

بررسی خصوصیات مکانیکی، دوامی و عملکردی ملات‌های ترمیمی پایه سیمانی حاوی ضایعات صنایع آهن و آلومینیوم

احمدرضا رضانی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

محمدرضا اصفهانی*

استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

چکیده

در پژوهش حاضر از ضایعات صنایع آهن و آلومینیوم (غبار کوره آهن گدازی، سرباره کوره آهن گدازی و گل قرمز) برای جایگزینی بخشی از سیمان در ساخت ملات‌های ترمیمی استفاده شده است. با جایگزینی ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ از این ضایعات با سیمان در مجموع ۱۴ طرح اختلاط ساخته شد و مطالعات آزمایشگاهی در سه بخش بر روی آن‌ها انجام شد. در بخش اول سعی در شناخت ریزساختار و ترکیبات شیمیایی مواد تشکیل‌دهنده ملات‌ها شده است. در بخش دوم با انجام آزمایش‌های مقاومت در برابر حمله اسید سولفوریک، جذب آب و مقاومت الکتریکی تلاش برای شناخت خصوصیات دوامی و با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی سعی در شناخت خصوصیات مکانیکی ملات‌ها شده است. در بخش آخر، یک تیر بتن مسلح به وسیله ملات ترمیمی و شبکه CFRP تقویت برشی شده و با یک تیر فاقد تقویت و یک تیر تقویت شده در برش با ورق‌های CFRP و چسب مقایسه شده است. در نهایت تیرها تحت بارگذاری متمرکز در یک نقطه قرار گرفته و ظرفیت برشی آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده تا عملکرد ملات ترمیمی ارزیابی گردد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که تقویت با استفاده از ملات ترمیمی باعث افزایش ظرفیت برشی به میزان ۲۳٪ در مقایسه با نمونه کنترل شده است در حالی که نمونه تقویت شده با چسب ۱۴٪ افزایش ظرفیت برشی نسبت به نمونه کنترل از خود نشان داده است.

واژه‌های کلیدی: ملات ترمیمی، ضایعات صنایع آهن و آلومینیوم، تقویت برشی، پلیمر مسلح الیافی (CFRP).

* نویسنده مسئول: esfahani@um.ac.ir

۱- مقدمه

تجدیدناپذیر می‌تواند منتج به دستیابی به ترکیب‌های بتنی با مشخصات مکانیکی بهبود یافته شود [۷, ۸]. غبار کوره قوس الکتریکی یک ماده غنی از فلز بوده که از ضایعات اصلی فرایند تولید فولاد می‌باشد. تاکنون تحقیقات گسترده‌ای بر روی کاربرد غبار کوره قوس الکتریکی به‌عنوان ماده جایگزین سیمان انجام شده است. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده کنترل‌شده از این ماده به‌عنوان بخشی از سیمان منجر به بهبود خصوصیات دوامی و حفظ کارایی ملات پایه‌سیمانی می‌شود [۹, ۱۰]. همچنین استفاده از ۲٪ غبار کوره قوس الکتریکی منجر به بهبود برخی از خواص بتن تازه و سخت‌شده می‌شود و می‌تواند باعث کاهش زمان گیرش اولیه و نهایی بتن گردد [۱۰]. از طرفی، نشان داده شده است که جایگزینی ۱۵٪ از سیمان با این ماده باعث کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها در مقایسه با نمونه ساخته شده با سیمان می‌شود. این در حالی است که جایگزینی ۱۰٪ از این ماده منجر به تولید نمونه‌هایی دارای ویژگی‌هایی مشابه با نمونه کنترل شده و نمونه‌های حاوی ۵٪ از این ماده خواصی مشابه و یا حتی بهتر از نمونه‌های کنترل دارند [۱۱, ۱۲].

سرباره کوره آهن‌گدازی یکی دیگر از ضایعات صنعت تولید فولاد بوده که به‌عنوان ماده جایگزین سیمان استفاده می‌شود. استفاده از این ماده می‌تواند تأثیر بسزایی بر مقاومت ملات سیمانی در برابر ورود کلریدها داشته باشد. مزایای استفاده از سرباره کوره آهن‌گدازی معمولاً به افزایش مقاومت بلند مدت، مقاومت در برابر هوازگی و مواد شیمیایی مهاجم نسبت داده می‌شود [۱۳]. با این حال عملکرد این ملات‌ها به نسبت جایگزینی، اندازه ذرات و شرایط عمل‌آوری بستگی دارد [۱۴]. هوانگ و لین [۱۵] نشان دادند که هنگام استفاده از سرباره کوره آهن‌گدازی، شبکه‌ای از منافذ کوچک‌تر در بافت ملات ایجاد می‌گردد که این موضوع ممکن است منجر به افزایش دوام این ملات‌ها هنگام قرار گرفتن در معرض شرایط محیطی نامناسب گردد. ازبورن [۱۶] مشاهده کرد که بتن ساخته شده با این ماده با میزان جایگزینی ۷۰٪ عملکرد بسیار بهتری در حالت مستغرق در آب دریا نسبت به نمونه مرجع از خود نشان داد، در حالی که تأثیر کربناتاسیون بر روی آن به

سیمان مهم‌ترین ماده ساختمانی عصر حاضر بوده که به‌عنوان رایج‌ترین ماده در پروژه‌های مختلف عمرانی از قبیل ساخت ساختمان‌ها، پل‌ها و جاده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱, ۲]. با وجود این، استفاده از سیمان در صنعت ساخت و ساز معایب مالی و زیست‌محیطی فراوانی را ایجاد کرده است. تحقیقات مختلف نشان می‌دهد که مقدار قابل توجهی انرژی صرف فرایند تولید سیمان شده که این میزان ۱۵٪ کل انرژی مصرف شده در حوزه صنعت در سراسر جهان را تشکیل می‌دهد [۳]. همچنین در طی فرایند تولید سیمان میزان قابل توجهی CO₂ آزاد می‌شود که این امر باعث تولید گازهای گلخانه‌ای می‌شود [۴, ۵]. پدیده گرم شدن زمین رابطه مستقیمی با اثر گازهای گلخانه‌ای داشته که این موضوع یکی از تهدیدات اصلی به شمار می‌آید که بشر با آن روبرو می‌باشد [۶]. در نتیجه حرکت به سوی تولید مصالح ساختمانی سبز و تلاش برای یافتن مواد جایگزین سیمان باید جزو اولویت‌های محققین در این حوزه قرار گیرد تا از میزان تولید سیمان کاسته شود. تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که ضایعات و محصولات جانبی برخی از صنایع، جایگزین مناسبی برای سیمان بوده که استفاده از آن‌ها در صنعت ساختمانی علاوه بر کاهش تولید سیمان، مشکل مدیریت بازیافت و دفع این مواد که همه ساله هزینه‌های سنگینی را بر کشورها تحمیل می‌کند مرتفع می‌سازد. همچنین به دلیل دارا بودن برخی از مواد سمی، رها کردن این مواد در طبیعت می‌تواند مشکلات فراوانی برای حوزه‌های زیستی دپوهای دفن ایجاد نماید. از جمله صنایعی که امکان استفاده از ضایعات آن‌ها به‌عنوان مواد جایگزین سیمان وجود دارد، صنعت تولید فولاد و آلومینیوم می‌باشد. استفاده از ضایعات صنعت تولید فولاد شامل سرباره کوره آهن‌گدازی (GGBFS^۱) و غبار کوره آهن‌گدازی (EAFD^۲)، و همچنین گل قرمز (RM^۳) که از ضایعات صنعت تولید آلومینیوم بوده، می‌تواند کمک بسزایی به کاهش تولید سیمان نماید.

استفاده صحیح از این محصولات جانبی به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان در ترکیب بتن، علاوه بر مرتفع نمودن برخی از مشکلات در حوزه آلودگی‌های زیست محیطی و مدیریت منابع

¹ Ground granulated blast-furnace

² Electric Arc Furnace Dust

³ Red Mud

سیستم تقویتی جدید به نام کامپوزیت‌های پایه‌سیمانی مسلح به الیاف (FRCM) که از مواد سیمانی برای ساخت ماتریس بهره می‌برند، این نقیصه تا حدود زیادی مرتفع شده است.

هزینه ترمیم ناشی از خوردگی سازه‌ها در جهان برابر با ۳٪ از تولید ناخالص کل جهان در سال ۲۰۱۰ بوده است [۲۲]. لذا نیاز به استفاده از مواد نوین ترمیمی و مقرون‌به‌صرفه روز به روز افزایش می‌یابد. در این پژوهش سعی شده است تا با کمک ضایعات صنایع آهن و آلومینیوم، ملات‌های ترمیمی پایه سیمانی طراحی و مورد آزمایش قرار گیرند. یکی از ویژگی‌های ملات‌های ترمیمی قابلیت جمع‌شدگی خشک پایین آن‌ها می‌باشد؛ چرا که در غیر این صورت ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی در سطح ملات ترمیمی راه را برای نفوذ مجدد عوامل مخرب به داخل بتن باز می‌کند. لذا از الیاف پلی‌پروپیلن برای کاهش ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی بهره گرفته شده است.

این پژوهش دارای سه بخش کلی می‌باشد. در قسمت اول پژوهش با توجه به وجود ضایعات در ملات‌ها، سعی در شناخت ریزساختار و ترکیبات شیمیایی مواد تشکیل‌دهنده آن‌ها شده است. در قسمت دوم با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی، مقاومت در برابر حمله اسید سولفوریک و جذب آب، ویژگی‌های مکانیکی و دوامی ملات‌های ساخته شده مورد بررسی قرار گرفته شده است. در بخش آخر سعی شده است که با رویکردی کاربردی، یک تیر بتن مسلح با کمک ملات ترمیمی منتخب و شبکه FRP تقویت برشی شده و با یک تیر کنترل فاقد تقویت و یک تیر تقویت شده در برش با ورق‌های FRP و چسب مقایسه شود. بدین منظور تمام تیرها تحت بارگذاری متمرکز در یک نقطه قرار گرفته و ظرفیت برشی آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده است تا عملکرد ملات ترمیمی مورد بررسی قرار گیرد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح

برای ساخت نمونه‌ها در این پژوهش از سیمان پرتلند تیپ ۲، سرباره کوره آهن‌گدازی، غبارکوره آهن‌گدازی، گل قرمز، میکروسیلیس و آب استفاده شده است. در جهت شناخت بهتر ترکیبات شیمیایی و ریزساختار مواد سیمانی مورد استفاده در پژوهش و شناسایی بهتر رفتار آن‌ها در ملات‌های پایه سیمانی،

شدت مشهودتر بود. هیروشی و همکاران [۱۷] نشان دادند که مقاومت فشاری ملات‌های حاوی سنگ‌دانه‌های ضایعات سرامیک ساخته شده با ۱۵٪ و ۳۰٪ جایگزینی سرباره کوره آهن‌گدازی کاهش مقاومت قابل توجهی را در مقایسه با ملات‌های فاقد این ماده نشان نمی‌دهند.

