

## کاربرد مفهوم ترمو-پوروالاستیک در بررسی دوبعدی پایداری دیواره چاه

سیدرضا شادی زاده<sup>۱</sup> دانشگاه صنعت نفت

مصطفی گمار<sup>۲</sup> مدیریت اکتشاف  
ایرج گوهرزینا<sup>۳</sup> دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

تغییرات تنش در اطراف چاه و مخزن از موارد مهم در مهندسی نفت و توسعه مخازن زمین گرمایی<sup>۱</sup> است. تنش‌های محلی ایجاد شده در سنگ، مجموع تنش‌های ناشی از تنش‌های درجا، تغییرات فشار منفذی<sup>۲</sup> و تنش‌های ناشی از تغییرات دماست<sup>۳</sup>. این تنش‌ها به دلیل تغییرات در خصوصیات سنگ و پدیده‌های انتقال حرارت می‌توانند بسیار ناهمگن باشند. چنین تغییراتی در میزان فشار و دما می‌تواند باعث آسیب سازند، تولید ماسه<sup>۴</sup>، ریزش شیل<sup>۵</sup> و حالات متفاوتی از ناپایداری چاه نظیر برش<sup>۶</sup>، ایجاد شکاف<sup>۷</sup> و غیره گردد.

در این تحقیق، پایداری دیواره چاه با استفاده کوپل کامل معادلات انتقال حرارت و مومنتم و با استفاده از معیارهای مختلف شکست سنگ بررسی خواهد شد. معادلات تعادل تنش همراه با معادلات انتقال حرارت و جریان سیال به صورت ناپایا<sup>۸</sup> در نظر گرفته شده است. با استفاده از روش المان محدود، توزیع تنش در اطراف چاه محاسبه می‌گردد و در نهایت، چهار معیار مختلف شکست سنگ موهر-کولمب<sup>۹</sup>، دراگر-پریجر<sup>۱۰</sup>، مدل اصلاح شده لید<sup>۱۱</sup> و مدل موگی-کولمب<sup>۱۲</sup> جهت بررسی پایداری چاه در نظر گرفته خواهد شد. از بررسی‌ها می‌توان تفاوت زیاد در میزان تنش‌های شعاعی و مماسی<sup>۱۳</sup> درجا برای حالات کوپل و غیر کوپل قبل و بعد از حفاری را نتیجه‌گیری کرد. در مورد مدل‌های شکست سنگ، نتایج نشان می‌دهد که در مدل مور-کولمب شعاع شکست<sup>۱۴</sup> دارای بیشترین مقدار در مقایسه با سایر مدل‌هاست و بنابراین، بیشترین میزان وزن گل را جهت پایداری چاه<sup>۱۵</sup> نیاز دارد. دراگر-پریجر کمترین میزان شعاع ریزش را مدل می‌کند و کمترین میزان وزن گل را جهت پایداری به دست می‌آورد. مدل‌های موگی-کولمب و مدل اصلاح شده لید، مقادیر میانگین وزن گل جهت پایداری را نتیجه می‌دهند.

واژگان کلیدی: ترمو-پوروالاستیک<sup>۱۶</sup>، پایداری چاه، معیار شکست سنگ، المان محدود<sup>۱۷</sup>

### مقدمه

شکست یا ریزش دیواره، تغییرات در شکل هندسی چاه در مقطع عمود بر محور چاه است که ناشی از تغییرات تنش می‌باشد. اولین گزارش مربوط به ریزش دیواره توسط لیمن [۱] از معدن طلای آفریقای جنوبی گزارش شد. مشاهدات مشابهی در چاه‌های نفت توسط کوکس [۲] ارائه گردید. بعد از آن، کار [۳] دریافت که جهت گشادشدگی چاه، هم‌راستا با جهت کوچک‌ترین محور تنش درجا<sup>۱۸</sup> می‌باشد. یافته‌های کار توسط محققان دیگری نظیر بل و گوگ [۴]، زوباک و همکاران [۵]، هیمسون و هریک [۶] تأیید گردید.

کارهای آزمایشگاهی (هیمسون و سانگ [۷]، هریسون و هریک [۸])، مطالعات عددی و تحلیل‌های تئوری بسیاری (تائو و قاسمی [۹]، یعقوبی و زینالی [۱۰] و ژنگ [۱۱]) جهت یافتن مقادیر عددی تنش‌های درجا با استفاده از شکل و اندازه ریزش دیواره چاه صورت گرفته است. از آنجایی که شکست دیواره چاه و توسعه آن متشکل از عوامل مختلفی است که هم‌زمان با هم تأثیر گذار هستند، بنابراین رابطه‌ی مشخص بین

اندازه شکست دیواره و مقادیر درجا تنش وجود ندارد و نمی‌توان مقادیر تنش‌های درجا را صرفاً بر اساس شعاع ریزش دیواره به دست آورد.

