



مطالعه آزمایشگاهی خصوصیات مکانیکی و ریزساختار ملات سیمانی حاوی پودرهای شیشه، پوسته تخم مرغ، آهن و لاستیک تحت شرایط محیطی اسیدی، خنثی و بازی

جواد محسنی پور اصل، مجید قلهکی*، محمد کاظم شربتدار

دانشکده عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۲۴
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۲۷
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۸
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۸/۱۰

کلمات کلیدی:

ملات سیمانی
ضایعات بازیافتی
خصوصیات مکانیکی
میکروسکوپ الکترونیکی
پراش اشعه ایکس
محیط های اسیدی و بازی

خلاصه: در این مقاله به بررسی خصوصیات مکانیکی و ریزساختار ملات سیمانی حاوی ضایعات بازیافتی مختلف تحت شرایط محیطی اسیدی، خنثی و بازی پرداخته شده است. ضایعات بازیافتی شامل پودرهای شیشه، پوسته تخم مرغ، آهن و لاستیک در مقادیر ۷، ۱۴ و ۲۱ درصد وزنی جایگزین سیمان شدند. پس از انجام آزمایش روانی (مینی اسلایپ)، کلیه نمونه ها در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه تحت آزمایشات مقاومت فشاری، کششی و خمشی و جذب آب و همچنین آزمایشات ریزساختار شامل آزمایش میکروسکوپ الکترونیکی (SEM) و آزمایش پراش اشعه ایکس (XRD) قرار گرفتند. محیط اسیدی با $PH=2/5$ و محیط بازی با $PH=12/5$ و محیط خنثی (آب معمولی) با $PH=7$ برای انجام عمل آوری نمونه ها در نظر گرفته شدند. نتایج حاکی از آن است که بیشترین میزان افزایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی نسبت به نمونه مرجع، به ترتیب برابر ۳۳٪ در محیط اسیدی، ۹۰٪ در محیط خنثی و اسیدی و ۶۷٪ در محیط اسیدی ملات سیمانی می باشد و حضور ضایعات بازیافتی کمک شایانی در بهبود مشخصات مکانیکی در شرایط عمل آوری اسیدی می کند. همچنین افزودن پودر لاستیک به ترکیب ملات سیمانی سبب کاهش مقاومت فشاری، کششی و خمشی تا ۱۱/۶ و ۲/۶ برابر نسبت به نمونه مرجع شده است که استفاده از آن در پروژه های عمرانی، به لحاظ فنی توصیه نمی شود. با استفاده از پودرهای شیشه، آهن و پودر پوسته تخم مرغ در مقادیر ۷ درصد، می توان میزان جذب آب نمونه ها را در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه تا ۱۱/۷، ۲۲/۱۳ و ۲۹/۹ درصد نسبت به نمونه مرجع کاهش داد. نتایج آزمایشات ریزساختار نیز نشان از کاهش ۳ برابری عرض ترکها و حفرات موجود در نمونه های حاوی پودرهای شیشه، آهن و پوسته تخم مرغ داشته و پیوند خمیر سیمان و افزودنی ها نیز قوی تر شده است.

۱- مقدمه

بر سیمان، نسبت آب به سیمان، نوع و pH محلول اسید، دما و غیره بستگی دارد. بنابراین، بررسی کامل اثر شرایط قرار گرفتن در معرض اسید بر تغییرات مکانیکی و ریزساختاری مواد مبتنی بر سیمان، امری ضروری است. [۳ و ۴]. بررسی خصوصیات مقاومت بتن و ملات در برابر شرایط خورنده، توسط محققان مختلفی بررسی شده است [۵-۸].

بینیسی و همکاران در سال ۲۰۱۵ ارزیابی امکان سنجی استفاده از ضایعات پوسته تخم مرغ صنعتی برای محافظت از ساختمان ها در برابر اثرات تشعشع خارجی را مورد مطالعه قرار دادند. برای این منظور خاصیت جذب تشعشع ملات های ساخته شده از سیمان، ماسه ریلیم و پوسته تخم مرغ به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفت. طی این کاوش، کاهش احتمالی کیفیت ملات مانند مقاومت در برابر سولفات ۹۰ روزه و مقاومت فشاری و خمشی ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان

دوام مهمترین معیار برای طراحی سازه های بتنی است. بتن با دوام به کمک حفظ منابع طبیعی، حداقل رساندن ضایعات و کاهش اثرات زیست محیطی تعمیر و نگهداری، به محیط زیست کمک می کند. عمر مفید مواد سیمانی ممکن است در اثر تعامل با محیط های تهاجمی تهدید شده و از بین برود. یکی از مکانیزم های آسیب حیاتی، حمله اسیدی است [۱]. در طول تماس بتن با محیط اسیدی، یون های کلسیم از فازهای حاوی کلسیم موجود در خمیر سیمان سخت شده مانند پورتلندیت و سیلیکات کلسیم هیدراته می شوند تا نمک کلسیم را تشکیل دهند، که منجر به افزایش تخلخل کل بتن و کاهش قابل توجه در مقاومت مکانیکی و عملکرد دوام می شود [۲]. سرعت و مکانیسم حمله اسیدی به بتن به عوامل مختلفی از جمله نوع مواد مبتنی

* نویسنده عهده دار مکاتبات: mgholhaki@semnan.ac.ir



داد که پوسته تخم مرغ به عنوان یک افزودنی مقاومت فشاری و خمشی را برای همه نمونه های ملات با درصدهای مختلف پوسته تخم مرغ و تمام سنین کاهش می دهد. ضریب جذب خطی در نمونه ها با افزایش نسبت پوسته تخم مرغ افزایش می یابد. همچنین نمونه های ملات حاوی پوسته تخم مرغ دارای نفوذ پذیری کم رادیواکتیو هستند [۹].

آنجلین و همکاران در سال ۲۰۱۷ به بررسی اثر افزودن ضایعات لاستیک خودرو بر رفتار مکانیکی و تخلخل ملات ماسه سیمان پرمقاومت پرداختند. بدین منظور ۳۰ درصد وزنی سنگدانه ها با ضایعات لاستیک که به شکل کروی و یافی شکل بودند، جایگزین شد. پس از عمل آوری و انجام آزمایشات از نمونه های ۷ روزه مشخص شد که مقاومت فشاری و خمشی نمونه ها به طور قابل ملاحظه ای کاهش یافته است. همچنین یک ساختار اترینگیت (یک نوع نمک محلول در آب که در اثر حمله سولفاتها به بتن بوجود می آید) مرتبط با نسبت ژل به فضا در نمونه مرجع قابل مشاهده است. همچنین آن ها به این نتیجه رسیدند که کاربردهای مهندسی متمایزی برای ملات های حاوی ضایعات لاستیکی با توجه به ملاحظات زیست محیطی، اقتصادی و سبک سازی می تواند مورد توجه قرار گیرد [۱۰].

پاچیده و همکاران در سال ۲۰۲۰ به بررسی عملکرد ملات های سیمانی حاوی چهار نوع افزودنی بازیافتی پرداختند. آزمایشات مختلفی از جمله جذب آب، مقاومت فشاری و کششی و آزمایش SEM بر روی نمونه ها انجام شدند. افزودنی های بازیافتی شامل پودرهای آهن، لاستیک، شیشه و پوسته تخم مرغ در مقادیر ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ درصد جایگزین سیمان شدند. آزمایشات مکانیکی و ریزساختار در سن ۲۸ روزه و آزمایش جذب آب در سنین ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه انجام شدند. بر اساس نتایج آن ها، استفاده از افزودنی های بازیافتی تا نسبت جایگزینی ۱۴٪، مقاومت فشاری را در مقایسه با نمونه شاهد ۲۸٪ بهبود بخشید. علاوه بر این، مشاهده شد که تا ۲۸ درصد جایگزینی افزودنی ها، مقاومت کششی بیشتر از نمونه شاهد است، اگرچه روند کاهشی را دنبال کرده است. همچنین جذب آب نمونه های حاوی پودر شیشه و پودر پوسته تخم مرغ، ۳۵ درصد کمتر از نمونه های دیگر است که در آزمایش های SEM نیز مشخص شده است [۱۱].

پاتل و همکاران در سال ۲۰۲۰ پودر شیشه با اندازه ۴۵ میکرومتری را به میزان ۲۰٪ جایگزین سیمان در ملات سیمانی و بتن به کار بردند تا ماهیت آنرا در پاسخ ملات تازه و مشخصات طولانی مدت و دوام مشاهده کنند. نتایج نشان داد که ارزش SAI نهفته بین ۹۰ تا ۱۲۶٪ بوده و واکنش پذیری آهک نزدیک به ملات آهکی حاوی خاکستر بادی است. علاوه بر

این، مقاومت فشاری و عرضی در مرحله بعدی مقاومت بالاتری نسبت به نمونه مرجع نشان داده و از نظر دوام نتایج حاصله در محدوده ایمن قرار داشتند. بر اساس نتایج مطالعه آن ها درخصوص اثرات زیست محیطی نمونه مرجع و نمونه حاوی پودر شیشه، کاهش ۲۰ درصدی شاخص های محیط زیست پایدار در نمونه حاوی پودر شیشه بوده است [۱۲].

گوپتا و همکاران در سال ۲۰۲۰ به بررسی دوام بتن مسلح حاوی قطعات لیاف لاستیک به عنوان سنگدانه نرم و دوده سیلیس به عنوان یک ماده سیمانی مکمل پرداختند. در طرح اختلاط بتن قطعات لاستیکی و دوده سیلیس به ترتیب جایگزین سنگدانه ریز طبیعی و سیمان شدند. بتن حاصله برای مقاومت فشاری تا ۳۶۵ روز و مقاومت ساییدگی و جذب آب تا ۲۸ روز مورد مطالعه قرار گرفت. کربناتاسیون و مقاومت در برابر اسید (H₂SO₄ HCL) به ترتیب برای دوره های ۹۰ و ۱۸۰ روزه مطالعه شدند. همچنین خوردگی نمونه ها تا ۱۸ ماه برای هر دو جریان ماکروسول و پتانسیل نیم سلول مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که استفاده از خرده های لاستیک در بتن سبب کاهش مقاومت فشاری و مقاومت در برابر جذب آب، کربناتاسیون و مقاومت در برابر خوردگی شده است. با این حال مقاومت در برابر سایش و حمله اسیدی افزایش یافت. وجود دوده سیلیس به میزان قابل توجهی خواص مکانیکی و دوام قطعات لاستیک را افزایش داده و احتمال خوردگی بتن را کاهش داده است [۱۳].

تایه و السفار در سال ۲۰۱۸ استفاده از پودر آهن بازیافتی در تولید ملات سیمانی تحت شرایط عادی را مورد مطالعه قرار دادند. آزمایش جدول جریان بر روی ملات تازه انجام شد. برای به دست آوردن مقاومت فشاری و خمشی ملات سیمانی، آزمایش های تخریبی (مقاومت فشاری و خمشی) بر روی نمونه های ملات سخت شده انجام شد. اثرات افزودن ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ پودر آهن بازیافتی به عنوان جایگزین ماسه طبیعی مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. پودر آهن بازیافتی مورد استفاده در تحقیق آن ها بر دو نوع بوده است. پودر درشت دانه (IP) که به عنوان جایگزین ماسه بکار می رود و پودر آهن ریز (FIP) که ریزتر از ماسه است. مقاومت فشاری با افزایش مقدار IP اضافه شده در مخلوط ها کاهش یافت، اما با افزودن ۱۰٪ FIP افزایش یافت و با افزایش سطح FIP به تدریج کاهش یافت. در مقابل، مقاومت خمشی به طور قابل توجهی با افزایش FIP در مخلوط افزایش یافت [۱۴].

فام و همکاران در سال ۲۰۱۹ به ارزیابی میزان خرابی کامپوزیت های پایه سیمان لاستیکی تحت شرایط محیطی خورنده پرداختند. در تحقیقات آن

مقاله را بصورت زیر خلاصه نمود:

- * جامع‌نگری روش تحقیق این مقاله نسبت به سایر تحقیقات
- * استفاده از چهار نوع افزودنی با جنس‌های مختلف اما کاربرد مشابه
- * استفاده از افزودنی‌هایی با قابلیت دسترسی و تهیه در تمام نقاط کشور
- * بررسی ملات سیمانی در سه محیط مختلف عمل‌آوری با کنترل مداوم شرایط محیطی
- * بررسی و انجام پرکاربردترین آزمایشات خصوصیات مکانیکی و ریزساختار ملات یا بتن

۲- برنامه آزمایشگاهی

در این تحقیق تعدادی نمونه ملات سیمانی حاوی ضایعات بازیافتی شامل پودر شیشه، پودر پوسته تخم مرغ، پودر لاستیک و پودر آهن در مقادیر ۰٫۷، ۱۴ و ۲۱ درصد وزنی جایگزین سیمان، ساخته شدند. نمونه‌ها تحت شرایط محیطی اسیدی (HCL)، خنثی (Water) و بازی $(Ca(OH)_2 + NaOH)$ به ترتیب با PH های حدود ۲/۵، ۷ و ۱۲/۵ در سنین ۰٫۷، ۲۱ و ۹۰ روزه قرار گرفتند. لازم به ذکر است، با توجه به فعل و انفعالات شیمیایی رخ داده در نمونه‌ها (به‌ویژه سیمان موجود در نمونه‌ها) در طول مدت عمل‌آوری (بالاخص در روزهای اولیه)، پیوسته باید PH محیط عمل‌آوری کنترل شده تا شرایط محیطی بر اساس فرضیات تحقیق پیش رود. PH متر استفاده شده قابلیت اندازه‌گیری با دقت ۰/۱ را داشته و از نوع دیجیتال می‌باشد. نمودار تغییرات PH بر حسب زمان در شرایط مختلف در شکل ۱ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، با گذر زمان و با توجه به عملیات هیدراتاسیون سیمان و فرآیند گیرش اولیه سیمان، مقدار PH در ۲ ساعت اولیه بیشترین تغییرات را داشته است. بطوری که در محیط اسیدی بیشترین و در محیط بازی کمترین تغییرات مشاهده شده است. اما پس از ۲۴ ساعت اولیه، شیب افزایش PH کاهش محسوسی داشته و عملاً می‌توان از تغییرات آن چشم‌پوشی کرد. حال پس از افزودن مواد اسیدی، بازی و یا آب در محیط جهت کنترل شرایط عمل‌آوری، این کار را باید هر ۲۴ ساعت یکبار کنترل نمود. اما با سپری شدن روزهای عمل‌آوری و اعمال کنترل‌ها، تغییرات افزایشی مقدار PH نیز کاسته خواهد شد. به عنوان مثال در محیط اسیدی، خنثی و بازی پس از گذر از سن ۲۸ روزه، میزان تغییرات PH کمتر از ۲۰، ۱۵ و ۵ درصد می‌باشد.

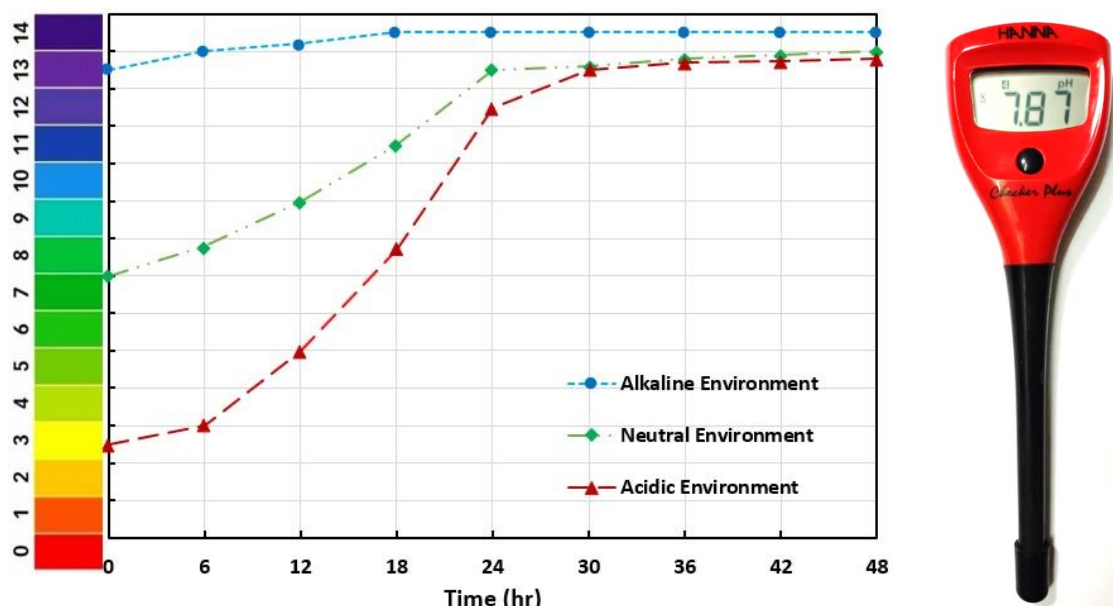
کلیه نمونه‌های ساخته شده تحت آزمایشات مکانیکی شامل مقاومت فشاری (نمونه‌های مکعبی به بعد ۵۰ میلی‌متر)، کششی (نمونه‌های پاپیونی

ها، اثر تقویت مرز مشترک سیمان و لاستیک بر مقاومت کاربردهای مبتنی بر سیمان لاستیکی در برابر حملات اسیدی و سولفات بررسی شد. به‌ویژه، متغیر آسیب به عنوان تغییرات مناطق مقاوم در برابر بار برای ارزیابی دوام نمونه‌های ملات لاستیکی در طول فرآیند حمله شیمیایی تعریف شد. نتایج نشان داد که تقویت مرز در سطح مشترک ملات لاستیک-سیمان، متغیر آسیب ملات حاوی سنگدانه‌های لاستیکی پوشش‌داده شده را در مقایسه با نمونه تیمار نشده کاهش داد. تجزیه و تحلیل ریزساختاری ارتباط بهتری را در ملات لاستیکی پوشش‌داده شده در معرض اسید استیک و محیط‌های خارجی سولفات سدیم نشان داد [۱۵].

تایه و همکاران در سال ۲۰۱۹ مقاومت سولفاتی ملات ماسه سیمان حاوی پودر شیشه را بررسی کردند. در مجموع ۶۰ نمونه جهت انجام تحقیق ساخته شد. سری اول با پودر شیشه عبوری از الک سایز ۲۰۰ میکرومتر و سری دوم با پودر شیشه عبوری از الک سایز ۴۰۰ میکرومتر. محلول $MgSO_4$ با غلظت‌های ۵ و ۱۰ و ۲۰٪ در سه بازه زمانی ۱۰، ۳۰ و ۶۰ روزه استفاده شد. نتایج نشان داد که جایگزینی پودر شیشه در نمونه مرجع، چگالی را تا ۲۹ درصد در نمونه ۶۰ روزه افزایش داد. اگر چه چگالی کم، درصد پودر شیشه بالایی تا ۲۰٪ را نشان داد، اما ۲۰٪ پودر شیشه جایگزین سیمان باعث بهبود خصوصیات ملات نسبت به نمونه شاهد ۲۸ روزه شد. جایگزینی ۱۰٪ پودر شیشه باعث افزایش مقاومت سولفات در مقایسه با نمونه‌های مرجع شده است [۱۶].

گوپتا و همکاران در سال ۲۰۱۹ عنوان کردند که پودر لاستیک (لاستیک‌های سوزانده شده) و الیاف لاستیکی (لاستیک‌های خرد شده) دو شکل مختلف از سنگدانه هستند که برای کاربردهای ساختاری به ارزیابی‌های مبتنی بر دوام مشابه نیاز دارند. در مطالعه آن‌ها بتن حاوی پودر لاستیک بازیافتی و بتن حاوی پودر و الیاف لاستیکی بازیافتی در مقابل شرایط محیطی خورنده (مهاجم) بررسی شد. نتایج نشان داد که علیرغم مقاومت خوب در برابر حمله اسیدی و انتشار یون کلرید، میلگرد تعبیه شده در بتن لاستیکی در مقایسه با میلگرد در بتن شاهد بسیار مستعد خوردگی بود [۱۷].

با توجه مطالعات تحقیقات اخیر و عدم وجود تحقیقات کافی در زمینه استفاده از افزودنی‌های بازیافتی در ترکیب ملات‌های سیمانی تحت شرایط محیطی مختلف (اسیدی، خنثی و بازی)، چند نوع آزمایش مکانیکی و ریزساختار در سنین ۰٫۷، ۲۸ و ۹۰ روزه بر روی نمونه‌ها بر اساس استاندارد انجام شده است. سپس کلیه نتایج با یکدیگر بررسی شده و با سایر تحقیقات نیز مورد ارزیابی و مقایسه واقع شدند. همچنین می‌توان نوآوری‌های موضوع



شکل ۱. نمودار تغییرات PH بر حسب زمان

Fig. 1.

برای تهیه پودر پوسته تخم مرغ، به کارخانجات تولید شیرینی و کیک مراجعه شده و پس از دریافت پوسته های تخم مرغ اضافی، آن ها را آسیاب کرده و بصورت پودر در آمدند. برای تهیه پودر شیشه و لاستیک نیز به ترتیب به کارخانه تولید شیشه های سکوریت و کارخانه تولید خرده لاستیک و پودر لاستیک جهت استفاده در چمن های مصنوعی و کفپوش ها مراجعه شده و تهیه گردیدند. همچنین جهت تهیه پودر آهن نیز به تراشکاری ها مراجعه شده و با استفاده از الک هایی با سوراخ های بسیار ریز، آهن بصورت پودر جدا شد. بنابراین برای تهیه و استفاده از این ضایعات، هزینه ای پرداخت نشده و یا با کمترین مقدار هزینه انجام شده است.

اندازه پودرهای استفاده شده در محدوده ۱۰ تا ۵۰ میکرومتر می باشند که پودر پوسته تخم مرغ و پودر آهن به ترتیب ریزترین و درشتترین آن ها می باشند. با توجه به بافت و ساختار ضایعات و امکانات موجود، شرایط ریزتر شدن افزودنی ها میسر نبوده است. قبل از استفاده از افزودنی ها، آن ها را در گرمکن الکتریکی قرار داده و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۹۰ تا ۱۱۰ درجه سانتی گراد قرار گرفته تا به طور کامل خشک شوند. با توجه به بازیافتی و پرتی بودن افزودنی ها، برای تهیه و استفاده آن ها در ملات، عملاً هزینه ای نشده است که این موضوع به خودی خود دارای صرفه اقتصادی استفاده در پروژه های عمرانی می باشد.

یا بریکت) و خمشی (نمونه های منشوری به ابعاد $160 \times 40 \times 40$ میلی متر) و همچنین آزمایش جذب آب (نمونه های مکعبی به بعد ۵۰ میلی متر) بر اساس استاندارد قرار گرفتند. همچنین با توجه به اینکه در کارهای عمرانی عموماً سن ۲۸ روزه نمونه ها ملاک عمل است، آزمایشات ریزساختار شامل SEM و XRD برای نمونه های با سن ۲۸ روزه و با مقادیر جایگزینی ۱۴ درصد (حد وسط مقدار جایگزینی) افزودنی به جای سیمان، انجام شدند.

