



مدل سازی فیزیکی چاه های نفت هنگام حفاری با استفاده از سلول سه محوری طراحی شده

مهدی حسینی^{*}، سونیا آقایی

گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳ آبان ۱۳۹۴
بازنگری: ۶ مرداد ۱۳۹۵
پذیرش: ۱۷ آبان ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۱۵ آذر ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

مدل سازی فیزیکی
سلول سه محوری
حفاری
چاه
نفت

چکیده: پیش بینی رفتار چاه های نفت هنگام حفاری برای جلوگیری از صرف هزینه های زیاد و بروز مشکلات پایداری مهم است. از جمله این مشکلات می توان به شکست دیواره ی چاه طی حفاری اشاره کرد. برای مدل سازی شکست دیواره ی چاه های نفت هنگام حفاری می توان از نمونه های استوانه ای توخالی جدار ضخیم استفاده کرد. سلول های سه محوری مختلفی برای این آزمایش در دنیا وجود دارند. سلول استفاده شده در این تحقیق بر اساس سلول هوک طراحی شده است. از مزایای این سلول می توان به قابلیت مدل سازی چاه های نفت هنگام حفاری و همچنین مدل سازی شکست هیدرولیکی اشاره کرد. همچنین امکان اندازه گیری کرنش مماسی در حفره مرکزی وجود دارد. این امکانات در بیشتر سلول های سه محوری به طور همزمان وجود ندارند. برای بررسی کارایی این سلول، نمونه های استوانه ای توخالی جدار ضخیم از گچ و بتن ساخته شد. در این مقاله از دو مسیر تنش مختلف برای اعمال فشار در سلول سه محوری استفاده شده است که عبارتند از: $\sigma_2 > \sigma_1 > \sigma_3 = 0$ و $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 0$. نتایج مطالعات در دو مسیر تنش مختلف نشان می دهد در شرایطی که تنش مماسی ناشی از تنش جانبی، تنش حداکثر باشد، شکست در اطراف چاه به صورت برشی در دو جهت مخالف دیواره رخ می دهد. همچنین، وقوع شکست در دیواره نمونه های استوانه ای جدار ضخیم به علت اختلاف تنش جانبی و فشار داخلی است. با افزایش این اختلاف تنش، عمق شکست و گسترش ترک در دیواره نمونه های استوانه ای جدار ضخیم نیز افزایش خواهد یافت. علاوه بر این، قابل توجه است که در حضور فشار داخلی، عمق شکست یا ناحیه پلاستیک نسبت به عدم حضور آن کاهش می یابد.

۱- مقدمه

حفر چاه در صنایع مختلف مانند نفت، گاز و معدن موضوعی است که همواره با صرف هزینه های زیاد و مشکلات ناپایداری همراه است. بنابراین بررسی رفتار چاه ها در هنگام حفر که با وقوع انواع تغییر شکل ها و شکست در آن ها همراه است، امری ضروری و حیاتی می باشد [۱ و ۲]. از کاربردهای نمونه های استوانه ای توخالی می توان به بررسی ناپایداری اطراف فضاهای زیرزمینی در صنایع مختلف مانند نفت، گاز و معدن که همواره با صرف هزینه های زیاد و مشکلات وسیع همراه بوده است، اشاره کرد [۳].

مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه های استوانه ای جدار ضخیم به قرن بیستم مربوط می شود که ابتدا آدامس^۱ [۴] و کینگ^۲ [۵] مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه های استوانه ای توخالی را شروع کردند. سپس بریجمن^۳ [۶] کارهای آدامس را با تغییر در شرایط بارگذاری تکرار کرد. رابرتسون^۴ [۷] اثر نسبت قطر داخلی به قطر خارجی را بر روی مقاومت

و تغییر شکل نمونه های استوانه ای توخالی بررسی کرد. هاس کینز^۵ [۸] آزمایش هایی بر روی نمونه های استوانه ای توخالی برای تعیین شکست در پنج نوع سنگ ایزوتروپیک انجام داد. آلساید^۶ [۹، ۱۰] رفتار تغییر شکل تحت بارگذاری های مختلف بر روی نمونه های استوانه ای توخالی را مطالعه کرد. گای^۷ [۱۱] مطالعات قبلی انجام شده بر روی گسترش ترک در نمونه های استوانه ای توخالی را توسعه داد. بندیس^۸ [۱۲] وضعیت های تنش و مودهای شکست اطراف فضاهای زیرزمینی را با استفاده از نمونه های استوانه ای توخالی تحت شرایط بارگذاری مختلف بررسی کرد. ایوی و کوک^۹ [۱۳، ۱۴] آزمایش های اضافی برای مطالعه رفتار تغییر شکل و شکست اطراف فضاهای زیرزمینی بر روی نمونه های استوانه ای توخالی انجام دادند. براون^{۱۰} و سانتارلی^{۱۱} [۱۰] توسعه شکست در استوانه های جدار ضخیم را

5 Hoskins
6 Alsayed
7 Gay
8 Bandis
9 Ewy and Cook
10 Brown
11 Santarelli

* نویسنده عهده دار مکاتبات: mahdi_hosseini@ikiu.ac.ir

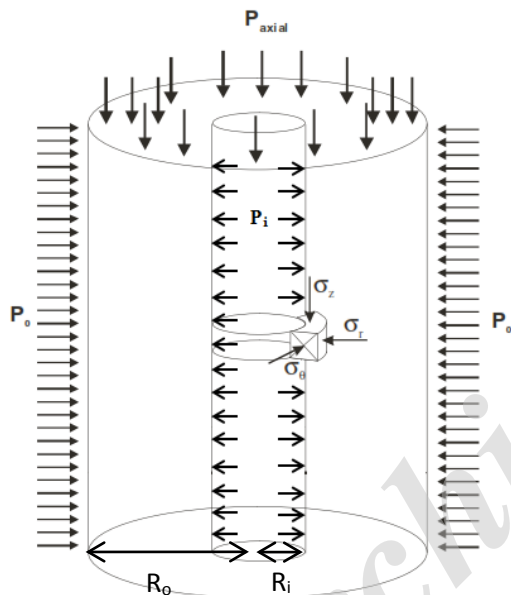
1 Adams
2 King
3 Bridgman
4 Robertson

$$\sigma_{\theta} = \frac{P_o R_o^2 - P_i R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} + \frac{(P_o - P_i) R_i^2 R_o^2}{r^2 (R_o^2 - R_i^2)} \quad (2)$$

و برای شرایط حاضر تنش محوری σ_z از رابطه ۳ بدست می‌آید:

$$\sigma_z = \frac{F}{\pi (R_o^2 - R_i^2)} - \frac{P_i R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} \quad (3)$$

تنش محوری در سطوح انتهایی نمونه‌ی استوانه‌ای به صورت یکنواخت گسترده شده است، معادله ۱ و ۲ نشان می‌دهند که تنش شعاعی و مماسی بر حسب فاصله از مرکز نمونه متغیر هستند. بسته به مقادیر فشار داخلی، تنش جانبی و تنش محوری اعمال شده بر نمونه، هر کدام از تنش‌های مماسی، شعاعی و محوری ناشی شده می‌توانند به عنوان تنش‌های حداکثر، حداقل و میانی محسوب شوند [۲۲ و ۱۶].



شکل ۱: نمایی از یک نمونه‌ی استوانه‌ای جدار ضخیم تحت فشار داخلی، تنش جانبی و تنش محوری [۱۶]

Fig. 1. A view of a thick-walled hollow cylinder sample under internal pressure, confining pressure and axial stress [16]

شکست در نمونه‌های استوانه‌ای توخالی با توجه به مسیر تنش‌های مختلف می‌تواند به دو صورت برشی و کشش رخ دهد، البته شکل شکست در دیواره‌ی نمونه‌های استوانه‌ای شکل به جهت و اندازه‌ی تنش‌های اصلی بستگی دارد. انواع مختلف شکل‌های شکست در نمونه‌های استوانه‌ای توخالی در شکل ۲ نشان داده شده است [۲۴].

