

تأثیر حرارت بالا بر رفتار صفحات بتن سنگین ژئوپلیمری حاوی سنگ‌دانه‌های کوره قوس الکتریکی (EAF) و مسلح به الیاف ترکیبی آرامید و فولادی تحت بار ضربه ای

ناصر حمیدزاده *

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

رحمت مدن دوست

استاد گروه مهندسی عمران، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

ملک محمد رنجبر تکلیمی

استاد گروه مهندسی عمران، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

چکیده

سازه‌های بتنی مسلح در محیط‌های دریایی به‌ویژه در سواحل خلیج فارس، در معرض تخریب تدریجی ناشی از نفوذ یون کلرید و کربناتاسیون قرار دارند. شرایط اقلیمی گرم و مرطوب، تبخیر بالا، پاشش مستقیم آب دریا و آلودگی‌های صنعتی، محیطی به‌شدت خورنده را برای این سازه‌ها فراهم کرده است. پژوهش حاضر باهدف بررسی میدانی و ریزساختاری آسیب‌پذیری اسکله‌های بتنی، به مطالعه موردی اسکله‌های بندرعباس می‌پردازد. به‌منظور تحلیل دقیق مکانیسم‌های تخریب، آزمایش‌هایی نظیر تعیین پروفیل نفوذ یون کلرید، بررسی میکروسکوپی با استفاده از تصاویر SEM، تحلیل عنصری با طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDX) و اندازه‌گیری مقاومت فشاری بتن بر روی نمونه‌های برداشت‌شده و آزمایشگاهی انجام شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده نفوذ یون کلرید به درون بتن، عامل اصلی تخریب زود هنگام سازه‌های دریایی در محیط دریایی خلیج فارس است. این یون‌ها با ایجاد ترکیبات ناپایدار نظیر نمک فریدل و تضعیف ژل/نانو ساختار C-S-H، به‌طور مستقیم موجب افزایش تخلخل، کاهش انسجام ریزساختار، و افت مقاومت مکانیکی بتن می‌شوند. تصاویر میکروسکوپی (SEM) و تحلیل‌های عنصری (EDX) حاکی از تمرکز بالای یون کلرید، ترک‌های ریز و آسیب به ناحیه انتقالی سطحی بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها است. مشاهده پروفیل‌های نفوذ کلرید، بیانگر عبور غلظت یون‌ها از حد بحرانی خوردگی در عمق‌هایی بیش از ۱۰۰ میلی‌متر است که نشان‌دهنده ضعف در طرح اختلاط، تراکم و عمل‌آوری بتن است. همچنین نتایج نشان داد که وجود پوشش‌های طبیعی نظیر صدف دریایی و افزایش ضخامت لایه پوششی بتن، در کاهش میزان نفوذ کلرید مؤثر بوده و نقش حفاظتی چشمگیری ایفا می‌کند.

واژه‌های کلیدی: بتن ژئوپلیمری، سنگ‌دانه‌های کوره قوس الکتریکی (EAF)، الیاف ترکیبی (آرامید-فولادی)، مقاومت در برابر حرارت بالا، بار ضربه ای.

* نویسنده مسئول: hamidzadeh@guilan.ac.ir

۱- مقدمه

پیوند قوی بین خمیر و سنگ دانه ها و رفتار حرارتی بهتر سنگ دانه EAF در مقایسه با مصالح باریت نسبت داده می شود. Pomaro و همکاران [۱۱] نشان دادند که بر اساس نتایج تجربی و عددی، بتن EAF دارای خواص محافظتی قابل مقایسه با بتن حاوی سنگ دانه های باریت است و به میزان یکسان موجب کاهش ضخامت سپر تابشی می شود. علاوه بر این گزارش دادند که در مقایسه با بتن معمولی، بتن EAF دارای خاصیت مکانیکی برتر می باشد. González-Ortega و همکاران [۱۲] نشان دادند که خصوصیات مکانیکی بتن با EAF مشابه یا بالاتر از بتن معمولی است و در همه موارد به طور قابل توجهی بالاتر از بتن حاوی باریت است. رجاس و همکاران (۲۰۲۳) [۱۳] به بررسی اثر استفاده از سنگ دانه های EAFS با جایگزینی های ۵۰٪ و ۱۰۰٪ برای سنگ دانه های درشت بتن با ارزیابی خواص فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی پرداختند. بر اساس نتایج پژوهش آن ها اسلامپ و کارایی بتن با EAFS به دلیل شکل و بافت سنگ دانه کاهش یافته است. همچنین مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته بتن با EAFS به ترتیب تا ۳۰٫۹٪، ۳۵٫۷٪ و ۲۵٫۰٪ نسبت به نمونه کنترل بهبود یافته است. بررسی مطالعات آزمایشگاهی نشان می - دهد بتن ساخته شده با سرباره EAF به عنوان سنگ دانه، خواص فیزیکی و مکانیکی خوبی از خود نشان می دهد و مطالعه بیشتر در مورد دوام آن، اطمینان بیشتری را در استفاده از آن تضمین می کند [۱۴].

استفاده از سنگ دانه های سنگین در ساخت بتن ژئوپلیمری می تواند باعث دستیابی به مشخصات مطلوب بتن سنگین در کنار مزایای مصالح ژئوپلیمری شود. قاسم زاده موسوی نژاد و فلاحکار (۲۰۲۱) [۱۵] در پژوهش آزمایشگاهی خود اثرات نسبت محلول قلیایی به مواد پودری با مقادیر ۰٫۶۵، ۰٫۷۵ و ۰٫۸۵ و نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم با مقادیر ۰٫۲۵، ۰٫۵ و ۰٫۷۵ را بر خواص بتن ژئوپلیمری سنگین مورد بررسی قرار داده اند. نتایج نشان داده است که نسبت محلول قلیایی به مواد پودری در مقایسه با نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم تأثیر بیشتری بر خواص شکست بتن ژئوپلیمری سنگین دارد، همچنین نتایج نشان داده است که با افزایش نسبت محلول قلیایی به مواد پودری از ۰٫۶۵ به ۰٫۸۵، انرژی شکست و همچنین چقرمگی شکست کاهش می - یابد. در ادامه و در پژوهشی دیگر قاسم زاده موسوی نژاد و

سیمان پرتلند معمولی به عنوان اصلی ترین و پرمصرف ترین ماده در صنعت ساختمان در سراسر جهان شناخته می شود. در فرایند تولید سیمان، مقادیر قابل توجهی از منابع طبیعی و سوخت های فسیلی مصرف شده و همچنین حجم عظیمی از گازهای گلخانه ای وارد جو می شود [۱ و ۲]. بتن ژئوپلیمری در دهه ۷۰ میلادی به عنوان یک جایگزین مناسب برای بتن ساخته شده از سیمان پرتلند معرفی شد [۳]. بتن ژئوپلیمری از دو بخش اصلی ماده پایه و ماده فعال ساز تشکیل شده است. ماده پایه در حقیقت ترکیبات آلومینوسیلیکاتی است و به همین جهت از آنجایی که پوزولانهای طبیعی و مصنوعی منابع غنی از این گونه ترکیبات هستند، می توانند به عنوان ماده پایه استفاده شوند. ساختار ژئوپلیمر یک شبکه آلومینوسیلیکات سه بعدی است که طی واکنش مواد غنی از اکسید آلومینیوم و اکسید سیلیس با محلول های قلیایی تولید می شود [۴ و ۵].

استفاده از بتن سنگین وزن به دلیل ویژگی های منحصر به فرد خود، در مواردی که نیاز به چگالی بالا باشد، کاربرد دارد. بتن سنگین وزن (HWC) دارای چگالی بیش از ۲۶۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب می باشند که در تولید آن از سنگ دانه های با چگالی بالا مانند مگنتیت، باریت، ژئوتیت، همتیت، سربانتین، کلمنیت، سیدریت، لیمونیت، ایلمنیت، سرباره کوره قوس الکتریکی، گلوله ها و ضایعات فولادی استفاده می شود [۶]. استفاده از سرباره کوره قوس الکتریکی (EAF) به عنوان سنگ دانه منجر به تولید بتن محافظ تشعشع با خصوصیات فنی و اقتصادی مناسب و سازگار با محیط زیست می گردد. Papachristoforou و Papayianni [۷] به این نتیجه رسیدند که در مقایسه با بتن معمولی حاوی سنگ دانه های سنگ آهک، استفاده از سنگ دانه های سرباره EAF منجر به تولید بتن با چگالی، خواص مکانیکی و حفاظت اشعه بالاتر می شود. Lardhi و Mukhtar [۸] گزارش دادند که استفاده از درشت دانه EAF موجب افزایش ۱۳٪ تا ۱۹٪ در عملکرد حفاظت تابشی بتن می شود. Hassan و همکاران [۹] به این نتیجه رسیدند که جایگزینی کل ریزدانه و درشت دانه با سنگ دانه های EAF منجر به افزایش ۴۰٪ در مقاومت فشاری ۲۸ روزه و افزایش ۲۲٪ در ضریب جذب خطی بتن می شود. Beaucour و همکاران [۱۰] به این نتیجه رسیدند که بتن EAF در افزایش درجه حرارت کاهش مقاومت کمتری را نشان می دهد. این رفتار بهبود یافته به

پژوهش حاضر با تمرکز بر تأثیر حرارت بالا بر رفتار صفحات بتن سنگین ژئوپلیمری حاوی سنگ‌دانه‌های کوره قوس الکتریکی (EAF) و مسلح به الیاف ترکیبی آرامید و فولادی تحت بار ضربه‌ای، به دنبال درک بهتر از عملکرد این مصالح در شرایط سخت و بحرانی است. این مطالعه نه تنها به افزایش دانش پایه در مورد بتن‌های ژئوپلیمری و رفتار آنها تحت تنش‌های حرارتی و ضربه‌ای کمک می‌کند، بلکه می‌تواند به طراحی و ساخت سازه‌های مقاوم‌تر و پایدارتر در صنایع مختلف منجر شود. نتایج این پژوهش می‌تواند به توسعه استانداردها و دستورالعمل‌های جدید برای استفاده از بتن‌های ژئوپلیمری در محیط‌های با دمای بالا و تحت بارهای دینامیکی کمک کند و گامی مهم در جهت افزایش ایمنی و دوام سازه‌ها در شرایط بحرانی باشد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی

در ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی از سنگ‌دانه (ترکیب ریزدانه و درشتدانه) کوره قوس الکتریکی (EAF) با حداکثر اندازه ۱۰ میلیمتر و چگالی ۳۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب استفاده شده است. همچنین با هدف بهبود دانه‌بندی از پودر سنگ به‌عنوانفیلر (پرکننده) استفاده شده است. پودر سنگ به‌عنوانیک ماده پرکننده فضای خالی بین سنگ‌دانه‌های را پر می‌کند و باعث بهبود کارایی و روانی بتن می‌شود. پودر سنگ با کاهش جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن بتن، به بهبود پایداری حجمی بتن کمک می‌کند، همچنین با توجه به کاربرد گسترده بتن سنگین در کاربردهای حفاظت پرتویی، استفاده از پودر سنگ به دلیل کاهش انقباض و ترک‌های ناشی از خشک شدن، می‌تواند باعث بهبود عملکرد بتن سنگین شود.

