



## شناسایی خواص فیزیکی - مکانیکی دوغاب پایه سیمانی حاوی مواد معدنی و استفاده از آن در تقویت تیرهای بتن مسلح

جواد سبزی، محمدرضا اصفهانی\*

دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۰  
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۱۴  
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۲۹  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۷/۲۴

### کلمات کلیدی:

دوغاب پایه سیمانی  
مواد معدنی  
تیر  
بتن مسلح  
تقویت

**خلاصه:** این پژوهش یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی خصوصیات دوغاب‌های پایه سیمانی حاوی مواد معدنی مختلف (غبار کوره آهن‌گدازی، گل قرمز، پودر مرمر و پودر شیشه) می‌باشد که در این دوغاب‌ها درصدهای مختلف وزنی از مواد معدنی جایگزین بخشی از سیمان شده است. به منظور بررسی دقیق خصوصیات مکانیکی دوغاب‌ها، بر روی تمامی مصالح استفاده شده آزمایش‌های آنالیز شیمیایی بر اساس روش فلورسانس اشعه ایکس، تعیین اندازه ذرات توسط دستگاه آنالیز لیزری ذرات، تجزیه و تحلیل ریزساختار با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و آزمایش طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس انجام گرفت. بر روی دوغاب‌های پایه سیمانی، آزمایش‌های مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز، مقاومت کششی در سنین ۷ و ۲۸ روز، جذب آب ۳۰ دقیقه‌ای، ۲۴ ساعته و ۷۲ ساعته در سن ۹۰ روز و مقاومت در برابر سولفوریک اسید در سن ۲۸ روز انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از پودر مرمر برای جایگزینی بخشی از سیمان به مقدار ۱۵ درصد، مقاومت فشاری را به مقدار قابل توجهی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه افزایش می‌دهد. همچنین استفاده از پودر شیشه به مقدار ۵ و ۱۵ درصد و گل قرمز به مقدار ۵ درصد برای جایگزینی بخشی از سیمان منجر به افزایش مقاومت کششی می‌شود. همچنین به منظور بررسی دقیق‌تر دوغاب پایه سیمانی در تقویت اعضای بتنی، کاربرد یکی از دوغاب‌ها در تقویت خمشی تیرهای بتنی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور سه تیر بتن مسلح ساخته شده و تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌ای قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که ظرفیت باربری تیر تقویت شده با دوغاب پایه سیمانی مسلح به شبکه الیافی تقریباً مشابه تیر تقویت شده با چسب اپوکسی به همراه ورق CFRP بوده و تقریباً ۶۰ درصد از تیر بدون تقویت بیشتر می‌باشد. همچنین استفاده از دوغاب پایه سیمانی برای تقویت، مشکلات مربوط به چسب اپوکسی مانند عدم امکان نصب بر روی سطوح خیس و مقاومت پایین در برابر آتش سوزی را برطرف می‌نماید.

### ۱- مقدمه

[۱]. از طرفی، امروزه افزایش آلاینده‌های زیست‌محیطی و مشکلات ناشی از آن‌ها توجه عده‌ی زیادی از محققین را به خود جلب کرده است. یکی از آلوده کننده‌ترین صنایع به لحاظ تولید حجم بالای گاز کربن دی‌اکسید، صنعت تولید سیمان به عنوان اصلی‌ترین ترکیب در ساختار بتن می‌باشد [۲]. استفاده از مواد با خاصیت سیمانی به عنوان درصدی از سیمان در ترکیب بتن و ملات علاوه بر مرتفع کردن مشکلات مربوط به آلودگی‌های ناشی از تولید انبوه سیمان، می‌تواند نتایج مطلوبی از جمله افزایش مقاومت، بهبود کارایی و دوام بهتر را نیز به همراه داشته باشد [۳].

اکثر کشورهای صنعتی به منظور مقابله با مشکل خرابی بتن و به منظور ترمیم و مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی روی به ساخت ملات‌های ترمیمی پیش‌ساخته آورده‌اند. اکثر ملات‌های ترمیمی موجود مانند سیستم اپوکسی، رزین اکریلیک و پلیمرهای پایه سیلیکونی با محیط‌زیست ناسازگار بوده و

طی سال‌های گذشته، زیرساخت‌های بتنی در سراسر جهان رشد چشمگیری داشتند. این عمدتاً به دلیل اثر بخشی و موفقیت قابل توجه بتن در مقایسه با مواد موجود در سطح جهانی و عملکرد دوام قابل توجه می‌باشد. با وجود تمامی مزایای بتن، این ماده دارای نارسایی‌هایی به خصوص در زمینه دوام بلندمدت در محیط‌های با شرایط جوی نامناسب و همچنین تولید گازهای گلخانه‌ای در فرآیند ساخت آن می‌باشد. قرارگیری بتن در محیط‌های خورنده باعث آسیب دیدگی مواد تشکیل دهنده بتن شده که می‌تواند منجر به خرابی سازه بتنی گردد. این موضوع اهمیت هزینه‌های تعمیر و نگهداری در سراسر جهان و همچنین کاهش منابع طبیعی و تجدیدنپذیر را نشان می‌دهد

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: esfahani@um.ac.ir



با نمونه شاهد دارد. دودو و همکاران [۸] نشان دادند که افزودن ۵٪ گل قرمز منجر به کیفیت برتر یا مساوی با ملات شاهد از حیث خصوصیات مکانیکی می‌گردد.

استفاده از ضایعات پودر مرمر و پودر شیشه به عنوان جایگزین بخشی از سیمان توسط برخی از پژوهشگران مورد بررسی قرار گرفته است. رانا و همکاران [۹] گزارش کردند که جایگزینی سیمان با مواد معدنی پودر مرمر به میزان ۱۰ درصد، تأثیر قابل توجهی بر روی دوام و خصوصیات مکانیکی بتن ندارد. همچنین آن‌ها گزارش کردند که جایگزینی سیمان با پودر مرمر بیش از ۱۰ درصد، منجر به کاهش دوام و خصوصیات مکانیکی بتن می‌گردد. بر اساس مطالعه لو و همکاران [۱۰] کارایی ملات معماری، وابستگی زیادی به اندازه ذرات و مورفولوژی پودر شیشه استفاده شده دارد. جایگزینی سیمان با پودر شیشه در ملات یا بتن می‌تواند به طور قابل توجهی مقاومت در برابر نفوذ آب [۱۱] و حمله سولفوریک اسید [۱۲] را بهبود بخشد.

از طرفی، تقویت سازه‌های بتنی به وسیله مواد کامپوزیتی راه‌حلی مقرون به صرفه، ساده و کارآمد به حساب می‌آید. در دو دهه‌ی گذشته پلیمرهای مسلح الیافی (FRP<sup>۵</sup>) توجهات بسیار زیادی را برای تقویت اعضای بتنی به خود جلب کرده است که منجر به افزایش روزافزون این مواد در هر دو حوزه تحقیقاتی و اجرایی شده است [۱۳-۱۵]. از جمله دلایل اصلی محبوبیت FRP می‌توان به وزن سبک، مقاومت و سختی بالا، مقاومت در برابر خوردگی و انعطاف‌پذیری در اجرا اشاره کرد [۱۶-۱۸]. در مقابل، FRPها ویژگی‌های نامطلوبی نیز دارند که محققان را به سمت یافتن مواد جدید سوق داده است. از جمله این کاستی‌ها می‌توان به عدم امکان نصب بر روی سطوح خیس، مقاومت پایین در برابر آتش‌سوزی، سختی نصب در دمای پایین و مقاومت کم در برابر اشعه UV اشاره کرد. حال آن که مواد پایه سیمانی مسلح الیافی با بهره‌گیری از ماتریس‌های غیرارگانیک (ملات سیمانی) تمام مشکلات فوق‌الذکر را برطرف کرده‌اند [۱۹].

همان‌طور که پیشتر به آن اشاره شد، با توجه به حجم بالای سازه‌های قدیمی نیازمند ترمیم و نیاز به تولید انبوه دوغاب‌های ترمیمی برای بازسازی این سازه‌ها و از آنجایی که جایگزینی سیمان با مواد معدنی می‌تواند راهکار بسیار مناسبی برای کاهش مشکلات مربوط به مصرف سیمان باشد، در این پژوهش سعی شده است تا دوغاب‌های پایه سیمانی ساخته شده با مواد معدنی مورد بررسی قرار گیرند. با توجه به سابقه پژوهش‌های مشابه بر روی بتن‌ها و ملات‌های حاوی درشت‌دانه (ماسه)، هدف اصلی از پژوهش حاضر

اثرات نامطلوبی بر روی آن دارند. حال آن که استفاده از ضایعات صنایع ملات‌های ترمیمی علاوه بر کاهش نیاز به منابع بکر و کاهش قیمت مواد خام می‌تواند خصوصیات منحصر به فردی را به ترکیب ملات‌های ترمیمی بیافزاید. نتایج تحقیقات گذشته حاکی از آن است که استفاده مناسب از ضایعات صنایع می‌تواند منجر به ساخت بتن‌هایی با خواص مکانیکی و دوام برتر گردد، حال آن که استفاده از این مواد در ملات‌های ترمیمی نیز می‌تواند منجر به دستیابی به ملاتی ارزان گردد [۱]. پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهند که محصولات جانبی برخی از صنایع و یا برخی از پوزولان‌ها که از طبیعت به دست می‌آیند شامل غبار کوره آهن‌گدازی (EAFD<sup>1</sup>)، گل قرمز (RM<sup>2</sup>)، پودر مرمر (MP<sup>3</sup>) و پودر شیشه (GP<sup>4</sup>) می‌توانند به عنوان ماده جایگزین سیمان برای ساخت ملات‌های پایه سیمانی مورد استفاده قرار گیرند.

غبار کوره آهن‌گدازی یکی از محصولات فرعی صنایع فولاد است که هر ساله مقادیر زیادی از آن در دنیا تولید می‌شود. غبار کوره قوس الکتریکی، یک زباله غنی از فلز می‌باشد که در فرآیند ساخت فلز در کوره قوس الکتریکی تولید می‌شود [۴]. برخی از پژوهشگران گزارش کرده‌اند که نمونه‌های حاوی تا ۵٪ غبار کوره آهن‌گدازی رفتار مکانیکی برتری را در مقایسه با نمونه‌های مرجع نشان می‌دهند. با این حال هنگامی که نسبت جایگزینی به ۱۵٪ افزایش می‌یابد، مقاومت فشاری تا ۲۰٪ کاهش می‌یابد [۵]. داسیلوا و همکاران [۴] تأثیر غبار کوره آهن‌گدازی از طریق جایگزین کردن آن با مواد سیمانی اضافی در نسبت‌های مختلف آب به سیمان را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که در بیشتر موارد، استفاده از ۵٪ غبار کوره آهن‌گدازی برای جایگزینی سیمان منجر به افزایش مقاومت فشاری نسبت به ملات‌های فاقد این ماده می‌گردد.

گل قرمز تولید شده در فرآیند آلومینا (روش بایر) نمونه‌ای از رسوب‌های صنعتی می‌باشد. اسنف و همکاران [۶] نشان دادند که گل قرمز به طور قابل توجهی فرآیند هیدراتاسیون را به تأخیر نمی‌اندازد. همچنین نمونه‌های سخت شده حاوی گل قرمز، جذب آب بالاتر و مقاومت مکانیکی پایین‌تری را با افزایش میزان گل قرمز نشان دادند. لو و همکاران [۷] نشان دادند که مخلوط‌های خمیر سیمانی حاوی ۱۵ درصد گل قرمز خشک شده در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت فشاری بالاتری در سن ۲۸ روزه در مقایسه

- 1 Electric Arc Furnace Dust
- 2 Red Mud
- 3 Marble powder
- 4 Glass Powder

جدول ۱. مشخصات شیمیایی مواد سیمانی (تعیین شده توسط تجزیه و تحلیل XRF)

Table 1. Chemical composition of cementitious materials

ترکیب (%)	سیمان	میکرو سیلیس	پودر سنگ	غبار کوره آهن گدازی	گل قرمز	پودر مرمر	پودر شیشه
SiO <sub>2</sub>	۲۱/۴	۹۰-۹۵	۲/۱	۴/۵	۱۳/۴	۰/۱	۶۱/۶
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۴/۳	۰/۶-۱/۲	۰/۶	۰/۳	۱۶/۹	۰/۱	۰/۷
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳/۱	۰/۳-۱/۳	۰/۱	۵۳/۳	۲۳/۸	۰/۲	۰/۲
CaO	۶۱/۴	۰/۵-۱/۵	۵۴/۲	۱۰/۵	۱۸/۳	۵۵/۶	۱۴/۴
SO <sub>3</sub>	۲/۰	---	---	۰/۶	۰/۵	---	۰/۲
MgO	۲/۴	۰/۵-۲	۰/۱	۴/۰	۱/۸	۰/۱	۳/۳
K <sub>2</sub> O	---	۰/۲-۰/۵	۰/۱	۵/۷	۰/۵	---	۰/۵
MnO <sub>2</sub>	---	۰/۰۲-۰/۰۷	<۰/۰۱	۰/۸	۰/۱	---	---
Na <sub>2</sub> O	---	۰/۳-۰/۵	۰/۱	۳/۴	۴/۴	<۰/۰۱	۷/۷
ZnO	---	---	---	۱/۱	---	---	---
L.O.I	۱/۱	۰/۴-۳	۴۲/۴	۱۵/۵	۱۴/۹	۴۳/۸	۱۱/۱
TiO <sub>2</sub>	---	---	۰/۱	۰/۱	۵/۲	---	---
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	---	---	---	۰/۱	---	---	---
Cl	---	---	---	۰/۱	---	---	<۰/۰۱
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	---	۰/۰۴	۰/۲	<۰/۰۱	۰/۲	---	<۰/۰۱
C <sub>3</sub> A	۴/۳	---	---	---	---	---	---
CeO <sub>2</sub>	---	---	---	---	---	---	۰/۳
C	---	۰/۲-۰/۴	---	---	---	---	---
La&Lu	---	---	---	<۰/۰۱	---	---	<۰/۰۱

