

## بررسی استحکام و کاربری سنگ‌های مصنوعی ساخته شده با رزین و مواد افزودنی مختلف

اکبر جعفرآذری خزینه<sup>۱</sup>، علی ارومیه‌ای<sup>۲\*</sup>، محمدرضا نیکودل<sup>۳</sup>

پذیرش مقاله: ۹۸/۱۰/۰۱

دریافت مقاله: ۹۸/۰۲/۱۲

### چکیده:

سنگ مصنوعی ترکیبی از سنگ‌دانه‌های طبیعی و مواد افزودنی مانند صمغ‌های صنعتی (رزین)، سیمان و دیگر مواد پلیمری می‌باشد. در این پژوهش سنگ مصنوعی با مواد افزودنی و دو رزین (پلی‌ستر و ویلین‌استر) به منظور تعیین استحکام و نوع کاربری، با طرح اختلاط، ۸۴٪ سنگ‌دانه، ۱۰٪ رزین و ۶٪ مواد افزودنی به روش کاملاً دستی بدون نیاز به سیستم خلاء و فشار ساخته شد. برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی و مهندسی (کششی برزبلی، بارنقطه‌ای، مقاومت فشاری تک محوری و ارتعاش فراصوت)، سنگ‌های مصنوعی ساخته شده با مواد افزودنی (الیاف شیشه، الیاف کربن، پلاستیک) و سه سنگ‌دانه گرانیت (الموت، نهندان و تکاب) مورد آزمایش واقع شده‌اند. بر اساس آزمایش‌های صورت گرفته سنگ‌های مصنوعی ساخته شده با سنگ‌دانه الموت، رزین ویلین‌استر، الیاف شیشه؛ بیشترین مقاومت فشاری تک محوری و بارنقطه‌ای را دارند. اما نمونه‌های ساخته شده با الیاف کربن نسبت به نمونه‌های ساخته شده با الیاف شیشه تقریباً ۲۸٪ مقاومت کششی بیشتری دارند. نمونه‌های ساخته شده با پلاستیک دارای کمترین تخلخل بین نمونه سنگ‌های مصنوعی ساخته شده است. با توجه به نتایج فوق در محیط‌هایی که متاثر نیروهای فشاری هستند از سنگ‌های مصنوعی با مقاومت فشاری بالا (نمونه‌های ساخته شده با الیاف شیشه)، در محیط‌های متاثر نیروهای کششی؛ از سنگ‌های مصنوعی با مقاومت کششی بالا (نمونه‌های ساخته شده با الیاف کربن) و در پیاده‌روها از سنگ‌های مصنوعی ساخته شده با پلاستیک به علت داشتن تخلخل پایین استفاده گردد.

**کلمات کلیدی:** سنگ مصنوعی، الیاف شیشه و کربن، رزین ویلین‌استر و پلی‌استر، پلاستیک، ویژگی‌های فیزیکی و مهندسی

۱. دانشجوی دوره کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس، [akbar.jafarazari@modares.ac.ir](mailto:akbar.jafarazari@modares.ac.ir)

۲. استاد گروه زمین‌شناسی دانشکده علوم پایه دانشگاه تربیت مدرس، [uromeia@modares.ac.ir](mailto:uromeia@modares.ac.ir)

۳. دانشیار گروه زمین‌شناسی دانشکده علوم پایه دانشگاه تربیت مدرس، [nikudelm@modares.ac.ir](mailto:nikudelm@modares.ac.ir)

\* نویسنده مسئول E-mail: [uromeia@modares.ac.ir](mailto:uromeia@modares.ac.ir)

## ۱. مقدمه

سنگ‌های مختلف در ساخت بناها و ساختمان‌های تاریخی براساس اهمیت و الزامات ساختاری آن‌ها، و همچنین در دسترس بودن مواد خام مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Stefanidou et al., 2015). امروزه تمایل بیشتری به استفاده مجدد از بقایای صنعتی در قالب سنگ مصنوعی به منظور کاهش تاثیرات محیطی آن‌ها وجود دارد (Gomes et al., 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 سنگین مورد توجه واقع شده‌اند (Peng and Qin, 2018). پرنیتیس (Prentice, 1990) شش ملاک شامل چهار ملاک مهم و دو ملاک کم اهمیت‌تر را به‌عنوان عوامل مؤثر در انتخاب سنگ ساختمانی نام می‌برد. چهار گروه مهم شامل مقاومت ساختاری، دوام، زیبایی ظاهری، آسان بودن استخراج و برش بوده و در دسترس بودن معدن سنگ و

پیامدهای زیست محیطی استخراج دو موردی را تشکیل می‌دهند که باید در کنار موارد قبلی مورد توجه قرار گیرند. وی معتقد است برای سنگ‌های باربر مقاومت فشارشی مهم بوده ولی برای مواردی نظیر سنگ‌های مورد استفاده در کف ساختمان‌ها، مقاومت کششی اهمیت می‌یابد. همچنین در مورد سنگ‌هایی که تحت بار زیاد قرار گرفته‌اند، بیان می‌دارد که صرفاً بالا بودن مقاومت فشارشی نمی‌تواند پایداری آن در بلند مدت را تضمین کند، چرا که ممکن است این سنگ‌ها در طول زمان دچار انحلال فشاری گردیده و باعث ناپایداری سازه گردند. یاووز و همکاران (Yavuz et al., 2006) نیز بیان می‌دارد که انتخاب سنگ ساختمانی نمی‌تواند صرفاً بر اساس زیبایی و رنگ باشد و ضروری است که ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی و تأثیر فاکتورهای محیطی در نظر گرفته شود. با توجه به مطالعات فوق، هدف از این پژوهش ارزیابی تأثیر مواد افزودنی، نوع رزین و سنگ‌دانه، در ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی، استحکام و کاربری سنگ‌های مصنوعی ساخته شده است. جدول ۱ مشخصه‌های مطلوب سنگ‌های تزئینی را شریح می‌دهد.

