نشریه مکانیک سنگ
Journal of Rock Mechanics
دوره دهم، شماره۲، تابستان۱۴۰۵، صفحه۱۰۲تا۱۲۴
https://doi.org/10.22034/IRSRM.2026.600913.1093



مطالعه آزمایشگاهی اثر ابعاد سنگدانه بر پارامترهای مقاومتی مصالح پایه سیمانی

رضا محسنی افخم[۱]؛ ابوالفضل فقیهی[۲]؛ جواد مشتاقی[۳]؛ هادی عطاپور[۴]*

۱- دانشکده مهندسی معدن، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۲- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.
۳- کارشناس دفتر فنی شرکت کانسار فرآمور ارس بنیان، اصفهان، ایران.
۴- دانشکده مهندسی علوم زمین معدن، دانشگاه صنعتی اراک، مرکزی، ایران.

دریافت : ۱۴۰۵/۰۵/۰۶؛ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۳۱

(*نویسنده مسئول:h.atapour@arakut.ac.ir)

چکیده

بتن و مواد شبه‌سنگی به‌عنوان یکی از پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی در جهان، به دلیل دسترسی آسان، هزینه تولید پایین و خواص مکانیکی مناسب، نقشی مهمی در ساخت سازه‌های عمرانی ازجمله پل‌ها، سدها و ساختمان‌ها دارند. باوجود تحقیقات گسترده، تأثیر دقیق مشخصات دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها بر رفتار مکانیکی مواد شبه‌سنگی، به‌ویژه در حالت‌های کششی و خمشی، هنوز به‌طور کامل بررسی نشده است. در این پژوهش، تأثیر اندازه دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها بر خواص مکانیکی مواد شبه‌سنگی از طریق مجموعه‌ای از آزمایش‌های کششی و خمشی بررسی شده است. چهار ترکیب متفاوت شامل دوغاب سیمانی بدون سنگ‌دانه (نوع ۱)، سیمان با پودر سنگ (نوع ۲)، سیمان با سنگ‌دانه‌های ریز (نوع ۳) و سیمان با سنگ‌دانه‌های ریز و درشت (نوع ۴)، برای تهیه نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور تحلیل دقیق رفتار مکانیکی، آزمایش‌های کشش غیرمستقیم برزیلی، خمش سه‌نقطه‌ای، خمش چهارنقطه‌ای و شاخص بار نقطه‌ای بر روی نمونه‌ها انجام شد. نتایج نشان داد که با تغییر ترکیب مخلوط‌ها از نوع ۱ به نوع ۴، مقاومت نمونه‌ها در آزمایش‌های انجام‌شده روند افزایشی داشت. در آزمایش برزیلی، مقاومت نمونه‌ها در مراحل متوالی تغییر ترکیب به‌ترتیب ۲۱، ۳۷ و ۵ درصد افزایش یافت. همچنین، مقاومت خمشی سه‌نقطه‌ای در سه مرحله متوالی به‌ترتیب ۸۲، ۷۶ و ۷۹ درصد و مقاومت خمشی چهارنقطه‌ای به‌ترتیب ۳۴، ۱۷ و ۳۴ درصد افزایش نشان داد. علاوه بر این، جابه‌جایی متناظر با بیشینه نیرو نیز در تمام آزمایش‌ها افزایش یافت. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که تغییر ترکیب و دانه‌بندی مصالح می‌تواند بر پاسخ مقاومتی مواد شبه‌سنگی تحت شرایط مختلف بارگذاری تأثیرگذار باشد. نوآوری این مطالعه در ارائه تحلیلی مقایسه‌ای از رفتار کششی و خمشی ترکیبات مختلف مواد شبه‌سنگی با استفاده از چهار روش آزمایشگاهی است که می‌تواند به شناخت بهتر رفتار مکانیکی این مصالح کمک کند.

واژگان کلیدی

مواد شبه‌سنگی، دانه‌بندی، مقاومت کششی غیرمستقیم، آزمایش خمش سه نقطه‌ای، آزمایش خمش چهار نقطه‌ای، شاخص بار نقطه‌ای

مقدمه

بتن و مواد شبه‌سنگی یکی از پرکاربردترین مصالح ساختمانی هستند که به دلیل هزینه تولید پایین و انعطاف‌پذیری بالا در طراحی، به‌طور گسترده در سازه‌های عمرانی مانند ساختمان‌ها، سدها و پل‌ها مورداستفاده قرار می‌گیرند [۱]. با تنوع بالایی که در انواع مواد شبه‌سنگی (مانند بتن معمولی، بتن سبک، بتن خودمتراکم و آمیزه‌های تزریق) وجود دارد و به دلیل ظرفیت باربری بالا و مقاومت در برابر شرایط محیطی، به یکی از مصالح پایدار و اقتصادی در ساخت‌وساز تبدیل‌شده

است [۳,۴]. مقاومت مواد شبه‌سنگی تحت تأثیر عواملی چون نسبت سیمان به آب، نسبت سیمان به سنگدانه، نسبت ملات به سنگدانه، و همچنین شکل، مقاومت و اندازه سنگ‌دانه‌ها قرار دارد [۴]. بررسی اثر ترکیب اجزای مواد شبه‌سنگی بر ویژگی‌های مکانیکی و دوام آن همواره از اهمیت بالایی برخوردار بوده است [۵], [۶], [۷]. باوجوداین، به دلیل تعامل متقابل میان این پارامترها، نقش دقیق اندازه سنگدانه در فرآیند شکست و رفتار مکانیکی مواد شبه‌سنگی هنوز به‌طور کامل روشن نشده است. در همین زمینه، بررسی تأثیر اندازه دانه‌بندی بر مقاومت سنگ، از دهه‌های گذشته موردتوجه پژوهشگران قرارگرفته است [۸], [۹], [۱۰], [۱۱], [۱۲], [۱۳], [۱۴], [۱۵], [۱۶]. در ادامه این مسیر تحقیقاتی، برخی مطالعات به بررسی تجربی تأثیر اندازه و محتوای حجمی سنگ‌دانه‌ها بر خواص مکانیکی بتن معمولی پرداخته‌اند و نتایج حاصل نشان می‌دهد که با افزایش اندازه و مقدار حجمی سنگ‌دانه‌ها، مقاومت مکانیکی بتن به‌تدریج افزایش می‌یابد [۱۷], [۱۸], [۱۹], [۲۰].

وانگ و همکاران (۱۹۹۶) رابطه بین اندازه دانه و طول اولیه ریزترک‌ها را بررسی کردند و نشان دادند که اندازه دانه تأثیر قابل‌توجهی بر مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) در سنگ مرمر دارد [۲۱]. پریکریل (۲۰۰۱) نیز نشان داد که تغییرپذیری مقاومت فشاری تک‌محوری در سنگ‌های آذرین با تخلخل کم، مانند گرانیت، ارتباط نزدیکی با اندازه متوسط دانه‌های کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده سنگ دارد؛ به‌طوری‌که با کاهش اندازه دانه، مقاومت سنگ افزایش می‌یابد [۲۲]. بااین‌حال، تحقیقات کمی در مورد دلایل اصلی تأثیر اندازه دانه بر مقاومت سنگ انجام‌شده است. در این زمینه، بریس (۱۹۶۱) رابطه میان اندازه دانه و مقاومت سنگ را با نظریه گریفیث (۱۹۲۰) مرتبط دانست [۲۳]. طبق این نظریه، طول ترک اولیه متناسب با اندازه دانه در نظر گرفته می‌شود و با افزایش اندازه دانه، تعداد مرزهای دانه که به‌عنوان منابع اصلی تمرکز تنش شناخته می‌شوند، بیشتر می‌شود [۲۴]. افزون بر این، مقاومت سنگ تحت تأثیر پاسخ‌های مکانیکی اجزای سنگ در مقیاس میان‌دانه‌ای و تمرکز تنش ناشی از شکل و اندازه دانه نیز قرار دارد. تونیو و همکاران (۲۰۱۹) تأثیر دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های درشت را برافزایش مقاومت فشاری و دوام بتن بررسی کردند [۲۵]. وانگ و همکاران (۲۰۲۳) با نمونه‌سازی سه محوری و مدل‌سازی عددی گزارش دادند که افزایش دانه‌بندی تا ۲۳.۵ درصد مقاومت فشاری بتن تحت بارگذاری محصورشده را افزایش می‌دهد [۲۶]. لی و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که دانه‌بندی مناسب فضای خالی بین ذرات را کاهش داده و شاخص‌های مقاومت فشاری، خمشی و کششی بتن را بهبود می‌بخشد. بیشتر مطالعات انجام‌شده برای بررسی تأثیر دانه‌بندی، بر پایه‌ی نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری بوده‌اند و بررسی‌های کمی در خصوص آزمایش‌های مرتبط با خواص مکانیکی کششی، ازجمله آزمایش برزیلی، آزمایش خمش سه نقطه‌ای، آزمایش خمش چهار نقطه‌ای و شاخص بار نقطه‌ای انجام‌شده است [۲۷], [۲۸], [۲۹]. دوستان و همکاران (۲۰۲۴)، تأثیر اندازه دانه بر پارامترهای مکانیکی و چقرمگی شکست مود I مواد شبه‌سنگی را با ثابت نگه‌داشتن سایر عوامل ریزساختاری بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش اندازه دانه با کاهش مقاومت فشاری، مقاومت کششی برزیلی و مدول الاستیسیته همراه است[۳۰]. همچنین، مختارزاده و طاهری، خواص مکانیکی ملات سیمان حاوی سنگ‌دانه‌های ورمیکولیت منبسط‌شده را بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که افزایش مقدار ورمیکولیت منبسط‌شده با کاهش بیشتر پارامترهای مکانیکی بررسی‌شده همراه است [۳۱]. این در حالی است که مشخصات دانه‌بندی می‌تواند بر رفتار مکانیکی نمونه‌ها در این آزمایش‌ها نیز تأثیرگذار باشد؛ به‌ویژه از طریق تغییر در نحوه توزیع تنش، محل شروع شکست و گسترش ترک در نمونه‌های سنگی. بااین‌وجود، تاکنون ارتباط مستقیم میان دانه‌بندی و نتایج حاصل از آزمایش‌های کششی به‌طور کامل موردبررسی قرار نگرفته است. به‌منظور جمع‌بندی پژوهش‌های مرتبط، مقایسه موضوع و محورهای اصلی مطالعات پیشین و تبیین ارتباط آن‌ها با پژوهش حاضر، مهم‌ترین مطالعات در جدول ۱ رائه شده‌اند.

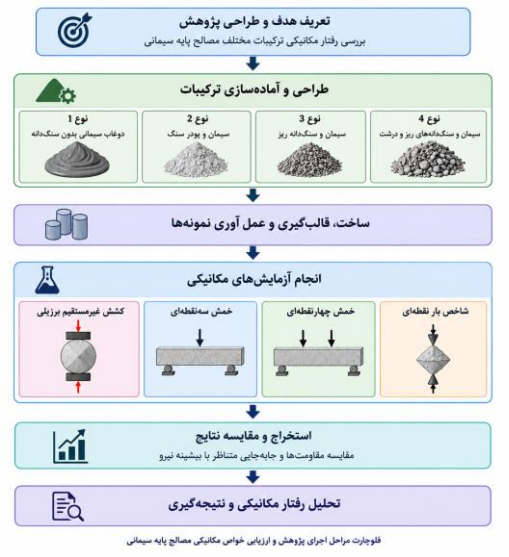
نتایج حاصل از مطالعات پیشین در مورد تأثیر سنگ‌دانه‌ها بر مشخصات مکانیکی و دوام مواد شبه سنگی نشان می‌دهد که رفتار مواد شبه سنگی به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر ویژگی‌های فیزیکی سنگ‌دانه‌ها، ازجمله حداکثر اندازه، شکل هندسی و خواص مکانیکی آن‌ها قرار دارد.

