

ارزیابی تأثیر اندازه نمونه در سنگ‌های رسوبی و اندازه سنگدانه در نمونه بتنی بر مقاومت فشاری تک محوره

محمد داربر^۱، لهراسب فرامرزی^{۲*}، مصطفی شریف زاده^۳، هومن رضایی^۴

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه کر تین استرالیا

۴- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت: دی ۱۳۹۵، پذیرش: تیر ۱۳۹۶)

چکیده

در مهندسی سنگ، انتخاب اندازه مناسب نمونه برای تعیین مقاومت فشاری سنگ که معرف خواص مقاومتی سنگ باشد، بسیار مهم است. پیش‌بینی مقاومت فشاری تک محوره در قطرهای مختلف با استفاده از تئوری‌های تأثیر اندازه نمونه بسیار با ارزش است. این تئوری‌ها، به پنج مدل تجربی، آماری، مولتی فراکتال، نظریه شکست و نظریه شکست فراکتال تقسیم‌بندی شده‌اند. بررسی‌های محدودی برای تعیین همبستگی تئوری‌های تأثیر اندازه با نتایج آزمایش‌های تجربی در طبقه‌بندی‌های مختلف، بر روی سنگ‌ها و نمونه‌های مصنوعی انجام شده است. در این مقاله، مؤلفان با مروری بر مطالعات گذشته، تأثیر اندازه نمونه را روی مقاومت فشاری تک محوره سنگ‌های رسوبی و نمونه‌های مصنوعی با استفاده از مدل‌های تأثیر اندازه و تحلیل‌های آماری بررسی کرده‌اند. همچنین در مطالعه تجربی، ۸۴ نمونه بتنی با چهار قطر ۵۶، ۶۸، ۷۲ و ۹۴ میلی‌متر و با سه دانه‌بندی مختلف ۱۲-، ۲۰-، ۲۵- میلی‌متر ساخته شد. یافته‌ها نشان داد که در سنگ‌های رسوبی، بررسی تأثیر اندازه نمونه با استفاده از نظریه شکست، همبستگی خوبی با نتایج آزمایش‌های تجربی دارد. در نمونه‌های مصنوعی، مدل هوک و براون مقادیر بالایی از ضرایب R^2 را نشان داد، اما این مدل برای نمونه‌های با قطرهای بزرگ، محافظه کارانه است. در این قطرها، مدل مولتی فراکتال همبستگی بهتری با اطلاعات آزمایشگاهی دارد. نتایج مطالعات تجربی نشان داد که در دانه‌بندی‌های ۲۰- و ۲۵- میلی‌متر، با افزایش قطر، مقاومت فشاری تک محوره، ابتدا روند افزایشی و سپس روند کاهشی دارد. در نمونه‌های با دانه‌بندی ۱۲- میلی‌متر، مقاومت فشاری یک روند افزایشی با افزایش قطر نشان داد. در نمونه‌های بتنی با دانه‌بندی ریز، مدل‌های مولتی فراکتال و تأثیر اندازه با استفاده از نظریه شکست، روند صعودی تغییرات مقاومت را به خوبی نشان می‌دهند. همچنین در نمونه‌های با دانه‌بندی درشت، مدل مولتی فراکتال، بیش‌ترین ضرایب R^2 را نشان داد.

کلمات کلیدی

تأثیر اندازه نمونه، تأثیر ابعاد دانه‌بندی، مقاومت فشاری تک‌محوره، تحلیل آماری، انرژی شکست

*عهده دار مکاتبات: lfaramarzi@cc.iut.ac.ir

۱- مقدمه

دارلینگتون و رنجیت [۱۴] و تئوری‌های بر پایه مکانیک شکست شامل مطالعات گریفیت [۳۶]، آدو و پوش [۳۷]، بازانت [۳۸]، کارپینتری [۸، ۳۹-۴۰] و معصومی و همکاران [۲۹] می‌شود. در حوزه مکانیک سنگ و مکانیک جامدات، معروف‌ترین تئوری‌های تحلیلی ارائه شده برای پیش‌بینی تأثیر اندازه نمونه روی مقاومت فشاری تک‌محوره، شامل تئوری آماری ویبول [۵]، تئوری تجربی هوک و براون [۶]، مدل مقیاس مولتی فراکتال کارپینتری و همکاران [۸]، مدل تأثیر اندازه با استفاده از نظریه شکست بازانت [۷]، مدل تأثیر اندازه با استفاده از نظریه شکست فراکتال بازانت [۹] و مدل یکپارچه تأثیر اندازه برای سنگ بکر (USEL) معصومی و همکاران [۴] هستند.

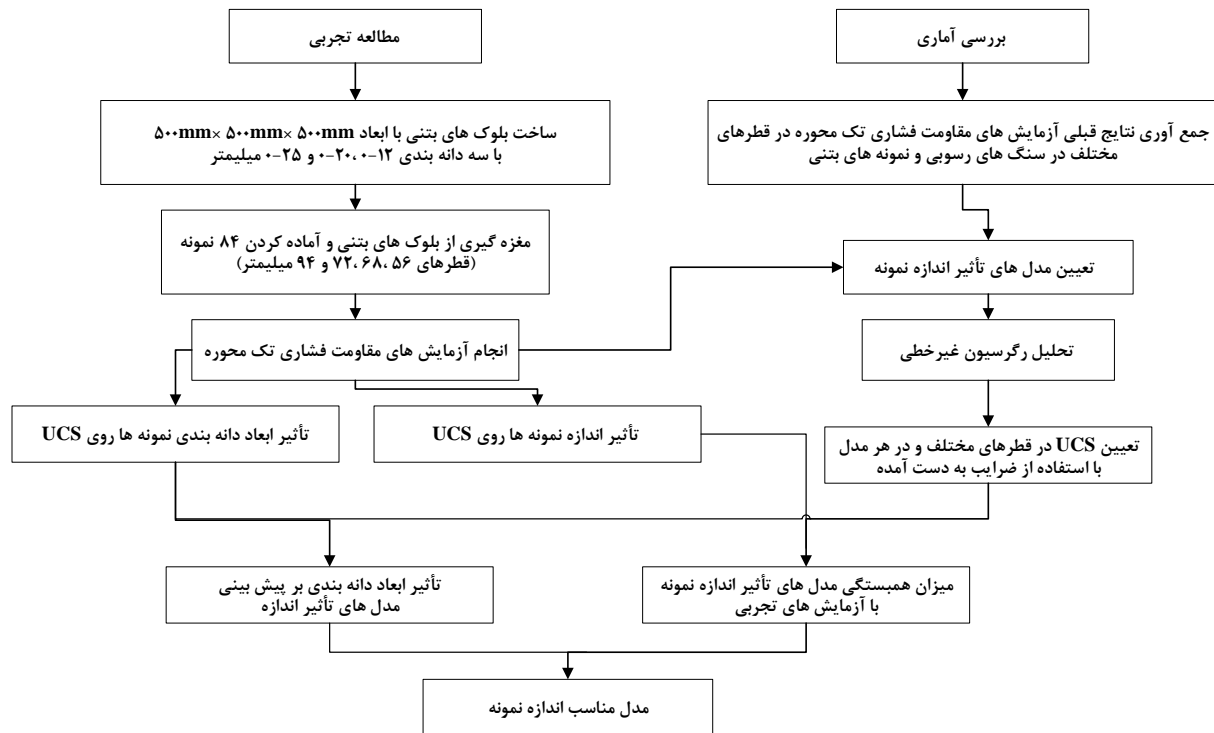
در مطالعات قبلی انجام شده روی تأثیر اندازه نمونه بر مقاومت فشاری تک محوره، تاکنون از مدل تأثیر اندازه نمونه با استفاده از نظریه شکست و نیز نظریه شکست فراکتال، در پیش‌بینی مقاومت فشاری تک محوره نمونه‌ها در قطرهای مختلف استفاده نشده بود. همچنین تأثیر اندازه دانه‌بندی روی پیش‌بینی مدل‌های تأثیر اندازه نمونه مشخص نشده است. به علاوه برای مشخص کردن حوزه کاربرد تئوری‌های تأثیر اندازه نمونه در نمونه‌های سنگی و بتنی، تاکنون بررسی‌های قابل توجهی انجام نشده و مدل مناسب تأثیر اندازه نمونه در سنگ‌های مختلف مشخص نشده است. دارلینگتون و همکاران [۱۴]، پس از تقسیم‌بندی سنگ‌های مختلف و تعریف ۵ مدل، مقادیر ضریب R^2 هر مدل را در هر یک از سنگ‌ها تعیین نمودند و نتیجه گرفتند، حتی در یک نوع از طبقه‌بندی مواد، به علت تأثیر اندازه نمونه، تغییرات زیادی در نتایج وجود دارد. در هر مدل، رابطه بین اندازه نمونه و مقاومت آن در سنگ‌های آذرین نسبت به سنگ‌های رسوبی ضعیف است. مطالعات معصومی و همکاران [۴]، نشان داد، در بعضی از سنگ‌های رسوبی، مدل یکپارچه تأثیر اندازه، نتایج خوبی نشان می‌دهد اما یکی از عیب‌های این مدل آن است که همیشه امکان انجام آزمایش‌های متعدد روی قطرهای مختلف برای رسیدن به پراکندگی مناسب در اطراف قطر با مقاومت بیشینه نیست.