جدول ۱. مشخصه‌های مطلوب سنگ‌های تزئینی (عطایی، ۱۳۸۷)

No alteration	Minerals such as alkaline feldspars, lagioclasses and feldsparatonides, alvin pyroxenes, if altered, such as water with appropriate pH, water and heat solids, etc., are transformed to secondary minerals and lose the texture of rocks, loose and disintegrate, and masonry.
No geological complications	The presence of joints and fissures in the rock textures, either in relatively large joints or in small joints, to <i>lead</i> reduces the strength of the stone and cannot be extracted from the slab blocks during mining.
No layering	Schistosed rocks such as shales are not suitable because of the inability to work on them and very loose.
Ability to cut, polish and polish	Stones that are pitted due to tectonic stresses, texture inconsistencies or weathering effects are less polished and will probably not sell well and therefore will not be expensive.
Hardly acceptable	The hardness of the masonry rocks varies greatly, with the hardness of the rocks varying from very low (soapstone) to more severe than steel (granite).
The charismatic beauty and color thebaine	Desirable stone has a uniform and light color and does not change color against sunlight and ambient weather.
The absence of clay layers within the rock	Filling the grains with clays in seemingly sturdy rocks greatly reduces their resistance to water. Clay compounds are more susceptible to weathering than other minerals.
Low porosity and water absorption coefficient	Porosity is one of the factors contributing to breakage and separation of stone from the surface of the building. This is usually due to water penetration through the rock pores and freezing and causing seams and crevices.
Having adequate compressive and tensile strength	For most construction work, a compressive strength of 400 kg / cm <sup>2</sup> is sufficient.
Proper durability	Resistance to physical and chemical weathering

## ۲. مواد و روش‌ها

۱,۲. معرفی مواد افزودنی به کار رفته در ساخت سنگ مصنوعی:

۱,۱,۲. الیاف کربن، شیشه و پلاستیک

الیاف خرد شده (chopped fiber) مصالحی هستند که از بریدن الیاف پلیمری شیشه، کربن و یا حتی یکسری آلیاژهای خاص بوجود می‌آیند. این الیاف جهت ساخت بتن الیافی و تقویت رزین اپوکسی یا رزین پلی‌استر کاربرد دارد. الیاف اضافه شده به بتن و یا رزین باعث افزایش پیوستگی، مقاومت کششی و مقاومت شیمیایی بالا در برابر عوامل مخرب، افزایش نرمی و کاهش ترک در بتن می‌شود. نوع الیاف بکار رفته و اندازه آن‌ها

به نوع بتن یا رزین و مقاومت کششی مورد انتظار بستگی دارد. اندازه‌ی این الیاف معمولاً ۲ الی ۲۵ میلیمتر می‌باشند. دفن بی‌رویه مواد زائد پلاستیکی، به ویژه در کشورهای در حال توسعه، مشکلات مربوط به محیط زیست را تشدید می‌کند (Wei and Zimmermann, 2017). جدول ۲ مشخصات فیزیکی، مکانیکی و فنی، الیاف شیشه، کربن و پلاستیک خریداری شده از شرکت شیمی افسون را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۲ و حجم عظیم تولید روزانه پلاستیک شهر تهران، تمهیداتی برای حل معضل آلودگی باید اندیشیده شود.

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و ساختاری الیاف شیشه، الیاف کربن و پلاستیک

Glass fiber ( <a href="http://polymersun.com">http://polymersun.com</a> )							
Fracture strain %	Tensile strength (GPa)	Elasticity coefficient (GPa)	Special Weight (g / cm <sup>3</sup> )	Diameter of string (um)	Deformation Temperature (c <sup>0</sup> )	Density (g / cm <sup>3</sup> )	Type of glass
3.5 -2	2-4	80	2.6	10-13	840	2.6-2.5	E
Carbon fiber ( <a href="http://shimiasoon.com">http://shimiasoon.com</a> )							
Fracture strain %	Tensile strength (GPa)	Elasticity coefficient (GPa)	Special Weight (g / cm <sup>3</sup> )	Thickness	Pattern	Weight (g / m <sup>2</sup> )	Barcode
1	2.6	230	1.9	0.20 ± 5 %	Twill texture	200 ± 5%	ESA-C200T
Plastic, (Geyer et al, 2017) <a href="http://www.iew.ir">www.iew.ir</a>							
Fracture strain %	Tensile strength (GPa)	Elasticity coefficient (GPa)	Special Weight (g / cm <sup>3</sup> )	The method of analysis	Daily production of tehran (Ton)	World production (Billion ton)	
15 - 13	0.9	4	1.1	Biological & non-biological	1000	8.3	

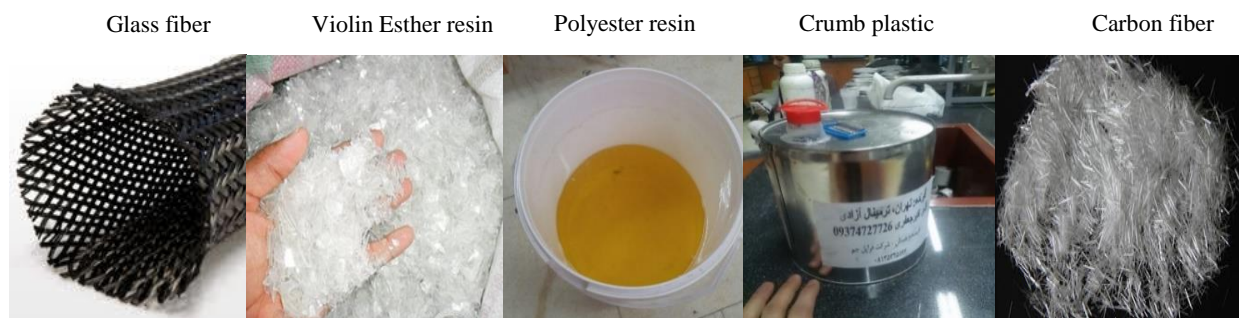
۲-۱-۲. رزین پلی‌استر و وینیل‌استر

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 طبقه‌بندی می‌شود که بستگی به ترکیب شیمیایی و مورد 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). جدول ۳ مشخصات فنی و قالب‌گیری رزین‌های پلی‌استر و وینیل‌استر در ساخت سنگ-های مصنوعی طبق استانداردهای مربوطه را نشان می‌دهد شکل ۱ موارد مصرف شده در ساخت سنگ مصنوعی را نشان می‌دهد.

جدول ۳. مشخصات فنی و قالب‌گیری رزین‌های پلی‌استر و وینیل‌استر (<http://shimiasoon.com>)

Test Method	Unit	Amount of (Violin Esther)	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 <sup>3</sup>		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



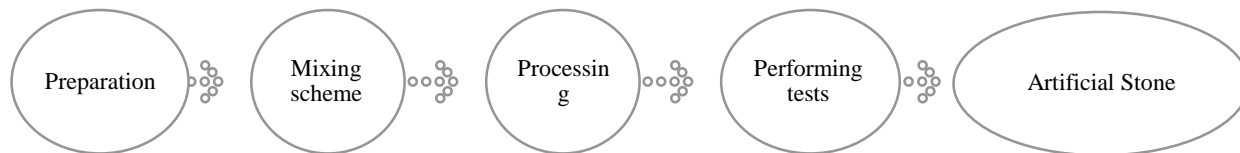
شکل ۱. الیاف کربن، الیاف شیشه، خرده پلاستیک، رزین پلی‌استر و ویلین‌استر مصرف شده در ساخت سنگ مصنوعی