وقتی یک چاه حفاری می‌گردد، توزیع اولیه تنش اطراف چاه تغییر می‌کند و توزیع نامتقارن تنش‌های شعاعی و مماسی در اطراف چاه شکل می‌گیرد. در یک ماده الاستیک، بیشترین مقادیر تنش روی دیواره چاه شکل می‌گیرد. در نقاط مشخصی از اطراف چاه، ترکیب این تنش‌ها بیشتر از مقاومت سنگ می‌گردد و باعث ریزش دیواره و یا ایجاد شکاف مصنوعی می‌شود. شواهد آزمایشگاهی، عددی و تجارب عملیاتی (زوباک [۵]، ژنگ [۱۱]، هیمسون و سانگ [۷]) نشان می‌دهند که دو مکانیسم شکست کششی<sup>۱۹</sup> و شکست برشی<sup>۲۰</sup>، علت‌های اصلی ایجاد و توسعه ریزش دیواره چاه هستند. شکست کششی زمانی اتفاق می‌افتد که فشار محصورکننده<sup>۲۱</sup> کم یا صفر است و شکست برشی زمانی رخ می‌دهد که فشار محصورکننده بسیار بالا باشد (ژنگ [۱۱]). علاوه بر فشار محصورکننده و میزان تنش‌های درجا، عوامل دیگری نظیر خصوصیات سنگ (نوع سنگ، ترکیب کانی شناسی سنگ،

\*نویسنده عهده‌دار مکاتبات (mustafa.gomar@gmail.com)



### ۱- تعریف مساله

#### ۱-۱- مدل ترمو-پوروالاستیک

قضیه پوروالاستیسیته<sup>۲۶</sup> برای اولین بار توسط بایوت [۲۲] ارایه گردید و سپس توسط رایس و کلسی [۲۳]، دتورنای و چنگ [۲۴]، کویی و همکاران [۲۵، ۲۶، ۲۷] و سانتزلی و همکاران [۲۸] بسط داده شد. معادلات، بیان کننده ترمو-پوروالاستیک توسط پالیوکاس و دومنیکو [۲۹] با بسط رابطه بایوت برای حالت غیرهم‌دما ارایه گردید. بنابراین، با در نظر گرفتن علامت مثبت برای حالت فشار، معادله حاکم به صورت زیر است.

$$G \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_i} + (\lambda + G) \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} - \alpha \frac{\partial p_p}{\partial x_j} - K \beta_s \frac{\partial T}{\partial x_j} - f_j = 0 \quad (1)$$

در این رابطه،  $u$  میزان جابه جایی در سنگ،  $G$  و  $\lambda$  به ترتیب مدول برشی<sup>۲۷</sup> و ثابت لام<sup>۲۸</sup>،  $p_p$  و  $T$  نشان دهنده فشار و دمای سیال درون چاه می‌باشند. ضرایب  $\alpha$ ،  $K$  و  $\beta_s$  به ترتیب ضریب بایوت<sup>۲۹</sup>، مدول بالک<sup>۳۰</sup> برای حالت تخلیه<sup>۳۱</sup> و ضریب انبساط حرارتی سنگ برای حالت تخلیه هستند. همچنین  $f$  مجموع همه نیروهای بدنی<sup>۳۲</sup> و خارجی وارده بوده و اندیس‌های  $i$ ،  $j$  بیانگر جهت‌های مختصات  $x$  و  $y$  می‌باشند.

معادلات حاکم برای جریان تک‌فازی سیال و انتقال انرژی را می‌توان با استفاده از مفاهیم بقای جرم و انرژی<sup>۳۳</sup>، معادله درسی<sup>۳۴</sup> و معادله حالت<sup>۳۵</sup> به دست آورد. بنابراین،

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{k}{\mu} \frac{\partial p_p}{\partial x_i} \right) = \beta \frac{\partial p_p}{\partial t} - \alpha \frac{\partial^2 u_i}{\partial t \partial x_i} + \beta_m \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( k_m \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = (\rho c)_f k \left( \frac{\partial p_p}{\partial x_i} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} + (\rho c)_m \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

تعریف کمیت‌ها و پارامترهای مورد استفاده در این معادلات در جدول ۱ آورده شده است. ضرایب  $(\rho c)_m$ ،  $(\rho c)_f$ ،  $\beta$ ،  $\beta_m$  و  $k_m$  به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\beta = (\alpha - \phi) / K_s + \phi / K_f \quad (4)$$

$$\beta_m = \alpha \beta_s + \phi (\beta_f - \beta_s) \quad (5)$$

$$(\rho c)_m = (1 - \phi) (\rho c)_s + \phi (\rho c)_f \quad (6)$$

$$k_m = (1 - \phi) k_s + \phi k_f \quad (7)$$

برای اکثر سنگ‌ها افزایش و کاهش دما تأثیر چشمگیری بر میزان تنش حرارتی و تغییر فشار سیال در فضای منفذی دارد اما تغییر تنش تأثیر زیادی بر دما ندارد. لذا، اثر کرنش سنگ در معادله انرژی وارد نشده است [۳۰].

ناهمگونی در ترکیب سنگ و پارامترهای حفاری (فشار سیال درون چاه، دمای سیال حفاری، قطر چاه) تأثیر زیادی در پایداری چاه و مکانیسم‌های شکست دیواره چاه دارند.

بل و گوگ [۱۲] و زوباک [۵] معیار شکست مور-کولمب را جهت بررسی تنش‌های اطراف چاه و تعیین محل شکست دیواره چاه در مدل الاستیک به کار بردند. ونگ و دوسولت [۱۳] مفهوم ترمو-پوروالاستیک خطی را برای محاسبه تنش مماسی روی دیواره چاه به کار بردند و اثر دما بر پایداری چاه را بررسی کردند. یوان و هریسون [۱۴] ریزش پیوسته دیواره چاه به همراه جریان سیال را به دلیل توزیع مکرر تنش توسط مدل هیدرومکانیکی به دست آوردند. هیمسون [۱۵] یک سری از آزمایش‌ها جهت مطالعه میکرومکانیسم‌های ریزش دیواره چاه روی انواع مختلف سنگ انجام داد و نتیجه گرفت که شکست دیواره چاه با توجه به نوع سنگ، ترکیب کانی‌شناسی و سیمان بین دانه‌ها متفاوت است.

