

ارایه مدل ترمو-هیدرو-مکانیکی آسیب برای محیط‌های سنگی متخلخل اشباع تحت میدان تنش سه محوره

عارف فرهی^۱، سعید نیکوسخن^{۲*}، علی مرتضوی^۳

- ۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
۳- استاد، گروه مهندسی مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

(دریافت ۱۳۹۸/۰۷/۰۸، پذیرش ۱۳۹۸/۱۱/۰۵)

چکیده

تأثیر توامان تنش، حرارت، فشار منفذی و آسیب بر عوامل هیدرولیکی مخازن هیدروکربوری و ژئوترمال و بازدهی چاه‌های تولیدی آنها نشان می‌دهد طراحی واقع‌گرایانه فرآیند تولید از این مخازن، نیازمند بهره‌گیری از یک مدل رفتاری جامع تنش-کرنش است. در این پژوهش با ارایه تعریف جدیدی از آسیب کلی ناشی از اثرات وجود سیال با دمای بالا در محیط متخلخل، معادله رفتاری تنش-کرنش تنیده ترموهیدرومکانیکی آسیب سنگ در شرایط بارگذاری سه‌محوری مرسوم بر پایه تئوری محیط موثر، مفهوم تنش موثر بایوت، تابع چگالی احتمال توزیع توانی، انتقال همرفت و رسانش ارایه شده است. نتایج نشان می‌دهد: الف) با افزایش ضریب بایوت، ضریب نفوذپذیری، فشار منفذی و دما، آسیب ترموهیدرومکانیکی در سنگ افزایش می‌یابد، افزایش فشار محصورکننده منجر به کاهش آسیب و در نتیجه بهبود ظرفیت باربری سنگ می‌شود. ب) با افزایش دما، میزان آسیب ترموهیدرومکانیکی کل کاهش می‌یابد و مقدار حداکثر آن در کرنش‌های بزرگ‌تر رخ می‌دهد. این در حالی است که نرخ رهاسازی انرژی منطبق بر تنش حداکثر و کرنش متناظر با آن افزایش می‌یابد. ج) معیار شکست لید اصلاح‌شده در مقایسه با معیارهای "موهر-کولمب" و "دراگر-پراگر"، پیش‌بینی واقع‌گرایانه‌تری را از رفتار تنیده ترموهیدرومکانیکی در آسیب سنگ ارایه می‌دهد. از نتایج این پژوهش چنین استنباط می‌شود که در نظر گرفتن مفهوم تنش موثر بایوت و آسیب همرفت در کنار تابع توزیع توانی، منجر به ارایه پیش‌بینی‌های دقیق‌تری از پاسخ تنیده ترموهیدرومکانیکی-آسیب‌سنگ‌ها خواهد شد.

کلمات کلیدی

مدل رفتاری ترموهیدرومکانیکی-آسیب، انتقال حرارت همرفت، تئوری محیط موثر (EMT)، توزیع توانی، تئوری بایوت.

۱- مقدمه

منحنی رفتاری تنش- کرنش سنگ و عوامل موثر بر آن همچون توسعه آسیب^۱، مکانیک و شیمی سیال منفذی و ساز و کارهای انتقال دما، به دلیل نقش بی‌واسطه ای که در پاسخ محیط سنگ میزبان سازه‌های زیرزمینی به آشفتگی ایجاد شده در میدان تنش حاکم بر آنها دارند، همواره یکی از مسایلی اصلی حوزه مکانیک سنگ بوده است.

رفتار تنش-کرنش سنگ را می‌توان با دو دیدگاه پدیدار شناسانه و میکرومکانیکی^۲ مورد بررسی قرار داد. دیدگاه پدیدار شناسانه مبتنی بر ارایه معادلات رفتاری بر مبنای قوانین بنیادی طبیعت همچون ترمودینامیک برگشت‌ناپذیر و استفاده از انرژی آزاد سیستم است [۱]. در این دیدگاه، ماده به عنوان کل در نظر گرفته می‌شود و فرآیندهای میکروسکوپی به صورت مستقیم در معادلات وارد نمی‌شوند. در مقابل این دیدگاه، مطالعات میکرومکانیکی، رفتار تنش-کرنش سنگ تحت تاثیر پدیده آسیب را در سطح میکروسکوپی مورد مطالعه قرار می‌دهد و رشد ریزشکستگی‌ها و پیکربندی این رخدادها را مبنای توجیه رفتار ماکروسکوپی سنگ می‌داند [۲]. این دو دیدگاه علی‌رغم موفقیت در توجیه شکست سنگ، به دلیل نادیده گرفتن فرآیند بهم پیوستن ریزشکستگی‌ها^۳، در توجیه پاسخ واقعی پس از شکست سنگ^۴ ناتوان هستند [۳]. به طور کلی منحنی رفتاری تنش-کرنش سنگ را می‌توان بر مبنای الف) تئوری الاستوپلاستیسیته و کاربرد قانون جریان پلاستیک غیرهمراه [۴]، ب) تئوری پیوستگی کاسرت^۵ [۵] و کاربرد نظریه دو شاخگی^۶ [۶]، ج) مکانیک آسیب(تئوری محیط موثر^۷) و کاربرد اصل کرنش معادل [۷] و د) مکانیک آسیب و توزیع‌های آماری [۸-۱۰] شبیه‌سازی کرد. در ادامه چون فرمول‌بندی پیشنهادی این پژوهش بر مبنای تئوری محیط موثر توسعه داده شده، این تئوری به اختصار معرفی شده است. در توجیه رفتار سنگ تحت تاثیر پدیده آسیب، بر مبنای تئوری محیط موثر و اصل کرنش معادل، رفتار تنیده مکانیکی-آسیب، بخش آسیب‌دیده^۸ به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود [۷]:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{1-D_M} \quad \& \quad D_M = \frac{S_D}{S} = \frac{S-\bar{S}}{S} \quad (1)$$

$$\rightarrow \sigma = \varepsilon E (1-D_M)$$

که در آن:

S : مساحت کل سطح مورد بررسی

\bar{S} : مساحت سطح بخش سالم

S_D : مساحت سطح ریزشکستگی‌ها

$\bar{\sigma}$: تنش خالص اثرکننده بر سطح بخش سالم

D_M : شاخص آسیب مکانیکی است.

توسعه حفاری‌های زیرسطحی و اجرای سازه‌های زیرزمینی در محیط‌هایی با دما و فشار بالا، نشان می‌دهد تاثیر دما بر گسترش آسیب در سنگ‌ها قابل توجه است و با افزایش دما، عوامل فیزیکی و مکانیکی سنگ همچون مدول تغییر شکل‌پذیری، اندازه دانه‌ها، رسانایی گرمایی سنگ، ضریب پواسون، تخلخل، تنش آستانه آسیب، مقاومت فشاری، چسبندگی، زاویه اتساع، زاویه اصطکاک داخلی، چقرمگی ترک، سرعت امواج مافوق صوت^۹ در سنگ، انتشار امواج اکوستیک و در نهایت میرایی لرزه‌ای امواج در هنگام گذر از سنگ^{۱۰}، دچار تغییرات قابل توجهی می‌شوند [۱۲، ۱۱]. علاوه بر این با گرمادهی، مرمرها در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، ماسه‌سنگ‌ها در دمای ۲۵۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، سنگ آهک در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، بازالت در دمای ۷۵۰ و گرانیت در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد رفتارهای پلاستیک از خود نشان می‌دهند [۱۴، ۱۳]. با محرز شدن نقش دما در رفتار سنگ، معادله رفتاری تنیده مکانیکی-آسیب سنگ برای توجیه پاسخ ترمومکانیکی سنگ با وارد کردن عامل آسیب ناشی از دما به صورت رابطه ۲ ارایه شده است [۱۵].

$$\sigma_T = E^0 \varepsilon_T (1-D_M)(1-D_T) + \mu(\sigma_T + \sigma_k) \quad (2)$$

$$D_T = 1 - \frac{E_T}{E^0}$$

که در آن:

μ : ضریب پواسون

E و E_T : مدول الاستیسیته در دمای اتاق و دمای مورد

مطالعه است.

