

مدلسازی عددی نمونه‌های استوانه‌ای توخالی جدار ضخیم: اثر شرایط تنش‌های اعمال شده بر روی تغییر شکل و نحوه گسیختگی

سونیا آقایی¹، مهدی حسینی^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی قزوین (ره)

2- دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی قزوین (ره)

(دریافت: تیر 1394، پذیرش: مهر 1394)

چکیده

حفر چاه در صنایع مختلف مانند نفت، گاز و معدن همواره با مشکل ناپایداری مواجه بوده و نیاز به صرف هزینه‌های زیاد دارد. با کنترل تغییر شکل و شکست در دیواره‌ی چاه می‌توان به حداقل ممکن ناپایداری رسید. در این مقاله، هدف بررسی تغییر شکل و نحوه گسیختگی در نمونه‌های استوانه‌ای توخالی جدار ضخیم (برای مدل سازی چاه نفت) حین حفاری تحت دو شرایط تنش متفاوت است. برای این منظور، ابتدا مطالعات آزمایشگاهی با هدف تعیین خصوصیات مکانیکی بر روی نمونه‌های مصنوعی گچ و نمونه‌های طبیعی مارن، ماسه‌سنگ و آهک رسی انجام شده است. با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی امکان انجام آزمایش در تنش بالا مقدور نبود بنابراین آزمایش سه محوری به کمک سلول هوک تغییر یافته فقط بر روی نمونه‌های استوانه‌ای توخالی جدار ضخیم گچ انجام شد. نتایج آزمایش‌های انجام شده برای ساخت و اصلاح مدلسازی عددی توسط نرم‌افزار ABAQUS مورد استفاده قرار گرفت و در نهایت از مدل اصلاح شده برای پیش‌بینی تغییر شکل و شکل شکست در نمونه‌های استوانه‌ای جدار ضخیم نمونه‌های طبیعی مارن، ماسه‌سنگ و آهک رسی تحت شرایط تنش $\sigma_1 = \sigma_\theta > \sigma_2 = \sigma_r > \sigma_3 = \sigma_z$ استفاده شد. نتایج حاصل از مدلسازی نشان داد که شکل شکست در شرایط تنش ذکر شده در دیواره‌ی نمونه‌های استوانه‌ای جدار ضخیم به صورت برشی و در دو جهت مخالف دیواره‌ی گمانه است. همچنین در رژیم تنش $\sigma_1 = \sigma_z > \sigma_2 = \sigma_\theta > \sigma_3 = \sigma_r$ شکست با توزیع تصادفی در سه ناحیه اتفاق می‌افتد. در هر دو رژیم تنش، بیشترین فشار داخل گمانه در لحظه شکست برای ماسه‌سنگ و کمترین فشار داخل گمانه برای آهک رسی در بین نمونه‌های مورد مطالعه است. همچنین کمترین کرنش پلاستیک برای ماسه‌سنگ و بیشترین کرنش پلاستیک برای آهک رسی از نتایج مدلسازی عددی حاصل شده است. فشار داخل گمانه در لحظه شکست می‌تواند به عنوان فشار اولیه گل حفاری مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی

استوانه‌ی توخالی جدار ضخیم، تغییر شکل، چاه نفت، شکست، ABAQUS

ارجاع به این مقاله:

آقایی، س.، حسینی، م.، (1394)، مدلسازی عددی نمونه‌های استوانه‌ای توخالی جدار ضخیم: اثر شرایط تنش‌های اعمال شده بر روی تغییر شکل و نحوه گسیختگی، روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، 9(5)، 99-111.

[http://dx.medra.org/10.17383/S2251-6565\(15\)940919-X](http://dx.medra.org/10.17383/S2251-6565(15)940919-X)

* عهده‌دار مکاتبات: Meh_hosseini18@yahoo.com

1- مقدمه

به‌طور معمول حفاری چاه موجب تغییر تنش‌های بکر منطقه و توزیع مجدد تنش‌های القایی در دیواره‌ی چاه می‌شود [1]. از این رو، زمانی که تنش‌های القایی در دیواره چاه از مقاومت کششی، فشاری و یا برشی سنگ تجاوز کنند، چاه دچار تغییر شکل و گسیختگی خواهد شد [2]. با فرض اینکه تنش‌های اصلی موجود در محیط قبل از حفر چاه، به صورت σ_v (تنش قائم)، σ_H (تنش افقی بیشینه) و σ_h (تنش افقی کمینه) باشند، پس از حفر چاه، توسط تنش‌های القایی که به صورت σ_r (تنش شعاعی)، σ_θ (تنش مماسی) و σ_z (تنش محوری) هستند، جایگزین می‌شوند [3]. باین حال، تنش‌های القایی تنها در محدوده‌ای در حدود 2 تا 3 برابر قطر چاه توزیع می‌شوند و با گذر از این محدوده، تنش‌های القایی ایجاد شده در محیط برابر با تنش‌های قبلی که σ_v (تنش قائم)، σ_H (تنش افقی بیشینه) و σ_h (تنش افقی کمینه) هستند، خواهند شد. بسته به جهت و اندازه‌ی تنش‌های القایی در دیواره‌ی چاه حالت‌های مختلف ناپایداری چاه ممکن است رخ دهد [3-5].

شرایط تنش اعمال شده به دیواره چاه و عملیات اجرایی حفاری موجب بروز انواع گسیختگی‌ها مانند بیرون زدگی¹ در دیواره چاه، همگرایی² و از دست رفتن چاه می‌شود [4، 6]. از این رو عوامل مؤثر بر روی انواع گسیختگی‌ها و تغییر شکل‌ها از جمله موضوعات مورد بررسی بیشتر محققان در زمینه‌ی پایداری گمانه است [7-12]. روش‌های مختلفی از جمله روش‌های آزمایشگاهی، تحلیلی و عددی برای بررسی تحلیل پایداری چاه وجود دارد.

یکی از روش‌های مرسوم آزمایشگاهی، استفاده از نمونه‌های استوانه‌ای توخالی جدار ضخیم است. مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای توخالی جدار ضخیم به قرن بیستم مربوط می‌شود که ابتدا توسط آدامز [13] و کینگ [14] انجام شد. سپس بریجمن [15] کارهای آدامز را با تغییر در شرایط بارگذاری تکرار کرد. رابرتسون [16] اثر نسبت قطر داخلی به قطر خارجی را بر روی مقاومت و تغییر شکل نمونه‌های استوانه‌ای توخالی بررسی کرد. هاس کینز [17] آزمایش‌هایی بر روی

