

## بررسی تاثیرات الیاف کربن و شیشه بر افزایش مقاومت خمشی سنگ‌های مصنوعی و مطالعه‌ی

### ساختار آن‌ها با استفاده از SEM

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

پذیرش مقاله: ۹۷/۱۲/۲۴

دریافت مقاله: ۹۷/۰۶/۲۲

#### چکیده:

سنگ مصنوعی ترکیبی از سنگ دانه‌های طبیعی و مواد افزودنی مانند صمغ‌های صنعتی (رزین)، سیمان و دیگر مواد پلیمری می‌باشد. در این پژوهش سنگ مصنوعی با مواد افزودنی و رزین‌های متفاوت به منظور دستیابی به ظرفیت خمشی بالا 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 ریز ترک‌ها، عناصر، اتم‌های سازنده، درصد وزنی و چگونگی قرارگیری و در هم تنیدگی مواد افزودنی مصرف شده در ساخت سنگ‌های مصنوعی، تصاویر FESEM از نمونه‌ها گرفته شد. برای تعیین شکل‌پذیری و ارزیابی کیفیت سنگ‌های مصنوعی توسط توانایی آن‌ها در برابر مقاومت به ایجاد ترک یا ناهمواری‌های سطحی دیگر در طول یک دوره‌ی خمشی مداوم، سنگ‌های مصنوعی ساخته شده با مواد افزودنی (الیاف شیشه، الیاف کربن، رزین پلی‌استر و وینیل‌استر) آزمایش خمشی سه‌نقطه‌ای صورت گرفت. بر اساس آزمایش خمشی سه نقطه‌ای نمونه ساخته شده با رزین ویلین‌استر و الیاف کربن بیش‌ترین مقاومت خمشی و نمونه ساخته شده با رزین ویلین‌استر و الیاف شیشه بیش‌ترین کرنش را در طول خمشی تحمل کردند. همچنین نوع شکست و ترک‌ها در سنگ‌های تقویت شده به ترتیب، شکننده و خمشی و در سنگ‌های بدون تقویت، شکل‌پذیر و خمشی برشی است.

**کلمات کلیدی:** سنگ مصنوعی، مواد افزودنی، الیاف شیشه و کربن، رزین پلی‌استر و وینیل‌استر، خمشی سه نقطه‌ای، SEM

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، [uromeiea@modares.ac.ir](mailto:uromeiea@modares.ac.ir)

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

\* نویسنده مسئول

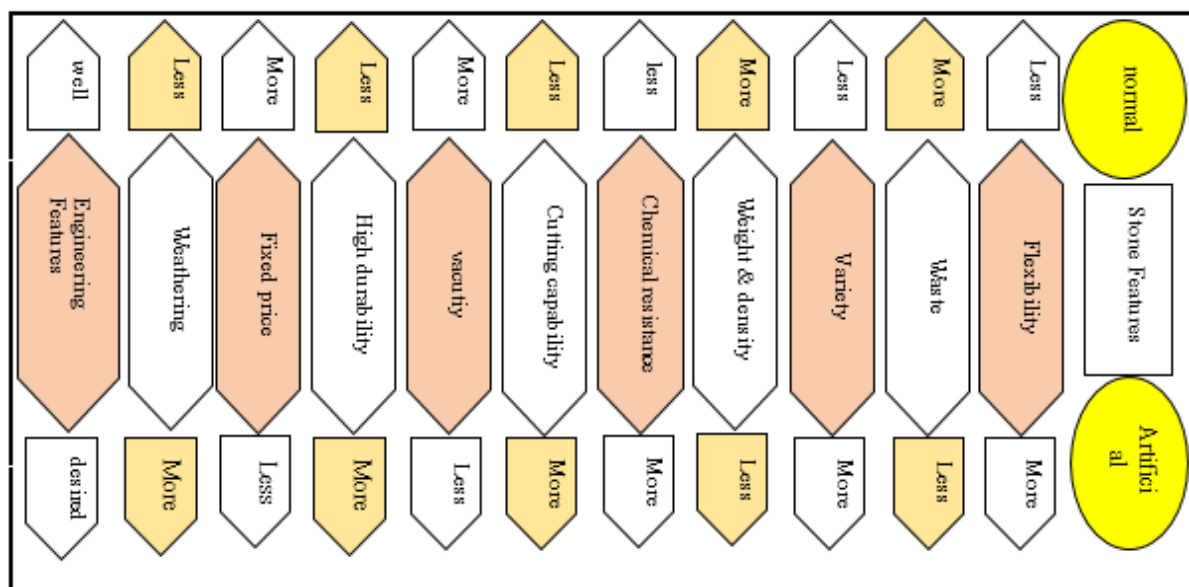
## ۱. مقدمه

مصنوعی برای پوشاندن دیوارها و سقف‌ها با استقبال بازار مواجه شده است (Peng and Qin, 2018).

شکل ۱ سنگ‌های مصنوعی و طبیعی را به لحاظ کیفیت و کاربرد مقایسه می‌کند. لیو (Liu, 2006) با استفاده از فن آوری تقسیم-بندی تصویر و تکنولوژی تشخیص لبه تصویر واقعی ساختار سنگ را به دست آورد و به تجزیه و تحلیل سنگ در مراحل مختلف پرداخت (Gong and Li, 2010).

کوارتز یکی از رایج‌ترین کانی‌ها در طبیعت است که بلورهای آن در طی دگرریختی، تغییر شکل می‌یابند و بنابراین به‌عنوان یک کانی شاخص برای بررسی ریزساختارها به کار می‌رود (Passchier and Trouw, 2005). هدف از این پژوهش ارزیابی تاثیر الیاف کربن و شیشه بر مقاومت خمشی سنگ‌های مصنوعی و تعیین دقیق ریز ترک‌ها، عناصر، اتم‌های سازنده، درصد وزنی و چگونگی قرارگیری و در هم تنیدگی مواد افزودنی مصرف‌شده در ساخت سنگ‌های مصنوعی با استفاده از FESEM (Emission Scanning Electron Microscope) می‌باشد. به همین منظور تصاویر میکروسکوپی با بزرگ‌نمایی و قدرت تفکیک بالا در حد نانومتر، تهیه آنالیز نیمه کمی توسط آنالایزر EDX (Energy Dispersive X ray) بر روی نمونه‌ها صورت گرفته است.