گل قرمز از محصولات جانبی فرایند تولید آلومینیوم می‌باشد که دارای سطح مخصوصی به مراتب بزرگ‌تر از سیمان می‌باشد ($10\text{ m}^2/\text{g}$ تا $25\text{ m}^2/\text{g}$ در مقایسه با $0.1\text{ m}^2/\text{g}$ تا $0.5\text{ m}^2/\text{g}$) [۱۸]. این سطح مخصوص غیرمعمول به وجود کانکرنیت متخلخل آن نسبت داده می‌شود که مخلوط کردن گل قرمز با آب را بسیار دشوار می‌کند [۱۹]. استفاده از ۵٪ گل قرمز به عنوان ماده جایگزین سیمان باعث ایجاد ملات با خصوصیات مکانیکی بهتر یا مشابه با ملات شاهد می‌شود. اما به طور کلی افزایش میزان گل قرمز کلسینه‌شده منجر به کاهش مقاومت فشاری و خمشی ملات می‌گردد. همچنین با افزایش میزان گل قرمز کارایی ملات کاهش یافته و زمان گیرش اولیه و نهایی تسریع می‌شود [۲۰]. لیو و همکاران [۲۱] تحقیقاتی بر روی سیمان‌های منیزیم فسفات اصلاح شده با گل قرمز انجام دادند. بررسی ریزساختار این ترکیبات نشان داد که استفاده از مقدار مناسبی گل قرمز می‌تواند ساختار متراکمی را به همراه منافذ کوچک‌تر با کاهش تخلخل ملات ایجاد نماید.

در بسیاری از کشورهای پیشرفته ملات‌های ترمیمی پیش‌ساخته با نام‌های تجاری مختلف به فروش می‌رسد که اغلب برای ترمیم و تقویت اعضای بتنی در محیط‌های خورنده مورد استفاده قرار می‌گیرند. اکثر این ملات‌های پیش‌ساخته که مورد تأیید استانداردهای اروپایی می‌باشند [۲۲]، حاوی الیاف پلی‌آمید بوده که ترکیبات آن‌ها با نسبت‌های مشخص با یکدیگر مخلوط شده و برای استفاده از آن‌ها تنها نیاز به افزودن آب به میزان مشخصی می‌باشد. یکی دیگر از سیستم‌های رایج تقویت و ترمیم المان‌های بتنی استفاده از پلیمرهای مسلح الیافی (FRP) می‌باشد. با توجه به خصوصیات منحصر به فرد از جمله راحتی استفاده، وزن سبک و مقاومت کششی بسیار بالا سهم قابل توجهی از پروژه‌های ترمیم را به خود اختصاص داده‌اند [۲۳-۲۵]. یکی از محدود مشکلات این سیستم تقویتی بهره‌گیری از ماتریس ارگانیک از جنس چسب بوده که با سطح المان مورد تقویت ناسازگار می‌باشد.

به منظور رفع این مشکل، طی چند سال گذشته با معرفی یک

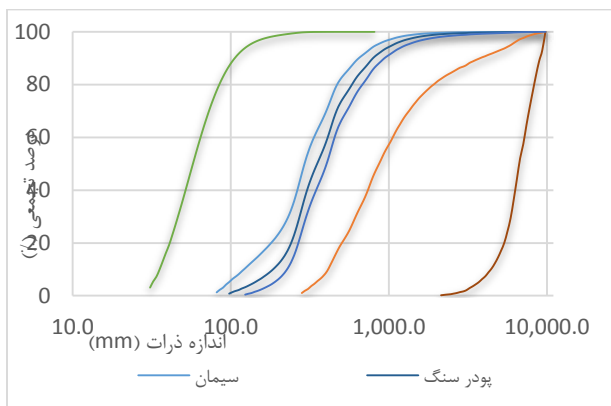
درصد هماتیت (Fe_2O_3)، ۱۸/۳ درصد اکسید کلسیم (CaO) و ۱۶/۹ درصد آلومینا (Al_2O_3) می‌باشد. این در حالی است که ماده غالب تشکیل‌دهنده در سیمان ۶۱/۴ درصد اکسید کلسیم (CaO) و ۲۱/۴ درصد سیلیس (SiO_2) بوده و در میکروسلیس ترکیب اصلی ۹۵-۹۰ درصد سیلیس (SiO_2) می‌باشد که این میزان بالای سیلیس عامل اصلی کمک این ماده به افزایش دوام و مقاومت فشاری ملات‌ها می‌باشد [۲۷].

جدول ۱- ترکیب شیمیایی مواد حاصل از آزمایش XRF

ترکیب (%)	سیمان	میکرو سیلیس	غبار کوره آهن‌گدازی	سرباره کوره آهن‌گدازی	گل قرمز
CaO	۶۱/۲	۰/۶-۱/۶	۱۰/۸	۳۴/۵	۱۸/۵
SiO_2	۲۱/۶	۹۰-۹۵	۴/۵	۱۱/۵	۱۳/۲
MgO	۲/۳	۰/۵-۲	۴	۲۲/۲	۱/۸
K_2O	-	۰/۲-۰/۵	۵/۳	۰/۴	۰/۵
Fe_2O_3	۳/۱	۰/۲-۱/۲	۵۳	۷/۱	۲۳/۶
Al_2O_3	۴/۵	۰/۷-۱/۲	۰/۳	۲/۸	۱۷/۱
SO_3	۱/۹	-	۰/۶	۰/۳	۰/۵
MnO_2	-	۰/۰۳-۰/۰۹	۰/۸	۰/۷	۰/۱
Na_2O	-	۰/۳-۰/۵	۳/۸	۰/۲	۴/۴
ZnO	-	-	۱/۱	۰/۲	-
L.O.I	۱	۰/۴-۲/۹	۱۵/۵	۱۹/۵	۱۵
TiO_2	-	-	۰/۱	۰/۳	۵/۱
BaO	-	-	-	۰/۲	-
V_2O_5	-	-	۰/۱	۰/۱	-
Cl	-	-	۰/۱	۰/۰۱<	-
P_2O_5	-	۰/۰۵	۰/۰۱<	۰/۰۱<	۰/۲
C_3A	۴/۴	-	-	-	-

تصاویر میکروسکوپ ریزنگار روبشی به منظور بررسی موشکافانه‌تر و دقیق‌تر ماهیت ریزساختار تمام مواد ریزدانه بکار رفته در ساخت نمونه‌ها در شکل ۲ آورده شده است. همانطور که در پژوهش‌های پیشین نیز مشاهده شده است، تصاویر SEM نشان می‌دهند که ذرات سیمان در بیشتر بخش‌ها دارای شکلی به صورت چند ضلعی نامنظم بوده که سطوح هیدراته نشده آن‌ها آمورفوس‌گونه می‌باشد. پودر سنگ و سرباره کوره آهن‌گدازی نیز دارای سطوحی به شکل چند ضلعی نامنظم و زاویه‌دار می‌باشند [۲۸، ۲۹]. از طرفی ذرات میکروسلیس و غبار کوره آهن‌گدازی به صورت کروی شکل می‌باشند که این موضوع با پژوهش داسیلوا

آزمایش‌های آنالیز لیزری ذرات (PSD^1)، فلورسانس اشعه ایکس (XRF^2)، میکروسکوپ ریزنگار روبشی (SEM^3) و طیف‌سنجی اشعه ایکس (EDX^4) در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مشهد انجام پذیرفت. به منظور بررسی توزیع اندازه ذرات هر یک از مواد بکار رفته در این پژوهش، آزمایش آنالیز لیزری ذرات انجام شد که نتایج آن در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱- اندازه ذرات مواد مورد استفاده حاصل از آزمایش PSD

نتایج نشان می‌دهد که سرباره کوره آهن‌گدازی دارای بالاترین میانگین اندازه ذرات در بین تمام مواد برابر با ۶۷۵۴ نانومتر و میکروسلیس دارای پایین‌ترین میانگین اندازه ذرات برابر با ۶۸ نانومتر می‌باشد. همچنین میانگین اندازه ذرات سیمان، پودر سنگ، غبار کوره آهن‌گدازی و گل قرمز به ترتیب برابر با ۳۷۴، ۴۷۰، ۱۵۶۰ و ۵۶۴ نانومتر می‌باشد. همانطور که در بتن‌های فوق‌توانمند از سنگ‌دانه‌ها با اندازه ذرات متفاوت برای ساخت بتن استفاده می‌شود تا بتن حاصل دارای حداقل فضای خالی بین سنگ‌دانه‌ها باشد، در صورت استفاده صحیح از اختلاف اندازه ذرات مواد ذکر شده، می‌توان به ترکیباتی با شبکه حفره‌های مطلوب‌تر و دوام مناسب‌تر دست یافت. همچنین با استفاده از روش فلورسانس اشعه ایکس آنالیز شیمیایی پنج ماده سیمانی بکار رفته در ترکیبات انجام شد و نتایج آن در جدول ۱ گزارش شده است. این نتایج نشان می‌دهد که مواد تشکیل‌دهنده اصلی در غبار کوره آهن‌گدازی شامل ۵۳/۳ درصد هماتیت (Fe_2O_3) و در سرباره کوره آهن‌گدازی ۳۴/۵ درصد اکسید کلسیم (CaO) و ۲۲/۲ درصد اکسید منیزیم بوده که همزمان ویژگی سیمانی بودن و پوزلانی بودن به این ماده اضافه می‌کنند [۲۶]. گل قرمز متشکل از ۲۳/۸

