

# بررسی مشخصات مکانیکی بتن پلیمری حاوی هیدروکسید آلومینیم با استفاده از مواد مضاف

علی حیدری\* (دانشیار)  
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شهرکرد  
طراوت شمس (دانشجوی دکتری)  
محمدرضا عدل پرور (دانشیار)  
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه قم

مهندسی عمران شریف، پاییز ۱۴۰۰ (۱۴۰۰)  
دردی ۲ - ۳۷، شماره ۳/۲، ص. ۱۲۷-۱۳۴، (پادداست نشی)

کورین نوعی سنگ مصنوعی است که بدون استفاده از سیمان تولید می‌شود و در واقع یک نوع بتن پلیمری است. برای تولید سنگ مصنوعی کورین از رزین پلی‌استر غیراشباع به عنوان چسباننده و پودر آلومینیوم تری‌هیدرات (ATH) به عنوان پرکننده استفاده می‌شود. از معایب سنگ کورین، می‌توان به قیمت بالا و مقاومت فشاری پایین آن اشاره کرد. در پژوهش حاضر، برای کاهش قیمت تمام شده کورین و افزایش مقاومت فشاری، مواد مضافی، از جمله: پودر ضایعات کاشی و سرامیک، پودر سنگ، گچ و سیمان استفاده شده است. در هر مرحله یکی از مواد مذکور، جایگزینی قسمتی از ATH شده است. سپس مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین مختلف ۱، ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ اندازه‌گیری شده است. نتایج به دست آمده نشان دادند که با جایگزینی ضایعات کاشی و سرامیک به میزان ۱۵٪، پودر سنگ ۶٪، گچ ۲۰٪ و سیمان ۵٪ نسبت به وزن ATH، مقاومت فشاری نمونه‌ها به میزان ۹/۲۰، ۱۶/۱۸ و ۲/۳۱ درصد افزایش یافته است.

واژگان کلیدی: سنگ مصنوعی، بتن پلیمری، کورین، رزین پلی‌استر غیراشباع، آلومینیوم تری‌هیدرات.

## ۱. مقدمه

سنگ‌های مصنوعی که اغلب به عنوان سنگ‌های مهندسی یا سنگ‌های مرکب شناخته می‌شوند، در چند سال گذشته ارزش تجاری بالا و تقاضای رو به رشدی را داشته‌اند.<sup>[۱]</sup> بتن معمولی پرتلند و بتن آسفالت به طور گسترده در مهندسی عمران و صنعت حمل و نقل استفاده می‌شوند. اما با گذشت زمان، با توجه به خواص فیزیکی و شیمیایی مواد، هر دو ماده مشکلات خاصی دارند. ماده‌ی اتصال‌دهنده اصلی یا چسب بتن، سیمان است که منجر به مقاومت کششی کم و تغییر شکل‌های کوچک می‌شود.<sup>[۲]</sup>

به علت مشکلات ذکر شده، پژوهشگران به دنبال بتنی برای جایگزین بتن‌های معمول شدند. بتن پلیمری با رزین پلی‌استر غیراشباع، نوعی سنگ مصنوعی است که با استفاده از رزین، شن و ماسه تولید می‌شود. در مقایسه با بتن معمولی، رزین به جای سیمان استفاده می‌شود. از جمله نقاط مثبت بتن پلیمری نسبت به بتن با سیمان پرتلند می‌توان به این موارد اشاره کرد: عمل‌آوری بتن با رزین سریع‌تر انجام

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳/۲/۱۳۹۹، اصلاحیه ۱۴/۱/۱۴۰۰، پذیرش ۲۴/۲/۱۴۰۰

DOI:10.24200/J30.2021.55519.2743

از مهم‌ترین مزایای بتن پلیمری است. در سال‌های اخیر، ژئوپلیمرها به عنوان گروه جدیدی از قیرهای سیمان سبز، توجه زیادی را به عنوان یک جایگزین سازگار با محیط‌زیست برای سیمان معمولی پرتلند (OPC) جلب کرده‌اند. بتن ژئوپلیمر تقویت شده با الیاف (FRGPC) به عنوان نوع جدیدی از بتن با ویژگی‌های شکل‌پذیری بالاتر نسبت به بتن معمولی شناخته می‌شود. مرادی‌خو و همکاران (۲۰۱۹)، الیاف هیبریدی پلی‌پروپیلن اصلاح شده با ۱۲ میلی‌متر و پلی‌الفین ۵۵ میلی‌متر را برای تولید نمونه‌های (FRGPC) مبتنی بر سنگ‌دانه‌های ریز (GGBFS) استفاده کردند و دریافتند که استفاده از الیاف هیبریدی باعث کاهش چگالی مخصوص و جذب آب، افزایش اندکی در مقاومت

heidari@sku.ac.ir  
ta.shams94@gmail.com  
mr.adlparvar@gmail.com

فشاری و بهبود قابل توجهی در مقاومت کششی و خمشی نمونه‌های (FRGPC) در مقایسه با نمونه‌های غیرفیبری می‌شود.<sup>[۶]</sup> کاهش جذب آب در این نوع از بتن‌های مذکور باعث افزایش دوام و عملکرد بتن می‌شود.

رزین در حالت مایع، فضای خالی منافذ سنگ را پر می‌کند که نه فقط باعث انسجام می‌شود، بلکه تداخل که همیشه در ذرات طبیعی به دلیل بافت و ساختار وجود دارد، را حذف می‌کند و در نتیجه جذب آب کمتر و مقاومت مکانیکی بالاتری به سنگ مصنوعی می‌دهد.<sup>[۷]</sup> کاهش درصد جذب آب، کارایی بتن در برابر دوره‌های یخبندان و ذوب را افزایش می‌دهد.

سنگ مصنوعی با توجه به انتخاب خرده سنگ و ترکیبی از مصالح مختلف، با ابعاد قابل تنظیم، مشابه به نوع سنگ خاص، دوام و خاصیت جذب آب اندک، طول عمر زیاد، نداشتن کانی‌های ضعیف می‌توانند در بسیاری از مشکلات مرمت‌سازی، قطعات گمشده یا شکسته شده جایگزین سنگ طبیعی شوند.<sup>[۹]</sup>

معمولاً حدود ۲۵٪ وزنی سنگ کورین رزین پلی‌استر غیراشباع و ۷۵٪ آن ATH است. سنگ مصنوعی کورین خواص ویژه‌ی، از جمله: آنتی باکتریال بودن، وزن حجمی کم، درصد جذب آب کم، و نمای زیبا دارد. قیمت بالای ATH از محبوبیت سنگ کورین کاسته است، لذا در پژوهش حاضر موادی جایگزین ATH شده است، تا علاوه بر کاهش قیمت آن، مقاومت فشاری آن نیز افزایش پیدا کند. مواد مضاف طوری انتخاب شدند که علاوه بر دسترس بودن، آزادی عمل برای انتخاب آن نیز برای تولیدکننده وجود داشته باشد. مواد جایگزین ATH، شامل: ماسه‌ی ریز، پودر ضایعات کاشی و سرامیک، سیمان و گچ است. یکی از مواد استفاده شده، پودر ضایعات کاشی و سرامیک بوده است که استفاده از آن علاوه بر حفظ محیط زیست، باعث کاهش قیمت تمام شده‌ی کورین می‌شود.