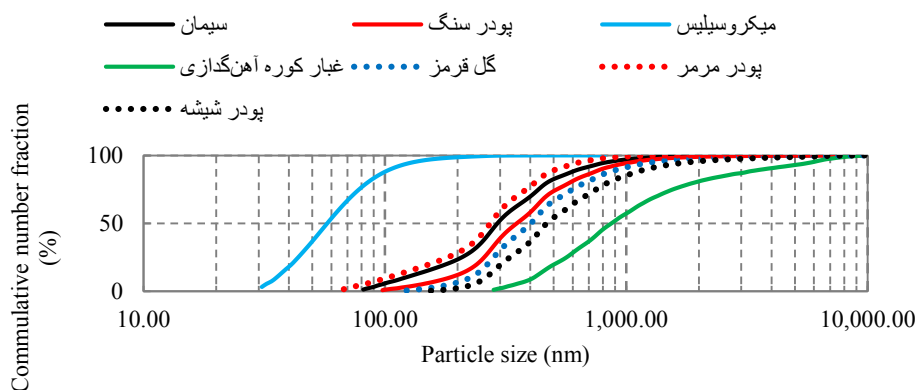
۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح

مصالح مورد استفاده در مطالعه حاضر برای ساخت دوغاب پایه سیمانی شامل سیمان تیپ ۲ مشهد، میکروسیلیس، پودر سنگ، غبار کوره آهن گدازی، گل قرمز، پودر مرمر، پودر شیشه و آب می‌باشد. غبار کوره آهن گدازی توسط مجتمع فولاد خراسان (واقع در شهر نیشابور)، گل قرمز از کارخانه آلومینای جاجرم (واقع در استان خراسان شمالی)، پودر مرمر از سنگبری بهبودی واقع در جاده شاندیز و پودر شیشه از کارخانه آینه رنگین توحیدی (واقع در مشهد) تأمین گردید. نتایج آنالیز شیمیایی برای مصالح ذکر شده در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مشهد از روش فلورسانس اشعه ایکس (XRF<sup>1</sup>) به دست آمده و در جدول ۱ خلاصه شده است. نتایج آنالیز شیمیایی نشان

بررسی ملات‌هایی می‌باشد که تنها حاوی ریزدانه می‌باشند (دوغاب پایه سیمانی)، لذا در کنار سیمان تنها از مواد معدنی با اندازه ذرات مشابه سیمان استفاده شده است. همچنین به منظور بررسی کاربردی بودن دوغاب‌های پایه سیمانی ساخته شده، سه تیر بتن مسلح طراحی شده و تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌ای قرار گرفتند. در این تیرها، دو نمونه کنترل یکی بدون تقویت و دیگری تقویت شده با ورق‌های پلیمری مسلح الیافی (CFRP) و چسب اپوکسی ساخته شدند. در نمونه سوم (نمونه مورد بررسی) ورق‌های CFRP به کمک دوغاب پایه سیمانی منتخب به تیر چسبانده شد. در نهایت عملکرد تیر تقویت شده با دوغاب پایه سیمانی به همراه شبکه الیافی در مقایسه با تیر تقویت نشده و تیر تقویت شده با چسب اپوکسی به همراه پلیمر مسلح الیافی سنجیده شده است.

1 X-ray Fluorescence



شکل ۱. نمودار تعیین اندازه ذرات مصالح استفاده شده

Fig. 1. Particle size curve of the materials

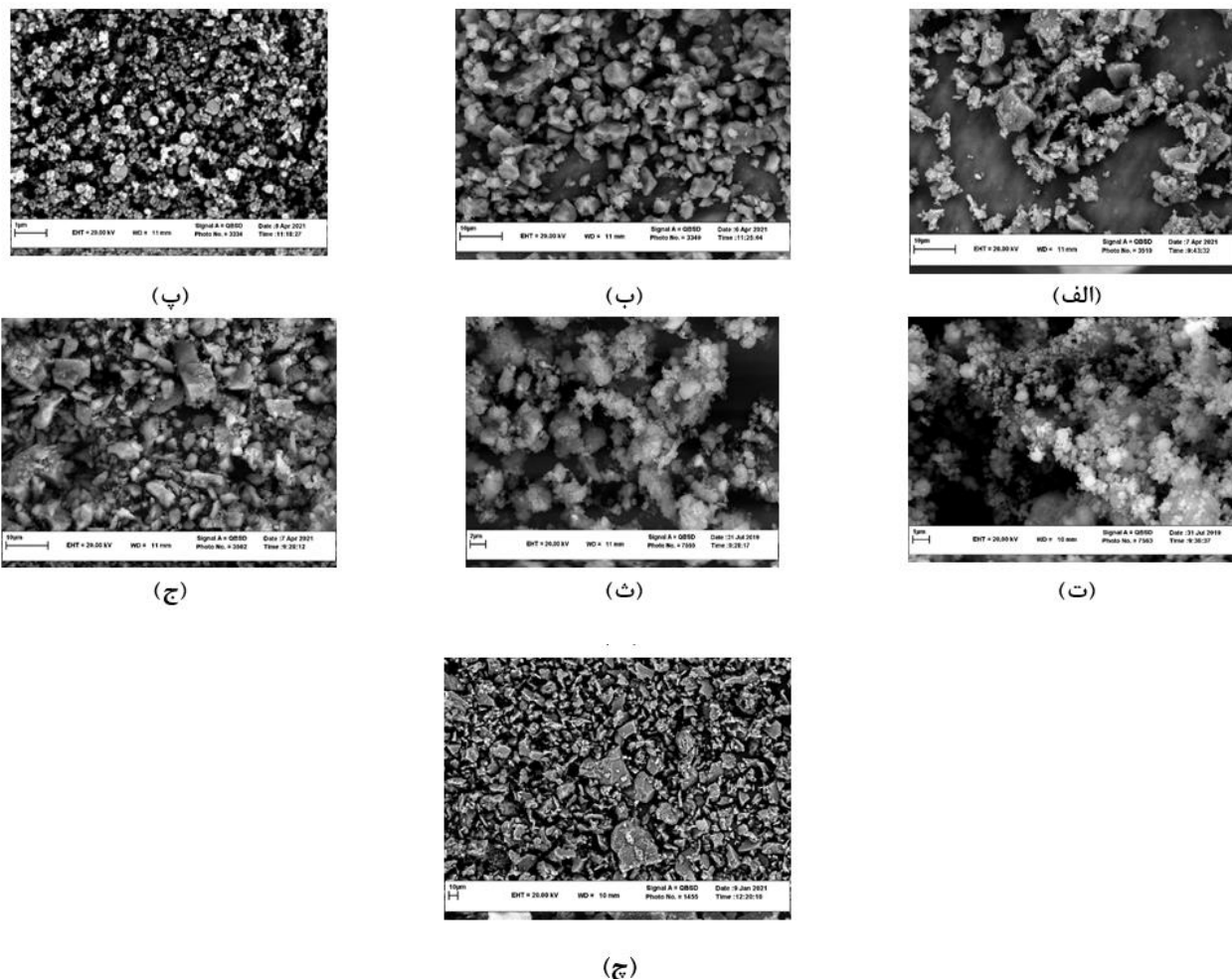
فردوسی مشهد به دست آمده و به ترتیب در شکل‌های ۲-الف تا ۲-ج ارائه شده است. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌گردد، ذرات سیمان، پودر سنگ، پودر مرمر و پودر شیشه دارای سطوحی به شکل چند ضلعی نامنظم و ذرات میکروسیلیس و غبار کوره آهن‌گدازی به صورت کروی شکل می‌باشند. همچنین مشاهده می‌شود که برخی از ذرات گل قرمز به شکل کروی شکل بوده، در حالی که برخی دیگر دارای سطوحی به شکل چند ضلعی نامنظم می‌باشند. نتایج ارائه شده برای سیمان با پژوهش انجام شده توسط شابر و همکاران [۲۰]، میکروسیلیس با پژوهش فارس و همکاران [۲۱]، غبار کوره آهن‌گدازی با پژوهش داسیلوا و همکاران [۴]، گل قرمز با پژوهش دودو و همکاران [۸]، پودر مرمر با پژوهش کابیر و ویاس [۲۲] و پودر شیشه با پژوهش انجام شده توسط پاتل و همکاران [۲۳] مطابقت دارند.

در پژوهش حاضر، مواد معدنی مختلف (غبار کوره آهن‌گدازی، گل قرمز، پودر مرمر و پودر شیشه) با درصد‌های وزنی ۵٪ و ۱۵٪ جایگزین سیمان شده و در مجموع ۹ دوغاب پایه سیمانی مختلف را تشکیل داده‌اند. ترکیب تمام دوغاب‌ها ساخته شده در جدول ۲ ارائه شده است. در تمامی طرح‌های اختلاط الیاف پلی پروپیلین به میزان ۲ درصد حجمی استفاده گردید. لازم به ذکر است که با جایگزینی مواد معدنی مختلف به عنوان بخشی از سیمان اسلامپ دوغاب‌ها تغییر می‌یابد، لذا برای ثابت نگه داشتن روانی تمام دوغاب‌ها در یک محدوده مشخص، مقدار فوق روان کننده به مقدار اندکی متناسب با نوع و میزان جایگزینی مواد معدنی تغییر داده شد.

می‌دهد که ترکیبات اصلی در سیمان، ۶۱/۴ درصد اکسید کلسیم (CaO) و ۲۱/۴ درصد سیلیس (SiO<sub>2</sub>) بوده، در میکروسیلیس ترکیب اصلی ۹۰-۹۵ درصد سیلیس (SiO<sub>2</sub>) و در پودر سنگ ترکیب اصلی ۵۴/۲ درصد اکسید کلسیم (CaO) می‌باشد. همچنین در جدول ۱ مشاهده می‌شود که ترکیبات اصلی در گل قرمز، ۲۳/۸ درصد هماتیت (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)، ۱۸/۳ درصد اکسید کلسیم (CaO) و ۱۶/۹ درصد آلومینا (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) می‌باشد، این در حالیست که ترکیبات اصلی در غبار کوره آهن‌گدازی ۵۳/۳ درصد هماتیت (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)، در پودر مرمر ۵۵/۶ درصد اکسید کلسیم (CaO) و در پودر شیشه ۶۱/۶ درصد سیلیس (SiO<sub>2</sub>) می‌باشد. توزیع اندازه ذرات سیمان، پودر سنگ، میکروسیلیس و مواد معدنی که توسط دستگاه آنالیز لیزری ذرات (PSD<sup>1</sup>) تعیین شده است در شکل ۱ ارائه شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، میانگین اندازه ذرات سیمان، پودر سنگ، میکروسیلیس، غبار کوره آهن‌گدازی، گل قرمز، پودر مرمر و پودر شیشه به ترتیب برابر با ۳۷۴، ۴۷۰، ۶۸، ۱۵۶۰، ۵۶۴، ۳۱۲ و ۷۳۰ نانومتر می‌باشد. تفاوت در توزیع اندازه ذرات مواد سیمانی پارامتری مهم در طراحی مخلوط است که استفاده صحیح از آن می‌تواند منجر به پر شدن حفره‌ها در بتن سخت شده و بهبود دوام گردد.

تجزیه و تحلیل ریزساختار مصالح استفاده شده با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM<sup>2</sup>) در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه

- 1 Particle Size Distribution
- 2 Scanning Electron Microscope



شکل ۲. تصاویر SEM مربوط به مصالح استفاده شده، (الف) سیمان، (ب) پودر سنگ، (پ) میکروسیلیس، (ت) غبار کوره آهن‌گدازی، (ث) گل قرمز، (ج) پودر مرمر و (چ) پودر شیشه

Fig. 2. SEM images of materials, (a) cement, (b) stone powder, (c) silica fume, (d) electric arc furnace dust, (e) red mud, (f) marble powder and (g) glass powder

## ۲-۲- آزمایش‌ها

در این مطالعه خصوصیات مکانیکی نمونه‌ها با استفاده از آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی و ویژگی‌های دوام به وسیله‌ی جذب آب و حمله اسید سولفوریک مورد بررسی قرار گرفت. روش‌های آزمایش مورد استفاده در جدول ۳ ارائه شده است. تهیه دوغاب‌های پایه سیمانی در یک مخلوط کن ۳۰ لیتری انجام گرفت. مخلوط‌کن دارای سرعت‌های چرخش متفاوت (آرام، متوسط و تند) بود. در مرحله اول آب با فوق روان‌کننده مخلوط می‌گردد. سپس میکروسیلیس، پودر سنگ و سیمان به مخلوط‌کن با چرخش آرام اضافه می‌گردد. بعد از بک‌نواخت شدن مخلوط الیاف عمل‌آوری شده به

در جدول ۲، CO نشان دهنده‌ی طرح اختلاط نمونه شاهد می‌باشد که در این طرح هیچ‌گونه مواد معدنی جایگزین سیمان نشده است و تنها سیمان به عنوان ماده چسباننده مورد استفاده قرار گرفته است. در نام‌گذاری طرح‌های ۲ تا ۹، E، R، M و G به ترتیب نشان دهنده‌ی استفاده از مواد معدنی غبار کوره آهن‌گدازی، گل قرمز، پودر مرمر و پودر شیشه برای جایگزینی بخشی از سیمان می‌باشد. اعداد ۵ و ۱۵ نشان دهنده‌ی درصد وزنی مواد معدنی استفاده شده برای جایگزینی سیمان می‌باشد. به عنوان مثال E5 دوغابی را نشان می‌دهد که برای جایگزینی سیمان از مواد معدنی غبار کوره آهن‌گدازی به میزان ۵٪ استفاده شده است.

