت افقی، در هنگام حفاری در امتداد قائم، تنش افقی حداقل و تنش افقی حداکثر بدست آمده است [۵].

در حال حاضر تعداد ۱۴۵ میدان هیدروکربنی و ۲۹۷ مخزن نفتی و گازی در ایران کشف شده است، که تعداد ۱۰۲ میدان نفتی و ۴۳ میدان گازی می‌باشند. از تعداد کل مخازن، ۲۰۵ مخزن نفتی و ۹۲ مخزن گاز طبیعی می‌باشند. از این میدان‌ها، تعداد ۷۸ میدان، فعال می‌باشند بیشتر میدان‌ها کشف شده (۱۴۰ میدان) در حوضه زاگرس و خلیج فارس (جنوب غربی ایران) می‌باشند [۶]. در این تحقیق به بررسی یکی از میادین مهم نفتی در غرب ایران به منظور تحلیل پایداری چاه با سازند آسماری از دهانه چاه تا ۱۵۰ متر از عمق با نرم‌افزار عددی کامسول پرداخته شده است. شکل (۲) زیر نقاط مربوط به میادین نفتی ایران را نشان می‌دهد.



شکل ۲- نقشه میادین نفتی و گازی موجود در ایران [۷]

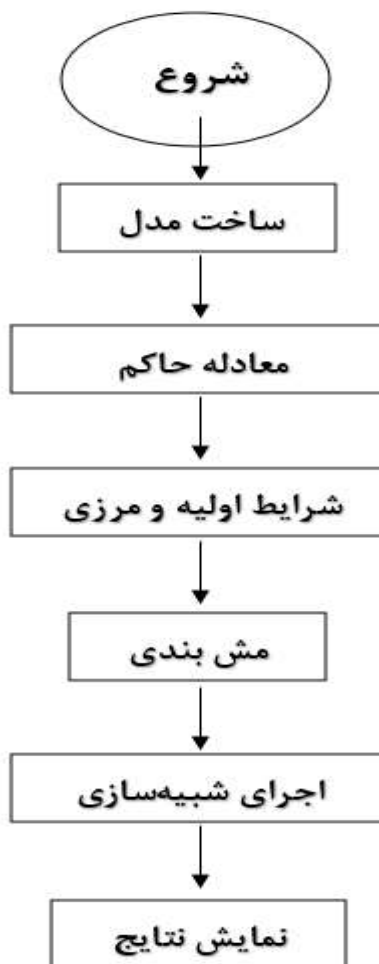
## ۲. پایداری چاه

تحلیل پایداری چاه روشی برای بهبود اقتصادی عملیات حفاری است، به منظور جلوگیری از ریزش دیواره چاه ناشی از گسیختگی برشی و شکاف هیدرولیکی ناشی از شکست کششی، طراحی فشار گل باید با دقت انجام شود. به دلیل کاهش فشار مخزن و کم شدن شاخص بهره‌دهی، عملیات شکست هیدرولیکی برای بالا بردن تراوایی و تولید از چاه انجام می‌شود. طی این عملیات سیال به خصوص با فشار مورد نیاز به منظور ایجاد شکاف در دیواره بدون چاه تزریق می‌شود. در این حالت فشار شکست برشی و کششی با استفاده از پارامترهای مکانیک‌سنگی و اطلاعات به دست آمده از نمودارهای چاه پیمایی و همچنین تنش بر جای عمودی و افقی حداقل و حداکثر باید تعیین شود [۸].

## ۳. نرم افزار کامسول

نرم‌افزار کامسول یک ابزاری بر پایه روش المان محدود می‌باشد که برای شبیه‌سازی و حل معادلات دیفرانسیل جزئی به کار می‌رود. نرم‌افزار کامسول دارای هشت مدول بوده که سبب افزایش قابلیت آن شده است که این مدول‌ها عبارتند از: صوتی،

مهندسی شیمی، زمین شناسی، انتقال حرارت و مکانیک‌های ساختاری. همچنین نرم‌افزار کامسول دارای فایل‌های مربوط به مواد مختلف بوده و می‌تواند در کنار نرم‌افزارهایی از قبیل نرم‌افزار اتوکد، سالی‌دورد و غیره به کار گرفته شود. آنالیزهای عددی ارائه شده در این قسمت با استفاده از نرم‌افزار کامسول بوده که به منظور پیش‌بینی ناپایداری اطراف چاه استفاده شده است. در این نرم‌افزار چندین مدل رفتاری از قبیل موهر-کلمب، دارگر-پراگر، هوک برون و ترسکا برای مواد الاستیک، شکننده و پلاستیک وجود دارد. فرآیندهای مورد نیاز برای مدل‌سازی پایداری چاه در شکل (۳) زیر آورده شده است [۹].



شکل ۳- فلوجارت فرآیند کلی حل مسئله در کامسول [۹]

#### ۴. تعیین پارامترهای مکانیک سنگ با استفاده از داده‌های نمودارگیری

پارامترهای ژئومکانیکی مخزن حاصل از بررسی‌های دینامیکی با استفاده از لاگ صوتی (که شامل زمان گذر موج فشاری و برشی) و لاگ چگالی به‌دست می‌آیند. با اندازه‌گیری خواص یاد شده پارامترهای ژئومکانیکی سازند به شرح زیر محاسبه می‌شوند [۱۰] و [۱۱]. که در جدول (۱) آورده شده است.

الف) مدول یانگ دینامیکی:

$$E_d = \frac{9 k_p V_p^{\gamma}}{\gamma K + \rho V_p^{\gamma}} = \left[ \frac{\rho}{\Delta t_p^{\gamma}} \right] \left[ \frac{\gamma \Delta t_p^{\gamma} - \xi \Delta t_s^{\gamma}}{\Delta t_p^{\gamma} - \Delta t_s^{\gamma}} \right] \times 1.34 \times 10^{11} \quad (1)$$

ب) مدول بالک دینامیکی:

$$K_d = \rho \left[ V_p^{\gamma} - \frac{\xi}{\gamma} V_s^{\gamma} \right] = \rho \left[ \frac{\gamma \Delta t_p^{\gamma} - \xi \Delta t_s^{\gamma}}{\gamma \Delta t_p^{\gamma} - \Delta t_s^{\gamma}} \right] \times 1.34 \times 10^{11} (Psi) \quad (2)$$

ج) مدول برشی دینامیک:

$$G_d = \rho V_p^{\gamma} = \left[ \frac{\rho}{\Delta t_p^{\gamma}} \right] \times 1.34 \times 10^{11} (Psi) \quad (3)$$

د) ضریب پواسون:

$$V_d = \frac{\frac{1}{\gamma} \left[ \frac{V_s^{\gamma}}{V_p^{\gamma}} \right] - 2}{\frac{1}{\gamma} \left[ \frac{V_s^{\gamma}}{V_p^{\gamma}} \right] - 1} = \frac{1}{\gamma} \left[ \frac{V_p^{\gamma} - 2V_s^{\gamma}}{V_p^{\gamma} - V_s^{\gamma}} \right] \quad (4)$$