استفاده از مصالح قابل بازیافت در بتن، علاوه بر صرفه‌جویی در انرژی به بهبود خواص بتن نیز کمک می‌کند. مطالعات نشان داده است که استفاده از ضایعات کاشی و سرامیک در ترکیب‌های بتن، علاوه بر کمک به حفظ محیط زیست، تا ۲۰٪ تأثیر منفی در عملکرد بتن ندارد و همچنین استفاده از هر مقدار ضایعات کاشی در بتن، میزان جذب آب را کاهش می‌دهد.<sup>[۱۰]</sup> حیدری و همکاران (۲۰۱۸) نیز برای تولید سنگ‌دانه از مواد بازیافتی، نسبت‌های معینی از مصالح ساختمانی دورریختنی را آسیاب و مواد حاصل را در بتن استفاده کردند و دریافته‌اند که مخلوط سرامیک، سنگ و آجر به عنوان ماسه‌ی بازیافتی، جذب آب را بالا می‌برد.<sup>[۱۲]</sup> همچنین نتایج برخی مطالعات آزمایشگاهی (۲۰۱۷) نشان داده است که استفاده از نسبت شن و ماسه به سیمان ۱ و مواد ضایعاتی با نسبت وزن ۲۰٪ جایگزین مصالح طبیعی، باعث افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه می‌شود.<sup>[۱۳]</sup> لی و همکاران (۲۰۰۸)، نیز با استفاده از ضایعات شیشه‌ی پودر شده و ریزدانه‌ها و همچنین رزین پلی‌استر غیراشباع، سنگ مصنوعی جدیدی را در قالب دال ارائه کردند و عمل‌آوری آن را در شرایط خلأ و با ویرهی نمونه‌ها انجام دادند. ابعاد دال مورد نظر ۱۲۰×۱۲۰×۱۲۰ میلی‌متر بوده است. سرانجام مقاومت فشاری ۱۴MPa و وزن حجمی  $2/44 \text{ gr/cm}^3$  به دست آمد. از دیگر ویژگی‌های سنگ مصنوعی ذکر شده، دوام بالا نسبت به مصالحی همچون چوب، مقاومت در برابر آتش و سطحی براق است. تأکید ایشان استفاده از مواد ضایعاتی و دوام مصالح مصنوعی اشاره شده بوده است.<sup>[۱۴]</sup>

دال‌های سنگ مصنوعی امروزه به دلیل قدرت خمشی زیاد، جذب کم آب، تداخل اندک، و سایش پذیری کمتر، به‌طورگسترده به مواد ساختمانی بسیار مهم برای دیوارپوش و کف‌پوش ساختمان تبدیل شده است.<sup>[۱۵]</sup> دال سنگ مصنوعی، یکی از مصالح پرکاربرد و مهم در بین مصالح ساختمانی است. به دلیل عملکرد بسیار خوب، از جمله: مقاومت قابل توجه در برابر

سایش و تداخل کم و جذب آب و همچنین مقاومت خمشی بالا می‌تواند در کف‌سازی و پوشش دیوارها استفاده شود. مطالعات در زمینه‌ی سنگ مصنوعی نشان داده است که سنگ مصنوعی با ضایعات لجنی کارخانه‌ی سنگ، مقاومت فشاری بالاتر و وزن حجمی کمتری را نسبت به سنگ تراورتن دارد، بنابراین علاوه بر اصلاح خواص سنگ تراورتن، از ضایعات کارخانه‌ی برش سنگ نیز استفاده شده است، که این امر نقش مؤثری در بازتولید مواد ضایعاتی داشته است.<sup>[۱۷]</sup> از جمله سنگ‌های مصنوعی دیگر می‌توان به سنگی اشاره کرد که ۸۰٪ وزنی آن از ضایعات سنگ مرمر خردشده و ۲۰٪ وزنی آن، رزین پلی‌استر غیراشباع بوده و مقاومت فشاری ۲۵MPa برای آن به دست آمده است.<sup>[۱]</sup> پنگ و همکارش (۲۰۱۸)، نیز با استفاده از سیلیس به عنوان ریزدانه و کوارتز به عنوان درشت دانه و رزین پلی‌استر غیراشباع، سنگ مصنوعی جدیدی ابداع کردند، که مقاومت فشاری ۱۷/۹MPa و وزن مخصوص  $2/4 \text{ gr/cm}^3$  داشته است.<sup>[۱۵]</sup>

در حال حاضر تمایل زیادی برای استفاده‌ی مجدد از پسماندهای صنعتی به منظور کاهش آثار زیست‌محیطی وجود دارد. با استفاده از پسماند صنایع آجر و رزین پلی‌استر غیراشباع، سنگ مصنوعی جدیدی به دست آمده است که در برابر حمله‌ی هیدروکلرید اسید مقاوم است و می‌تواند بار سیکنی تا ۳MPa را تحمل کند.<sup>[۱۸]</sup> پژوهش حاضر در ۴ فاز انجام شده است. برای این منظور، ابتدا نمونه‌ی شاهد بدون در نظر گرفتن مواد مضاف ساخته شده است. سپس در فاز اول، از ضایعات کاشی و سرامیک؛ در فاز دوم از سیمان؛ در فاز سوم، از گچ؛ و در فاز چهارم، از ماسه‌ی ریز (پودرسنگ) به عنوان جایگزینی بخشی از ATH استفاده شده است. لازم به ذکر است در پژوهش حاضر چسباننده، رزین بوده و از آب استفاده نشده و استفاده از سیمان و گچ فقط به عنوان پرکننده بوده است. در تمام بخش‌ها، رزین پلی‌استر غیراشباع پس از ترکیب با ماده‌ی مضاف و ATH ترکیب و در مرحله‌ی آخر ترکیب، شتاب‌دهنده نیز اضافه شده است. سپس در دمای محیط مواد در قالب ریخته شده و نتایج نشان داده است که درصد بهینه‌ی استفاده از مواد مضاف برای ضایعات کاشی ۱۵٪، سیمان ۵٪، گچ ۲۵٪، و ماسه‌ی ریز ۶۰٪ بوده است. همچنین مشاهده شد که در درصد‌های بهینه از مواد مضاف، مقاومت فشاری افزایش یافته، ولیکن وزن حجمی تغییر خاصی نشان نداده است.