تقریباً در همه مطالعات انجام شده، مدل مور-کولمب جهت بررسی شکست سنگ استفاده شده است. دو مسأله در رابطه با این معیار شکست وجود دارد؛ اول اینکه مدل مور-کولمب رابطه‌ی خطی بین کمترین و بیشترین مقادیر تنش‌ها را در نظر می‌گیرد. دوم اینکه تنش اصلی متوسط،  $\sigma_p$ ، اثری روی مقاومت سنگ ندارد. شواهد (سانگ و هیمسون [۷]، هندین و همکاران [۱۶]، موگی [۱۷] و هیمسون و چنگ [۱۸]) نشان داده‌اند که تنش اصلی میانه<sup>۳۲</sup> اثر مهمی بر مقاومت سنگ دارد. الاجمی و همکاران [۱۹، ۲۰] مدل جدیدی به نام موگی-کولمب جهت بررسی شکست سنگ ارایه کرد و پایداری دیواره چاه را بر اساس این معیار بررسی کرد. ژانگ و همکاران [۲۱] داده‌های آزمایشگاهی سه‌محوری پنج نمونه سنگ را جهت پیدا کردن پارامترهای معیار شکست سنگ بررسی کرد و پایداری دیواره چاه‌های حفر شده در این پنج نمونه سنگ را با استفاده از این مدل‌ها به دست آورد، اگرچه در بررسی این پنج مدل، اثر حرارت و فشار سیال منفذی را در نظر نگرفتند.

مطالعات انجام شده در مورد تأثیر دما غالباً بر اساس مفهوم انتقال حرارت در اثر هدایت<sup>۳۳</sup> در بخش جامد سنگ و یا پدیده همرفت<sup>۳۴</sup> درون سیال منفذی بدون بررسی اثر هدایتی بخش جامد بوده است. همچنین، در مطالعات قبلی اثر دما بر میزان کرنش<sup>۳۵</sup> و نتیجه آن بر میزان تغییرات فشار در نظر گرفته نشده است. جهت بررسی پدیده‌های فوق در اطراف چاه مدل ترمو-پوروالاستیک که کوپل با پدیده‌های انتقال می‌باشد، در نظر گرفته شده است. سپس، با استفاده از روش اِلمان محدود، توزیع تنش اطراف چاه برای حالات فشار و دمای متغیر به دست آمده است. جهت بررسی پایداری دیواره چاه چهار معیار شکست سنگ شامل موهر-کولمب، دراگر-پریجر، مدل اصلاح شده لید و مدل موگی-کولمب در نظر گرفته شده است.

۲- پیاده‌سازی عددی

جواب‌های تحلیلی توزیع تنش در اطراف چاه محدود به چاه با دیواره صاف و سطح مقطع دایره‌ی شکل می‌باشد. برای حالتی که دیواره چاه ریزش داشته و از حالت دایره‌ای خارج شده باشد، نمی‌توان از حل تحلیلی

Parameter	Value
Borehole radius, $r_w$ , (m)	0.1
Bottom hole pressure, $p_w$ , (MPa)	29
External boundary fluid pressure, $p_o$ , (MPa)	24
Borehole fluid temperature, $T_w$ , ( $^{\circ}C$ )	45
External boundary temperature, $T_o$ , ( $^{\circ}C$ )	85
Minimum in-situ stress, $\sigma_h$ , (MPa)	36
Maximum in-situ stress, $\sigma_H$ , (MPa)	55
Fluid heat capacity, $c_f$ , (j/kg $^{\circ}C$ )	4180
Rock matrix heat capacity, $c_s$ , (j/kg $^{\circ}C$ )	768
Fluid density, $\rho_f$ , (kg/m <sup>3</sup> )	1113
Rock matrix density, $\rho_s$ , (kg/m <sup>3</sup> )	2710
Hole depth (m)	2640
Vertical overburden stress, $\sigma_z$ , (MPa)	67
Porosity, $\phi$ , (fraction)	0.1
Thermal expansivity of solid matrix, $\beta_s$ , ( $1/^{\circ}C$ )	$1.8 \times 10^{-5}$
Thermal expansivity of fluid, $\beta_f$ , ( $1/^{\circ}C$ )	$3.1 \times 10^{-4}$
Solid grain bulk modulus, $K_s$ , (GPa)	48.21
Fluid bulk modulus, $K_f$ , (GPa)	2.15
Rock matrix thermal conductivity, $k_s$ , (W/m $^{\circ}C$ )	1.3
Fluid thermal conductivity, $k_f$ , (W/m $^{\circ}C$ )	0.58
Fluid viscosity, $\mu$ , (Pa.sec)	0.001
Permeability, $k$ , (m <sup>2</sup> )	$0.987 \times 10^{-15}$
Poisson ratio, $\nu$ ,	0.19
Young's Modulus, $E$ , (GPa)	20.6
Cohesive strength, $C$ , (MPa)	9.56
Internal friction angle, $\phi$ , (deg)	38

۲-۱- شرایط مرزی و مقادیر اولیه

مسئله به‌طور شماتیک در شکل ۱- نشان داده شده است. شعاع چاه و شعاع بیرونی به ترتیب  $r_w$  و  $r_o$  می‌باشند. تنش ماکسیمم در جا  $\sigma_H$ ، در امتداد محور  $X$  و تنش کمینه در جا  $\sigma_h$  در جهت  $Y$  در نظر گرفته شده است. مفهوم کرنش صفحه‌ای در جهت محور چاه، در راستایی که تنش محوری  $\sigma_z$  اعمال می‌گردد، در نظر گرفته شده است. تعریف و مقادیر عددی پارامترهای مورد استفاده در جدول ۱- آورده شده است. اگر فرض کنیم که دما و فشار سیال ته چاه به ترتیب  $T_w$  و  $P_w$  باشد، شرایط اولیه در زمان و مرزها به‌صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$T(r, \theta, t < 0) = T_o, \quad p(r, \theta, t < 0) = p_o \quad (8a)$$