جدول ۲. مشخصات طرح‌های اختلاط

Table 2. Mixture proportions

طول الیاف (mm)	فوق روان کننده (gr)	آب (gr)	پودر شیشه (gr)	پودر مرمر (gr)	گل قرمز (gr)	غبار کوره آهن‌گدازی (gr)	پودر سنگ (gr)	میکروسیلیس (gr)	سیمان (gr)	نام طرح	طرح اختلاط
۶	۱۰۰	۲۵۰۰	۰	۰	۰	۰	۴۸۰۰	۱۹۰۰	۴۸۰۰	C0	۱
۶	۱۲۰	۲۴۸۰	۰	۰	۰	۳۵۲	۴۸۰۰	۱۹۰۰	۴۴۵۰	E5	۲
۶	۲۰۰	۲۴۰۰	۰	۰	۰	۱۰۵۰	۴۸۰۰	۱۹۰۰	۳۷۵۰	E15	۳
۶	۱۲۰	۲۴۸۰	۰	۰	۳۵۲	۰	۴۸۰۰	۱۹۰۰	۴۴۵۰	R5	۴
۶	۱۳۰	۲۴۷۰	۰	۰	۱۰۵۰	۰	۴۸۰۰	۱۹۰۰	۳۷۵۰	R15	۵
۶	۱۲۰	۲۴۸۰	۰	۳۵۲	۰	۰	۴۸۰۰	۱۹۰۰	۴۴۵۰	M5	۶
۶	۱۴۰	۲۴۶۰	۰	۱۰۵۰	۰	۰	۴۸۰۰	۱۹۰۰	۴۰۹۵	M15	۷
۶	۱۲۰	۲۴۸۰	۳۵۲	۰	۰	۰	۴۸۰۰	۱۹۰۰	۳۷۵۰	G5	۸
۶	۱۴۰	۲۴۶۰	۱۰۵۰	۰	۰	۰	۴۸۰۰	۱۹۰۰	۳۷۵۰	G15	۹

جدول ۳. جزئیات آزمایشات انجام شده بر روی دوغاب‌های پایه سیمانی

Table 3. The details of experimental program conducted on the cement based mortars

اطلاعات خاص	روش آزمایش	نوع نمونه	زمان تست (روز)	آزمایش
---	ASTM C109 [24]	مکعب با ابعاد ۵۰ میلی‌متر	۲۸، ۷ و ۹۰	مقاومت فشاری
---	ASTM C496 [25]	پاپیونی (بریکت)	۲۸ و ۷	مقاومت کششی
اسید سولفوریک ۵ درصد	ASTM C267 [26]	مکعب با ابعاد ۵۰ میلی‌متر	۱۴ و ۲۸ روز بعد از قرارگیری در سولفوریک اسید (در سن ۲۸ روزه وارد محفظه اسید شدند)	حمله سولفوریک اسید
---	ASTM C642 [27]	مکعب با ابعاد ۵۰ میلی‌متر	۹۰	جذب آب



(ب)



(الف)

شکل ۳. ریختن دوغاب‌های پایه سیمانی در قالب، (الف) نمونه فشاری و (ب) نمونه کششی

Fig. 3. Pouring grout into the molds, (a) compressive specimens and (b) tensile specimens

$$W.A = \frac{W_a - W_d}{W_d} \times 100 \quad (1)$$

آنالیز شیمیایی توسط دستگاه فلورسانس اشعه ایکس PHILIPS، مدل دستگاه PW1410 و کشور سازنده هلند تعیین گردید. شرکت سازنده دستگاه تعیین اندازه ذرات Cordouan، مدل دستگاه Vasco3 و کشور سازنده فرانسه می‌باشد. سازنده دستگاه تعیین تصاویر ریزنگار روبشی ZEISS، مدل دستگاه LEO1450vp و کشور سازنده آلمان می‌باشد.

### ۳- تجزیه و تحلیل نتایج

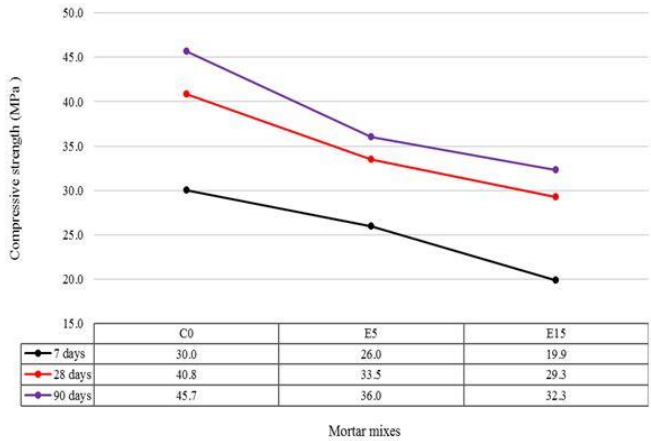
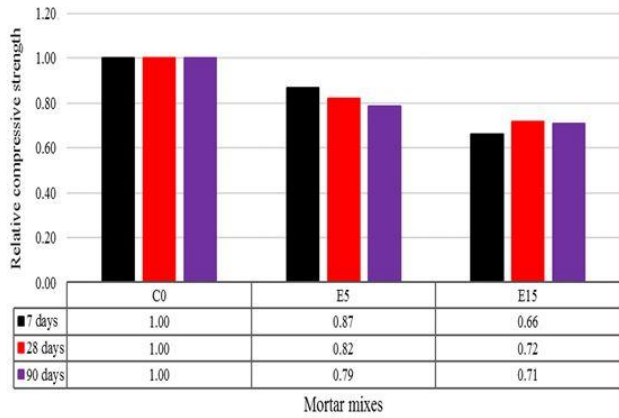
#### ۳-۱- مقاومت فشاری

نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه در شکل ۴ نشان داده شده است. از هر نمونه ۳ آزمون در هر سن مورد آزمایش قرار گرفت و میانگین مقاومت فشاری آن‌ها ثبت شد. بر اساس شکل ۴ مقاومت فشاری با گذشت زمان در تمام طرح‌های اختلاط افزایش یافته است که حاکی از واکنش‌های مداوم در طول زمان می‌باشد [۲۸].

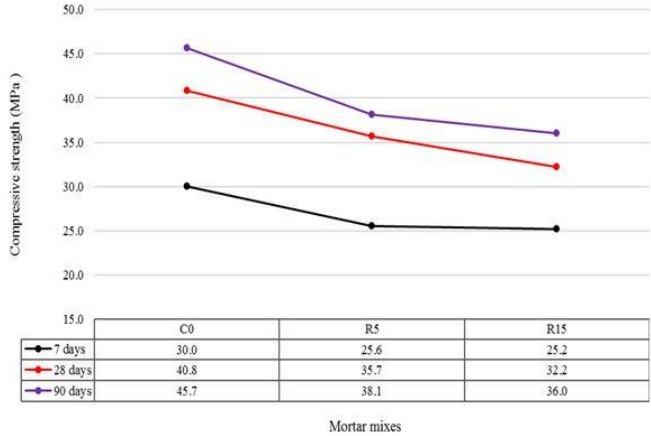
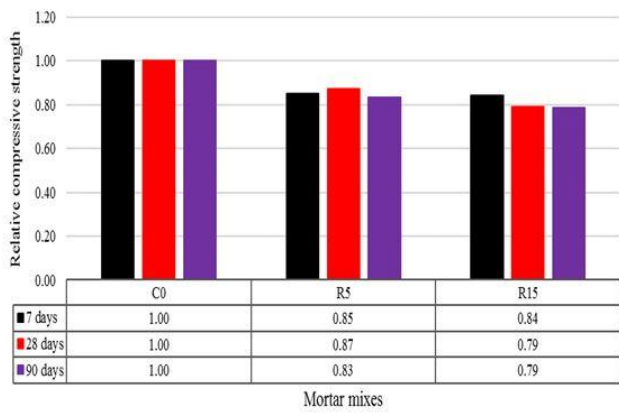
همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود میزان افزایش مقاومت فشاری دوغاب‌های حاوی مواد معدنی به میزان جایگزینی آن با سیمان، نوع مواد معدنی و سن دوغاب بستگی دارد. در شکل ۴-الف تأثیر جایگزینی غبار کوره آهن‌گدازی بر مقاومت فشاری ارائه شده است. نتایج مقاومت فشاری در سن ۷ روزه نشان می‌دهد که مقاومت فشاری نمونه‌های E5 و

آرامی به مخلوط اضافه می‌گردد. در نهایت مواد معدنی جایگزین سیمان به مخلوط اضافه شده و مخلوط با چرخش تند به مدت ۵ دقیقه انجام می‌شود. بعد از مخلوط کردن، نمونه‌ها در قالب ریخته شدند (شکل ۳-الف و ب). تمام نمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعت از قالب خارج شدند و تا زمان آزمایش در محفظه‌های حاوی آب عمل آوری شدند.

آزمایش جذب آب بر روی نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۵۰ میلی‌متر و در سن ۹۰ روزه انجام شد. از هر طرح سه نمونه مکعبی ساخته شده که جذب آب نهایی بر اساس میانگین مقادیر جذب آب به دست آمده برای هر طرح محاسبه شد. نمونه‌ها پس از عمل‌آوری در حوضچه‌های آب، از آب خارج گردیده و پس از خشک شدن تدریجی در محیط آزمایشگاه، جهت تعیین وزن خشک در داخل گرم‌کن در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند. سپس نمونه‌ها از گرم‌کن خارج و پس از رسیدن به دمای محیط توسط ترازوی دیجیتال توزین شدند. پس از خشک شدن تدریجی نمونه‌ها در محیط آزمایشگاه، برای به دست آوردن وزن نمونه اشباع با سطح خشک، نمونه‌ها به داخل حوضچه آب بازگردانده شدند. در نهایت نمونه‌ها در سه بازه زمانی ۳۰ دقیقه، ۲۴ ساعت و ۷۲ ساعت از حوضچه خارج شده و پس از خشک کردن رطوبت سطحی، توزین شدند. درصد جذب آب نمونه‌ها از رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌گردد. در رابطه‌ی ۱،  $W_d$  وزن کاملاً خشک نمونه،  $W_a$  وزن نمونه پس از قرارگیری در آب و  $W.A$  درصد جذب آب می‌باشد.



(الف)

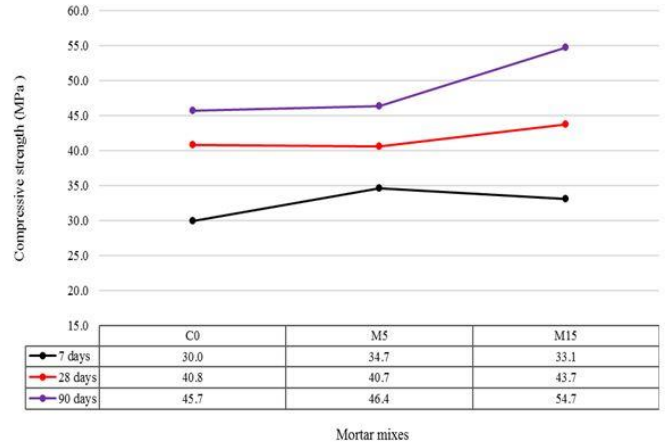
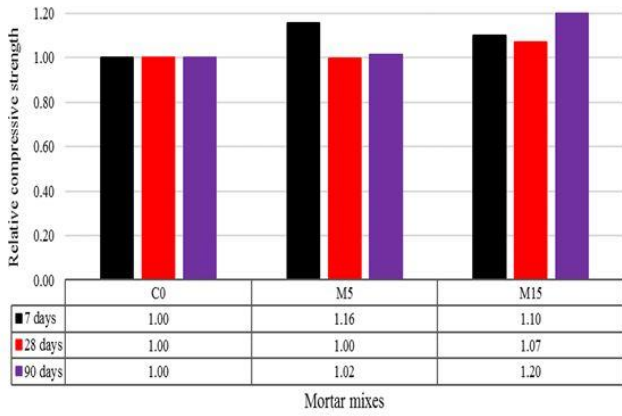


(ب)

