مروری بر عملکرد بتن‌های ژئوپلیمری در دماهای بالا و مقاومت آن ها در برابر آتش (کد G)

محمدعلی معلمی[۱]، علی دوستی[۲]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران - محیط‌زیست، دانشگاه تهران

۲- عضو هیئت‌علمی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

(m.moallemi۷۵@ut.ac.ir)

چکیده

بتن پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی می‌باشد؛ از این رو نقش آن در توسعه پایدار صنعت ساختمان، انکارناپذیر است. از سویی دیگر صنعت سیمان که ماده اصلی سازنده بتن می‌باشد، با تولید گازهای آلاینده به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین صنایع آلوده‌کننده محیط‌زیست بشمار می‌رود. به‌منظور کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای و تولید بتن سازگار با محیط‌زیست، نسل جدیدی از بتن‌ها با عنوان بتن‌های سازگار با محیط‌زیست تولید شده است. هم‌چنین نیاز صنعت ساختمان در سال‌های اخیر زمینه تحقیقات بسیاری را در راستای تحقیق و تولید مصالح مقاوم در برابر آتش، فراهم نموده است. یکی از این مصالح که هم خواص مکانیکی و هم خواص زیست‌محیطی مناسبی دارد و اولین بار توسط داویدویتس[۱] در سال ۱۹۷۲ معرفی گردید، بتن ژئوپلیمری می‌باشد. بتن ژئوپلیمری از ترکیب مصالح آلومینوسیلیکاتی (شامل آلومینیوم و سیلیسیوم) و محلول‌های فعال‌کننده قلیایی (معمولاً ترکیبی از هیدروکسید سدیم یا پتاسیم و سیلیکات سدیم یا پتاسیم) به‌عنوان چسباننده، ساخته می‌شوند. ازجمله ویژگی‌های بارز بتن‌های ژئوپلیمری می‌توان به تولید کربن دی‌اکسید کمتر، هزینه پایین‌تر تولید، مصرف کمتر انرژی، ویژگی‌های مقاومتی مناسب، دوام بالا در محیط‌های خورنده، سازگاری با محیط‌زیست از طریق استفاده از محصولات جانبی و ضایعات صنایع، تثبیت فلزات سنگین و خواص فیزیکی و بهره‌برداری مناسب در دماهای بالا و در مقابل آتش، اشاره کرد. بتن ژئوپلیمر به عنوان یک مصالح نوین، مقاومت ساختمان در برابر آتش‌سوزی را افزایش می‌دهد و خرابی و خوردگی در دماهای بالا را کنترل می‌کند؛ از این رو جایگزین مناسبی برای بتن های معمول با سیمان پرتلند می‌باشد. در این مقاله سعی شده است تا به مرور عملکرد بتن ژئوپلیمر در دماهای بالا و در برابر آتش پرداخته شود. همچنین در این راستا پارامترهای موثر بر رفتار بتن‌های ژئوپلیمر در دماهای بالا مورد ارزیابی قرار گرفته‌است.

کلمات کلیدی: توسعه پایدار، بتن سازگار با محیط‌زیست، بتن ژئوپلیمری، مقاومت در برابر آتش

[۱] Davidovits

۱. مقدمه

بتن به علت هزینه پایین، سهولت دسترسی و مقاومت مناسب به‌عنوان یکی از پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی همواره نقش مهمی را در پیشرفت‌های ساختمانی داشته است[1]. در اغلب کشورها نسبت تولید بتن به فولاد از ۱۰ به ۱ فراتر رفته است. در کشور ما نیز به علت مصرف زیاد بتن، تولید و مصرف سیمان سالانه در حدود ۴۵ میلیون تن با فرض عیار سیمان ۳۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب پیش‌بینی می‌شود[**2**]. از این رو نقش صنعت سیمان که ماده اصلی سازنده بتن می‌باشد در توسعه پایدار، انکارناپذیر است.

از طرفی دیگر صنعت پرمصرف سیمان با انتشار گازهای گلخانه‌ای نظیر کربن دی‌اکسید، به‌عنوان یکی از منابع اصلی آلوده‌کننده محیط‌زیست و عامل تغییر اقلیم به شمار می‌رود. به‌طور متوسط برای تولید هر یک تن سیمان پرتلند، حدود یک تن کربن دی‌اکسید منتشر می‌شود[3]. یکی از روش‌های کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در صنعت بتن، استفاده از مواد جایگزین سیمان و تولید بتن‌های غیر سیمانی و درنتیجه تولید کمتر سیمان است[4]. بتن‌های ژئوپلیمری، نسل جدید بتن‌های سازگار با محیط‌زیست می‌باشند که علاوه بر سازگاری با محیط‌زیست دارای ویژگی های مثبت دیگری می باشند که عبارتند از: هزینه پایین تولید (به دلیل مصرف سیمان کمتر)، مصرف کمتر انرژی، خواص مکانیکی و بهره‌برداری مناسب، دوام بالا در محیط‌های خورنده، استفاده از ضایعات صنایع و تثبیت فلزات سمی سنگین و نهایتاً مقاومت مناسب این بتن‌ها در دماهای بالا و در برابر آتش [5].

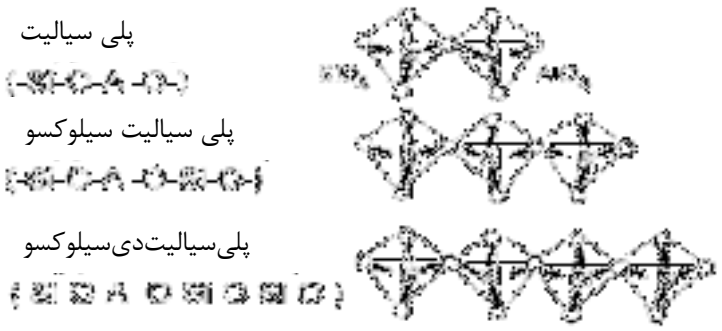
امروزه تحقیقات بسیاری در زمینه‌ی ایمنی و محافظت از سازه‌ها در برابر آتش در حال گسترش می‌باشد. بتن ژئوپلیمر به‌عنوان یکی از مصالح جدید، مقاومت مناسبی در دمای بالا و در برابر آتش از خود نشان می‌دهد. ژئوپلیمرها ازلحاظ شیمیایی ترکیبات پایداری بشمار می‌آیند و ساختار شیمیایی آن‌ها برخلاف محصولات هیدراسیون سیمان‌های متداول پرتلند در دماهای بالا، تخریب نمی‌شوند [6]. نتایج حاصل از آزمایش ژئوپلیمرها در دمای بالا نشان می‌دهد که به دلیل به هم پیوستن رشته‌های کربنی در اثر پلیمریزاسیون، این ماده در دماهای بسیار بالا مشتعل نمی‌شود، نمی‌سوزد و دود ساطع نمی‌کند. هم‌چنین ژئوپلیمرها همزمان دارای مقاومت بسیار بالایی در برابر آتش‌سوزی و همچنین قیمت تمام‌شده مناسب هستند و مقاومت خمشی خود را نیز در اثر آتش‌سوزی تا حد امکان، حفظ می‌کنند[7]. در این مقاله سعی شده است تا ضمن مرور عملکرد بتن ژئوپلیمر در دماهای بالا و در برابر آتش، پارامترهای اثرگذار بر آن نیز معرفی شوند.