سنگ مصنوعی ترکیبی از سنگ دانه‌های طبیعی و مواد افزودنی مانند صمغ‌های صنعتی، سیمان و دیگر مواد پلیمری می‌باشد. موادی که برای خط تولید سنگ‌های مصنوعی بکار می‌روند طوری انتخاب می‌شوند که برای کارهای داخلی و خارجی ساختمان چه در کف و چه در نما ایده‌آل باشد. دو کشور ایتالیا و آمریکا در صدر تولیدکنندگان سنگ مصنوعی می‌باشند. در ایران به طور عمده و چشمگیر در استان‌های اصفهان، کرمان و لرستان و به طور جزئی در چند استان دیگر سنگ مصنوعی تولید می‌گردد که مواد اولیه این کارخانه‌ها ضایعات سنگبری‌ها بوده که بعد از خردایش به ابعاد مورد نظر طی تکنولوژی خاص به سنگ مصنوعی تبدیل می‌شود (بابا آدم و همکاران، ۱۳۹۴). سنگ‌های مصنوعی در مقابل فشار، نور، اشعه ماورا بنفش و تغییرات جوی به طور کلی مقاوم بوده و رفتاری مشابه با سنگ‌های طبیعی دارند. همچنین نگهداری این محصولات آسان بوده و با صیقل دادن قابل استفاده مجدد می‌باشند. از دیگر خصوصیات این سنگ‌ها می‌توان به تک لایه بودن آن‌ها اشاره کرد (Cruz et al., 2010). سنگ‌های طبیعی دارای انعطاف پذیری پایین، مقاومت، ضریب جذب آب و تخلخل بالا می‌باشند (Gomes et al., 2018) از این رو اندیشه استفاده از سنگ



شکل ۱. مقایسه سنگ مصنوعی با سنگ طبیعی (Stefunidou et al., 2015)

## ۲. مواد و روش‌ها

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

مصنوعی:

۱,۱,۲. الیاف کربن

الیاف کربن نخستین بار در سال ۱۸۷۹ میلادی زمانی که توماس ادیسون از این ماده به عنوان رشته پرمقاومت در ایجاد روشنایی الکتریکی استفاده کرد، پای به عرصه علم و فن آوری گذاشت. الیاف کربن که به عنوان مواد تقویتی به کار می‌روند دارای خواصی مانند مقاومت بالا، وزن کم، نسبت مقاومت به وزن بالا، سرعت عملیات اجرا، مقاوم در برابر شرایط جوی و خوردگی، عدم نیاز به ماشین‌آلات و تجهیزات خاص می‌باشد. مواد کامپوزیتی از دو جزء اساسی تشکیل می‌شوند؛ فایبر (الیاف) و رزین (ماده چسباننده). فایبرها که اصولاً الاستیک، ترد و بسیار مقاوم هستند، جزء اصلی باربر در ماده کامپوزیتی محسوب می‌شوند. رزین اصولاً به عنوان یک محیط چسباننده عمل می‌کند که فایبرها را در کنار یکدیگر نگاه می‌دارد (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۸۵).

شکل (۲- a) الیاف کربن بکار برده شده در ساخت سنگ مصنوعی این تحقیق را نشان می‌دهد به منظور طرح اختلاط و پوشش همه جانبه سنگ الیاف کربن به اندازه‌های ۳ سانتی‌متری خرد شد و مورد استفاده قرار گرفت.

۱,۲. الیاف شیشه

رشته الیاف شیشه (GFRP) Glass Fiber Reinforced Polymer از فیبرهای شیشه‌ای تشکیل می‌شوند که تارهایی به ضخامت حدود ۱۰ میکرون هستند. مقاومت کششی و شیمیایی بسیار بالای الیاف باعث شده تا استفاده از آن‌ها در ساخت قطعات صنایع هوافضا، خودرو، دریایی و ساختمانی،

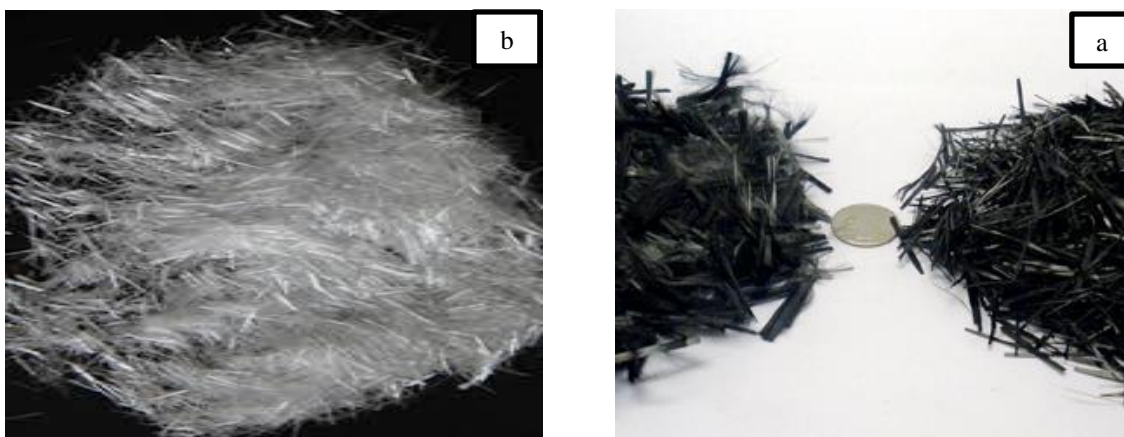
تجهیزات مبلمان و تجهیزات ورزشی، روز به روز بیشتر شود (زیدآبادی نژاد، ۱۳۹۴).

Fiber Reinforced Polymer (FRP) کاربردهای متفاوتی در صنعت ساخت و ساز دارد. بیشترین کاربرد FRP در ترمیم و تقویت و مقاوم سازی سازه‌های بتنی است. الیاف FRP با قرار گرفتن و نصب بر روی سطوح بتنی از قبیل دال‌ها، تیرها، ستون‌ها، دیوارهای بتنی و فونداسیون بتنی می‌تواند باعث افزایش مقاومت بتن شوند (غلامی و همکاران، ۱۳۹۱).

فیبر شیشه مدول کششی پایین و وزن مخصوص بالا نسبت به الیاف کربن دارند و همین مسئله سبب می‌شود تا مهندسين سازه جهت مقاوم سازی ساختمان‌ها بیشتر رغبت به استفاده از الیاف کربن به جای الیاف شیشه داشته باشند. همچنین از الیاف کربن به دلیل بالا بودن مدول کششی بالا می‌توان در فضاهای زیرزمینی، نیروگاه‌های هسته‌ای و پناهگاه‌ها که سقف بیشتر متاثر نیروهای کششی است استفاده گردد (Zanjani et al., 2018).

شیشه متداول‌ترین محصول برای مقاوم سازی، تقویت و بهسازی انواع سازه‌ها در صنعت ساختمان بوده، همچنین این مصالح برای حفاظت اجزای مختلف در محیط‌های خورنده و شیمیایی و ایزوله کردن لوله‌های فلزی و حفاظت شیمیایی در محیط‌های خورنده با pH خیلی بالا یا کم، نیز کاربرد گسترده‌ای دارند (Zhu et al., 2007).