$$T(r_w, \theta, t \geq 0) = T_w, \quad p(r_w, \theta, t \geq 0) = p_w \quad (8b)$$

$$T(r_o, \theta, t) = T_o, \quad p(r_o, \theta, t) = p_o \quad (8c)$$

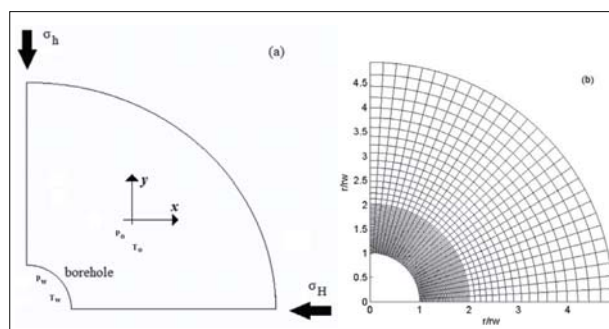
$$\sigma_r(r_w, \theta, t \geq 0) = -p_w \quad (8d)$$

$$\sigma_{x0} = \sigma_H, \quad \sigma_{y0} = \sigma_h \quad (8e)$$

۳-۱- معیارهای شکست سنگ

هر مسأله‌ی تحلیل پایداری دیواره چاه باید شامل دو بخش باشد؛ اول اینکه توزیع تنش اطراف چاه مشخص گردد و دیگر اینکه معیار شکست سنگ جهت بررسی وضعیت مقاومت سنگ استفاده شود. تاکنون، معیارهای شکست سنگ مختلفی استفاده شده و وزن سیال حفاری بهینه برای ایجاد پایداری چاه به‌دست آورده شده است.

متداول‌ترین شاخصه‌های مورد استفاده در بررسی پایداری دیواره چاه عبارتند از: موهر- کولمب، دراگر- پریر، مدل اصلاح شده لید و مدل موگی- کولمب. این معیارها در کنار پارامترهای مربوطه که بر مبنای ضریب چسبندگی  $C$  و زاویه اصطکاک داخلی  $\phi$  بیان شده‌اند در جدول ۲- آورده شده‌اند.



شکل ۱ | (a) ترسیم دامنه مساله (b) نمونه دامنه مشبک شده مورد استفاده در تحلیل مساله



به ۱۵۶۶ المان ۱۶۵۰ گره و ۶۴۳۰ درجه‌ی آزادی تقسیم بندی شده است. برای بالا بردن دقت جواب، ناحیه‌ی نزدیک به چاه به المان‌های کوچکتر تقسیم شده و المان‌ها در امتداد شعاع چاه به تقسیم‌های ریزتر دسته‌بندی شده است.

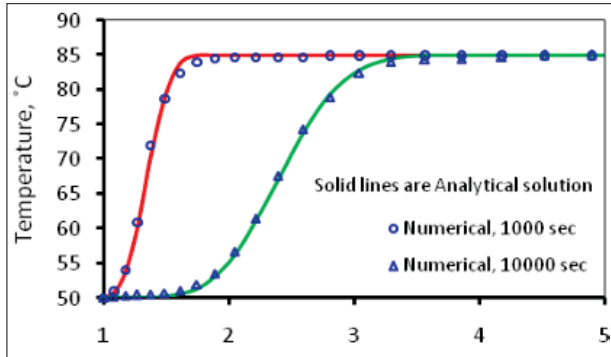
اگر معادلات تعادل تنش، جریان سیال و دما را با استفاده از روش انتگرال وزن دار باقیمانده<sup>۳۸</sup> در فرم انتگرالی بنویسیم، آنگاه در نهایت فرم ماتریسی معادلات به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{bmatrix} X & R_1 & R_2 \\ \Gamma_2 & Q\Delta t + \Gamma_1 & \Gamma_3 \\ 0 & 0 & (W + \Lambda_2)\Delta t + \Lambda_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u^{t+\Delta t} \\ P \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & R_1 & R_2 \\ \Gamma_2 & \Gamma_1 & \Gamma_3 \\ 0 & 0 & \Lambda_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u^t \\ P \\ T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f^{t+\Delta t} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} f^t \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

سطر اول، دوم و سوم این ماتریس به ترتیب فرم انتگرالی معادلات ۱، ۲ و ۳ هستند. درایه‌های این ماتریس معادلات در جدول ۳ آورده شده است.

### ۳- اثبات صحت مدل و حل عددی

اثبات حل عددی با مقایسه جواب‌ها برای حالت پوروالاستیک توسط جواب تحلیلی برای حالت همرفت-هدایت در شکل ۲ نشان داده شده است. علاوه بر توزیع دما، توزیع تنش شعاعی و مماسی برای جواب‌های تحلیلی و عددی با هم مقایسه شده‌اند (شکل ۳ و ۴). نتایج،



۲ مقایسه توزیع تحلیلی و عددی دما ( $\Delta\rho = +9.5 \text{ MPa}$ ,  $\Delta T = -35^\circ\text{C}$ )