با وجود مطالعات انجام‌شده درباره رفتار مکانیکی مواد شبه‌سنگی، تأثیر اندازه و ترکیب دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها بر

پاسخ این مواد تحت شرایط مختلف بارگذاری، به‌ویژه از نظر مقایسه هم‌زمان خواص مقاومتی و تغییرشکلی، همچنان نیازمند بررسی بیشتر است. در این پژوهش، تأثیر چهار ترکیب متفاوت از مواد شبه‌سنگی، شامل دوغاب سیمانی بدون سنگ‌دانه (نوع ۱)، سیمان حاوی پودر سنگ (نوع ۲)، سیمان حاوی سنگ‌دانه‌های ریز (نوع ۳) و سیمان حاوی سنگ‌دانه‌های ریز و درشت (نوع ۴)، بر رفتار مکانیکی نمونه‌ها بررسی شده است. نوآوری اصلی این مطالعه در ارزیابی مقایسه‌ای رفتار این ترکیبات تحت چهار روش آزمایشگاهی شامل آزمایش برزیلی، خمش سه‌نقطه‌ای، خمش چهارنقطه‌ای و شاخص بار نقطه‌ای است. برخلاف رویکردهایی که رفتار مکانیکی مواد را صرفاً با استفاده از یک روش بارگذاری ارزیابی می‌کنند، در این پژوهش نتایج حاصل از چند روش آزمایشگاهی به‌صورت هم‌زمان بررسی شده‌اند تا ضمن تعیین تأثیر ترکیب و اندازه سنگ‌دانه‌ها بر مقاومت مکانیکی نمونه‌ها، شباهت‌ها و تفاوت‌های پاسخ آن‌ها در شرایط مختلف بارگذاری نیز مشخص شود. همچنین، مقایسه نتایج حاصل از این آزمایش‌ها امکان بررسی نقش نوع بارگذاری و نحوه اعمال نیرو در تفسیر اثر دانه‌بندی بر رفتار مکانیکی مواد شبه‌سنگی را فراهم می‌کند. بر این اساس، در این مطالعه، به بررسی تأثیر ترکیب و اندازه سنگ‌دانه‌ها بر خواص مکانیکی مواد پایه سیمانی و تبیین تفاوت پاسخ آن‌ها در آزمایش‌های کششی، خمشی و بار نقطه‌ای پرداخته شده است.

جدول ۱. خلاصه مطالعات پیشین مرتبط با اثر اندازه سنگ‌دانه و ویژگی‌های ساختاری بر خواص مکانیکی سنگ‌ها و مصالح پایه سیمانی

پژوهش	موضوع اصلی	مهم‌ترین یافته یا محور بررسی	ارتباط با پژوهش حاضر
Darbor et al.* [۳۲]*(2019a)	اثر اندازه نمونه بر مقاومت فشاری سنگ‌های سخت و مصالح سیمانی شبه‌سنگی و بررسی اثر اندازه دانه	بررسی اثر مقیاس و ارزیابی مدل‌های اثر اندازه برای تفسیر مقاومت فشاری	نشان‌دهنده اهمیت اندازه نمونه و دانه‌بندی در تحلیل خواص مکانیکی مصالح
Darbor et al.* [۳۳]*(2019b)	اثر ابعاد نمونه در سنگ‌های رسوبی و اندازه دانه در بتن بر مقاومت فشاری تک‌محوری	بررسی تجربی اثر اندازه نمونه و دانه بر مقاومت فشاری	مرتبط با بررسی رفتار مقاومتی ترکیبات سیمانی با دانه‌بندی متفاوت
Faramarzi et al.* [۳۴]*(2023)	اثر ناهمسانگردی، اندازه سنگ‌دانه و ابعاد نمونه بر خواص مکانیکی مصالح سنگی مصنوعی	بررسی تغییرات مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و انرژی ویژه تخریب با توجه به ساختار و اندازه مصالح	تأکید بر نقش اندازه سنگ‌دانه و ناهمگنی در رفتار مکانیکی و شکست
پژوهش حاضر	مقایسه رفتار چهار ترکیب مصالح پایه سیمانی با چهار روش آزمایشگاهی	بررسی مقاومت کششی غیرمستقیم برزیلی، مقاومت خمشی سه‌نقطه‌ای و چهارنقطه‌ای و شاخص بار نقطه‌ای	تکمیل مطالعات پیشین از طریق مقایسه پاسخ ترکیبات مختلف تحت شرایط بارگذاری متفاوت



شکل ۱- فلوچارت مراحل پژوهش

۱-۱- روابط تحلیلی و تجربی آزمایش‌های کشش غیرمستقیم

برای تعیین مقاومت کششی غیرمستقیم مواد شبه‌سنگی، روابط متعددی بر اساس هندسه نمونه، شرایط بارگذاری و فرضیات مکانیک شکست ارائه‌شده‌اند. در آزمایش برزیلی، نمونه دیسکی تحت بار فشاری قطری قرار می‌گیرد و بیشترین مقدار تنش کششی در مرکز دیسک بر اساس تئوری الاستیسیته خطی به‌صورت رابطه‌ی (۱) محاسبه می‌شود، در این رابطه، $P(KN)$ نیروی اعمالی، $D(mm)$ قطر نمونه، $t(mm)$ ضخامت نمونه و $\sigma_{BTS}(MPa)$ مقاومت کششی غیرمستقیم در آزمایش برزیلی است [۳۵].

$$\sigma_{BTS} = \frac{2P}{\pi Dt} \qquad (۱)$$

در آزمایش خمش سه نقطه‌ای، نمونه استوانه‌ای با مقطع دایره‌ای بر روی دو تکیه‌گاه ساده قرارگرفته و نیروی متمرکز در مرکز نمونه اعمال می‌شود. بر اساس تئوری خمش تیرها، مقاومت کششی به‌صورت رابطه (۲) محاسبه می‌شود، که در آن $L\ (mm)$ فاصله دهانه تکیه‌گاه‌ها، $r\ (mm)$ شعاع نمونه و $\sigma_t(MPa)$ مقاومت کششی حاصل ازخمش سه نقطه‌ای است [۳۶].

$$\sigma_t = \frac{PL}{\pi r^3} \qquad (۲)$$

در آزمایش خمش چهار نقطه‌ای، نمونه استوانه‌ای با مقطع دایره‌ای بر روی دو تکیه‌گاه ساده قرار گرفته و دو نیروی متمرکز با فاصله مساوی از مرکز نمونه اعمال می‌شود، به‌طوری‌که یک ناحیه با لنگر خمشی یکنواخت در وسط نمونه ایجاد می‌گردد. بر اساس تئوری خمش تیرها، مقاومت کششی به‌صورت رابطه (۳) محاسبه می‌شود، که در آن $L\ (mm)$ فاصله دهانه تکیه‌گاه‌ها، $r\ (mm)$ شعاع نمونه و $\sigma_t(MPa)$ مقاومت کششی حاصل از خمش چهار نقطه‌ای است [۳۶].

$$\sigma_t = \frac{2PL}{\pi r^3} \qquad (۳)$$

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، برای ارزیابی رفتار مکانیکی مواد شبه‌سنگی، ابتدا به انتخاب و ترکیب مناسب مصالح توجه شده است؛ زیرا نوع، درصد و نحوه ترکیب سنگ‌دانه‌ها تأثیر مهمی بر ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌های شبه‌سنگی دارد. به‌منظور بررسی اثر ابعاد سنگدانه بر خواص کششی نمونه‌های شبه‌سنگی، نمونه‌هایی با نسبت‌های متنوعی از سنگ‌دانه‌های ریزودرشت تهیه شدند. سپس آزمایش‌های کشش غیرمستقیم بر روی آن‌ها انجام گردید تا تأثیر تغییرات در مصالح بر خواص نمونه‌های شبه‌سنگی مورد ارزیابی قرار گیرد.

ساخت نمونه‌ها

برای دستیابی به نتایج آزمایشگاهی دقیق‌تر در تحلیل داده‌ها، تهیه نمونه‌های همگن و یکنواخت ضروری است. با توجه به

اهمیت دانه‌بندی در تعیین خواص مقاومتی مواد شبه‌سنگی، در این پژوهش تأثیر ابعاد سنگ‌دانه‌ها بر رفتار مکانیکی مواد شبه‌سنگی بررسی شد. مصالح به‌کاررفته شامل آب، سیمان، پودر سنگ، سنگ‌دانه‌ی ریز و سنگ‌دانه‌ی درشت است.

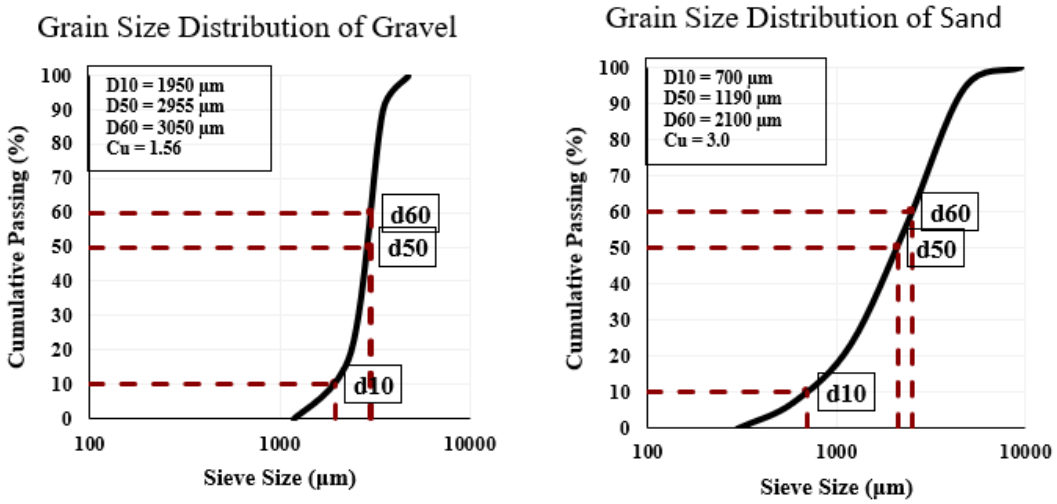
مواد اولیه شامل آب شهری، پودر سنگ (چگالی ۲۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب) و سیمان پرتلند تیپ ۲ است. سیمان تیپ ۲ مطابق با استاندارد *ISIRI 389* ایران و *ASTM C150* آمریکا تولید می‌شود [۳۷].

دو نوع سنگ‌دانه ریز (ماسه) و درشت (شن) با چگالی‌های به ترتیب ۲.۳۴ و ۲.۶۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب به‌کار رفته رفت. هر دو سنگ‌دانه مطابق با استاندارد *ASTM C33* دارای دانه‌بندی یکنواخت هستند [۳۸]. منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های ریز و درشت در شکل ۲ ارائه‌شده است.

چهار نوع نمونه با ترکیبات مطابق جدول ۲ تهیه شدند.