در این پژوهش برای ساخت بتن ژئوپلیمری از سرباره کوره بلند آهن‌گدازی (GGBFS) به‌عنوانماده پایه استفاده شده است. سرباره کوره بلند آهن‌گدازی، محصول جانبی فرایند تولید آهن است که در واقع ناخالصی‌های مذاب جدا شده از آهن مذاب در کوره‌های بلند هستند. این ماده که ترکیبی از سیلیکات‌ها و اکسیدهای فلزی است، پس از سرد شدن به جامد تبدیل می‌شود. سرباره کوره بلند آهن‌گدازی از کارخانه سیمان سپاهان اصفهان تهیه شده است. میکروسیلیس، پودری بسیار ریز و خاکستری رنگ

همکاران (۲۰۲۱) [۱۶] سایر اثرات غلظت محلول NaOH (یعنی ۲، ۴، و ۶ مولار) و سنین مختلف عمل‌آوری (۳، ۷، و ۲۸ روز) بر خواص شکست و رفتار شکل‌پذیری بتن ژئوپلیمر سنگین وزن مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان داده است که حداکثر انرژی شکست و بالاترین شکنندگی برای نمونه‌هایی با غلظت ۴ مولار NaOH به دست آمده است. پاپاچیسستوفرو و همکاران (۲۰۲۰) [۱۷] در مطالعه خود به بررسی عملکرد بتن حاوی سرباره فولادی کوره قوس الکتریکی (EAF) به‌عنوانسنگ‌دانه درشت و تقویت شده با الیاف فولادی پرداخته‌اند. نتایج نشان داده است که خواص مکانیکی بتن با سنگ‌دانه‌های EAF در مقایسه با بتن مرجع به طور قابل توجهی بالاتر است، این افزایش همچنین در مورد چقرمگی و مقاومت در برابر ضربه بتن مسلح با الیاف فولادی نشان داده شده است. در پژوهش آزمایشگاهی Gabr و همکاران [۱۸]

در سال ۲۰۲۱ تأثیر الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن بر رفتار بتن ژئوپلیمری با تمرکز بر خواص مکانیکی و مقاومت ضربه‌ای بررسی شده است. نتایج نشان داده است که اگرچه ترکیب هیبریدی الیاف (۱٪ فولادی + ۰٫۲٪ پلی‌پروپیلن) مقاومت مکانیکی کمتری نسبت به نمونه‌های حاوی ۱٫۲٪ الیاف فولادی نتیجه داده است، اما تأثیر بیشتری بر بهبود مقاومت ضربه‌ای دارد. پژوهش آزمایشگاهی Aisheh و همکاران (۲۰۲۲) [۱۹] به بررسی بتن ژئوپلیمری با عملکرد بالا حاوی میکروسیلیس و سرباره کوره بلند (GBFS) تقویت شده با الیاف پلی‌پروپیلن و فولادی پرداخته است. نتایج نشان داده است که حضور همزمان الیاف پلی‌پروپیلن و الیاف فولادی موجب بهبود خواص مکانیکی می‌شود، در حالی که جایگزینی الیاف پلی‌پروپیلن با الیاف فولادی اگرچه باعث کاهش مقاومت مکانیکی می‌شود، اما دوام بتن را افزایش می‌دهد. در پژوهش آزمایشگاهی دیگر Ma و همکاران (۲۰۲۵) [۲۰] به بررسی بتن ژئوپلیمری با سنگ‌دانه بازیافتی تقویت شده با الیاف ترکیبی فولادی-پلی‌پروپیلن پرداخته‌اند. نتایج نشان داده است که افزودن الیاف فولادی به‌ویژه با درصد حجمی و نسبت ابعادی بالاتر، موجب بهبود مقاومت مکانیکی، شکل‌پذیری و چقرمگی خمشی می‌شود. همچنین براساس نتایج پژوهش آن‌ها اگرچه اثر سینرژیستی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن در بهبود خواص مکانیکی مشهود است، اما طبیعت آبدوست الیاف فولادی و آبرگریز الیاف پلی‌پروپیلن تا حدی باعث تضعیف پیوند الیاف-ماتریس می‌شود.

مشخصات مکانیکی و فیزیکی الیاف‌های فولادی و آرامید ارائه شده است. درصد حجمی الیاف فولادی در مخلوط‌های آزمایشگاهی در این پژوهش بین ۰/۲۵ تا ۱ درصد متغیر است، همچنین الیاف آرامید با درصدهای حجمی ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد استفاده شده است.

جدول ۲- مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف آرامید

مشخصات	مقدار	واحد
چگالی	۱/۴۵	گرم بر سانتی متر مکعب
مقاومت کششی	۳۴۰۰	مگاپاسکال
مدول یانگ	۸۰	گیگاپاسکال
ازدیاد طول تا شکست	۲/۵ - ۳/۵	%
مقاومت در برابر حرارت	۴۵۰	درجه سانتی گراد
جذب رطوبت	۷-۴	%

جدول ۳- مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف فولادی

مشخصات	مقدار	واحد
چگالی	۷/۸	گرم بر سانتی متر مکعب
مقاومت کششی	۱۲۰۰	مگاپاسکال
مدول یانگ	۲۰۰	گیگاپاسکال
ازدیاد طول تا شکست	۱-۱۰	%
مقاومت در برابر حرارت	۸۰۰-۶۰۰	درجه سانتی گراد

جدول ۴- دانه بندی سنگ دانه کوره قوس الکتریکی (EAF)

اندازه (mm)	درصد عبوری تجمعی
۱۰	۱۰۰
۴/۷۵	۶۲
۲/۳۶	۴۳
۱/۱۸	۳۱
۰/۶	۲۹
۰/۳	۱۵
۰/۱۵	۵

۲-۲- طرح‌های مخلوط

برای دستیابی به اهداف مورد نظر در این پژوهش ۸ طرح اختلاط ساخته شده است که با حروف H1 تا H8 نام گذاری شده است. در ساخت تمامی نمونه‌های آزمایشگاهی ساخته شده از بتن

است که به عنوان محصول جانبی تولید سیلیسیم یا آلیاژهای آن در کوره‌های قوس الکتریکی به دست می‌آید.

در این پژوهش ۲۰ درصد از وزن سرباره کوره بلند آهن گدازی با میکروسیلیس با هدف بهبود کارایی و افزایش زمان گیرش بتن تازه و همچنین کاهش انقباض در بتن‌های ژئوپلیمری بر پایه سرباره جایگزین شده است [۲۱ و ۲۲]. میکروسیلیس مصرفی تولید کارخانه فروسیلیس ایران است که دارای وزن مخصوص 3 Kg/m^3 می‌باشد. این افزودنی بدون حل کردن در آب به حالت خشک و به صورت درصدی از وزن سرباره به مخلوط بتن اضافه شده است. در جدول ۱ مشخصات شیمیایی سرباره کوره بلند آهن گدازی و میکروسیلیس ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات شیمیایی سرباره کوره بلند آهن گدازی و

میکروسیلیس (درصد وزنی)

مشخصات شیمیایی و فیزیکی	سرباره	میکروسیلیس
SiO ₂	۳۷/۲	۸۵
Al ₂ O ₃	۱۱/۵	۱
Fe ₂ O ₃	۱	۱/۵
MgO	۸/۲	۱/۵
CaO	۳۶/۷	۰/۱ - ۰/۵
SO ₃	۰/۹۸	۰
K ₂ O	۰/۷	-
وزن مخصوص (kg/m^3)	۱۴۵۰	۲۲۰۰

برای فعال سازی قلیایی مواد پایه در این پژوهش ترکیبی از محلول هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم مایع با نسبت وزنی ۱ به ۱ در به عنوان محلول فعال کننده قلیایی در نظر گرفته شده است. سیلیکات سدیم مایع با نسبت مدول تقریبی ۲/۰۷ از شرکت سیلیکات ایران تهیه شده است. غلظت محلول هیدروکسید سدیم برابر ۱۲ مول در لیتر برای تمامی نمونه‌های آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است. آب مصرفی در این پژوهش از آب شرب شهر رشت تهیه شده است.

در ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی از دو نوع الیاف فولادی و آرامید استفاده شده است. الیاف فولادی از نوع دو سرفلابدار و با طول ۳۵ میلیمتر و الیاف آرامید از نوع چاپت به طول ۶ میلیمتر از شرکت پیشرو مبتکر پیوند تهیه شده است. در جداول ۲ و ۳

اختلاط از سه نمونه مکعبی با ابعاد ۱۰ سانتی متر استفاده شده است و مقاومت فشاری بر اساس استاندارد BS 1881-116 تعیین شده است [۲۷].

