



مطالعه آزمایشگاهی تأثیر پدیده آرچینگ در ثبت مقدار تنش‌ها توسط سلول فشار در محیط‌های ماسه‌ای

بهنام رحیمی محسنی^۱؛ مهدی موسوی^۲

چکیده

پدیده آرچینگ بعنوان فرایندی شناخته می‌شود که در محیط‌های دانه ای رخ داده و در آن توزیع تنش به دلیل در هم قفل شدگی دانه‌ها تغییر می‌کند. این فرایند را میتوان هم در تست‌های آزمایشگاهی و هم در ساختارهای زمینی و بصورت برج مشاهده کرد. زمانی که در سازه‌های زیرزمینی آرچینگ فعال رخ می‌دهد، عموماً مشاهده می‌شود که مقدار فشاری که از طرف روباره به سازه مدفون وارد می‌شود بسیار کمتر از مقداری است که از فرض تنش قائم ناشی از وزن طبقات محاسبه می‌شود. از آنجایی که این پدیده تأثیرات فراوانی بر مهندسی ژئوتکنیک، مکانیک سنگ، ژئومکانیک و دیگر زمینه‌ها داشته است، محققین برای درک مکانیزم آن، دهه‌ها مشغول به مطالعه بوده‌اند. در مطالعه آزمایشگاهی حاضر، یک سلول فشار طراحی و ساخته شده است که با استفاده از این سلول و تجهیزاتی مانند سنسور هیدرولیکی فشار، فشارسنج‌های دیجیتال، سامانه‌های اعمال فشار محوری و منفذی میتوان پدیده آرچینگ را مطالعه کرد. در این آزمایش‌ها که به صورت بارگذاری و باربرداری بر روی ماسه‌های دانه‌ای انجام می‌شود پدیده آرچینگ در حالت‌های مختلف دانه بندی و شرایط اشباع و ... بررسی می‌شود. در این مطالعه تأثیر آرچینگ در سه محیط سیال، جامد و ترکیب سیال و جامد مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین از سه نوع ماسه با دانه‌های درشت تا ریز استفاده شده تا به اثر سایز دانه‌ها بر شدت پدیده آرچینگ پی برد. نتایج حاصل از آزمایش دو رفتار متفاوت از ماسه‌های دانه‌ای را در مرحله رفت (بارگذاری) و برگشت (باربرداری) نشان می‌دهند. به این صورت که در مرحله رفت در تمامی حالت‌های آزمایش شده، تنش ثبت شده در ماسه یک رفتار خطی از خود نشان می‌دهد در حالی که در مرحله برگشت یک رفتار نمایی از ماسه ثبت شده است که این رفتار نمایی متناسب با شرایط محیط آزمایش دست‌خوش تغییر می‌شود. پدیده فوق در اثر قفل شدگی دانه‌ها در هم و مقاومت در برابر باربرداری ایجاد می‌شود. در این مقاله به بررسی پدیده قوس زدگی و عوامل موثر بر آن و تأثیر این پارامتر مهم در پروژه‌های نفتی و ژئومکانیکی پرداخته شده است.

کلیدواژه‌ها: پدیده آرچینگ، توزیع مجدد تنش‌ها، بارگذاری، باربرداری، سلول فشار

۱- مقدمه

بالغ بر یک قرن است که پدیده آرچینگ شناخته شده است. تحقیقات معمولاً به صورت پراکنده در این زمینه انجام شده است، معمولاً تحقیقات انجام‌شده به صورت مستقیم در یک نقطه زمانی برای یک محیط که اهمیت بالایی داشته صورت گرفته‌اند. پدیده آرچینگ در بسیاری از مسائل ژئوتکنیکی و ژئومکانیکی حضور دارد.

^۱ نویسنده مسئول: دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی اکتشاف نفت، دانشگاه تهران، behnamrahimi71@ut.ac.ir

^۲ نویسنده دوم: دانشیار دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، mmoosavi@ut.ac.ir

۲..... سومین کنفرانس ملی ژئومکانیک نفت

با این حال، برای اولین بار این پدیده در چهارچوبی غیر از این موارد شناسایی شد. در اوایل دهه ۱۸۰۰ از مهندسی نظامی فرانسه، خواسته شد تا سیلوهای مخزنی انبار مهمات را طراحی کنند. آن‌ها فهمیدند که پایه سیلو فقط مقداری از وزن نهایی مواد روی آن را پشتیبانی می‌کند و دیوارهای جانبی به مراتب بار بیشتری را نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده تحمل می‌کنند [1]. آزمایش‌ها نشان داد که اگر یک بخش کوچک از پایه جدا شود و پایین برده شود، بارگذاری حاصل که توسط آن بخش تحمل می‌شود به ارتفاع مواد روی سیلو بستگی نخواهد داشت و مستقل خواهد بود. از این رو، آن‌ها نتیجه گرفتند که یک قوس بالای بخش جابه‌جا شده شکل گرفته است. در اواخر دهه ۱۸۰۰ این دانش در مورد رفتار درون انبار مهمات توسط جانسون ۱۸۹۵ با هدف استخراج یک روش برای طراحی سیلوها در حالتی که مواد آن دانه‌ای هستند و یا از مواد مخصوص دیگری استفاده می‌شود، مورد استفاده قرار گرفت.

حوالی سال ۱۹۱۰ پروژه‌های قابل توجه زهکشی زمین در میدوست آمریکا انجام می‌شد. مهندسی در حین انجام پروژه فهمیدند که بسیاری از لوله‌های زهکشی بعد از نصب و پر کردن دچار آسیب ساختاری شده‌اند [2]. آنسون مارستون ۱۹۳۰ تحقیق وسیعی را در دانشگاه ایالت یووا بر روی لوله‌ها/کانال‌های زیرزمینی انجام داد، و متوجه شد که بارگذاری‌ها ممکن است بین بخش کوچکی از روباره و کل روباره تغییر کند. بارهای مختلف بر روی کانال به انعطاف‌پذیری کانال و پروسه نصب بستگی دارد و این مبحث مربوط به پدیده آرچینگ است.