در این روابط زمان گذر موج فشاری و برشی برحسب میکرو ثانیه بر فوت، چگالی بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب است. برای تبدیل مدول یانگ دینامیکی به استاتیکی از رابطه زیر استفاده می کنیم [۱۰]:

$$E_{Static} = 0.4145 E_{Dynamics} - 1.0593 \quad (5)$$

خواص	پارامتر	فرمول
الاستیک	ضریب پواسون و مدول یانگ و مدول بالک و مدول برشی دینامیکی	$v_d = \frac{1}{2} \left[ \frac{\left[ \frac{V_s^{\gamma}}{V_p^{\gamma}} \right] - 2}{\left[ \frac{V_s^{\gamma}}{V_p^{\gamma}} \right] - 1} \right] = \frac{1}{2} \left[ \frac{V_p^{\gamma} - 2V_s^{\gamma}}{V_p^{\gamma} - V_s^{\gamma}} \right]$
		$G_d = \rho V_p^{\gamma} = \left[ \frac{\rho}{\Delta t_p^{\gamma}} \right] \times 1.34 \times 10^{11} (Psi)$
		$E_d = \frac{9 k_p V_p^{\gamma}}{\gamma K + \rho V_p^{\gamma}} = \left[ \frac{\rho}{\Delta t_p^{\gamma}} \right] \left[ \frac{\gamma \Delta t_p^{\gamma} - \xi \Delta t_s^{\gamma}}{\Delta t_p^{\gamma} - \Delta t_s^{\gamma}} \right] \times 1.34 \times 10^{11}$
		$K_d = \rho \left[ V_p^{\gamma} - \frac{\xi}{\gamma} V_s^{\gamma} \right] = \rho \left[ \frac{\gamma \Delta t_p^{\gamma} - \xi \Delta t_s^{\gamma}}{\gamma \Delta t_p^{\gamma} - \Delta t_s^{\gamma}} \right] \times 1.34 \times 10^{11} (Psi)$

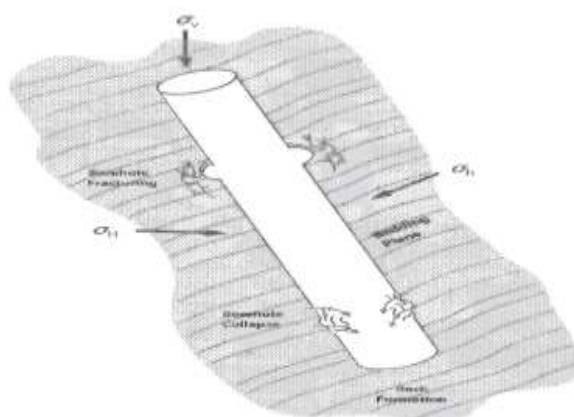
$\sigma_v = \rho gh$	تنش‌های عمودی و افقی مینیم و ماکسیمم	تنش برجا
$\sigma_x = \frac{\nu}{(1-\nu)}(\sigma_v - \alpha_v p_v) + \alpha_v p_v + \frac{E_{sta}}{(1-\nu^2)}(\epsilon_x + \nu\epsilon_v)$		
$\sigma_y = \frac{\nu}{(1-\nu)}(\sigma_v - \alpha_v p_v) + \alpha_v p_v + \frac{E_{sta}}{(1-\nu^2)}(\epsilon_y + \nu\epsilon_v)$		
$P_{pg}$ گرایان منفذی فشار گرایان $OBG P_{pg}$ و گرایان تنش روباره نرمال منفذی فشار $\Delta t$ گرایش تراکم نرمال $NCT$ و فشاری اوج عبور زمان	$p_{pg} = OBG - (OBG - P_{pg}) \left( \frac{NCT}{\Delta t} \right)^*$	گرایان فشار منفذی

جدول (۱): تعیین پارامترهای سنگ و مخزن با استفاده از روابط الاستیک

## ۵. وضعیت تنش در اطراف دیوار چاه

سازند قبل از حفاری پایدار است. حفر چاه و به کار بردن سیالات حفاری و تکمیل چاه، موجب بروز تغییراتی در سازند گشته و زمینه‌ی ناپایداری و ریزش چاه را فراهم می‌آورد. بنابراین نیاز روزافزون به پیشرفت مدل‌های ریاضی به منظور شبیه‌سازی فیزیکی فرآیند حفاری تولید، احساس می‌شود. تولید نفت و گاز به سمت وضعیت‌های سخت و پیچیده‌ی زمین‌شناسی، مانند حفاری در آب‌های عمیق و مخازن فشار بالا پیش می‌رود. از این‌رو بالا بردن آگاهی افزایش دقت در رابطه با پایداری چاه ضروری است. دلایل اصلی ناپایداری عبارتست از: که در شکل (۴) نشان داده شده است [۱].

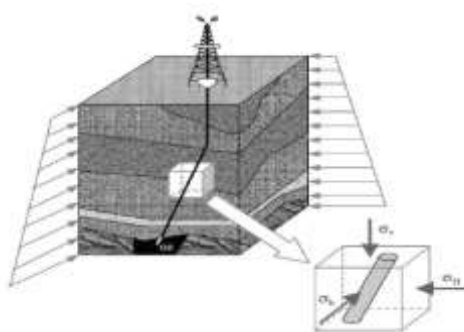
- فشار منفذی بالا در سازند
- آشفته‌گی ایجاد شده بر اثر حفاری در سازندهای پایدار
- واکنش‌های شیمیایی احتمالی میان سازند و مخزن و سیالات حفاری و تکمیل چاه



شکل ۴- چاه انحرافی، جهت چاه با جهت تنش‌های برجا و صفحه لایه‌بندی سنگ ناهمسانگرد یکسان نیست [۱]

## ۶. وضعیت تنش در اطراف چاه

قبل از شروع حفاری، معمولاً تنش‌های موجود در سازند در وضعیت تعادل استاتیکی بوده و مقدار بسیار کمی جابه‌جایی، با فرض عدم فعالیت لرزه‌ای در اطراف سازند، وجود خواهد داشت. در چنین حالتی سه تنش اصلی به عنوان تنش‌های برجا شناخته می‌شود. بعد از حفاری، تنش‌های استاتیکی آشفته شده و موجب ناپایداری سازند و تغییر در تنش‌های برجای موجود در اطراف چاه را نشان می‌دهد. تعیین این تنش‌ها، اولین مرحله در فرآیند تحلیل پایداری دیواره چاه می‌باشد [۱]. به منظور مطالعه تنش‌های موجود در اطراف چاه، تنش‌های موجود در سازند قبل و بعد از حفاری در شکل (۵) نشان داده شده است. بطور کلی دو دسته از تنش‌ها در طول حفاری در درون سازند وجود دارند که باید مورد تحلیل قرار گیرند، این دسته‌ها عبارت‌اند از: (۱) تنش‌های برجا و (۲) تنش‌های اطراف چاه [۱].

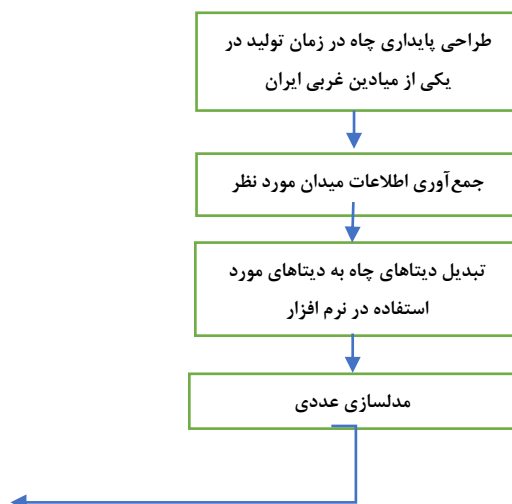


شکل ۵- شماتیکی از وضعیت تنش‌های برجا در اطراف چاه [۱]

