

بررسی تأثیر ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی سنگ‌دانه‌های کربناته روی ویژگی‌های سنگ‌های مصنوعی

طیبه میرجلیلی، ماشاله خامه‌چیان*، محمدرضا نیکودل؛

دانشگاه تربیت مدرس، گروه زمین‌شناسی مهندسی

پذیرش ۹۸/۱۰/۲۱

تاریخ: دریافت ۹۷/۱۰/۱۹

چکیده

هدف این تحقیق بررسی تأثیر ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی سنگ‌دانه‌های کربناته روی ویژگی‌های سنگ‌های مصنوعی با سیمان غیررزینی و سپس مقایسه ویژگی‌های مهندسی سنگ‌های مصنوعی ساخته شده با سنگ‌های طبیعی است. در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر ویژگی‌های سنگ‌دانه‌های کربناته بر سنگ‌مصنوعی از ۷ نمونه سنگ ساختمانی شامل سنگ‌چینی (مرمریت ریزبلور)، مرمر کریستال (مرمریت درشت بلور)، مرمریت (نهان بلور)، سنگ آهک سیاه، ۲ نمونه تراواتن و انیکس استفاده شده است. از این نمونه‌های سنگی، ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی نمونه‌ها تعیین شد. پس از طراحی قالب برای ساخت سنگ‌مصنوعی، سنگ‌دانه‌هایی با دانه‌بندی و طرح اختلاط یک‌سان تهیه و برای تمامی سنگ‌دانه‌ها با شرایط و بیره، فشار و خلأ یکسان، دو نمونه سنگ‌مصنوعی درشت‌دانه و ریزدانه ساخته شده است. بعد از ساخت، اقدام به انجام آزمایش‌های فیزیکی، مقاومتی و دوام شد و سپس نتایج حاصل مقایسه شد. بررسی نتایج پارامترهای مهندسی نشان داد سنگ‌های مصنوعی تراواتن حجت‌آباد دارای کیفیت مهندسی مشابه نسبت به سنگ طبیعی خود دارند. سنگ‌های مصنوعی مرمر و تراواتن توران‌پشت حدود ۱۱ تا ۳۲٪ افزایش کیفیت و ولی سنگ‌های مصنوعی سنگ‌چینی، آهک سیاه، انیکس و مرمریت حدود ۶ تا ۳۳٪ کاهش کیفیت نسبت به سنگ طبیعی خود دارند. نمونه‌های تولید شده از این سنگ‌ها نیز اگرچه از

نظر پارامترهای مقایسه‌ای سنگ مصنوعی کم‌تر از سنگ طبیعی است اما در محدوده قابل قبول به‌عنوان مصالح ساختمانی قرار می‌گیرند.

واژه‌های کلیدی: ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی، سنگ ساختمانی، سنگ مصنوعی، سنگ‌دانه، کربناته.

مقدمه

با توجه به تنوع مصالح ساختمانی و استفاده وسیع از معادن سنگ طبیعی و تولید ضایعات معدنی غیرقابل استفاده لازم است که از این ضایعات معدنی مجدداً استفاده شود. یکی از این روش‌ها برای استفاده مجدد از ضایعات معدنی، ساخت سنگ مصنوعی و کاربرد آن به‌عنوان مصالح ساختمانی است. ضایعات معدنی را می‌توان به‌عنوان مواد باقی‌مانده، باطله‌ها و یا مواد بی‌ارزشی که بعد از استخراج و فرآوری مواد برای تولید محصول با ارزش به‌وجود می‌آیند در نظر گرفت [۱]. از ضایعات سنگ ساختمانی طبیعی و بلوک‌های کیفیت کم معدن در تولید سنگ مصنوعی می‌توان استفاده کرد. به‌علت فشرده‌گی در فرایند ساخت، سنگ‌های مصنوعی دارای تخلخل ناچیز، درصد کم جذب آب، مقاومت مکانیکی و دوام زیاد دارند، سنگ‌های مصنوعی، مصالح ساختمانی همگن، سالم و زیبایی هستند که کاربرد گسترده‌ای در بخش ساخت و ساز ساختمان دارند [۲]. با توجه به ویژگی‌های ذکر شده، استفاده از سنگ مصنوعی برای پوشاندن دیوارها و سقف‌ها با استقبال بازار مواجه شده است [۳].

تکنولوژی تولید سنگ مصنوعی از سال ۱۹۶۰ در ایتالیا پدید آمد و پژوهش‌گران زیادی درباره استفاده از مواد زاید معدن برای ساخت سنگ مصنوعی [۱۳]، [۱۴]، [۱۵]، طراحی سیستم قالب‌گیری خط تولید سنگ مصنوعی [۱۶] و همچنین تأثیر سنگ‌دانه‌ها کربناته و سیلیسی در کیفیت سنگ مصنوعی [۷]، [۸]، [۹]، [۱۰]، ویژگی‌ها و ساخت سنگ مصنوعی رزینی [۳]، [۴]، تأثیر نوع رزینی و مواد افزودنی در ساخت سنگ مصنوعی رزینی [۵]، [۶]، بررسی تکنیک‌های ساخت سنگ مصنوعی اصلاح شده (سنگ مهندسی) پایدار برای سختی، دوام، و حفاظت از انرژی [۱۱]، استفاده از سنگ مصنوعی برای ترمیم عناصر سنگی در بناهای تاریخی [۱۲] تحقیقاتی ارائه کردند.

سنگ مصنوعی از ترکیب سنگ‌دانه‌های طبیعی با مواد افزاینده دیگر به دست می‌آید. این سنگ‌ها از ترکیب سنگ‌دانه‌های سنگ‌های ضایعاتی، پودرسنگ، چسباننده‌ها، رنگ‌دانه‌ها و افزودنی‌ها ساخته می‌شوند. سنگ‌دانه‌ها در اندازه‌های مختلف معمولاً در حد ماسه هستند. انتخاب رنگ، جنس، اندازه و دانه‌بندی آن‌ها بستگی به سیمای سنگ و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی محصول دارد. رنگ‌دانه‌ها به همراه رنگ طبیعی سنگ‌دانه‌ها رنگ‌های جذاب زیبایی را به وجود می‌آورند. به عنوان چسباننده از چسب‌های ارگانیک (رزین‌های ساختاری) و هم چسباننده‌های غیرارگانیک (سیمان) استفاده می‌شود، البته هر چسباننده ویژگی‌های خاص خود را به محصول می‌دهد. افزودنی‌ها به مقاصد مختلف به مقدار بسیار کم به مخلوط اضافه می‌شوند. این سنگ‌ها در محیط خلاً فشرده و ویرنه می‌شوند. عملیات مخلوط‌سازی تحت خلاً همراه با فشار و ویرنه برای سنگ‌دانه‌ها این امکان را می‌دهد که بسیار نزدیک به هم قرار گرفته و بهترین آرایش مواد جامد مخلوط را داشته باشد، بنابراین مقدار مواد چسباننده که سنگ‌دانه‌ها را در بر می‌گیرد بسیار کاهش می‌یابد و این عاملی است که ویژگی‌های مهندسی سنگ را بهبود می‌بخشد [۱۷].

بدیهی است سنگ‌دانه‌ها، ماده متشکله‌ای که درصد بزرگی از سنگ مصنوعی را تشکیل می‌دهند، باید نقش مهمی در خواص زمین‌شناسی مهندسی سنگ مصنوعی داشته باشد پژوهش‌گران مختلفی در باره نقش سنگ‌دانه‌ها بر کیفیت مصالح بتنی تحقیقاتی ارایه کرده‌اند [۱۸]-[۲۵]. ولی این تحقیق توجه ویژه‌ای به تأثیر سنگ‌دانه سنگ‌های ساختمانی کربناته مختلف و اندازه آن‌ها روی ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی سنگ‌های مصنوعی ساخته شده از هر یک از این سنگ‌دانه‌ها دارد. به منظور بررسی تأثیر ویژگی‌های مهندسی سنگ‌دانه‌های کربناته مختلف بر کیفیت سنگ مصنوعی، سنگ‌دانه‌هایی با خواص فیزیکی، دوام و مقاومت متفاوت گردآوری و به آزمایشگاه منتقل شده است. در ابتدا خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های انتخاب شده بررسی و تعیین شد. در مرحله بعد، سنگ‌های موجود به ذراتی در اندازه‌ی شن، ماسه و پودرسنگ خرد شده و سپس با استفاده از طرح اختلاط ثابتی از نمونه‌های موجود، ۲ نمونه سنگ مصنوعی ریزدانه و درشت‌دانه تهیه و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های مصنوعی حاضر از قبیل دوام، مقاومت فشاری و کششی بعد از گذشت ۲۸ روز اندازه‌گیری شد. پس از به‌کارگیری و تعیین ویژگی‌های مهندسی سنگ مصنوعی

ساخته شده و کسب پارامترهای لازم، تأثیر ویژگی‌های مهندسی سنگ‌دانه‌های کربناته بر ویژگی‌های سنگ‌های مصنوعی تهیه شده تفسیر و ارزیابی شد در نهایت ویژگی‌های مهندسی سنگ‌های مصنوعی ساخته شده با سنگ‌های طبیعی مقایسه شد [۱۰].