آزمایش دیگری که در این پژوهش انجام شده است آزمایش سقوط وزنه^۱ است. در این آزمایش از صفحات بتنی با ابعاد ۴۰۰ × ۴۰۰ × ۴۰ میلی‌متر استفاده شده است که نمونه تا سن ۲۸ روز عمل آوری شده‌اند. برای انجام این آزمایش از یک دستگاه ضربه وزنه با قابلیت تنظیم وزن و ارتفاع سقوط وزنه، استفاده شده است. این دستگاه دارای یک پایه سنگین است تا از نوسان و کج شدن دستگاه در هنگام آزمایش جلوگیری کند و به‌عنوان یک میراکننده برای کاهش شدت امواج بازتابی در طول آزمایش عمل کند. چهار لبه نمونه‌های صفحه‌ای روی اعضای فولادی قرار داده شده‌اند که به طور محکم به پایه متصل شده بودند. صفحات بتنی به ساختارهای نگهدارنده متصل هستند، تا بلند شدن و لغزش جانبی نمونه محدود شود. برای انجام آزمایش وزنه افتان از وزنه ۲۰ کیلوگرمی استفاده شده است، همچنین ارتفاع سقوط وزنه برای تمامی نمونه‌ها یکسان و برابر ۱۰۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۱- دستگاه آزمایش سقوط وزنه

با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش سقوط وزنه، نمودار شتاب-زمان، نمودار نیرو-تغییر مکان وسط صفحه بتنی و همچنین نمودار نیرو-زمان، رسم شده است. وزن وزنه افتان و شرایط تکیه‌گاهی برای صفحات ساخته شده از نوع بتن سنگین ژئوپلیمری و حاوی الیاف، در همه آزمایش‌ها ثابت است. جزئیات طرح اختلاط نمونه‌های آزمایشگاهی در جدول ۵ و نامگذاری و مشخصات مربوط به هر طرح اختلاط در جدول ۶ ارائه شده است.

ژئوپلیمری سنگین، از سرباره کوره قوس الکتریکی (EAF) به‌عنوان سنگ‌دانه‌های با چگالی بالا استفاده شده است. همچنین از ترکیب سرباره کوره بلند آهن‌گذاری و میکروسیلیس به‌عنوان ماده پایه در ساخت بتن ژئوپلیمری استفاده شده است که به جز طرح اختلاط H8 در سایر مخلوط‌ها ۲۰ درصد وزن سرباره با میکروسیلیس جایگزین شده است. همچنین در ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی از دو نوع الیاف فولادی و آرامید به صورت تک و ترکیب استفاده شده است. در طرح اختلاط H3 از ترکیب ۰/۲۵ درصد الیاف فولادی و ۰/۲۵ درصد الیاف آرامید استفاده شده است و طرح‌های اختلاط H1 و H8 فاقد الیاف هستند، همچنین در طرح اختلاط H2 از ۰/۵ درصد الیاف آرامید استفاده شده است. همچنین در طرح‌ها اختلاط H4 تا H7، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد الیاف فولادی استفاده شده است.

۲-۳- نحوه مخلوط کردن و آزمایش‌ها

برای ساخت طرح‌های اختلاط نمونه‌های آزمایشگاهی ابتدا مواد خشک شامل سنگ‌دانه‌ها، سرباره کوره بلند آهن‌گذاری و میکروسیلیس به مدت سه دقیقه مخلوط می‌شوند. همچنین محلول فعال‌کننده قلیایی که ۲۴ ساعت قبل تهیه می‌شود به آرامی به مواد خشک اضافه گردیده و فرایند اختلاط تا دست‌یابی به یک مخلوط همگن ادامه می‌یابد. الیاف به مخلوط بتن تازه اضافه می‌شود و عمل اختلاط تا حصول اطمینان از توزیع یکنواخت الیاف در بتن ادامه می‌یابد. مخلوط تازه بتن ژئوپلیمری در سه لایه در قالب ریخته می‌شود و با استفاده از میز ارتعاش متراکم می‌گردد. پس از ۲۴ ساعت قالب برداری انجام شده و نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز در دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد) تحت عمل آوری قرار گرفته‌اند. نمونه‌ها پس از رسیدن به سن ۲۸ روز با استفاده از کوره الکتریکی تحت اثر حرارت با دماهای ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت با هدف بررسی اثر حرارت بر مشخصات مکانیکی و دینامیکی بتن سنگین ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره بلند آهن‌گذاری و حاوی سنگ‌دانه‌های EAF و مسلح به الیاف قرار گرفته‌اند. مقاومت فشاری بتن‌های مورد مطالعه در این پژوهش، در سن ۲۸ روز اندازه‌گیری شده است. برای هر طرح

¹ Drop-Weight

جدول ۵- طرح مخلوط بتن ها

شماره	کل سنگدانه (کیلوگرم)	پودر سنگ (کیلوگرم)	سرباره (کیلوگرم)	میکروسیلیس (کیلوگرم)	محلول فعال کننده (کیلوگرم)	آب شیشه (کیلوگرم)	محلول سدیم هیدروکسید (کیلوگرم)	الیاف آرامید (کیلوگرم)	الیاف فولادی (کیلوگرم)
H1	2229.3	247.7	320	80	280	140	140	0	0
H2	2229.3	247.7	320	80	280	140	140	7.25	0
H3	2229.3	247.7	320	80	280	140	140	3.625	19.625
H4	2229.3	247.7	320	80	280	140	140	0	39.25
H5	2229.3	247.7	320	80	280	140	140	0	19.625
H6	2229.3	247.7	320	80	280	140	140	0	58.875
H7	2229.3	247.7	320	80	280	140	140	0	78.5
H8	2229.3	247.7	400	0	280	140	140	0	0

جدول ۶- نامگذاری طرح های اختلاط

شماره	نام طرح اختلاط	مشخصات
H1	GMCS0A0	فاقد الیاف، حاوی ۲۰٪ میکروسیلیس (جایگزین سرباره)
H2	GMCS0A0.50	حاوی ۰/۵ درصد الیاف آرامید، حاوی ۲۰٪ میکروسیلیس (جایگزین سرباره)
H3	GMCS0.25A0.25	حاوی ترکیب ۰/۲۵ درصد آرامید و ۰/۲۵ درصد الیاف فولادی، حاوی ۲۰٪ میکروسیلیس
H4	GMCS0.50A0	حاوی ۰/۵ الیاف فولادی، حاوی ۲۰٪ میکروسیلیس
H5	GMCS0.25A0	حاوی ۰/۲۵ الیاف فولادی، حاوی ۲۰٪ میکروسیلیس
H6	GMCS0.75A0	حاوی ۰/۷۵ الیاف فولادی، حاوی ۲۰٪ میکروسیلیس
H7	GMCS1A0	حاوی ۱ الیاف فولادی، حاوی ۲۰٪ میکروسیلیس
H8	GCS0A0	فاقد الیاف و فاقد میکروسیلیس

۳- نتایج آزمایشگاهی و شرح آنها

۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری

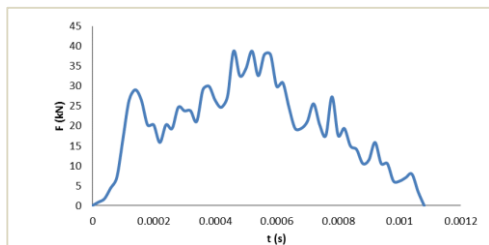
نسبت به نمونه شاهد فاقد الیاف، حدود ۱۵/۲ درصد بهبود عملکرد داشته است. نتایج آزمایش ها نشان داد که در هر دو دمای ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی گراد، نمونه های حاوی ۰/۵ درصد الیاف فولادی بالاترین مقاومت فشاری را از خود نشان دادند.

بر اساس نتایج طرح اختلاط GMCS0A0 (فاقد الیاف فولادی و آرامید) تحت اثر حرارت با دماهای ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی گراد به ترتیب ۳۸ و ۷۰ درصد افت مقاومت فشاری نتیجه داده است. استفاده از الیاف فولادی در مخلوط بتن ژئوپلیمری سنگین ضمن افزایش مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری سنگین در دماهای ۲۵ و ۶۰۰ درجه سانتی گراد، باعث کاهش افت مقاومت فشاری تحت اثر دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد می شود به طوری که طرح اختلاط GMCS0.25A0 حاوی ۰/۲۵ درصد الیاف فولادی، تحت اثر حرارت ۶۰۰ درجه سانتی گراد، ۶۷/۲ درصد افت مقاومت فشاری نتیجه داده است که این مقدار با افزایش درصد حجمی الیاف به

در این تحقیق، مقاومت فشاری نمونه های مکعبی ۱۰۰ میلی متری پس از ۲۸ روز عمل آوری مطابق استاندارد BS 1881-116 اندازه گیری شد. نتایج آزمایش که در نمودار شکل ۲ ارائه شده است، مقاومت فشاری بتن سنگین ژئوپلیمری پایه سرباره حاوی سنگدانه های EAF و تقویت شده با الیاف فولادی و آرامید را تحت تأثیر حرارت بالا بررسی می کند. بر اساس یافته ها، طرح اختلاط GMCS0A0 (بدون الیاف و میکروسیلیس) در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد کمترین مقدار مقاومت فشاری را نشان داد. نتایج ارائه شده در شکل ۲ نشان می دهد که افزودن الیاف موجب افزایش قابل توجه مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری سنگین شده است. در این میان، طرح اختلاط GMCS0.50A0 حاوی ۰/۵ درصد الیاف فولادی، بالاترین مقاومت فشاری را نشان داده که

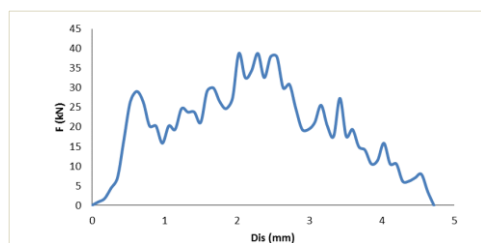
۲-۳- نتایج آزمایش ضربه (سقوط وزنه)