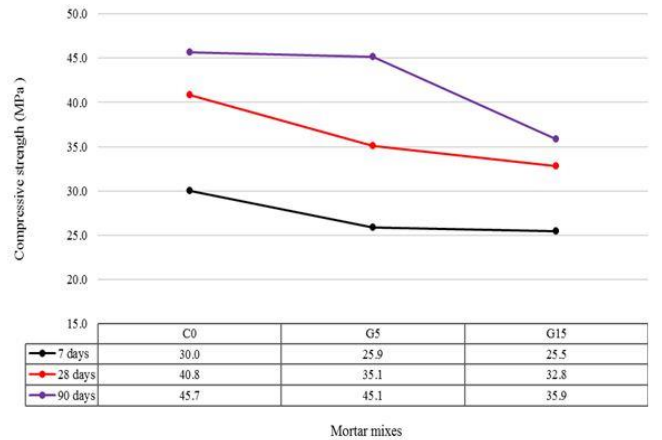
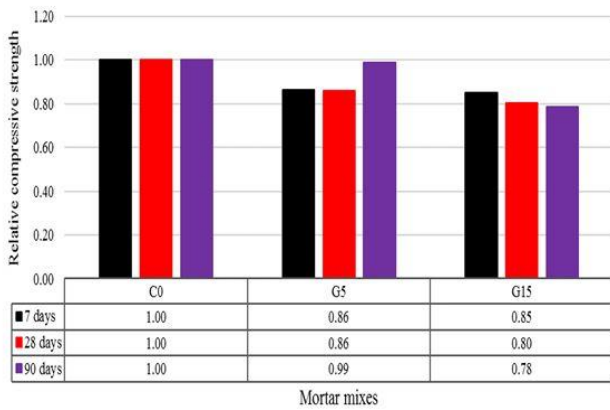
شکل ۴. تأثیر مقادیر مختلف مواد معدنی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان بر مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز، (الف) غبار کوره آهن گدازی، (ب) گل قرمز، (پ) پودر مرمر و (ت) پودر شیشه (ادامه دارد)

Fig. 4. Effect of using different mineral materials as partial replacement of cement on the compressive strength at ages of 7, 28, and 90 days, (a) electric arc furnace dust, (b) red mud, (c) marble powder and (d) glass powder(Continued)





(ب)



(ت)

شکل ۴. تأثیر مقادیر مختلف مواد معدنی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان بر مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز، (الف) غبار کوره آهن‌گدازی، (ب) گل قرمز، (پ) پودر مرمر و (ت) پودر شیشه

Fig. 4. Effect of using different mineral materials as partial replacement of cement on the compressive strength at ages of 7, 28, and 90 days, (a) electric arc furnace dust, (b) red mud, (c) marble powder and (d) glass powder

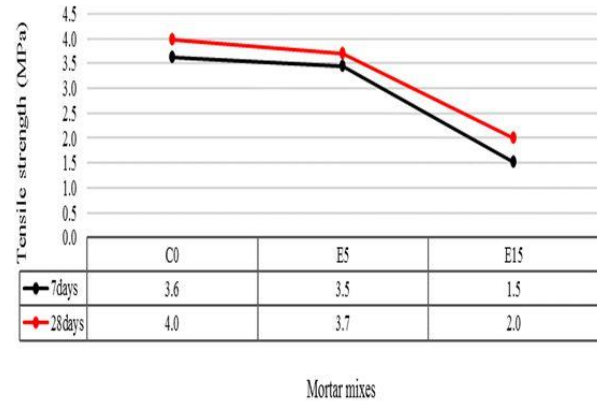
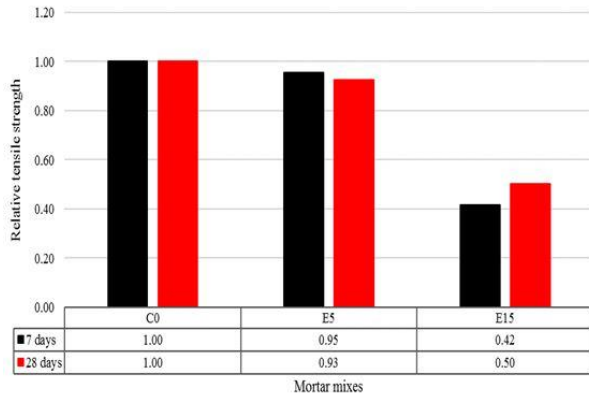
عبارتی می‌توان بیان نمود که مواد معدنی مازاد غیرفعال شده و مانند یک ماده بی اثر عمل می‌کنند. این موضوع در پژوهش دوو و تن [۱۱] نیز گزارش شده است. همچنین با افزایش درصد جایگزینی مواد معدنی پودر مرمر از ۵ به ۱۵ درصد مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. این موضوع را می‌توان این گونه توجیح کرد که تفاوت در توزیع اندازه ذرات مواد سیمانی پارامتری مهم در طراحی مخلوط است که استفاده صحیح از آن می‌تواند منجر به پر شدن حفره‌ها و بهبود دوام گردد. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌گردد اندازه ذرات مواد معدنی پودر مرمر کوچک‌تر از اندازه ذرات سیمان می‌باشد، بنابراین استفاده بیشتر از این مواد معدنی برای جایگزینی سیمان منجر به پر شدن حفره‌ها در دوغاب شده و مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که بیشترین کاهش مقاومت فشاری هنگامی مشاهده شد که غبار کوره آهن‌گدازی به میزان ۱۵ درصد جایگزین سیمان شد. به عبارتی دیگر در مواد معدنی استفاده شده در این پژوهش (غبار کوره آهن‌گدازی، گل قرمز، پودر مرمر و پودر شیشه)، غبار کوره آهن‌گدازی منجر به بیشترین تأثیر منفی بر روی مقاومت فشاری شد.

### ۳-۲- مقاومت کششی

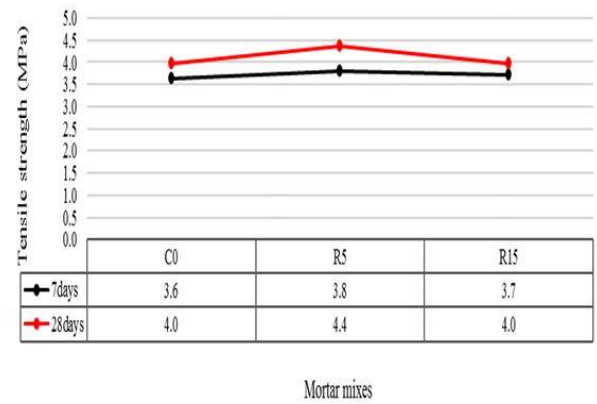
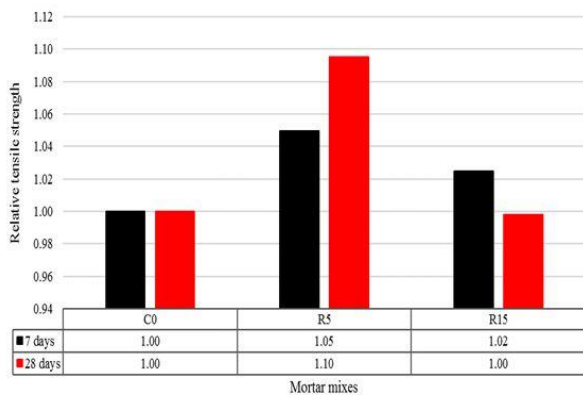
نتایج مربوط به مقاومت کششی برای طرح‌های اختلاط مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است. در شکل ۵-الف تأثیر جایگزینی غبار کوره آهن‌گدازی بر مقاومت کششی ارائه شده است. نتایج مقاومت کششی در سن ۷ روزه نشان می‌دهد که مقاومت کششی نمونه‌های E5 و E15 به ترتیب به مقدار ۵ و ۵۸ درصد کمتر از نمونه شاهد می‌باشد. در سن ۲۸ روزه، مقاومت کششی نمونه‌های E5 و E15 به ترتیب به مقدار ۷ و ۵۰ درصد کمتر از نمونه شاهد می‌باشد. در شکل ۵-ب تأثیر جایگزینی گل قرمز بر مقاومت کششی ارائه شده است. نتایج مقاومت کششی در سن ۷ روزه نشان می‌دهد که مقاومت کششی نمونه‌های R5 و R15 به ترتیب به مقدار ۵ و ۲ درصد بیشتر از نمونه شاهد می‌باشد. در سن ۲۸ روزه، مقاومت کششی نمونه‌های R5 به مقدار ۱۰ درصد بیشتر از نمونه شاهد و مقاومت کششی نمونه R15 برابر با نمونه شاهد می‌باشد. در شکل ۵-پ تأثیر جایگزینی پودر مرمر بر مقاومت کششی ارائه شده است. نتایج مقاومت کششی در سن ۷ روزه نشان می‌دهد که مقاومت کششی نمونه‌های M5 و M15 به ترتیب به مقدار ۱۴ و ۷ درصد کمتر از نمونه شاهد می‌باشد. در سن ۲۸ روزه، مقاومت فشاری نمونه‌های M5 و M15 به ترتیب ۱۳ و ۷ درصد کمتر از نمونه شاهد می‌باشد. در شکل ۵-ت تأثیر جایگزینی پودر شیشه بر مقاومت

E15 به ترتیب به مقدار ۱۳ و ۳۴ درصد کمتر از نمونه شاهد می‌باشد. در سن ۲۸ روزه، مقاومت فشاری نمونه‌های E5 و E15 به ترتیب به مقدار ۱۸ و ۲۸ درصد کمتر از نمونه شاهد می‌باشد. در نهایت در سن ۹۰ روزه، مقاومت فشاری نمونه‌های E5 و E15 به ترتیب به مقدار ۲۱ و ۲۹ درصد کمتر از نمونه شاهد می‌باشد. در شکل ۴-ب تأثیر جایگزینی گل قرمز بر مقاومت فشاری ارائه شده است. نتایج مقاومت فشاری در سن ۷ روزه نشان می‌دهد که مقاومت فشاری نمونه‌های R5 و R15 به ترتیب به مقدار ۱۵ و ۱۶ درصد کمتر از نمونه شاهد می‌باشد. در سن ۲۸ روزه، مقاومت فشاری نمونه‌های R5 و R15 به ترتیب به مقدار ۱۳ و ۲۱ درصد کمتر از نمونه شاهد می‌باشد. در نهایت در سن ۹۰ روزه، مقاومت فشاری نمونه‌های R5 و R15 به ترتیب به مقدار ۱۷ و ۲۱ درصد کمتر از نمونه شاهد می‌باشد. در شکل ۴-پ تأثیر جایگزینی پودر مرمر بر مقاومت فشاری ارائه شده است. نتایج مقاومت فشاری در سن ۷ روزه نشان می‌دهد که مقاومت فشاری نمونه‌های M5 و M15 به ترتیب به مقدار ۱۶ و ۱۰ درصد بیشتر از نمونه شاهد می‌باشد. در سن ۲۸ روزه، مقاومت فشاری نمونه‌های M5 و M15 به ترتیب برابر و ۷ درصد بیشتر از نمونه شاهد می‌باشد. در نهایت در سن ۹۰ روزه، مقاومت فشاری نمونه‌های M5 و M15 به ترتیب به مقدار ۲ و ۲۰ درصد بیشتر از نمونه شاهد می‌باشد. در شکل ۴-ت تأثیر جایگزینی پودر شیشه بر مقاومت فشاری ارائه شده است. نتایج مقاومت فشاری در سن ۷ روزه نشان می‌دهد که مقاومت فشاری نمونه‌های G5 و G15 به ترتیب به مقدار ۱۴ و ۱۵ درصد کمتر از نمونه شاهد می‌باشد. در سن ۲۸ روزه، مقاومت فشاری نمونه‌های G5 و G15 به ترتیب به مقدار ۱۴ و ۲۰ درصد کمتر از نمونه شاهد می‌باشد. در نهایت در سن ۹۰ روزه، مقاومت فشاری نمونه‌های G5 و G15 به ترتیب برابر و ۲۲ درصد کمتر از نمونه شاهد می‌باشد.

با توجه به مطالب ذکر شده می‌توان بیان کرد که جایگزینی مواد معدنی پودر مرمر در درصد جایگزینی‌های ۵ و ۱۵ درصد و جایگزینی مواد معدنی پودر شیشه با درصد جایگزینی ۵ درصد مناسب می‌باشد. این نتیجه را می‌توان به تأثیر پر کردن و واکنش پوزالانی پنهان مواد معدنی نسبت داد [۲۱]. در تمامی طرح اختلاط‌های حاوی مواد معدنی غبار کوره آهن‌گدازی، گل قرمز و پودر شیشه با افزایش درصد جایگزینی مواد معدنی از ۵ درصد به ۱۵ درصد مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه کاهش می‌یابد کاهش قابل توجه مقاومت فشاری با افزایش درصد جایگزینی مواد معدنی را می‌توان این گونه توجیح کرد که یک حد بالا برای جایگزینی مواد معدنی با سیمان وجود دارد که فراتر از این مقدار واکنش‌های پوزولانیک مواد معدنی اتفاق نمی‌افتد. به



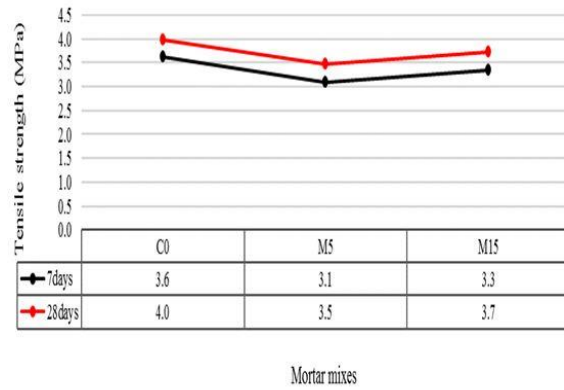
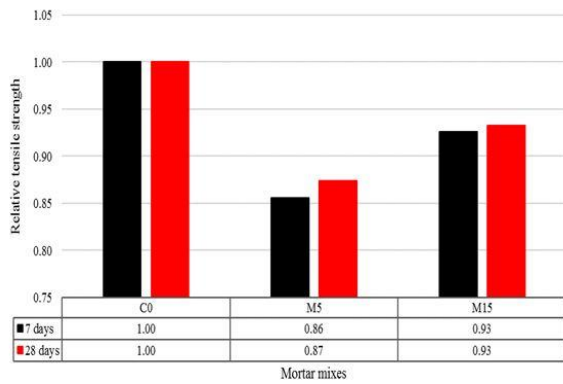
(الف)



