

مطالعه آزمایشگاهی خصوصیات مکانیکی سنگ‌های مصنوعی با هدف تعیین ترکیب بهینه مواد تشکیل دهنده

ستار مهدوری^۱؛ مهدی مرتضی پور^۲

۱- استادیار، عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)
۲- دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۱؛ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۰۱

(نویسنده مسئول: satar.mahdevari@aut.ac.ir)

چکیده

پیشرفت صنعت ساختمان از یک سو و سلیقه‌های متفاوت بشر از سوی دیگر موجب ابداع و گسترش روزافزون انواع سنگ مصنوعی شده است. در این پژوهش تأثیر ویژگی‌های سنگ طبیعی، نوع دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها، کمیت و کیفیت ماتریکس چسباننده و نیز انواع افزودنی‌ها بر خصوصیات مکانیکی سنگ‌های مصنوعی مطالعه شده است. برای این منظور نمونه‌های متعدد سنگ مصنوعی با استفاده از سنگ‌دانه‌های کربناته با دانه‌بندی‌های مختلف و ماتریکس پلیمری و سیمانی با یا بدون افزودنی سیلیس (کوارتز) و الیاف شیشه تولید و خصوصیات مکانیکی آنها در آزمایشگاه بررسی شد. بر اساس نتایج حاصل، سنگ‌های مصنوعی پلیمری از نظر وزن مخصوص، تخلخل، مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی نتایج بهتری نسبت به سنگ‌های مصنوعی سیمانی و سنگ‌های طبیعی داشتند. در همه موارد افزودن سیلیس موجب بهبود ویژگی‌های سنگ مصنوعی شد. همچنین افزودن الیاف شیشه بر مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ‌های مصنوعی تقریباً بی‌تأثیر بود، اما سایر ویژگی‌ها را بهبود داد. بیشترین مقاومت فشاری تک‌محوری برابر ۱۰۹/۱۰ مگاپاسکال از سنگ مرمر مصنوعی متشکل از ۱۸٪ رزین اپوکسی و ۱۰٪ افزودنی سیلیس به دست آمد. همین‌طور کمترین جذب آب به میزان ۰/۲۶٪ در سنگ مرمریت مصنوعی با ۱۸٪ رزین اپوکسی و ۱۰٪ افزودنی سیلیس مشاهده شد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد نوع پودر سنگ، دانه‌بندی سنگ‌دانه، نوع و مقدار ماتریکس چسباننده و نوع و نسبت افزودنی‌ها در تعیین ویژگی‌های مکانیکی سنگ مصنوعی مؤثر هستند.

واژگان کلیدی

سنگ مصنوعی، بهینه‌سازی مواد تشکیل دهنده، خصوصیات مکانیکی، مقیاس آزمایشگاهی

۱- مقدمه

مصرف‌کننده محدود است. بر این اساس در دهه اخیر تولید و کاربرد انواع سنگ مصنوعی به‌عنوان جایگزین سنگ طبیعی با استقبال گسترده‌ای مواجه شده است [۱]. سنگ مصنوعی از ترکیب مجدد خرده‌های سنگ‌های طبیعی با مواد چسباننده همچون سیمان، رزین پلیمری، رنگ‌دانه و مواد افزودنی تشکیل می‌شود و در صنعت ساخت و ساز جایگزینی

امروزه استخراج و فرآوری سنگ‌های ساختمانی طبیعی دشوار، پرهزینه و باتولید باطله زیاد و در نتیجه بهره‌وری کم و تخریب محیط‌زیست همراه است. از طرفی سنگ طبیعی پاسخگوی سلاقی متنوع مصرف‌کنندگان و دکوراسیون مدنظر معماران نیست. بنابراین امکان انتخاب سنگ طبیعی به‌تناسب کاربرد و نیاز

آزمون‌های انجام‌شده مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها بین هشت تا پانزده مگاپاسکال به دست آمد. همچنین افزایش فشار تراکمی بیشتر از ۳۱۰ اتمسفر تأثیر چندانی روی مقاومت فشار تک‌محوری نداشت. به‌منظور برآورد تأثیر هم‌زمان فشار تراکمی و نسبت سیمان به پودر سنگ‌آهک بر مقاومت فشاری تک‌محوری با استفاده از روش‌های آماری یک مدل خطی به دست آمد که بیانگر تأثیر به‌مراتب بیشتر نسبت سیمان به پودر سنگ‌آهک در تعیین مقاومت فشاری تک‌محوری است [۴]. لی و همکاران برای تولید سنگ مصنوعی از سنگ‌دانه‌های طبیعی، ضایعات شیشه و رزین پلیمری غیراشباع استفاده کردند. محققین این پژوهش در نهایت به مقاومت فشاری تک‌محوری $148/8 \text{ MPa}$ ، مقاومت خمشی $51/1 \text{ MPa}$ و جذب آب کمتر از $0/02\%$ دست یافتند و اظهار داشتند که استفاده از ضایعات شیشه و سنگ‌دانه طبیعی گرانیتی نه تنها یک جایگزین برای سنگ‌های ساختمانی طبیعی ارائه می‌دهد، بلکه تولید و کاربردهای آن نیز مزایای اقتصادی زیادی را به همراه دارد [۵]. صارمی و مهدویان یک نوع سنگ مصنوعی با استفاده از ضایعات سنگ، سیمان، آب، رزین پلی‌استر و پرکننده‌های کربنات کلسیم، میکرو سیلیس، دی‌اکسید تیتانیوم و اکسید روی تولید کردند. نمونه‌ها به مدت ۳، ۷ و ۲۸ روز در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد در استخر آب قرار داده شدند. برخلاف بتن، سنگ مصنوعی در غیاب آب مقاومت بهتری نشان داده است. به‌طورکلی خواص مکانیکی سنگ‌های مصنوعی تهیه‌شده با ضایعات تراورتن بهتر از سنگ‌های تولیدشده با ضایعات مرمریت بود. اضافه نمودن میکرو سیلیس و دی‌اکسید تیتانیوم باعث بهبود خواص مکانیکی و کاهش منافذ سنگ شد [۶]. میرجلیلی و همکاران با ساخت نمونه‌های سنگ مصنوعی از سنگ‌دانه‌های تراورتن و سنگ کربناته، تأثیر فشار، خلاء و ویریه در بهبود خصوصیات مکانیکی سنگ را بررسی کردند. به این ترتیب که دو پارامتر فشار و خلاء نقش مؤثری در کاهش تخلخل و درصد جذب آب نشان دادند. همچنین با افزایش جذب آب، دوام سنگ کاهش یافت. بر اساس نتایج این پژوهش تأثیر عامل فشار در ویژگی‌های فیزیکی سنگ مصنوعی شامل وزن واحد حجم، تخلخل و درصد جذب آب بیشتر از خلاء است؛ اما اعمال هم‌زمان خلاء در حین متراکم نمودن نقش مؤثرتری در بهبود ویژگی‌های فیزیکی سنگ مصنوعی دارد [۷]. بابا آدم و همکاران با به‌کارگیری سه نوع سنگ‌دانه مختلف از جنس توف، گرانیت، آندزیت و ماتریکس پلیمری و اعمال فشار تراکمی حین فرآیند، تأثیر سنگ‌دانه‌های سیلیکاته بر خصوصیات مکانیکی سنگ مصنوعی را بررسی کردند. با توجه به ساختار متخلخل توف طبیعی، این سنگ بیشترین