شاخص آسیب مکانیکی تعریف شده در این معادله انرژی تلف شده در سیستم و تابع چگالی احتمال توزیع‌های آماری بر اساس مدول تغییر شکل‌پذیری، تخلخل، تنش تسلیم، فاصله درزه‌ها، AEC^{11} ، تعداد ترک و سرعت امواج، قابل محاسبه است [۱۲، ۱۱، ۲، ۱]. در تعریف شاخص آسیب با استفاده از توزیع‌های آماری فرض بر تصادفی بودن توزیع ریزشکستگی‌ها در سنگ است. در این روش ماده متشکل از بی‌نهایت اجزای مزوسکوپیک حاوی ریزشکستگی تشکیل و توسعه ریزشکستگی‌ها و گسیخته شدن آنها تحت اثر بارگذاری، تصادفی در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس با توجه به ماهیت تصادفی بودن توسعه آسیب در سنگ، شاخص آسیب با استفاده

است. انتقال حرارت بین سنگ و سیال در محیط‌های متخلخل اشباع به دو صورت انتقال حرارت رسانشی در اثر تماس فاز سیال با جامد و انتقال حرارت همرفتی در اثر حرکت شاره و پدیده همرفتی رخ می‌دهد [۱۶-۱۸]. در انتقال حرارت همرفت عدد بی بعد ناسلت^{۱۴} عامل تعیین کننده انتقال حرارت بوده و بزرگای این عدد، موید سهم انتقال حرارت جابجایی است [۱۹]. پژوهش‌ها نشان می‌دهد این عدد را می‌توان نمودی از پدیده آسیب ناشی از انتقال حرارت همرفت در نظر گرفت [۲۰].

براین اساس با در نظر گرفتن انتقال حرارت همرفت، تنش موثر بایوت و تعریف شاخص آسیب مکانیکی موثر از تابع چگالی احتمال توزیع توانی، معادله رفتاری تنیده ترموهیدرومکانیکی-آسیب سنگ در شرایط بارگذاری سه محوری به صورت رابطه ۳ پیشنهاد می‌شود:

$$\begin{aligned} \sigma_i^{eff} &= A + B \\ A &= KE^0 \varepsilon_i (1 - D_m)(1 - D_H)(1 - D_T) \\ B &= \mu(\sigma_j + \sigma_k) + bP_p(1 - 2\mu) \end{aligned} \quad (3)$$

که در آن:

K: ضریب اصلاح قسمت غیرخطی نمودار در نتیجه

بسته شدن ترک‌ها

D_H : آسیب حرارتی ناشی از اثر همرفت

D_T : آسیب حرارتی ناشی از رسانش

b: ضریب بایوت

σ_i^{eff} : تنش موثر بایوت

P_p : فشار منغذی است.

تابع چگالی احتمال توزیع توانی مورد استفاده در این مدل

به منظور محاسبه شاخص آسیب مکانیکی (D_m) با معادله ۴

تعریف می‌شود [۲۱]:

$$f(F) = \frac{n}{F_0} \left(\frac{F}{F_0} \right)^{n-1} \quad (4)$$

که در آن:

n و F_0 : مقادیر ثابت

F: متغیر تصادفی توزیع است که در پژوهش، متغیر تصادفی

همان تنش نهایی ماده و یا به عبارتی معیار شکست لحاظ شده

است.

شاخص‌های آسیب مکانیکی [۲۱]، آسیب رسانش [۱۵] و

آسیب همرفت [۲۰] به صورت رابطه ۵ تعریف می‌شوند:

از تابع چگالی احتمال توزیع‌های آماری همچون توزیع ویبول، نرمال و توانی توصیف می‌شود.

بررسی شیوه گرمادهی مورد استفاده در پژوهش‌های انجام شده تاکنون، گرمادهی تا دمای هدف و پس از آن رهاسازی نمونه در دمای اتاق تا رسیدن به تعادل دمایی با محیط (Thermal treatment) را نشان می‌دهد. تعیین آسیب ترمال با فرض انتقال حرارت رسانش است و در رفتار کلی تنش-کرنش، به دلیل عدم استفاده از سیال در گرمادهی سنگ، نقش هم‌زمان انتقال حرارت همرفت و تنش موثر بایوت در نظر گرفته نشده است. این در حالی است که در کاربردهای مهندسی همچون تولید انرژی از مخازن ژئوترمال و تولید مواد هیدروکربوری، نقش سیال در رفتار ترموهیدرومکانیکی سنگ غیرقابل انکار است [۱۶]. پژوهش‌های انجام شده در زمینه رفتار ترموهیدرومکانیکی سنگ‌های متخلخل اشباع، نشان می‌دهد افزایش دما باعث افزایش آسیب و در نتیجه کاهش دانسیته سنگ می‌شود [۱۰]. البته هم‌زمان افزایش چگالی تا یک دمای مشخص (از ۲۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد) نیز در سنگ‌های مختلف مشاهده شده و دلیل آن، کاهش آسیب تا این دما ذکر شده است [۱۷]. این موارد تناقض و هم‌چنین ضعف مدل‌ها در توجیه رفتار ترموهیدرومکانیکی سنگ و موارد عینی مثل عدم توانایی مدل‌های موجود در ارایه تصویری روشن از دلیل افت فشار در مخازن EGS^{۱۲} [۱۶]، نشان می‌دهد نیاز به مدلی که پاسخ واقعی سنگ را مدل کند، کاملاً احساس می‌شود.

در این پژوهش با هدف شبیه‌سازی واقع‌گرایانه‌تر پاسخ ترموهیدرومکانیکی سنگ در شرایط گرمادهی به‌وسیله سیال مدلی بر مبنای تئوری محیط موثر و با بهره‌گیری از مفهوم تنش موثر بایوت، انتقال حرارت ناشی از همرفت و رسانش و تابع چگالی احتمال ارایه شده و معادله رفتاری تنش-کرنش تنیده ترموهیدرومکانیکی-آسیب سنگ در شرایط بارگذاری سه محوری مرسوم، با نگاه پدیدارشناسانه توسعه داده شده است.

۲- ارایه مدل رفتاری ترموهیدرومکانیکی-آسیب^{۱۳} سنگ

تحلیل رفتار ترموهیدرومکانیکی درزه‌ها نشان می‌دهد در طی تزریق سیال گرم به درون درزه فرآیندهای انحلال، انتقال جرم و رسوب‌گذاری در درون درزه به وقوع می‌پیوندد [۱۱]. این موضوع نشان می‌دهد در بارگذاری حرارتی محیط‌های متخلخل با استفاده از سیال حتی در محدوده الاستیک نیز، وقوع آسیب و تغییر رفتار ترموهیدرومکانیکی سنگ محتمل

$$I_1 = \frac{E\varepsilon_1(\sigma_1 + 2\sigma_3) - 3\varepsilon_1 E b P_p}{\sigma_1 - 2\mu\sigma_3 + bP_p(2\mu - 1)} \quad \&$$

$$\sqrt{J_2} = \frac{E\varepsilon_1(\sigma_1 - \sigma_3)}{\sqrt{3}(\sigma_1 - 2\mu\sigma_3) + \sqrt{3}(2\mu - 1)bP_p} \quad (9 \text{ ادامه})$$

$$\alpha = \frac{\sin\varphi}{\sqrt{3(3 + \sin^2\varphi)}} \quad \& \quad k = \frac{3c \times \cos\varphi}{\sqrt{3(3 + \sin^2\varphi)}}$$

$$F_{ML} = \frac{(I_1^n)^3}{I_3^n} - 27 + \eta$$

$$I_1^n = (\sigma_1 + S_a - bP_p) + (\sigma_2 + S_a - bP_p) + (\sigma_3 + S_a - bP_p) \quad (10)$$

$$I_3^n = (\sigma_1 + S_a - bP_p)(\sigma_2 + S_a - bP_p)(\sigma_3 + S_a - bP_p)$$

$$S_a = \frac{c}{\tan\varphi} \quad \& \quad \eta = 4(\tan\varphi)^2 \left(\frac{9 - 7\sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \right)$$

که در این روابط:

θ : زاویه لود^{۱۶}

c : چسبندگی

φ : زاویه اصطکاک داخلی سنگ است.

شاخص آسیب ترموهیدرومکانیکی^{۱۷} (D_{THM}) و میزان رشد آن ($\frac{dD_{THM}}{d\varepsilon_1}$) در شرایط بارگذاری سه محوره بر مبنای مدل پیشنهادی این پژوهش، به صورت رابطه ۱۱ ارایه می‌شوند:

$$D_{THM} = A - B \times C$$

$$A = 1$$

$$B = \frac{E_T}{E_0} \exp \left(- \left(\frac{\alpha I_1 + \sqrt{J_2}}{F_0} \right)^n \right)$$

$$C = \left(1 - 0.664 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} \right)$$

$$\frac{dD_{THM}}{d\varepsilon_1} = M \times N$$

$$M = \left(1 - 0.664 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} \right) \frac{n E_T}{F_0 E_0} \left(\frac{\alpha I_1 + \sqrt{J_2}}{F_0} \right)^{n-1} \quad (11)$$

$$N = \left(\alpha \frac{dI_1}{d\varepsilon_1} + \frac{1}{2\sqrt{J_2}} \frac{dJ_2}{d\varepsilon_1} \right) \exp \left(- \left(\frac{\alpha I_1 + \sqrt{J_2}}{F_0} \right)^n \right)$$

$$\frac{dI_1}{d\varepsilon_1} = Q - R$$

$$Q = \frac{E(\sigma_1 + 2\sigma_3) + E\varepsilon_1 \frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} - 3EbP_p}{\sigma_1 - 2\mu\sigma_3 + bP_p(2\mu - 1)}$$

$$R = \frac{\frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} (E\varepsilon_1(\sigma_1 + 2\sigma_3) - 3\varepsilon_1 E b P_p)}{(\sigma_1 - 2\mu\sigma_3 + bP_p(2\mu - 1))^2}$$

$$\frac{dJ_2}{d\varepsilon_1} = S \times (T - U)$$

$$D_m = \frac{f(F) dF dx dy dz}{V} = \int_0^F f(F) dF$$

$$= \int_0^F \frac{n}{F_0} \left(\frac{F}{F_0} \right)^{n-1} dF = \left(\frac{F}{F_0} \right)^n \quad (5)$$

$$D_T = \left(1 - \frac{E_T}{E_0} \right)$$

$$D_H = Nu = 0.664 Re^{1/2} Pr^{1/3}$$

$$= 0.0664 k_0^{0.5} g^{0.5} h^{0.5} L^{0.5} \vartheta_T^{-2/3} \alpha^{1/3}$$

که در آن:

Re: عدد رینولدز جریان

Pr: عدد پراوندل

k_0 : نفوذپذیری

h: هد جریان

ϑ_T : ویسکوزیته سینماتیکی سیال

g: شتاب گرانش زمین

α : ضریب حرارتی سنگ است.