برای تولید این الیاف مخلوط مذاب حاصل از مواد اولیه تشکیل‌دهنده الیاف تحت فشار بالا از سوراخ‌هایی با قطر بسیار کم خارج شده و پس از آغشته شدن به مواد روان کننده، بر روی قرقره چرخان پیچیده می‌شوند تا در مراحل بعدی برای تولید محصولات متنوع الیاف شیشه مورد استفاده قرار گیرند (شاهدی‌فر و همکاران، ۱۳۸۹). شکل (۲- b) الیاف شیشه استفاده شده را نشان می‌دهد.



شکل ۲. الیاف کربن استفاده شده در ساخت سنگ مصنوعی (a). الیاف شیشه‌ای استفاده شده در سنگ مصنوعی (b)

رزین‌های پلی‌استر محصولاتی با کاربرد زیاد هستند. به علت وجود اجزای تکنیکی در آن‌ها، این نوع رزین در کاربردهای با تکنولوژی بالا مانند: اتومبیل سازی و علوم وابسته به ساختمان-ها و صنایع ترکیبی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Zhu et al., 2007).

در تکنولوژی سنگ‌های مصنوعی به منظور تولید بلوک‌ها این اجازه داده می‌شود تا هم از چسب‌های آلی (رزین‌های ساختمانی) و هم از چسباننده‌های غیرآلی (سیمان پرتلند) بدون هیچ تغییری در طرح تولید استفاده شود. البته هر چسباننده ویژگی‌های خاص خود را به محصول خواهد داد. ترکیبات رزین می‌توانند از محدوده وسیعی از رزین‌های ترمواستاتیکی انتخاب شوند. به عنوان مثال می‌توان از آکرلیک، رزین متاکریلیک، رزین پلی‌استری اشباع، رزین وینیل‌استر و یا دیگر رزین‌های پلیمری استفاده کرد. اگر میزان رزین مصرفی بیش از ۸۰ درصد باشد سنگ مصنوعی تبدیل به یک پلاستیک شده و نمی‌توان آن را سنگ نامید و اگر میزان رزین کم باشد سنگ مصنوعی ایجاد شده بسیار ترد و شکننده خواهد بود (Sakai et al., 2001).

#### ۲.۲. مراحل ساخت سنگ مصنوعی

سنگ مصنوعی محصولی ساختمانی است که از ترکیب سنگ-دانه‌های طبیعی و یک ماده چسباننده مانند سیمان و یا مواد پلیمری (رزین) و یا هر دو، و افزودن سایر افزودنی‌ها تحت شرایط خاص ساخته می‌شود.

#### ۳.۱، ۲. رزین‌های پلی‌استر و وینیل‌استر

رزین ترکیبی طبیعی یا مصنوعی است که تحت شرایط سخت می‌شود. معمولاً در الکل قابل حل است اما در آب حل نمی‌شود مانع نفوذ آب می‌شود به همین دلیل سنگ‌ها میزان تخلخل پایینی نشان می‌دهند. رزین‌های پلی‌استر (Polyester Resin) و وینیل‌استر (Vinylester Resin) به علت مقاومت شیمیایی و حلالی خود بسیار مورد توجه‌اند (Quantum- Quartz, 2013). این دو رزین چسبندگی خوبی بر روی سطوح مختلف دارند، اگرچه بیش‌ترین کاربرد آن‌ها بر روی فولاد و بتن است. نوع مواد اولیه مصرفی در ساخت پلی‌استر و وینیل‌استر، تعیین‌کننده میزان مقاومت مکانیکی، شیمیایی و پایداری حرارتی آن‌ها است (Carvalho et al., 2018).

رزین وینیل‌استر از واکنش رزین اپوکسی با اکریلیک اسید یا متاکریلیک اسید حاوی گروه وینیلی ساخته می‌شود که استفاده از اپوکسی نووالاک در ساخت آن خواص نهایی مطلوب‌تری را ارائه می‌دهد (Kandelbauer et al., 2014). از کاربرد این دسته پوشش‌ها می‌توان به مقاوم سازی مخازن، مقاوم سازی کف زمین، پوشش سازه‌های فولادی، دیوار و سقف اشاره کرد. اصلی‌ترین چسب آلی که مورد استفاده قرار می‌گیرد رزین پلیمری اشباع با فرمولی مناسب برای تولید محصولات سنگ مصنوعی است. آنچه بطور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد "اورتوفتالیک رزین نیمه سختی با حداقل واکنش می‌باشند.

خلاء و فشار ساخته شد و در مرحله آخر آزمایشات خمشی سه نقطه‌ای با رعایت استانداردهای مربوطه انجام گرفت.

### ۳. کانی شناسی سنگ گرانیت تکاب با میکروسکوپ پلاریزان و آنالیز XRD

گرانیت تکاب در معدن گرانیت گچی قلعه‌سی در اطراف شهرستان شاهین‌دژ واقع در آذربایجان غربی است. کانی‌های موجود در این سنگ عبارت از: آلبیت، لابرادوریت، ارتوکلاز، کوارتز، مگنزیو هورنبلند و موسکوویت است که در مقطع میکروسکوپی آن (شکل ۴)، بلورهای آلکالی فلدسپار در قسمت بالایی عکس و دانه‌های ریز کوارتز در قسمت پایین و دانه‌های بیوتیت در عکس دیده می‌شوند. نتایج آنالیز XRD وجود کانی‌های آلبیت، لابرودوریت، ارتوکلاز، کوارتز، هورنبلند و مسکوویت را نشان می‌دهد بر اساس مطالعات کانی‌شناسی گرانیت تکاب از لحاظ زمین‌شناسی میلونیت-گرانیت نام گذاری شد.

شکل ۳ مراحل ساخت سنگ مصنوعی در این تحقیق را بترتیب نشان می‌دهد که شامل مراحل؛ آماده‌سازی، طرح اختلاط، شرایط فرآوری و انجام آزمایش است. در مرحله آماده سازی، سنگ گرانیت (تکاب) با توجه به این‌که سنگ‌های گرانیتی دارای مقاومت بالا هستند و همچنین بیشترین کوپدهی معادن را سنگ‌های گرانیتی دارند انتخاب شد. و با دستگاه سنگ خرد-کن (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 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 که مهم‌ترین اصل در استحکام و مقاومت سنگ‌های مصنوعی است اختلاط گردید.