۲-۱- مشخصات مصالح طرح اختلاط

آب مصرفی در ساخت نمونه ها از نوع آب شرب شهری بوده و سیمان مصرفی از نوع تیپ دو کارخانه سیمان شاهرود می باشد. همچنین ماسه مصرفی نیز از نوع دوبار شور بوده و از معدن تیغاب شهرستان پاکدشت تهیه شده است. آنالیز فیزیکی و شیمیایی سیمان مصرفی به کمک استاندارد ملی ۳۸۹ ایران و استاندارد کارخانه در جداول ۱ و ۲ ارائه شده اند. همچنین دانه بندی ماسه مصرفی بر اساس استاندارد ASTM C ۸۴۸-۱۳۶ می باشد. ضایعات بازیافتی استفاده شده به عنوان جایگزین بخشی از سیمان مصرفی در ملات شامل پودر شیشه، پودر پوسته تخم مرغ، پودر لاستیک و پودر آهن، بازیافت و پرتی صنایع مختلف می باشند. همچنین تصاویر و آنالیز شیمیایی پودرهای استفاده شده، در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۱. آنالیز فیزیکی سیمان مصرفی [۵]

Table 1. Physical analysis of used cement

شماره	آزمایش	نتیجه	استاندارد کارخانه	ISIRI ۳۸۹	روش آزمایش
۱	نرمی بلین (cm ² /gr)	۳۱۵۰	۲۹۰۰ حداقل	۲۸۰۰ حداقل	۳۹۰
۲	انبساط اتوکلاو	۰/۰۴۶	۰/۶ حداکثر	۰/۸ حداکثر	۳۹۱
۳	زمان گیرش				
۳-۱	زمان اولیه گیرش (mm)	۱۳۵	۷۰ حداقل	۴۵ حداقل	۳۹۲
۳-۲	زمان نهایی (hr)	۳:۳۵	۵ حداکثر	۶ حداکثر	۳۹۲
۴	مقاومت فشاری (Kg/cm ²)				
۴-۱	۱ روز	-	-	-	۳۹۳
۴-۲	۲ روز	-	-	-	۳۹۳
۴-۳	۳ روز	۲۴۰	۱۷۰ حداقل	۱۰۰ حداقل	۳۹۳
۴-۴	۷ روز	۳۴۰	۲۵۰ حداقل	۱۷۵ حداقل	۳۹۳
۴-۵	۲۸ روز	۴۴۰	۳۵۰ حداقل	۳۱۵ حداقل	۳۹۳
۵	گرمای هیدراتاسیون (cal/gr)				
۵-۱	۳ روز	-	-	-	۳۹۴
۵-۲	۲۸ روز	-	-	-	۳۹۴




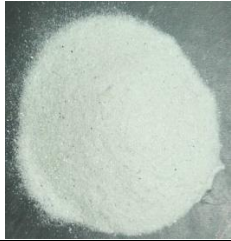
جدول ۲. آنالیز شیمیایی سیمان مصرفی [۵]

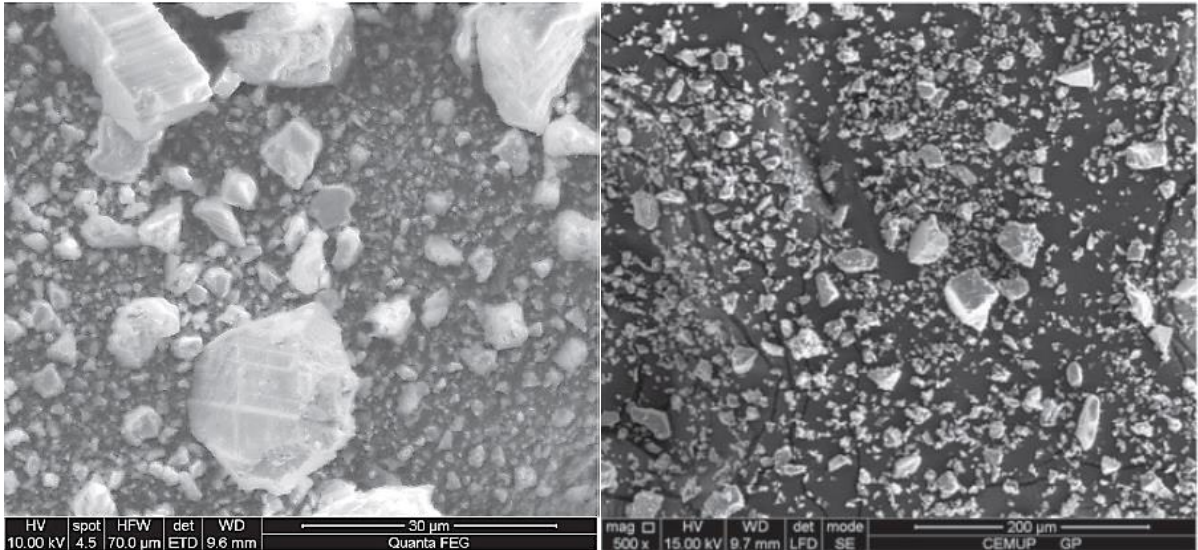
Table 2. Chemical analysis of used cement

شماره	محتویات	نتیجه (درصد)	استاندارد کارخانه	ISIRI ۳۸۹	روش آزمایش
۱	SiO ₂	۲۱/۱۱	۲۰/۵ حداقل	۲۰ حداقل	
۲	Al ₂ O ₃	۴/۴۸	۵ حداکثر	۶ حداکثر	
۳	Fe ₂ O ₃	۳/۹۱	۵ حداکثر	۶ حداکثر	۱۶۹۲
۴	CaO	۶۳/۳۶	-	-	
۵	MgO	۱/۴۸	۲/۵ حداکثر	۵ حداکثر	
۶	SO ₃	۲/۵۸	۲/۹ حداکثر	۳ حداکثر	
۷	Na ₂ O	۰/۴۳	-	-	۱۶۹۵
۸	K ₂ O	۰/۴۸	-	-	
۹	L.O.I	۲/۲۵	۲/۹ حداقل	۳ حداقل	
۱۰	IR	۰/۴۵	۰/۷ حداقل	۰/۷۵ حداقل	
۱۱	F.CaO	۱/۵۰	-	-	۱۶۹۲
۱۲	C ₃ S	۵۲/۸	-	-	
۱۳	C ₂ S	۲۱/۰	-	-	
۱۴	C ₃ A _{≤8}	۵/۳	-	-	

جدول ۳. تصاویر و آنالیز شیمیایی افزودنی‌ها (درصد)

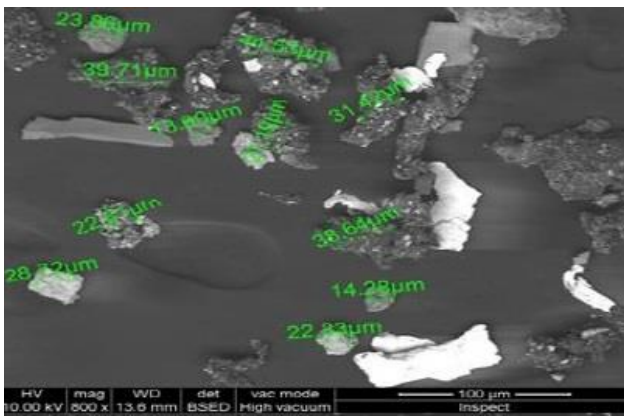
Table 3. Characteristics of used nanographene

سیاه	قهوه‌ای	سفید	سفید مات	
				
پودر لاستیک	پودر آهن	پودر پوسته تخم مرغ	پودر شیشه	
-	-	۹۸/۳	-	CaCO ₃
-	۴/۱۴	-	۱۱	CaO
-	۶۹/۵۲	-	۶۸	SiO ₂
-	۷/۴۴	-	۷	Al ₂ O ₃
-	۸/۱۳	-	۱	Fe ₂ O ₃
-	۳/۷۲	-	۱	MgO
-	۰/۰۳	-	۰/۴	SO ₃
-	۱/۳۸	-	۱۲	Na ₂ O
-	۱/۹۷	-	۱	K ₂ O
-	-	۰/۰۳۴	-	SO ₄ ²⁻ (Sulfate)
-	-	۰/۰۵۸	-	Cl ⁻ (Chloride)
-	-	۱/۳	-	Organic matter
-	-	۰/۰۲۸	-	Lost on ignition (LOI) (g)
۹۱/۵	-	-	-	C
۳/۵	-	-	-	Zn
۳/۵	-	-	-	O
۱/۲	-	-	-	S
۰/۲	-	-	-	Na
۰/۲	-	-	-	H
۰/۱	-	-	-	Ca

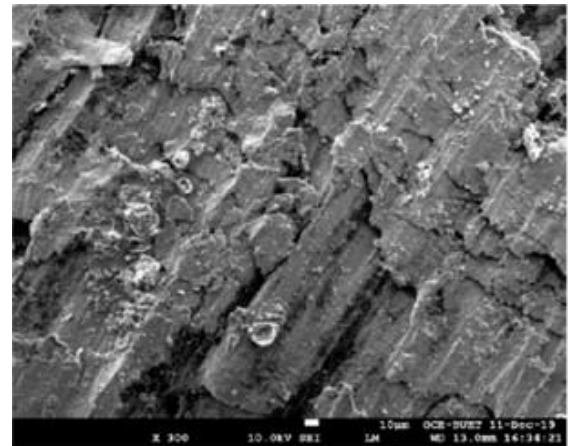


ب) پودر پوسته تخم مرغ

الف) پودر شیشه



ت) پوسته لاستیک



پ) پودر آهن

شکل ۲. آنالیز SEM پودرهای استفاده شده

Fig. 2. SEM test images on the samples

۲-۲- آنالیز SEM پودرها

آنالیز SEM پودرهای استفاده شده، در شکل ۲ آورده شده است. تصاویر SEM پودر شیشه نشان می دهد که بیشتر ذرات به صورت گوشه دار و توده ای شکل هستند. تصاویر پودر پوسته تخم مرغ نیز بصورت شکل های مشخص و در اندازه های مختلف می باشند. همچنین تصاویر پودر آهن بصورت اشکال چندضلعی نامنظم و تصاویر پودر لاستیک بصورت رنگ تیره و خاص قابل مشاهده هستند.

۲-۳- طرح اختلاط

افزودنی های مختلف در مقادیر ۷، ۱۴ و ۲۱ درصد وزنی جایگزین سیمان در نمونه های مختلف مورد استفاده قرار گرفتند که اطلاعات کامل آن ها در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین به منظور مقایسه و بررسی بهتر نتایج، نمونه مرجع (نمونه ای بدون ضایعات) نیز ارائه شده است. بر اساس جدول ۴، اسامی Ref، GP، EP، IP و RP به ترتیب بیانگر نمونه مرجع و نمونه های حاوی پودرهای شیشه، پوسته تخم مرغ، آهن و لاستیک می

جدول ۴. طرح اختلاط نمونه ها (کیلوگرم بر مترمکعب)

Table 4. Mixing design of autoclaved aerated light block (kg/m³)

RP	IP	EP	GP	آب	سیمان	ماسه	
-	-	-	-	۳۰۵	۴۷۵	۱۴۴۰	Ref
-	-	-	۳۳	۳۰۵	۴۴۲	۱۴۴۰	GP-7
-	-	-	۶۶	۳۰۵	۴۰۹	۱۴۴۰	GP-14
-	-	-	۱۰۰	۳۰۵	۳۷۵	۱۴۴۰	GP-21
-	-	۳۳	-	۳۰۵	۴۴۲	۱۴۴۰	EP-7
-	-	۶۶	-	۳۰۵	۴۰۹	۱۴۴۰	EP-14
-	-	۱۰۰	-	۳۰۵	۳۷۵	۱۴۴۰	EP-21
-	۳۳	-	-	۳۰۵	۴۴۲	۱۴۴۰	IP-7
-	۶۶	-	-	۳۰۵	۴۰۹	۱۴۴۰	IP-14
-	۱۰۰	-	-	۳۰۵	۳۷۵	۱۴۴۰	IP-21
۳۳	-	-	-	۳۰۵	۴۴۲	۱۴۴۰	RP-7
۶۶	-	-	-	۳۰۵	۴۰۹	۱۴۴۰	RP-14
۱۰۰	-	-	-	۳۰۵	۳۷۵	۱۴۴۰	RP-21

در جدول ۵ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می شود، نمونه حاوی پودر لاستیک به علت چسبندگی کم با خمیر سیمان، شل تر بوده و مقدار اسلامپ آن بیشترین مقدار شده است. همچنین نمونه حاوی پودر پوسته تخم مرغ به علت ساختار آهکی و سیلیسی آن، به خوبی با خمیر سیمان ترکیب شده و چسبندگی بهتری نسبت به سایر نمونه ها داشته و عدد اسلامپ ۱۰۸ به ثبت رسیده است. در سایر نمونه ها نیز با توجه به اندازه افزودنی ها و میزان ارتباط با خمیر سیمان، عدد اسلامپ متفاوت می باشد.

۲-۴- روش آزمایش

نمونه های ساخته شده دارای طرح اختلاط مرجع مطابق جدول ۳ بوده و مقادیر ۷، ۱۴ و ۲۱ درصد وزنی سیمان از پودرهای ضایعاتی به آن اضافه شد. پس از ساخت نمونه ها، کلیه نمونه ها تحت آزمایشات مقاومت فشاری، کششی و خمشی و همچنین آزمایشات جذب آب و ریزساختار قرار گرفتند. سرعت بارگذاری دستگاه برای آزمایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی به ترتیب ۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه (۳۹۲۵ نیوتن بر ثانیه)، ۰/۲ مگاپاسکال بر ثانیه (۱۵۷۰ نیوتن بر ثانیه) و ۰/۱ مگاپاسکال بر ثانیه (۷۸۵ نیوتن بر ثانیه)

باشند. اعداد مقابل آن ها نیز بیانگر درصد جایگزینی با سیمان می باشند. همانطور که ملاحظه می شود، جمع مقدار وزنی هر پودر ضایعاتی و سیمان در هر ردیف، برابر مقدار سیمان در نمونه مرجع می باشد. همچنین نسبت آب به سیمان نیز برابر ۰/۶۴ بوده که این نسبت عموماً در پروژه های عمرانی و شرایط اقلیمی کشور ایران مورد استفاده قرار می گیرد.

جهت ساخت نمونه ها، ابتدا تمامی سیمان و پودر ضایعاتی موردنیاز با یکدیگر مخلوط شده، سپس با ماسه مرطوب (۲٪ جذب آب) ترکیب شدند و به تدریج آب مورد نیاز به مخلوط اضافه گشته (کل این فرآیند حداکثر ۳ دقیقه به طول انجامید) و کل مخلوط در یک دستگاه همزن با سرعت بالا به مدت یک دقیقه دیگر مخلوط شد.

همچنین در حین ساخت نمونه ها، آزمایش روانی (مینی اسلامپ) [۱۸] نیز انجام شد. در این آزمایش از یک مخروط ناقص، که نمونه کوچک شده مخروط آبرام مورد استفاده در آزمایش استاندارد اسلامپ جهت کارایی بتن است، مورد استفاده قرار گرفته است. قطر بالا، قطر پایین و ارتفاع این مخروط ناقص بترتیب ۱۹، ۳۸/۱ و ۵۷/۲ میلی متر می باشد. مقادیر اسلامپ (قطر پخش شدن) برای نمونه مرجع و نمونه های حاوی ۱۴ درصد ضایعات،

جدول ۵. مقادیر اسلامپ (میلی متر)

Table 5.

Ref	GP-14	EP-14	IP-14	RP-14
۱۲۰	۱۳۲	۱۰۸	۱۴۰	۱۵۵



شکل ۳. آزمایش مقاومت فشاری قبل و بعد از شکست نمونه

Fig. 3. Testing the compressive strength of the samples

اختلاط بطور جداگانه و مجموعاً ۹ نمونه، داخل محیط های اسیدی، بازی و آب معمولی قرار گرفته و به ترتیب ۷، ۲۸ و ۹۰ روز بعد توسط چک هیدرولیک با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلونیوتن و سرعت بارگذاری ۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه [۵] شکسته شدند. برای انجام آزمایش، سطوح فک دستگاه بارگذاری کاملاً تمیز شده و نمونه‌ها در مرکز بین دو فک دستگاه قرار گرفتند. نمونه‌ها با نرخ ثابت تا رسیدن به مرز گسیختگی، بارگذاری شده و حداکثر باری که توسط نمونه تحمل گردید (باری که چک ثبت کرده است)، ثبت شد. نمونه تصاویر این آزمایش در قبل و بعد از شکست در شکل ۳ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، در پایان آزمایش، نمونه بصورت قطری و از مرکز شکسته شده است. اما میزان تخریب نمونه‌ها در پایان آزمایش (با توجه به شرایط محیطی مختلف) متفاوت بوده و هر چقدر محیط اسیدی

بر طبق استاندارد EN-12390-13 [۱۹] انتخاب گردید.

۳- انجام آزمایش و بررسی نمونه‌ها

پس از اتمام مراحل ساخت، تولید و عمل‌آوری نمونه‌های ملات، آزمایشات مقاومت فشاری، کششی، خمشی (برای سنین ۷ تا ۹۰ روزه)، جذب آب و ریزساختار (برای سن ۲۸ روزه)، طبق استاندارد بر روی آن‌ها انجام شد. همچنین نتایج این مقاله با نتایج سایر محققان نیز مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفتند.

۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری

سه نمونه مکعبی به بعد ۵۰ میلی‌متر (ASTM C109) از هر طرح

تر شده است، پیوند خمیر سیمان با سنگدانه‌ها نیز شکننده‌تر گشته است. بنابراین نمونه‌ها بصورت تکه‌های با تعداد بیشتری خرد شدند.

پس از انجام آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی، اطلاعات حاصله گردآوری شده و مقاومت فشاری هر نمونه محاسبه گردید. سپس مقدار میانگین سه نمونه شکسته شده با شرایط یکسان (شرایط یکسان از نظر سن، ماده افزودنی، درصد افزودنی و محیط عمل‌آوری) محاسبه شده و به عنوان نماینده آن طرح انتخاب گردید. در جدول ۶ گزارش این عملیات ارائه شده است.

نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین مختلف و در محیط‌های عمل‌آوری اسیدی، خنثی و بازی در شکل ۴ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، تقریباً در تمامی نمونه‌ها بجز نمونه‌های حاوی پودر لاستیک، مقاومت فشاری در سنین مختلف نسبت به نمونه مرجع افزایش یافته است. در نمونه‌های حاوی پودر لاستیک به علت عدم چسبندگی و ارتباط میان لاستیک و خمیر سیمان، سبب ایجاد فضاهای خالی در ملات شده، بنابراین مقاومت فشاری به شدت کاهش یافته است. به گونه‌ای که در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه، مقاومت فشاری نمونه‌های RP نسبت به نمونه مرجع به ترتیب تا ۸۰، ۸۱ و ۸۴ درصد کاهش یافته است که این موضوع نیز بیانگر افزایش آثار تخریبی پودر لاستیک در گذر زمان بر مقاومت فشاری ملات می‌باشد. مقاومت فشاری در نمونه RP-21 به قدری کم است که می‌توان پیش‌بینی نمود که افزودن ۲۸ درصد از پودر لاستیک به درون ملات، مقاومت فشاری نزدیک به صفر را نتیجه خواهد داشت. این پدیده به دلیل جایگزینی عامل اصلی تشکیل ملات ماسه سیمان (سیمان) با پودر لاستیک می‌باشد. به عبارت دیگر با افزایش میزان استفاده از پودر لاستیک و کاهش مصرف سیمان، ماتریس سیمان-سنگدانه تضعیف شده و مقاومت فشاری به شدت افت می‌کند. این روند نزولی مقاومت فشاری نشان می‌دهد پودر لاستیک به صورت یک ماده مخرب در ملات ماسه سیمان عمل کرده و باعث می‌شود انسجام کلی نمونه مختل شود. می‌توان پیش‌بینی نمود ذرات پودر لاستیک سبب لقی اتصال بین سنگدانه‌های موجود در نمونه می‌گردد به طوری که با وارد آمدن نیروی فشاری، بلافاصله بین سنگدانه‌ها تغییر مکان بوجود آمده و همین لغزش داخلی بین سنگدانه‌ها سرآغاز شکست کلی نمونه می‌گردد. افزایش مقاومت در برابر ضربه و خستگی در نمونه‌های حاوی پودر لاستیک مؤید همین مطلب است. زیرا افزایش انعطاف‌پذیری در نمونه سبب مقاومت بهتر در برابر ضربه و خستگی می‌شود اما به همان نسبت از صلبیت نمونه کاسته شده و مقاومت در برابر نیروی فشاری کاهش می‌یابد.

در تمامی نمونه‌های حاوی پودرهای پوسته تخم مرغ، شیشه و آهن، با افزایش مقدار افزودنی، مقاومت فشاری نیز افزایش یافته است. بیشترین مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه متعلق به نمونه‌های EP-21، GP-21 و GP-21 و در محیط بازی می‌باشد. البته به طور کلی مقاومت فشاری نمونه‌هایی که در محیط بازی عمل‌آوری شدند، به علت وجود کلسیم و سدیم و همچنین سیلیسیم موجود در ذرات شیشه و پوسته تخم مرغ، افزایش قابل توجهی نسبت به نمونه مرجع یافتند. حضور عنصر کلر در محیط عمل‌آوری اسیدی سبب فرآیند تخریبی و کاهش مقاومت در نمونه‌ها در سنین مختلف شده است. با این وجود، اگر چه استفاده از ۷ و ۱۴ درصد افزودنی، سبب بهبود کم مقاومت فشاری شده است اما با افزایش استفاده از افزودنی‌ها (بجز پودر لاستیک) تا ۲۱ درصد جایگزینی، افزایش مقاومت فشاری قابل توجهی نسبت به نمونه شاهد حاصل شده است. در نمونه‌های حاوی پودر آهن نیز به علت مقاومت ذاتی ذرات آهن و میزان صلبیت آن‌ها، افزایش مقاومت فشاری در تمامی سنین و محیط‌های عمل‌آوری مشاهده شده است. به خصوص در سنین بالاتر، مقاومت فشاری تا حدود ۲۵ مگاپاسکال رسیده است.