## ۲. مواد

مواد استفاده شده در پژوهش حاضر، شامل: رزین پلی‌استر غیراشباع، به همراه سخت‌کننده و شتاب‌دهنده، ATH، سیمان، گچ، پودر سنگ و پودر کاشی و سرامیک بوده است.

### ۱.۲. رزین پلی‌استر غیراشباع

سخت‌کننده‌ی استفاده شده در پژوهش حاضر متیل اتیل کتون پراکسید با فرمول شیمیایی  $\text{CH}_2\text{H}_{16}\text{O}_2$  و وزن مولکولی آن  $174/24 \text{ gr/mol}$  و شتاب‌دهنده‌ی استفاده شده‌ی کبالت نیز با فرمول  $[\text{CH}_2(\text{CH}_2)_3\text{CH}(\text{C}_2\text{H}_5)\text{COO}]_2\text{CO}$  بوده است. رزین پلی‌استر غیراشباع تولید شرکت رزیتان و شتاب‌دهنده و سخت‌کننده، تولید شرکت FRP چین بوده است. همه‌ی محصولات ذکر شده از شرکت شیمی افسون تهیه شده‌اند (جدول ۱).

جدول ۱. خصوصیات رزین پلی استر غیراشباع. [۱۹-۲۵]

روش تست	واحد	مقدار	خصوصیت
	MPa	۶۰-۷۰	مقاومت کششی
ASTMD۶۳۸	GPa	۲-۳	مدول کششی
	%	۴-۶	درصد ازدیاد طول
ASTMD۷۹۰	GPa	۲-۳	مدول خمشی
ASTMD۲۵۶۶	%	۴	درصد جمع شدگی
ASTMD۲۵۸۳	Barcol	۳۵-۴۰	سختی
ASTMD۶۴۸	C°	۵۵-۶۵	دمای تغییر شکل
ASTMD۵۷۰	%	۱۳/۰	جذب آب

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی ATH.

درصد (OH) <sub>۲</sub>	درصد سفیدی	میانگین سایز (میکرون)	شکل فیزیکی	شکل ذره	رنگ	وزن مخصوص	pH
۹۹/۷%	۹۳-۹۶%	۲۵ ± ۳	پودر	شش ضلعی	سفید	۲/۴۲	۱۰ - ۹

جدول ۳. خصوصیات شیمیایی پودر کاشی.

ترکیب شیمیایی	AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	LOI
مقدار (درصد)	۱۸/۵۳	۴/۸۱	۱/۵۷	۲/۰۱	۱/۶۳	۰/۷۲	۰/۷۳۷	۰/۰۷۸	۰/۰۳۴	۰/۰۰۶	۰/۴۸

جدول ۴. خصوصیات فیزیکی پودر کاشی.

مقدار	آزمایش
۰/۲	میزان رطوبت (%)
۰/۰۸	انبساط در آزمایش اتوکلاو
۲۱	مانده روی الک مش ۳۲۵ به روش تر (%)
۲/۵۷	جرم حجمی (gr/cm <sup>3</sup> )
۳۴/۱	سطح ویژه به روش BET (m <sup>2</sup> /gr)

## ۶.۲. گچ

گچی که در پژوهش حاضر استفاده شده است، تولید کارخانه‌ی گچ فارسان و وزن مخصوص آن  $85 gr/cm^3$  بوده است.

## ۳. روش ساخت

پژوهش حاضر به ۴ فاز تقسیم شده است: در فاز اول، مواد مضاف استفاده شده، ضایعات کاشی و سرامیک انتخاب و جهت بررسی بهتر خواص آن‌ها، پودر کاشی با درصدهای وزنی ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ جایگزین ATH شده است (جدول ۶). در فاز دوم، از سیمان با درصدهای وزنی ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ جهت جایگزین ATH (جدول ۷) و در فاز سوم، از ماسه‌ی ریز با درصدهای وزنی ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ جهت جایگزین ATH استفاده شده است (جدول ۸). در فاز چهارم، از گچ با درصدهای وزنی ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ جهت جایگزین ATH استفاده شده است (جدول ۹). در نهایت، برخی خواص مکانیکی، مانند: مقاومت فشاری و وزن حجمی نمونه‌ها در سنین ۱، ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه اندازه‌گیری و نتایج به دست آمده با نتایج نمونه‌ی شاهد مقایسه شده است. بدین ترتیب براساس آیین‌نامه‌ی ۲۵ACI طرح اختلاط جهت ساخت نمونه‌ها تهیه و برای هر طرح اختلاط، ۶ نمونه‌ی ۵×۵ سانتی‌متر جهت آزمایش مقاومت فشاری و تعیین وزن مخصوص ساخته شدند. در ابتدا، ۲۵٪ وزنی رزین با ۲٪ وزنی رزین سخت‌کننده مخلوط شده است. پس از مخلوط کردن رزین و سخت‌کننده، ATH و ماده‌ی مضاف با درصد وزنی تعیین شده به مخلوط اضافه شدند و در پایان ۱٪ وزنی رزین، شتاب‌دهنده نیز به مواد اضافه شد و ترکیب حاصل به مدت ۵ الی ۶ دقیقه مخلوط و نمونه‌ها قالب‌گیری و ویریه شدند. عمل‌آوری نمونه‌ها در دمای محیط C° ۲۵-۲۰ صورت گرفت. پس از قالب‌گیری حدوداً ۳ تا ۴ ساعت مدت زمان خشک شدن نمونه‌ها بود و پس از زمان مذکور به راحتی نمونه‌ها از قالب

## ۲.۲. آلومینیوم تری هیدرات (ATH)

آلومینیوم تری هیدرات با فرمول شیمیایی  $Al(OH)_3$  یکی از مواد اصلی سنگ کورین است. ATH استفاده‌شده در پژوهش حاضر، تولید شرکتی از کشور چین بوده است که خصوصیات آن در جدول ۲ ارائه شده است.

## ۳.۲. پودر ضایعات کاشی و سرامیک

یکی از موادی که جایگزین ATH شده است، ضایعات کاشی و سرامیک کارخانه‌ی ارزنگ شهرکرد است. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مواد مذکور در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده‌اند.

