

بررسی آزمایشگاهی تأثیر حفرات بزرگ مقیاس بر رفتار مکانیکی توده سنگ و ارزیابی نتایج با استفاده از روش میکرومکانیک

علیرضا اردکانی^۱، محمود یزدانی^{۲*}، سید علی قدمی تیزابی^۳

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) a.ardakani@eng.ikiu.ac.ir

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس myazdani@modares.ac.ir

۳- کارشناس ارشد مهندسی عمران- مکانیک خاک و پی، دانشگاه تربیت مدرس

(دریافت ۲۰ شهریور ۱۳۹۰، پذیرش ۲۷ آذر ۱۳۹۰)

چکیده

با توجه به وجود پروژه‌های بزرگ زیربنایی در منطقه زاگرس به خصوص سدها و نیروگاه‌های برقابی، تعیین پارامترهای مهندسی توده سنگ‌های سازند آسماری، توجهات گسترده‌ای را به خود جلب کرده است. از جمله ویژگی‌های این سازند، وجود حفرات می- باشند که بسته به شکل و موقعیت آن‌ها باعث کاهش مقادیر پارامترهای مقاومتی و تغییر شکلی در سنگ می‌شوند. در بخش اول این تحقیق برای مطالعه میزان حفرات بر مدول تغییر شکل پذیری و نیز مقاومت تک‌محوری سنگ، از مدل‌سازی آزمایشگاهی استفاده شده است. نمونه‌های متخلخل، از گچ و دانه‌های فوم کروی شکل با قطرهای ۴ و ۶ میلیمتر ساخته شد. محدوده تخلخل نمونه‌های ساخته شده برای مقاومت تک‌محوری صفر الی ۴۵٪ و برای مدول ارتجاعی صفر الی ۳۰٪ است. با توجه به آزمایش‌های انجام شده، میزان مقاومت تک‌محوری و مدول تغییر شکل پذیری با افزایش حجم حفرات کروی بصورت نمایی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش اندازه حفرات از ۴ به ۶ میلی‌متر در نمونه‌های با درصد تخلخل یکسان، میزان کاهش مقاومت تک‌محوری و مدول ارتجاعی کمتر از ۷ درصد است. در بخش دوم، با توجه به اینکه مصالح متخلخل می‌تواند حالت خاصی از مواد مرکب در نظر گرفته شود، توسط روش میکرومکانیک و مدل‌های مختلف همگن‌سازی به بررسی اثر میزان حفرات کروی بر مدول ارتجاعی پرداخته شده است. با توجه به برازش انجام شده در محدوده تخلخل صفر الی ۳۰٪، کاهش مدول ارتجاعی نسبت به حجم حفرات کروی را می‌توان با دقت بسیار مناسبی توسط روابط نمایی تعیین کرد. همچنین نتایج آزمایشگاهی تطابق مناسبی با مدل‌های همگن‌سازی که اثر شکل را لحاظ می‌کنند، دارد. در تخلخل‌های کمتر از ۱۵٪ با توجه به اختلاف کم مدل‌های اشلیبی، خودسازگار، موری-تاناکا و لایلس، نتایج آزمایشگاهی تطابق مناسبی با آن‌ها دارد. با افزایش تخلخل نتایج آزمایش‌ها بیشتر به مدل‌های خودسازگار و اشلیبی تمایل دارد.

کلمات کلیدی

حفرات بزرگ، مقاومت تک محوری، مدول ارتجاعی، مدل‌سازی آزمایشگاهی، روش میکرومکانیک.

۱- مقدمه

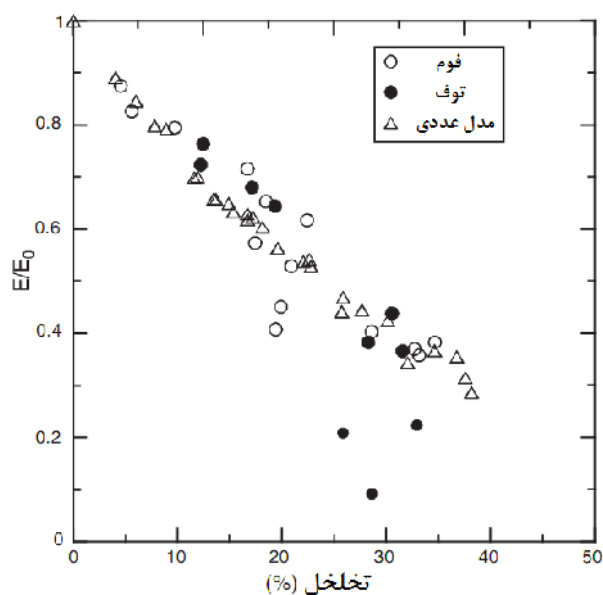
سازه‌هایی چون سدهای بتنی، تونل‌ها و مغارهای بزرگ اغلب در محیط‌های سنگی بنا می‌شوند و برای تحلیل پایداری این سازه‌ها، لازم است ویژگی‌های رفتاری توده سنگ تعیین شود. با توجه به مقیاس بزرگ این سازه‌ها، تخمین صحیح از پارامترهای رفتاری توده‌های سنگی، تنها براساس آزمون‌های آزمایشگاهی روی نمونه‌های کوچک میسر نیست. بنابراین لازم است اثر سایر عوامل که در مقیاس بزرگ، توده سنگ را تحت تأثیر قرار می‌دهند، نیز در نظر گرفت. نمونه‌های بدست آمده از توده سنگ دارای ابعاد محدودی بوده و نماینده مناسبی از ناهمگنی‌های موجود در توده سنگ نیستند. علاوه بر این ممکن است توده سنگ ریز ساختارهای اساسی دیگری نیز داشته باشد.

