

مقایسه ویژگی های فیزیکی و مکانیکی سنگ های مصنوعی ساخته شده با شرایط وجود و عدم وجود خلاء و فشار، رزین و سنگ دانه های مختلف

اکبر جعفرآذری خزینه^۱، فاطمه سادات هل اتائی^۲، علی ارومیه ای^{۳*}، محمدرضا نیکودل^۴، ناصر حافظی مقدس^۵

پذیرش مقاله: ۹۹/۰۶/۳۰

دریافت مقاله: ۹۸/۱۰/۴

چکیده:

سنگ مصنوعی ترکیبی از سنگ دانه های طبیعی و مواد افزودنی مانند صمغ های صنعتی (رزین)، سیمان و دیگر مواد پلیمری می باشد. هدف این پژوهش مقایسه ویژگی های فیزیکی و مکانیکی سنگ های مصنوعی ساخته شده با شرایط وجود و عدم وجود خلاء و فشار، رزین و سنگ دانه های مختلف می باشد. برای دستیابی به این اهداف نمونه سنگ های مصنوعی با رزین های پلی استر و ویلین استر و سنگ دانه های گرانیت، آهک، سیلیس و ترکیب برابر آهک و سیلیس، با شرایط وجود و عدم وجود خلاء و فشار در حین ساخت سنگ های مصنوعی ساخته شدند. برای تعیین ویژگی های فیزیکی و مکانیکی (کششی برزیلی، بارنقطه ای و مقاومت فشاری تک محوری)، سنگ های مصنوعی ساخته شده مورد آزمایش واقع شده اند. بر اساس آزمایش های صورت گرفته سنگ های مصنوعی ساخته شده با سیستم خلاء و فشار دارای ویژگی های فیزیکی مطلوب تر و ویژگی های مهندسی نامطلوب نسبت به نمونه های همزاد ساخته شده در شرایط کاملاً دستی بدون سیستم خلاء و فشار دارند. نمونه های ساخته شده با رزین ویلین استر دارای مقاومت فشاری تک محوری بیشتر نسبت به سایر نمونه ها هستند و نوع شکست آن ها به صورت الاستیک - شکست است اما نمونه های ساخته شده با رزین پلی استر فارغ از نوع سنگ دانه دارای رفتار الاستیک - پلاستیک - خزشی هستند. افزایش درصد رزین در سنگ های مصنوعی ساخته شده با سنگ دانه آهک موجب بالا رفتن مقاومت کششی می شود اما در سنگ های گرانیتی تاثیر مثبتی ندارد. نتایج بررسی نشان می دهد که کلیه ویژگی های مقاومتی سنگ های مصنوعی قابل کنترل بوده و طرح اختلاط و نسبت درصدهای ترکیبی مهمترین اصل در استحکام و مقاومت سنگ مصنوعی می باشد و برای هر استفاده ای و سلیقه ای قابلیت انعطاف پذیری را دارد.

واژه های کلیدی: سنگ مصنوعی، رزین پلی استر و ویلین استر، ویژگی های فیزیکی و مکانیکی، وجود و عدم وجود خلاء و فشار

^۱ دانشجوی دوره دکتری زمین شناسی مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، akbar.jafarazari@modares.ac.ir

^۲ دانشجوی دوره کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس، f.halataei@modares.ac.ir

^۳ استاد گروه زمین شناسی دانشکده علوم پایه دانشگاه تربیت مدرس، uromeia@modares.ac.ir

^۴ دانشیار گروه زمین شناسی دانشکده علوم پایه دانشگاه تربیت مدرس، nikudelm@modares.ac.ir

^۵ استاد گروه زمین شناسی دانشکده علوم پایه دانشگاه فردوسی مشهد، nhafezi@um.ac.ir

۱. مقدمه

رشد و توسعه اقتصادی هر کشور بر اساس سیاست‌ها و منابع هر کشور به توسعه‌های صنعتی، معدنی و کشاورزی در آن کشور بستگی دارد. ظهور توسعه تکنولوژی بعد از انقلاب اروپا (۱۸۷۰ میلادی) ثمرات فراوانی را برای جوامع بشری در پی داشته است، اما این توسعه نتیجه نامطلوب دیگری را نیز در پی داشت و آن افزایش میزان مواد زائد صنعتی تولید شده بود (آزادی و همکاران، ۱۳۸۹). ضایعات هزینه‌های قابل توجهی را به فرآیند تولید وارد می‌آورد. البته گاهی مواقع، این ضایعات برای محیط‌زیست خطرناک بوده و لازم است تمهیدات ویژه‌ای در دفع یا بازیافت آن‌ها به عمل آید (پژوهشکده حمل و نقل وزارت راه و ترابری، ۱۳۸۵). سنگ مصنوعی از مواد زائد بازیافتی از قبیل زباله شیشه و خرده-سنگ‌های حاصل از فرآوری سنگ به عنوان مواد خام با استفاده از تراکم و ویبره در یک محیط خلاء ساخته می‌شود که این امر سبب سبک‌تر شدن سنگ‌ها نسبت به نمونه‌های طبیعی آن‌ها شده که در نتیجه نصب و استفاده آسانتری خواهد داشت (Hamoush et al., 2011). کشورهای پیشرفته در صنعت سنگ، نظیر ایتالیا و اسپانیا پس از سال‌ها فرهنگ-سازی و تلاش به پژوهشی در زمینه بازیافت ضایعات سنگ به راه‌های استفاده مجدد و بهینه از این مواد زائد دست یافته-اند که هم ارزش اقتصادی دارند و هم از تجمع و انباشت مواد زائد و مزاحم و بازدارنده تداوم عملیات در معادن و کارخانجات سنگ‌بری جلوگیری می‌کنند این ضایعات و گل سنگ در صنایع گوناگونی مانند سنگ مصنوعی، سیمان، کاغذ، رنگ، لاستیک و پلاستیک، کشاورزی، سرامیک، مصنوعات سنگی، مرمت آثار باستانی، بتن‌های مقاوم، کامپوزیت‌ها می-تواند مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین ضایعات یاد شده را در صورت داشتن کیفیت شیمیایی و فیزیکی مناسب می‌توان به مصارف بهینه‌ای در صنایع گوناگون رساند (Phillips., 1989, Xie et al., 2004). با پیشرفت علوم شیمی و متالورژی به ویژه در گرایش‌های پلیمر و کامپوزیت، تحول شگرفی در صنایع و معادن حادث شده است. ساخت و سنتز مصنوعات

