

تحلیل پایداری دیواره چاه در زمان حفاری با استفاده از مدل ژئومکانیکی و نرم افزار $FLAC^{3D}$ در مخزن آسماری میدان نفتی اهواز

محمد میرانی^{۱*}، بهرام حبیب نیا^۲

۱ گروه مهندسی نفت، دانشگاه امیدیه

۲ عضو هیات علمی دانشگاه صنعت نفت اهواز

*habibnia@put.ac.ir

دریافت مهر ۱۳۹۳، پذیرش دی ۱۳۹۳

چکیده

مخازن نفتی، یکی از مهمترین منابع تولید انرژی به شمار می آیند که به دلیل داشتن شرایط ویژه مکانیک سنگی، قابلیت حفظ و نگهداری سیالات هیدروکربنی را دارند. از آنجاکه مهمترین عامل جهت دسترسی به این مخازن نفتی و آگاهی از شرایط زمین در اعماق بیشتر حفر چاه می باشد، لذا یکی از مهمترین فرآیندهایی که در طول زمان بهره برداری از مخزن نفتی، بایستی بدان توجه ویژه ای نمود، پیش بینی و طراحی دقیق پایداری دیواره چاه نفتی و داشتن اطلاعات کافی از وضعیت تنش های برجا منطقه در زمان حفاری چاه های نفتی می باشد. عدم تجزیه و تحلیل دقیق پایداری چاه می تواند مشکلات بسیاری مانند ریزش چاه، شکست، مچالگی لوله جدار، گیرکردن لوله ها و مته حفاری را بوجود آورد. در این تحقیق پایداری یک چاه نفتی، در سازند آسماری واقع در میدان نفتی اهواز با استفاده از نرم افزار عددی $FLAC^{3D}$ و اطلاعات بدست آمده از نمودار های چاه پیمایی در دو بخش مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته و نتایج آن ارائه شده است. فشار و وزن گل حفاری در آغاز حرکت پلاستیک دیواره چاه و همچنین آغاز گسیختگی برشی در دیواره چاه نیز بدست آمده است. فشار و وزن گل حفاری در آغاز حرکت پلاستیک دیواره چاه و همچنین آغاز گسیختگی برشی در دیواره چاه، برای ۷٫۵ متر از سازند که لیتولوژی آن عمدتاً شامل آهک مارنی و ماسه سنگ بوده، و نیز برای ۶ متر از سازند که دارای خصوصیت آهک سخت می باشد، بدست آمده است. همچنین تحلیل پایداری چاه در امتداد قائم، تنش افقی حداقل و تنش افقی حداکثر انجام شده است. آغاز حرکت پلاستیک و گسیختگی برشی در دیواره چاه در بخش اول به ترتیب در فشار گل های ۳۳ و ۲۶/۴ مگاپاسکال و در بخش دوم در فشار گل های ۴۵ و ۳۰ مگاپاسکال اتفاق می افتد. نتایج نشان می دهد شکست کششی در امتداد تنش افقی حداکثر و گسیختگی برشی در امتداد تنش افقی حداقل می باشند. همچنین نتایج تحلیل به دلیل پایین بودن خصوصیات مکانیک سنگی لایه ماسه سنگی حاکی از بیشترین میزان جابجایی و ریزش، و کوچک بودن محدوده ای ایمن گل حفاری در این لایه می باشند.

کلمات کلیدی: تحلیل پایداری، گسیختگی برشی، شکستگی کششی، حرکت پلاستیک، تنش های برجا

۱. مقدمه

پایداری دیواره چاه به عنوان یکی از نکات حساس و بحرانی در عملیات حفاری به شمار می رود. ناپایداری چاه باعث بروز مشکلاتی در حفاری شده و در نهایت می تواند منجر به از دست دادن چاه شود. یکی از پارامترهای مهم و تعیین کننده برای انتخاب روش حفاری تحت تعادل (UBD) و یا روش حفاری بالای تعادل (OBD)، میزان پایداری چاه است. بروز ناپایداری سبب اتلاف مقدار زیادی وقت و هزینه شده و حتی ممکن است منجر به از دست رفتن چاه نیز گردد. لذا تحلیل و پیش بینی پایداری چاه از اهمیت ویژه ای برخوردار است. پایداری یک چاه به عوامل متعددی مانند مسیر حفاری، شکل هندسی چاه، تنش های برجا، فشار منفذی، خصوصیات مکانیکی سنگ و وزن گل بستگی دارد [۱]. برای جلوگیری از ناپایداری چاه لازم است که اطلاعات دقیقی از تنش های اطراف دیواره چاه و نحوه تاثیر آنها بر پایداری دیواره چاه داشته باشیم تا با تحلیل صحیح این تنشها بتوان طراحی دقیقی برای لوله جداری و انتخاب سیمان مناسب انجام داد. قبل از حفاری، میزان تنش های مکانیکی موجود در سازند از مقاومت سنگ نیز کمتر است. واکنش های شیمیایی در حالت تعادل بوده و یا با یک سرعت نسبی در طول زمان زمین شناسی انجام میشوند. سنگها، تحت این شرایط تعادل یا نزدیک به حالت تعادل، پایدار می باشند. [۲].

جامعه حفاری مشکلات پایداری دیواره چاه را به وفور تجربه کرده اند. پیامد های عملی ناپایداری دیواره چاه اغلب ناشی از فروریختن دیواره چاه می باشد [۳]. فروپاشی دیواره چاه را میتوان به کمک تجزیه و تحلیل شکست و بکار گیری مدلی سازنده برای تنش های فشاری پیش بینی نمود. انتخاب معیار شکست برای تجزیه و تحلیل پایداری دیواره چاه کاری بسیار دشوار می باشد. ترجیحا یک معیار شکست را باید بر اساس آگاهی از مکانیسم شکست در نظر گرفت ولی این موضوع همیشه صدق نمی کند. در حقیقت بسیاری از فرضیه های شکست تنها به عنوان یک نتیجه از استدلال های نظری مطرح شده و نمی تواند توسط شواهد تجربی مورد تایید قرار گیرد [۴]. از متداولترین معیارهای مورد استفاده در تجزیه و تحلیل پایداری دیواره چاه معیار مور - کولمب می باشد. در این تحقیق به تحلیل پایداری دیواره یک چاه در میدان نفتی اهواز با استفاده از معیار شکست مور کولمب نیز پرداخته شده است. میدان نفتی اهواز در استان خوزستان و در جنوب غربی ایران واقع می باشد. این میدان تاقدیسی بطول ۶۷ و عرض ۶ کیلومتر مربع را شامل می شود. که از شمال با میدان رامین (ملائانی)، از شرق با میدان مارون، از جنوب با میداین شادگان و منصوری و از غرب با میداین آب تیمور و سوسنگرد مجاور است. این میدان دارای روند شمالی - جنوب شرقی (به موازات رشته کوه زاگرس) می باشد. سازند آسماری در میدان نفتی اهواز در جنوب فروافتادگی دزفول شامل بخش ماسه سنگی اهواز می باشد.

انطباق بین پارامترهای دینامیکی و استاتیکی مکانیک سنگ از گذشته مورد توجه محققان بوده است. انجام این نوع مطالعات در چاه های نفتی به منظور ارزیابی پیوسته پارامترهای استاتیکی و مقاومتی چاه انجام می گردد. روابط تجربی جهت ایجاد نگاره های مکانیک سنگی از داده های پتروفیزیکی از سال ۱۹۵۰ مورد استفاده قرار گرفته است. وایلی و همکاران در سال های ۱۹۵۶ و ۱۹۵۸، و ۱۹۶۳ از سرعت موج به منظور تعیین تخلخل استفاده کردند [۵ و ۷]. ساویچ در سال ۱۹۷۴ نشان داد که بین مدول یانگ دینامیکی و مدول یانگ استاتیکی رابطه لگاریتمی وجود دارد و اظهار داشت دقت رابطه لگاریتمی ۲۰ درصد بیشتر از رابطه خطی است [۸]. یسار و همکاران در سال ۲۰۰۴ روابطی بین مقاومت فشاری تک محوره و مدول الاستیسیته را با سرعت موج تراکمی تعیین کردند [۹]. همچنین در سال ۲۰۱۰ حبیب نیا و همکاران به تحلیل پایداری مکانیکی بر روی دو چاه جهتدار (میدان اهواز) پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که بهترین جهت حفاری در میدان اهواز در جهت تنش افقی ماکزیمم می باشد [۱۰]. در سال ۲۰۱۴ چی تان و همکاران به مدل سازی عددی پایداری دیواره چاه در رسوبات هیدروکربن زا پرداختند و به این نتیجه رسیدند که مدل سازی عددی کمک به درک واکنش رسوبات هیدروکربن زا در طی فرآیند حفاری تحت تعادل (UBD) نیز می کند [۱۱]. در سال ۲۰۱۴، اسمیت و همکاران به مدل سازی عددی پایداری دیواره چاه با بررسی اثر تنش و

آنیزوتروپی سنگ پرداختند. آنها در یافتند که شکستگی های کششی بصورت متقارن بر دیواره چاه ایجاد نخواهند شد و آنیزوتروپی سنگ می تواند بر جهت انتشار شکستگی ها اثر گذاشته اما الگوی تنش دیواره چاه را تغییر نخواهد داد [۱۲]. انگیزه اصلی از انجام این تحقیق ارائه راهکارهایی مناسب جهت طراحی یک چاه پایدار، همچون استفاده از وزن گل بهینه، داشتن اطلاعات کافی از وضعیت تنش های برجا منطقه و آگاهی از میزان مقاومت سنگ با استفاده از داده های چاه پیمایی و... می باشد تا بتوان در حفاری چاه های نفتی جدید در آینده با اجتناب از بروز مشکلات مربوط به پایداری دیواره چاه های نفتی، صرفه جویی قابل توجهی در بخش هزینه هابه عمل بیآوریم.