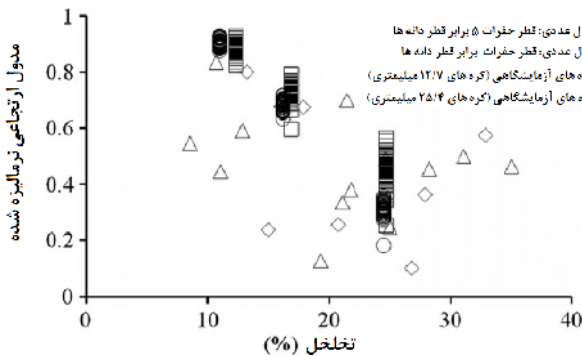
سازند آسماری در ایران جایگاه ویژه‌ای دارد. این سازند به‌عنوان معروف‌ترین سازند کربناته ایران در مناطق وسیعی از غرب و جنوب غرب ایران گسترش دارد. در سال‌های اخیر بدلیل پروژه‌های بزرگ سد و نیروگاه تعیین پارامترهای مهندسی آن توجهات گسترده‌ای را به سمت خود جلب کرد [۳-۱]. با توجه به وضعیت سنگ‌شناسی، نخستین خصوصیات مهندسی سازند آسماری انحلال‌پذیری سنگ‌های کربناته است [۴]. در نتیجه با توجه به انحلال‌پذیری آن‌ها دارای حفرات کوچک مقیاس، این حفرات مختلف هستند. علاوه بر حفرات کوچک مقیاس، این حفرات مهم‌ترین نوع حفره در سنگ‌های آهکی است. تخلخل سازند آسماری با سایر سنگ‌های متخلخل مثل ماسه سنگ که تخلخل آن‌ها حاصل از فضای بین دانه‌ای است، تفاوت دارد. این نوع حفرات با چشم غیر مسلح قابل مشاهده بوده و از لحاظ شکل و اندازه، متنوع هستند. تنوع در شکل و اندازه حفرات باعث تفاوت‌های زیادی در مقاومت نمونه‌ها شده به طوری که تعیین مقدار مقاومت طراحی با احتساب تخلخل، دشوار می‌گردد. همچنین اغلب روش‌های تجربی موجود برای تعیین مدول تغییر شکل‌پذیری سنگ‌ها بر پایه تأثیر ناپیوستگی‌ها بنا شده و تأثیر حفرات را به طور کامل در نظر نگرفته‌اند. ابعاد این حفرات در مواردی به حدی بزرگ بوده که اثر آن‌ها در مدول تغییر شکل توده سنگ بسیار قابل توجه است. از طرف دیگر به علت بزرگ بودن ابعاد آن‌ها، تهیه نمونه‌های کوچک آزمایشگاهی که شامل این حفرات باشد، در عمل غیرممکن است. تحقیق حاضر به مطالعه تأثیر حفرات بر مقاومت و سختی توده سنگ می‌پردازد.

۲- مطالعات گذشته

تاکنون مطالعات تئوریک، آزمایشگاهی و عددی متعددی برای بررسی تأثیر تخلخل بر ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌ها انجام شده است. تأثیر حفرات بر مقاومت فشاری نمونه‌های سنگی برای انواع سنگ‌های مختلف توسط محققان بسیاری بررسی شده است. از جمله می‌توان به تحقیقات روی ماسه‌سنگ [۷-۵]، دولریت [۸]، گرانیت [۹]، گرانیت و دولریت [۱۰]، ماسه سنگ و کربنات‌ها [۱۱]، بازالت شکسته [۱۲]، بازالت کارستی [۱۳]- [۱۴] اشاره کرد. همچنین اثر تخلخل بر مشخصات ارتجاعی و دینامیکی سنگ‌ها برای ماسه سنگ [۱۵]، ماسه سنگ و کربنات‌ها [۱۱]، بازالت کارستی [۱۴] مورد مطالعه قرار گرفته است.

زیمرن [۱۶] توسط روش دیفرانسیلی و با حل معادلات آن، به بررسی تأثیر حفرات کروی توخالی و صلب بر مدول ارتجاعی مواد مرکب پرداخت. آوار و همکاران [۱۷] اثر نسبت تخلخل بر روی مدول ارتجاعی سنگ‌های توف، در بخش‌هایی از مخازن پسماندهای هسته‌ای با درجه بالا، در کوهستان یوکا را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها علاوه بر انجام آزمایش بر روی نمونه‌های سنگ توف، نمونه‌هایی با نسبت تخلخل‌های مختلف را به صورت فیزیکی مدل‌سازی نمودند و همچنین با کد دوبعدی محیط پیوسته به مدل‌سازی عددی سنگ‌های شبیه‌سازی پرداختند. آن‌ها نشان دادند نتایج مدل‌سازی عددی تطابق مناسبی با نمونه‌های شبیه‌سازی آزمایشگاهی دارد. در شکل ۱، نتایج تأثیر تخلخل بر نسبت E/E_0 (مدول ارتجاعی نمونه به مدول ارتجاعی ماتریس یا مدول ارتجاعی نرمالیزه شده) حاصل کار آوار و همکاران [۱۷] نشان داده شده است.





شکل ۳: اثر تخلخل بر مدول ارتجاعی نرمالیزه شده حاصل از روش عددی و داده های آزمایشگاهی [۲۰]

در این تحقیق به روش شبیه سازی و انجام آزمایش، تأثیر حفرات بزرگ مقیاس بر مقاومت فشاری تک محوری و مدول ارتجاعی بررسی شده است. برای بررسی تأثیر اندازه حفرات، از دو اندازه حفره ۴ و ۶ میلیمتر استفاده شده است. همچنین با استفاده از روش میکرومکانیک و مدل های مختلف همگن سازی، به ارزیابی نتایج آزمایشگاهی پرداخته شده است.