در این مقاله، تأثیر اندازه نمونه و تأثیر اندازه دانه‌بندی بر مقاومت فشاری تک‌محوره نمونه‌های سنگی و بتنی با استفاده از روش‌های آماری و تجربی بررسی شده است. همچنین در این تحقیق برای اولین بار از مدل‌های تأثیر

یکی از مباحث بسیار مهم در مهندسی سنگ، تأثیر مقیاس بر خواص مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ است. وابستگی مقاومت فشاری به اندازه نمونه، نقش اساسی در طراحی سازه‌های سنگی دارد. یک نمونه از اهمیت اندازه ساختار در معدنکاری، ابعاد پایه‌ها در روش معدنکاری اتاق و پایه و در مهندسی عمران، ساختارهای روی توده‌سنگ مانند پایه‌های بتنی در پل‌ها است [۱]. پژوهش‌ها نشان داده است، مقاومت فشاری تک محوره سنگ بکر با افزایش اندازه نمونه، به علت افزایش نقص‌ها در حجم نمونه، کاهش می‌یابد، اما روند تغییرات، وابسته به نوع سنگ، ترکیب کانی‌شناسی، تخلخل و غیره است [۲، ۳]. تعیین خصوصیات مقاومتی و رفتاری مواد در نمونه‌های با اندازه واقعی به دلیل محدودیت اعمال بار و هزینه بالای تجهیزات بارگذاری مشکل است. بنابراین تخمین و پیش‌بینی مقاومت با استفاده از آزمایش‌های آزمایشگاهی، روی نمونه‌های بزرگ و با استفاده از تئوری‌های تأثیر اندازه بسیار با ارزش است [۴-۹].

در مکانیک سنگ، برای مشخص کردن تأثیر اندازه بر رفتار مکانیکی سنگ بکر، از روش‌های تجربی و تحلیلی استفاده زیادی شده است. آزمایش‌های تجربی تحت شرایط تنش تک محوره (مچی [۱۰]، باچر و انیشتین [۱۱]، ثرو و همکاران [۱۲]، پلز [۱۳]، دارلینگتون و رنجیت [۱۴] و معصومی و همکاران [۴])، آزمایش بار نقطه‌ای (بینی‌اویسکی [۱۵]، گرمینگر [۱۶]، هوکینز [۱۷]، ثرو و همکاران [۱۸] و فوریز و همکاران [۱۹])، آزمایش کششی غیر مستقیم (اندریو [۲۰-۲۱]، کارپینتری و همکاران [۸]، بوتنوت [۲۲]، الیسز و روکو [۲۳]، ثرو و همکاران [۱۲] و کاناکی و پالا [۲۴]) و تحت شرایط سه‌محوره (سینگ و هاک [۲۵]، هانت [۲۶]، مدهورست و برون [۲۷]، آبرتین و همکاران [۲۸] و معصومی و همکاران [۲۹]) انجام شده است. روش‌های تحلیلی می‌توانند به سه دسته تئوری‌های آماری، تئوری‌های تجربی و نیمه تجربی و تئوری‌های بر اساس مکانیک شکست تقسیم شوند. تئوری‌های آماری شامل مطالعات ویبول [۳۰]، بینی‌اویسکی [۳۱]، پرتوریوس و سی [۳۲]، بازانت [۷، ۳۳-۳۵]، دارلینگتون و رنجیت [۱۴] و معصومی و همکاران [۴]، تئوری‌های تجربی و نیمه تجربی شامل مطالعات مچی [۱۰]، هوک و براون [۶]، یوشیناکا و همکاران [۲] و

بتنی مورد بررسی قرار گرفته است. بحث تأثیر جنس سنگدانه ها روی نتایج پژوهش، خارج از حوزه این مطالعه بوده و در پژوهش های آینده بررسی خواهد شد. شکل ۱، مراحل مختلف مطالعه حاضر را نشان می دهد.



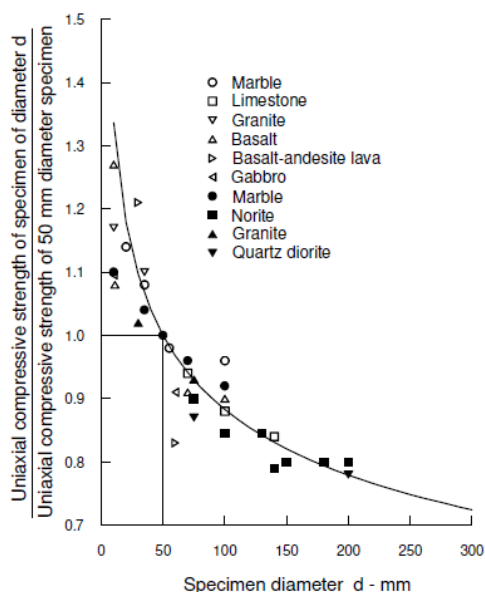
شکل ۱: مراحل ارزیابی تأثیر اندازه نمونه و اندازه دانه بندی بر مقاومت فشاری تک محوره

۲- بررسی تحلیلی تئوری های تأثیر اندازه نمونه

تئوری های تأثیر اندازه نمونه روی مقاومت فشاری تک محوره را می توان به پنج روش، شامل روش های تجربی، آماری، مولتی فراکتال، نظریه شکست و نظریه شکست فراکتال تقسیم بندی کرد. در ادامه هر یک از این روش ها بررسی می شوند.

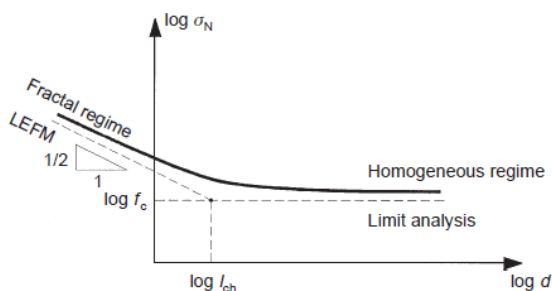
۲-۱- بررسی تجربی تأثیر اندازه نمونه (هوک و براون)

شکل ۲، تأثیر اندازه نمونه روی مقاومت نمونه های مختلف سنگ بکر را نشان می دهد که توسط هوک و براون (۱۹۸۰- مدل H-B) ارائه شده است. تأثیر اندازه نمونه روی مقاومت، با رابطه ۱ نشان داده شده است. در این رابطه، σ_{cd} ، مقاومت فشاری نمونه های با قطر ۱۰ تا ۲۰۰ میلی متر و σ_{c50} ، مقاومت فشاری نمونه با قطر ۵۰ میلی متر است.



شکل ۲: تأثیر اندازه نمونه روی مقاومت فشاری تک محوره سنگ بکر [۴۲]

$$\sigma_{cd} = \sigma_{c50} \left(\frac{50}{d}\right)^{0.18} \quad (1)$$



شکل ۳: تأثیرات مقیاس بر طبق مدل مقیاس مولتی فراکتال [۴۷]

۲-۴- بررسی تأثیر اندازه نمونه با استفاده از نظریه شکست

بازانت با بررسی تعادل انرژی در انتشار ترک، دو مدل تأثیر اندازه نمونه را برای ساختارهای هندسی مشابه با اندازه‌های مختلف در بتن استنتاج کرد [۲۲، ۳۵]. نوع I تأثیر اندازه بازانت (SEL-I) در ساختارهایی که در آغاز تشکیل ترک با یک سطح صاف می‌شکنند، به کار می‌رود و نوع II تأثیر اندازه (SEL-II)، هنگامی به کار می‌رود که یک ساختار نیمه شکننده، یک شکاف عمیق یا یک ترک عاری از تنش بزرگ، قبل از رسیدن به بار بیشینه داشته باشد [۳۴، ۳۷]. بیان تحلیلی مدل تأثیر اندازه SEL-II، توسط رابطه ۵ و SEL-I توسط رابطه‌های ۶ و ۷ نشان داده می‌شود:

$$\sigma_N = P/bD = Bf_c^{\infty} (1 + D/D_0)^{-1/2} \quad (5)$$

که σ_N : مقاومت اسمی، P : بار بیشینه، b : ضخامت نمونه، D : قطر نمونه، f_c^{∞} : یک پارامتر مقاومت، B و D_0 : پارامترهایی که وابسته به هندسه ساختار هستند و با تطبیق دادن (fitting) اطلاعات تجربی تعیین می‌شوند [۸، ۳۷، ۴۷].

$$\sigma_N = f_r^{\infty} [(l_s/(D + l_s))^{rn/m} + (rD_b/(D + l_p))]^{1/r} \quad (6)$$

$$\text{If } m \rightarrow \infty, \sigma_N = f_r^{\infty} [1 + (rD_b/(D + l_p))]^{1/r} \quad (7)$$

که f_r^{∞} ، D_b ، n ، m و r ثابت‌هایی مثبت اند برای نمونه‌هایی که از لحاظ هندسی مشابه هستند. f_r^{∞} : مقاومت اسمی برای یک ساختار خیلی بزرگ، D : اندازه مشخصه ساختار، l_s : طول مشخصه مرتبه دوم و l_p : طول مشخصه مواد است که نشان دهنده اندازه المان حجمی معرف در مواد نیمه شکننده است. رابطه ۶، برای قطرهای کوچک به رابطه ۷ و برای قطرهای بزرگ به تئوری تأثیر اندازه ویبول (رابطه ۲) میل می‌کند [۳۶، ۳۷]. مدل بازانت برای مواد شبه شکننده و شکننده همچون سنگ و بتن مناسب است [۴].