۲. روش کار

به منظور انجام مدل سازی، ابتدا محیط مورد نظر را به قسمتهای کوچکی که در اصطلاح به آن مش بندی گفته می شود تقسیم کردیم. اگر ناپیوستگی در مدل وجود داشته باشد، ابتدا هندسه آن ایجاد شده و سپس خواص مورد نظر به آن اختصاص می یابد. در مرحله بعد یک مدل رفتاری را تعریف کرده و سپس به اعمال خواص مواد می پردازیم. پس از این مرحله نوبت به اعمال شرایط مرزی و اولیه می رسد. در این حالت مدل باید تحت شرایط موجود به تعادل برسد. پارامترهای ورودی مورد نیاز به نرم افزار $FLAC^{3D}$ شامل: تنش های برجا، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، مقاومت کششی سنگ، مدول برشی، مدول بالک، فشار منفذی و ضریب پواسون می باشد.

۱-۲ معیار شکست تعریف شده در نرم افزار

یکی از ساده ترین و در عین حال مهمترین معیارهای شکستی که برای اولین بار استفاده شد معیار مور-کولمب بود که برای شکست مواد اصطکاکی در سال ۱۷۷۳ ارائه شد [۱۳]. به دلیل اینکه استفاده از این معیار نسبت به سایر معیارهای دیگر شکست سنگ به جهت نیاز کمتر به اطلاعات میدانی، آسانتر است در این تحقیق از معیار شکست مور-کولمب استفاده گردیده است. معیار شکست مور-کولمب بر اساس ارتباط بین تنش برشی و تنش نرمال در گسیختگی در طول یک صفحه گسیختگی بیان می شود. در واقع به شکل زیر می باشد:

(۱)

$$\tau = C + \sigma_n \tan \varphi \text{ or } \dots |\tau| = S_o + \mu \sigma_n$$

که در رابطه بالا: φ زاویه اصطکاک داخلی و C چسبندگی می باشد.

۲-۲. تعیین پارامترهای ژئومکانیکی

در این بخش با استفاده از لاگ چگالی و صوتی و همچنین روابط پروالاستیک، پارامترهای ژئومکانیکی سازند از قبیل مدول یانگ، مدول برشی، مدول بالک و نسبت پواسون توسط روابط ارائه شده در زیر حاصل شده اند... لاگهای صوتی و چگالی در شکل های ۱ و ۲ نشان داده شده اند.

(۲) مدول یانگ دینامیکی:

$$E_d = \frac{\rho_b \left[3 - 4 \left(\frac{\Delta t_c}{\Delta t_s} \right)^2 \right]}{\Delta t_s^2 - \Delta t_c^2} \text{ (Gpa)}$$

(۳) مدول بالک دینامیکی:

$$K_d = \rho_b \left(\frac{1}{\Delta t_c^2} - \frac{4}{3\Delta t_s^2} \right) \text{ (Gpa)}$$

(۴) مدول برشی دینامیکی:

$$G_d = \left[\frac{\rho_b}{\Delta t_s^2} \right] \text{ (Gpa)}$$

(۵) ضریب پواسون :

$$\vartheta = \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta t_s}{\Delta t_c} \right)^2 - 1}{\left(\frac{\Delta t_s}{\Delta t_c} \right)^2 - 1}$$

در روابط بالا Δt_c و Δt_s به ترتیب زمان گذر موج فشاری و برشی بر حسب میکروثانیه بر فوت و ρ_b چگالی کل بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب می باشد. پارامترهای ورودی به نرم افزار پارامترهای استاتیکی می باشند و به همین جهت از روابط تجربی زیر برای تبدیل مدول بالک، مدول برشی و مدول بالک از حالت دینامیکی به استاتیکی استفاده شده است [۱۴].

$$G_{Static} = \frac{E_{Estatic}}{2(1+\vartheta_{Estatic})} \text{ (V)} \quad E_{Static} = 0.4145E_{dynamic} - 1.0593 \quad (6)$$

$$K_{Estatic} = \frac{E_{Estatic}}{3(1-2\vartheta_{Estatic})} \quad (8)$$

پس از تعیین خواص مکانیکی سنگ سازند، نیاز است که تنش های برجا نیز محاسبه شوند. تنش های برجا به سه صورت تنش قائم، تنش افقی حداکثر و تنش افقی حداقل تقسیم می شوند. تنش قائم ناشی از وزن طبقات بالایی است و بطور ریاضی با انتگرال گیری دانسیته سنگ از سطح تا عمق مورد نظر بصورت زیر محاسبه می شود:

(۹) تنش قائم:

$$S_V = \int_0^Z \rho(Z)g dz$$

که در رابطه بالا $\rho(z)$ دانسیته سنگ، g شتاب گرانش سنگ می باشد [۱۵]. لازم به ذکر است که در این تحقیق از طریق نمودار دانسیته مقدار دانسیته برای هر لایه را بدست آورده و سپس تنش قائم را با استفاده از مجموع حاصلضرب های دانسیته در ضخامت لایه ها محاسبه نمودیم.

تخمین تنش های افقی بسیار مشکل تر از تنش قائم است. تنش افقی حداقل می تواند بصورت مستقیم از داده های آزمایش نشتی (LOT)، شکست هیدرولیکی، مینی فراکچر و داده های هرزروی گل برای نقاط خاصی از چاه و بصورت گسسته، بدست آید. اما برای تعیین تنش افقی حداکثر رابطه خاصی ارائه نشده است و این تنش معمولاً از تئوری گسلش اندرسون و یا روابط پورالاستیک محاسبه می گردد. در میان این روش ها آزمایش نشتی کاربرد بیشتری نسبت به سایر روش ها دارد اما به دلیل در دسترس نبودن اطلاعات این آزمایش، تنش های افقی حداقل و حداکثر با استفاده از روابط پورالاستیک با تخمین قابل قبولی محاسبه شده اند.

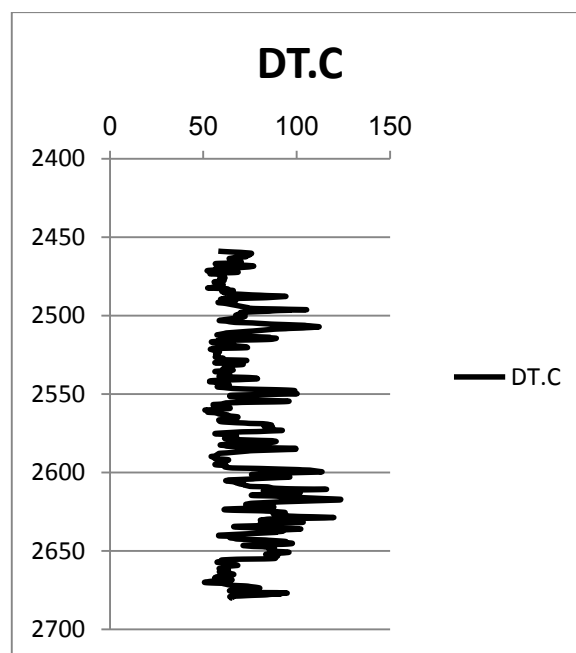
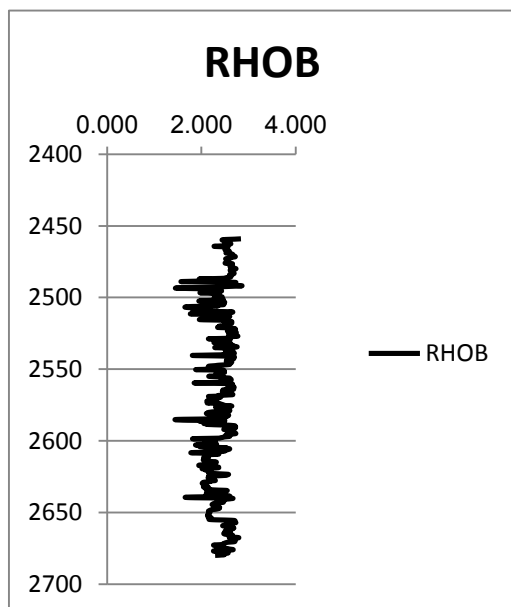
(۱۰) تنش افقی حداقل

$$S_{Hmin} = \frac{\vartheta}{1-\vartheta} S_V - \frac{\vartheta}{1-\vartheta} \alpha P_P + \alpha P_P + \frac{E}{1-\vartheta^2} \varepsilon_x + \frac{\vartheta E}{1-\vartheta^2} \varepsilon_y$$