مطالعه‌کردند. پری^۱ و گودمن^۲ [۱۵] مطالعاتی بر روی نمونه‌های گچی برای مطالعه شکست در نمونه‌های استوانه‌ای توخالی انجام دادند. الکادی^۳ [۱۶] شکست در نمونه‌های استوانه‌ای توخالی بتنی را بررسی کرد. وارلیک^۴ و همکاران [۱۷] از نمونه‌های استوانه‌ای توخالی برای مطالعه پایداری دیواره‌ی چاه‌های نفت در طی حفاری و تولید استفاده کردند.

در مطالعات اخیر، هاشمی^۵ و همکاران [۳] اثرات پارامترهای مختلف مانند مقدار آب و سیمان، توزیع اندازه دانه‌ها، زمان عمل‌آوری نمونه‌ها استوانه‌ای جدار ضخیم را باهدف پیش‌بینی پایداری چاه حین حفاری مطالعه کردند. مییر^۶ و همکاران [۱] با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی اثر شیب لایه‌ها بر روی پایداری چاه را توسط نمونه‌های استوانه‌ای جدار ضخیم بررسی کردند. در این راستا، شکست‌های رخ داده در دیواره نمونه‌های استوانه جدار ضخیم طی تغییر شیب لایه‌ها نسبت به محور چاه مطالعه شد. همچنین، هاشمی و همکاران [۱۹] با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی نمونه‌های استوانه‌ای جدار ضخیم، اثر رژیم‌های مختلف تنش بر روی پایداری چاه را بررسی کردند که نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه فشار جانبی بر روی پایداری چاه بود. سانتانا^۷ و همکاران [۲۰] ترکیبی از مطالعات آزمایشگاهی توسط نمونه‌های استوانه‌ای جدار ضخیم و روش‌های عددی را برای پیش‌بینی تولید ماسه در چاه استفاده کردند. سپس هاشمی و همکاران [۲۱] مطالعات آزمایشگاهی بر روی ارتباط بین منطقه‌های موضعی و ناپایداری چاه را با استفاده از نمونه‌های استوانه جدار ضخیم از جنس ماسه ضعیف سیمانی شده انجام دادند.

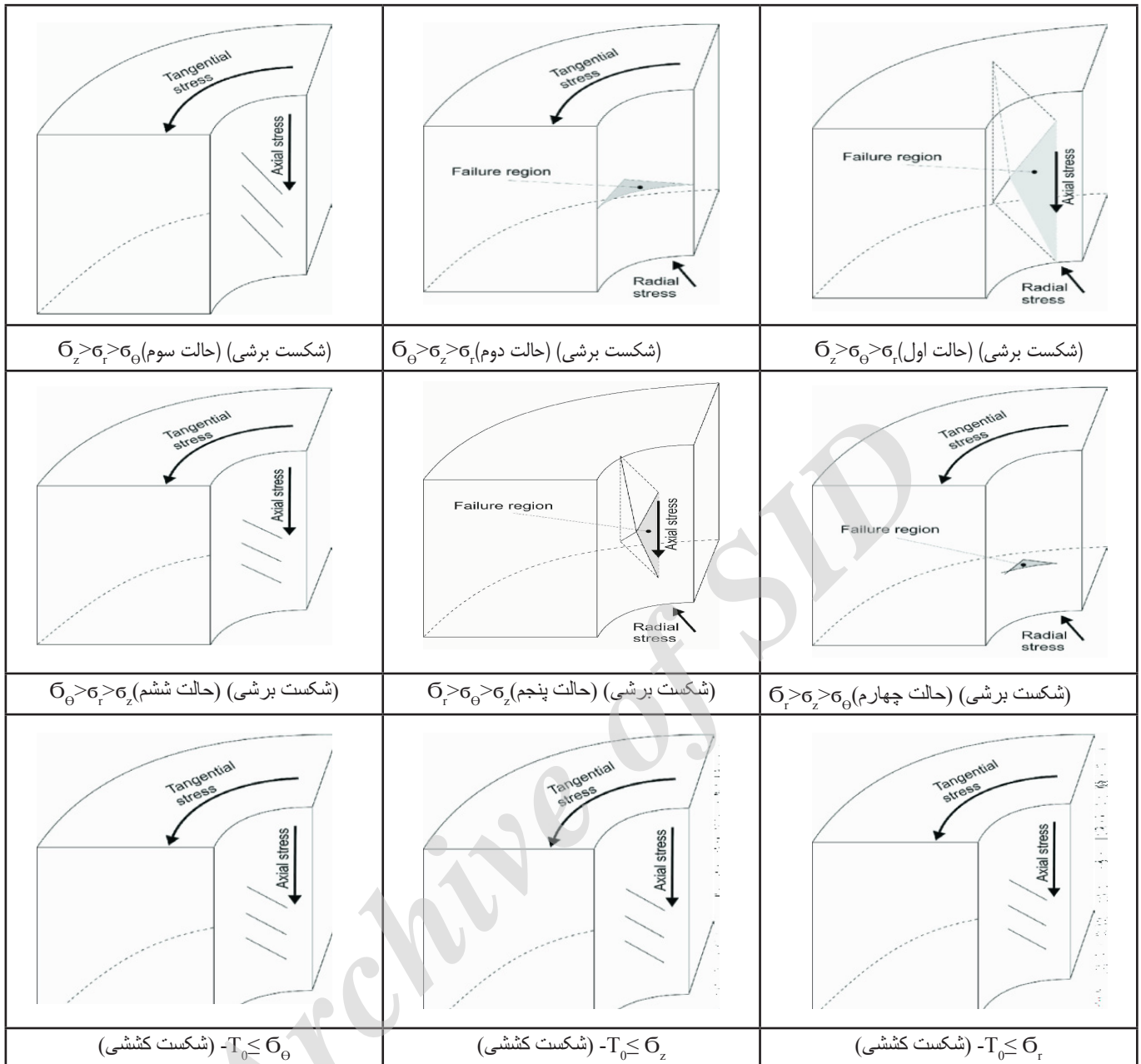
مطالعات انجام شده بر روی نمونه‌های استوانه‌ای توخالی نشان از اهمیت و نقاط قوت این روش است. در این مقاله کارایی سلول سه‌محوری طراحی شده برای مدل‌سازی فیزیکی چاه‌های نفت حین حفاری با انجام آزمایش‌هایی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای توخالی گچ و بتن تحت شرایط بارگذاری مختلف سه‌محوره بررسی شده است.

۲- تنش در نمونه‌های استوانه‌ای توخالی

در شکل ۱، توزیع تنش در یک نمونه‌ی استوانه‌ای توخالی دارای شعاع داخلی R_i ، شعاع خارجی R_o ، که تحت فشار داخلی یکنواخت P_i ، فشار خارجی P_o و نیروی محوری P می‌باشد نشان داده شده است. با استفاده از مختصات استوانه‌ای (r, θ, z) تنش‌های σ_r و σ_{θ} در هر نقطه با فاصله شعاعی (r) از مرکز نمونه از معادلات ۱ و ۲ محاسبه می‌شوند [۲۲]:

$$\sigma_r = \frac{P_o R_o^2 - P_i R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} - \frac{(P_o - P_i) R_i^2 R_o^2}{r^2 (R_o^2 - R_i^2)} \quad (1)$$

- 1 Perie
- 2 Goodman
- 3 Elcadi
- 4 Warlick
- 5 Hashemi
- 6 Meier
- 7 Santana



شکل ۲: انواع مختلف شکست برشی و شکست کششی در دیواره نمونه‌های استوانه‌ای توخالی [۲۳]

Fig. 2. Different types of shear failure and tensile failure in the wall of hollow cylindrical samples [23]

حفری و همچنین امکان مدل‌سازی آزمایش شکست هیدرولیکی نیز توسط این سلول امکان‌پذیر است. در این سلول می‌توان کرنش سنج در جداره حفره مرکزی نصب کرد و کرنش مماسی را اندازه‌گیری کرد. سلول استفاده شده در این پژوهش در شکل ۳ نشان داده شده است.