آسیب کلی ترمومکانیکی (D_{TM}) و ترموهیدرومکانیکی

(D_{THM}) به صورت روابط ۶ و ۷ تعریف می‌شوند:

$$D_{TM} = (1 - D_m)(1 - D_T) = 1 - \frac{E_T}{E_0} \exp \left(- \left(\frac{F}{F_0} \right)^n \right) \quad (6)$$

$$D_{THM} = \left(1 - \frac{E_T}{E_0} \exp \left(- \left(\frac{F}{F_0} \right)^n \right) \right) \left(1 - 0.664 Re^{(1/2)} Pr^{(1/3)} \right) \quad (7)$$

برای شبیه‌سازی قسمت غیرخطی نمودار در نتیجه بسته‌شدن ترک‌ها در حین بارگذاری ضریب K به صورت رابطه ۸ تعریف می‌شود [۲]. در این پژوهش، ثابت n تعریف شده در معادله برابر ثابت توزیع در دمای مورد مطالعه در نظر گرفته شده است.

$$K = LOG \left[\frac{(n-1)\varepsilon}{\varepsilon_s} + 1 \right] \quad (8)$$

که در آن:

ε : کرنش پیک است.

حد نهایی مقاومت سنگ بر اساس معیار شکست‌های

دراگر- پراگر (DP)، مورکولمب (MC) [۱۵] و لید اصلاح

شده^{۱۵} (ML) [۲۲] به صورت روابط ۹ و ۱۰ تعریف می‌شود:

$$F_{DP} = \alpha_0 I_1 + \sqrt{J_2} - k$$

$$F_{MC} = A + B$$

$$A = \frac{1}{3} I_1 \sin\varphi \quad (9)$$

$$B = (\cos\theta - \frac{1}{\sqrt{3}} (\sin\theta \sin\varphi) (\sqrt{J_2})) - c \times \cos\varphi$$

$$Y = \left(\text{LOG} \left[\frac{(n-1)\varepsilon}{\varepsilon_s} + 1 \right] \right) \quad (\text{ادامه ۱۳})$$

$$Z = \mu(\sigma_j + \sigma_k) + bP_p(1-2\mu)$$

۱-۳- صحت‌سنجی مدل پیشنهادی

برای راستی‌آزمایی این مدل، به دلیل عدم دسترسی به داده‌های آزمایشگاهی متناسب با شرایط مدل پیشنهادی، با صفر در نظر گرفتن شاخص آسیب همرفت و ضریب بایوت، مدل به یک مدل پایه ترمومکانیکی بر مبنای معیار لید اصلاح شده و تابع توزیع توانی، کاهش یافت، سپس این مدل جهت ارزیابی دقت پیش‌بینی و میزان خطا با داده‌های آزمایشگاهی و مدل ارائه‌شده در [۱۵] مقایسه و نتایج در شکل ۱ نشان داده شده است. مدل ارائه شده در مرجع مذکور بر اساس معیار شکست دراگر-پراگر و توزیع ویبول بوده و با صرف نظر کردن از نقش سیال منفذی، رفتار ترمومکانیکی سنگ را پیش‌بینی می‌کند.

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده، مدل ترموهیدرومکانیکی پیشنهادی در ناحیه قبل از شکست

جدول ۱: داده‌های آزمایشگاهی [۲۰] مورد استفاده در مدل پیشنهادی (THMD)

$1,431 \times 10^{-16}$	نفوذپذیری (m/s)
$1,001 \times 10^{-3}$	ویسکوزیته (Pa.s)
$2,219 \times 10^{-6}$	ضریب هدایت حرارتی سنگ (m^2/s)
۰,۳	ضریب پواسون
۱	ضریب بایوت

جدول ۲: ثابت‌های توزیع آماری و مدول الاستیسیته سنگ گرانیت در دماهای مختلف [۱۵]

۱۲,۶۷	n	دمای ۲۵ درجه
۱۲,۷۹	F_0	
۳۱,۳۱	E_T (GPa)	
۷,۹۹	n	دمای ۲۰۰ درجه
۱۴۶,۶۵	F_0	
۲۸,۵۶	E_T (GPa)	
۵,۷۴۸	n	دمای ۴۰۰ درجه
۱۲۹,۷	F_0	
۲۷,۴۵۸	E_T (GPa)	
۱۲	C (MPa)	چسبندگی
۲۷	φ (°)	زاویه اصطکاک داخلی

$$S = \frac{2E\varepsilon_1(\sigma_1 - \sigma_3)}{\sqrt{3}(\sigma_1 - 2\mu\sigma_3) + \sqrt{3}(2\mu - 1)bP_p}$$

$$T = \frac{E(\sigma_1 - \sigma_3) + E\varepsilon_1 \frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1}}{\sqrt{3}(\sigma_1 - 2\mu\sigma_3) + \sqrt{3}(2\mu - 1)bP_p} \quad (\text{ادامه ۱۱})$$

$$U = \frac{E(E\varepsilon_1(\sigma_1 - \sigma_3))}{\sqrt{3}((\sigma_1 - 2\mu\sigma_3) + (2\mu - 1)bP_p)^2}$$

نرخ آزادسازی انرژی (γ) مورد استفاده در مدل پیشنهادی به صورت رابطه ۱۲ تعریف می‌شود [۲۳]:

$$\gamma = \frac{\sigma_{rq}^2}{2E(1-D)^2} \left[\frac{2}{3}(1+\mu) + 3(1-2\mu) \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{rq}} \right)^2 \right]$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad \&$$

$$\sigma_{rq} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}}$$

که در آن:

D: شاخص آسیب و مقدار آن در پژوهش برابر با مقدار آسیب ترموهیدرومکانیکی پیشنهادی در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است در فرمول‌بندی ترموهیدرومکانیکی پیشنهادی، با صفر در نظر گرفتن شاخص‌های شبیه‌ساز تنش موثر بایوت، انتقال حرارت همرفت و توزیع توانی، مدل به معادله ۲ [۱۵] کاهش خواهد یافت. علاوه بر این به منظور صحت‌سنجی مدل پایه پیشنهادی، داده‌های ارائه شده در جداول ۱ و ۲ بر مبنای نتایج آزمایشگاهی منتشرشده در پژوهش‌های پیشین مورد استفاده قرار گرفته شده است [۲۰، ۱۵].

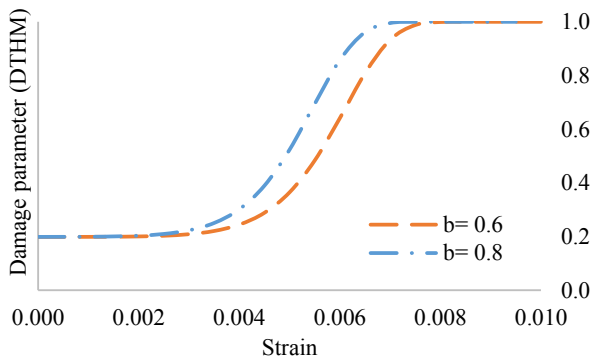
۳- نتایج

با قراردادن معادلات شماره ۴، ۵، ۸ و ۱۰ در معادله شماره ۳، معادله رفتاری تنیده ترموهیدرومکانیکی-آسیب سنگ در شرایط بارگذاری سه محوره مرسوم بر مبنای معیار اصلاح شده شکست لید و در نظر گرفتن انتقال حرارت همرفت و رسانش و اصلاح تقعر قسمت ابتدایی منحنی رفتاری در نتیجه بسته‌شدن درزه‌ها، به صورت رابطه ۱۳ پیشنهاد می‌شود.