بررسی‌های آزمایشگاهی

۱. سنگ‌دانه‌ها

در ابتدا سنگ‌های ساختمانی کربناته مختلف از معادن جنوب‌غرب یزد گردآوری و به آزمایشگاه دانشگاه تربیت مدرس منتقل شد. در مرحله بعد ویژگی‌های فیزیکی، مقاومتی، دوام و سنگ‌شناسی سنگ‌های کربناته بررسی شد و سپس در آزمایشگاه با یک دستگاه سنگ‌شکن فکی (در اندازه‌های شن، ماسه و پودرسنگ) خرد شدند. محل نمونه‌برداری مصالح استفاده شده در شکل ۱ نشان داده شده است. از نظر شکل ظاهری سنگ‌دانه‌های خردشده در این تحقیق تیز گوشه و با سطح جانی زبر هستند. استفاده از سنگ‌دانه‌های تیز گوشه با سطح جانبی زبر، باعث درگیری و قفل و بست بهتر اجزا بتن شده و منجر به افزایش مقاومت فشاری می‌شود [۲۶]. بنابراین استفاده از سنگ‌دانه درشت با سطح خارجی کاملاً صاف منجر به مقاومت فشاری کم‌تری می‌شود [۲۷].



شکل ۱. منطقه جغرافیایی بررسی شده در جنوب‌غرب یزد و محل‌های جمع‌آوری نمونه‌های مورد نظر (Google Earth)

۲. بررسی‌های میکروسکوپی سنگ‌های طبیعی کربناته

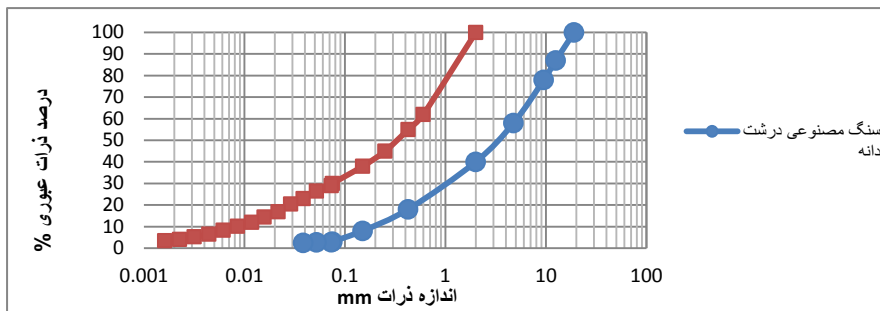
برای بررسی بافت و ویژگی سنگ‌شناسی، از نمونه‌ها مقطع نازک تهیه (شکل ۴) و بررسی‌های میکروسکوپی انجام شد و نام‌گذاری نمونه‌ها به‌روش دانه‌ام انجام شد [۲۸]. ویژگی کلی سنگ‌های ساختمانی با توجه به بررسی میکروسکوپی نشان داد ترکیب کانی‌شناسی از کربنات کلسیم (CaCO_3) تشکیل شده است. سنگ‌های کربناته با توجه مزایای سنگ‌دانه (شامل استحکام خوب، احتمال کم واکنش قلیایی-سیلیس و انقباض خشک‌کننده در بتن) در صنعت ساخت و ساز کاربرد زیادی دارند [۲۹]. واکنش قلیایی-سیلیسی یک واکنش شیمیایی است که در بین برخی از سنگ‌دانه‌های سیلیکایی و محلول‌های قلیایی موجود در بتن رخ می‌دهد این واکنش سبب انبساط بتن شده و در نهایت نیز منجر به ترک خوردگی و کاهش ایمنی، عمر و مقاومت آن می‌شود [۳۰].

۳. منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه

منظور از دانه‌بندی، چگونگی توزیع قطر ذرات موجود در هر مخلوط بر حسب درصد وزنی است. توزیع اندازه ذرات عموماً به‌صورت یک منحنی به‌نام منحنی دانه‌بندی نشان داده می‌شود [۳۱]. با توجه به تنوع دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های تولید شده از سنگ اولیه از نظر شکل و ابعاد هندسی و جهت یک‌سان کردن میزان تخلخل در آنها ضرورت دارد تا منحنی دانه‌بندی نمونه سنگ مصنوعی واحدی تهیه شده با نسبت یک‌سانی از سیمان مخلوط شود بدین ترتیب خصوصیات ترکیبی سنگ مصنوعی تهیه شده یک‌نواخت بوده و تنها عامل متغیر در آنها جنس سنگ‌دانه‌ها است. به‌منظور بررسی تأثیر اندازه سنگ‌دانه روی ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی سنگ مصنوعی دو منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه برای ساخت سنگ‌های مصنوعی ریزدانه و سنگ‌های مصنوعی درشت‌دانه طبق استاندارد ASTM C 136-01 در نظر گرفته شد [۳۲].

۴. تعیین طرح اختلاط

طرح اختلاط سنگ مصنوعی به این مفهوم است که به چه نسبتی اجزاء سنگ مصنوعی (سیمان، آب، شن و ماسه) مخلوط شوند تا سنگ مصنوعی ساخته شده دارای ویژگی (از نظر رسیدن به مقاومت مورد نظر، تامین دوام کافی و کارایی و روانی مورد نظر) مشخصی شود.



شکل ۲. نمودار دانه‌بندی سنگ‌دانه برای ساخت سنگ‌مصنوعی ریزدانه و درشت‌دانه

ویژگی مقاومتی و دوام مستقیماً متأثر از توزیع درصد منافذ در خمیر سیمان، سنگ‌دانه و سطح مشترک بین خمیر سیمان و سنگ‌دانه است. از طرف دیگر ساختار منافذ و نحوه توزیع آنها متأثر از عوامل متعددی است که یکی از آنها عیار سیمان موجود در مخلوط است. بنابراین عیار سیمان نقش بسیار مهمی را در مقاومت و دوام ایفا می‌کند [۳۳]. مقدار سیمان زیاد باعث افزایش حجم خمیر سیمان می‌شود که مهم‌ترین عامل تخلخل است که باعث افزایش حجم کل منافذ می‌شود [۳۴]. اگر سیمان موجود در مخلوط کافی نباشد، مخلوط بعد از ساخت به درستی متراکم نمی‌شود و بافتی لانه زنبوری با سایر معایب سطحی در آن به وجود می‌آید که موجب تسهیل راه‌یابی عوامل آسیب‌رسان به درون آن می‌شود [۳۵]. مقاومت فشاری با کاهش نسبت آب به سیمان افزایش می‌یابد. که بیش‌ترین مقاومت‌ها در نسبت‌های آب به سیمان کم و زمان ۲۸ روز بعد از ساخت حاصل می‌شود [۳۶]. مقاومت فشاری علاوه بر نسبت آب به سیمان، نیز به اندازه سنگ‌دانه‌ها بستگی دارد [۳۷]. کارایی و روانی مخلوط تنها به مقدار آب بستگی دارد. مقدار آب به نوع دانه‌ها، توزیع اندازه ذرات، شکل و بافت دانه‌ها، و مقدار ریز دانه بستگی دارد [۳۸]. پودر سنگ برای تولید سنگ مصنوعی در مقایسه با سنگ‌دانه‌های به‌کار رفته در مخلوط دارای سطح بیش‌تر و در نتیجه مقدار جذب آب زیادی دارد، با فشردن مواد مخلوط می‌توان مقدار آب مورد نیاز را حداقل کرد [۳۹]. ویژگی‌های مهندسی سنگ‌مصنوعی به‌ویژگی‌های فیزیکی مواد پرکننده [۲]

و واکنش‌های سطحی و جذب آب سنگ مصنوعی به ترکیب شیمیایی، اندازه ذرات و میزان پودر سنگ بستگی دارد [۴۰].

سیمان پرتلند، سیمان سفید و سیمان‌های رنگی در ساخت سنگ مصنوعی کاربرد دارند، در این تحقیق ساخت سنگ مصنوعی با سیمان سفید مدنظر بود تا رنگ طبیعی سنگ‌دانه‌ها در متن سنگ نمایان شود بنابراین سیمان استفاده شده در این تحقیق از نوع سیمان سفید (به‌نام سیمان سفید دماوند تولید کارخانه سیمان شمال) است. این نوع سیمان با مشخصات تپ یک (سیمان معمولی) و تپ سه (سیمان زود سخت شونده) مطابقت دارد. برای تولید آن از مواد خام دارای آهن و منگنز کم استفاده می‌شود تا رنگ سفید خالص برای آن به‌دست آید [۴۱]. این نوع سیمان هم‌چنین دارای این مزیت است که سطح بتن را لکه‌دار نمی‌کند زیرا مقدار قلیایی قابل حل آن کم است و عموماً مقاومت سیمان پرتلند سفید کم‌تر از سیمان پرتلند معمولی است [۴۲].