مناسب برای سنگ طبیعی است. از جمله مزایای سنگ مصنوعی نسبت به سنگ طبیعی می‌توان به هزینه تمام‌شده کمتر، دورریز و هدر رفت کمتر، تنوع در رنگ و طرح، وزن مخصوص کمتر، جذب آب بسیار ناچیز، عدم محدودیت در ابعاد، قابلیت تولید با مقاومت‌های برابر یا بیشتر از سنگ طبیعی، دوام و پایداری فوق‌العاده در برابر عوامل جوی، شیمیایی و فیزیکی، قابلیت ایجاد ویژگی‌های خاص برای کاربردهای ویژه، ساب‌پذیری بهتر، یکنواختی بافت سنگ، همگن بودن و نداشتن سطوح ناپیوستگی و سازگاری با محیط‌زیست اشاره کرد [۲].

در رابطه با تاریخچه سنگ مصنوعی اطلاعات دقیقی در دست نیست؛ ولی بر اساس شواهد تاریخی قدمت سنگ مصنوعی به تولید اولین موزائیک در حدود ۲۰۰۰ سال قبل در روم باستان برمی‌گردد که از خرده‌سنگ‌های طبیعی ساخته شده بود. با این حال از الینور کوادی^۱ و فردریک رنسام^۲ صنعت‌گر بریتانیایی قرن نوزدهم، به‌عنوان مخترع سنگ مصنوعی مدرن نام برده می‌شود. تولید صنعتی سنگ مصنوعی به شکل امروزی آن از دهه ۱۹۶۰ در کشور ایتالیا آغاز شده است [۳].

بنابراین دانش تولید سنگ مصنوعی نوپا است و توسعه این فناوری جز با تلفیق پژوهش‌های علمی و تجارب عملی میسر نخواهد شد. در این میان بهینه‌سازی ترکیب مواد سازنده یکی از مهم‌ترین موضوع‌های پژوهش در این حوزه است که ضمن کاهش هزینه تولید، بازیابی باطله‌های معدنی و بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ مصنوعی، زمینه را برای افزودن قابلیت‌های جدیدی به سنگ مصنوعی نظیر تصفیه آلاینده‌های زیست‌محیطی یا ذخیره‌سازی انرژی گرمایی فراهم می‌کند.

۲- پیشینه پژوهش

اگر چه تولید سنگ مصنوعی قدمت طولانی دارد، ولی مطالعه علمی و پژوهش‌های مربوط به خواص مکانیکی سنگ‌های مصنوعی و ترکیب تشکیل‌دهنده آنها یکی از موضوعات پژوهشی مورد توجه محققین است. در ادامه این بخش به برخی از تحقیقات اخیر مرتبط با موضوع به طور مختصر اشاره می‌شود.

گالتاکیس^۳ و راکا یک نوع سنگ مصنوعی تولید کردند که در آن سیمان پرتلند تیپ یک، پودر سنگ‌آهک متشکل از ۹۸٪ وزنی کلسیت (با سطح ویژه ۱/۱ تا ۱/۶ مترمربع بر گرم)، پودر کوارتز و دولومیت استفاده شد. نسبت پودر سیمان (C) به سنگ‌آهک (LD) و فشار تراکم (P)، به‌عنوان دو متغیر مستقل (متغیرهای فرآیند) در نظر گرفته شدند؛ درحالی‌که مقاومت فشاری تک‌محوری ۲۸ روزه، متغیر وابسته فرض شد. بر اساس نتایج

³ Galetakis

¹ Eleanor Coade

² Frederick Ransome

و پلیمری (رزینی) وجود دارد؟ افزودن سنگدانه سیلیسی و ایف شیشه چه تأثیری بر ویژگی‌های سنگ مصنوعی خواهد داشت؟ بر این اساس در این پژوهش از سنگ‌های کربناته سه معدن تراورتن حصار سفید (TH)، مرمریت وزمان (MA) و مرمر قشلاق‌لو (OG) استفاده شده است که ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی آنها در جدول ۱ ارائه شده است:

جدول ۱- میانگین مقادیر مشخصات مکانیکی سنگ‌های طبیعی

پارامتر	واحد	TH	OG	MA
وزن مخصوص	(gr/cm ³)	۲/۵۱	۲/۷۲	۲/۶۴
تخلخل	(%)	۷/۸۱	۰/۰۴	۲/۲۰
مقاومت کششی	(MPa)	۸/۴۵	۱۰/۰۷	۱۰/۷۴
مقاومت فشاری تک‌محوری	(MPa)	۴۷/۵۶	۱۲۰/۳۲	۱۱۱/۲

۳-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها

برای آماده‌سازی نمونه‌های سنگ طبیعی ابتدا قطعاتی به وزن حدود ۲۰۰ کیلوگرم از هر معدن تهیه و به آزمایشگاه منتقل شد. برای انجام آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری و آزمون مقاومت کششی غیرمستقیم مغزه‌های استاندارد از بلوک سنگ‌ها تهیه و در ادامه مغزه‌ها با برش و پرداخت سطوح قاعده آماده‌سازی شدند (شکل ۱). سپس باقیمانده سنگ‌ها با استفاده از سنگ‌شکن فکی *KJC-1223* و سنگ‌شکن مخروطی *DF-CCR* خرد شد و سنگ‌دانه‌های حاصل در دو گروه ریز (۰ تا ۲ میلی‌متر) و درشت (۲ تا ۱۹/۱ میلی‌متر) دسته‌بندی شدند.