### ۳ فرم انتگرالی درایه‌های ماتریس معادلات

معادله ترمو-پوروالاستیسیته	معادله موازنه جرم	معادله موازنه انرژی
$X = \int_{\Omega} \Pi^T D \Pi d\Omega$	$Q = -\frac{k}{\mu} \int_{\Omega} \nabla N^T \nabla N d\Omega + \frac{k}{\mu_s} \int_{\Omega} \nabla N^T \nabla N_i ds$	$W = -\frac{k_m}{(\rho c)_m} \int_{\Omega} \nabla N^T \nabla N d\Omega + \frac{k_m}{(\rho c)_s} \int_{\Omega} \nabla N^T \nabla N_i ds$
$R_1 = -\alpha \int_{\Omega} \Pi^T m N d\Omega$	$\Gamma_1 = -\beta \int_{\Omega} N^T N d\Omega$	$\Lambda_1 = -\int_{\Omega} N^T N d\Omega$
$R_2 = -\int_{\Omega} \Pi^T K \beta_s m N d\Omega$	$\Gamma_2 = \alpha \int_{\Omega} N^T m B N d\Omega$ $\Gamma_3 = -\beta_m \int_{\Omega} N^T N d\Omega$	$\Lambda_1 = -\frac{(\rho c)_f}{(\rho c)_m} \int_{\Omega} N^T N d\Omega$

ژاگر [۳۲] برای به دست آوردن توزیع تنش استفاده کرد و می‌باید حل عددی به کار برد. تقریباً در همه‌ی روش‌های عددی، یک فرم پیوسته از معادلات دیفرانسیلی با یک دسته از معادلات جبری جایگزین می‌گردد. برای به دست آوردن معادلات جبری لازم است ناحیه تحت بررسی توسط المان‌ها و گره‌ها به جزء‌های کوچکتر تقسیم بندی شود که شبکه المان محدود نام دارد. (شکل ۱-ب) در ادامه، حل دامنه‌ی مورد نظر

معیار شکست سنگ	معادله مربوطه
Mohr-Coulomb (Zhang [21])	$\sigma_1 = \sigma_c + q\sigma_3$ $q = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$ $\sigma_c = \frac{2C \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$
Drucker-Prager (Zhang [21])	$\sqrt{J_2} = \alpha I_1 + k$ $I_1$ : First stress invariant $J_2$ : Second deviatoric stress invariant $I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ $J_2 = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{6} + \tau_{r\theta}^2 + \tau_{rz}^2 + \tau_{\theta z}^2$ $\alpha = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)}$ $k = \frac{6C \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)}$
Modified Lade (Ewy [31])	$\frac{I_1^3}{I_3} = 27 + \eta$ $I_1 = (\sigma_1 + S) + (\sigma_2 + S) + (\sigma_3 + S)$ $I_3 = (\sigma_1 + S)(\sigma_2 + S)(\sigma_3 + S)$ $S = \frac{C}{\tan \varphi}$ $\eta = \frac{4 \tan^2 \varphi (9 - 7 \sin \varphi)}{1 - \sin \varphi}$
Mogi-Coulomb (Al-Ajmi and Zimmerman [19])	$\tau_{oct} = a + b\sigma_{m,2}$ $\sigma_{m,2}$ : Effective mean stress $\tau_{oct}$ : Octahedral shear stress $\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$ $\sigma_{m,2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}$ $a = \frac{2\sqrt{2}}{3} C \cos \varphi$ $b = \frac{2\sqrt{2}}{3} \sin \varphi$

کمتر شدن مقادیر تنش مماسی نسبت به مقاومت کششی سنگ از علت‌های ایجاد شکاف مصنوعی حین عملیات حفاری است. در امتداد محور  $\gamma$  تنش مماسی بیشترین مقدار خود را دارد و با توجه به مقادیر کوچک تنش شعاعی، ریزش دیواره چاه در این جهت رخ می‌دهد.

شعاع ریزش دیواره چاه در راستای محور تنش اصلی کمینه برای چهار معیار شکست سنگ معرفی شده در شکل ۶- آورده شده است. نتایج برای سه دسته افت فشار و دمای سیال حفاری بررسی شده‌اند. اگر دما و فشار سیال درون چاه بیشتر از دما و فشار سیال مخزن باشد، دما و افت فشار، مثبت در نظر گرفته می‌شود،  $\Delta T = T_w - T_o$  و  $\Delta p = p_w - p_o$ . همان‌طور که شکل‌های ۶- (a) تا (f) نشان می‌دهند، در مدل مور-کولمب بیشترین شعاع ریزش به دست آمده و مدل دراکر-پریجر کمترین شعاع شکست را نتیجه داده است. این جواب‌ها به این معناست که مدل مور-کولمب مقاومت سنگ را کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند و مدل دراکر-پریجر بیشترین مقدار را برای مقاومت، نتیجه می‌دهد؛ بنابراین، مدل مور-کولمب بیشترین مقدار وزن گل و دراکر-پریجر کمترین مقدار وزن گل را جهت پایداری دیواره چاه پیش‌بینی می‌کند.