جدول ۱. طرح اختلاط سنگ مصنوعی درشت‌دانه و ریزدانه با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ [۱۰]

نام نمونه	سیمان (kg/m^3)	اب (kg/m^3)	ماسه (kg/m^3)	شن (kg/m^3)	پودر سنگ (kg/m^3)
سنگ مصنوعی درشت دانه	۴۲۵	۱۹۰	۶۳۸/۴۱	۱۰۵۵/۳۹	۵۲/۳۸
سنگ مصنوعی ریزدانه	۴۵۰	۲۰۵	۸۲۱/۸۲	۰	۳۶۹/۲۲

در این تحقیق برای انتخاب طرح اختلاط سنگ مصنوعی سعی شده است بر اساس روش آئین‌نامه ACI-211 سال ۲۰۰۷ [۴۳] (جدول ۱) طرحی انتخاب شود که برای سنگ مصنوعی قابل کاربرد باشد. زیرا در بحث عملکرد تأثیر سنگ‌دانه‌ها در ویژگی سنگ مصنوعی بررسی شده، ثابت بودن نسبت آب به سیمان حائز اهمیت است. این طرح انتخابی بر اساس یک طرح تجربی و بیش‌تر به‌منظور امکان ساخت سنگ مصنوعی بوده است در جدول ۱ طرح اختلاط نمونه‌ها برای ساخت سنگ مصنوعی درشت‌دانه و ریزدانه نشان داده شده است. فشار تراکمی، ویبره و خلأ، از عوامل مؤثر در تکنولوژی ساخت سنگ مصنوعی و باعث بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی است. علاوه بر فشار تراکمی زیاد، ویبره هم لازم است، تا دانه‌ها با دقت بیش‌تر فشرده شوند، در هنگام متراکم کردن، هوای محبوس شده بین سنگ-دانه‌ها را به‌راحتی نمی‌توان حذف کرد، فقط زمانی که تراکم و خلأ هم‌زمان با هم انجام شود هوای بین سنگ‌دانه‌ها را می‌توان به‌راحتی حذف کرد. حذف کردن هوا باعث جلوگیری از

تشکیل خلل و فرج بین سنگ‌دانه‌ها و کاهش جذب آب شده، در نتیجه مقاومت فشاری سنگ مصنوعی افزایش می‌یابد [۴].

۵. روش ساخت نمونه‌ها

برای ساخت سنگ مصنوعی درشت‌دانه و ریزدانه، بر اساس طرح اختلاط آئین‌نامه ACI-211 با توجه به جدول ۱، سنگ‌دانه، پودرسنگ و سیمان سفید با هم مخلوط شده [۴۳]. و سپس مخلوط با مقدار آب مورد نیاز مرطوب و در درون قالب فلزی مکعبی با سطح داخلی 15×15 cm و ارتفاع ۱۵cm ریخته و ویبره شده و در مرحله بعد مخلوط تحت فشار معادل $10/5$ Mp همراه با خلأ قرار گرفت است. بعد از ساخت نمونه از قالب خارج و برای عمل‌آوری در درون پلاستیک در دمای اتاق تا ۲۸ روز قرار گرفت. چنان‌که در شکل ۳ و ۴ (تصاویر ماکروسکوپی و میکروسکوپی) مشاهده می‌شود از هر نوع سنگ‌دانه سنگ کربناته طبیعی، ۲ نمونه سنگ مصنوعی ریزدانه و درشت‌دانه در آزمایشگاه ساخته شده است.



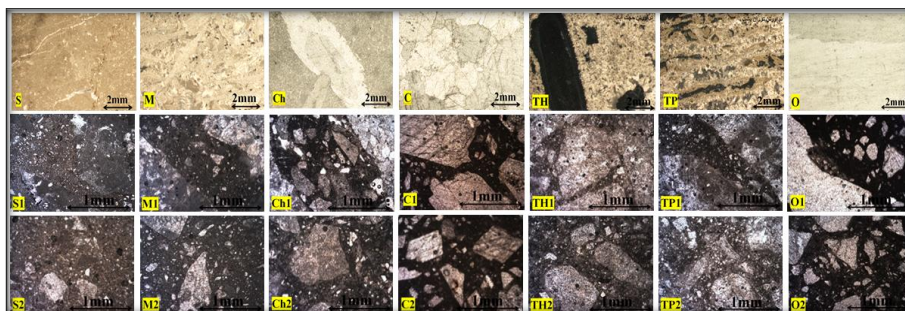




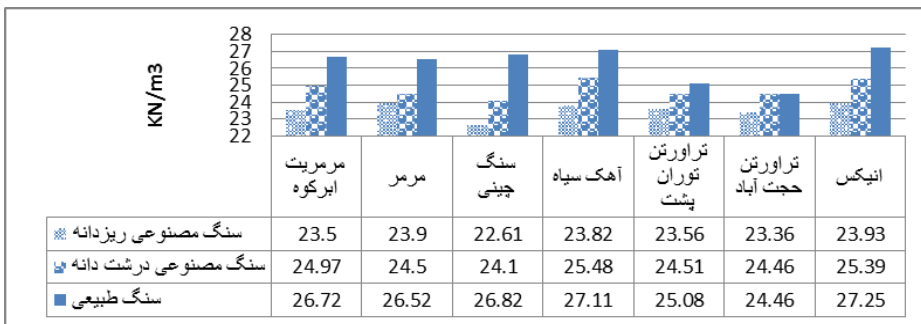
شکل ۳. سنگ مصنوعی ریزدانه و درشت‌دانه ساخته شده از ۷ نوع سنگ‌دانه سنگ ساختمانی کربناته

۶. آزمایش‌های انجام شده

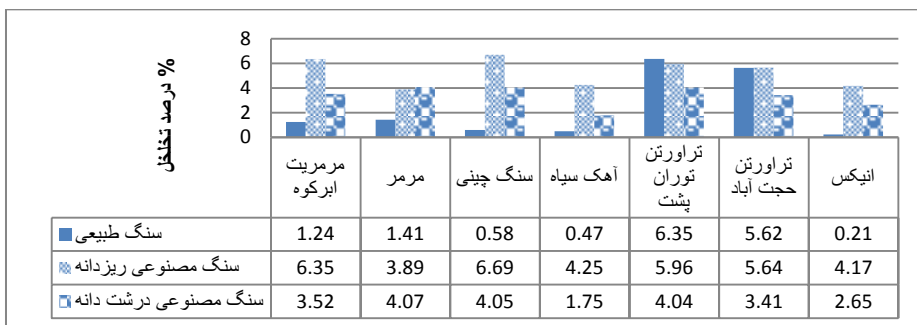
با توجه به نتایج آزمایش شکل‌های ۵ تا ۱۰، آزمایش‌های گوناگونی پس از کرگیری برای تعیین ویژگی‌های مهندسی سنگ‌های مصنوعی ساخته شده و سنگ‌های طبیعی اولیه انجام شد که می‌توان به بررسی‌های میکروسکوپی، آزمایش مقاومت تراکمی تک‌محوری (ASTM D2938، مقاومت کششی برزیلین (ASTM D3967) و دوام وارفتگی (ASTM D4644 – 08) اشاره کرد. برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی از روش استاندارد (ISRM, 1981) استفاده شده است [۴۴]-[۴۷].