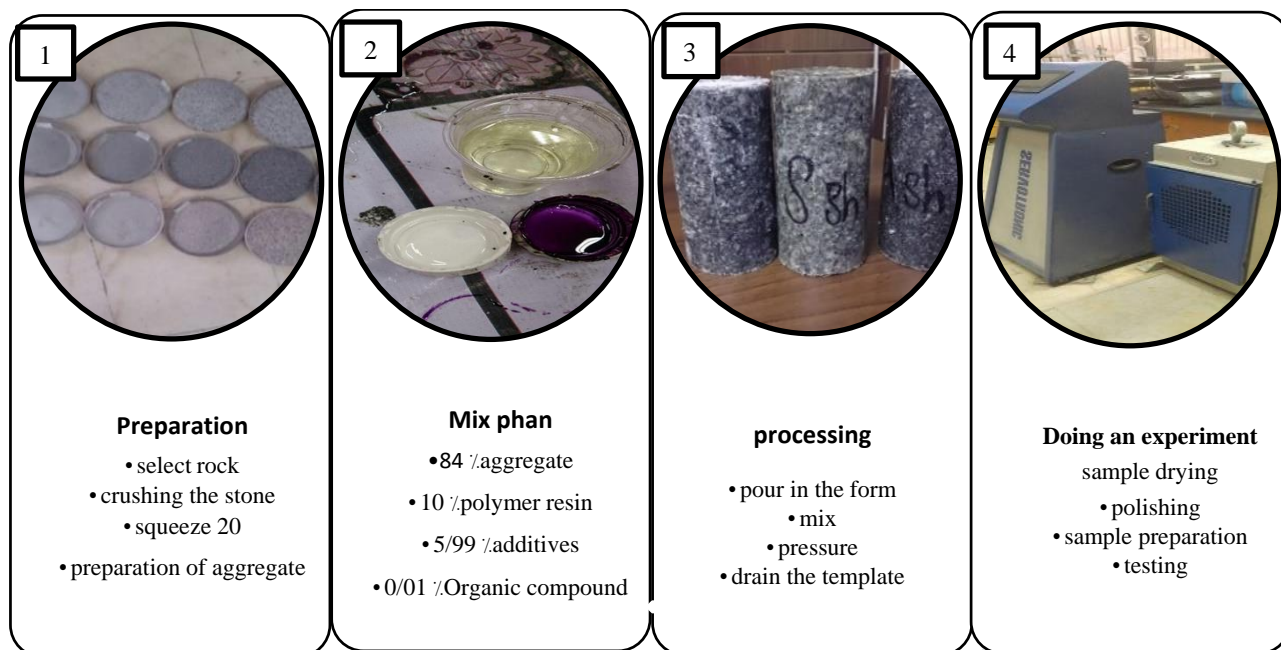
جدول ۱ درصد مواد بکار رفته در ساخت ۶ نمونه سنگ مصنوعی را نشان می‌دهد. در مرحله سوم سنگ‌های مصنوعی کاملاً بصورت دستی و بدون نیاز به هر نوع وسیله و سیستم

جدول ۱. درصد مواد بکار رفته در نمونه سنگ‌های مصنوعی ساخته شده با الیاف کربن، الیاف شیشه و فاقد افزودن

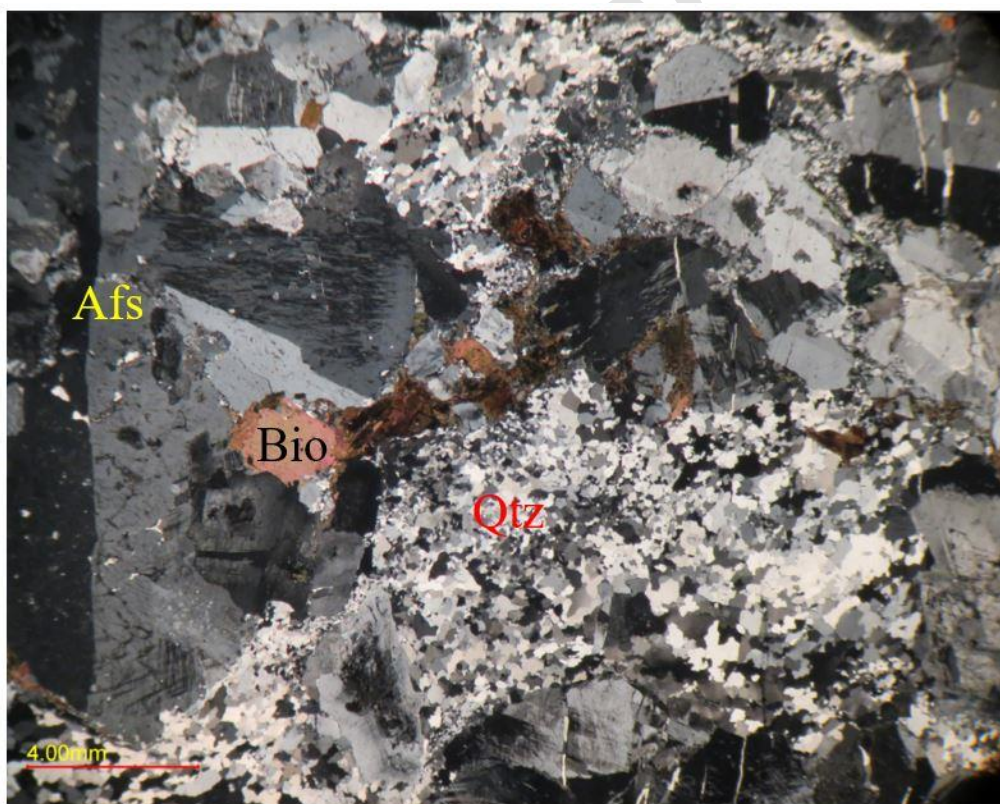
Hardanger &cobalt Acid	%Aggregate Takab Granite	% Fiber		% Resin		Samples
		Glass	Carbon	Wheelinaster	Ployester	
0/04	89/34	0	0	0	10/66	Ployester without additive
0/04	89/34	0	0	10/66	0	Wheelinaster without additive
0/04	84	5/96	0	0	10	Glass fiber ployester
0/04	84	5/96	0	10	0	Wheelinaster with glass fiber
0/04	84	0	5/96	0	10	Ployester with carbon fiber
0/04	84	0	5/96	10	0	Caqrbon fiber wheelinaster

سنگ‌های مصنوعی ساخته شده تصاویر SEM گرفته شد تا مکمل و تایید کننده بخش مقطع نازک باشد.

برای شکست‌نگاری و بررسی مورفولوژی جزئیات منافذ بین-دانه‌ای و چگونگی در هم تنیدگی مواد افزودنی و همچنین برای شناسایی عناصر و نام‌گذاری سنگ گرانیت تکاب در نمونه



شکل ۳. مراحل ساخت سنگ مصنوعی در این تحقیق به ترتیب شماره



شکل ۴. تصویر میکروسکوپی از گرانیت تکاب که بلورهای آلکالی فلدسپار، بیوتیت و کوارتز در آن دیده می شود.