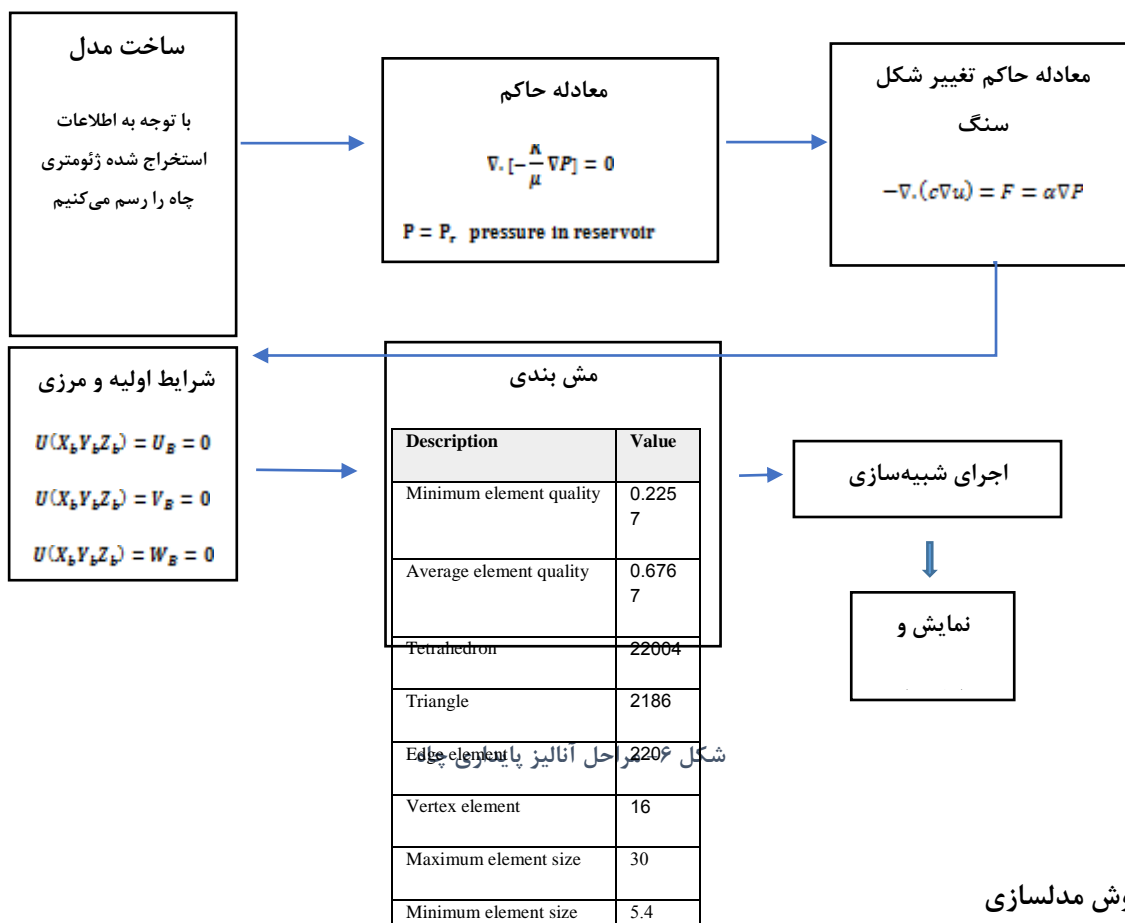
## ۷. آنالیز پایداری چاه با استفاده از روش المان محدود

وزن لایه‌های رسوبی در بالای سازند، بخشی توسط ماتریکس سنگ و بخشی دیگر توسط سیال تحت فشار موجود در فضاهای خالی تحمل می‌شود در صورتی که در اثر تولید نفت فشار درون مخزن کاهش پیدا کند، بیشتر بارها به ماتریکس سنگ منتقل شده و بنابراین تنش موثر در درون سنگ افزایش پیدا می‌کند که سبب فشرده شدن سازند خواهد شد. این فشردگی در بعضی مواقع می‌تواند سبب جابه‌جایی‌هایی چشمگیری در هر دو جهت عمودی و افقی می‌شود. برای مدلسازی اثرهای ژئومکانیکی ایجاد شده در اثر تولید از مخزن و وابستگی جریان سیال منفذی و تغییر شکل ماتریکس سنگ از روش المان محدود استفاده کردیم. روابط ساختاری و معادله حاکم جریان سیال با روابط تنش-کرنش کوپل می‌شوند. با شرایط اولیه و مرزی مناسب، این معادلات به عنوان معادلات دیفرانسیل جزئی در نرم‌افزار کامسول حل می‌شوند [۹].

از معیار موهر-کلمب به همراه مدل الاستوپلاستیک برای مدلسازی استفاده شده است. بنابراین نرم‌افزار کامسول به طور عددی پایداری چاه را در حین عملیات تولید از مخزن در حالت سه بعدی شبیه‌سازی می‌کند. شکل (۶) نمای کلی تحلیل را نشان می‌دهد.







## ۸. روش مدل سازی

شبکه هندسه مدل شده مربوط به یک چاه عمودی است. این چاه عمودی در ۱۵۰ متری مخزن طراحی شده است. سیال از مخزن به سمت چاه جریان دارد و تنها از طریق چاه خارج می شود. جابه جایی در اطراف مخزن محدود شده است اما دیواره های چاه به طور آزادانه ای تغییر شکل می کنند. هدف از این شبیه سازی به دست آوردن جابه جایی اطراف چاه، تغییرات سرعت و فشار سیال در درون مخزن و فشار ته چاهی بهینه در زمان تولید از ناپایداری چاه و به دنبال آن تولید شن جلوگیری کند. علاوه بر این موارد می توان ناحیه های پایدار و ناپایدار در اطراف چاه را شناسایی کرد. با توجه به اطلاعات بدست آمده از یکی از میادین نفتی ایران و دستیابی به لاگ یک چاه از یک شرکت با توجه به روابط گفته شده به بدست آوردن هریک از پارامترها با فرمول نویسی در نرم افزار اکسل پرداختیم و مشخصات فیزیکی سنگ اطراف چاه و غیره را بدست آوردیم تا با استفاده از این اطلاعات بتوانیم مدل مناسبی با توجه به شرایط موجود بدست آوریم. بعد از مدل سازی و تعیین خصوصیات که در جدول (۲) آورده شده است و اعمال خصوصیات بدست آمده به تعیین معادلات حاکم موجود در نرم افزار میپردازیم و مش بندی را به مدل ساخته شده اعمال می کنیم.

جدول ۲- پارامترهای مورد نظر برای یک نقطه از تحلیل پایداری چاه

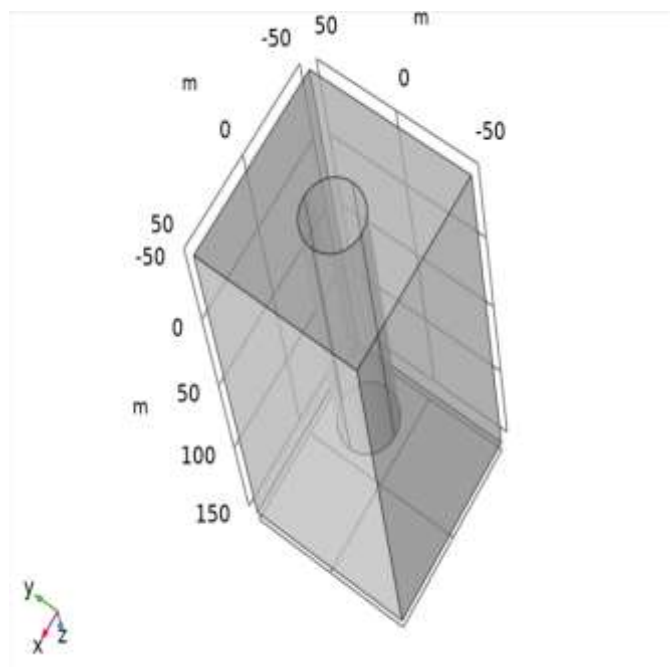
E dyn (Mpa)	E static (Mpa)	friction angle (D)	P <sub>w</sub> (psi/ft)	S <sub>v</sub> (psi)	S <sub>h</sub> max (psi)	S <sub>h</sub> min (psi)	pp (psi)
124	49	47	1.8614	13069.9943	7028.0620	6237.9894	5262.8429

بعد از اعمال مدل سازی و مشخص کردن مراحل حل مسئله و اعمال شرایط مرزی و مش بندی و اعمال تنش های مینیمم و ماکسیمم به اجرای نرم افزار و شروع ران از نرم افزار پرداخته شده است. بعد از اجرای کامل مراحل ران گیری از نرم افزار در بخش های بعدی خروجی های مورد نیاز، برای تحلیل آنالیز ناپایداری چاه توضیح داده شده است.