در دهه‌های ۱۹۲۰ و ۱۹۳۰ اهمیت آرچینگ پیرامون تونل‌ها شناسایی گردید. طراحان فهمیدند که بارهای پشتیبان به مراتب کمتر از روباره هستند و اینکه اگر پیش‌بینی‌های دقیقی از بارگذاری امکان‌پذیر باشد می‌توان به صرفه‌جویی‌های قابل توجهی دست یافت. این مطالعات راه پیشرفت و دستیابی به رابطه‌های تجربی در زمینه تونل را ارائه داد. برخی از این رابطه‌ها امروزه نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد، به عنوان مثال می‌توان مقادیر طراحی ترزاقی برای بارهای پشتیبان سازه‌های زیرزمینی تحت شرایط گوناگون زیرزمینی را در نظر داشت [3]. علاقه به بارگذاری پشتیبان در تونل منجر به مطالعات آزمایشگاهی و تئوریک در رابطه با مشکلات موجود شد. در این زمینه بیشتر تحقیقات انجام‌شده توسط ترزاقی در سال‌های ۱۹۳۶ تا ۱۹۴۳ مورد توجه است.

در دهه ۱۹۵۰ تصمیم ساخت یک سیستم بزرگراه بین ایالتی در آمریکا علاقه جدیدی در بارگذاری بر روی کانال‌های زیرزمینی ایجاد کرد. مجراهای زیرزمینی بزرگ‌تری با ارتفاع بیشتر و بارگذاری‌های بزرگ‌تر در مقایسه با همه موارد قبلی مورد نیاز بود. محققان پیشنهادها مارستون که در پرتو تجربه در طی دهه‌ها بعد از تحقیقات او حاصل شده بودند را بازبینی و به‌روزرسانی کردند [2]. توجه ویژه‌ای به تأثیرات مثبت توزیع مجدد تنش پیرامون مجراهای زیرزمینی انعطاف‌پذیر و تکنیک کاهش دادن بار بر روی یک مجرا زیرزمینی طی فرآیند معین خاک ریزی (برگرداندن خاکی که قبلاً در هنگام حفاری استخراج می‌کنند)، شده است.

جهت تحقیقات انجام‌شده مرتبط با آرچینگ یک‌بار دیگر در دهه ۱۹۶۰ تغییر کرد، زمانی که دپارتمان دفاع آمریکا از تحقیق قابل‌ملاحظه‌ای در مورد منطقه فعل و انفعالات سازه‌های خاکی حمایت کرد. تکنیک‌های زیادی برای طراحی امکانات دفاعی عظیم لازم بود و تشخیص داده شده بود که پدیده آرچینگ اجازه خواهد داد تا امکانات زیر زمین ساخته شوند تا در برابر حملات هسته‌ای در طول جنگ که همه امکانات سطحی را تخریب خواهد کرد ایستادگی کنند [4].

در دهه ۱۹۷۰ تکنیک‌های مبتنی بر کامپیوتر در مطالعات مرتبط با پدیده آرچینگ به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفت. گتزلر و همکاران ۱۹۷۰ از روش تفاضل محدود برای آنالیز فشارهای آرچینگ در یک مدل خاک الاستیک ایده آل استفاده کردند [5]. ریود ۱۹۸۲ از یک برنامه اجزا محدود الاستیک خطی استفاده کرد تا

مطالعه آزمایشگاهی تأثیر پدیده آرچینگ در ثبت مقدار تنش‌ها..... ۳

رفتار یک مجرای زیرزمینی نصب‌شده در آزمایشگاه تست مخزن را پیش‌بینی کند. پیش‌بینی‌های حاصل از برنامه ریود انطباق خوبی را با نتایج حاصل از آزمایش نشان داد [6]. همچنین، ویژگی‌های درون ذره‌ای و روابط بین ذره‌ای در آنالیزهای عددی در نظر گرفته می‌شود. ساکاگوچی و اوزاکی ۱۹۹۲ روش اجزا گسسته را برای شبیه‌سازی‌ها به وسیله کامپیوتر در تشکیل روند ایجاد آرچینگ استفاده کردند [7]. آن‌ها تأثیر اصطکاک غلطان بین ذرات را در نظر گرفتند و یک انطباق خوب بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی پیدا کردند. تست‌های درب تله^۱ ترزاقی ۱۹۳۶ به وسیله چندین محقق تکرار شده است. مانند مک نالتی ۱۹۶۵، لادانی و هایوکس ۱۹۶۹، هریس ۱۹۷۴، واردولاکیس و همکاران ۱۹۸۱، فریکی و فریکر ۱۹۸۳ و ایوانس ۱۹۸۳. هیچ پیشرفت قابل توجهی در این تحقیقات در مقایسه با روش ترزاقی صورت نگرفت. امروزه تعدادی از تکنولوژی‌های جدید در مطالعات آرچینگ مورد کاربرد واقع شده است. محققانی برای حل مشکل مقیاس در آزمایش‌های مربوط به آرچینگ در مواد مربوط به زمین‌شناسی مانند سنگ و خاک از سانتی‌فیوژ استفاده کرده‌اند.

۲- دستگاه مورد استفاده برای مطالعه پدیده آرچینگ

برای بررسی پدیده آرچینگ از یک سلول مخصوصی استفاده شده است که در اصل یک سلول هوک بوده که در طراحی درب‌های آن تغییراتی ایجاد شده است. در این سلول می‌توان یک سلول فشار را در حالت‌های مختلف برای انواع مختلف ماده مانند ماسه با دانه‌بندی‌های متفاوت قرار داد و نتایج بارگذاری و باربرداری و همچنین پدیده آرچینگ رخ داده‌شده در آن را بررسی و مورد مطالعه قرار داد. این سلول برای دو گروه متفاوت از تست‌های مرتبط با پدیده آرچینگ در نظر گرفته شده است که می‌توان این دو گروه اصلی را به صورت زیر تقسیم‌بندی کرد:

- ۱- تست‌هایی که در آن‌ها سیال وارد محیط دانه‌ای شده است، در واقع در این تست‌ها فشار منفذی اعمال شده و تأثیر آن بر روی سلول فشار بررسی شده است.
 - ۲- تست‌هایی که در آن‌ها سیال حضور ندارد و به صورت خشک انجام شده‌اند. در این تست‌ها فشار منفذی اعمال نشده است و سلول فشار تنها با ماسه خشک تحت فشار قرار می‌گیرد.
- دستگاه مورد استفاده از چهار بخش اصلی تشکیل شده است که عبارت‌اند از:

- ۱- سلول و بدنه اصلی دستگاه
- ۲- سامانه فشار محوری
- ۳- سامانه فشار منفذی
- ۴- فریم انجام آزمایش

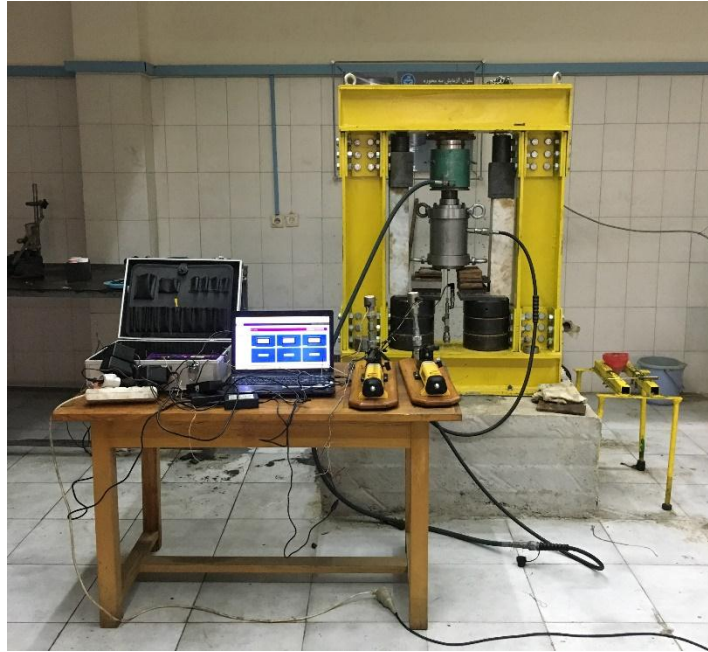
علاوه بر قسمت‌های اصلی، دستگاه شامل سه قسمت فرعی نیز است که عبارت‌اند از:

- ۱- اسپیسرها و صفحات تنظیم‌کننده
- ۲- تجهیزات اعمال تنش
- ۳- تجهیزات اندازه‌گیری فشارهای وارده

در شکل (۱) تصویر کاملی از تمامی قسمت‌های مورد استفاده برای انجام یک آزمایش، قابل مشاهده است. در شکل (۲) نیز تصویر شماتیکی از سلول و بدنه اصلی دستگاه، آورده شده است که به قسمت‌های مختلف استفاده شده در آن اشاره شده است. در ادامه سنسور هیدرولیکی استفاده شده در درون سلول اصلی که مهم‌ترین

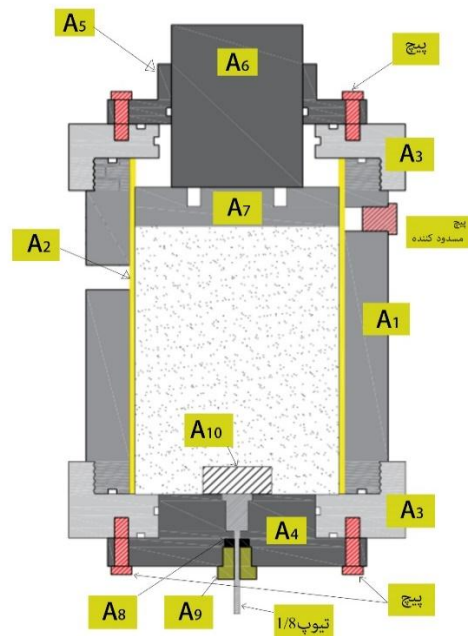
¹ Trap door

۴..... سومین کنفرانس ملی ژئومکانیک نفت
 قسمت در انجام آزمایش ها است، معرفی شده است.



شکل (۱) : تمامی قسمت های لازم برای انجام آزمایش به صورت بر روی هم نصب شده

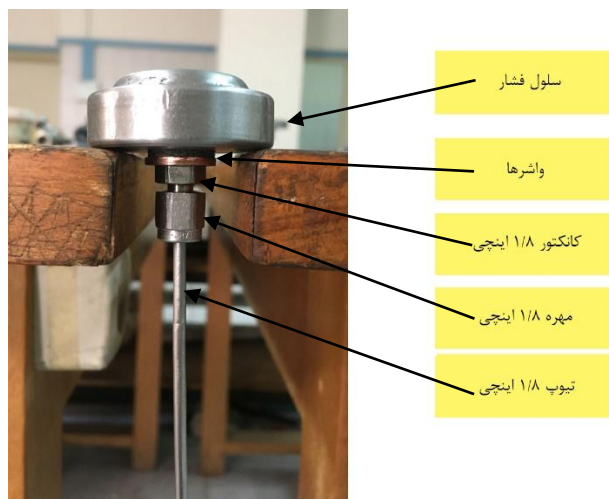
- A1: بدنه سلول
- A2: غشاء پلاستیکی
- A3: درب های اصلی بالایی و پایینی سلول
- A4: درب طراحی شده پایینی متصل شونده به درب اصلی سلول
- A5: درب بالایی متصل شونده به درب اصلی سلول
- A6: استوانه اعمال بار محوری
- A7: صفحه بارگذاری
- A8: واشرهای آب بندی
- A9: گلند
- A10: سلول فشار



شکل (۲) : طرح شماتیکی از سلول و تجهیزات متصل به آن در حین آزمایش

۲-۱- سنسور هیدرولیکی فشار

مهم‌ترین و اصلی‌ترین بخش در تمامی آزمایش‌ها سلول فشار یا همان سنسور هیدرولیکی فشار است. وظیفه اصلی این سلول فشار در درون سلول اصلی، دریافت تنش‌ها و انتقال آن به مبدل فشار برای ثبت کردن تنش‌ها است. به همین منظور از یک تیوپ ۱/۸ اینچ برای اتصال سلول فشار به مبدل فشار استفاده شده است. در شکل (۳) تصویر سلول فشار را در حالتی که تیوپ ۱/۸ اینچی به انتهای آن متصل شده است را می‌توان مشاهده کرد. انتهای دیگر این تیوپ به مبدل فشار متصل می‌شود. سلول فشار را در تصویر شماتیک با نامگذاری A10 می‌توان مشاهده کرد که در انتهای سلول اصلی قرار داده شده است.



شکل (۳): سنسور هیدرولیکی فشار و اتصالاتی که همراه آن داخل سلول اصلی قرار می‌گیرد.