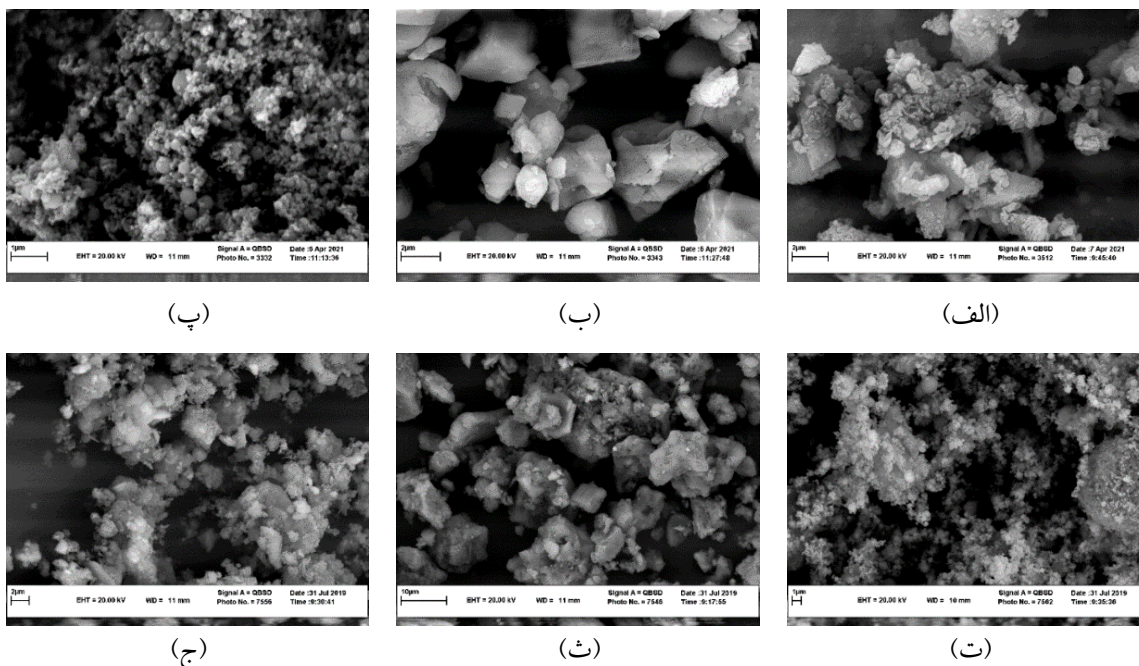
³ scanning electron microscope

⁴ energy-dispersive X-ray spectroscopy

¹ Particle Size Distribution

²X-ray Fluorescence

و همکاران [۱۲] مطابقت دارد. همچنین تصاویر نشان می‌دهند که این ذرات کروی شکل در غبار کوره آهن‌گدازی تشکیل گروه‌هایی با ابعاد ۱۰ تا ۱۵ میکرومتر داده‌اند. مشابه با پژوهش لو و همکاران [۳۰] 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.



شکل ۲- تصاویر SEM، الف- سیمان ب- پودر سنگ پ- میکروسیلیس ت- غبار کوره آهن‌گدازی ث- سرباره کوره آهن‌گدازی ج- گل قرمز

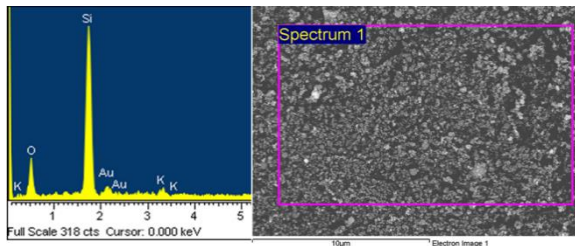
جدول ۲- درصد وزنی مواد حاصل از آزمایش EDX

ترکیب (%)	سیمان	پودر سنگ	میکرو سیلیس	غبار کوره آهن‌گدازی	سرباره کوره آهن‌گدازی	گل قرمز
C K	۹/۱	۱۱/۹	۰	۰	۱۳/۷	۰
O K	۴۶/۱	۵۲/۲	۴۸/۱۲	۳۵/۹	۵۲/۲	۵۰/۹
Mg K	۱/۵	۰	۰	۵/۶	۱۰/۸	۰/۸
Al K	۲/۶	۰	۰	۰	۰/۹	۹/۱
Si K	۷/۲	۰	۴۸/۶	۲/۴	۰/۹	۷/۱
S K	۱/۷	۰	۰	۰	۰	۰
Ca K	۳۱/۷	۳۵/۸	۰	۴/۲	۲۰/۳	۱۲/۳
K K	۰	۰	۳/۲۷	۶	۰	۰/۶
Na K	۰	۰	۰	۴/۱	۰	۴/۷
Fe K	۰	۰	۰	۴۰/۸	۱/۲	۱۱
Cl K	۰	۰	۰	۱/۲	۰	۰/۵
Ti K	۰	۰	۰	۰	۰	۲/۹

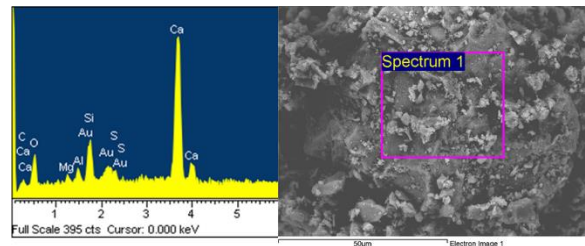
* حرف اول نشان‌دهنده نماد شیمیایی عناصر بوده و حرف دوم که برای همه عناصر K می‌باشد، نشان دهنده لایه برداشت است

نتایج آزمایش طیف‌سنجی اشعه ایکس در جدول ۲ و شکل ۳ ارائه شده است. بررسی نتایج این آزمایش کمک می‌کند تا با شناخت ترکیبات اصلی مواد سیمانی، رفتار آن‌ها در ملات را بهتر پیش‌بینی کرد. بدین منظور تمرکز اصلی بر روی شناسایی ترکیب غالب در هر ماده بوده که با مشخص نمودن قله اصلی در نتایج این آزمایش شناسایی می‌شود.

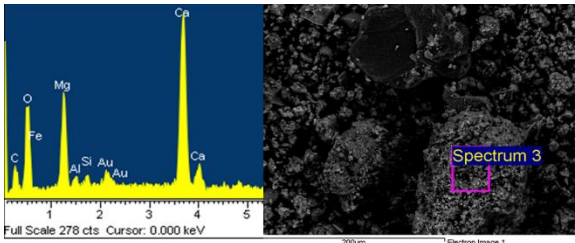
همانطور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، مطابق انتظار ترکیب غالب در سیمان و پودر سنگ، کلسیم (Ca) می‌باشد و قله اصلی در میکروسیلیس، سلیسیم (Si) می‌باشد. در غبار کوره آهن‌گدازی به عنوان ضایعات صنعت تولید آهن، ترکیب غالب آهن (Fe) بوده، در حالی که سرباره کوره آهن‌گدازی فاقد مقادیر زیادی آهن می‌باشد و کلسیم (Ca) و منیزیم (Mg) بیشترین سهم از عناصر تشکیل‌دهنده این ماده را به خود اختصاص داده‌اند. گل قرمز متشکل از چندین عنصر به عنوان ترکیبات اصلی خود شامل کلسیم (Ca)، آهن (Fe)، آلومینیوم (Al) و سلیسیم (Si) می‌باشد.



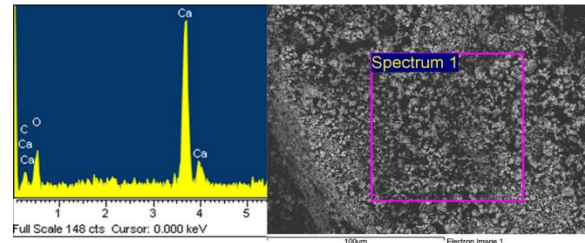
ب- میکروسیلیس



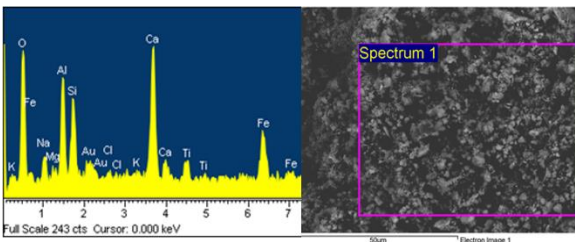
الف- سیمان



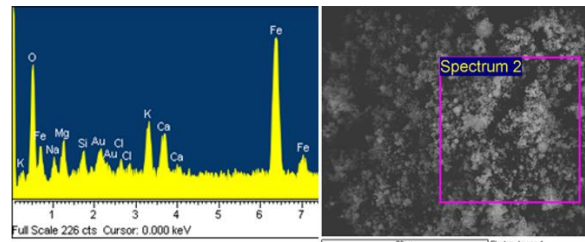
ت- سرباره کوره آهن گدازی



پ- پودر سنگ



ج- گل قرمز



ث- غبار کوره آهن گدازی

شکل ۳- آزمایش EDX، الف- سیمان ب- میکروسیلیس پ- پودر سنگ ت- سرباره کوره آهن گدازی ث- غبار کوره آهن گدازی ج- گل قرمز

توانایی بسیار بالای این الیاف در کاهش ترک‌های ملات حاصل به خصوص ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی خشک که پس از تبخیر آب بتن تازه رخ می‌دهد می‌باشد [۳۳، ۳۴]. با توجه به اینکه یکی از اهداف مهم ترمیم، دستیابی به یک سطح غیرقابل نفوذ برای محافظت از لایه ضعیف ترمیم شده می‌باشد، ملات ترمیمی باید دارای حداقل میزان ترک پس از خشک شدن باشد، چرا که ایجاد ترک‌های ریز در ملات می‌تواند روزه‌ای برای ورود مجدد عوامل مخرب از جمله یون‌های کلر به بخش آسیب‌دیده بتنی به وجود آورد. لذا استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن می‌تواند نقش بسزایی در دستیابی به ملات ترمیمی مناسب داشته باشد. میزان فوق‌روان‌کننده با توجه به لزوم ثابت نگه داشتن اسلامپ ترکیبات ساخته شده با انواع مختلف مواد جایگزین و درصد‌های متفاوت جایگزینی، تغییر داده شده است. لازم به ذکر است که دلیل انتخاب نوع ضایعات در این پژوهش فراوانی آنها در استان‌های خراسان با توجه به وجود کارخانه‌های تولید آهن و آلومینیوم بوده و انتخاب نسبت