با توجه به توضیحات فوق، استفاده از مواد افزودنی اشاره شده (بجز پودر لاستیک) در ترکیب ملات سیمانی، سبب بهبود قابل توجه مقاومت فشاری می‌شود. همچنین برای تهیه و استفاده از این افزودنی‌ها نیاز به پرداخت هزینه نبوده و یا با کمترین هزینه قابل تهیه و استفاده هستند. همچنین یکی دیگر از مزایای افزودنی‌های استفاده شده در این مقاله، در دسترس بودن آن‌ها در اقصی نقاط دنیا می‌باشد. بنابراین هم به لحاظ فنی و هم اقتصادی، کاملاً مقرون به صرفه بوده و قابلیت استفاده در پروژه‌های عمرانی را دارند. همچنین می‌توان با تغییر در طرح اختلاط و درصد جایگزینی افزودنی‌ها، به مقاومت‌های بالاتری نیز دست یافت و به عنوان ملات سازه‌ای نیز استفاده کرد. البته همانطور که ملاحظه می‌شود، برخی از مقاومت‌های بدست آمده که در حدود ۲۵ مگاپاسکال می‌باشند نیز چنین قابلیت‌هایی را دارا می‌باشند. تصاویر نمونه‌ها پس از اتمام فرآیند عمل‌آوری، در شکل ۵ آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، اثرات محیط اسیدی (HCL) بر روی نمونه‌ها به رنگ قهوه‌ای درآمده و با توجه به عمل‌آوری نمونه، سطح خرابی آن قابل رویت است. همچنین اثرات آهک و سیلیس در محیط بازی به صورت غشای سفید رنگی بر روی نمونه‌ها نمایان شده است که در مقایسه با شرایط خنثی، سفیدی بیشتری رویت می‌شود.

جدول ۶. مقاومت فشاری نمونه ها (مگاپاسکال) و انحراف معیار (ادامه دارد)

Table 6. Compressive strength values of the samples (MPa) (Continued)

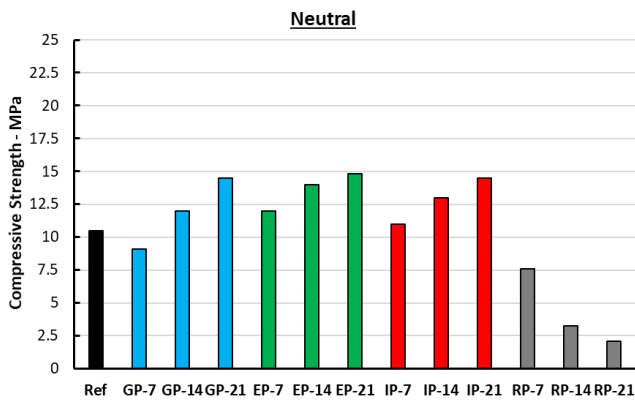
مقاومت فشاری ۷ روزه															
بازی				خنثی				اسیدی							
انحراف معیار	میانگین	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱	انحراف معیار	میانگین	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱	انحراف معیار	میانگین	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱	
	۱۰/۹۳	۱۱/۷۵	۱۰/۴۴	۱۰/۶۰		۱۰/۴۷	۱۱/۲۶	۱۰/۰۰	۱۰/۱۶		۷/۳۵	۷/۹۰	۷/۰۲	۷/۱۳	Ref
	۱۰/۷۰	۱۱/۵۰	۱۰/۲۲	۱۰/۳۸		۹/۱۰	۹/۷۸	۸/۶۹	۸/۸۳		۸/۰۰	۸/۶۰	۷/۶۴	۷/۷۶	GP-7
	۱۲/۹۰	۱۳/۸۷	۱۲/۳۲	۱۲/۵۱		۱۲/۰۰	۱۲/۹۰	۱۱/۴۶	۱۱/۶۴		۱۰/۱۰	۱۰/۸۶	۹/۶۵	۹/۸۰	GP-14
	۱۵/۰۰	۱۴/۳۳	۱۶/۱۳	۱۴/۵۵		۱۴/۵۰	۱۳/۸۵	۱۵/۵۹	۱۴/۰۷		۱۱/۶۰	۱۱/۰۸	۱۲/۴۷	۱۱/۲۵	GP-21
	۱۳/۱۰	۱۴/۰۸	۱۲/۵۱	۱۲/۷۱		۱۲/۰۰	۱۲/۹۰	۱۱/۴۶	۱۱/۶۴		۸/۵۰	۹/۱۴	۸/۱۲	۸/۲۵	EP-7
	۱۵/۲۰	۱۴/۵۲	۱۶/۳۴	۱۴/۷۴		۱۴/۰۰	۱۳/۳۷	۱۵/۰۵	۱۳/۵۸		۹/۰۰	۸/۶۰	۹/۶۸	۸/۷۳	EP-14
۴/۲۹	۱۵/۸۰	۱۵/۰۹	۱۶/۹۹	۱۵/۳۳	۴/۰۹	۱۴/۸۰	۱۴/۱۳	۱۵/۹۱	۱۴/۳۶	۳/۰۴	۱۲/۳۰	۱۱/۷۵	۱۳/۲۲	۱۱/۹۳	EP-21
	۱۲/۵۰	۱۱/۹۴	۱۳/۴۴	۱۲/۱۳		۱۱/۰۰	۱۰/۵۱	۱۱/۸۳	۱۰/۶۷		۷/۴۰	۰/۰۷	۷/۹۶	۷/۱۸	IP-7
	۱۵/۰۰	۱۶/۱۳	۱۴/۳۳	۱۴/۵۵		۱۳/۰۰	۱۳/۹۸	۱۲/۴۲	۱۲/۶۱		۸/۵۰	۹/۱۴	۸/۱۲	۸/۲۵	IP-14
	۱۵/۵۰	۱۴/۸۰	۱۶/۶۶	۱۵/۰۴		۱۴/۵۰	۱۳/۸۵	۱۵/۵۹	۱۴/۰۷		۱۰/۰۰	۹/۵۵	۱۰/۷۵	۹/۷۰	IP-21
	۸/۰۵	۸/۶۵	۷/۶۹	۷/۸۱		۷/۶۰	۸/۱۷	۷/۲۶	۷/۳۷		۶/۲۵	۶/۷۲	۵/۹۷	۶/۰۶	RP-7
	۴/۲۱	۴/۰۲	۴/۵۳	۴/۰۸		۳/۲۵	۳/۱۰	۳/۴۹	۳/۱۵		۲/۸۴	۲/۷۱	۳/۰۵	۲/۷۵	RP-14
	۲/۳۵	۲/۲۴	۲/۵۳	۲/۲۸		۲/۱۰	۲/۰۱	۲/۲۶	۲/۰۴		۱/۵۰	۱/۴۳	۱/۶۱	۱/۴۶	RP-21
مقاومت فشاری ۲۸ روزه															
بازی				خنثی				اسیدی							
انحراف معیار	میانگین	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱	انحراف معیار	میانگین	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱	انحراف معیار	میانگین	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱	
	۱۶/۸۰	۱۸/۰۶	۱۶/۰۴	۱۶/۳۰		۱۶/۱۰	۱۷/۳۱	۱۵/۳۸	۱۵/۶۲		۱۱/۳۰	۱۲/۱۵	۱۰/۷۹	۱۰/۹۶	Ref
	۱۳/۸۰	۱۴/۸۴	۱۳/۱۸	۱۳/۳۹		۱۲/۱۰	۱۳/۰۱	۱۱/۵۶	۱۱/۷۴		۱۰/۱۰	۱۰/۸۶	۹/۶۵	۹/۸۰	GP-7
۶	۱۵/۲۰	۱۶/۳۴	۱۴/۵۲	۱۴/۷۴	۵/۵۴	۱۴/۸۷	۱۵/۹۹	۱۴/۲۰	۱۴/۴۲	۳/۸۵	۱۲/۰۰	۱۲/۹۰	۱۱/۴۶	۱۱/۶۴	GP-14
	۲۲/۵۰	۲۱/۴۹	۲۴/۱۹	۲۱/۸۳		۱۹/۲۰	۱۸/۳۴	۲۰/۶۴	۱۸/۶۲		۱۵/۵۰	۱۴/۸۰	۱۶/۶۶	۱۵/۰۴	GP-21
	۱۷/۹۰	۱۹/۲۴	۱۷/۰۹	۱۷/۳۶		۱۶/۸۰	۱۸/۰۶	۱۶/۰۴	۱۶/۳۰		۱۱/۵۰	۱۲/۳۶	۱۰/۹۸	۱۱/۱۶	EP-7

جدول ۶. مقاومت فشاری نمونه ها (مگاپاسکال) و انحراف معیار

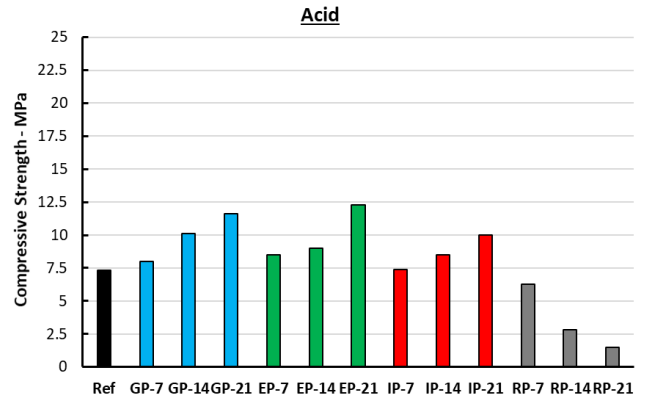
Table 6. Compressive strength values of the samples (MPa).

۲۰/۹۰	۱۹/۹۶	۲۲/۴۷	۲۰/۲۷	۱۸/۶۵	۱۷/۸۱	۲۰/۰۵	۱۸/۰۹	۱۳/۱۱	۱۲/۵۲	۱۴/۰۹	۱۲/۷۲	EP-14			
۲۰/۵۰	۱۹/۵۸	۲۲/۰۴	۱۹/۸۹	۱۹/۲۰	۱۸/۳۴	۲۰/۶۴	۱۸/۶۲	۱۵/۰۰	۱۴/۳۳	۱۶/۱۳	۱۴/۵۵	EP-21			
۱۸/۲۰	۱۷/۸	۱۹/۵۷	۱۷/۶۵	۱۶/۵۰	۱۵/۷۶	۱۷/۷۴	۱۶/۰۱	۱۱/۰۰	۱۰/۵۱	۱۱/۸۳	۱۰/۶۷	IP-7			
۲۲/۴۰	۲۴/۰۸	۲۱/۳۹	۲۱/۷۳	۱۹/۱۵	۲۰/۵۹	۱۸/۲۹	۱۸/۵۸	۱۲/۷۰	۱۳/۶۵	۱۲/۱۳	۱۲/۳۲	IP-14			
۲۲/۳۰	۲۱/۳۰	۲۳/۹۷	۲۱/۶۳	۲۱/۴۰	۲۰/۴۴	۲۳/۰۱	۲۰/۷۶	۱۴/۵۰	۱۳/۸۵	۱۵/۵۹	۱۴/۰۷	IP-21			
۱۲/۲۰	۱۳/۱۲	۱۱/۶۵	۱۱/۸۳	۱۱/۵۰	۱۲/۳۶	۱۰/۹۸	۱۱/۱۶	۹/۵۰	۱۰/۲۱	۹/۰۷	۹/۲۲	RP-7			
۶/۲۷	۵/۹۹	۶/۷۴	۶/۰۸	۴/۹۱	۴/۶۹	۵/۲۸	۴/۷۶	۴/۲۸	۴/۰۹	۴/۶۰	۴/۱۵	RP-14			
۳/۵۰	۳/۳۴	۳/۷۶	۳/۴۰	۳/۰۰	۲/۸۷	۳/۲۳	۲/۹۱	۲/۲۰	۲/۱۰	۲/۳۷	۲/۱۳	RP-21			
مقاومت فشاری ۹۰ روزه															
اسیدی															
خنثی															
بازی															
انحراف معیار	میانگین	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱	انحراف معیار	میانگین	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱	انحراف معیار	میانگین	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱	
	۱۸/۱۶	۱۹/۵۲	۱۷/۳۴	۱۷/۶۲	۱۷/۴۰	۱۸/۷۱	۱۶/۶۲	۱۶/۸۸	۱۲/۲۲	۱۳/۱۴	۱۱/۶۷	۱۱/۸۵		Ref	
	۱۵/۰۶	۱۶/۱۹	۱۴/۳۸	۱۴/۶۱	۱۳/۴۵	۱۴/۴۶	۱۲/۸۴	۱۳/۰۵	۱۱/۱۰	۱۱/۹۳	۱۰/۶۰	۱۰/۷۷		GP-7	
	۱۷/۱۵	۱۸/۴۴	۱۶/۳۸	۱۶/۶۴	۱۷/۰۰	۱۸/۲۸	۱۶/۲۴	۱۶/۴۹	۱۳/۲۰	۱۴/۱۹	۱۲/۶۱	۱۲/۸۰		GP-14	
	۲۴/۹۸	۲۳/۸۶	۲۶/۸۵	۲۴/۲۳	۲۱/۶۰	۲۰/۶۳	۲۳/۲۲	۲۰/۹۵	۱۷/۳۰	۱۶/۵۲	۱۸/۶۰	۱۶/۷۸		GP-21	
	۲۰/۰۰	۲۱/۵۰	۱۹/۱۰	۱۹/۴۰	۱۸/۶۰	۲۰/۰۰	۱۷/۷۶	۱۸/۰۴	۱۲/۴۵	۱۳/۳۸	۱۱/۸۹	۱۲/۰۸		EP-7	
	۲۳/۰۰	۲۱/۹۷	۲۴/۷۳	۲۲/۳۱	۲۰/۷۸	۱۹/۸۴	۲۲/۳۴	۲۰/۱۶	۱۴/۵۶	۱۳/۹۰	۱۵/۶۵	۱۴/۱۲		EP-14	
۶/۷۲	۲۲/۹۷	۲۱/۹۴	۲۴/۶۹	۲۲/۲۸	۶/۲۲	۲۱/۴۰	۲۰/۴۴	۲۳/۰۱	۲۰/۷۶	۴/۴۹	۱۶/۹۰	۱۶/۱۴	۱۸/۱۷	۱۶/۳۹	EP-21
	۲۰/۰۰	۱۹/۱۰	۲۱/۵۰	۱۹/۴۰	۱۸/۰۰	۱۷/۱۹	۱۹/۳۵	۱۷/۴۶	۱۱/۸۹	۱۱/۳۵	۱۲/۷۸	۱۱/۵۳		IP-7	
	۲۴/۸۸	۲۶/۷۵	۲۳/۷۶	۲۴/۱۳	۲۱/۰۰	۲۲/۵۸	۲۰/۰۶	۲۰/۳۷	۱۴/۰۰	۱۵/۰۵	۱۳/۳۷	۱۳/۵۸		IP-14	
	۲۴/۸۰	۲۳/۶۸	۲۶/۶۶	۲۴/۰۶	۲۴/۰۰	۲۲/۹۲	۲۵/۸۰	۲۳/۲۸	۱۵/۹۰	۱۵/۱۸	۱۷/۰۹	۱۵/۴۲		IP-21	
	۱۳/۲۰	۱۴/۱۹	۱۲/۶۱	۱۲/۸۰	۱۲/۴۴	۱۳/۳۷	۱۱/۸۸	۱۲/۰۷	۹/۲۰	۹/۸۹	۸/۷۹	۸/۹۲		RP-7	
	۶/۸۰	۶/۴۹	۷/۳۱	۶/۶۰	۵/۳۲	۵/۰۸	۵/۷۲	۵/۱۶	۴/۲۰	۴/۰۱	۴/۵۲	۴/۰۷		RP-14	
	۳/۸۳	۳/۶۶	۴/۱۲	۳/۷۲	۳/۲۶	۳/۱۱	۳/۵۰	۳/۱۶	۲/۰۰	۱/۹۱	۲/۱۵	۱/۹۴		RP-21	

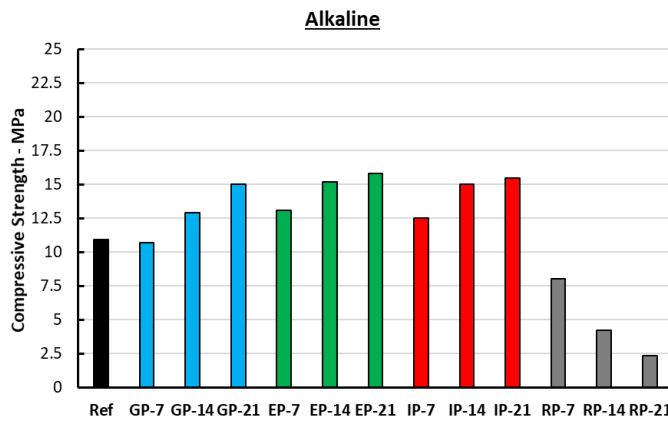
انحراف معیار کلی (مقاومت فشاری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه) = ۵/۹۲



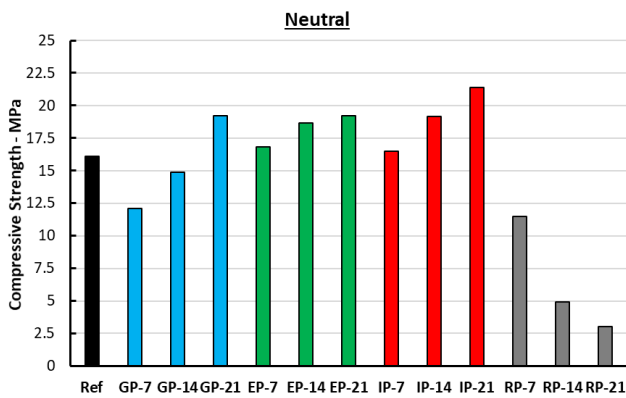
ب) محیط خنثی - ۷ روزه



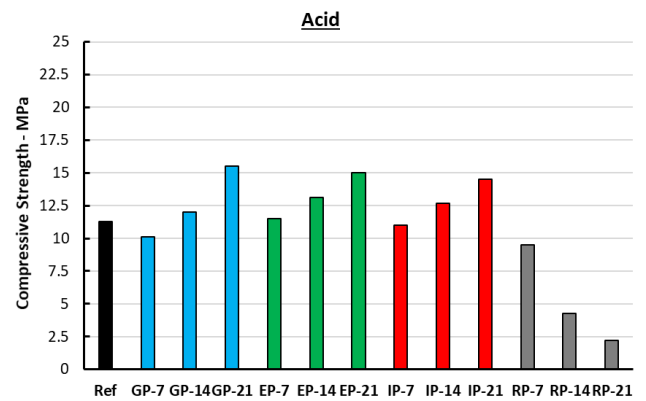
الف) محیط اسیدی - ۷ روزه



پ) محیط بازی - ۷ روزه



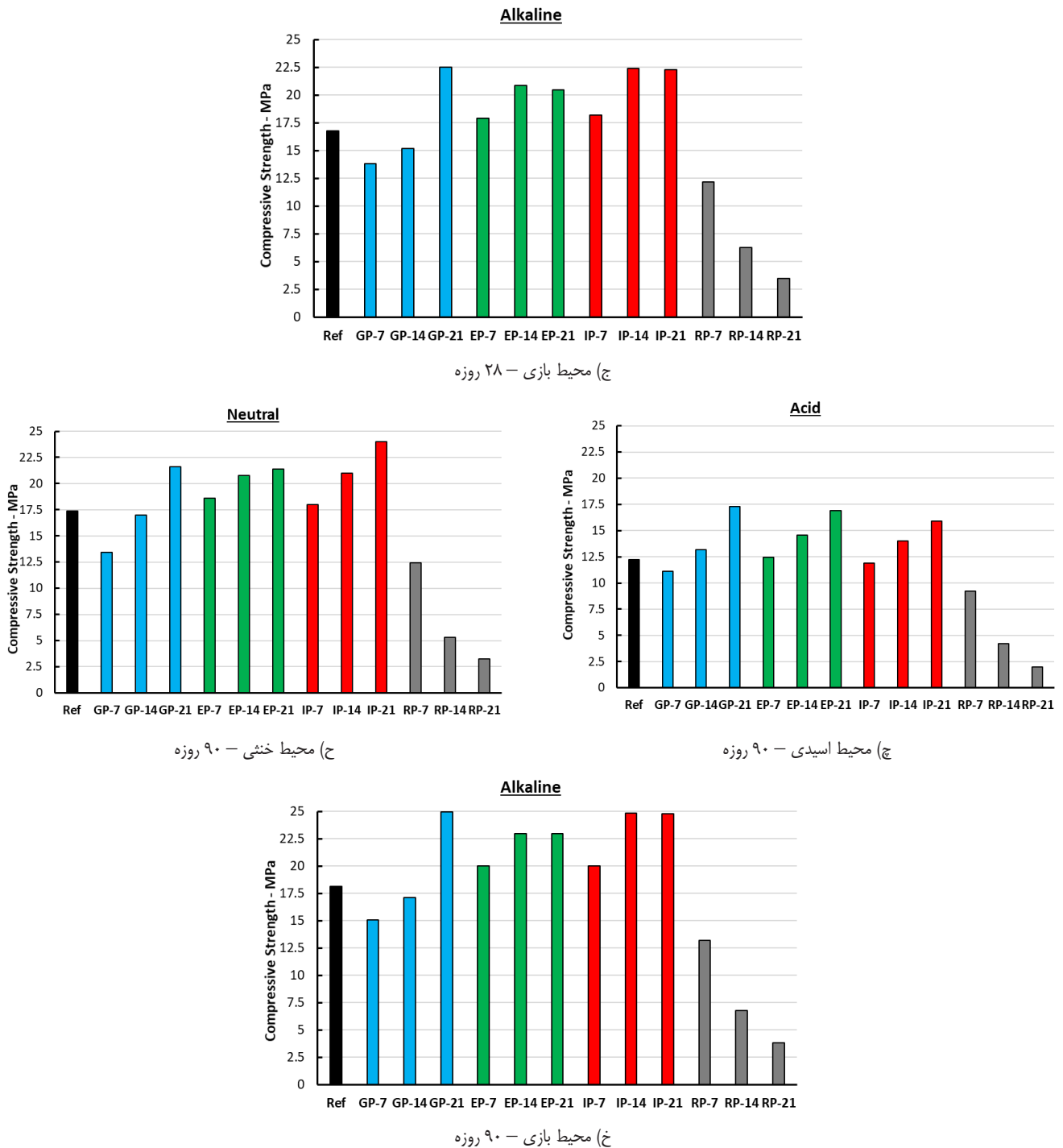
ث) محیط خنثی - ۲۸ روزه



ت) محیط اسیدی - ۲۸ روزه

شکل ۴. نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها (ادامه دارد)

Fig. 4. Results of Compressive strength values of the samples(Continued)



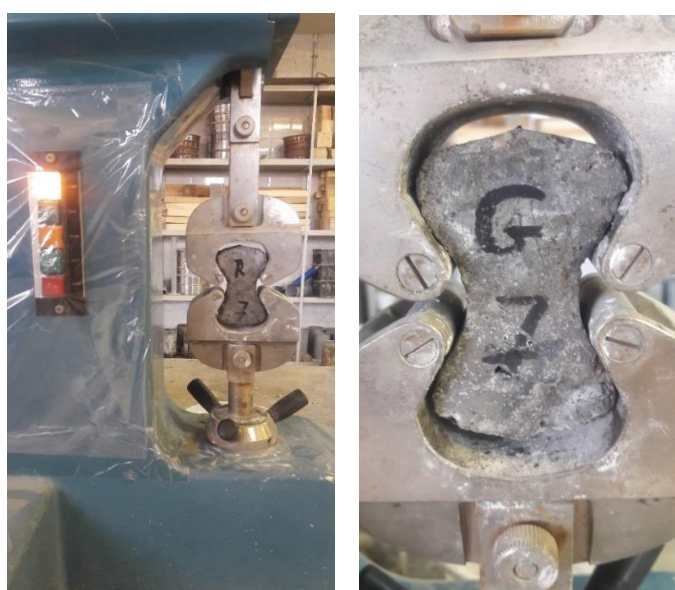
شکل ۴. نتایج مقاومت فشاری نمونه ها

Fig. 4. Results of Compressive strength values of the samples



شکل ۵. تصاویر نمونه ها پس از اتمام عمل آوری

Fig. 5. Testing the compressive strength of the samples



شکل ۶. آزمایش مقاومت کششی نمونه ها

Fig. 6. Tensile strength of samples

۳-۲- آزمایش مقاومت کششی

از نظر سن، ماده افزودنی، درصد افزودنی و محیط عمل آوری) محاسبه شده و به عنوان نماینده آن طرح انتخاب گردید. در جدول ۷ نتایج این عملیات ارائه شده است.