شکل ۱- مراحل تهیه و آماده‌سازی مغزه‌ها

رزین اپوکسی با سخت‌کننده پلی‌آمین به‌عنوان ماتریکس چسباننده انتخاب شد. این رزین مایعی است که به کمک جزء سخت‌کننده خود چسبی با ویسکوزیته پایین می‌سازد که می‌تواند بازه دمایی وسیعی از ۵ تا ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد را تحمل کند. مقاومت مکانیکی خوب، مقاومت در برابر آب، جمع‌شدگی کم در اثر انجام واکنش پلیمریزاسیون و مقاومت حرارتی بالا از دیگر ویژگی‌های مثبت این رزین است؛ درحالی‌که نیاز به تمهیدات

درصد جذب آب را نشان داد. ولی نمونه‌های آندزیت و گرانیت به دلیل ساختار بلوری، آب کمتری جذب کردند. از طرف دیگر روند کاهش مقاومت فشاری تک‌محوری و همچنین مقاومت کششی غیرمستقیم برای سنگ‌های مصنوعی آندزیت و توف و روند افزایشی این دو ویژگی برای سنگ مصنوعی گرانیت مشهود بود [۸]. دیمارتینی و همکاران در پژوهش دیگری ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ مصنوعی تولیدشده از ضایعات مرمر دولومیتی را ارزیابی کردند. آزمون‌های مکانیکی نشان داد که سنگ مصنوعی تولیدشده دارای حداکثر مقاومت خمشی ۳۳/۹۳ مگاپاسکال و مقاومت فشاری ۹۶/۴۹ مگاپاسکال است که در مقایسه با سنگ مرمر تجاری بهتر است. همچنین انحراف استاندارد کم، یکنواختی سنگ‌های مصنوعی تولیدشده را تأیید کرد [۹]. گومز و راکا با استفاده از سنگ‌دانه‌های متشکل از بقایای آجرهای شاموتی و پودر سنگ و ماتریکس اپوکسی تحت عوامل فشار، ویبره و خلاء یک نوع سنگ مصنوعی تولید کردن که دارای مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال و مقاومت عالی در برابر سایش است [۱۰]. سپهوند و بارانی از سنگ‌دانه گرانیت و مرمریت و رزین پلی‌استر غیراشباع اورتوفتالیک برای تولید سنگ مصنوعی از ضایعات سنگ تزئینی استفاده کردند. بر اساس نتایج آنها با افزایش مقدار رزین و به تبع آن کاهش مقدار ضایعات، مقاومت فشاری دچار افت شد ولی مقاومت‌های کششی و خمشی بهبود پیدا کردند. همچنین افزایش مقدار رزین بیشترین تأثیر را به ترتیب بر مقاومت‌های خمشی، کششی و فشاری داشته است [۱۱]. شیشه‌گران و همکاران برای تولید سنگ مصنوعی حاوی ۹۰٪ پودر تراورتن، ۱۰٪ لجن تراورتن و ۲۵٪ رزین اپوکسی ۸۲۸ (نسبت به بخش جامد)، به مقاومت فشاری میانگین ۵۵ مگاپاسکال دست یافتند. همچنین بهترین مقدار مقاومت فشاری و خمشی به ترتیب ۶۷/۳ و ۶۰/۷ مگاپاسکال برای سنگ حاوی ۹۰٪ پودر تراورتن، ۱۰٪ لجن تراورتن و ۳۰٪ رزین اپوکسی ۸۲۸ به دست آمد [۱۲].

۳- روش انجام پژوهش

در سال‌های اخیر پژوهشگران بسیاری در زمینه تولید سنگ مصنوعی کار کرده‌اند اما اکثر آنها یک جنبه خاص از مواد اولیه یا فرآیند تولید سنگ مصنوعی را مورد بررسی قرار داده‌اند. این پژوهش با هدف دستیابی به ترکیب بهینه مواد سازنده سنگ مصنوعی در پی بررسی تأثیر متقابل و هم‌زمان نوع سنگ‌دانه، دانه‌بندی، نوع و مقدار ماتریکس چسباننده و همچنین نوع و مقدار افزودنی‌ها از طریق پاسخ به پرسش‌های زیر است: کدام ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ مصنوعی و سنگ طبیعی ارتباط مستقیم دارند؟ تأثیر دانه‌بندی سنگ‌دانه در خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ مصنوعی چیست؟ چه تفاوتی بین سنگ مصنوعی سیمانی

مصنوعی با دانه بندی ریزدانه، متوسط و درشت دانه با افزودنی سیلیس و الیاف شیشه ساخته شد. نسبت آب به سیمان در همه نمونه های سیمانی ۰/۵ است. سنگ های مصنوعی رزینی بعد از ۴۸ ساعت و سنگ های مصنوعی سیمانی پس از ۷ روز عمل آوری در دمای آزمایشگاه، از قالب خارج شدند.

برای معرفی ترکیب مواد تشکیل دهنده نمونه ها، یک کد برای هر نمونه تعریف شده است. به این ترتیب که حرف A، مصنوعی بودن سنگ را نشان می دهد. دو حرف بعدی شامل حروف TH، OG و MA به ترتیب معرف نوع سنگ دانه تراورتن حصارسفید، مرمر قشلاق لو و مرمریت وزمان است. عدد قبل از حرف f بیانگر درصد وزنی ریزدانه و عدد قبل از حرف C معرف درصد وزنی درشت دانه است. عدد همراه Si معرف درصد وزنی افزودنی سیلیس و عدد همراه Gf نشان دهنده درصد وزنی الیاف شیشه است. در نهایت عدد آخر، درصد وزنی ماتریکس را نشان می دهد که اگر رزین اپوکسی باشد از ER، اگر سیمان پرتلند باشد از PC و اگر سیمان سفید باشد از WC استفاده شده است.

نمودار نتایج آزمایش های مربوط به نمونه های سنگ طبیعی و سنگ مصنوعی تراورتن حصارسفید، مرمر قشلاق لو و مرمریت وزمان در شکل های ۴ تا ۷ ارائه شده است. به این ترتیب در شکل ۴ نتایج وزن مخصوص در نمونه های طبیعی و مصنوعی، در شکل ۵ نتایج درصد تخلخل در نمونه های طبیعی و مصنوعی، در شکل ۶ نتایج مقاومت کششی در نمونه های طبیعی و مصنوعی و در شکل ۷ نتایج مقاومت فشاری در نمونه های طبیعی و مصنوعی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، در نمونه های سنگ مصنوعی بر پایه رزین اپوکسی مقاومت های کششی و فشاری نسبت به نمونه های سنگ طبیعی و نمونه های سنگ مصنوعی بر پایه سیمان به طور چشم گیری افزایش یافته است. همچنین در نمونه های سنگ مصنوعی بر پایه رزین اپوکسی وزن مخصوص و درصد تخلخل نسبت به سایر نمونه ها کاهش یافته است. این موضوع حاکی از استحکام بیشتر در کنار تخلخل کمتر و سبکی نمونه سنگ مصنوعی بر پایه رزین اپوکسی است.