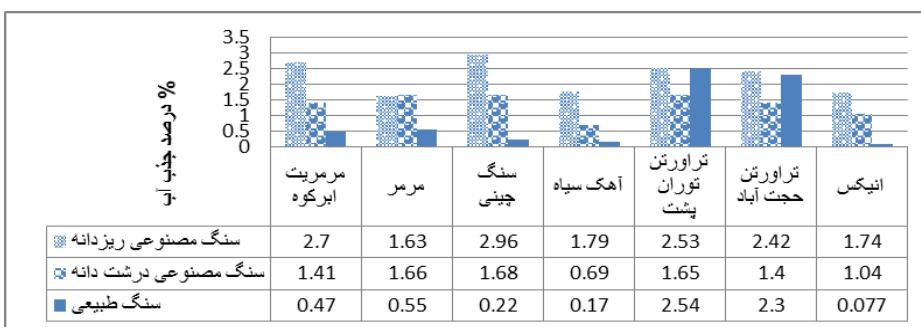
شکل ۴. تصاویر میکروسکوپی از مقاطع سنگ طبیعی (ردیف اول)، سنگ مصنوعی درشت‌دانه (شماره ۱) و ریزدانه (شماره ۲) ساخته شده از ۷ نوع سنگ‌دانه سنگ ساختمانی کربناته شامل: انیکس (O) و تراورتن توران‌پشت (TP)، تراورتن کرم حجت‌آباد (TH)، سنگ‌چینی (Ch)، مرمر (C) و سنگ آهک سیاه‌ده‌بالا (S)، مرمریت ابرکوه (M)



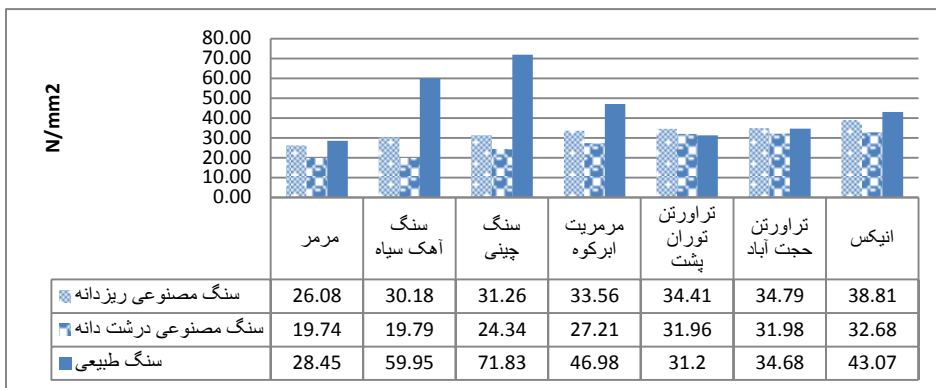
شکل ۵. نمودار ستونی وزن واحد حجم خشک سنگ‌های مصنوعی (ریزدانه، درشت دانه) و سنگ‌های طبیعی



شکل ۶. نمودار ستونی درصد تخلخل (درصد نسبت حجم منافذ به حجم کل نمونه) سنگ‌های مصنوعی (ریزدانه، درشت‌دانه) و سنگ‌های ساختمانی طبیعی

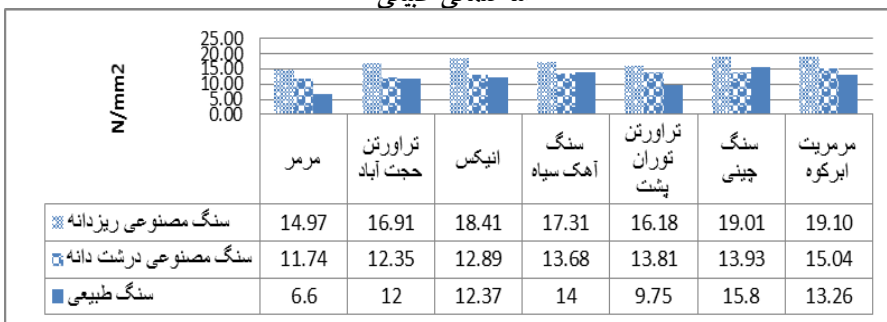


شکل ۷. نمودار ستونی درصد جذب آب سنگ‌های مصنوعی (ریزدانه، درشت‌دانه) و سنگ‌های



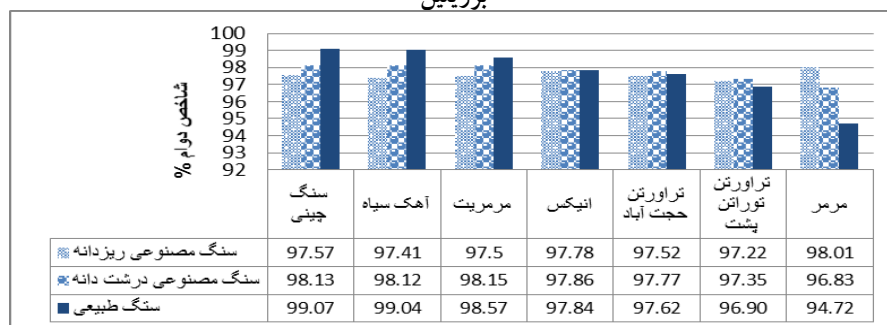
شکل ۸. نتایج آزمایش مقاومت فشاری سنگ‌های مصنوعی (ریزدانه، درشت‌دانه) و سنگ‌های

ساختمانی طبیعی



شکل ۹. نتایج مقاومت کششی سنگ‌های مصنوعی و سنگ‌های ساختمانی طبیعی در آزمایش

برزیلین



شکل ۱۰. نتایج آزمایش دوام وارفتگی سنگ‌های مصنوعی (ریزدانه، درشت‌دانه) و سنگ‌های

ساختمانی طبیعی تا ۱۰ چرخه (Id10) در محلول اسید سولفوریک با PH=5.25

تحلیل نتایج

۱. مقایسه میکروسکوپی سنگ‌های مصنوعی ساخته شده با سنگ‌های کربناته طبیعی

برای بررسی بافت و ویژگی سنگ‌شناسی، از نمونه‌ها مقطع نازک تهیه و بررسی‌های میکروسکوپی انجام شد شکل ۴ تصاویری از نمونه سنگ‌های طبیعی و مصنوعی (دانه‌درشت و ریزدانه) را در زیر میکروسکوپ نشان می‌دهد.

الف) بررسی‌های میکروسکوپی سنگ‌های طبیعی کربناته

سنگ آهک سیاه ده‌بالا: نام سنگ وکستون بایوکلاستی (بایومیکرایت) است در نمونه آثار استیلولیت مشاهده می‌شود که در امتداد سطوح استیلولیت‌ها اکسیدهای آهن و مواد آلی تجمع یافته است. بافت شیمیایی و بیوشیمیایی در آن قابل مشاهده است.

مرمر ده‌بالا: این نمونه به‌طور کامل از بلورهای درشت (در حدود ۲ تا ۵ میلی‌متر) کلسیت تشکیل شده است. مرز دانه‌ها در سنگ به‌صورت مضرس است و دارای بافت دگرگونی است.

سنگ چینی ده‌بالا: این سنگ دارای ۵ تا ۷ درصد فسیل‌های خارپوست، بلورهای ریز کلسیت و بافت دگرگونی است.

تراورتن کرم حجت‌آباد: کانی کلسیت به‌صورت نواری متن سنگ را تشکیل می‌دهد. لایه‌های میکرایتی (کلسیت‌های دانه‌ریز) در بخش‌هایی از سنگ مشاهده می‌شود. تخلخل سنگ از نوع حفره‌ای و دارای بافت شیمیایی است.

انیکس توران‌پشت: نمونه سنگ از بلورهای سوزنی شکل آراگونیت تشکیل شده که به‌صورت لایه‌ای و تکرار شونده در سنگ مشاهده می‌شود. نام سنگ تراورتن (نوعی انیکس) با ظاهر شفاف (آهک متبلور) فاقد تخلخل است و در شرایط شیمیایی مربوط به چشمه‌های آب گرم تشکیل شده است.

تراورتن چوب‌درختی توران‌پشت: لامینه‌های جلبکی به تناوب با بلورهای کلسیت اسپاری متن سنگ را تشکیل می‌دهد. بلورهای موجود در سنگ کربنات کلسیم (آراگونیت و کلسیت) است. تخلخل زیادی در متن سنگ در امتداد سطوح لامینه‌ها و بین لامینه‌ها مشاهده می‌شود. نام سنگ تراورتن و دارای بافت شیمیایی است.

مرمریت ابرکوه: نام سنگ گرینستون بایوکلاستی (سنگ آهک با فسیل‌های فراوان) است به صورت شیمیایی و بیوشیمیایی شکل گرفته است. ترکیب اصلی سنگ از نظر شیمیایی کربنات کلسیم (کلسیت) است به علت تراکم فیزیکی و شیمیایی اکثر دانه‌ها در یک‌دیگر تداخل کرده و مرز دانه‌ها (فسیل‌ها) به صورت مضرس در آمده است. به میزان کمی رگچه‌ها و درزهای استیلولیتی در سنگ مشاهده می‌شود که باعث کاهش استحکام سنگ می‌شود.