۳- سلول سه محوری طراحی شده

سلول هوک سه محوره ساخته شده توسط هوک و فرانکلین [۲۲] به‌طور وسیع برای آزمایش تراکم سه محوری روی نمونه‌های استوانه‌های توپر دارای قطر ۵۴/۷ میلی‌متر به کار می‌رود و امکان اندازه‌گیری کرنش‌ها در سلول هوک وجود ندارد. ولی با استفاده از سلول هوک تغییر شکل یافته طراحی شده توسط حسینی و همکاران امکان آزمایش روی نمونه‌های استوانه‌ای توخالی جدار ضخیم دارای قطر ۷۳ میلی‌متر برای مدل‌سازی چاه نفت هنگام

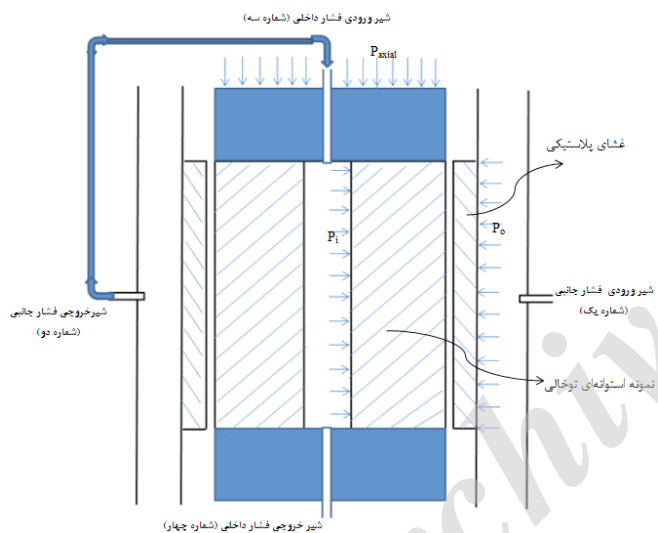
و داخلی، فشار داخلی را به طور دلخواه تا حد معین کاهش داد. به عبارتی می توان حفاری را با انجام این عمل شبیه سازی کرد. امکانات اصلی لازم برای اعمال تنش محوری، تنش جانبی و فشار داخلی و همچنین برای ثبت تغییر شکل عبارتند از:

- یک سیستم بارگذاری محوری خود کنترل برای اعمال بار محوری تا حد بیشینه ۲۰۰ تن.
- دستگاه اعمال فشار هیدرولیکی برای اعمال فشار جانبی و متعاقب آن اعمال فشار داخلی با ظرفیت ۶۰ مگاپاسکال.
- آن مجموعه ی ثبت داده های تغییر شکل. در این سلول فقط امکان اندازه گیری کرنش مماسی وجود دارد. سیم های کرنش سنج بسیار نازک هستند از پشت پوشش داخلی از حفره مرکزی خارج و در صفحه بارگذاری بالایی مجرای برای خروج سیم های کرنش سنج وجود دارد سیم های خروجی سپس به دستگاه ثبت داده ها وصل می شود.



شکل ۳: (الف) نمایی کلی از سلول هوک تغییر یافته، (ب) سلول هوک تغییر یافته با نمونه داخل آن در دید از بالا و (ج) اجزای داخلی سلول هوک

Fig. 3. (a) The overall view of the modified Hoek cell, (b) modified Hoek cells with the sample inside it, the view from above



شکل ۴: نمایی از طراحی انجام شده برای اعمال فشار داخلی در سلول طراحی شده توسط حسینی و همکاران

Fig. 4. An overview of the design used to apply internal pressure in the cell designed by Hosseini et al

۴-۴ مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه های گچ و بتن

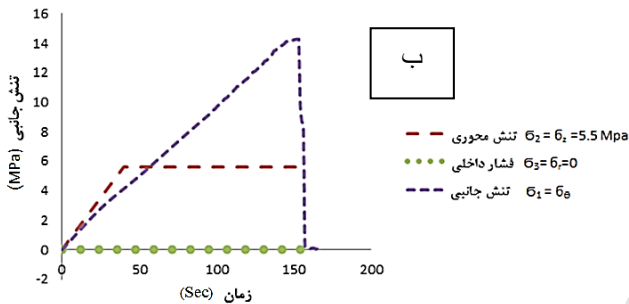
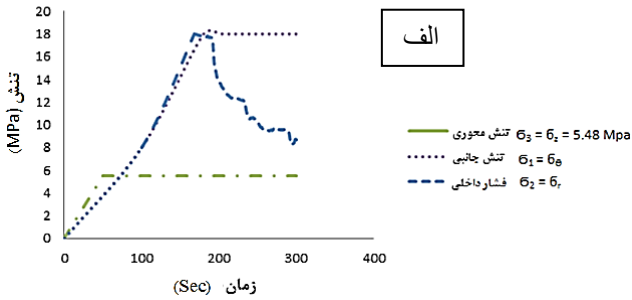
نمونه های استوانه ای توخالی باهدف شبیه سازی چاه های نفت در طی حفاری، از گچ و بتن ساخته شد برای تهیه نمونه های گچی، نسبت اختلاط گچ به آب، سه به یک و برای بتن، نسبت سیمان به ماسه، یک به یک در نظر گرفته شد. با توجه به ابعاد سلول هوک، ابعاد نمونه های تهیه شده دارای ارتفاع ۱۵۶ میلی متر، قطر داخلی ۲۵ میلی متر و قطر خارجی ۷۳ میلی متر می باشند. برای شناخت مشخصات ژئومکانیکی نمونه های گچ و بتن استفاده شده برای آزمایش، آزمون های ژئومکانیکی مطابق با استانداردهای

در شکل ۴ نشان داده شده است که برای اعمال تنش جانبی ابتدا روغن از شیر ورودی شماره ۱ وارد می شود و توسط غشای پلاستیکی طراحی شده فشار جانبی را به نمونه مورد نظر اعمال می کند و سپس همزمان با افزایش فشار جانبی شیر خروجی شماره ۲ باز شده و روغن خارج شده از طریق شیر ورودی شماره ۳ طراحی شده برای فشار داخلی (فشار داخل حفره مرکزی) وارد فضای داخلی نمونه می شود. با انجام این عمل می توان فشار داخلی را همزمان با افزایش فشار جانبی تا مقدار دلخواه افزایش داد. در حفره مرکزی نیز پوششی پلاستیکی نصب شده که روغن به داخل پوشش وارد می شود و از طریق پوشش، فشار داخلی اعمال می شود. برای مستقل کردن فشار جانبی و داخلی در خروجی شیر دوم یک فلکه برای قطع ارتباط بین شیر دوم و شیر سوم تعبیه شده است. همچنین برای کنترل فشار داخلی، شیر خروجی شماره ۴ تعبیه شده است که می توان پس از قطع ارتباط بین فشار جانبی

شده در طی آزمایش اعمال کرد.

در این مقاله از دو مسیر تنش مختلف برای اعمال فشار در سلول سه محوری استفاده شده است که عبارتند از:

- $\sigma_{\theta} = \sigma_1 > \sigma_r = \sigma_2 > \sigma_z = \sigma_3$ (شکل ۶-الف)
- $\sigma_{\theta} = \sigma_1 > \sigma_z = \sigma_2 > \sigma_r = \sigma_3 = 0$ (شکل ۶-ب).



شکل ۶: شرایط تنش اعمال شده در طی آزمایش (الف) $\sigma_{\theta} = \sigma_1 > \sigma_r = \sigma_2 > \sigma_z = \sigma_3$ (ب) $\sigma_{\theta} = \sigma_1 > \sigma_z = \sigma_2 > \sigma_r = \sigma_3$

Fig. 6. Stress conditions applied during the test

a) $\sigma_{\theta} = \sigma_1 > \sigma_r = \sigma_2 > \sigma_z = \sigma_3$

b) $\sigma_{\theta} = \sigma_1 > \sigma_z = \sigma_2 > \sigma_r = \sigma_3$

برای شبیه سازی شرایط تنش قبل از حفاری، در ابتدا فشار داخل چاه، فشار جانبی اطراف نمونه و تنش محوری، همزمان با یک سرعت افزایش می یابد تا به مقدار مورد نظر برسند. سپس، برای مدل کردن شرایط حین حفاری، با ثابت نگاه داشتن فشار جانبی و تنش محوری، فشار داخل چاه تا لحظه شکست نمونه کاهش داده می شود. فشار داخل چاه در لحظه شکست بیانگر حداقل فشار گل خواهد بود. شرایط تنش در این حالت به صورت $\sigma_{\theta} = \sigma_1 > \sigma_r = \sigma_2 > \sigma_z = \sigma_3$ است (شکل ۶-الف). همچنین نحوه شکست نمونه بعد از انجام آزمایش و برش عرضی نمونه بررسی می شود.