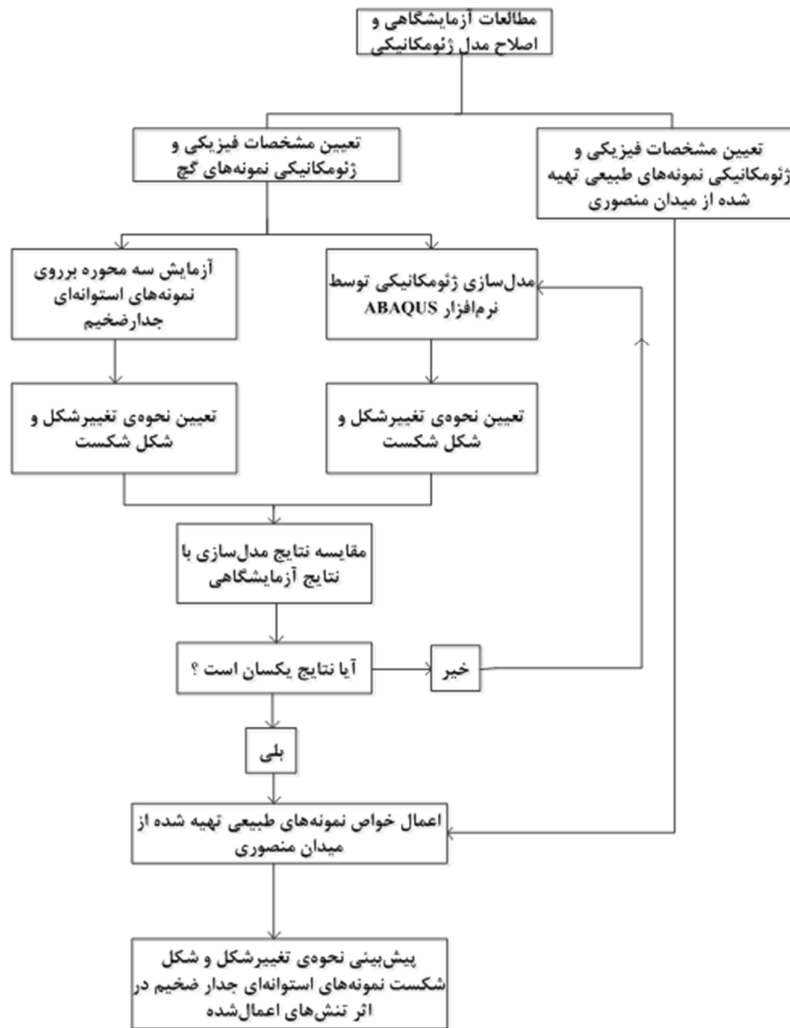
نمونه‌های استوانه‌ای توخالی برای تعیین شکست در پنج نوع سنگ ایزوتروپیک انجام داد. آلساید [18] رفتار تغییر شکل تحت بارگذاری‌های مختلف بر روی نمونه‌های استوانه‌ای توخالی را مطالعه کرد. گای [19] مطالعات قبلی انجام شده بر روی گسترش ترک در نمونه‌های استوانه‌ای توخالی را توسعه داد. باندیس [20] وضعیت تنش و حالت‌های شکست اطراف فضاهای زیرزمینی را با استفاده از نمونه‌های استوانه‌ای توخالی تحت شرایط بارگذاری مختلف بررسی کرد.

از مطالعات انجام گرفته توسط روش‌های عددی می‌توان به مطالعات والتون و همکاران اشاره کرد که به بررسی رابطه‌ی بین شکل شکست در دیواره‌ی چاه و جهت و مقدار تنش‌های برجا در توده‌سنگ‌های سخت پرداختند [21]. چاترجی و همکاران تغییر شکل و ارتباط آن با اثر تنش‌های تفاضلی و فشار گل حفاری در دیواره‌ی چاه را توسط روش‌های عددی بررسی کردند [22]. جنتزیس و همکاران با استفاده از روش‌های عددی یک روش جدید برای پیش‌بینی پایداری چاه‌های افقی ارائه کردند [23]. پنگ و همکاران با استفاده از مدل ژئومکانیکی به بررسی مکانیزم شکست لوله‌های جداری در سازندهای ماسه‌ای تحکیم نیافته پرداختند [24]. صالحی و همکاران با استفاده از مدلسازی عددی شرایط لازم برای پایداری چاه از لحاظ تنش‌های برجا و ویژگی‌های مکانیکی سازند در حین حفاری فروتعدالی را بررسی کردند [25].

نتایج تحقیقات محققین گذشته نشان داد که انواع گسیختگی‌های رخ داده در دیواره‌ی نمونه‌های استوانه‌ای جدار ضخیم، متناسب با بزرگی و جهت تنش‌های اصلی، وجود ریزترک‌ها در ساختار نمونه، ابعاد و ترکیب کانی شناسی نمونه‌های سنگ است. مطالعات آزمایشگاهی ابتدا با تعیین مشخصات فیزیکی، مکانیکی، آماده‌سازی نمونه‌های استوانه‌ای جدار ضخیم گچ و انجام آزمایش سه محوری به وسیله سلول هوک تغییر یافته با قابلیت اعمال فشار سه‌محوره (فشار محوری، جانبی و فشار داخل گمانه) بر روی نمونه‌های گچ شروع شد. سپس در مرحله بعد، مشخصات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های طبیعی تهیه شده (نمونه‌های مارن، آهک و ماسه‌سنگ) در آزمایشگاه مکانیک سنگ تعیین شد. همچنین در مرحله مطالعات مدلسازی عددی، ابتدا آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های

اعمال شده بر روی نمونه‌های طبیعی استوانه‌ای جدار ضخیم ماسه‌سنگ، مارن و آهک رسی میسر شد. در شکل 1 نمایی از مراحل یاد شده نشان داده شده است.

استوانه‌ای جدار ضخیم گچ شبیه‌سازی شد، سپس با اصلاح مدل، مشخصات نمونه‌های طبیعی تهیه شده از میدان منصوری در مدل اعمال شد. با اعمال این روند در مطالعات، پیش‌بینی تغییر شکل و شکل شکست در اثر تنش‌های



شکل 1: نمایی از مراحل مطالعات آزمایشگاهی و عددی برای بررسی نحوه‌ی تغییر شکل و شکل شکست نمونه‌های استوانه‌ای جدار ضخیم در اثر تنش‌های اعمال شده

فاصله شعاعی (r) از مرکز نمونه از معادله‌های (1) و (2) محاسبه می‌شوند [26]:

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

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

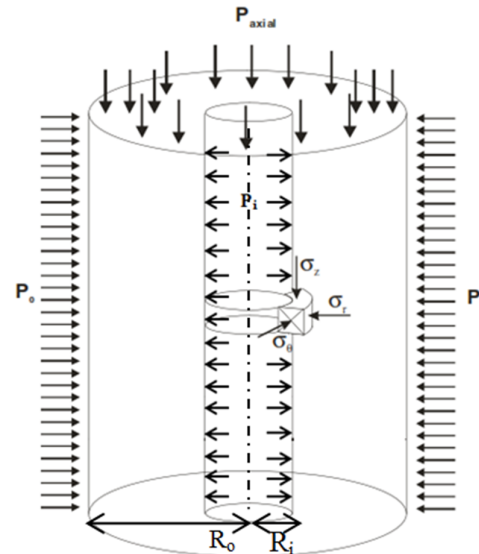
در این حالت، تنش محوری σ_z از رابطه (3) به دست

2- توزیع تنش در نمونه‌های استوانه‌ای توخالی

مطابق شکل 2، یک نمونه‌ی استوانه‌ای توخالی که دارای شعاع داخلی R_i ، شعاع خارجی R_o ، فشار داخلی P_i ، فشار جانبی P_o و نیروی محوری P_{axial} است، در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از مشخصات استوانه‌ای (r, θ, z) ، تنش‌های شعاعی σ_r و مماسی σ_θ در هر نقطه با

می‌آید:

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



شکل 2: نمایی از یک نمونه‌ی استوانه‌ای توخالی جدار ضخیم تحت فشار داخلی، تنش جانبی و تنش محوری [20]

تنش محوری در سطوح انتهایی نمونه‌ی استوانه‌ای به صورت یکنواخت گسترده شده است. معادله (1) و (2) نشان می‌دهند که تنش شعاعی و مماسی برحسب 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 در دیواره گمانه می‌توانند به‌عنوان تنش‌های بیشینه، کمینه و میانی محسوب شوند [26، 27].