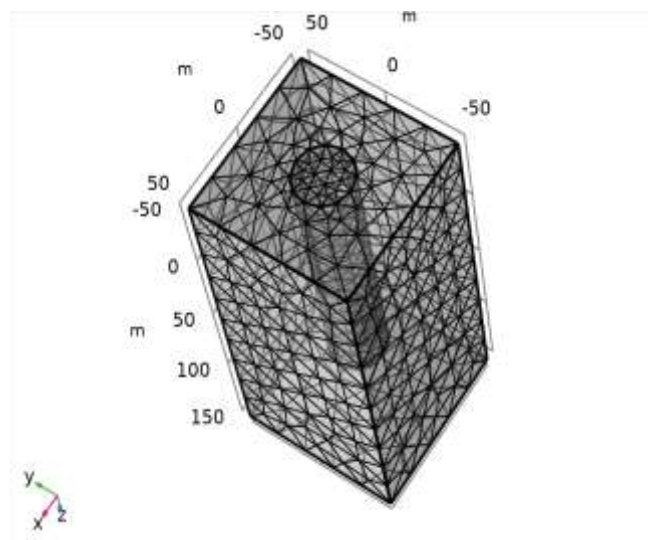
## ۹. تحلیل نتایج

۹.۱. ژئومتری مدل ساخته شده در نرم افزار

با توجه به اطلاعات موجود ارتفاع چاه و قطر چاه و باقی مشخصات و رسم ژئومتری چاه خواهیم پرداخته شده است که در شکل های (۷) و (۸) به ترتیب ژئومتری و نوع مش بندی نشان داده شده است.



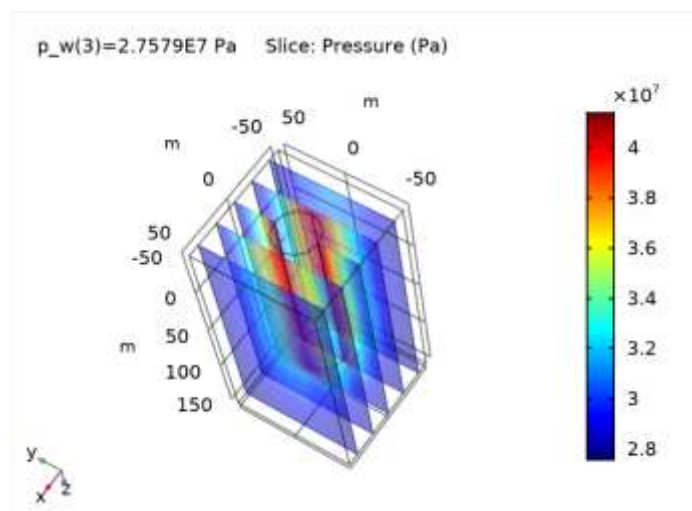
شکل ۷- ژئومتری مدل ساخته شده در نرم افزار کامسول



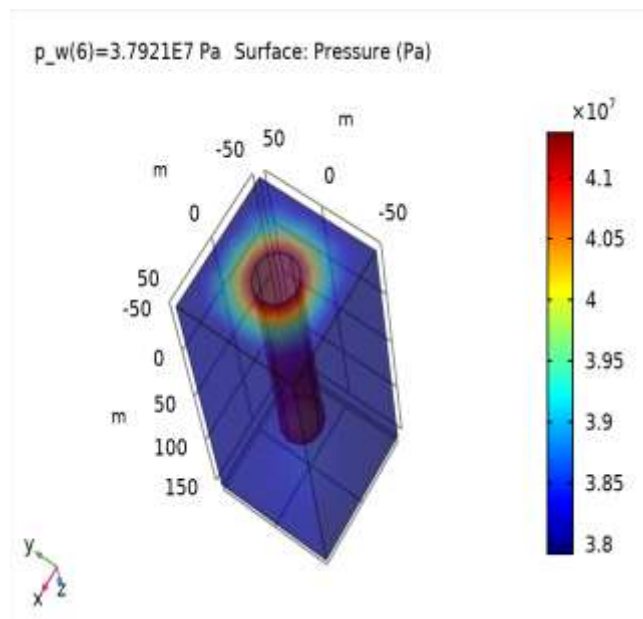
شکل ۸- مش بندی مدل

## ۹.۲. خروجی های نرم افزار

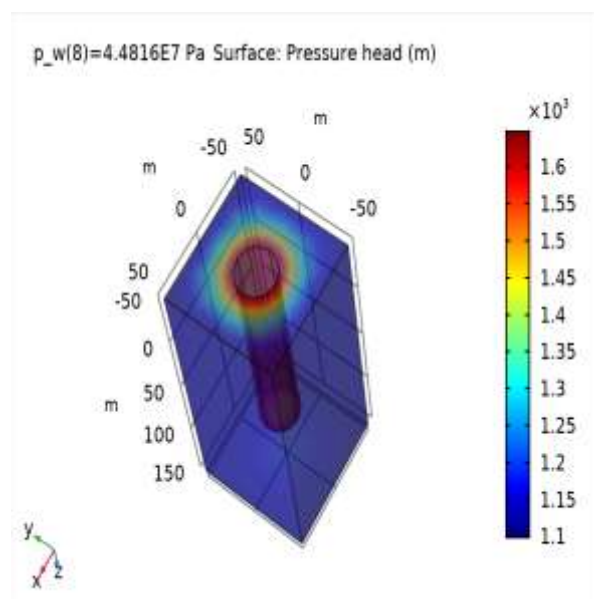
با توجه به هدف تحلیل چاه نفت مورد نظر شرایط فشار وارده به دیواره چاه در سه حال فشار سیال ۲,۷ پاسکال، ۳,۷ پاسکال و ۴,۵ پاسکال مورد بررسی قرار گرفته است که با توجه به شکل (۹) در فشار سیال ۲,۷ پاسکال میزان فشار در نیود سیستم نگهداری چاه را ناپایدار نشان داده و امکان ریزش چاه وجود دارد. در شکل های (۱۰) و (۱۱) که به ترتیب فشار سیال ۳,۷ و ۴,۵ پاسکال را نشان می دهد نیز میزان توضیع فشار در نبود سیستم نگهداری بالا بوده و امکان ریزش چاه وجود دارد.