(۱۱) تنش افقی حداکثر:

$$S_{Hmax} = \frac{\vartheta}{1-\vartheta} S_V - \frac{\vartheta}{1-\vartheta} \alpha P_P + \alpha P_P + \frac{E}{1-\vartheta^2} \varepsilon_y + \frac{\vartheta E}{1-\vartheta^2} \varepsilon_x$$

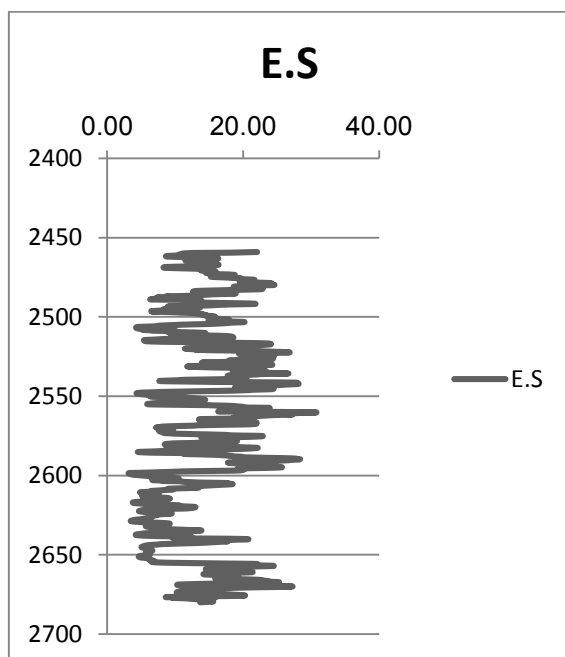
که در روابط بالا، θ ضریب پواسون، α ضریب بایوت $P_p(BF)$ فشار منفذی، E مدول یانگ و ϵ_x و ϵ_y به ترتیب کرنش در جهت تنش افقی حداقل و حداکثر می باشند [۱۶]. ضریب بایوت تصویری از تخلخل سنگ مخزن است و مقدار آن بین صفر و یک می باشد. هرچه سنگ پرتخلخل باشد به یک نزدیک و هرچه تخلخل کمتر باشد به صفر نزدیک است [۱۷]. در میدانی که تحت تنش های تکتونیکی قرار دارند (مانند میدان نفتی اهواز)، تعیین ϵ_x و ϵ_y برای کالیبره نمودن نمودار تنش افقی ضروری می باشند. در این تحقیق $\epsilon_x = 0/69$ و $\epsilon_y = 1/20$ در نظر گرفته شده است.



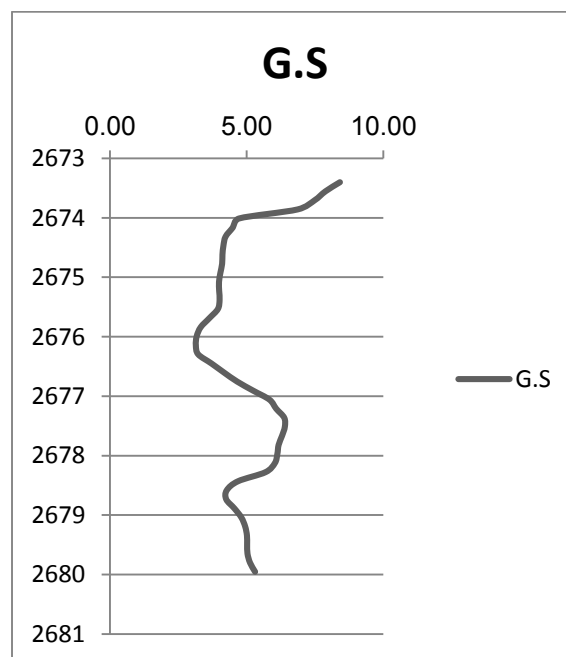
شکل ۲- نمودار دانسیته (گرم بر سانتی متر مکعب)

شکل ۱- نمودار صوتی (میکروثانیه بر فوت)

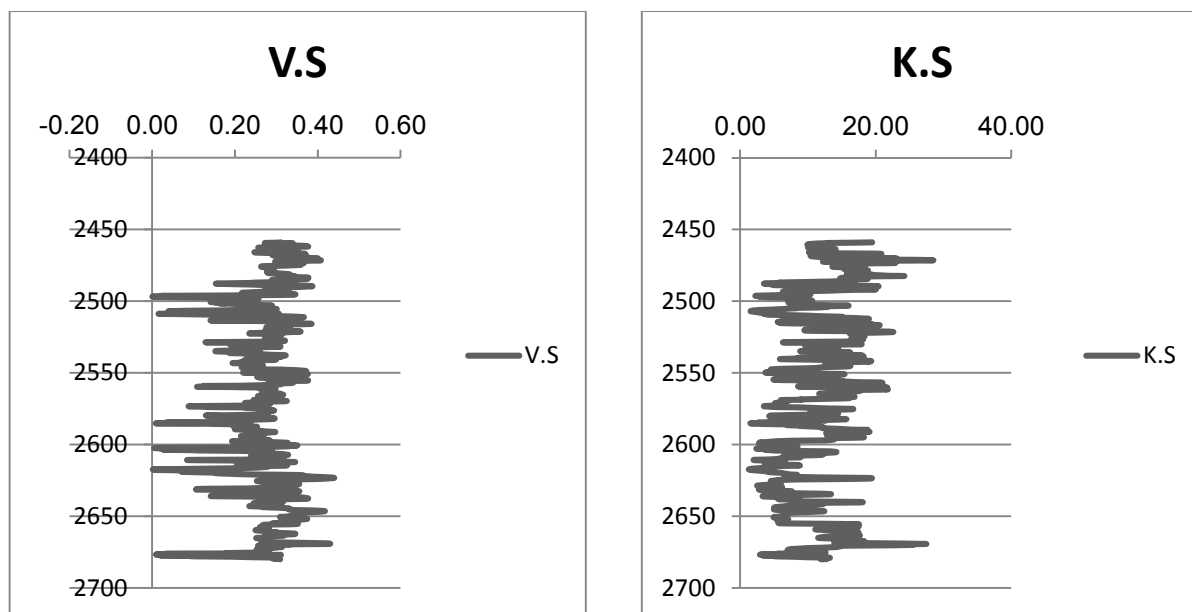
در ادامه با محاسبه مدول های یانگ، برشی، بالک و نسبت پواسون نمودارهای هر یک نسبت به عمق در اشکال ۳، ۴، ۵ و ۶ نشان داده شده اند



شکل ۴- مدول یانگ (Gpa)



شکل ۳- مدول برشی (Gpa)