ب) بررسی‌های میکروسکوپی سنگ‌های مصنوعی ساخته شده

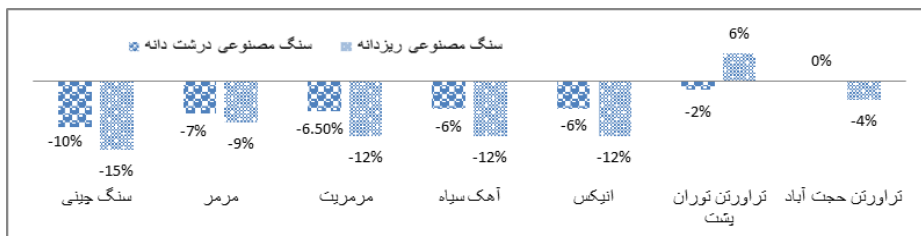
با توجه به ردیف دوم و سوم شکل ۴، سیمان سنگ‌دانه‌ها را به یک‌دیگر چسبانده و جسم یک‌پارچه و مقاومی را ایجاد کرده است. اجزای اصلی شامل سنگ‌دانه‌های آهکی از نوع کربنات کلسیم (کلسیت) است. سنگ‌دانه‌ها زاویه‌دار و در طیف گسترده‌ای از ریز تا درشت است و اجزا از یک نوع سنگ کربناته خردشده انتخاب شده‌اند. در بافت سنگ به علت خروج حباب‌های هوا و گاز تخلخل‌های حفره‌ای مشاهده می‌شود. سنگ مصنوعی درشت‌دانه (ردیف دوم) دانه‌بندی بهتری نسبت به سنگ مصنوعی ریزدانه دارند.

سنگ‌های مصنوعی درشت‌دانه و ریزدانه تراورتن نسبت به سنگ طبیعی اولیه خود تخلخل ندارند علت آن این است خلل و فرج موجود در سطح سنگ‌دانه‌های تراورتن در مخلوط، پیوند با خمیر سیمان بر قرار کرده و باعث حذف تخلخل حفره‌ای در تراورتن حجت‌آباد و تخلخل زیادی در امتداد سطوح لامینه‌ها و بین لامینه‌ها در تراورتن توران‌پشت شده است.

در سنگ مصنوعی ریزدانه مرمر با کوچک شدن اندازه سنگ‌دانه‌ها، تأثیر ساختار سنگ (سطح رخ و سستی بلورهای کلسیت) در سنگ‌دانه‌های مرمر کمتر شده و باعث کم شدن سطوح ضعف ساختاری (سطوح رخ) در سنگ‌دانه‌های ریز مرمر شده است.

۲. مقایسه ویژگی‌های فیزیکی سنگ‌های مصنوعی ساخته شده با سنگ‌های کربناته طبیعی با توجه به نتایج مقایسه وزن واحد حجم خشک در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود به طور کلی وزن واحد حجم سنگ‌های مصنوعی (درشت‌دانه و ریزدانه) کم‌تر از سنگ طبیعی اولیه

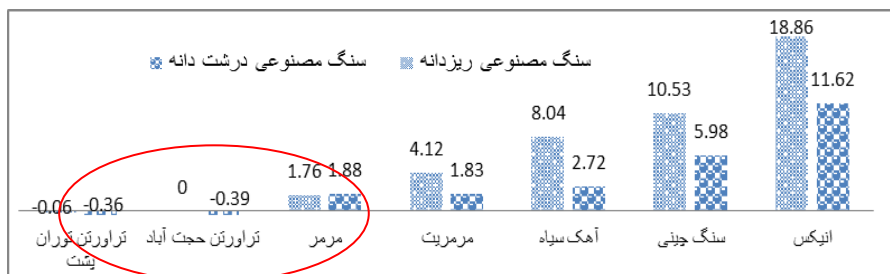
است. به جز یک نمونه تراورتن، در بقیه نمونه‌ها تخلخل و درصد جذب آب سنگ مصنوعی درشت و ریزدانه بیش‌تر از سنگ طبیعی اولیه است.



شکل ۱۱. درصد افت و افزایش وزن واحد حجم خشک سنگ‌های مصنوعی درشت دانه و ریزدانه نسبت به سنگ طبیعی اولیه

بنابراین با توجه به نتایج تخلخل در شکل ۱۲ سنگ‌های مصنوعی درشت‌دانه و ریزدانه تراورتن نسبت به سنگ طبیعی اولیه خود تخلخل کم‌تری نشان می‌دهند. علت آن این است خلل و فرج موجود در سطح سنگ‌دانه‌های تراورتن در مخلوط پیوند با خمیر سیمان بر قرار کرده و در نتیجه تخلخل موثر کم‌تری نسبت به سنگ طبیعی اولیه خود دارند.

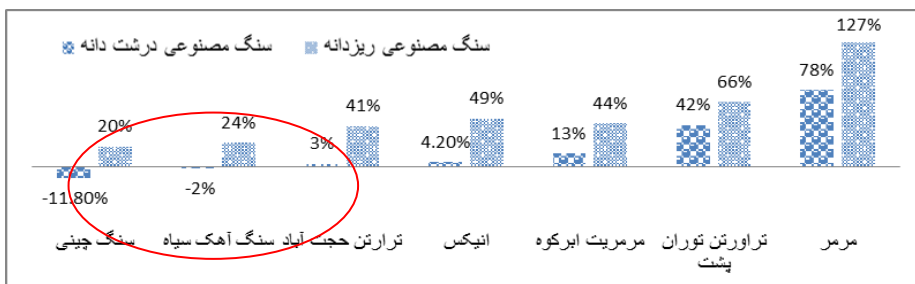
با توجه به این‌که در این تحقیق مقدار فشار، ویبره و خلأ یک‌سان در هنگام ساخت به نمونه‌های درشت‌دانه و ریزدانه اعمال شده، ولی نمونه سنگ‌های مصنوعی ریزدانه وزن واحد حجم کم‌تر و درصد جذب آب و تخلخل بیش‌تری نسبت به سنگ‌های مصنوعی درشت‌دانه نشان می‌دهند بنابراین هرچه اندازه سنگ‌دانه‌ها کوچک‌تر می‌شود باعث افزایش سطح کانی‌های آن و سبب افزایش درصد جذب آب و تخلخل می‌شود که می‌توان با افزایش فشار، در هنگام ساخت سنگ مصنوعی ریزدانه کیفیت فیزیکی سنگ مصنوعی ریزدانه را بهبود داد.



شکل ۱۲. نسبت افت و افزایش تخلخل سنگ‌های مصنوعی درشت‌دانه و ریزدانه نسبت به سنگ طبیعی اولیه

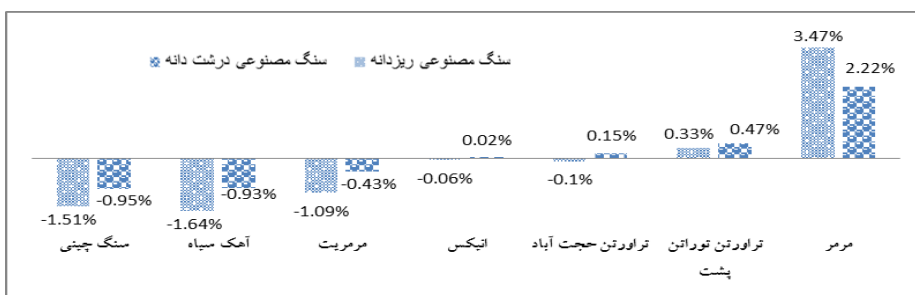


شکل ۱۴. الف) وجود ۳ سطح رخ و سستی بلورهای درشت کلسیت در مرمر، ب) خلل و فرج و لامینه در تراورتن، وجود رگچه‌ها و استیلولیت در مرمریت



شکل ۱۵. درصد افزایش و افت مقاومت کششی سنگ‌های مصنوعی درشت‌دانه و ریزدانه نسبت به سنگ طبیعی اولیه

با توجه به شکل ۱۵ سیمان سنگ‌دانه‌ها را به یک‌دیگر چسبانده و جسم یک‌پارچه و مقاومی را ایجاد کرده و سبب حذف ساختار سنگ (با توجه به شکل ۱۴ خلل و فرج و لامینه در تراورتن، وجود رگچه‌ها و استیلولیت در مرمریت و سطح رخ و سستی بلورهای درشت کلسیت در مرمر) موجود در سنگ طبیعی شده است. بنابراین سبب افزایش مقاومت کششی سنگ‌های مصنوعی دارای سنگ‌دانه‌های تراورتن، مرمریت و مرمر شده است. در سنگ‌چینی و آهک سیاه به علت کم بودن ساختار سنگ، مقاومت کششی سنگ طبیعی بیش‌تر از سنگ مصنوعی (درشت‌دانه) است در نتیجه افت مقاومت کششی سنگ مصنوعی فقط در سنگ‌دانه‌های (درشت‌دانه) سنگ‌چینی و آهک سیاه مشاهده می‌شود. هر چقدر اندازه سنگ‌دانه‌ها ریزتر، تأثیر ساختار سنگ (سطح رخ، تخلخل و لامینه) در سنگ‌دانه‌ها کم‌تر می‌شود و هم‌چنین سطح تماس سنگ‌دانه به دلیل افزایش سطح ویژه آن با خمیر سیمان پیوند بیش‌تری برقرار کرده و در نتیجه مقاومت کششی سنگ‌های مصنوعی ریزدانه بیش‌تر از سنگ مصنوعی درشت‌دانه است.