شیمیایی و احیای مواد معدنی از طریق فعل و انفعالات شیمیایی، یکی از کارکردهای شیمی پلیمر در عصر حاضر است، شاید ترکیب عناصر و مواد معدنی با یکدیگر و تولید مواد جدید ترکیبی تحت عنوان کامپوزیت مهم‌ترین تحول علمی قرن بیستم در مصالح ساختمانی باشد. از سوی دیگر ترکیب مواد طبیعی بازیافتی با بستری از مواد چسبنده منجر به تولید مصنوعات ویژه با کارکردهای متنوع شده است. در این ترکیبات معمولاً از رزین‌ها به عنوان چسباننده استفاده (مصفا و همکاران، ۱۳۸۸). امروزه تمایل بیشتری به استفاده مجدد از بقایای صنعتی در قالب سنگ مصنوعی به منظور کاهش تاثیرات محیطی آن‌ها وجود دارد (Gomes et ai., 2018). اسلب‌های سنگ مصنوعی برای پوشش دیوارها و کاشی‌های کف و موارد استفاده دیگر، مواد ساختمانی مناسبی هستند که به دلیل قدرت بالای خمش، جذب آب کم، تخلخل پایین و عملکرد سایشی کم مورد توجه واقع شده‌اند (Peng and Qin, 2018). Rajgor and Pitroda (2013) راه‌کار اقتصادی برای به‌کارگیری ضایعات سنگ در کارخانجات آجرسازی مورد بررسی قرار دادند که منجر به کاهش ضایعات معادن گردید. سنگ‌های رسوبی بیش از ۹۵ درصد سطح زمین را می‌پوشانند و سنگ‌های آهکی از جمله فراوان‌ترین سنگ-های رسوبی می‌باشند. حدود یک چهارم سطح زمین را سنگ-های قابل حل و عمدتاً کربناته در برمی‌گیرد (Merke, 2000). بیشترین ضایعات سنگ مربوط به سنگ گرانیت است که ضریب کوبدهی در معادن سنگ گرانیت حدود ۴۰٪ است، علت این امر روش استخراج معادن گرانیت در کشور است که فاصله زیادی با استانداردهای جهانی دارد (حسینی، ۱۳۹۴). بنابراین برای ساخت سنگ مصنوعی در این تحقیق از سنگ‌دانه‌های گرانیت و آهک استفاده شد. از عوامل اصلی ایجاد پسماند در معادن و کارخانه‌های سنگ‌بری ایران می‌توان به موارد زیر اشاره کرد (حقیقی و همکاران، ۱۳۸۶). عدم چسب و تور کردن بلوک، عدم استفاده از تکنولوژی مدرن در برش بلوک، عدم استفاده از کارگران ماهر، وجود

مصرف آن دارد. همچنین کاربردهای زیادی در هنر، تولید پلیمر و غیره دارد. نوع مواد اولیه مصرفی در ساخت پلی‌استر و وینیل‌استر، تعیین کننده میزان مقاومت مکانیکی، شیمیایی و پایداری حرارتی آن‌ها است (Carvalho et al., 2018). از رزین‌های پلی‌استر، به مقدار زیاد در تهیه قالب‌ها، پوشش‌های فایبرگلاس و تولید سنگ مصنوعی استفاده می‌شود (Nichols and Horning, 1993). جدول ۱ مشخصات فنی و قالب‌گیری رزین‌های پلی‌استر و وینیل‌استر در ساخت سنگ مصنوعی طبق استانداردهای مربوطه را نشان می‌دهد که از شرکت شیمی افسون دارو خریداری شده است.

گسل‌ها و درزه‌ها در سنگ، عدم امتداد لایه‌ها به موازات راستای چین‌خوردگی سنگ، حمل و نقل نامناسب که غالباً باعث ایجاد شکستگی در لبه‌ها، ترک‌ها و خراش در سطح ساب خورده می‌کند، ضربه انفجار در معادنی که به روش انفجاری استخراج می‌نمایند، عدم استخراج در جهت عکس شیب طبقات.

۲. مواد و روش‌ها

رزین ترکیبی طبیعی یا مصنوعی است که بسیار چسبناک است و تحت شرایطی سخت می‌شود. معمولاً در الکل قابل حل است اما در آب حل نمی‌شود. این ترکیب به طرق گوناگون

Test Method	Unit	Amount of (Vinyl ester)	Amount of (polyester)	Specification	Properties
ASTM D2196	mPa.s	45 -35	600- 400	Technical	Viscosity
ASTM D1639	MgKOH /g	10	Maximum 15		Acidic number
ASTM D1259	%	62	65 - 60		Percent Solid
ASTM D2471 - 88	min	13 -10	25 - 10		Gel time
	min	17- 13	30 - 15		Baking time
	°c	200- 170	200- 170		Maximum heat
ASTM D1544	Gardner		Maximum 1/5		Color
ASTM D1298	g / cm ³		1.1-1.2		Density
ASTM D2583	Barcol	45- 35	50 - 40		hardness
ASTM D638	GPa	3.5-4.5	3-2		Molded resin
	%	6 - 2	2.5-3.5	Elongation	
ASTM D648	°c	105 - 90	80 - 70		Deformation temperature

طبقه‌بندی می‌شود که بستگی به ترکیب شیمیایی و مورد

جدول ۱. مشخصات فنی و قالب‌گیری رزین‌های پلی‌استر و وینیل‌استر (<http://shimiasoon.com>) جعفرآذری و همکاران، (۱۳۹۸)

۳. مراحل ساخت سنگ مصنوعی

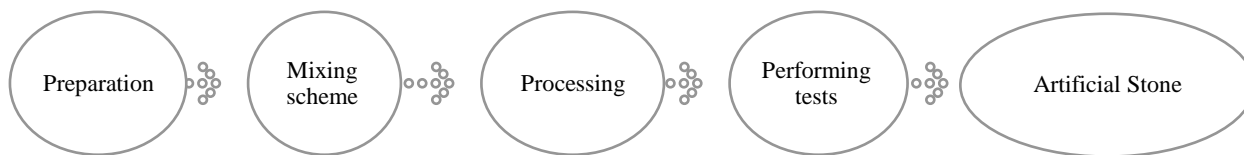
تحقیق را به ترتیب نشان می‌دهد که شامل مراحل؛ آماده‌سازی، طرح اختلاط، شرایط فرآوری که با رنگ تیره‌تر مشخص گردیده است و می‌تواند با اعمال یا عدم اعمال سیستم خلاء و فشار باشد و مرحله آخر انجام آزمایش است. در مرحله آماده سازی، سه سنگ گرانیت (تکاب، نهندان و الموت) با توجه به این‌که سنگ‌های گرانیتی دارای مقاومت بالا هستند و همچنین بیشترین کوپدهی معادن را سنگ‌های گرانیتی دارند، انتخاب شدند و با دستگاه سنگ شکن که می‌تواند سنگ‌دانه-