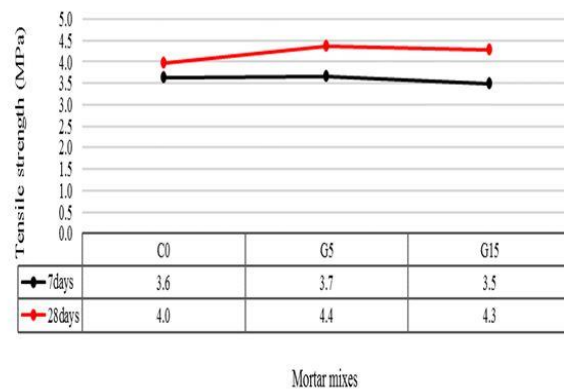
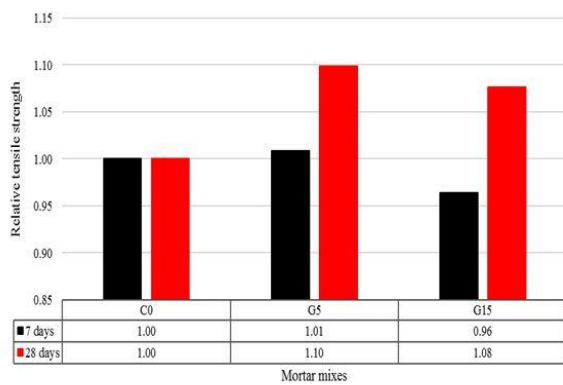
(ب)

شکل ۵. تأثیر مقادیر مختلف مواد معدنی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان بر مقاومت کششی در سنین ۷ و ۲۸ روز، الف) غبار کوره آهن‌گدازی، ب) گل قرمز، پ) پودر مرمر و ت) پودر شیشه (ادامه دارد)

Fig. 5. Effect of using different mineral materials as partial replacement of cement on the tensile strength at ages of 7 and 28 days, (a) electric arc furnace dust, (b) red mud, (c) marble powder and (d) glass powder (Continued)



(ب)



(ت)

شکل ۵. تأثیر مقادیر مختلف مواد معدنی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان بر مقاومت کششی در سنین ۷ و ۲۸ روز، الف) غبار کوره آهن گدازی، ب) گل قرمز، پ) پودر مرمر و ت) پودر شیشه

Fig. 5. Effect of using different mineral materials as partial replacement of cement on the tensile strength at ages of 7 and 28 days, (a) electric arc furnace dust, (b) red mud, (c) marble powder and (d) glass powder

از نمونه شاهد می‌باشد.

همچنین با مقایسه نمونه‌های E5 با E15، R5 با R15 و G5 با G15 مشاهده می‌شود که با افزایش درصد جایگزینی مواد معدنی (غبار کوره آهن‌گدازی، گل قرمز و پودر شیشه) مقدار جذب آب افزایش یافته است. بنابراین می‌توان بیان کرد که افزایش درصد جایگزینی با مواد معدنی غبار کوره آهن‌گدازی، گل قرمز و پودر شیشه منجر به افزایش در مقدار منافذ و حفره‌های به هم پیوسته اشباع شده از آب شده که این امر منجر به افزایش جذب آب می‌گردد. علاوه بر این، پژوهش‌های گذشته [۲۹] گزارش کرده‌اند که افزایش مقدار گل قرمز تأثیر منفی بر جذب آب دارد که به دلیل حضور حفره‌ها و چین‌خوردگی‌ها بر روی سطح ذرات گل قرمز می‌باشد و متعاقباً ظرفیت جذب آب افزایش می‌یابد. همچنین با مقایسه نمونه‌های M-5-S با M-15-S مشاهده می‌شود که با افزایش درصد جایگزینی پودر مرمر مقدار جذب آب نمونه در زمان‌های ۳۰ دقیقه‌ای، ۲۴ ساعته و ۷۲ ساعته کاهش یافته است. سبزی و همکاران [۳۰] و کوشکباقی و همکاران [۳۱] گزارش کردند که کاهش در مقادیر منافذ حفره‌های به هم پیوسته اشباع شده از آب، دلیل اصلی برای کاهش جذب آب می‌باشد.

### ۳-۴- دوام در برابر سولفوریک اسید

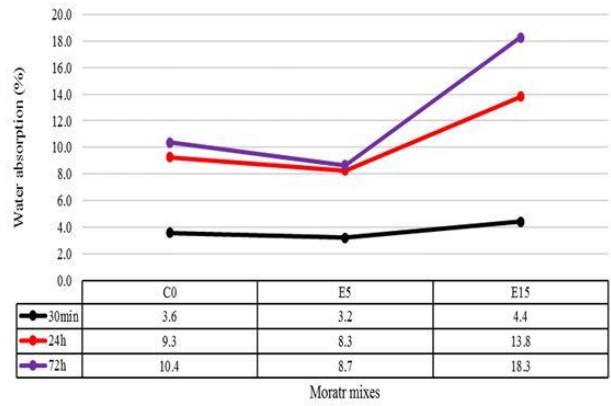
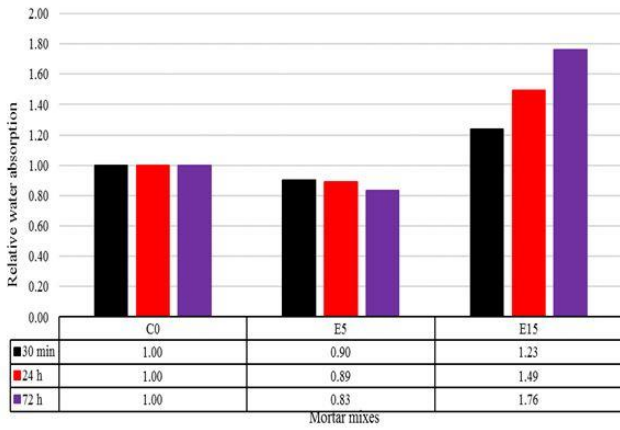
به دلیل تفاوت ماهیت آنیون موجود در سولفوریک اسید (یون سولفات)، مکانیزم خرابی بر اثر حمله این نوع اسید با سایر اسیدها متفاوت است. مقاومت شیمیایی طولانی مدت سازه‌های بتنی از اهمیت زیادی برخوردار است، یک جنبه در این زمینه این است که مواد سیمانی با مقاومت بالا در برابر اسید برای ساخت و ساز یا تعمیر بسیاری از زیرساخت‌های مهم ضروری است. در این مطالعه به منظور بررسی حمله سولفوریک اسید بر کاهش مقاومت فشاری، نمونه‌های مکعبی به بعد ۵ سانتی‌متر در محفظه‌های آب قرار گرفتند. پس از ۲۸ روز، ۶ نمونه از محفظه آب خارج شده و به محفظه حاوی سولفوریک اسید ۵ درصد منتقل شدند. ۳ نمونه پس از ۱۴ روز قرارگیری در سولفوریک اسید و ۳ نمونه پس از ۲۸ روز قرارگیری در سولفوریک اسید مورد بررسی قرار گرفتند.

با توجه به شکل ۷ می‌توان بیان نمود که مقاومت فشاری نمونه‌های R5، M5، M15، G5 و G15 قرار گرفته به مدت ۱۴ روز در سولفوریک اسید از نمونه شاهد بیشتر می‌باشد. همچنین مقاومت فشاری نمونه‌های R5، M5، M15 و G5 قرار گرفته به مدت ۲۸ روز در سولفوریک اسید از نمونه شاهد بیشتر بود. علاوه بر این، مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری

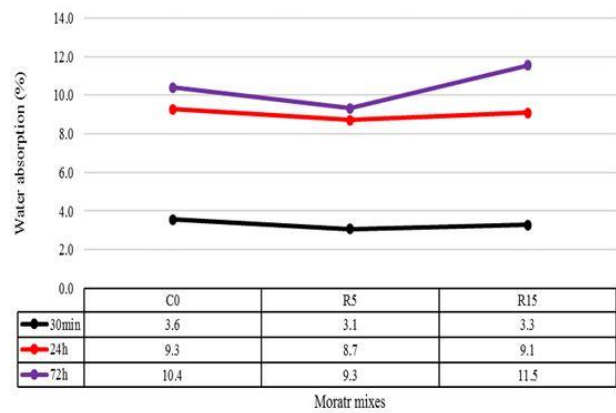
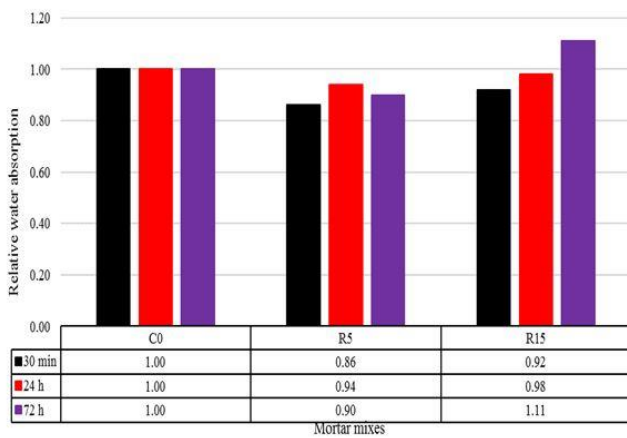
کششی ارائه شده است. نتایج مقاومت کششی در سن ۷ روزه نشان می‌دهد که مقاومت کششی نمونه‌های G5 و G15 به ترتیب به مقدار ۱ و ۴ درصد بیشتر از نمونه شاهد می‌باشد. در سن ۲۸ روزه، مقاومت کششی نمونه‌های G5 و G15 به ترتیب ۱۰ و ۸ درصد بیشتر از نمونه شاهد می‌باشد. با توجه به مطالب ذکر شده می‌توان بیان نمود که استفاده از غبار کوره آهن‌گدازی در مقایسه با مواد معدنی گل قرمز، پودر مرمر و پودر شیشه منجر به کاهش مقاومت کششی می‌گردد. دلیل اصلی این موضوع را می‌توان به اندازه ذرات غبار کوره آهن‌گدازی در مقایسه با سایر مواد معدنی استفاده شده نسبت داد. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌گردد اندازه ذرات غبار کوره آهن‌گدازی از تمامی مواد معدنی استفاده شده بزرگ‌تر می‌باشد.

### ۳-۳- جذب آب

نتایج حاصل از آزمایش جذب آب ۳۰ دقیقه‌ای، ۲۴ ساعته و ۷۲ ساعته نمونه‌ها در شکل ۶ ارائه شده است. در شکل ۶-الف تأثیر جایگزینی غبار کوره آهن‌گدازی بر جذب آب ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که جذب آب ۳۰ دقیقه‌ای، ۲۴ ساعته و ۷۲ ساعته نمونه E5 به ترتیب به مقدار ۱۰، ۱۱ و ۱۷ درصد کمتر از نمونه شاهد می‌باشد. همچنین جذب آب ۳۰ دقیقه‌ای، ۲۴ ساعته و ۷۲ ساعته نمونه E15 به ترتیب به مقدار ۲۳، ۴۹ و ۷۶ درصد بیشتر از نمونه شاهد می‌باشد. در شکل ۶-ب تأثیر جایگزینی گل قرمز بر جذب آب ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که جذب آب ۳۰ دقیقه‌ای، ۲۴ ساعته و ۷۲ ساعته نمونه R5 به ترتیب به مقدار ۴، ۶ و ۱۰ درصد کمتر از نمونه شاهد می‌باشد. همچنین جذب آب ۳۰ دقیقه‌ای و ۲۴ ساعته نمونه R15 به ترتیب به مقدار ۸ و ۲ درصد کمتر از نمونه شاهد و جذب آب ۷۲ ساعته این نمونه به مقدار ۱۱ درصد بیشتر از نمونه شاهد می‌باشد. در شکل ۶-پ تأثیر جایگزینی پودر مرمر بر جذب آب ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که جذب آب ۳۰ دقیقه‌ای، ۲۴ ساعته و ۷۲ ساعته نمونه M5 به ترتیب به مقدار ۹، ۳ و ۴ درصد بیشتر از نمونه شاهد می‌باشد. همچنین جذب آب ۳۰ دقیقه‌ای، ۲۴ ساعته و ۷۲ ساعته نمونه M15 به ترتیب به مقدار ۳۷، ۲ و ۸ درصد کمتر از نمونه شاهد می‌باشد. در شکل ۶-ت تأثیر جایگزینی پودر شیشه بر جذب آب ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که جذب آب ۳۰ دقیقه‌ای، ۲۴ ساعته و ۷۲ ساعته نمونه G5 به ترتیب به مقدار ۵، ۱۲ و ۱۱ درصد کمتر از نمونه شاهد می‌باشد. همچنین جذب آب ۳۰ دقیقه‌ای G15 به مقدار ۲ درصد کمتر از نمونه شاهد و جذب آب ۲۴ ساعته و ۷۲ ساعته نمونه G15 به ترتیب به مقدار ۱۹ و ۱۸ درصد بیشتر