۲. ساختار ژئوپلیمر

ژئوپلیمرها، نتیجه یک واکنش پلیمریزاسیون میان اکسیدهای آلومینوسیلیکات و محلول‌های فعال‌کننده قلیایی، در محیطی با قلیائیت بالا، می‌باشند. این واکنش گرماده بوده و در دماهای بین دمای اتاق تا کمتر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، منجر به ایجاد ساختار آمورف سه‌بعدی شامل پیوندهای Si-O-Si، می‌شود[8]. برای ساخت ژئوپلیمر بایستی از یک پیش ماده و محلول قلیافعال مناسب، استفاده شود. پیش ماده مورد استفاده در ساخت بتن ژئوپلیمر می‌تواند به صورت متاکائولن، سرباره کوره آهنگدازی، خاکستربادی، دوده سیلیس و زئولیت باشد. محلول فعال‌ساز قلیائی نیز معمولاً از سیلیکات سدیم یا پتاسیم به همراه هیدروکسید سدیم یا پتاسیم، ساخته می‌شود[9].

ژئوپلیمرها به سه دسته اصلی با توجه به نسبت سیلیکات به آلومینات، تقسیم‌بندی می‌شوند. سه مونومر به نام‌های پلی سیالیت (PS)، پلی سیالیت سیلوکسو (PSS) و پلی سیالیت دی سیلوکسو (PSDS)، ساختمان اصلی زنجیره‌های انواع ژئوپلیمر را تشکیل می‌دهند. به ترتیب نسبت SiO_2/Al_2O_3 در پلی سیالیت برابر ۱، پلی سیالیت سیلوکسو برابر ۲ و پلی

سیالیت دی سیلوکسو برابر ۳، می‌باشد. شکل ۱ ساختار مونومرهای اصلی سازنده ژئوپلیمرها را به صورت سه‌بعدی در فضا نشان می‌دهد[9].



شکل ۱- مونومر های اولیه زنجیره‌های ژئوپلیمر [9]

جدول ۱ نیز کاربردهای متداول ژئوپلیمرها را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ژئوپلیمر با انواع ساختار مونومری را می‌توان به‌عنوان عایق حرارتی و مقاوم در برابر آتش به کار برد.

جدول ۱- کاربرد انواع ژئوپلیمرها با مونومر های مختلف [5]

مونومر اولیه	کاربرد
پلی سیالیت (PS)	عایق حرارتی مواد مقاوم در برابر آتش
پلی سیالیت سیلوکسو (PSS)	نسوزها مواد مقاوم در برابر آتش سیمان‌های با کارایی بالا
پلی سیالیت دی سیلوکسو (PSDS)	مواد مرکب نسوزها مواد مقاوم در برابر آتش

فرمول کلی ژئوپلیمرها به‌صورت رابطه (۱) تعریف می گردد که در آن M یک کاتیون قلیایی مانند پتاسیم، سدیم یا کلسیم، n درجه پلیریمریزاسیون، Z نیز برابر ۱، ۲ یا ۳ و W نیز میزان آب متبلور موجود در ساختار ژئوپلیمر است[10]:

$$M_n\left[-(SiO_2)_z - AlO_2\right]_n . wH_2O \qquad (1)$$

شکل‌گیری ژئوپلیمرها بسیار پیچیده و تاکنون به‌صورت کامل ناشناخته است؛ اما به‌صورت کلی مراحل زیر در یک واکنش ژئوپلیمریزاسیون انجام می‌شود [۸]:

۱- انحلال سیلیسیوم و آلومینیوم موجود در مواد آلومینوسیلیکاتی در محلول فعال‌کننده قلیایی (انحلال)
۲- تشکیل مونومر های اولیه (جهت‌گیری)
۳- پلیمریزاسیون مونومرها جهت تشکیل ژئوپلیمرهای سه بعدی آمورف (ژئوپلیمریزاسیون)

۴- سخت شدن ژئوپلیمر از طریق مصالح پرکننده و ذرات واکنش نداده (سخت شدن نهایی) نوع و ترکیبات فعال‌کننده قلیایی، زمان و دما و آب عمل‌آوری، نوع پیش ماده و مقادیر نسبی سدیم، پتاسیم، آلومینیوم و سیلیسیوم در واکنش پلیمر سازی، بر خواص بتن ژئوپلیمر تولیدی موثر است[5].

ژئوپلیمر سخت شده به‌صورت کلی خواص زیر را دارد:

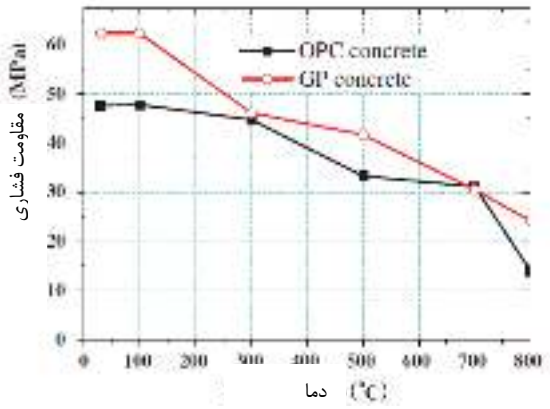
- هزینه و انرژی تولید پایین: به دلیل استفاده از ضایعات صنایع و مواد ارزان آلومینوسیلیکاتی آن‌هم در دمای پایین ژئوپلیمریزاسیون
- سازگاری با محیط‌زیست: به دلیل تثبیت فلزات سمی سنگین و کاهش تولید و مصرف سیمان به‌عنوان اصلی‌ترین منتشرکننده گازهای گلخانه‌ای در صنعت بتن [9]
- مقاومت سازه‌ای و بهره‌برداری مناسب به‌خصوص در دماهای بالا و در برابر آتش: به دلیل وجود ساختار پلیمری [11]