3- مطالعات آزمایشگاهی

مطالعات آزمایشگاهی در دو بخش تعیین مشخصات مکانیکی (هم برای نمونه‌های طبیعی ماسه‌سنگ، مارن و آهک‌رسی و هم برای نمونه‌های مصنوعی گچ) و انجام آزمایش‌های سه محوری به کمک سلول هوک تغییر یافته بر روی نمونه‌های استوانه‌ای جدار ضخیم گچ انجام شد. قبل از انجام آزمایش‌ها بر روی گمانه‌های استوانه‌ای توخالی جدار ضخیم، برای تعیین مشخصات مکانیکی و شناخت ویژگی‌های فیزیکی نمونه‌های مورد آزمایش، نمونه‌هایی با شرایط کاملاً مشابه، مطابق با استانداردهای ISRM تحت آزمایش‌های مکانیک سنگی قرار گرفتند و آزمون‌های تعیین چگالی، مقاومت فشاری تک‌محوره، مقاومت فشاری سه‌محوره و مقاومت کششی از جمله آزمایش‌های انجام شده هستند. به کمک آزمایش تک‌محوره، مدول تغییرشکل‌پذیری و ضریب پواسون و همچنین از آزمایش فشاری سه‌محوره، چسبندگی و زاویه اصطکاک هر کدام از نمونه‌ها تعیین شد. در جدول 1 میانگین مشخصات مکانیکی نمونه‌ها آورده شده است.

جدول 1: میانگین مشخصات مکانیکی نمونه‌های آزمایش شده

جنس	سازند	چگالی (کیلونیوتن بر مترمکعب)	مقاومت فشاری تک‌محوره (MPa)	چسبندگی (MPa)	مدول تغییر شکل‌پذیری (GPa)	زاویه اصطکاک (درجه)	ضریب پواسون	مقاومت کششی (MPa)
ماسه‌سنگ	لالون	21/6	55	5	12/22	42	0/21	5/5
مارن	بنگستان	21	50	4/4	5/45	43	0/3	7
آهک‌رسی	آسماری	21/7	45	3	6/6	36	0/18	2
گچ		12	8/6	0/8	7/6	32	0/23	0/3

150 میلی‌متر، قطر داخلی 25 میلی‌متر و قطر خارجی 75 میلی‌متر هستند. همچنین، از کرنش‌سنج‌های الکتریکی 120 اهم در داخل حفره مرکزی برای اندازه‌گیری کرنش

برای تهیه نمونه‌های استوانه‌ای توخالی گچی، نسبت اختلاط گچ به آب، سه به یک در نظر گرفته شد. با توجه به ابعاد سلول هوک، ابعاد نمونه‌های تهیه شده دارای ارتفاع

همان‌طور که گفته شد، بسته به مقادیر فشار داخلی (فشار داخل گمانه)، تنش جانبی و تنش محوری اعمال شده بر نمونه، هر کدام از تنش‌های مماسی، شعاعی و محوری در جداره گمانه می‌توانند به‌عنوان تنش‌های بیشینه، کمینه و میانی محسوب شوند. بنابراین، می‌توان مسیرهای مختلف تنش را با ترکیبی از مقادیر مختلف تنش‌های یاد شده در طی آزمایش اعمال کرد. رژیم تنش استفاده شده برای مطالعات آزمایشگاهی عبارت است از:

$$\sigma_1 = \sigma_\theta > \sigma_2 = \sigma_r > \sigma_3 = \sigma_z \quad (\text{وضعیت تنش در دیواره گمانه}) \quad (\text{شکل 5})$$

آزمون‌های مذکور با حضور فشار داخلی (فشار داخل گمانه) انجام شد که شامل دو مرحله است که در مرحله اول ابتدا تنش محوری تا 5/5 مگاپاسکال، تنش جانبی تا 16 الی 18 (در آزمایش‌های مختلف) مگاپاسکال و فشار داخلی نیز تا 16 الی 18 مگاپاسکال (در آزمایش‌های مختلف) افزایش می‌یابد. سپس با ثابت ماندن تنش جانبی و تنش محوری، فشار داخل گمانه به تدریج کاهش پیدا کرده تا نمونه دچار شکست شود. به عبارتی با این شرایط می‌توان فرآیند حفاری را شبیه‌سازی کرد. فشار داخلی که شکست نمونه استوانه‌ای جدار ضخیم در آن تنش اتفاق می‌افتد به عنوان فشار گل کمینه معرفی می‌شود.

نتایج آزمایش‌های انجام شده روی نمونه‌های استوانه‌ای توخالی جدار ضخیم گچ در جدول 2 آورده شده است. لازم به ذکر است قبل از انجام آزمایش‌های با اعمال فشار داخل گمانه، آزمایش‌هایی بدون اعمال فشار داخل گمانه تحت شرایط تنش $\sigma_1 = \sigma_z > \sigma_2 = \sigma_\theta > \sigma_3 = \sigma_r = 0$ انجام شده است. در این حالت فشار جانبی افزایش می‌یابد تا نمونه‌های استوانه‌ای توخالی بشکنند. این آزمایش‌ها برای تعیین فشار جانبی مناسب در انجام آزمایش‌های با اعمال فشار داخل گمانه انجام شده است. فشار جانبی در آزمایش‌های با اعمال فشار داخل گمانه بیشتر از تنش جانبی که باعث شکست نمونه‌ها در حالت بدون اعمال فشار داخل گمانه می‌شود انتخاب شده است.

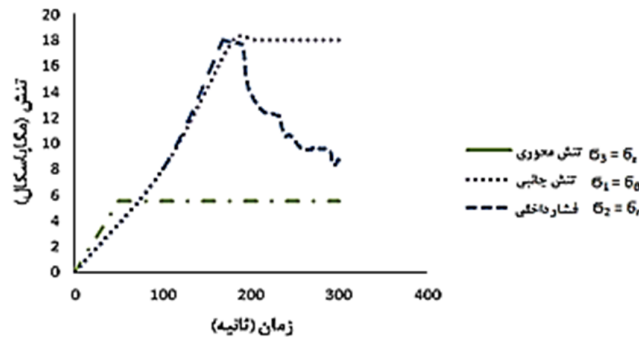
مماسی نمونه در داخل گمانه بهره گرفته شده است. نمایی از وضعیت نهایی نمونه‌های استوانه‌ای توخالی گچی تهیه شده در شکل 3 نشان داده شده است. برای انجام آزمایش از سلول هوک سه‌محوری تغییر یافته استفاده شد (شکل 4).