به منظور ارزیابی مقاومت ضربه‌ای بتن سنگین ژئوپلیمری تقویت شده با الیاف، از روش آزمایش سقوط وزنه استفاده گردید. در این راستا نمونه‌های بتنی به ابعاد 40×40 سانتیمتر با ضخامت ۴ سانتیمتر مورد آزمایش قرار گرفتند. شرایط آزمایشگاهی شامل استفاده از وزنه‌ای به جرم ۲۰ کیلوگرم بود که از ارتفاع ثابت ۱۰۰ سانتیمتری بر روی سطح نمونه‌ها رها می‌شد. این روش استاندارد برای کلیه نمونه‌ها به صورت یکسان اجرا شد تا نتایج قابل مقایسه‌ای به دست آید. با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش سقوط وزنه، نمودار شتاب-زمان، نمودار نیرو-تغییر مکان وسط پلنت و همچنین نمودار نیرو-زمان، رسم شده است. سپس با استفاده از اطلاعات مربوط به هر یک از این نمودارها سایر شاخصهای مربوط به آزمایش ضربه از جمله تکانه فشاری (Pc)، تکانه بازگشت^۲ (Pr)، تکانه کل^۳ (Pf)، نیروی ضربه مؤثر^۴ و انرژی ضربه^۵ برای نمونه‌های آزمایشگاهی در دو حالت پیش از قرارگیری تحت اثر حرارت و پس از قرارگیری در معرض حرارت با دماهای ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، محاسبه شده است. نمونه‌ای از اختلاط H4 که حاوی ۰/۵ درصد الیاف فولادی در مخلوط بتن سنگین ژئوپلیمری است در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ ارائه شده است.



شکل ۴- منحنی نیرو-زمان طرح اختلاط H4 (حاوی ۰/۵ درصد

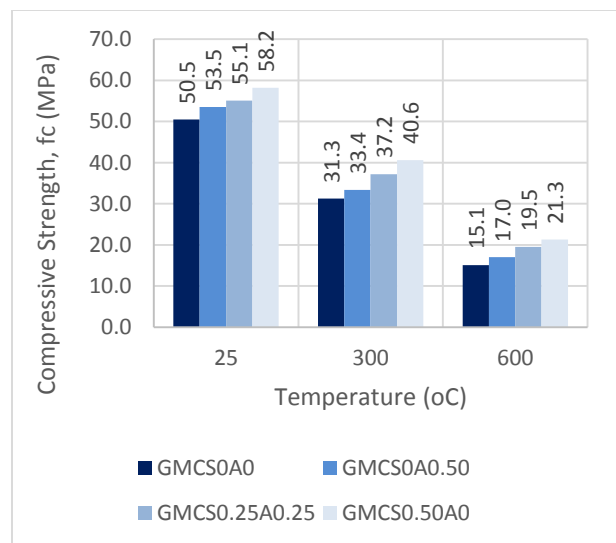
الیاف فولادی) پیش از حرارت



شکل ۵- منحنی نیرو-تغییر مکان طرح اختلاط H4 (حاوی ۰/۵

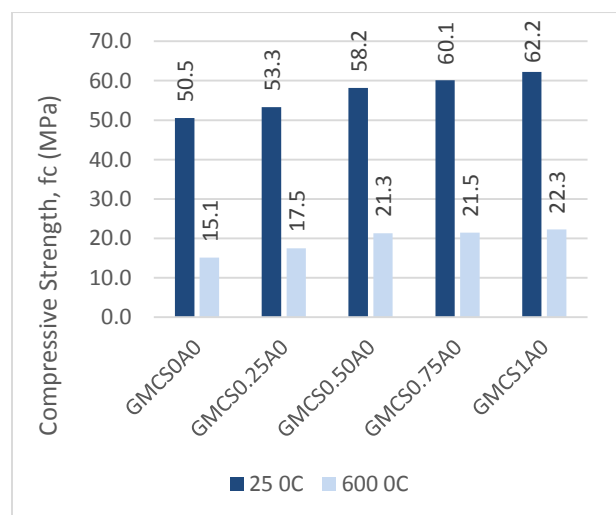
درصد الیاف فولادی) پیش از حرارت

۰/۵ درصد، به ۶۳/۴ درصد رسیده است. اثر استفاده از الیاف به ویژه الیاف فولادی بر افزایش مقاومت در برابر حرارت بالا بر اساس نتایج سایر پژوهش‌های آزمایشگاهی نیز قابل مشاهده است به طوری که در پژوهش Zheng و همکاران (۲۰۲۴) [۲۳] گزارش شده است افزودن ۱٪ الیاف فولادی به بتن ژئوپلیمری مقاومت فشاری را حدود ۳۰ درصد و مقاومت کششی را بیش از ۱۶٪ بهبود می‌بخشد، و باعث کاهش افت مقاومت فشاری پس از قرارگیری در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌شود.



شکل ۲- اثر حرارت با دمای ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد بر

نتایج آزمایش مقاومت فشاری



شکل ۳- تأثیر مقادیر مختلف الیاف فولادی بر نتایج مقاومت

فشاری در دماهای ۲۵ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد

⁴ Effective Impact Force

⁵ Impact Energy

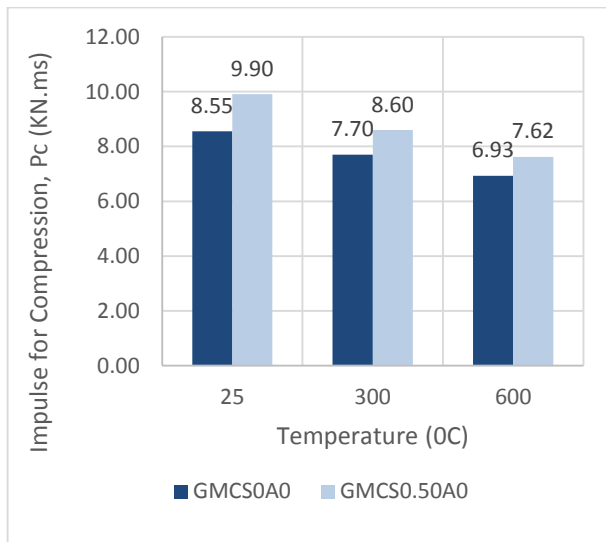
¹ Impulse for Compression

² Impulse for Restitution

³ Total Impulse

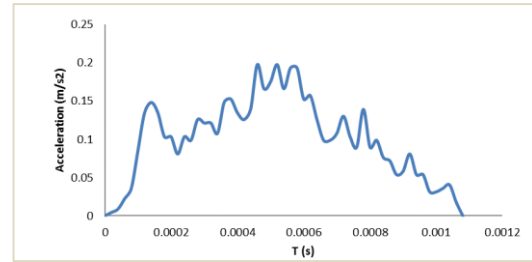
فشاری دارد، به طوری که با افزایش درصد حجمی الیاف فولادی، مقدار تکانه فشاری افزایش یافته است. بیشترین مقدار تکانه فشاری مربوط به طرح اختلاط حاوی ۱ درصد الیاف فولادی است.

با افزودن الیاف فولادی، مقاومت کششی بتن افزایش می‌یابد. الیاف از گسترش ترک‌ها جلوگیری کرده و باعث می‌شوند بتن بتواند انرژی بیشتری را قبل از شکست جذب کند [۲۴ و ۲۵]. این افزایش جذب انرژی مستقیماً باعث افزایش تکانه در ناحیه فشاری می‌شود. طرح اختلاط حاوی ۱ درصد الیاف فولادی پیش از قرارگیری در معرض حرارت، نسبت به نمونه شاهد ۲۸/۷ درصد تکانه فشاری بالاتری نتیجه داده است. نتایج ارائه شده در نمودار شکل ۷ نشان می‌دهد قرارگیری در معرض حرارت با دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد باعث افت مقادیر تکانه فشاری بتن ژئوپلیمری سنگین حاوی الیاف فولادی شده است. در میان نمونه‌های حرارت دیده همچنان بیشترین مقدار P_c مربوط به طرح اختلاط حاوی ۱ درصد الیاف فولادی است که نسبت به نمونه شاهد ۱۸/۲ درصد تکانه فشاری بالاتری نتیجه داده است.



شکل ۸- اثر حرارت بر تکانه فشاری (P_c) نمونه حاوی الیاف فولادی

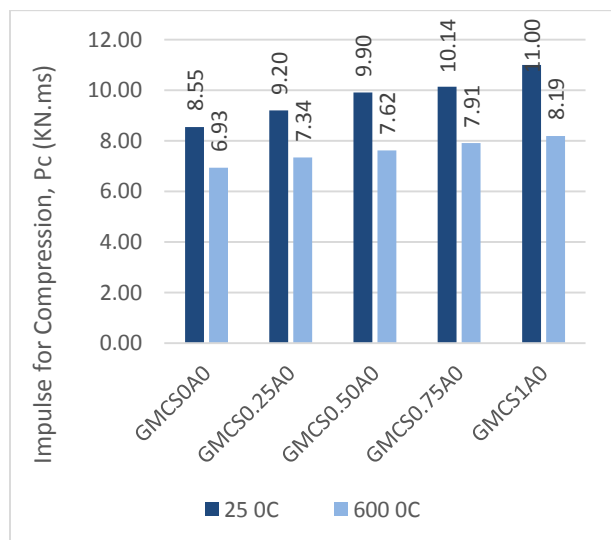
بررسی نتایج ارائه شده در شکل ۸ نشان می‌دهد قرارگیری صفحه بتن ژئوپلیمری سنگین تحت اثر حرارت با دماهای ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد باعث کاهش شاخص تکانه فشاری در آزمایش سقوط وزنه می‌شود. استفاده از ۰/۵ درصد الیاف فولادی در مخلوط بتن ژئوپلیمری باعث افزایش ۱۵/۹ درصدی تکانه فشاری



شکل ۶- منحنی شتاب-زمان طرح اختلاط H4 (حاوی ۰/۵ درصد الیاف فولادی) پیش از حرارت

۳-۲-۱- بررسی شاخصهای تکانه (P_f و P_r , P_c)