۳. رفتار ژئوپلیمر در دماهای بالا

همان‌طور که گفته شد، بتن‌های ژئوپلیمر مقاومت و دوام مناسبی در دماهای بالا و در برابر آتش دارند؛ به‌طوری‌که می‌توان از آن‌ها به‌عنوان عایق حرارتی نیز استفاده کرد[11]. بتن ژئوپلیمر با سنگدانه شکسته در مقایسه با بتن با سیمان پرتلند متداول، مقاومت بسیار بالایی در مقابل آتش از خود نشان می‌دهد. با این شرایط طرح اختلاط دقیقی برای دستیابی به پایداری شیمیایی، تغییر حجم کم نسبت به زمان و مقاومت در برابر خوردگی، موردنیاز است. عواملی نظیر انتخاب پیش ماده و سنگدانه مناسب، نسبت مواد قلیایی در ژئوپلیمر و مقدار آب برای این طرح اختلاط حیاتی است و می‌بایست کنترل شود[6]. علت مقاومت بالاتر بتن ژئوپلیمر نسبت به بتن‌های معمولی در دماهای بالا، تشکیل کمتر فازهای ضعیفی همچون هماتیت، پاراژونیت و آلبیت در ساختار خمیر سیمان تشکیل شده نسبت به بتن‌های معمول، می باشد[12]. ژانگ و همکاران، آزمایش‌های مقاومت خمشی و فشاری را بر روی نمونه‌های خمیر ژئوپلیمر، ملات و بتن ژئوپلیمر در معرض دمای محیط و دمای بالا انجام دادند تا در نهایت بتوانند مقدار بهینه متاکائولن و خاکستری بادی را در بتن ژئوپلیمر برای دستیابی به مقاومت مناسب در برابر آتش را بدست آورند. بر اساس نتایج این تحقیق استفاده از پودر ژئوپلیمر به همراه ۵۰ درصد متاکائولن و ۵۰ درصد خاکستر بادی، در دمای محیط و دماهای بالا، مقاومت خمشی و فشاری بهینه را به همراه داشت. هم‌چنین به دلیل ناسازگاری میان کرنش حرارتی ژئوپلیمر و سنگدانه‌ها، ترک خوردگی و تضعیف مقاومت بتن ژئوپلیمری پس از قرار گرفتن در دماهای بالا، مشاهده شد[**13**].

شکل ۲، تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتن ژئوپلیمر (GP) و بتن با سیمان پرتلند معمولی[۲](OPC) را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در تمامی دماها بین صفر تا ۸۰۰ درجه سلسیوس، مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمر بیشتر از بتن معمولی است. علت کاهش مقاومت با افزایش دما نیز تغییر شکل‌های حرارتی و کاهش رطوبت و در نتیجه وزن بتن در اثر حرارت می‌باشد[13].

[۲] Ordinary Portland Cement



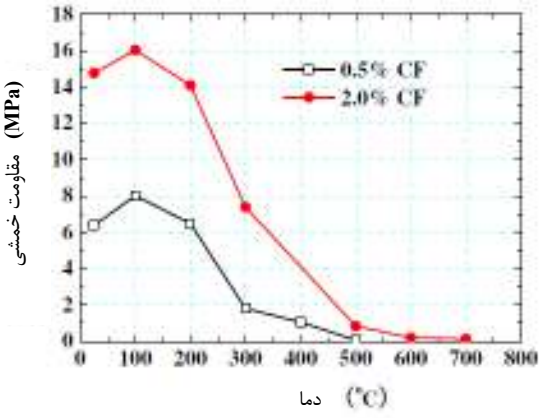
شکل ۲- نمودار مقاومت فشاری برحسب دما برای نمونه بتن ژئوپلیمر (GP) و بتن با سیمان متداول (OPC) [13]

کومار و همکاران، نمونه‌های استوانه‌ای بتن ژئوپلیمر با خاکستر بادی و بتن با سیمان معمولی را تا دمای ۱۰۰۰ درجه سلسیوس و بر اساس نرخ حرارت دهی استاندارد ISO۸۳۴، درمعرض آتش قراردادند. پس از قرارگیری در معرض آتش، نمونه‌های ژئوپلیمر از نظر ترک‌خوردگی، وضعیت بهتری نسبت به نمونه‌های بتن معمولی داشتند و کمتر تخریب شده بودند. نمونه‌های بتن معمولی در دماهای ۸۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سلسیوس بسیار فرسوده و تخریب‌شده بودند؛ درحالی‌که در نمونه‌های ژئوپلیمر هیچ‌گونه اثر خرابی و خوردگی دیده نمی‌شد. به‌طورکلی در طول آزمایش همواره مقاومت بالاتر بتن ژئوپلیمر نسبت به بتن معمولی ، حفظ شد[14]. هم‌چنین مشاهده شد که حرارت با سرعت بیشتری از بتن ژئوپلیمر نسبت به بتن معمولی عبور می‌کند که این خاصیت باعث می‌شود تا گرادیان حرارتی (تغییرات دما) در بتن ژئوپلیمر نسبت به نمونه‌های معمولی، کمتر شود. ریزساختار بتن ژئوپلیمر نیز پس از قرارگیری در معرض آتش، تا دمای ۸۰۰ درجه سلسیوس، کاملاً پایدار و متراکم باقی ماند[14].

های-یانژانگ و همکاران تعداد زیادی آزمایش انجام دادند تا بهترین طرح اختلاط برای بتن ژئوپلیمر الیافی بر پایه خاکستر بادی و یا متاکائولن، به‌منظور مقاومت در برابر آتش را به دست آورند. با استفاده از آزمایش مقاومت خمشی و فشاری برای بتن ژئوپلیمر با نسبت الیاف کربن متفاوت و ترکیبات مختلفی از خاکستر بادی و متاکائولن، مشخص گردید که استفاده از ۵۰ درصد متاکائولن، ۵۰ درصد خاکستر بادی به همراه الیاف کربنی خردشده به مقدار ۲ درصد وزنی پوزولان، می‌تواند این مصالح را به‌عنوان جایگزین مناسبی برای مصالح موجود درزمینه‌ی مقاومت در برابر آتش مطرح کرد[15].

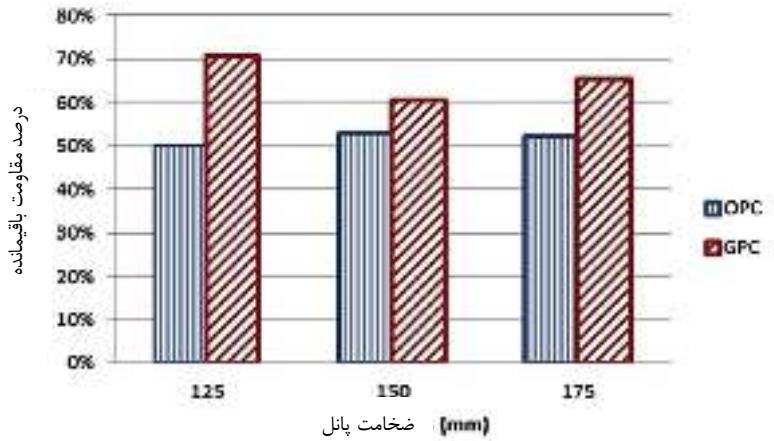
شکل ۳، نمودار مقاومت خمشی برحسب دما را برای دو مقدار متفاوت از الیاف کربنی[۳](CF) نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، اضافه کردن الیاف کربنی خردشده به ژئوپلیمر، اثرات مثبتی بر روی کنترل ترک در دماهای بالا و افزایش مقاومت خمشی در دماهای بین ۲۰ تا ۵۰۰ درجه سلسیوس خواهد گذاشت[15].