شکل ۱۶. درصد افزایش و افت شاخص دوام وارفنگی در چرخه ۱۰ (Id_{10}) در محلول اسید سولفوریک با $PH=5.25$

سنگ‌های مصنوعی درشت‌دانه و ریزدانه نسبت به سنگ طبیعی اولیه

مقایسه نتایج شاخص دوام در شکل ۱۶ نشان می‌دهد که شاخص دوام سنگ‌های مصنوعی سنگ‌چینی، آهک سیاه و مرمریت کم‌تر از سنگ‌های طبیعی اولیه و سنگ‌های مصنوعی تراورتن تقریباً مشابه یا بیش‌تر از سنگ‌های طبیعی اولیه است، هم‌چنین سنگ‌های مصنوعی مرمر شاخص دوام بیش‌تری نسبت به سنگ طبیعی اولیه نشان می‌دهند. سیمان

سنگ‌دانه‌ها را به یک‌دیگر چسبانده و جسم یک‌پارچه و مقاومی را ایجاد کرده و سبب حذف ساختار سنگ مانند خلل و فرج و لامینه در تراورتن و سطح رخ و سستی بلورهای درشت کلسیت در مرمر) موجود در سنگ طبیعی اولیه شده است. بنابراین سبب افزایش شاخص دوام سنگ‌های مصنوعی دارای سنگ‌دانه‌های تراورتن و مرمر شده است. باتوجه به شکل ۱۶ به جز سنگ مصنوعی درشت‌دانه مرمر، در بقیه نمونه‌ها سنگ‌های مصنوعی درشت‌دانه نسبت به ریزدانه دارای شاخص دوام بیش‌تری هستند، در سنگ مصنوعی ریزدانه مرمر با کوچک شدن اندازه سنگ‌دانه‌ها، تأثیر ساختار سنگ (سطح رخ و سستی بلورهای کلسیت) در سنگ‌دانه‌های مرمر کم‌تر شده بنابراین سیمان، سنگ‌دانه‌ها را به یک‌دیگر چسبانده و جسم یک‌پارچه و مقاوم‌تری نسبت به سنگ مصنوعی درشت‌دانه مرمر ساخته است. این مسئله ناشی از بین رفتن سطوح ضعف ساختاری (سطوح رخ) در سنگ‌دانه‌های ریز مرمر است.

بررسی نتایج مقایسه ویژگی‌های مکانیکی (شکل‌های ۱۳، ۱۵ و ۱۶) نشان می‌دهند از بین سنگ‌های مصنوعی ساخته شده تحت شرایط یک‌سان از سنگ‌دانه‌های کربناته مختلف، سنگ‌دانه‌های تراورتن نسبت به سنگ طبیعی اولیه خود از نظر ویژگی‌های مقاومت و دوام دارای کیفیت بیش‌تری است. در تراورتن‌ها به دلیل خلل و فرج موجود در سطح سنگ‌دانه‌های تراورتن در مخلوط، پیوند با خمیر سیمان بر قرار کرده و در نتیجه سبب کاهش تخلخل موثر و افزایش مقاومت و دوام سنگ‌های مصنوعی می‌شود.

۴. امتیازبندی سنگ‌های مصنوعی و طبیعی

مبنای امتیازدهی براساس آئین‌نامه انتخاب سنگ برای موج شکن‌ها و سازه‌های هیدرولیکی است اما جدول ۲ پیشنهاد تحقیق است اثر وزن واحد حجم خودش را در دوام نشان می‌دهد برای سنگ‌های ساختمانی اهمیت دوام و مقاومت بیش‌تر از وزن واحد حجم است هرچه درصد جذب آب افزایش یابد دوام در زمان مشابه کاهش می‌یابد بنابراین سنگ‌های با جذب آب کم‌تر اهمیت بیش‌تری دارند.

در این تحقیق پارامترهای مهندسی سنگ بر اساس درجه اهمیت برای سنگ‌های ساختمانی مطابق جدول ۲ امتیازبندی شد و سپس با توجه به جدول امتیازبندی، نتایج امتیاز هر سنگ طبیعی و سنگ‌های مصنوعی ساخته شده از آن تعیین شد (جدول ۳).

جدول ۲. امتیازبندی سنگ ساختمانی براساس پارامترهای مهندسی [۱۰]

پارامترها	توصیف	عالی	خوب	متوسط	ضعیف
امتیاز کل	۱۰۰	۷۵	۵۰	۲۵	
درصد جذب آب %	محدوده	۲-۰	۳-۲	۵-۳	بیش‌تر از ۵
	امتیاز	۲۵	۲۰	۱۵	۱۰
وزن واحد حجم kn/m^3	محدوده	بیش‌تر از ۲۴	۲۴-۲۲	۲۲-۱۸	کم‌تر از ۱۸
	امتیاز	۱۵	۱۰	۵	۳
مقاومت فشاری MPa	محدوده	بیش‌تر از ۵۰	۵۰-۴۰	۴۰-۳۰	کم‌تر از ۳۰
	امتیاز	۲۰	۱۵	۱۰	۴
مقاومت کششی MPa	محدوده	بیش‌تر از ۲۰	۲۰-۱۵	۱۵-۱۰	کم‌تر از ۱۰
	امتیاز	۲۰	۱۵	۱۰	۴
دوام %	محدوده	کم‌تر از ۱	۱-۲	۲-۳	بیش‌تر از ۳
	امتیاز	۲۰	۱۵	۱۰	۴

با توجه به جدول ۳، نتایج امتیازبندی ویژگی‌های مهندسی سنگ‌های طبیعی و مصنوعی نشان داد سنگ مصنوعی مرمر کیفیت مهندسی بیش‌تری نسبت به سنگ طبیعی مرمر دارند و هم‌چنین سنگ‌مصنوعی‌های تراورتن نسبت به سنگ اولیه دارای کیفیت مشابه سنگ طبیعی و حتی بیش‌تر است ولی نمونه سنگ‌های طبیعی شامل سنگ‌چینی، آهک سیاه، انیکس، مرمریت کیفیت مهندسی بیش‌تری نسبت به سنگ‌های مصنوعی ساخته شده خود دارند.

بررسی نتایج نشان داد که سنگ‌های مصنوعی ساخته شده از سنگ‌دانه‌های تراورتن نسبت به سنگ طبیعی اولیه از نظر ویژگی‌های فیزیکی، مقاومت و دوام دارای کیفیت بیش‌تری است. نمونه‌های تولید شده از سایر سنگ‌ها نیز اگرچه از نظر پارامترهای مقایسه‌ای سنگ‌مصنوعی کم‌تر از سنگ طبیعی است اما در محدوده قابل قبول به‌عنوان مصالح ساختمانی قرار می‌گیرند. با مقایسه نتایج جدول ۳ با آیین‌نامه ملی برای کاربرد سنگ در موج شکن‌ها و سازه‌های حفاظت [۴۸]، سنگ‌ها عموماً در رده مقاوم تا خیلی مقاوم قرار می‌گیرند در حالی‌که بر مبنای مشاهدات محقق (جدول ۲)، این نمونه‌ها در محدوده عالی تا متوسط هستند.