## ۲-۲. مراحل ساخت سنگ مصنوعی

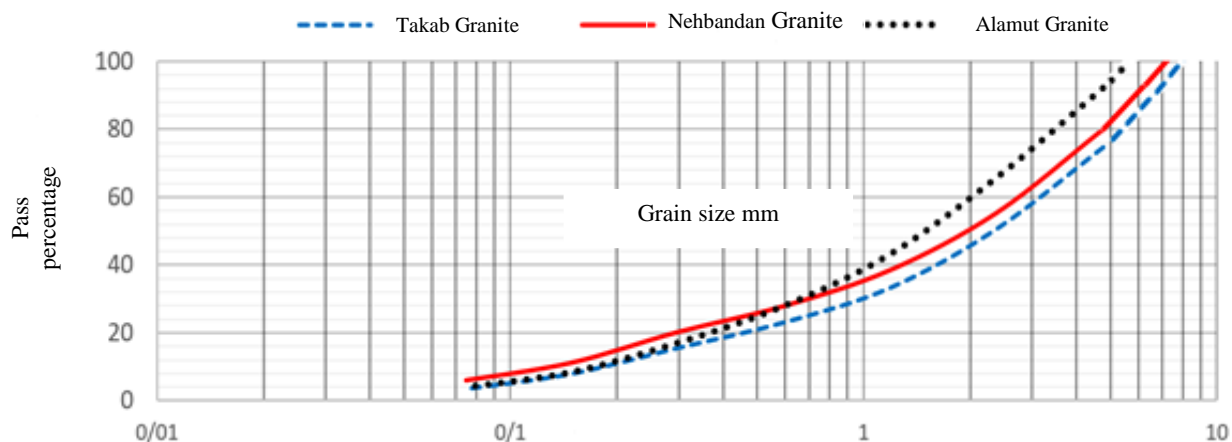
همچنین بیشترین کوبدهی معادن را سنگ‌های گرانیتی دارند. انتخاب شدند و با دستگاه سنگ خردکن (Crasher) که می‌تواند سنگ‌دانه‌هایی با اندازه‌های متفاوت و مورد نیاز برای طرح اختلاط فراهم آورد خرد شد و با الک کردن و انجام آزمایش دانه‌بندی (شکل ۳) با استناد بر منحنی‌های دانه‌بندی موجود برای ساخت بتن با کمترین میزان تخلخل مش‌بندی شد و خرده‌سنگ‌ها در محدوده دانه‌بندی خوب قرار گرفت. در مرحله دوم، درصد‌های ترکیبی طبق جدول ۴، که مهم‌ترین اصل در استحکام و مقاومت سنگ‌های مصنوعی است اختلاط گردید. در مرحله سوم سنگ‌های مصنوعی کاملاً بصورت دستی و بدون نیاز به هر نوع وسیله و سیستم خلاء و فشار در قالب لوله

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 ۲ مراحل ساخت سنگ مصنوعی در این تحقیق را به ترتیب نشان می‌دهد که شامل مراحل؛ آماده‌سازی، طرح اختلاط، شرایط فرآوری و 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

پلیکا ساخته شد و در مرحله آخر کلیه آزمایش‌ها با رعایت استانداردهای مربوطه انجام گرفت.



شکل ۲. مراحل ساخت سنگ مصنوعی



شکل ۳. دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها

جدول ۴. درصد مواد افزودنی به کار رفته در ساخت سنگ‌های مصنوعی

Hardner %	Aggregate %	plastic%	fiber%		resin%		Examples
			Glass	Carbon	Violin Ester	Polyester	
Acid & cobalt	Takab, Alamut, Nehbandan						
0.04	89.34	0	0	0	0	10/66	Polyester without additive
0.04	89.34	0	0	0	10.66	0	Additives without violin ester
0.04	84	0	5.96	0	0	10	Polyester with glass fibers
0.04	84	0	5.96	0	10	0	Violin ester with glass fibers
0.04	84	0	0	5.96	0	10	Polyester with carbon fiber
0.04	84	0	0	5.96	10	10	Violin ester with carbon fiber
0.04	84	5.96	0	0	0	10	Plastic polyester
0.04	84	5.96	0	0	10	0	Plastic violin ester

رابطه ۱ ضریب یکنواختی را نشان می‌دهد که هر چه این ضریب به یک نزدیکتر باشد، یکنواختی مصالح بیشتر است. رابطه ۲ ضریب خمیدگی را نشان می‌دهد و هر چه به یک نزدیکتر باشد، خمیدگی منحنی دانه بندی یکنواخت‌تر است.

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}} \quad (2)$$

$D_{60}$  قطر بزرگترین دانه‌ای است که می‌تواند از الکی که ۶۰ درصد دانه‌ها از آن عبور کرده‌اند رد شود.  $D_{30}$  قطر بزرگترین

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

(۵)

$$c_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}} = \frac{0.44}{2 \cdot 0.19} = 1.15 \quad c_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{3.1}{0.19} = 16.31$$

با توجه به ضریب یکنواختی (Uniformity Coefficient) و ضریب خمیدگی (Curvature coefficient) و محدوده‌ی دانه-بندی، نمونه سنگ‌های خرد شده دارای دانه‌بندی خوب (Well) Graded Soil هستند. 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 (ACI Committee 221, 2007). شکل ۴ طریقه نام‌گذاری سنگ‌های مصنوعی ساخته شده را نشان می‌دهد

دانه‌ای است که می‌تواند از الکی که ۳۰ درصد دانه‌ها از آن عبور کرده‌اند رد شود.  $D_{10}$  قطر بزرگترین دانه‌ای است که

می‌تواند از الکی که ۱۰ درصد دانه‌ها از آن عبور کرده‌اند رد شود. محاسبه ضریب یکنواختی و ضریب خمیدگی برای گرانیف تکاب (sf):

(۳)

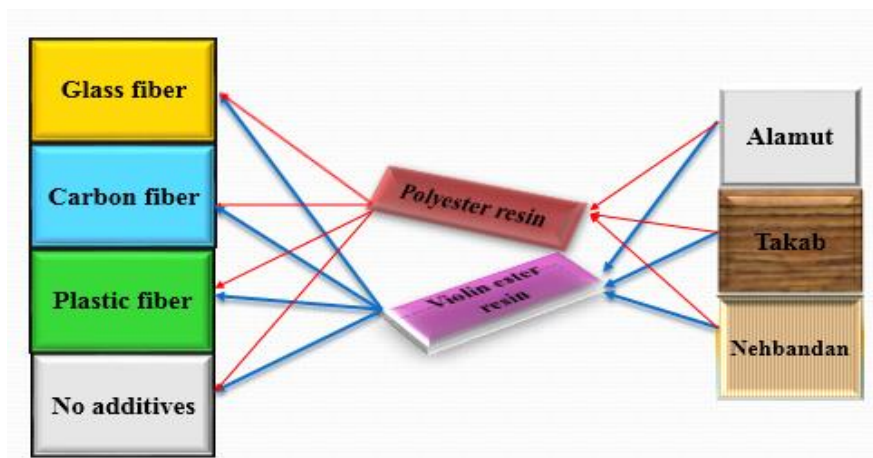
$$c_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}} = \frac{0.44}{2 \cdot 0.19} = 1.15 \quad c_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{2}{0.19} = 10.52$$