۲-۲- طرح اختلاط و نام‌گذاری نمونه‌ها

به منظور بررسی تأثیر استفاده از ضایعات به‌عنوان بخشی از سیمان بر روی عملکرد ملات‌های پایه سیمانی، در مجموع ۱۴ ترکیب مختلف ساخته شد. همانطور که در جدول ۳ ارائه شده است، این ۱۴ طرح با جایگزینی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد از سیمان با غبار کوره آهن‌گدازی، سرباره کوره آهن‌گدازی و گل قرمز ساخته شده‌اند. میزان پودر سنگ استفاده شده در نمونه‌ها تقریباً برابر با kg/m^3 ۶۲۰ بوده و در تمام نمونه‌ها از ۱۶/۵ کیلوگرم الیاف پلی‌پروپیلن و ۳۲۰ کیلوگرم میکروسیلیس به ازای هر متر مکعب ملات استفاده شده است. با توجه به اهمیت پارامترهای دوامی و تأثیر بسزایی میکروسیلیس بر روی این پارامتر [۳۱، ۳۲]، برای دستیابی به یک طرح اختلاط با دوام مناسب در تمام نمونه‌ها از میکروسیلیس استفاده شد. همچنین از پودر سنگ به‌عنوان یک ماده پرکننده و به منظور کاهش میزان استفاده از مواد سیمانی و پوزالانی در ترکیب استفاده شده است. علت استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن،

آهن‌گذاری به نسبت ۱ به ۳ در طرح اختلاط مورد استفاده قرار گرفته‌اند و مجموع این دو ضایعات جایگزین ۱۵٪ از سیمان شده است. برای نام‌گذاری نمونه شاهد که فاقد هر گونه ضایعات جایگزین می‌باشد تنها از کلمه Control استفاده شده است.

۳- آزمایش‌ها

خصوصیات مکانیکی نمونه‌ها با استفاده از آزمایش‌های مقاومت فشاری و کشش‌بررسی شد. علاوه بر این، ویژگی‌های دوام به وسیله مقاومت در برابر حمله اسید سولفوریک، جذب آب و مقاومت الکتریکی بررسی شد. آزمایش مقاومت فشاری مطابق با آئین‌نامه [35] ASTM C109 بر روی نمونه‌های مکعبی شکل به ابعاد ۵۰ میلی‌متر در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه انجام شد. آزمایش مقاومت کششی مطابق با ضوابط آئین‌نامه [36] ASTM C307 بر روی نمونه‌های دمبلی شکل به طول ۷۶/۲ میلی‌متر، ضخامت ۲۵/۴ میلی‌متر و عرض گلوگاه ۲۵/۴ میلی‌متر در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه انجام شد. دوام طرح‌های مختلف در برابر حمله اسید سولفوریک ۵٪ بر روی نمونه‌های مکعبی شکل به ابعاد ۵۰ میلی‌متر مطابق با آئین‌نامه [37] ASTM C267 پس از ۲۸ روز عمل‌آوری و قرارگیری ۱۴ و ۲۸ روزه در تانک اسید مورد بررسی قرار گرفت. همچنین میزان جذب آب نمونه‌ها با ساخت نمونه‌های مکعبی شکل به ابعاد ۵۰ میلی‌متر مطابق با آئین‌نامه ASTM [38] C642 مورد آزمایش قرار گرفت. در نهایت آزمایش مقاومت در برابر جریان الکتریکی مطابق با روش تشریح شده در پژوهش زانگجین [۳۹] بر روی نمونه‌های استوانه‌ای شکل به شعاع ۵۰ و طول ۱۰۰ میلی‌متر انجام شد.

۳-۱- خصوصیات دوامی

خصوصیات مربوط به دوام نمونه‌ها با انجام آزمایش‌های مقاومت الکتریکی، جذب آب و مقاومت در برابر حمله اسید سولفوریک مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۱-۱- مقاومت الکتریکی

آزمایش مقاومت الکتریکی بر روی نمونه‌های اشباع با سطح خشک در سن ۴۲ روزه انجام شد. بدین منظور دو صفحه فولادی توسط خمیر سیمان کم‌اسلامپ به دو طرف نمونه متصل شد و

ترکیبات ۱۴ طرح مورد بررسی با توجه به نتایج برخی از تحقیقات پیشین می‌باشد.

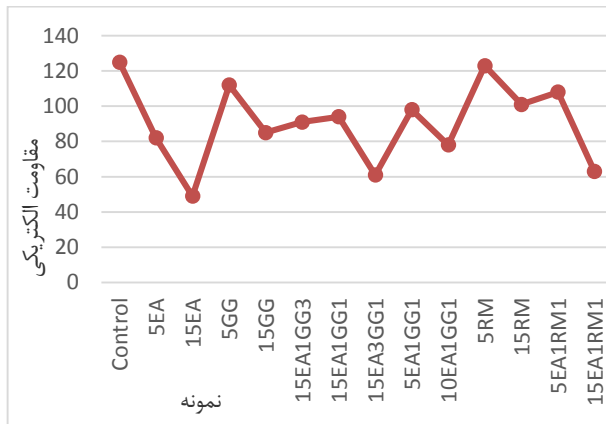
جدول ۳- نام‌گذاری و طرح اختلاط ملات‌ها*

فوق روان کننده	آب	گل قرمز	سرباره کوره آهن‌گدازی	غبار کوره آهن‌گدازی	سیمان	نام طرح
۱۶	۳۴۰	۰	۰	۰	۶۵۰	Control
۱۶	۳۴۰	۰	۰	۰	۶۱۰	5EA
۲۴	۳۴۰	۰	۰	۰	۵۱۵	15EA
۱۶	۳۴۰	۰	۴۸	۰	۶۱۰	5GG
۱۹	۳۴۰	۰	۱۴۴	۰	۵۱۵	15GG
۲۱	۳۴۰	۰	۱۰۸	۰	۶۱۰	15EA1GG3
۲۲	۳۴۰	۰	۷۲	۰	۵۶۰	15EA1GG1
۲۴	۳۴۰	۰	۳۶	۰	۵۱۵	15EA3GG1
۱۵	۳۴۰	۰	۲۴	۰	۵۱۵	5EA1GG1
۱۹	۳۴۰	۰	۴۸	۰	۵۱۵	10EA1GG1
۱۶	۳۴۰	۴۸	۰	۰	۶۱۰	5RM
۱۸	۳۴۰	۱۴۴	۰	۰	۵۱۵	15RM
۱۵	۳۴۰	۲۴	۰	۰	۵۱۵	5EA1RM1
۲۳	۳۴۰	۷۲	۰	۰	۵۱۵	15EA1RM1

* کلیه واحدها برحسب kg/m^3 می‌باشند. پودر سنگ استفاده شده در تمام نمونه‌ها تقریباً برابر با kg/m^3 ۶۲۰ بوده است. همچنین در تمام نمونه‌ها از kg/m^3 ۱۶/۵ الیاف پلی‌پروپیلن و kg/m^3 ۳۲۰ میکروسیلیس استفاده شده است.

در نام‌گذاری نمونه‌ها EA به اختصار برای معرفی غبار کوره آهن‌گدازی، GG برای معرفی سرباره کوره آهن‌گدازی و RM به منظور معرفی گل قرمز استفاده شده است. در طرح‌هایی که تنها دارای یک نوع از ضایعات در ترکیب خود می‌باشند عددی که پس از حروف آورده شده است درصد وزنی جایگزینی با سیمان را نشان می‌دهد. در طرح‌هایی که از دو نوع ضایعات جایگزین استفاده شده است، حروف اختصاری هر یک از ضایعات در نام‌گذاری آورده شده و پس از حروف اختصاری نسبت مورد استفاده از آن ضایعات در طرح قید شده است. همچنین عدد ذکر شده در انتهای نام بیان‌گر میزان جایگزینی مجموع ضایعات با سیمان می‌باشد. به‌عنوان مثال نمونه EA1GG3-15 معرف نمونه‌ای می‌باشد که غبار کوره آهن‌گدازی و سرباره کوره

بوده که ۱۵٪ از سیمان جایگزین غبار کوره آهن گدازی شده است. استفاده از سرباره کوره آهن گدازی و گل قرمز به صورت ترکیبی و تکی به خصوص در درصد‌های جایگزینی ۱۵٪ نیز باعث کاهش مقاومت الکتریکی شده است. لازم به ذکر است که افزودن میکروسیلیس به نمونه‌ها به منظور افزایش مقاومت الکتریکی بوده، چرا که این ماده با تغییر ریزساختار ناحیه انتقال بین سطحی منجر به اصلاح شبکه حفره‌ها و افزایش مقاومت الکتریکی ملات می‌شود.



شکل ۴- مقاومت الکتریکی نمونه‌ها

۳-۱-۲- جذب آب

نتایج حاصل از آزمایش جذب آب ۳۰ دقیقه‌ای، ۲۴ ساعته و ۷۲ ساعته نمونه‌ها در شکل ۵ ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، بیشترین جذب آب مربوط به نمونه‌های 15EA، 15EA1GG1 و 15EA1RM1 که در تمام آن‌ها درصد جایگزینی ۱۵٪ می‌باشد. همچنین کمترین میزان جذب آب که پایین‌تر از نمونه شاهد نیز می‌باشد، مربوط به نمونه‌های 5EA، 5GG و 5EA1GG1 بوده که در تمام آن‌ها درصد جایگزینی ۵٪ می‌باشد. با مقایسه نمونه‌های حاوی ۵٪ و ۱۰٪ مواد جایگزین سیمان با نمونه شاهد مشاهده می‌شود که میزان جذب آب تمام این نمونه‌ها کمتر از نمونه شاهد بوده که این امر را می‌توان به تاثیر ضایعات بر تغییر شبکه حفره‌های داخل ملات نسبت داد. از طرفی با توجه به اینکه ضایعات ابعاد متفاوتی نسبت به پودر سیمان دارند، وجود مواد با اندازه‌های مختلف درون ملات تأثیر بسزایی در پر کردن فضای خالی حفره‌ها دارد. از طرفی با افزایش مجموع درصد جایگزینی ضایعات به خصوص غبار کوره آهن گدازی به میزان ۱۵٪ ملات به شدت روانی خود را از دست داده و روند تراکم بتن

سپس نمونه در مدار قرار گرفت.