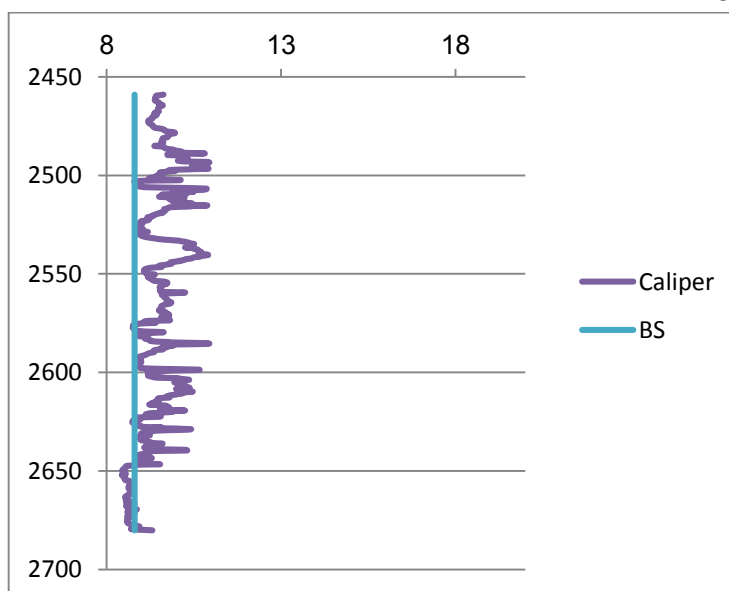


شکل ۶- نسبت پواسون

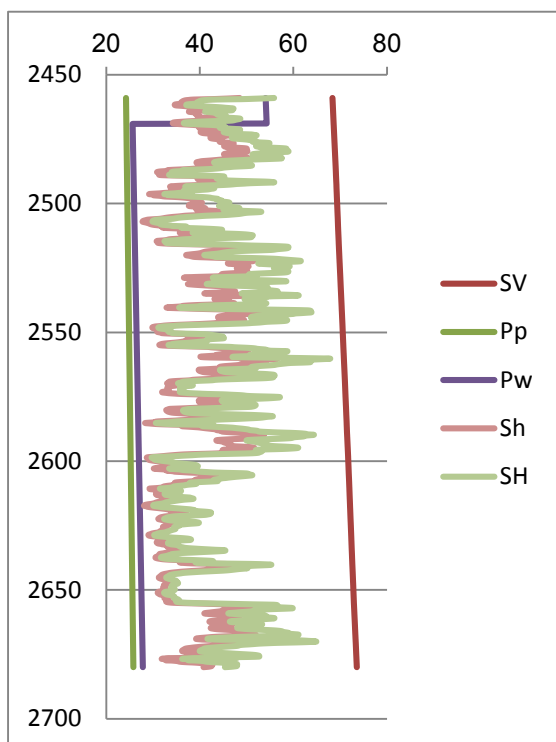
شکل ۵- مدول بالک (Gpa)

۲-۳. مدل سازی عددی

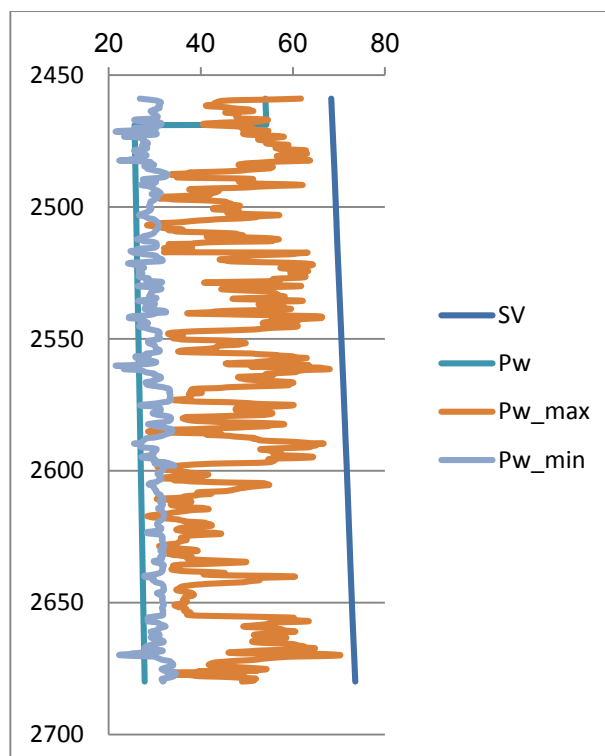
در این تحقیق مدل سازی عددی در دو بخش انجام گردید. در بخش اول مدل سازی، به جهت پیش بینی و آگاهی دقیق از واکنش لایه های ماسه سنگی در برابر تغییرات بارگذاری مکانیکی (تنش های کششی و برشی) و تعیین محدوده پنجره ایمن گل، در بین لایه هایی با خصوصیات مختلف، مدل ارائه شده از سه قسمت با خصوصیات مختلف: آهک مارنی و میان لایه ماسه سنگی تشکیل شده است. در بخش دوم مدل سازی عددی، جهت تعیین محدوده پنجره ایمن گل، مدل ارائه شده تنها از یک لایه با لیتولوژی آهک سخت نیز تشکیل شده است. همچنین در نمودار ارائه شده در شکل ۷ نحوه تغییرات قطر چاه نسبت به عمق جهت تعیین نواحی دارای بیشترین ریزش نشان داده شده است.



شکل ۷- نحوه تغییرات قطر چاه نسبت به عمق



شکل ۹- محدوده تنش های برجا



شکل ۸- محدوده فشار گل با معیار مور - کولمب

با توجه شکل ۸ در قستهایی از نمودار، فشار گل انتخابی توسط حفار به کمتر از وزن گل حداقل تمایل پیدا کرد است. این نقاط نشان Breakout در عمق مورد نظر می باشد.

۲-۳-۱ مدل سازی عددی (بخش اول)

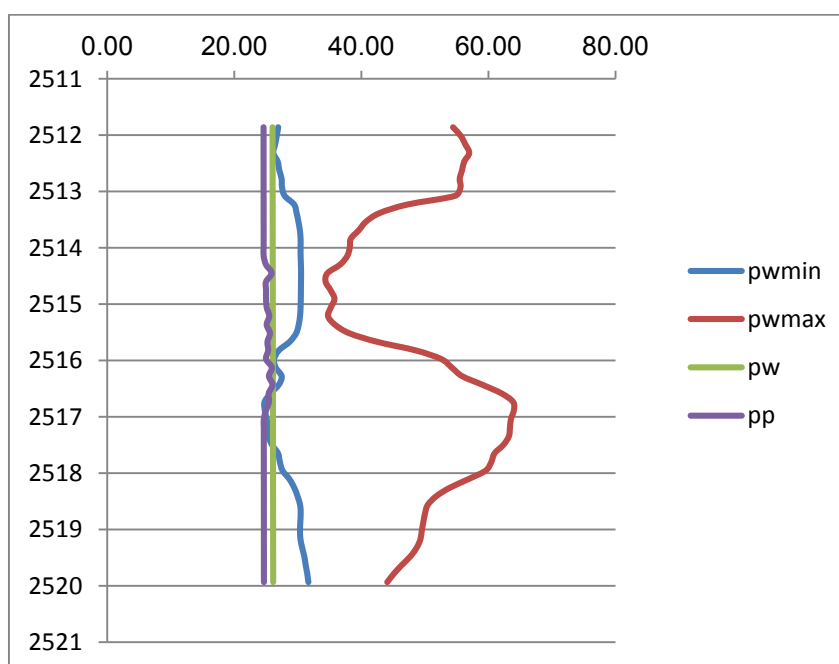
در چاه های نفتی که در لایه های ماسه ای تولید می شوند مانند لایه آسماری در میدان نفتی اهواز، با بزرگترین مشکلی که مواجه می باشیم، پدیده تولید ماسه می باشد. این پدیده که در آن دانه های ماسه به علت فشارهای زیاد وارد از سنگ مخزن جدا می شوند، هر ساله هزینه های قابل توجهی را به شرکت های نفتی تحمیل می کند. در طی فرآیند تولید ماسه تنش های کششی و برشی وارد بر دیواره اطراف چاه از مقاومت آن تجاوز می کند در نتیجه ذرات ماسه بصورت دانه دانه از ماتریس اولیه خود جدا می شوند. به دلیل اهمیت تولید ماسه همراه نفت تولیدی در میدان نفتی اهواز، مدل ارائه شده در این تحقیق از سه قسمت تشکیل شده است. که ابعاد مدل ارائه شده بصورت سه بعدی بصورت $5 \times 10 \times 6$ متری در حالت قائم (شکل ۱۱) با خصوصیات مختلف: آهک مارنی در فاصله عمقی (۲۵۱۲-۲۵۱۴/۵) و (۲۵۱۷-۲۵۱۹/۵) متری و میان لایه ماسه سنگی (۲۵۱۷-۲۵۱۴/۵) متری تقسیم می گردد (شکل ۱۲). تا بتوان میزان مقاومت این لایه ها را نسبت به یکدیگر نشان داده و از طرفی دیگر نواحی درای بیشترین ریزش را از بین این سه لایه تشخیص داد. شعاع چاه با توجه به ریزش $10/795$ سانتی متر در نظر گرفته شد.