جدول۲. مشخصات و نسبت اجزای تشکیل‌دهنده ترکیبات مختلف مصالح پایه سیمانی

نوع نمونه	ترکیب	نسبت آب به سیمان *(W/C)*	نسبت سیمان به جزء سنگی
نوع ۱	دوغاب سیمانی بدون سنگ‌دانه	۰.۵۰	فاقد سنگ‌دانه
نوع ۲	سیمان و پودر سنگ	۰.۶۰	۱
نوع ۳	سیمان و سنگ‌دانه ریز	۰.۶۰	۰.۳۳
نوع ۴	سیمان و سنگ‌دانه‌های ریز و درشت	۰.۶۰	۰.۶۷



(ب) (الف)

شکل ۲- الف) منحنی دانه‌بندی سنگدانه ریز. ب) منحنی دانه‌بندی سنگدانه درشت.

قالب‌های نمونه آزمایش برزیلی با قطر *NX* (۵۴ میلی‌متر) و ضخامت ۲۹ میلی‌متر مطابق با استاندارد *ISRM* تهیه شد [۳۹]. برای آزمایش خمش سه نقطه‌ای از قالب‌های استوانه‌ای با قطر *NX* و طول ۱۲۰ میلی‌متر و برای خمش چهار نقطه‌ای از قالب‌های قطر *NX* و طول ۱۷۰ میلی‌متر استفاده گردید.

هر ترکیب با نسبت‌های معین در میکسر ریخته و تا یکنواخت شدن کامل مواد هم زده شد. سپس برای توزیع یکنواخت، مخلوط‌ها به‌طور هم‌زمان در قالب‌ها ریخته و قالب‌ها به مدت

۲۰ ثانیه روی میز لرزان قرار گرفتند تا تراکم و خارج شدن هوا به‌درستی انجام شود. پس از قالب‌ریزی، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط و درون قالب نگهداری شدند. پس از گیرش اولیه، آن‌ها خارج و به مدت ۲۸ روز در آب قرار گرفتند.

شکل ۳ نمونه‌های خارج‌شده از آب را نشان می‌دهد. کلیه مراحل ساخت مطابق با استاندارد *ASTM C192* انجام‌شده است [۴۰].



شکل ۳- نمونه‌های خارج‌شده در سن ۲۸ روز.

۲-۲- انجام آزمایش‌ها

بتن و مواد شبه‌سنگی به دلیل نسبت پایین مقاومت کششی به فشاری عمدتاً در برابر بارهای کششی آسیب‌پذیر هستند [۴۱]. این موضوع ریشه در ریزترک‌های پیش‌ساخته دارد؛ در بارگذاری فشاری، ترک‌ها ابتدا بسته می‌شوند و اختلالی ایجاد نمی‌کنند، اما تحت کشش، ترک‌ها به یکدیگر متصل شده و شکست اتفاق می‌افتد.

در عمل، روش‌های مستقیم و غیرمستقیم متنوعی برای اندازه‌گیری مقاومت کششی بتن و مواد شبه‌سنگی به‌کار می‌روند. آزمایش کشش مستقیم دقیق‌ترین روش برای تعیین مقاومت کششی است [۴۲]، اما نیاز به گیره‌های دقیق نگهدارنده در دو انتها، بارگذاری محوری پیچیده و هزینه بالا باعث شده است کمتر مورداستفاده قرار گیرد. ازاین‌رو، آزمایش‌های کشش غیرمستقیم ترجیح داده می‌شوند. بنابراین، در این پژوهش آزمایش کشش برزیلی (*BTS*[1])، آزمایش خمش سه نقطه‌ای (*T-PBT*[2])، آزمایش خمش چهار نقطه‌ای (*F-PBT*[3]) و آزمایش شاخص بار نقطه‌ای (*PLT*[4]) برای بررسی تأثیر ابعاد سنگدانه بر خواص کششی مواد شبه‌سنگی به‌کار رفت. در ادامه، شرایط و رویه هر یک از این آزمایش‌ها تشریح می‌شود.

۲-۲-۱- آزمایش برزیلی

آزمایش کشش برزیلی مطابق با استاندارد *ISRM* انجام شد [۳۹]. فک‌های بارگذاری فولادی به‌گونه‌ای طراحی شدند که شعاع فک ۱/۵ برابر شعاع نمونه دیسکی باشد. بارگذاری به‌صورت پیوسته و یکنواخت با سرعت ۰/۲ میلی‌متر بر دقیقه اعمال گردید، به طوری که شکست ضعیف‌ترین نمونه‌ها در بازه‌ی ۱۵ تا ۳۰ ثانیه اتفاق افتد. نمونه‌های استوانه‌ای پیش از بارگذاری بین دو فک قرار داده شدند و در حین آزمایش، نیروی اعمالی و تغییر شکل قطری نمونه به‌صورت پیوسته ثبت گردید. شکل ۴ نمایی از دستگاه و نمونه‌ها را قبل و بعد از بارگذاری نشان می‌دهد.

۲-۲-۲- آزمایش خمش سه نقطه‌ای

آزمایش خمش سه نقطه‌ای به‌عنوان روشی غیرمستقیم برای تعیین مقاومت کششی بتن و مواد شبه‌سنگی به‌کار می‌رود. در این آزمایش، تحت بارگذاری سه‌نقطه‌ای هم تنش‌های فشاری و هم کششی ایجاد می‌شوند؛ به‌طوری‌که تنش‌های کششی در محل شکست به‌صورت تک‌محوری عمل می‌کنند، درحالی‌که در روش‌های غیرمستقیم دیگر، تنش کششی شکست معمولاً دومحوره است [۴۳]. نمونه‌ها مطابق دستورالعمل *ISRM* با سرعت بارگذاری ۰,۲ میلی‌متر بر دقیقه آزمایش شدند [۴۴]. در طول آزمایش، نیروی اعمال‌شده و تغییر شکل میانی نمونه‌ها به‌صورت پیوسته ثبت گردید. شکل ۵ وضعیت نمونه‌ها پیش و پس از شکست و نمای دستگاه بارگذاری را نمایش می‌دهد.

[1] Brazilian Tensile Strength
[2] Three-Point Bending Test
[3] Four-Point Bending Test
[4] Point Load Test



(ج) (ب) (الف)

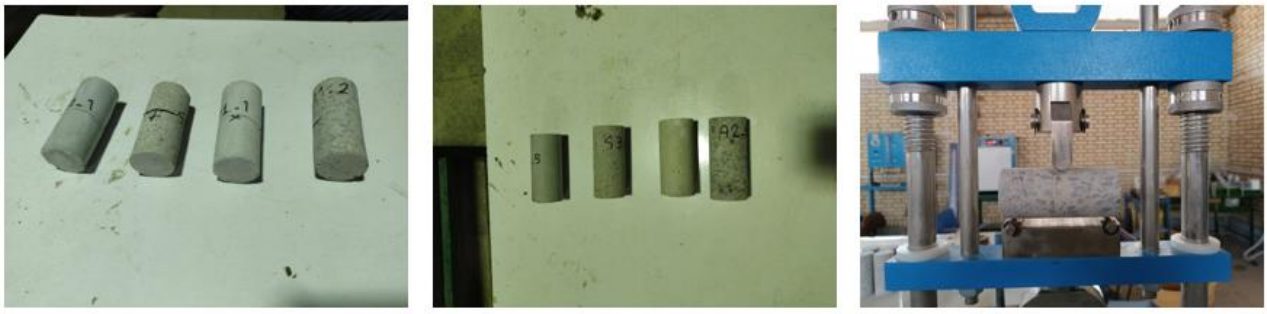
شکل۴- الف) نمایی از دستگاه بارگذاری آزمایش برزیلی، ب) نمونه‌ها قبل از بارگذاری، ج) نمونه‌ها بعد از شکست.

۲-۲-۳- آزمایش خمش چهار نقطه‌ای

آزمایش خمش چهار نقطه‌ای مشابه خمش سه نقطه‌ای است با این تفاوت که به‌جای یک غلتک، از دو غلتک برای اعمال نیروی استفاده می‌شود. برای دستیابی به توزیع یکنواخت تنش و جلوگیری از تمرکز نیرو، یک صفحه بر روی غلتک‌ها قرار داده می‌شود؛ به‌گونه‌ای که فاصله غلتک‌های بارگذاری از تکیه‌گاه‌ها بافاصله تکیه‌گاه‌ها از یکدیگر مطابقت دارد. نمونه‌های تهیه‌شده با سرعت بارگذاری ۰/۲ میلی‌متر بر دقیقه مطابق با استاندارد *ISRM* مورد آزمایش قرار گرفتند [۴۵]. در طول آزمایش، بار اعمال‌شده و تغییر شکل نمونه‌ها به‌صورت پیوسته ثبت گردید شکل ۶ نمایی از نمونه‌ها پس از شکست را نشان می‌دهد.

۲-۲-۴- آزمایش شاخص بار نقطه‌ای

آزمایش شاخص بار نقطه‌ای به دلیل سهولت اجرا، آماده‌سازی ساده نمونه و امکان کاربرد میدانی، به‌عنوان روشی اقتصادی و کاربردی برای برآورد مقاومت سنگ‌ها شناخته می‌شود [۴۶]. این آزمایش اغلب معیاری غیرمستقیم برای تعیین مقاومت فشاری و کششی سنگ‌ها



(ج) (ب) (الف)

شکل۵- الف) نمایی از دستگاه بارگذاری آزمایش خمش سه نقطه‌ای، ب) نمونه‌ها قبل از بارگذاری، ج) نمونه‌ها بعد از شکست



شکل۶- نمونه‌ها بعد از شکست در آزمایش خمش چهار نقطه‌ای

است [۴۷]. نمونه‌ها می‌توانند به‌صورت محوری، قطری، قطعه‌های مکعبی منظم و قطعات نامنظم مورد آزمایش قرار گیرند [۴۸].در این پژوهش، آزمایش شاخص بار نقطه‌ای به‌صورت محوری بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با قطر NX انجام شد و مقاومت نهایی شکست هر نمونه ثبت گردید. شکل ۷ نمونه‌ها را پس از شکست و نمایی از دستگاه بارگذاری نشان می‌دهد.

۳- ارائه نتایج

در این بخش، نتایج آزمایش‌های مکانیکی انجام‌شده بر روی مواد شبه‌سنگی ساخته‌شده با چهار نوع دانه‌بندی مختلف ارائه و تحلیل می‌شوند. نمونه‌ها بر اساس نوع دانه‌بندی به چهار گروه (نوع ۱ تا نوع ۴) دسته‌بندی‌شده‌اند. هدف از انجام این آزمایش‌ها، بررسی تأثیر تغییر در الگوی دانه‌بندی مصالح بر مقاومت کششی، خمشی و پارامترهای مقاومتی مواد شبه‌سنگی است.