نتایج آزمایش مقاومت کششی نمونه ها در شکل ۷ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می شود، مقاومت کششی نمونه شاهد در محیط اسیدی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه به ترتیب برابر ۰/۶، ۰/۹۲ و ۱ مگاپاسکال و در محیط خنثی ۰/۷۳، ۱/۱۱ و ۱/۲۲ مگاپاسکال و در محیط بازی نیز برابر ۰/۹۴، ۱/۴۲ و ۱/۶۰ مگاپاسکال می باشد. همانطور که انتظار می رفت، بیشترین سرعت افزایش مقاومت کششی مربوط حفاصل سنین ۷ و ۲۸ روزه می باشد. حضور نمونه های مرجع در محیط اسیدی سبب کاهش مقاومت

برای انجام آزمایش مقاومت کششی نمونه ها، از روش کشش مستقیم نمونه طبق استاندارد ASTM C348 استفاده شد. جک هیدرولیک دارای ظرفیت ۱۵۰ دکانیوتن بوده و با سرعت ۰/۲ مگاپاسکال بر ثانیه بار را اعمال می کند. نمونه های بریکت (پایبونی) از هر طرح اختلاط داخل محیط های با PH مختلف قرار گرفته و به ترتیب ۷، ۲۸ و ۹۰ روز بعد شکسته می شوند. تصویر نمونه قرار گرفته در دستگاه آزمایش در شکل ۶ مشاهده می گردد. پس از انجام آزمایش مقاومت کششی بر روی نمونه های پایبونی، اطلاعات حاصله گردآوری شده و مقاومت کششی هر نمونه محاسبه گردید. سپس مقدار میانگین سه نمونه شکسته شده با شرایط یکسان (شرایط یکسان

جدول ۷. مقاومت کششی نمونه ها (مگاپاسکال) و انحراف معیار (ادامه دارد)

Table 7. (Continued)

مقاومت کششی ۷ روزه															
بازی				خنثی				اسیدی							
انحراف معیار	میانگین	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱	انحراف معیار	میانگین	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱	انحراف معیار	میانگین	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱	
	۰/۹۴	۱/۰۱	۰/۹۰	۰/۹۱		۰/۷۳	۰/۷۸	۰/۷۰	۰/۷۱		۰/۶۰	۰/۶۴	۰/۵۷	۰/۵۸	Ref
	۱/۰۳	۱/۱۱	۰/۹۸	۱/۰۰		۰/۹۰	۰/۹۷	۰/۸۶	۰/۸۷		۰/۶۰	۰/۶۵	۰/۵۷	۰/۵۸	GP-7
	۱/۱۰	۱/۱۸	۱/۰۵	۱/۰۷		۰/۹۸	۱/۰۵	۰/۹۴	۰/۹۵		۰/۷۸	۰/۸۴	۰/۷۴	۰/۷۵	GP-14
	۱/۶۲	۱/۵۵	۱/۷۴	۱/۵۷		۱/۴۰	۱/۳۴	۱/۵۱	۱/۳۶		۰/۹۱	۰/۸۷	۰/۹۸	۰/۸۸	GP-21
	۱/۰۳	۱/۱۱	۰/۹۹	۱/۰۰		۰/۹۸	۱/۰۵	۰/۹۳	۰/۹۵		۰/۸۰	۰/۸۶	۰/۷۶	۰/۷۸	EP-7
	۱/۱۶	۱/۱۰	۱/۲۴	۱/۱۲		۱/۰۷	۱/۰۲	۱/۱۵	۱/۰۴		۰/۹۳	۰/۸۹	۱/۰۰	۰/۹۰	EP-14
۰/۳۷	۱/۲۰	۱/۱۴	۱/۲۹	۱/۱۶	۰/۳۳	۱/۱۴	۱/۰۹	۱/۲۲	۱/۱۰	۰/۲۴	۱/۰۱	۰/۹۶	۱/۰۸	۰/۹۸	EP-21
	۱/۳۵	۱/۲۹	۱/۴۵	۱/۳۱		۱/۱۰	۱/۰۵	۱/۱۸	۱/۰۷		۰/۹۰	۰/۸۶	۰/۹۷	۰/۸۷	IP-7
	۱/۶۰	۱/۷۲	۱/۵۳	۱/۵۵		۱/۴۵	۱/۵۶	۱/۳۸	۱/۴۱		۱/۰۶	۱/۱۴	۱/۰۱	۱/۰۳	IP-14
	۱/۶۹	۱/۶۱	۱/۸۲	۱/۶۴		۱/۵۵	۱/۴۸	۱/۶۷	۱/۵۰		۱/۱۵	۱/۱۰	۱/۲۴	۱/۱۲	IP-21
	۰/۸۳	۰/۸۹	۰/۷۹	۰/۸۱		۰/۸۳	۰/۸۹	۰/۷۹	۰/۸۱		۰/۶۲	۰/۶۷	۰/۵۹	۰/۶۰	RP-7
	۰/۵۸	۰/۵۵	۰/۶۲	۰/۵۶		۰/۵۷	۰/۵۴	۰/۶۱	۰/۵۵		۰/۵۰	۰/۴۸	۰/۵۴	۰/۴۹	RP-14
	۰/۴۸	۰/۴۶	۰/۵۲	۰/۴۷		۰/۴۱	۰/۳۹	۰/۴۴	۰/۴۰		۰/۳۴	۰/۳۲	۰/۳۷	۰/۳۳	RP-21

مقاومت کششی ۲۸ روزه															
بازی				خنثی				اسیدی							
انحراف معیار	میانگین	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱	انحراف معیار	میانگین	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱	انحراف معیار	میانگین	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱	
	۱/۴۲	۱/۵۳	۱/۳۶	۱/۳۸		۱/۱۱	۱/۱۹	۱/۰۶	۱/۰۸		۰/۹۲	۰/۹۹	۰/۸۸	۰/۸۹	Ref
۰/۴۳	۱/۴۳	۱/۵۴	۱/۳۷	۱/۳۹	۰/۴۱	۱/۲۲	۱/۳۱	۱/۱۶	۱/۱۸	۰/۳۵	۰/۸۸	۰/۹۵	۰/۸۴	۰/۸۵	GP-7

جدول ۷. مقاومت کششی نمونه ها (مگا پاسکال) و انحراف معیار (ادامه دارد)

Table 7. (Continued)

۱/۶۲	۱/۷۴	۱/۵۵	۱/۵۷	۱/۳۱	۱/۴۱	۱/۲۵	۱/۲۷	۱/۰۰	۱/۰۸	۰/۹۶	۰/۹۷	GP-14
۱/۹۵	۱/۸۶	۲/۱۰	۱/۸۹	۱/۷۵	۱/۶۷	۱/۸۸	۱/۷۰	۱/۳۵	۱/۲۹	۱/۴۵	۱/۳۱	GP-21
۱/۵۹	۱/۷۱	۱/۵۲	۱/۵۴	۱/۵۰	۱/۶۱	۱/۴۳	۱/۴۶	۱/۲۳	۱/۳۲	۱/۱۷	۱/۱۹	EP-7
۱/۷۸	۱/۷۰	۱/۹۱	۱/۷۳	۱/۶۵	۱/۵۸	۱/۷۷	۱/۶۰	۱/۴۳	۱/۳۷	۱/۵۴	۱/۳۹	EP-14
۱/۸۴	۱/۷۶	۱/۹۸	۱/۷۸	۱/۷۵	۱/۶۷	۱/۸۸	۱/۷۰	۱/۵۵	۱/۴۸	۱/۶۷	۱/۵۰	EP-21
۱/۷۵	۱/۶۷	۱/۸۸	۱/۷۰	۱/۶۲	۱/۵۵	۱/۷۴	۱/۵۷	۱/۳۳	۱/۲۷	۱/۴۳	۱/۲۹	IP-7
۲/۱۰	۲/۲۶	۲/۰۱	۲/۰۴	۱/۹۱	۲/۰۵	۱/۸۲	۱/۸۵	۱/۵۹	۱/۷۱	۱/۵۲	۱/۵۴	IP-14
۲/۲۱	۲/۱۱	۲/۳۸	۲/۱۴	۲/۰۰	۱/۹۱	۲/۱۵	۱/۹۴	۱/۶۴	۱/۵۷	۱/۷۶	۱/۵۹	IP-21
۱/۳۰	۱/۴۰	۱/۲۴	۱/۲۶	۱/۲۶	۱/۳۵	۱/۲۰	۱/۲۲	۰/۹۳	۱/۰۰	۰/۸۹	۰/۹۰	RP-7
۰/۹۳	۰/۸۹	۱/۰۰	۰/۹۰	۰/۸۷	۰/۸۳	۰/۹۴	۰/۸۴	۰/۷۵	۰/۷۲	۰/۸۱	۰/۷۳	RP-14
۰/۷۰	۰/۶۷	۰/۷۵	۰/۶۸	۰/۶۰	۰/۵۷	۰/۶۵	۰/۵۸	۰/۵۰	۰/۴۸	۰/۵۴	۰/۴۹	RP-21

مقاومت کششی ۹۰ روزه

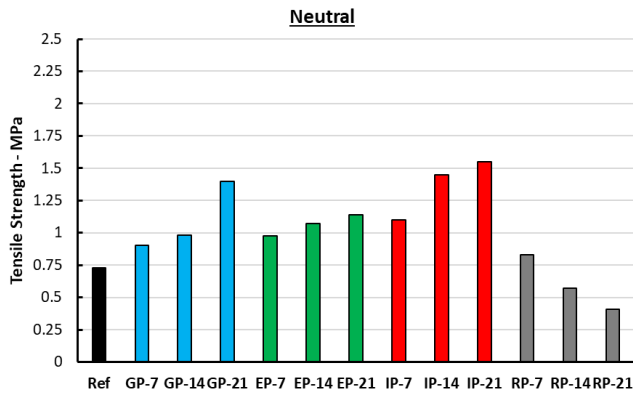
بازی				خنثی				اسیدی							
انحراف معیار	میانگین	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱	انحراف معیار	میانگین	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱	انحراف معیار	میانگین	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱	
	۱/۶۰	۱/۷۲	۱/۵۳	۱/۵۵		۱/۲۲	۱/۳۱	۱/۱۷	۱/۱۸		۱/۰۰	۱/۰۸	۰/۹۶	۰/۹۷	Ref
	۱/۶۲	۱/۷۴	۱/۵۵	۱/۵۷		۱/۴۰	۱/۵۱	۱/۳۴	۱/۳۶		۱/۰۰	۱/۰۸	۰/۹۶	۰/۹۷	GP-7
	۲/۱۰	۲/۲۶	۲/۰۱	۲/۰۴		۱/۵۱	۱/۶۲	۱/۴۴	۱/۴۶		۱/۱۰	۱/۱۸	۱/۰۵	۱/۰۷	GP-14
	۲/۲۱	۲/۱۱	۲/۳۸	۲/۱۴		۲/۰۷	۱/۹۸	۲/۲۳	۲/۰۱		۱/۹۰	۱/۸۱	۲/۰۴	۱/۸۴	GP-21
۰/۴۹	۲/۰۰	۲/۱۵	۱/۹۱	۱/۹۴	۰/۵۰	۱/۹۰	۲/۰۴	۱/۸۱	۱/۸۴	۰/۴۷	۱/۶۳	۱/۷۵	۱/۵۶	۱/۵۸	EP-7
	۲/۲۱	۲/۱۱	۲/۳۸	۲/۱۴		۲/۱۰	۲/۰۱	۲/۲۶	۲/۰۴		۱/۷۶	۱/۶۸	۱/۸۹	۱/۷۱	EP-14
	۲/۱۸	۲/۰۸	۲/۳۴	۲/۱۱		۲/۱۵	۲/۰۵	۲/۳۱	۲/۰۹		۱/۹۰	۱/۸۱	۲/۰۴	۱/۸۴	EP-21
	۱/۹۳	۱/۸۴	۲/۰۷	۱/۸۷		۱/۷۸	۱/۷۰	۱/۹۱	۱/۷۳		۱/۴۶	۱/۳۹	۱/۵۷	۱/۴۲	IP-7

جدول ۷. مقاومت کششی نمونه ها (مگاپاسکال) و انحراف معیار

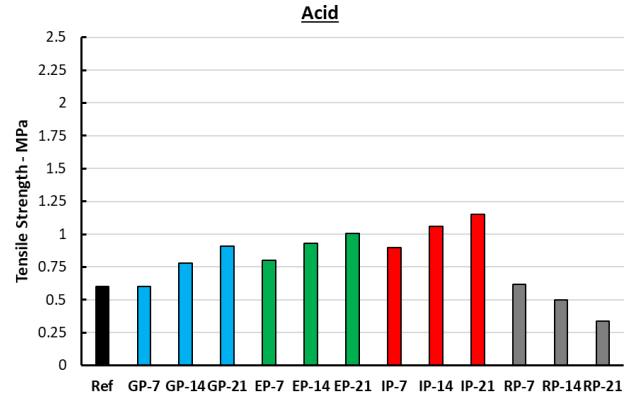
Table 7.

مقاومت کششی ۹۰ روزه															
بازی				ختی				اسیدی							
انحراف معیار	میانگین	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱	انحراف معیار	میانگین	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱	انحراف معیار	میانگین	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱	
	۲/۳۵	۲/۵۳	۲/۲۴	۲/۲۸		۲/۱۰	۲/۲۶	۲/۰۱	۲/۰۴		۱/۷۲	۱/۸۵	۱/۶۴	۱/۶۷	IP-14
	۲/۴۹	۲/۳۸	۲/۶۸	۲/۴۲		۲/۳۳	۲/۲۳	۲/۵۰	۲/۲۶		۱/۸۲	۱/۷۴	۱/۹۶	۱/۷۷	IP-21
	۱/۴۴	۱/۵۵	۱/۳۸	۱/۴۰		۱/۳۸	۱/۴۸	۱/۳۲	۱/۳۴		۰/۹۶	۱/۰۳	۰/۹۲	۰/۹۳	RP-7
	۱/۱۵	۱/۱۰	۱/۲۴	۱/۱۲		۰/۹۸	۰/۹۴	۱/۰۵	۰/۹۵		۰/۷۶	۰/۷۳	۰/۸۲	۰/۷۴	RP-14
	۰/۸۵	۰/۸۱	۰/۹۱	۰/۸۲		۰/۶۹	۰/۶۶	۰/۷۴	۰/۶۷		۰/۵۰	۰/۴۸	۰/۵۴	۰/۴۹	RP-21

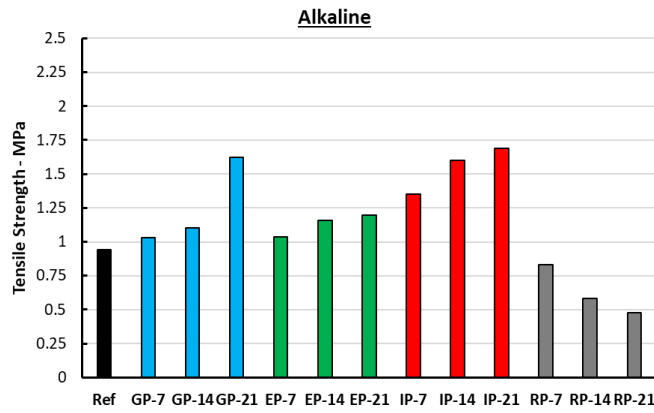
انحراف معیار کلی (مقاومت کششی ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه) = ۰/۵۲



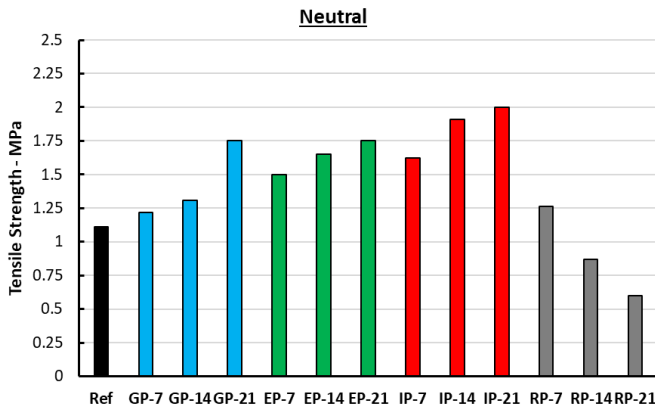
ب) محیط خنثی - ۷ روزه



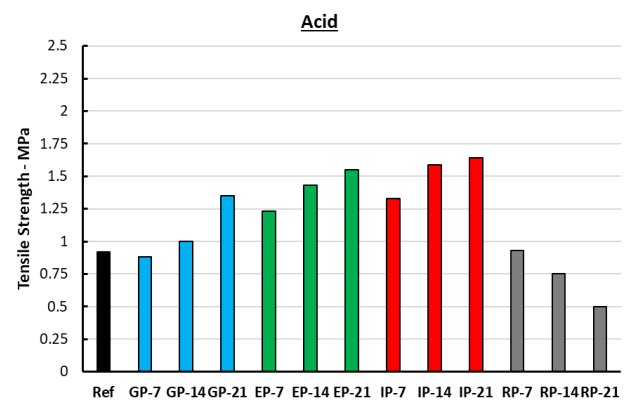
الف) محیط اسیدی - ۷ روزه



پ) محیط بازی - ۷ روزه



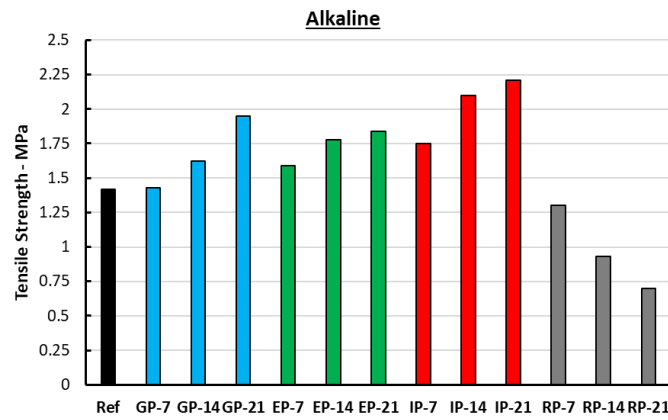
ث) محیط خنثی - ۲۸ روزه



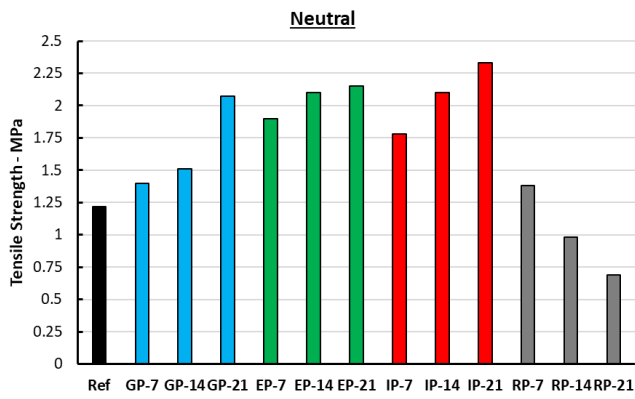
ت) محیط اسیدی - ۲۸ روزه

شکل ۷. نتایج مقاومت کششی نمونه‌ها (ادامه دارد)

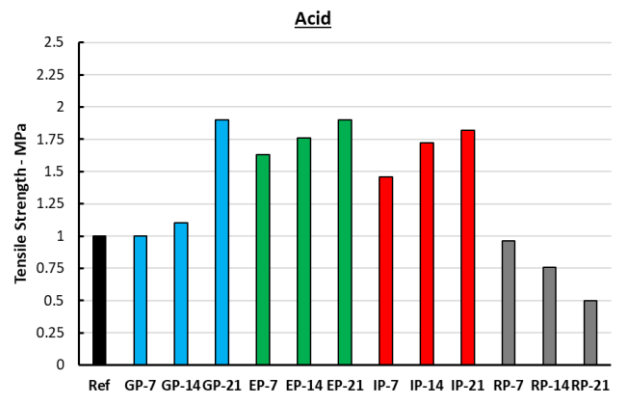
Fig. 7. (Continued)



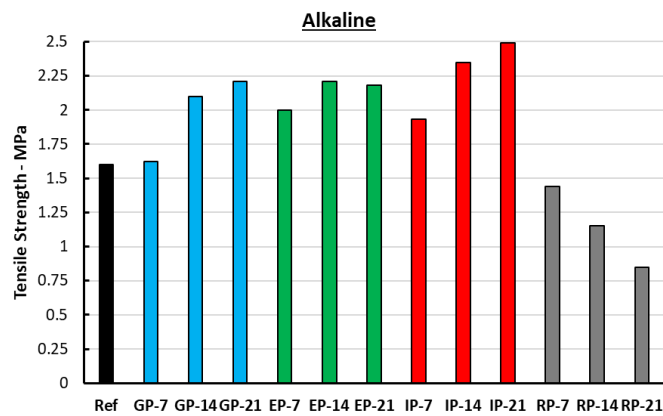
ج) محیط بازی - ۲۸ روزه



ح) محیط خنثی - ۹۰ روزه



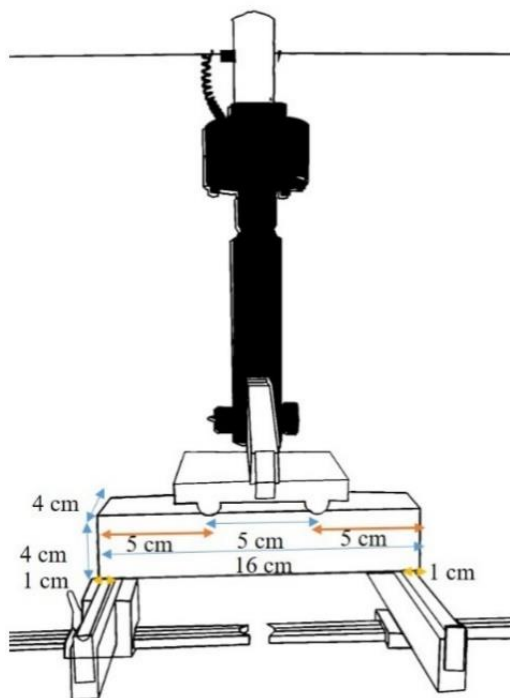
چ) محیط اسیدی - ۹۰ روزه



خ) محیط بازی - ۹۰ روزه

شکل ۷. نتایج مقاومت کششی نمونه ها

Fig. 7.