[۳] Carbon Fibre



شکل ۳- نمودار مقاومت خمشی برحسب دما برای بتن ژئوپلیمر با درصد الیاف کربنی ۰،۵ و ۲ [15]

کومار و سیمون، پانل‌های مربعی به ابعاد ۵۰۰ میلی‌متر متشکل از بتن ژئوپلیمر و بتن معمولی، با ضخامت ۱۲۵، ۱۵۰ و ۱۷۵ میلی‌متر و دارای یک لایه مش بندی فولادی را به مدت ۲ ساعت در معرض آتش قراردادند. بر اساس نتایج آزمون مقاومت فشاری، ظرفیت فشاری باقیمانده برای بتن ژئوپلیمری (۶۶ درصد) نسبت به بتن معمولی (۵۲ درصد) بیشتر گزارش شد. بر اساس این مطالعات گزارش شد که در اثر دماهای بالا و ایجاد گرادیان های حرارتی زیاد میزان آسیب های داخلی (همچون ایجاد ترک های موئینه) برای بتن ژئوپلیمری نسبت به بتن معمولی کمتر مشاهده شده است. درنتیجه بتن ژئوپلیمر مسلح شده می‌تواند محافظ مناسبی در برابر آتش نسبت به بتن‌های معمولی به‌حساب آید[**16**]. مطابق شکل ۴، مقاومت باقیمانده برای پانل‌های ژئوپلیمری و معمولی در ضخامت‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در تمامی ضخامت‌ها، مقاومت فشاری باقیمانده برای پانل ژئوپلیمری نسبت به پانل معمولی، بیشتر است[16].



شکل ۴- نمودار درصد مقاومت باقیمانده برحسب ضخامت‌های مختلف برای پانل ژئوپلیمر (GPC) و پانل معمولی (OPC) [16].

اصلانی، خصوصیات بتن ژئوپلیمری در دماهای بالا را به‌منظور مدل‌سازی بتن ژئوپلیمر، موردبررسی قرارداد و روابطی برای شاخص‌های مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته، مقاومت خمشی، کرنش حرارتی و رابطه تنش فشاری- کرنش در دماهای بالا پیشنهاد کرد (رابطه ۲). رابطه معرفی شده برای مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمر در دماهای بالا به‌صورت ذیل تعریف می گردد:

$$f'_{GT} = f'_G \begin{pmatrix} ۱ \\ ۱,۱۱۱۲ - ۰,۰۰۰۴T - ۰,۰۰۰۰۰۲T^{۲} \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} ۲۰^{\circ}C \\ ۱۰۰^{\circ}C \le T \le ۱۰۰۰^{\circ}C \end{matrix} \qquad (۲)$$

که در این رابطه، f'_{GT} مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمر در دماهای بالا، f'_G مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمر در دمای ۲۰ درجه سلسیوس و T دما برحسب درجه سلسیوس می‌باشد[17].

عبدالغنی و همکاران در مطالعات خود بر روی بتن های ژئوپلیمری، از پیش ماده سرباره کوره آهنگدازی به همراه ۳ و ۶ درصد سدیم هیدروکسید به‌علاوه ۳ درصد سدیم سیلیکات به‌عنوان فعال‌کننده قلیایی استفاده کردند. نتایج آزمایش‌ها در درجه حرارت بالا نشان داد که بتن ژئوپلیمر با ۳ درصد سدیم هیدروکسید به همراه سدیم سیلیکات به‌عنوان فعال‌کننده قلیایی، پایداری و مقاومت بالایی در برابر آتش از خود نشان می‌دهد و بدین ترتیب عملکرد بهتری نسبت به بتن‌های معمولی خواهد داشت[**18**].

حکیم عزیز و همکاران، رفتار خمیر، ملات و بتن ژئوپلیمر را تحت تأثیر درجه حرارت بالا مورد مطالعه قراردادند. اطلاعات مربوط به طرح اختلاط هر یک از نمونه‌ها در جدول ۲، آمده‌است[۱۹]. آن‌ها ترک‌خوردگی، فرسایش سطح بتن، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و ظرفیت فشاری باقیمانده را به‌عنوان شاخص‌های مقاومت بتن در برابر آتش، در نظر گرفتند. همچنین پارامترهای نسبت جامد به مایع، نسبت سیلیسیوم به آلومینیوم، نسبت سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید، عمل‌آوری و افزودنی‌های اصلاح‌کننده خصوصیات مکانیکی و حرارتی، به‌عنوان پارامترهای اثرگذار بر مقاومت بتن ژئوپلیمری در برابر آتش معرفی شدند[11].

جدول۲- اطلاعات مربوط به طرح اختلاط خمیر، ملات و بتن ژئوپلیمر بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب[19]

ترکیبات / نوع نمونه	خاکستر بادی	سدیم سیلیکات	سدیم هیدروکسید	نسبت فعال کننده قلیایی به جرم خاکستر بادی	سنگدانه سبک	ماسه	آب اضافه
خمیر	۳۴۱/۸۹	۱۰۰/۸۶	۱۰۰/۸۶	۰/۶	-	-	-
ملات	۳۴۱/۸۹	۱۰۰/۸۶	۱۰۰/۸۶	۰/۶	-	۸۲۳/۳۹	۱۲/۴۸
بتن سبکدانه	۳۴۱/۸۹	۱۰۰/۸۶	۱۰۰/۸۶	۰/۶	۴۸۴	۸۲۳/۳۹	۹۱/۴۷

مطابق جدول ۳، درصد مقاومت ازدست‌رفته برای خمیر، ملات و بتن ژئوپلیمری با سنگدانه سبک[۴](LWAGC) در دماهای ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سلسیوس، پس از قرارگیری نمونه‌ها در داخل کوره با نرخ افزایش دمای ۴/۴درجه سلسیوس به ازای هر دقیقه، نشان داده شده است. با توجه به جدول، مشاهده می گردد که بتن ژئوپلیمری کمترین مقدار افت مقاومتی را نسبت به بقیه نمونه‌ها تجربه کرده است[11].