۳-۱ آزمایش برزیلی

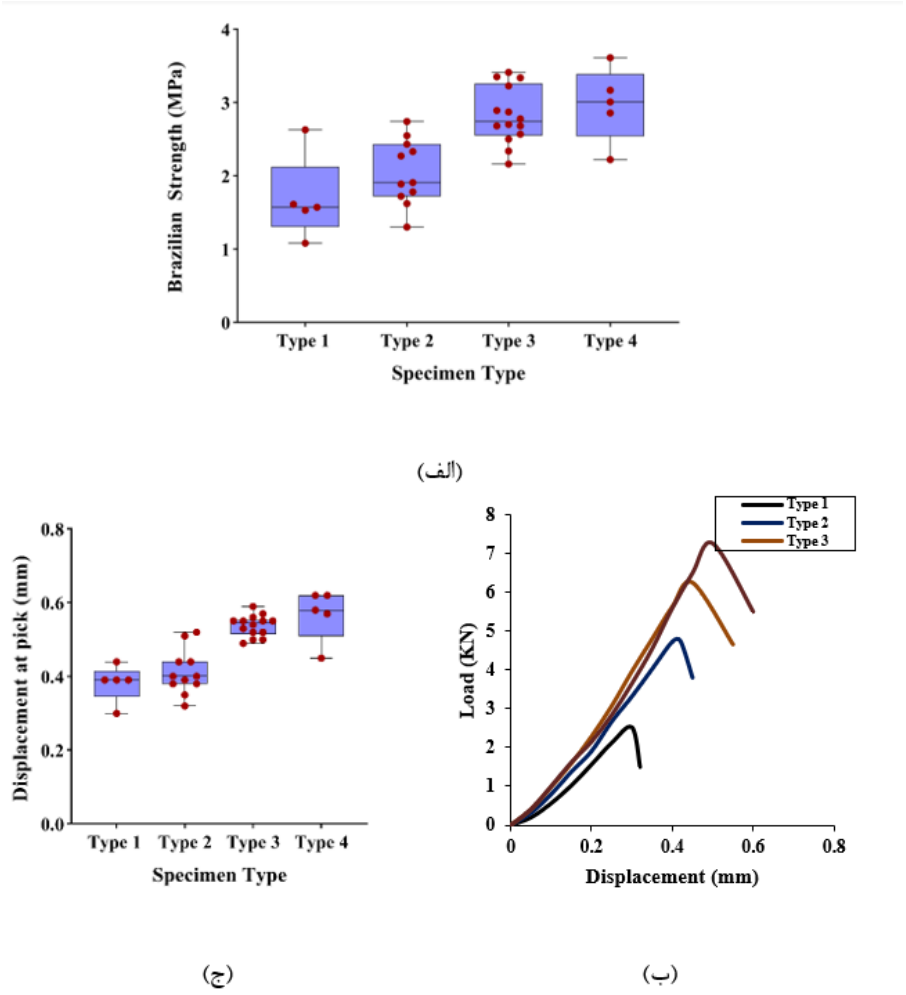
شکل ۸ (الف) روند تغییرات مقاومت کششی نهایی نمونه‌های شبه‌سنگی با دانه‌بندی‌های مختلف (نوع ۱ تا نوع ۴) را نشان می‌دهد. با افزایش اندازه سنگ‌دانه‌ها، مقاومت کششی برزیلی به‌طور پیوسته افزایش‌یافته است. لازم به ذکر است که نمونه نوع ۱ با نسبت آب به سیمان ۰.۵۰ و سایر نمونه‌ها با نسبت ۰.۶ ساخته شدند. بنابراین، بخشی از تفاوت مقاومت کششی بین نمونه نوع ۱ و سایر نمونه‌ها می‌تواند ناشی از این تفاوت در نسبت آب به سیمان باشد. با لحاظ کردن این موضوع، بررسی جزئی‌تر نشان می‌دهد که مقاومت نمونه نوع دو نسبت به نوع یک ۲۱ درصد نوع سه نسبت به نوع دو ۳۷ درصد، و نوع چهار نسبت به نوع سه ۵ درصد افزایش‌یافته است. این افزایش را می‌توان به تأثیر سنگ‌دانه‌های درشت‌تر در کنترل مسیر گسترش ترک‌ها نسبت داد؛ زیرا در نمونه‌هایی که سنگ‌دانه‌های درشت‌تری دارند، ترک‌های ایجادشده در نمونه‌های شبه‌سنگی هنگام بارگذاری، با احتمال بیشتری به سنگ‌دانه‌ها برخورد می‌کنند. ازآنجاکه سنگ‌دانه‌ها نسبت به ماتریس سیمانی مقاومت و سختی بیشتری دارند، این برخورد موجب کند شدن یا انحراف مسیر ترک می‌شود و درنتیجه، انرژی بیشتری برای گسترش ترک لازم است. این روند باعث افزایش مقاومت نهایی نمونه‌های شبه‌سنگی شده است. نتایج به‌دست‌آمده با یافته‌های افشار و همکاران (۲۰۲۵) مطابقت دارد که نشان داده‌اند افزایش اندازه سنگ‌دانه‌ها می‌تواند با تأثیرگذاری بر مسیر ترک، منجر به افزایش مقاومت کششی نهایی مواد شبه‌سنگی گردد [۴۹]. همچنین، پراکندگی جابجایی متناظر با مقاومت نهایی در نمونه‌های دارای سنگ‌دانه‌های درشت بیشتر است. این اتفاق به توزیع تصادفی اندازه و شکل سنگ‌دانه‌ها در هر نمونه بازمی‌گردد که موجب افزایش نوسانات در نتایج آزمایش می‌شود.

شکل ۸ (ب) منحنی‌های نیرو–جابجایی را نشان می‌دهد که در آن نمونه‌های دارای سنگ‌دانه‌های درشت‌تر نه‌تنها نیروی بیشتری تحمل کرده‌اند، بلکه جابجایی بیشتری تا نقطه شکست داشته‌اند. این موضوع نشان می‌دهد که با افزایش اندازه سنگ‌دانه‌ها، نمونه‌های شبه‌سنگی توانایی بیشتری در جذب انرژی پیداکرده و رفتار شکل‌پذیرتری از خود نشان داده است. این روند در شکل ۸ ج نیز تائید شده می‌شود، جایی که جابجایی متناظر با بیشینه مقاومت برای هر نوع دانه‌بندی بررسی‌شده است. همان‌طور که مشخص است، با بزرگ‌تر شدن سنگ‌دانه‌ها، میزان جابجایی افزایش می‌یابد. مقادیر نشان می‌دهد که جابجایی نمونه نوع دو نسبت به نوع یک ۵ درصد، نوع سه نسبت به نوع دو ۳۰ درصد، و نوع چهار نسبت به نوع سه ۵ درصد می‌باشد.



(ب) (الف)

شکل ۷- الف) نمونه‌های آزمایش شاخص بار نقطه‌ای بعد از شکست، ب) نمایی از دستگاه بارگذاری آزمایش شاخص بار نقطه‌ای.



شکل ۸- تأثیر تغییر دانه‌بندی سنگدانه‌ها بر خواص مقاومتی نمونه‌های شبه‌سنگی در آزمایش برزیلی: (الف) تغییرات مقاومت کششی برزیلی ، (ب) منحنی نیرو–جابجایی و (ج) تغییرات جابجایی متناظر با بیشینه مقاومت.

۳-۲- آزمایش خمش سه نقطه‌ای

در آزمایش خمش سه نقطه‌ای نیز روندی مشابه آزمایش برزیلی مشاهده شد. شکل ۹ (الف) نشان می‌دهد که با افزایش اندازه سنگ‌دانه‌ها، مقاومت خمشی نمونه‌ها به‌صورت پیوسته افزایش‌یافته است. به‌طوری‌که نمونه نوع دو نسبت به نمونه نوع یک ۸۲ درصد، نمونه نوع سه نسبت به نمونه نوع دو ۷۶ درصد و نمونه نوع چهار نسبت به نمونه نوع سه ۷۹ درصد افزایش داشته است. بنابراین می‌توان گفت که این افزایش در مقایسه با آزمایش برزیلی، یکنواخت‌تر و نزدیک‌تر بین انواع مختلف دانه‌بندی اتفاق افتاده است. همچنین در نوع ۴ پراکندگی نتایج نیز بیشتر است. در نمودار نیرو–جابجایی (شکل ۹(ب)) نیز نمونه‌های حاوی سنگ‌دانه‌های درشت‌تر، جابجایی و تحمل بار بیشتری تا شکست نهایی از خود نشان داده‌اند این تغییرات نسبت به آزمایش برزیلی قابل‌توجه‌تر بود. شکل۹ (ج) نیز تأیید می‌کند که جابجایی متناظر با بیشینه نیرو در این نمونه‌ها بیشتر بوده است. با بررسی دقیق‌تر می‌توان مشاهده کرد که نمونه نوع دو نسبت به نمونه نوع یک ۷۳ درصد، نمونه نوع سه نسبت به نمونه نوع دو ۳۵ درصد و نمونه نوع چهار نسبت به نمونه نوع سه ۳۸ درصد افزایش داشته است. این نتایج با یافته‌های الیسس۵ و روکو۶ (۲۰۰۸) مطابقت دارد که نشان داده‌اند سنگ‌دانه‌های درشت‌تر می‌توانند با تغییر مکانیزم شکست، منجر به افزایش ظرفیت خمشی مواد شبه‌سنگی شوند [۵۰].

۳-۳- آزمایش خمش چهار نقطه‌ای

در آزمایش خمش چهار نقطه‌ای نیز روندی مشابه با آزمایش‌های برزیلی وخمش سه نقطه‌ای مشاهده شد. شکل ۱۰ (الف) نشان می‌دهد که با افزایش اندازه سنگ‌دانه‌ها، مقاومت خمشی نمونه‌های شبه سنگی افزایش‌یافته است. به‌طوری‌که نمونه نوع دو نسبت به نمونه نوع یک ۳۴ درصد، نمونه نوع سه نسبت به نمونه نوع دو ۱۷ درصد و نمونه نوع چهار نسبت به نمونه نوع سه ۳۴ درصد افزایش داشته است. در نوع ۴ نیز پراکندگی نتایج نسبت به آزمایش برزیلی و آزمایش خمش سه نقطه‌ای بیشتر است. نمودار نیرو–جابجایی (شکل ۱۰ (ب)) نشان می‌دهد که نمونه‌های دارای سنگ‌دانه‌های درشت‌تر، جابجایی و ظرفیت تحمل بار بیشتری تا مرحله شکست از خود نشان داده‌اند. این موضوع در شکل ۱۰ (ج) نیز تأییدشده است، به‌طوری‌که جابجایی متناظر با بیشینه نیرو در نمونه‌های دارای سنگ‌دانه‌های درشت، بیشتر بوده است. با بررسی دقیق‌تر می‌توان مشاهده کرد که نمونه نوع دو نسبت به نمونه نوع یک ۲۷ درصد، نمونه نوع سه نسبت به نمونه نوع دو ۳۷ درصد و نمونه نوع چهار نسبت به نمونه نوع سه ۲۱ درصد افزایش داشته است. این نتایج با یافته‌های دینک[۷] و همکاران (۲۰۲۳) همخوانی دارد که افزایش اندازه سنگ‌دانه‌ها را عاملی در افزایش مقاومت خمشی و افزایش ظرفیت تغییر شکل مواد شبه‌سنگی دانسته‌اند [۵۱].