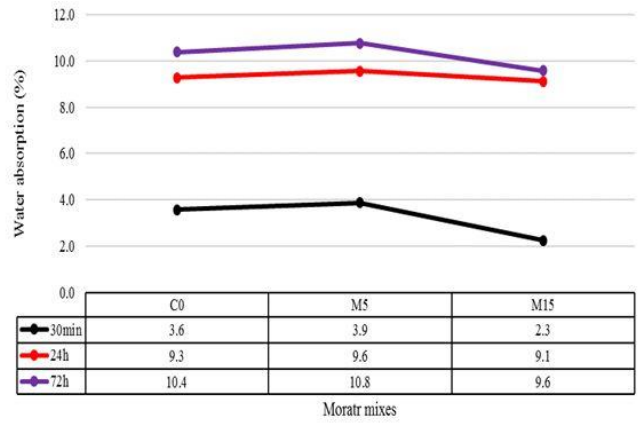
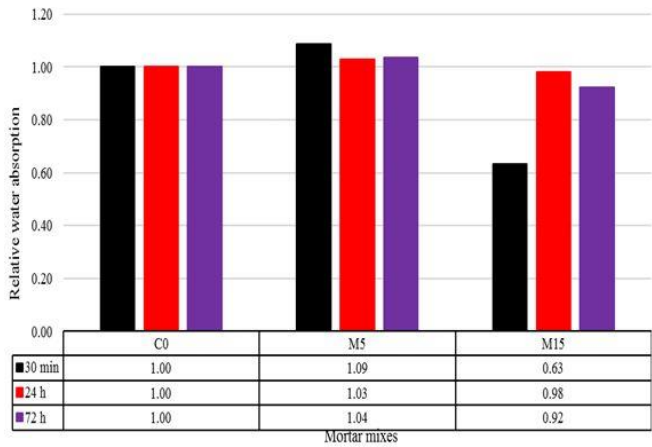
(الف)



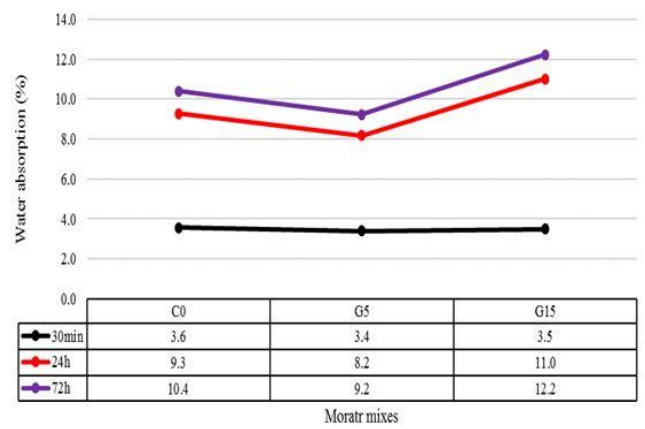
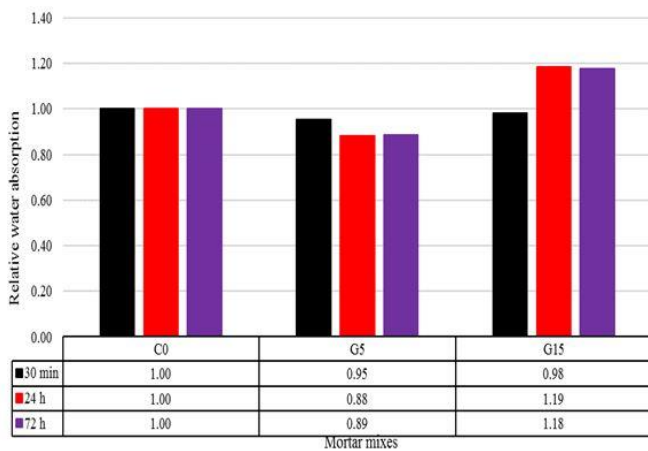
(ب)

شکل ۶. تأثیر مقادیر مختلف مواد معدنی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان بر جذب آب در سن ۹۰ روزه (جذب آب ۳۰ دقیقه، ۲۴، ۷۲ و ۷۲ ساعته، الف) غبار کوره آهن گدازی، ب) گل قرمز، پ) پودر مرمر و ت) پودر شیشه (ادامه دارد)

Fig. 6. Effect of using different mineral materials as partial replacement of cement on the water absorption at age of 90 days (water absorption durations of 30 minutes, 24 hours and 72 hours), (a) electric arc furnace dust, (b) red mud, (c) marble powder and (d) glass powder(Continue)



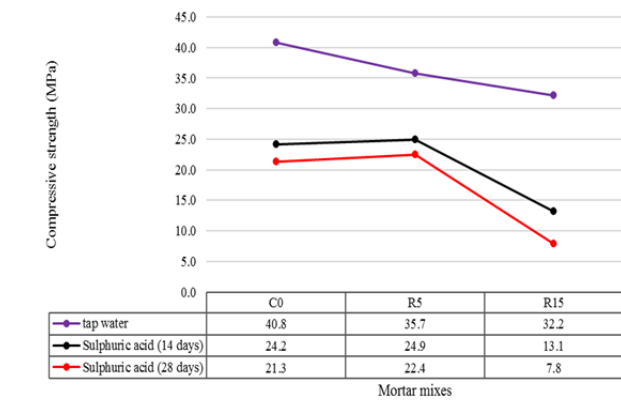
(پ)



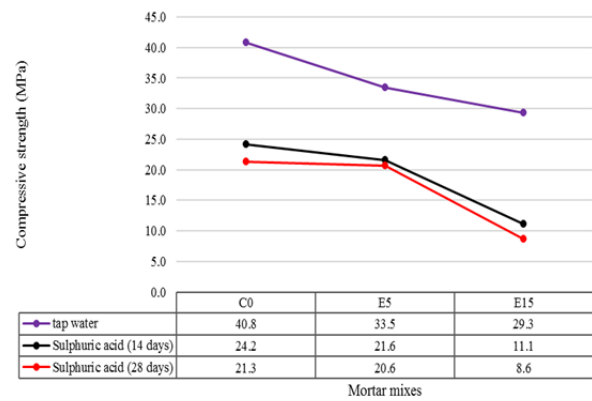
(ت)

شکل ۶. تأثیر مقادیر مختلف مواد معدنی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان بر جذب آب در سن ۹۰ روزه (جذب آب ۳۰ دقیقه‌ای، ۲۴ ساعته و ۷۲ ساعته)، الف) غبار کوره آهن‌گدازی، ب) گل قرمز، پ) پودر مرمَر و ت) پودر شیشه

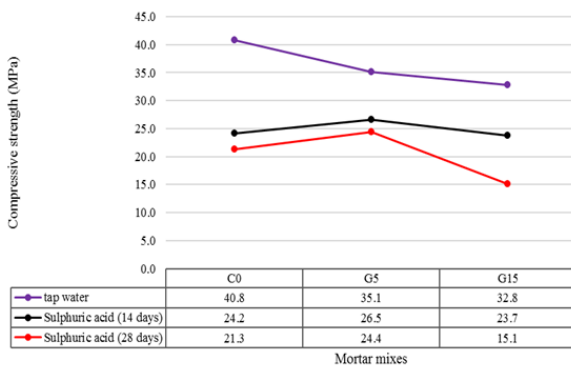
Fig. 6. Effect of using different mineral materials as partial replacement of cement on the water absorption at age of 90 days (water absorption durations of 30 minutes, 24 hours and 72 hours), (a) electric arc furnace dust, (b) red mud, (c) marble powder and (d) glass powder



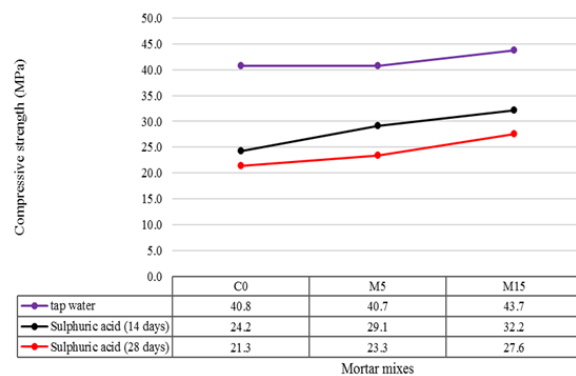
(ب)



(الف)



(ت)



(پ)

شکل ۷. مقاومت فشاری بعد از ۱۴ و ۲۸ روز قرار گیری در سولفوریک اسید، (الف) غبار کوره آهن گدازی، (ب) گل قرمز، (پ) پودر مرمر و (ت) پودر شیشه

Fig. 7. Compressive strength after 14 and 28 days of exposure to sulfuric acid, (a) electric arc furnace dust, (b) red mud, (c) marble powder and (d) glass powder

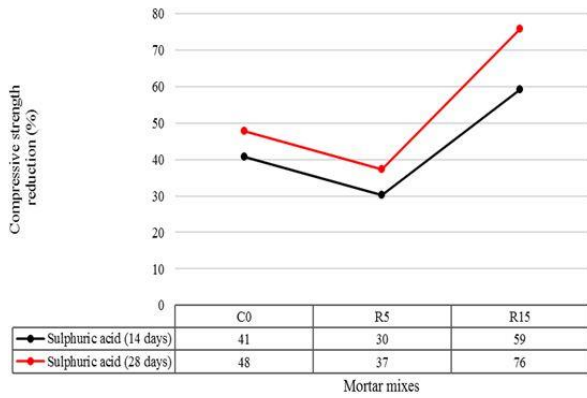


#### ۴- استفاده از دوغاب پایه سیمانی برای تقویت تیر بتن مسلح

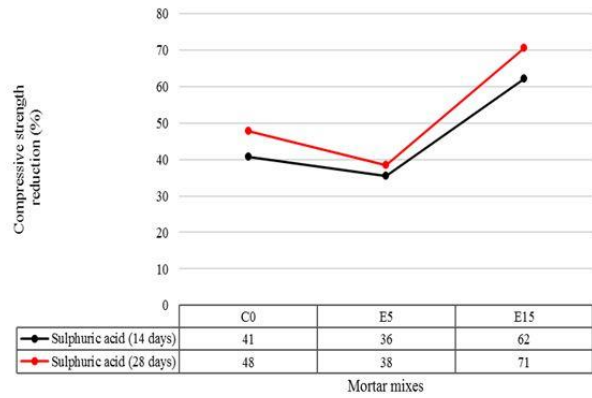
برای دستیابی به اهداف این بخش، سه نمونه تیر بتنی مسلح ساخته و تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌ای قرار گرفتند. دو نمونه کنترل یکی بدون تقویت و دیگری تقویت شده با ورق‌های پلیمری مسلح الیافی (CFRP) و چسب ساخته شدند. در نمونه سوم (نمونه مورد بررسی) شبکه‌های الیاف CFRP به کمک دوغاب پایه سیمانی به تیر چسبانده شد. ورق‌های CFRP و شبکه الیاف CFRP به ترتیب در شکل‌های ۹-الف و ب نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در تقویت با دوغاب پایه سیمانی نمی‌توان از ورق‌های CFRP رایج استفاده نمود، چرا که دوغاب امکان عبور از ورق‌های CFRP و چسبیدن به لایه زیرین را ندارد. بنابراین در تقویت با دوغاب از شبکه‌های الیاف CFRP استفاده می‌گردد تا بتوان چسبندگی مناسبی بین شبکه الیاف و دوغاب پایه سیمانی ایجاد نمود. به منظور مقایسه تیرهای تقویت شده با ورق‌های CFRP به همراه چسب اپوکسی و شبکه‌های الیاف CFRP به همراه دوغاب پایه سیمانی، سختی محوری کامپوزیت‌ها ( $A_f E_f$ ) در نمونه‌های تقویت شده با چسب اپوکسی و دوغاب پایه سیمانی یکسان در نظر گرفته شد. ورق‌های CFRP و شبکه الیاف CFRP از نوع تک‌جهته و با نام تجاری QUANTOM Wrap 300C انتخاب شد. مدول الاستیسته ورق‌های CFRP و شبکه الیاف CFRP یکسان بوده و برای یکسان بودن سطح مقطع الیاف، در تیر تقویت شده با ورق CFRP و چسب اپوکسی از یک لایه ورق CFRP و در تیر تقویت شده با شبکه الیاف CFRP و دوغاب پایه سیمانی از دو لایه شبکه الیاف CFRP استفاده شد. لازم به ذکر است که برای تقویت تیرها با شبکه الیاف CFRP از دوغاب پایه سیمانی طرح اختلاط شماره ۷ استفاده شده است. به عبارت دیگر، تعداد الیاف‌های CFRP در هر دو نوع روش تقویت یکسان در نظر گرفته شد. در نمونه‌های تقویت شده، ابتدا وجه کششی تیر به وسیله دستگاه فرز و سنگ مخصوص سایش بتن زبر شده (شکل‌های ۱۰-الف و ب) و ورق CFRP با چسب اپوکسی (شکل ۱۰-ج) یا دوغاب پایه سیمانی به وجه کششی تیر چسبانده شد. در تقویت با دوغاب پایه سیمانی، سطح زبر شده به مدت ۳۰ دقیقه قبل از تقویت اشباع می‌گردد. در مرحله بعد لایه‌ای از دوغاب پایه سیمانی که تقریباً دارای ضخامت ۵ میلی‌متر می‌باشد روی سطح زبر شده قرار داده می‌شود. سپس شبکه الیاف CFRP بر روی دوغاب پایه سیمانی قرار داده می‌شود (شکل ۱۱-الف). به دلیل استفاده از دو

نمونه‌های E15 و R15 به مقدار قابل توجهی کمتر از نمونه شاهد می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت که جایگزینی مواد معدنی با بخشی از سیمان می‌تواند منجر به دوام مثبت یا منفی این دوغاب‌ها در مقابل حمله سولفوریک اسید گردد، که این موضوع به اندازه، شکل و بافت ذرات مواد معدنی بستگی دارد [۳۰].