شکل ۸. تصویر شماتیک آزمایش مقاومت خمشی [۲۳]

Fig. 8.

۳-۳- آزمایش مقاومت خمشی

به منظور انجام آزمایش مقاومت خمشی بر روی نمونه های ملات، نمونه ها در قالب هایی منشوری به ابعاد $۱۶۰ \times ۴۰ \times ۴۰$ میلی متر طبق استاندارد ASTM C1609 [۲۰] ساخته شدند. پس از اتمام فرآیند عمل آوری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه بر روی کلیه نمونه های خمشی، به کمک آزمایش خمش چهارمحوره که حالت خمش خالص (خمش خالص، ناحیه ای از جسم است که فقط خمش تحمل کرده و نیروهای دیگر صفر هستند) را ایجاد می کند، آزمایش مقاومت خمشی انجام شد. به علت مقاومت خمشی بسیار اندک ملات ها و ترد بودن آن ها در خمش، سرعت بارگذاری دستگاه اندک بوده (حدود $۰/۱$ مگاپاسکال بر ثانیه) بطوری که مانع از ایجاد شوک و ضربه در نمونه ها شود. جزئیات انجام آزمایش مقاومت خمشی چهار نقطه ای در شکل ۸ نشان داده شده است.

پس از انجام آزمایش مقاومت خمشی بر روی نمونه های منشوری، اطلاعات حاصله گردآوری شده و مقاومت خمشی هر نمونه محاسبه گردید. سپس مقدار میانگین سه نمونه شکسته شده با شرایط یکسان (شرایط یکسان از نظر سن، ماده افزودنی، درصد افزودنی و محیط عمل آوری) محاسبه شده و به عنوان نماینده آن طرح انتخاب گردید. در جدول ۸ نتایج این آزمایشات ارائه شده است.

کششی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه تا مقدار ۶۷ درصد شده است که بیانگر آثار تخریبی حضور عنصر کلر در محیط اسیدی می باشد. اما در سایر نمونه بجز چند مورد، کاهش مقاومت کششی تحت تأثیر محیط اسیدی، کمتر از ۶۷ درصد می باشد.

مقاومت کششی نمونه های حاوی پودر لاستیک، مشابه روند مقاومت فشاری آن ها بوده و با افزایش پودر لاستیک به ترکیب ملات سیمانی، مقاومت کششی نمونه ها کاهش یافتند. بیشترین مقاومت های کششی در تمامی محیط های عمل آوری مربوط به نمونه های حاوی پودر آهن می باشد. علت این موضوع این است که آزمایش مقاومت کششی ملات بصورت کشش مستقیم بوده و ساختار و ماهیت ذرات آهن قوی تر و منسجم تر از سایر افزودنی ها بوده، بنابراین مقاومت کششی را نیز افزایش بیشتری داده اند (۲/۴۹ مگاپاسکال مربوط به نمونه IP-21).

بنابراین با جمع بندی مطالب فوق، می توان بیان کرد که استفاده از پودرهای شیشه، پوسته تخم مرغ و آهن در ترکیب ملات سیمانی، اگر در مقادیر ۲۱ درصد باشد سبب بهبود چشمگیر مقاومت کششی خواهند شد (هرچند که استفاده در مقادیر کمتر نیز مقاومت کششی را افزایش داده اند).

جدول ۸. مقاومت خمشی نمونه ها (مگا پاسکال) و انحراف معیار (ادامه دارد)

Table 8. (Continued)

مقاومت خمشی ۷ روزه															
بازی				خنثی				اسیدی							
انحراف معیار	میانگین	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱	انحراف معیار	میانگین	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱	انحراف معیار	میانگین	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱	
	۰/۴۹	۰/۵۳	۰/۴۷	۰/۴۸		۰/۳۸	۰/۴۱	۰/۳۶	۰/۳۷		۰/۳۲	۰/۳۴	۰/۳۱	۰/۳۱	Ref
	۰/۵۱	۰/۵۵	۰/۴۹	۰/۴۹		۰/۴۵	۰/۴۸	۰/۴۳	۰/۴۴		۰/۳۴	۰/۳۷	۰/۳۲	۰/۳۳	GP-7
	۰/۶۰	۰/۶۵	۰/۵۷	۰/۵۸		۰/۵۰	۰/۵۴	۰/۴۸	۰/۴۹		۰/۳۷	۰/۴۰	۰/۳۵	۰/۳۶	GP-14
	۰/۶۸	۰/۶۵	۰/۷۳	۰/۶۶		۰/۶۲	۰/۵۹	۰/۶۷	۰/۶۰		۰/۴۹	۰/۴۷	۰/۵۳	۰/۴۸	GP-21
	۰/۵۶	۰/۶۰	۰/۵۳	۰/۵۴		۰/۵۳	۰/۵۷	۰/۵۱	۰/۵۱		۰/۴۴	۰/۴۷	۰/۴۲	۰/۴۳	EP-7
	۰/۶۵	۰/۶۲	۰/۷۰	۰/۶۳		۰/۶۲	۰/۵۹	۰/۶۷	۰/۶۰		۰/۵۲	۰/۵۰	۰/۵۶	۰/۵۰	EP-14
۰/۱۶	۰/۶۶	۰/۶۳	۰/۷۱	۰/۶۴	۰/۱۴	۰/۶۳	۰/۶۰	۰/۶۸	۰/۶۱	۰/۱۳	۰/۵۵	۰/۵۳	۰/۵۹	۰/۵۳	EP-21
	۰/۵۹	۰/۵۶	۰/۶۳	۰/۵۷		۰/۵۶	۰/۵۳	۰/۶۰	۰/۵۴		۰/۴۴	۰/۴۲	۰/۴۷	۰/۴۳	IP-7
	۰/۷۵	۰/۸۱	۰/۷۲	۰/۷۳		۰/۶۵	۰/۷۰	۰/۶۲	۰/۶۳		۰/۶۰	۰/۶۵	۰/۵۷	۰/۵۸	IP-14
	۰/۸۴	۰/۸۰	۰/۹۰	۰/۸۱		۰/۷۲	۰/۶۹	۰/۷۷	۰/۷۰		۰/۵۵	۰/۵۳	۰/۵۹	۰/۵۳	IP-21
	۰/۴۸	۰/۵۲	۰/۴۶	۰/۴۷		۰/۴۶	۰/۴۹	۰/۴۴	۰/۴۵		۰/۳۱	۰/۳۳	۰/۳۰	۰/۳۰	RP-7
	۰/۳۲	۰/۳۱	۰/۳۴	۰/۳۱		۰/۳۲	۰/۳۱	۰/۳۴	۰/۳۱		۰/۲۲	۰/۲۱	۰/۲۴	۰/۲۱	RP-14
	۰/۲۷	۰/۲۹	۰/۲۶	۰/۲۶		۰/۲۲	۰/۲۱	۰/۲۴	۰/۲۱		۰/۱۷	۰/۱۶	۰/۱۸	۰/۱۶	RP-21

مقاومت خمشی ۲۸ روزه

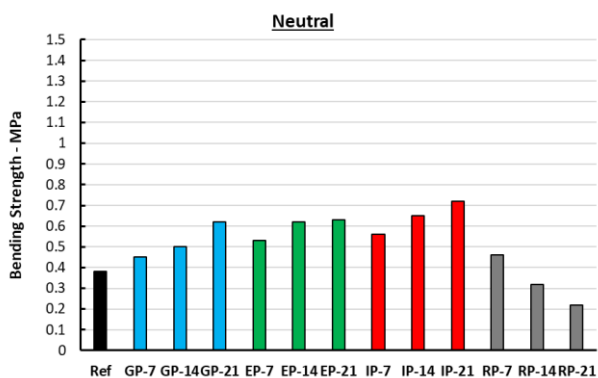
مقاومت خمشی ۲۸ روزه															
بازی				خنثی				اسیدی							
انحراف معیار	میانگین	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱	انحراف معیار	میانگین	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱	انحراف معیار	میانگین	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱	
	۰/۷۳	۰/۷۸	۰/۷۰	۰/۷۱		۰/۵۶	۰/۶۰	۰/۵۳	۰/۵۴		۰/۴۷	۰/۵۱	۰/۴۵	۰/۴۶	Ref
	۰/۷۱	۰/۷۶	۰/۶۸	۰/۶۹		۰/۶۲	۰/۶۷	۰/۵۹	۰/۶۰		۰/۴۵	۰/۴۸	۰/۴۳	۰/۴۴	GP-7
	۰/۸۳	۰/۸۹	۰/۷۹	۰/۸۱		۰/۶۴	۰/۶۹	۰/۶۱	۰/۶۲		۰/۵۲	۰/۵۶	۰/۵۰	۰/۵۰	GP-14
۰/۲۲	۰/۹۶	۰/۹۲	۱/۰۴	۰/۹۴	۰/۲۰	۰/۸۵	۰/۸۱	۰/۹۱	۰/۸۲	۰/۱۸	۰/۶۹	۰/۶۶	۰/۷۴	۰/۶۷	GP-21
	۰/۷۹	۰/۸۵	۰/۷۵	۰/۷۷		۰/۷۷	۰/۸۳	۰/۷۴	۰/۷۵		۰/۶۳	۰/۶۸	۰/۶۰	۰/۶۱	EP-7
	۰/۸۵	۰/۸۱	۰/۹۱	۰/۸۲		۰/۸۳	۰/۷۹	۰/۸۹	۰/۸۱		۰/۷۲	۰/۶۹	۰/۷۷	۰/۷۰	EP-14

جدول ۸. مقاومت خمشی نمونه ها (مگاپاسکال) و انحراف معیار

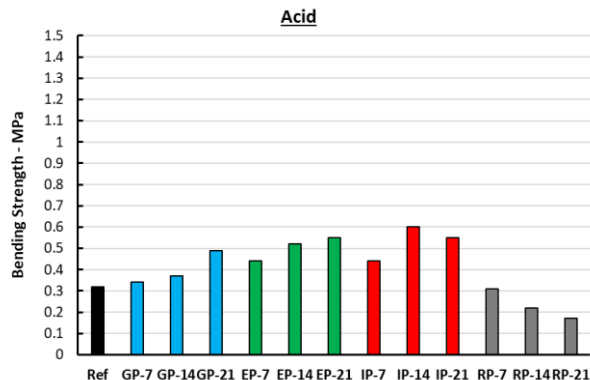
Table 8.

بازی		خنثی				اسیدی									
انحراف معیار	میانگین	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱	انحراف معیار	میانگین	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱	انحراف معیار	میانگین	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱	
	۰/۹۴	۰/۹۰	۱/۰۱	۰/۹۱		۰/۸۹	۰/۸۵	۰/۹۶	۰/۸۶		۰/۷۹	۰/۷۵	۰/۸۵	۰/۷۷	EP-21
	۰/۸۵	۰/۸۱	۰/۹۱	۰/۸۲		۰/۸۱	۰/۷۷	۰/۸۷	۰/۷۹		۰/۶۶	۰/۶۳	۰/۷۱	۰/۶۴	IP-7
	۱/۱۴	۱/۲۳	۱/۰۹	۱/۱۱		۰/۹۳	۱/۰۰	۰/۸۹	۰/۹۰		۰/۷۹	۰/۸۵	۰/۷۵	۰/۷۷	IP-14
	۱/۱۴	۱/۰۹	۱/۲۴	۱/۱۱		۰/۹۸	۰/۹۴	۱/۰۵	۰/۹۵		۰/۸۲	۰/۷۸	۰/۸۸	۰/۸۰	IP-21
	۰/۶۸	۰/۷۳	۰/۶۵	۰/۶۶		۰/۶۶	۰/۷۱	۰/۶۳	۰/۶۴		۰/۴۷	۰/۵۱	۰/۴۵	۰/۴۶	RP-7
	۰/۴۹	۰/۴۷	۰/۵۳	۰/۴۸		۰/۴۵	۰/۴۳	۰/۴۸	۰/۴۴		۰/۳۸	۰/۳۶	۰/۴۰	۰/۳۶	RP-14
	۰/۳۷	۰/۳۵	۰/۴۰	۰/۳۶		۰/۲۹	۰/۲۸	۰/۳۱	۰/۲۸		۰/۲۵	۰/۲۴	۰/۲۷	۰/۲۴	RP-21
مقاومت خمشی ۹۰ روزه															
بازی		خنثی				اسیدی									
انحراف معیار	میانگین	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱	انحراف معیار	میانگین	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱	انحراف معیار	میانگین	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱	
	۰/۸۴	۰/۹۰	۰/۸۰	۰/۸۱		۰/۶۵	۰/۷۰	۰/۶۲	۰/۶۳		۰/۵۵	۰/۵۹	۰/۵۳	۰/۵۳	Ref
	۰/۹۰	۰/۹۷	۰/۸۶	۰/۸۷		۰/۷۹	۰/۸۵	۰/۷۵	۰/۷۷		۰/۵۷	۰/۶۱	۰/۵۴	۰/۵۵	GP-7
	۱/۰۱	۱/۰۹	۰/۹۶	۰/۹۸		۰/۷۶	۰/۸۲	۰/۷۳	۰/۷۴		۰/۶۴	۰/۶۹	۰/۶۱	۰/۶۲	GP-14
	۱/۱۶	۱/۱۱	۱/۲۵	۱/۱۳		۰/۹۹	۰/۹۵	۱/۰۶	۰/۹۶		۰/۸۳	۰/۷۹	۰/۸۹	۰/۸۱	GP-21
	۰/۹۳	۱/۰۰	۰/۸۹	۰/۹۰		۰/۸۹	۰/۹۶	۰/۸۵	۰/۸۶		۰/۷۳	۰/۷۸	۰/۷۰	۰/۷۱	EP-7
	۱/۰۰	۰/۹۶	۱/۰۸	۰/۹۷		۰/۹۶	۰/۹۲	۱/۰۳	۰/۹۳		۰/۸۴	۰/۸۰	۰/۹۰	۰/۸۱	EP-14
۰/۲۵	۱/۱۰	۱/۰۵	۱/۱۸	۱/۰۷	۰/۲۱	۱/۰۳	۰/۹۸	۱/۱۱	۱/۰۰	۰/۲۲	۰/۹۱	۰/۸۷	۰/۹۸	۰/۸۸	EP-21
	۰/۹۷	۰/۹۳	۱/۰۴	۰/۹۴		۰/۹۱	۰/۸۷	۰/۹۸	۰/۸۸		۰/۷۴	۰/۷۱	۰/۸۰	۰/۷۲	IP-7
	۱/۲۰	۱/۲۹	۱/۱۵	۱/۱۶		۱/۰۷	۱/۱۵	۱/۰۲	۱/۰۴		۰/۸۶	۰/۹۲	۰/۸۲	۰/۸۳	IP-14
	۱/۲۹	۱/۲۳	۱/۳۹	۱/۲۵		۱/۰۷	۱/۰۲	۱/۱۵	۱/۰۴		۰/۹۲	۰/۸۸	۰/۹۹	۰/۸۹	IP-21
	۰/۷۴	۰/۸۰	۰/۷۱	۰/۷۲		۰/۷۵	۰/۸۱	۰/۷۲	۰/۷۳		۰/۴۷	۰/۵۱	۰/۴۵	۰/۴۶	RP-7
	۰/۵۳	۰/۵۱	۰/۵۷	۰/۵۱		۰/۵۴	۰/۵۲	۰/۵۸	۰/۵۲		۰/۳۶	۰/۳۴	۰/۳۹	۰/۳۵	RP-14
	۰/۴۵	۰/۴۳	۰/۴۸	۰/۴۴		۰/۳۸	۰/۳۶	۰/۴۱	۰/۳۷		۰/۲۱	۰/۲۰	۰/۲۳	۰/۲۰	RP-21

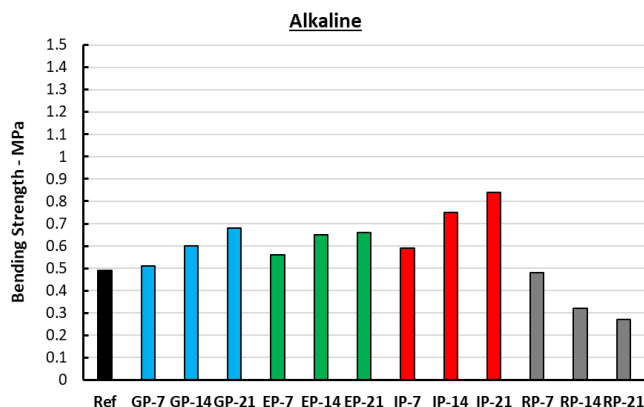
انحراف معیار کلی (مقاومت خمشی ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه) = ۰/۲۵



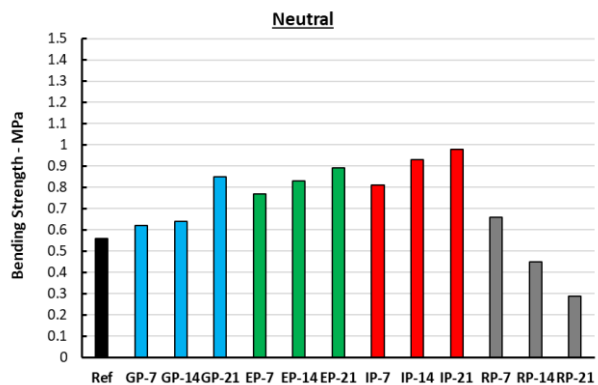
ب) محیط خنثی - ۷ روزه



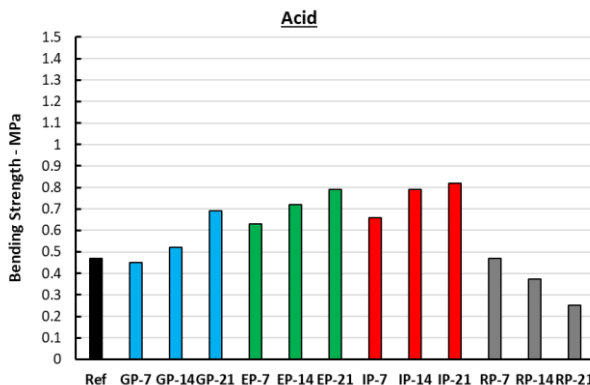
الف) محیط اسیدی - ۷ روزه



پ) محیط بازی - ۷ روزه



ث) محیط خنثی - ۲۸ روزه



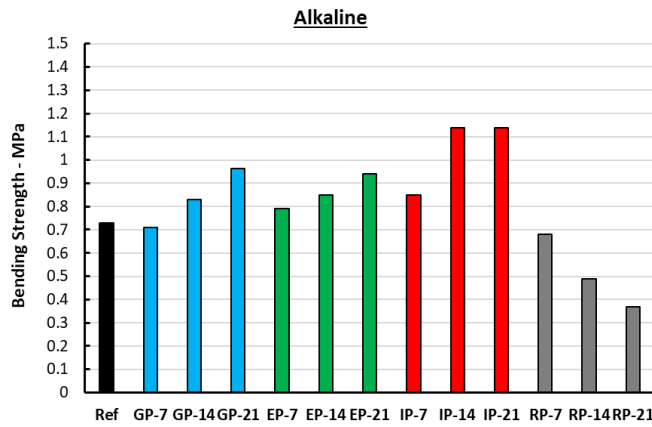
ت) محیط اسیدی - ۲۸ روزه

شکل ۹. نتایج مقاومت خمشی نمونه‌ها (ادامه دارد)

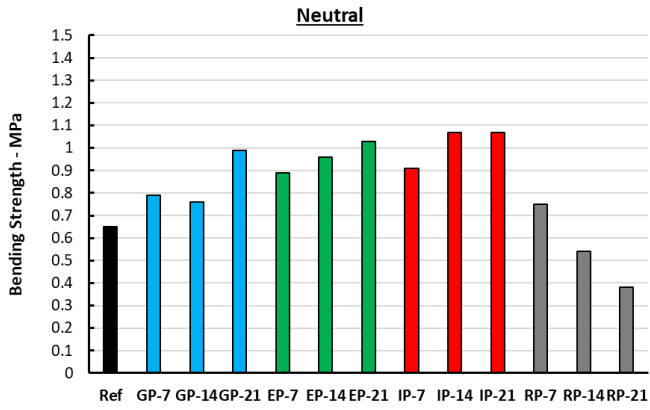
Fig. 9. (Continued)

۱۴ و ۲۱ درصد از پودرهایی شیشه، پوسته تخم مرغ و آهن در ترکیب ملات سیمانی، مقاومت خمشی نمونه‌ها را در شرایط محیطی اسیدی، خنثی و بازی نسبت به نمونه مرجع افزایش داده است. مقاومت خمشی نمونه مرجع در سن ۷ روزه تحت شرایط محیطی اسیدی، خنثی و بازی به ترتیب برابر

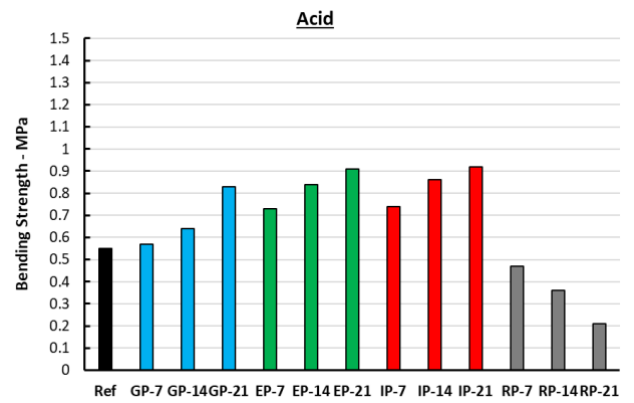
نتایج حاصل از آزمایش مقاومت خمشی بر روی نمونه های منشوری، در شکل ۹ آورده شده است. همانطور که ملاحظه می گردد، مقاومت خمشی در تمامی نمونه ها با افزایش درصد استفاده از افزودنی بازیافتی، افزایش یافته است (بجز در نمونه های حاوی پودر لاستیک). به بیان دیگر، استفاده از ۷،



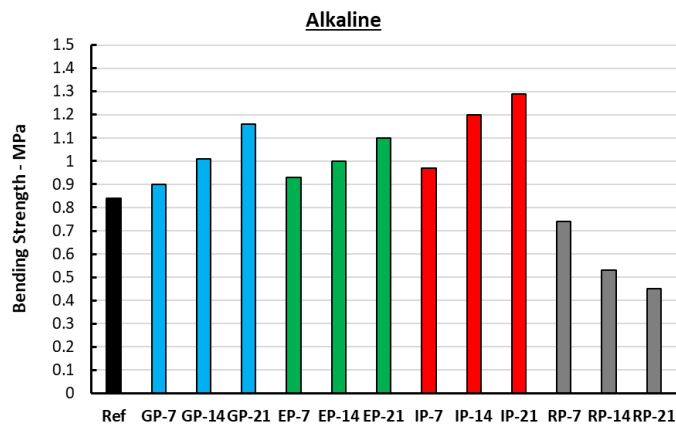
ج) محیط بازی - ۲۸ روزه



ح) محیط خنثی - ۹۰ روزه



چ) محیط اسیدی - ۹۰ روزه



خ) محیط بازی - ۹۰ روزه

شکل ۹. نتایج مقاومت خمشی نمونه ها

Fig. 9.