جدول ۳ - درصد مقاومت ازدست‌رفته برای خمیر، ملات و بتن ژئوپلیمر در دماهای مختلف[11]

LWAGC	ملات	خمیر	دما (درجه سلسیوس)
۱۳	۱۶/۷	۳۷/۸	۴۰۰
۲۶/۷	۳۸/۶	۵۶/۵	۶۰۰
۳۹	۵۲/۳	۱۰۰	۸۰۰

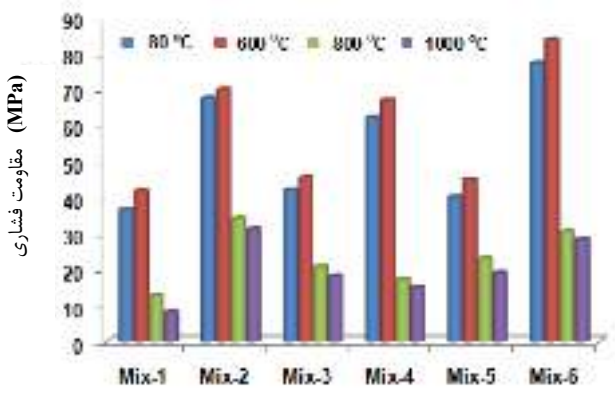
[۴] Lightweight Aggregate Geopolymer Concrete

ساکسِنا و همکاران، محصولات جانبی و ضایعات صنایع را به‌عنوان مصالح اولیه به‌منظور تولید بتن ژئوپلیمر مطابق جدول ۳ استفاده کردند؛ زیرا این محصولات درصد زیادی آلومینوسیلیکات (ترکیبات آلومینیوم و سیلیسیوم) به‌عنوان ماده اصلی سازنده ژئوپلیمر را دارا هستند. در این مطالعه سه نوع ملات ژئوپلیمر با استفاده از خاکستری بادی[۵](FA)، سرباره کوره آهنگدازی[۶] (GBFS) و رس کلسینه شده (CC) در حضور دوده سیلیس و فعال‌کننده‌های قلیایی سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات، ساخته شدند و بر روی آنها به ترتیب آزمون های مقاومت فشاری و مقاومت در برابر آتش در دماهای ۶۰۰ ، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ درجه انجام شد. [**20**].

جدول ۳- جزئیات طرح اختلاط شش ملات ژئوپلیمر (اعداد بر حسب گرم می‌باشند)[20]

طرح اختلاط	خاکستر بادی	سرباره کوره آهنگدازی	رس کلسینه شده	ماسه	دوده سیلیسی	سدیم سیلیکات	سدیم هیدروکسید	آب اضافه (میلی‌لیتر)
Mix-۱	۲۰۰	۰	۰	۶۰۰	۰	۸۰	۴۰	۰
Mix-۲	۲۰۰	۰	۰	۶۰۰	۶۴	۸۰	۴۰	5
Mix-۳	۰	۰	۲۰۰	۶۰۰	۰	۸۰	۴۰	۰
Mix-۴	۰	۰	۲۰۰	۶۰۰	۶۴	۸۰	۴۰	10
Mix-۵	۰	۲۰۰	۰	۶۰۰	۰	۸۰	۴۰	۰
Mix-۶	۰	۲۰۰	۰	۶۰۰	۶۴	۸۰	۴۰	5

بر اساس نتایج حاصل (شکل ۵)، مقاومت فشاری نمونه‌ها در حضور دوده سیلیس، بیشتر از سایر نمونه‌ها محاسبه شده است. هم‌چنین تقریباً تمام ملات‌های ژئوپلیمری ساخته‌شده تا دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس، مقاومت مناسبی در برابر آتش از خود نشان داده اند ولی با افزایش دما به بیش از ۶۰۰ درجه سلسیوس، مقاومت فشاری نمونه ها در برابر آتش افت کرده است. بر اساس نتایج ارائه شده در این مطالعه، ملات ژئوپلیمر ساخته شده با خاکستر بادی و دوده سیلیس، بیشترین مقاومت در برابر آتش را در دماهای ۸۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سلسیوس از خود نشان داده است [20].

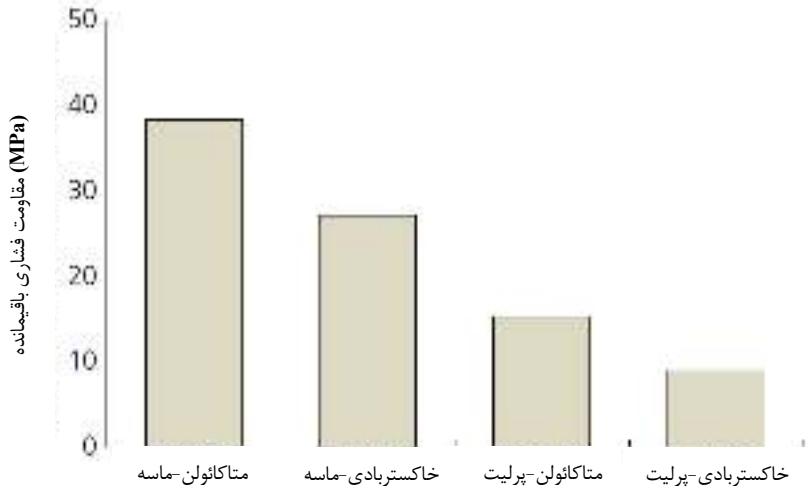


شکل ۵- نمودار مقاومت فشاری ۶ ملات ژئوپلیمر در دماهای مختلف[20].

[۵] Fly Ash

[۶] Granulated Blast Furnace Slag

علا راشد در مطالعه خود از دو نوع پوزولان از جنس آلومینوسیلیکات ها با نام‌های متاکائولن (MK) و خاکستر بادی (FA) به‌عنوان ماده اولیه ساخت ملات‌های ژئوپلیمر استفاده کرد. هم‌چنین ماسه سیلیسی طبیعی رودخانه (S) و پرلیت منبسط شده[۷](EP) را به‌عنوان مصالح ریزدانه مورد استفاده قرارداد. پس از عمل‌آوری، آزمایش‌های مربوطه بر روی ملات های ژئوپلیمری ساخته شده انجام گرفت و مشخص شد که ملات‌های ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن و خاکسترِبادی، می‌توانند به‌عنوان عایق و محافظ در برابر آتش، استفاده شوند. هدایت حرارتی نمونه‌های ژئوپلیمری نسبت به نمونه‌های بتن معمولی، بین ۳۳ تا ۷۳ درصد کاهش و مقاومت فشاری آن‌ها بین ۸۳ تا ۱۱۵ درصد، افزایش یافته است[21]. نتایج مقاومت فشاری باقیمانده پس از رویارویی با دمای ۶۰۰ درجه مطابق شکل ۶ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می گردد ملات متاکائولن با ریزدانه طبیعی بهترین عملکرد را نسبت به بقیه طرح ها داشته است[21].