## ۴.۲. پودر سنگ

پودر سنگ استفاده شده در پژوهش حاضر، وزن مخصوص ظاهری  $1/6 gr/cm^3$  داشته است. بزرگ‌ترین سایز پودر سنگ استفاده شده، ۴۲۵ میکرون بوده است.

## ۵.۲. سیمان

در پژوهش حاضر از سیمان پرتلند تیپ II کارخانه‌ی سیمان شهرکرد استفاده شده است که مشخصات شیمیایی آن در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵. خصوصیات شیمیایی سیمان.

LOI	SO <sub>۲</sub>	MgO	CaO	Fe <sub>۲</sub> O <sub>۳</sub>	AL <sub>۲</sub> O <sub>۳</sub>	SiO <sub>۲</sub>	پارامتر (درصد)
≤ ۱/۳	≤ ۲	≤ ۱/۷	۶۴/۷	۴/۱	۵	۲۱/۵	سیمان

جدول ۹. طرح اختلاط سنگ کورین با ترکیبات گچ.

نام طرح	ATH (%)	رزین (%)	سخت‌کننده (%)	شتاب‌دهنده ضایعات کاشی (%)
CaS۱°	۶۵	۲۵	۲	۱
CaS۲°	۵۵	۲۵	۲	۱
CaS۲۵	۵۰	۲۵	۲	۱
CaS۳°	۴۵	۲۵	۲	۱
CaS۴°	۳۵	۲۵	۲	۱
CaS۵°	۲۵	۲۵	۲	۱
CaS°	۷۵	۲۵	۲	۱

جدول ۶. طرح اختلاط سنگ کورین با ترکیبات ضایعات کاشی.

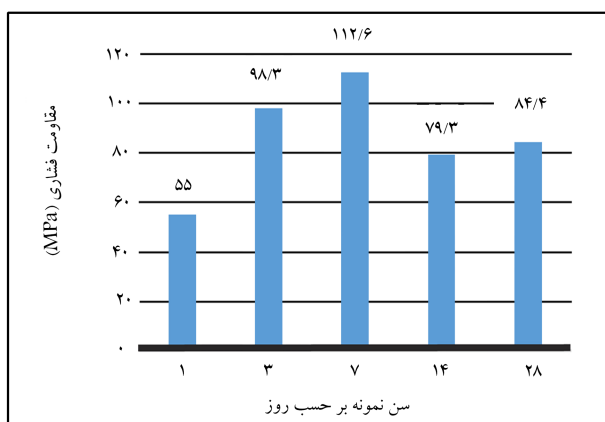
نام طرح	ATH (%)	رزین (%)	سخت‌کننده (%)	شتاب‌دهنده ضایعات کاشی (%)
S۱°	۶۵	۲۵	۲	۱
S۱۵	۶۰	۲۵	۲	۱
S۲°	۵۵	۲۵	۲	۱
S۳°	۴۵	۲۵	۲	۱
S۴°	۳۵	۲۵	۲	۱
S۵°	۲۵	۲۵	۲	۱
S°	۷۵	۲۵	۲	۱

جدول ۷. طرح اختلاط سنگ کورین با ترکیبات سیمان.

نام طرح	ATH (%)	رزین (%)	سخت‌کننده (%)	شتاب‌دهنده ضایعات کاشی (%)
C۱°	۶۵	۲۵	۲	۱
C۲°	۵۵	۲۵	۲	۱
C۲۵	۵۰	۲۵	۲	۱
C۳°	۴۵	۲۵	۲	۱
C۴°	۳۵	۲۵	۲	۱
C۵°	۲۵	۲۵	۲	۱
C°	۷۵	۲۵	۲	۱

جدول ۸. طرح اختلاط سنگ کورین با ترکیبات ماسه.

نام طرح	ATH (%)	رزین (%)	سخت‌کننده (%)	شتاب‌دهنده ضایعات کاشی (%)
Sa۱°	۶۵	۲۵	۲	۱
Sa۲°	۵۵	۲۵	۲	۱
Sa۳°	۴۵	۲۵	۲	۱
Sa۴°	۳۵	۲۵	۲	۱
Sa۵°	۲۵	۲۵	۲	۱
Sa۶°	۱۵	۲۵	۲	۱
Sa۷°	۵	۲۵	۲	۱
Sa°	۷۵	۲۵	۲	۱



شکل ۱. مقاومت فشاری سنگ کورین در سنین مختلف.

#### ۱.۱.۴. نتایج مقاومت فشاری سنگ کورین بدون مواد جایگزین ATH (نمونه‌ی شاهد)

در شکل ۱ ملاحظه می‌شود که با افزایش سن نمونه تا ۷ روز، مقاومت فشاری روند صعودی دارد و رشد مقاومت فشاری نشانگر عملکرد مثبت رزین و ATH است. میزان رشد مقاومت فشاری از سن ۱ تا ۳ روز بسیار زیاد است و این امر نشان می‌دهد که اوج فعالیت رزین و ATH در سنین ۲ و ۳ روز است. اگرچه در سن ۷ روز نیز مقاومت فشاری نسبت به سن ۳ روز افزایش پیدا کرده است، ولی رشد مقاومت به اندازه‌ی بازه‌ی ۲ تا ۳ روز نیست. پس از آن در سنین ۱۴ و ۲۸ روز، مقاومت فشاری روند نزولی دارد. بیشترین مقاومت فشاری سنگ کورین، در سن ۷ روز برابر ۱۱۲/۶ MPa و در سن ۲۸ روز ۸۴/۴ MPa است. این در حالی است که وزن مخصوص نمونه‌ی شاهد  $2400 \text{ kg/m}^3$  بوده است.