به منظور مقایسه تأثیر مشخصات سنگ دانه ها ابتدا نمونه های مشابه که صرفاً از نظر نوع سنگ دانه متفاوت بودند، انتخاب شدند. سپس وزن مخصوص، تخلخل، مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی آنها با هم مقایسه شد. به عنوان مثال ترکیب مواد تشکیل دهنده یکی از نمونه ها در شکل ۸ و نتایج آزمون های مربوط به آن در شکل ۹ ارائه شده است. همچنین برای بررسی اثر دانه بندی بر خصوصیات مکانیکی سنگ مصنوعی، تخلخل، وزن مخصوص، مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی هر یک از نمونه های سنگ مصنوعی با سنگ دانه های متوسط، ریزدانه (۴۵٪ وزنی ریز، ۳۰٪ درشت) و درشت دانه (۳۰٪ وزنی ریز، ۴۵٪

ایمنی حین جابجایی و استفاده و نیز گران بودن ویژگی های منفی این نوع رزین محسوب می شوند.

از پودر سیلیس (کوارتز) غیر بلوری با دانه بندی ۲۰۰ مش و الیاف شیشه با قطر ۵ تا ۲۵ میکرون به عنوان افزودنی استفاده شد. پس از خردایش، سرند کردن و رطوبت گیری سنگ دانه ها و اضافه نمودن ماتریکس، مخلوط مواد اولیه بر اساس طرح های اختلاط مختلف توسط مخلوط کن دستی به خمیر یکنواختی تبدیل و پس از قالب گیری وارد مرحله عمل آوری نهایی شد (شکل ۲).



شکل ۲- مراحل تهیه نمونه های سنگ مصنوعی

۲-۲-۳- آزمون ها

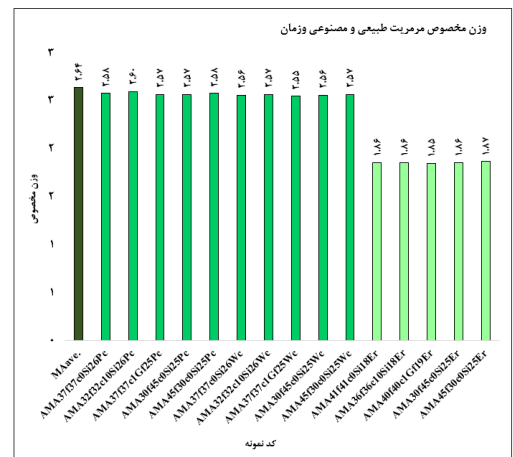
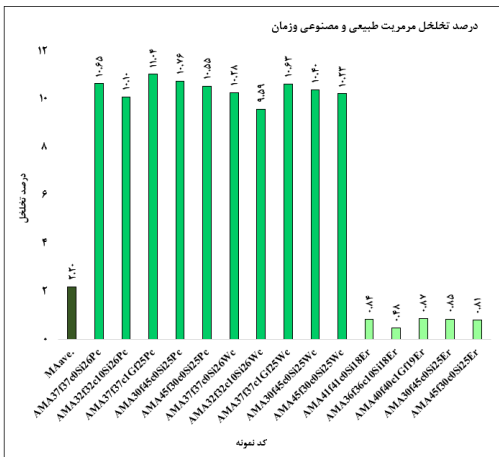
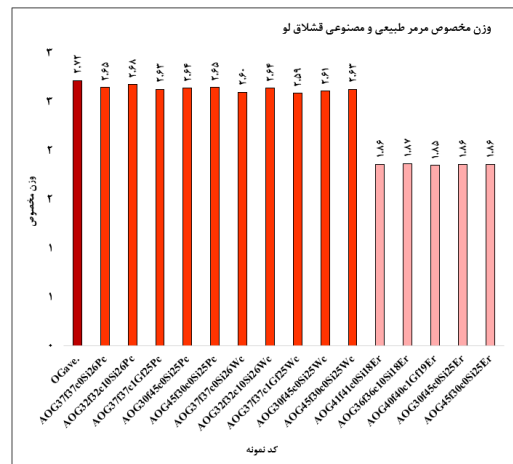
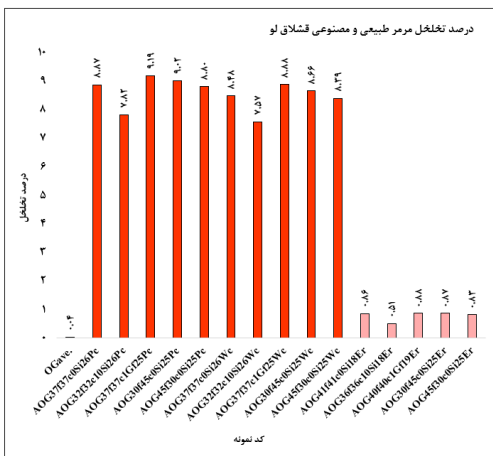
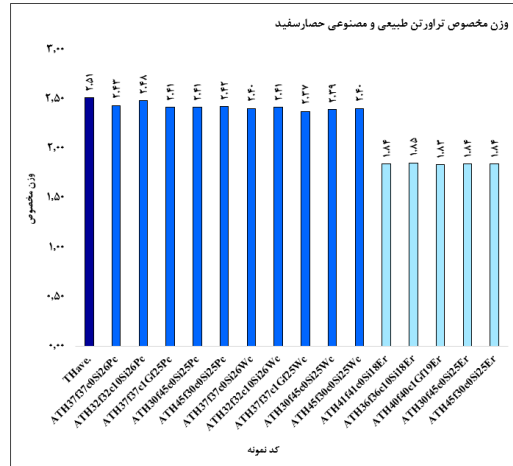
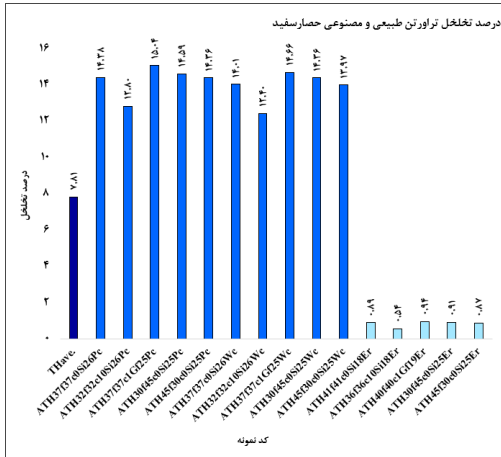
ویژگی های فیزیکی و مکانیکی که در این پژوهش مبنا قرار گرفته است شامل: وزن مخصوص (بر اساس استاندارد *ASTM D 2216*)، درصد تخلخل (مطابق استاندارد *ASTM C 97*)، مقاومت فشاری تک محوری (بر مبنای *ASTM D 2938*) و مقاومت کششی (طبق استاندارد *ASTM D 3967*) است [۱۳]. در شکل ۳ نمونه تحت آزمایش مقاومت تک محوری نشان داده شده است.