۳-۴- آزمایش شاخص بار نقطه‌ای

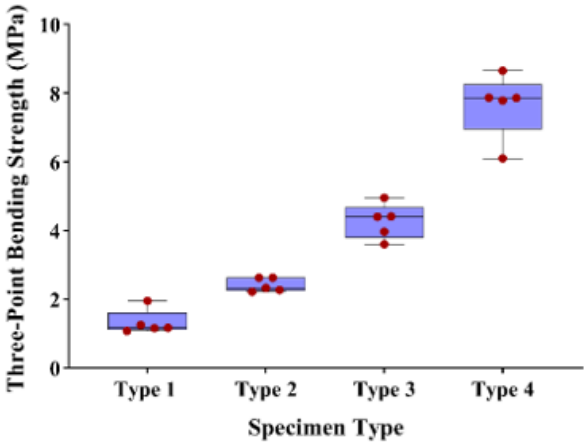
در آزمایش شاخص بار نقطه‌ای نیز شاخص $I_{S(50)}$ روند افزایشی داشت و با افزایش اندازه سنگ‌دانه‌ها، مقاومت نمونه‌های شبه سنگی به‌طور پیوسته افزایش یافت(شکل۱۱). به‌طوری‌که نمونه نوع دو نسبت به نمونه نوع یک ۱۹ درصد، نمونه نوع سه نسبت به نمونه نوع دو ۱۳۶ درصد و نمونه نوع چهار نسبت به نمونه نوع سه ۹۵ درصد افزایش داشته است این روند با نتایج سایر آزمایش‌ها همخوانی داشت. بااین‌حال، در نمونه‌های نوع ۳ و نوع ۴ تفاوت قابل‌توجهی مشاهده نشد که این موضوع می‌تواند به ماهیت بارگذاری متمرکز در یک نقطه مربوط باشد. ازآنجاکه بار در نقطه مشخصی وارد می‌شود، وجود یا عدم وجود سنگدانه در محل تماس بار تأثیر مستقیمی بر نتایج دارد و می‌تواند تغییرپذیری مقاومت را افزایش دهد.

۳-۵- بحث و تحلیل مکانیزم اثر اندازه سنگ‌دانه بر مقاومت مکانیکی

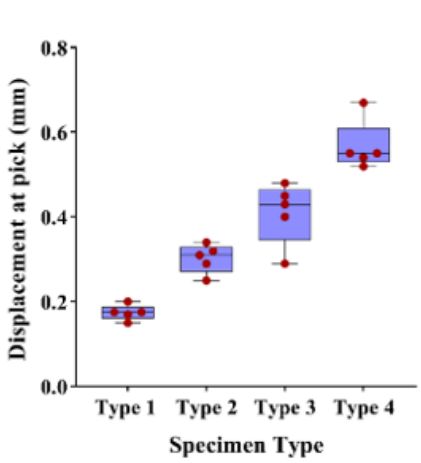
نتایج حاصل از چهار روش آزمایشگاهی نشان داد که مقاومت کششی برزیلی، مقاومت خمشی سه‌نقطه‌ای و چهارنقطه‌ای و شاخص بار نقطه‌ای در ترکیبات بررسی‌شده از نوع ۱ تا نوع ۴ افزایش یافته‌اند. بااین‌حال، افزایش اندازه سنگ‌دانه‌ها لزوماً در تمام مصالح پایه سیمانی به افزایش مقاومت منجر نمی‌شود و جهت این اثر به ویژگی‌های ریزساختاری، کیفیت اتصال سنگ‌دانه‌ها به ماتریس سیمانی و سازوکار گسترش ترک بستگی دارد.

[5] Elices
[6] Rocco
[۷] Dengke

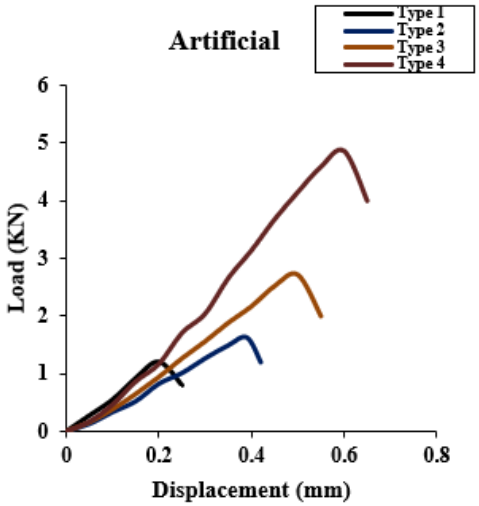
درشت‌تر شدن سنگ‌دانه‌ها می‌تواند با انحراف مسیر ترک، افزایش پیچیدگی سطح شکست و افزایش انرژی لازم برای گسترش ترک، مقاومت نهایی را افزایش دهد. در مقابل، اگر افزایش اندازه سنگ‌دانه با افزایش تمرکز تنش در اطراف ذرات یا گسترش ترک در نواحی ضعیف فصل مشترک همراه باشد، ممکن است مقاومت کاهش یابد. بنابراین، اثر اندازه سنگ‌دانه حاصل رقابت میان سازوکارهای مقاوم‌کننده در برابر انتشار ترک و عوامل تسهیل‌کننده آغاز و گسترش شکست است.



(الف)

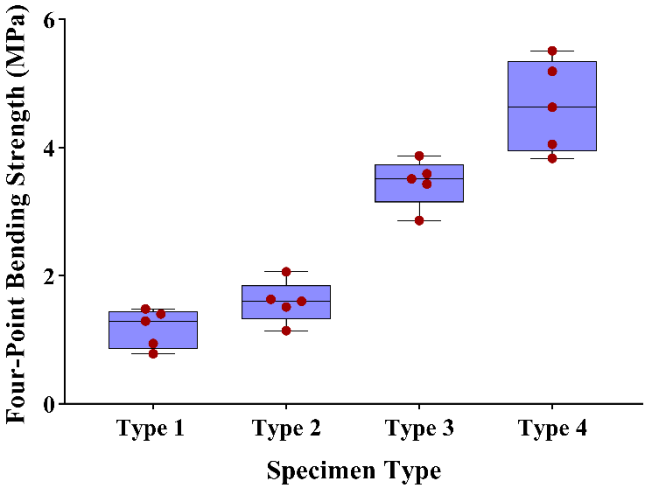


(ج)

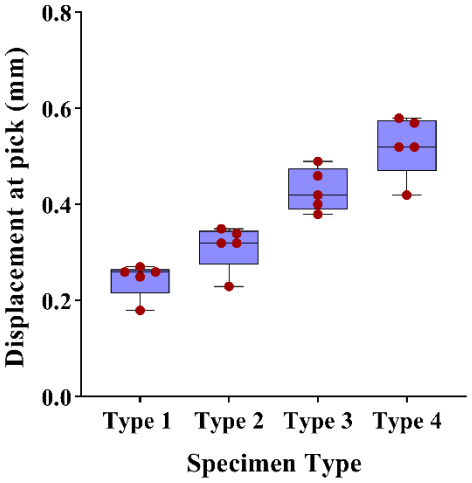


(ب)

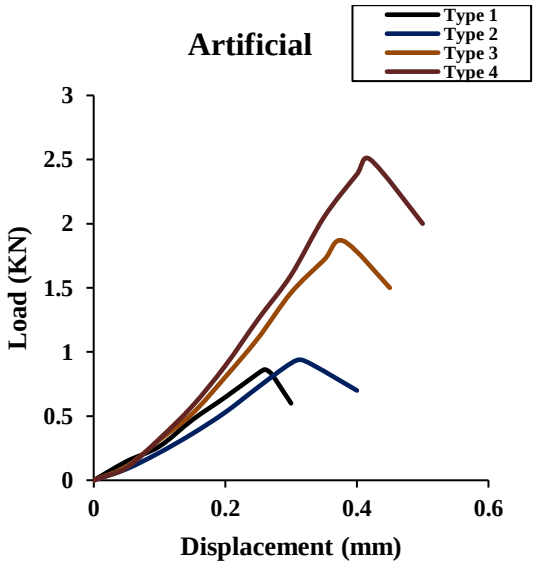
شکل ۹- تأثیر تغییر دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها بر خواص مقاومتی نمونه‌های شبه‌سنگی در آزمایش خمش سه نقطه‌ای: (الف) تغییرات مقاومت خمشی سه‌نقطه‌ای، (ب) منحنی نیرو–جابجایی و (ج) تغییرات جابجایی متناظر با بیشینه مقاومت.



(الف)

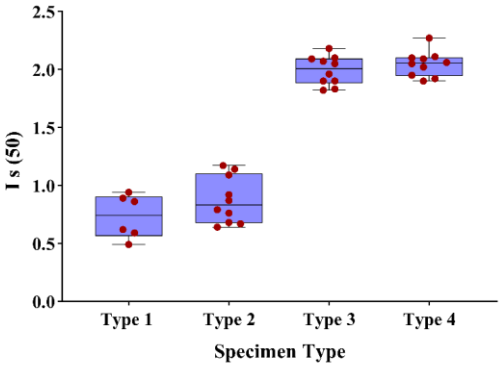


(ج)



(ب)

شکل ۱۰- تأثیر تغییر دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها بر خواص مقاومتی نمونه‌های شبه‌سنگی در آزمایش خمش چهار نقطه‌ای: (الف) تغییرات مقاومت خمش چهار نقطه‌ای، (ب) منحنی نیرو–جابجایی و (ج) تغییرات جابجایی متناظر با بیشینه مقاومت.



شکل ۱۱- تأثیر تغییر دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها بر نتایج شاخص بار نقطه‌ای ($I_{S(50)}$).

در آزمایش برزیلی، افزایش مقاومت کششی با تغییر ترکیب نمونه‌ها می‌تواند با تغییر مسیر گسترش ترک در حضور ذرات سنگ‌دانه و تغییر ویژگی‌های ماتریس سیمانی مرتبط باشد. در آزمایش‌های خمش سه‌نقطه‌ای و چهارنقطه‌ای نیز افزایش مقاومت خمشی مشاهده شد؛ بااین‌حال، میزان افزایش در این دو آزمایش یکسان نبود. این تفاوت را می‌توان به تفاوت در توزیع تنش کششی و خمشی، محل آغاز ترک و نحوه گسترش آن در نمونه‌ها نسبت داد. در آزمایش خمش چهارنقطه‌ای، وجود ناحیه‌ای با لنگر خمشی ثابت می‌تواند شرایط آغاز شکست را نسبت به خمش سه‌نقطه‌ای تغییر دهد؛ درحالی‌که در آزمایش سه‌نقطه‌ای، بیشینه لنگر خمشی در ناحیه بارگذاری مرکزی ایجاد می‌شود. ازاین‌رو، اثر ترکیب و اندازه سنگ‌دانه‌ها ممکن است تحت تأثیر آرایش تنش در هر آزمایش قرار گیرد.

در آزمایش شاخص بار نقطه‌ای نیز افزایش شاخص مقاومت در ترکیبات بررسی‌شده مشاهده شد؛ بااین‌حال، این آزمایش به دلیل تمرکز بار در ناحیه تماس فک‌ها، می‌تواند به موقعیت موضعی سنگ‌دانه‌ها و ویژگی‌های فصل مشترک آن‌ها با ماتریس سیمانی حساس باشد. در نتیجه، افزایش ناهمگنی در ترکیبات حاوی سنگ‌دانه‌های درشت‌تر ممکن است موجب افزایش پراکندگی نتایج شود. این موضوع با پراکندگی بیشتر مشاهده‌شده در برخی ترکیبات درشت‌دانه سازگار است، هرچند برای تأیید مستقیم این سازوکار، بررسی ریزساختاری و ثبت محل آغاز ترک ضروری است.