۷ و ۱۵ درصد، افزایش مقاومت خمشی چشمگیری نسبت به نمونه شاهد رخ نداده است، اما استفاده از ۲۱ درصد جایگزینی پودر شیشه و پودر پوسته تخم مرغ، سبب افزایش مقاومت خمشی تا ۳۸ (۹۰ روزه - محیط بازی) و ۷۲ (۷ روزه - محیط اسیدی) درصد شده است. همچنین می توان ملاحظه نمود که بیشترین نرخ رشد مقاومت خمشی برای نمونه های حاوی پودر شیشه و پودر پوسته تخم مرغ، مربوط به محیط اسیدی و سپس خنثی و بازی می باشد.

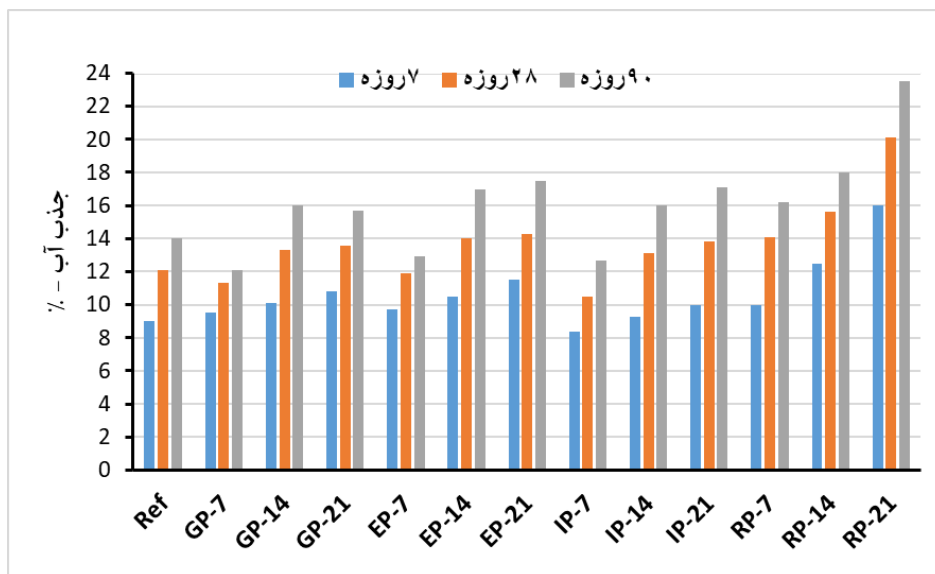
حضور پودر لاستیک در نمونه های ملات سیمانی، هرچند در برخی از نمونه ها در مقدار ۷ درصد سبب افزایش مقاومت خمشی اندکی شده است، اما بطور کلی استفاده از این نوع پودر سبب کاهش شدید مقاومت خمشی (به علت عدم پیوند مناسب با خمیر سیمان و به تبع وجود حفرات زیاد در ساختار ملات) شده است.

۳-۴- آزمایش جذب آب

آزمایش جذب آب بر روی نمونه های مکعبی به بعد ۵۰ میلی متر و در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه بر اساس استاندارد ASTM C642 [۲۱] انجام شد. از هر طرح سه نمونه مکعبی ساخته شده که جذب آب نهایی بر اساس میانگین گیری از مقادیر جذب آب بدست آمده برای هر نمونه محاسبه شد. نمونه ها را پس از عمل آوری در حوضچه های آب با دمای ثابت 23 ± 2 درجه سانتی گراد، از آب خارج گردیده و پس از خشک شدن تدریجی در محیط آزمایشگاه، جهت تعیین وزن خشک در داخل کوره با دمای ۱۰۰ الی ۱۱۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند. سپس نمونه ها از گرمکن خارج و پس از رسیدن به دمای محیط توسط ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۱ گرم توزین شدند. پس از آن برای ۲۴ ساعت دیگر نمونه ها در کوره قرار داده شده و سپس توزین گردیدند. این فرآیند تا آنجا ادامه پیدا کرده که تفاضل دو توزین متوالی کمتر از ۰/۵٪ وزن خشک شود. آخرین توزین به عنوان وزن خشک نمونه یادداشت گردید. پس از خنک شدن تدریجی نمونه ها در محیط آزمایشگاه، برای بدست آوردن وزن نمونه اشباع با سطح خشک، نمونه ها به داخل حوضچه آب با دمای ۲۱ درجه سانتی گراد بازگردانده شدند. نمونه ها پس از گذشت حداقل ۴۸ ساعت از حوضچه مذکور خارج و پس از خشک کردن رطوبت سطحی توسط حوله خشک، توزین شدند. نمونه های مذکور دوباره به مدت ۲۴ ساعت در همان حوضچه نگهداری شده و سپس از حوضچه خارج گردیده و دوباره به همان شیوه قبلی توزین شدند. این روند تا جایی ادامه پیدا می کند که اختلاف دو توزین متوالی کمتر از ۰/۵٪ وزن سنگین تر باشد. در پایان، آخرین توزین به عنوان وزن اشباع با سطح خشک

۰/۳۲، ۰/۳۸ و ۰/۴۹ مگاپاسکال و در سن ۲۸ روزه برابر ۰/۴۷، ۰/۵۶ و ۰/۷۳ مگاپاسکال و در سن ۹۰ روزه برابر ۰/۵۵، ۰/۶۵ و ۰/۸۴ مگاپاسکال می باشد. همانطور که ملاحظه می شود، مقاومت خمشی نمونه های مرجع، با افزایش سن نمونه ها افزایش یافته است. در محیط بازی به علت وجود عناصر کلسیم و سدیم بیشتر نسبت به سایر محیط ها، پیوستگی ترکیبات ملات و مقاومت خمشی آن بیشتر از سایر نمونه ها می باشد.

استفاده از افزودنی ها در ترکیب ملات تأثیر چندانی در مسلح کردن ملات سیمانی ندارد و صرفاً به عنوان جایگزین سیمان و نقش گیرش و ارتباط بین دانه های ماسه را حفظ می کند، به همین دلیل شکست خمشی در تمامی نمونه ها تقریباً بصورت ترد بوده و پس از رسیدن به مقاومت نهایی، به یکباره شکستند. اما در مقایسه کلی نمونه ها با یکدیگر، نمونه حاوی پودر آهن که از استحکام و مقاومت ذاتی بیشتری نسبت به سایر افزودنی ها برخوردار است، دارای بیشترین مقاومت خمشی می باشد، بطوری که مقاومت خمشی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه در تمام محیط ها مربوط به نمونه های IP-21 (۰/۸۴، ۱/۱۴ و ۱/۲۹ مگاپاسکال) می باشد. همچنین نتایج جایگزینی ۱۴ و ۲۱ درصد پودر آهن به ترکیب ملات سیمانی نشان از این دارد که تفاوت چندانی در مقاومت خمشی حاصل نشده است، بنابراین می توان پیش بینی نمود که با افزودن پودر آهن بیشتر از ۲۱ درصد، یا مقاومت خمشی افزایشی نداشته و یا کاهش خواهد یافت. در نتیجه درصد بهینه برای این پودر (پودر آهن) برای مقاومت خمشی، ۲۱ درصد جایگزینی می باشد. افزایش مقاومت خمشی نمونه های حاوی پودر آهن ناشی از نقش تسلیح کنندگی پودر آهن در ملات می باشد. این پدیده همانند نتایج استفاده از براده آهن در بتن سبب تقویت مشخصات مکانیکی ملات می گردد. یکی از دلایل افزایش مقاومت، رفتار الیاف گونه براده آهن در ملات است که این عملکرد در مقاومت خمشی بیشتر مشهود است. زیرا نمونه ملات ماسه سیمان غیر مسلح در برابر نیروی خمشی کمترین مقاومت را در مقایسه با نیروهای فشاری و کششی از خود نشان می دهد. وقتی یک نمونه منشوری تحت خمش خالص قرار می گیرد، وجه تحتانی نمونه که در زیر تار خنثی واقع شده است به سرعت ترک خورده و موجب انهدام نمونه می شود. عاملی که سبب مقاومت در برابر تنش های ناشی از خمش در تارهای کششی نمونه می باشد وجود الیاف مسلح کننده در ملات است و هر چه صلیبیت و مقدار این الیاف بیشتر باشد به طور مستقیم مقاومت خمشی نمونه افزایش می یابد. در نمونه های حاوی پودر شیشه و پودر پوسته تخم مرغ نیز به همان دلایل ارائه شده در آزمایشات مقاومت فشاری و کششی، در مقادیر جایگزینی



شکل ۱۰. نتایج آزمایش جذب آب (درصد)

Fig. 10.

توانند کاربرد مناسبی برای ملات های سیمانی باشند. اما در مقادیر استفاده ۲۱ درصد، توصیه نمی شوند. با مقایسه تمامی نتایج، کمترین و بیشترین درصد جذب آب متعلق به نمونه IP-7 (۷ روزه) و RP-21 (۹۰ روزه) می باشد. در سن ۲۸ روزه که ملاک و معیار بسیاری از کارهای مهندسی می باشد، کمترین و بیشترین درصد جذب آب به ترتیب مربوط به نمونه های IP-7 و RP-21 می باشد. جذب آب نمونه به طور مستقیم با مقدار تخلخل آن مرتبط است. به همین دلیل در نمونه های دارای وزن مخصوص بیشتر که دارای منافذ کمتری هستند حداقل جذب آب و در نمونه های با تخلخل بالا بیشترین جذب آب رخ می دهد. پودر لاستیک به دلیل عدم واکنش با سیمان و سنگدانه موجود در ملات، به عنوان یک عامل خارجی در ساختار ملات عمل کرده و حفرات موجود در نمونه را افزایش می دهد. همچنین ذرات لاستیک بدلیل وزن کم در مقایسه با سیمان، سبب کاهش وزن مخصوص نمونه شده و برآیند این دو عامل (افزایش تخلخل و کاهش وزن مخصوص) سبب افزایش جذب آب در نمونه می شوند. مؤید این مطلب افزایش میزان جذب آب نمونه حاوی پودر لاستیک به ازای افزایش درصد استفاده از این افزودنی می باشد. به همین ترتیب در نمونه حاوی پودر آهن که بدلیل وزن

یادداشت گردیده و درصد جذب آب محاسبه شده است. لازم به ذکر است که با توجه به انجام پیش آزمایشات مختلف، این نتیجه حاصل شد که شرایط محیط عمل آوری تأثیر چندانی در مقدار جذب آب نمونه ها ندارد. اما سن عمل آوری نمونه ها پارامتر مهم و تأثیرگذار در این خصوص می باشد. لذا درصد جذب آب نمونه ها در سنین ۷، ۲۸، و ۹۰ روزه تحت شرایط عمل آوری آب معمولی (محیط خنثی) در شکل ۱۰ ارائه شده است. یکی از پارامترهای مؤثر در میزان جذب آب در نمونه های ملات یا بتن، میزان تخلخل آن ها می باشد. بنابراین با توجه به اینکه پودر لاستیک چسبندگی کمی با خمیر سیمان دارد، لذا مقدار جذب آب آن نیز بیشتر از سایر نمونه ها بوده، بگونه ای که با افزایش استفاده از پودر لاستیک در ترکیب ملات سیمانی، درصد جذب آب نیز افزایش می یابد که بیشترین مقدار آن مربوط به نمونه حاوی ۲۱ درصد پودر لاستیک بوده که برابر ۲۳/۵ درصد می باشد. در بقیه مقادیر استفاده از پودر لاستیک نیز نتایج مثبتی حاصل نشده و مقادیر جذب آب از نمونه مرجع نیز بیشتر می باشند. در نمونه های حاوی سایر پودرها، در مقادیر استفاده ۷ و ۱۴ درصد، درصد جذب آب نسبت به نمونه شاهد یا کاهش یافته و یا مقدار کمی بیشتر می باشند. بنابراین می

مخصوص قابل توجه آهن، سنگین‌تر از سایر نمونه‌ها است، کمترین جذب آب رخ می‌دهد اما این کاهش نفوذ پذیری با افزایش استفاده از پودر آهن رابطه معکوس دارد. به طوری که به ازای مقادیر بیشتر از ۷ درصد، جذب آب نمونه حاوی پودر آهن نیز افزایش می‌یابد. عدم مشارکت پودر آهن در واکنش بین سیمان و سنگدانه یکی از عوامل بروز این پدیده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت اگر افزودنی‌های بکار رفته در ملات ماسه سیمان که در واکنش شیمیایی بین سیمان و سنگدانه وارد نمی‌شوند دارای وزن مخصوص کمی باشند، به ازای افزایش استفاده از آنها به طور مستقیم نفوذ پذیری و جذب آب نمونه نیز افزایش می‌یابد و در صورت استفاده از افزودنی‌های با وزن مخصوص قابل توجه تا مقادیر ۷ درصد نفوذپذیری کاهش یافته اما به ازای استفاده بیش از این مقدار نفوذپذیری و جذب آب نمونه افزایش می‌یابد.

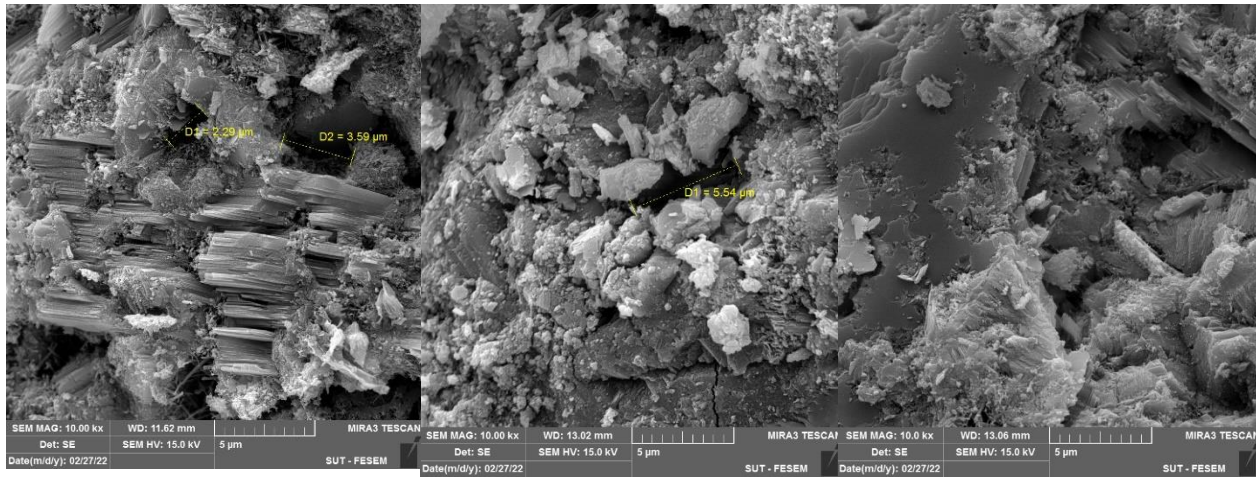
۳-۵- آزمایش میکروسکوپ الکترونیکی (SEM)

به منظور شناخت و درک بهتر خواص ریزساختار نمونه‌ها، نمونه‌های دارای ۱۴ درصد افزودنی و در سن ۲۸ روزه تحت آزمایش میکروسکوپ الکترونیکی قرار گرفتند. در واقع به کمک انجام این آزمایش می‌توان به ساختار دورنی ملات سیمانی حاوی چهار نوع افزودنی استفاده شده، پی برده و اثر افزودن پودرها بر ترکیب ملات را مشاهده نمود. در شکل ۱۱ تصاویر مربوط به آزمایش میکروسکوپ الکترونیکی بر روی نمونه‌ها نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، شرایط محیطی اسیدی سبب ایجاد یک بافت نامنظم و ساختار متزلزلی در ملات شده است. حال با استفاده از افزودن پودرهای مورد نظر، تا حدودی این نامنظمی بهبود یافت. کاهش عرض ترک‌ها، کاهش وجود حفرات بزرگ در نمونه، یکپارچگی ساختار و... از جمله مزایای استفاده از افزودنی‌ها در ترکیب ملات می‌باشند. اما در نمونه‌های حاوی پودر لاستیک به علت عدم چسبندگی لاستیک با خمیر سیمان، ساختار ملات نامنظم‌تر از بقیه نمونه‌ها شده است. در شرایط عمل آوری خنثی و بازی، پیوند خمیر سیمان و افزودنی‌ها منسجم‌تر شده، بطوری که عرض ترک‌ها و حفرات تا ۳ برابر کاهش یافته است. همچنین ساختار سوزنی و پفکی شکل افزودنی‌ها نیز نمود بیشتری یافته است. همچنین مقادیر حاصل از آزمایش مینی‌اسلامپ و جذب آب نیز به وضوح در تصاویر شکل زیر قابل درک می‌باشد. از میان تمامی نمونه‌ها، نمونه‌های حاوی پودر پوسته تخم مرغ به علت وجود ترکیبات سیلیسی و آهکی که همگون با سیمان هستند و همچنین اندازه ذراتشان نسبت به بقیه افزودنی‌ها ریزتر می‌باشد، دارای

بافت منسجم‌تر، عرض ترک کمتر و پیوند قوی‌تری می‌باشند. برای تمام نمونه‌های حاوی افزودنی‌های بازیافتی، آنالیز عنصری (EDS) انجام شد که نتایج در شکل ۱۲ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با توجه به نوع پودری که به ملات اضافه شده است، درصد وزنی عناصر نیز تغییر کرده است. به عنوان مثال، مقدار کربن در نمونه RP بیشتر از نمونه Ref و EP می‌باشد، چرا که عنصر اصلی تشکیل دهنده پودر لاستیک، کربن است. همچنین عناصر جدیدی مانند گوگرد (S) و پتاسیم (K) نیز در ترکیبات مختلف دیده می‌شود. یکی از مزایای استفاده از این چند نوع افزودنی این است که ساختار اصلی ملات از جمله اکسیژن، کلسیم، کربن و سیلیسیم را حفظ می‌کند. به همین دلیل، شناخت و ارزیابی رفتار ملات را پیچیده نمی‌کند. لازم به ذکر است که با توجه به اینکه بتن یک ترکیب غیرهمگن است، لذا اگر این آنالیز در یک قسمت دیگری از هر نمونه انجام می‌شد، احتمالاً نتایج دستخوش تغییراتی هرچند اندک می‌شد. نتایج آنالیز EDS حاصل از آزمایش SEM بصورت درصد جرمی برای هر عنصر در هر نمونه (بر اساس شکل ۱۲) در جدول ۹ ارائه شده است. لازم به ذکر است که صرفاً مقادیر مربوط به چند عنصری که عدد قابل توجهی دارند، آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، استفاده از افزودنی‌های بازیافتی سبب کاهش درصد اکسیژن نمونه‌ها شده اما مقادیر کلسیم و کربن افزایش یافتند. بنابراین حضور بیشتر کلسیم و کربن در ترکیبات، سبب بهبود پیوند خمیر سیمان و افزودنی با ماسه خواهد شد. سایر عناصر نیز در مقادیر بسیار کمی در نمونه‌ها حضور دارند که تأثیری در روند نتایج نخواهند داشت.

۳-۶- آزمایش پراش اشعه ایکس (XRD)

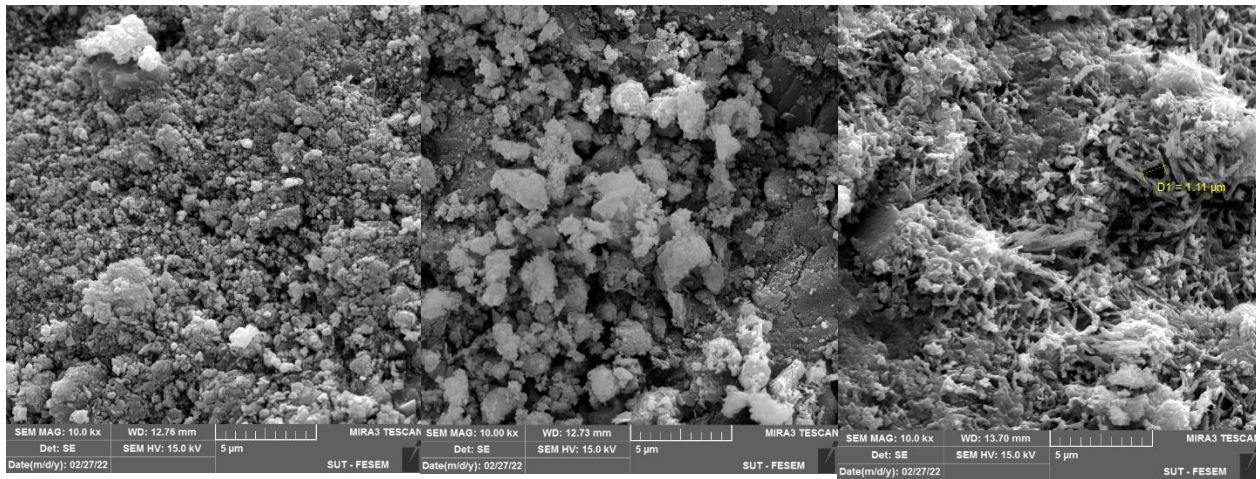
به منظور بررسی تأثیر افزودن چهار نوع پودر ضایعاتی به ملات سیمانی، نمونه‌های حاوی ۱۴ درصد افزودنی که در شرایط عمل آوری مختلف در سن ۲۸ روزه قرار داشتند، تحت آزمایش پراش اشعه ایکس (XRD) قرار گرفتند. جهت انجام این آزمایش ابتدا قطعاتی از مرکز نمونه‌های فشاری جدا شده و این نمونه‌ها کاملاً به صورت پودری یکنواخت و همگن درآمده و مورد آزمایش قرار گرفتند. آنالیز مورد نظر با تابش $\text{Cu K} (\lambda = 1.5406)$ تحت شرایط ۴۰ کیلو ولت و ۳۰ میلی آمپر از دستگاه XRD فیلیپس Xpert استفاده شد. در هر مرحله اسکن از ۱۰ تا ۸۰ درجه با گام 0.2° (درجه 2θ) و سرعت اسکن ۲ ثانیه صورت گرفت.