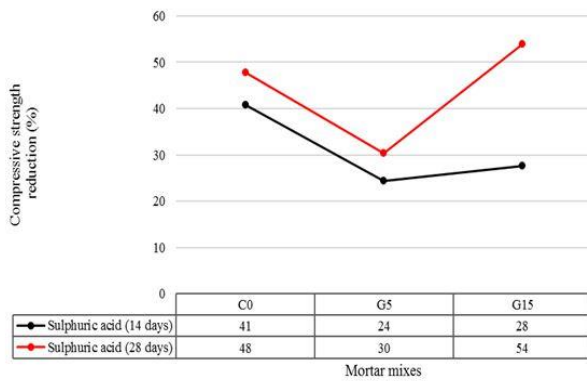
در شکل ۷-الف و ۸-الف تأثیر جایگزینی غبار کوره آهن‌گدازی بر مقاومت در برابر حمله سولفوریک اسید ارائه شده است. کاهش مقاومت فشاری نمونه E5 پس از ۱۴ و ۲۸ روز قرارگیری در معرض سولفوریک اسید به مقدار ۳۶ و ۳۸ درصد می‌باشد. همچنین کاهش مقاومت فشاری نمونه E15 پس از ۱۴ و ۲۸ روز قرارگیری در معرض سولفوریک اسید به مقدار ۶۲ و ۷۱ درصد می‌باشد. در شکل ۷-ب و ۸-ب تأثیر جایگزینی گل قرمز بر مقاومت در برابر حمله سولفوریک اسید ارائه شده است. کاهش مقاومت فشاری نمونه R5 پس از ۱۴ و ۲۸ روز قرارگیری در معرض سولفوریک اسید به مقدار ۳۰ و ۳۷ درصد می‌باشد. همچنین کاهش مقاومت فشاری نمونه R15 پس از ۱۴ و ۲۸ روز قرارگیری در معرض سولفوریک اسید به مقدار ۵۹ و ۷۶ درصد می‌باشد. در شکل ۷-پ و ۸-پ تأثیر جایگزینی پودر مرمر بر مقاومت در برابر حمله سولفوریک اسید ارائه شده است. کاهش مقاومت فشاری نمونه M5 پس از ۱۴ و ۲۸ روز قرارگیری در معرض سولفوریک اسید به مقدار ۲۸ و ۴۳ درصد می‌باشد. همچنین کاهش مقاومت فشاری نمونه M15 پس از ۱۴ و ۲۸ روز قرارگیری در معرض سولفوریک اسید به مقدار ۲۶ و ۳۷ درصد می‌باشد. در شکل ۷-ت و ۸-ت تأثیر جایگزینی پودر شیشه بر مقاومت در برابر حمله سولفوریک اسید ارائه شده است. کاهش مقاومت فشاری نمونه G5 پس از ۱۴ و ۲۸ روز قرارگیری در معرض سولفوریک اسید به مقدار ۲۴ و ۳۰ درصد می‌باشد. همچنین کاهش مقاومت فشاری نمونه G15 پس از ۱۴ و ۲۸ روز قرارگیری در معرض سولفوریک اسید به مقدار ۲۸ و ۵۴ درصد می‌باشد. در نهایت می‌توان بیان نمود که کاهش مقاومت فشاری با افزایش درصد جایگزینی مواد معدنی (غبار کوره آهن‌گدازی، گل قرمز و پودر شیشه) با سیمان افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌گردد که میزان کاهش مقاومت فشاری با افزایش درصد جایگزینی مواد معدنی پودر مرمر با سیمان کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان بیان کرد که کاهش نفوذپذیری به کاهش نفوذ اسید در ماتریس دوغاب کمک می‌نماید که در نتیجه منجر به بهبود مقاومت در برابر حمله اسید سولفوریک می‌شود [۳۲].



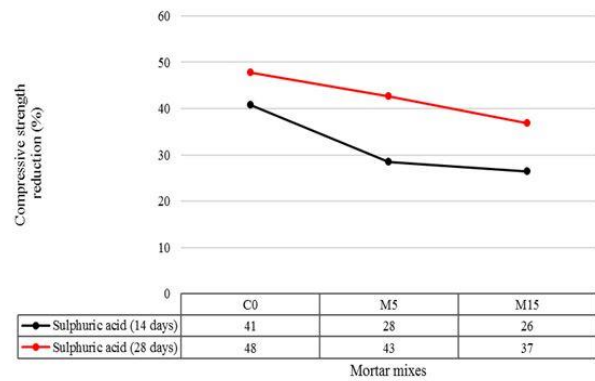
(ب)



(الف)



(ت)



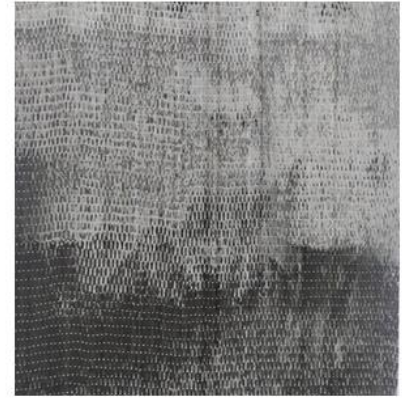
(پ)

شکل ۸. درصد کاهش مقاومت فشاری بعد از ۱۴ و ۲۸ روز قرار گیری در سولفوریک اسید، الف) غبار کوره آهن گدازی، ب) گل قرمز، پ) پودر مرمر و ت) پودر شیشه

Fig. 8. The percentage of compressive strength reduction after 14 and 28 days of exposure to sulfuric acid, (a) electric arc furnace dust, (b) red mud, (c) marble powder and (d) glass powder



(ب)



(الف)

شکل ۹. (الف) ورق‌های CFRP و (ب) شبکه الیاف CFRP

Fig. 9. (a) CFRP sheets and (b) FRCM mesh



(ج)



(ب)



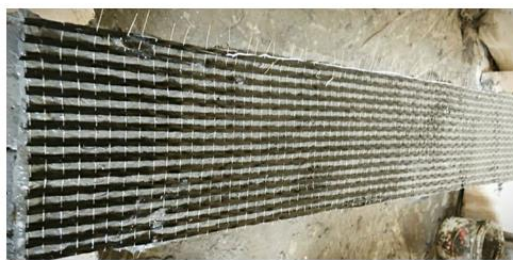
(الف)

شکل ۱۰. مراحل تقویت با ورق CFRP و چسب اپوکسی، (الف) زبر کردن سطح نمونه‌ها با سنگ فرز و سنگ مخصوص سایش بتن، (ب) سطح آماده شده بتن بعد از آماده‌سازی سطحی و (ج) چسباندن ورق CFRP به وجه کششی تیر با چسب اپوکسی

Fig. 10. Stages of strengthening using CFRP sheets and epoxy, (a) roughening the surface of the specimens using a hand grinding machine, (b) the appropriate surface for strengthening after surface preparation process and (c) applying the CFRP sheets to the tensile side of the beam using epoxy



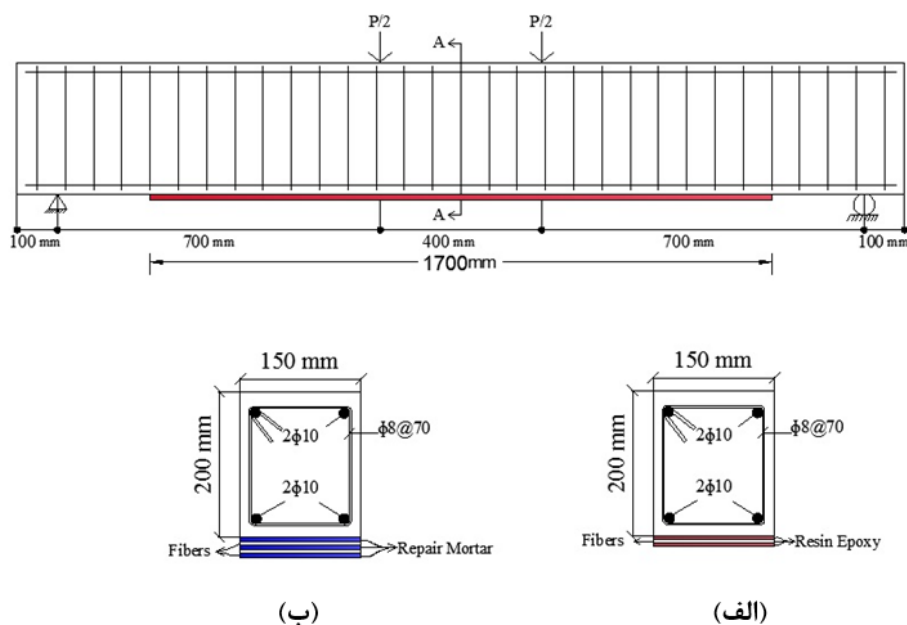
(ب)



(الف)

شکل ۱۱. مراحل تقویت با دوغاب پایه سیمانی و شبکه الیاف CFRP، (الف) قرار گرفتن شبکه الیاف CFRP بر روی دوغاب، (ب) قرار گرفتن دوغاب بر روی شبکه الیاف CFRP

Fig. 11. Stages of strengthening using CFRP mesh and cement based mortar, (a) applying the CFRP mesh on the mortar and (b) applying the second mortar layer on the mesh



(ب)

(الف)

شکل ۱۲. ابعاد هندسی تیرها، آرایش میلگردهای طولی و عرضی نمونه‌ها و بارهای اعمالی (ابعاد برحسب میلی‌متر)، (الف) نمونه تقویت شده با پلیمرهای مسلح الیافی و چسب اپوکسی و (ب) نمونه تقویت شده با پلیمرهای مسلح الیافی و دوغاب پایه سیمانی

Fig. 12. The geometry and dimension of the beams, the compressive and tensile reinforcement arrangement and the applied load (in mm), (a) the specimen strengthened using FRP sheets and epoxy and (b) the specimen strengthened using CFRP mesh and cement based mortar

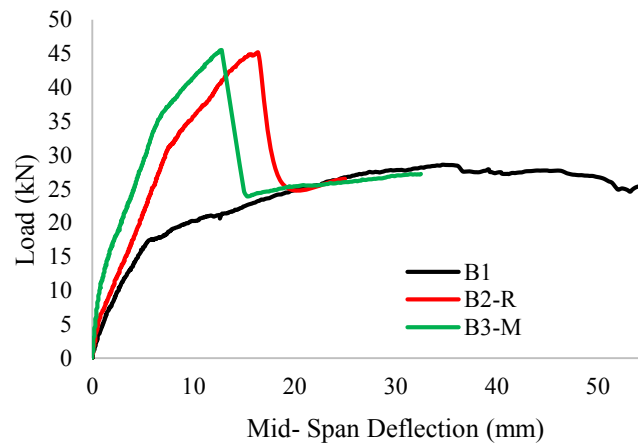
آورده شده است. همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌گردد، میلگردهایی به قطر ۱۰ میلی‌متر به عنوان میلگرد کششی و فشاری و میلگردهایی به قطر ۸ میلی‌متر (با فاصله ۷۰ میلی‌متر) به عنوان میلگرد عرضی در نظر گرفته شد. پوشش تحتانی و کناری بتن برابر با ۳۰ میلی‌متر انتخاب شد. برای ساخت نمونه‌ها از بتن با مقاومت معمولی (۳۰ مگاپاسکال) استفاده شد. نمونه‌ها به

لایه شبکه الیاف CFRP برای تقویت، در مرحله بعدی لایه‌ای از دوغاب پایه سیمانی به ضخامت ۵ میلی‌متر قرار داده شده (شکل ۱۱-ب) و سپس شبکه الیاف CFRP بر روی دوغاب قرار می‌گیرد. در نهایت دوغاب بر روی لایه دوم شبکه الیاف CFRP قرار گرفته و سطح آن هموار می‌گردد. ابعاد هندسی، آرایش میلگردهای طولی و عرضی هر یک از نمونه‌ها در شکل ۱۲

جدول ۴. خلاصه نتایج آزمایشگاهی

Table 4. Experimental program results

نمونه‌ها	تعداد لایه‌های تقویت	سطح مقطع کامپوزیت‌های استفاده شده	روش تقویت	ظرفیت باربری (kN)	تغییر مکان وسط دهانه در لحظه‌ی باربری حداکثر (mm)	مود گسیختگی
B1	۰	۰	بدون تقویت	۲۸/۶	۳۴/۶	خرد شدن بتن فشاری
B2-R	۱	۲۵/۲	تقویت با پلیمرهای مسلح الیافی و چسب اپوکسی	۴۵/۲	۱۶/۴	جدا شدگی پلیمرهای مسلح الیافی
B3-M	۲	۲۵/۲	تقویت با پلیمرهای مسلح الیافی و دوغاب پایه سیمانی	۴۵/۵	۱۲/۸	پارگی پلیمرهای مسلح الیافی



شکل ۱۳. منحنی بار- تغییر مکان نمونه‌ها

Fig. 13. Load-deflection curve

پایه سیمانی تقریباً مشابه نمونه تقویت شده با چسب اپوکسی بوده و تقریباً ۶۰ درصد بیشتر از نمونه بدون تقویت می‌باشند. همچنین تقویت تیرها با دوغاب پایه سیمانی و چسب منجر به کاهش تغییر مکان وسط دهانه به ترتیب به میزان ۶۳ و ۵۳ درصد در مقایسه با نمونه بدون تقویت شده است. بنابراین، استفاده از دوغاب پایه سیمانی برای چسباندن ورق‌های FRP و

طور کلی Ba-R/M نام‌گذاری شده‌اند. که a نشان دهنده‌ی شماره نمونه و R و M به ترتیب بیانگر استفاده از رزین اپوکسی و دوغاب پایه سیمانی برای تقویت می‌باشد. ظرفیت باربری، تغییر مکان وسط دهانه در لحظه‌ی باربری حداکثر و مود گسیختگی نمونه‌ها در جدول ۴ گزارش شده است. همچنین منحنی بار- تغییر مکان نمونه‌ها در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد ظرفیت باربری نمونه تقویت شده با دوغاب

تقویت خمشی تیر مناسب می‌باشد.