سنگ مصنوعی ترکیبی از سنگ‌دانه‌های طبیعی و مواد افزودنی مانند صمغ‌های صنعتی (رزین)، سیمان و دیگر مواد پلیمری می‌باشد که برای کاربری‌های خاص در شرایط خاص تهیه و تولید و استفاده می‌شوند. این‌گونه سنگ‌ها با توجه به نیازهای مصرف‌کننده با رنگ‌های مختلف، ابعاد هندسی، ویژگی‌های مقاومتی و چگالی‌های متفاوت ساخته می‌شوند (Peng and Qin, 2018). شکل ۱ مراحل ساخت سنگ مصنوعی در این

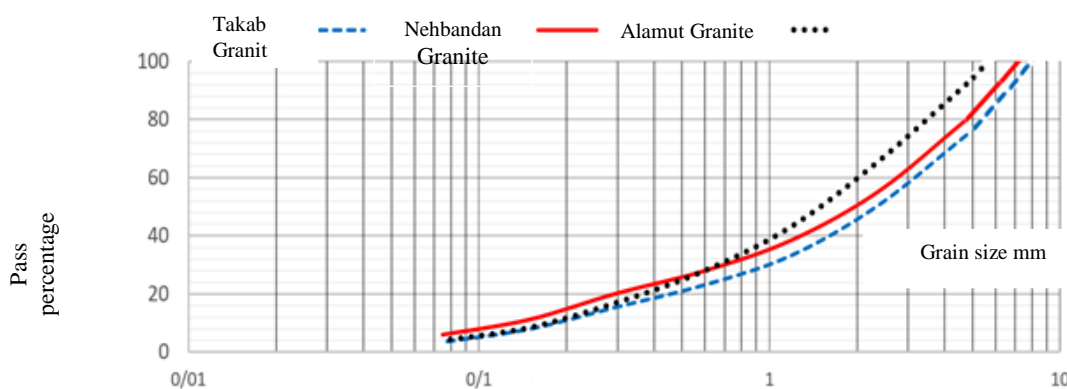
تکاب از ۱۱ درصد رزین، برای نمونه گرانیته ساخته شده با شرایط اعمال خلاء و فشار از ۱۵ درصد رزین (بابا آدم و همکاران، ۱۳۹۴)، برای نمونه‌های سیلیس از ۲۵ درصد رزین، برای نمونه سنگ‌های مصنوعی ساخته شده با آهک از ۳۵ درصد رزین و مخلوط سیلیس و آهک از ۲۵ درصد رزین طبق جدول ۲ استفاده گردید (هل‌اتائی و همکاران، ۱۳۹۸). در مرحله سوم سنگ‌های مصنوعی کاملاً بصورت دستی و بدون نیاز به هر نوع وسیله و سیستم خلاء و فشار در قالب لوله پلیکا ساخته شدند بجز نماد G در جدول ۲ که از سیستم خلاء و فشار در ساخت آن استفاده شده است و در مرحله آخر کلیه آزمایش‌ها با رعایت استانداردهای مربوطه انجام گرفت. جدول ۳ ضریب یکنواختی و خمیدگی محاسبه شده برای دانه‌بندی انجام شده را نشان می‌دهد.

هایی با اندازه‌های متفاوت و مورد نیاز برای طرح اختلاط فراهم آورد خرد شد و با الک کردن و انجام آزمایش دانه‌بندی (شکل ۲) با استناد بر منحنی‌های دانه‌بندی موجود برای ساخت بتن با کمترین میزان تخلخل مش‌بندی شد و خرده-سنگ‌ها در محدوده دانه‌بندی خوب قرار گرفتند همچنین سنگ‌دانه‌های سیلیسی دانه‌بندی بد دارند و دانه شکری هستند و سنگ‌دانه‌های آهک به‌صورت پودر و زیر الک ۲۰۰ از لحاظ دانه‌بندی قرار گرفتند.

در مرحله دوم، درصد‌های ترکیبی است با آزمون سعی و خطا و به کمک اساتید گروه شیمی و پلیمر دانشگاه تربیت مدرس و تبریز برای دستیابی به بهترین درصد اختلاط که مهم‌ترین اصل در استحکام و مقاومت سنگ‌های مصنوعی است، ترکیب گردید. برای سنگ‌دانه‌های گرانیته الموت، نهبندان و



شکل ۱. مراحل ساخت سنگ مصنوعی



شکل ۲. دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها

جدول ۲. درصد مواد افزودنی، وجود و عدم وجود سیستم خلاء و فشار و نماد سنگ‌های مصنوعی ساخته شده

Resin Polyester				Resin Vinyl ester				Resin Polyester		Resin type
35	30	25	15	11				11	Resin content (%)	
There isn't			There is		There isn't		There isn't		Apply pressure and vacuum	
Limestone	Limestone and silica	Silica	Granite	Nehbandan	Alamut	Takab	Nehbandan	Alamut	Takab	Name
M	L	K	G	F	E	D	C	B	A	Symbol

جدول ۳. ضریب یکنواختی و خمیدگی محاسبه شده برای سنگ‌دانه‌ها

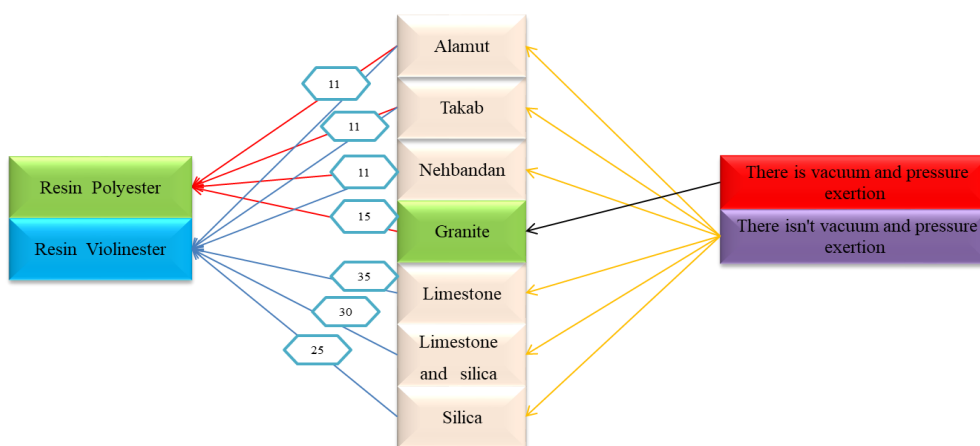
C_c	C_u	Name rock
1.15	10.52	Takab Granite
1.69	23.33	Nehbandan Granite
1.15	16.31	Alamut Granite