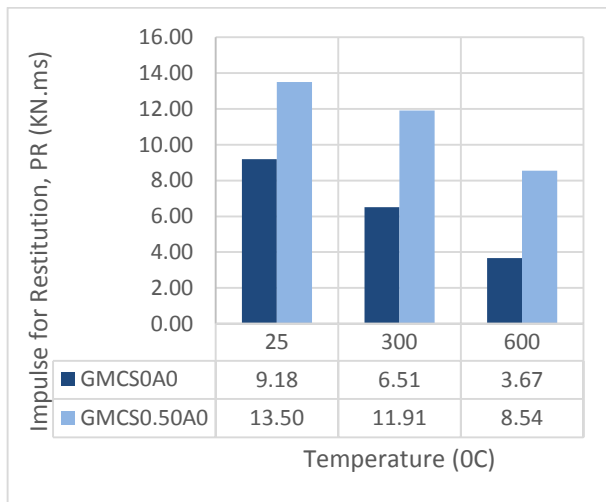
تکانه فشاری به مقدار تکانه‌ای اطلاق می‌شود که در طول فاز فشرده‌سازی^۱ از برخورد وزنه به صفحه بتنی حاصل می‌شود. تکانه فشاری (P_c) مربوط به فاز فشرده‌سازی است و نشان‌دهنده تکانه‌ای است که در این فاز به سیستم وارد می‌شود. در آزمایش سقوط وزنه، نیروی وارد شده به سیستم در طول زمان با استفاده از سنسورهای ثبت نیرو (لودسل) اندازه‌گیری و نتیجه به صورت منحنی نیرو-زمان ثبت شده است. تکانه فشاری با استفاده از محاسبه سطح زیر منحنی نیرو-زمان در طول مدت فشرده‌سازی بدست می‌آید. براساس منحنی نیرو-زمان بازه زمانی فشرده‌سازی از لحظه شروع تماس وزنه (اعمال نیرو) تا لحظه‌ای است که نیرو به حداکثر مقدار خود می‌رسد.



شکل ۷- تأثیر درصد حجمی الیاف فولادی بر نتایج تکانه فشاری نتایج بدست آمده نشان می‌دهد حضور الیاف فولادی در مخلوط بتن سنگین ژئوپلیمری، تأثیر قابل توجهی بر افزایش شاخص تکانه

^۱ Compression Phase

چقرمگی باعث می‌شود بتن بتواند انرژی بیشتری را در فاز فشرده‌سازی جذب کند و بخشی از این انرژی در فاز بازگشت بازگردانده شود. در نتیجه، تکانه بازگشتی افزایش می‌یابد. همچنین الیاف فولادی از گسترش ترک‌ها جلوگیری کرده و باعث می‌شوند بتن پس از فشرده‌سازی بتواند به حالت اولیه خود بازگردد. این بهبود رفتار بازگشتی باعث افزایش تکانه بازگشتی می‌شود. این موضوع در پژوهش Tran و همکاران (۲۰۲۲) [۲۸] نیز مشاهده شده است به طوری که افزودن الیاف به‌طور چشمگیری رفتار پس از شکست را برای بتن ژئوپلیمری بهبود می‌بخشد و باعث کاهش خردشدگی بتن و افزایش نیروی عکس‌العمل می‌شود.



شکل ۱۰- اثر حرارت بر تکانه بازگشت (Pr)

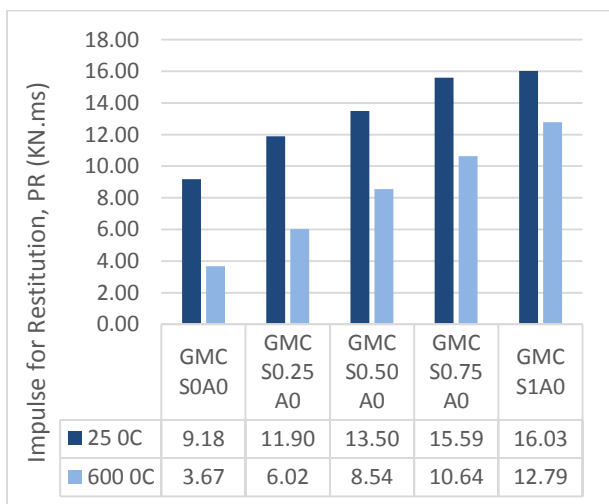
بررسی و مقایسه نتایج مربوط به تأثیر الیاف فولادی بر شاخصهای تکانه فشاری و تکانه بازگشت بتن ژئوپلیمری سنگین نشان می‌دهد الیاف فولادی باعث افزایش و بهبود هر دو می‌شود اما تأثیر بیشتری بر افزایش تکانه بازگشت در مقایسه با تکانه ناحیه فشاری دارد. بیشترین مقدار بدست آمده برای تکانه کل مربوط به طرح اختلاط GMCS1A0 است که حاوی ۱ درصد الیاف فولادی است و نسبت به نمونه فاقد الیاف در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد (پیش از حرارت) ۵۲/۵ درصد مقادیر بالاتری از Pf نتیجه داده است.

طرح اختلاط حاوی ۱ درصد الیاف فولادی در مقایسه با نمونه شاهد و پس از قرارگیری تحت اثر حرارت ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، ۹۷ درصد تکانه کل بیشتری نتیجه داده است.

نسبت به نمونه فاقد الیاف و در شرایطی که نمونه تحت اثر حرارت قرار نگرفته است، می‌شود.

شاخص دیگری که در آزمایش سقوط وزنه حاصل از منحنی نیرو- زمان بدست آمده است تکانه بازگشتی است که به مقدار تکانه‌ای اطلاق می‌شود که در طول فاز بازگشت یک برخورد یا ضربه به سیستم وارد می‌شود. این شاخص از محاسبه سطح زیر منحنی نیرو- زمان در طول مدت بازگشت محاسبه می‌شود که این بازه از لحظه‌ای که نیرو به حداکثر مقدار خود می‌رسد (پایان فاز فشرده‌سازی) تا لحظه‌ای که نیرو به صفر می‌رسد (پایان برخورد) است.

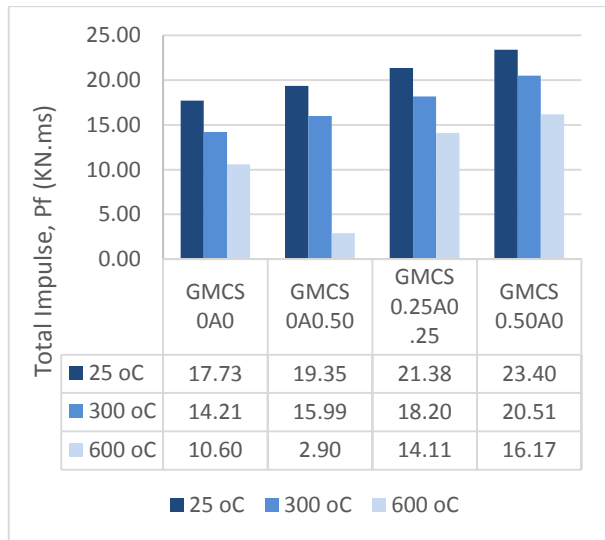
بررسی نتایج شکل ۹ نشان می‌دهد استفاده از الیاف فولادی تأثیر قابل توجهی بر افزایش مقادیر تکانه بازگشت (Pr) دارد. بررسی نتایج نشان می‌دهد استفاده از ۰/۵ درصد الیاف فولادی باعث افزایش ۴۷ درصدی تکانه بازگشت (Pr) بتن ژئوپلیمری سنگین شده است. افزایش درصد الیاف فولادی باعث افزایش مقادیر تکانه بازگشت شده است به طوری که بیشترین مقدار بدست آمده برای Pr مربوط به طرح اختلاط حاوی ۱ درصد الیاف فولادی است که ۷۴/۶ درصد نسبت به نمونه فاقد الیاف، Pr بالاتری نتیجه داده است.



شکل ۹- تأثیر درصد الیاف فولادی بر نتایج تکانه بازگشت (Pr)

براساس نتایج سایر مطالعات آزمایشگاهی الیاف فولادی با ایجاد یک شبکه سه‌بعدی در ماتریس بتن ژئوپلیمری سنگین، چقرمگی (Toughness) را افزایش می‌دهد [۲۶ و ۲۷]. این افزایش

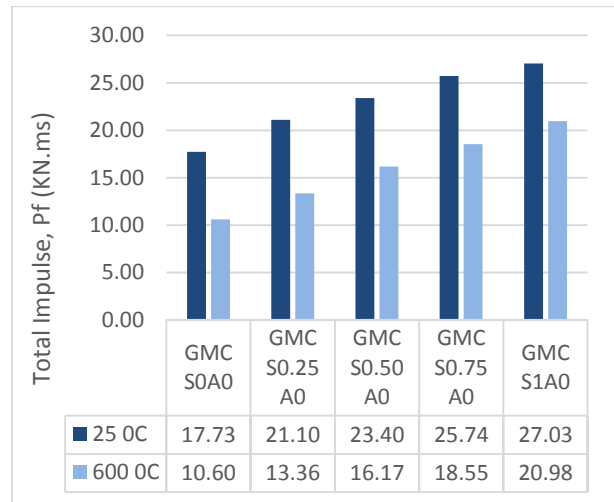
¹ Impulse for Restitution



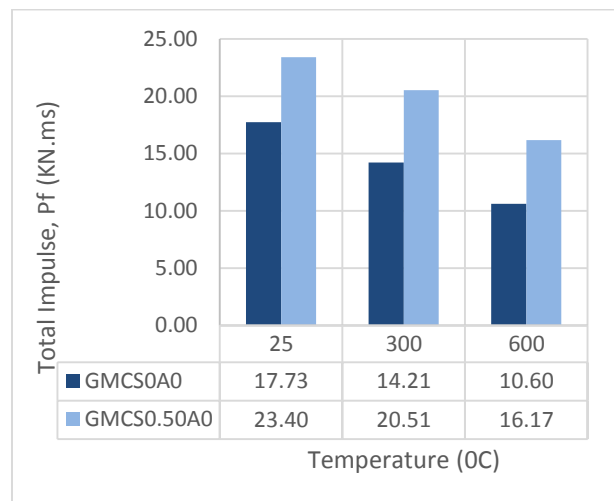
شکل ۱۳- اثر استفاده از الیاف های آرامید و فولادی بر مقادیر