۳- روش میکرومکانیک و مدل های همگن سازی

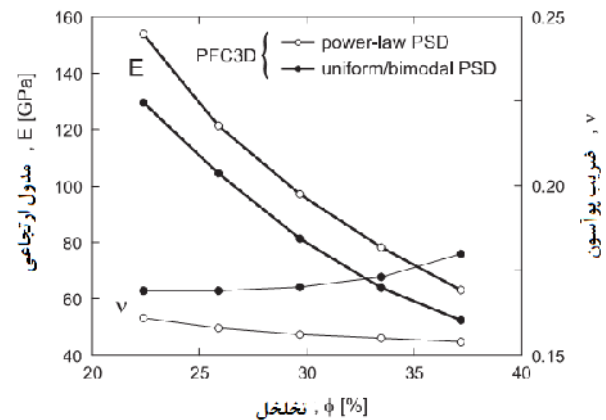
مصلح متخلخل می توانند حالت خاصی از مصلح چند فازی یا مواد مرکب در نظر گرفته شوند و از تئوری های مواد مرکب و میکرومکانیک برای تعیین رفتار آن ها استفاده کرد. هدف میکرومکانیک تعیین ویژگی های ماکروسکوپی (Macroscopic) یا موثر (موثر) مواد مرکب بوسیله مدل هایی که مشخصات ریزساختارهای تشکیل دهنده آن ها را ترکیب می کند، است. دو راهکار ممکن است مورد استفاده قرار گیرد. راهکار اول استفاده از تکنیک های همگن سازی است. این تکنیک ها برای یافتن معادلات همگن شده (متوسط گیری شده) بکار می رود. در این تکنیک ها از المان معرف حجم (یا RVE) که به مراتب بزرگتر از غیریکنواختی ساختاری است، استفاده می شود. تئوری های مختلف متوسط گیری، اغلب به بررسی توزیع تصادفی ناهمگنی در RVE می پردازند و بر اساس آنها میانگین حجمی دامنه تنش و کرنش در هر یک از فازهای ماده مرکب تعیین می شود [۲۲]-[۲۳]. راهکار دوم، شیوه های زمینه متناوب (Periodic field) است که در آنها فرض می شود که ناهمگنی ها در مکان های از پیش تعیین شده (و یا منظم) قرار می گیرند. در این روش ها تعیین ویژگی های ماکروسکوپی از مدل سازی عددی یا تحلیلی پاسخ مکانیکی یک سلول واحد با شرایط مرزی مشخص تعیین می شود [۲۴]. در این تحقیق با استفاده از استراتژی اول، به بررسی حفرات بر مدول ارتجاعی

شکل ۱: اثر تخلخل بر مدول ارتجاعی نرمالیزه شده [۱۷]

پالچیک [۱۸] نقش تخلخل بر مدول ارتجاعی، زاویه اصطکاک و چسبندگی شیل های ماسه ای متخلخل را بررسی کرد و رابطه زیر را برای تعیین مقاومت فشاری تک محوره (σ_c) بر اساس میزان تخلخل (n) ارائه کرد.

$$\sigma_c = \frac{k_1}{n^{k_2}} \quad (۱)$$

در رابطه فوق k_1 و k_2 ضرایب تجربی هستند. اسکوفر و همکاران با استفاده از کد اجزا مجزا سه بعدی و دو روش مختلف مدل سازی، به بررسی اثر تخلخل بر مدول ارتجاعی، مقاومت و زاویه اصطکاک سنگ پرداختند [۱۹]. در شکل ۲، تأثیر میزان تخلخل بر مدول ارتجاعی و ضریب پواسون بر نتایج آن ها ارائه شده است.



شکل ۲: اثر تخلخل بر مدول ارتجاعی و ضریب پواسون [۱۹]

فخیمی و قره باق [۲۰] با استفاده از کد اجزا مجزا دو بعدی، به تأثیر اندازه و توزیع حفرات بر رفتار مکانیکی سنگ پرداختند. نتایج تحقیقات آن ها نشان داد، علاوه بر میزان تخلخل، اندازه حفرات می تواند تأثیر قابل توجهی بر مدول ارتجاعی و مقاومت سنگ داشته باشد. در شکل ۳، اثر تخلخل بر نسبت مدول ارتجاعی نمونه به مدول ارتجاعی ماتریس (نرمالیزه شده)، که حاصل نتایج مدل سازی آن ها و مقایسه آن با اطلاعات داکستا [۲۱] است، نشان داده شده است.

روش‌های همگن‌سازی قرار گرفت. وی به بررسی حل مسئله اینکلوژن بیضی‌گون در ماتریس بینهایت پرداخت. تانسور تمرکز تنش بر اساس مدل اشلیبی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$A^{Eshelby} = [I + SC_m(C_i - C_m)]^{-1} \quad (11)$$

در رابطه فوق I تانسور واحد مرتبه چهار و S تانسورهای مرتبه چهار اشلیبی است. تانسورهای اشلیبی با توجه به هندسه اینکلوژن و ضریب پوآسون ماتریکس محاسبه می‌شود. تانسورهای اشلیبی به صورت زیر مقارن هستند:

$$S_{ijkl} = S_{jikl} = S_{ijlk} \quad (12)$$

مدل اشلیبی [27] اندرکنش بین اینکلوژن‌ها را در نظر نمی‌گیرد و برای مواد مرکب با نسبت پایین اینکلوژن مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مدل خودسازگار^۲ (یا SC) توسط هیل [28] ارائه شد. در این مدل اندرکنش میان اینکلوژن‌ها، با تغییر ویژگی ماتریکس به ویژگی ماده مرکب، در نظر گرفته می‌شود. تانسور تمرکز تنش بر اساس این مدل به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$A^{SC} = [I + S(C^{-1}C_i - I)]^{-1} \quad (13)$$

در رابطه فوق C تانسور سختی ماده مرکب است که در ابتدای کار مجهول است که با فرض اولیه و حل عددی و تکرار با رابطه (7) تعیین می‌شود.

مدل موری-تاناکا (MT) [29] یکی از پر کاربردترین روش‌های همگن‌سازی است و اغلب برای نسبت حجمی متوسط اینکلوژن‌ها استفاده می‌شود. در این مدل اندرکنش بین اینکلوژن‌ها توسط کرنش اغتشاشی غیریکنواخت در نظر گرفته می‌شود. تانسور تمرکز تنش برای این مدل به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$A^{MT} = A^{Eshelby}[(1 - V_i)I + V_i A^{Eshelby}]^{-1} \quad (14)$$

مدل اینکلوژن دوگانه (Double inclosion) توسط هوری و نعمت ناصر [30] ارائه شده است. این مدل دارای جزئیات به مراتب بیشتری نسبت به مدل اینکلوژن واحد است و برای مواد مرکبی که دارای یک فاز جداگانه پیرامون اینکلوژن هستند، کاربرد گسترده‌ای دارد. این مدل در حالت‌های خاص قابل تبدیل به مدل‌های خودسازگار و موری-تاناکا است. لایلس [30] بر مبنای نتایج مدل اینکلوژن دوگانه، مدل خود را ارائه کرد. این مدل برای مواد مرکب دارای کسر حجمی بالای اینکلوژن پیشنهاد شده است و از درون‌یابی مدل موری-تاناکا و معکوس مدل موری-تاناکا برای تعیین تانسور تمرکز تنش استفاده می‌کند. تانسور تمرکز تنش برای این مدل به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$A^{Lielens} = \{(1 - \lambda)[A^{lower}]^{-1} + \lambda[A^{upper}]^{-1}\}^{-1} \quad (15)$$