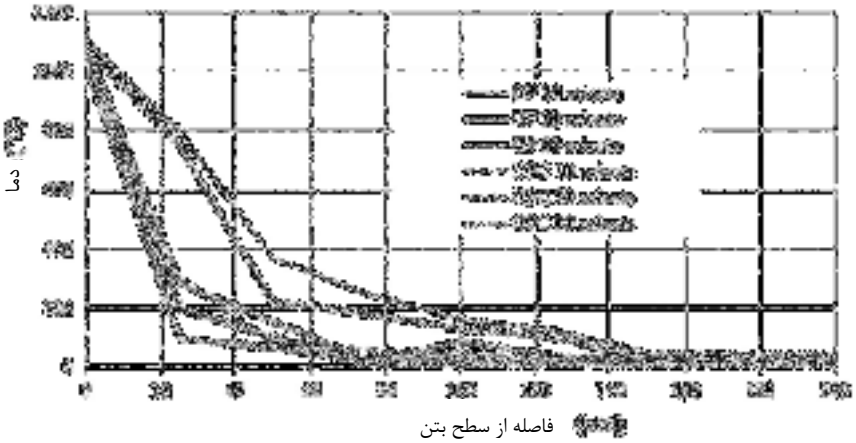


شکل ۶- نمودار مقاومت فشاری باقیمانده پس از عبور از دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس[21]

مهد علی و همکاران، اثر آتش‌سوزی بر مقاومت فشاری باقیمانده را بر نمونه‌های استوانه‌ای بتن ژئوپلیمری بررسی کردند. در این مطالعه دو نمونه استوانه‌ای با ابعاد ۳۰۰×۱۵۰ و ۲۰۰×۱۰۰ میلی‌متر در معرض آتش‌سوزی ازیک‌طرف برای مدت زمان‌های مساوی(۱۲۰ دقیقه) قرار گرفتند. نتایج حاصل از این آزمون نشان داد که در سطح آزمونه ها هیچ‌گونه آثار تخریبی مشاهده نگردید و میزان کاهش جرم نیز بین ۲/۷ تا ۴/۶۵ درصد بدست آمد که ناشی از کاهش رطوبت نمونه‌ها بوده است. همچنین تجزیه و تحلیل‌ها نشان داد که بتن ژئوپلیمری مقاومت گرمایی مناسبی دارد به‌طوری‌که با افزایش درجه حرارت سطح آن به ۱۰۰۰ درجه سلسیوس، دما در عمق ۱۰۰ میلی‌متری نسبت به سطح ، پس از ۳۰ دقیقه به مقدار حدود ۴۰ درجه سلسیوس خواهد رسید. این مسئله ناشی از آن است که بتن ژئوپلیمری نسبت به بتن‌های معمولی، ظرفیت ذخیره‌سازی گرمایی بالاتر و انتشار حرارتی کمتری دارد[22].

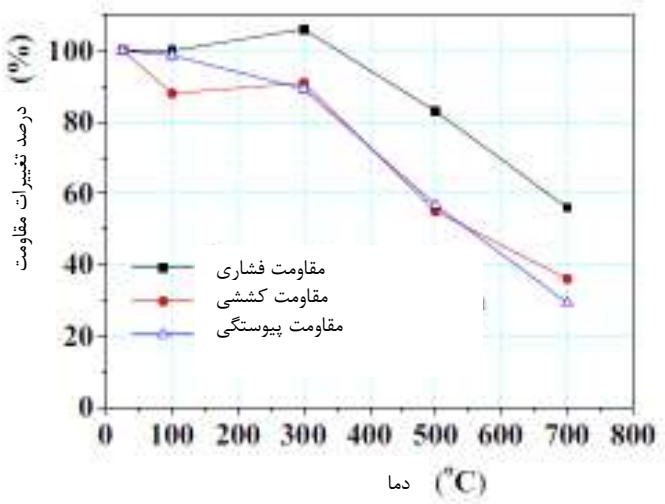
مطابق شکل ۷، میزان دمای اندازه‌گیری شده در اعماق مختلف از سطح نمونه بتن ژئوپلیمر (GP) و بتن معمول (OPC) نشان داده شده است. مطابق شکل می‌توان دریافت که بتن‌های ژئوپلیمری، زمان بیشتری لازم دارند تا دما را تا عمق مشخصی از سطح منتقل کنند؛ به‌عبارتی دیگر، این بتن ها نسبت به بتن های معمولی گرادیان حرارتی پایین‌تری خواهند داشت بنابراین از آن ها می توان به عنوان پوشش‌های مقاوم در برابر آتش استفاده نمود [22].

[۷] Expanded Perlite



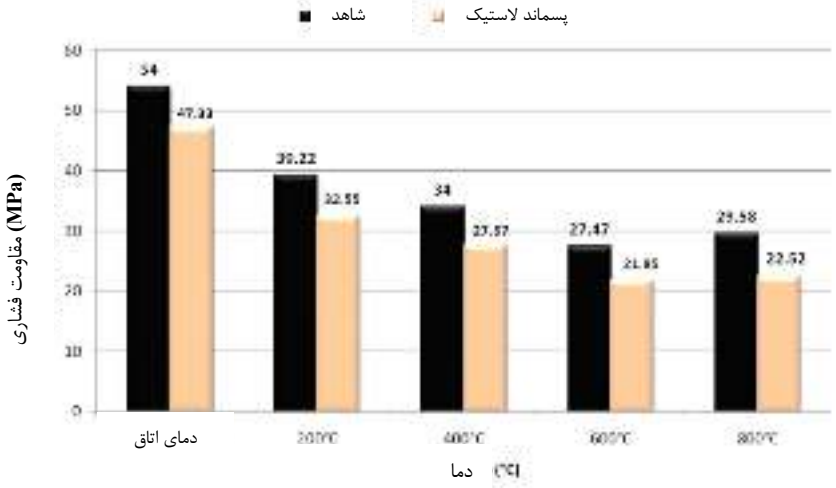
شکل ۷- نمودار دما برحسب فاصله از سطح برای بتن ژئوپلیمر (GP) و بتن معمولی (OPC)[22].

های-یانژانگ و همکاران، آزمون بیرون کشیدگی میلگرد (Pull-Out) را بر روی نمونه‌های بتن ژئوپلیمر مسلح شده با مقاومت فشاری ۴۸ و ۶۴ مگاپاسکال و پنج نوع میلگرد با قطرهای ۱۰ ، ۱۲ ، ۱۴ ، ۱۸ و ۲۵ میلی‌متر، در دمای محیط و به ترتیب در دماهای ۱۰۰ ، ۳۰۰ ، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سلسیوس انجام دادند. بر اساس نتایج این مطالعه، مقدار مقاومت پیوستگی میان بتن و میلگرد برای بتن ژئوپلیمری نسبت به بتن معمولی مقدار بیشتری گزارش شد. به همین منظور از بتن های ژئوپلیمری می توان به عنوان یک جایگزین عملی مناسب برای بتن‌های معمولی به‌منظور طراحی ساختمان‌های بتنی با در نظر گرفتن ملاحظات مقاومت در برابر آتش، استفاده نمود[23]. نتایج آزمون بیرون کشیدگی میلگرد مطابق شکل ۸ نشان می دهد که تا دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس، پیوستگی میان بتن ژئوپلیمری و میلگرد حفظ شده است ولی در دماهای فراتر از ۳۰۰ درجه سلسیوس، پیوستگی میان بتن و میلگرد تحت تأثیر دما قرار گرفته است بطوریکه پس از آن شاهد افت مقاومت پیوستگی بتن و میلگرد می باشیم. همچنین داده‌های آزمایشی اثبات کرده است که نرخ کاهش پیوستگی بتن و میلگرد در بتن ژئوپلیمری بسیار نزدیک و شبیه به نرخ کاهش مقاومت کششی بتن به روش دو نیم کردن می باشد. [23].