جدول ۱- خصوصیات مکانیک سنگی لایه های مختلف سازند آسماری

نوع سنگ	ضریب پواسون	مقاومت کششی (Mpa)	زاویه اصطکاک (درجه)	چسبندگی (Mpa)	مدول بالک (Gpa)	مدول برشی (Gpa)
Limestone1	۰/۲۶	۲/۰۷	۴۰	۴/۹	۱۱/۸۴	۵/۵۷
Sandstone	۰/۳۳	۱/۲۱	۴۷	۲/۳۸	۶/۹۴	۳/۵۴
Limestone2	۰/۳۱	۲/۹	۴۰	۵/۲۹	۱۵/۵۱	۷/۲۰

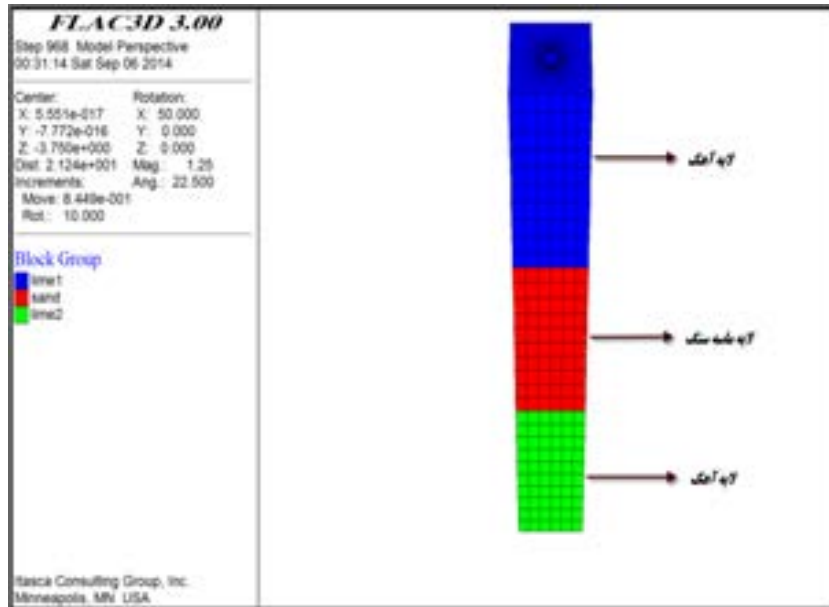
جدول ۲- تنش های قائم، تنش افقی حداقل، تنش افقی حداکثر و فشار منفذی لایه های مختلف سازند آسماری

نوع سنگ	عمق (متر)	قطر چاه (in)	تنش قائم (Mpa)	تنش افقی حداقل (Mpa)	تنش افقی حداکثر (Mpa)	فشار منفذی (Mpa)
Limestone1	۲۵۱۲-۲۵۱۴/۵	۹/۴۷	۷۰/۶۵	۳۶/۳۳	۳۸	۲۴
Sandstone	۲۵۱۴/۵-۲۵۱۷	۱۰/۷۲	۷۰/۷۰	۳۲	۳۶	۲۵/۶۵
Limestone2	۲۵۱۷-۲۵۱۹/۵	۹/۵۹	۷۱	۳۹/۳	۴۴/۷	۲۴/۲



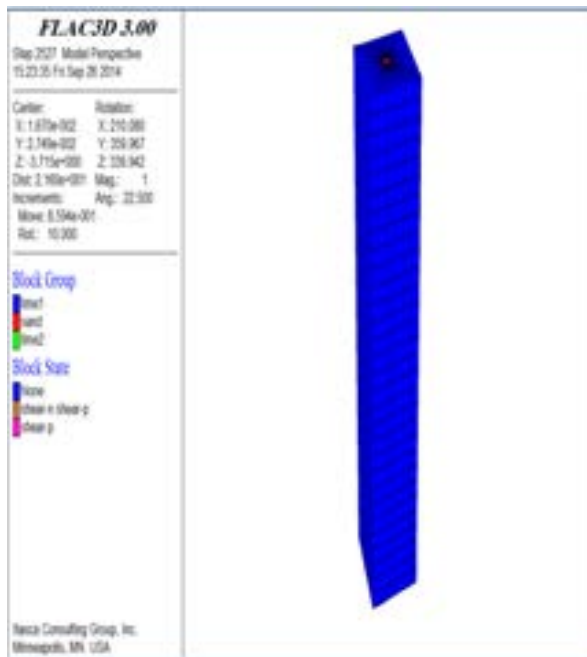
شکل ۱۰ محدوده فشار گل با معیار مور - کولمب در محدوده مورد نظر

همانگونه که در شکل ۱۰ مشخص می باشد، محدوده ایمن گل حفاری کوچک شده و در نتیجه آن عملیات حفاری مشکل تر خواهد بود.

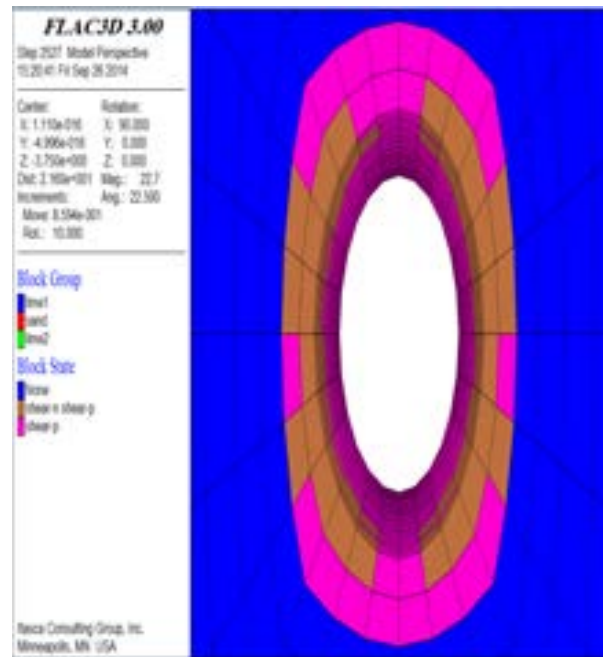


شکل ۱۱- مدل چاه در حالت قائم و لایه بندی آن

با استفاده از نرم افزار ابتدا مدل چاه ساخته شد. سپس پارامترهای مختلف مکانیک سنگی و جریانی سازند و همچنین تنش های برجا در آن قرار داده شده و در درون سازند با خصوصیات آهک مارنی و میان لایه ماسه سنگی در عمق مورد نظر اجرا و تحلیل حساسیت بر روی فشار گل حفاری انجام می شود. در اولین مرحله مدل سازی فرض بر آن می شود که هیچ نوع فشار گلی بر دیواره چاه وارد نشده است. در اینصورت همانگونه که در شکل های زیر مشخص است، ناحیه پلاستیک تشکیل شده در اطراف چاه بسیار زیاد می باشد.