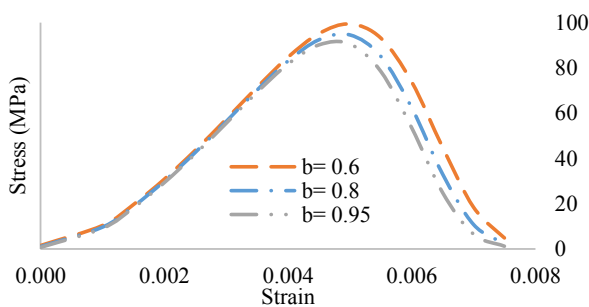
$$\sigma_i^{eff} = W \times X \times Y + Z$$

$$W = E^0 \varepsilon_i \left(1 - \frac{E_T}{E_0} \exp \left(- \left(\frac{F_{ML}}{F_0} \right)^n \right) \right) \quad (\text{۱۳})$$

$$X = \left(1 - 0.0664k_0^{0.5} g^{0.5} h^{0.5} L^{0.5} g_T^{-\frac{2}{3}} \alpha^{\frac{1}{3}} \right)$$



شکل ۲: تغییرات آسیب ترموهیدرومکانیکی با تغییرات ضریب بایوت در دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد

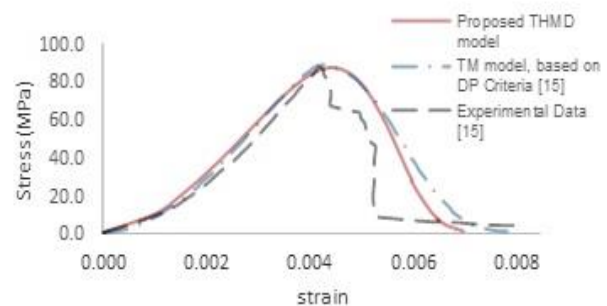


شکل ۳: پاسخ تنش- کرنش سنگ بر مبنای مدل THMD به‌ازای ضریب بایوت‌های مختلف در دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد

۳-۳- تاثیر ضریب نفوذپذیری بر توسعه آسیب ترموهیدرومکانیکی و منحنی رفتاری تنش-کرنش سنگ

در شرایط تنش محصورکننده و فشار منفذی به‌ترتیب ۵ و ۴ مگاپاسکال، با افزایش ضریب نفوذپذیری ناشی از افزایش سرعت سیال (براساس قانون دارسی)، انتقال حرارت هم‌رفت درون محیط متخلخل، تشدید و آسیب کلی ترموهیدرومکانیکی محیط افزایش می‌یابد. این پدیده در شکل ۴ نشان داده شده است. به‌علاوه همچنان که در شکل ۵ نشان داده شده است افزایش سرعت سیال باعث افزایش اصطکاک بین سیال و دانه‌های سنگ و در نتیجه، تشدید آسیب مکانیکی می‌شود. بر این اساس در یک دمای مشخص با افزایش ضریب نفوذپذیری، ظرفیت باربری و مدول دگرشکلی سنگ کاهش می‌یابند.

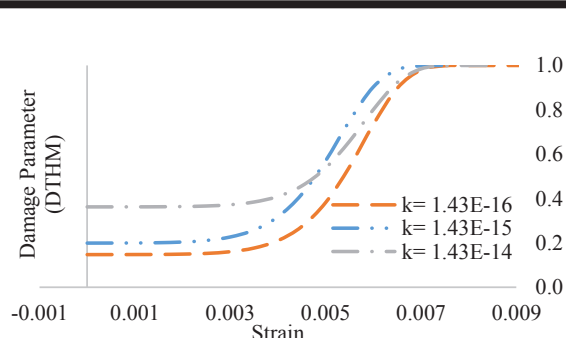
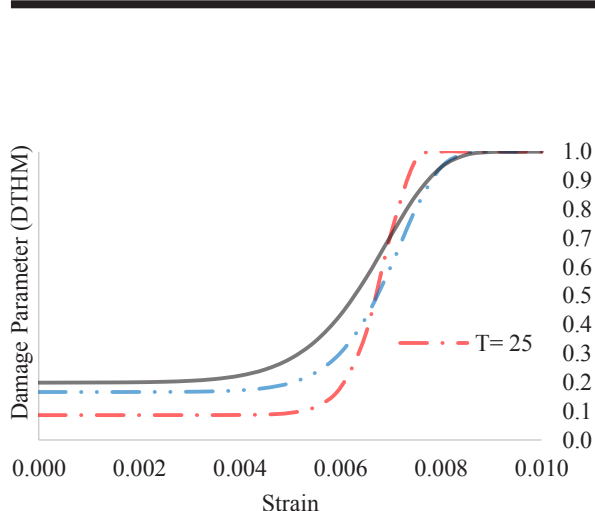
منحنی تنش-کرنش سنگ مطابقت بسیار خوبی با داده‌های آزمایشگاهی داشته و علاوه بر این در پیش‌بینی رفتار پس از شکست سنگ نیز نسبت به مدل ترمومکانیکی (TM) که بر اساس معیار شکست دراگر-پراگر (DP) و تابع توزیع ویبول ساخته‌شده، مدل دقیق‌تری است [۱۵]. از این‌رو در ادامه برای بررسی جنبه‌های مختلف رفتار ترموهیدرومکانیکی سنگ تحت اثر میدان تنش سه‌محوری، مدل پیشنهادی (THMD) مورد استفاده قرار گرفته است. لازم به‌ذکر است در این پژوهش، آب با دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌عنوان سیال اشباع‌کننده محیط در نظر گرفته‌شده که دلیل این انتخاب، مطابقت شرایط با پروژه‌های EGS و در نتیجه امکان بهره‌گیری از نتایج حاصل از این پژوهش در تحلیل رفتاری مخازن بوده است.



شکل ۴: مقایسه پاسخ تنش-کرنش گرانیات در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد بر مبنای مدل پیشنهادی (THMD)، مدل ترمومکانیکی و داده‌های تجربی [۱۵]

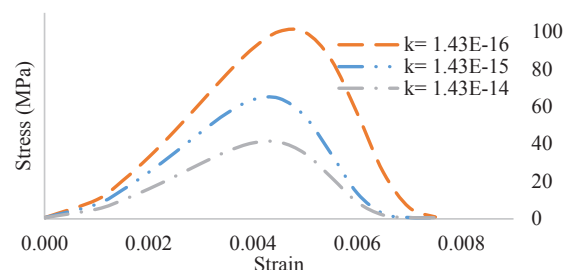
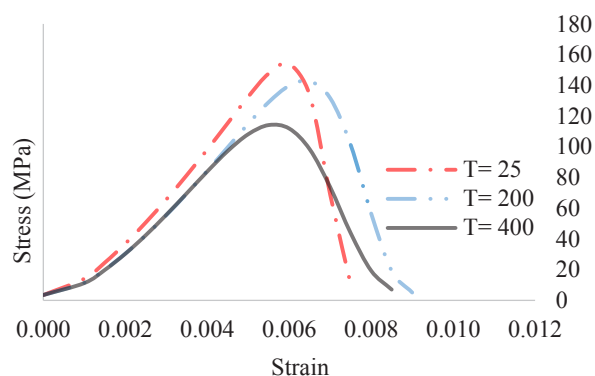
۳-۲- تاثیر ضریب بایوت بر توسعه آسیب ترموهیدرومکانیکی و منحنی رفتاری تنش-کرنش سنگ

همچنان که اشکال ۲ و ۳ نشان می‌دهد در تنش محصورکننده و فشار منفذی به‌ترتیب ۵ و ۴ مگاپاسکال، با افزایش ضریب بایوت و تقویت شدت رفتار توامان هیدرومکانیکی، میزان آسیب، افزایش و در نتیجه ظرفیت باربری سنگ، کاهش یافته است. این افزایش آسیب را می‌توان در نتیجه افزایش سهم دانه‌ها از تنش اعمالی و در نتیجه توسعه ترک‌های بین دانه‌های دانست. بنابراین انتظار می‌رود در محیط‌هایی با دانه‌های تراکم‌ناپذیر، با افزایش ضریب بایوت، شاهد کاهش بیشتری در مدول دگرشکلی باشیم.