پ) بازای-Ref

ب) خنثی-Ref

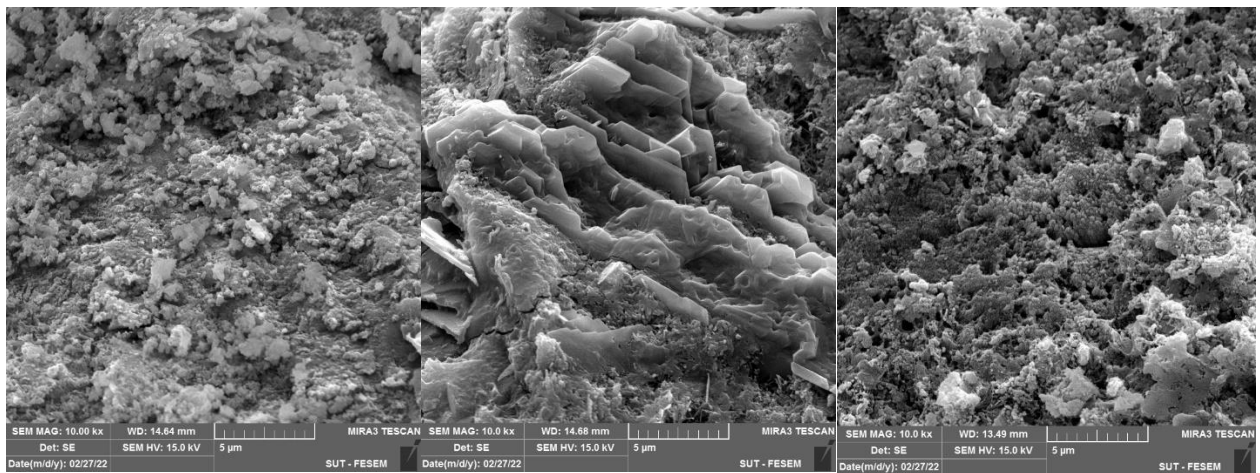
الف) اسیدی-Ref



ج) بازای-GP

ث) خنثی-GP

ت) اسیدی-GP



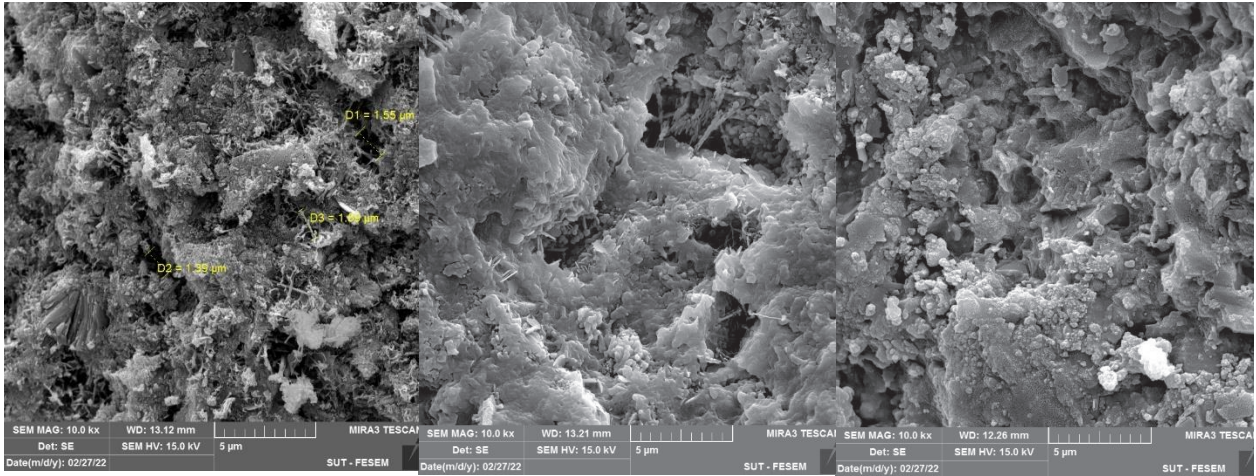
ح) بازای-EP

خ) خنثی-EP

ج) اسیدی-EP

شکل ۱۱. تصاویر آزمایش SEM نمونه‌ها (ادامه دارد)

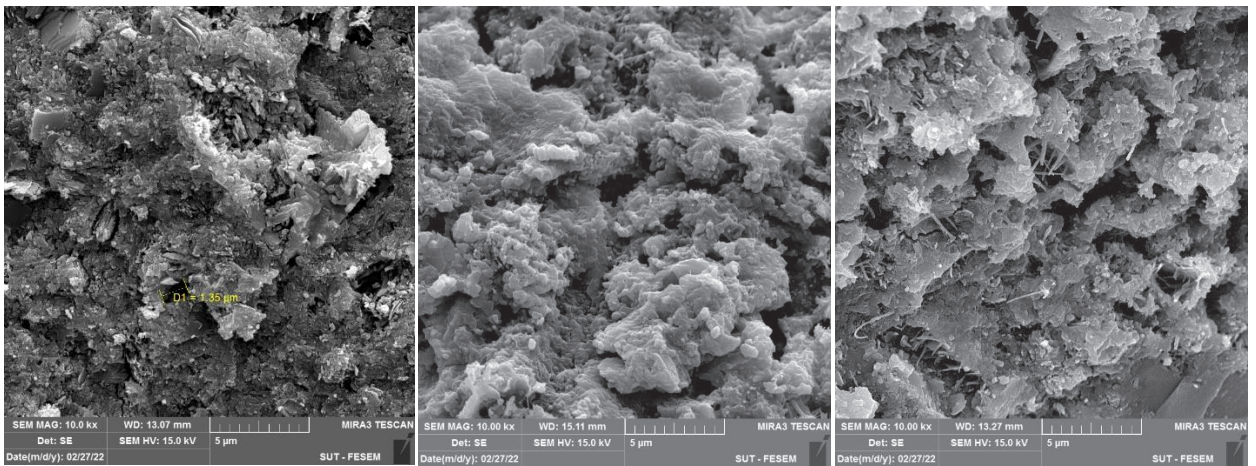
Fig. 11. SEM test images on the samples(Continued)



ر) بازی -IP

د) خنثی -IP

د) اسیدی -IP



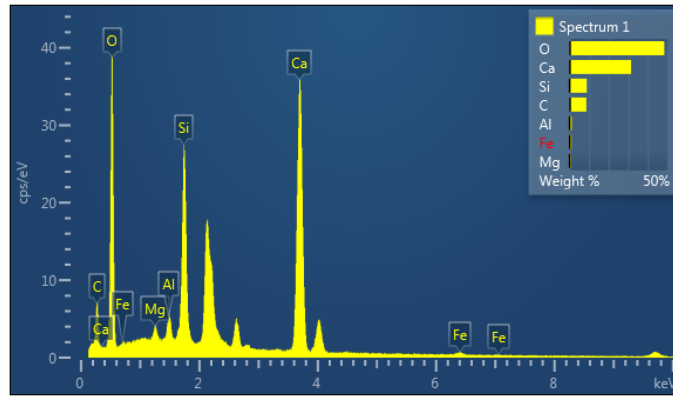
س) بازی -RP

ز) خنثی -RP

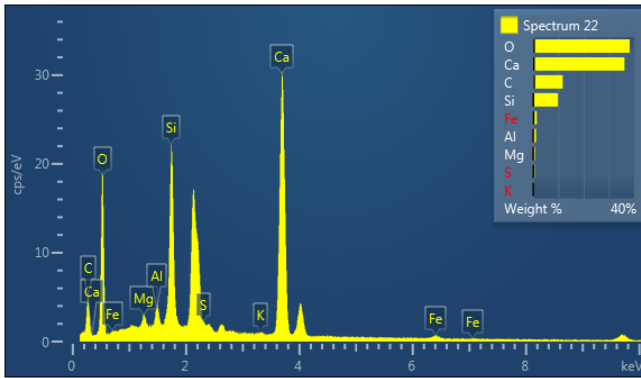
ز) اسیدی -RP

شکل ۱۱. تصاویر آزمایش SEM نمونه ها

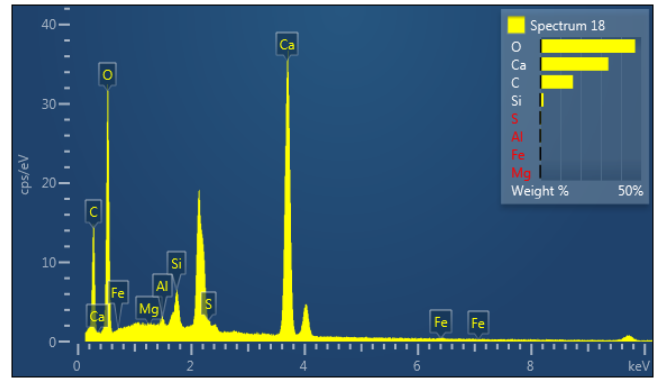
Fig. 11. SEM test images on the samples



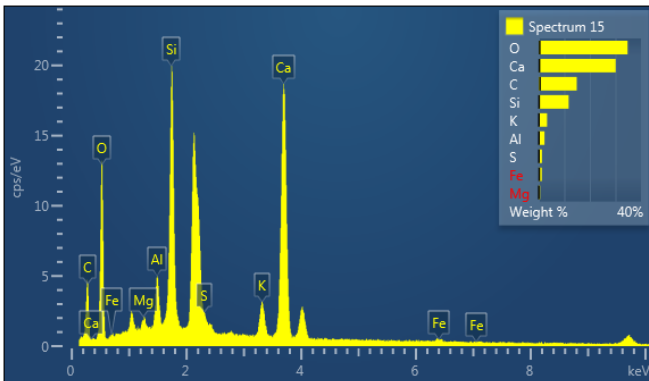
الف) Ref



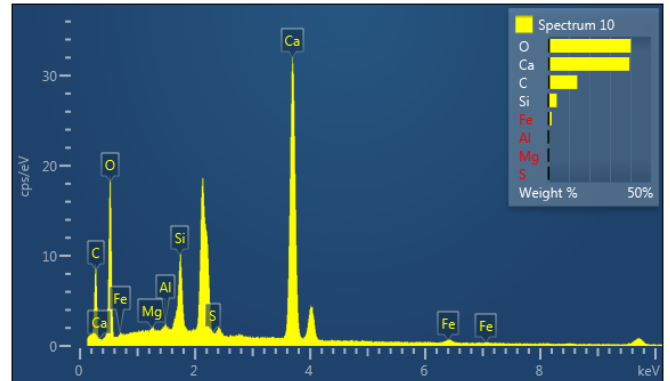
پ) EP



ب) GP



ت) RP



ث) IP

شکل ۱۲. نتایج آنالیز عنصری نمونه ها

Fig. 12.

جدول ۹. نتایج کمی حاصل از آنالیز EDS (درصد)

Table 9.

جمع	Fe	Mg	Al	S	K	Si	C	Ca	O	
۱۰۰	۰/۹۷	۰/۶۶	۱/۱۳	-	-	۸/۸۱	۸/۵۸	۳۱/۴۰	۴۸/۴۵	Ref
۱۰۰	۰/۳۵	۰/۰۷	۰/۴۱	۰/۵۵	-	۱/۶۵	۱۶/۲۶	۳۳/۷۲	۴۶/۹۸	GP
۱۰۰	۱/۴۴	۰/۷۰	۱/۱۲	۰/۶۲	۰/۲۲	۹/۸۳	۱۱/۶۹	۳۶/۱۸	۳۸/۲۱	EP
۱۰۰	۱/۵۶	۰/۹۰	۰/۳۰	۰/۱۰	-	۴/۱۰	۱۴/۰۵	۳۹/۵۲	۴۰/۱۸	IP
۱۰۰	۱/۲۰	۰/۵۲	۳/۲۸	۱/۲۶	۳/۲۸	۱۱/۷۳	۱۴/۸۸	۳۰/۰۸	۳۴/۷۷	RP

در کمترین مقدار مربوط به عنصر کوارتز (به ترتیب ۳۴۰۰ و ۱۵۰۰) میباشد. در نمونه حاوی پودر لاستیک بیشترین مقدار از آن عنصر کلسیت (حدود ۳۸۰۰) و کمترین مقدار مربوط به پورتلندیت (حدود ۲۳۰۰) می باشد و بالاخره در نمونه شاهد بیشترین و کمترین مقدار مربوط به عنصر کوارتز (به ترتیب ۴۰۰۰ و ۱۵۰۰) میباشد. نکته حائز اهمیت در نمونه شاهد قرار گرفتن عنصر دولومیت $(CaMg(CO_3)_2)$ در لیست مقادیر حداکثری میباشد که در هیچ یک از نمونههای دیگر مشاهده نشد.

*** محیط خنثی:**

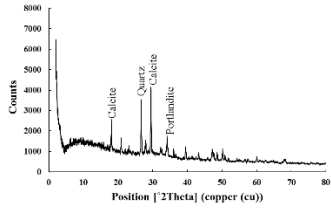
در تمامی نمونههای مورد آزمایش عنصر کوارتز حداکثر مقدار را به خود اختصاص میدهد. مقادیر کوارتز در نمونههای حاوی پودر پوسته تخم مرغ، پودر شیشه، پودر آهن، پودر لاستیک و نمونه شاهد به ترتیب برابر ۶۰۰۰، ۵۴۰۰، ۷۱۰۰، ۵۰۰۰ و ۴۰۰۰ میباشد. همچنین کمترین مقدار در نمونههای حاوی پودر پوسته تخم مرغ، پودر شیشه و نمونه شاهد نیز متعلق به عنصر کوارتز است که به ترتیب برابر ۱۲۰۰، ۱۸۰۰ و ۱۶۰۰ میباشد. مقدار حداقل در نمونه حاوی پودر آهن مربوط به عنصر کلسیت (۱۳۰۰) و در نمونه حاوی پودر لاستیک مربوط به عنصر پورتلندیت (۱۶۰۰) میباشد. بنابراین میتوان نتیجه گرفت که در تمامی نمونههای عمل آوری شده در محیط خنثی بیشترین و کمترین مقدار مربوط به عنصر کوارتز با مقادیر ۷۰۰۰ و ۱۲۰۰ میباشد.

در واقع در این آزمایش، مقدار و ترکیبات اصلی هر نمونه مشخص می شود. همانطور که در شکل ۱۳ مشاهده می شود، محیط اسیدی سبب کاهش مقدار ترکیبات اصلی (حداکثر ۴۰۰۰) شده است، اما مقادیر در محیط های خنثی و بازی عموماً تا حدود ۶۰۰۰ هم می رسد. ترکیبات اصلی نمونه ها عبارتند از کوارتز (SiO_2) ، کلسیت $(CaCO_3)$ و پورتلندیت $(Ca(OH)_2)$ که در اکثر نمونه ها، بیشترین مقدار مربوط به کوارتز و سپس مربوط به پورتلندیت و کلسیت بوده که این دو ترکیب در نمونه های مختلف جایجا شده اند. همچنین در حالت کلی، افزودن مواد بازیافتی به ترکیب ملات سیمانی، سبب افزایش مقدار بیشترین پیک در هر نمونه شده است (نسبت به نمونه مرجع). مقدار افزایش بیشترین پیک در شرایط محیط های اسیدی، خنثی و بازی نسبت به نمونه مرجع به ترتیب برابر ۲/۵ (نمونه EP)، ۷۸ (نمونه IP) و ۷/۹ (نمونه های EP و IP) درصد می باشد.

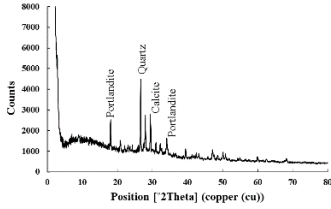
بصورت تفکیک شده، نتایج بدست آمده در هر محیط ارائه می شود:

*** محیط اسیدی:**

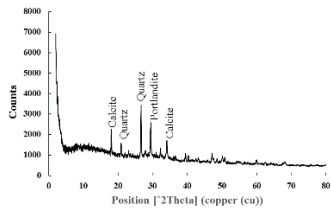
در نمونه حاوی پودر پوسته تخم مرغ، بیشترین مقدار مربوط به عنصر کلسیت $(CaCO_3)$ (حدود ۴۰۰۰) و کمترین مقدار مربوط به پورتلندیت $(Ca(OH)_2)$ (حدود ۱۷۰۰) می باشد. در نمونه حاوی پودر شیشه بیشترین مقدار مربوط به عنصر کوارتز (SiO_2) (حدود ۴۵۰۰) و کمترین مقدار مربوط به پورتلندیت (حدود ۱۵۰۰) می باشد. در نمونه حاوی پودر آهن بیشترین و



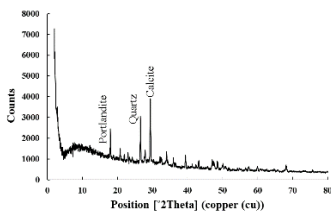
پورسته نخم مرغ



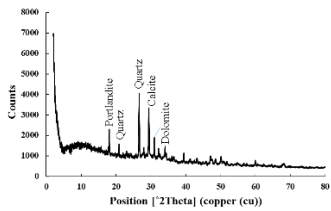
شیشه



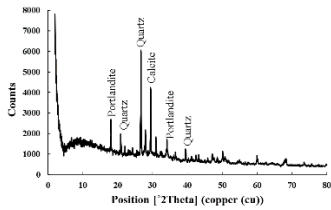
آهن



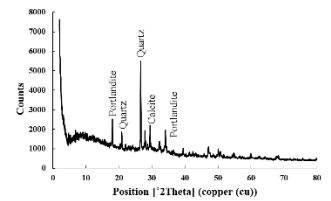
مرجع



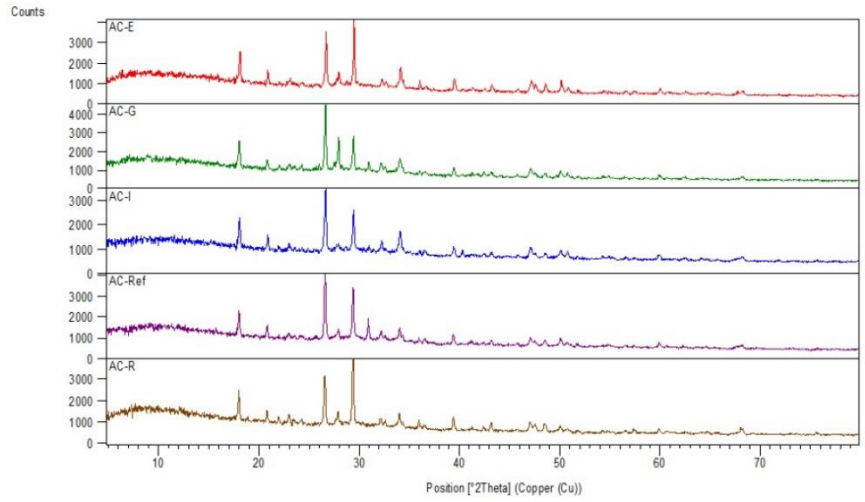
لاستیک



پورسته نخم مرغ



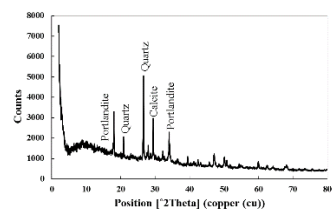
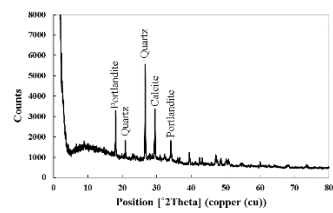
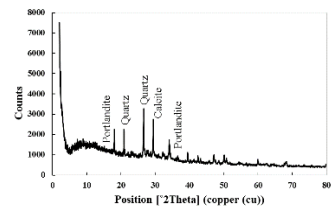
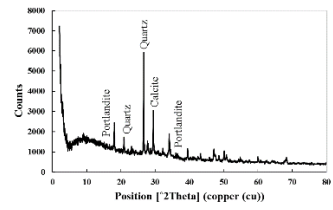
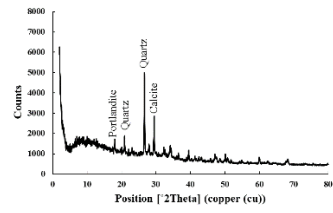
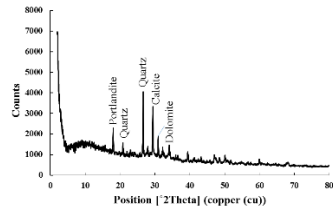
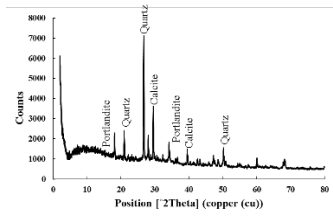
شیشه



الف) اسیدی

شکل ۱۳. نتایج آزمایش XRD بر روی نمونه‌ها (ادامه دارد)

Fig. 13. XRD test results on the samples(Continued)



آهن

مرجع

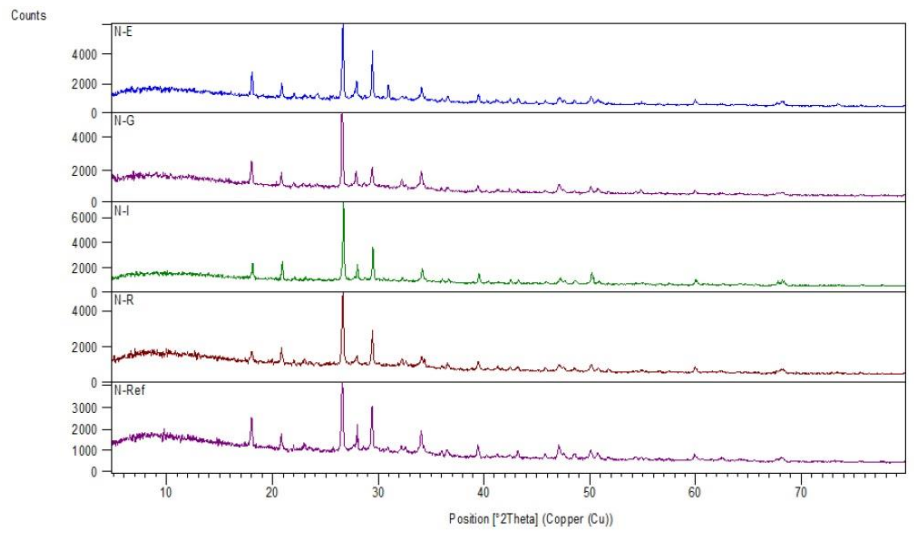
لاستیک

پروسته تخم مرغ

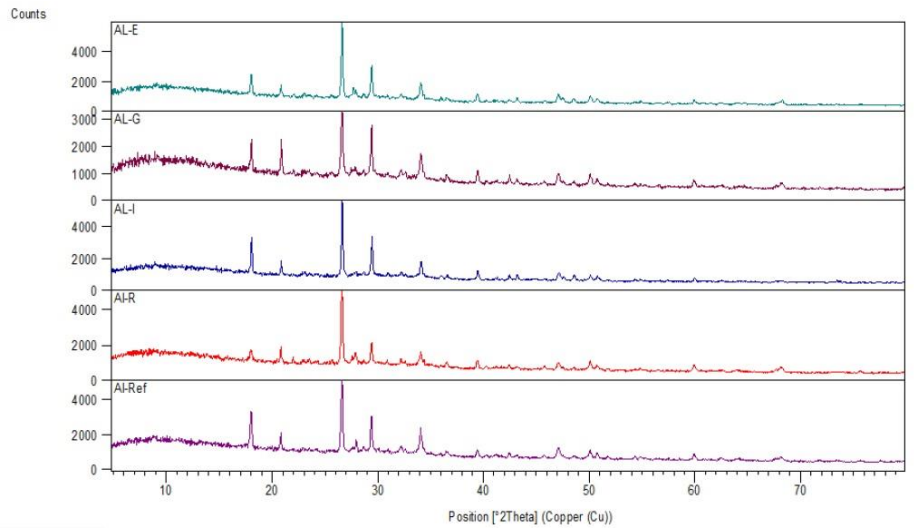
شیشه

آهن

مرجع

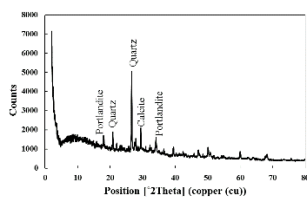


ب) خنثی



شکل ۱۳. نتایج آزمایش XRD بر روی نمونه‌ها (ادامه دارد)

Fig. 13. XRD test results on the samples(Continued)



لاستیک

(پ) بازی

شکل ۱۳. نتایج آزمایش XRD بر روی نمونه ها

Fig. 13. XRD test results on the samples

مقاله نسبت به سایر تحقیقات، بهتر بوده و خصوصیات ملات را تا چندین برابر بیشتر ارتقاء داده اند. همچنین در این مقاله و همچنین در مقاله دیگری که توسط قلهکی و همکاران [۱۱] انجام شده است، مقایسه همزمان چهار نوع افزودنی انجام شده است، اما وسعت پژوهش در سایر تحقیقات تا این اندازه نیست.