به آهک با ۳۰ درصد رزین پلی‌استر بدون سیستم خلاء و فشار ساخته شده است. شکل ۴ تصاویر میکروسکوپی گرفته شده از نمونه‌ها را نشان می‌دهد. شکل ۵ نمونه سنگ‌های مصنوعی ساخته شده بعد از انجام آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

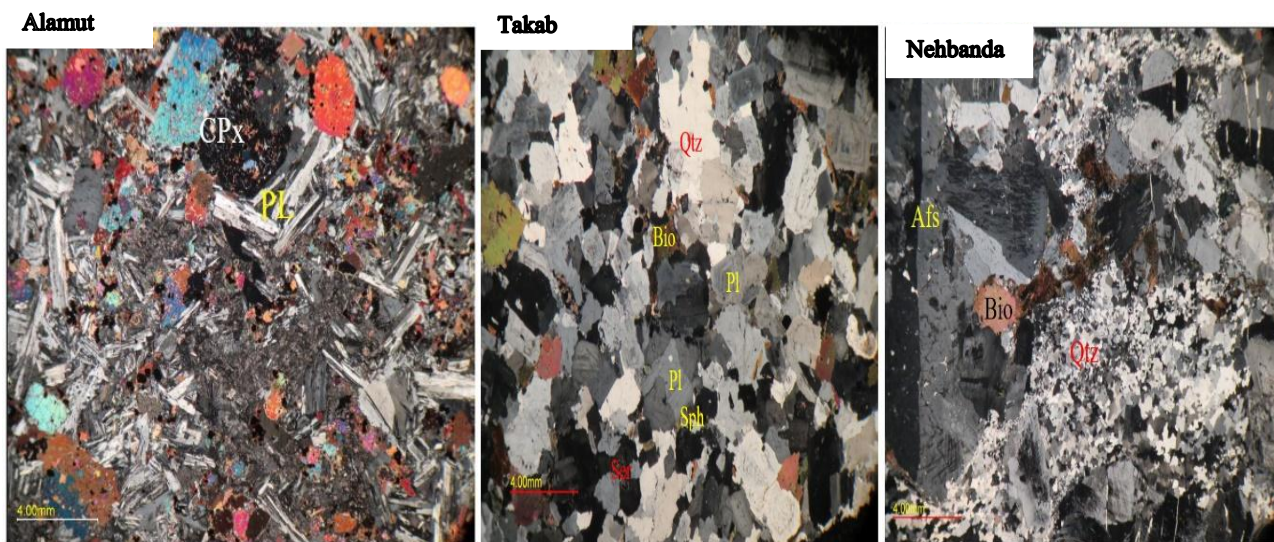
۴. قسمت‌های مختلف دستگاه خلاء و فشار ساخته شده

شکل ۶ قسمت‌های مختلف دستگاه خلاء و فشار ساخته شده در دانشگاه تربیت مدرس را به صورت شماتیک و عینی نشان می‌دهد. دستگاه تشکیل شده از دو قالب استوانه‌ای فولادی که داخل یکدیگر قرار گرفته‌اند که در قسمت انتهایی با ۸ پیچ متصل می‌گردند. ارتفاع و شعاع قاعده استوانه داخلی به ترتیب ۲۵ cm - ۸ cm است (شکل ۳ - c). در قسمت زیرین قالب یک پیچ جهت تخلیه هوا و ایجاد خلاء تعبیه شده است (شکل ۳ - d) که به دستگاه پمپ خلاء برای مکش هوا متصل می‌شود. در قسمت کف قالب و در حد فاصل بدنه خارجی و استوانه داخلی صفحه‌ای متخلخل (شکل ۳ - b) به ضخامت ۰/۵ cm به منظور مکش بهتر هوا از داخل نمونه صورت می‌گیرد. در قسمت داخلی جهت اعمال فشار از یک پیستون متناسب با قطر داخلی استوانه استفاده شده که پس از ریختن نمونه در داخل قالب روی آن قرار گرفته و شرایط مناسبی را جهت اعمال بار به نمونه فراهم می‌کند. فشار طی سه مرحله و حداکثر اعمال فشار برای هر مرحله ۱۲ MPa می‌باشد (باب‌آدم و همکاران، ۱۳۹۴).

با توجه به ضریب یکنواختی و ضریب خمیدگی و محدوده‌ی دانه‌بندی، نمونه سنگ‌های خرد شده دارای دانه‌بندی خوب هستند و این عاملی است که به سنگدانه‌ها این امکان را می‌دهد که بسیار نزدیک به هم قرار گیرند و بهترین آرایش مواد جامد مخلوط را داشته باشند. بنابراین مقدار مواد چسباننده که سنگ‌دانه‌ها را در بر می‌گیرد بسیار کاهش می‌یابد و این عاملی است که مشخصات تکنیکی سنگ را بهبود می‌بخشد و سبب تولید اسلب سنگ مصنوعی با مقاومت فشاری بالا می‌شود. برای این منظور از سیلیس‌های دانه شکری با دانه‌بندی بد و پودر آهک زیر الک ۲۰۰ برای مقایسه با گرانیت‌های خوب - دانه‌بندی شده استفاده کردیم. سنگ‌دانه‌های تیز گوشه و آن‌هایی که سطوح ناصافی و متخلخل دارند نسبت به سنگ‌دانه‌های گرد گوشه آب بیشتری جذب می‌کنند. شکل ۳ روند انجام و درصد اختلاط مصالح سنگ‌های مصنوعی ساخته شده همراه با درصد رزین و شرایط ساخت را نشان می‌دهد. به‌طور مثال نمونه G به سنگ مصنوعی ساخته شده با سنگ‌دانه گرانیت، تحت شرایط خلاء و فشار، با ۱۵ درصد رزین پلی‌استر اطلاق می‌شود که چند نمونه برای نشان دادن تاثیر فشار و خلاء ساخته شده است و میانگین آن‌ها در نتایج آورده شده است. همچنین نمونه F به نمونه سنگ مصنوعی ساخته شده، بدون اعمال شرایط خلاء و فشار، با سنگ‌دانه گرانیت نه‌بندان و با ۱۱ درصد رزین ویلین استر اطلاق می‌گردد. نمونه L با نسبت برابر سیلیس