#### ۲.۱.۴. نتایج مقاومت فشاری سنگ کورین با جایگزین پودر کاشی به جای ATH

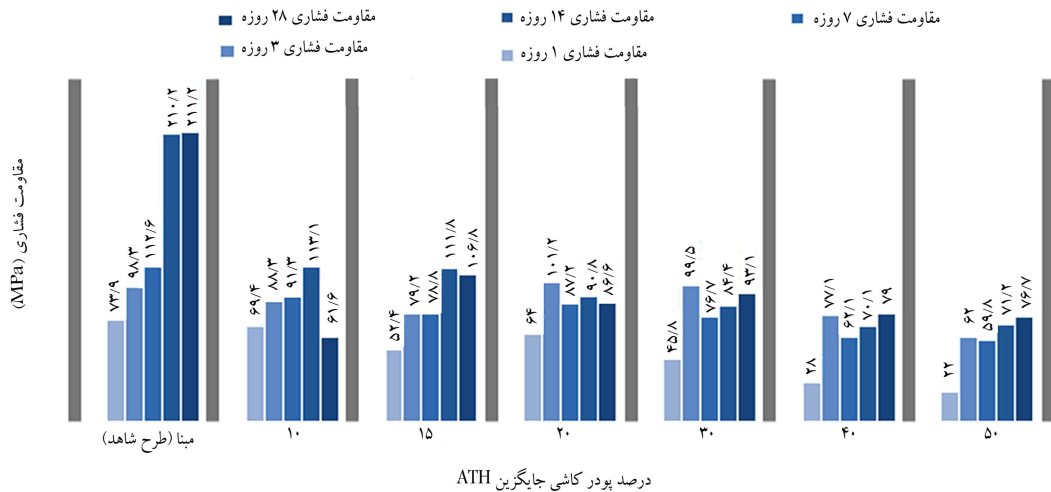
با دقت در شکل ۲ می‌توان دریافت که بیشترین رشد مقاومت فشاری در بازه‌ی سن ۲ تا ۳ روز است. پس از سن ۳ روز، مقاومت فشاری در سن ۷ روز کاهش و مجدداً در سنین ۱۴ و ۲۸ روز افزایش یافته است. با افزایش درصد وزنی پودر کاشی ملاحظه می‌شود که مقاومت فشاری در همه‌ی سنین کاهش یافته است. بیشترین مقاومت فشاری، در سن ۲۸ روز برای نسبت وزنی ۱۵٪ پودر کاشی، برابر

جدا شدند. مقاومت فشاری نمونه‌ها در سن ۱، ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه با استفاده از دستگاه جک بتن‌شکن و با سرعت  $2400 \text{ N/S}$  اندازه‌گیری شد.

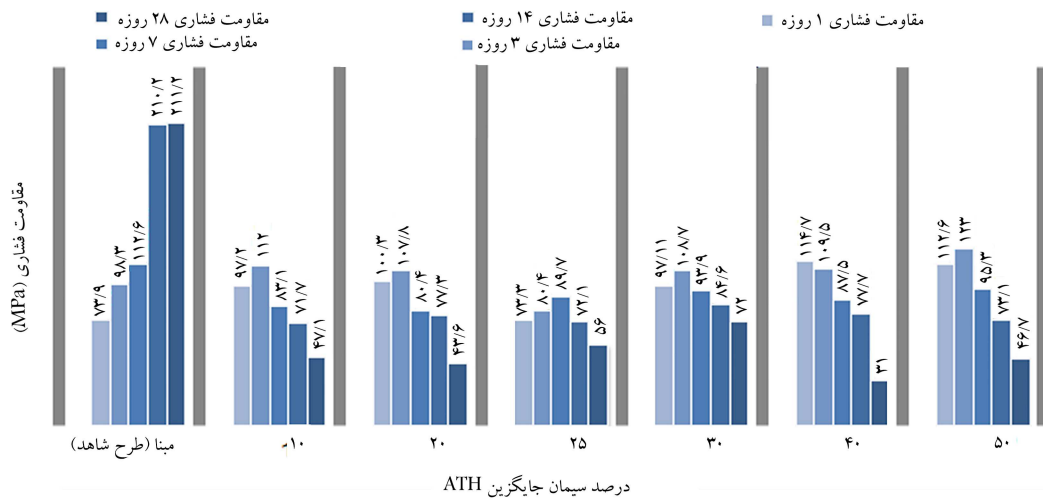
#### ۴. نتایج

##### ۱.۴. مقاومت فشاری

مقاومت فشاری سنگ کورین در سنین ۱، ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه در شکل ۱ و سپس برای هر فاز نمودارهای جداگانه ارائه شده است.



شکل ۲. مقاومت فشاری سنگ کورین با ترکیب پودر کاشی برای درصد‌های وزنی مختلف در سنین: ۱، ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه.



شکل ۳. مقاومت فشاری سنگ کورین با ترکیب سیمان برای درصد‌های وزنی مختلف در سنین: ۱، ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه.

تقریباً در همه‌ی سنین برابر بوده است. بیشترین مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز مربوط به طرح اختلاط شامل ۵٪ سیمان، برابر ۱۲۲/۶ MPa بوده است، و این در حالی است که مقاومت فشاری نمونه‌ی شاهد در سن ۲۸ روز، ۸۴/۴ MPa بوده است. این میزان افزایش در مقاومت فشاری، بهترین نتیجه در بین همه‌ی مواد مضاف بوده است.

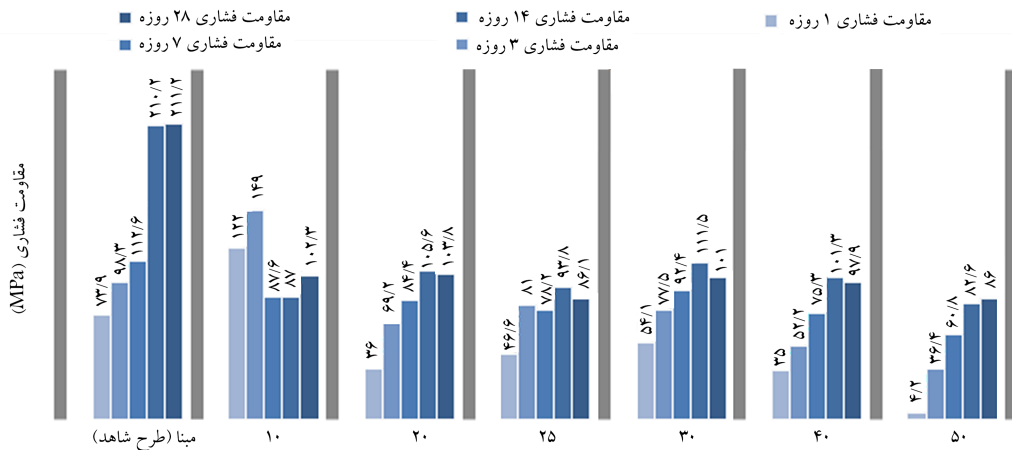
این در حالی است که مقاومت فشاری نمونه‌ی شاهد در سن ۲۸ روز، ۸۴/۴ MPa بوده است، که نشانگر تأثیر مطلوب پودر کاشی در سنگ کورین است.