محاسبه ضریب یکنواختی و ضریب خمیدگی برای گرانیف نهندان (nf):

(۴)

$$c_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}} = \frac{1}{3.1 \cdot 0.19} = 1.69 \quad c_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{2.8}{0.12} = 23.33$$

محاسبه ضریب یکنواختی و ضریب خمیدگی برای گرانیف الموت (Af):



شکل ۴. روش نام‌گذاری سنگ‌های مصنوعی ساخته شده

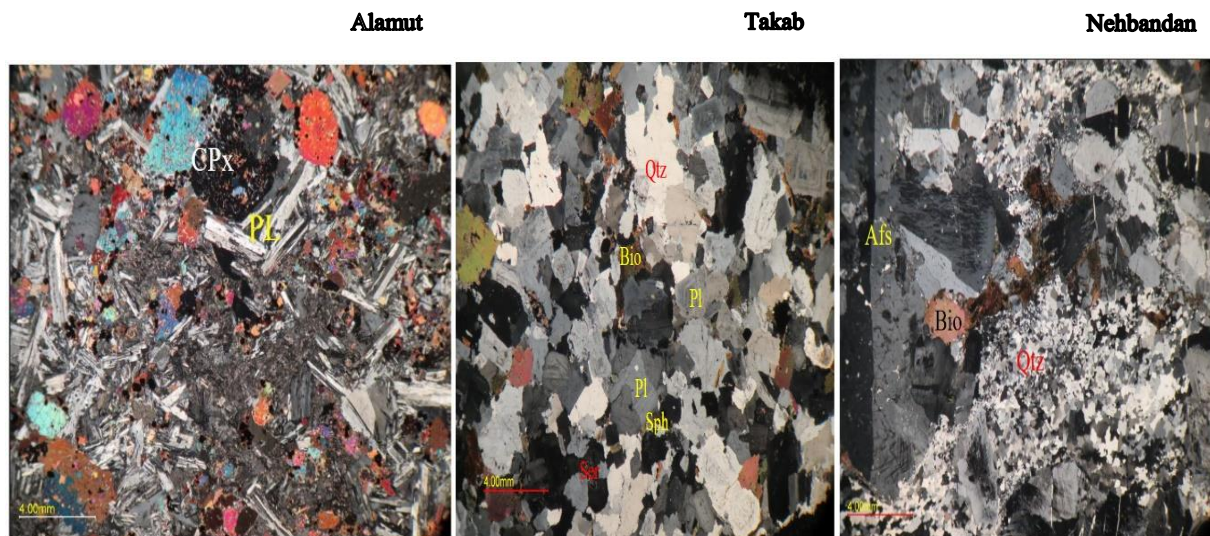
کانی‌هایی مانند کوارتز، پلاژیوکلاز، آلكالی‌فلدسپار، سریسیت، و بیوتیت را مشخص کرده است. دگرسانی‌ها (کلریتی شدن، سرسیتی شدن) و افزایش پتاسیم در ساختمان کانی و به-خصوص در مرز کانی‌ها می‌تواند از عوامل ضعف در این سنگ باشد. گرانیف الموت مطالعه میکروسکوپی این نمونه، کانی‌هایی مثل کلینوپیروکسن، ارتوپیروکسن، پلاژیوکلاز، مقدار زیاد بیوتیت، اولیوین و کانی‌های مافیک را نشان می‌دهد. برای تایید نتایج مقاطع میکروسکوپی و تعیین دقیق کانی‌های موجود و

۳. کانی شناسی سنگ گرانیف تکاب، الموت و نهندان با

میکروسکوپ پلاریزان و آنالیز XRD

شکل ۵ تصاویر میکروسکوپی گرفته شده از نمونه‌ها را نشان می‌دهد. گرانیف تکاب بلورهای کوارتز با بافت ریزبلور در کنار بلورهای درشت آلكالی‌فلدسپار و شکستگی در بلورهای آلكالی‌فلدسپار به وضوح دیده می‌شود. دوگانگی بافت و شکستگی-های بسیار می‌تواند از دلایل ضعف این سنگ در آزمایش‌های مختلف باشد. گرانیف نهندان مطالعه میکروسکوپی این نمونه،

تعیین نام علمی نمونه سنگ‌ها آنالیز XRD صورت گرفت. جدول ۵ نتایج آزمایش XRD و همچنین نام علمی و بازاری، و کانی‌شناسی نمونه سنگ‌های قید شده را نشان می‌دهد.



شکل ۵. تصاویر میکروسکوپی از گرانیت تکاب با بلورهای آلکالی فلدسپار، بیوتیت و کوارتز؛ گرانیت نهبندان با بلورهای کوارتز، بیوتیت، فلدسپار و سرسیت؛ گرانیت الموت با بلورهای کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز در آن دیده می‌شود

جدول ۵. نتایج آنالیز XRD نام زمین شناسی و ترکیب کانی شناسی گرانیت تکاب، الموت و نهبندان.

Brand	Geology name	Mineralogical composition	Analyze XRD
Takab Granite	Mylonite Granite	Alkali Feldspar, Quartz, Biotite, Chlorite, Serist	Albite, Labradorite, orthoclase, quartz, hornblende, muscovite
Alamut Granite	Biotite-bearing gabbro	Plagioclase, Clino pyroxene, Biotite, Muscovite	Labradorite orthoclase, albite, anakite, biotite
Nehbandan Granite	Monsoon Granite	Alkali feldspar, quartz, biotite, cericite	Microclinic, Labradorite, Quartz, Mosquito

بالایی و پایین نمونه و هموار بودن آن بستگی دارد به همین دلیل نمونه سنگ‌ها مورد ساب قرار گرفتند.

#### ۲-۴. آزمایش برزیلی

آزمایش برزیلی (Brazilian Test) یکی از روش‌های متداول برای اندازه‌گیری غیر مستقیم مقاومت کششی (Tensile Strength) سنگ‌ها می‌باشد. مقاومت کششی سنگ از رابطه ۷ به دست می‌آید:

$$\sigma_t = \frac{0.636 P}{DL} \quad (7)$$

#### ۴. آزمایش‌های صورت گرفته

##### ۴-۱. آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

یکی از آزمایش‌های متداول برای تعیین مقاومت فشاری و دیگر شاخص‌های تغییر شکل پذیری سنگ بکر است. برای محاسبه مقاومت فشاری تک‌محوری (Uniaxial Compression Test) از رابطه ۶ استفاده می‌شود.