نکته مهم در تفسیر نتایج حاضر آن است که تغییرات مشاهده‌شده را نمی‌توان صرفاً به افزایش اندازه سنگ‌دانه‌ها نسبت داد؛ زیرا ترکیبات آزمایش‌شده از نظر نوع و مقدار اجزای تشکیل‌دهنده و نسبت آب به سیمان نیز متفاوت بودند. به‌ویژه، نسبت آب به سیمان در نمونه نوع ۱ برابر ۰٫۵ و در نمونه‌های انواع ۲ تا ۴ برابر ۰٫۶ بود. بنابراین، نتایج بیانگر اثر کلی تغییر ترکیب مصالح و دانه‌بندی بر رفتار مکانیکی نمونه‌ها هستند، نه اثر مستقل اندازه سنگ‌دانه. همچنین، اگرچه سازوکارهای یادشده می‌توانند برای تفسیر رفتار مقاومتی مصالح پایه سیمانی در شرایط فشاری نیز مطرح باشند، در پژوهش حاضر آزمایش مقاومت فشاری انجام نشده است؛ ازاین‌رو، نتیجه‌گیری تجربی درباره اثر این تغییرات بر مقاومت فشاری به بررسی‌های تکمیلی نیاز دارد. به‌منظور مقایسه یکپارچه ویژگی‌های مقاومتی چهار نوع نمونه و جمع‌بندی نتایج حاصل از آزمایش‌های مختلف، مقادیر مقاومت کششی غیرمستقیم برزیلی، مقاومت خمشی سه‌نقطه‌ای، مقاومت خمشی چهارنقطه‌ای و شاخص بار نقطه‌ای در جدول ۳ ارائه شده‌اند. این جدول امکان مقایسه پاسخ مقاومتی ترکیبات مختلف را تحت شرایط بارگذاری متفاوت فراهم می‌کند.

جدول ۳. مقایسه تغییرات ویژگی‌های مقاومتی چهار نوع نمونه مصالح پایه سیمانی

نوع نمونه	مقاومت برزیلی	مقاومت خمشی سه‌نقطه‌ای	مقاومت خمشی چهارنقطه‌ای	شاخص بار نقطه‌ای
نوع ۱	مبنا			
نوع ۲ نسبت به نوع ۱	٪۲۱ افزایش	٪۸۲ افزایش	٪۳۴ افزایش	٪۱۹ افزایش
نوع ۳ نسبت به نوع ۲	٪۳۷ افزایش	٪۷۶ افزایش	٪۱۷ افزایش	٪۱۳۶ افزایش
نوع ۴ نسبت به نوع ۳	٪۵ افزایش	٪۷۹ افزایش	٪۳۴ افزایش	٪۹۵ افزایش

۶-۳- بحث و تحلیل مکانیزم اثر اندازه سنگ‌دانه بر مقاومت مکانیکی

علاوه بر اندازه سنگ‌دانه، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آن نیز می‌تواند بر مقاومت و رفتار شکست مصالح پایه سیمانی تأثیرگذار باشد. عواملی نظیر تخلخل، جذب آب، مقاومت ذرات، شکل و بافت سطحی، ترکیب کانی‌شناختی و کیفیت اتصال سنگ‌دانه به ماتریس سیمانی، از جمله پارامترهایی هستند که می‌توانند نحوه انتقال تنش و آغاز و گسترش ترک را تحت تأثیر قرار دهند. ازاین‌رو، حتی در صورت یکسان‌بودن اندازه و دانه‌بندی، جایگزینی سنگ‌دانه طبیعی با مواد بازیافتی یا سبک‌دانه‌هایی نظیر پرلیت لزوماً به رفتار مکانیکی مشابه منجر نخواهد شد. برای مثال، تخلخل و جذب آب بالاتر برخی سنگ‌دانه‌ها می‌تواند بر آب مؤثر مخلوط و کیفیت ناحیه انتقالی بین سنگ‌دانه و خمیر سیمان تأثیر بگذارد؛ در مقابل، ویژگی‌های سطحی و واکنش‌پذیری برخی مواد بازیافتی ممکن است در شرایط مشخص به بهبود اتصال یا تراکم ساختار خمیر سیمان کمک کند. بنابراین، جهت و میزان تغییر مقاومت به ویژگی‌های ماده مصرفی و شرایط طراحی مخلوط وابسته است.

در این زمینه، دولتشاهی و همکاران (۲۰۲۵)، اثر اندازه ذرات شیشه بازیافتی را به‌عنوان جایگزین بخشی از سنگ‌دانه ریز بر خواص مکانیکی و چقرمگی شکست ملات سیمانی بررسی کردند [۵۲]. نتایج آن‌ها نشان داد که کاهش اندازه میانه ذرات شیشه بازیافتی از ۰.۵۳۳ به ۰.۱۳۴ میلی‌متر با بهبود چقرمگی شکست کششی و برشی همراه بود. همچنین، در مقایسه با نمونه شاهد، استفاده از ذرات ریزتر در شرایط اختلاط بررسی‌شده با بهبود مقاومت فشاری و کششی و کاهش تخلخل همراه بود. این نتایج نشان می‌دهد که رابطه بین اندازه ذرات و مقاومت، مستقل از جنس و ویژگی‌های سنگ‌دانه نیست و نمی‌توان یک روند واحد را برای همه مواد مصرفی در نظر گرفت. بااین‌حال، از آنجا که مطالعه مذکور بر ذرات شیشه بازیافتی و روش آزمایش نیم‌دایره‌ای تحت خمش (*SCB*) متمرکز بوده است، نتایج آن را نمی‌توان بدون بررسی بیشتر مستقیماً به سایر سنگ‌دانه‌های بازیافتی یا پرلیت تعمیم داد.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که افزایش اندازه سنگ‌دانه‌ها به‌طور پیوسته موجب افزایش در مقاومت مکانیکی و شکل‌پذیری مواد شبه‌سنگی می‌شود. این روند افزایشی در تمامی آزمایش‌ها، ازجمله آزمایش برزیلی، آزمایش خمش سه نقطه‌ای، آزمایش خمش چهار نقطه‌ای و شاخص بار نقطه‌ای مشاهده شد. در آزمایش برزیلی، مقاومت کششی نمونه‌ها با افزایش اندازه سنگ‌دانه‌ها افزایش یافت؛ به‌طوری‌که از نوع ۱ به نوع ۲ حدود ٪۲۱، از نوع ۲ به ۳ حدود ٪۳۷، و از نوع ۳ به ۴ حدود ٪۵ افزایش نشان داد. همچنین، جابجایی متناظر با بیشینه نیرو در این آزمایش تا ٪۴۰ افزایش یافت که بیانگر جذب انرژی بیشتر و رفتار شکل‌پذیرتر مواد شبه‌سنگی است. در آزمایش خمش سه نقطه‌ای، مقاومت خمشی تا ٪۲۳۷ و جابجایی متناظر تا ٪۱۴۶ افزایش یافت. در آزمایش خمش چهار نقطه‌ای نیز مقاومت و جابجایی هر دو تا حدود ٪۸۵ افزایش داشتند. این افزایش‌ها نسبت به آزمایش برزیلی با یکنواختی بیشتر و پراکندگی کمتر همراه بودند. در آزمایش شاخص بار نقطه‌ای نیز شاخص $I_{S(50)}$ بیش از ٪۲۵۰ افزایش یافت. با افزایش اندازه متوسط سنگ‌دانه‌ها، نمونه‌های شبه‌سنگی متراکم‌تر و تخلخل آن کمتر می‌شود. همچنین با افزایش اندازه متوسط سنگ‌دانه‌ها به ویژه در نوع چهار، مسیر رشد ترک پیچیده‌تر شده و انرژی شکست بیشتری نیاز دارند. در آزمایش‌های خمش سه نقطه‌ای و شاخص بار نقطه‌ای، تمرکز نیرو در یک نقطه باعث شد مکانیزم شکست به حضور یا عدم حضور سنگ‌دانه در آن نقطه حساس شود. بااین‌حال، در این آزمایش به دلیل ماهیت بارگذاری متمرکز، موقعیت دقیق سنگ‌دانه‌ها در ناحیه تماس تأثیر محسوسی بر نتایج داشت، به‌طوری‌که در نمونه‌های با دانه‌بندی درشت‌تر (نوع ۳ و ۴) تغییرات مقاومت به‌وضوح مشخص نبود.

به‌طورکلی، افزایش اندازه سنگ‌دانه‌ها با افزایش مقاومت کششی، خمشی و شاخص بار نقطه‌ای همراه بوده است. این امر را می‌توان به نقش سنگ‌دانه‌های درشت‌تر در کنترل و انحراف مسیر ترک‌ها نسبت داد؛ چراکه برخورد ترک با سنگ‌دانه‌هایی با سختی و مقاومت بالاتر، نیازمند صرف انرژی بیشتر برای گسترش شکست است. افزون بر آن، سنگ‌دانه‌های درشت‌تر موجب توزیع یکنواخت‌تر تنش در حجم نمونه شده و از تمرکز تنش جلوگیری می‌کنند. بااین‌حال، پراکندگی نتایج نیز با افزایش اندازه سنگ‌دانه‌ها

بیشتر شده است که احتمالاً به توزیع تصادفی شکل، اندازه و موقعیت سنگ‌دانه‌ها در نمونه‌ها بازمی‌گردد.

این مطالعه با تمرکز ویژه بر تأثیر ترکیبات مختلف دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های ریز و درشت، و با انجام همزمان چندین نوع آزمایش مکانیکی (کششی، خمشی و بار نقطه‌ای)، توانست به‌صورت جامع و هم‌زمان رفتار مکانیکی مواد شبه‌سنگی را در شرایط مختلف بارگذاری بررسی کند. برخلاف بسیاری از تحقیقات پیشین که عمدتاً به خواص فشاری و کششی بتن بسنده کرده‌اند، این پژوهش توانسته است اثرات متقابل دانه‌بندی بر مقاومت خمشی و رفتار جذب انرژی را با دقت بیشتری تحلیل نماید. علاوه بر این، کاربرد مدل‌های ترکیبی از دوغاب سیمانی، دوغاب با پودر سنگ و سنگ‌دانه‌های مختلف، کمک کرد تا نقش هر بخش در بهبود خواص مکانیکی به‌صورت مجزا و ترکیبی روشن شود که می‌تواند راهنمایی دقیق‌تر برای طراحی مواد شبه‌سنگی مقاوم و با عملکرد بهتر در سازه‌های حساس باشد.