قبل از اعمال شرایط تنش حین حفاری، آزمایش در حالت بدون فشار داخلی انجام می شود تا مقدار تنش در نمونه قبل از حفاری بدست آید. مقدار فشاری که قبل از حفاری به نمونه اعمال می شود، باید از مقدار فشار شکست نمونه بدون فشار داخلی، تحت شرایط تنش محوری ثابت و جانبی متغیر بیشتر باشد. شرایط تنش در این حالت به صورت $\sigma_{\theta} = \sigma_1 > \sigma_z = \sigma_2 > \sigma_r = \sigma_3 = 0$ است (شکل ۶-ب).

ISRM بر روی آن ها انجام شد. نتایج آن در جدول ۱ و ۲ آورده شده است. همچنین، از کرنش سنج های الکترونیکی ۱۲۰ اهم در داخل حفره مرکزی برای اندازه گیری کرنش مماسی نمونه در داخل چاه بهره گرفته شده است. نمایش از وضعیت نهایی نمونه های استوانه ای توخالی گچی تهیه شده در شکل ۵ نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات ژئومکانیکی نمونه های گچ

Table 1. Geomechanical Properties of Gypsum Samples

مقاومت فشاری تک محوره (σ_c) (MPa)	مدول الاستیسیته (E) (GPa)	ضریب پواسون (ν)
۸/۶	۷/۶	۰/۲۳

جدول ۲: مشخصات ژئومکانیکی نمونه های بتن (بتن ۷ روزه)

Table 2. Geomechanical characteristics of concrete samples (7-day concrete)

مقاومت فشاری تک محوره (σ_c) (MPa)	مدول الاستیسیته (E) (GPa)	ضریب پواسون (ν)
۸/۴	۳/۵	۰/۲۶



شکل ۵: نمایی از نمونه های استوانه ای توخالی جدار ضخیم گچی تهیه شده برای آزمایش

Fig. 5. A view of thick-walled hollow cylinder gypsum samples prepared for testing

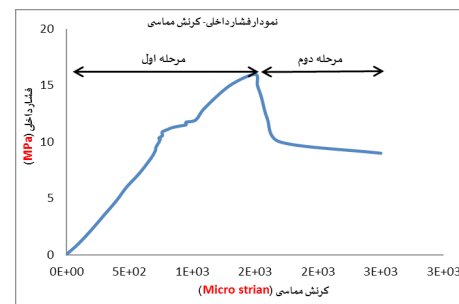
بسته به مقادیر فشار داخلی، تنش جانبی و تنش محوری اعمال شده بر نمونه، هر کدام از تنش های مماسی، شعاعی و محوری ناشی شده می توانند به عنوان تنش های اصلی حداکثر، حداقل و میانی محسوب شوند. بنابراین، می توان مسیرهای مختلف تنش را با ترکیبی از مقادیر مختلف تنش های یاد

۵- بحث و نتایج آزمایش

نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های استوانه‌ای توخالی گچ و بتن، شامل تغییرات کرنش مماسی در اثر تنش جانبی و فشار داخلی می‌باشد. با رسم نمودار تنش جانبی و فشار داخلی در مقابل کرنش مماسی برای هر نمونه می‌توان رفتار تغییر شکل را در طی مراحل مختلف بارگذاری پیش‌بینی کرد. همچنین حداکثر میزان کرنش قابل تحمل در دیواره‌ی چاه را که یک ویژگی خاص برای نمونه‌ها می‌باشد، تعیین کرد. علاوه بر این با استفاده از تحلیل تصاویر بعد از شکست نمونه‌ها، می‌توان شکل شکست در دیواره‌ی چاه‌ها را در هر شرایط برای هر کدام از نمونه‌ها مشخص کرد.

۵-۱- گچ

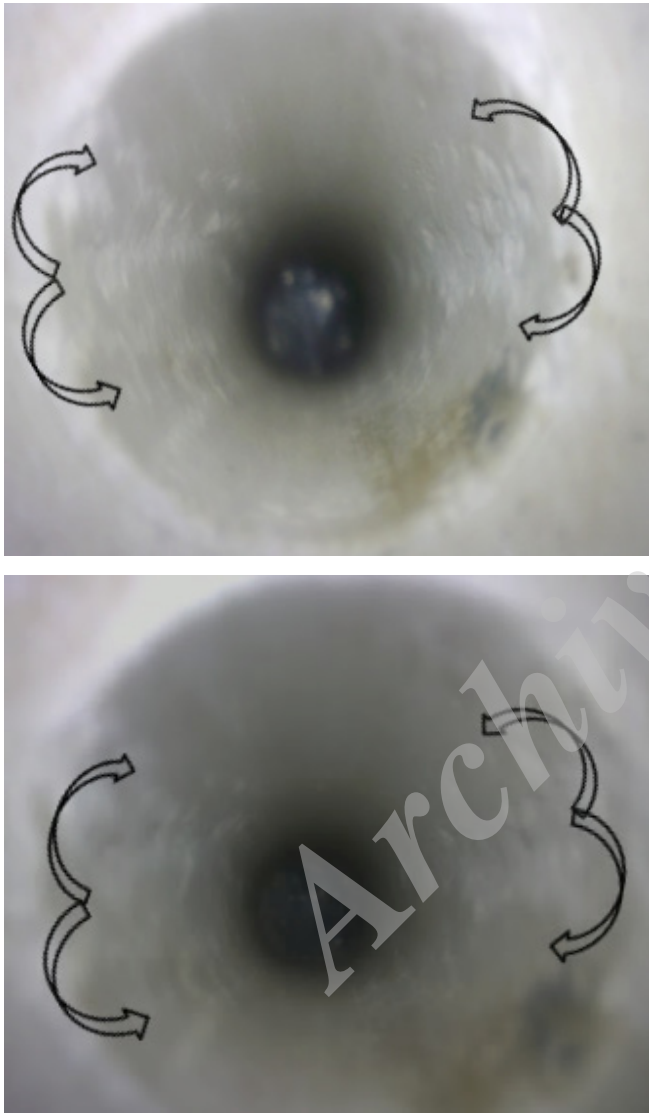
شکل ۷ نمودار فشار داخلی برحسب کرنش مماسی بدست آمده از مجموعه آزمون‌های انجام شده در شرایط $\bar{\sigma}_\theta = \sigma_1 > \sigma_r = \sigma_2 > \bar{\sigma}_z = \sigma_3$ را نشان می‌دهد. در این شرایط تنش، تمام آزمایش‌ها در تنش محوری ثابت ۵/۵ الی ۶ مگاپاسکال و تنش جانبی ثابت ۱۶ مگاپاسکال انجام شده‌اند. این مجموعه از آزمون‌ها با حضور فشار داخلی انجام شده‌اند، که شامل دو مرحله می‌باشند که در مرحله اول ابتدا تنش محوری تا ۵/۵ مگاپاسکال، تنش جانبی تا ۱۶ مگاپاسکال و فشار داخلی نیز تا ۱۶ مگاپاسکال افزایش یافته و سپس با ثابت ماندن تنش جانبی و تنش محوری، فشار داخلی نمونه به تدریج تا لحظه شکست کاهش می‌یابد. این مراحل در شکل ۷ مشخص شده است. در شکل ۷ مشاهده می‌شود که شکست حاصله در دیواره گمانه ناشی از افزایش اختلاف بین تنش جانبی و فشار داخلی است در مرحله‌ی اول تغییر شکل به صورت خطی افزایش پیدا می‌کند و هنوز شکست در دیواره نمونه رخ نداده است. در مرحله‌ی دوم با کاهش فشار داخلی و افزایش اختلاف بین تنش جانبی و فشار داخلی، ابتدا تغییر شکل با سرعت کمتر ادامه پیدا می‌کند و در ادامه شکست رخ می‌دهد. سپس از لحظه‌ی شکست به بعد افزایش ناگهانی تغییر شکل مشاهده می‌شود.