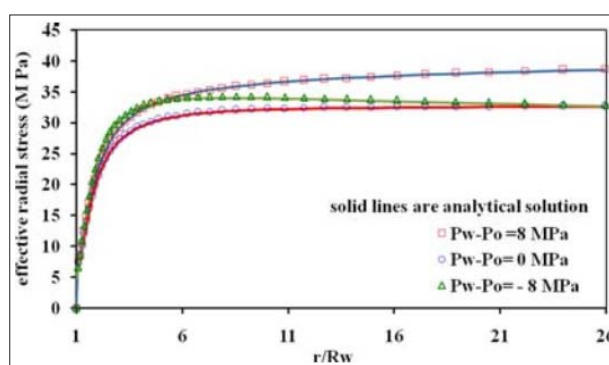
اخیراً، بیشتر شواهد نشان می‌دهد که میزان تنش در جای میانه تأثیر زیادی بر مقاومت سنگ دارد. ضعف اصلی روش مور کولمب، که نتیجه در بیشترین عمق ریزش می‌دهد، این است که در این معیار، مقدار تنش میانه تأثیری بر مقاومت سنگ و میزان شکست ندارد. اما در مدل دراکر-پریجر مقدار تنش میانه بیشترین تأثیر را در مقاومت سنگ دارد. مشابه با نتایج آزمایشگاهی منتشر شده توسط ژنگک [۱۱]، مدل موگی-کولمب کمترین مقدار خطا در پیش‌بینی مقاومت سنگ را دارد. بنابراین انتظار می‌رود که کمترین شعاع ریزش را نتیجه دهد. مقایسه نتایج شکل ۶- (a) تا (c) نشان می‌دهد که گرم کردن دیواره چاه باعث افزایش میزان ریزش دیواره چاه می‌گردد. علت این پدیده، افزایش تنش مماسی، افزایش فشار و کاهش تنش مؤثر شعاعی است که در نهایت باعث ریزش بیشتر می‌گردد. همچنین، سرد کردن دیواره چاه باعث پایداری به دلیل کاهش تنش مماسی و کاهش فشار می‌شود. کاهش فشار فضای متخلخل باعث افزایش تنش مؤثر محدودکننده می‌گردد در نتیجه، مقاومت سنگ افزایش می‌یابد و باعث ترویج بهتر پایداری چاه می‌گردد.

تأثیر تنش حاصل از فشار سیال در پایداری چاه را می‌توان با دو روش شرح داد: فشار سیال درون چاه و دیگری تنش ناشی از فشار سیال در فضای منفذی. بالاتر بودن فشار سیال درون چاه نسبت به فشار سیال فضای منفذی، باعث افزایش مقاومت سنگ از طریق افزایش اثر محصورکنندگی و باعث کاهش تنش مؤثر می‌شود که شکست سنگ را بیشتر می‌کند. بر مبنای تراوایی سنگ و اختلاف فشار سیال،

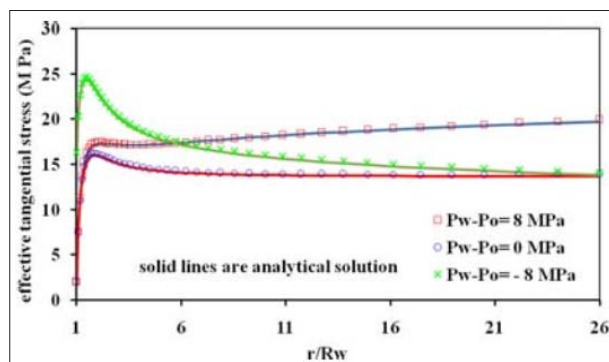
مطابقت خوبی بین حل عددی و تحلیلی برای دما و تنش‌های مؤثر نشان می‌دهد.

#### ۴- نتایج بررسی

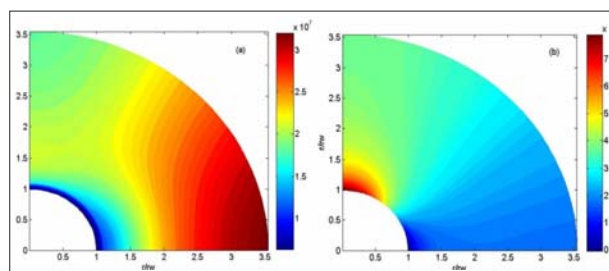
شکل ۵- توزیع تنش مؤثر شعاعی و مماسی اطراف چاه را قبل از شکل‌گیری ریزش دیواره چاه نشان می‌دهد. شکل ۵- (a) و (b) به ترتیب توزیع تنش مؤثر شعاعی و مماسی در اطراف چاه را نشان می‌دهد. دو ناحیه با مقادیر کمینه و بیشینه‌ی تنش مماسی در امتداد تنش بیشینه‌ی اصلی درجا و تنش کمینه‌ی اصلی درجا وجود دارند.



شکل ۳ | توزیع تنش شعاعی مؤثر در امتداد محور  $x$  (t= 1000sec,  $\Delta p = +9.5$  MPa,  $\Delta T = -45$  C)