نهایت شکل (۵-F) تصویر SEM سنگ مصنوعی ساخته شده با رزین وینیل‌استر و بدون افزودنی همراه با قطر منافذ، بافت و آرایش مجدد دانه‌های کوارتز را که دانه‌ها بصورت کاملاً طبیعی و با بیشترین قفل شدگی در کنار هم قرار گرفتند را نشان می‌دهد. قطر الیاف شیشه  $15\mu\text{m}$  است و الیاف کربن بخاطر سختی کم هنگام برش و آماده سازی نمونه تغییر بافت داده و به صورت یک ماده، جزئی از بافت سنگ شده است که این امر باعث افزایش خواص کششی و انعطاف‌پذیری بالای سنگ مصنوعی شده است.

جدول (۲) درصد وزنی و اتمی عناصر تشکیل دهنده سنگ‌های مصنوعی ساخته شده را با آنالیز EDS نشان می‌دهد. شکل (۶) EDX سنگ‌های مصنوعی ساخته شده را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که نمونه ساخته شده با الیاف شیشه درصد Si بیشتر و نمونه ساخته شده با الیاف کربن دارای C بیشتر نسبت به نمونه‌های دیگر ساخته شده است که خاصیت کششی و انعطاف‌پذیری به نمونه‌ها می‌دهد. همچنین نمونه فاقد مواد افزودنی نیز با توجه به کانی‌های موجود در سنگ با توجه به نتایج XRD دارای Si بیشتر می‌باشد.

جدول ۳ نام تجاری و زمین‌شناسی، ترکیب کانی‌شناسی و نتایج آنالیز XRD و SEM را نشان می‌دهد.

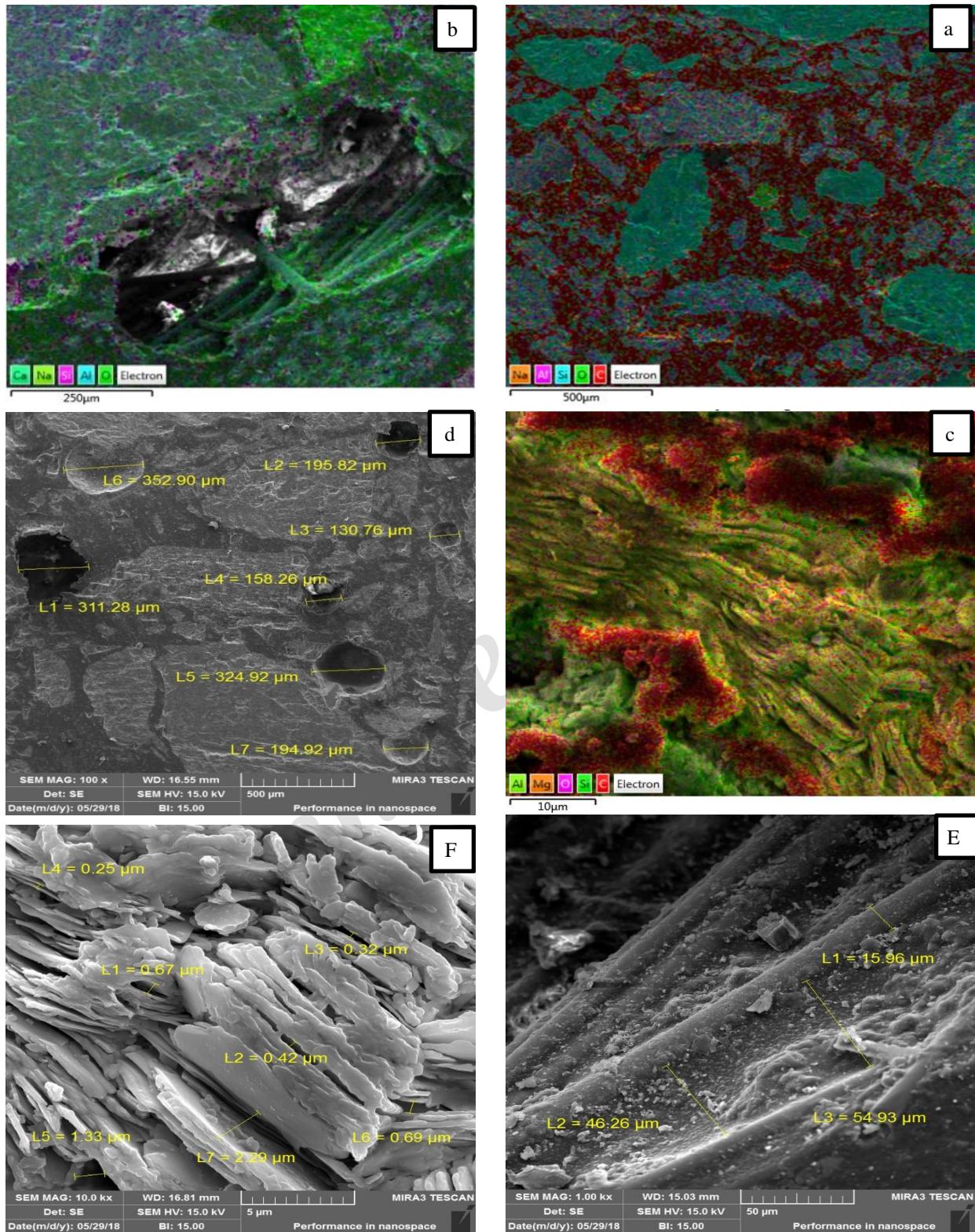
#### ۴. تجزیه و تحلیل ساختار سنگ‌های مصنوعی با SEM

زمین‌شناسان در حال حاضر با معرفی سیستم‌های SEM (Scanning electron microscope) و EDX (Energy Dispersive X ray)، قادر به رفتن به یک مرحله فراتر از تجزیه و تحلیل بخش مقاطع نازک و نگاه کردن به منافذ هستند که اقدام به شناسایی کوچکترین مواد معدنی بوده و توزیع آن‌ها را بررسی می‌کنند.