شکل ۷: نمودار تغییرات کرنش مماسی در اثر فشار داخلی در شرایط $\bar{\sigma}_\theta = \sigma_1 > \sigma_r = \sigma_2 > \bar{\sigma}_z = \sigma_3$ با تنش محوری ثابت ۵/۵ مگاپاسکال و تنش جانبی ثابت ۱۶ مگاپاسکال

Fig. 7. Tangential strain variation curve due to internal pressure in the conditions $\bar{\sigma}_\theta = \sigma_1 > \sigma_r = \sigma_2 > \bar{\sigma}_z = \sigma_3$ under constant axial stress conditions of 5.5 MPa and constant lateral stress of 16 MPa

برای مجموعه آزمون‌های انجام شده، شکست در فشار داخلی ۹ مگاپاسکال رخ می‌دهد که فشار گل باید از این مقدار بیشتر باشد. یک نمونه از تصاویر بعد از شکست نمونه‌ها که در شکل ۸ آورده شده است، نشان می‌دهد که شکست به صورت برشی در دو جهت مخالف دیواره چاه حفر شده رخ می‌دهد. شرایط تنش‌های اولیه و القایی حاصل از آزمایش‌های انجام شده برای شکست در دیواره چاه نمونه‌های استوانه‌ای جدار ضخیم گچ در شرایط تنش $\bar{\sigma}_\theta = \sigma_1 > \bar{\sigma}_r = \sigma_2 > \bar{\sigma}_z = \sigma_3$ در جدول ۳ آورده شده است.



شکل ۸: تصاویر بعد از شکست نمونه‌های استوانه‌ای تو خالی جدار ضخیم گچ در شرایط تنش $\bar{\sigma}_\theta = \sigma_1 > \bar{\sigma}_r = \sigma_2 > \bar{\sigma}_z = \sigma_3$

Fig. 8. Images after the failure of thick-walled hollow cylinder of gypsum under stress conditions $\bar{\sigma}_\theta = \sigma_1 > \bar{\sigma}_r = \sigma_2 > \bar{\sigma}_z = \sigma_3$

جدول ۳: شرایط تنش‌های القایی و نسبت تنش افقی به تنش قائم در دیواره‌ی چاه نمونه‌های گچ در شرایط تنش

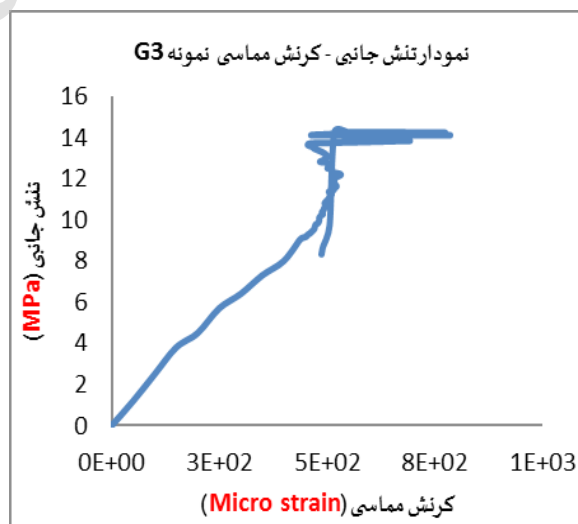
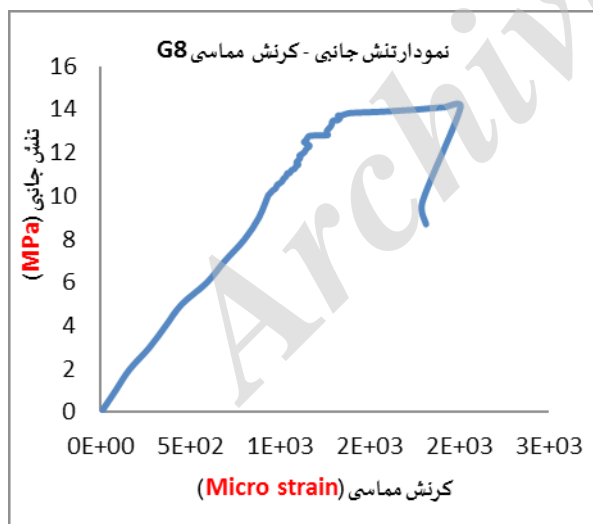
$$\sigma_{\theta} = \sigma_1 > \sigma_r = \sigma_2 > \sigma_z = \sigma_3$$

Table 3. Conditions of induced stresses and horizontal stress ratio to vertical stress in well wall of gypsum samples under stress conditions $\sigma_{\theta} = \sigma_1 > \sigma_r = \sigma_2 > \sigma_z = \sigma_3$

ردیف	نام نمونه	تنش محوری (σ_v) (MPa)	تنش جانبی (σ_h) (MPa)	فشار داخلی (Pi) (MPa)	نسبت تنش افقی به تنش قائم در لحظه شکست (K)	تنش‌های القایی (در دیواره چاه در لحظه شکست)		
						تنش مماسی (σ_{θ}) (MPa)	تنش قائم (σ_z) (MPa)	تنش شعاعی (σ_r) (MPa)
۱	G ₉	۵/۵۸	۱۶	۱۶	۲/۸۶	۲۴/۸	۵/۵۸	۹
۲	G ₁₀	۵/۶۲	۱۸	۱۸	۳/۲	۲۹/۳	۵/۶۲	۸/۸۷
۳	G ₁₂	۵/۷۱	۱۸	۱۸	۳/۱۵	۲۹/۹۴	۵/۷۱	۸/۵
۴	G ₁₃	۵/۶۱	۱۸	۱۸	۳/۲	۲۹/۲	۵/۶۱	۸/۹
۵	G ₁₄	۵/۴۸	۱۸	۱۸	۳/۲۸	۲۹/۰۶	۵/۴۸	۹/۲

شکل ۹ نشان می‌دهد که نمونه G₈ و G₃ به ترتیب در فشار جانبی ۱۴/۲۵ و ۱۴/۷۳ مگاپاسکال شکسته است و سپس در اثر شوکی که به کرنش‌سنج‌ها وارد شده یک‌باره کرنش افزایش پیدا کرد و ارتباطی به رفتار پلاستیک نمونه‌ها ندارد.

شکل ۹ نمودار تنش جانبی برحسب کرنش مماسی به دست آمده از مجموعه آزمون‌های انجام شده در شرایط $\sigma_{\theta} = \sigma_1 > \sigma_z = \sigma_2 > \sigma_r = \sigma_3 = 0$ بر روی نمونه‌های استوانه‌ای جدار ضخیم گچ را نشان می‌دهد. تمامی آزمایش‌ها در تنش محوری ثابت ۵/۵ الی ۶ مگاپاسکال انجام شده‌اند.