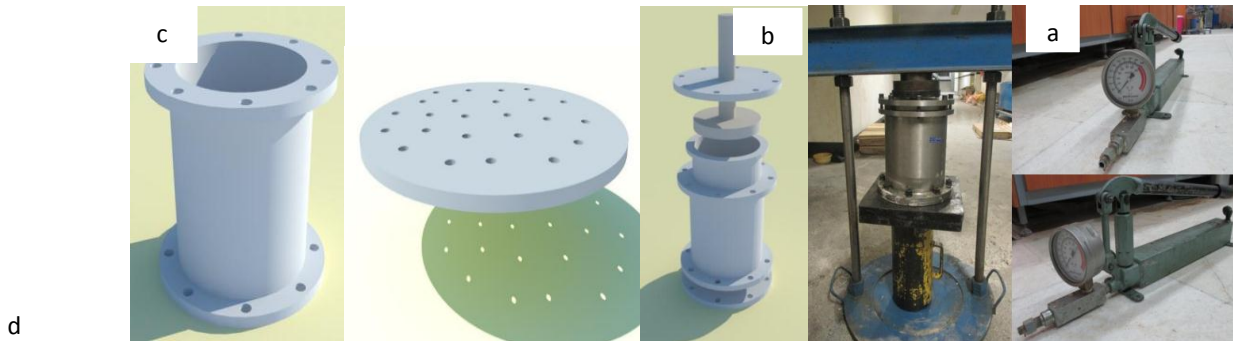
شکل ۳. طرح اختلاط و روش تهیه نمونه‌ها سنگ‌های مصنوعی ساخته شده



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپی از گرانیتهکاب با بلورهای آلکالی فلدسپار، بیوتیت و کوارتز؛ گرانیتهبندان با بلورهای کوارتز، بیوتیت، فلدسپار و سرسیت؛ گرانیتموت با بلورهای کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز در آن دیده می‌شود.



شکل ۵. نمونه‌های سنگ مصنوعی ساخته شده قبل و بعد از انجام آزمایش‌ها



شکل ۶. قسمت‌های مختلف دستگاه خلاء و فشار (باباآدم و همکاران، ۱۳۹۴)

که از سیستم خلاء و فشار در ساخت آن استفاده شده است دارای بیشترین چگالی در بین نمونه سنگ‌های مصنوعی ساخته شده است.

۲.۵. نتایج آزمایش برزیلین

آزمایش برزیلین یکی از روش‌های متداول برای اندازه‌گیری غیر مستقیم مقاومت کششی سنگ‌ها می‌باشد. در این تحقیق برای تعیین مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای سنگ بکر از روش غیرمستقیم با استاندارد (ISRM, 2007)، آزمایش برزیلی استفاده شد. شکل (۹) نتایج آزمایش برزیلین صورت گرفته بر روی سنگ‌های ساخته شده را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که نمونه L (نمونه ساخته شده با نسبت برابر آهک و سیلیس با ۳۰ درصد رزین پلی‌استر بدون اعمال شرایط فشار و خلاء) بیشترین مقاومت کششی را دارد اما نمونه K (نمونه ساخته شده با ۲۵ درصد رزین پلی‌استر و سنگ‌دانه سیلیس دانه شکری بدون اعمال شرایط خلاء و فشار) و M (نمونه ساخته شده با ۳۵ درصد رزین پلی‌استر و پودر آهک بدون اعمال شرایط خلاء و فشار) کمترین میزان مقاومت کششی را دارند. نمونه‌های سنگ مصنوعی C و F که دارای رزین متفاوت هستند و با سنگ‌دانه گرانیت نهبندان ساخته شده‌اند دارای مقاومت کششی نسبتاً یکسانی هستند. از این نتایج نتیجه می‌شود که میزان درصد رزین و یکنواختی سنگ‌دانه‌ها روی مقاومت کششی تاثیر به‌سزایی دارد.

جدول ۴ نتایج آزمایش‌های ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی، شکل ۷ نتایج نمودار تنش- کرنش حاصل از نتایج آزمایش مقاومت تک‌محوری نمونه سنگ‌های مصنوعی ساخته شده و شکل ۸ نتیجه آزمایش‌های ویژگی‌های فیزیکی (چگالی، تخلخل و جذب آب)، آزمایش مقاومت تک‌محوری، برزیلین، و بار نقطه‌ای را به صورت نمودار نشان می‌دهند.

۵. بحث و بررسی نتایج

۱.۵. نتایج حاصل از آزمایش ویژگی‌های فیزیکی سنگ مصنوعی
نمونه‌های ساخته شده برای تعیین درصد جذب آب، تخلخل، چگالی و جذب آب مورد آزمایش ویژگی‌های فیزیکی طبق استاندارد ISRM (2007) واقع شدند و نتایج ویژگی‌های فیزیکی همان‌طور که در جدول ۴ و شکل ۹ مشاهده می‌شود حاکی از آن است که نمونه سنگ‌های ساخته شده به جز نمونه -های K و L که دارای تخلخل بالا هستند سایر نمونه‌ها دارای چگالی کم درصد جذب آب و تخلخل پایین هستند که این ویژگی‌ها باعث می‌شود سنگ‌های مصنوعی بخاطر سبک بودن و آب‌گریز بودن رزین در صنعت ساختمان از مقبولیت بیشتری برخوردار باشند. دلیل بالا بودن تخلخل در نمونه‌های K و L به دانه‌بندی بد و یکنواختی دانه‌ها نسبت داده می‌شود چرا که فضای بین آرایش دانه‌ها بخاطر هم‌اندازه بودن بیشتر شده و درصد رزین‌های به‌کار رفته نمی‌تواند تمام خلل و فرج سنگ را پر نماید. نمونه G

۳.۵. نتایج آزمایش بار نقطه‌ای

در این تحقیق آزمایش بار نقطه‌ای طبق استاندارد (ISRM, 2007) انجام شده است. نتایج شکل ۸ نشان می‌دهد که نمونه‌های L و M دارای بیشترین مقاومت بار نقطه‌ای هستند و تقریباً ۱/۷ برابر نمونه‌های گرانیتی ساخته شده بدون سیستم خلاء و فشار و با رزین‌های متفاوت، مقاومت بار نقطه‌ای دارند. این در حالی است که نمونه M در آزمایش برزیلین دارای کمترین مقاومت کششی بود که می‌توان نتیجه گرفت با افزایش درصد رزین و ریزدانه‌تر شدن سنگ‌دانه‌ها و تغییر ماهیت سنگ‌دانه‌ها از گرانیت به آهک میزان مقاومت بار نقطه‌ای افزایش می‌یابد. بر طبق نتایج نمونه K دارای کمترین میزان مقاومت بار نقطه‌ای است. نمونه‌های گرانیتی بدون اعمال سیستم فشار و خلاء صرف نظر از نوع رزین دارای مقاومت بار نقطه‌ای تقریباً ۲ برابر بیشتر از نمونه گرانیتی ساخته شده با شرایط خلاء و فشار (G) دارند و این حاکی از آن است که سیستم خلاء و فشار با توجه به کاهش ویژگی‌های فیزیکی سنگ مصنوعی و افزایش پارامترهای مکانیکی نتیجه مطلوبی در ساخت سنگ‌های مصنوعی ایفا می‌نماید.