توده سنگ پرداخته می‌شود. در نتیجه توده سنگ به عنوان یک ماده مرکب دوفازی که حاصل توزیع تصادفی اینکلوژن^۲ (حفرات) در ماده زمینه (ماتریکس) است، در نظر گرفته می‌شود. نسبت حجمی اینکلوژن (V_i) بیانگر تخلخل می‌باشد و به صورت زیر با نسبت حجمی ماتریکس (V_m) ارتباط دارد:

$$V_i = 1 - V_m \quad (2)$$

در میکرومکانیک و تئوری مواد مرکب، تانسور سختی و نرمی موثر (C_e و D_e) در معادله رفتاری خطی به صورت زیر تعریف می‌شوند [22]:

$$\langle \sigma \rangle = C_e \langle \varepsilon \rangle \quad (3)$$

$$\langle \varepsilon \rangle = D_e \langle \sigma \rangle \quad (4)$$

که σ و ε به ترتیب تانسور تنش و کرنش هستند. همچنین اندیس‌های i و m نشان دهنده اینکلوژن و ماتریکس و علامت‌های $\langle \rangle_i$ ، $\langle \rangle_m$ و $\langle \rangle$ نشان‌دهنده متوسط حجمی در نواحی RVE، اینکلوژن و ماتریکس است. تانسور تمرکز تنش و کرنش (A و B) که ارتباط دهنده متوسط کرنش و تنش RVE و اینکلوژن است، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\langle \varepsilon \rangle_i = A \langle \varepsilon \rangle \quad (5)$$

$$\langle \sigma \rangle_i = B \langle \sigma \rangle \quad (6)$$

تانسور سختی و نرمی موثر، به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$C_e = C_m + V_i(C_i - C_m)A \quad (7)$$

$$D_e = D_m + V_i(D_i - D_m)B \quad (8)$$

طبق روابط (7) و (8) تعیین ویژگی‌های موثر نیاز به تعیین تانسورهای تمرکز تنش و کرنش دارد که بر اساس مدل‌های مختلف همگن‌سازی تعیین می‌شود. در ادامه چند مدل همگن‌سازی مشهور بیان می‌شوند.

ساده‌ترین مدل‌های همگن‌سازی مدل ویت [25] و مدل رئیس [26] است. در این مدل‌ها به ترتیب کرنش و تنش داخل ماده مرکب به صورت یکنواخت فرض می‌شود. در این مدل‌ها به ترتیب تانسورهای A و B برابر واحد فرض می‌شود، و ویژگی‌های موثر ماده مرکب تنها به نسبت حجمی فازهای تشکیل دهنده آن وابسته است. در نتیجه داریم:

$$C_e^{Voigt} = C_m + V_i(C_i - C_m) \quad (9)$$

$$D_e^{Reuss} = D_m + V_i(D_i - D_m) \quad (10)$$

در اواسط قرن بیستم، مدل اشلیبی [27] که یکی از اصلی‌ترین دستاوردهای روش تحلیلی برای یافتن ویژگی‌های موثر ماده مرکب است، ارائه گردید. مدل اشلیبی بعدها مبنای بسیاری از

مشخص آماده شده و پس از ترکیب، عملیات اختلاط تا همگنی کامل مخلوط ادامه می‌یابد. بعد از اختلاط کامل، مخلوط همگن درون قالب ریخته می‌شود. قالب پس از گیرش نمونه‌ها باز شده و به منظور خشک شدن به مدت یک‌ماه در محیط آزمایشگاه قرار داده شد. سپس توسط وزن کردن و روابط وزنی حجمی، حجم حفرات آن‌ها تعیین شد. به منظور مسطح کردن نمونه‌های استوانه‌ای و از بین بردن خطای عدم صافی دو سر نمونه، بر روی آن‌ها کلاهک‌گذاری انجام شد. در شکل ۴، مراحل ساخت نمونه نمایش داده شده است.



(الف) آماده سازی مصالح



(ب) ریختن داخل قالب

شکل ۴: مراحل ساخت نمونه‌ها

بارگذاری نمونه‌ها به صورت تک‌محوری و به صورت کنترل تغییر شکل صورت گرفته است. سرعت بارگذاری در تمامی آزمایش‌ها برابر ۰/۸۶ میلی‌متر در دقیقه بوده است و نمودار تنش-کرنش نمونه‌ها برداشت شده است. قرائت داده‌ها به صورت اتوماتیک و توسط سیستم اتوماتیک قرائت داده (دیتالاگر) و سنسورهای تغییر مکان (LVDT) انجام شده است. در شکل ۵، تجهیزات مورد استفاده برای آزمایش نشان داده شده است. همچنین در شکل ۶، نمودار تنش-کرنش تعدادی از نمونه‌ها نمایش داده شده است. بهترین شیب خط گذرنده از منحنی تنش-کرنش در حد فاصل ابتدای نمودار تا میزان کرنش ۵۰٪ درصد تنش نهایی به‌عنوان مدول ارتجاعی گزارش شده است.

$$A^{lower} = \{I + S[(C_m)^{-1}C_i - I]\}^{-1} \quad (16)$$

$$A^{upper} = I + S_i[(C_i)^{-1}C_m - I] \quad (17)$$

$$\lambda = \frac{1}{2}V_i(1+V_i) \quad (18)$$

S_i در رابطه (۱۷) تانسور اشلپی است که با توجه به ویژگی‌های اینکوژن محاسبه می‌شود.

۴- برنامه آزمایشگاهی

در این تحقیق بوسیله شبیه‌سازی آزمایشگاهی تأثیر میزان حفرات کروی، بر مدول ارتجاعی و مقاومت تک محوری سنگ بررسی می‌شود.