۳- فرآیند انجام آزمایش‌ها

در ابتدا در مورد مواد استفاده‌شده در آزمایش‌ها که همان ماسه دانه‌ای است توضیحی داده شده است و در ادامه نحوه آماده سازی هر یک از قسمت‌های مختلف آزمایش مورد بحث قرار گرفته است

۳-۱- ماسه دانه‌ای مورد استفاده در آزمایش‌ها

برای مطالعه پدیده آرچینگ، از ماسه دانه‌ای خشک استفاده شده است. ماسه دانه‌ای مورد استفاده، تولید شرکت تاوان سیلیس است که این شرکت محصولات خود را با دقت بالایی دانه‌بندی می‌نماید. در جدول (۱) نتیجه حاصل از آنالیز ماسه‌های سیلیسی این شرکت نشان داده شده است که این نتایج درصد بالای سیلیس را نشان می‌دهد.

جدول (۱): نتیجه آنالیز ترکیبی ماسه دانه‌ای شرکت تاوان سیلیس

ترکیبات موجود به همراه درصد آن‌ها						
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
97.60	0.48	0.12	0.18	0.08	0.63	0.14

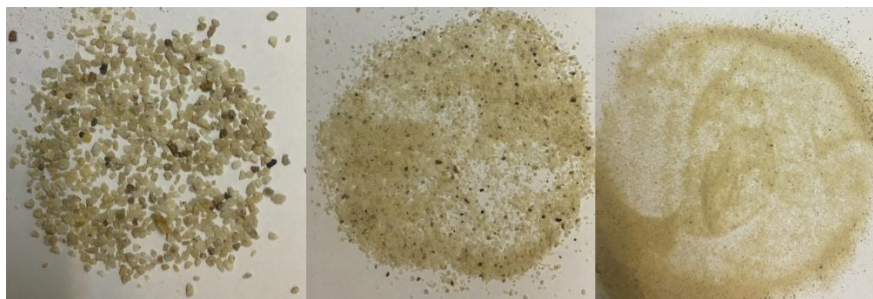
۶..... سومین کنفرانس ملی ژئومکانیک نفت
 به منظور مطالعه بهتر و ایجاد امکان مقایسه نتایج حاصل از آزمایش‌ها، سه نوع ماسه، مورد استفاده قرار گرفته است. این سه نوع ماسه دانه‌ای عبارت‌اند از:

- ماسه M15
- ماسه M40
- ماسه هواکش

تفاوت این سه نوع ماسه در اندازه و دامنه اندازه ذرات آن‌ها است. این ماسه‌ها به ترتیبی که در بالا آورده شده به تدریج ریز دانه تر می‌شوند. در جدول (۲) دامنه اندازه ذرات هر یک از ماسه‌های مورد استفاده بر حسب میلی‌متر آورده شده است. شکل (۴) تصویر هر سه ماسه را در کنار هم نشان می‌دهد.

جدول (۲): دامنه اندازه ذرات ماسه‌های دانه‌ای مختلف

شماره ماسه	M15	M40	هواکش
اندازه ذرات بر حسب میلی‌متر	1-1.7	0.25-0.6	>0.1



شکل (۴): تصویر ماسه‌های دانه‌ای در کنار هم - به ترتیب از راست به چپ: هواکش-M40-M15

۳-۲- آزمایش‌های اصلی

آزمایش‌های اصلی به دو دسته مجزا تقسیم‌بندی شده‌اند که عبارت‌اند از:

- آزمایش‌های اصلی بدون در نظر گرفتن فشار منفذی
- آزمایش‌های اصلی همراه با اعمال فشار منفذی

۳-۲-۱- آزمایش‌های اصلی بدون در نظر گرفتن فشار منفذی

به آزمایش‌های اصلی بدون در نظر گرفتن فشار منفذی آزمایش‌های خشک نیز گفته می‌شود، دلیل این نام‌گذاری عدم وجود سیال درون سلول و نمونه در حین انجام آزمایش است. علاوه بر استفاده از سه نوع ماسه متفاوت در آزمایش‌های خشک، سه حالت مختلف از محل قرارگیری سلول فشار نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. محل قرارگیری سلول فشار در آزمایش‌های اصلی خشک را می‌توان به صورت زیر تفکیک کرد:

- سلول فشار در پایین‌ترین سطح ممکن در درون سلول قرار دارد. پایین‌ترین سطح ممکن در درون سلول با توجه به هندسه سلول و دستگاه، سطح بالایی در طراحی شده پایینی می‌باشد. این حالت از محل قرارگیری سلول فشار را می‌توان در طرح شماتیکی آورده شده در شکل (۲) مشاهده کرد.
- حالت دوم در مورد محل قرارگیری سلول فشار در سلول، حالت میانی است. در این حالت سلول فشار

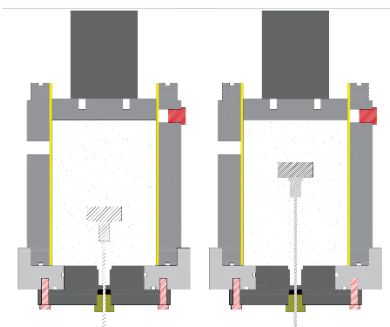
مطالعه آزمایشگاهی تأثیر پدیده آرچینگ در ثبت مقدار تنش‌ها..... ۷

در ارتفاع ۵۰ میلی‌متری از کف سلول قرار دارد.

- حالت سوم، حالتی است که سلول فشار در بالاترین ارتفاع ممکن از کف سلول قرار گرفته است که این ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر است.

با توجه به این نکته که در حین انجام آزمایش باید یک لایه با ضخامت حداقلی روی سلول فشار قرار داشته باشد تا به دیافراگم سلول فشار، آسیبی وارد نشود، ارتفاع حالت سوم در آزمایش‌های خشک ۱۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

طرح شماتیکی حالت اول از آزمایش‌های خشک همانند طرح شماتیکی نشان داده شده در شکل (۲) است. در شکل (۵) نیز طرح شماتیکی حالت دوم و سوم از آزمایش‌های خشک نمایش داده شده است تا درک صحیحی از محل قرارگیری سنسور حاصل شود.