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (6)$$

در این رابطه  $\sigma_c$  مقاومت فشاری تک‌محوری بر حسب مگاپاسکال، F نیروی فشاری وارد بر نمونه بر حسب کیلونیوتن، A سطح مقطع نمونه بر حسب مترمربع است. نتایج این آزمایش به ریز ترک‌های اولیه سنگ و همچنین موازی بودن سطوح

$$I_{s50} = \frac{P}{D^2} \quad (۸)$$

۴-۴. نتایج آزمایش ارتعاش فراصوتی

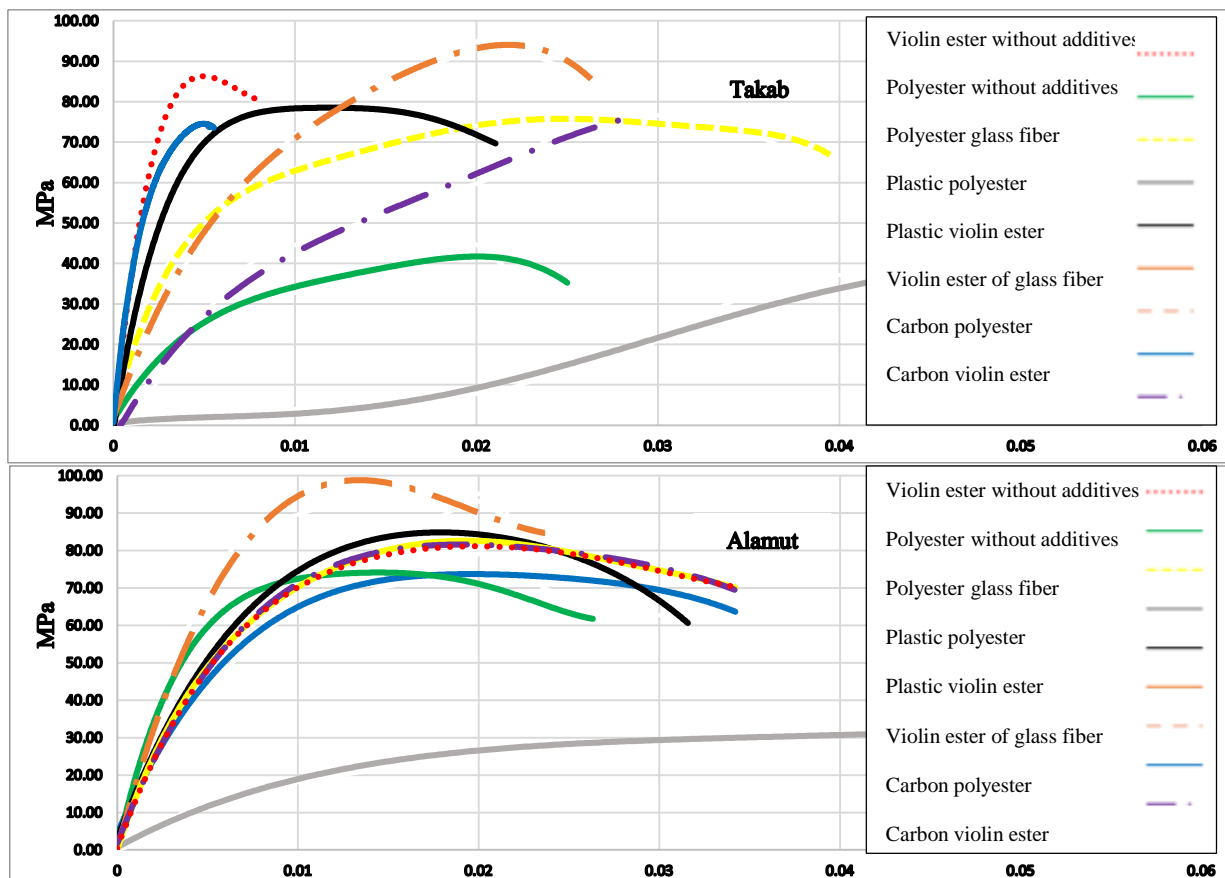
ارتعاش فراصوتی (Ultra Sonic Test) آزمایشی غیر مخرب برای تعیین خواص فیزیکی و مهندسی سنگ به شمار می آید. این آزمایش بر مبنای اندازه گیری سرعت حرکت موج الاستیک در سنگ پایه ریزی شده است. هر چه سرعت حرکت موج در یک محیط بیشتر باشد، نشانه بالا بودن چگالی و پیوستگی آن محیط است. شکل ۶ نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری و شکل ۷ نتایج آزمایش های به ترتیب؛ ویژگی های فیزیکی، ارتعاش فراصوت، کششی برزیلی و مقاومت بار نقطه- ای را نشان می دهد.

در این رابطه P بار وارده بر حسب کیلو نیوتن، D قطر نمونه بر حسب میلی متر و L طول نمونه (ضخامت نمونه) بر حسب میلی- متر می باشند.