رابطه ۱، روند کاهشی مقاومت فشاری با افزایش قطر را نشان می‌دهد [۶]، همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، این مطالعه در سنگ‌های سخت مانند گرانیت، بازالت و دیوریت انجام شده است. باید توجه داشت که نیاز به بررسی تأثیر مقیاس در سنگ‌های نرم و نمونه‌های بزرگ‌تر وجود دارد [۲].

۲-۲- بیان تأثیر مقیاس با تئوری آماری ویبول

ویبول، برای تعیین مقاومت به صورت تابعی از اندازه نمونه، توزیع آماری را پیشنهاد کرد که با استفاده از آن می‌توان تأثیر اندازه نمونه را به وسیله پراکندگی نتایج داده‌های تجربی پیش‌بینی کرد (رابطه ۲):

$$P_f(\sigma_N) = 1 - \exp[-\int_V C(\sigma(x), \sigma_N) dV(x)] \quad (2)$$

در این رابطه σ : تانسور تنش القا شده توسط بار مربوط به تنش اسمی σ_N است، x : بردار مختصاتی، V : حجم ساختار و $C(\sigma)$: تابعی است که تمرکز فضایی احتمال شکست مواد را نشان می‌دهد [۴۳، ۴۴].

ویبول فرض کرد که احتمال شکست یک جسم جامدی که از ذرات کوچک‌تر ساخته شده است، تابعی از حجم آن است (رابطه ۳):

$$m \log(\sigma_c/\sigma_{c0}) = \log(V0/V) \quad (3)$$

که V : حجم نمونه، m : ثابت مواد که ضریب یکنواختی نامیده می‌شود و $V0$: حجم نمونه ای با اندازه استاندارد است. رابطه ۳ نشان می‌دهد، نسبت مقاومت جامدات، تنها وابسته به نسبت حجم آنها است [۴۵، ۴۶].

۲-۳- مدل مقیاس مولتی فراکتال

بر طبق مفهوم مولتی فراکتال، کاربرینتری و همکاران، یک مدل تحلیلی برای بررسی تأثیر اندازه، مطابق رابطه ۴، که به عنوان مدل مقیاس مولتی فراکتال (MFSL) شناخته می‌شود، پیشنهاد کردند (شکل ۳):

$$\sigma_N = f_c(1 + l_{ch}/D)^{1/2} \quad (4)$$

که σ_N : مقاومت نرمال، D : قطر نمونه و f_c و l_{ch} : ثابت‌هایی هستند که به ترتیب مقاومت فشاری نمونه بزرگ نامحدود و طول داخلی مواد را نشان می‌دهد [۴۷]. کاربرینتری، چپایا و فرو [۲۰، ۲۱]، با بررسی روی اطلاعات تجربی موجود، نشان دادند که مدل MFSL، مقاومت ساختارهای بدون شکاف (notch) را به خوبی تخمین می‌زند [۴۳].

نمونه های مصنوعی، دو مطالعه موازی با یکدیگر انجام شد. ابتدا، نتایج مطالعات آزمایشگاهی انجام شده توسط پژوهشگران مختلف جمع آوری شد. در سنگ های رسوبی، سه نوع سنگ آهک و سه نوع ماسه سنگ و در نمونه های مصنوعی نیز یک نوع بتن با سه نسبت مختلف آب به سیمان (W/C) و یک نوع پلاستر مطالعه شد. تعداد نمونه های سنگ های رسوبی ۴۵ نمونه سنگ آهک با قطر ۲۵ تا ۵۷۵ میلی متر و ۱۶ نمونه ماسه سنگ با قطر ۱۸ تا ۱۴۶ میلی متر و تعداد نمونه های بتنی، ۲۰ نمونه بتنی با قطر ۵۱ تا ۶۱۰ میلی متر و یک نمونه پلاستر با قطر ۲۵ تا ۱۵۲ میلی متر است. جدول ۱، خلاصه ای از مشخصات نمونه های مطالعه شده را نشان می دهد. سپس، در مطالعه تجربی، ۸۴ نمونه با قطرهای ۵۶، ۶۸، ۷۲ و ۹۴ میلی متر با نسبت ارتفاع به قطر ۲/۱ و با سه دانه بندی مختلف ۰-۱۲، ۰-۲۰ و ۰-۲۵ میلی متر ساخته شد. در ادامه، با استفاده از مدل های تأثیر اندازه نمونه، روند تغییرات مقاومت فشاری سنگ های رسوبی و نمونه های مصنوعی نسبت به تغییرات قطر پیش بینی می شود و میزان مطابقت آن با اطلاعات آزمایشگاهی قبلی تحلیل خواهد شد.

۲-۵- مدل تأثیر اندازه با استفاده از نظریه شکست فراکتال بازانت، از نظریه شکست فراکتال برای تعیین مقاومت اسمی نمونه استفاده کرد و مدل تأثیر اندازه با استفاده از نظریه شکست فراکتال (FFSEL) را پیشنهاد کرد:

$$\sigma_N = (\sigma_0 D^{(d_f-1)/2}) (1 + (D/D_0))^{-1/2} \quad (8)$$

که σ_0 : مقاومت نمونه ای با اندازه بسیار کم که ممکن است به صورت مقاومت ذاتی بیان شود، d_f : بعد فراکتال و سایر ثابت ها، قبلاً تعریف شده اند. معمولاً ساختار مدل های SEL-II و FFSEL خیلی مشابه هستند. برای تعیین σ_0 و d_f در FFSEL لازم است ابتدا D_0 از مدل SEL-II تعیین شود، سپس σ_0 و d_f برای FFSEL محاسبه شود. برای اندازه هایی که خصوصیات غیرفراکتال دارند، $d_f = 1$ است و مدل FFSEL همان مدل SEL-II می شود که در آن $\sigma_0 = Bf_t^4$ است [۴].

۳- تأثیر مقیاس روی مقاومت فشاری نمونه های سنگی و بتنی

به منظور مطالعه تأثیر اندازه نمونه و اندازه دانه بندی بر روی مقاومت فشاری تک محوره سنگ های رسوبی و

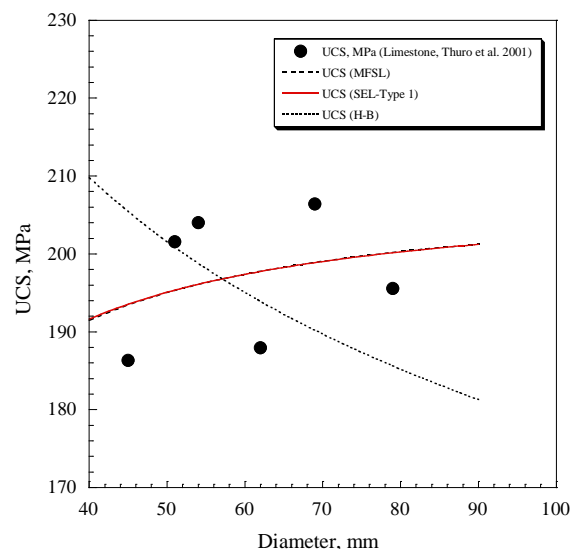
جدول ۱: مطالعات انجام شده روی تأثیر اندازه نمونه بر مقاومت فشاری تک محوره سنگ های رسوبی و نمونه های مصنوعی

مرجع	مقاومت فشاری تک محوره (MPa)	قطر (mm)	تعداد نمونه ها	نوع نمونه	طبقه بندی نمونه
Natau et al. (۱۹۸۳)	۹۸-۲	۵۷۵-۶۱	۳۳	سنگ آهک	
Thuro et al. (۲۰۰۱)	۲۰۶-۱۸۶	۷۹-۴۵	۶	سنگ آهک	
Hoskins and Horino (۱۹۶۹)	۵۲-۴۸	۱۵۰-۲۵	۶	سنگ آهک کانزاس	سنگ های رسوبی
Pells (۲۰۰۴)	۳۱-۲۵	۱۴۴-۱۸	۴	ماسه سنگ هوکسبری	
Masoumi et al. (۲۰۱۴)	۵۹-۳۵	۱۴۶-۱۹	۸	ماسه سنگ گوسفرد	
Hoskins and Horino (۱۹۶۹)	۱۷۱-۱۶۷	۱۰۰-۲۵	۴	ماسه سنگ لانگمونت	
Blanks and McNamara (۱۹۳۵)	۲۸-۲۳	۹۱۴-۷۶	۷	بتن (w/c=۰/۵۳)	
Blanks and McNamara (۱۹۳۵)	۲۹-۲۳	۴۵۷-۵۱	۶	بتن (w/c=۰/۵۴)	نمونه های مصنوعی
Blanks and McNamara (۱۹۳۵)	۲۸-۲۲	۶۱۰-۵۱	۷	بتن (w/c=۰/۵۵)	
Hoskins and Horino (۱۹۶۹)	۳/۶-۴	۱۵۲-۲۵	۶	پلاستر پاریس	