شکل (۵-a) آنالیز صفحه‌ای حاصل از الیاف کربن (رنگ قرمز) و دیگر عناصر در زمینه سنگ مصنوعی را نشان می‌دهد که بصورت کاملاً یکپارچه بافت سنگ را در بر گرفته است. شکل (۵-b) آنالیز صفحه‌ای سنگ مصنوعی ساخته شده با الیاف شیشه همراه با سایر عناصر موجود در آن را نشان می‌دهد. شکل (۵-c) آنالیز صفحه‌ای سنگ مصنوعی ساخته شده با رزین وینیل‌استر و بدون هر نوع الیافی با عناصر موجود در آن را نشان می‌دهد. تصاویر FESEM قطر منافذ و الیاف های بکار برده را نشان می‌دهد. بزرگترین منفذ، قطر  $324\mu\text{m}$  را دارد شکل (۵-d) تصویر SEM سنگ مصنوعی ساخته شده با الیاف کربن و رزین پلی‌استر همراه با قطر منافذ را نشان می‌دهد شکل (۵-E) تصاویر SEM سنگ‌های مصنوعی ساخته شده با الیاف شیشه و رزین وینیل‌استر همراه با قطر منافذ را نشان می‌دهد. و در

جدول ۲. درصد وزنی و اتمی عناصر موجود در سنگ‌های مصنوعی ساخته شده با الیاف کربن، الیاف شیشه، فاقد افزودن

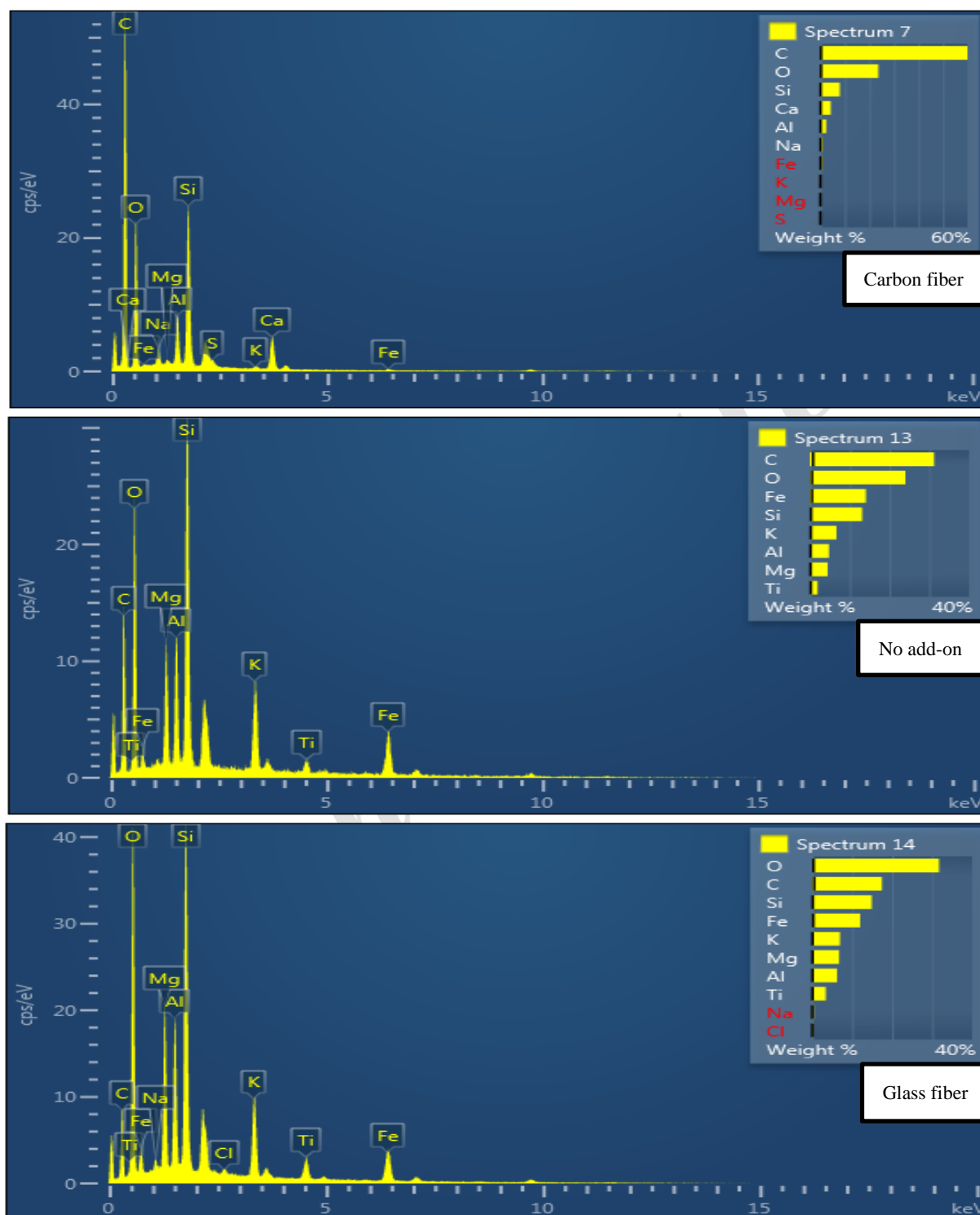
Element	Wt% Glass fiber	Wt% Carbon fiber	Wt% NO add-on	Atomic % Glass fiber	Atomic % Carbon fiber	Atomic % NO add-on
C	45/69	31/23	32/75	59/97	48/31	49/18
O	24/51	23/97	24/53	24/15	27/83	27/65
Na	1/15			0/79		
Al	5/46	4/77	5/49	3/19	3/29	3/67
Si	16/41	13/10	13/03	9/21	8/66	8/41
Cl	0/25			0/11		
K	5/58		5/90	2/25		2/72
Ca	0/59	6/64		0/23	3/15	
Fe	0/35	14/02	11/21	0/10	4/66	3/62
Mg		4/41	5/79		3/37	4/29
Ti		1/85	1/23		0/72	0/46
Total:	100/00	100/00	100/00	100/00	100/00	100/00



شکل ۵. تصویر آنالیز صفحه‌ای SEM سنگ‌های مصنوعی ساخته شده با الیاف کربن (a) الیاف شیشه (b) فاقد افزودنی (c) و تصاویر SEM و اندازه

منافذ سنگ‌های مصنوعی ساخته شده با الیاف کربن (d) الیاف شیشه (E) و فاقد افزودنی (F)





شکل ۶. EDX نقطه‌ای تهیه شده از نمونه سنگ‌های مصنوعی ساخته شده با الیاف شیشه، الیاف کربن و بدون افزودنی با درصد عنصری تشکیل‌دهنده آن‌ها

## جدول ۳. نتایج آنالیز XRD و SEM نام زمین شناسی و ترکیب کانی شناسی گرانیت تکاب

Brand	Name of geology	Mineralogical composition	Analaze of SEM & XRD
Takab Granite	Granite -Milonite	'biotite ،quartz ،Alkali feldspar serist ،colorite	'quartz ،orthocracy ،labradorite ،albite muscovite ،hornblade

چگالی نمونه‌هایی که با الیاف شیشه ساخته شده‌اند از سایر نمونه‌ها کم‌تر می‌باشد. این حاکی از آن است که الیاف شیشه هنگام اختلاط با رزین (پلی استر و وینیل استر) مانند یخ زدن آب افزایش حجم پیدا می‌کند و مانع تراکم می‌شود.