قرائت میزان جریان برای هر نمونه در ۳ ولتاژ ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ولت انجام شده و میانگین آن‌ها مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت مقاومت الکتریکی برای هر نمونه با کمک روابط (۱) و (۲) به دست آمد.

$$P = R(A / L) \quad (۱)$$

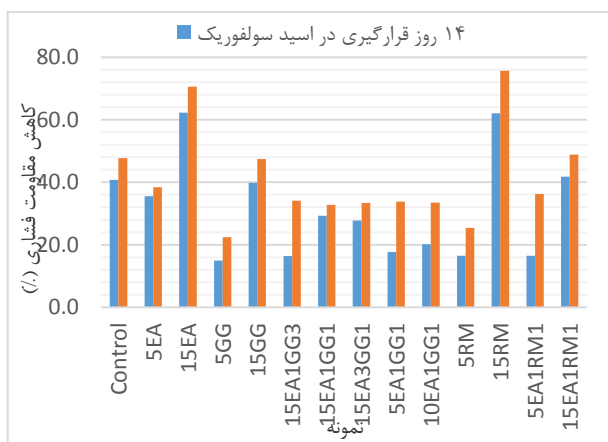
$$R = V / I \quad (۲)$$

در این روابط R مقاومت بر حسب Ω ، P مقاومت الکتریکی نمونه بر حسب $k\Omega \cdot cm$ ، V ولتاژ بر حسب v، I جریان بر حسب mA، L طول نمونه بر حسب cm و A سطح مقطع نمونه بر حسب cm^2 می‌باشد.

به‌طور کلی مقاومت الکتریکی ملات رابطه مستقیمی با ساختار حفره‌های داخلی بتن دارد. بتن به‌عنوان ماده‌ای تقریباً غیر رسانا در نظر گرفته می‌شود و رسانایی الکتریکی در نمونه‌ها عمدتاً به دلیل آب موجود در حفره‌ها می‌باشد. در نتیجه هر چه میزان حفرات نمونه کمتر باشد، رسانایی الکتریکی نیز کمتر و مقاومت الکتریکی بیشتر خواهد بود. ساختار و ارتباط حفره‌های داخلی بتن تأثیر بیشتری بر پارامترهای دوامی بتن از جمله مقاومت الکتریکی به نسبت پارامترهای مکانیکی بتن مانند مقاومت فشاری دارند. به علاوه، مقاومت الکتریکی به ترکیبات تشکیل دهنده بتن نیز وابسته می‌باشد [۴۰].

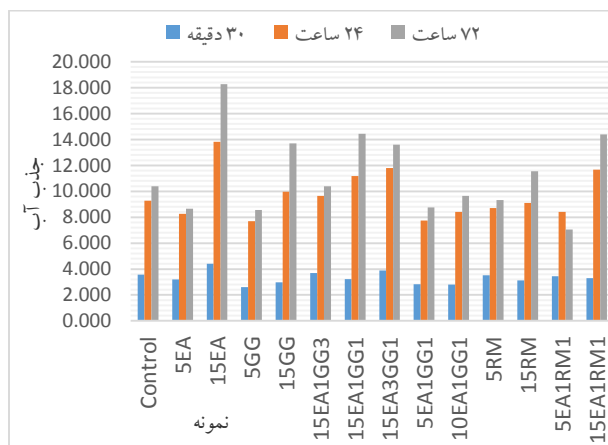
نتایج مقاومت الکتریکی تمام نمونه‌ها در شکل ۴ آورده شده است. نمونه شاهد که فاقد هر گونه ضایعات می‌باشد دارای بالاترین مقاومت الکتریکی در میان نمونه‌ها می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که به جز در نمونه 5EA که حاوی ۵٪ غبار کوره آهن گدازی می‌باشد، افزودن ۵٪ مواد جایگزین به ترکیب ملات، تأثیر چندانی بر مقاومت الکتریکی ندارد. جایگزینی سیمان با ضایعات در درصد‌های جایگزینی بالای ۵٪ منجر به کاهش شدید مقاومت الکتریکی می‌گردد. همان‌طور که در بخش قبل به آن اشاره شد، نتایج آزمایش طیف‌سنجی اشعه ایکس (شکل ۳) نشان‌گر مقادیر بالای آهن در ترکیب غبار کوره آهن گدازی می‌باشد. وجود غبار کوره آهن گدازی در ملات‌ها به معنی مقادیر بالای فلزات سنگین است که می‌توان با آن رسانایی بالاترین ملات‌ها را توجیه کرد. پایین‌ترین مقاومت الکتریکی مربوط به نمونه 15EA

تعداد وجهی از نمونه‌های ساخته شده با ضایعات عملکرد بسیار بهتری نسبت به نمونه شاهد داشتند که این موضوع توانایی مواد جایگزین در افزایش دوام نمونه‌ها را نشان می‌دهد. استفاده از ضایعات پوزالانی باعث می‌شود که پوزالان‌ها با Ca(OH)_2 واکنش داده و تولید ژل C-S-H اضافه نمایند که این امر می‌تواند به افزایش مقاومت نمونه‌ها در برابر اسید کمک نماید [۴۴]. با مقایسه نمونه‌های ساخته با یک نوع ضایعات و درصدهای مختلف جایگزینی، به‌عنوان مثال مقایسه نمونه‌های 5GG و 15GG مشاهده می‌شود که افزایش درصد جایگزینی از ۵٪ به ۱۵٪ منجر به افزایش چشمگیر کاهش مقاومت فشاری نمونه پس از قرار گرفتن در محیط اسیدی می‌شود. به ترتیب با افزایش درصد جایگزینی غبار کوره آهن‌گدازی، سرباره کوره آهن‌گدازی و گل قرمز از ۵ به ۱۵ درصد، میزان کاهش مقاومت فشاری ۱۴ روزه از ۳۵/۶٪ به ۶۲/۲٪، از ۱۴/۹٪ به ۳۹/۸٪ و از ۱۶/۵٪ به ۶۲/۱٪ افزایش یافته است. علت این امر را می‌توان در افزایش حفره‌ها و نفوذپذیری نمونه‌های ساخته شده با درصد بالاتر جایگزینی ضایعات دانست؛ چرا که در آزمایش جذب آب روندی کاملاً مشابه مشاهده گردید. به طور کلی می‌توان مشاهده کرد که در تمام مواردی که درصد جایگزینی ۵ یا ۱۰٪ بوده است، ضایعات جایگزین با واکنش‌های پوزالانی خود باعث عملکرد بهتر نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد شده‌اند. در طرف دیگر، افزودن ۱۵٪ ضایعات به‌عنوان جایگزین با توجه به نوع و نسبت ترکیب ضایعات، می‌تواند باعث دستیابی به نمونه‌هایی با دوام بهتر یا ضعیف‌تر نسبت به نمونه شاهد گردد.



شکل ۶- کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از قرارگیری در اسید سولفوریک

تازه به خوبی انجام نمی‌شود که این امر موجب ایجاد منافذ بیشتری در بتن می‌شود. از طرفی حضور ناهمواری‌ها و شکستگی‌های نامنظم بر روی سطح ذرات ضایعات که در پژوهش‌های پیشین نیز به آن اشاره شده است [۴۱, ۴۲] باعث تشدید این پدیده می‌شود. در نمونه‌های دارای یک نوع ضایعات نیز مشاهده می‌شود که افزایش درصد جایگزینی از ۵٪ به ۱۵٪ منجر به افزایش قابل توجه جذب آب شده است.



شکل ۵- جذب آب نمونه‌ها در سن ۹۰ روزه

۳-۱-۳ مقاومت در برابر اسید سولفوریک

به‌منظور بررسی مقاومت طرح‌های مختلف در برابر حمله اسید سولفوریک، نمونه‌ها پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در تانک آب، وارد محفظه حاوی اسید سولفوریک ۵٪ شدند و به مدت ۱۴ و ۲۸ روز در محیط خورنده اسیدی قرار گرفتند. برای بالا بردن دقت آزمایش، به صورت روزانه سطح pH تانک اسید با کمک pH-سنج کنترل شده و در صورت کاهش آن با افزودن اسید، سطح pH به میزان اولیه خود رسانده شد. مقاومت فشاری نمونه‌ها به عنوان پارامتری برای اندازه‌گیری مقاومت بتن در برابر حمله اسید اندازه‌گیری شده و نتایج آن در شکل ۶ گزارش شده است. به طور کلی پس از قرارگیری نمونه‌ها در محیط اسیدی، ژل C-S-H موجود در ملات تخریب شده که این امر منجر به نرم‌شدگی ماتریس سیمان و در نهایت تخریب نمونه‌ها می‌شود [۴۳].

همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، نمونه‌های 5GG، 15EA1GG3، 5EA1RM1، 5RM، 15EA1GG3 در هر دو سن ۱۴ و ۲۸ روزه دچار کاهش مقاومت فشاری کمتری در اثر قرارگیری در محیط اسیدی نسبت به نمونه مرجع شده‌اند. این نشان می‌دهد که

۲-۳- خصوصیات مکانیکی

سرباره کوره آهن گدازی در نسبت‌های ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ به‌عنوان مواد جایگزین سیمان می‌باشد. در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه نیز اکثر نمونه‌ها عملکردی ضعیف‌تری نسبت به نمونه شاهد از خود نشان دادند در حالی که در سن ۲۸ روزه نمونه‌های 15EA1GG3 و 15EA1GG1 و در سن ۹۰ روزه نمونه‌های 15EA1GG3، 15EA1GG1، 5EA1GG1 و 10EA1GG1 عملکردی مشابه و حتی بهتر نسبت به نمونه شاهد داشتند. همانطور که مشاهده می‌شود در تمام این نمونه‌ها غبار کوره آهن گدازی و سرباره کوره آهن گدازی در ترکیب حضور دارند که با توجه به کاهش میزان سیمان به کار رفته و متعاقباً کاهش هزینه‌ها و صدمات زیست‌محیطی، استفاده از این طرح‌ها برتری قابل ملاحظه‌ای نسبت به نمونه شاهد که فاقد ضایعات بوده می‌باشد. عملکرد مناسب ضایعات با وجود خاصیت سیمانی پایین‌تر نسبت به سیمان را می‌توان در تفاوت اندازه ابعاد ذات تشکیل‌دهنده، خاصیت پراکنندگی و واکنش‌های پوزالانی نهان آن‌ها جست‌وجو کرد [۴۵]. در حالت استفاده از تنها یک نوع ضایعات، در نمونه‌های حاوی سرباره کوره آهن و غبار کوره آهن گدازی با افزایش درصد جایگزینی از ۵٪ به ۱۵٪ مقاومت فشاری کاهش می‌یابد، درحالی‌که در نمونه‌های حاوی گل قرمز این روند برعکس می‌باشد.