شکل (۵): طرح شماتیکی حالت‌های دوم و سوم آزمایش‌های اصلی خشک

در این گروه از آزمایش‌ها دو مدار به دستگاه جمع‌آوری اطلاعات منتهی شده است. مدار اول، مدار مربوط به مبدل فشاری است که به سلول فشار متصل است. مدار دوم نیز مداری است که از فشارسنج دیجیتال بسته‌شده به پمپ اعمال فشار محوری به دستگاه جمع‌آوری اطلاعات رسیده است. در نتیجه داده‌هایی که در این گروه ثبت می‌شوند، عبارت‌اند از:

- فشاری که به سلول فشار وارد می‌شود (در بخش نتایج این فشار با اصطلاح SENSOR PRESSURE فشار سنسور در نمودارها نشان داده شده است).
- فشار محوری اعمال شده

۳-۲-۲- آزمایش‌های اصلی همراه با اعمال فشار منفذی

به منظور مطالعه و بررسی تأثیر حضور سیال بر روی پدیده آرچینگ، دو آزمایش با اعمال فشار منفذی انجام شده است. در این دو آزمایش برای اعمال فشار منفذی از یک پمپ تزریق روغن دیگر استفاده شده است که این پمپ توسط اتصالاتی به بدنه سلول متصل شده و باعث تزریق روغن به داخل سلول اصلی می‌شود. در این آزمایش‌ها محل قرارگیری سنسور هیدرولیکی داخل سلول اصلی ثابت (پایین‌ترین ارتفاع ممکن) در نظر گرفته شده است.

در مورد ماسه هواکش به دلیل ریز دانه بودن ذرات این نوع ماسه، پس از ترکیب شدن آن با روغن مورد استفاده در آزمایش‌ها، ترکیب ایجادشده حالت گل ماندی به خود می‌گرفت که اجازه عبور سیال از خود را نمی‌دهد و سیال را جذب خود می‌کرد. در نتیجه اعمال فشار منفذی غیرممکن شد، به همین دلیل از آزمایش

مربوط به ماسه هواکش در گروه دوم آزمایش‌ها، صرف‌نظر شد.

نحوه انجام آزمایش‌ها به این صورت بوده که ابتدا ماسه مورد نظر درون سلول بر روی سلول فشار ریخته می‌شود، پس از اینکه سطح ماسه درون سلول به اندازه کافی بالا آمد، صفحه بارگذاری بر روی سطح نمونه قرار داده می‌شود. در آزمایش‌های گروه دوم تزریق روغن از طریق پمپ مربوط به فشار منفذی شروع می‌شود. این مرحله تا اشباع کامل نمونه از روغن ادامه پیدا می‌کند. پس از هواگیری، استوانه اعمال بار وارد می‌شود. اعمال فشار منفذی ادامه پیدا می‌کند تا فشارسنج عدد ۱ بار را نشان دهد، سپس شیر پمپ را تنظیم کرده تا مقدار فشار منفذی به صفر بار برگردد. حال سلول و نمونه اشباع از روغن تزریق شده است. در این مرحله اعمال فشار محوری شروع می‌شود. متناسب با افزایش فشار محوری مقدار فشار منفذی نیز افزایش نشان می‌دهد که این داده‌ها توسط دستگاه جمع‌آوری اطلاعات ثبت می‌شود. در این حین تغییرات فشار وارد به سلول فشار نیز ثبت می‌شود.

۳-۲-۳- آزمایش کالیبراسیون

قبل از انجام آزمایش‌های اصلی برای بررسی صحت و دقت سلول فشار، باید آزمایش کالیبراسیون انجام شود. فرآیند انجام این آزمایش به این صورت است که سلول فشار درون سلول اصلی قرار داده می‌شود و فضای داخلی سلول از روغن پر می‌شود.

پارامترهایی که در این آزمایش اندازه‌گیری و ثبت می‌شوند، عبارت‌اند از:

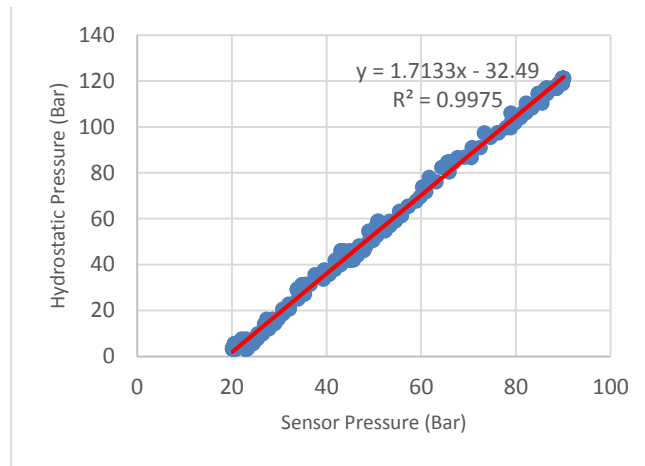
- فشار هیدرواستاتیک اعمال شده توسط روغن
- فشار وارد شده به سلول فشار

فرآیند انجام این آزمایش مشابه آزمایش‌های همراه با اعمال فشار منفذی است که نقطه اختلاف آن‌ها حضور ماسه در آزمایش‌های اصلی و عدم حضور ماسه در آزمایش کالیبراسیون است. در آزمایش کالیبراسیون روغن موجود درون سلول با سلول فشار ارتباط مستقیم دارد و افزایش فشار سیال باعث افزایش فشار وارد به سلول فشار می‌شود. تغییرات فشار وارد بر سلول فشار در حین افزایش فشار و کاهش فشار سیال موجود در سلول به وسیله دستگاه جمع‌آوری اطلاعات ثبت می‌شود. نمودارهای حاصل از این آزمایش همانند نتایج حاصل از آزمایش اصلی در بخش نتایج آورده می‌شود.