جدول ۳. نتایج امتیازبندی سنگ‌های طبیعی و سنگ‌های مصنوعی ساخته شده

نام سنگ	درصد جذب آب %	وزن واحد حجم KN/m ³	مقاومت فشاری Mpa	مقاومت کشش Mpa	دوام %	امتیاز کل	درصد افزایش و افت امتیاز کل سنگ-مصنوعی نسبت به سنگ طبیعی اولیه	توصیف
سنگ مصنوعی درشت‌دانه مرمر	۲۵	۱۵	۴	۱۰	۴	۵۸	+ ۱۱/۵ %	خوب - متوسط
سنگ مصنوعی ریزدانه مرمر	۲۵	۱۰	۴	۱۰	۱۵	۶۴	+ ۲۳ %	خوب - متوسط
سنگ طبیعی اولیه مرمر	۲۵	۱۵	۴	۴	۴	۵۲		متوسط
سنگ مصنوعی درشت‌دانه تراورتن توران پشت	۲۵	۱۵	۱۰	۱۰	۱۰	۷۰	+ ۳۲ %	خوب - متوسط
سنگ مصنوعی ریزدانه تراورتن توران پشت	۲۰	۱۰	۱۰	۱۵	۱۰	۶۵	+ ۲۲/۶ %	خوب - متوسط
سنگ طبیعی تراورتن توران پشت	۲۰	۱۵	۱۰	۴	۴	۵۳		متوسط
سنگ مصنوعی درشت‌دانه تراورتن حجیت آباد	۲۵	۱۵	۴	۱۰	۱۰	۶۴	- ۱/۵ %	خوب - متوسط
سنگ مصنوعی ریزدانه تراورتن حجیت آباد	۲۰	۱۰	۱۰	۱۵	۱۰	۶۵	۰ %	خوب - متوسط
سنگ طبیعی اولیه تراورتن حجیت آباد	۲۰	۱۵	۱۰	۱۰	۱۰	۶۵		خوب - متوسط
سنگ مصنوعی درشت‌دانه انیکس	۲۵	۱۵	۴	۱۰	۱۰	۶۴	- ۱۴/۶ %	خوب - متوسط
سنگ مصنوعی ریزدانه انیکس	۲۵	۱۰	۱۰	۱۵	۱۰	۷۰	- ۶/۶ %	خوب - متوسط
سنگ طبیعی اولیه انیکس	۲۵	۱۵	۱۵	۱۰	۱۰	۷۵		خوب
سنگ مصنوعی درشت‌دانه مرمریت	۲۵	۱۵	۴	۱۵	۱۵	۷۴	- ۷/۵ %	خوب - متوسط
سنگ مصنوعی ریزدانه مرمریت	۲۰	۱۰	۱۰	۱۵	۱۰	۶۵	- ۱۸/۷ %	خوب - متوسط
سنگ طبیعی اولیه مرمریت	۲۵	۱۵	۱۵	۱۰	۱۵	۸۰		عالی - خوب
سنگ مصنوعی درشت‌دانه سنگ‌چینی	۲۵	۱۵	۴	۱۰	۱۵	۶۹	- ۲۷/۴ %	خوب - متوسط
سنگ مصنوعی ریزدانه سنگ‌چینی	۲۰	۱۰	۱۰	۱۵	۱۰	۶۵	- ۳۳/۳ %	خوب - متوسط
سنگ طبیعی اولیه سنگ‌چینی	۲۵	۱۵	۲۰	۱۵	۲۰	۹۵		عالی - خوب
سنگ مصنوعی درشت‌دانه آهک سیاه	۲۵	۱۵	۴	۱۵	۱۵	۷۴	- ۱۷/۸ %	خوب - متوسط

متوسط								
خوب - متوسط	۲۷/۸ % -	۶۵	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۲۵	سنگ مصنوعی ریزدانه آهک سیاه
عالی - خوب		۹۰	۲۰	۱۰	۲۰	۱۵	۲۵	سنگ طبیعی اولیه آهک سیاه

نتیجه گیری

سنگ مصنوعی درشت‌دانه به علت دانه‌بندی خوب، تخلخل و درصد جذب آب کم‌تر، دوام بیش‌تری نسبت به سنگ مصنوعی ریزدانه نشان می‌دهند. در سنگ مصنوعی ریزدانه کاهش اندازه سنگ‌دانه‌ها و افزایش سطح آنها سبب افزایش تخلخل و درصد جذب آب و کاهش دوام شده است. از طرف دیگر کاهش اندازه سنگ‌دانه‌ها و افزایش سطح آنها سبب افزایش جذب دوغاب و پیوند بیش‌تری با خمیره سیمان در مخلوط می‌شود و باعث افزایش مقاومت فشاری و کششی در سنگ مصنوعی ریزدانه شده است. می‌توان با افزایش اعمال فشار در هنگام ساخت تخلخل و دوام سنگ مصنوعی ریزدانه را بهبود داد.

با توجه جدول ۳، امتیاز کل سنگ‌های مصنوعی ریزدانه (۶۵٪) تقریباً مشابه یک‌دیگرند که نشان می‌دهند نوع سنگ‌دانه کربناته، تأثیری روی ویژگی‌های سنگ مصنوعی ریزدانه ندارد ولی امتیاز کل سنگ‌های مصنوعی درشت‌دانه در محدوده گسترده‌تر ۵۸ تا ۷۴٪ هستند که نشان می‌دهند سطوح ضعف ساختاری به‌ویژه سطح رخ نسبت تخلخل، لامینه، رگچه و استیلولیت در ویژگی‌های مهندسی اندازه سنگ‌دانه در سنگ مصنوعی تأثیر بیش‌تری دارد تأثیر سطح رخ را می‌توان در سنگ مصنوعی مرمر مشاهده کرد سنگ‌های مصنوعی مرمر کیفیت مهندسی بیش‌تری نسبت به سنگ طبیعی مرمر دارند. به‌ویژه در سنگ مصنوعی ریزدانه مرمر با کاهش اندازه سنگ‌دانه، سبب افزایش مقدار مقاومت و دوام شده است که این مسئله ناشی از بین رفتن سطوح ضعف ساختاری (سطوح رخ) در سنگ‌دانه‌های ریز مرمر است.

سنگ مصنوعی‌های تراورتن نسبت به سنگ طبیعی اولیه از نظر ویژگی‌های فیزیکی، مقاومت و دوام دارای کیفیت مشابه سنگ طبیعی و حتی بیش‌تر هستند. به‌دلیل وجود خلل و فرج موجود در سطح سنگ‌دانه‌های تراورتن در مخلوط، پیوند با خمیر سیمان بر قرار کرده و در نتیجه سبب کاهش تخلخل مؤثر و افزایش مقاومت و دوام سنگ مصنوعی می‌شود.

با توجه به جدول ۳، نتایج درصد افزایش و افت امتیاز کل (کیفیت مهندسی) سنگ‌های مصنوعی درشت‌دانه و ریزدانه نسبت به سنگ طبیعی اولیه نشان داد سنگ‌های مصنوعی مرمر و تراورتن توران‌پشت حدود ۱۱ تا ۳۲٪ افزایش امتیاز نسبت به سنگ طبیعی خود دارند و هم‌چنین سنگ‌های مصنوعی تراورتن حجت‌آباد نسبت به سنگ طبیعی خود امتیاز مشابهی دارد ولی نمونه سنگ‌های مصنوعی سنگ چینی و آهک سیاه حدود ۱۷ تا ۳۳٪ کاهش و هم‌چنین سنگ‌های مصنوعی انیکس و مرمریت حدود ۶ تا ۱۸٪ کاهش نسبت به امتیاز کل سنگ‌های طبیعی خود دارند. از نظر امتیاز کل تمام سنگ‌های مصنوعی ریزدانه ساخته شده در محدوده ۶۴ تا ۷۰٪ و هم‌چنین تمام سنگ‌های مصنوعی درشت‌دانه ساخته شده در محدوده ۵۸ تا ۷۴ قرار می‌گیرند که از نظر امتیاز کل با ویژگی‌های مهندسی سنگ طبیعی تراورتن (۶۵٪) و انیکس (۷۵٪) معدن حجت‌آباد مشابه هستند.

نمونه سنگ‌های طبیعی شامل سنگ‌چینی، آهک سیاه، انیکس و مرمریت کیفیت مهندسی بیش‌تری نسبت به سنگ‌های مصنوعی ساخته شده خود دارند. نمونه‌های تولید شده از این سنگ‌دانه‌ها اگرچه از نظر پارامترهای مقایسه‌ای سنگ مصنوعی کم‌تر از سنگ طبیعی است اما با توجه به نتایج امتیازبندی (جدول ۳) در محدوده قابل قبول به‌عنوان مصالح ساختمانی قرار می‌گیرند. در صورت بهبود وسایل، امکان تولید سنگ مصنوعی بهتر از سنگ‌های سست طبیعی مقدور است.

منابع

1. Mitchell C. J., Harrison D. J., Robinson H. L., Ghazireh N., "Minerals from waste recent BGS and Tarmac experience in finding uses for mine and quarry waste", *Miner Eng*, Vol.17 (2004) 279-284.
2. Bilgin A., Gurkan y., Sonmez A., Nursev B., Suleyman P., "The effects of mineralogical and petrographical features of the Lake District rocks (Isparta, Turkey) on the quality of artificial marbles", *Recycling-Waste Recovery-Hulladekhasznositas*, Vol. 5 (2013).
3. Peng L., Qin S., "Mechanical behaviour and microstructure of an artificial stone slab prepared using a SiO₂ waste crucible and quartz sand", *Construction and Building Materials*, 171 (2018) 273-280.