جدول (۴) میزان تخلخل و چگالی سنگ‌های مصنوعی ساخته شده با مواد افزودنی را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد سنگ‌های مصنوعی ساخته شده با الیاف شیشه نسبت به نمونه‌های فاقد افزودنی ۲/۲ برابر و نسبت به نمونه‌هایی که با الیاف کربن ساخته شده‌اند ۳/۳ برابر تخلخل بیشتر دارند با توجه به این که

## جدول ۴. درصد تخلخل و چگالی سنگ‌های مصنوعی ساخته شده با الیاف شیشه، کربن و بدون افزودنی

Density (gr/cm <sup>3</sup> )	% Porosity	Additives	Rock
1/89	2/79	Glass fiber	Granite -Milonite
1/96	0/83	Carbon fiber	
2/02	1/26	NO add-on	

خمش در هر لحظه از زمان خمش و مدول خمش قابل محاسبه است.

$$E_B = \frac{L^3 m}{4bd^3} \quad (2) \quad P = \frac{2bd^2 S_{11}}{3L} \quad (1)$$

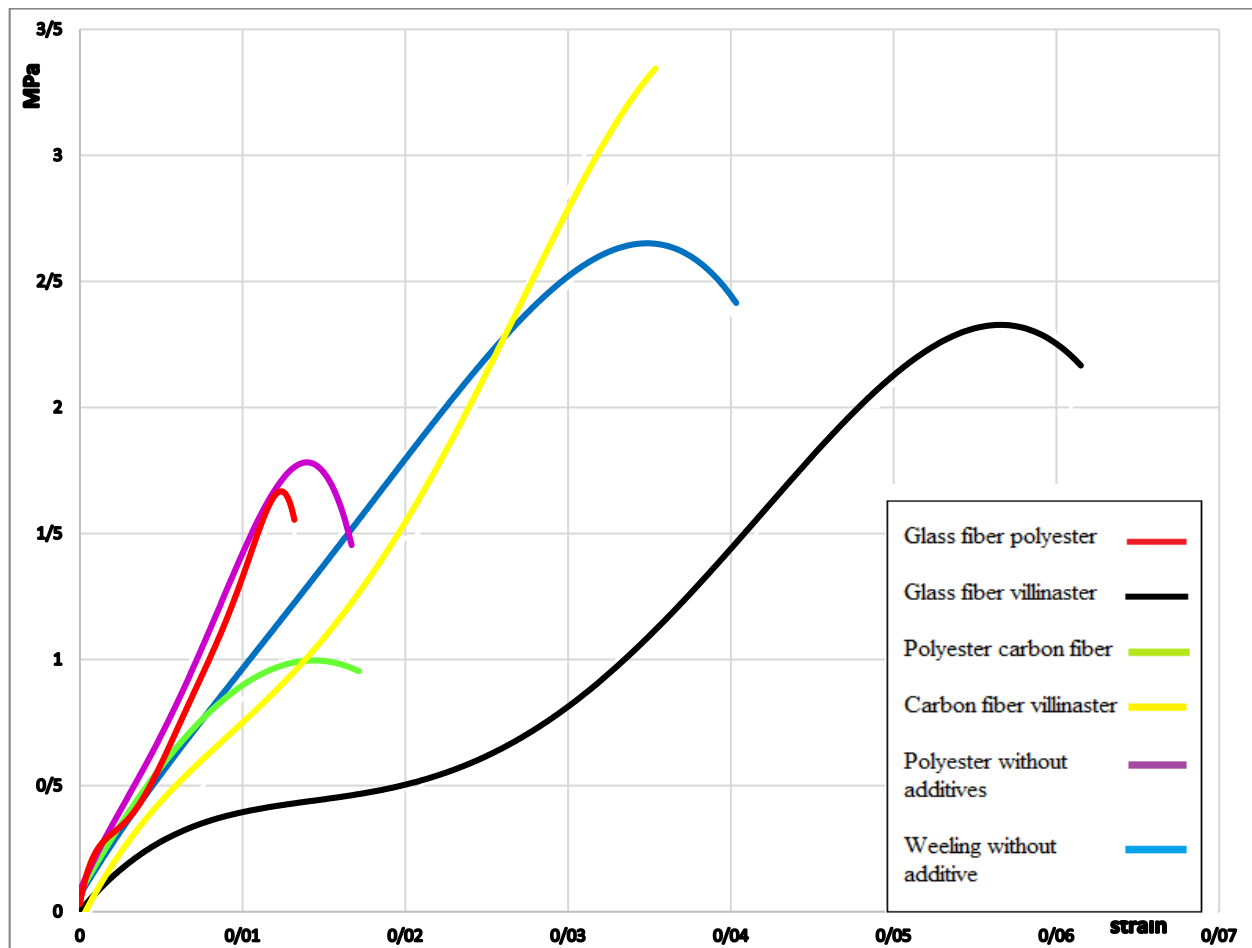
در این رابطه‌ها  $b$  و  $d$  به ترتیب عرض و ضخامت نمونه‌ها سنگ مصنوعی،  $L$  فاصله‌ی فک‌های زیرین،  $P$  نیروی خمش،  $S_{11}$  تنش طولی در هر لحظه از زمان خمش و  $m$  شیب نمودار تنش - کرنش در قسمت الاستیک می‌باشند.

## ۵. آزمایش خمش سه نقطه‌ای

آزمایش خمش (Three point flexural test) راهی ساده در تعیین شکل‌پذیری و ارزیابی کیفیت مواد، توسط توانایی آن‌ها در برابر مقاومت به ایجاد ترک یا ناهمواری‌های سطحی دیگر در طول یک دوره‌ی خمشی مداوم می‌باشد. برای تعیین مقاومت خمش سه نقطه‌ای، سنگ‌های مصنوعی در قالب ۱۶\*۱۶\*۴ ساخته شد (شکل ۷). با روابط ۱ و ۲ به ترتیب نیروی



شکل ۷. سنگ مصنوعی ساخته شده در قالب خمش سه نقطه‌ای و فک‌های دستگاه خمش



شکل ۸. نتایج آزمایش خمشی سه نقطه‌ای بر روی سنگ‌های مصنوعی ساخته شده با رزین وینیل استر و پلی استر با الیاف کربن و شیشه

وینیل استر نسبت به نمونه ساخته شده با رزین پلی استر تقریباً ۳/۱ برابر است. نمونه‌های ساخته شده با رزین ویلین استر و فاقد الیاف نسبت به نمونه‌های مشابه ساخته شده با رزین پلی-استر تقریباً ۱/۵ برابر مقاومت خمشی بیش تری دارند و نمونه‌هایی که با رزین ویلین استر و الیاف کربن ساخته شده‌اند نسبت به نمونه‌هایی که از رزین پلی استر ساخته شده‌اند به علت خاصیت کششی بالای الیاف کربن، کرنش بیشتری را تحمل می‌کند چرا که الیاف کربن ضریب الاستیک نسبتاً بالایی در مقایسه با الیاف شیشه دارد و زنجیر اصلی اپوکسی سازنده وینیل استر، موجب پیدایش چقرمگی و ازدیاد طول کششی و تحمل تنش بالاتر آن می‌شود. نوع شکست در سنگ‌های