۴- نتایج آزمایش‌ها

۴-۱- نتایج آزمایش کالیبراسیون

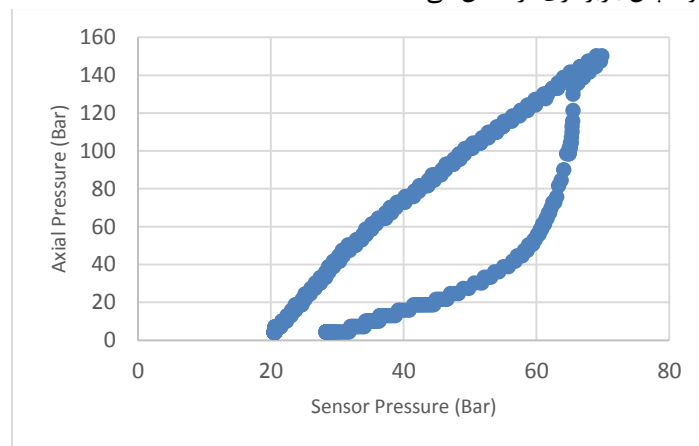
همان‌طور که اشاره شد در این آزمایش مواد جامدی در درون سلول نیست و این آزمایش را می‌توان به نوعی نشان‌دهنده رفتار سلول فشار در محیطی که فقط سیال حضور دارد دانست. به همین منظور می‌توان نتیجه حاصل از این آزمایش را با نتیجه حاصل از یک آزمایش اصلی خشک که در آن سیال نقشی ندارد مقایسه کرد تا به تفاوت رفتاری سلول فشار در محیط جامد و سیال پی برد. شکل (۶) نمودار حاصل از انجام آزمایش کالیبراسیون را نشان می‌دهد که شامل یک رفت و برگشت کامل است. همان‌طور که دیده می‌شود، تغییرات این دو پارامتر نسبت به هم خطی است. معادله خط رسم شده خطی بودن این روند را تأیید می‌کند. همچنین مقدار R^2 (ضریب تعیین) دقت بالای خط گذر داده شده را نشان می‌دهد.



شکل (۶): نمودار حاصل از انجام آزمایش کالیبراسیون

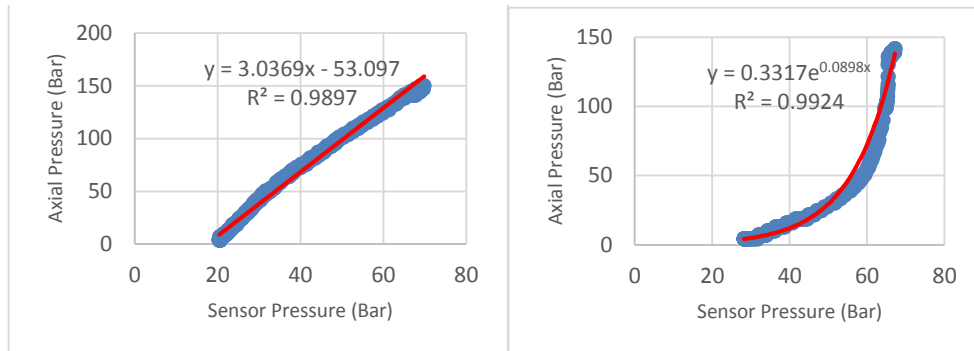
۲-۴- نتایج آزمایش اصلی خشک

شکل (۷) نمودار نتایج حاصل از انجام آزمایش خشک در ماسه M15 را نشان می‌دهد (انتخاب ماسه M15 برای این آزمایش بدون هیچ هدف خاصی صورت گرفته است زیرا هدف از مقایسه رفتار سلول فشار در این دو محیط متفاوت، یک مقایسه کیفی است و مقایسه کمی منظور نمی‌باشد). نمودار زیر یک رفت و برگشت کامل (فرآیند بارگذاری و سپس باربرداری) را نشان می‌دهد.



شکل (۷): نمودار حاصل از انجام آزمایش خشک با ماسه M15

نمودار شکل (۷) را می‌توان به دو زیرنمودار ساده تجزیه کرد که در شکل (۸) قابل مشاهده است. نمودار رفت یک رفتار خطی از خود نشان می‌دهد، این در حالی است که نمودار برگشت یک رفتار منحنی طور از خود به نمایش می‌گذارد که یک تابع نمایی است. با مشاهده دو شکل (۶) و (۷) می‌توان تفاوت رفتار سلول فشار را در دو محیط سیال و جامد در دو فرآیند رفت و برگشت مقایسه کرد.



شکل (۸): نمودار سمت چپ: نمودار مرحله رفت (بارگذاری)
نمودار سمت راست: نمودار مرحله برگشت (باربرداری)

رفتار سلول فشار را در هر دو مرحله رفت و برگشت چنین می‌توان جمع‌بندی کرد:

- رفتار سنسور نسبت به افزایش فشار محوری در تمام مرحله رفت، یک رفتار ثابت و قابل پیش‌بینی است.
- رفتار سنسور نسبت به کاهش فشار محوری در بخش‌های مختلف مرحله برگشت رفتاری متغیر و نا ثابت است. به این شکل که در ابتدای مرحله برگشت به ازای کاهش چشمگیر مقدار فشار محوری، تنها مقدار اندکی از فشار سنسور کاسته می‌شود. این در حالی است که در انتهای مرحله برگشت تنها با کاهش اندک مقدار فشار محوری، تغییر چشمگیری در فشار سنسور رخ می‌دهد. علت این رفتار تراکم پذیری ماسه است. به این ترتیب که در حین مرحله بارگذاری ماسه تحت فشار وارد شده، متراکم می‌شود ولی در مرحله باربرداری یا برگشت، ماسه متراکم شده به راحتی از روی دیافراگم سلول فشار برداشته نمی‌شود و به نوعی دچار قوس زدگی می‌شود و این حالت تا مدتی پس از باربرداری کامل حاکم است و فقط پس از باربرداری کامل قوس ایجاد شده در ماسه، فشارش را از روی دیافراگم سلول فشار برمی‌دارد.