شکل 3: نمایی از نمونه‌های استوانه‌ای تو خالی جدار ضخیم تهیه شده برای آزمایش



شکل 4: (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



شکل 5: شرایط تنش اعمال شده در طی آزمایش ($\sigma_1 = \sigma_\theta$) $\sigma_2 = \sigma_r$) $\sigma_3 = \sigma_z$

جدول 2: تنش‌های محوری و جانبی اعمال شده به نمونه‌های استوانه‌ای توخالی گچی و فشار داخل گمانه به دست آمده در لحظه شکست

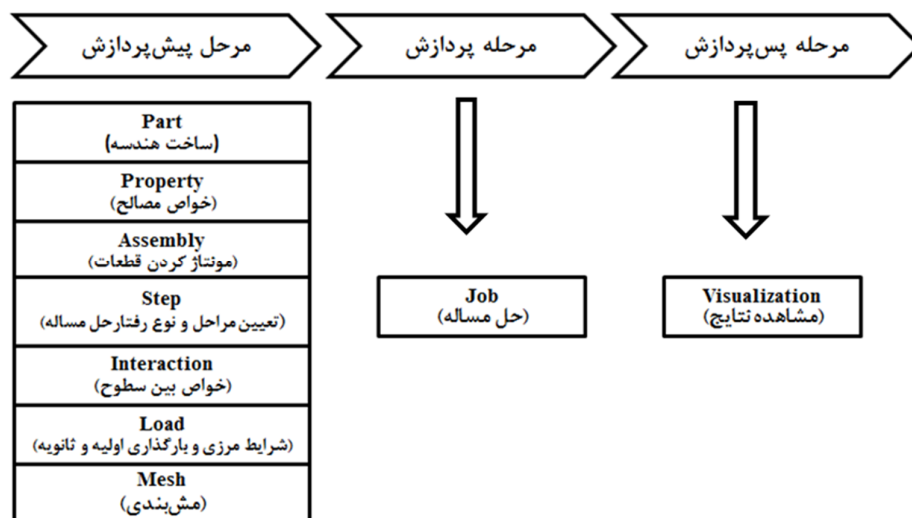
نمونه	تنش محوری (σ_v) (MPa)	تنش جانبی (σ_h) (MPa)	فشار داخلی (گمانه) در لحظه شکست نمونه‌ها (P_i) (MPa)
1 G_9	5/58	16	9
2 G_{10}	5/62	18	8/87
3 G_{12}	5/71	18	8/5
4 G_{13}	5/61	18	8/9
5 G_{14}	5/48	18	9/2

تراوش و پیرو الکتریک را مورد مطالعه قرار داد. مراحل مدلسازی توسط نرم‌افزار آباکوس در شکل 6 نشان داده شده است.

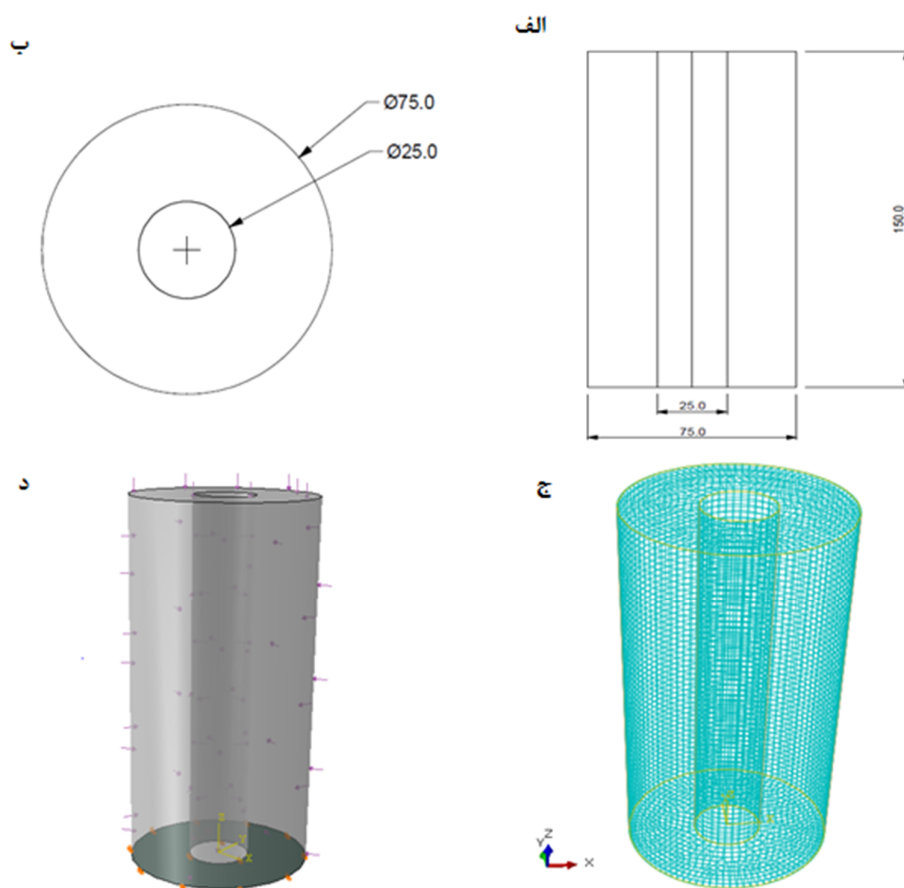
در مدلسازی انجام شده، محیط پیوسته در نظر گرفته شده است. همانطور که در شکل 7 دیده می‌شود، نمونه‌های استوانه‌ای جدار ضخیم دارای ارتفاع 150 میلی‌متر، قطر داخلی 25 میلی‌متر و قطر خارجی 75 میلی‌متر هستند. همچنین شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای مدلسازی به صورتی است که کف مدل فقط در جهت عمودی (راستای Z) از لحاظ جابه‌جایی ثابت در نظر گرفته شده است. در سطوح جانبی و داخلی به ترتیب فشار جانبی و فشار داخلی و همچنین در سطح بالایی فشار محوری اعمال شده است. المان مورد استفاده برای مش‌بندی مدل از نوع $C3D8P$ ³ به صورت سه‌بُعدی 8 گره‌ای مکعبی با قابلیت در نظر گرفتن فشار منفذی است (این المان همانطور که گفته شده است برای اعمال درجه آزادی فشار منفذی در مدل در نظر گرفته شده است و فشار داخلی که در حقیقت همان فشار گل است در صورت حضور این المان قابل اعمال است) (شکل 7).

4- مدلسازی عددی

مدلسازی عددی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS انجام شده است. نرم‌افزار ABAQUS قابلیت حل مسایل از یک تحلیل خطی ساده تا پیچیده‌ترین مدلسازی غیر خطی را دارا است. این نرم‌افزار دارای مجموعه المان‌های بسیار گسترده‌ای است که هر نوع هندسه‌ای را می‌توان توسط این المان‌ها مدلسازی کرد. همچنین دارای مدل‌های رفتاری بسیار زیادی است که در مدلسازی انواع مواد با خواص و رفتار گوناگون نظیر فلزات، لاستیک‌ها، پلیمرها، کامپوزیت‌ها، بتن مسلح، فوم‌های فبری و نیز شکننده و همچنین مصالحی ژئوتکنیکی نظیر خاک و سنگ، قابلیت بالایی را ممکن می‌سازد. نظر به اینکه ABAQUS یک ابزار مدلسازی عمومی و گسترده است، استفاده از آن تنها محدود به تحلیل مسائل مکانیک جامدات (یعنی مسئله تنش - کرنش) نمی‌شود. با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان مسایل مختلفی نظیر انتقال حرارت، نفوذ جرم، تحلیل حرارتی اجزاء الکتریکی، اکوستیک،



شکل 6: مراحل مدلسازی توسط نرم افزار ABAQUS



شکل 7: الف) دید قائم نمونه‌های استوانه‌ای جدار ضخیم، ب) دید از بالا، ج) شبکه مش بندی استفاده شده، د) شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای نمونه‌های استوانه‌ای جدار ضخیم