۴-۱- مصالح، روش ساخت نمونه و انجام آزمایش

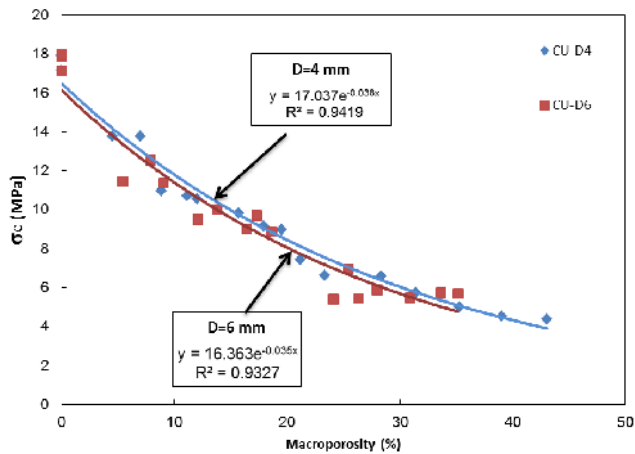
برای بررسی تأثیر حفرات بر روی مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ، از شبیه‌سازی فیزیکی محیط متخلخل سنگ بوسیله مصالح دیگر استفاده گردید. گچ تاکنون به طور گسترده‌ای برای مدل‌سازی رفتار ترد مصالح شبه سنگی استفاده شده است [۱۷] تا [۳۲]. به همین منظور از گچ برای ایجاد ماده زمینه و از دانه‌های فوم، که کره‌هایی از جنس پلی استایرن (یونولیت) هستند، برای ایجاد حفرات استفاده شده است.

برای ساخت تمامی نمونه‌ها، از گچ و آب با نسبت ثابت ۷ به ۴ استفاده شده است. قابل ذکر است که این نسبت، پس از انجام آزمایش‌های اولیه و بررسی‌های لازم در مورد چگونگی غرقاب کردن دانه‌های فوم در این مخلوط، بدست آمده است. برای بررسی تأثیر اندازه حفرات، نمونه‌ها با دو اندازه فوم با قطر ۴ و ۶ میلی‌متر، بطور جداگانه ساخته شدند. همچنین از دو نوع قالب مکعبی به ابعاد ۱۰ سانتیمتر و استوانه‌ای با ابعاد ۱۰×۲۰ سانتیمتر استفاده شد. با توجه به نوع قالب و اندازه حفرات بکار رفته، نمونه‌های مورد بررسی در چهار گروه تقسیم بندی شد. مشخصات هر یک از گروه‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: نامگذاری و مشخصات نمونه‌ها

نام گروه				مشخصات
CU-D6	CU-D4	CY-D6	CY-D4	
۶	۴	۶	۴	قطر فوم (mm)
مکعبی	مکعبی	استوانه‌ای	استوانه‌ای	نوع قالب
۵/۴-۳۵/۲	۴/۵-۴۳/۱	۱/۶-۲۶/۵	۲/۴-۲۶/۱	دامنه تخلخل (درصد)

برای ساخت نمونه‌ها، ابتدا مصالح لازم با نسبت اختلاط



شکل ۷: میزان مقاومت تک محوری در برابر حجم فوم در نمونه های مکعبی

در شکل ۸ نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری نسبت به درصد حجمی حفرات برای نمونه های استوانه ای نشان داده شده است. رابطه و ضریب همبستگی برای نمونه های استوانه ای عبارتند از:

برای حفرات به قطر ۴ میلی متر:

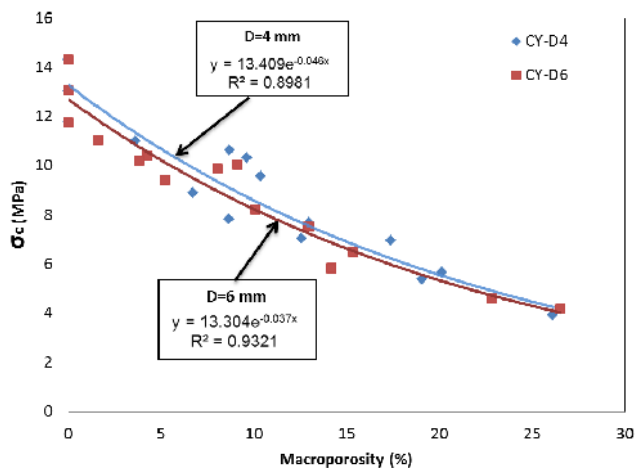
$$\sigma_c = 13.409e^{-0.046\phi} \quad (21)$$

$$R^2 = 0.8981$$

برای حفرات به قطر ۶ میلی متر:

$$\sigma_c = 13.304e^{-0.035\phi} \quad (22)$$

$$R^2 = 0.9321$$



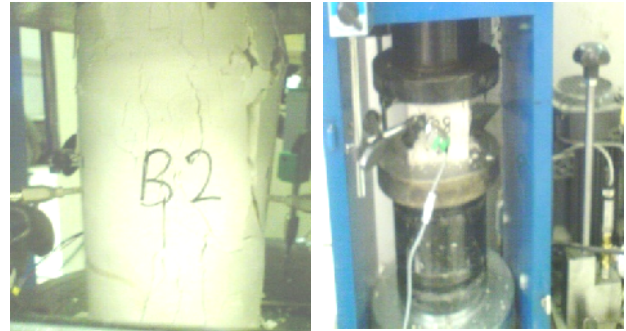
شکل ۸: میزان مقاومت تک محوری در برابر حجم فوم در نمونه های استوانه ای

در شکل ۹ نتایج میزان مدول ارتجاعی (E) نسبت به میزان حفرات برای نمونه های استوانه ای نشان داده شده است. رابطه و ضریب همبستگی برای آزمایش های مذکور عبارتند از:

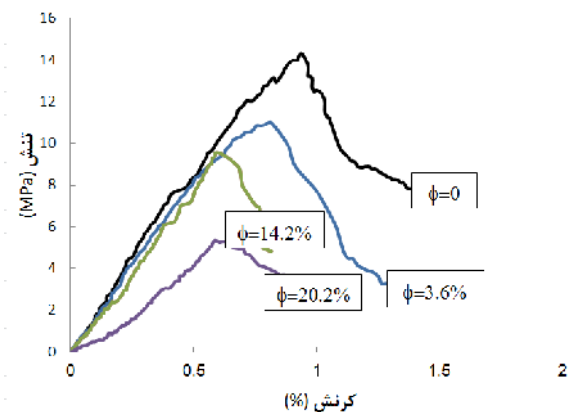
$$E = 1.849e^{-0.026\phi} \quad (23)$$



(الف) دیتا لاگر (ب) نمونه مکعبی پس از شکست



(پ) نمای کلی دستگاه هنگام آزمایش (ت) نمونه استوانه ای پس از شکست
شکل ۵: آزمایش تعیین مقاومت فشاری و مدول ارتجاعی