شکل ۹- توزیع فشار سیال ۲,۷ pa در امتداد چاه

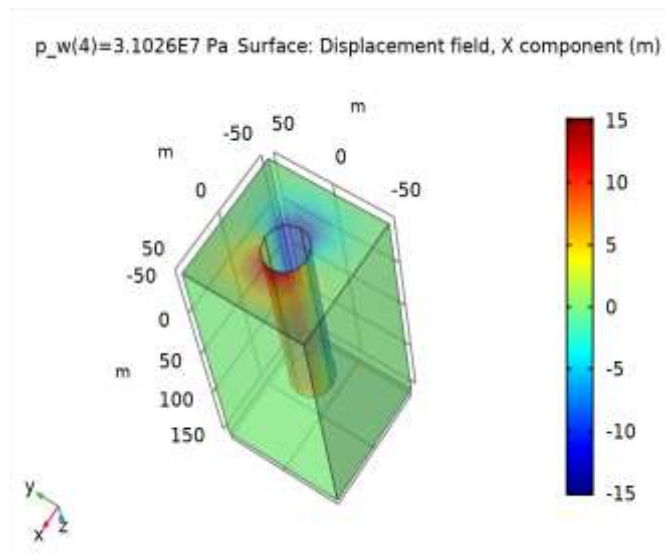


شکل ۱۰- توزیع فشار سیال ۳,۷ pa در ابتدای چاه

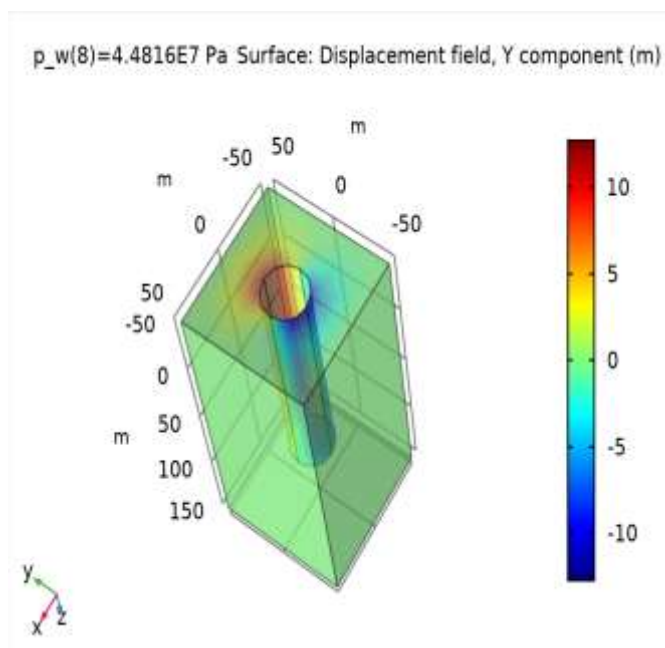


شکل ۱۱- توزیع فشار سیال ۴,۵ pa در ابتدای چاه

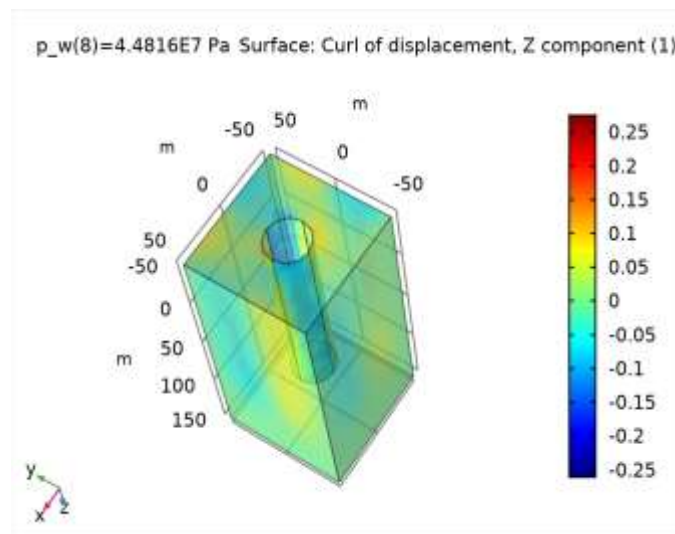
میزان جابه‌جایی در چاه با استفاده از تحلیل نرم‌افزار در سه محور  $X$ ،  $Y$ ،  $Z$  بدست آمده است که به ترتیب در شکل‌های (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) نمایش داده شده است. میزان جابه‌جایی در فشار ۳,۱ پاسکال در محور  $X$ ، همانطور که در شکل (۱۲) نشان داده شده است جهت جابه‌جایی و ناپیاری چاه را نشان می‌دهد و همینطور در فشار ۴,۴۸ پاسکال در محور  $Y$  و  $Z$  میزان جابه‌جایی و ناپایداری در حین انجام عملیات حفاری نشان داده شده است. همانطور که در شکل‌ها مشخص است، بیشترین جابه‌جایی در اطراف دهانه چاه بوده است. و این مقدار جابه‌جایی‌ها با دور شدن از دهانه چاه کاهش یافته و به صفر می‌رسد.