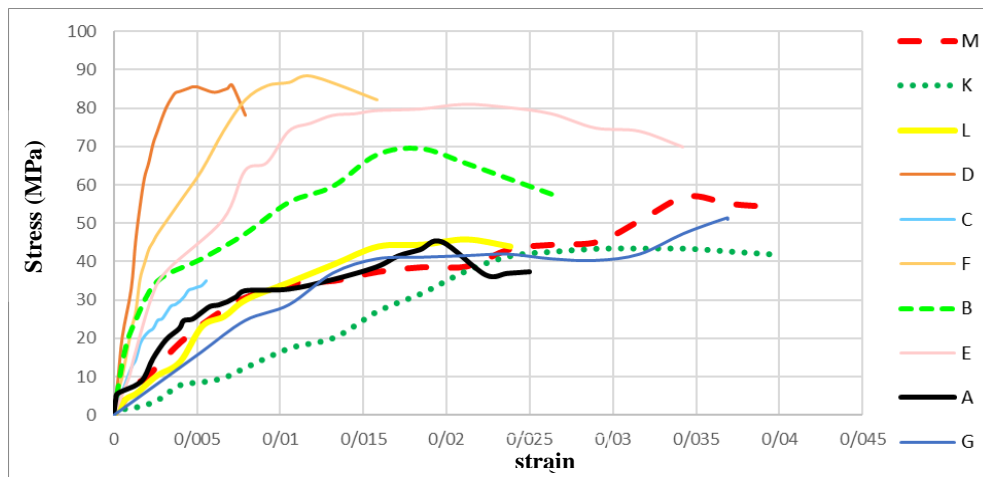
۴.۵. نتایج آزمایش تک‌محوری

آزمایش تراکم تک‌محوری یکی از آزمایش‌های متداول برای تعیین مقاومت تراکمی و دیگر شاخص‌های تغییر شکل پذیری سنگ بکر است. نتایج این آزمایش به ریز ترک‌های اولیه سنگ و همچنین موازی بودن سطوح بالایی و پایینی نمونه و هموار بودن آن بستگی دارد به همین دلیل نمونه سنگ‌ها مورد سواب قرار گرفتند طبق استاندارد (ISRM, 2007) انجام گرفت. نتایج نشان می‌دهد (شکل ۸) که نمونه‌های

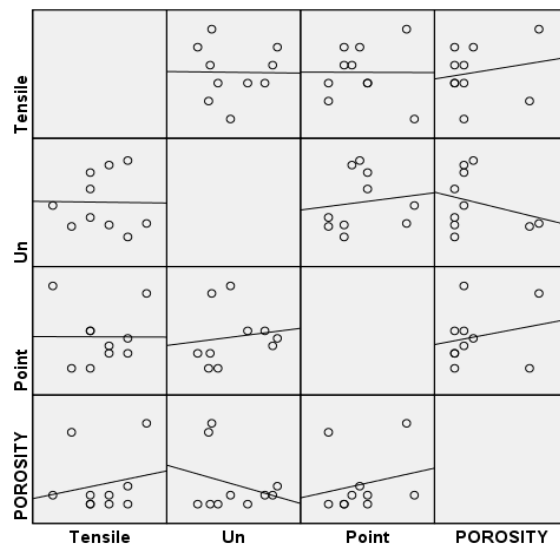
گرانیتی ساخته شده با رزین ویلین استر (D, E و F) تقریباً ۱/۶ برابر نسبت به نمونه‌های ساخته شده با رزین پلی‌استر و سنگدانه آهک، سیلیس، مشترک سیلیس و آهک و گرانیت ساخته شده با سیستم خلاء و فشار (L, K, G, M) مقاومت بیشتری دارند. نتایج نمودار تنش و کرنش نیز حاکی از آن است (شکل ۷) که نمونه‌های D, E و F در کرنش بسیار پایین‌تری به حداکثر مقاومت خود رسیده‌اند. نوع شکست نمونه C آن‌ها بصورت الاستیک - شکست می‌باشد این بخاطر خواص چگرمگی بالای رزین ویلین استر و فرمول شیمایی آن است. نمونه‌های ساخته شده با رزین پلی‌استر از شکست الاستیک - پلاستیک - خزش پیروی می‌کنند و بیشترین کرنش را نمونه‌های K, M و G متحمل شده‌اند که دارای بیشترین درصد رزین هستند. درصد بیشتر رزین (۳۵ درصد) باعث شده سنگ مصنوعی ساخته شده با آهک مقاومت بیشتری نسبت به سنگ مصنوعی ساخته شده با سنگ‌دانه سیلیس با میزان رزین ۲۵ درصد داشته باشد. همچنین بر اساس نتایج جدول ۴ و شکل ۸ و ۹ مشاهده می‌شود ارتباط معنی‌داری بین مقاومت کششی و فشارشی وجود ندارد به-عنوان مثال در نمونه‌های C و E مقاومت کششی بالا است اما مقاومت فشارشی پایین می‌باشد. همچنین انتظار می‌رود با افزایش تخلخل مقادیر مقاومت‌های کششی و فشارشی کاهش پیدا کند اما نتایج حاصله عدم وجود این رابطه حکایت دارد. بر اساس نتایج همبستگی انجام شده با spss مطابق شکل ۸ ارتباط معنی‌داری بین پارامترها وجود ندارد، که این عدم وجود رابطه یا گاهی وجود رابطه معکوس را باید در میزان درصد رزین و نوع رزین ارتباط داد.