شکل ۶: نمونه هایی از نمودار تنش-کرنش آزمایش ها

۲-۴- نتایج آزمایش ها

در شکل ۷ نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری نسبت به میزان حفرات برای نمونه های مکعبی نشان داده شده است. مطابق شکل میزان مقاومت فشاری (σ_c) به صورت نمایی با افزایش درصد حجمی حفرات (ϕ) کاهش پیدا می کند. رابطه و ضریب همبستگی این موضوع به صورت ذیل بیان می شود:

برای حفرات به قطر ۴ میلی متر:

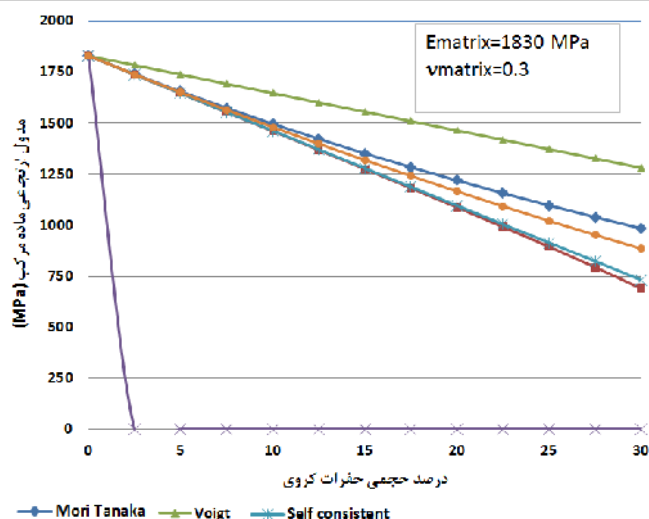
$$\sigma_c = 17.037e^{-0.039\phi} \quad (19)$$

$$R^2 = 0.9419$$

برای حفرات به قطر ۶ میلی متر:

$$\sigma_c = 16.636e^{-0.035\phi} \quad (20)$$

$$R^2 = 0.9327$$



شکل ۱۰: مدول ارتجاعی ماده مرکب تحت تأثیر میزان حفرات
کروی بر اساس مدل‌های همگن سازی

مطابق شکل ۱۰، مدل ویت و رئوس اختلاف قابل توجهی با سایر مدل‌ها دارند و با توجه به در نظر نگرفتن شکل اینکلوژن و تفاوت قابل توجه سختی ماتریکس و اینکلوژن، نمی‌توانند تخمین قابل قبولی برای این مسئله ارائه دهند. مدل‌های همگن‌سازی دارای محاسبات به نسبت پیچیده است. به منظور ارائه روابط ساده و کاربردی، برازش نمایی از نمودار مدول ارتجاعی نرمالیزه-میزان حفرات آنها در محدوده صفر الی ۳۰٪ انجام گردید. رابطه پیشنهادی برای مدول ارتجاعی و ضریب همبستگی مربوط به آن‌ها عبارتند از:

$$E/E_0 = 1.0664e^{-0.03\phi} \quad (26)$$

$$R^2 = 0.9773$$

مدل خودسازگار:

$$E/E_0 = e^{-0.023\phi} \quad (27)$$

$$R^2 = 0.9947$$

مدل موری-تاناکا:

$$E/E_0 = e^{-0.02\phi} \quad (28)$$

$$R^2 = 0.9997$$

مدل لایلس:

$$E/E_0 = 1.0544e^{-0.03\phi} \quad (29)$$

$$R^2 = 0.9847$$

در روابط فوق، E_0 مدول ارتجاعی ماتریکس است. با توجه به روابط ارائه شده، توسط روابط نمایی می‌توان تخمین مناسبی برای هریک از روش‌های همگن‌سازی مذکور ارائه داد.

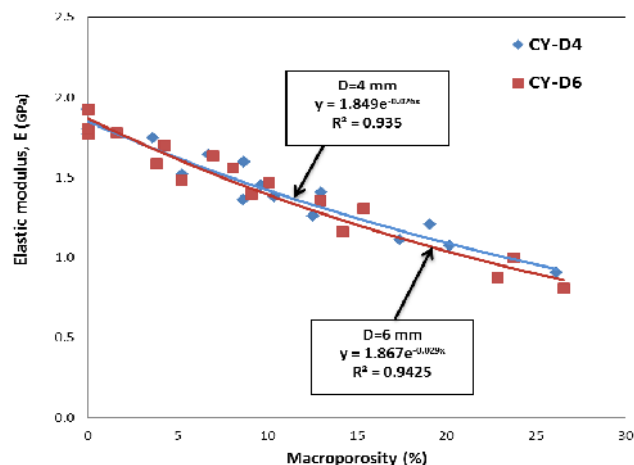
$$R^2 = 0.935$$

برای حفرات به قطر ۶ میلی‌متر:

$$E = 1.867e^{-0.026\phi}$$

$$(24)$$

$$R^2 = 0.9425$$



شکل ۹: میزان مدول ارتجاعی در برابر حجم فوم

۵- بررسی اثر حفرات توسط مدل‌های همگن‌سازی

به منظور ارزیابی نتایج آزمایشگاهی با مدل‌های مختلف همگن‌سازی، با ارائه یک مثال به بررسی اثر میزان حفرات کروی بر مدول ارتجاعی ماده مرکب پرداخته شده است. بدین منظور با فرض مدول ارتجاعی ماتریکس و اینکلوژن به ترتیب برابر ۱۸۳۰ و ۰/۰۰۱ مگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۳ برای هر دو آنها، مدول ارتجاعی ماده مرکب با روش‌های مختلف تحت تأثیر حفرات کروی، محاسبه شده است. تانسورهای اشلبی برای اینکلوژن کروی عبارتند از:

$$S_{1111} = S_{2222} = S_{3333} = \frac{7-5\nu}{15(1-\nu)} \quad (25)$$

$$S_{1122} = S_{2233} = S_{3311} = S_{1133} = S_{2211} = S_{3322} = \frac{5\nu-1}{15(1-\nu)}$$