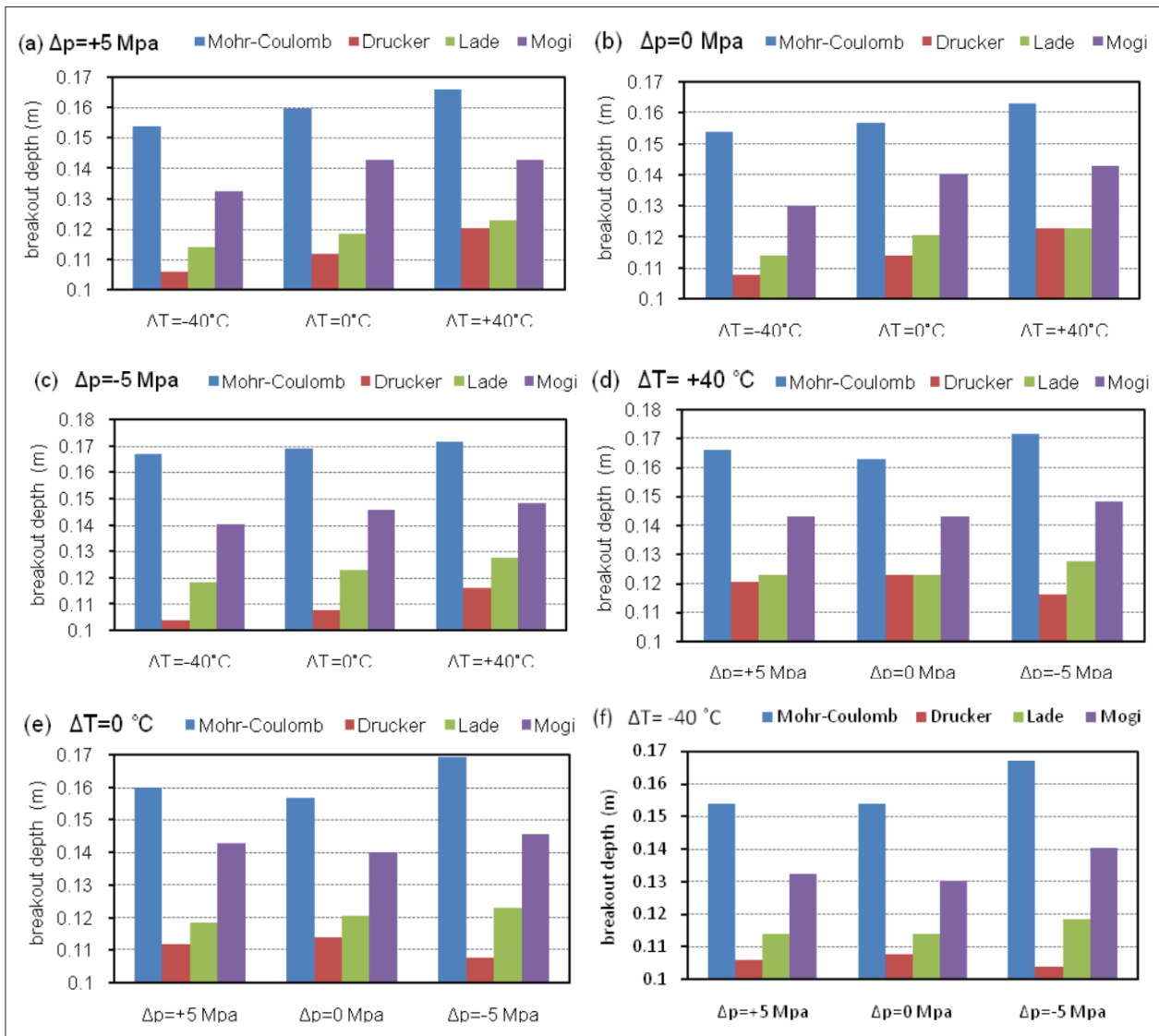


شکل ۴ | توزیع تنش مماسی مؤثر در امتداد محور  $y$  (t= 1000sec,  $\Delta p = +9.5$  MPa,  $\Delta T = -45$  C)



شکل ۵ | توزیع تنش اطراف چاه قبل از ریزش دیواره، (a) تنش مؤثر شعاعی و (b) تنش مؤثر مماسی.





شکل ۶ | شعاع ریزش دیواره چاه برای معیارهای شکست سنگ متفاوت و سه حالت مختلف دما و فشار

ناپایا جهت بررسی پایداری دیواره چاه و میزان آسیب مکانیکی وارده به سازند در نظر گرفته شده است. با استفاده از روش المان محدود، توزیع تنش در اطراف چاه محاسبه شده است. نتایج، تفاوت زیادی بین توزیع تنش‌های در جای اولیه و توزیع تنش‌ها بعد از عملیات حفاری نشان می‌دهد. توزیع تنش‌های به دست آمده در اطراف چاه و ناحیه گسیخته شده با چهار معیار شکست سنگ جهت بررسی پایداری چاه مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل مور-کولمب بیشترین شعاع شکست را نتیجه می‌دهد و بنا بر این، بیشترین میزان وزن گل را جهت پایداری چاه نیاز دارد. همچنین، مدل دراکر-پریچر کمترین میزان شعاع ریزش را مدل می‌کند و کمترین میزان وزن گل را جهت پایداری در نظر می‌گیرد.

هر دوی فشار سیال منفذی و اثر محصور کنندگی تمایل دارند اثر همدیگر را خنثی کنند. شکل ۶- (a) تا (f) اثر اختلاف فشار را برای سه اختلاف دما متفاوت نشان می‌دهد. برای هر سه این دماها، اعمال فشار منفی روی دیواره چاه باعث کاهش فشار فضای منفذی شده که در نتیجه، تنش موثر افزایش می‌یابد و شرایط پایداری را بهبود می‌بخشد. برعکس، کاهش میزان اثر محصور کنندگی باعث افزایش شعاع ریزش می‌شود. این‌ها به این معنی است که اثر محصور کنندگی سیال، اثر بیشتری نسبت به فشار فضای متخلخل دارد.

#### نتیجه‌گیری

مدل ترمو-پورو الاستیک خطی برای حالت هدایت و همرفت

پانویس‌ها

1. Geothermal reservoir	11. Modified Lade	21. Confining pressure	30. Bulk modulus
2. Pore pressure	12. Mogi-Coulomb	22. Intermediate principle	31. Drained
3. Thermally induced stresses	13. Radial and tangential stresses	stress	32. Body force
4. Sand production	14. Breakout	23. Conduction	33. Conversation of mass
5. Shale spalling	15. Borehole stability	24. Convection	34. Darcy equation
6. Shear failure	16. Thermo-poroelastic	25. Strain	35. Equation of state
7. Induced fracture	17. Finite element	26. poroelasticity	36. Cohesion strength
8. Unsteady state	18. Minimum in-situ stress	27. Shear Molulus	37. Internal friction angle
9. Mohr-Coulomb	19. Tensile fracture	28. Lame constant	38. Weighted residual
10. Druker-Prager	20. Shear failure	29. Biot coefficient	