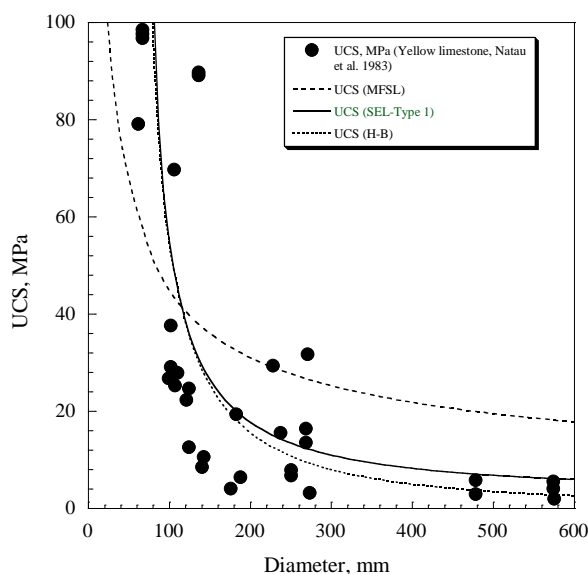
۳-۱- تأثیر اندازه نمونه روی مقاومت فشاری سنگ‌های رسوبی

ناتاو و همکاران، با بررسی ۳۳ نمونه سنگ آهک با قطرهای ۶۱ تا ۵۷۵ میلی‌متر نشان دادند، با افزایش قطر نمونه‌ها، مقاومت فشاری تک‌محوره کاهش می‌یابد [۴۸]. از آنجا که این نمونه‌ها و سایر سنگ‌های رسوبی این مطالعه بدون شکاف هستند، بنابراین در تحلیل‌های آماری، از مدل I تأثیر اندازه نمونه با استفاده از نظریه شکست (SEL-I) استفاده شد. اطلاعات آزمایشگاهی و نتایج به دست آمده از تحلیل‌های آماری انجام شده با سه مدل MFSL، SEL-I و H-B در شکل ۴ نشان داده شده است. ثابت‌های دو مدل MFSL و SEL-I با استفاده از الگوریتم عددی حداقل مربعات غیر خطی با روش رگرسیون غیر خطی لونیبرگ-مارکوارت و با استفاده از نرم‌افزار SPSS تعیین شدند. ضریب R^2 دو مدل H-B و SEL-I برابر ۰/۶۳ است و مقدار این ضریب برای مدل MFSL برابر ۰/۳۷ است.

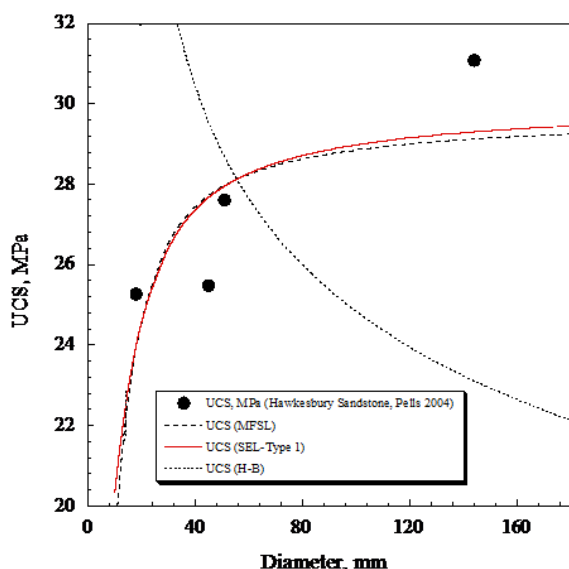
۱۸ تا ۱۴۴ میلی‌متر را تحت آزمایش تک‌محوره قرار داد [۱۳]. نتایج تحلیل‌های آماری نشان داد، روند تغییرات مقاومت فشاری نسبت به قطر نمونه در آزمایش‌های تجربی با مدل H-B متفاوت است. اطلاعات آزمایشگاهی و نتایج به دست آمده از سه مدل MFSL، SEL-I و H-B، در شکل ۶ نشان داده شده است. در این نمونه‌ها، مدل SEL-I همبستگی بهتری با نتایج آزمایشگاهی دارد.



شکل ۵: پیش‌بینی تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوره در مقابل اندازه نمونه در نمونه‌های سنگ آهک با استفاده از سه مدل تأثیر اندازه H-B و SEL-I، MFSL

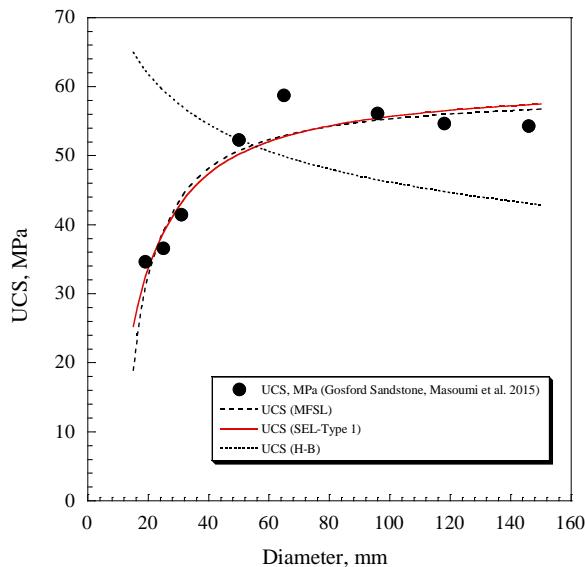


شکل ۴: پیش‌بینی تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوره در مقابل اندازه نمونه در نمونه‌های سنگ آهک با استفاده از سه مدل تأثیر اندازه H-B و SEL-I، MFSL

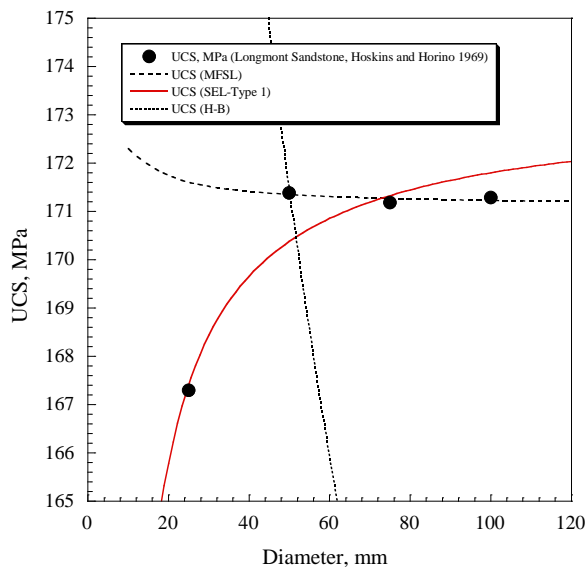


شکل ۶: پیش‌بینی تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوره در مقابل اندازه نمونه در ماسه سنگ هوکسبری با استفاده از سه مدل تأثیر اندازه H-B و SEL-I، MFSL

ثرو و همکاران، آهک دانه ریز تا دانه متوسط را تحت آزمایش تک‌محوره قرار دادند [۱۲]. نتایج به دست آمده از آزمایش‌های تک‌محوره روی سنگ آهک با قطرهای ۴۵ تا ۷۹ میلی‌متر در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود روند خاصی در نتایج به دست آمده وجود ندارد. پلز، نمونه‌هایی از ماسه سنگ هوکسبری با قطرهای



شکل ۷: پیش بینی تغییرات مقاومت فشاری تک محوره در مقابل اندازه نمونه در ماسه سنگ گسفرد با استفاده از سه مدل تأثیر اندازه H-B و SEL-I, MFSL



شکل ۸: پیش بینی تغییرات مقاومت فشاری تک محوره در مقابل اندازه نمونه در ماسه سنگ لانگمونت با استفاده از سه مدل تأثیر اندازه H-B و SEL-I, MFSL

۲-۳- تأثیر اندازه دانه ها روی مقاومت فشاری نمونه های مصنوعی

بلنکز و مک نامارا، تعدادی نمونه بتنی با نسبت های مختلف آب به سیمان و با قطرهای ۵۱ تا ۹۱۴ میلی متر را تحت آزمایش تک محوره قرار دادند [۵۱]. شکل ۱۰، نتایج این آزمایش های تجربی به اضافه پیش بینی تئوری های مختلف تأثیر اندازه را نشان می دهد. همان طور که مشاهده

هوکینز، با بررسی سنگ های رسوبی نشان داد در قطرهای بزرگ تر یا کوچک تر از اندازه خاصی مقاومت کاهش می یابد [۱۷]. روند افزایشی و کاهشی مقاومت در اندازه های مختلف در ابتدا توسط هوکینز و هورینو [۴۹]، گزارش شده بود. بعداً وتوکوری و همکاران، بیان کردند که دو مکانیزم مؤثر تأثیر اندازه در آزمایش های فشاری تک محوره به صورت همزمان وجود دارد.