۵- توجیه اقتصادی

مزایا و توجیه فنی استفاده از مواد ضایعاتی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در ترکیب ملات سیمانی در قسمت های قیل بطور کامل تشریح گردید. نکته حائز اهمیت دیگر، توجیه دقیق موضوع تحقیق از لحاظ اقتصادی می باشد. بر اساس نتایج نشان داده شده در جدول ۱۱ که بر اساس اطلاعات و آمار کشور ایران می باشد، تقریباً ۱۰۰، ۵۰، ۳۰، ۵ و ۳۰ درصد سیمان، تخم مرغ، لاستیک، آهن و شیشه قابلیت بازآوری و تبدیل به پودر کردن دارند. لذا با توجه به درصد بالای آلایندهی سیمان به خصوص در صنعت ساختمان و همچنین با توجه به اینکه این افزودنی ها بر حسب درصد وزنی سیمان استفاده می شوند، لذا مقادیر ۰/۵، ۰/۱۲، ۱/۵ و ۰/۹ میلیون تن بدست آمده از جدول ۱۱، مقادیر قابل توجهی بوده و قطعاً می توانند جایگزین بخشی از سیمان مصرفی در ترکیب ملات یا بتن باشند.

لذا اگر سیاست گذاران عرصه عمران و مسکن، توجه ویژه تری به این موضوع داشته باشند، می توانند گزینه های حمایتی برای کارخانجات در نظر بگیرند و استفاده از این مواد ضایعاتی را رونق بیشتری دهند. بنابراین می توان مقادیر بیشتری از پرتی ها استفاده نمود. بنابراین اگر بطور میانگین ۱۰ درصد از مقدار سیمان مصرفی کاسته شود، می توان سالانه در حدود ۸

* محیط بازی:

در این محیط نیز همچون محیط خنثی در تمامی نمونه های مورد آزمایش عنصر کوارتز حداکثر مقدار را به خود اختصاص میدهد. مقادیر کوارتز در نمونه های حاوی پودر پوسته تخم مرغ، پودر شیشه، پودر آهن، پودر لاستیک و نمونه شاهد به ترتیب برابر ۵۹۰۰، ۳۲۰۰، ۵۶۰۰، ۵۰۰۰ و ۵۰۰۰ میباشد. همچنین کمترین مقدار در نمونه های حاوی پودر پوسته تخم مرغ و نمونه شاهد نیز متعلق به عنصر کوارتز است که به ترتیب برابر ۱۶۰۰ و ۱۹۰۰ میباشد. مقدار حداقل در نمونه حاوی پودر شیشه، پودر آهن و پودر لاستیک مربوط به عنصر پورتلندیت می باشد که به ترتیب معادل ۱۷۰۰، ۱۷۰۰ و ۱۶۰۰ است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که در تمامی نمونه های عمل آوری شده در محیط بازی بیشترین و کمترین مقدار مربوط به عنصر کوارتز با مقادیر ۵۹۰۰ و ۱۶۰۰ میباشد.

۴- مقایسه نتایج این مقاله با نتایج سایر محققان

به منظور درک بهتر نتایج بدست آمده از یافته های این تحقیق، بهترین حالت ممکن در نتایج این تحقیق با بهترین حالت ممکن در نتایج سایر محققان در جدول ۱۰ مورد مقایسه قرار می گیرند. تمامی مواردی که در جدول ذکر شده اند بر حسب درصد بوده و در مقایسه با نمونه مرجع مربوط به همان مقاله ارائه شده اند. همچنین کلیه تحقیقاتی که در جدول ارائه شدند از مواد افزودنی استفاده شده در این مقاله در اختلاط ملات، بتن و... استفاده نمودند. بنابراین نتایج تحقیقات ذیل صرفاً محدود به ملات سیمانی نمی باشند. لذا با جامعیت بیشتری می توان به اهمیت نتایج این مقاله نسبت به نتایج سایر محققان پی برد. تقریباً در تمامی موارد نتایج بدست آمده از این

جدول ۱۰. مقایسه نتایج این مقاله با نتایج سایر تحقیقات (درصد)

Table 10. Comparison of the results of this article with the results of other researches (percentage)

جذب آب				مقاومت خمشی				مقاومت کششی				مقاومت فشاری				Details	
RP	IP	GP	EP	RP	IP	GP	EP	RP	IP	GP	EP	RP	IP	GP	EP		
+۱۱/۱	-۱۳/۲	-۶/۶	-۷/۹	+۲۱	+۸۹/۵	+۶۳/۲	+۷۱/۹	+۱۳/۷	+۹۱/۹	+۹۱/۸	+۹۰	-۱۴/۹	+۴۱/۸	+۵۷/۸	+۶۷/۳	CM-AE	This Paper
-	-	-	-	-	-	-	-۲/۹	-	-	-	-	-	-	-	-۳/۸	CM-AE	[9]
-	-	-	-	-	-	-	-۱۲	-	-	-	-	-	-	-	-۱۴/۱	CM-AE	[22]
-	-	-	-	-۷۵	-	-	-	-	-	-	-	-۲۲	-	-	-	CM	[10]
+۵/۴	-	-۱۰/۹	-۱۵/۵	-	-	-	-	+۱۴	-	+۳۰	+۴۹	+۱۷	-	+۳۶	+۲۸	CM	[11]
-	-	-۳۸	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+۳/۵	-	CM	[12]
+۲۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۰	-	-	-	C-AE	[13]
-	+۲۸	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+۱۰/۱	-	-	CM	[14]
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۰	-	-	-	CBC-AE	[15]
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+۸/۴	-	CM-AE	[16]
-	-	-	-	-	-	-	-	۰	-	-	-	-۲/۳	-	-	-	CM	[23]
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-۲/۸	-	-	-	C-AE	[17]
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۰	-	GCM-AE	[24]
-	-	-	-۲/۵	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+۲۹/۶	CM	[25]
-	-	-	+۱/۲	-	-	-	-۸/۵	-	-	-	-	-	-	-	-۲۲/۲	CM	[26]
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-۲/۹	-	C-AE	[27]
-	-	-	-	+۱۴/۶	-	-	-	-	-	-	-	-	+۱۲/۹	-	-	C	[28]
-	-	-	-	۰	-	-	-	-	-	+۸/۳	-	-	-	+۸/۸	-	C	[29]
-	-	-	۱۶/۷-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+۲۱/۸	-	C	[30]
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+۳۲	-	-	-	+۱۶/۷	-	C-AE	[31]

* CM: ملات سیمانی
 * AE: محیط خورنده
 * C: بتن
 * CBC: کامپوزین پایه سیمانی
 * GCM: ملات ژئوپلیمری

جدول ۱۱. مقایسه اقتصادی استفاده از افزودنی های بازیافتی در ترکیب ملات سیمانی

Table 11.

تولید سالانه در کشور (میلیون تن)					
ماده چسباننده	سیمان	پوسته تخم مرغ	لاستیک	آهن	شیشه
مقدار تولیدی	۸۰	۱	۰/۴	۳۰	۳
قابلیت استفاده در قالب پودر	۸۰	۰/۵	۰/۱۲	۱/۵	۰/۹

حاوی پودر پوسته تخم مرغ (به دلیل وجود کلسیم) و لاستیک بوده که عدد اسلامپ شان ۱۰۸ و ۱۵۵ می باشد. همچنین مقادیر اسلامپ نمونه های حاوی پودرهای شیشه، پوسته تخم مرغ، آهن و لاستیک نسبت به نمونه مرجع به ترتیب +۱۰، -۱۰، +۱۶/۷ و +۲۹/۲ درصد تغییر نموده است.

* بر اساس نتایج آزمایشات مقاومت فشاری بر روی نمونه ها می توان به این نکته پی برد که افزایش مقاومت فشاری برای تمامی نمونه ها (بجز نمونه های حاوی پودر لاستیک) نسبت به نمونه مرجع رخ داده است. اما با توجه به اینکه در برخی از نمونه ها در مقادیر استفاده ۷ و ۱۴ درصد، مقاومت فشاری تا حدودی کاهش داشته (حداکثر ۲۳ درصد کاهش) و یا افزایش خیلی زیادی نداشته (حداکثر ۲۲/۷ درصد)، لذا توصیه می شود برای مقادیر جایگزینی ۲۱ درصد استفاده شوند. بطور کلی درصد افزایش مقاومت فشاری نمونه ها با افزودن پودرها در محیط اسیدی بیشتر از سایر محیط ها بوده، به طوری که بیشترین افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه مرجع در محیط های اسیدی، خنثی و بازی به ترتیب برابر ۴۱/۶، ۳۷/۹ و ۳۲/۷ درصد بوده است. در مجموع با توجه به وجود ذرات کلسیم و سدیم در محیط های بازی، بیشترین مقادیر مقاومت فشاری در این محیط رخ داده است که مربوط به نمونه GP-21 (۲۴/۹۸ مگاپاسکال) می باشد.

* نتایج آزمایش مقاومت کششی نشان دادند که روند تغییرات تقریباً مشابه مقاومت فشاری می باشد. مقاومت کششی نمونه های مرجع در محیط اسیدی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه به ترتیب برابر ۰/۵۹۹، ۰/۹۲ و ۱ مگاپاسکال و در محیط خنثی برابر ۰/۷۳، ۱/۱۱ و ۱/۲۲ مگاپاسکال و در محیط بازی نیز برابر ۰/۹۴، ۱/۴۲ و ۱/۶۰ مگاپاسکال می باشد که با افزایش مقدار PH محیط های عمل آوری، مقاومت کششی نیز افزایش یافته است.

میلیون تن در مصرف سیمان صرفه جویی نمود. اگر قیمت یک پاکت سیمان (۵۰ کیلوگرم) در حدود ۴۰ هزار تومان در نظر گرفته شود، بنابراین سالانه در حدود ۶/۴ میلیارد تومان در مصرف سیمان صرفه جویی خواهد شد.

همانطور که می دانید، برای تهیه افزودنی های ضایعاتی نیاز به پرداخت هزینه ای نمی باشد، چرا که تماماً از مواد دورریز استفاده خواهد شد. صرفاً یک هزینه ای جهت تبدیل به پودر کردن مواد صرف خواهد شد که در مقایسه با صرفه جویی اقتصادی که نسبت به سیمان در بر خواهد داشت، این هزینه کمتر از ۵ درصد می باشد.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله با جایگزینی چهار نوع پودر ضایعاتی به جای سیمان در ترکیب ملات سیمانی، به بررسی مشخصات مکانیکی و ریزساختار آن پرداخته شد. بدین منظور پودرهای شیشه، پوسته تخم مرغ، آهن و لاستیک در مقادیر ۷، ۱۴ و ۲۱ درصد جایگزینی به ترکیب ملات اضافه شده و در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه تحت شرایط محیطی اسیدی (HCL)، خنثی (آب معمولی) و بازی (Ca(OH)₂+NaOH) قرار گرفتند. در نهایت آزمایشات روانی، مقاومت فشاری و کششی و خمشی، جذب آب، SEM و XRD بر روی نمونه ها انجام پذیرفت. مهمترین نتایج بدست آمده از انجام این مقاله به قرار زیر است:

* نتایج آزمایش روانی (مینی اسلامپ) حاکی از آن است که با افزایش اندازه ذرات افزودنی ها و کاهش چسبندگی آن ها با خمیر سیمان، عدد اسلامپ نیز به علت وجود فضاهای خالی در نمونه ها افزایش یافته است. بیشترین و کمترین میزان چسبندگی و ارتباط به ترتیب مربوط به نمونه های

* استفاده از پودرهای شیشه، پوسته تخم مرغ و آهن علاوه بر مزایای اقتصادی (همچنین در مقایسه با سایر تحقیقات)، به علت در دسترس بودن و عدم احتیاج به فرآیند بازآوری و پرداخت هزینه جهت استفاده، به لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه بوده و می‌توانند جایگزین مناسبی برای پوزولان‌ها (شامل میکروسیلیس، زئولیت، خاکستر بادی و...) باشند.

منابع

- [1] C.L. Page, M.M. Page, *Durability of Concrete and Cement Composites*, Elsevier, 2007.
- [2] MK Sharbatdar, F Rahmati, *Experimental evaluation of multi-functional effects of fibers on mechanical and performance properties of Roller-compacted concrete pavements (RCCP)*, *Construction and Building Materials*, 2022, 316, 125890.
- [3] MK Sharbatdar, A Tajari, *Experimental in-plane seismic strengthening of masonry infilled reinforced concrete frames by engineered cementitious composites (ECC)*, *Construction and Building Materials*, 2021, 293, 123529.
- [4] V.R. Zivica, A. Bajza, *Acidic attack of cement-based materials- a review: Part 2. Factors of rate of acidic attack and protective measures*, *Constr. Build. Mater.* 16 (4) (2002) 215–222.
- [5] Pachideh G, Gholhaki M, Moshtagh A. *On the post-heat performance of cement mortar containing silica fume or Granulated Blast-Furnace Slag*. *Journal of Building Engineering*, (2019), 24, 100757.
- [6] Pachideh G, Gholhaki M. *Effect of pozzolanic materials on mechanical properties and water absorption of autoclaved aerated concrete*. *Journal of Building Engineering*, (2019), 26, 100856
- [7] Amar, M., Benzerzour, M., Safhi, A.E.M., Abriak, N.-E., 2018. *Durability of a cementitious matrix based on treated sediments*. *Case Stud. Constr. Mater.* 8, 258–276.
- [8] Rao, K.J., Keerthi, K., Vasam, S., 2018. *Acid resistance of quaternary blended recycled aggregate concrete*. *Case Stud. Constr. Mater.* 8, 423–433.
- [9] Binici H, Aksogan O, Sevinc AH, Cınpolat E. *Mechanical and radioactivity shielding performances of mortars*

هر چند که مقادیر مقاومت کششی در استفاده ۲۱ درصد از افزودنی‌ها نزدیک به هم هستند، اما بیشترین مقاومت کششی مربوط به نمونه IP-21 (۲/۴۹ مگاپاسکال) می‌باشد. اگرچه بطور کلی مقاومت کششی نمونه‌های حاوی پودر لاستیک نسبت به نمونه مرجع کاهش محسوسی داشته است اما در برخی موارد و در مقادیر استفاده ۷ درصد از آن، مقاومت کششی تا ۱۳/۷ درصد افزایش یافته است (به علت ظرفیت کششی ذاتی لاستیک). بنابراین می‌توان با تغییر در میزان استفاده از پودر لاستیک و مقادیر آب، سیمان و ماسه طرح اختلاط مورد نظر، به مقاومت‌های مطلوبی برای نمونه‌های حاوی پودر لاستیک رسید.

* شکست خمشی کلیه نمونه‌ها با توجه به مسلح نبودن آن‌ها با میلگرد و... بصورت ترد بوده و در ناحیه یک‌سوم میانی (خمش خالص) رخ داده است. در مقادیر ۷ درصد استفاده از پودر لاستیک و همچنین در اکثر قریب به اتفاق سایر نمونه‌ها، مقاومت خمشی نسبت به نمونه مرجع افزایش یافته است. منتها با افزایش مقادیر استفاده از پودر لاستیک، مقاومت خمشی تا ۲۱ درصد کاهش و با افزایش مقادیر استفاده از سایر پودرها مقاومت خمشی افزایش تا ۹۲ درصد افزایش یافته است. روند کلی تغییرات مقاومت خمشی در محیط‌های عمل‌آوری مختلف، مشابه روند مقاومت فشاری و کششی می‌باشد.

* بر اساس نتایج حاصل از آزمایشات، جذب آب نمونه شاهد در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه به ترتیب برابر ۹، ۱۲/۱ و ۱۴ درصد بوده که این نتایج برای تمامی نمونه‌ها (بجز نمونه حاوی پودر لاستیک) بهبود بخشیده شد. بطور کلی و با جمع بندی نتایج در سنین مختلف، میزان جذب آب در نمونه GP-7، EP-7 و IP-7 نسبت به نمونه مرجع به ترتیب ۶/۶، ۷/۹ و ۱۳/۲ درصد کاهش یافته است. اما با افزایش درصد استفاده از افزودنی‌ها (۱۴ و ۲۱ درصد) مقادیر جذب آب به تدریج افزایش داشته است. بنابراین علیرغم خاصیت جذب آب افزودنی‌های استفاده شده، می‌توان در مقادیر استفاده محدود از آن‌ها، جذب آب را نیز کاهش داد. علت عمده افزایش جذب آب در سنین مختلف در نمونه‌های حاوی پودر لاستیک (از حدود ۱۱ تا ۱۶ درصد) را می‌توان به وجود فضاهای خالی در نمونه مرتبط دانست.

* بر اساس مشاهدات و تفاسیر نتایج آزمایش SEM و XRD بر روی نمونه‌ها، میزان عرض ترک‌ها در نمونه‌های GP، EP و IP تا ۳ برابر نسبت به نمونه مرجع کاهش یافته و پیوند خمیر سیمان با افزودنی‌ها نیز به علت وجود ذرات کلسیم و سیلیسیم قوی‌تر شده و حفرات بزرگ در نمونه‌ها مشاهده نشده است.

- concrete, in: Determination of Secant Modulus of Elasticity in Compression, 418–455.
- [20] ASTM C1609/C1609M. Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading); ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2012; pp. 1–9.
- [21] ASTM C642-13, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2013), www.astm.org.
- [22] Pliya P, Cree D. Limestone derived eggshell powder as a replacement in Portland cement mortar. *Construction and Building Materials*. 2015 Oct 1; 95: 1-9.
- [23] Omar Ibrahim O.M, Tayeh B.A. Combined effect of lightweight fine aggregate and micro rubber ash on the properties of cement mortar. *Advances in concrete construction*. 2020; 10(10 (6) 537-546).
- [24] Vafaei M, Allahverdi A, Dong P, Bassim N. Acid attack on geopolymer cement mortar based on waste-glass powder and calcium aluminate cement at mild concentration. *Construction and Building Materials*. 2018 Dec 30; 193: 363-372.
- [25] Alaa Jaber H, Salahuddin Mahdi R, K.Hassan A. Influence of eggshell powder on the Portland cement mortar properties. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.153>.
- [26] Cree D, Pliya P. Effect of elevated temperature on eggshell, eggshell powder and eggshell powder mortars for masonry applications. *Journal of Building Engineering*. 2019, 26, 100852.
- [27] Chaïd R, Kenaï S, Zeroub H, Jauberthie R. Microstructure and permeability of concrete with glass powder addition conserved in the sulphatic environment. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2015, 19: 2, 219-237.
- [28] Othman R, Wei Chong B, Putra Jaya R, Mohd Hasan MR, Al Bakri Abdullah MM, Haziman M. Wan Ibrahim. Evaluation on the rheological and mechanical properties made with cement, sand and egg shells. *Construction and Building Materials*. 2015 Sep 15; 93: 1145-50.
- [10] Angelin AF, Lintz RC, Gachet-Barbosa LA, Osorio WR. The effects of porosity on mechanical behavior and water absorption of an environmentally friendly cement mortar with recycled rubber. *Construction and Building Materials*. 2017 Oct 1; 151: 534-45.
- [11] Pachideh G, Gholhaki M, Ketabdari H. Effect of pozzolanic wastes on mechanical properties, durability and microstructure of the cementitious mortars. *Journal of Building Engineering*. 2020 May 1; 29: 101178.
- [12] Patel D, Shrivastava R, Tiwari RP, Yadav RK. Properties of cement mortar in substitution with waste fine glass powder and environmental impact study. *Journal of Building Engineering*. 2020 Jan 1; 27: 100940.
- [13] Gupta T, Siddique S, Sharma RK, Chaudhary S. Effect of aggressive environment on durability of concrete containing fibrous rubber shreds and silica fume. *Structural Concrete*. 2021 Oct;22(5):2611-23.
- [14] Tayeh BA, Al Saffar DM. Utilization of waste iron powder as fine aggregate in cement mortar. *journal of engineering research and technology*. 2018;5(2).
- [15] Pham NP, Toumi A, Turatsinze A. Evaluating damage of rubberized cement-based composites under aggressive environments. *Construction and Building Materials*. 2019 Aug 30; 217: 234-41.
- [16] Tayeh BA, Al Saffar DM, Aadi AS, Almeshal I. Sulphate resistance of cement mortar contains glass powder. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*. 2020 Dec 1; 32(8):495-500.
- [17] Gupta T, Siddique S, Sharma RK, Chaudhary S. Behaviour of waste rubber powder and hybrid rubber concrete in aggressive environment. *Construction and Building Materials*. 2019 Aug 30; 217: 283-91.
- [18] Collins, F., J. Lambert, and W.H. Duan, the influences of admixtures on the dispersion, workability, and strength of carbon nanotube–OPC paste mixtures. *Cement and Concrete Composites*, 2012. 34(2): p. 201-207.
- [19] NF EN 12390-13 AFNOR. 2013 Testing hardened

- Concrete. Construction and Building Materials. 2020, 252, 119075.
- [31] Shamsudeen Abdulazeez A, Usman N, Adamu Idi M, Gabriel U. Suitability of Waste Glass Powder as Partial Cement Replacement in Concrete Subject to Chemical Aggressive Environment. International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science (IJLTEMAS). 2020, 9: 2, 45-52.
- of concrete incorporating eggshell with tire powder. journal of materials research and technology 2021, 14: 439-451.
- [29] Ramdani S, Guettala A, Benmalek ML, B.Aguiar J. Physical and mechanical performance of concrete made with waste rubber aggregate, glass powder and silica sand powder. Journal of Building Engineering. 2019, 21, 302-311.
- [30] Lal Jain K, Sancheti G, Kumar Gupta L. Durability performance of waste granite and glass powder added

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

J. Mohseni pour asl, M. Gholhaki, M. K. Sharbatdar, An Experimental Investigation into the Mechanical Performance and Microstructure of Cementitious Mortars Containing Recycled Waste Materials Subjected to Various Environments, Amirkabir J. Civil Eng., 55(12) (2024) 2365-2404.

DOI: 10.22060/ceej.2023.21291.7677