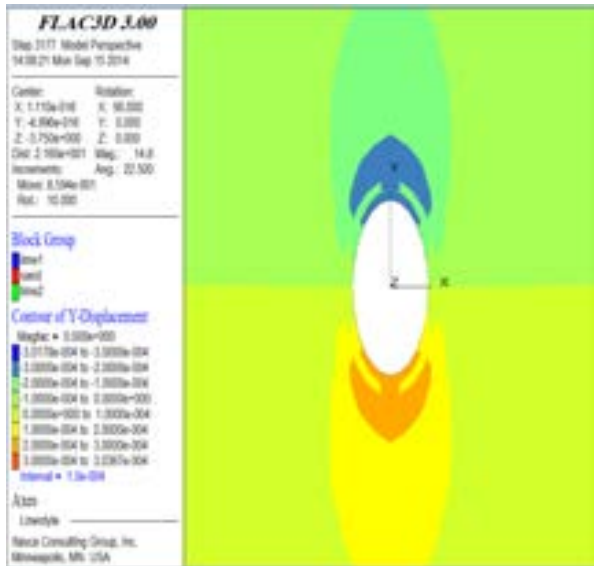


شکل ۱۳- وضعیت مدل در حالت بدون اعمال فشار گل

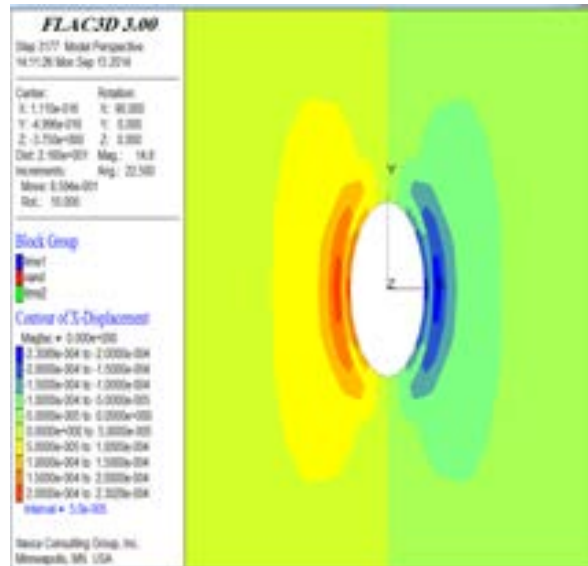


شکل ۱۲- ناحیه پلاستیک اطراف چاه در حالتی که $P_w=0$

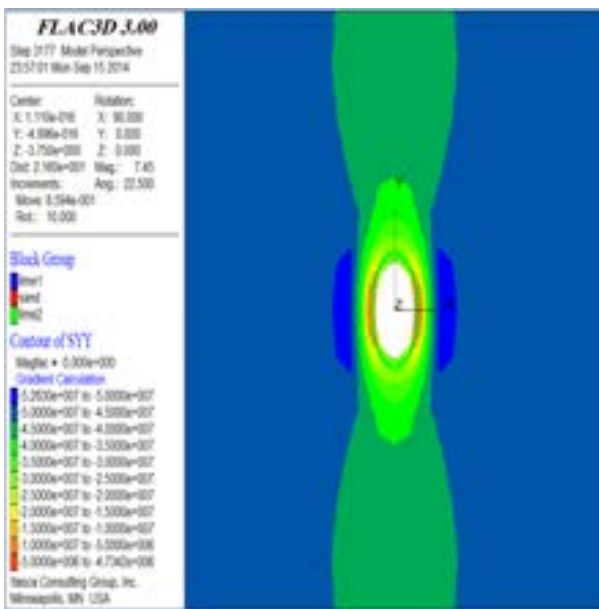
برای بدست آوردن وزن گل بهینه، از فشار گل بالاتر و نزدیک به فشار منفذی سازند، تحلیل را شروع کرده و برای رسیدن در آغاز حرکت پلاستیک در دیواره چاه فشار گل های مختلفی را آزمایش کردیم. بر اساس تحلیل های صورت گرفته در فشار گل های مختلف در محدوده ۲۶/۵ تا ۳۳ مگاپاسکال هیچگونه ریزشی در مدل مشاهده نگردید. همانگونه که در شکل های ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است، آغاز حرکت پلاستیک و ایجاد شکاف در دیواره چاه در جهت تنش افقی حداکثر و در فشار گل ۳۳ مگاپاسکال اتفاق می افتد.



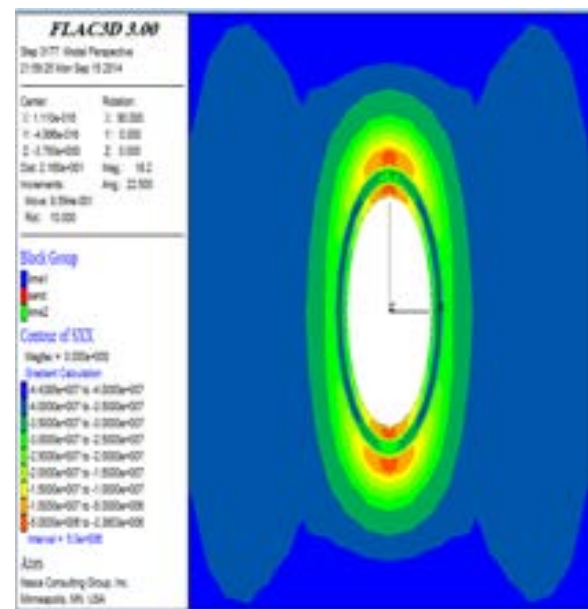
شکل ۱۵- جابجایی در جهت Y در فشار ۳۳(mpa)



شکل ۱۴- جابجایی در جهت X در فشار ۳۳(mpa)

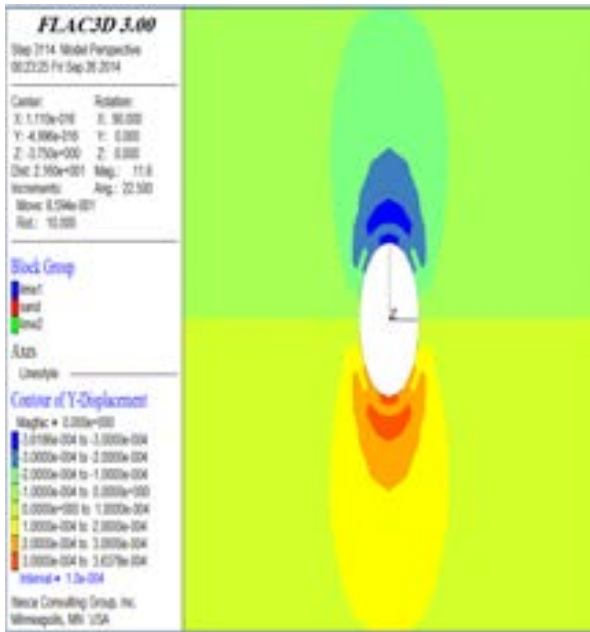


شکل ۱۷- توزیع تنش القایی حداکثر در فشار گل ۳۳(mpa)

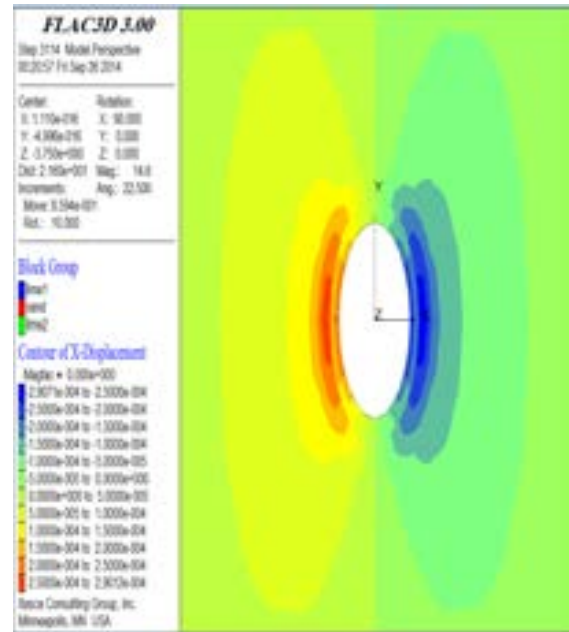


شکل ۱۶- توزیع تنش القایی حداقل در فشار گل ۳۳(mpa)

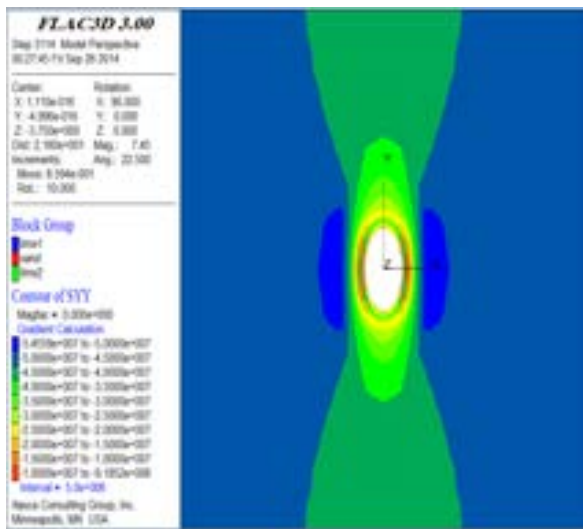
در ادامه تحلیل برای بدست آوردن حداقل فشار مجاز گل در جلوگیری از ریزش، فشار گل پایین مختلفی را اعمال نمودیم. بر اساس تحلیل صورت گرفته در فشار ۲۶/۴ مگاپاسکال بر اثر تمرکز تنش ایجاد شده، در مدل شاهد گسیختگی برشی خواهیم بود و دیواره چاه در جهت تنش افقی حداقل ریزش می کند. نتایج تحلیل در فشار ۲۶/۴ مگاپاسکال به قرار زیر می باشد.