اولین مکانیزم، مفهوم رایج تأثیر اندازه بر مقاومت است که کاهش مقاومت را با افزایش اندازه نشان می دهد و متناسب با مدل های کاهشی قبلی است. مکانیزم دوم مرتبط با عیب و نقص های سطحی یا عیب های ایجاد شده هنگام آماده سازی نمونه است که منجر به افزایش مقاومت با افزایش اندازه نمونه می شود [۵۰]. معصومی و همکاران، با ارائه مدل جدیدی با عنوان مدل یکپارچه تأثیر اندازه (USEL) برای پیش بینی روندهای افزایشی-کاهشی مقاومت تأیید کردند که ممکن است هر دو مورد عیب های سطحی نمونه و شکست فراکتال، در افزایش مقاومت با افزایش اندازه برای نمونه های کوچک نقش داشته باشند. شکل ۷، این روند افزایشی-کاهشی مقاومت را در ماسه سنگ گسفرد نشان می دهد [۴]. باید توجه نمود که برای استفاده از مدل USEL، محدوده اندازه نمونه ها در بالا و پایین قطر تقاطع، یعنی جایی که بیشینه مقاومت مشاهده شده است، باید به اندازه کافی عریض باشد، اما اکثر اوقات به دلیل کاهش هزینه ها، اطلاعات محدودی برای پیش بینی تأثیر اندازه روی مقاومت وجود دارد. برای نمونه در شکل های ۸ و ۹ که مربوط به ماسه سنگ لانگمونت و سنگ آهک کانزاس است [۴۹]، داده های محدودی برای نمونه های با قطر بزرگ وجود دارد. به علاوه این روندهای افزایشی-کاهشی در سنگ های خاصی دیده شده است. بنابراین در همه سنگ ها، امکان کاربرد مدل USEL برای پیش بینی تأثیر اندازه نمونه روی مقاومت وجود ندارد.

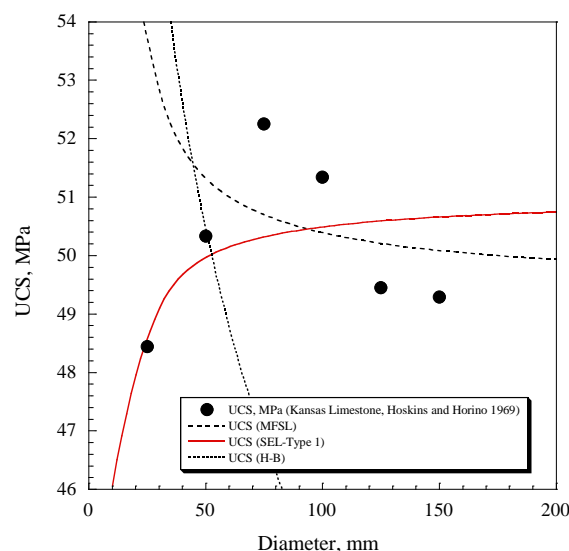
ضریب (R^2) هر یک از مدل های H- و SEL-I, MFSL و B برای انواع سنگ های رسوبی در جدول ۲ ذکر شده است. همان طور که مشاهده می شود، در بین تئوری های مختلف در انواع سنگ های رسوبی، مدل SEL-I، همبستگی بهتری با نتایج آزمایش های آزمایشگاهی دارد.

می‌شود، با افزایش قطر نمونه‌ها، مقاومت کاهش می‌یابد. دادند (شکل ۱۱) [۴۹]. بررسی مدل‌های مختلف نشان می‌دهد، مقادیر ضرائب R^2 در این نمونه‌ها خیلی نزدیک به یکدیگر هستند. هوسکینز و هورینو، نمونه‌هایی با قطرهای ۲۵ تا ۱۵۲ میلی‌متر از پلاستر پاریس را تحت آزمایش تک‌محوره قرار

جدول ۲: مقادیر ضریب (R^2) به دست آمده از تحلیل‌های آماری برای مدل‌های MFSL، SEL-I و H-B در انواع سنگ‌های رسوبی

مرجع	نوع نمونه	MFSL	SEL-I	H-B
		R^2	R^2	R^2
Natau et al. (۱۹۸۳)	سنگ آهک	۰/۳۷	۰/۶۳	۰/۶۳
Thuro et al. (۲۰۰۱)	سنگ آهک	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۷
Hoskins and Horino (۱۹۶۹)	سنگ آهک کانزاس	۰/۱۴	۰/۲۰	۰/۰۹
Pells (۲۰۰۴)	ماسه سنگ هوسکبری	۰/۵۵	۰/۵۹	۰/۷۹
Masoumi et al. (۲۰۱۵)	ماسه سنگ گسگرد	۰/۸۸	۰/۸۹	۰/۸۱
Hoskins and Horino (۱۹۶۹)	ماسه سنگ لانگمونت	۰/۳۷	۰/۸۹	۰/۷۸

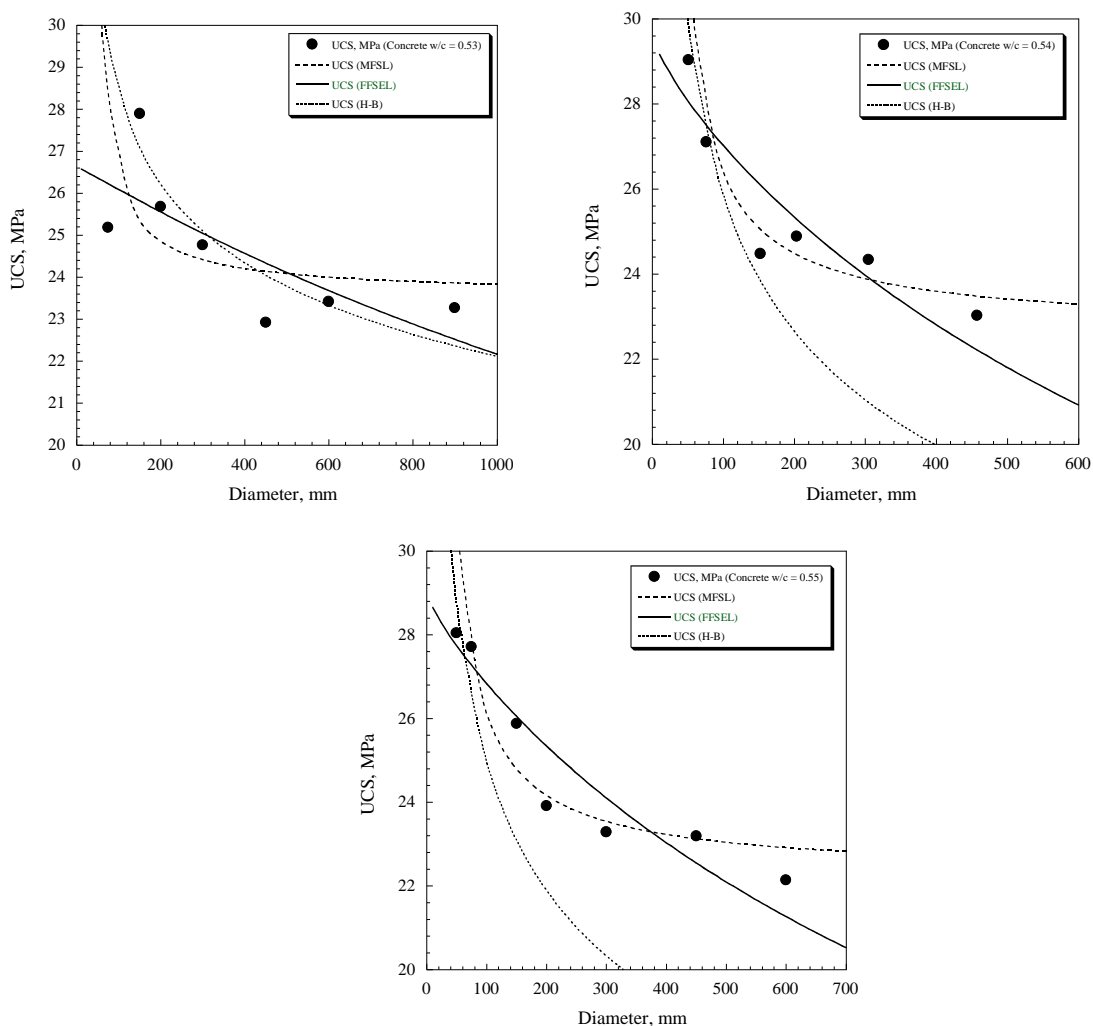
از آنجا که نمونه‌های مورد مطالعه توسط بلنکز و مک نامارا و نیز هوسکینز و هورینو، شکاف داشتند، بنابراین در تحلیل آماری این نمونه‌ها، از مدل II تأثیر اندازه نمونه با استفاده از نظریه شکست (SEL-II) استفاده شد. همچنین با توجه به اینکه هندسه فراکتال، پدیده‌های فیزیکی را بهتر توصیف می‌کند، بنابراین از مدل تأثیر اندازه با استفاده از نظریه شکست فراکتال (FFSEL) استفاده شد. ضریب (R^2) هر یک از مدل‌های MFSL، FFSEL و H-B برای انواع نمونه‌های مصنوعی در جدول ۳ ذکر شده است. مدل H-B مقادیر بالایی از ضرائب R^2 را نشان می‌دهد، اما این مدل برای نمونه‌های با قطرهای بزرگ، محافظه کارانه است، در این قطرها، مدل مولتی فراکتال همبستگی بهتری با نتایج اطلاعات آزمایشگاهی دارد (شکل‌های ۱۰ و ۱۱).