شکل ۳- آزمون مقاومت فشاری تک محوری

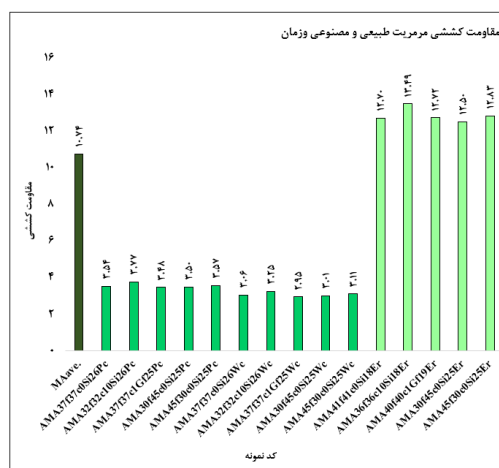
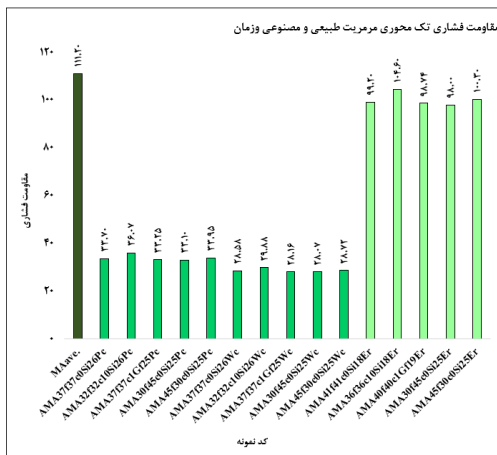
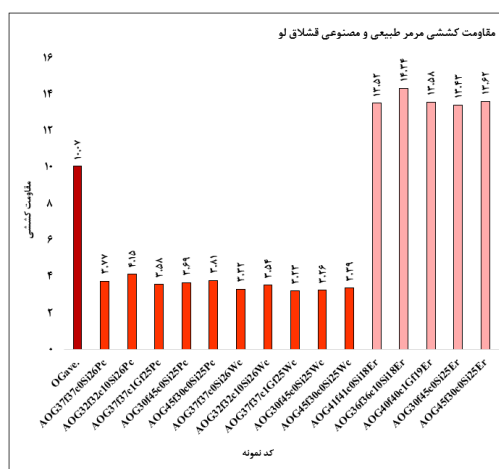
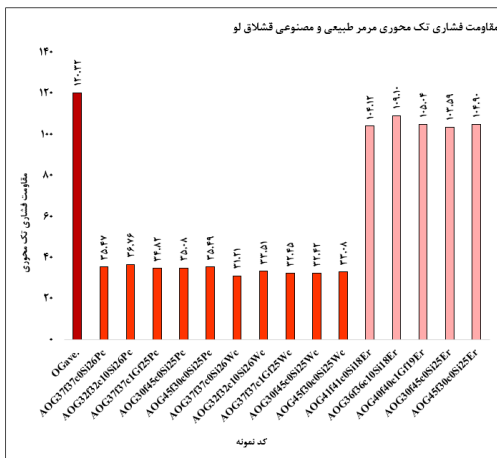
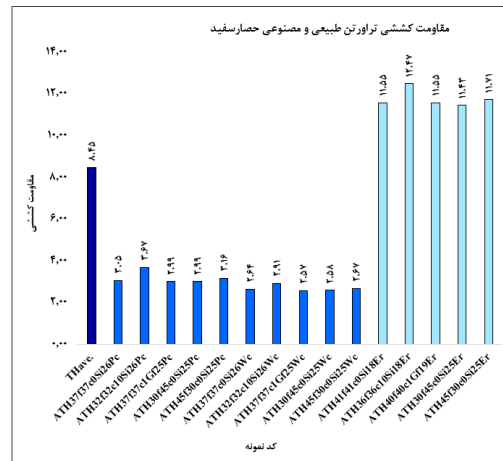
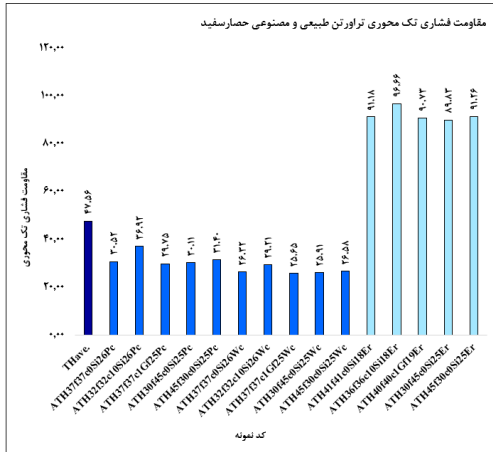
۴- نتایج آزمون های آزمایشگاهی نمونه های طبیعی و مصنوعی برای انجام آزمایش های هر سه نوع سنگ طبیعی و سه نوع سنگ مصنوعی متناظر، بر مبنای اینکه ماتریکس چسباننده رزین یا سیمان پرتلند یا سیمان سفید باشد، در هر گروه پنج نوع سنگ

درشت) مقایسه گردید. نتایج مربوط به سنگ مصنوعی سیمانی و رزینی حصارسفید در نمودار شکل ۱۰ ارائه شده است.