شکل ۴: تغییرات آسیب ترموهیدرومکانیکی با تغییرات ضریب نفوذپذیری در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد

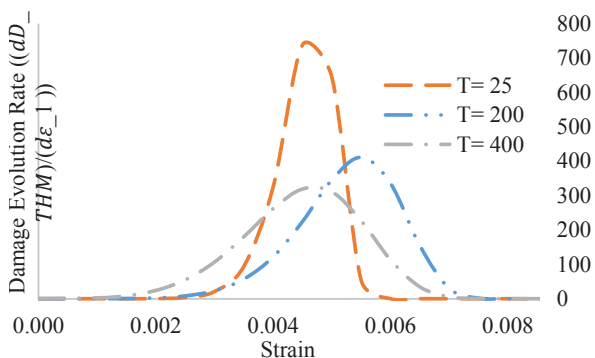
شکل ۶: تغییرات شاخص آسیب ترموهیدرومکانیکی (THMD) با دما



شکل ۵: پاسخ تنش-کرنش سنگ بر مبنای مدل THMD به ازای ضریب نفوذپذیری‌های مختلف در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد

۴-۳- تأثیر دما بر توسعه آسیب ترموهیدرومکانیکی و پاسخ تنش-کرنش سنگ

شکل ۷: پاسخ تنش-کرنش سنگ بر مبنای مدل پیشنهادی تنیده ترموهیدرومکانیکی - آسیب (THMD) در دماهای مختلف



بررسی اشکال ۶ و ۷ نشان می‌دهد در تنش محصورکننده و فشار منفذی به ترتیب ۱۰ و ۴ مگاپاسکال، افزایش دما باعث کاهش ظرفیت باربری و صلیبیت سنگ می‌شود. این کاهش را می‌توان در نتیجه توسعه شکستگی‌ها در سنگ در اثر تنش‌های حرارتی دانست. این نتیجه‌گیری با نتایج ارائه شده در پژوهش‌های پیشین مطابقت دارد؛ هرچند پژوهش‌هایی نیز افزایش خواص مکانیکی با افزایش دما را مطرح کرده‌اند [۲۴]. هم‌چنین با افزایش دما به دلیل افزایش چگالی ریزشکستگی‌های درون سنگ در طول بارگذاری، مرحله بسته‌شدن ترک‌ها در منحنی تنش-کرنش گسترده‌تر می‌شود. پیک مشاهده شده کاهش کرنش متناسب با دما، مطابق نتایج مدل‌سازی‌های عددی گرانیته تا دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد است [۲۴].

شکل ۸: نمو آسیب کل نسبت به کرنش در دماهای مختلف

۳-۵- چگونگی تغییر آسیب ترموهیدرومکانیکی کل با تغییرات کرنش

هم‌چنان‌که شکل ۸ نشان می‌دهد در تنش محصورکننده و

و در نتیجه ظرفیت باربری و صلبیت ماده افزایش می‌یابد. این سخت‌شدگی شاید در اثر کاهش تنش کششی در نوک ترک باشد و به دلیل مصرف بخشی از انرژی کرنشی اعمالی بر ماده در ناحیه سخت‌شدگی نوک ترک، رشد ترک نیازمند سطح انرژی بیشتری است که در نتیجه این فرآیند، شاهد افزایش مقاومت در ماده هستیم.

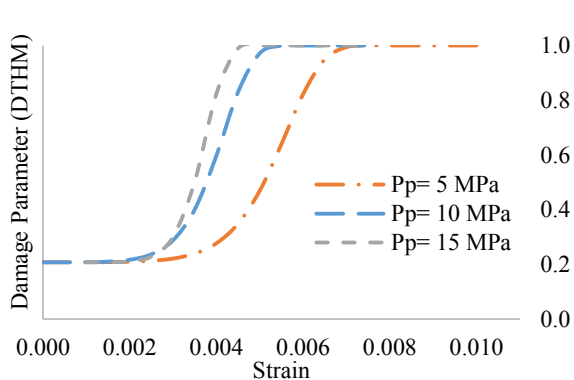
۳-۷- تاثیر فشار منفذی بر توسعه آسیب ترموهیدرومکانیکی و منحنی رفتاری تنش- کرنش سنگ

اشکال ۱۱ و ۱۲ نشان می‌دهد در تنش محصورکننده برابر با ۵ مگاپاسگال، با افزایش فشار منفذی ظرفیت باربری سنگ کاهش می‌یابد. این کاهش ظرفیت باربری را می‌توان نتیجه تاثیر هم‌زمان کاهش تنش موثر بین دانه‌ها و توسعه ترک در اثر تنش‌های حرارتی ناشی از انتقال حرارت هم‌رفت دانست. علاوه بر این فشار منفذی نیز باعث القای فشار هیدرولیکی در

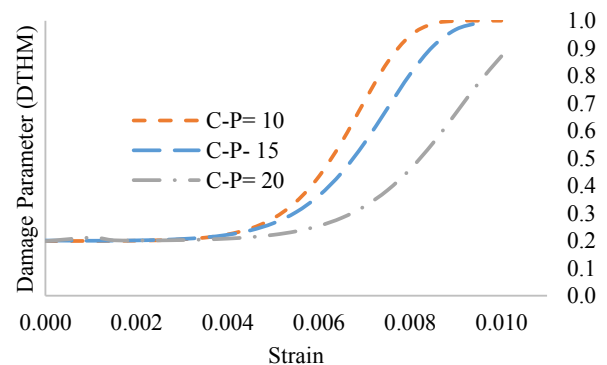
فشار منفذی به ترتیب ۱۰ و ۴ مگاپاسگال، با افزایش دما، آسیب کل کاهش می‌یابد که آن را می‌توان نتیجه تمایل یافتگی دانه‌ها به بروز رفتار پلاستیک و جذب تنش‌های حرارتی دانست. پژوهش‌ها نشان می‌دهد در سنگ‌های گرانیتی تادمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد در اثر تبخیر آب‌های آزاد و آب‌های سطحی جذب شده بین دانه‌ها، شاهد کاهش روند آسیب خواهیم بود. ولی با گذر از این دما و رسیدن به دمای انتقال فاز کانی‌ها، شدت آسیب‌ها و سرعت رشد آن افزایش می‌یابد. این مشاهده با نتایج منتشر شده در پژوهش‌های پیشین مطابقت دارد [۱۵].

۳-۶- تاثیر تنش محصورکننده بر توسعه آسیب ترموهیدرومکانیکی و منحنی رفتاری تنش-کرنش سنگ

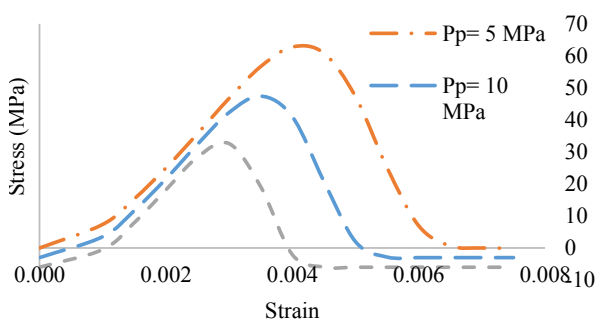
همان‌طور که در اشکال ۹ و ۱۰ نشان داده شده است در فشار منفذی برابر ۴ مگاپاسگال با افزایش فشار محصورکننده، شاخص آسیب ترموهیدرومکانیکی کاهش یافته



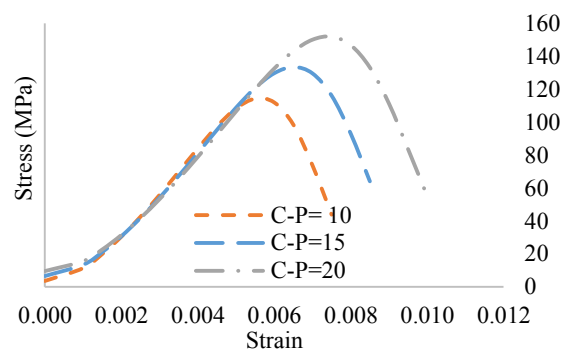
شکل ۱۱: تغییرات شاخص آسیب ترموهیدرومکانیکی با تغییرات فشار منفذی در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۹: تغییرات شاخص آسیب ترموهیدرومکانیکی (THMD) با تنش محصورکننده در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد

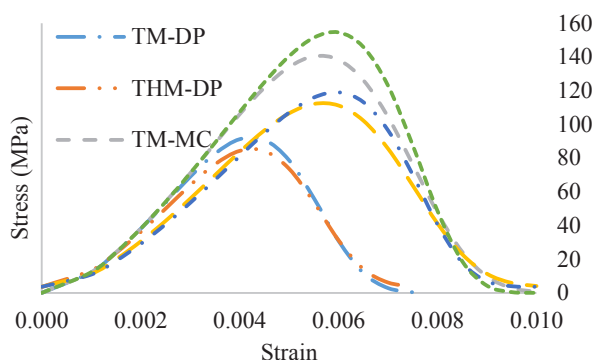


شکل ۱۲: پاسخ تنش-کرنش سنگ بر مبنای مدل THMD به ازای فشار منفذی‌های مختلف در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد

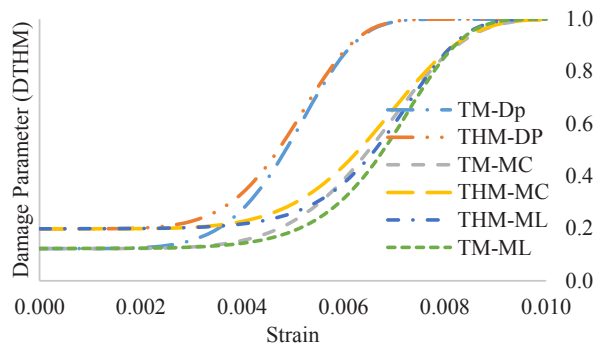


شکل ۱۰: پاسخ تنش-کرنش سنگ بر مبنای مدل THMD به ازای تنش‌های محصورکننده مختلف در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد

آسیب ترموهیدرومکانیکی بیشتری را در مقایسه با معیار لید اصلاح‌شده پیش بینی می‌کند. این اختلاف را می‌توان ناشی از ماهیت سه‌بعدی بودن معیار لید اصلاح‌شده و در نظر گرفتن نقش تنش متوسط بر رفتار مقاومتی سنگ دانست. همچنین مقدار افت مقاومت سنگ در حالت ترموهیدرومکانیکی (فشار منفذی ۱ کیلوپاسکال) نسبت به حالت ترمومکانیکی، قابل توجه بوده و به همین دلیل نوع معیار شکست انتخابی، بر مقدار شاخص آسیب ترموهیدرومکانیکی تاثیر قابل توجهی دارد و میزان گسترش زون آسیب در اطراف حفریه را تحت تاثیر قرار می‌دهد. مقایسه مدل ترمومکانیکی با مدل ترموهیدرومکانیکی متناظر با آن نیز نشان می‌دهد در صورت وجود سیال در محیط، حساسیت نتایج به انتخاب معیار شکست بیشتر خواهد بود.



شکل ۱۴: پاسخ تنش- کرنش سنگ بر مبنای مدل THMD و کاربرد معیار شکست‌های مختلف در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد

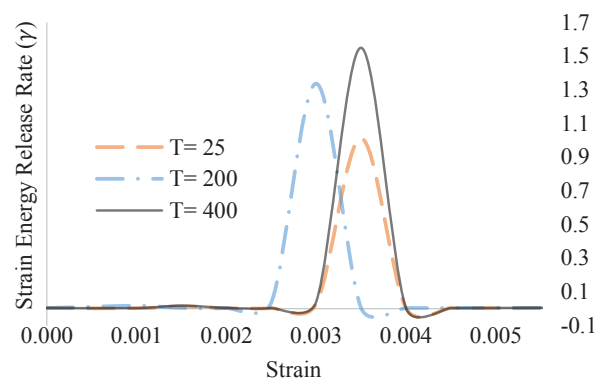


شکل ۱۵: پاسخ تغییرات شاخص آسیب ترموهیدرومکانیکی (THMD) بر مبنای معیار شکست‌های مختلف در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد

نوک ترک می‌شود و با افزایش ضریب شدت تنش، رشد آنرا تسریع می‌کند. بنابراین با افزایش فشار منفذی، میزان آسیب به دلیل افزایش دانسیته ترک‌ها در سنگ افزایش می‌یابد. البته اگر فشار منفذی در تعیین آسیب سنگ‌ها لحاظ نشود، به دلیل زیاد در نظر گرفتن خواص مقاومتی سنگ، طراحی‌های غیرواقع‌گرایانه‌ای را شاهد خواهیم بود. لازم به ذکر است این نتیجه‌گیری با نتایج منتشر شده توسط جائو و همکاران در خصوص بررسی تاثیر تنیده نفوذپذیری و پارامتر آسیب آماری در مخازن ماسه سنگی مطابقت دارد [۱۲]. به علاوه نتایج نشان می‌دهد افزایش فشار منفذی، باعث زوال تنش و رشد ترک تحت تنش ثابت، منجر به شکنندگی بیشتر سنگ می‌شود [۱۸].

۳-۸- تغییرات نرخ رهاسازی انرژی کرنشی با تغییرات دما

همچنان که در شکل ۱۳ نشان داده شده است در تنش محصورکننده و فشار منفذی به ترتیب ۱۰ و ۴ مگاپاسکال، با افزایش دما، نرخ رهاسازی انرژی و کرنش پیک متناظر با آن به دلیل توسعه تنش‌های حرارتی در سنگ و رشد ریزشکستگی‌ها افزایش می‌یابد و در نتیجه با توسعه آسیب در سنگ، ظرفیت باربری ماده کاهش می‌یابد.



شکل ۱۳: تغییرات نرخ آزاد سازی انرژی با افزایش دما

۳-۹- تاثیر انتخاب معیار شکست بر توسعه آسیب و منحنی رفتاری تنش-کرنش سنگ

همان‌طور که در اشکال ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است در تنش محصورکننده و فشار منفذی به ترتیب ۱۰ و ۴ مگاپاسکال، در یک کرنش معین، معیار شکست دراگر-پراگر

۴- نتیجه گیری

- استفاده از معیار شکست لید اصلاح شده منجر به پیش‌بینی واقع‌گرایانه‌تری از رفتار پس از شکست سنگ در مقایسه با معیارهای موهر-کولمب و دراگر-پراگر شده است.
- در نظر گرفتن اثر هم‌رفت و تنش موثر بایوت، باعث واقع‌گرایانه‌تر شدن مدل‌های رفتاری در شبیه‌سازی پاسخ تنیده ترموهیدرومکانیکی-آسیب سنگ می‌شود.

۵- مراجع

- [1] Zhu, C., and Arson, C. (2014). "A thermo-mechanical damage model for rock stiffness during anisotropic crack opening and closure". *Acta Geotechnica*, 9(5): 847-867.
- [2] Liu, X., Ning, J., Tan, Y., and Gu, Q. (2016). "Damage constitutive model based on energy dissipation for intact rock subjected to cyclic loading". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 85: 27-32.
- [3] Yuan, S., and Harrison, J. (2006). "A review of the state of the art in modelling progressive mechanical breakdown and associated fluid flow in intact heterogeneous rocks". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(7): 1001-1022.
- [4] Pourhosseini, O., and Shabanimashcool, M. (2014). "Development of an elasto-plastic constitutive model for intact rocks". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 66: 1-12.
- [5] Stefanou, I., Sulem, J., and Rattetz, H. (2017). "Cosserat approach to localization in geomaterials". *Handbook of Nonlocal Continuum Mechanics for Materials and Structures*, 1-25.
- [6] Sulem, J., Stefanou, I., and Veveakis, E. (2011). "Stability analysis of undrained adiabatic shearing of a rock layer with Cosserat microstructure". *Granular Matter*, 13(3): 261-268.
- [7] Lemaitre, J. (1984). "How to use damage mechanics". *Nuclear Engineering and Design*, 80(2): 233-245.
- [8] Li, X., Cao, W.-G., and Su, Y.-H. (2012). "A statistical damage constitutive model for softening behavior of rocks". *Engineering Geology*, 143: 1-17.
- [9] Wen, T., Tang, H., Ma, J., and Liu, Y. (2019). "Energy Analysis of the Deformation and Failure Process of Sandstone and Damage Constitutive Model". *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23(2): 513-524.
- [10] Vagnon, F., Colombero, C., Colombo, F., Comina, C., Ferrero, A. M., Mandrone, G., and Vinciguerra, S. C. (2019). "Effects of thermal treatment on physical and

در این پژوهش بر مبنای مدل ترمومکانیکی ارائه شده در پژوهش‌های پیشین، برای شبیه‌سازی پاسخ تنش-کرنش سنگ در مخازن ژئوترمال و چاه‌های نفت، مدل تنیده ترموهیدرومکانیکی-آسیب ارائه شده است. وجه تمایز این مدل، اضافه‌شدن شاخص آسیب ناشی از انتقال حرارت هم‌رفت و تنش موثر بایوت به مدل‌های ترمومکانیکی آماری پیشین و تعریف شاخص آسیب مکانیکی بر اساس تابع توزیع توانی و معیار شکست لید اصلاح‌شده در پیش‌بینی پاسخ سنگ به شرایط تنش سه‌محوری است. این مدل در توجیه پاسخ قبل از شکست سنگ، همخوانی قابل قبولی با داده‌های آزمایشگاهی داشت. با این حال در توجیه پاسخ پس از شکست سنگ به دلیل تشکیل صفحه شکست و به عبارتی نقض فرض گسترش تصادفی شکستگی‌ها، با خطا همراه است. با توجه به این دلایل می‌توان گفت مدل مذکور برای سنگ‌هایی که رفتار پس از شکست آنها به رفتار پلاستیک کامل نزدیک‌تر است، نسبت به سنگ‌هایی با رفتار شکننده پیش‌بینی‌های واقع‌گرایانه‌تری ارائه می‌دهد. همچنین بر مبنای نتایج حاصل از تحلیل حساسیت مدل پیشنهادی نسبت به شاخص‌های مختلف تاثیرگذار بر آن چنین استنباط می‌شود که:

- با افزایش ضریب نفوذپذیری سنگ به دلیل افزایش آسیب ناشی از اثر هم‌رفت، آسیب ترموهیدرومکانیکی کل افزایش و در نتیجه، ظرفیت باربری سنگ کاهش می‌یابد.
- با افزایش ضریب بایوت، به دلیل افزایش شدت کوپلینگ هیدرومکانیکی و افزایش سهم دانه‌ها از تنش اعمالی، تنش در مرز دانه‌ها افزایش می‌یابد و رشد ترک، افزایش آسیب و کاهش ظرفیت باربری سنگ را شاهد خواهیم بود.
- افزایش فشار منفذی و دما، آسیب ترموهیدرومکانیکی در سنگ را افزایش و ظرفیت باربری را کاهش می‌دهند.
- با افزایش فشار محصورکننده ناشی از افزایش قفل‌شدگی دانه‌ها، آسیب ترموهیدرومکانیکی کاهش و در نتیجه ظرفیت باربری سنگ بهبود می‌یابد.
- با افزایش دما، میزان آسیب ترموهیدرومکانیکی کل کاهش و مقدار پیک آن در کرنش‌های بزرگ‌تری رخ می‌دهد. حال آن‌که نرخ رهاسازی انرژی منطبق بر تنش پیک و کرنش متناظر با آن افزایش می‌یابد که حاکی از کاهش ظرفیت باربری سنگ با افزایش دما است.