برای تحقیقات آینده، پیشنهاد می‌شود دامنه دانه‌بندی‌های موردبررسی گسترش‌یافته و ترکیب‌های متنوع‌تری از نسبت‌های حجمی سنگ‌دانه‌های ریزودرشت مورد آزمایش قرار گیرد تا به بهینه‌ترین ترکیب برای ارتقاء خواص مکانیکی مواد شبه‌سنگی دست‌یافت. همچنین بهره‌گیری از مدل‌سازی‌های عددی پیشرفته می‌تواند درک عمیق‌تری از فرآیندهای ترک‌خوردگی و توزیع تنش در مواد شبه‌سنگی فراهم کند. بررسی تأثیرات دانه‌بندی بر دوام مواد شبه‌سنگی تحت شرایط محیطی متنوع نظیر یخزدگی، خوردگی و بارگذاری چرخه‌ای نیز می‌تواند به توسعه مواد شبه‌سنگی مقاوم‌تر کمک کند. علاوه بر این، مطالعه ترکیب دانه‌بندی بهینه‌شده همراه با افزودنی‌های معدنی و شیمیایی می‌تواند در ارتقای هم‌زمان مقاومت و دوام مواد شبه‌سنگی مؤثر باشد. نهایتاً انجام آزمایش‌های میدانی برای ارزیابی عملکرد عملی این مواد شبه‌سنگی در سازه‌های واقعی، گامی مهم در جهت کاربردی سازی نتایج آزمایشگاهی خواهد بود.همچنین در تفسیر نتایج این پژوهش، فرض بر این است که شرایط آماده‌سازی نمونه‌ها، عمل‌آوری و اجرای آزمایش‌ها تا حد امکان یکسان و قابل مقایسه بوده است. بااین‌حال، این مطالعه با محدودیت‌هایی همراه است. نخست، ترکیب اجزای مخلوط‌ها و نسبت آب به سیمان در نمونه‌های مختلف یکسان نبوده است؛ بنابراین، تغییرات مشاهده‌شده در خواص مکانیکی را نمی‌توان صرفاً به تغییر اندازه سنگ‌دانه‌ها نسبت داد و این تغییرات باید در چارچوب اثر کلی ترکیب و دانه‌بندی مصالح تفسیر شوند. دوم، ارزیابی مکانیکی به آزمایش‌های کشش غیرمستقیم برزیلی، خمش سه‌نقطه‌ای، خمش چهارنقطه‌ای و شاخص بار نقطه‌ای محدود بوده و آزمایش‌هایی مانند مقاومت فشاری تک‌محوری و اندازه‌گیری سرعت امواج فراصوت در این مطالعه انجام نشده‌اند. همچنین، نتایج به ترکیبات و شرایط آزمایشگاهی بررسی‌شده محدود هستند و تعمیم آن‌ها به سایر انواع سنگ‌دانه، نسبت‌های اختلاط یا شرایط اجرایی نیازمند بررسی‌های تکمیلی است. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، با کنترل مستقل اندازه سنگ‌دانه و نسبت آب به سیمان، اثر هر یک از این متغیرها بر خواص مکانیکی مصالح پایه سیمانی به‌صورت جداگانه ارزیابی شود.

۵- منبع ها

[1] J. Chakraborty and M. Stolinski, “Signal-level fusion approach for embedded ultrasonic sensors in damage detection of real RC structures,” *Mathematics*, vol. 10, no. 5, p. 724, 2022.

[2] G. Karaiskos, A. Deraemaeker, D. G. Aggelis, and D. Van Hemelrijck, “Monitoring of concrete structures using the ultrasonic pulse velocity method,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 24, no. 11, p. 113001, 2015, doi: 10.1088/0964-1726/24/11/113001.

[3] K. Feng, Q. Zhao, and Y. Qiu, “Damage imaging in mesoscale concrete modeling based on the ultrasonic time-reversal technique,” *Acta Mech. Solida Sin.*, vol. 33, pp. 61–70, 2020.

[4] E. Gal and R. Kryvoruk, *Properties of concrete*, vol. 4. Longman London, 2010. doi: 10.1201/b10546-17.

[5] T. Akçaoğlu, M. Tokyay, and T. Çelik, "Effect of coarse aggregate size and matrix quality on ITZ and failure behavior of concrete under uniaxial compression," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 26, no. 6, pp. 633–638, 2004, doi: 10.1016/S0958-9465(03)00092-1.

[6] J. Zhang, L. Wang, M. Sun, and Q. Liu, "Effect of coarse/fine aggregate ratio and cement matrix strength on fracture parameters of concrete," *Gongcheng Lixue/Engineering Mech.*, vol. 21, no. 1, pp. 136–142, 2004.

[7] J. Xu and F. Li, "A meso-scale model for analyzing the chloride diffusion of concrete subjected to external stress," *Constr. Build. Mater.*, vol. 130, pp. 11–21, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.054.

[8] P. E. Petersson, "Fracture energy of concrete: Practical performance and experimental results," *Cem. Concr. Res.*, vol. 10, no. 1, pp. 91–101, 1980, doi: 10.1016/0008-8846(80)90055-1.

[9] H. D. Kleinschrodt and H. Winkler, "The influence of the maximum aggregate size and the size of specimen on fracture mechanics parameters," *Fract. toughness Fract. energy Concr.*, pp. 391–402, 1986.

[10] H. Mihashi, N. Nomura, and M. Izumi, "Influence of matrix strength and gravel grain size on fracture properties of concrete. fracture of concrete and rock: Recent developments. papers presented at the international conference, university of wales, college of cardiff, school of engineering, se," *Publ. Soc. Automot. Eng.*, 1989.

[11] H. Mihashi, N. Nomura, and S. Niiseki, "Influence of aggregate size on fracture process zone of concrete detected with three dimensional acoustic emission technique," *Cem. Concr. Res.*, vol. 21, no. 5, pp. 737–744, 1991, doi: 10.1016/0008-8846(91)90168-H.

[12] V. E. Saouma, J. J. Broz, E. Brühwiler, and H. L. Boggs, "Effect of Aggregate and Specimen Size on Fracture Properties of Dam Concrete," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 3, no. 3, pp. 204–218, 1991, doi: 10.1061/(asce)0899-1561(1991)3:3(204).

[13] C. Tasdemir, M. A. Tasdemir, F. D. Lydon, and B. I. G. Barr, "Effects of silica fume and aggregate size on the brittleness of concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 26, no. 1, pp. 63–68, 1996, doi: 10.1016/0008-8846(95)00180-8.

[14] G. A. Rao and B. K. R. Prasad, "Fracture energy and softening behavior of high-strength concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 32, no. 2, pp. 247–252, 2002, doi: 10.1016/S0008-8846(01)00667-6.

[15] B. Chen and J. Liu, "Effect of aggregate on the fracture behavior of high strength concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 18, no. 8, pp. 585–590, 2004, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2004.04.013.

[16] F. T. Suorineni, D. R. Chinnasane, and P. K. Kaiser, "A procedure for determining rock-type specific hoek-brown brittle parameter s," *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 42, no. 6, pp. 849–881, 2009, doi: 10.1007/s00603-008-0024-y.

[17] M. H. A. Beygi, M. T. Kazemi, I. M. Nikbin, J. Vaseghi Amiri, S. Rabbanifar, and E. Rahmani, "The influence of coarse aggregate size and volume on the fracture behavior and brittleness of self-compacting concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 66, pp. 75–90, 2014, doi: 10.1016/j.cemconres.2014.06.008.

[18] J. Il Sim, K. H. Yang, and J. K. Jeon, "Influence of aggregate size on the compressive size effect according to different concrete types," *Constr. Build. Mater.*, vol. 44, pp. 716–725, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.03.066.

[19] Y. Lv, L. Qing, and G. Cao, "Effect of coarse aggregate content on fracture behavior of epoxy-repaired concrete," *Shuili Fadian Xuebao/Journal Hydroelectr. Eng.*, vol. 41, no. 4, pp. 113–120, 2022, doi: 10.11660/slfdxb.20220412.

[20] X. H. Vu, L. Daudeville, and Y. Malecot, "Effect of coarse aggregate size and cement paste volume on concrete behavior under high triaxial compression loading," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 10, pp. 3941–3949, 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.026.

[21] R. H. C. Wong, K. T. Chau, and P. Wang, "Microcracking and grain size effect in Yuen Long marbles," in *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics*, Elsevier, 1996, pp. 479–485. doi: 10.1016/0148-9062(96)00007-1.

[22] R. Přikryl, "Some microstructural aspects of strength variation in rocks," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 38, no. 5, pp. 671–682, 2001, doi: 10.1016/S1365-1609(01)00031-4.

[23] W. F. Brace, "Dependence of fracture strength of rocks on grain size," in *4th U.S. Symposium on*

Rock Mechanics, USRMS 1961, ARMA, 1961, pp. 99–103.
[24] A. A. Griffith, “Griffith AA (1920) The phenomena of rupture and flow in solids. Philos Trans R Soc Lond Ser A Math Phys Sci 221(587):163–198,” in *Royal Soc*, 1920.
[25] Z. A. Tunio, F. U. R. Abro, T. Ali, A. S. Buller, and M. A. Abbasi, “Influence of Coarse Aggregate Gradation on the Mechnical Properties of Concrete, Part I: No-Fines Concrete,” *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 9, no. 5, pp. 4612–4615, 2019, doi: 10.48084/etasr.3046.
[26] C. Wang, Q. Qiu, X. Wang, S. Zhang, G. Wang, and P. Wei, “Concrete Aggregate-Gradation Effect and Strength-Criterion Modification for Fully Graded Hydraulic Concrete,” *Materials (Basel).*, vol. 17, no. 15, p. 3816, 2024, doi: 10.3390/ma17153816.
[27] R. Mohseni Afkham, M. Bahaaddini, and A. Majdi, “Experimental investigation on the effect of loading platen curvature on the failure patterns in the brazilian test,” *J. Eng. Geol.*, pp. 414–429.
[28] R. Mohseni Afkham, E. Rafiei, and A. Taheri, “Influence of Mix Design on Brittleness and Ductility Characteristics of Rock-Like Materials from a Mechanical Energy–Based Perspective,” *J. Min. Environ.*, 2026.
[29] R. Mohseniafkham, A. Faghihi Habibabadi, and H. Atapour, “Comparison of Indirect Tensile Strength Determination Methods for Samples Ranging from Fine-Grained to Coarse-Grained,” *J. ROCK Mech.*, vol. 9, no. 3, pp. 23–39, 2025.
[30] A. Doostan, S. M. Eftekhari, and M. Ahmadi, “Experimental Investigation of the Effect of Grain Size on the Mechanical Parameters and Mode I Fracture Toughness of Rock-Like Materials,” *J. ROCK Mech.*, vol. 8, no. 2, pp. 21–34, 2024.
[31] M. H. Mokhtarzadeh and E. Taheri, “Evaluation of the Mechanical Properties of Cement Mortar Containing Expanded Vermiculite Aggregate,” *J. Rock Mech.*, vol. 8, no. 2, pp. 1–19, 2024.
[32] L. Faramarzi, M. Darbor, B. Ebrahimi Jouzdani, and S. H. Hoseinie, “The effect of anisotropy on the mechanical properties of artificial rock mass based on laboratory physical modeling,” *روش های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن*, vol. 13, no. 35, pp. 51–62, 2023, doi: 10.22034/anm.2022.2860.
[33] M. Darbor, L. Faramarzi, and M. Sharifzadeh, “Size-dependent compressive strength properties of hard rocks and rock-like cementitious brittle materials,” *Geosystem Eng.*, vol. 22, no. 4, pp. 179–192, 2019.
[34] M. Darbor, L. Faramarzi, M. Sharifzadeh, and H. Rezaei, “Evaluation of Specimen Size-Effect in Sedimentary Rocks and Grain Size Effect in Concrete Specimens on Uniaxial Compressive Strength,” *J. Anal. Numer. Methods Min. Eng.*, vol. 8, no. 16, pp. 57–70, 2018.
[35] G. Hondros, “The evaluation of Poisson’s ratio and modulus of materials of a low tensile resistance by the Brazilian (indirect tensile) test with particular reference to concrete,” *J. AppL Sci.*, vol. 10, no. 3, pp. 243–268, 1959.
[36] P. Pandey and D. P. Singh, “Deformation of a rock in different tensile tests,” *Eng. Geol.*, vol. 22, no. 3, pp. 281–292, 1986, doi: 10.1016/0013-7952(86)90029-3.
[37] A. Standard, “Standard specification for Portland cement,” *ASTM Int. West Conshohocken, PA*, 2009.
[38] E. S. Berney and D. M. Smith, “Mechanical and physical properties of ASTM C33 Sand,” 2008.
[39] Z. T. Bieniawski and I. Hawkes, “Suggested Methods for Determining Tensile Strength of Rock Materials - 1. Suggested Method for Determining Direct Tensile Strength.,” *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 15, no. 3, pp. 99–103, 1978.
[40] C. ASTM, “192/C 192M Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory,” *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. 4, 2007.
[41] J. J. Liao, M. T. Yang, and H. Y. Hsieh, “Direct tensile behavior of a transversely isotropic rock,” *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 34, no. 5, pp. 837–849, 1997, doi: 10.1016/s1365-1609(96)00065-4.
[42] N. Erarslan and D. J. Williams, “Investigating the effect of cyclic loading on the indirect tensile strength of rocks,” *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 45, no. 3, pp. 327–340, 2012, doi: 10.1007/s00603-011-0209-7.
[43] V. P. Efimov, “Efimov V (2009) The rock strength in different tension conditions. J Min Sci 45:569–575. https://doi.org/10.1007/ s10913-009-0071-0,” *J. Min. Sci.*, vol. 45, no. 6, pp. 569–575, 2009, doi: 10.1007/s10913-009-0071-0.