۳-۴- مطالعه و بررسی تکرارپذیری رفتار ماسه ها و محل قرارگیری سلول فشار

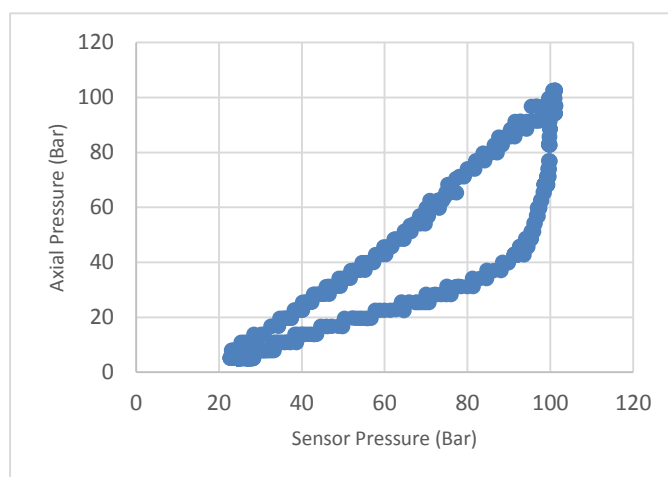
به منظور اعتبارسنجی رفتاری که از سلول فشار در دو محیط سیال و جامد مشاهده شد، و همچنین بررسی ثابت بودن و عدم تصادفی بودن رفتار سلول فشار در این دو محیط، در همه آزمایش‌ها فرآیند انجام آزمایش‌ها برای چندین رفت و برگشت انجام داده شد. با مقایسه نتایج حاصل از آزمایش‌هایی که در آن‌ها تعداد مراحل رفت و برگشت انجام شده بیش از یک بار است، با نتایج حاصل از آزمایش‌هایی که در آن‌ها صرفاً یک بار مرحله رفت و برگشت انجام شده است، تکرارپذیری رفتار سلول فشار مورد تایید قرار گرفته است. همانطور که اشاره شد محل قرارگیری سلول فشار نیز مورد مطالعه قرار گرفته است که به دلیل محدودیت در تعداد صفحات صرفاً نتایج آن بیان می‌شود.

در درجه اول با مقایسه ۳ نمودار که نشان‌دهنده ۳ محل قرارگیری متفاوت برای سلول فشار در یک ماسه واحد هستند، این نتیجه حاصل می‌شود که محل قرارگیری سلول فشار در رفتار سلول فشار تغییری ایجاد نمی‌کند. در واقع هر سه نمودار در مرحله رفت رفتار خطی از خود نشان می‌دهند و در مرحله برگشت رفتاری نامایی دارند. در درجه دوم با نگاه دقیق تر و عمیق تر در سه نمودار مورد نظر می‌توان به اختلاف عددی موجود در این سه

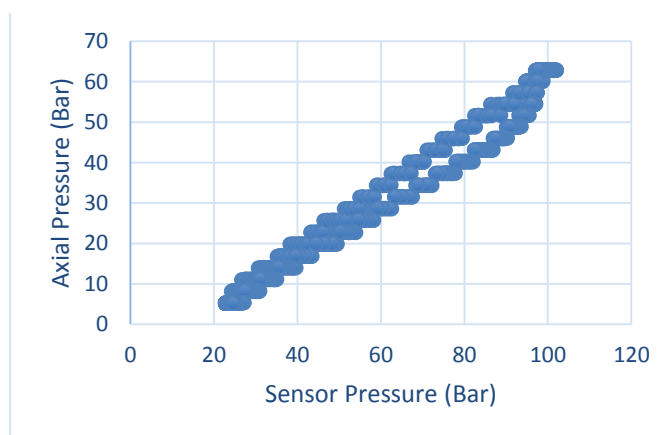
مطالعه آزمایشگاهی تأثیر پدیده آرچینگ در ثبت مقدار تنش‌ها..... ۱۱
 نمودار پی برد. این اختلاف از یک روند مشخص برخوردار است. به این صورت که هر چه محل قرارگیری سلول فشار بالاتر می رود، فشار سنسور در یک مقدار مشخص فشار محوری، مقدار بالاتری را نشان می‌دهد.

۴-۴- مطالعه و بررسی رفتار سلول فشار با اعمال فشار منفذی

برای مطالعه و بررسی رفتار سلول فشار در این آزمایش، تغییرات سنسور نسبت به فشار محوری نمایش داده می‌شود که نمودار این تغییرات در شکل (۹) و (۱۰) برای دو ماسه M15 و M40 آورده شده است. این نمودارها نشان دهنده ۲ مرحله کامل رفت و برگشتی است. همان طور که در هر دو نمودار مشاهده می‌شود، رفتار سلول فشار در محیط ماسه‌ای که در آن فشار منفذی نیز اعمال شده است، نشان دهنده اختلافی بین فرآیند رفت و فرآیند برگشت است، در غیر این صورت باید نمودار مرحله رفت و مرحله برگشت بر روی هم منطبق می‌شد.



شکل (۹): نمودار آزمایش بر روی ماسه M15 به صورت دو رفت و برگشت کامل



شکل (۱۰): نمودار آزمایش بر روی ماسه M40 به صورت دو رفت و برگشت کامل

با مشاهده نمودارهای به دست آمده از آزمایش‌هایی که در آن‌ها فشار منفذی اعمال شده است، و مقایسه

۱۲..... سومین کنفرانس ملی ژئومکانیک نفت

آن‌ها با نمودارهایی که در بخش‌های قبل برای آزمایش‌های اصلی خشک نشان داده شد، می‌توان به تغییری که در روند مراحل برگشت در آزمایش‌های اخیر رخ داده است، پی برد. در آزمایش‌هایی که فشار منفذی اعمال شده است، حضور سیال در محیط تأثیری در روند فرآیند برگشت گذاشته است. به شکلی که در نمودارهای خشک نشان داده شده در قسمت‌های قبل بخشی از نمودار که نشان‌دهنده فرآیند برگشت بوده از شکل تابع نمایی پیروی می‌کرده است در حالی که در دو آزمایش اخیر فشار منفذی، شیب این نمودار ملایم شده و به حالت خطی تمایل یافته است. این تغییر شکل در نمودارهای ماسه M40 نمایان تر است. در مورد نمودارهای ماسه M15 تغییر شکل اتفاق افتاده بیشتر در بخش دوم فرآیند برگشت خود را نشان می‌دهد.

با مقایسه نمودارهای ماسه‌های M15 و M40 در آزمایش‌هایی که در آن‌ها فشار منفذی اعمال شده است می‌توان به این نتیجه دست یافت که در آزمایش ماسه M15 برای اینکه فشار سنسور به ۱۰۰ بار برسد مقدار فشار محوری لازم برابر با ۱۰۰ بار است. این در حالی است که در آزمایش ماسه M40 برای اینکه فشار سنسور به ۱۰۰ بار برسد، مقدار فشار محوری لازم حدوداً ۶۰ بار است. در نتیجه می‌توان ادعا کرد که با تغییر نوع ماسه از M15 به M40 برای رسیدن فشار سنسور به هر مقداری، مقدار فشار محوری لازم کاهش می‌یابد. به عبارتی می‌توان گفت در ماسه M40، انتقال تنش به سلول فشار بهتر صورت می‌گیرد.