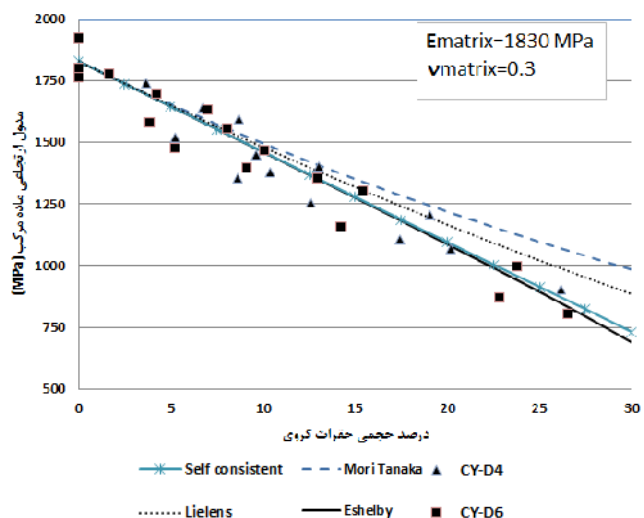
$$S_{1212} = S_{2323} = S_{3131} = \frac{4-5\nu}{15(1-\nu)}$$

در شکل ۱۰، میزان مدول ارتجاعی ماده مرکب نسبت به درصد حجمی حفرات کروی بر اساس مدل‌های همگن‌سازی، ارائه شده است.

۶- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل‌های همگن‌سازی

با توجه به بخش ۵ و ۶، نتایج آزمایشگاهی و مدل‌های همگن‌سازی، حاکی از کاهش مدول ارتجاعی با افزایش تخلخل به صورت نمایی می‌باشد. البته لازم است توجه شود که در هر دو حالت، تخلخل موجود ناشی از حفرات کروی است.

در شکل ۱۱ نتایج آزمایشگاهی به همراه مدل‌های همگن‌سازی نشان داده شده است. مطابق این شکل تا میزان تخلخل ۱۵٪، مدل‌های همگن‌سازی دارای نتایج نزدیک به هم می‌باشند و تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارند. از میزان تخلخل ۱۵٪ الی ۲۶/۵٪ نتایج آزمایشگاهی بیشتر با مدل‌های اشلیبی و خودسازگار که حد پایین مدل‌های همگن‌سازی هستند، منطبق است.



شکل ۱۱: مدول ارتجاعی تحت تأثیر میزان حفرات کروی بر اساس مدل‌های همگن‌سازی و آزمایش‌ها

در روش میکرومکانیک فرض اساسی همگنی ماده مرکب و محیط بینهایت است. در نتیجه بازه تغییرات نتایج آزمایشگاهی می‌تواند ناشی از تغییر فرضیات مذکور باشد. همچنین در مدل‌های همگن‌سازی، مدول ارتجاعی ماده مرکب تنها به شکل هندسی حفره و نسبت حجمی آن وابسته است. به عبارت دیگر در این مدل‌ها عامل اندازه حفرات، در میزان تخلخل یکسان، بی‌تأثیر است. حال آنکه نتایج آزمایشگاهی حاکی از کاهش میزان مدول ارتجاعی در اثر افزایش اندازه حفرات از ۴ میلیمتر به ۶ میلی‌متر است. البته این میزان اختلاف ناچیز بوده و حداکثر به ۷ درصد می‌رسد.

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ضمن بیان کارهای انجام شده توسط محققین

مختلف، به اهمیت تأثیر حفرات بزرگ مقیاس در مناطق وسیعی از سازند آسماری کشور پرداخته شد. با توجه به دشواری تولید حفرات بزرگ در آزمایشگاه و توجه به این‌که ایجاد حفرات بزرگ نیاز به ساخت نمونه‌های بزرگ دارد، امکان انجام آزمون‌های آزمایشگاهی در مقیاس واقعی دارای محدودیت است. در نتیجه در مقیاس کوچک با مدل‌سازی فیزیکی سنگ، تأثیر میزان حفرات کروی بر مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول ارتجاعی بررسی شد. لازم به توضیح است که با توجه به اهمیت موضوع، وجود پروژه‌های بزرگ زیربنایی متعدد و امکان تعمیم نتایج به کل منطقه زاگرس یا سازند آسماری وجود ندارند، زیرا تحقیقات حاضر با فرض حفرات کروی شکل و همگن بودن ماتریکس سنگ انجام شده است و در صورت تطابق فرضیات قابل تعمیم به هر منطقه‌ای است.

دو نوع قالب استوانه‌ای و مکعبی و دو سایز حفره ۴ و ۶ میلی-متر برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد و برازش نمایی و ضریب همبستگی بر کلیه حالت‌ها ارائه شد. مطابق آزمایش‌های انجام شده، با افزایش حجم حفرات کروی مدول ارتجاعی و مقاومت تک‌محوری فشاری سنگ، به صورت نمایی کاهش پیدا می‌کند. همچنین در یک میزان تخلخل ثابت، با افزایش قطر حفرات از ۴ به ۶ میلیمتر، میزان مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول ارتجاعی به میزان کمی، کاهش پیدا می‌کند. این میزان اختلاف کم بوده و حداکثر به ۷ درصد می‌رسد.

با توجه به اینکه، مصالح متخلخل می‌توانند حالت خاصی از مواد مرکب در نظر گرفته شوند، با استفاده از روش میکرومکانیک و مدل‌های مختلف همگن‌سازی، به بررسی اثر میزان حفرات کروی بر مدول ارتجاعی آنها پرداخته شد. در روش میکرومکانیک فرض اساسی همگنی ماده مرکب و محیط بینهایت است. با توجه به برازش انجام شده، می‌توان کاهش مدول ارتجاعی، نسبت به حجم حفرات کروی را با دقت بسیار مناسبی توسط روابط نمایی تعیین کرد.

نتایج آزمایش‌ها حاکی از تطابق مناسب آن با مدل‌های همگن‌سازی که در آنها اثر شکل اینکلوزن لحاظ شده، می‌باشد. این تطابق در میزان تخلخل کمتر از ۱۵٪ بیشتر می‌باشد و با افزایش میزان تخلخل نتایج آزمایش‌ها به نتایج مدل اشلیبی و خودسازگار میل می‌کند.

مراجع

- [1] Ghobadi, M.H.; 2005; "Assessment of solubility of Asemari limestone in Karun 1 damside"; Iran.ICOLD, 73th Annual meeting of ICOLD, Tehran, Iran.