شکل ۱۲- میزان جابه‌جایی با فشار سیال ۳,۱۰۰ در محور x

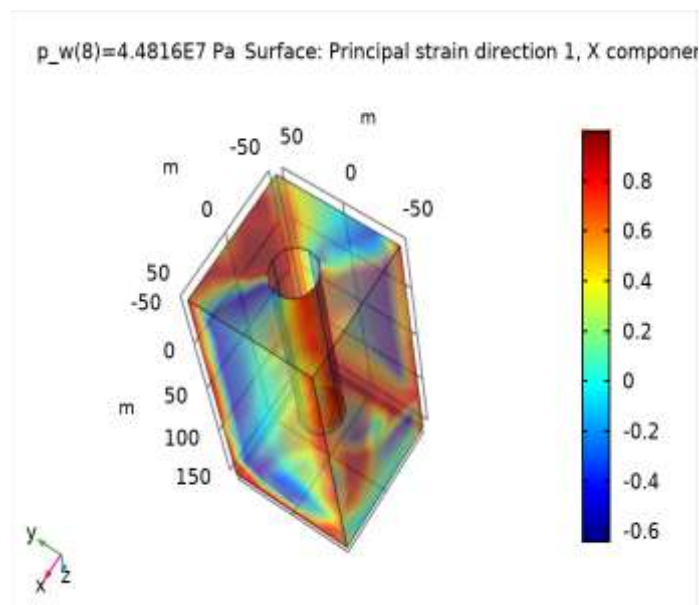


شکل ۱۳- میزان جابه‌جایی با فشار سیال ۴,۴۸ pa در محور y

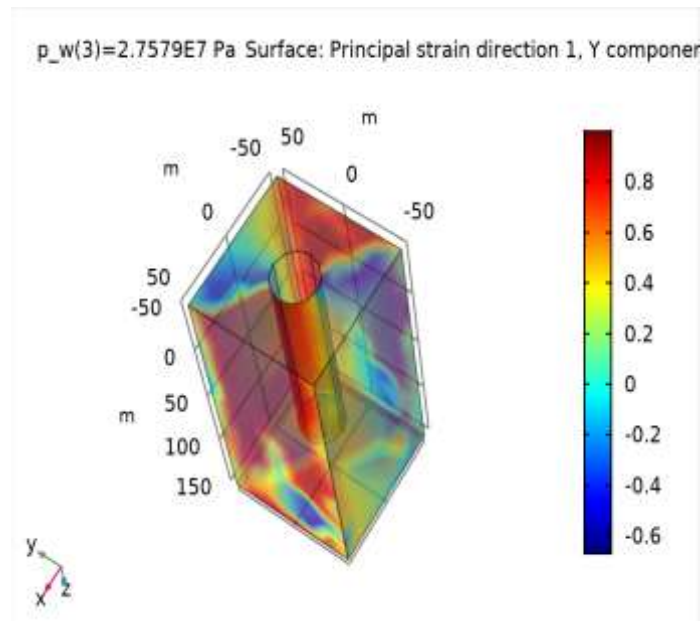


شکل ۱۴- میزان جابه‌جایی با فشار سیال ۴,۴۸ pa در محور z

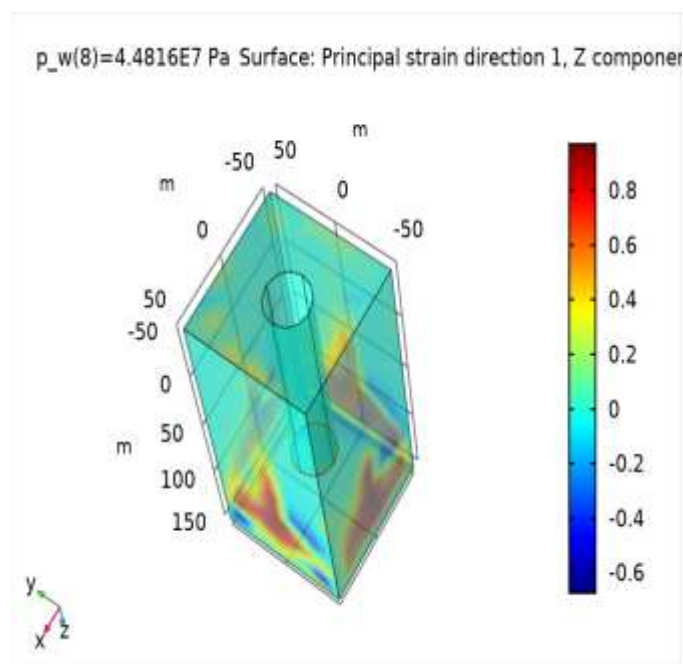
همینطور شکل‌های (۱۵)، (۱۶) و (۱۷) نیز میزان کرنش‌های اصلی در جهت  $x$ ،  $y$  و  $z$  را نشان می‌دهد. همینطور جابه‌جایی کلی در اطراف دهانه چاه را برای فشار ته چالی آورده شده است. که در این اشکال نشان داده شده است. نواحی اطراف چاه دارای بیشترین جابه‌جایی بوده و تمایل به ناپایداری دارند. مشاهده می‌شود که با افزایش فشار ته چالی جابه‌جایی کمتری در اطراف دهانه چاه اتفاق می‌افتد.



شکل ۱۵- میزان کرنش با فشار سیال ۴,۴۸ pa در محور x

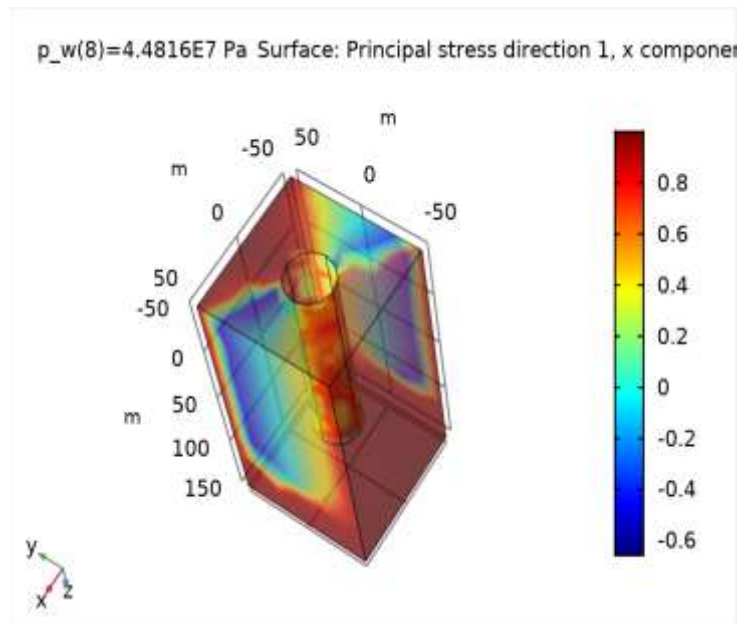


شکل ۱۶- میزان کرنش با فشار سیال ۲,۷۵۷۹ Pa در محور y

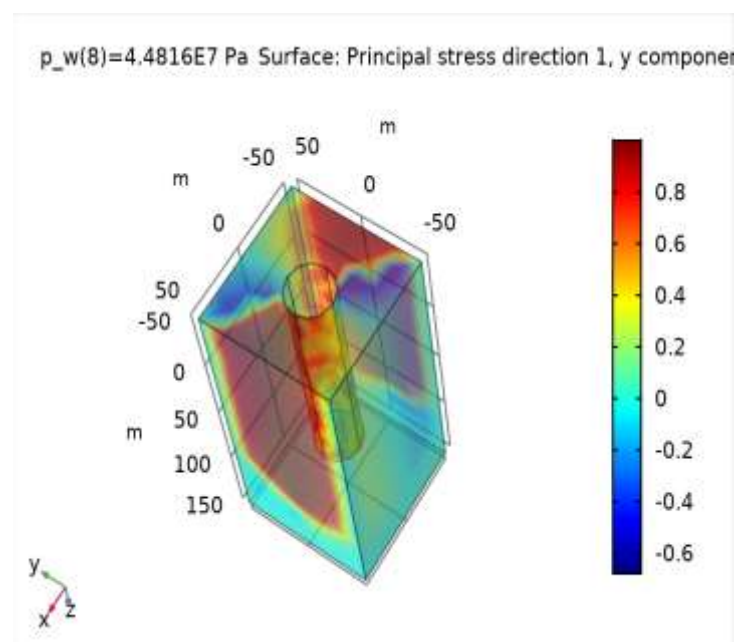


شکل ۱۷- میزان کرنش با فشار سیال ۴,۴۸۱۶ Pa در محور z

در شکل‌های (۱۸)، (۱۹) و (۲۰) میزان تنش‌های اصلی در سه جهت در جهت X، Y و Z با فشار سیال ته چالی ۴,۴۸ پاسکال در سه جهت را نشان داده شده است. نواحی قرمز رنگ در اطراف دهانه چاه بیانگر مناطقی می‌باشد که احتمال ناپایداری در آن بیشتر است. مقادیر منفی برای تابع شکست، بیانگر پتانسیل بیشتر برای ناپایداری می‌باشد.