جدول ۴. نتایج آزمایش‌های ویژگی فیزیکی و آزمایش

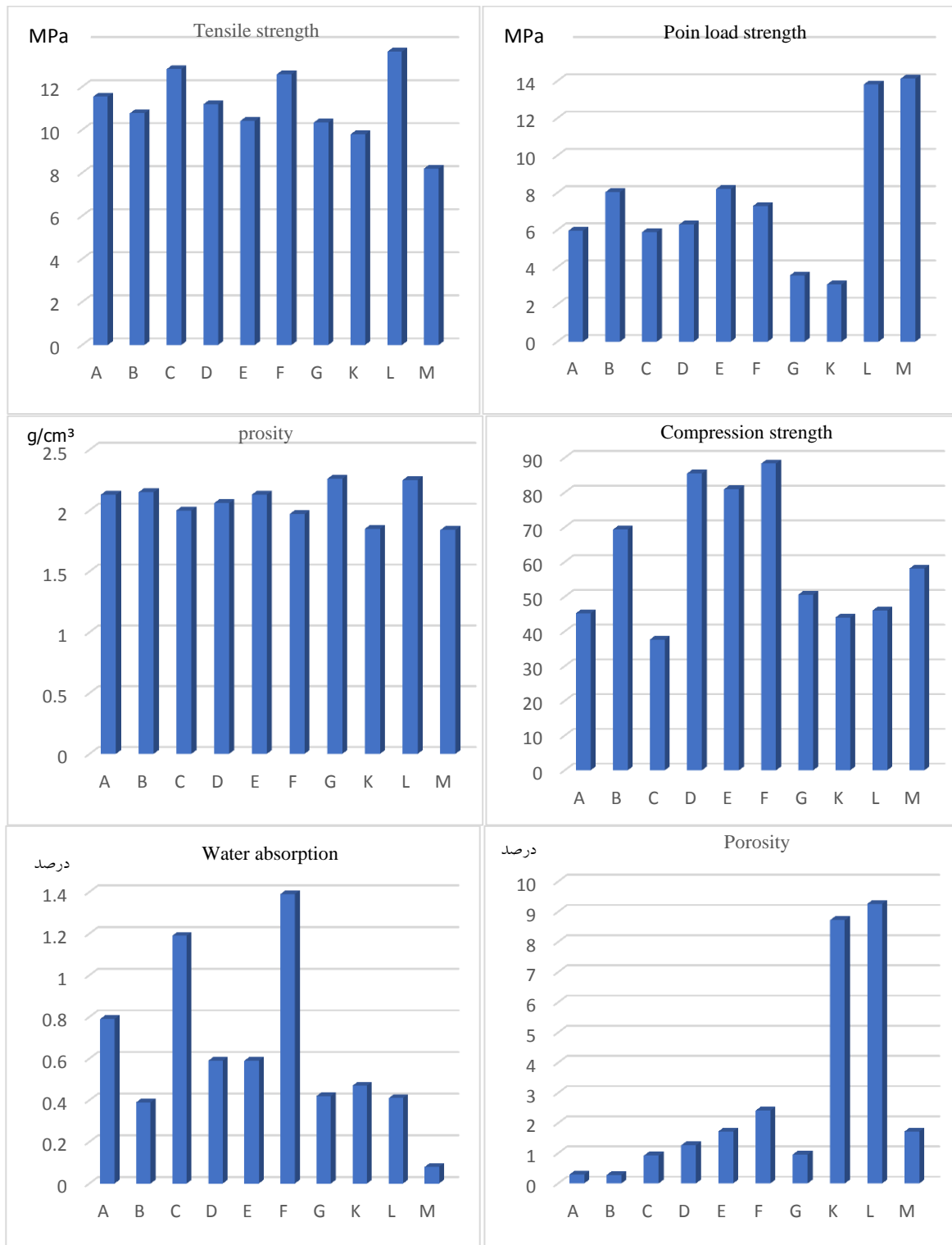
Compression strength average uniaxial (MPa)	Point load strength average (MPa)	Tensile strength average (MPa)	Porosity (%)	Water absorption (%)	Density (gr/cm ³)	Symbol
45.2	5.96	11.54	0.29	0.79	2.13	A
69.31	8.03	10.77	0.28	0.39	2.15	B
37.67	5.89	12.82	0.92	1.19	2	C
85.47	6.29	11.19	1.26	0.59	2.06	D
80.95	8.20	10.41	1.72	0.59	2.13	E
88.35	7.29	12.59	2.41	1.39	1.97	F
50.59	3.56	10.34	0.96	0.42	2.26	G
44	3.07	7.79	8.72	0.47	1.85	K
46	13.82	13.63	9.26	0.41	2.25	L
58.12	14.13	8.2	1.52	0.08	1.84	M



شکل ۷. نتایج نمودار تنش- کرنش حاصل از نتایج آزمایش مقاومت تک‌محوری نمونه سنگ‌های مصنوعی



شکل ۸. همبستگی نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی، مقاومت بار نقطه‌ای و تخلخل



شکل ۹. نتایج آزمایش‌های ویژگی‌های فیزیکی (چگالی، تخلخل و جذب آب)، آزمایش مقاومت تک‌محوری، برزیلین، و بار نقطه‌ای

۶. نتیجه گیری

هدف از انجام این پژوهش مقایسه ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های مصنوعی ساخته شده با شرایط (وجود و عدم وجود خلاء و فشار)، رزین و سنگ‌دانه‌های مختلف می‌باشد. برای دستیابی به این اهداف نمونه سنگ‌های مصنوعی با رزین‌های پلی‌استر و ویلین‌استر و سنگ‌دانه‌های گرانیت، آهک، سیلیس و ترکیب برابر آهک و سیلیس، با شرایط وجود و عدم وجود خلاء و فشار در حین ساخت سنگ‌های مصنوعی ساخته شدند.

نمونه سنگ‌های مصنوعی ساخته شده با رزین پلی‌استر و سنگ‌دانه آهک و آهک سیلیس مشترک با نمادهای به ترتیب K و L معرفی شده‌اند دارای تخلخل و مقاومت کششی بالاتری نسبت به سایر نمونه‌ها بودند دلیل بالا بودن مقاومت کششی را به نسبت بیشتر رزین در طرح اختلاط می‌توان ربط داد.

نمونه G پارامترهای فیزیکی مطلوب‌تری نسبت به سایر نمونه‌ها دارد زیرا با اعمال سیستم خلاء و فشار فضای خالی بین‌دانه‌ها کم‌تر شده و در نتیجه تخلخل و جذب آب پایین‌تر را شاهد هستیم اما این نمونه ویژگی‌های مکانیکی کمتری نسبت به نمونه‌های هم‌زاد خود (A, B و C) که شرایط اعمال سیستم خلاء و فشار را نداشته‌اند، از خود نشان داد که دلیل آن به درصد رزین ۱۵ استفاده شده در ساخت آن نسبت داد بنابراین برای ساخت سنگ‌های مصنوعی با سنگ‌دانه‌های گرانیتی درصد رزین ۱۱ درصد بیشترین مقاومت را به سنگ مصنوعی می‌دهد.