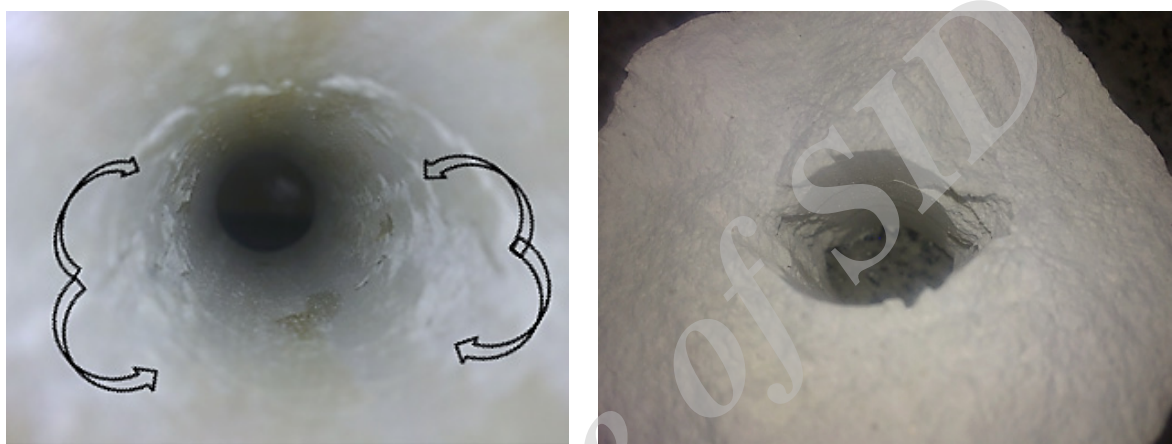


شکل ۹: نمودار تغییرات کرنش مماسی در اثر تنش جانبی در شرایط تنش $\sigma_{\theta} = \sigma_1 > \sigma_z = \sigma_2 > \sigma_r = \sigma_3 = 0$ با تنش محوری ثابت ۵/۶۵ مگاپاسکال

Fig. 9. Tangential strain variation curve due to lateral stress in the conditions $\sigma_{\theta} = \sigma_1 > \sigma_z = \sigma_2 > \sigma_r = \sigma_3$ under constant axial stress conditions of 5.65 MPa

شرایط تنش‌های اولیه و القایی به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده برای شکست در دیواره چاه نمونه‌های استوانه‌ای جدار ضخیم گچ در شرایط تنش $\bar{\sigma}_\theta = \sigma_1 > \sigma_z = \sigma_2 > \bar{\sigma}_r = \sigma_3 = 0$ در جدول ۴ آورده شده است. مشاهده نمونه‌ها بعد از آزمایش نشان می‌دهد در آزمایش‌هایی که بدون فشار داخلی (تنش شعاعی برابر صفر) روی نمونه‌ها انجام شده بیشترین عمق شکست در دیواره گمانه به وجود می‌آید همچنین در حالت آزمایش بدون فشار داخلی عرض ناحیه شکست شده در دیواره گمانه نسبت به حالت با فشار داخلی بیشتر است.

تصاویر بعد از شکست نمونه‌ها در شکل ۱۰ نشان داده شده است. این تصاویر نشان‌دهنده‌ی شکست برشی در دو جهت دیواره مانند شرایط $\bar{\sigma}_\theta = \sigma_1 > \sigma_r = \sigma_2 > \bar{\sigma}_z = \sigma_3$ است. البته با این تفاوت که عمق شکست در این شرایط نسبت به شرایط $\bar{\sigma}_\theta = \sigma_1 > \sigma_r = \sigma_2 > \bar{\sigma}_z = \sigma_3$ بیشتر است. بطور کلی می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش اختلاف تنش جانبی و فشار داخلی گمانه، عمق شکست یا ناحیه پلاستیک اطراف چاه گسترده‌تر می‌شود. نتایج بدست آمده برای شکل شکست در شرایط مسیر تنش $\bar{\sigma}_\theta = \sigma_1 > \sigma_r = \sigma_2 > \bar{\sigma}_z = \sigma_3 = 0$ و $\sigma_r = \sigma_2 > \bar{\sigma}_z = \sigma_3$ با نتایج مطالعات پسیک^۱ [۲۴] که در شکل ۲ ارائه شده است، تطابق دارد.



شکل ۱۰: نمودار تغییرات تنش جانبی بر حسب کرنش مماسی در شرایط تنش $\bar{\sigma}_\theta = \sigma_1 > \sigma_z = \sigma_2 > \bar{\sigma}_r = \sigma_3 = 0$ با تنش محوری ثابت ۵/۶۵ مگاپاسکال

Fig. 10. Images after the failure of thick-walled hollow cylinder of gypsum under stress conditions

$$\bar{\sigma}_\theta = \sigma_1 > \sigma_z = \sigma_2 > \bar{\sigma}_r = \sigma_3$$

جدول ۴: شرایط تنش‌های القایی و نسبت تنش افقی به تنش قائم در دیواره‌ی گمانه‌ی نمونه‌های گچ در شرایط تنش

$$\bar{\sigma}_\theta = \sigma_1 > \sigma_z = \sigma_2 > \bar{\sigma}_r = \sigma_3 = 0$$

Table 4. Conditions of induced stresses and horizontal stress ratio to vertical stress in well wall of gypsum samples under stress conditions $\bar{\sigma}_\theta = \sigma_1 > \sigma_z = \sigma_2 > \bar{\sigma}_r = \sigma_3$

ردیف	نام نمونه	تنش محوری (σ_v) (MPa)	تنش جانبی (σ_h) (MPa)	تنش‌های اولیه			تنش‌های القایی (در دیواره چاه در لحظه شکست)	
				نسبت تنش افقی به تنش قائم در لحظه شکست (K)	تنش مماسی (σ_θ) (MPa)	تنش قائم (σ_z) (MPa)	تنش شعاعی (σ_r) (MPa)	
۱	G ₃	۵/۶۱	۱۴/۲۵	۲/۵۴	۳۲/۲۰۵	۵/۶۱	صفر	
۲	G ₈	۵/۶۵	۱۴/۷۳	۲/۶	۳۳/۲۸	۵/۶۵	صفر	
۳	G ₁₆	۵/۶۵	۱۵/۲۶۱	۲/۷	۳۴/۴۸	۵/۶۵	صفر	

۵-۲- بتن

همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، تنش محوری در طی آزمایش، مقدار ثابت ۴/۰۶ مگاپاسکال و فشار داخلی برابر صفر بوده است. در این شرایط، شکست نمونه در اثر افزایش تنش جانبی در مقدار ۱۰/۴ مگاپاسکال رخ داده است. شکل شکست برای نمونه استوانه‌ای جدار ضخیم بتن C₂₂ در این شرایط در شکل ۱۳ نشان داده شده است. شکست به صورت برشی در دو جهت مخالف روی دیواره چاه می‌باشد.



شکل ۱۳: تصاویر بعد از شکست نمونه استوانه‌ای جدار ضخیم بتن

$$\bar{\sigma}_\theta = \sigma_1 > \bar{\sigma}_z = \sigma_2 > \bar{\sigma}_r = \sigma_3 = 0$$

Fig. 13. Images after the failure of thick-walled hollow cylinder of C₂₂ concrete specimen under stress conditions $\bar{\sigma}_\theta = \sigma_1 > \bar{\sigma}_z = \sigma_2 > \bar{\sigma}_r = \sigma_3 = 0$

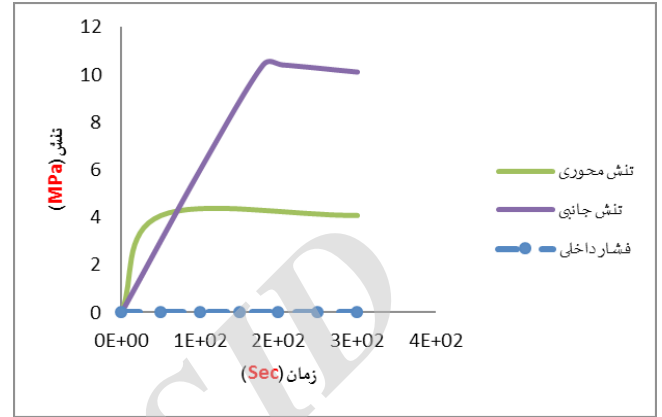
برای شرایط تنش $\bar{\sigma}_\theta = \sigma_1 > \bar{\sigma}_r = \sigma_2 > \bar{\sigma}_z = \sigma_3$ تنش محوری و تنش جانبی به صورت ثابت به ترتیب برابر ۲/۸ و ۱۱ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. شکست نمونه‌ی استوانه‌ای جدار ضخیم بتن C₂₄ در فشار داخلی ۵/۸ مگاپاسکال رخ داده است.