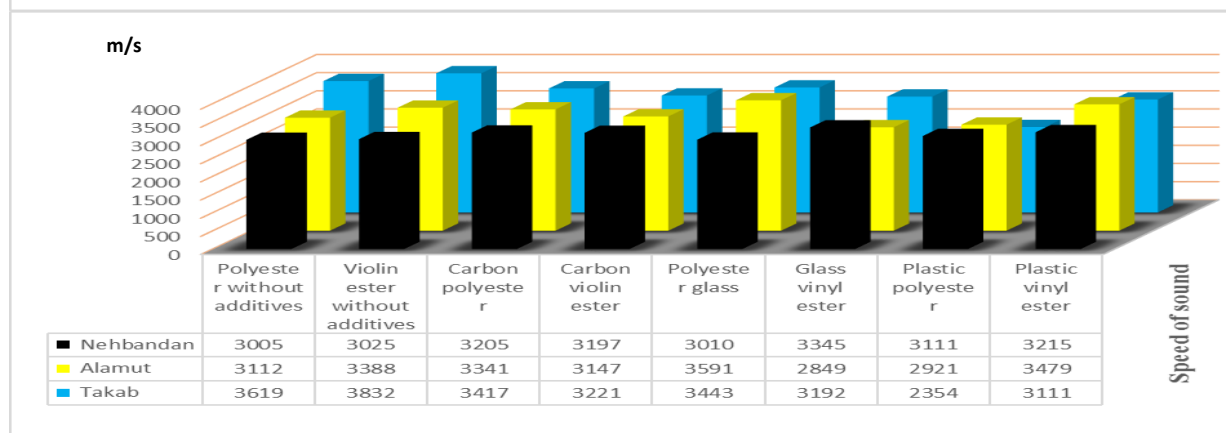
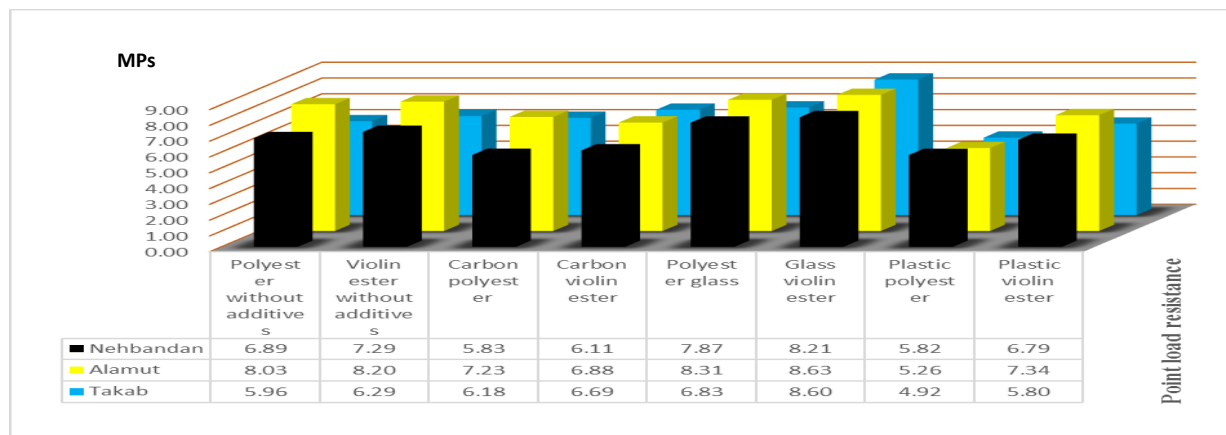
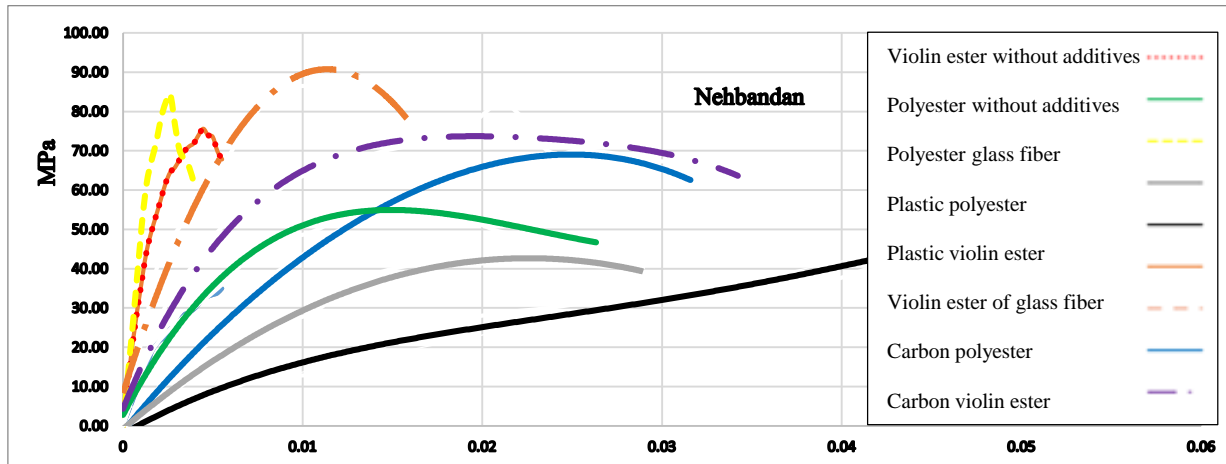
۴-۳. آزمایش بار نقطه ای

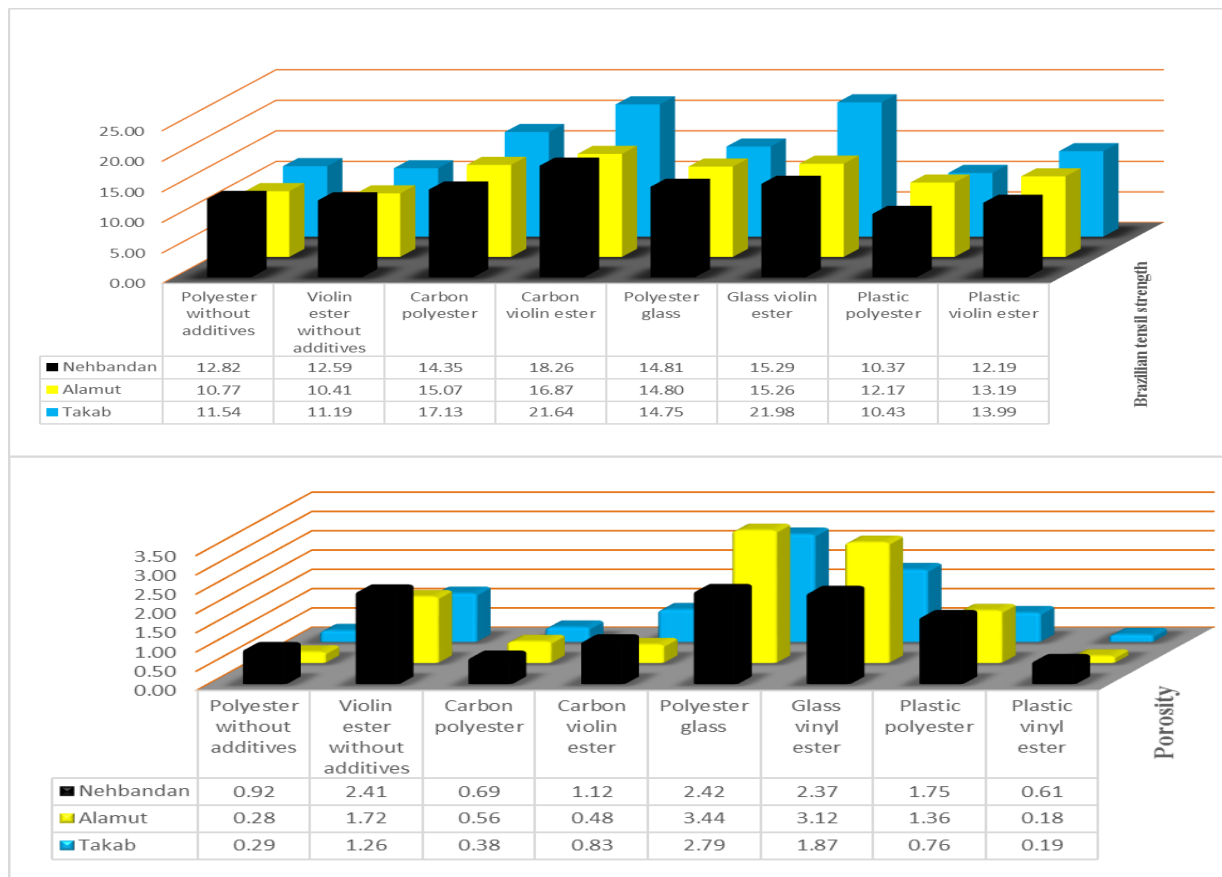
در آزمایش بار نقطه ای (Point Load Test) نمونه ها بدون داشتن شکل هندسی مشخص می توانند در راستای ارتفاع خود به نحوی که طول نمونه حداقل ۱/۵ برابر قطر مغزه باشد مورد آزمایش قرار گیرند. با انجام این آزمایش سه ویژگی مهندسی سنگ، شامل شاخص بار نقطه ای، مقاومت کششی و مقاومت فشاری تعیین می شود. شاخص بار نقطه ای از رابطه ۸ به دست می آید.