شکل ۸- نمودار درصد تغییرات مقاومت فشاری، کششی و پیوستگی نسبت به دما برای بتن ژئوپلیمر[23]

سلمابانو و همکاران، در تحقیقات خود با استفاده از خاکستر بادی و پسماندهای لاستیکی به عنوان جایگزین شن و ماسه بتن‌های ژئوپلیمری ساختند. تغییرات به وجود آمده در وزن، مقاومت فشاری، چگالی و ریزساختار بتن در دمای اتاق و دماهای ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۲ ساعت توسط پراکنش اشعه ایکس[۸](XRD)، طیف‌سنجی فوریه[۹] (FTIR)، تحلیل حرارت سنجی[۱۰](TGA)، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این آزمون ها نشان داد که اثر دماهای بالا بر نمونه شاهد ژئوپلیمری و نمونه همراه با پسماندهای لاستیکی، تقریباً یکسان است. بر اساس آزمون FTIR برای هردو نمونه مشاهده شد که مقاومت حرارتی هر دو بتن ژئوپلیمری معمولی و با پسماند لاستیک، در حد عالی است[24]. مطابق نتایج حاصل از مقاومت فشاری باقیمانده از طرح های مذکور در دماهای مختلف (شکل ۹)، مشاهده می گردد که مقاومت فشاری هر دو طرح تا دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس کاهش پیدا می‌کند ولی پس از آن با رسیدن به دمای ۸۰۰ درجه سلسیوس، مقاومت فشاری دو نمونه افزایش اندکی را تجربه می کنند [24]. محققین علت این کاهش مقاومت را زوال جرم بتن و علت بالا رفتن مقاومت را پایداری و تثبیت دوباره ترکیبات ژئوپلیمرها عنوان کرده اند.



شکل ۹- نمودار مقاومت فشاری نمونه شاهد ژئوپلیمر و نمونه با پسماند لاستیک

نظری و همکاران، رفتار بتن ژئوپلیمری را در اثر شوک حرارتی ناشی از قرارگیری آزمونه ها در دماهای ۴۰۰، ۶۰۰ ، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سلسیوس و سپس قرارگرفتن در معرض هوا یا آب سرد مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمون مقاومت فشاری بر روی آزمونه ها پس از قرارگیری در دماهای مذکور نشان داد که بتن ژئوپلیمری نسبت به بتن معمولی در شرایط شوک حرارتی بهتر عمل می‌کند. به‌عنوان مثال بتن ژئوپلیمری با افزایش دما، در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، افزایش مقاومت فشاری را تجربه می‌کند که کاملاً متفاوت از بتن‌های معمولی است. برای دماهای بالاتر از ۴۰۰ درجه، آزمونه‌های بتن ژئوپلیمری دچار تغییر رنگ شدند و در دمای ۱۰۰۰ درجه اندکی ترک خوردگی بر روی ظاهر آنها مشاهده گردید. محققین علت تغییر رنگ سطح بتن را مربوط به مهاجرت یون‌های فلزی در اثر افزایش دما در ژئوپلیمر نسبت می دهند[12].

شکل ۱۰، نمودار مقاومت فشاری اندازه‌گیری شده برای نمونه‌های بتن معمولی (OPC) و بتن ژئوپلیمری را پس از مواجهه با دماهای مختلف و سپس خنک شدن در محیط آزمایشگاه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در دماهای بالا،

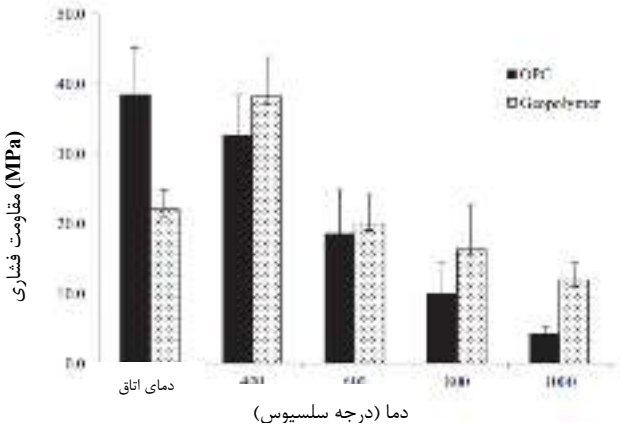
---

[۸] X-Ray Diffraction

[۹] Fourier-Transform Infrared Spectroscopy

[۱۰] Thermogravimetric Analysis

عملکرد بتن ژئوپلیمری در مقایسه با بتن معمولی، ازنظر مقاومت فشاری، بهتر است. رفتار و روند افت مقاومت نمونه‌های بتنی در خنک‌سازی با آب نیز به همین شکل می‌باشد[12].



شکل۱۰- نمودار مقاومت فشاری نمونه‌های بتن ژئوپلیمر (Geopolymer) و بتن معمول (OPC) در دماهای بالا و سپس خنک‌سازی در هوا[12]

چیثامبرام و همکاران، رفتار مشخصات مکانیکی نمونه‌های ملات ژئوپلیمری را در دماهای ۲۰۰ درجه سلسیوس تا ۱۰۰۰ درجه سلسیوس، مورد بررسی و ارزیابی قراردادند. نتایج حاصل از این مطالعه حاکی از آن است که اثر درجه حرارت بالا بر مقاومت فشاری رابطه مستقیمی با کاهش وزن نمونه‌ها با افزایش دما دارد[25].

۴. نتیجه‌گیری

نیاز صنایع ساختمانی و به‌تبع آن صنعت تولید بتن به‌عنوان پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی، زمینه تحقیقات گسترده‌ای را برای تولید مصالحی با مقاومت بالا در برابر آتش و دماهای بالا ضمن حفظ خصوصیات مکانیکی مطلوب فراهم نموده است. این تحقیقات سبب تولید بتنی تحت عنوان بتن ژئوپلیمر با ساختار آلومینوسیلیکاتی شده است. ژئوپلیمرها، نتیجه یک واکنش پلیمریزاسیون میان اکسیدهای آلومینوسیلیکات و محلول‌های فعال‌کننده قلیایی، در محیطی با قلیائیت بالا، می‌باشند.همان‌طور که گفته شد، ژئوپلیمرها در دمای بالا به دلیل به هم پیوستن رشته‌های کربنی در اثر پلیمریزاسیون، مشتعل نمی‌شوند، نمی-سوزند و دود ساطع نمی‌کند. هم‌چنین دارای مقاومت بسیار بالایی در برابر آتش‌سوزی می‌باشند؛ این بتن ها نسبت به بتن های معمولی گرادیان حرارتی پایین‌تری خواهند داشت و از آن‌ها می توان به عنوان پوشش‌های مقاوم در برابر آتش استفاده نمود؛ نتیجتاً بتن ژئوپلیمر یک مصالح سازه‌ای مناسب در برابر آتش‌سوزی می‌باشد.