تکانه کل تحت اثر دماهای مختلف

این موضوع نشان دهنده تأثیر بیشتر الیاف فولادی در مقایسه با الیاف آرامید، بر افزایش تکانه کل صفحه بتن ژئوپلیمری سنگین در آزمایش ضربه می باشد. بررسی نتایج مربوط به تکانه کل (Pf) نشان می دهد تحت اثر حرارت با دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد کمترین مقدار کاهش شاخص تکانه مربوط به طرح اختلاط حاوی ۰/۵ درصد الیاف فولادی است که تحت اثر حرارت ۶۰۰ درجه سانتی گراد مقدار تکانه کل برای این طرح اختلاط ۳۱ درصد کاهش یافته است. بیشترین کاهش تکانه کل مربوط به طرح اختلاط حاوی ۰/۵ درصد الیاف آرامید است، به طوری که تحت اثر این دما مقدار تکانه کل ۸۵ درصد کاهش یافته است. مقدار تکانه کل برای طرح اختلاط شاهد (فاقد الیاف) پس از قرارگیری تحت اثر حرارت با دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد، ۴۰/۲ درصد کاهش یافته است. در نمونه های حرارت دیده، ماتریس بتن تحت اثر آسیب های ناشی از حرارت بالا، ضعیف تر می شود و مقاومت آن در برابر ترک خوردگی کاهش می یابد. حضور الیاف فولادی نقش تقویت کننده ای در ماتریس بتن ایفا می کند به طوری که از گسترش ترک ها جلوگیری می کند و رفتار پس از ترک خوردگی (Post-Cracking Behavior) را بهبود می بخشد که این موضوع تأثیر قابل توجهی بر افزایش تکانه کل دارد. میزان تأثیر حرارت بر کاهش تکانه کل در طرح اختلاط فاقد الیاف در مقایسه با طرح اختلاط حاوی الیاف، بیشتر است و این موضوع به خوبی نقش الیاف فولادی را در کاهش اثر حرارت بر افت تکانه کل نشان می دهد.



شکل ۱۱- تأثیر درصد الیاف فولادی بر نتایج تکانه کل (Pf)

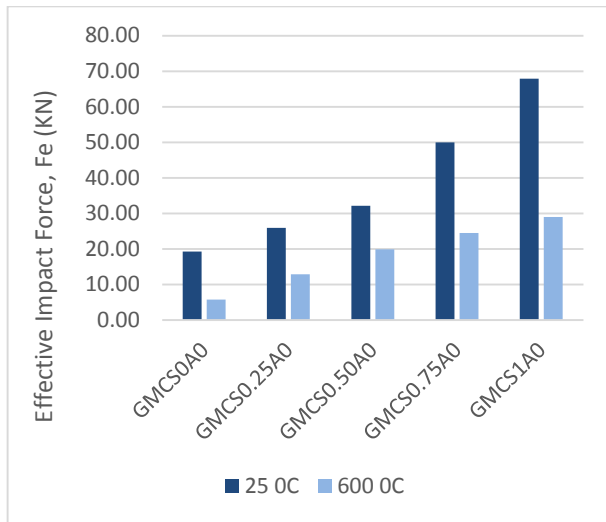


شکل ۱۲- تأثیر حرارت بر نتایج تکانه کل (Pf)

میزان تأثیر حرارت بر کاهش تکانه کل در طرح اختلاط فاقد الیاف در مقایسه با طرح اختلاط حاوی الیاف، بیشتر است و این موضوع به خوبی نقش الیاف فولادی را در کاهش اثر حرارت بر افت تکانه کل نشان می دهد. براساس نتایج بدست آمده قرارگیری در معرض حرارت با دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد باعث شده تا تکانه کل (Pf) در طرح فاقد الیاف ۴۰/۲ درصد کاهش یابد که این مقدار در اثر حضور ۰/۵ درصد الیاف فولادی به ۳۰/۱ درصد کاهش یافته است.

بررسی نتایج ارائه شده در شکل ۱۳ نشان می دهد طرح اختلاط حاوی ۰/۵ درصد الیاف فولادی نسبت به نمونه شاهد، پس از قرارگیری تحت اثر حرارت با دمای ۳۰۰ درجه سانتی گراد، ۴۴/۳ درصد تکانه کل بیشتری نتیجه داده است که این مقدار برای طرح اختلاط حاوی ۰/۵ درصد الیاف آرامید برابر ۱۲/۵ درصد است.

قابل توجهی بر افزایش نیروی مؤثر ضربه بتن سنگین ژئوپلیمری دارد. همچنین با افزایش درصد حجمی الیاف فولادی میزان نیروی مؤثر ضربه افزایش یافته است.



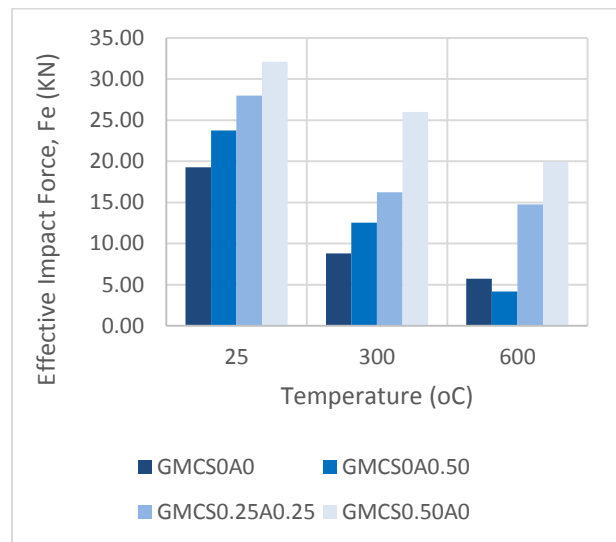
شکل ۱۵- تأثیر الیاف فولادی بر مشخصه نیروی مؤثر ضربه در دماهای مختلف

استفاده از الیاف فولادی نقش بسیار مؤثری در افزایش مقدار نیروی مؤثر ضربه به ویژه پس از قرارگیری تحت اثر حرارت با دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد دارد به طوری که پس از قرارگیری در معرض حرارت با دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد طرح اختلاط حاوی ۱ درصد الیاف فولادی نسبت به نمونه شاهد ۵ برابر نیروی مؤثر ضربه بیشتری نتیجه داده است. کاهش نیروی مؤثر ضربه در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد عمدتاً ناشی از تخریب ساختار ژئوپلیمری، تغییرات فازهای کریستالی، ایجاد تنشهای حرارتی و کاهش چسبندگی بین اجزای بتن است. این عوامل باعث کاهش مقاومت مکانیکی و چقرمگی بتن میشوند و در نتیجه، توانایی آن در تحمل بارهای ضربه‌ای کاهش می‌یابد که حضور الیاف فولادی تا حد زیادی می‌تواند این اثرات را جبران نماید.

الیاف فولادی در دمای بالا پایداری ابعادی بهتری دارند و کمتر دچار تغییر شکل یا جمع‌شدگی می‌شوند، درحالی‌که الیاف آرامید ممکن است در معرض تغییرات ابعادی قرار گیرند. الیاف فولادی به دلیل مقاومت حرارتی بالاتر، چسبندگی بهتر با ماتریس ژئوپلیمری و توانایی بیشتر در کنترل ترکها، در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد عملکرد بهتری در مقایسه با الیاف آرامید در کاهش افت نیروی مؤثر ضربه دارد.

۲-۲-۳- محاسبه نیروی ضربه مؤثر

نیروی ضربه مؤثر یکی از شاخصهای مهمی است که در این پژوهش بر اساس آزمایش ضربه (سقوط وزنه) بر صفحه بتن سنگین ژئوپلیمری، با هدف ارزیابی مقاومت بتن در برابر ضربه محاسبه شده است. نیروی ضربه مؤثر از تقسیم تکانه کل بر زمان تماس برخورد برای هر نمونه بدست آمده است.



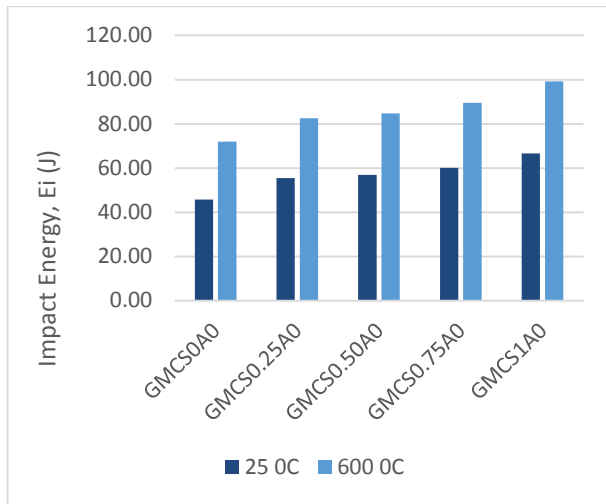
شکل ۱۴- اثر حرارت بر نتایج نیروی مؤثر ضربه نمونه های حاوی الیاف فولادی و آرامید

با توجه به نتایج بدست آمده نیروی مؤثر ضربه طرح اختلاط شاهد (فاقد الیاف) پس از قرارگیری در معرض حرارت با دمای ۳۰۰ درجه سانتی-گراد ۵۴/۴ درصد کاهش یافته است و این مقدار پس از قرارگیری تحت اثر دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد به ۷۰/۲ درصد رسیده است. استفاده از ۰/۵ درصد الیاف آرامید در مخلوط بتن سنگین ژئوپلیمری باعث می-شود مقدار افت نیروی مؤثر ضربه تحت اثر حرارت ۳۰۰ درجه سانتی کاهش یابد و برابر ۴۷/۳ درصد باشد. با افزایش حرارت به ۶۰۰ درجه سانتی گراد مشاهده می‌شود نمونه حاوی ۰/۵ درصد الیاف آرامید ۸۲/۵ درصد افت نیروی مؤثر ضربه نتیجه داده است که این موضوع ناشی از آسیب الیاف آرامید تحت اثر این حرارت و ایجاد نواحی ضعیف درون ساختار بتن سنگین ژئوپلیمری است.