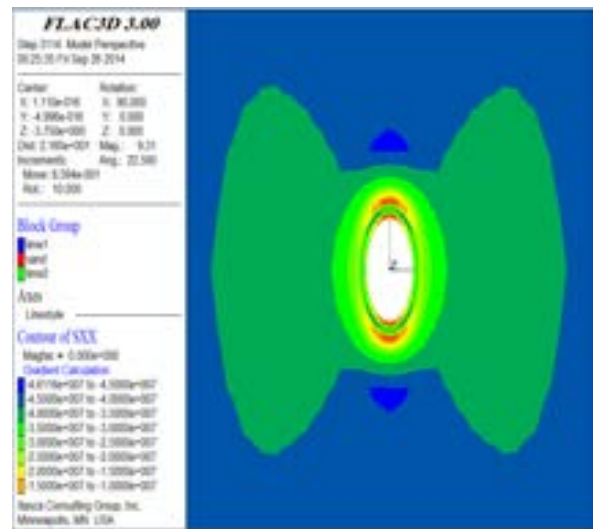
شکل ۱۹- جابجایی در جهت Y در فشار ۲۶/۴(mpa)



شکل ۱۸- جابجایی در جهت X در فشار ۲۶/۴(mpa)



شکل ۲۱- توزیع تنش القایی حداکثر در فشار گل ۳۳(mpa)



شکل ۲۰- توزیع تنش القایی حداقل در فشار گل ۳۳(mpa)

جدول ۳- نتایج کلی تحلیل پایداری

فشار گل (Mpa)	جابجایی در راستای محور X (m)	جابجایی در راستای محور Y (m)	تنش در راستای محور X (mpa)	تنش در راستای محور Y (mpa)	تنش در راستای محور Z (mpa)
۲۶/۴	$۲/۹۰ \times ۱۰^{-۴}$	$۳/۶۳ \times ۱۰^{-۴}$	$۴/۶۱ \times ۱۰^۱$	$۵/۴۵ \times ۱۰^۱$	$۷/۰۶۱ \times ۱۰^۱$
۳۳	$۲/۳۰ \times ۱۰^{-۴}$	$۳/۰۱۷ \times ۱۰^{-۴}$	$۴/۴۳ \times ۱۰^۱$	$۵/۹۴ \times ۱۰^۱$	$۷/۰۷ \times ۱۰^۱$

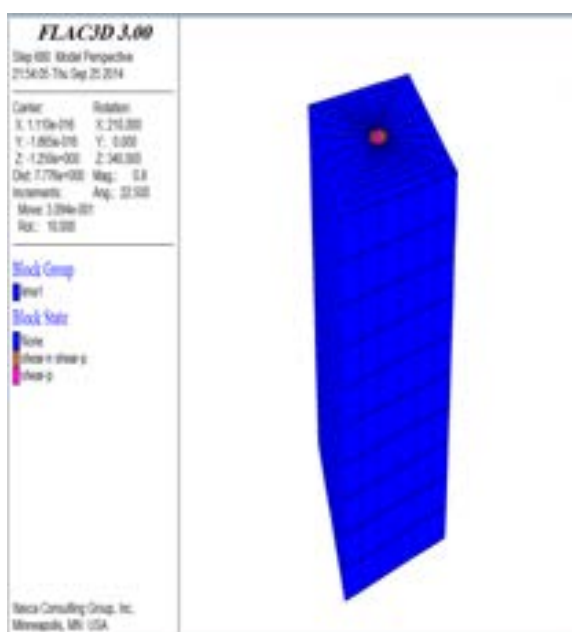
۲-۳-۳. مدل سازی عددی

در قسمت دوم مدل سازی عددی، ابعاد مدل ارائه شده بصورت سه بعدی بصورت $۵ \times ۱۰ \times ۶$ متری در حالت قائم با خصوصیت آهک سخت در فاصله عمقی ۲۶۷۲ تا ۲۶۷۸ متری سطح زمین می باشد.
جدول ۴- خصوصیات مختلف مکانیک سنگی لایه های آهکی سازند آسماری

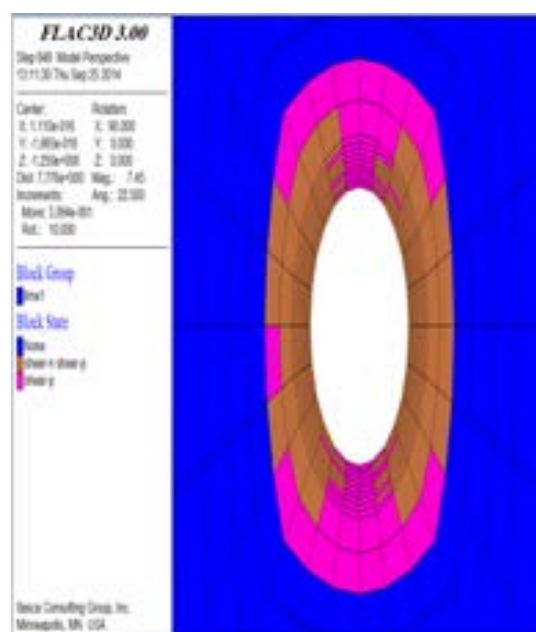
نوع سنگ	ضریب پواسون (Mpa)	مقاومت کششی (Mpa)	زاویه اصطکاک (درجه)	چسبندگی (Mpa)	مدول بالک (Mpa)	مدول برشی (Mpa)
آهک	۰/۲۹	۲/۹۸	۴۰	۶/۹۴	۱۴/۹۹	۶/۸۵

جدول ۵- تنش های قائم، تنش افقی حداقل، تنش افقی حداکثر و فشار منفذی لایه آهکی سازند آسماری

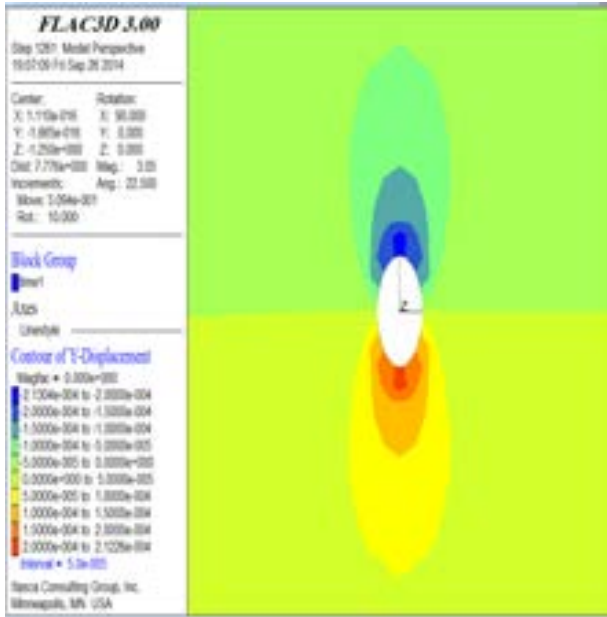
نوع سنگ	عمق (متر)	تنش قائم (Mpa)	تنش افقی حداقل (Mpa)	تنش افقی حداکثر (Mpa)	فشار منفذی
آهک	۲۶۷۲-۲۶۷۶	۷۴	۴۰/۲	۵۰/۶۷	۲۵/۷۳



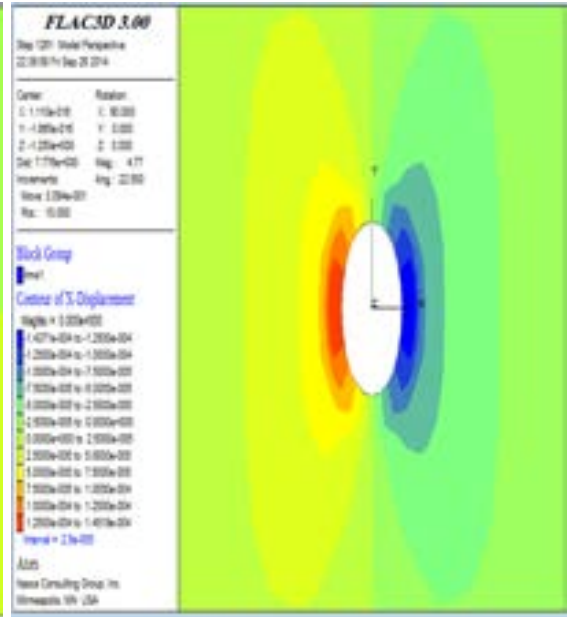
شکل ۲۳- وضعیت مدل در حالت بدون اعمال فشار گل



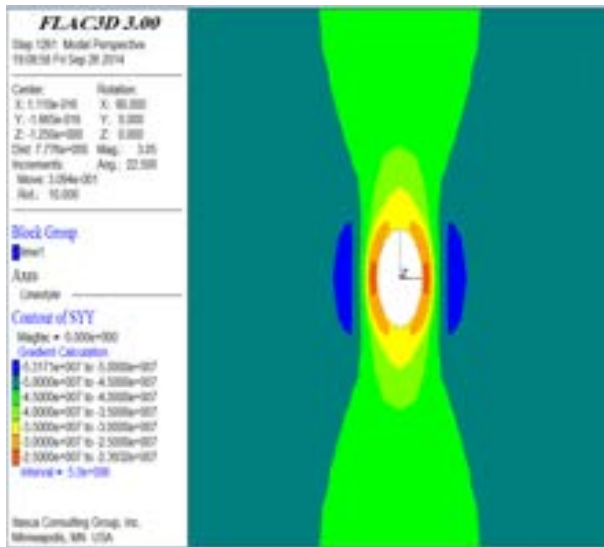
شکل ۲۲- ناحیه پلاستیک اطراف چاه در حالتی که $P_w=0$