### ۳.۱.۴. نتایج مقاومت فشاری سنگ کورین با جایگزین سیمان به جای

#### ATH

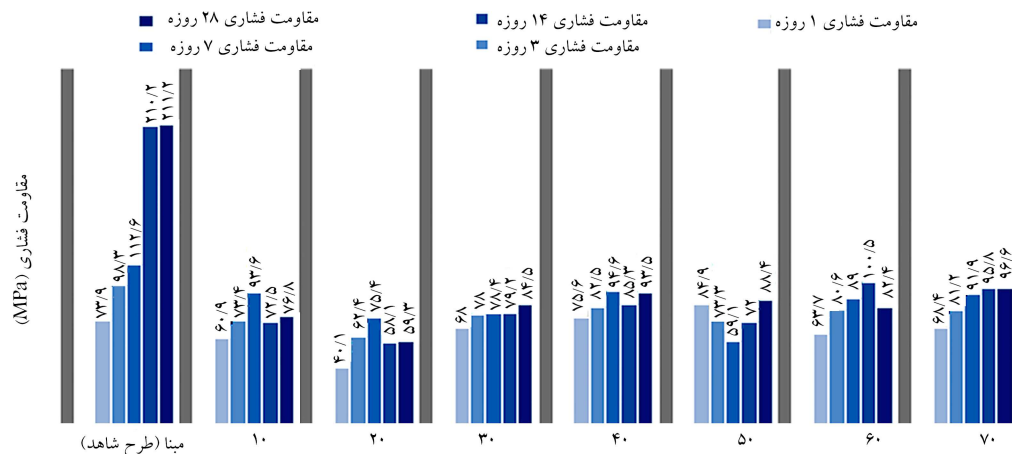
۴.۱.۴. نتایج مقاومت فشاری سنگ کورین با جایگزین گچ به جای ATH به‌طورکلی می‌توان گفت با افزایش درصد گچ مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. سرعت رشد مقاومت فشاری در بازه‌ی ۲ تا ۳ روز بیشتر از سنین دیگر قابل محسوس است، بدین جهت که واکنش گچ و رزین و ATH در بازه‌ی زمانی اخیر به اوج خود می‌رسد. با دقت در شکل ۴ می‌توان دریافت که به‌طورکلی با افزایش سن نمونه، مقاومت فشاری نیز افزایش یافته است. ولی در نمونه‌های شاهد بعد از سن ۷ روز کاهش مقاومت فشاری مشاهده می‌شود. تأثیر مطلوب گچ در سنگ مصنوعی مذکور باعث شده است تا روند صعودی مقاومت فشاری با افزایش سن نمونه ادامه پیدا کند. بیشترین مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز مربوط به طرح اختلاط شامل ۲۰٪ گچ، برابر ۱۰۳/۸ MPa بوده است. این در

مطابق شکل ۳، با افزایش درصد سیمان، به‌طورکلی مقاومت فشاری روند صعودی داشته است، که نشانگر تأثیر مثبت سیمان و رزین و ATH است. مقاومت فشاری در درصد‌های جایگزین سیمان ۱۰، ۲۰، ۲۵، ۳۰ در سن ۱۴ روزه بیشتر از سن ۲۸ روزه و در طرح اختلاط دیگر تقریباً مقاومت فشاری ۱۴ و ۲۸ روز برابر بوده‌اند، به این معنا که نمونه‌ها بیشینه‌ی مقاومت خود را در سن ۱۴ روز به‌دست می‌آورند. در درصد‌های جایگزین سیمان از ۱۰ تا ۳۰ درصد، مقاومت فشاری ۲۸ روزه کمتر از مقاومت فشاری ۱۴ روزه بوده است، در حالی که با افزایش درصد سیمان و عبور از ۴۰٪، مقاومت فشاری ۲۸ روزه بیشتر از مقاومت فشاری ۱۴ روزه شده است؛ بدین معنا که با افزایش درصد سیمان، روند افزایشی مقاومت فشاری ادامه پیدا کرده است. با دقت در نمودار شکل ۳ می‌توان دریافت که سرعت رشد مقاومت فشاری



درصد گچ جایگزین ATH

شکل ۴. مقاومت فشاری سنگ کورین با ترکیب گچ برای درصدهای وزنی مختلف در سنین: ۱، ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه.



درصد ماسه جایگزین ATH

شکل ۵. مقاومت فشاری سنگ کورین با ترکیب ماسه برای درصدهای وزنی مختلف در سنین: ۱، ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه.

است. طبق آزمایش صورت گرفته، وزن حجمی نمونه شا هد  $1/71 \text{ gr/cm}^3$  بوده است. وزن حجمی سنگ کورین با مواد مضاف در شکل‌های ۶ الی ۹ مشاهده می‌شود. در تمامی فازهای آزمایش با افزایش درصد مواد مضاف، وزن حجمی نیز افزایش پیدا کرده و وزن حجمی در تمام طرح اختلاط‌ها به میزان کمی بیشتر از وزن حجمی نمونه شاهد بوده است که این اختلاف قابل چشم‌پوشی است.

## ۵. بررسی اقتصادی

استفاده از مواد مضاف در بتن پلیمری علاوه بر کاهش قیمت و کاهش هزینه‌ها، موجب صرفه‌جویی در مصرف انرژی، کمک به برگرداندن مواد بدون کاربرد در چرخه‌ی باز تولید می‌شود. ضایعات کاشی و سرامیک در هیچ فرایند تولیدی و مصرفی کاربردی ندارند و معمولاً در حاشیه‌ی شهرها انباشته می‌شوند. از طرفی قیمت بالای سنگ کورین باعث شده است تا از سنگ کورین استفاده‌های زیادی نشود. با جایگزین کردن پودر کاشی به جای ATH می‌توان علاوه بر کاهش قیمت سنگ کورین و بهبود برخی از خواص مکانیکی آن، از لطمه به محیط زیست نیز جلوگیری کرد. در

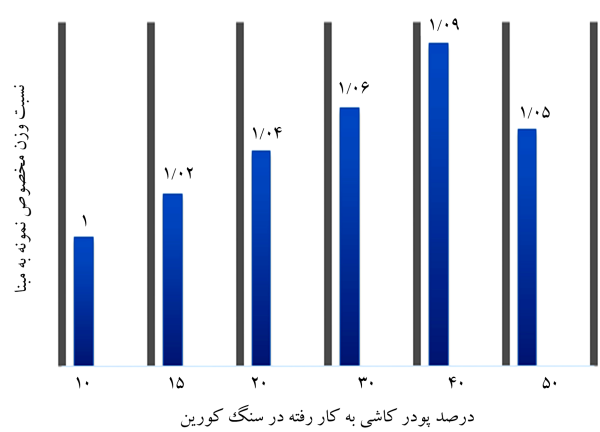
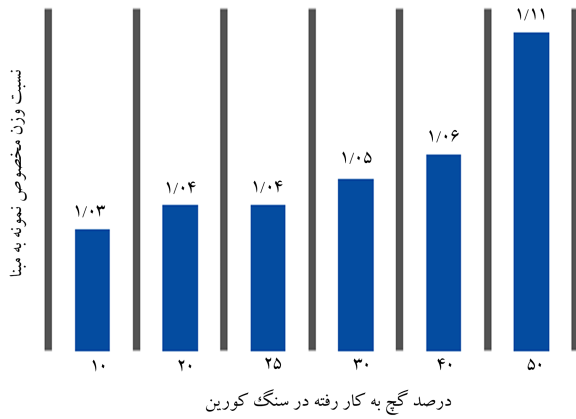
حالی است که مقاومت فشاری نمونه شاهد در سن ۲۸ روز،  $84/4 \text{ MPa}$  بوده است.