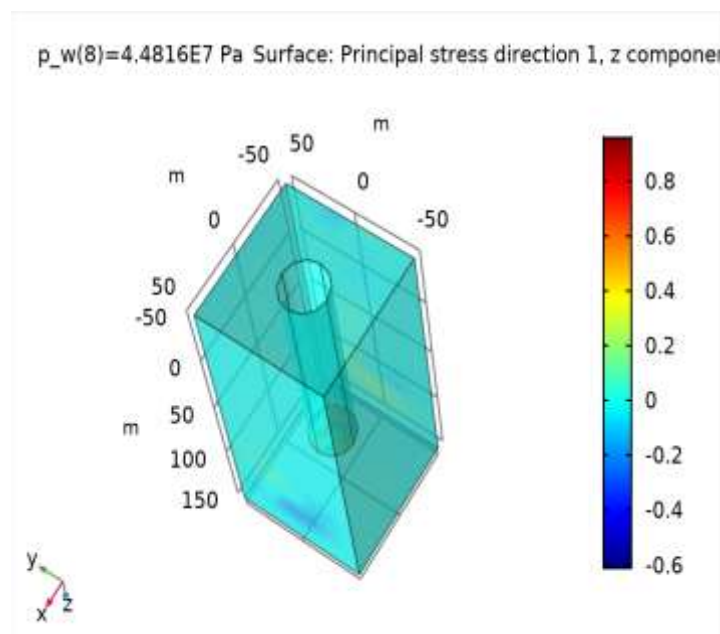


شکل ۱۸- میزان توزیع تنش‌های اصلی با فشار سیال ۴,۴۸ pa در محور x



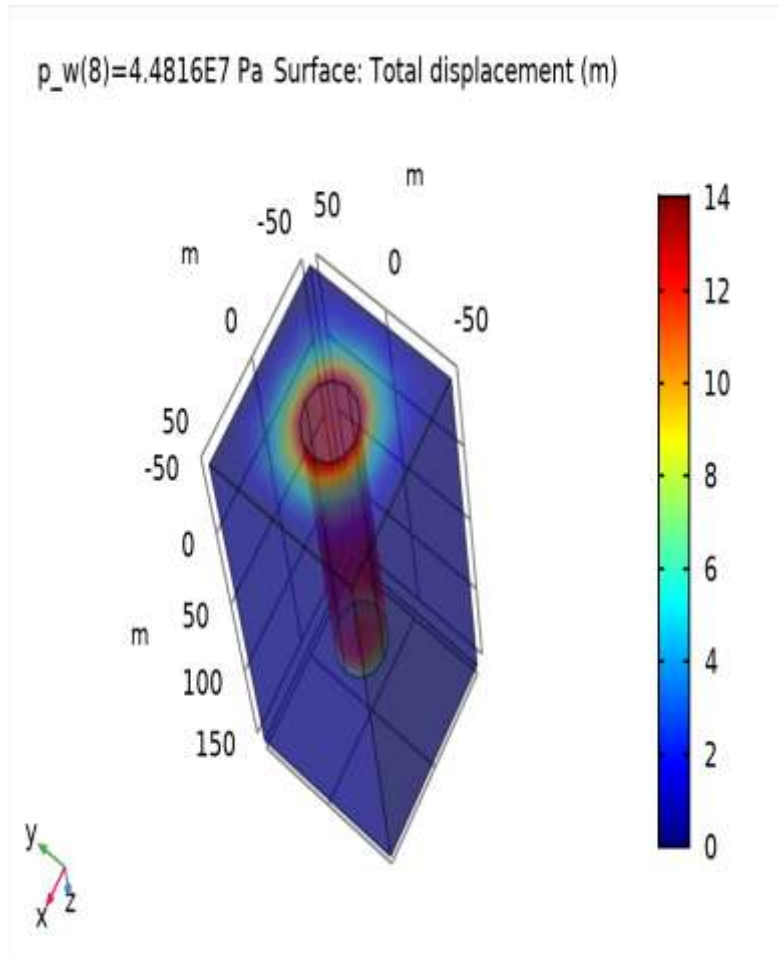
شکل ۱۹- میزان توزیع تنش‌های اصلی با فشار سیال ۴,۴۸ pa در محور y



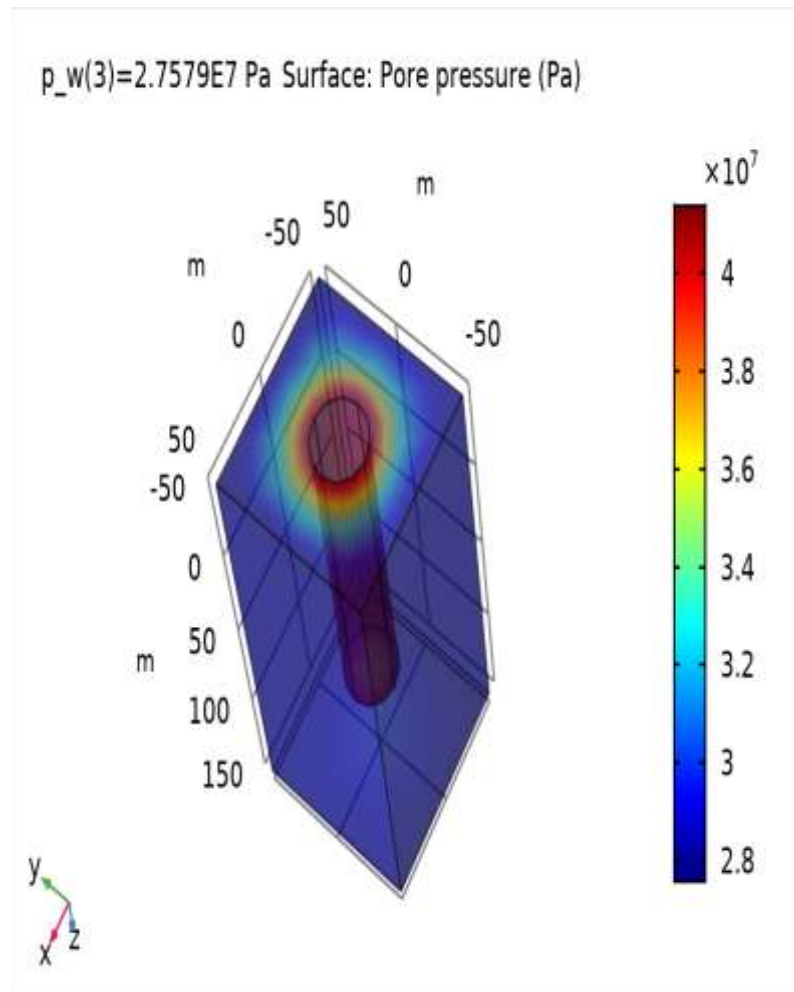


شکل ۲۰- میزان توزیع تنش‌های اصلی با فشار سیال ۴,۴۸ در محور y

بنابراین زمانی که مقادیر بسیار منفی باشد پتانسیل ناپایداری نیز افزایش پیدا خواهد کرد. همانطور که انتظار می‌رود پیش‌بینی تابع‌های شکست نشان می‌دهد که بیشترین پتانسیل ناپایداری در اطراف دهانه چاه می‌باشد. در این تصاویر نشان داده شده است که احتمال ناپایداری در اطراف دهانه چاه با افزایش فشار ته چاهی کاهش می‌یابد. این امر بیانگر آن است که افزایش دبی باعث کاهش فشار ته چاهی می‌شود، بنابراین ناحیه ناپایداری در اطراف دهانه چاه افزایش خواهد یافت. تغییرات جابه‌جایی ایجاد شده در تحلیل و فشارمنفذی در شکل‌های (۲۱) و (۲۲) آورده شده است. با توجه به جابه‌جایی کل بوجود آمده در ابتدای چاه با فشار سیال ۴,۴۸ پاسکال و همینطور فشار منفذی کل با فشار سیال ۲,۷ پاسکال که باعث ناپایداری است نشان داده شده است.



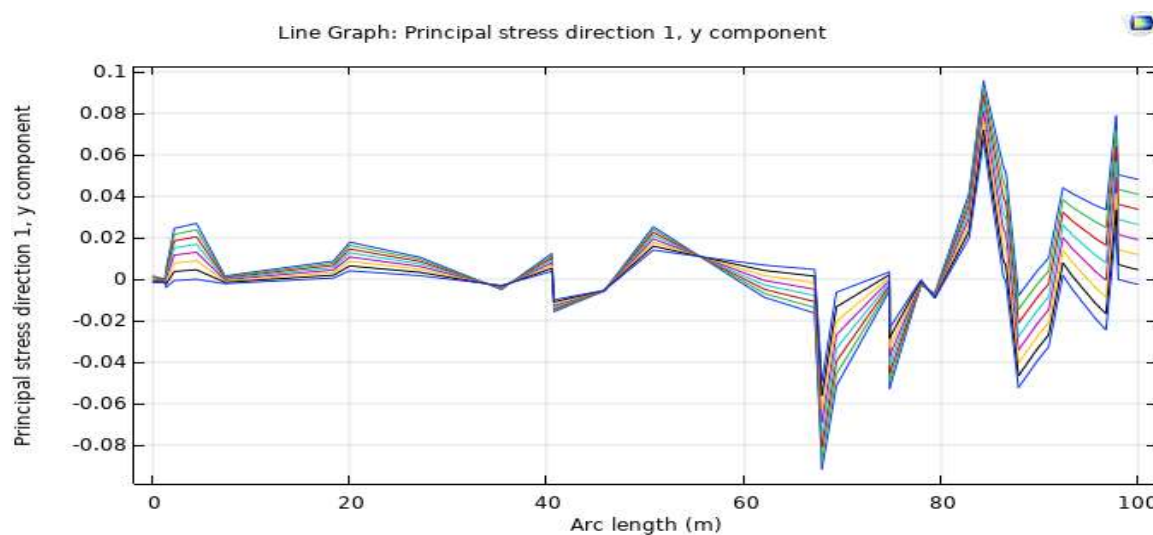
شکل ۲۱- مقدار توزیع جابه‌جایی کل در فشار ۴۰۴۸۰۰ در دهانه چاه



شکل ۲۲- مقدار توزیع حاصل از فشار منقذی کل در فشار  $2.7 \times 10^7$  Pa در دهانه چاه