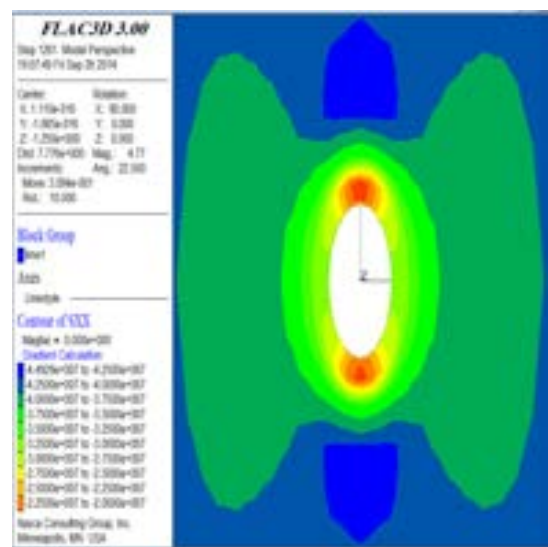
شکل ۲۹- جابجایی در جهت Y در فشار (30 mpa)



شکل ۲۸- جابجایی در جهت X در فشار (30 mpa)



شکل ۳۱- توزیع تنش القایی حداکثر در فشار گل (30 mpa)



شکل ۳۰- توزیع تنش القایی حداقل در فشار گل (30 mpa)

جدول ۶- نتایج کلی تحلیل پایداری

فشار گل (Mpa)	جابجایی در راستای محور X (m)	جابجایی در راستای محور Y (m)	تنش در راستای محور X (mpa)	تنش در راستای محور Y (mpa)	تنش در راستای محور Z (mpa)
۳۰	$1/45 \times 10^{-4}$	$2/13 \times 10^{-4}$	$4/49 \times 10^1$	$5/31 \times 10^1$	$7/04 \times 10^1$
۴۵	$3/46 \times 10^{-5}$	$1/022 \times 10^{-4}$	$4/18 \times 10^1$	$4/92 \times 10^1$	$7/07 \times 10^1$

۳. نتایج

جدول ۷- نتایج کلی تحلیل پایداری (بخش اول مدل سازی)

(۱)

مقایسه نتایج	وزن گل حداقل (mpa)	وزن گل حداکثر (mpa)
مدل سازی تحلیلی	۲۹	۳۴/۶۹
مدل سازی عددی	۲۶/۴	۳۳

جدول ۷ حاکی از تطابق تقریبی مدل سازی تحلیلی (Excel) دیواره چاه مورد مطالعه با مدل سازی عددی (FLAC^{3D}) می باشد. این نتایج خود بطور نسبی نشانگر انتخاب صحیح فشار گل (۲۶ مگاپاسکال) از سوی مهندس حفار می باشد.

جدول ۸- نتایج کلی تحلیل پایداری (بخش دوم مدل سازی)

(۲)

مقایسه نتایج	وزن گل حداقل (mpa)	وزن گل حداکثر (mpa)
مدل سازی تحلیلی	۳۳	۴۷
مدل سازی عددی	۳۰	۴۵

جدول ۸ حاکی از تطابق نسبی مدل سازی تحلیلی و عددی می باشد. همچنین این جدول بیانگر کوچک بودن محدوده پنجره ایمن گل در عمق مورد مطالعه نیز می باشد. پیشنهاد می گردد طراحی وزن گل حفاری در بالاتر از ۳۰ مگاپاسکال لحاظ گردد تا از گسیختگی برشی و گسیختگی کششی احتمالی جلوگیری گردد.

(۳) با مقایسه مقدار جابجایی در راستای محور X می توان نتیجه گرفت که در فشار گل ۲۶/۴ و ۳۰ مگاپاسکال مقدار جابجایی بیش از مقدار جابجایی در فشار گل ۳۳ و ۴۵ مگاپاسکال خواهد بود و با توجه به اینکه جابجایی در محدوده رفتار پلاستیک مواد رخ می دهد، این خود دلیلی بر ایجاد شکست در فشار گل ۳۳ و ۴۵ مگاپاسکال خواهد بود.

(۴) بالاترین میزان فشار گل در هر دو بخش مدل سازی بیش از تنش افقی حداقل می باشد. که در اینصورت سازند دچار شکست خواهد شد.

۵) نتایج بررسی حاصل از مطالعه نشان می دهد که در چاه قائم، لایه های ماسه سنگی ناپایدارتر و کربنات ها پایدارتر از بقیه لایه ها می باشند.

۶) در بخش اول مدل سازی عددی در محدوده فشاری (۲۶/۵-۳۲) مگاپاسکال و در بخش دوم مدل سازی در محدوده فشاری (۳۰-۴۵) مگاپاسکال هیچگونه ریزشی مشاهده نگردید. بنابراین این محدوده های فشاری را می توان بعنوان محدوده وزن گل بهینه در نظر گرفت.

۷) با مقایسه کلی نتایج بدست آمده از دو روش مدل سازی عددی و تحلیلی، روش تحلیلی به واقعیت نزدیک تر بوده و شرایط واقعی موجود در چاه مورد مطالعه را نشان می دهد. در نتیجه نتایج روش تحلیلی قابل اعتماد تر می باشد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از زحمات آقایان دکتر زرگر، دکتر قبادی و دکتر آبدیده در داوری مقاله سپاسگزاری می نمایند.

۵. منابع

- [1] Peng, P., and J. Zhang, 2007, Engineering geology for underground rocks. Springer. Berlin.
- [2] Amco - Wellbore Stability book. 2011
- [3] Aadnoy, B. S., and S. Ong, 2003, Introduction to special issue on borehole stability: Journal of Petroleum Science Engineering, p. 79-82.
- [4] Bieniawski, Z.T., 1996, Milestone in Rock Mech. Min. Sci., p.1169-1193.
- [5] Wyllie, M. R. J., A. R. Gregory, and L.W. Gardner, 1956, Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media Geophysics in heterogeneous and porous media: Geophysics, v.21, p. 41-70.
- [6] Wyllie, M. R. J., A. R. Gregory, and L.W.G. H. F Gardner, 1958, Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media Geophysics in heterogeneous and porous media: Geophysics, v. 23, p. 459-493.
- [7] Wyllie, M. R. J., C.C. H. F Gardner, and A. R., Garegory, 1963, Studies of elastic wave attenuation in porous media: Geophysics, v. 27, p. 569-589.
- [8] Savich, A. L., 1984, Generalized relation between static and dynamic indices of rock deformability, Translated from Gidrotekhnicheskoe stroitel stvo. v. 8, p. 50-54.
- [9] Yasar, E., and Y. Erdogan, 2004, Correlating sound velocity with the density, compressive strength and young's modulus of carbonate rocks: Int of Journal of Rock Mechanics. min. Sci., v. 41, p. 871-875.
- [10] Zare M. R., S. R. Shadizadeh, and B. Habibniya, 2010, Mechanical stability analysis of directional wells: A case study in Ahwaz oil field., SPE138989.
- [11] Tan., CH., B. Clennel, and A. Tohidi, 2014, Wellbore stability model for hydrate bearing sediments: Heriotwatt University.
- [12] Schmitt. D., I. Moeck., and R. Kofman, 2014, Improving borehole instability analysis by investigating the impacts of stress and rock anisotropy: University of Alberta. Canada.
- [13] AL-Ajmi, A. M., and R. W. Zimmerma, 2006, Stability analysis of vertical borholes using the mogi-coulomb failure criterion: Int of Journal of Rock Mechanics. min. Sci., v.43, P.1200-1211.
- [14] Amadie, B. and O. Stephansson, 1997, Rock stress and its measurement: Chapman and Hall 1st edition.
- [15] Zoback, M. D., et al., 2003, Determination of Stress orientation and magnitude in deep wells: Int of Journal of Rock Mechanics. min. Sci., v.40, p.10498-1076.
- [16] Birchwood, R., Geomechanics specialist, option for Enhanced wellbore stability. schlumberger oilfield services Caracas, Venezuela.
- [17] Grandi, S., R., Rao, and M. Toks oz, 2002, Geomechanical modeling of in situ stresses around a borehole: Department of Earthsciences, Atmospheric and planetary sciences. Massachusetts Institute of technology.