نمونه سنگ‌های مصنوعی ساخته شده با رزین ویلین‌استر (D)، (E و F) در کرنش‌های پایین به مقاومت نهایی خود می‌رسند و نوع رفتار آن‌ها بصورت الاستیک - شکست است اما نمونه‌های ساخته شده با رزین پلی‌استر (A, B, C, G, K, L و M) در کرنش‌های بیشتر به حداکثر مقاومت خود می‌رسند و رفتار آن‌ها بصورت الاستیک - پلاستیک - الاستیک می‌باشد. میزان مقاومت تک‌محوری نمونه‌های ساخته شده با رزین ویلین

استر به نسبت با نمونه‌های ساخته شده با رزین پلی‌استر بیشتر است.

نمونه سنگ مصنوعی ساخته شده با نسبت برابر آهک و سیلیس با نماد L دارای مقاومت بار نقطه‌ای و کششی بیشتر و مقاومت تک‌محوری کمتر نسبت به سایر نمونه‌ها است پس می‌توان گفت درصد رزین بیشتر در طرح اختلاط باعث می‌شود که سنگ مصنوعی ساخته شده با آهک با وجود کم مقاوم بودن سنگ‌های آهکی دارای مقاومت کششی و بارنقطه‌ای بیشتری باشند.

نتایج بررسی نشان می‌دهد که کلیه ویژگی‌های مقاومتی سنگ‌های مصنوعی قابل کنترل بوده و طرح اختلاط و نسبت درصدهای ترکیبی مهمترین اصل در استحکام و مقاومت سنگ‌مصنوعی می‌باشد و برای هر استفاده‌ای و سلیقه‌ای قابلیت انعطاف پذیری را دارد.

۷. قدردانی

در پایان از مسئول آزمایشگاه دانشکده علوم پایه دانشگاه تربیت مدرس خانم میرجلیلی، گروه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس، همچنین از مسئول آزمایشگاه معدن دانشگاه تربیت مدرس آقای مهندس شیخانی، و همچنین از خانم مهندس باباآدم به پاس تمام حمایت‌ها و همراهی سخاوت‌مندانه‌شان طی مراحل انجام این تحقیق، کمال تشکر و قدردانی دارم.

مراجع

- آزادی، م، خاکزاد، ا، کریمی، م، بهاروند، س، ۱۳۸۹. کاربرد پودرهای کربنات کلسیم ضایعاتی برای ساخت رنگ، نخستین همایش انجمن زمین شناسی اقتصادی ایران، مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد.
- باباآدم، ن، ارومیه ای، ع، نیکودل، م. ۱۳۹۴. تاثیر خصوصیات زمین شناسی مهندسی سنگ‌دانه‌های سیلیسی بر ویژگی‌های مهندسی سنگ مصنوعی، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه تربیت مدرس.
- سادات هل اتائی، ف، جعفرآذری خزینه، ا، ارومیه‌ای، ع، ۱۳۹۸. بررسی کمی و کیفی اعمال و عدم اعمال خلاء و فشار در تولید سنگ مصنوعی، بیست و دومین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران.
- پژوهشکده حمل و نقل وزارت راه و ترابری، ۱۳۸۵. تهیه مواد پرکننده روان با استفاده از ضایعات کارخانه‌های سنگبری، گزارش مرحله اول، شرکت خاک سنگ سازه.
- جعفرآذری خزینه، ا، ارومیه ای، ع، نیکودل، م. ر، ۱۳۹۱. بررسی استحکام و کاربری سنگ‌های مصنوعی ساخته شده با رزین و مواد افزودنی مختلف، نشریه انجمن زمین شناسی مهندسی ایران
- حقیقی، ن، حبیبزاده، ع، پایندهمهر، س، رضایی، م، ۱۳۸۶. بازیافت و استفاده از ضایعات و لجن سنگبریها و معادن استان همدان، اولین همایش سراسری سنگهای ساختمانی و صنایع وابسته، دانشگاه آزاد اسلامی واحد محلات.
- حسینی، س، ۱۳۹۴. تولید سنگ مصنوعی و اهمیت آن در معماری ساختمان"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت ساخت، طبری بابل.
- مصفا، ع، اسفنده، م، ۱۳۸۸. بررسی اثر افزایش اکریلونیتریلبوتادین را بر خواص مکانیکی و مرفولوژیکی رزین پلی‌استر، تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران. نهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران.
- ACI-COMMITTEE-221, (2007). Guide for use of normal weight and heavyweight aggregates in concrete. American concrete institute.
- Carvalho, E. A. S., Vilela, N. D. F., Monteiro, S. N., Vieira, C. M. F., & Silva, L. C. D. (2018). Novel artificial ornamental stone developed with quarry waste in epoxy composite. *Materials Research*, 21.
- Gomes, M. L. P., Carvalho, E. A., Sobrinho, L. N., Monteiro, S. N., Rodriguez, R. J., & Vieira, C. M. F. (2018). Production and characterization of a novel artificial stone using brick residue and quarry dust in epoxy matrix. *Journal of materials research and technology*, 7(4), 492-498. 57-85.
- ISRM, 2007. Rock characterization, testing and monitoring. In: Brown, E. T. (Ed), International Society for Rock Mechanics Suggested methods. Pergamon Press, Oxford. 211pp.
- Hamoush, S., Abu-Lebdeh, T., Picornell, M., & Amer, S. (2011). Development of sustainable engineered stone cladding for toughness, durability, and energy conservation. *Construction and Building materials*, 25(10), 4006-4016.
- <http://shimiasoon.com>
- Merke, G. (2000). Sustainable development in the natural stone industry. *Roc Maquina*, 6, 56-58.
- Nichols, S., Horning, G. J., (1993). Rubber Toughening of Polyesters The Effect of Acid Content. Tech. Conf. Reinf. Plast./Comp. Inst., Soc. Plast. Ind., Session 19-B,
- Phillips, K. A. (1989). Industrial minerals in Arizona's paint industry. Arizona Department of Mines and Mineral Resources.
- Peng, L., & Qin, S. (2018). Mechanical behaviour and microstructure of an artificial stone slab prepared using a SiO₂ waste crucible and quartz sand. *Construction and Building Materials*, 171, 273-280.
- Rajgor, M., & Pitroda, J. (2013). Stone sludge: Economical solution for manufacturing of bricks. *International journal of innovative technology and exploring engineering*, 2(5), 16-20.
- Xie, X. L., Liu, Q. X., Li, R. K. Y., Zhou, X. P., Zhang, Q. X., Yu, Z. Z., & Mai, Y. W. (2004). Rheological and mechanical properties of PVC/CaCO₃ nanocomposites prepared by in situ polymerization. *Polymer*, 45(19), 6665-6673.