- brittle rock*". Journal of Central South University, 21(3): 1136-1141.
- [21] Li, Y., Jia, D., Rui, Z., Peng, J., Fu, C., and Zhang, J. (2017). "Evaluation method of rock brittleness based on statistical constitutive relations for rock damage". Journal of Petroleum Science and Engineering, 153: 123-132.
- [22] da Fontoura, S. A. (2012). "Lade and modified lade 3D rock strength criteria". In The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring, Springer, 253-258.
- [23] Xu, X., Gao, F., and Zhang, Z. (2018). "Thermo-mechanical coupling damage constitutive model of rock based on the Hoek-Brown strength criterion". International Journal of Damage Mechanics, 27(8): 1213-1230.
- [24] Zhao, Z. (2016). "Thermal influence on mechanical properties of granite: a microcracking perspective". Rock Mechanics and Rock Engineering, 49(3): 747-762.
- mechanical properties of Valdieri Marble-NW Italy*". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 116: 75-86.
- [11] Kamali-Asl, A., Ghazanfari, E., Perdrial, N., and Bredice, N. (2018). "Experimental study of fracture response in granite specimens subjected to hydrothermal conditions relevant for enhanced geothermal systems". Geothermics, 72: 205-224.
- [12] Gao, C., Xie, L., Xie, H., He, B., Li, C., Wang, J., and Luo, Y. (2017). "Coupling between the statistical damage model and permeability variation in reservoir sandstone: Theoretical analysis and verification". Journal of Natural Gas Science and Engineering, 37: 375-385.
- [13] Zhang, J., Chen, X., and Kang, H. (2017). "Experimental investigation of mechanical properties and energy features of granite after heat treatment under different loading paths". Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette, 24(6): 1841-1852.
- [14] Ranjith, P., Viete, D. R., Chen, B. J., and Perera, M. S. A. (2012). "Transformation plasticity and the effect of temperature on the mechanical behaviour of Hawkesbury sandstone at atmospheric pressure". Engineering Geology, 151: 120-127.
- [15] Xu, X., and Karakus, M. (2018). "A coupled thermo-mechanical damage model for granite". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 103: 195-204.
- [16] Park, J.-W., Rutqvist, J., Ryu, D., Park, E.-S., and Synn, J.-H. (2016). "Coupled thermal-hydrological-mechanical behavior of rock mass surrounding a high-temperature thermal energy storage cavern at shallow depth". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 83: 149-161.
- [17] Yang, Y., Zheng, K., Li, Z., Li, Z., Si, L., Hou, S., and Duan, Y. (2019). "Experimental study on pore-fracture evolution law in the thermal damage process of coal". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 116: 13-24.
- [18] Tomac, I., and Sauter, M. (2018). "A review on challenges in the assessment of geomechanical rock performance for deep geothermal reservoir development". Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82: 3972-3980.
- [19] Herwig, H. (2016). "What Exactly is the Nusselt Number in Convective heat transfer problems and are there alternatives?". Entropy, 18(5): 198.
- [20] Li, P., Rao, Q.-h., Li, Z., Ma, W.-b., and Ma, B. (2014). "Thermal-hydro-mechanical coupling damage model of

¹ Damage

² Phenomenological and micromechanical

³ Micro crack coalescence

⁴ Post peak behavior

⁵ Cosserate continuum theory

⁶ Bifurcation theory

⁷ Effective Medium Theory

⁸ Damaged elements

⁹ Ultrasonic velocities

¹⁰ Seismic attenuation

¹¹ Acoustic Emission Counts

¹² Enhanced geothermal systems

¹³ Thermo-Hydro-Mechanical- Damage (THMD) behavioral model

¹⁴ Nusselt Number

¹⁵ Modified Lade criterion

¹⁶ Lode

¹⁷ Damage evolution rate

¹⁸ Intergranular



DOI: 10.30479/jmre.2020.11682.1323

A Thermo-Hydro-Mechanical-Damage Model for Saturated Porous Medium Under Three-Axial Stress Field

Farahi A.¹, Nikoosokhan S.^{2*}, Mortazavi A.³

1- Ph.D. Student, Dept. of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
farahiaref@aut.ac.ir

2- Assistant Professor, Dept. of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
s.nikoosokhan@aut.ac.ir

3- Professor, Dept. of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
ali.mortazavi@aut.ac.ir

(Received: 30 Sep. 2019, Accepted: 25 Jan. 2020)

Abstract: Coupling effects of stress, temperature, pore pressure and damage on hydraulic parameters of hydrocarbon and geothermal reservoirs and their production wells show that the realistic design of the production process from these reservoirs requires a comprehensive stress-strain behavioral model. In this study, through presenting a novel definition of total damage due to the effects of high temperature fluid in porous medium, a coupled stress-strain thermo-hydro-mechanical-damage behavioral model of rock in three-axial loading condition is performed based on the effective medium theory, the concept of Biot effective stress, power probability density function and convection and conduction heat transfer. Results show that: A) Increasing Biot effective stress coefficients, rock permeability, pore pressure and temperature leads to the augmentation of the coupled thermo-hydro-mechanical damage while the increase in confining pressure reduces damage thus improves rock bearing capacity. B) As temperature increases, total thermo-hydro-mechanical damage rate decreases and its peak occurs at larger strains, C) Modified Lade failure criterion provides a more realistic prediction from coupled thermo-hydro-mechanical-damage behavior compared with Mohr-Coulomb and Dragger-Prager failure criteria. Generally, it is concluded that taking into account the concept of Biots effective stress and convection heat transfer along with power distribution function will lead to more accurate predictions of the coupled thermo-hydro-mechanical-damage model.

Keywords: Coupled Thermo-Hydro-Mechanical-Damage behavioral model (THMD), Convection heat transfer, Effective medium theory, Power probability density function, Biot effective stress theory.

INTRODUCTION

Mechanical behavior of rocks can be generally demonstrated based on the theory of elastoplasticity and the application of non-associated plastic flow rule [1], Cossaret continuum theory and the application of the bifurcation theory [2,3], damage mechanics and the application of equivalence strain principle [4] and statistical distribution functions [5]. Based on the theory of effective medium and equivalent strain



principle with respect to the effect of temperature, the coupled mechanical- damage behavior of rock is defined as follows [6]:

$$\sigma_i = E_0 \varepsilon_i (1 - D_m)(1 - D_T) + \mu(\sigma_j + \sigma_k) \quad (1)$$

Where E_0 is elasticity modulus at room temperature, D_m and D_T are mechanical and thermal damage parameters, respectively, μ is Poisson's ratio, and σ_j and σ_k are stress in j and k direction (lateral direction), respectively. Due to the stochastic nature of micro-cracks distribution and damage evolution in rock, damage parameter can be described using the probability density function of statistical distributions such as Weibull, normal and power distributions [5].

In this study, in order to provide a more realistic simulation from thermo-hydro-mechanical model of saturated rocks, a model is presented based on the effective medium theory and using the concept of Biot effective stress, convection and conduction heat transfer and probability density function.