ضعیف‌ترین عملکرد در آزمایش مقاومت فشاری مربوط به نمونه‌های 15EA و 15EA3GG1 می‌باشد که هر دو حاوی مقادیر زیادی سرباره کوره آهن گدازی می‌باشند.

۲-۲-۳ مقاومت کششی

همانطور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود در سن ۷ روزه نمونه‌های 5EA، 5GG، 15GG، 15RM و 5EA1RM1 مقاومت کششی مشابهی نسبت به نمونه شاهد داشته و مقاومت کششی نمونه‌های 15RM و 10EA1GG1 به ترتیب ۱۷٪ و ۵٪ بالاتر از نمونه شاهد می‌باشد. در سن ۲۸ روزه نیز در تمام نمونه‌های قبلی مقاومت کششی بالاتر یا مشابه یا نمونه شاهد بوده است. با مقایسه نمونه‌های 5EA و 15EA و همچنین نمونه‌های 15EA1GG3، 15EA1GG1 و 15EA3GG1 مشاهده می‌شود که با افزایش میزان سرباره کوره آهن گدازی مقاومت کششی به شکل چشم‌گیری کاهش یافته است. همچنین پایین‌ترین مقاومت کششی

خصوصیات مکانیکی طرح اختلاط‌های ساخته شده با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت کششی مورد بحث قرار گرفته است. نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه و نتایج آزمایش مقاومت کششی نمونه‌ها در سنین ۷ و ۲۸ روزه در جدول ۴ گزارش شده است. لازم به ذکر است که اعداد گزارش شده با میانگین‌گیری ۳ نمونه برای هر طرح اختلاط به‌دست آمده است.

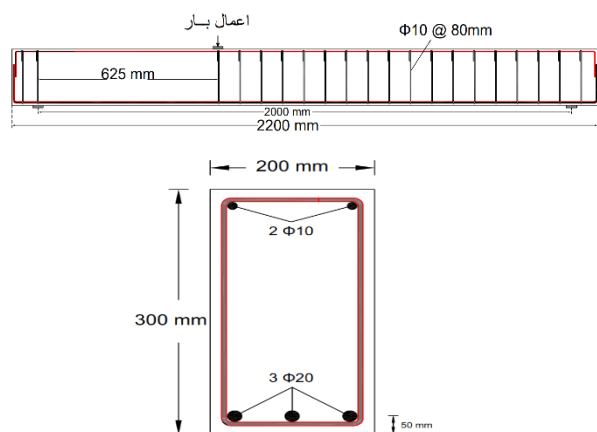
جدول ۴- نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی

نمونه	روزه ۷		روزه ۲۸		روزه ۹۰
	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)
Control	۲۸/۹۱	۳/۵	۳۹/۲۸	۳/۹	۴۳/۴
5EA	۲۶	۳/۴۶	۳۰/۸۷	۳/۷۱	۳۶
15EA	۱۹/۸۷	۲	۳۰/۲۷	۲/۷۵	۳۲/۳۳
5GG	۲۴/۱	۳/۵۷	۳۵/۰۶	۳/۹۶	۳۹/۲۲
15GG	۲۱/۵۳	۳/۴۶	۳۳/۱	۴/۰۵	۳۷/۷۶
15EA1GG3	۲۸/۵۹	۳/۳۶	۳۹/۴۴	۳/۶۶	۴۴/۱
15EA1GG1	۲۷/۶۶	۳/۱	۳۹/۳۳	۳/۵۳	۴۲/۸
15EA3GG1	۱۸/۹۳	۲/۸۷	۲۸/۹۳	۳	۳۴/۲۳
5EA1GG1	۲۸/۹۵	۳/۲۶	۳۸/۳۲	۳/۸۴	۴۳/۶
10EA1GG1	۲۹/۳۱	۳/۶۷	۳۴/۸۱	۳/۷۱	۴۲/۷۷
5RM	۲۱/۳۳	۴/۱۲	۲۹/۷	۴/۳۳	۳۵/۱۴
15RM	۲۴/۳۳	۳/۵۷	۳۴/۱۲	۴/۰۸	۳۶/۷۳
5EA1RM1	۲۷/۸۶	۳/۴۶	۳۴/۴۳	۳/۹۲	۴۰/۷۶
15EA1RM1	۲۱/۴۷	۳/۳	۳۲/۲۷	۳/۴	۳۴/۷۳

۱-۲-۳ مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترها برای بررسی خصوصیات مکانیکی ملات‌های ساخته شده مورد ارزیابی قرار گرفته است. همانطور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود در سن ۷ روزه مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی یک نوع ضایعات در تمام درصدهای جایگزینی پایین‌تر از نمونه شاهد می‌باشد. حال آنکه در نمونه‌های 10EA1GG1 و 5EA1GG1، 15EA1GG3 مقاومت فشاری تقریباً مشابه با نمونه شاهد می‌باشد که این نشان‌دهنده هم‌افزایی استفاده هم‌زمان از غبار کوره آهن گدازی و

شد تا عملکرد ملات تقویتی با چسب اپوکسی مقایسه شود. به منظور بررسی توانایی سیستم‌های تقویتی در افزایش ظرفیت برشی تیرهای بتن مسلح، دهانه فاقد میلگردهای برشی، تقویت شده و مطابق شکل ۷ تیرها تحت آزمایش بارگذاری متمرکز در یک نقطه قرار گرفتند. تیرها به صورتی طراحی شدند تا حتی پس از تقویت نیز در برش شکسته شده تا افزایش ظرفیت برشی آن‌ها در مقایسه با نمونه شاهد مشخص گردد. با وجود اینکه دورپیچ کامل به وسیله ورق‌های CFRP مؤثرترین روش برای تقویت برشی می‌باشد، با توجه به کاربردی تر بودن سیستم تقویتی U-شکل، از این سیستم برای تقویت استفاده شد. پیش از شروع تقویت، عملیات آماده‌سازی سطحی شامل از بین بردن سطح ضعیف بتنی با ساینده سطح به وسیله فرز و فرچه سیمی انجام شد. همچنین به منظور جلوگیری از پارگی ورق‌های CFRP در گوشه‌های تیر، انحنائی به شعاع ۲ cm ایجاد شد. در تیر تقویت شده با ورق‌های CFRP پس از انجام عملیات آماده‌سازی سطحی، ورق‌ها با کمک چسب اپوکسی به صورت U-شکل در دهانه ضعیف برشی چسبانده شدند. عرض و فاصله ورق‌ها به گونه‌ای انتخاب شد که ظرفیت برشی نهایی تیر باعث شکست برشی تیر گردد.



شکل ۷- مشخصات تیرها پیش از تقویت و نحوه بارگذاری

در نوع دیگر تقویت همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است، از شبکه CFRP به جای ورق‌های FRP استفاده شده تا این شبکه بین دو لایه ملات ترمیمی ساندویچ شود. مطابق شکل ۹ در این سیستم تقویتی، پس از اشباع کردن سطح تیر یک لایه ملات ترمیمی بر روی تیر اجرا شد، در مرحله بعد شبکه CFRP با فشار اندک دست بر روی لایه ملات فشرده شد و در نهایت لایه بعدی ملات بر روی شبکه

مربوط به نمونه حاوی ۱۵٪ غبار کوره آهن‌گدازی می‌باشد که این موضوع عملکرد ضعیف این ترکیب به عنوان ماده جایگزین سیمان را در آزمایش مقاومت کششی نشان می‌دهد. در طرف مقابل نمونه‌هایی که تنها حاوی گل قرمز به عنوان ماده جایگزین سیمان بوده‌اند، بهترین عملکرد را در آزمایش مقاومت کششی از خود نشان دادند. در این نمونه‌ها نیز با افزایش درصد جایگزینی از ۵٪ به ۱۵٪ مقاومت کششی کاهش یافته است. نمونه‌هایی که تنها از سرباره کوره آهن‌گدازی در ساخت آن‌ها استفاده شده است در هر دو سن ۷ و ۲۸ روزه عملکردی مشابه با نمونه شاهد داشته‌اند.

۳-۳- خصوصیات عملکردی

به منظور بررسی کاربردی بودن ملات‌های ترمیمی ساخته شده با ضایعات، طرح اختلاط مربوط به نمونه 15EA1GG3 که در تمام پارامترهای مکانیکی و دوامی مورد بحث در این پژوهش عملکرد مناسبی از خود نشان داد، به عنوان نمونه برگزیده انتخاب شد تا توانایی آن در ترمیم المان‌های بتنی نیز سنجیده شود.

۳-۳-۱- تقویت برشی تیرهای بتن مسلح با ملات ترمیمی

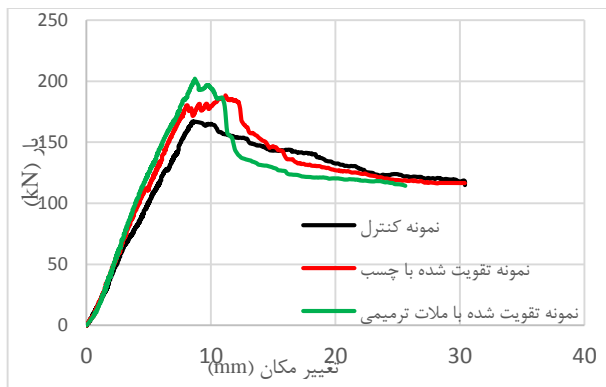
به منظور بررسی عملکرد ملات ترمیمی، سه تیر بتن مسلح به طول ۲۲۰۰ میلی‌متر، عرض ۲۰۰ میلی‌متر و عمق ۳۰۰ میلی‌متر ساخته شد. یک تیر به عنوان نمونه کنترل بدون تقویت مورد بررسی قرار گرفته و ۲ تیر دیگر تحت تقویت برشی قرار گرفتند. برای ساخت تیرها از بتن با مقاومت فشاری ۳۵ MPa استفاده شد و کاور پایینی تیر برابر با ۵ cm در نظر گرفته شد. سایر مشخصات بتن مورد استفاده در تیرها در جدول ۵ گزارش شده است. سایر مشخصات تیرها از جمله میزان و آرایش آرماتورهای طولی و عرضی در شکل ۷ نشان داده شده است.