#### ۶. بحث و بررسی نتایج

آنالیز SEM مکمل برای بخش مقطع نازک با توجه به بزرگنمایی بالا، تعیین درصد وزنی و اتمی عناصر سازنده و همچنین اندازه‌گیری قطر منافذ است. با توجه به ظرفیت خمشی بالای سنگ‌های مصنوعی و تعیین آن، که آن‌ها را نسبت به سنگ‌های طبیعی ارجحیت می‌دهد آزمایش خمشی سه نقطه‌ای صورت گرفت. نتایج آزمایش خمشی سه نقطه‌ای نشان می‌دهد که نمونه‌های تقویت شده با الیاف شیشه مقاومت خمشی استفاده شده از رزین ویلین استر نسبت به نمونه ساخته شده با رزین پلی استر تقریباً ۱/۱ برابر است. نمونه‌های تقویت شده با الیاف کربن، مقاومت خمشی استفاده شده از رزین

تایید کننده همین امر است. بر اساس آزمایش خمش سه نقطه‌ای نمونه ساخته شده با رزین ویلین استر و الیاف کربن بیشترین مقاومت خمشی و نمونه ساخته شده با رزین ویلین استر و الیاف شیشه بیشترین کرنش را در طول خمش تحمل کردند. همچنین نوع شکست و ترک‌ها در سنگ‌های تقویت شده به ترتیب شکننده و خمشی و در سنگ‌های بدون تقویت شکل-پذیر و خمشی برشی است.

### 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، اپراتور SEM دانشگاه شریف مهندس صفاری و خانم‌ها وقایع‌نگار و باباآدم به پاس تمام حمایت‌ها و همراهی سخاوت‌مندانه‌شان طی مراحل انجام این تحقیق، کمال تشکر و قدردانی دارم.

مصنوعی بدون تقویت، آزمایش شده در این تحقیق، از نوع شکست شکننده و در سنگ‌های مصنوعی تقویت شده از نوع شکست شکل‌پذیر می‌باشد. در نمونه‌های بدون تقویت و الیاف شیشه، آزمایش شده در این تحقیق ترک‌ها از نوع خمشی-برشی و در نمونه‌های تقویت شده با الیاف کربن ترک‌ها از نوع خمشی می‌باشد.

### ۷. نتیجه‌گیری

هدف از انجام این پژوهش بررسی تاثیرات الیاف کربن و الیاف شیشه بر افزایش ظرفیت خمشی سنگ‌های مصنوعی و مطالعه‌ی ساختار آن‌ها با استفاده از SEM می‌باشد. برای دست‌یابی به این اهداف نمونه سنگ‌های مصنوعی با رزین‌های پلی‌استر و ویلین استر، با الیاف شیشه، الیاف کربن و فاقد افزودنی ساخته شدند. نتایج آنالیز SEM نشان می‌دهد که سنگ مصنوعی ساخته شده با الیاف شیشه دارای منافذ بزرگتری نسبت به سایر نمونه‌ها می‌باشد و آزمایشات فیزیکی بخاطر این‌که نمونه سنگ‌های ساخته شده با الیاف شیشه تخلخل بیشتری دارند

### منابع

- باباآدم، ن، ۱۳۹۴. تاثیر خصوصیات زمین شناسی مهندسی سنگ دانه های سیلیسی بر ویژگی های مهندسی سنگ مصنوعی، پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.
- زیدآبادی نژاد، م، ۱۳۹۴، بررسی تراکم بافت بر استحکام کامپوزیت تهیه شده از پارچه الیاف شیشه تقویت شده با رزین اپوکسی، کنفرانس بین المللی علوم و مهندسی ۱۰ آذر، دبی - امارات
- سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۸۵. راهنمای طراحی و ضوابط اجرایی بهسازی ساختمان‌های بتنی موجود با استفاده از مصالح تقویتی FRP، نشریه شماره ۳۴۵.
- شاهدی فر، و، حاجی حسینی، م، امیری، ا، ۱۳۸۹. خواص و عملکرد کامپوزیت بر پایه رزین اپوکسی، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، گروه کامپوزیت، تهران دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجله علوم و تکنولوژی پلیمر، شماره ۳، صفحه ۲۱۱-۲۰۳، سال بیست و سوم
- غلامی، ع، اعلائی، ح، ۱۳۹۱. تأثیر الیاف کامپوزیتی کربن در افزایش ظرفیت خمشی تیرهای بتن مسلح با بتن ضعیف، پژوهشنامه زلزله شناسی و مهندسی زلزله، سال پانزدهم، شماره اول
- 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.
- Cruz, Juan., 2010. Process for manufacturing outdoor artificial stone boards with methacrylate resin by means of the vibro-compression under vacuum system. U.S. Patent Application 11/886,897, filed March 11.
- 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*.

- Gong, W., & Li, C., 2010. Multi-scale and anisotropic characterization of coal structure based on SEM image analysis. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 29(S1), 2681-2689.
- Kandelbauer, A., Tondi, G., Zaske, O. C., & Goodman, S. H., 2014. Unsaturated polyesters and vinyl esters. In *Handbook of Thermoset Plastics (Third Edition)* (pp. 111-172).
- Liu Hui., 2006. Preliminary Study on the Characteristic of Rock Microscopic Damage Based on the Technique of CT Image Processing under the Frost and Thaw Condition. Master Dissertation. Xi'an: Xi'an Electronic Science and Technology University Press, 3-10.
- 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.
- Passchier, C. W., & Trouw, R. A. J., 2005. *Microtectonics*, 366 pp.
- Quantum-Quartz, 2013. [www.wk.au/quantumquartz\\_technical\\_info\\_pdf](http://www.wk.au/quantumquartz_technical_info_pdf),
- Sakai, M. and Kenichiro, S., 2001. ARTIFICIAL STONE. Patent No US 6,309,562B1.
- Stfanidou, 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.
- Zanjani, J. S. M., Al-Nadhari, A. S., & Yildiz, M., 2018. Manufacturing of electroactive morphing carbon fiber/glass fiber/epoxy composite: Process and structural monitoring by FBG sensors. *Thin-Walled Structures*, 130, 458-466.
- Zhu, J., Imam, A., Crane, R., Lozano, K., Khabashesku, V. N., & Barrera, E. V., 2007. Processing a glass fiber reinforced vinyl ester composite with nanotube enhancement of interlaminar shear strength. *Composites Science and Technology*, 67(7-8), 1509-1517.

Archive of SID