[44] T. S. EN, “TS EN 12372, ‘Natural stone test methods- Determination of flexural strength under concentrated load,’ Turkish Standards Institution, 2013.,” *Inst. Turkish Stand.*, p. 15.

[45] NP EN 13161:2006, “NP EN 13161:2006 - Natural stone test methods Determination of flexural strength under constant moment (in Portuguese),” 2006, *Turkish Standards Institution Ankara*.

[46] E. Broch and J. A. Franklin, “The point-load strength test,” in *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Elsevier, 1972, pp. 669–676.

[47] M. Fener, S. Kahraman, A. Bilgil, and O. Gunaydin, “A comparative evaluation of indirect methods to estimate the compressive strength of rocks,” *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 38, no. 4, pp. 329–343, 2005, doi: 10.1007/s00603-005-0061-8.

[48] S. Kahraman, “Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock,” *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 38, no. 7, pp. 981–994, 2001, doi: 10.1016/S1365-1609(01)00039-9.

[49] R. Afshar, L. Faramarzi, M. Mirsayar, B. Shahbazian, and M. R. M. Aliha, “Effect of Aggregate Size on the Fracture Behavior of Concrete Under Modes I, III, and I/III Conditions,” *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 2025, doi: 10.1111/ffe.70028.

[50] M. Elices and C. G. Rocco, “Effect of aggregate size on the fracture and mechanical properties of a simple concrete,” *Eng. Fract. Mech.*, vol. 75, no. 13, pp. 3839–3851, 2008, doi: 10.1016/j.engfracmech.2008.02.011.

[51] W. Dengke, Z. Gaozhan, L. Yang, and D. Qingjun, “Experimental investigation and reliability prediction of high performance concrete based on lightweight aggregate under 4-point bending loading,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 18, p. e01804, 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01804.

[52] A. Dolatshahi, M. Arash, and H. Molladavoodi, “Recycled aggregate size effect on shear and tensile fracture toughness of SCB Eco-friendly cemented specimens,” *Sci. Rep.*, vol. 16, no. 1, p. 1391, 2026, doi: 10.1038/s41598-025-31318-1.

Journal of Rock Mechanics
Vol. 10, No. 2, PP. 103-124, (2026)

https://doi.org/10.22034/IRSRM.2026.600913.1093

An Experimental Study of the Effect of Aggregate Size on the Strength Parameters of Cement-Based Materials

Reza Mohseni Afkham[1], Abolfazl Faghihi[2], Javad Moshtaghi[3], Hadi Atapour[4*]

1- Department of Mining Engineering, Faculty of Mining Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
2- Department of Mining Engineering, Faculty of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.
3- Technical Engineer, Technical Office, Kansar Faravar Aras Bonyan Co., Isfahan, Iran.
4- Department of Geomechanical Engineering, Faculty of Earth Sciences Engineering, Arak University of Technology, Markazi, Iran.

Received: 28 July 2026 Accepted: 22 September 2026
(*Corresponding author: h.atapour@arakut.ac.ir)

Keywords

Rock-like materials
Grain size distribution
Indirect tensile strength
Three-point bending test
Four-point bending test
Point load index

Final English Extended Abstract

Concrete and rock-like materials are among the most widely used construction materials worldwide due to their availability, low production costs, and suitable mechanical properties. They play an important role in the construction of civil engineering structures, including bridges, dams, and buildings. Despite extensive research, the precise effects of aggregate gradation characteristics on the mechanical behavior of rock-like materials, particularly under tensile and flexural loading conditions, have not yet been fully investigated .In this study, the effects of aggregate gradation on the mechanical properties of rock-like materials were investigated through a series of tensile and flexural tests. Four different mixtures were used to prepare the specimens: cement slurry without aggregate (Type 1), cement mixed with stone powder (Type 2), cement mixed with fine aggregates (Type 3), and cement mixed with fine and coarse aggregates (Type 4). To provide a comprehensive assessment of mechanical behavior, Brazilian indirect tensile tests, three-point bending tests, four-point bending tests, and point-load index tests were performed on the specimens .The results showed that specimen strength exhibited an increasing trend as the mixture composition changed from Type 1 to Type 4. In the Brazilian test, strength increased by 21%, 37%, and 5% across the three successive mixture transitions. Similarly, three-point flexural strength increased by 82%, 76%, and 79%, while four-point flexural strength increased by 34%, 17%, and 34%, respectively. In addition, the displacement corresponding to the peak load increased in all tests. The results indicate that changes in mixture composition and aggregate gradation can influence the mechanical response of rock-like materials under different loading conditions .The novelty of this study lies in providing a comparative analysis of the tensile and flexural behavior of different rock-like material mixtures using four experimental methods. The findings can contribute to a better understanding of the mechanical behavior of these materials.

Introduction

Concrete and rock-like materials are fundamental to civil infrastructure (bridges, dams, buildings) because of their availability, cost-effectiveness and useful mechanical properties. However, the influence of aggregate gradation — in particular grain size — on tensile and flexural behavior remains incompletely understood, and this gap limits optimized mixture design for applications where tensile or bending failure controls performance. This paper addresses that gap by experimentally investigating how changing aggregate grain size affects the tensile and bending response of cement-based

Journal of Rock Mechanics
Vol. 10, No. 2, PP. 103-124, (2026)

https://doi.org/10.22034/IRSRM.2026.600913.1093



rock-like materials.
Previous studies have linked grain size and aggregate characteristics to fracture processes and strength variation in rocks and concretes [9], [10], [23], [24]. Nevertheless, most prior work focuses on compressive or fracture parameters in isolation; comparatively few studies provide a combined experimental view of tensile (indirect) and multiple bending tests together to reveal how gradation controls crack initiation, propagation and energy absorption. The present study positions itself within that literature and builds on both classic fracture mechanics arguments and recent aggregate-gradation investigations.
To examine these effects systematically, four mixture types were prepared: (Type 1) cement slurry without aggregates; (Type 2) cement with stone powder; (Type 3) cement with fine aggregates; and (Type 4) cement with both fine and coarse aggregates. After standard curing, samples were tested using the indirect (Brazilian) tensile test, three-point bending, four-point bending and the point-load index test; loading was applied and load–displacement was recorded continuously according to ISRM/ASTM practice.
The main findings show a consistent, systematic increase in tensile and bending strengths as aggregate size increases, together with larger displacements at peak load (i.e., greater ductility and energy absorption). Micro-mechanically, these improvements are attributed to coarser aggregates producing more tortuous crack paths, reducing local stress concentration, and promoting a more uniform stress distribution throughout the specimen. By combining Brazilian, 3- and 4-point bending and point-load tests, this work provides a comprehensive experimental picture of how aggregate gradation affects crack propagation and macroscopic mechanical performance — information useful for mixture design where tensile and flexural resistance matter.

Methodology and Approaches

based rock-like materials, four mixture types were prepared with identical cement content and water-to-cement ratio, differing only in aggregate composition:

- **Type 1**: Cement slurry without any aggregates.
- **Type 2**: Cement with stone powder as filler.
- **Type 3**: Cement with fine aggregates only.
- **Type 4**: Cement with both fine and coarse aggregates.

All mixtures were cast in standard molds, compacted to minimize voids, and cured in water at room temperature for 28 days before testing. This curing protocol follows common ISRM and ASTM recommendations for ensuring hydration and consistent material properties

Mechanical Testing

Four mechanical tests were conducted to evaluate tensile and flexural properties:

1. **Brazilian Indirect Tensile Test**
    - Performed according to ASTM D3967 and ISRM suggested method.
    - Disk-shaped specimens were loaded diametrically at a constant displacement rate of **0.2 mm/min** until failure.
2. **Three-Point Bending Test**
    - Conducted following ASTM C78.
    - Beam specimens were simply supported and loaded at midspan; flexural strength was derived from peak load and span geometry.

Journal of Rock Mechanics
Vol. 10, No. 2, PP. 103-124, (2026)

https://doi.org/10.22034/IRSRM.2026.600913.1093



3. **Four-Point Bending Test**
    - Conducted in accordance with ASTM C1609.
    - Beams were supported at two ends and loaded symmetrically to generate a constant bending moment region.
4. **Point-Load Index Test**
    - Performed according to ISRM guidelines.
    - Specimens were compressed between conical platens, and the point-load index was calculated as an indirect tensile measure.

Data Collection and Analysis

During all tests, load and displacement were recorded continuously using digital load cells and displacement transducers. Peak load, strength values, and displacement at failure were extracted for each specimen. Multiple specimens per mixture type were tested to assess reproducibility and variability. Statistical analysis of results was performed by comparing mean values and standard deviations across mixture types..

Results and Conclusions

The present study systematically examined the effect of aggregate grain size on the tensile and flexural behavior of cement-based rock-like materials using Brazilian tensile, three- and four-point bending, and point-load tests. Based on the findings, the following conclusions are drawn:

1. **Principles and Generalizations**
    - Increasing aggregate size consistently enhanced both tensile and flexural strengths across all test types.
    - Larger aggregates also increased the displacement at peak load, indicating greater ductility and higher energy absorption capacity.
    - These improvements are attributed to more tortuous crack propagation paths and more uniform stress distribution induced by coarse aggregates.
2. **Exceptions and Limitations**
    - The variability of results increased with coarser aggregate mixtures due to the random distribution of large particles within the cement matrix.
    - Only one type of cement and a limited range of aggregate gradations were investigated; results may not be universally generalizable.
    - Environmental effects (e.g., freeze–thaw cycles, chemical exposure) and long-term durability were not addressed in this study.
3. **Theoretical and Practical Implications**
    - From a theoretical perspective, the results support fracture mechanics models that predict aggregate size significantly affects crack path tortuosity and stress distribution.
    - Practically, the findings suggest that coarser aggregate gradations should be favored in mixture designs where tensile and flexural resistance are critical, such as dams, bridges, and repair materials exposed to bending or tensile stresses.
4. **Recommendations**
    - Future work should expand the range of aggregate gradations, consider different aggregate shapes and mineralogies, and incorporate numerical modeling of fracture processes.
    - Additional experimental studies should investigate durability under environmental conditions (freeze–thaw, chemical attack) to confirm the robustness of the observed trends.

Journal of Rock Mechanics
Vol. 10, No. 2, PP. 103-124, (2026)

https://doi.org/10.22034/IRSRM.2026.600913.1093



- Field-scale trials are recommended to validate laboratory findings and assess constructability and performance in real engineering applications.