شکل ۱۴ و ۱۵ به ترتیب نمودار تنش جانبی- کرنش مماسی و فشار داخلی- کرنش مماسی را برای نمونه‌های بتنی C₂₂ و C₂₄ نشان می‌دهند.

شرایط تنش‌های اعمال شده در آزمایش بر روی نمونه‌های استوانه‌ای بتن به دو صورت زیر می‌باشد:

• $\bar{\sigma}_\theta = \sigma_1 > \bar{\sigma}_z = \sigma_2 > \bar{\sigma}_r = \sigma_3 = 0$ (شکل ۱۱).

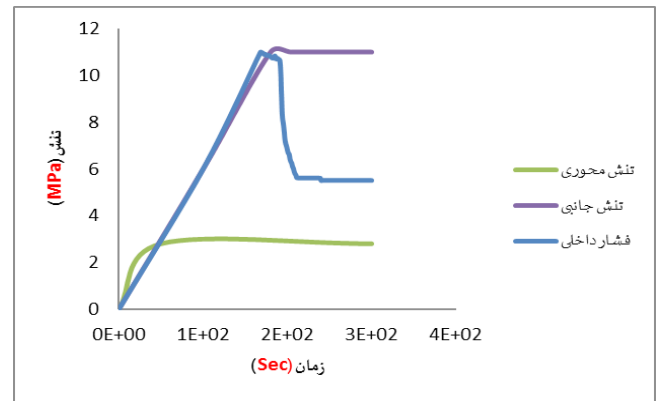
• $\bar{\sigma}_\theta = \sigma_1 > \bar{\sigma}_r = \sigma_2 > \bar{\sigma}_z = \sigma_3$ (شکل ۱۲).



شکل ۱۱: مسیر تنش اعمال شده برای نمونه بتنی C₂₂ در شرایط

$$\bar{\sigma}_\theta = \sigma_1 > \bar{\sigma}_z = \sigma_2 > \bar{\sigma}_r = \sigma_3 = 0$$

Fig. 11. Stress path applied for C₂₂ concrete specimen under conditions



شکل ۱۲: مسیر تنش اعمال شده برای نمونه بتنی C₂₄ در شرایط

$$\bar{\sigma}_\theta = \sigma_1 > \bar{\sigma}_r = \sigma_2 > \bar{\sigma}_z = \sigma_3$$

Fig. 12. Stress path applied for C₂₄ concrete specimen under conditions $\bar{\sigma}_\theta = \sigma_1 > \bar{\sigma}_r = \sigma_2 > \bar{\sigma}_z = \sigma_3$

ناحیه پلاستیک و گسترش ترک آن نسبت به سایر نمونه‌ها بیشتر می‌باشد. طبیعی است تفاوت در عمق ناحیه پلاستیک و گسترش ترک بین نمونه‌های گچ و بتن مربوط به ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی می‌باشد. این نکته قابل ذکر است که نمونه‌های بتنی پس از گذشت ۶ روز از زمان ساخت تحت بارگذاری قرار گرفته‌اند.



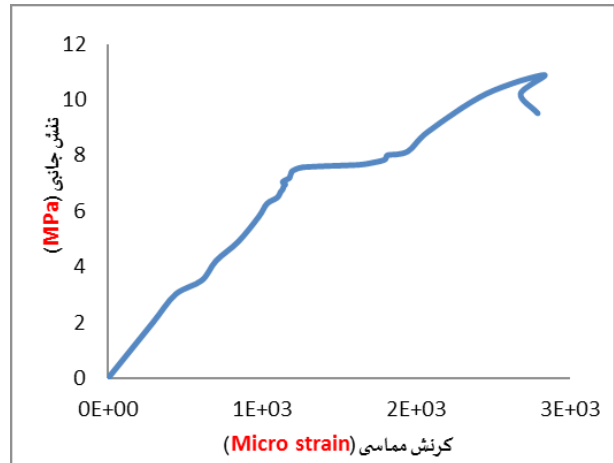
شکل ۱۶: تصویر بعد از شکست نمونه‌های استوانه‌ای جدار ضخیم

بتن C_{24} در شرایط تنش $\sigma_{\theta} = \sigma_1 > \sigma_r = \sigma_2 > \sigma_z = \sigma_3$

Fig. 16. Image after the failure of thick-walled hollow cylinder of C_{24} concrete specimen under stress conditions $\sigma_{\theta} = \sigma_1 > \sigma_r = \sigma_2 > \sigma_z = \sigma_3$

شرایط تنش‌های اولیه و القایی حاصل از آزمایش‌های انجام شده برای شکست در دیواره چاه نمونه‌های استوانه‌ای جدار ضخیم بتن در دو شرایط ذکر شده در جدول ۵ آورده شده است.

در نمونه‌های بتنی نیز همانند نمونه‌های گچی عمق و عرض ناحیه شکسته شده در دیواره گمانه در آزمایش‌های بدون فشار داخلی بیشتر از آزمایش‌های با فشار داخلی است. نتایج این تحقیق با نتایج تحقیق هاشمی و همکارانش که روی بتن انجام داده‌اند مطابقت دارد. نتایج آزمایش‌ها و مقایسه آن‌ها با پژوهش‌های محققین قبلی نشان می‌دهد سلول طراحی شده به خوبی می‌تواند برای مدل‌سازی چاه‌های نفت مورد استفاده قرار گیرد.

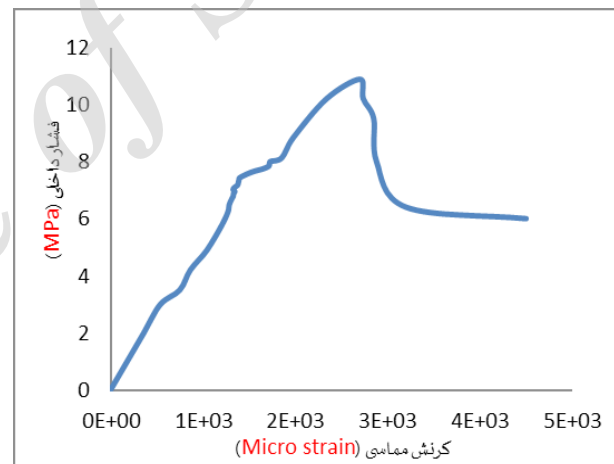


شکل ۱۴: نمودار تنش جانبی-کرنش مماسی برای نمونه بتن C_{22}

در شرایط $\sigma_{\theta} = \sigma_1 > \sigma_z = \sigma_2 > \sigma_r = \sigma_3 = 0$

Fig. 14. Lateral stress - tangential strain chart for C_{22} concrete specimen in the conditions

$\sigma_{\theta} = \sigma_1 > \sigma_z = \sigma_2 > \sigma_r = \sigma_3 = 0$



شکل ۱۵: نمودار فشار داخلی-کرنش مماسی برای نمونه بتن C_{24}

در شرایط $\sigma_{\theta} = \sigma_1 > \sigma_r = \sigma_2 > \sigma_z = \sigma_3$

Fig. 15. Internal pressure - tangential strain chart for C_{24} concrete specimen in the conditions $\sigma_{\theta} = \sigma_1 > \sigma_r =$

$\sigma_2 > \sigma_z = \sigma_3$

نتایج بدست‌آمده برای نمونه‌های استوانه‌ای جدار ضخیم بتن در دو شرایط ذکر شده برای تغییرشکل و شکل شکست، همانند نمونه‌های گچ می‌باشد. همانطور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، شکل شکست برای نمونه بتن C_{24} تحت شرایط $\sigma_{\theta} = \sigma_1 > \sigma_r = \sigma_2 > \sigma_z = \sigma_3$ همانند نمونه‌های گچ، به صورت پوسته‌پوسته شدن در دو جهت مخالف روی دیواره چاه اتفاق می‌افتد، با این تفاوت که شکست در نمونه‌های بتنی تحت تنش و کرنش متفاوت و کمتری از نمونه‌های گچ رخ می‌دهد و همچنین عمق