منابع

- [1] Leeman ER. The treatment of stress in rock: I. the rock stress measurement: II. Borehole rock stress measuring instrument: III. The results of some rock stress investigations. *J S Afr Inst Min Met* 1964; 65:4584-254 ,114-.
- [2] Cox JW. The high resolution dipmeter reveals dip-related borehole and formation characteristics. *Trans 11th SPWLA Logging Symposium* 1970; D1-D26.
- [3] Carr WJ. Summary of tectonic and structural evidence for stress orientation at the Nevada Test Site. Open file report, US Geological Survey, Denver, Colorado. 1974; 74176-. <http://pubs.usgs.gov/of/19740176/report.pdf>.
- [4] Bell JS and Gough DI. Northeast-Southwest compressive stress in Alberta: evidence from oil wells. *Earth planet Sc Lett* 1979; 45:47582-.
- [5] Zobak MD, Moos DL, Mastin, Anderson RN. Wellbore breakout and in situ stress. *J Geophys Res* 1985; 90:552338-.
- [6] Haimson BC, Herrick CG. In situ stress evaluation from borehole breakouts-experimental studies. *Proceeding of the 26th US Rock Mechanics Symposium* 1985; Rotterdam: A.A. Balkema: 120718-.
- [7] Song I, Haimson BC. Polyaxial strength criteria and their use in estimating in situ stress magnitudes from borehole breakout dimensions. *Int J Rock Mech Min* 1997; 34: 116.e1116- e16.
- [8] Haimson BC, Herrick CG. Borehole breakouts-a new tool for estimating in situ stress? *Proceedings of the first international symposium on rock stress and rock stress measurement* 1986. Lulea, Centek Publications: 27181-.
- [9] Tao Q, Ghassemi A. porothermoelastic borehole stress analysis for determination of the in situ stress and rock strength. *Geothermics* 2010; 39:2509-.
- [10] Yaghoubi A, Zeinali M. Determination of magnitude and orientation of the in-situ stress from borehole breakout and effect of pore pressure on borehole stability — Case study in Cheshmeh Khush oil field of Iran. *J Petrol Sci Tech* 2009; 67:11626-.
- [11] Zheng Z, John K, Neville GWC. Analysis of borehole breakouts. *J Geophys Res-Sol EA* 1989; 94:717182-.
- [12] Gough DI, Bell JS. Stress orientation from borehole wall fractures with examples from Colorado, east Texas, and northern Canada. *Can J Earth Sc* 1982; 19:135870-.
- [13] Wang Y, Dusseault MB. A coupled conductive-convective thermo-poroelastic solution and implications for wellbore stability. *J Petrol Sci Eng* 2003; 38:18798-.
- [14] Yuan SC, Harrison JP. Modeling breakout and near well fluid flow of a borehole in an anisotropic stress field. *41th ARMA/USRMS* 2006; 1157.
- [15] Haimson B. Micromechanism of borehole failure in reservoir rocks. *11th Congress of the Int Society for Rock Mech*, 2007.
- [16] Handin J, Heard HC, Magouirk JN. Effect of the intermediate principle stress on the failure of limestone, dolomite, and glass at different temperature and strain rate. *J Geophys Res* 1967; 72:61140-.
- [17] Mogi K. Fracture and flow of rocks under triaxial compression. *J Geophys Res* 1971; 76:125569-.
- [18] Haimson BC, Chang C. A new true triaxial cell for testing mechanical properties of rock, and its use to determine rock strength and deformability of Westerly granite. *Int J Rock Mech Min* 2000; 37:285-96.
- [19] Al-Ajmi AM, Zimmerman RW. Relation between the Mogi and the Coulomb failure criteria. *Int J Rock Mech Min* 2005; 42:431439-.
- [20] Al-Ajmi AM, Zimmerman RW. Stability analysis of vertical boreholes using the Mogi-Coulomb failure criterion. *Int J Rock Mech Min* 2006; 43:120011-.
- [21] Zhang L, Cao P, Radha KC. Evaluation of rock strength criteria for wellbore stability analysis. *Int J Rock Mech Min* 2010; 47:130416-.
- [22] Biot A. General theory of three dimensional consolidations. *J Appl Phy* 1941; 12:15564-.
- [23] Rice JR, Cleary MP. Some basic stress diffusion solution for fluid-saturated elastic porous media with compressible constituents. *Rev Geophys Space Phys* 1976; 14:22741-.
- [24] Detournay E, Cheng AHD. Poroelastic response of a borehole in a non-hydrostatic stress field. *Int J Rock Mech Min* 1988; 25:17182-.
- [25] Cui L, Ekbote S, Abousleiman Y, Zaman M, Roegiers JC. Borehole stability analysis in fluid-saturated formations with impermeable walls. *Int J Rock Mech Min* 1998; 35:58283-.
- [26] Cui L, Cheng AHD, Abousleiman Y. Poroelastic solution for an inclined borehole. *J Appl Mech* 1997; 64:328-.
- [27] Cui L, Cheng AHD, Abousleiman Y, Roegiers JC. Time-dependent failure analysis of inclined boreholes in fluid-saturated formations. *J Energy Res Tech* 1999; 121:319-.
- [28] Santarelli FJ, Brown ET, Maury V. Analysis of borehole stress using pressure-dependent linear elasticity. *Int J Rock Mech Min* 1986; 23:445-9.
- [29] Palciauskas V, Domenico PA. Characterization of drained and undrained response of thermally loaded repository rocks. *Water Resour Res* 1982; 18:28190-.
- [30] Wang HF. Theory of linear poroelasticity with application to geomechanics and hydrology. Princeton: Princeton University Press, 2000.
- [31] Ewy R. Wellbore-stability predictions by use of a modified Lade criterion. *SPE Drill and Completion* 1999; 14:8591-.
- [32] Jaeger JC, Cook NGW, Zimmerman RW. *Fundamental of rock mechanic*. 4th Edition. Massachusetts: Black Well; 2007.