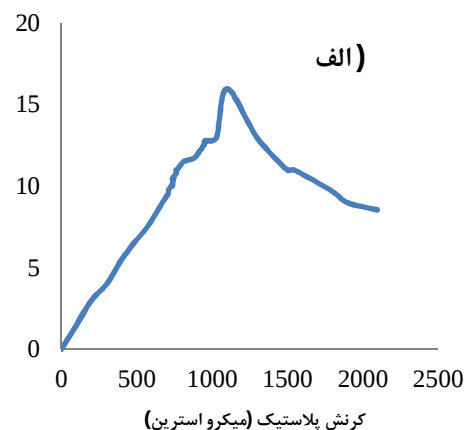
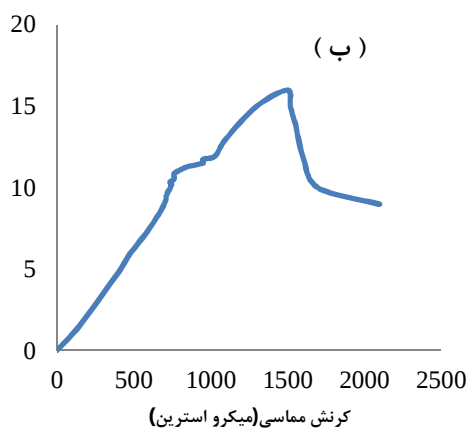
همانطور که در شکل 1 نشان داده شده است، در مرحله اول برای رسیدن به یک مدل عددی مطمئن، با توجه به در دسترس بودن نتایج آزمایش‌های سه‌محوره انجام شده بر روی نمونه‌های استوانه‌ای توخالی جدار ضخیم گچ، ابتدا مدلسازی نمونه‌های استوانه‌ای جدار ضخیم گچ انجام شد. خواص مکانیکی میانگین اعمال شده برای نمونه‌های گچ که حاصل چندین آزمایش بر روی نمونه‌های استوانه‌ای است، در جدول 1 ذکر شده است. معیار مور-کولمب برای تحلیل رفتار پلاستیک در نظر گرفته شده است. پس از اصلاح مدل عددی ساخته شده، خواص مکانیکی نمونه‌های طبیعی به مدل اعمال شد. جدول 1 میانگین خواص مکانیکی نمونه‌های طبیعی ماسه‌سنگ، مارن و آهک‌رسی را نشان می‌دهد (این خواص از میانگین نتایج آزمایش‌های انجام شده روی 5 نمونه از هر کدام از نمونه‌های سنگ به دست آمده است).

برای اصلاح مدل عددی، دو پارامتری که به عنوان معیار مقایسه بین مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی مورد توجه قرار گرفت، میزان کرنش پلاستیک رخ داده در دیواره گمانه و شکل شکست (مشابهت شکل شکست نمونه‌ها در

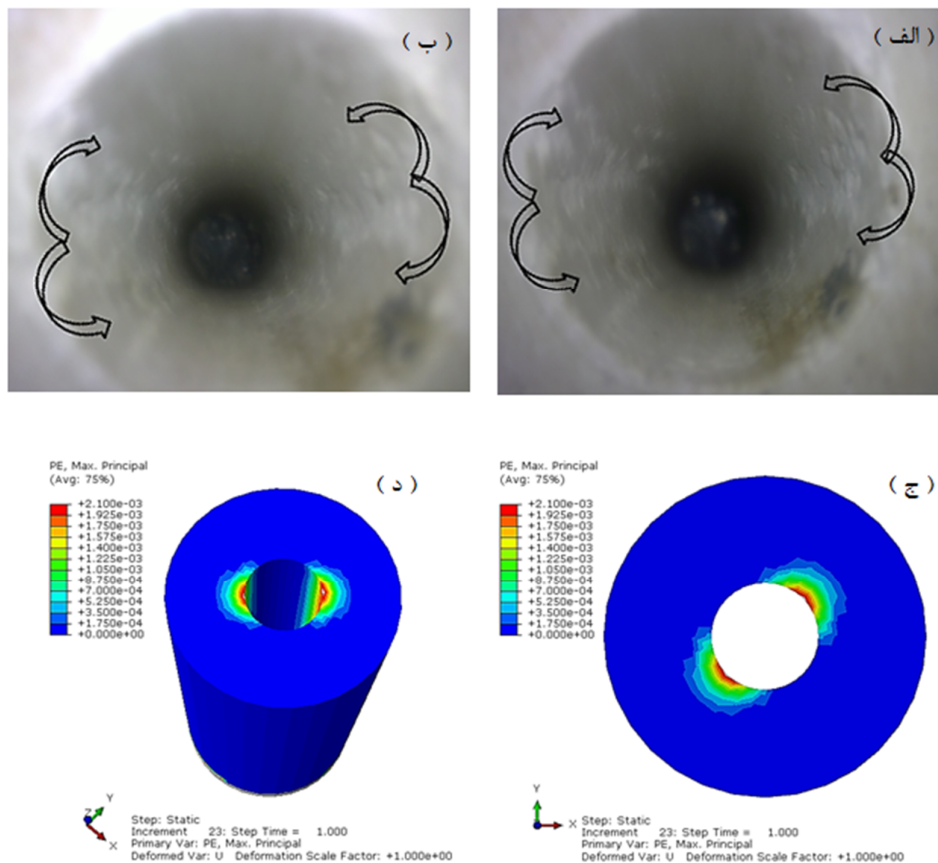
حالت آزمایشگاهی و عددی مقایسه شده است) حاصل در نمونه‌های استوانه‌ای جدار ضخیم است. در شکل‌های 8 و 9 به ترتیب نمودار تغییرات فشار داخلی برحسب کرنش مماسی و تصاویر بعد از شکست نمونه‌های استوانه‌ای تو خالی جدار ضخیم گچ در حالت آزمایشگاهی و مدلسازی عددی نشان داده شده است. همانطور که در شکل 8 مشاهده می‌شود کرنش مماسی رخ داده در لحظه‌ی شکست در آزمایشگاه 2000 میکرواسترین گزارش شده است، همچنین برای مدلسازی انجام شده نیز کرنش پلاستیک حاصل 2100 میکرواسترین است. در شکل 9 نتایج آزمایشگاهی و مدلسازی عددی برای شکل شکست نمونه‌های گچی نشان داده شده است که شکست به صورت برشی در دو جهت مخالف دیواره گمانه‌ی حفر شده رخ داده است. همچنین تنش‌های محوری و جانبی اعمال شده به نمونه‌ها در مدلسازی عددی و فشار داخل گمانه در لحظه شکست به دست آمده از مدلسازی عددی در جدول 3 ذکر شده است که تطابق خوبی با درصد خطای کمتر از 10 درصد در مقایسه‌ی با نتایج آزمایشگاهی گزارش شده در جدول 2 دارد.

جدول 3: تنش‌های محوری و جانبی اعمال شده به نمونه‌های استوانه‌ای توخالی گچی در مدلسازی عددی و فشار داخل گمانه به دست آمده در لحظه شکست.