- [15] Yale, D.P.; and Nieto, J.A.; 1995; "The effect of cementation on the static and dynamic properties of the Rotiegendes sandstone", In: Daemen, A., Schultz, A. (Eds.), *Rock Mechanics*, Balkema, Rotterdam, 169-175.
- [16] Zimmerman, R.W.; 1991; "Elastic moduli of a solid containing spherical inclusions", *Mechanics of Materials*, 12(1), 17-24.
- [17] Avar, B.B.; Hudyma, N.; and Karakouzian, M.; 2003; "Porosity dependence of the elastic modulus of lithophysae-rich tuff: numerical and experimental investigations", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40, 919-928.
- [18] Palchik, V.; 2006; "Application of Mohr-Coulomb failure theory to very porous sandy shales", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43, 1153-1162.
- [19] Schopfer, M.P.J.; Abe, S.; Childs, C.; and Walsh, J.J.; 2009; "The impact of porosity and crack density on the elasticity, strength and friction of cohesive granular materials: Insights from DEM modeling", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46, 250-261.
- [20] Fakhimi, A.; and Gharahbagh, E.A.; 2011; "Discrete element analysis of the effect of pore size and pore distribution on the mechanical behavior of rock", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48, 77-85.
- [21] DaCosta, A.; Wright, C.; Ye, Y.; MacLaughlin, M.; and Hudyma, N.; 2007; "Development of upper and lower bounds to describe engineering properties as a function of macroporosity". In: Eberhardt E, Stead D, Morrison T, editors. *Proceedings of the 1st Can-US rock mechanics symposium*, Vancouver.
- [22] Nemat-Nasser, S.; Hori, M.; 1999; "Micromechanics: Overall Properties of Heterogeneous Materials", North-Holland.
- [23] Torquato, S.; 1998; "Effective stiffness tensor of composite media: II. Applications to isotropic dispersions", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 46, 1411-1440.
- [24] Bohm, H.J.; 2004; "Continuum models for the thermomechanical behavior of discontinuously reinforced materials", *Advanced Engineering Materials*, 6, 626-633.
- [25] Voigt, W.; 1889; "On the relationship between the two elastic contacts of an isotropic body", 1889, *Ann. Phys.*, (38), 573-587.
- [26] Reuss, A.; 1929; "Estimation of yield surface of polycrystals based on the plastic behaviour of single crystals", 1929, *Zeit. Ang. Math. Mech.*, 9, 44-58.
- [27] Eshelby, J.D.; 1957; "The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems", *Proc. Roy. Soc. London, Ser. A*, A241, 376-396.
- [28] Hill, R.; 1965; "A self-consistent mechanics of composite materials", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 13(4), 213-222.
- [29] Mori, T.; and Tanaka, K.; 1973; "Average stress in matrix and average elastic energy of
- [2] Yazdani, M.; Kamali, B.A.; and Kamali, A.; "Importance role of discontinuities in the rock mass of arch concrete Seimareh dam"; 2006, *Seventh International Congress on Civil Engineering*, Tehran, in Persian.
- [3] Yazdani, M.; "Measurement of stress field in the rock for steel cover design control of Panstak tunnels of Seimareh dam project"; 2008, *Second National Conference of Dams and Hydroelectric Power Plants*, Tehran, in Persian.
- [4] Qobadi, M.; Mohseni, H.; and Rasulifarh, H.; 2009; "Study on geologic characteristics of Asmari limestone formation in the north east of Masjed Soleiman"; *Iranian Journal of Engineering Geology*, 2(1-2), 1-18, in Persian.
- [5] Dunn, D.E.; La Fountain, L.J.; and Jackson, R.E.; 1978; "Porosity dependence and mechanism of brittle fracture in sandstone"; *Journal of Geophysical Research*, 78 (14), 2403-2417.
- [6] Hoshino, K.; 1974; "Effect of porosity on the strength of clastic sedimentary rocks"; *International congress on rock mechanics*, 1974, Denver, CO, A.A. Balkema, Rotterdam vol. 1, 511-516.
- [7] Vernik, L.; Bruno, M.; and Bovberg, C.; 1993; "Empirical relations between compressive strength and porosity of siliclastic rocks", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 30(7), 677-680.
- [8] Dearman, W.R.; 1974; "Weathering classification in the characterization of rock for engineering purposes in British Practice" *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 9, 33-42.
- [9] Dearman, W.R.; Baynes, F.J.; and Irfan, T.Y.; 1978; "Engineering grading of weathered granite", *Engineering Geology*, 12, 345-374.
- [10] Lumb, P.; 1983; "Engineering properties of fresh and decomposed igneous rocks from Hong Kong", *Engineering Geology*, 19, 81-94.
- [11] Farquhar, R.A.; Somerville, J.M.; Smart, B.G.D.; and Heriot-Watt, U.; 1994; "Porosity as a geomechanical indicator: an application of core and log data and rock mechanics", *The European Petroleum Conference*, Society of Petroleum Engineers, London.
- [12] Tugrul, A.; Gurginar, O.; 1997; "A proposed weathering classification for basalts and their engineering properties", *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 55, 139-149.
- [13] Kelsall, P.C.; Watters, R.J.; and Franzone, J.G.; 1986; "Engineering characterization of fissured weathered dolerite and vesicular basalt" *Rock Mechanics: Key to Energy Production*, Proc. 27th US Symp. on Rock Mechanics, Tuscaloosa, Alabama.
- [14] Al-Harthi, A.A.; Al-Amri, R.M.; and Shehata, W.M.; 1999; "The porosity and engineering properties of vesicular basalt in Saudi Arabia", *Engineering Geology*, 54, 313-320.

[32] Stimpson, B.; 1970; "Modeling materials for engineering rock mechanics", International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 7, 77-121.

زیر نویس ها

materials with misfitting inclusions", Acta Metall, 21, 571-574.

[30] Hori, M.; and Nemat-Nasser, S.; 1993; "Double-inclusion model and overall moduli of multi-phase composites", 1993, Mechanics of Materials, 14(3), 189-206.

[31] Lielens G.; 1999; "Micro-macro modeling of structured materials", Ph.D dissertation, UCL/FSA, Louvain-la-Neuve, Belgium.

¹ Micromechanics

² Inclosion

³ Self consistent