شکل ۹: پیش‌بینی تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوره در مقابل اندازه نمونه در سنگ آهک کانزاس با استفاده از سه مدل تأثیر اندازه MFSL، SEL-I و H-B

جدول ۳: مقادیر ضریب (R^2) به دست آمده از تحلیل‌های آماری برای مدل‌های MFSL، FFSEL و H-B در انواع نمونه‌های مصنوعی

مرجع	نوع نمونه	MFSL	FFSEL	H-B
		R^2	R^2	R^2
Blanks and McNamara (۱۹۳۵)	بتن با $(w/c) = ۰/۵۳$	۰/۳۱	۰/۵۵	۰/۵۰
Blanks and McNamara (۱۹۳۵)	بتن با $(w/c) = ۰/۵۴$	۰/۹۶	۰/۸۰	۰/۹۳
Blanks and McNamara (۱۹۳۵)	بتن با $(w/c) = ۰/۵۵$	۰/۸۹	۰/۸۷	۰/۹۵
Hoskins and Horino (۱۹۶۹)	پلاستر پاریس	۰/۹۵	۰/۹۴	۰/۹۷



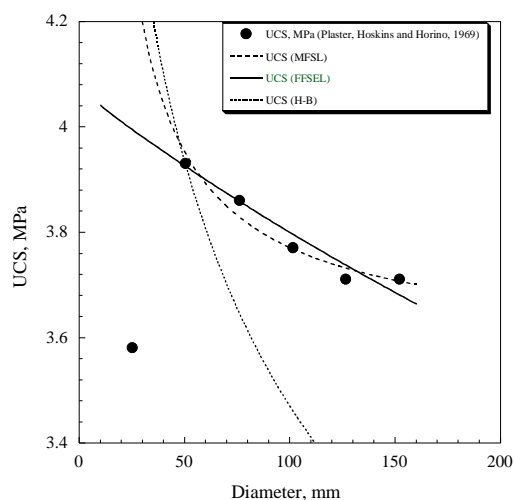
شکل ۱۰: پیش بینی تغییرات مقاومت فشاری تک محوره در مقابل اندازه نمونه در نمونه های بتنی با نسبت های مختلف آب به سیمان

H-B و FFSEL, MFSL, با استفاده از سه مدل تأثیر اندازه $w/c = 0.53, 0.54, 0.55$

۴- مطالعه تجربی

۴-۱- آماده سازی نمونه ها

به منظور بررسی تأثیر اندازه نمونه و ابعاد دانه بندی بر مقاومت فشاری تک محوره نمونه های بتنی، تعداد سه بلوک بتنی با ابعاد $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ و با سه دانه بندی مختلف ساخته شد. پس از زمان عمل آوری بلوک های بتنی (۲۸ روز)، با استفاده از یک ماشین حفاری چرخشی مغزه گیر، نمونه های استوانه ای با قطرهای ۵۶، ۶۸، ۷۲ و ۹۴ میلی متر و با نسبت های طول به قطر ۲ طبق استاندارد ISRM [۵۲] تهیه شد (شکل ۱۲) [۵۳].



شکل ۱۱: پیش بینی تغییرات مقاومت فشاری تک محوره در مقابل اندازه نمونه در پلاستر پاریس با استفاده از سه مدل تأثیر اندازه

H-B و FFSEL, MFSL

در طرح اختلاط نمونه‌ها از استاندارد ACI-211 [۵۴] و برای دانه‌بندی سنگ دانه‌های مصرفی از استاندارد ASTM C33 [۵۵] استفاده شد. در این پژوهش از سه طرح اختلاط با ابعاد دانه‌های مختلف استفاده شده است. تفاوت هر یک از این طرح‌ها، تنها در اندازه شن مورد استفاده است. در ساخت نمونه‌ها، از مصالح سنگی با ابعاد ۰-۱۲، ۰-۲۰ و ۰-۲۵ میلی‌متر استفاده شد. طرح اختلاط به کار رفته در ساخت نمونه‌ها در جدول ۴، ارائه شده است [۵۳].



شکل ۱۲: تعدادی از نمونه‌های استوانه‌ای مغزه‌گیری شده با قطرهای مختلف، آماده شده برای انجام آزمایش فشاری تک‌محوره [۵۳]

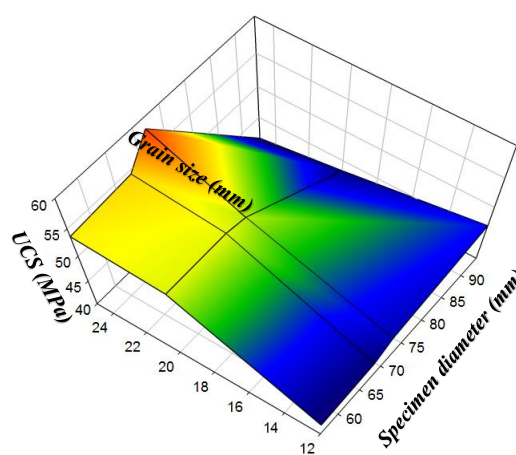
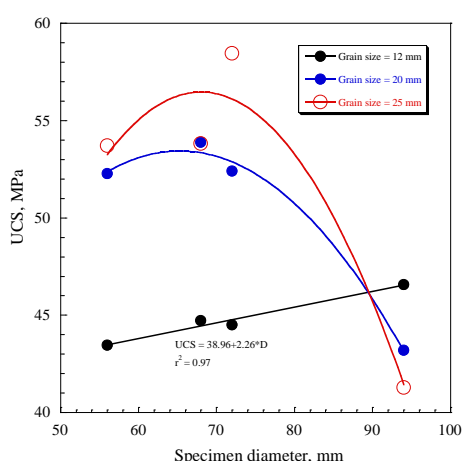
جدول ۴: طرح اختلاط مورد استفاده در ساخت نمونه‌های بتنی [۵۳]

شماره بلوک	Gravel ($\frac{kg}{m^3}$)	Sand ($\frac{kg}{m^3}$)	Cement ($\frac{kg}{m^3}$)	Super Lubricant ($\frac{kg}{m^3}$)	Water ($\frac{kg}{m^3}$)
۱	۸۵۰	۸۳۰	۴۵۰	۵	۱۷۵
۲	۹۵۰	۷۷۰	۴۵۰	۵	۱۷۵
۳	۱۰۵۰	۷۰۵	۴۵۰	۵	۱۷۵

سنگدانه‌های ۰-۱۲، ۰-۲۰ و ۰-۲۵ میلی‌متری در شکل ۱۳ ترسیم شده است. نتایج آزمایش‌های فشاری تک‌محوره روی نمونه‌هایی با قطرهای مختلف نشان داد، مشابه مطالعات انجام شده توسط بلنکر و مک نامارا روی ۲۰ نمونه بتنی با قطرهای مختلف در سه نسبت آب به سیمان و دارلینگتون و همکاران روی ۲۹ نمونه بتنی در قطرهای مختلف، مدل مقیاس مولتی فراکتال، همبستگی بهتری با اطلاعات آزمایشگاهی دارد.

۲-۴- نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوره

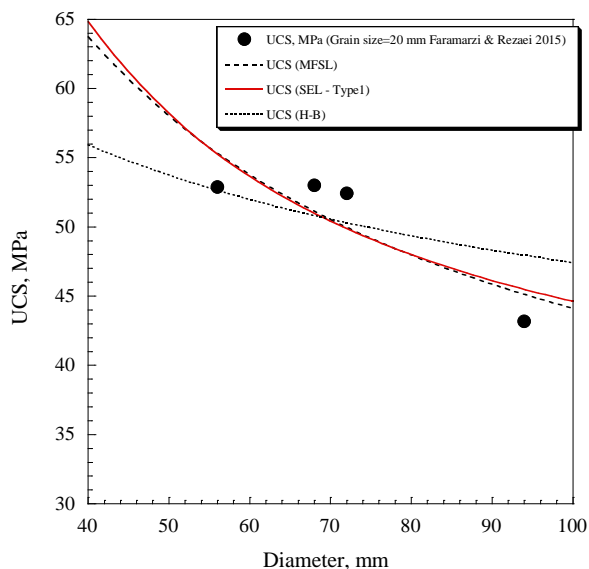
آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوره بر نمونه‌هایی با نسبت طول به قطر ۲ انجام شد. نرخ تنش اعمالی بین ۵-۱۰ MPa/s بود. آزمایش‌ها، حداقل ۳ و حداکثر ۱۰ مرتبه تکرار شده و از نتایج به دست آمده میانگین گرفته شد. نمودار دو و سه بعدی تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوره نسبت به قطر نمونه‌ها به صورت مجزا برای هر یک از



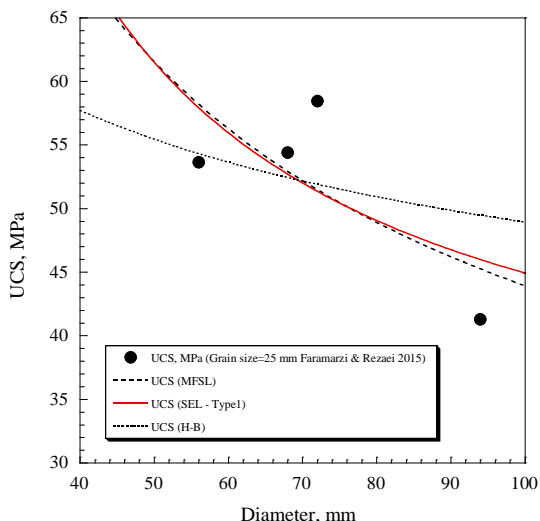
شکل ۱۳: نمودار دو و سه بعدی تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوره نسبت به قطر نمونه‌ها در نمونه‌هایی با ابعاد دانه بندی ۰-۱۲، ۰-۲۰ و ۰-۲۵ میلی‌متر [۵۳]

نمونه از ۶۳/۵ تا ۳۰۰ میلی‌متر، مقاومت فشاری حدود ۱۰ درصد کاهش می‌یابد، اما در این مطالعه، در نمونه‌های با