جدول ۵- طرح اختلاط برای ساخت ۱ متر مکعب بتن

فوق روان‌کننده	ریزدانه	درشت‌دانه	آب	سیمان
(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)
۱/۵	۱۰۱۰	۸۶۰	۲۰۰	۴۲۰

در یکی از دو تیر تقویت شده از ورق‌های پلیمر مسلح الیاف کربنی (CFRP) و چسب اپوکسی برای تقویت استفاده شد و در تیر دیگر از ملات ترمیمی معرفی شده به همراه شبکه CFRP استفاده

و خمشی [۴۹، ۵۰] تیرهای بتنی به وسیله ورق‌های FRP و چسب اپوکسی، جدایش ورق‌های FRP مود اصلی شکست تیرهای تقویت شده بوده که این امر باعث می‌شود تا از حداکثر ظرفیت ورق‌های FRP استفاده نشود. همانطور که در شکل ۱۱-ب مشاهده می‌شود، استفاده از سیستم تقویتی با ملات باعث جلوگیری از جدایش لایه تقویتی شده که منجر به استفاده از حداکثر ظرفیت شبکه CFRP و پارگی آن شد که این امر باعث برتری این سیستم نسبت به سیستم تقویتی با چسب شده است.



شکل ۱۰- نمودار بار-تغییر مکان تیرها



(الف)



(ب)

شکل ۱۱- نحوه گسیختگی تیرها، الف- گسیختگی تیر تقویت شده با چسب ب- گسیختگی تیر تقویت شده با ملات

CFRP اجرا گردید. لازم به ذکر است که به منظور افزایش دقت آزمایش در دو سیستم تقویتی از تعداد یکسان الیاف CFRP استفاده شد تا سختی کششی هر دو سیستم یکسان بوده و تنها تفاوت دو سیستم در نوع روش چسباندن یعنی چسب و ملات باشد.



شکل ۸- شبکه الیاف CFRP



ب- تیر تقویت شده الف- اجرای لایه تقویتی

شکل ۹- تقویت تیر به وسیله ملات و شبکه CFRP

نمودار بار-تغییر مکان نمونه‌ها در شکل ۱۰ آورده شده است. نمونه کنترل در بار $166/42 \text{ kN}$ و تغییر مکان $8/6 \text{ mm}$ ، نمونه تقویت شده با ورق CFRP و چسب در بار $188/57 \text{ kN}$ و تغییر مکان $11/17 \text{ mm}$ و نمونه تقویت شده با شبکه CFRP و ملات ترمیمی در بار $202/48 \text{ kN}$ و تغییر مکان $8/7 \text{ mm}$ گسیخته شد. همانطور که مشاهده می‌شود ظرفیت باربری در نمونه‌های تقویت شده با چسب و ملات به ترتیب 14% و 23% افزایش یافته است که نشان از تأثیر گذاری سیستم تقویتی بر افزایش ظرفیت برشی نمونه‌ها دارد؛ اما نکته اصلی عملکرد بهتر ملات تقویتی در مقایسه با چسب می‌باشد. همانطور که در شکل ۱۱-الف مشاهده می‌شود، نمونه تقویت شده با چسب در اثر جدایش ورق‌های CFRP از سطح تیر گسیخته شد، در حالی که نمونه تقویت شده با ملات در اثر پاره شدن ورق‌های CFRP گسیخته شد. همانطور که در پژوهش‌های پیشین نیز گزارش شده است در هر دو نوع تقویت برشی [۴۶-۴۸]

- در اکثر مواردی که درصد جایگزینی ضایعات ۵٪ یا ۱۰٪ بوده است، ضایعات با واکنش‌های پوزالانی خود باعث عملکرد بهتر نمونه‌ها در برابر حمله اسید سولفوریک نسبت به نمونه شاهد شده‌اند.

استفاده از ضایعات پوزالانی باعث می‌شود که پوزالان‌ها با $Ca(OH)_2$ واکنش داده و تولید ژل C-S-H اضافه نمایند که این امر می‌تواند به افزایش مقاومت نمونه‌ها در برابر اسید کمک نماید. افزایش درصد جایگزینی از ۵٪ به ۱۵٪ منجر به افزایش چشمگیر کاهش مقاومت فشاری نمونه پس از قرار گرفتن در محیط اسیدی می‌شود.

- در سن ۷ روزه مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی یک نوع ضایعات در تمام درصد‌های جایگزینی پایین‌تر از نمونه شاهد می‌باشد. درحالی‌که در نمونه‌های حاوی ۵٪ و ۱۰٪ ضایعات که در آن‌ها نسبت استفاده شده از سرباره کوره آهن‌گدازی و غبار کوره آهن‌گدازی یکسان می‌باشد، مقاومت فشاری تقریباً مشابه با نمونه شاهد بوده که این نشان‌دهنده هم‌افزایی استفاده هم‌زمان از این دو ماده در ساخت ملات می‌باشد. در سن ۲۸ روزه نمونه‌های حاوی ۱۵٪ ضایعات با نسبت استفاده یکسان و نسبت ۱ به ۳ سرباره کوره آهن‌گدازی به غبار کوره آهن‌گدازی مقاومت فشاری مشابه با نمونه شاهد می‌باشد.

- مقاومت کششی نمونه‌های حاوی ۱۵٪ گل قرمز و نمونه حاوی ۱۰٪ ضایعات با استفاده یکسان از سرباره کوره آهن‌گدازی و غبار کوره آهن‌گدازی به ترتیب ۱۷٪ و ۵٪ بالاتر از نمونه شاهد می‌باشد. نمونه‌هایی که تنها حاوی گل قرمز به‌عنوان ماده جایگزین سیمان بوده‌اند، بهترین عملکرد را در آزمایش مقاومت کششی از خود نشان دادند.

- ظرفیت باربری در نمونه‌های تقویت شده با چسب و ملات به ترتیب ۱۴٪ و ۲۳٪ نسبت به نمونه فاقد تقویت افزایش یافته است که نشان از تأثیرگذاری سیستم تقویتی بر افزایش ظرفیت برشی نمونه‌ها دارد. نکته حائز اهمیت این است که در دو تیر تقویت شده، تنها پارامتر متغیر تفاوت استفاده از چسب و ملات ترمیمی برای تقویت بوده است. لذا این موضوع عملکرد بهتر ملات ترمیمی در مقایسه با چسب را نشان می‌دهد. همچنین مشاهده شد که نمونه تقویت شده با ملات در اثر پاره شدن ورق‌های CFRP گسیخته شد در حالی‌که نمونه تقویت شده با چسب در اثر جدایش

همچنین باید توجه شود که تقویت به وسیله ملات برتری‌های دیگری از جمله سازگاری با سطح بتنی تیر، مقاومت بهتر در برابر آتش‌سوزی و امکان عبور رطوبت از خود را نیز دارا می‌باشد. در نهایت می‌توان بیان نمود که استفاده از ملات‌های ساخته شده با ضایعات علاوه بر کاهش هزینه‌ها و آلودگی‌های زیست‌محیطی توانست عملکرد مناسبی در تقویت تیرهای بتنی از خود نشان دهد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش از ضایعات صنایع آهن و آلومینیوم شامل غبار کوره آهن‌گدازی، سرباره کوره آهن‌گدازی و گل قرمز برای جایگزینی بخشی از سیمان در ساخت ملات‌های ترمیمی استفاده شده است. در مجموع ۱۴ طرح اختلاط ساخته شد و مطالعات آزمایشگاهی شامل بررسی ریزساختار مواد تشکیل‌دهنده ملات‌ها، آزمایش مقاومت در برابر حمله اسید سولفوریک، جذب آب، مقاومت الکتریکی، مقاومت فشاری و مقاومت کششی بر روی آن‌ها انجام شد. همچنین به‌منظور بررسی عملکرد ملات‌های ساخته شده در ترمیم تیرهای بتنی در برش، یک تیر بتن مسلح به وسیله ملات ترمیمی و شبکه CFRP تقویت برشی شده و با یک تیر فاقد تقویت و یک تیر تقویت شده با ورق‌های CFRP و چسب مقایسه شد. نتایج آزمایش‌های انجام شده به شرح زیر می‌باشد.

- نمونه شاهد که فاقد هر گونه ضایعات بوده دارای بالاترین مقاومت الکتریکی در میان نمونه‌ها می‌باشد. افزودن ۵٪ مواد جایگزین به ترکیب ملات، تأثیر چندانی بر مقاومت الکتریکی ندارد. جایگزینی سیمان با ضایعات در درصد‌های جایگزینی بالای ۵٪ منجر به کاهش شدید مقاومت الکتریکی می‌گردد.

- کمترین میزان جذب آب، مربوط به نمونه‌های حاوی ۵٪ سرباره کوره آهن‌گدازی و غبار کوره آهن‌گدازی به صورت تکی و ترکیبی می‌باشد که باعث کاهش جذب آب ۷۲ ساعته تا ۲۰٪ در مقایسه با نمونه شاهد شده‌اند. همچنین تمام نمونه‌های حاوی ۵٪ و ۱۰٪ مواد جایگزین سیمان، میزان جذب آب کمتری از نمونه شاهد داشته که این امر را می‌توان به تأثیر ضایعات بر تغییر شبکه حفره‌های داخل ملات نسبت داد. در مقابل با افزایش مجموع درصد جایگزینی ضایعات به خصوص غبار کوره آهن‌گدازی به میزان ۱۵٪ با کاهش تراکم نمونه، منافذ بیشتری در ملات ایجاد شده و جذب آب افزایش می‌یابد.

Negheimish, Investigation of potential uses of electric-arc furnace dust (EAFD) in concrete, *Cement and Concrete Research*, 27(2) (1997) 267-278.