تنش محوری (σ_v) (MPa)	تنش جانبی (σ_h) (MPa)	فشار داخلی (P_i) (MPa)
5/8	17/75	8/56



شکل 8: نمودار تغییرات فشار داخلی برحسب کرنش مماسی در شرایط تنش $\sigma_1 = \sigma_\theta$ (الف) نتایج مدلسازی عددی و (ب) نتایج آزمایشگاهی



شکل 9: تصاویر بعد از شکست نمونه‌های استوانه‌ای تو خالی جدار ضخیم گچ (الف) و (ب) نتایج آزمایشگاهی - (ج) و (د) نتایج مدلسازی عددی از دید دوبعدی و سه‌بعدی

تنش‌های محوری و جانبی اعمال شده (تحت رژیم تنش $\sigma_1 = \sigma_\theta$, $\sigma_2 = \sigma_r$, $\sigma_3 = \sigma_z$) به نمونه‌های استوانه‌ای توخالی مارن، آهک رسی و ماسه‌سنگ و فشار داخل گمانه به دست آمده از مدلسازی عددی در لحظه شکست ذکر شده است. تنش‌های مماسی و محوری ارائه شده در جدول 4 از روابط (2) و (3) برای دیواره‌ی گمانه محاسبه شده‌اند. در شکل 10 تصاویر بعد از شکست نمونه‌های استوانه‌ای جدار ضخیم حاصل از مدلسازی عددی و نمودارهای کرنش پلاستیک بر حسب فشار داخلی برای نمونه‌های استوانه‌ای جدار ضخیم مارن، ماسه‌سنگ و آهک رسی در رژیم تنش $\sigma_1 = \sigma_\theta$, $\sigma_2 = \sigma_r$, $\sigma_3 = \sigma_z$ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل 10 مشاهده می‌شود، شکل شکست برای نمونه‌های مختلف تقریباً یکسان است و در دو جهت مخالف به صورت برشی اتفاق می‌افتد. دو ناحیه زاویه 180 درجه نسبت به هم تشکیل می‌دهند. قابل توجه است که عمق شکست و بیشینه اندازه‌ی کرنش پلاستیک برای

در حالت کلی مدلسازی عددی نمونه‌های استوانه‌ای جدار ضخیم از انعطاف بیشتری برای بررسی رفتار نمونه‌های استوانه‌ای توخالی جدار ضخیم نسبت به آزمون‌های آزمایشگاهی برخوردار است. آزمون‌های انجام شده برای مطالعه تغییر شکل و نحوه‌ی شکست نمونه‌های استوانه‌ای توخالی جدار ضخیم با محدودیت اعمال فشار داخل گمانه در مورد نمونه‌های طبیعی مارن، آهک رسی و ماسه‌سنگ روبرو بود. بنابراین، ساخت مدل عددی اصلاح شده توسط نتایج آزمایشگاهی، می‌تواند جایگزینی مناسب برای بررسی تغییر شکل و نحوه‌ی شکست نمونه‌های استوانه‌ای توخالی جدار ضخیم مارن، آهک رسی و ماسه‌سنگ (برای مدلسازی حفاری چاه‌های نفت) باشد.

شکل شکست و تغییر شکل بیشینه (کرنش پلاستیک) در دیواره‌ی نمونه‌های استوانه‌ای توخالی جدار ضخیم از جمله معیارهای بررسی هستند که برای مقایسه نتایج بین نمونه‌های مختلف استفاده شده است. در جدول 4

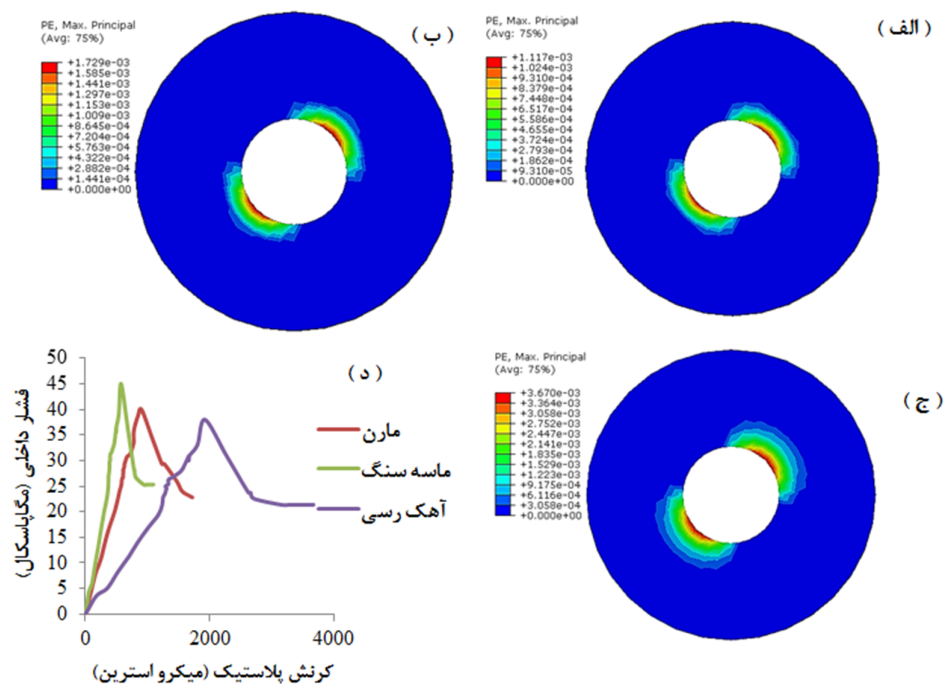
در شکل 10 بیشینه اندازه‌ی کرنش پلاستیک برای نمونه‌های استوانه‌ای جدارضخیم مارن، ماسه‌سنگ و آهک‌رسی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، کمترین کرنش پلاستیک در لحظه‌ی شکست برای ماسه‌سنگ و بیشترین کرنش پلاستیک برای آهک‌رسی حاصل شده است.

نمونه‌های استوانه‌ای جدار ضخیم مارن، ماسه‌سنگ و آهک‌رسی متفاوت است. همانطور که در جدول 3 مشاهده می‌شود، ماسه‌سنگ بیشترین فشار داخلی در لحظه شکست و آهک‌رسی در بین نمونه‌های ذکر شده کمترین فشار داخلی در لحظه شکست را دارد.

جدول 4: تنش‌های اعمال شده به نمونه‌های استوانه‌ای توخالی مارن، ماسه‌سنگ و آهک‌رسی و فشار داخل گمانه به دست آمده در لحظه

شکست در شرایط تنش $\sigma_1 = \sigma_\theta$ ، $\sigma_2 = \sigma_r$ ، $\sigma_3 = \sigma_z$

تنش شعاعی (MPa) (σ_r)	تنش قائم (MPa) (σ_z)	تنش مماسی (MPa) (σ_θ)	فشار داخلی (MPa) (P_i)	تنش جانبی (MPa) (σ_h)	تنش محوری (MPa) (σ_v)	
21/81	11/8	64/77	21/81	41	14/5	مارن
20/37	10/45	62/22	20/37	39	13	آهک‌رسی
24/12	13/7	68/84	24/12	44	15/7	ماسه‌سنگ



شکل 10: تصاویر بعد از شکست نمونه‌های استوانه‌ای توخالی جدارضخیم حاصل از مدلسازی عددی برای (الف) ماسه‌سنگ (ب) مارن (ج)

آهک‌رسی و (د) نمودارهای تغییرات کرنش پلاستیک بر حسب فشار داخلی در شرایط تنش $\sigma_1 = \sigma_\theta$ ، $\sigma_2 = \sigma_r$ ، $\sigma_3 = \sigma_z$

ارائه شده در جدول 5 از روابط (2) و (3) برای دیواره گمانه محاسبه شده‌اند. همان‌طور که در شکل 11 مشاهده می‌شود، شکل شکست برای نمونه‌های مختلف تقریباً یکسان است و شکست با توزیع تصادفی در سه ناحیه اتفاق می‌افتد. زاویه بین ناحیه 1 و 2 تقریباً 50 درجه، زاویه بین

در جدول 5 تنش‌های محوری و جانبی اعمال شده (تحت رژیم تنش $\sigma_1 = \sigma_z$ ، $\sigma_2 = \sigma_\theta$ ، $\sigma_3 = \sigma_r$) به نمونه‌های استوانه‌ای توخالی مارن، آهک‌رسی و ماسه‌سنگ و فشار داخل گمانه به دست آمده از مدلسازی عددی در لحظه شکست ذکر شده است. تنش‌های مماسی و محوری