4. Lee M. y., Ko Ch. H., Chang F., Ch., Lo Sh.Li., Lin J. D., Shan M.Y., Lee J.ch., "Artificial stone slab production using waste glass stone fragments and vacuum vibratory compaction", cement and concrete composites, Vol. 30 (2008) 583-587.
5. Kandelbauer A., Tondi G., zasko O. C., Goodman S. H, "Unsaturated polyesters and vinyl esters", In Handbook of Thermoset Plastics (Third Edition) (2014) 111-172.
۶. جعفرآذری خزینه اکبر، ارومیه‌ای ع.، نیکودل م. ر.، "بررسی تأثیر مواد افزودنی در استحکام و کاربری سنگ‌های مصنوعی تولید شده از سنگ‌های گرانیتی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس (۱۳۹۷).
۷. باباآدم ن.، ارومیه‌ای ع.، نیکودل م. ر.، "تأثیر خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سنگ دانه‌های سیلیسی بر ویژگی‌های مهندسی سنگ مصنوعی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس (۱۳۹۴).
۸. صحبت‌زاده ل.، فضلوی ع.، کریمی غ. ل.، باقرپور ز.، "بررسی کمی و کیفی فاکتورهای مؤثر ماسه سیلیسی (کارخانه ریخته‌گری) بر تولید سنگ مصنوعی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، دانشکده فنی (۱۳۹۲).
9. Fernanda Souza S., Carlos Eduardo Gomes R., Ruben Jesus Sanchez R., "Physical and Mechanical Characterization of Artificial Stone with Marble Calcite Waste and Epoxy Resin", Materials Research. Vol. 21 No. 1 (2018).
۱۰. میرجلیلی ط.، خامه‌چیان م.، نیکودل م. ر.، "بررسی تأثیر ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی سنگ-دانه‌های آهکی روی خصوصیات سنگ‌های مصنوعی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس (۱۳۹۳).
11. Hamoush S., Abu-Lebdeh T., Picornell M., Amer S., "Development of sustainable engineered stone cladding for toughness, durability, and energy conservation", construction and Building materials, 25 (10) (2011) 4006-4016.

12. Stefanidou M., Pachta V., Papayianni I., "Design and testing of artificial stone for the restoration of stone elements in monuments and historic buildings", *Construction and Building Materials*, 93 (2015) 957-965.
13. Carvalho E. A. S., Vilela N. D. F., Monteiro S. N., Vieira C. M. F., Silva L. C. D., "Novel Artificial Ornamental Stone Developed with Quarry Waste in Epoxy Composite", *Materials Research*, 21(2018).
۱۴. اسماعیلی ح.، بارانی بیرانوند ک.، رشیدی ر.، "استفاده مجدد و به‌کارگیری لجن کارخانجات سنگ‌بری جهت تولید سنگ مصنوعی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه لرستان، دانشکده فنی (۱۳۹۳).
۱۵. حسین‌پور ا.، شیخ ر.، عبدالمهی شریف ج.، "ارزیابی فنی و اقتصادی تولید سنگ‌های تزئینی مصنوعی از ذخایر معدنی استان و تدوین برنامه‌ریزی تولید این ذخایر با دیدگاه تأمین نیاز بازار"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه ارومیه، دانشکده فنی (۱۳۹۱).
۱۶. دوست‌محمدی ا.، اصفهانیان م.، مصطفی‌غیور م.، "طراحی سیستم قالب‌گیری خط تولید سنگ مصنوعی سمنت‌پلاست"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مکانیک (۱۳۹۷).
۱۷. شرکت شهرک‌های صنعتی خراسان، "امکان سنجی تولید سنگ مصنوعی"، (۱۳۷۸).
۱۸. یوسف‌وند ف.، نیکودل م. ر.، "بررسی تأثیر نوع سنگ‌دانه در دوام بتن گوگردی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس (۱۳۹۳).
۱۹. قاسمی ش.، نیکودل م. ر.، "تأثیر جنس و بافت سنگ‌دانه‌ها بر ویژگی‌های مقاومتی بتن‌های گوگردی و معمولی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس (۱۳۹۱).
۲۰. شریفی ج.، نیکودل م. ر.، "بررسی اثر جنس سنگ‌دانه‌های مختلف بر خواص مقاومتی بتن"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران (۱۳۸۷).
21. Kou Shi-Cong, Poon Chi-Sun. Miren, Etxeberria, "Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete", *cement & concrete composites*, Vol. 33 (2011) 286-29.

22. EI-Dash K. M., Ramadan M. O., "Effect of aggregate on the performance of confined concrete", cement and Concrete Research, Vol. 36 (2006) 599-605.
23. Basheer p., Basheer L., Lange D. A., Long A. E., "Influence of coarse aggregate on the permeation, durability and the microstructure characteri- stics of ordinary Portland cement", construction and building Materials, Vol.19 (2005) 682-690.
24. Beshr H., Almusallam A. A., Maslehuddin M., "Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete", construction And Building Materials, Vol.17 (2003) 97-103.
25. Donza H., Cabrera O., Irassar E. F., "High-strength concrete with different fine aggr egate", cement and Concrete Research, Vol. 32 (2002) 1755-1761.
26. Elices M., Rocco C.G., "Effect of aggregate size on the fracture and mechanical properties of a simple concrete", Engineering fracture mechanics, 75 (2008) 3839-3851.
27. Basheer P., Basheer L., Lange D., Long A. E., "Role of thresholding to determine the size of interfacial transition zone", ACI special publication SP-189, ACI spring convention, Chicago, (1990) 164-86.
28. Dunham R. G., "classification of carbonate rocks according to deposition texture", in: Classification of Carbonate rocks (ed. By W. E. Ham) A A P G Mem., No. 1 (1962) 108-121.
29. Carlos A., Masumi I., Hiroaki M., Maki M., Takahisa O., "The effects of limestone aggregate on concrete properties", Construction and Building Materials, Vol. 24 (2010) 2363-2368
۳۰. حاجی قاسمی س.، رمضانپور ع. ا.، لطفی و.، کاشفی زاده م. ح.، "بررسی اثر واکنش قلیایی - سیلیسی بر رفتار سازه ای تیره‌های بتنی مسلح با استفاده از روش المان محدود"، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر. دوره ۴۹، شماره ۱ (۱۳۹۶) ۲۳-۳۳.

۳۱. رحیمی ح.، "مصالح ساختمانی"، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ سوم، تهران (۱۳۸۸).
32. ASTM, "American society for testing and materials C 136-01", Standard Test Method (2004).
33. Güneysi E., Özturan T., Gesoğlu M., "A study on reinforcement corrosion and related properties of plain and blended cement concretes under different curing conditions", Cement & Concrete Composites, Vol. 27 (2005) 449-461 .
34. Koliass S., Georgiou C., "The effect of paste volume and of water content on the strength and water absorption of concrete", Cement and Concrete Composites, Vol. 27 (2005) 211-216.
35. Ahmad S., "Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction - a review", Cement & Concrete Composites, Vol. 25 (2003) 459-471.
36. Alawode O., Dip P., Idowu O., "Effects of Water-Cement Ratios on the Compressive Strength and Workability of Concrete and Lateritic Concrete Mixes", The Pacific Journal of Science and Technology, Vol.12, 2 (2000) 99-105.
37. Chi J., Huang R., Yang C., Chang J., "Effect of aggregate properties on the strength and stiffness of lightweight concrete", Cement and Concrete Composites, Vol. 25 (2003) 197-205.
38. Topličić-Ćurčić G., Grdić Z., Despotović I., Ristić., "Influence of crushed stone aggregate type on concrete consistency", Architecture and Civil Engineering ,Vol.8,1 (2010) 99-109.
39. Galetakis M., Raka S., "Utilization of limestone dust for artificial stone production: an experimental approach", Mineral Engineering, Vol. 17 (2004) 355-357.

40. Sakai T., "artificial stone composition and method of manufacturing artificial stone", Doppel Co. Ltd., Tokyo' Japan, Patent Number, Vol. 6 (2000) 127-458.
۴۱. رضانیان پور ع. ا.، طاحونی ش.، پیدایش م.، "دستنامه اجرای بتن"، مؤسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران، چاپ اول، تهران (۱۳۸۰).
۴۲. فامیلی ه.، "بتن‌شناسی (ویژگی بتن)"، انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه علم و صنعت ایران، چاپ اول (۱۳۶۸).
43. Aci-Committee-221, "Guide for Use of Normal Weight and Heavyweight Aggregates in Concrete", American Concrete Institute (2007).
44. ASTM, "American society for testing and materials D 2938-95", Standard test method of unconfined compressive strength of intact rock core specimens, (2002).
45. ASTM, "American society for testing and materials D 3967-95", Standard test method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens, Designation (2001).
46. ASTM, "American society for testing and materials D 4644", Standard Test Method for Slake Durability of Shales and Similar Weak Rocks (1998).
47. ISRM, "Commission on Standartization of Laboratory and Fild Tests", Suggested Methods for Rock Characterization Teesting and Monit, In: Brown, E.T. (Ed.), oring. Pergamon, Oxford, (1981) 113-116 and 123-127.
۴۸. شفیع‌فر م.، رحمانی ا.، نیکودل م. ر.، حافظی مقدس ن.، "معرفی آیین‌نامه ملی برای کاربرد سنگ در موج شکن‌ها و سازه‌های حفاظت، نهمین همایش بین‌المللی سواحل"، بنادر و سازه‌های دریایی ICOPMAS 2010، ۱۰-۸ آذر ماه (۱۳۸۹).