در نمودار شکل ۱۵ تأثیر مقادیر مختلف الیاف فولادی در مخلوط بتن سنگین ژئوپلیمری، بر مشخصه نیروی مؤثر ضربه، پیش از قرارگیری در معرض حرارت (دمای ۲۵ درجه سانتی گراد) و پس از قرارگیری در معرض حرارت با دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد، ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد استفاده از الیاف فولادی تأثیر

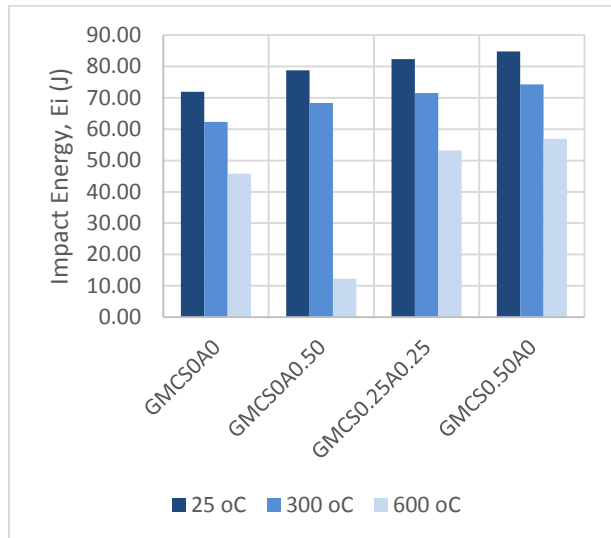
۳-۲-۳- محاسبه انرژی ضربه

این شاخص نشان دهنده توانایی بتن در جذب انرژی و مقاومت در برابر بارهای دینامیکی (ضربه) است. برای محاسبه این شاخص از سطح زیر منحنی نیرو-تغییر مکان وسط دهانه صفحه بتنی، استفاده شده است. در نمودار شکل ۱۶ تأثیر استفاده از الیاف فولادی و آرامید بر شاخص انرژی ضربه، طی آزمایش سقوط وزنه بر صفحه بتن سنگین ژئوپلیمری ارائه شده است.



شکل ۱۷- اثر استفاده از الیاف فولادی بر مشخصه انرژی ضربه نمونه های قرار گرفته در معرض حرارت ۶۰۰ درجه سانتی گراد

براساس نتایج استفاده از الیاف فولادی باعث افزایش قابل توجه در مقادیر انرژی ضربه می شود و با افزایش درصد حجمی الیاف فولادی، مقادیر انرژی ضربه افزایش یافته است. براساس نتایج بدست آمده افزودن ۰/۲۵ درصد الیاف فولادی به مخلوط بتن سنگین ژئوپلیمری، باعث شده تا انرژی ضربه در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد (پیش از حرارت) ۱۴/۸ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش یابد، که این مقدار با افزایش درصد حجمی الیاف به ۱ درصد، به ۳۷/۹ درصد رسیده است. همچنین براساس نتایج انرژی ضربه نمونه شاهد پس از قرارگیری در معرض حرارت با دمای ۳۰۰ درجه سانتی گراد، ۱۳/۳ درصد کاهش یافته است که این مقدار با افزایش حرارت به ۶۰۰ درجه سانتی گراد به ۳۶/۳ درصد رسیده است. مقدار کاهش انرژی ضربه برای طرح اختلاط حاوی ۰/۵ درصد الیاف فولادی، تحت اثر حرارت با دمای ۶۰۰ درجه سانتی-گراد ۳۲/۹ درصد بدست آمده است. بررسی مطالعات آزمایشگاهی پیشین نیز به خوبی نشان دهنده اثر حضور الیاف بر بهبود مشخصات مکانیکی بتن ژئوپلیمری تحت اثر بار ضربه است. پژوهش Wang و همکاران (۲۰۲۳) [۲۹] رفتار دینامیکی بتن ژئوپلیمری مسلح به الیاف بازالت را در محدوده دمایی ۲۵ تا ۸۰۰ درجه سانتی گراد مورد بررسی قرار داده است. نتایج نشان داده است که استفاده بهینه از الیاف بازالت می تواند عملکرد بتن ژئوپلیمری را در شرایط مختلف دمایی به ویژه در مواجهه با بارهای دینامیکی به طور معناداری ارتقا بخشد. همچنین نتایج سایر پژوهش های آزمایشگاهی نیز به خوبی نشان می دهد که افزودن



شکل ۱۶- اثر الیاف های فولادی و آرامید بر مشخصه انرژی ضربه بررسی نتایج نشان می دهد پیش از قرارگیری تحت اثر حرارت، و در دمای عمل آوری ۲۵ درجه سانتی گراد، استفاده از الیاف به ویژه الیاف فولادی باعث افزایش انرژی ضربه می شود. نمونه حاوی ۰/۵ درصد الیاف فولادی در مقایسه با نمونه حاوی ۰/۵ درصد الیاف آرامید مقادیر بیشتری انرژی ضربه نتیجه داده است به طوری که طرح اختلاط حاوی ۰/۵ درصد الیاف فولادی در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد نسبت به نمونه شاهد ۱۷/۸ درصد انرژی ضربه بیشتری نتیجه داده است در حالی که این مقدار برای طرح اختلاط حاوی ۰/۵ درصد الیاف آرامید ۱۴/۵ درصد است.

براساس نتایج پس از قرارگیری تحت اثر حرارت با دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد و به دلیل آسیب الیاف آرامید ناشی از حرارت، طرح اختلاط حاوی ۰/۵ درصد الیاف آرامید ۷۳ درصد انرژی ضربه کمتری نسبت به نمونه شاهد نتیجه داده است. از این رو در دماهای بالاتر از ۳۰۰ درجه سانتی گراد حضور الیاف آرامید در طرح اختلاط بتن سنگین ژئوپلیمری تأثیری بر افزایش انرژی ضربه ندارد.

کاهش افت نیروی مؤثر ضربه بتن سنگین ژئوپلیمری در آزمایش ضربه دارد. این موضوع به ویژه در نمونه‌های قرارگرفته در معرض حرارت ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد مشهود است.

(۷) پس از قرارگیری در معرض حرارت ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و به دلیل آسیب الیاف آرامید ناشی از حرارت، طرح اختلاط حاوی ۰٫۵ درصد الیاف آرامید ۷۳ درصد انرژی ضربه کمتری نسبت به نمونه شاهد نشان داد. همچنین استفاده از میکروسیلیس موجب افزایش قابل توجه انرژی ضربه در آزمایش سقوط وزنه بر صفحه بتن سنگین ژئوپلیمری می‌شود.

۵- مراجع

- [1] Lagrini, K., Ghafiri, A., Ouali, A., Feddoul, A., Elrhaz, R., & El Moutaki, K. S. (2019). The effect of air temperature conditions on mechanical strength, porosity, permeability, chloride diffusion and dimensional variations of concrete. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 9(10), 23-29.
- [2] Andrew, R. M. (2019). Global CO₂ emissions from cement production, 1928–2018. *Earth System Science Data*, 11(4), 1675-1710.
- Ramesh, V., & Srikanth, K. (2020). Mechanical properties and mix design of geopolymer concrete—A review. In *E3S web of conferences* (Vol. 184, p. 01091). EDP Sciences.
- [3] Sandanayake, M., Gunasekara, C., Law, D., Zhang, G., & Setunge, S. (2018). Greenhouse gas emissions of different fly ash based geopolymer concretes in building construction. *Journal of cleaner production*, 204, 399-408.
- [4] Amran, Y. M., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., & El-Zeadani, M. (2020). Clean production and properties of geopolymer concrete; A review. *Journal of Cleaner Production*, 251, 119679.
- [5] Al-Sodani, K. A. A. (2022). Mix design, mechanical properties and durability of the rubberized geopolymer concrete: A review. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01480.
- [6] Ban, C. C., Khalaf, M. A., Ramli, M., Ahmed, N. M., Ahmad, M. S., Ali, A. M. A., ... & Ameri, F. (2021). Modern heavyweight concrete shielding: Principles, industrial applications and future challenges; review. *Journal of Building Engineering*, 39, 102290.
- [7] Papachristoforou, M., & Papayianni, I. (2018). Radiation shielding and mechanical properties of

الیاف فولادی مقاومت برشی پانچی، جذب انرژی و مقاومت ضربه‌ای را در مقایسه با بتن ژئوپلیمری معمولی به‌طور چشمگیری بهبود می‌بخشد و الگوی شکست را از حالت برشی خالص به ترکیبی از برش و خمش تغییر می‌دهد [۳۰ و ۳۱].