مرمر کمتر از نمونه شاهد می‌باشد. علاوه بر این مشاهده شد که بیشترین جذب آب ۳۰ دقیقه‌ای، ۲۴ ساعته و ۷۲ ساعته در دوغاب حاوی ۱۵ درصد غبار کوره آهن‌گدازی می‌باشد.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به منظور ساخت یک دوغاب پایه سیمانی مناسب و ارزان قیمت برای تقویت سازه‌های بتنی، تأثیر برخی از محصولات جانبی صنایع شامل غبار کوره آهن‌گدازی، گل قرمز، پودر مرممر و پودر شیشه به عنوان مواد جایگزین سیمان بر مقاومت فشاری، جذب آب، مقاومت کششی و مقاومت در برابر سولفوریک اسید مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، ۹ دوغاب پایه سیمانی حاوی درصدهای مختلف وزنی مواد معدنی ساخته شد. همچنین به منظور بررسی کاربردی بودن دوغاب‌های پایه سیمانی ساخته شده، سه تیر بتن مسلح طراحی شده و تحت خمش چهار نقطه‌ای قرار گرفتند. بر اساس نتایج آزمایشگاهی، نتایج زیر در مورد جایگزینی بخشی از سیمان با مواد معدنی ذکر شده قابل ارائه می‌باشد:

۴- نتایج مقاومت فشاری دوغاب‌های قرار گرفته به مدت ۱۴ روز در اسید سولفوریک نشان می‌دهد که مقاومت فشاری دوغاب‌های حاوی مواد معدنی گل قرمز به میزان ۵ درصد، پودر شیشه به میزان ۵ و ۱۵ درصد و پودر مرممر به میزان ۵ و ۱۵ درصد بیشتر از نمونه شاهد می‌باشد. علاوه بر این، مقاومت فشاری دوغاب‌های قرار گرفته به مدت ۲۸ روز در اسید سولفوریک نشان می‌دهد که دوغاب‌های حاوی گل قرمز به میزان ۵ درصد، پودر شیشه به میزان ۵ درصد و پودر مرممر به میزان ۵ و ۱۵ درصد بیشتر از نمونه شاهد می‌باشد. همچنین بیشترین کاهش مقاومت فشاری مربوط به دوغاب‌های حاوی غبار کوره آهن‌گدازی به میزان ۱۵ درصد یا گل قرمز به میزان ۱۵ درصد می‌باشد.

۵- نتایج مربوط به آزمایش خمش چهار نقطه‌ای در تیرهای تقویت شده با دوغاب پایه سیمانی مسلح به شبکه الیافی و چسب اپوکسی به همراه ورق CFRP (سختی محوری یکسان در هر دو نوع تقویت) نشان می‌دهد که ظرفیت باربری نمونه تقویت شده با دوغاب پایه سیمانی مشابه نمونه تقویت شده با چسب اپوکسی بوده و تقریباً ۶۰ درصد از نمونه بدون تقویت بیشتر می‌باشد. همچنین استفاده از دوغاب پایه سیمانی برای تقویت، مشکلات مربوط به چسب اپوکسی مانند عدم امکان نصب بر روی سطوح خیس و محیط‌های با رطوبت بالا و مقاومت پایین در برابر آتش‌سوزی و گرما را برطرف نموده و هزینه این نوع دوغاب در مقایسه با چسب اپوکسی بسیار پایین‌تر می‌باشد.

## منابع

- [1] A. Aattache, R. Soltani, Durability-related properties of early-age and long-term resistant laboratory elaborated polymer-based repair mortars, *Construction and Building Materials*, 235 (2020) 117494.
- [2] E. Crossin, The greenhouse gas implications of using ground granulated blast furnace slag as a cement substitute, *Journal of Cleaner Production*, 95 (2015) 101-108.
- [3] A.A. Ramezani pour, A. Kazemian, M. Sarvari, B. Ahmadi, Use of natural zeolite to produce self-consolidating concrete with low Portland cement content

- ۱- استفاده از پودر مرممر برای جایگزینی بخشی از سیمان به میزان ۱۵ درصد، مقاومت فشاری را به مقدار قابل توجهی در سن ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه افزایش می‌دهد. همچنین در سن ۹۰ روزه، مقاومت فشاری دوغاب‌های پایه سیمانی حاوی ۵ درصد پودر مرممر یا پودر شیشه برای جایگزینی بخشی از سیمان تقریباً مشابه نمونه شاهد می‌باشد. این نتیجه را می‌توان به تأثیر پر کردن و واکنش پوزولانی پنهان مواد معدنی نسبت داد. علاوه بر این، استفاده از غبار کوره آهن‌گدازی برای جایگزینی بخشی از سیمان در مقادیر ۵ و ۱۵ درصد منجر به کاهش مقاومت فشاری به مقدار قابل توجهی می‌گردد.
- ۲- نتایج مقاومت کششی در سن ۷ روزه نشان می‌دهد که مقاومت کششی دوغاب‌های پایه سیمانی حاوی ۵ و ۱۵ درصد پودر شیشه و دوغاب‌های پایه سیمانی حاوی ۵ درصد غبار کوره آهن‌گدازی یا ۵ درصد گل قرمز تقریباً مشابه نمونه شاهد می‌باشد. در سن ۲۸ روزه، مقاومت کششی دوغاب‌های پایه سیمانی حاوی ۵ و ۱۵ درصد پودر شیشه و دوغاب‌های پایه سیمانی حاوی ۵ درصد گل قرمز به مقدار قابل توجهی بیشتر از نمونه شاهد می‌باشد. همچنین استفاده از غبار کوره آهن‌گدازی به عنوان جایگزین ۱۵ درصد از سیمان منجر به کاهش مقاومت کششی به مقدار قابل توجهی (حدود ۵۰ درصد) در سن ۷ و ۲۸ روزه می‌گردد.

۳- نتایج جذب آب در سن ۹۰ روزه نشان می‌دهد که جذب آب ۳۰ دقیقه‌ای، ۲۴ ساعته و ۷۲ ساعته دوغاب حاوی ۵ درصد غبار کوره آهن‌گدازی، دوغاب حاوی ۵ درصد گل قرمز و دوغاب حاوی ۱۵ درصد پودر

- beams strengthened using EBR and EBROG methods, *Engineering Structures*, 205 (2020) 110072.
- [14] J. Sabzi, M. Reza. Esfahani, Effects of tensile steel bars arrangement on concrete cover separation of RC beams strengthened by CFRP sheets, *Construction and Building Materials*, 162 (2018) 470-479.
- [15] B. Farahi, M. Reza. Esfahani, J. Sabzi, Experimental investigation on the behavior of reinforced concrete beams retrofitted with NSM-SMA/FRP, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 51(4) (2019) 685-698.
- [16] A.M. Khorasani, M. Reza. Esfahani, J. Sabzi, The effect of transverse and flexural reinforcement on deflection and cracking of GFRP bar reinforced concrete beams, *Composites Part B: Engineering*, 161 (2019) 530-546.
- [17] J. Sabzi, M. Reza. Esfahani, Flexural Behavior of RC Beams Strengthened by CFRP Sheets in the Beams with low and high Reinforcement Ratios, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 50(5) (2018) 907-918.
- [18] A. Arabshahi, M. Tavakol, J. Sabzi, N. Gharaei-Moghaddam, Prediction of the effective moment of inertia for concrete beams reinforced with FRP bars using an evolutionary algorithm, in: *Structures*, Elsevier, (2022) 684-705.
- [19] J. Sabzi, M. Reza. Esfahani, Experimental and analytical investigation of RC beams strengthened by FRP and FRCM, *Concrete Research*, 15(3) (2022) 5-17.
- [20] A.A. Shubbar, H. Jafer, M. Abdulredha, Z.S. Al-Khafaji, M.S. Nasr, Z. Al Masoodi, M. Sadique, Properties of cement mortar incorporated high volume fraction of GGBFS and CKD from 1 day to 550 days, *Journal of Building Engineering*, 30 (2020) 101327.
- [21] G. Fares, R.Z. Al-Zaid, A. Fauzi, A.M. Alhozaimy, A.I. Al-Negheimish, M.I. Khan, Performance of optimized electric arc furnace dust-based cementitious matrix compared to conventional supplementary cementitious materials, *Construction and Building Materials*, 112 (2016) 210-221.
- [22] K.S.A. Kabeer, A.K. Vyas, Utilization of marble powder as fine aggregate in mortar mixes, *Construction and Building Materials*, 25(5) (2013) 589-596.
- [4] M. da Silva Magalhães, F. Faleschini, C. Pellegrino, K. Brunelli, Cementing efficiency of electric arc furnace dust in mortars, *Construction and Building Materials*, 157 (2017) 141-150.
- [5] A.S. de Vargas, Â.B. Masuero, A.C. Vilela, Investigations on the use of electric-arc furnace dust (EAFD) in Pozzolan-modified Portland cement I (MP) pastes, *Cement and Concrete research*, 36(10) (2006) 1833-1841.
- [6] L. Senff, D. Hotza, J. Labrincha, Effect of red mud addition on the rheological behaviour and on hardened state characteristics of cement mortars, *Construction and Building Materials*, 25(1) (2011) 163-170.
- [7] S. Luo, M. Liu, L. Yang, J. Chang, W. Yang, X. Yan, H. Yu, Y. Shen, Utilization of waste from alumina industry to produce sustainable cement-based materials, *Construction and Building Materials*, 229 (2019) 116795.
- [8] D. Dodoo-Arhin, R.A. Nuamah, B. Agyei-Tuffour, D.O. Obada, A. Yaya, Awaso bauxite red mud-cement based composites: Characterisation for pavement applications, *Case studies in construction materials*, 7 (2017) 45-55.
- [9] A. Rana, P. Kalla, L.J. Csetenyi, Sustainable use of marble slurry in concrete, *Journal of Cleaner Production*, 94 (2015) 304-311.
- [10] J.-x. Lu, Z.-h. Duan, C.S. Poon, Fresh properties of cement pastes or mortars incorporating waste glass powder and cullet, *Construction and Building Materials*, 131 (2017) 793-799.
- [11] H. Du, K.H. Tan, Waste glass powder as cement replacement in concrete, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 12(11) (2014) 468-477.
- [12] H. Siad, M. Lachemi, M. Sahmaran, K.M.A. Hossain, Effect of glass powder on sulfuric acid resistance of cementitious materials, *Construction and Building Materials*, 113 (2016) 163-173.
- [13] J. Sabzi, M. Reza. Esfahani, T. Ozbakkaloglu, B. Farahi, Effect of concrete strength and longitudinal reinforcement arrangement on the performance of reinforced concrete

- [28] S.M. Zabihi, H.R. Tavakoli, Evaluation of monomer ratio on performance of GGBFS-RHA alkali-activated concretes, *Construction and Building Materials*, 208 (2019) 326-332.
- [29] R.-X. Liu, C.-S. Poon, Utilization of red mud derived from bauxite in self-compacting concrete, *Journal of cleaner production*, 112 (2016) 384-391.
- [30] J. Sabzi, E. Asadi Shamsabadi, M. Ghalehnavi, S.A. Hadigheh, A. Khodabakhshian, J.d. Brito, Mechanical and durability properties of mortars incorporating red mud, ground granulated blast furnace slag, and electric arc furnace dust, *Applied Sciences*, 11(9) (2021) 4110.
- [31] M. Koushkbaghi, M.J. Kazemi, H. Mosavi, E. Mohseni, Acid resistance and durability properties of steel fiber-reinforced concrete incorporating rice husk ash and recycled aggregate, *Construction and Building Materials*, 202 (2019) 266-275.
- [32] P.S. Deb, P.K. Sarker, S. Barbhuiya, Sorptivity and acid resistance of ambient-cured geopolymer mortars containing nano-silica, *Cement and Concrete Composites*, 72 (2016) 235-245.
- Building Materials, 165 (2018) 321-332.
- [23] D. Patel, R. Shrivastava, R. Tiwari, R. Yadav, Properties of cement mortar in substitution with waste fine glass powder and environmental impact study, *Journal of Building Engineering*, 27 (2020) 100940.
- [24] ASTM C109 / C109M-16a, Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2 in. or [50-mm] Cube Specimens), ASTM International, West Conshohocken, PA, (2016).
- [25] ASTM C496/C496M-11, Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2011).
- [26] ASTM C267, Standard test methods for chemical resistance of mortars, grouts and monolithic surfacings and polymer concretes, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2012).
- [27] ASTM C642-13, Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2013).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*J. Sabzi, M. R. Esfahani, Analysis of mechanical-physical properties of cement-based mortar made with mineral materials and its usage for strengthening of RC beams, Amirkabir J. Civil Eng., 54(12) (2023) 4459-4482.*

DOI: [10.22060/ceej.2022.20351.7400](https://doi.org/10.22060/ceej.2022.20351.7400)