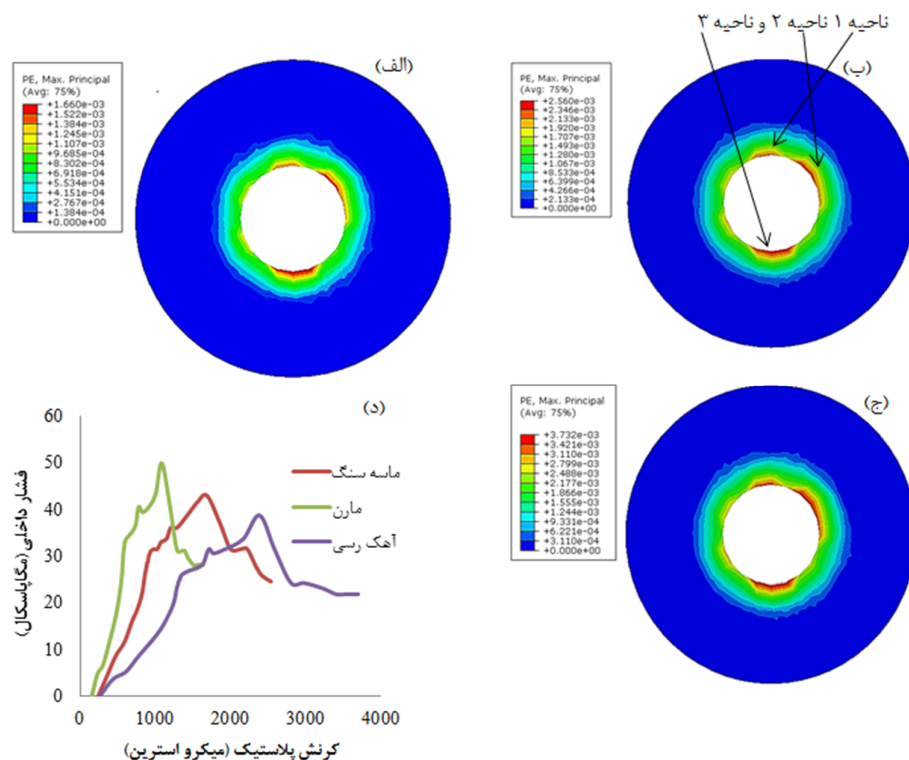
ناحیه 2 و 3 تقریباً 130 درجه و زاویه بین ناحیه 3 و 1، 180 درجه است.

در شکل 11 بیشینه اندازه‌ی کرنش پلاستیک برای نمونه‌های استوانه‌ای جدارضخیم مارن، ماسه‌سنگ و آهک‌رسی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، کمترین کرنش پلاستیک در لحظه شکست برای

ماسه‌سنگ و بیشترین کرنش پلاستیک برای آهک‌رسی حاصل شده است. همانطور که در جدول 5 مشاهده می‌شود، ماسه‌سنگ بیشترین فشار داخلی در لحظه شکست و آهک‌رسی در بین نمونه‌های ذکر شده کمترین فشار داخلی در لحظه شکست را دارد.

جدول 5: تنش‌های اعمال شده به نمونه‌های استوانه‌ای توخالی مارن، ماسه‌سنگ و آهک‌رسی و فشار داخل گمانه به دست آمده در لحظه شکست در. شرایط تنش $\sigma_1 = \sigma_z$ ، $\sigma_2 = \sigma_\theta$ ، $\sigma_3 = \sigma_r$

تنش شعاعی (MPa) (σ_r)	تنش قائم (MPa) (σ_z)	تنش مماسی (MPa) (σ_θ)	فشار داخلی (MPa) (P_i)	تنش جانبی (MPa) (σ_h)	تنش محوری (MPa) (σ_v)	
20/8	40/61	34/96	20/8	27/1	43/2	مارن
18/6	37/07	32/47	18/6	24/8	39/4	آهک رسی
23/45	47/38	46/47	23/45	33/7	50/3	ماسه سنگ



شکل 11: تصاویر بعد از شکست نمونه‌های استوانه‌ای توخالی جدارضخیم حاصل از مدلسازی عددی برای (الف) ماسه‌سنگ (ب) مارن (ج) آهک رسی و (د) نمودارهای تغییرات کرنش پلاستیک بر حسب فشار داخلی در شرایط تنش $\sigma_1 = \sigma_z$ ، $\sigma_2 = \sigma_\theta$ ، $\sigma_3 = \sigma_r$

مدلسازی عددی، نیازمند در دسترس بودن نتایج مدل آزمایشگاهی مشابه است. برای غلبه بر محدودیت‌های آزمایشگاهی می‌توان از مدلسازی عددی اصلاح شده استفاده کرد. مکانیزم شکست حاصل از مدل آزمایشگاهی و

5- نتیجه‌گیری

برای بررسی نحوه‌ی تغییر شکل و شکل شکست می‌توان از روش‌های آزمایشگاهی و عددی استفاده کرد. اصلاح

- [4] Zoback, M. D. (2010). Reservoir geomechanics. Cambridge University Press.
- [5] Pasic, B., Gaurina-Međimurec, N., & Matanovic, D. (2007). Wellbore Instability: Causes And Consequences/Nestabilnost Kanala Busotine: Uzroci I Posljedice. Rudarsko - geolosko - naftni zbornik, 19(1), 87.
- [6] Fjar, E., Holt, R. M., Raaen, A. M., Risnes, R., & Horsrud, P. (2008). Petroleum related rock mechanics (Vol. 53). Elsevier.
- [7] Ewy, R. T., & Cook, N. G. W. (1990, October). 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 (Vol. 27, No. 5, pp. 387-407). Pergamon.
- [8] Santarelli, F. J., & Brown, E. T. (1989, September). Failure of three sedimentary rocks in triaxial and hollow cylinder compression tests. In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts (Vol. 26, No. 5, pp. 401-413). Pergamon.
- [9] Perie, P. J., & Goodman, R. E. (1989). Evidence of new failure patterns in a thick-walled cylinder experiment. In Proc. 12th ETCE/ASME Conf. (Vol. 22, pp. 23-27).
- [10] Elkadi, A. S., & Van Mier, J. G. M. (2004). Scaled hollow-cylinder tests for studying size effect in fracture processes of concrete. fracture mechanics of concrete structures, 1, 229-236.
- [11] Warlick, L. M., Abass, H. H., Khan, M. R., Pardo Techa, C. H., Tahini, A. M., Shehri, D. A., ... & Perumalla, S. (2009, January). 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.
- [12] Haimson, B. (2007). Micromechanisms of borehole instability leading to breakouts in rocks. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 44(2), 157-173.
- [13] Adams, F. D. (1912). An experimental contribution to the question of the depth of the zone of flow in the earth's crust. The Journal of Geology, 97-118.
- [14] King, L. V. (1912). On the limiting strength of rocks under conditions of stress existing in the earth's interior. The Journal of Geology, 119-138.
- [15] Bridgman, P. The failure of cavities in crystals and rocks under pressure. American Journal of Science, 1918.
- [16] Robertson, E. C. (1955). Experimental study of the strength of rocks. Geological Society of America Bulletin, 66(10), 1275-1314.
- [17] Hoskins, E. R. (1969, January). The failure of thick-walled hollow cylinders of isotropic rock. In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts (Vol. 6, No. 1, pp. 99-125). Pergamon.