جدول ۵: شرایط تنش‌های القایی و نسبت تنش افقی به تنش قائم در دیواره‌ی چاه نمونه‌های بتن

Table 5. Conditions of induced stresses and horizontal stress ratio to vertical stress in well wall of concrete samples

ردیف	نام نمونه	تنش‌های اولیه			تنش‌های القایی (در دیواره چاه در لحظه شکست)		
		تنش محوری (σ_v) (MPa)	تنش جانبی (σ_h) (MPa)	فشار داخلی (P_i) (MPa)	نسبت تنش افقی به تنش قائم در لحظه شکست (K)	تنش مماسی (σ_θ) (MPa)	تنش قائم (σ_z) (MPa)
۱	C ₂₂	۴/۰۶	۱۰/۴	۰	۲/۵۶	۲۳/۵	۴/۰۶
۲	C ₂₄	۲/۸	۱۱	۱۱	۳/۹۲	۱۷/۶۳	۵/۸

۶- نتیجه گیری

- ناپایداری اطراف فضاهای زیرزمینی در صنایع مختلف مانند نفت، گاز و معدن همواره با صرف هزینه‌های زیاد و مشکلات وسیع همراه بوده است. انجام آزمایش بر روی استوانه‌های توخالی جدار ضخیم یکی از روش‌های مدل‌سازی چاه‌های نفت می‌باشد. سلول‌های سه محوری مختلفی برای انجام آزمایش روی استوانه توخالی در دنیا وجود دارند، سلول استفاده شده بر اساس سلول هوک طراحی شده است. این سلول دارای مزایای فراوانی است که از جمله می‌توان به قابلیت مدل‌سازی چاه‌های نفت هنگام حفاری و هم‌چنین مدل‌سازی آزمایش شکست هیدرولیکی اشاره کرد. در این سلول امکان اندازه‌گیری کرنش مماسی در حفره مرکزی نیز وجود دارد. برای بررسی کارایی سلول سه‌محوری طراحی شده در مدل‌سازی فیزیکی چاه نفت دو سری آزمایش روی نمونه‌های استوانه‌ای جدار ضخیم انجام شده است.

مراجع

[1] M. Alsayed, Utilising the Hoek triaxial cell for multiaxial testing of hollow rock cylinders, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 39(3) (2002) 355-366.

[2] T. Lin, Experimental Study on Borehole Collapse, Advances in Petroleum Exploration and Development, 10(2) (2016) 126-129.

[3] S. Hashemi, N. Melkounian, A. Taheri, A borehole stability study by newly designed laboratory tests on thick-walled hollow cylinders, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 7(5) (2015) 519-531.

[4] F.D. Adams, An experimental contribution to the question of the depth of the zone of flow in the earth's crust, The Journal of Geology, 20(2) (1912) 97-118.

[5] L.V. King, On the limiting strength of rocks under conditions of stress existing in the earth's interior, The Journal of Geology, 20(2) (1912) 119-138.

[6] P. Bridgman, The failure of cavities in crystals and rocks under pressure, American Journal of Science, (268) (1918) 243-268.

- بر اساس آزمایش‌های انجام شده نتایج زیر حاصل شده است:
- برای نمونه‌های گچی و بتنی در شرایط تنش $\sigma_\theta = \sigma_1 > \sigma_z$ مخالف دیواره چاه حفر شده رخ می‌دهد.
- در شرایط تنش $\sigma_\theta = \sigma_1 > \sigma_r = \sigma_2 > \sigma_z = \sigma_3 = 0$ نیز شکست به صورت برشی در دو جهت مخالف دیواره چاه حفر شده رخ می‌دهد. البته تفاوت شکست در بین دو شرایط تنش ذکر شده در میزان عمق شکست می‌باشد که در شرایط تنش $\sigma_\theta = \sigma_1 > \sigma_r$ $\sigma_\theta = \sigma_1 > \sigma_z = \sigma_3$ = نسبت به شرایط تنش $\sigma_2 > \sigma_r = \sigma_3 = 0$ کمتر می‌باشد.
- نسبت تنش افقی به تنش قائم در لحظه شکست در نمونه‌های گچی و بتنی، در دو شرایط تنش اعمال شده در بازه‌ی ۲/۵۴ الی ۳/۹۲ تغییر می‌کند.
- شکست در دیواره‌ی چاه نمونه‌های گچ و بتن حاصل از اختلاف بین تنش جانبی و فشار داخلی می‌باشد و با افزایش این اختلاف، عمق شکست یا ناحیه پلاستیک در دیواره‌ی چاه نمونه‌ها گسترده‌تر می‌شود.

- [16] A. Elkadi, J. Van Mier, Scaled hollow-cylinder tests for studying size effect in fracture processes of concrete, fracture mechanics of concrete structures, 1 (2004) 229-236.
- [17] L. Warlick, H. Abass, M. Khan, C. Pardo Techa, A. Tahini, D. Shehri, H. Badairy, Y. Shobaili, T. Finkbeiner, S. Perumalla, Evaluation of wellbore stability during drilling and production of open hole horizontal wells in a carbonate field, in: SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium, Society of Petroleum Engineers, 2009.
- [18] T. Meier, E. Rybacki, T. Backers, G. Dresen, Influence of bedding angle on borehole stability: a laboratory investigation of transverse isotropic oil shale, Rock Mechanics and Rock Engineering, 48(4) (2015) 1535-1546.
- [19] S. Hashemi, N. Melkounian, Effect of different stress path regimes on borehole instability in poorly cemented granular formations, Journal of Petroleum Science and Engineering, 146 (2016) 30-49.
- [20] C. Santana, F. Likrama, Workflow on Incorporating Thick-Walled Cylinder Test Results in Finite Element Models of near Wellbore for Sanding Prediction Studies, in: 50th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, American Rock Mechanics Association, 2016.
- [21] S. Hashemi, A. Taheri, N. Melkounian, An experimental study on the relationship between localised zones and borehole instability in poorly cemented sands, Journal of Petroleum Science and Engineering, 135 (2015) 101-117.
- [22] E. Hoek, J.A. Franklin, A simple triaxial cell for field or laboratory testing of rock, Imperial College of Science and Technology, University of London, 1967.
- [23] B. Pasic, N. Gaurina-Medimurec, D. Matanovic, Wellbore instability; causes and consequences, paper Rudarsko-geološko-naftni zbornik, in, Zagreb, 2007.
- [7] E.C. Robertson, Experimental study of the strength of rocks, Geological Society of America Bulletin, 66(10) (1955) 1275-1314.
- [8] E. Hoskins, The failure of thick-walled hollow cylinders of isotropic rock, in: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Elsevier, 1969, pp. 99-125.
- [9] M.I. Alsayed, Rock behaviour under multiaxial compression, Newcastle University, 1996.
- [10] F. Santarelli, E. Brown, Failure of three sedimentary rocks in triaxial and hollow cylinder compression tests, in: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Elsevier, 1989, pp. 401-413.
- [11] N. Gay, Fracture growth around openings in large blocks of rock subjected to uniaxial and biaxial compression, in: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Elsevier, 1976, pp. 231-243.
- [12] S.C. Bandis, J. Lindman, N. Barton, Three-dimensional stress state and fracturing around cavities in overstressed weak rock, in: 6th ISRM Congress, International Society for Rock Mechanics, 1987.
- [13] R. Ewy, N. Cook, Deformation and fracture around cylindrical openings in rock—I. Observations and analysis of deformations, in: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Elsevier, 1990, pp. 387-407.
- [14] R. Ewy, N. Cook, Deformation and fracture around cylindrical openings in rock—II. Initiation, growth and interaction of fractures, in: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Elsevier, 1990, pp. 409-427.
- [15] P. Perie, R. Goodman, Evidence of new failure patterns in a thick-walled cylinder experiment, in: Proc. 12th ETCE/ASME Conf, 1989, pp. 23-27.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. Hosseini, S. Aghayi, Physical Modelling of Oil Wells During Drilling Using Designed Triaxial Cell. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 49(4) (2018) 801-812.

DOI: 10.22060/ceej.2016.867