[11] I.W. Hamilton, N.M. Sammes, Encapsulation of steel foundry bag house dusts in cement mortar, *Cement and concrete research*, 29(1) (1999) 55-61.

[12] 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.

[13] D. Roy, Hydration, structure, and properties of blast furnace slag cements, mortars, and concrete, in: *Journal Proceedings*, 1982, pp. 444-457.

[14] R. Swamy, A. Bouikni, Some engineering properties of slag concrete as influenced by mix proportioning and curing, *Materials Journal*, 87(3) (1990) 210-220.

[15] C.L. Hwang, C.Y. Lin, Strength development of blended blast-furnace slag-cement mortars, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 9(3) (1986) 233-239.

[16] G. Osborne, Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete, *Cement and Concrete Composites*, 21(1) (1999) 11-21.

[17] H. Higashiyama, M. Sappakittipakorn, M. Mizukoshi, O. Takahashi, Efficiency of ground granulated blast-furnace slag replacement in ceramic waste aggregate mortar, *Cement and Concrete Composites*, 49 (2014) 43-49.

[18] M. Gräfe, G. Power, C. Klauber, Bauxite residue issues: III. Alkalinity and associated chemistry, *Hydrometallurgy*, 108(1-2) (2011) 60-79.

[19] M. Miyake, T. Akachi, M. Matsuda, Preparation, structure and photocatalytic properties of cancrinite encapsulating lead and sulfide ions, *Journal of Materials Chemistry*, 15(7) (2005) 791-797.

[20] 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.

[21] Y. Liu, Z. Qin, B. Chen, Experimental research on magnesium phosphate cements modified by red mud, *Construction and Building Materials*, 231 (2020) 117131.

[22] 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.

[23] A.M. Khorasani, M.R. Esfahani, J. Sabzi, The

ورق‌های CFRP از سطح تیر گسیخته شد که این امر باعث می‌شود تا از حداکثر ظرفیت ورق‌های FRP استفاده نشود. این موضوع نشان از برتری این سیستم نسبت به سیستم تقویتی با چسب دارد.

۵- مراجع

[1] M. Karim, M. Zain, M. Jamil, F. Lai, Fabrication of a non-cement binder using slag, palm oil fuel ash and rice husk ash with sodium hydroxide, *Construction and Building Materials*, 49 (2013) 894-902.

[2] M. Saedi, K. Behfarnia, H. Soltanian, The effect of the blaine fineness on the mechanical properties of the alkali-activated slag cement, *Journal of Building Engineering*, 26 (2019) 100897.

[3] B.J. Van Ruijven, D.P. Van Vuuren, W. Boskaljon, M.L. Neelis, D. Saygin, M.K. Patel, Long-term model-based projections of energy use and CO2 emissions from the global steel and cement industries, *Resources, Conservation and Recycling*, 112 (2016) 15-36.

[4] A.A. Shubbar, M. Sadique, H.K. Shanbara, K. Hashim, The development of a new low carbon binder for construction as an alternative to cement, in: *Advances in Sustainable Construction Materials and Geotechnical Engineering*, Springer, 2020, pp. 205-213.

[5] M. Younes, H. Abdel-Rahman, M.M. Khattab, Utilization of rice husk ash and waste glass in the production of ternary blended cement mortar composites, *Journal of Building Engineering*, 20 (2018) 42-50.

[6] A. Mehta, D.K. Ashish, Silica fume and waste glass in cement concrete production: A review, *Journal of Building Engineering*, 29 (2020) 100888.

[7] R. Rehan, M. Nehdi, Carbon dioxide emissions and climate change: policy implications for the cement industry, *Environmental Science & Policy*, 8(2) (2005) 105-114.

[8] A.A. Ramezani-pour, A. Kazemian, M. Sarvari, B. Ahmadi, Use of natural zeolite to produce self-consolidating concrete with low Portland cement content and high durability, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(5) (2013) 589-596.

[9] M. Maslehuddin, F. Awan, M. Shameem, M. Ibrahim, M. Ali, Effect of electric arc furnace dust on the properties of OPC and blended cement concretes, *Construction and Building Materials*, 25(1) (2011) 308-312.

[10] R.Z. Al-Zaid, F.H. Al-Sugair, A.I. Al-

- cement mortars (Using 2 in. or [50-mm] Cube Specimens), ASTM International, West Conshohocken, PA, (2016).
- [36] ASTM C307-18, Standard Test Method for Tensile Strength of Chemical-Resistant Mortar, Grouts, and Monolithic Surfacing, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2018).
- [37] ASTM C267, Standard test methods for chemical resistance of mortars, grouts and monolithic surfacings and polymer concretes, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2012).
- [38] ASTM C642-13, Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2013).
- [39] L. Zongjin, Advanced concrete technology, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, (2011).
- [40] A. Bagheri, H. Zanganeh, H. Alizadeh, M. Shakerinia, M.A.S. Marian, Comparing the performance of fine fly ash and silica fume in enhancing the properties of concretes containing fly ash, *Construction and building materials*, 47 (2013) 1402-1408.
- [41] M. Ghalehnovi, N. Roshan, E. Hakak, E.A. Shamsabadi, J. De Brito, Effect of red mud (bauxite residue) as cement replacement on the properties of self-compacting concrete incorporating various fillers, *Journal of Cleaner Production*, 240 (2019) 118213.
- [42] 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.
- [43] E. Ganjian, H.S. Pouya, Effect of magnesium and sulfate ions on durability of silica fume blended mixes exposed to the seawater tidal zone, *Cement and concrete research*, 35(7) (2005) 1332-1343.
- [44] H. Biricik, F. Aköz, F. Türker, I. Berktaş, Resistance to magnesium sulfate and sodium sulfate attack of mortars containing wheat straw ash, *Cement and Concrete Research*, 30(8) (2000) 1189-1197.
- [45] 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.
- [46] S. Cholostiakow, M. Di Benedetti, K. Pilakoutas, M. Guadagnini, Effect of beam depth on shear behavior of FRP RC beams, *Journal of Composites for Construction*, 23(1) (2019) effect of transverse and flexural reinforcement on deflection and cracking of GFRP bar reinforced concrete beams, *Composites Part B: Engineering*, (2019) 530-546.
- [24] B. Farahi, M. 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.
- [25] J. Sabzi, M. 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.
- [26] G.F. Huseien, K.W. Shah, Performance evaluation of alkali-activated mortars containing industrial wastes as surface repair materials, *Journal of Building Engineering*, 30 (2020) 101234.
- [27] D. Lal, A. Chatterjee, A. Dwivedi, Investigation of properties of cement mortar incorporating pond ash—an environmental sustainable material, *Construction and Building Materials*, 209 (2019) 20-31.
- [28] E. Aprianti, P. Shafigh, R. Zawawi, Z.F.A. Hassan, Introducing an effective curing method for mortar containing high volume cementitious materials, *Construction and Building Materials*, 107 (2016) 365-377.
- [29] A.A. Ramezani-pour, M.A. Moeini, Mechanical and durability properties of alkali activated slag coating mortars containing nanosilica and silica fume, *Construction and Building Materials*, 163 (2018) 611-621.
- [30] 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.
- [31] N. Amudhavalli, J. Mathew, Effect of silica fume on strength and durability parameters of concrete, *International journal of engineering sciences & emerging technologies*, 3(1) (2012) 28-35.
- [32] M.I. Khan, R. Siddique, Utilization of silica fume in concrete: Review of durability properties, *Resources, Conservation and Recycling*, 57 (2011) 30-35.
- [33] A. Ramezani, M.R. Esfahani, Evaluation of hybrid fiber reinforced concrete exposed to severe environmental conditions, *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 51(1) (2018) 119-130.
- [34] A. Ramezani, M.R. Esfahani, Effect of fiber hybridization on energy absorption and synergy in concrete, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 13(6) (2019) 1338-1349.
- [35] ASTM C109 / C109M-16a, Standard test method for compressive strength of hydraulic

04018075.

[47] W. Li, Z. Huang, Z. Huang, X. Yang, T. Shi, F. Xing, Shear behavior of RC beams with corroded stirrups strengthened using FRP laminates: Effect of the shear span-to-depth ratio, *Journal of Composites for Construction*, 24(4) (2020) 04020033.

[48] W. Li, C.K. Leung, Effect of shear span-depth ratio on mechanical performance of RC beams strengthened in shear with U-wrapping FRP strips, *Composite Structures*, 177 (2017) 141-157.

[49] J. Sabzi, M.R. Esfahani, T. Ozbakkaloglu, B. Farahi, Effect of concrete strength and longitudinal reinforcement arrangement on the performance of reinforced concrete beams strengthened using EBR and EBROG methods, *Engineering Structures*, 205 (2020) 110072.

[50] J. Sabzi, M.R. 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.

Investigation of mechanical properties, durability properties, and functionality of cement-based repair mortars containing steel and alumina industrial wastes

Ahmadreza Ramezani

PhD student, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Mohammad Reza Esfahani *

Professor, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Abstract

In the present study, steel and alumina industrial wastes (ground granulated blast-furnace, electric arc furnace dust, and red mud) were used as a partial replacement for cement to form cement-based repair mortars. By substituting 5%, 10%, and 15% of cement with these materials a total of 14 mixtures were formed and an experimental program comprising three distinct parts was carried out. In the first part of the experimental program, the microstructure and chemical composition of all the constituent materials were examined. In the second part, resistance to acid sulfuric, water absorption, and electrical resistivity tests were conducted to evaluate the durability performance of the mortars, and compressive strength and tensile strength tests were performed to assess the mechanical properties of the mortars. In the last part of the experimental program, one reinforced concrete beam was strengthened in shear using repair mortar and carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheets and it was compared with a reinforced concrete beam without strengthening and a beam strengthened in shear using epoxy and CFRP sheets. The beams were tested by implementing a concentrated load and their shear capacity was compared to evaluate the performance of repair mortar. The results indicate that strengthening using repair mortar resulted in 23% increase in the shear capacity compared to the control specimen, while the shear capacity of the specimen strengthened with epoxy increased by 14% compared to the control specimen.

Keywords: Repair mortar, steel and alumina industrial wastes, shear strengthening, Carbon fiber reinforced polymer (CFRP).

* Corresponding Author: esfahani@um.ac.ir