شکل ۶. نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری نمونه سنگ های مصنوعی ساخته شده با مواد افزودنی مختلف









شکل ۷. نتایج آزمایش‌های تخلخل، ارتعاش فراصوت، کششی برزیلی و مقاومت بار نقطه‌ای نمونه سنگ‌های مصنوعی

### بحث و بررسی نتایج

#### ۱-۵. تخلخل و ارتعاش فراصوت

سرعت صوت پایین‌تر است تاییدکننده نتایج ویژگی‌های فیزیکی (تخلخل) می‌باشد. نمونه‌های ساخته شده با الیاف شیشه به دلیل ویژگی فیزیکی الیاف شیشه و الیاف کربن و تراکم سخت و ناقص آن دارای سرعت موج P کمتری نسبت به نمونه سنگ-های ساخته شده بدون الیاف شیشه است. اما با این وجود به دلیل قرارگیری تصادفی تار و پود مانند الیاف شیشه در حین ساخت سنگ مصنوعی و همچنین مقاومت بالای شیشه نمونه سنگ‌های ساخته شده با الیاف شیشه مقاومت بیشتری دارند. نمونه‌های ساخته شده با رزین پلی‌استر و نمونه‌های فاقد الیاف دارای سرعت صوت بیشتری هستند که حاکی از گیرش مناسب رزین پلی‌استر در منافذ سنگ مصنوعی می‌باشد.

#### ۲-۵. مقاومت فشاری تک محوری

نمونه‌های ساخته شده با گرانیت الموت با هر نوع رزین و ماده افزودنی و الیاف شیشه نسبت به سنگ‌دانه‌های تکاب و نهبندان

سنگ‌های مصنوعی ساخته شده با الیاف شیشه نسبت به نمونه‌های ساخته شده با الیاف کربن ۶/۱۴ (نسبت‌گیری) برابر تخلخل بیشتری دارند. چون موقع اختلاط رزین با الیاف شیشه، الیاف شیشه افزایش حجم پیدا کرده و گیرش مناسب به خود نمی‌گیرد. نمونه‌های ساخته شده با رزین ویلین‌استر نسبت به نمونه‌های ساخته شده با رزین پلی‌استر ۴/۳۴ برابر تخلخل بالاتری دارند. اما این نسبت در نمونه‌های ساخته شده با رزین ویلین‌استر و پلاستیک صدق نمی‌کند و کمترین تخلخل را دارا هستند. نمونه‌های ساخته شده با الیاف کربن نیز نسبت به نمونه‌های بدون افزودنی تخلخل بیشتری دارد و در نهایت نمونه‌های ساخته شده با رزین ویلین‌استر نسبت به نمونه‌های ساخته شده با رزین پلی‌استر تخلخل بیشتری را نشان می‌دهد. نتایج آزمایش ارتعاش فراصوت با توجه به این که در سنگ‌های دارای تخلخل بیشتر

مقاومت کششی بیشتری هستند. نمونه‌های ساخته شده با الیاف کربن نسبت به نمونه‌های ساخته شده با الیاف شیشه تقریباً ۲۸٪ مقاومت کششی بیشتری دارد.

نمونه‌های ساخته شده با پلیاستیک نسبت به نمونه‌های بدون افزودنی مقاومت کششی بیشتری دارند. می‌توان نتیجه گرفت که الیاف شیشه و به علت در هم تنیدگی تار و پود مانند در بافت سنگ و الیاف کربن و پلیاستیک بخاطر ساختار کشسان خود و همچنین داشتن مقاومت بسیار بالا، مقاومت کششی بالایی به سنگ می‌دهد.

#### ۴-۵. مقاومت بار نقطه‌ای

نمونه‌های ساخته شده با الیاف شیشه دارای شاخص بار نقطه‌ای تقریباً ۱۲٪ بیشتر نسبت به نمونه سنگ‌های بدون الیاف شیشه هستند و نمونه‌های ساخته شده با الیاف کربن دارای شاخص بار نقطه‌ای تقریباً ۱۵٪ کمتر نسبت به نمونه سنگ‌های بدون الیاف کربن هستند. نمونه سنگ‌های ساخته شده با سنگ‌دانه‌های الموت با توجه به این‌که در نتایج آزمایش XRD سنگ‌هایی با مقاومت بالا هستند شاخص بار نقطه‌ای بیشتری نسبت به نمونه سنگ‌های ساخته شده از سنگ‌دانه‌های نهبندان و تکاب هستند.

در نهایت نمونه‌های ساخته شده با پلیاستیک دارای شاخص بار نقطه‌ای پایین‌تری نسبت به نمونه‌های خود اما بدون افزودنی دارند. بر اساس رده بندی (Brouch and Franklin, 1972)، نمونه سنگ‌های مصنوعی در محدوده‌ی سنگ‌های خوب از نظر رده‌بندی شاخص نقطه‌ای قرار می‌گیرند. سنگ‌های مصنوعی به دلیل همگن (Homogenous) و همسان (Isotropic) بودن و نداشتن نقاط ضعف شاخص بار نقطه‌ای بیشتری را نشان می‌دهد.

با در نظر گرفتن نتایج فوق، جدول ۶ به کاربری و استحکام سنگ‌های مصنوعی ساخته شده پرداخته است. با توجه به بالا

مقاومت بیشتری را نشان می‌دهد که حاکی از آن است که خود سنگ‌دانه در مقاومت سنگ مصنوعی تاثیر گذار است. نسبت مقاومت نمونه‌های ساخته شده با رزین ویلین‌استر به مقاومت نمونه‌های ساخته شده با رزین پلی‌استر در هر سه نمونه سنگ گرانیت، تقریباً ۱/۶۴ برابر بوده و نشان‌دهنده آن است که برای ساخت سنگ مصنوعی با ویژگی و خصوصیات مد نظر باید از رزین مخصوصی استفاده نمود. نمونه‌های ساخته شده با الیاف شیشه و رزین وینیل‌استر تقریباً ۱۴٪ و نمونه ساخته شده با الیاف شیشه و رزین پلی‌استر تقریباً ۸۸٪ با نمونه‌های مشابه بدون استفاده از الیاف شیشه مقاومت بیشتری را نشان می‌دهند. نمونه‌های ساخته شده با الیاف کربن و رزین ویلین‌استر تقریباً ۰/۰۳٪ و نمونه ساخته شده با الیاف کربن و رزین پلی‌استر تقریباً ۷۷٪ با نمونه‌های مشابه بدون استفاده از الیاف کربن مقاومت بیشتری را نشان می‌دهند. نمونه‌های ساخته شده با رزین ویلین‌استر پلیاستیک تقریباً ۰/۰۸ درصد و نمونه‌های ساخته شده با رزین پلی‌استر و پلیاستیک تقریباً ۳۳٪ کاهش مقاومت نسبت به نمونه‌های مشابه بدون استفاده از افزودنی را دارند. همان‌طور که از نمودارهای تنش کرنش آزمایش مقاومت فشاری تک محوری مشهود است نمونه‌های ساخته شده با هر دو رزین ویلین‌استر و پلی‌استر با ماده افزودنی پلیاستیک با سه نوع سنگ‌دانه الموت، نهبندان و تکاب، نمودار تنش کرنش حاصله بعد از گذشت از نقطه شکست در کرنش‌های بالا بدون شکست و با تغییر شکل، خمره‌ای شکل، به تحمل تنش ادامه می‌دهند و رفتار این سنگ‌ها به صورت پلیاستیک است.