### ۵.۱.۴. نتایج مقاومت فشاری سنگ کورین با ترکیب‌های ماسه

با ملاحظه در شکل ۵، سرعت رشد مقاومت فشاری در تمام سنین تقریباً برابر بوده است. مقاومت فشاری در طرح اختلاط شامل ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد ماسه در سن ۱۴ روز کمتر از سن ۷ روز بوده و با افزایش نسبت ماسه در طرح اختلاط، روند صعودی مقاومت فشاری ادامه پیدا کرده است. در نمونه‌ی شاهد نیز پس از سن ۷ روز مقاومت فشاری در سن ۱۴ روز کاهش یافته است. بیشترین مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز مربوط به طرح اختلاط شامل ۷۰٪ ماسه، برابر  $96/6 \text{ MPa}$  و مقاومت فشاری نمونه‌ی شاهد در سن ۲۸ روز  $84/4 \text{ MPa}$  بوده است که مشاهده می‌شود مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش یافته است.

### ۲.۴. نتایج وزن حجمی

یکی از ویژگی‌های مطلوب سنگ مصنوعی کورین، پایین بودن وزن حجمی آن است، لذا آزمایش تعیین وزن حجمی سنگ کورین با مواد مضاف اندازه‌گیری شده

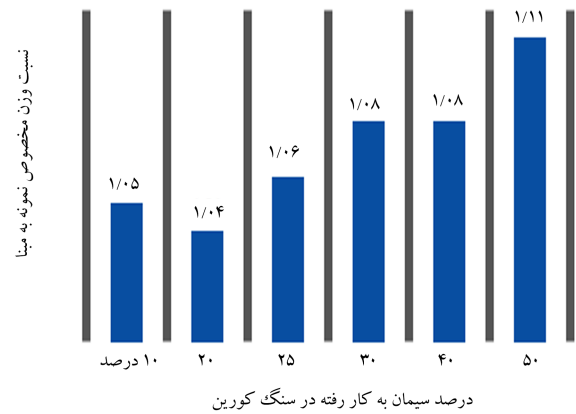


شکل ۹. نسبت وزن حجمی سنگ کورین با درصدهای وزنی مختلف از گچ به وزن مخصوص طرح شاهد.

شکل ۶. نسبت وزن حجمی سنگ کورین با درصدهای مختلف پودر کاشی به وزن مخصوص طرح شاهد.

جدول ۱۰. محاسبه‌ی هزینه‌ی تمام‌شده‌ی پودر کاشی و ATH.

۰	قیمت هر تن کاشی ضایعاتی درجه ۶
۳۶۳۰۰۰ تومان	هزینه‌ی آسیاب کاشی هر تن
۴۵۰۰۰۰ تومان	هزینه‌ی حمل و بارگیری هر تن
۸۱۳۰۰۰ تومان	مجموع هزینه‌ی پودر کاشی هر تن
۱۸۵۰۰۰۰۰۰ تومان	هزینه‌ی تولید و حمل یک تن ATH
۱۸۴۱۸۷۰۰۰ تومان	تفاوت قیمت هر تن پودر کاشی و ATH



شکل ۷. نسبت وزن حجمی سنگ کورین با درصدهای وزنی مختلف از سیمان به وزن مخصوص طرح شاهد.

## ۶. نتیجه‌گیری

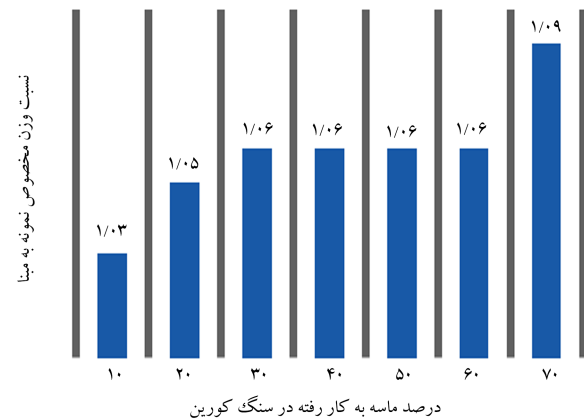
در پژوهش آزمایشگاهی حاضر، برخی خواص مکانیکی سنگ مصنوعی کورین بررسی و سپس با جایگزین کردن مواد مضاف، خواص سنگ کورین ارزیابی شده است. مطالعه‌ی حاضر در ۴ فاز صورت گرفته است. در هر فاز، ماده‌ی مضاف با نسبت‌های وزنی مختلف جایگزین ATH و مقاومت فشاری و وزن مخصوص اندازه‌گیری شده است. براساس آزمایش‌های انجام‌گرفته، این نتایج به‌دست آمده است:

۱. در سنگ کورین با ترکیب‌های پودر کاشی مشاهده شد که بهترین مقاومت فشاری در طرح اختلاط شامل: ۲۵٪ رزین، ۱۵٪ پودر کاشی و ۶۰٪ ATH است. مقاومت فشاری این ترکیب در سن ۲۸ روز در مقایسه با مقاومت فشاری سنگ کورین (نمونه‌ی شاهد)، ۲۰٪/۹٪ رشد داشته و همچنین وزن حجمی آن ۲٪ افزایش یافته است. و این در حالی است که پودر کاشی نسبت به سنگ کورین، توجه اقتصادی دارد و این مقدار افزایش در وزن حجمی نسبت به افزایش مقاومت فشاری و کاهش قیمت، قابل چشم‌پوشی است.

۲. بیشترین مقاومت فشاری در سنگ کورین با ترکیب سیمان مربوط به ۵۰٪ سیمان و ۲۵٪ ATH بوده است. در مقایسه با مقاومت فشاری سنگ کورین با ترکیب سیمان و نمونه‌ی شاهد نیز می‌توان گفت مقاومت فشاری ۳۱/۱۵٪ افزایش و وزن حجمی نیز ۱۰٪ افزایش یافته است.