۵. مراجع

[1] یزدیان, مهدی و محمد شکرچی زاده، ۱۳۹۳، بررسی روشهای کاهش اثرات زیست محیطی بتن در ایران، *هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران*، بابل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی

[2] شکرچی زاده, محمد و زانیار میرزایی، ۱۳۸۸، آینده آموزش مهندسی بتن و سیمان با نگرش به محیط زیست، *کنفرانس آموزش مهندسی در ۱۴۰۴، تهران*، دانشگاه تهران، فرهنگستان علوم

[3] فامیلی, هرمز؛ محمد دلنواز و ساناز شعاعی، ۱۳۹۵، صنعت سیمان و توسعه پایدار، *سمینار ملی بتن های سازگار با محیط زیست*،

گرمسار، موسسه آموزش عالی علاءالدوله سمنانی

[4] رمضانیانپور, علی اکبر، ۱۳۹۵، بتن های سازگار با محیط زیست، *سمینار ملی بتن های سازگار با محیط زیست*، گرمسار، موسسه آموزش عالی علاءالدوله سمنانی

[5] بندار, دالی؛ نعمت حسنی و محمدمهدی خداپرست، ۱۳۹۰، بتن ژئوپلیمری و کاربردهای آن، *اولین همایش بین المللی بتن های ناتراوا مخازن ذخیره آب شرب*، رشت، شرکت آب و فاضلاب شهری استان گلستان

[۶] M. Lahoti, K. H. Tan, and E.-H. Yang, "A critical review of geopolymer properties for structural fire-resistance applications," *Constr. Build. Mater.*, vol. ۲۲۱, pp. ۵۱۴–526, 2019.

[7] وردی, علی اله؛ ابراهیم نجفی کانی و سارا اسمعیل پور، ۱۳۸۵، ژئوپلیمرها، نسل جدید موادساختمانی مقاوم در برابر آتش، *دومین همایش محافظت ساختمانها در برابر آتش*، تهران، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن

[8] بزرگمهرنیا, سعید؛ عرفان کمالی و حمیدرضا اصغری، ۱۳۹۷، بررسی استفاده از پیش ماده های مختلف بر ساخت ملات سیمان ژئوپلیمری با رویکرد مقاومت فشاری، *دهمین کنفرانس ملی بتن، تهران*، انجمن بتن ایران

[۹] J. Davidovits, "Properties of Geopolymer Cements," *First Int. Conf. Alkaline Cem. Concr.*, no. October ۱۹۹۴, pp. ۱۳۱–۱۴۹, ۱۹۹۴.

[۱۰] J. Davidovits and Institut Géopolymère, *Geopolymer chemistry and applications*. .

[۱۱] I. H. Aziz *et al.*, "Manufacturing parameters influencing fire resistance of geopolymers: A review," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.*, vol. ۲۳۳, no. ۴, pp. ۷۲۱–733, 2019.

[۱۲] A. Nazari *et al.*, "Thermal shock reactions of Ordinary Portland cement and geopolymer concrete: Microstructural and mechanical investigation," *Constr. Build. Mater.*, vol. ۱۹۶, pp. 492–498, 2019.

[۱۳] H. Y. Zhang, V. Kodur, S. L. Qi, L. Cao, and B. Wu, "Development of metakaolin-fly ash based geopolymers for fire resistance applications," *Constr. Build. Mater.*, vol. ۵۵, pp. ۳۸–45, 2014.

[۱۴] P. K. Sarker, S. Kelly, and Z. Yao, "Effect of fire exposure on cracking, spalling and residual strength of fly ash geopolymer concrete," *Mater. Des.*, vol. ۶۳, pp. ۵۸۴–592, 2014.

[۱۵] H. Y. Zhang, V. Kodur, L. Cao, and S. L. Qi, "Fiber reinforced geopolymers for fire resistance applications," *Procedia Eng.*, vol. ۷۱, pp. ۱۵۳–۱۵۸, ۲۰۱۴.

[۱۶] P. K. Sarker and S. McBeath, "Fire endurance of steel reinforced fly ash geopolymer concrete elements," *Constr. Build. Mater.*, vol. ۹۰, pp. ۹۱–۹۸, ۲۰۱۵.

[۱۷] F. Aslani and M. Asce, "Thermal Performance Modeling of Geopolymer Concrete," ۲۰۱۵.

[۱۸] N. T. Abdel-Ghani, H. A. Elsayed, and S. AbdelMoied, "Geopolymer synthesis by the alkali-activation of blastfurnace steel slag and its fire-resistance," *HBRC J.*, vol. ۱۴, no. ۲, pp. ۱۵۹–164, 2018.

[۱۹] O. A. Abdulkareem, A. M. M. Al, H. Kamarudin, I. K. Nizar, and A. Saif, "Effects of elevated temperatures on the thermal behavior and mechanical performance of fly ash geopolymer paste , mortar and lightweight concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. ۵۰, pp. ۳۷۷–387, 2014.

[۲۰] S. K. Saxena, M. Kumar, and N. B. Singh, "Fire Resistant Properties of Alumino Silicate Geopolymer cement Mortars," *Mater. Today Proc.*, vol. ۴, no. ۴, pp. ۵۶۰۵–5612, 2017.

[۲۱] A. M. Rashad, "Insulating and fire-resistant behaviour of metakaolin and fly ash geopolymer mortars," *Proc. Inst. Civ. Eng. - Constr. Mater.*, vol. ۱۷۲, no. ۱, pp. ۳۷–۴۴, ۲۰۱7.

[۲۲] A. Z. Mohd Ali, J. Sanjayan, and M. Guerrieri, "Performance of geopolymer high strength concrete wall panels and cylinders when exposed to a hydrocarbon fire," *Constr. Build. Mater.*, vol. ۱۳۷, pp. ۱۹۵–۲۰۷, ۲۰۱۷.

[۲۳] H. Y. Zhang, V. Kodur, B. Wu, J. Yan, and Z. S. Yuan, "Effect of temperature on bond characteristics of geopolymer concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. ۱۶۳, pp. ۲۷۷–285, 2018.

[۲۴] S. Luhar, S. Chaudhary, and I. Luhar, “Thermal resistance of fly ash based rubberized geopolymer concrete,” *J. Build. Eng.*, vol. ۱۹, no. January, pp. ۴۲۰–۴28, 2018.
[۲۵] S. J. Chithambaram, S. Kumar, and M. M. Prasad, “Thermo-mechanical characteristics of geopolymer mortar,” *Constr. Build. Mater.*, vol. ۲۱۳, no. ۲۰۱۹, pp. ۱۰۰–۱08, 2019.