Coupled Thermo-hydro- Mechanical damage behavioral model of rock (THMD Model)

Considering the convective heat transfer, Biot effective stress and the mechanical damage parameter definition based on the probability density function of the power distribution, thermo-hydro-mechanical-damage behavioral equation under triaxial loading conditions is proposed as follows:

$$\sigma_i^{eff} = KE_0 \varepsilon_i \left(1 - (F/F_0)^n\right) \left(1 - 0.0664 k_0^{0.5} g^{0.5} h^{0.5} L^{0.5} \mathcal{G}_T^{-2/3} \alpha^{1/3}\right) (E_T/E_0) + \mu(\sigma_j + \sigma_k) + bP_p(1 - 2\mu) \quad (2)$$

where σ_i^{eff} is axial Biot effective stress, K is the coefficient for correcting nonlinear part of the stress-strain diagram as the result of crack closure, F and F_0 and n are Power Probability Density Function parameters, k_0 is reference permeability, h is hydraulic flow head, \mathcal{G}_T is fluid kinematic viscosity, g is gravitational acceleration, α is rock Thermal coefficient, E_T is elasticity modulus at desired temperature, b is Biot coefficient and P_p is pore pressure. Accordingly, thermo-mechanical-damage (TMD) and thermo-hydro-mechanical-damage (THMD) are defined as follows:

$$D_{TM} = (1 - D_m)(1 - D_T) = 1 - \frac{E_T}{E_0} \exp\left(-\left(\frac{F}{F_0}\right)^n\right) \quad (3)$$

$$D_{THM} = \left(1 - \frac{E_T}{E_0} \exp\left(-\left(\frac{F}{F_0}\right)^n\right)\right) \left(1 - 0.664 Re^{(1/2)} Pr^{(1/3)}\right) = 1 - \frac{E_T}{E_0} \exp\left(-\left(\frac{\alpha I_1 + \sqrt{J_2}}{F_0}\right)^n\right) \times \left(1 - 0.664 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}\right)$$

Where Re and Pr are Reynolds and prantdl numbers, and I_1 and J_2 are first and second stress tensor invariants, respectively.

Furthermore thermo-hydro-mechanical-damage parameter evolution rate " $dD_{THM}/d\varepsilon_1$ " and energy release rate (γ) under three-axial loading conditions based on the proposed model are presented as follows:

$$\frac{dD_{THM}}{d\varepsilon_1} = \left(1 - 0.664 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}\right) \frac{nE_T}{F_0 E_0} \left(\frac{\alpha I_1 + \sqrt{J_2}}{F_0}\right)^{n-1} \times \left(\alpha \frac{dI_1}{d\varepsilon_1} + \frac{1}{2\sqrt{J_2}} \frac{dJ_2}{d\varepsilon_1}\right) \exp\left(-\left(\frac{\alpha I_1 + \sqrt{J_2}}{F_0}\right)^n\right) \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{\sigma_{eq}^2}{2E(1 - D_{THM})^2} \left[\frac{2}{3}(1 + \mu) + 3(1 - 2\mu) \left(\frac{((\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3)}{\left(\sqrt{((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2)/2}\right)} \right)^2 \right] \quad (5)$$

It should be noted that in the proposed formulation, the model will be reduced to "Equation 2" [6] considering zero values for the parameters of the effective Biot stress, convective heat transfer and power distribution. In addition, in order to validate the proposed base model, data presented in Tables 1 and 2 are used based on the experimental results published in [6,7].

Table 1. Parameters used in proposed THMD model [7]

Permeability (m/s)	1.431×10^{-16}
Fluid viscosity (Pa.s)	1.001×10^{-3}
Rock thermal conductivity (m^2/s)	2.219×10^{-6}
Poison ratio (-)	0.3
Biot coefficient (-)	1

Table 2. Statistical distribution constants and elasticity modulus of granite at different temperature [6]

Temperature	Constants	Value
25 °C	n	12.67
	F_0	12.79
	E_T (GPa)	31.31
200 °C	n	7.99
	F_0	146.65
	E_T (GPa)	28.56
400 °C	n	5.75
	F_0	129.7
	E_T (GPa)	27.46
Cohesion	C (MPa)	12
Internal friction angle	φ (°)	27

RESULTS AND DISCUSSION

Validation of the proposed model

In order to validate the proposed model, due to the inaccessibility to laboratory data in accordance with the proposed model conditions, and considering zero values for convective damage parameter and Biot effective stress coefficient, model is reduced to a basic thermomechanical model based on the modified Lade criterion and power distribution function. Then, this model is compared to the laboratory data and thermomechanical model presented in [6] in order to evaluate the prediction accuracy and error magnitude. Results are shown in Figure 1.

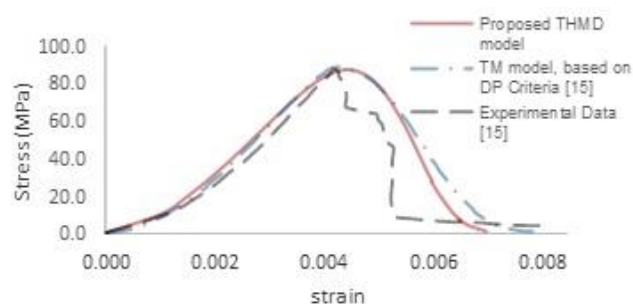


Figure 1. Stress-strain response of granite at 400 °C (based on proposed THMD model, thermomechanical model and experimental data)

As shown in Figure 1, the proposed thermo-hydro-mechanical model is in good agreement with the experimental data in the pre-peak area of the rock stress- strain curve. Moreover, it is a more accurate model for predicting post-peak behavior of the thermomechanical model (TM) than that of [6] which is

based on Dragger-Prager failure criterion (DP) and Weibull distribution function (revise needed, not clear). Accordingly, the proposed THMD model has been utilized to investigate different aspects of rocks thermo-hydro-mechanical behavior under triaxial stress state loading. It should be noted that in this study water at temperature 400 ° C is considered as saturating fluid and it is in accordance with geothermal projects. Therefore, the results can be used in these reservoirs behavioral analysis.

Impact of Biot Coefficient on the evolution of THM Damage and Stress-strain Behavior

At confining stress and pore pressure of 5 and 4 MPa, respectively, increasing Biot coefficient led to increased amount of damage and consequently rock bearing capacity decreased. This increase in damage can be attributed to the increased share of grains from the applied stress and the development of intergranular cracks. Therefore, we expect to see a further decrease in the deformation modulus with increasing Biot coefficients in the medium with incompressible grains.

Impact of permeability coefficient on the evolution of THM Damage and Stress-strain Behavior

Under confining stress and pore pressure of 5 and 4 MPa, respectively, permeability coefficient was increased due to increasing fluid velocity (according to Darcy's law). As a result, convective heat transfer inside porous medium is intensified which increases the overall thermo-hydro-mechanical damage of the medium. In addition, increasing fluid velocity increases the friction between fluid and grains, thereby exacerbating mechanical damage. Hence, at a certain temperature, permeability coefficient, bearing capacity and deformation modulus of the rock will decrease with increasing permeability coefficient.

Variations of strain release rate with temperature changes

At confining stress and pore pressure of 10 and 4 MPa, respectively, as temperature increases, energy release rate and the corresponding peak strain increase due to the development of thermal stresses in the rock and the growth of micro-fractures. This leads to development of damage and reduced rocks bearing capacity.

CONCLUSIONS

In this study, based on the thermomechanical model presented in literature review, a coupled thermo-hydro-mechanical-damage model is proposed in order to simulate rocks stress-strain response in geothermal reservoirs and oil wells. The unique feature of this model is the addition of the damage parameter due to convective heat transfer and Biot effective stress, compared to the previous statistical thermomechanical models. The proposed model is in good agreement with experimental data in pre-peak portion of the stress-strain curve, however, due to violating its initial assumption, (i.e., micro-fractures and their propagation are randomly distributed in the rock), acceptable errors appear in the post-peak portion. Overall, the proposed model offers accurate predictions for rocks, with perfect plastic behavior in the post-peak portion. In addition, based on the results of sensitivity analysis of the proposed model with different parameters, it is concluded that:

- Use of the modified Lade failure criterion leads to a more realistic prediction of post-peak behavior compared to Mohr-Columbus and Drager-Prager failure criteria.
- The effect of convection and the Biot effective stress makes the behavioral models more realistic in simulating coupled thermo-mechanical response.

REFERENCES

- [1] Pourhosseini, O., and Shabanimashcool, M. (2014). "Development of an elasto-plastic constitutive model for intact rocks". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 66: 1-12.
- [2] Stefanou, I., Sulem, J., and Rattiez, H. (2017). "Cossaret approach to localization in geomaterials". Handbook of Nonlocal Continuum Mechanics for Materials and Structures, 1-25.
- [3] Sulem, J., Stefanou, I., and Veveakis, E. (2011). "Stability analysis of undrained adiabatic shearing of a rock layer with Cossaret microstructure". Granular Matter, 13(3): 261-268.
- [4] Lemaitre, J. (1984). "How to use damage mechanics". Nuclear Engineering and Design, 80(2): 233-245.

- [5] Li, X., Cao, W.-G., and Su, Y.-H. (2012). "*A statistical damage constitutive model for softening behavior of rocks*". Engineering Geology, 143: 1-17.
- [6] Xu, X., and Karakas, M. (2018). "*A coupled thermo-mechanical damage model for granite*". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 103: 195-204.
- [7] Li, P., Rao, Q.-h., Li, Z., Ma, W.-b., and Ma, B. (2014). "*Thermal-hydro-mechanical coupling damage model of brittle rock*". Journal of Central South University, 21(3): 1136-1141.