#### ۳-۵. مقاومت کششی برزیلی

نمونه‌های ساخته شده با الیاف کربن فارغ از نوع سنگ‌دانه دارای مقاومت کششی بیشتری نسبت به نمونه‌های دیگر هستند. نمونه‌های ساخته شده با خرده سنگ‌های گرانیت نهبندان نسبت به نمونه‌های ساخته شده با گرانیت تکاب و الموت قزوین، دارای مقاومت کششی بیشتری هستند.

نمونه‌های ساخته شده با الیاف شیشه نسبت به نمونه‌های بدون الیاف شیشه فارغ از نوع رزین و سنگ‌دانه دارای تقریباً ۱۵٪

سایر نمونه‌ها که دارای مقاومت متوسطی هستند برای استفاده عمومی؛ نظیر استفاده در کف آسانسور، آشپزخانه، دیوارپوش، کف‌پوش از جمله کف‌پوش مکان‌های مرطوب مانند حمام، پیشنهاد می‌شوند.

بودن مقاومت کششی سنگ‌های مصنوعی ساخته شده با الیاف کربن (استفاده در محیط‌های متاثر نیروهای کشی)، بالا بودن مقاومت فشاری سنگ‌های مصنوعی ساخته شده با الیاف شیشه و رزین ویلین‌استر (استفاده در محیط‌های متاثر نیروهای فشارشی) و سنگ‌های ساخته شده با پلاستیک با توجه به بازیافتی بودن و داشتن تخلخل بسیار پایین و مقاوم در مقابل یخبندان (پیاده‌روها)، استفاده شود.

جدول ۶. مقایسه استحکام و کاربری سنگ‌های مصنوعی ساخته شده

User	Strength			Additive	Resin	Aggregate
	Public consumption	Affected by compressive force	Affected by tensile force			
pavement				No additives		
				Glass fiber		Takab Granite
				Carbon fiber plastic		
	●			No additives		
				Glass fiber	Polyester	Alamut Granite
				Carbon fiber plastic		
	●		▼	No additives		
				Glass fiber	Nehbandan Granite	
				Carbon fiber plastic		
	●	●		No additives		
				Glass fiber	Takab Granite	
			●	Carbon fiber plastic		
	●			No additives		
		●	▲	Glass fiber	Violin Ester	Alamut Granite
				Carbon fiber plastic		
	●			No additives		
				Glass fiber	Nehbandan Granite	
				Carbon fiber plastic		

## نتیجه گیری

نمونه‌های ساخته شده با رزین پلی‌استر و الیاف کربن در کرنش‌های بالا رفتار شکننده را از خود بروز می‌دهند اما نمونه‌های ساخته شده با رزین ویلین‌استر در کرنش‌های پایین‌تر با تحمل تنش بیشتر رفتار شکننده را نشان می‌دهند سنگ‌های مصنوعی ساخته شده با مواد پلاستیکی با توجه به دارا بودن ویژگی‌های مکانیکی مطلوب و تخلخل ناچیز بهترین گزینه برای استفاده در پیاده‌روها و سنگ فرش خیابان‌ها توسط شهرداری‌ها که خود عامل و نقش زیبا سازی محیط شهری و کاهش ضایعات را دارند می‌باشند.

## 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، به پاس تمام حمایت‌ها و همراهی سخاوت‌مندانه‌شان طی مراحل انجام این تحقیق، کمال تشکر و قدردانی دارم.

هدف از انجام این پژوهش بررسی تاثیر مواد افزودنی در استحکام و کاربری سنگ‌های مصنوعی ساخته شده با رزین‌های مختلف می‌باشد. برای دستیابی به این اهداف نمونه سنگ‌های مصنوعی با رزین‌های پلی‌استر و ویلین‌استر، با الیاف شیشه، الیاف کربن، پلاستیک و فاقد افزودنی (به عنوان نمونه شاهد) ساخته شدند. استفاده از الیاف چاپد شده (الیاف شیشه و الیاف کربن) در ساخت سنگ‌های مصنوعی برای عملیات مقاوم سازی می‌باشد که باعث حذف میلگرد، کاهش ضخامت لایه-های سنگی، افزایش دوام و کارایی بهتر، کاهش هزینه‌ها، افزایش ایمنی، سرعت و مقاومت کار می‌گردد. نمونه سنگ‌های مصنوعی ساخته شده با رزین ویلین‌استر و الیاف شیشه دارای تخلخل و میزان جذب آب، مقاومت فشاری تک‌محوری، شاخص بارنقطه‌ای بیشتری به سایر نمونه‌ها هستند و در مقابل نمونه‌های ساخته شده با رزین پلی‌استر و الیاف کربن مقاومت کششی بیشتری دارند. نمونه‌هایی که با رزین ویلین‌استر ساخته شده‌اند نسبت به نمونه‌هایی که با رزین پلی‌استر ساخته شده‌اند شاخص‌های مهندسی و مکانیکی مطلوب‌تر و بهتری به نمونه-هایی که با رزین پلی‌استر ساخته شده‌اند را نشان می‌دهند.

## منابع

- عطایی، م. ، ۱۳۸۷، استخراج سنگ‌های ساختمانی، تهران، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود، ۲۸۶.
- ACI-COMMITTEE-221, (2007). Guide for use of normal weight and heavyweight aggregates in concrete. American concrete institute.
- Batson, G. B., & Shah, S. P. (1987). Fiber reinforced concrete properties and applications. American Concrete Institute.
- Broch, E., & Franklin, J. A. (1972, November). The point-load strength test. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 9, No. 6, pp. 669-676).
- 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.
- 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.
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science advances*, 3(7), e1700782.

Peng, L., & Qin, S. (2018). Mechanical behaviour and microstructure of an artificial stone slab prepared using a SiO<sub>2</sub> waste crucible and quartz sand. *Construction and Building Materials*, 171, 273-280.

Stefanidou, M., Pacht, V., & Papayianni, I. (2015). Design and testing of artificial stone for the restoration of stone elements in monuments and historic buildings. *Construction and building materials*, 93, 957-965.

Wei, R., & Zimmermann, W. (2017). Microbial enzymes for the recycling of recalcitrant petroleum- based plastics: Andrady.

<http://polymersun.com>

[www.iew.ir](http://www.iew.ir)

<http://shimiasoon.com>