شکل ۵- نتایج درصد تخلخل در نمونه‌های طبیعی و مصنوعی

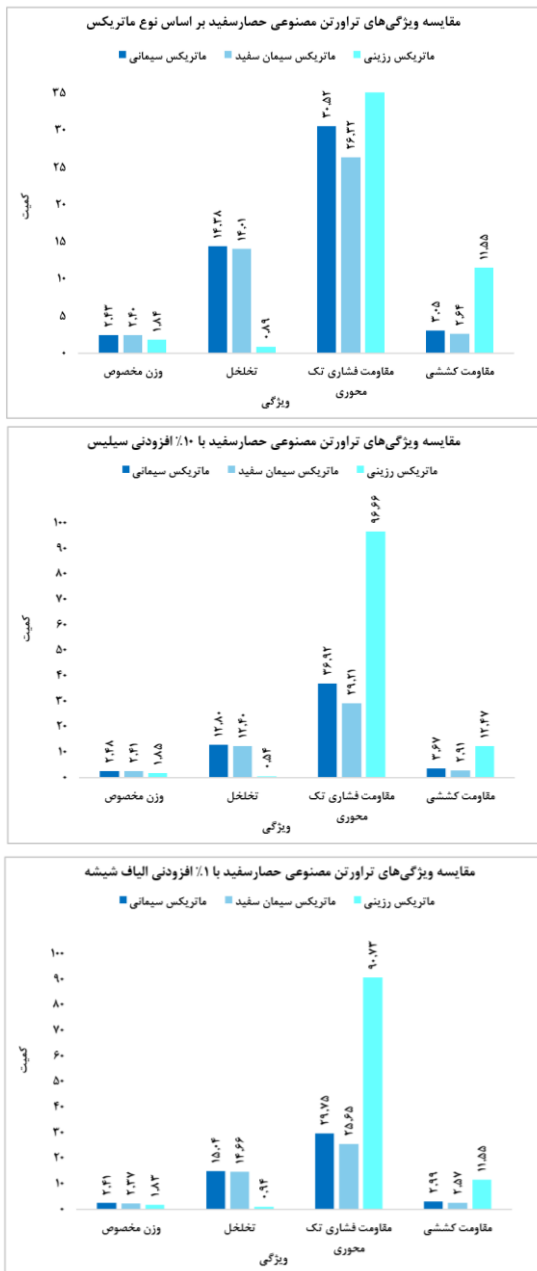
شکل ۴- نتایج وزن مخصوص در نمونه‌های طبیعی و مصنوعی



شکل ۷- نتایج مقاومت فشاری در نمونه‌های طبیعی و مصنوعی

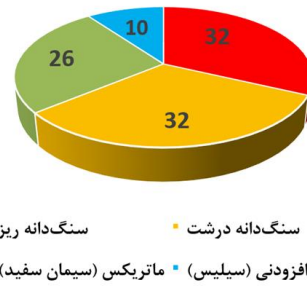
شکل ۶- نتایج مقاومت کششی در نمونه‌های طبیعی و مصنوعی

سطح ویژه بالاتر) تخلخل کمتری نسبت به نمونه‌های ساخته شده با سیمان پرتلند داشتند. از طرفی تخلخل در انواع تراورتن و مرمیت مصنوعی پلیمری نسبت به سنگ اولیه کمتر و در سنگ مرمر مصنوعی پلیمری از سنگ اولیه بیشتر است. اثر افزودن ۱۰٪ وزنی سیلیس و ۱٪ الیاف شیشه بر ویژگی‌های مکانیکی سنگ مصنوعی نیز بررسی شد که نتایج آن برای سنگ تراورتن مصنوعی حصارسفید در شکل ۱۱ قابل مشاهده می‌باشد. در همه موارد افزودن سیلیس موجب کاهش تخلخل و برعکس افزودن الیاف شیشه موجب افزایش آن شد.

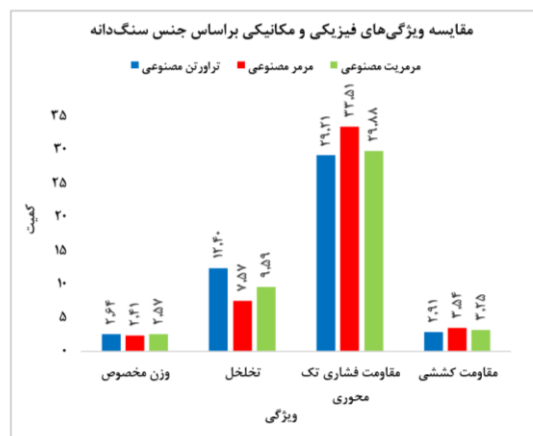


شکل ۱۱- مقایسه خصوصیات مکانیکی تراورتن مصنوعی حصارسفید

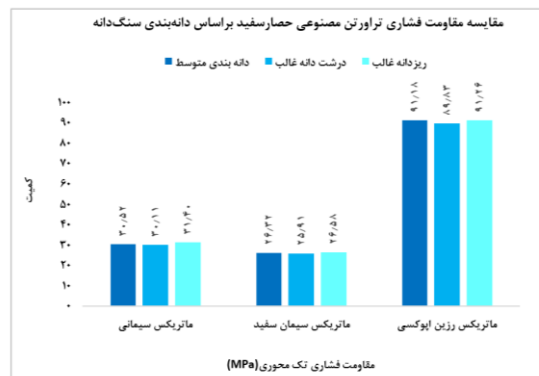
اجزاء ترکیب برحسب درصد



شکل ۸- ترکیب سنگ‌دانه‌ها در نمونه‌های منتخب سنگ مصنوعی



شکل ۹- مقایسه خصوصیات مکانیکی بر اساس نوع سنگ‌دانه



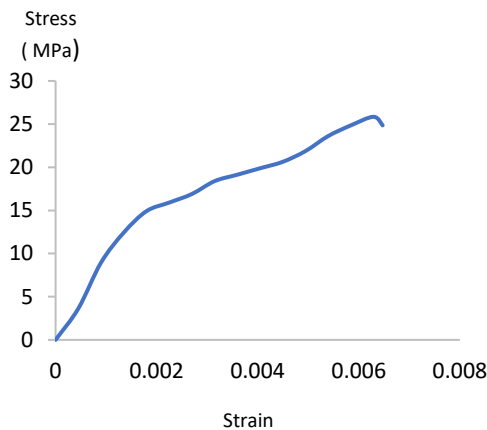
شکل ۱۰- تأثیر نوع سنگ‌دانه و ماتریکس بر مقاومت فشاری تک محوری تراورتن مصنوعی حصارسفید

میانگین مقادیر مشخصات مکانیکی سنگ‌های مصنوعی مختلف برمبنای ماتریکس چسباننده رزین، سیمان پرتلند یا سیمان سفید در جدول ۲ خلاصه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده تخلخل نمونه‌های مصنوعی با ماتریکس سیمانی از سنگ‌های اولیه بیشتر است. البته نمونه‌های ساخته شده از سیمان سفید (احتمالاً به دلیل

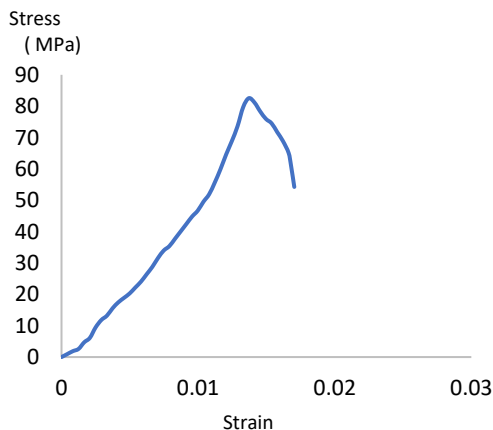
جدول ۲- میانگین مقادیر مشخصات مکانیکی سنگ‌های مصنوعی