۵- نتیجه گیری

طبق نتایج به دست آمده در آزمایش‌های اصلی خشک، با بالا بردن محل قرارگیری سلول فشار، مقدار فشار قرائت‌شده برای سنسور افزایش می‌یابد.

در ۲ آزمایش نیز تأثیر اعمال فشار منفذی مورد تحقیق قرار گرفت. این دو آزمایش به نوعی ترکیب بررسی رفتار سلول فشار در سیال و جامد بودند، زیرا در محیط هم ماسه دانه‌ای M15 یا M40 و هم روغن حضور داشت. با بررسی نتایج این دو آزمایش و مقایسه آن‌ها با نتایج حاصل از آزمایش‌های خشک تأثیر حضور سیال مشخص می‌شود. در این دو آزمایش نمودار مرحله برگشت تغییر شکل پیدا کرده است که به نوعی تمایل به سمت خطی شدن همانند نمودارهای رفتار سلول فشار در سیال دارد. همچنین بر اساس نتایج این ۲ آزمایش مشاهده می‌شود که با تبدیل نوع ماسه از M15 به M40 مقدار کمتری فشار محوری لازم است تا فشار سنسور افزایش پیدا کند. به عبارتی به ازای مقادیر کمتری از فشار محوری در ماسه M40 فشار سنسور از خود افزایش نشان می‌دهد.

بر اساس تمامی نمودارهای به دست آمده می‌توان گفت در محیط‌هایی که ماسه ای هستند یا همانند ماسه شرایط دانه ای و خاصیت تراکم پذیری و شرایط رخ دادن آرچینگ در آنها وجود دارد، اگر با کمک سلول‌های فشار، توزیع تنش و تغییرات آن در این محیط‌ها مورد بررسی قرار داده شود، باید توجه کرد که این مواد بر اثر فرآیند و شرایط بارگذاری دچار تراکم می‌شوند و در آنها همزمان پدیده آرچینگ رخ می‌دهد و به نوعی در آنها قوسی بر اثر تنش‌های وارد شده ایجاد می‌شود که این قوس در میزان فشارهای وارد شده به سازه (چه طبیعی و چه ساخت دست بشر) تفاوت‌هایی را رقم می‌زند. همان‌طور که در نمودارها دیده شد قوس ایجاد شده در حین باربرداری نقش مهمی بازی می‌کند. به این صورت که قوس ایجاد شده بر روی سلول فشار مانع از برداشته شدن فشار از روی سلول فشار شده و در نتیجه مقدار تنشی که سازه همچنان تحمل می‌کند بیشتر خواهد بود.

۶- مراجع

- [1] Feld, Jacob ; (1948); "Early History and Bibliography of Soil Mechanics", Second International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam, Vol. 1.
- [2] Spangler, M.G. & R.L. Handy; (1973); "Soil Engineering", 3rd Edition, Intext Educational Publishers, New

York.

[3] Karl Terzaghi; (1943); "*Theoretical Soil Mechanics*", John Wiley and Sons, New York.

[4] Whitman, R.V., Z. Getzler, & K. HSeg; (1963); "*Tests upon Thin Domes Buried in Sand*", Journal of the Boston Society of Civil Engineers, January.

[5] Getzler, Z., M. Gellert, & R. Eitan; (1970); "*Analysis of Arching Pressures in Ideal E Elastic Soil*", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division.

[6] Rude, Lawrence C.; (1983); "*Load Reduction on Buried Rigid Pipe*", Journal of Transportation Engineering, ASCE, Vol. 109, No. 1.

[7] Sakaguchi, H. & E. Ozaki; (1992); "*Analysis of the Formation of Arches Plugging the Flow of Granular Materials*", Proceedings of the 2nd International Conference on Discrete Element Method, MIT, Cambridge, Massachusetts.



3rd National Conference on Petroleum Geomechanics
National Iranian Oil Company Exploration Directorate
Tehran, Jan,22-23,2019

***EXPERIMENTAL INVESTIGATION REGARDING THE IMPACT OF ARCHING
PHENOMENON IN RECORDING STRESS VALUES BY PRESSURE CELLS IN
POROUS MEDIA***

Behnam Rahimi Mohseni¹; Mahdi Moosavi²

Extended Abstract: Arching phenomenon is one of the universal phenomena encountered in soils both in the field and in the laboratory. This phenomenon is recognized both in underground structures and in the natural landscape. Underground conduits, karst terrain and sandstone reservoirs are good examples of cases in which arching phenomenon can be widely observed. When this phenomenon happens in underground structures, because of arching effect the overburden pressure will be decreased. The stress redistribution affects the load that puts pressure on the structures while the source of the pressure can be overburden soil, surface surcharge, or lateral earth pressure.

Arching phenomena has a lot of effects on geotechnical engineering, rock mechanics, geomechanics engineering, and other cases so a lot of researchers have tried to understand its mechanism for years. Most of researches that has been done in this case can be divided in 4 main parts: theoretical derivations, analytical methods, numerical analyses, and experimental investigations.

In this thesis base on some proposes that are defined, most of studies and investigations that should be done, are related to experimental investigations. First, by designing and building some necessary parts, a Hook cell is changed in order to build a new special cell for new experiments.

The new apparatus has been equipped with an accurate data logger, digital pressure sensors, and some instruments for applying the axial pressure and pore pressure to carry out some experiments to investigate the impact of arching phenomenon on loading processes and unloading processes on sands. The experiments should explore the effects of some parameters on some kind of sands. In this thesis impact of arching phenomena on 3 kind of sands has been studied in 3 different conditions including individual fluid, dry sand, and two phase fluid and sand sample.

Base on results of the experiments, in some cases that the cell is only filled by sand, during the loading processes sand will be compressed and arching will happen then an arch on the pressure cell will develop that during the unloading processes will put its maximum impact on the pressure cell. When the axial pressure and pore pressure reduce the sensor pressure doesn't reduce same as them. So, for sands two different behaviors have been recorded that show there is an important difference between loading processes and unloading processes in sands.

Keywords: *Arching phenomena, stress redistribution, new apparatus, axial pressure, pore pressure, pressure cell, loading, unloading.*

¹ M.Sc. Student of oil exploration engineering, University of Tehran, behnamrahimi71@ut.ac.ir.

²Associate Prof. of Mining Engineering, University of Tehran, mmoosavi@ut.ac.ir.