۴- نتیجه‌گیری

- (۱) افزودن هر دو نوع الیاف فولادی و آرامید به مخلوط بتن ژئوپلیمری سنگین موجب کاهش افت مقاومت فشاری ناشی از حرارت می‌شود. بر اساس نتایج، الیاف فولادی در مقایسه با الیاف آرامید تأثیر بیشتری در کاهش افت مقاومت فشاری ناشی از حرارت دارد.
- (۲) استفاده از الیاف فولادی در بتن سنگین ژئوپلیمری تأثیر قابل توجهی بر افزایش تکانه فشاری و تکانه بازگشت دارد. با افزایش درصد حجمی الیاف فولادی، مقادیر تکانه فشاری و تکانه بازگشت افزایش می‌یابد. بیشترین مقادیر تکانه فشاری و تکانه بازگشت مربوط به طرح اختلاط حاوی ۱ درصد الیاف فولادی است.
- (۳) الیاف فولادی در افزایش تکانه کل نمونه‌های حرارت‌دیده نسبت به نمونه‌های حرارت‌دیده تأثیر بیشتری دارد. طرح اختلاط حاوی ۱ درصد الیاف فولادی در مقایسه با نمونه شاهد و پس از قرارگیری در معرض حرارت ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، ۹۷ درصد تکانه کل بیشتری نشان داد.
- (۴) هر دو نوع الیاف آرامید و فولادی باعث افزایش نیروی مؤثر ضربه در بتن سنگین ژئوپلیمری می‌شوند. الیاف فولادی در مقایسه با الیاف آرامید تأثیر بیشتری بر افزایش نیروی مؤثر ضربه دارد. طرح اختلاط حاوی ۰٫۵ درصد الیاف آرامید نسبت به نمونه شاهد ۲۳/۲ درصد نیروی مؤثر ضربه بالاتری نشان داد، در حالی که این مقدار برای نمونه حاوی ۰٫۵ درصد الیاف فولادی ۶۶/۶ درصد بود.
- (۵) استفاده از الیاف فولادی تأثیر قابل توجهی بر افزایش نیروی مؤثر ضربه بتن سنگین ژئوپلیمری دارد. با افزایش درصد حجمی الیاف فولادی، میزان نیروی مؤثر ضربه افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار نیروی مؤثر ضربه مربوط به طرح اختلاط حاوی ۱ درصد الیاف فولادی است.
- (۶) الیاف فولادی در مقایسه با الیاف آرامید تأثیر بیشتری در

ISSN 0950-0618.

- [17] M. Papachristoforou, E.K. Anastasiou, I. Papayianni, Durability of steel fiber reinforced concrete with coarse steel slag aggregates including performance at elevated temperatures, *Construction and Building Materials*, Volume 262, 2020, 120569, ISSN 0950-0618.
- [18] Gabr, Dina & Maaty, Alsaed & Taman, Mohamed & Tahwia, Ahmed. (2021). Impact Resistance and Mechanical Properties of Hybrid Steel and Polypropylene Fiber Reinforced Geopolymer Concrete Impact Resistance and Mechanical Properties of Hybrid Steel and Polypropylene Fiber Reinforced Geopolymer Concrete.
- [19] Aisheh, Y. I. A., Atrushi, D. S., Akeed, M. H., Qaidi, S., & Tayeh, B. A. (2022). Influence of polypropylene and steel fibers on the mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced geopolymer concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01234.
- [20] Ma, L., Zhen, C., Zeng, Q., & Li, B. (2025). Experimental Investigation on the Mechanical Properties of Geopolymer Recycled Aggregate Concrete Reinforced with Steel-Polypropylene Hybrid Fiber. *Buildings*, 15(10), 1723.
- [21] Sadeghian, G., Behfarnia, K., & Teymouri, M. (2022). Drying shrinkage of one-part alkali-activated slag concrete. *Journal of Building Engineering*, 51, 104263.
- [22] Shahmansouri, A. A., Nematzadeh, M., & Behnood, A. (2021). Mechanical properties of GGBFS-based geopolymer concrete incorporating natural zeolite and silica fume with an optimum design using response surface method. *Journal of Building Engineering*, 36, 102138.
- [23] Zheng, Y., Zhang, W., Zheng, L., & Zheng, J. (2024). Mechanical properties of steel fiber-reinforced geopolymer concrete after high temperature exposure. *Construction and Building Materials*, 439, 137394.
- [24] Bellum, R. R. (2022). Influence of steel and PP fibers on mechanical and microstructural properties of fly ash-GGBFS based geopolymer composites. *Ceramics International*, 48(5), 6808-6818.
- [25] Khan, M. Z. N., Hao, Y., & Hao, H. (2019). Mechanical properties and behaviour of high-strength plain and hybrid-fiber reinforced geopolymer composites under dynamic splitting tension. *Cement and Concrete Composites*, 104, 103343.
- [26] da Silva, A. C. R., Almeida, B. M., Lucas, M. M., Candido, V. S., da Cruz, K. S. P., Oliveira, M. S., & Monteiro, S. N. (2022). Fatigue behavior of steel fiber reinforced concrete (SFRC) produced with EAF slag aggregates. *Radiation Physics and Chemistry*, 149, 26-32.
- [8] Lardhi, M., & Mukhtar, F. (2023). Radiation shielding performance of seawater-mixed concrete incorporating recycled coarse aggregate and steel slag. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 16(1), 100528.
- [9] Hassan, A. G., Elkady, H., Faried, A. S., Hassan, M. A., & Allam, M. E. (2020). Evaluation of electric arc furnace slag high strength shielding concrete on exposure to gamma 662 KeV. *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00416.
- [10] Beaucour, A. L., Pliya, P., Faleschini, F., Njinwoua, R., Pellegrino, C., & Noumowé, A. (2020). Influence of elevated temperature on properties of radiation shielding concrete with electric arc furnace slag as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 256, 119385.
- [11] Pomaro, B., Gramegna, F., Cherubini, R., De Nadal, V., Salomoni, V., & Faleschini, F. (2019). Gamma-ray shielding properties of heavyweight concrete with Electric Arc Furnace slag as aggregate: An experimental and numerical study. *Construction and Building Materials*, 200, 188-197.
- [12] González-Ortega, M. A., Segura, I., Cavalaro, S. H. P., Toralles-Carbonari, B., Aguado, A., & Andrello, A. C. (2014). Radiological protection and mechanical properties of concretes with EAF steel slags. *Construction and Building Materials*, 51, 432-438.
- [13] Wen-Ten Kuo, Chun-Ya Shu, Effect of particle size and curing temperature on expansion reaction in electric arc furnace oxidizing slag aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 94, 2015, Pages 488-493, ISSN 0950-0618.
- [14] My Ngoc-Tra Lam, Saravut Jaritngam, Duc-Hien Le, Roller-compacted concrete pavement made of Electric Arc Furnace slag aggregate: Mix design and mechanical properties, *Construction and Building Materials*, Volume 154, 2017, Pages 482-495, ISSN 0950-0618.
- [15] Seyed Hosein Ghasemzadeh Mousavinejad, Mohsen Falahatkar Gashti, Effects of alkaline solution/binder and Na₂SiO₃/NaOH ratios on fracture properties and ductility of ambient-cured GGBFS based heavyweight geopolymer concrete, *Structures*, Volume 32, 2021, Pages 2118-2129, ISSN 2352-0124.
- [16] Seyed Hosein Ghasemzadeh Mousavinejad, Mohsen Falahatkar Gashti, Effects of NaOH solution concentration and aging on fracture properties and ductility of ambient-cured heavyweight geopolymer concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 277, 2021, 122266,

steel fiber reinforced geopolymer concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00829.

[27] Farhan, K. Z., Johari, M. A. M., & Demirboğa, R. (2022). Evaluation of properties of steel fiber reinforced GGBFS-based geopolymer composites in aggressive environments. *Construction and Building Materials*, 345, 128339.

[28] Tran, T. T., Pham, T. M., Huang, Z., Chen, W., Ngo, T. T., Hao, H., & Elchalakani, M. (2022). Effect of fibre reinforcements on shear capacity of geopolymer concrete beams subjected to impact load. *International Journal of Impact Engineering*, 159, 104056.

[29] Wang, Z., Bai, E., Ren, B., & Lv, Y. (2023). Effects of temperature and basalt fiber on the mechanical properties of geopolymer concrete under impact loads of different high strain rates. *Journal of Building Engineering*, 72, 106605.

[30] Chen, C., Zhang, X., Hao, H., & Sarker, P. K. (2025). Experimental and numerical study of steel fibre reinforced geopolymer concrete slab under impact loading. *Engineering Structures*, 322, 119096.

[31] Islam, A., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., Ghazali, N. B., Yusoff, S., & Bashar, I. I. (2017). Influence of steel fibers on the mechanical properties and impact resistance of lightweight geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 152, 964-977.

The Impact of High Temperature on the Behavior of Heavy Geopolymer Concrete Plates Containing Electric Arc Furnace (EAF) Aggregates and Reinforced with Hybrid Aramid-Steel Fibers under Impact Loading

Naser Hamidzadeh *

Department of Civil Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

Rahmat Madandoust

Department of Civil Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

Malek Mohammad Ranjbar

Department of Civil Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

Abstract

In this research, the effect of high temperature on the behavior of heavyweight geopolymer concrete plates containing Electric Arc Furnace (EAF) aggregates and reinforced with hybrid aramid and steel fibers under impact loading has been investigated. The volumetric percentage of steel fibers varied between 0.25% and 1%, while aramid fibers were used at 0.25% and 0.5%. Eight mix designs were prepared, using EAF slag as heavy aggregates and a combination of blast furnace slag and microsilica as the base material for geopolymer concrete. The compressive strength of the samples was measured at 28 days of age. Additionally, impact tests (drop-weight test) were conducted on concrete plates with dimensions of $400 \times 400 \times 40$ mm, and parameters such as impulse for compression (Pc), impulse for restitution (Pr), total impulse (Pf), effective impact force, and impact energy were calculated. Compressive strength and impact tests were repeated after exposing the samples to temperatures of 300°C and 600°C for one hour. The results showed that the addition of both steel and aramid fibers to heavyweight geopolymer concrete reduces the reduction in compressive strength due to heat. However, steel fibers had a more significant effect in mitigating this loss. Under the effect of 600°C, samples containing 1% steel fibers exhibited the least loss of compressive strength. In the impact test, steel fibers significantly increased the compressive impulse and rebound impulse, with the highest values of these parameters obtained from the mix design containing 1% steel fibers. Furthermore, steel fibers had a greater impact on increasing the effective impact force compared to aramid fibers. For instance, the mix design containing 0.5% aramid fibers showed a 23.2% higher effective impact force compared to the control sample, while this value was 66.6% for the sample containing 0.5% steel fibers.

Keywords: Geopolymer Concrete, Electric Arc Furnace (EAF) Aggregates, Hybrid Fibers (Aramid-Steel), High-Temperature Resistance, Impact Loading.

* Corresponding Author: hamidzadeh@guilan.ac.ir