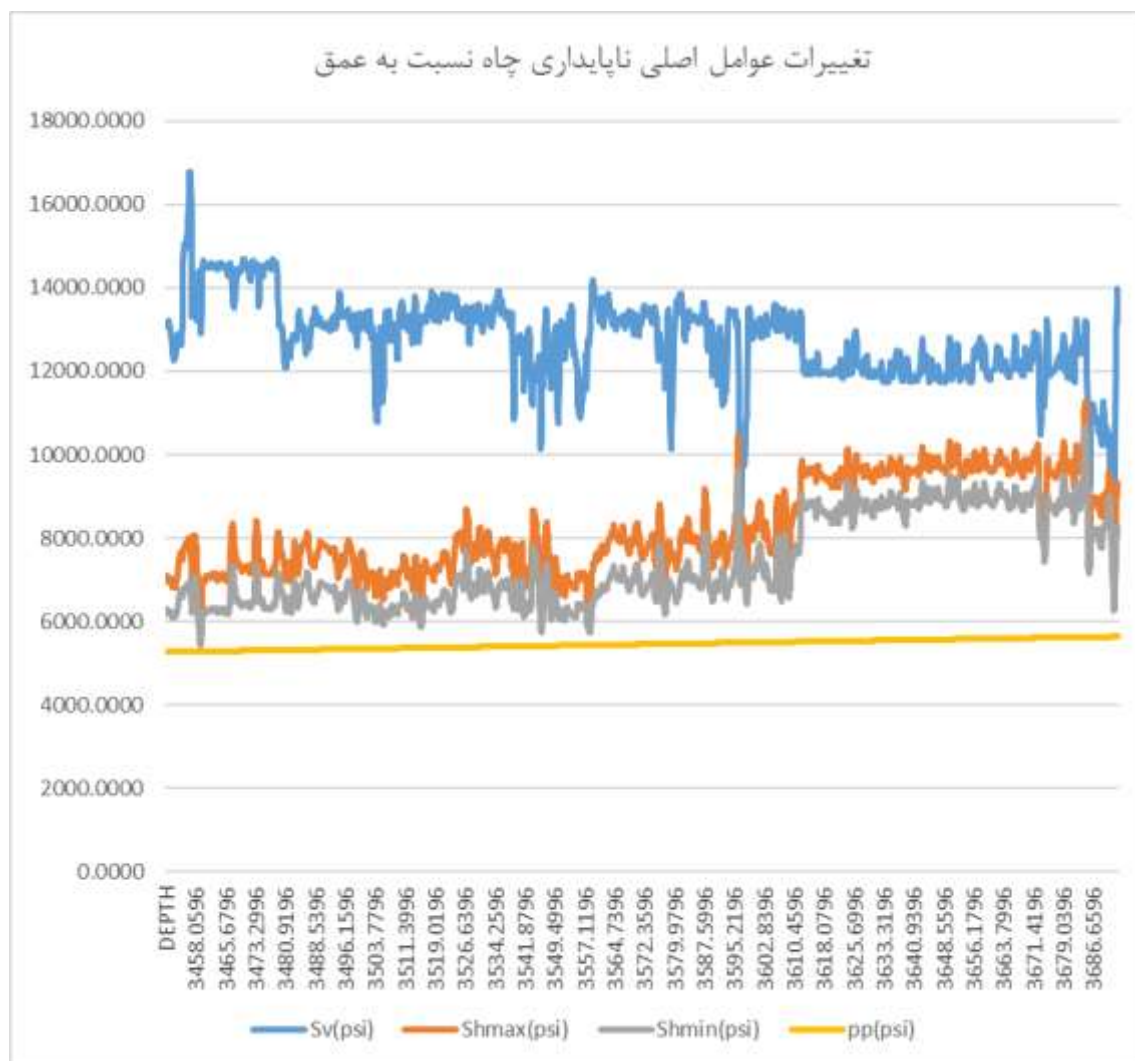
## ۱۰. نتیجه‌گیری

شبکه هندسه مدل شده مربوط به یک چاه عمودی در ۱۵۰ متری از مخزن است. سیال از مخزن به سمت چاه جریان دارد و تنها از طریق چاه خارج می‌شود. جایه‌جایی در اطراف مخزن محدود شده است اما دیواره‌های چاه به‌طور آزادانه‌ای تغییر شکل می‌کنند. شکل (۲۳) نمودار تنش در محور  $y$ - عمق را نشان می‌دهد که در این نمودار میزان تغییرات تنش‌های اصلی آورده شده است و همانطور که مشخص است بیشتر میزان تنش در عمق ۸۷ متری چاه بوده و میزان ناپایداری در این نقطه بسیار زیاد است و امکان ریزش یا شکست چاه وجود دارد.



شکل ۲۳- نمودار تغییرات تنش در محور  $y$  نسبت به عمق چاه

با توجه به شکل (۲۴) نمودار تغییرات عوامل ناپایدار کننده چاه و تغییرات این پارامترها نسبت به عمق نشان داده شده است که میزان تنش‌های اصلی در اواسط چاه تغییرات چشمگیری داشته و می‌توان صحت نمودار شکل (۲۳) تایید کرد. با توجه به افزایش فشار منفذی نسبت به عمق می‌توان به این نتیجه رسید که در عمق چاه میزان ناپایداری افزایش یافته و پایداری چاه به خطر خواهد افتاد.



شکل ۲۴- نمودار تغییرات عوامل ناپایدار کننده چاه و تغییرات این پارامترها نسبت به عمق چاه

همانطور که انتظار می‌رود پیش‌بینی تابع‌های شکست نشان می‌دهد که بیشترین پتانسیل ناپایداری در اطراف دهانه چاه می‌باشد. در اینصورت احتمال ناپایداری در اطراف دهانه چاه با افزایش فشار ته چاهی کاهش می‌یابد.

## مراجع

۱. Petroleum Rock Mechanics: Drilling Operations and Well Design. Bernt Aadnøy Reza Looyeh. ۲۶<sup>th</sup> May ۲۰۱۱.
2. Petroleum Related Rock Mechanics (Developments in Petroleum Science), by E. Fjær (Author), P. Horsrud (Author), A.M. Raaen (Author), R. Risnes (Author), R.M. Holt (Author), ۱۹۹۲

۳. رضا شیرین آبادی، رسولی و گشتابی، تحلیل پایداری چاه در یکی از مخازن نفتی ایران،

۴. محمد دانیالی و آرش ابراهیم آباد، تحلیل پایداری دیواره چاه نفت در حفاری فروتعدالی به وسیله ی نرم افزار ABAQUS. هفتمین کنفرانس بین المللی نفت و گاز با رویکرد توسعه.
۵. احسان کوچکی، کامران گشتاسبی. تحلیل پایداری چاه نفت سازند آسماری میدان کوپال. ششمین کنفرانس دانشجویی مهندسی معدن.
۶. گزارش شرکت نفت مربوط به حوضه مناطق جنوب غربی ایران. ۱۳۹۰
۷. ویکی پدیا، <https://fa.wikipedia.org/wiki>
۸. theory of linear poroelasticity with applications to geomechanics and hydrogeology. HF Wang - ۲۰۱۷
۹. "کاربرد مکانیک سنگ در مهندسی نفت"، دکتر عباس خاکسار منشاد و دکتر بهرام حبیب نیا و مسعود اصلان نژاد. ۱۳۹۳، موسسه انتشارات ستایش.
10. Kidambi and Kumar (2016). Mechanical Earth Modeling for a vertical well drilled in a naturally fractured tight carbonate gas reservoir in the Persian Gulf. Petroleum science and engineering. 0920-4105/& 2016 Elsevier B.V. All rights reserved.
11. Maleki and et al (2014). Comparison of different failure criteria in prediction of safe mud weight window in drilling practice. Earth- science reviews. 0012-8252/© 2014Elsevier B.V.All rights reserved.