مطالعه انجام شده توسط دارلینگتون و همکاران، روی ۲۹ نمونه بتنی در قطرهای مختلف نشان داد، با افزایش قطر



شکل ۱۵: پیش بینی تغییرات مقاومت فشاری تک محوره در مقابل اندازه نمونه در نمونه های بتنی با اندازه دانه بندی ۰-۲۰ میلی متر با استفاده از سه مدل تأثیر اندازه MFSL، SEL-I و H-B



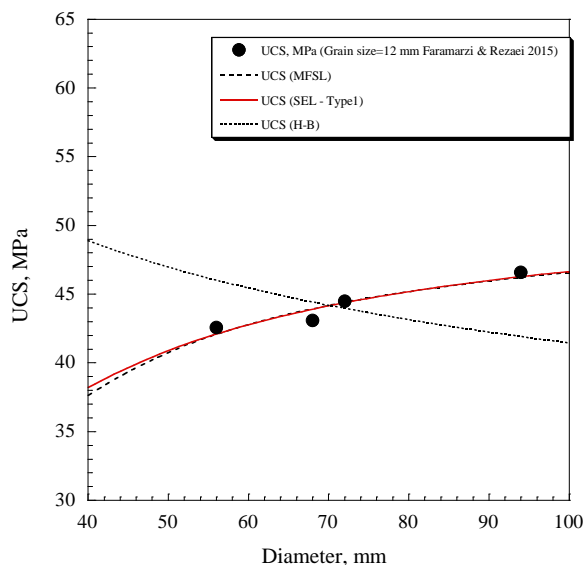
شکل ۱۶: پیش بینی تغییرات مقاومت فشاری تک محوره در مقابل اندازه نمونه در نمونه های بتنی با اندازه دانه بندی ۰-۲۵ میلی متر با استفاده از سه مدل تأثیر اندازه MFSL، SEL-I و H-B

۵- نتیجه گیری

وابستگی مقاومت فشاری به اندازه نمونه، نقش اساسی در طراحی سازه های سنگی دارد. در مطالعات قبلی انجام شده روی تأثیر اندازه نمونه بر مقاومت فشاری تک محوره، تاکنون از مدل تأثیر اندازه نمونه با استفاده از نظریه شکست و نیز مدل تأثیر اندازه نمونه با استفاده از نظریه شکست فراکتال، در پیش بینی مقاومت فشاری تک محوره نمونه ها

دانه بندی ۰-۲۰ و ۰-۲۵ میلی متر، مشابه نظر بلنکز و مک نامارا، هوکینز و نیز معصومی و همکاران، مقاومت فشاری تک محوره، ابتدا روند افزایشی و سپس روند کاهشی را دنبال می کند. برای نمونه، آزمایش های تک محوره در نمونه هایی با دانه بندی ۰-۲۰ میلی متر نشان داد، در قطرهای ۵۶ تا ۶۸ میلی متر، مقاومت فشاری تک محوره ابتدا حدود ۰/۵ درصد افزایش و سپس از قطر ۶۸ تا ۹۴ میلی متر حدود ۱۹ درصد کاهش می یابد. همچنین در نمونه های با دانه بندی ۰-۱۲ میلی متر، مشابه مطالعات انجام شده توسط یوکی و همکاران [۴۱] و پلز [۱۳]، به ترتیب روی نمونه های توف و ماسه سنگ، مقاومت فشاری از قطر ۵۶ تا ۹۴ میلی متر افزایش می یابد.

شکل های ۱۴، ۱۵ و ۱۶، نتایج یافته های مطالعه اخیر را نشان می دهند. در مورد نمونه های بتنی با دانه بندی ۰-۱۲ میلی متر، مدل های MFSL و SEL-I، روند صعودی تغییرات مقاومت را به خوبی نشان می دهند. همچنین در نمونه های با دانه بندی ۰-۲۰ و ۰-۲۵ میلی متر، مدل MFSL بیشترین ضریب R^2 را نشان داد (به ترتیب $R^2 = ۰/۷۲$ و $R^2 = ۰/۴۷$). در جدول ۵، خلاصه نتایج مطالعه تجربی ذکر شده است. همانطور که مشاهده می شود، با افزایش ابعاد دانه ها، مقدار این ضریب برای مدل های مختلف کاهش می یابد.



شکل ۱۴: پیش بینی تغییرات مقاومت فشاری تک محوره در مقابل اندازه نمونه در نمونه های بتنی با اندازه دانه بندی ۰-۱۲ میلی متر با استفاده از سه مدل تأثیر اندازه MFSL، SEL-I و H-B

بتنی، تاکنون بررسی‌های قابل توجهی انجام نشده و مدل مناسب تأثیر اندازه نمونه در سنگ‌های مختلف مشخص نشده است.

در قطرهای مختلف استفاده نشده بود. همچنین تأثیر اندازه دانه‌بندی روی پیش‌بینی‌های مدل‌های تأثیر اندازه نمونه مشخص نشده بود. به علاوه برای مشخص کردن حوزه کاربرد تئوری‌های تأثیر اندازه نمونه بر روی نمونه‌های سنگی و

جدول ۵: مقادیر ضریب (R^2) به دست آمده از تحلیل‌های آماری برای مدل‌های MFSL، SEL-I و H-B در مطالعه تجربی انجام شده

نوع نمونه	MFSL	SEL- I	H-B
	R^2	R^2	R^2
Concrete (Grain size = ۱۲-۰ mm)	۰/۸۹	۰/۹۰	۰/۲۹
Concrete (Grain size = ۰-۲۰ mm)	۰/۷۲	۰/۶۹	۰/۵۴
Concrete (Grain size = ۰-۲۵ mm)	۰/۴۷	۰/۴۳	۰/۳۱

دانه‌بندی‌های ۰-۲۰ و ۰-۲۵ میلی‌متر، با افزایش قطر، مقاومت فشاری تک‌محوره، ابتدا روند افزایشی و سپس روند کاهشی دارد. در نمونه‌های با دانه‌بندی ۰-۱۲ میلی‌متر، مقاومت فشاری، یک روند افزایشی با افزایش قطر نشان داد. در نمونه‌های بتنی با دانه‌بندی ریز، مدل‌های مولتی فراکتال و تأثیر اندازه با استفاده از نظریه شکست، روند صعودی تغییرات مقاومت را به خوبی نشان دادند. همچنین در نمونه‌های با دانه‌بندی درشت، مدل مولتی فراکتال، بیش‌ترین ضرایب R^2 را نشان داد.

مطالعه انجام شده روی نمونه‌های بتنی با دانه‌بندی مختلف نشان داد، ابعاد دانه‌بندی، تأثیر زیادی روی مقاومت و رفتار مقاومتی دارد. با افزایش ابعاد دانه‌ها، ضرایب R^2 در مدل‌های مختلف پیش‌بینی تأثیر اندازه روی مقاومت، کاهش یافت. همچنین، در سنگ‌های رسوبی، مدل تأثیر اندازه نمونه با استفاده از نظریه شکست و در نمونه‌های بتنی، مدل مولتی فراکتال، همبستگی بیشتری با نتایج آزمایشگاهی نشان دادند.

مراجع

- [1] Masoumi, H., Douglas, K. J., & Russell, A. R. (2016). A bounding surface plasticity model for intact rock exhibiting size-dependent behavior. *Rock Mech. Rock Eng.*, 49, 47-62.
- [2] Yoshinaka, R., Osada, M., Park, H., Sasaki, T., & Sasaki, K. (2008). Practical determination of mechanical design parameters of intact rock considering scale effect. *Eng. Geol.*, 96(3-4), 173-186.

در این مقاله، تأثیر اندازه نمونه و تأثیر اندازه دانه‌بندی روی مقاومت فشاری تک‌محوره نمونه‌های سنگی و بتنی با استفاده از روش‌های آماری و تجربی بررسی شد. همچنین در این پژوهش برای اولین بار از مدل‌های تأثیر اندازه نمونه با استفاده از نظریه شکست و همچنین نظریه شکست فراکتال، در پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوره نمونه‌ها در قطرهای مختلف استفاده شد. به علاوه، تأثیر اندازه دانه‌بندی روی پیش‌بینی تئوری‌های تأثیر اندازه نمونه بر مقاومت فشاری با استفاده از نمونه‌های مصنوعی ساخته شده از بتن بررسی شد. بررسی‌های انجام شده در این مطالعه نشان داد، پیش‌بینی‌های تئوری‌های تأثیر اندازه نمونه روی مقاومت فشاری تک‌محوره وابسته به روش آزمایش تجربی، نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها و ناهمسانگردی نمونه‌ها است.

تحلیل آماری رگرسیون غیر خطی روی نتایج مطالعات پیشین آزمایش‌های تک‌محوره در نمونه سنگ‌های رسوبی در اندازه‌های مختلف نشان داد، بررسی تأثیر اندازه نمونه با استفاده از نظریه شکست، همبستگی خوبی با نتایج آزمایش‌های تجربی دارد. همچنین در نمونه‌های مصنوعی، مدل هوک و براون مقادیر بالایی از ضرایب R^2 را نشان داد، اما این مدل برای نمونه‌های با قطرهای بزرگ، محافظه کارانه است. در این قطرها، مدل مولتی فراکتال همبستگی بهتری با اطلاعات آزمایشگاهی دارد.