۳. بیشترین مقاومت فشاری در سنگ کورین با ترکیب‌های گچ مربوط به ۲۰٪ گچ و ۵۵٪ ATH بوده است. افزایش مقاومت فشاری در سنگ کورین با ترکیب گچ نسبت به نمونه‌ی شاهد ۱۸/۶۸٪ و وزن حجمی به ۴/۴۹٪ بوده است.

۴. در مورد سنگ کورین با ترکیب‌های ماسه می‌توان گفت بیشترین مقاومت فشاری مربوط به ۷۰٪ ماسه و ۵٪ ATH بوده است. افزایش مقاومت فشاری در



شکل ۸. نسبت وزن حجمی سنگ کورین با درصدهای وزنی مختلف از ماسه به وزن مخصوص طرح شاهد.

جدول ۱۰، هزینه‌های یک تن ATH و یک تن پودر کاشی ضایعاتی مقایسه شده است. با توجه به تفاوت مذکور در قیمت، به خوبی می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از پودر کاشی ضایعاتی در سنگ مصنوعی کورین، توجه اقتصادی دارد. قابل ذکر است دیگر مواد مضاف نیز نسبت به ATH توجه اقتصادی دارند.

در پژوهش حاضر، سیمان است. استفاده از سیمان در سنگ کورین، مقاومت فشاری را تا ۳۱/۱۵٪ افزایش می‌دهد، هر چند وزن حجمی نیز به میزان ۱۰٪ افزایش یافته است، ولی با این افزایش مقاومت و کاهش هزینه‌ها، این مقدار افزایش وزن حجمی قابل چشم‌پوشی است.

سنگ کورین با ترکیب ماسه نسبت به نمونه‌ی شاهد، ۱۲/۶۳٪ و وزن حجمی به ۶/۵۹٪ بوده است.

۵. می‌توان گفت بهترین مواد برای جایگزین ATH از بین ترکیب‌های استفاده شده

### منابع (References)

- Eduardo, C. and Ribeiro, G. "Influence of compaction pressure and particle content on thermal and mechanical behavior of artificial marbles with marble waste and unsaturated polyester", *Material Research*, **18**(2), pp. 283-290 (2015).
- Yousefieh, N., Joshaghani, A. and Hajibandeh, E. "Influence of fibers on drying shrinkage in restrained concrete", *Construction and Building Material*, **148**, pp. 833-845 (2017).
- Li, L.G. and Kwan, A.K.H. "Adding limestone fines as cementitious paste replacement to improve tensile strength, stiffness and durability of concrete", *Cement and Concrete Composition*, **60**, pp. 17-24 (2015).
- Gao, Y., Romero, P., Zhang, H. and et al. "Unsaturated polyester resin concrete: A review", *Construction and Building Materials*, **228**, pp. 1-18 (2019).
- Hashmpour, M. and Heidari, A. "Investigation of mechanical properties of self-compacting polymeric concrete with backpropagation network", *International Journal of Engineering*, **31**(6), pp. 903-909 (2018).
- Moradikhou, A.B., Esparham, A. and Jamshidi Avanaiki, M. "Effect of hybrid fibers on water absorption and mechanical strengths of geopolymer concrete based on blast furnace slag", *Civil Engineering and Materials Application*, **3**(4), pp. 193-201 (2019).
- Carvalho E.A.S., Vilela, N.D.F., Monteiro, S.N. and et al. "Novel artificial ornamental stone developed with quarry waste in epoxy composite", *Materials Research*, **21**(1), pp. (2018).
- Sepahvand, Z. and Barani, K. "Production of artificial stone from dimension stone waste", *Amirkabir Journal of Civil Engineerig*, **50**(3), pp. 453-460 (2018).
- Stfanidou M., Pacht V. and Papayianni I. "Design and testing of artificial stone for the restoration of stone elements in monuments and historic buildings", *Construction and Building Materials*, **93**, pp. 957-965 (2015).
- Heidari, A., Hashempour, M. and Tavakoli, D. "Use of waste materials in concrete: A review", *Journal of Science and Technology*, **26**(2), pp. 499-522 (2018).
- Heidari, A. and Tavakoli, D. "A study of the mechanical properties of ground ceramic powder concrete incorporating nano-SiO<sub>2</sub> particles", *Construction and Building Materials*, **38**, pp. 255-264 (2013).
- Heidari, A., Hashempour, M., Javdanian, H. and et al. "Investigation of mechanical properties of mortar with mixed recycled aggregates", *Asian Journal of Civil Engineering*, **19**(5), pp. 583-593 (2018).
- Heidari, A., Hashempour, M. and Tavakoli, D. "Using of Backpropagation neural network in estimation of compressive strength of waste concrete", *Soft Computing in Civil Engineering*, **1**(1), pp. 54-64 (2017).
- Lee, M., Ko, Ch., Chang, F. and et al. "Artificial stone slab production using waste glass, stone fragments and vacuum vibratory compaction", *Cement and Concrete Composites*, **30**(7), pp. 583-587 (2008).
- Peng, L. and Qin, Sh. "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**, pp. 273-280 (2018).
- Shishegaran, A., Saeedi, M., Mirvaland, S. and et al. "The mechanical strength of the artificial stones, containing the travertine wastes and sand", *Materials Research and Technology*, **11**, pp. 1688-1709 (2021).
- Sarami, N. and Mahdavian, L. "Comparison of artificial stone made from sludge stone with travertine stone waste of stone cutting factory", *Engineering Research in Africa*, **23**, pp. 64-71 (2015).
- Gomes, M., Carvalho, E., Sobrinho, S. and et al. "Production and characterization of a novel artificial stone using brick residue and quarry dust in epoxy matrix", *Material Research and Technology*, **7**(4), pp. 492-498 (2018).
- DiCiccio, A.M. and Coates, G.W. "Ring-opening copolymerization of maleic anhydride with epoxides", *Advanced Materials Science and Technology* (2017).
- American Society for Testing and Materials (ASTM), "Standard test method for tensile properties of plastics", ASTM D 638 (2014).
- American Society for Testing and Materials (ASTM), "Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials", ASTM D 790 (2003).
- American Society for Testing and Materials (ASTM), "Standard test method for linear shrinkage of cured thermosetting casting resins during cure", ASTM D2566 (1993).
- American Society for Testing and Materials (ASTM), "Standard test method for indentation hardness of rigid plastics", ASTM D2583 (1995).
- American Society for Testing and Materials (ASTM), "Standard test method for deflection temperature of plastics under flexural load in the edgewise position", ASTM D648 (2018).
- American Society for Testing and Materials (ASTM), "Standard test method for water absorption of plastics", ASTM D570 (2018).