مقاومت کششی (MPa)	مقاومت فشاری تک محوری (MPa)	تخلخل (%)	وزن مخصوص (gr/cm ³)	نوع سنگ مصنوعی
۳/۰۵	۳۰/۵۲	۱۴/۳۸	۲/۴۳	تراورتن حصارسفید برپایه سیمان پرتلند
۲/۶۴	۲۶/۳۲	۱۴/۰۱	۲/۴۰	تراورتن حصارسفید برپایه سیمان سفید
۱۱/۵۵	۹۱/۱۸	۰/۸۹	۱/۸۴	تراورتن حصارسفید برپایه رزین اپوکسی
۳/۷۷	۳۵/۴۷	۸/۸۷	۲/۶۵	مرمر قشلاق لو برپایه سیمان پرتلند
۳/۳۲	۳۱/۲۱	۸/۴۸	۲/۶۰	مرمر قشلاق لو برپایه سیمان سفید
۱۳/۵۲	۱۰۴/۱۲	۰/۸۶	۱/۸۶	مرمر قشلاق لو برپایه رزین اپوکسی
۳/۵۴	۳۳/۷۰	۱۰/۶۵	۲/۵۸	مرمریت وزمان برپایه سیمان پرتلند
۳/۰۶	۲۸/۵۸	۱۰/۲۸	۲/۵۶	مرمریت وزمان برپایه سیمان سفید
۱۲/۷۰	۹۹/۲۰	۰/۸۴	۱/۸۶	مرمریت وزمان برپایه رزین اپوکسی

برای تخریب بیشتر نمونه انرژی بیشتری لازم است. این نوع سنگ‌ها بعد از رسیدن به حداکثر قابلیت باربری همچنان مقاومت خود را حفظ می‌کنند [۱۳].



شکل ۱۲- نمودار تنش-کرنش تراورتن طبیعی حصار سفید



شکل ۱۳- نمودار تنش-کرنش نمونه سنگ ATH41f41c0Si18Er

همچنین در همه موارد افزودن سیلیس موجب کاهش تخلخل و برعکس افزودن الیاف شیشه موجب افزایش آن شد. با کاهش ابعاد سنگ‌دانه‌ها تخلخل کمتر شد اما افزایش اندازه متوسط سنگ‌دانه‌ها تخلخل را اندکی افزایش داد. با افزودن سیلیس مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ مصنوعی بیشتر شد؛ اما افزودن الیاف شیشه بر مقاومت همه سنگ‌های مصنوعی با ماتریکس پلیمر، سیمان و سیمان سفید تقریباً بی‌اثر بود. بنابراین می‌توان با تغییر سایر پارامترهای سنگ‌دانه‌های ضعیف (دانه‌بندی سنگ‌دانه، نوع و مقدار ماتریکس و نوع و مقدار افزودنی‌ها) یک سنگ مصنوعی با مقاومت مطلوب تولید کرد.

در خصوص تأثیر دانه‌بندی بر خصوصیات مکانیکی سنگ‌های مصنوعی تولیدی، هرچند در تمامی موارد میانگین حاصل از آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های ریزدانه از مقاومت فشاری سایر گروه‌های دانه‌بندی اندکی بیشتر بود؛ اما با در نظر گرفتن انحراف معیار داده‌های حاصل از آزمون‌های مقاومت فشاری تک‌محوری هر گروه، این تفاوت معنی‌دار نیست و نمی‌تواند معیار مقایسه قرار گیرد. در نهایت تغییرات مقاومت در بین نمونه‌های سنگ مصنوعی نسبت به نمونه‌های سنگ طبیعی به مراتب کمتر بود که علت آن همسانگردی بیشتر سنگ مصنوعی است.

نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌های طبیعی تقریباً از نمودار شکل ۱۲ تبعیت می‌کند؛ اما منحنی تنش-کرنش نمونه‌های مصنوعی (پلیمری و سیمانی) عموماً دارای تفرع اولیه رو به بالا بود و به تدریج (به علت فشردن شدن سنگ و بسته شدن ترک‌های ریز) حالت الاستیک غالب و خطی را نشان می‌دهد. در شکل ۱۳ نمودار تنش-کرنش یکی از تراورتن‌های مصنوعی برای نمونه ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، وجود مقاومت ماندگار در نمونه‌های مصنوعی نشان‌دهنده این است که با عبور از نقطه مقاومت حداکثر

۵- نتیجه گیری

مخصوص سنگ مصنوعی را کاهش می دهد. بیشترین مقاومت فشاری تک محوری به ترتیب مربوط به مرمر و مرمریت طبیعی و پس از آن متعلق به گروه سنگ های رزینی بود. همچنین نمونه های ساخته شده از سیمان سفید مقاومت فشاری و کششی کمتری نسبت به سیمان پرتلند داشتند؛ بنابراین می توان گفت جنس ماتریکس چسباننده بر مقاومت فشاری سنگ های مصنوعی تأثیرگذار است. از طرفی بر اساس نتایج آزمون ها هرچه مقاومت سنگ دانه بیشتر باشد، مقاومت سنگ مصنوعی تولیدی نیز بیشتر خواهد شد. همچنین با بررسی نتایج حاصل از اثر افزودنی ها مشاهده شد که با افزودن سیلیس مقاومت فشاری تک محوری سنگ مصنوعی بیشتر می شود؛ اما افزودن الیاف شیشه بر مقاومت هر سه گروه سنگ های مصنوعی (با ماتریکس پلیمر، سیمان و سیمان سفید) تقریباً بی اثر بود. از طرف دیگر برخلاف انتظار افزودن الیاف شیشه موجب کاهش مقاومت کششی شد. بنابراین می توان با تغییر سایر پارامترهای سنگ دانه های ضعیف (دانه بندی سنگ دانه، نوع و مقدار ماتریکس و نوع و مقدار افزودنی ها) یک سنگ مصنوعی با مقاومت مطلوب تولید کرد.