مدلسازی عددی در شرایط تنش $\sigma_1 = \sigma_\theta, \sigma_2 = \sigma_r, \sigma_3 = \sigma_z$ به صورت برشی و در دو جهت مخالف هم در دیواره‌ی گمانه‌های نمونه‌های استوانه‌ای توخالی جدار ضخیم است. پس از اصلاح مدل و اعمال خصوصیات نمونه‌های طبیعی مارن، ماسه‌سنگ و آهک رسی تحت شرایط تنش $\sigma_1 = \sigma_\theta, \sigma_2 = \sigma_r, \sigma_3 = \sigma_z$ می‌توان از مدلسازی عددی نتیجه گرفت که شکل شکست در دیواره‌ی نمونه‌های استوانه‌ای توخالی جدار ضخیم در رژیم تنش $\sigma_1 = \sigma_\theta, \sigma_2 = \sigma_r, \sigma_3 = \sigma_z$ به صورت برشی و در دو جهت مخالف دیواره‌ی گمانه است. همچنین در رژیم تنش $\sigma_1 = \sigma_z, \sigma_2 = \sigma_\theta, \sigma_3 = \sigma_r$ شکست با توزیع تصادفی در سه ناحیه اتفاق می‌افتد. در دو شرایط تنش یاد شده، بیشترین فشار داخل گمانه در لحظه شکست برای ماسه‌سنگ و کمترین فشار داخل گمانه برای آهک رسی در بین نمونه‌های مورد مطالعه است. همچنین کمترین کرنش پلاستیک برای ماسه‌سنگ و بیشترین کرنش پلاستیک برای آهک رسی از نتایج مدلسازی عددی حاصل شده است. به علاوه، می‌توان نتیجه گرفت که شکل شکست به جهت تنش‌های اعمالی و مقادیر آنها بستگی دارد. لازم به ذکر است در شرایطی که روی نمونه‌های استوانه‌ای توخالی آزمایش انجام شود و یا مدلسازی عددی تحت شرایط تنش $\sigma_1 = \sigma_\theta, \sigma_2 = \sigma_r, \sigma_3 = \sigma_z$ صورت گیرد، فشار شکست گمانه به دست آمده را می‌توان به عنوان فشار اولیه گل حفاری در عملیات حفاری چاههای نفت در نظر گرفت و با اعمال فشار مناسب گل حفاری از ناپایداری‌ها پیشگیری شود.

6- مراجع

- [1] Al-Ajmi, A. M., & Zimmerman, R. W. (2006). Stability analysis of vertical boreholes using the Mogi-Coulomb failure criterion. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43(8), 1200-1211.
- [2] Bell, J. S., & Bachu, S. (2003). In situ stress magnitude and orientation estimates for Cretaceous coal-bearing strata beneath the plains area of central and southern Alberta. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 51(1), 1-28.
- [3] Khan, S. A. I. (2006). Wellbore stability during underbalanced drilling. In Masters Abstracts International (Vol. 45, No. 03).

- [18] Alsayed, M. I. (2002). Utilising the Hoek triaxial cell for multiaxial testing of hollow rock cylinders. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(3), 355-366.
- [19] Gay, N. C. (1973, May). Fracture growth around openings in thick-walled cylinders of rock subjected to hydrostatic compression. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 10, No. 3, pp. 209-233). Pergamon.
- [20] Bandis, S. C., Lindman, J., & Barton, N. (1987, January). Three-dimensional stress state and fracturing around cavities in overstressed weak rock. In 6th ISRM Congress. International Society for Rock Mechanics.
- [21] Walton, G., et al. (2015). Borehole Breakout Analysis to Determine the In-Situ Stress State in Hard Rock. 49th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium,
- [22] Chatterjee, R., Singha, D. K., & Sangvai, P. Deformation modeling around a wellbore using finite element technique.
- [23] Gentzis, T., Deisman, N., & Chalaturnyk, R. J. (2009). A method to predict geomechanical properties and model well stability in horizontal boreholes. *International Journal of Coal Geology*, 78(2), 149-160.
- [24] Peng, S., Fu, J., & Zhang, J. (2007). Borehole casing failure analysis in unconsolidated formations: A case study. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 59(3), 226-238.
- [25] Salehi, S., Hareland, G., & Nygaard, R. (2010). Numerical simulations of wellbore stability in under-balanced-drilling wells. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 72(3), 229-235.
- [26] Hoek, E., & Franklin, J. A. (1967). A simple triaxial cell for field or laboratory testing of rock. Imperial College of Science and Technology, University of London.
- [27] Elkadi, A. S., & Van Mier, J. G. M. (2004). Scaled hollow-cylinder tests for studying size effect in fracture processes of concrete. *fracture mechanics of concrete structures*, 1, 229-236.

1- Breakout

2- Collapsing

3- An 8-node brick, trilinear displacement, trilinear pore pressure.

Numerical Modeling of Thick-Walled Hollow Cylindrical Samples: Effect of Status of Applied Stresses on Deformation and Shape of Failure

S.Aghayi¹, M. hosseini^{2*}

1- M.Sc. Student of Mining, Dept. of Mining, Imam khomeini International University, Ghazvin, Iran

2- Assistant Professor, Dept. of Mining, Imam khomeini International University, Ghazvin, Iran

* Corresponding Author: meh_hosseini18@gmail.com

(Received: July 2015, Accepted: October 2015)

Abstract

In addition to high cost levels, shaft excavation in different sectors such as mining, oil and gas extraction have always been dealing with instability problems. Instability hazards can be minimized by controlling the deformation and failure of wellbore wall. The purpose of this paper is to study the deformation and failure mechanism of thick-walled hollow cylindrical specimens (for modeling of oil well) during the excavation in two different stress conditions. Laboratory tests were carried out on artificial specimens of gypsum and natural specimens of marl, sandstone and clayed limestone in order to determine the mechanical properties of the aforementioned rocks. The experiments in high stress conditions could not be carried out due to some limitations related to laboratory. Therefore, triaxial tests were done on thick-walled hollow cylindrical specimens of gypsum using modified Hoek cell. The results of tests were employed to develop and modify numerical models which were used for prediction of deformation and failure mechanisms in thick-walled hollow cylindrical natural specimens of marl, sandstone and clayed limestone in the following stress condition $\sigma_1 = \sigma_\theta > \sigma_2 = \sigma_r > \sigma_3 = \sigma_z$. It was revealed that the failure mechanism in the wall of thick-walled hollow cylindrical specimens for stress condition of $\sigma_1 = \sigma_\theta > \sigma_2 = \sigma_r > \sigma_3 = \sigma_z$ is shear failure which occurs in two opposite points on the borehole wall. However, in the stress condition of $\sigma_1 = \sigma_z > \sigma_2 = \sigma_\theta > \sigma_3 = \sigma_r$ the failure occurs in three points with random distribution. The maximum and minimum values of borehole pressure in the failure moment occurred for sandstone and clayed limestone respectively in both stress conditions. Also the outcome of numerical modeling revealed the maximum and minimum values of plastic strain to be in cases of clayed limestone and sandstone, respectively. Pressure within the borehole at the moment of failure could be used as initial pressure of drilling fluid.

Keywords

Thick-Walled Hollow Cylinder Specimens, Deformation, Oil Well, Failure and ABAQUS

Cite This Paper:

Aghayi, S., and Hosseini, M. (2015). Numerical Modeling of Thick-Walled Hollow Cylindrical Samples: Effect of Status of Applied Stresses on Deformation and Shape of Failure. Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering, 5(9), 99-111. [http://dx.medra.org/10.17383/S2251-6565\(15\)940919-X](http://dx.medra.org/10.17383/S2251-6565(15)940919-X)