در مطالعه تجربی، ۸۴ نمونه بتنی با چهار قطر ۵۶، ۶۸، ۷۲ و ۹۴ میلی‌متر و با سه دانه‌بندی مختلف ۰-۱۲، ۰-۲۰ و ۰-۲۵ میلی‌متر ساخته شد. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوره روی نمونه‌های مختلف نشان داد، در

- [18] Thuro, K., Plinninger, R. J., Zah, S., & Schutz, S. (2001b). Scale effect in rock strength properties. Part 2: Point load test and point load strength index. In *Rock Mechanics- a challenge for Society*, Zeitlinger, Switzerland, 175-180.
- [19] Forbes, M., Masoumi, H., Saydam, S., & Hagan, P. (2015). Investigation into the effect of length to diameter ratio on the point load strength index of Gosford sandstone. In *49th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symp.*, American Rock Mechanics Association, San Francisco.
- [20] Andreev, G. E. (1991a). A review of the Brazilian test for rock tensile strength determination. Part I: Calculation formula. *Min. Sci. Tech.*, 13(3), 445-456.
- [21] Andreev, G. E. (1991b). A review of the Brazilian test for rock tensile strength determination. Part II: Contact conditions. *Min. Sci. Tech.*, 13(3), 457-465.
- [22] Butenuth, C. (1997). Comparison of tensile strength values of rocks determined by point load and direct tension tests. *Rock Mech. Rock Eng.*, 30(1), 65-72.
- [23] Elices, M., & Rocco, C. (1999). Size effect and boundary conditions in Brazilian test: Theoretical analysis. *Mater. Struct.*, 32(6), 437-444.
- [24] Çanakci, H., & Pala, M. (2007). Tensile strength of basalt from a neural network. *Eng. Geol.*, 94(1-2), 10-18.
- [25] Singh, M. M., & Huck, P. J. (1972). Large scale triaxial tests on rock. In the 14th US Symp. on *Rock Mech.*, Pennsylvania State Univ., 35-60.
- [26] Hunt, D. D. (1973). The Influence of Confining Pressure on Size Effect. Master of Science, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- [27] Medhurst, T. P., & Brown, E. T. (1998). A study of the mechanical behaviour of coal for pillar design. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 35(8), 1087-1105.
- [28] Aubertin, M., Li, L., & Simon, R. (2000). A multiaxial stress criterion for short and long term strength of isotropic rock media. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 37(8), 1169-1193.
- [29] Masoumi, H., Roshan, H., & Hagan, P. C. (2016). Size-dependent Hoek-Brown failure criterion. *Int. J. Geomech.*, 17(2), 1-12.
- [30] Weibull, W. (1939). A statistical theory of the strength of materials. *Ingeniors Vetenskaps Akademiens Handlingar*, 151, 1-29.
- [31] Bieniawski, Z. T. (1968). The effect of specimen size on compressive strength of coal. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 5, 325-335.
- [3] Poulsen, B. A., & Adhikary, D. P. (2013). A numerical study of the scale effect in coal strength. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 63, 62-71.
- [4] Masoumi, H., Saydam, S., & Hagan, P. C. (2015). Unified Size-Effect Law for Intact Rock. *Int. J. Geomech.*, 16(2), 1-15.
- [5] Weibull, W. (1951). A statistical distribution of function of wide applicability. *J. Appl. Mech.*, 18, 293-297.
- [6] Hoek, E., & Brown, E. T. (1980). *Underground excavations in rock*. Inst. Min. Metall., London, 527.
- [7] Bazant, Z. P., & ASCE, F. (1984). Size effect in blunt fracture: Concrete, rock, metal. *J. Eng. Mech.*, 110(4), 518-535.
- [8] Carpinteri, A., Chiaia, B., & Ferro, G. (1995). Size effects on nominal tensile strength of concrete structures: multifractality of material ligaments and dimensional transition from order to disorder. *Mater. Struct.*, 28(6), 311-317.
- [9] Bazant, Z. P. (1997). Scaling of quasibrittle fracture: Hypotheses of invasive and lacunar fractality, their critique and Weibull connection. *Int. J. Frac.*, 83(1), 41-65.
- [10] Mogi, K. (1962). The influence of dimensions of specimens on the fracture strength of rocks. *Bull. Earth Res. Inst.*, 40, 175-185.
- [11] Baecher, G. B., & Einstein, H. H. (1981). Size effect in rock testing. *Geophys. Res. Lett.*, 8(7), 671-674.
- [12] Thuro, K., Plinninger, R. J., Zah, S., & Schutz, S. (2001). Scale effects in rock strength properties. Part1: Unconfined compressive test and Brazilian test. *Rock mechanics-a challenge for society*, ISRM, Espoo, 169-174.
- [13] Pells, P. J. N. (2004). On the absence of size effects for substance strength of Hawkesbury Sandstone. *Aust. Geomech.*, 39, 79-83.
- [14] Darlington, W. J., & Ranjith, P. G. (2011). The effect of specimen size on strength and other properties in laboratory testing of rock and rock-like cementitious brittle materials. *Rock Mech. Rock Eng.*, 44(5), 513-529.
- [15] Bieniawski, Z. T. (1975). The point load test in geotechnical practice. *Eng. Geol.*, 9, 1-11.
- [16] Greminger, M. (1982). Experimental studies of the influence of rock anisotropy and size and shape effects in point-load testing. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 19, 241-246.
- [17] Hawkins, A. B. (1998). Aspects of rock strength. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 57, 17-30.

- concrete Specimens. *Mag. Concr. Res.*, 51(3), 217-225.
- [48] Natau, O., Frolich, B. O., & Mutschler, T. O. (1983). Recent development of the large scale triaxial test. In *ISRM Congress, Melbourne, A65-A74*.
- [49] Hoskins, J. R., & Horino, F. G. (1969). Influence of Spherical Head Size and Specimen Diameters on the Uniaxial Compressive Strength of Rocks. US Department of the Interior, Bureau of Mines, Washington.
- [50] Vutukuri, V. S., Lama, R. D., & Saluja, S. S. (1978). *Handbook on Mechanical Properties of Rocks*, Trans. Tech. Publications.
- [51] Blanks, R. F., & Mcnamara, C. C. (1935). Mass concrete tests in large cylinders. *J. Am. Concrete Inst.*, 31, 280-303.
- [52] ISRM. (2007). *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006*. Ulusay, R., & Hudson, J. A. (eds.), Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics, Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey.
- [53] Rezaee, H. (2015). *Experimental Evaluation of the Effect of Specimen and Grain Size on the Mechanical Properties and Fracture Behavior of Rock*, MSc Thesis, Isfahan University of Technology.
- [54] ACI (American Concrete Institute). (1988). *Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete*. 85(6), 583-593.
- [55] ASTM. (2003). *Standard Specification for Concrete Aggregates- C33-03*. Annual Book of ASTM Standards, 4(2).
- [32] Pretorius, J. P. G., & Se, M. (1972). Weakness correlation and the size effect in rock strength tests. *JS Afr. Inst. Min. Met.*, 12, 322-327.
- [33] Bazant, Z. P., & Oh, B. H. (1983). Crack band theory for fracture of concrete. *Mater. Struct.*, 16, 155-177.
- [34] Bazant, Z. P., & Chen, E. P. (1997). Scaling of structural failure. *Appl. Mech. Rev.*, 50(10), 593-627.
- [35] Bazant, Z. P., & Planas, J. (1998). *Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials*. CRC Press.
- [36] Griffith, A. A. (1924). The theory of rupture. In *1st Int. Congress of Applied Mech., Delft, Netherlands*, 55-63.
- [37] Adey, R. A., & Pusch, R. (1999). Scale dependency in rock strength. *Eng. Geol.*, 53, 251-258.
- [38] Bazant, Z. P., Lin, F. B., & Lippmann, H. (1993). Fracture energy release and size effect in borehole breakout. *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, 17, 1-14.
- [39] Carpinteri, A. (1994). Fractal nature of material microstructure and size effects on apparent mechanical properties. *Mech. Mater.*, 18, 89-101.
- [40] Carpinteri, A., & Mainardi, F. (1997). *Fractals and Fractional Calculus in Continuum Mechanics*. Springer.
- [41] Yuki, N., Aoto, S., Yoshinaka, R., Yoshihiro, O., & Terada, M. (1995). The scale and creep effect on the strength of welded tuff. In *Int. Workshop on Rock Foundation, Balkema, Tokyo*.
- [42] Hoek, E. (2000). *Rock Engineering Course Notes* by Evert Hoek.
- http://www.rocscience.com/education/hoeks_corner
- [43] Bazant, Z. P., & et al. (2004). RILEM TC QFS, Quasibrittle fracture scaling and size effect-Final report. *Mater. Struct.*, 37, 547-568.
- [44] Ovalle, C., Frossard, E., Dano, C., Hu, W., Maiolino, S., & Hicher, P. Y. (2014). The effect of size on the strength of coarse rock aggregates and large rockfill samples through experimental data. *Acta Mech.*, 225, 2199-2216.
- [45] Zhang, Q., Zhu, H., Zhang, L., & Ding, X. (2011). Study of scale effect on intact rock strength using particle flow modeling. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 48, 1320-1328.
- [46] Bazant, Z. P., & Xi, Y. (1991). Statistical size effect in quasi-brittle structures: II. Nonlocal theory. *ASCE J. Eng. Mech.*, 117(11), 2623-2640.
- [47] Carpinteri, A., Ferro, G., & Monetto, I. (1999). Scale effects in uniaxially compressed