در این پژوهش تأثیر ویژگی های سنگ طبیعی، نوع دانه بندی سنگ دانه ها، کمیت و کیفیت ماتریکس چسباننده و نیز انواع افزودنی ها بر خصوصیات مکانیکی سنگ های مصنوعی مطالعه شده است. برای این منظور نمونه های متعدد سنگ مصنوعی با استفاده از سنگ دانه های کربناته با دانه بندی های مختلف و ماتریکس پلیمری و سیمانی با یا بدون افزودنی سیلیس و الیاف شیشه تولید و خصوصیات مکانیکی آنها در آزمایشگاه بررسی شد. بر اساس نتایج حاصل، نوع سنگ طبیعی، دانه بندی سنگ دانه، نوع و مقدار ماتریکس چسباننده و نوع و مقدار افزودنی ها همگی در ویژگی های سنگ مصنوعی مؤثر هستند و اثر متقابل این پارامترهای به گونه ای است که در راستای دستیابی به سنگ مصنوعی با پارامترهای مورد نظر اثرات مثبت یا منفی همدیگر را جبران می کنند. با بررسی وزن مخصوص ملاحظه می شود که همه نمونه های سنگ مصنوعی نسبت به سنگ اولیه خود وزن مخصوص کمتری داشتند. همچنین کاهش اندازه متوسط سنگ دانه ها و افزودن سیلیس موجب افزایش وزن مخصوص می شود؛ اما افزودن الیاف شیشه وزن

منابع:

- [1] م. مرتضی پور، "بهینه سازی ترکیب مواد تشکیل دهنده سنگ های مصنوعی به منظور ارتقاء خصوصیات شیمیایی و فیزیکی." دانشگاه صنعتی همدان، ۱۴۰۲.
- [2] T. L. da Cruz Silva, E. A. Santos Carvalho, G. N. Sales Barreto, C. P. Agrizzi, A. R. G. de Azevedo, and C. M. Fontes Vieira, "Characterization of Artificial Stone Developed with the Incorporation of Granite and Mirror Wastes in an Epoxy Matrix," *Mater. Res.*, vol. 26, 2023.
- [3] Angelo Bertolazzi, "Artificial Stone in France (1830-1930): A Material between Modernity and Tradition," *J. Civ. Eng. Archit.*, vol. 7, no. 5, 2013.
- [4] M. Galetakis and S. Raka, "Utilization of limestone dust for artificial stone production: An experimental approach," in *Minerals Engineering*, 2004, vol. 17, no. 2, pp. 355–357.
- [5] M. Y. Lee *et al.*, "Artificial stone slab production using waste glass, stone fragments and vacuum vibratory compaction," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 30, no. 7, pp. 583–587, 2008.
- [6] N. Sarami and L. Mahdavian, "Effect of inorganic compound on artificial stones' properties," *Int. J. Ind. Chem.*, vol. 6, no. 3, pp. 213–219, 2015.
- [7] میرجلیلی، طیبیه، خامه چیان، ماشاله، نیکودل، محمدرضا، "بررسی عوامل موثر در بهبود ویژگی های فیزیکی سنگ مصنوعی و مقایسه ویژگی های مهندسی سنگ مصنوعی ساخته شده با دو نمونه سنگ طبیعی."، ۱۳۹۶.
- [8] بابا آدم، نیلوفر، ارومیه ای، علی، نیکودل، محمدرضا، "تأثیر سنگ دانه های سیلیکاته بر تغییر خصوصیات زمین شناسی مهندسی سنگ مصنوعی نسبت به سنگ طبیعی."، *نشریه زمین شناسی مهندسی*، vol. 12, no. 3, 1397.
- [9] T. J. Da Cunha Demartini, R. J. S. Rodríguez, and F. S. Silva, "Physical and mechanical evaluation of artificial marble produced with dolomitic marble residue processed by diamond-plated bladed gang-saws," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 7, no. 3, pp. 308–313, 2018.
- [10] M. L. P. M. Gomes, E. A. S. Carvalho, L. N. Sobrinho, S. N. Monteiro, R. J. S. Rodriguez, and C. M. F. Vieira, "Production and characterization of a novel artificial stone using brick residue and quarry dust in epoxy matrix," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 7, no. 4, pp. 492–498, 2018.
- [11] Z. Sepahvand and K. Barani, "Production of Artificial Stone from Dimension Stone Waste," *Amirkabir J.*, vol. 50, no. 3, pp. 453–460, 2018.
- [12] A. Shishegaran, M. Saeedi, S. Mirvalad, and A. H. Korayem, "The mechanical strength of the artificial stones, containing the travertine wastes and sand," *J. Mater. Res. Technol.*, 2021.
- [13] فهیمی فر، احمد، *آزمایش های مکانیک سنگ مبانی نظری و استانداردها*. شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک وزارت مسکن و شهرسازی.



Experimental Study of the Mechanical Properties of Artificial Stones with the Aim of Determining the Optimal Composition of Constituent Materials

Satar Mahdevari ^{1*}; Mehdi Mortezapour ²

1-Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology
2-Ph.D. Student, Department of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology.

Received: 21. April. 2023; Accepted: 23. August .2023
(Corresponding author: satar.mahdevari@aut.ac.ir)

Keywords

Artificial stone
Optimization of ingredients
Mechanical properties
Experimental scale

Final English Extended Abstract

Summary

In this research, the effect of natural stone characteristics, aggregate size, quantity and quality of the binder matrix, and types of additives on the mechanical properties of artificial stones were studied. To conduct tests on all three types of natural stones and three corresponding artificial stones, five types of artificial stones with fine, medium, and coarse grain sizes with silica and glass fiber additives were made in each group, based on whether the binder matrix was resin and Portland or white cement. The water-to-cement ratio in all cement samples was 0.5.

The resin artificial stones were removed from the mold after 48 hours and the cement artificial stones were tested after 7 days of preserving at laboratory temperature.

Introduction

The progress of the construction industry on the one hand and the different tastes of people on the other hand have led to the invention and expansion of all kinds of artificial stones. In this research, the effect of natural stone characteristics, the type of aggregates, the quantity and quality of the adhesive matrix, and the types of additives on the mechanical properties of artificial stones have been studied.

Methodology and Approaches

For this purpose, several artificial stone samples were produced using carbonate aggregates with different grading and polymer and cement matrices with or without the addition of silica (quartz) and glass fibers. Then, their mechanical properties were examined through experimental analyses in the laboratory.

Results and Conclusions

Based on the results, polymer artificial stones had better results than cement artificial stones and natural stones in terms of specific weight, porosity, uniaxial compressive strength and tensile strength. In all cases, the addition of silica improved the properties of artificial stone. Also, the addition of glass fibers had almost no effect on the uniaxial compressive strength of artificial stones, but improved other properties. The highest uniaxial compressive strength equal to 109.1 MPa was obtained from artificial marble consisting of 18% epoxy resin and 10% silica additive. Likewise, the lowest water absorption of 0.26% was observed in artificial marble with 18% epoxy resin and 10% silica additive. The results of this research show that the type of natural stone powder, aggregate size, type and amount of adhesive matrix, and the type and ratio of additives are effective in determining the mechanical properties of artificial stones.
