

## بررسی آزمایشگاهی مشخصات و مقاومت بتن پوزولانی معدنی محلی در برابر آتش و ارزیابی توانایی آن در کاهش انتشار گاز گلخانه‌ای CO<sub>2</sub>

مهدی رفتاری<sup>۱\*</sup>، رحمت مدن دوست<sup>۲</sup>، رضا محبوب<sup>۱</sup>، مجتبی رنگرزیان<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، واحد خرم‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم‌آباد

<sup>۲</sup> استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت و استاد مدعو گروه مهندسی عمران، واحد خرم‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم‌آباد

<sup>۳</sup> گروه مهندسی عمران، واحد خرم‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم‌آباد

دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۷، بازنگری: ۱۴۰۲/۱/۱۵، پذیرش: ۱۴۰۲/۲/۱۸، نشر آنلاین: ۱۴۰۲/۲/۱۸

### چکیده

یافتن راهی جهت کاهش تولید و مصرف سیمان در بتن به‌عنوان پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی، که در نتیجه آن از انتشار گاز گلخانه‌ای CO<sub>2</sub> کاسته شود، اولویت دارد. در این مقاله، یک پوزولان طبیعی از ایران با خواص فیزیکی و شیمیایی مناسب برای جایگزینی بخشی از سیمان در بتن، معرفی و خواص مهندسی آن بررسی و توانایی آن در کاهش مقدار انتشار CO<sub>2</sub> مورد ارزیابی قرار گرفت. در آزمایشات، از الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن به‌صورت جداگانه و هیبرید با پوزولان معدنی جدید استفاده گردید. با توجه به بهینه‌سازی‌های قبلی، پوزولان معدنی با کسر وزنی ۱۵ درصد معوض سیمان، در بتن استفاده شد. آزمایشات نشان داد نمونه‌های بتنی حاوی پوزولان معدنی محلی و الیاف فولادی، از مقاومت فشاری بیشتری برخوردار بودند. نمونه‌های بتن پوزولانی حاوی ترکیبی از الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن عملکرد بهتری در مقاومت خمشی داشتند. بررسی مقاومت نمونه‌ها پس از قرارگیری در دمای ۶۰۰°C صورت پذیرفت. نمونه‌های حاوی الیاف فولادی مقاومت فشاری بهتری از خود نشان دادند. بررسی‌ها ثابت کرد، افزودن ۱۵ درصد وزنی پوزولان معدنی محلی معوض سیمان در بتن می‌تواند ۱۵/۲۰ درصد انتشار گاز گلخانه‌ای CO<sub>2</sub> را کاهش دهد. مطالعات بر روی نمونه‌های حاوی پوزولان معدنی محلی نشان داد که این پوزولان با ایجاد واکنش مطلوب پوزولانی با پرتلندیت، از افزایش اندازه مقدار پرتلندیت در نزدیکی سنگ‌دانه‌ها جلوگیری کرده و به‌این ترتیب ناحیه انتقال مرزی (Interfacial Transition Zone) (ITZ) را تقویت کرد و پیوند بین کل و ماتریس را بهبود می‌بخشد. کاهش انتشار آلاینده‌گی با مدنظر قراردادن مقیاس تولید و مصرف سیمان در صنعت ساختمان، در حفظ محیط زیست اثرگذار می‌باشد، به‌گونه‌ای که پوزولان معدنی مورد مطالعه، ضمن بهبود مشخصات مهندسی بتن، مصرف سیمان را تا حد زیادی کاهش می‌دهد و کارا در حفاظت از محیط زیست و ساخت و تولید بتن سبز است.

**کلیدواژه‌ها:** بتن الیافی پوزولانی، مشخصات مکانیکی بتن، اثر آتش، گاز گلخانه‌ای، پتانسیل گرمایش جهانی (GWP)، بتن سبز.

### ۱- مقدمه

زمین مانند سطح یک گلخانه است که باید مقداری از انرژی خود را از طریق جو به بیرون هدایت کند، اما به‌دلیل حضور بیش از اندازه گازهای گلخانه‌ای، این انرژی به سطح زیرین این‌گازها (داخل گلخانه) باز می‌گردد و در نتیجه جو زمین گرم‌تر می‌شود. از این رو، این‌گازها را گازهای گلخانه‌ای می‌نامند. اثر گلخانه‌ای یک

یکی از بحران‌های پیش روی بشر در سال‌های اخیر آسیب به محیط زیست است. مهم‌ترین پیامد آن، انتشار بیش‌ازحد گازهای گلخانه‌ای است. گازهای گلخانه‌ای (GHGs)<sup>۱</sup> به‌عنوان یک تله روی زمین عمل می‌کنند و زمین را گرم می‌کنند. در این مکانیسم،

### 1. Greenhouse Gases



افزایش پرکننده‌های سیمانی که خواص مشابه پوزولان‌های طبیعی دارند (Cobirzan و همکاران، ۲۰۱۵)، یا با استفاده از بقایای چینی (پرسولان) (Jacoby و همکاران، ۲۰۱۵)، یا پرکننده‌های غیرسیمانی مانند خاک‌های (پودر) آهکی (Senhadji و همکاران، ۲۰۱۴)، یا با جایگزینی بخشی از مواد سیمانی تکمیلی (SCM)<sup>۴</sup> ضایعات کشاورزی که می‌تواند نقش الیاف را در کامپوزیت ایفا کند (Thomas و همکاران، ۲۰۲۱؛ Wu و همکاران، ۲۰۱۳). همچنین؛ خاکستر پوسته برنج (RHA)<sup>۵</sup> (Christopher و همکاران، ۲۰۱۷) خاکاره یا خاکستر چوب (SDA)<sup>۶</sup> (Muralidhar و همکاران، ۲۰۲۱) خاکستر نخل پالم (POFA)<sup>۷</sup> (Alyousef و همکاران، ۲۰۲۱) پرکننده‌های دیگری هستند که می‌توان از آن‌ها برای جایگزینی مقداری سیمان در بتن استفاده کرد. Ranjbar و Madandoust در این رابطه دریافته‌اند که افزودن زئولیت طبیعی (NZ)<sup>۸</sup> می‌تواند مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی را بهبود بخشد (Ranjbar و همکاران، ۲۰۱۳).

Nie و همکاران همچنین؛ بیان داشتند که استفاده از خاکستر بادی (FA)<sup>۹</sup> به‌طور قابل توجهی مقاومت بتن در برابر حمله سولفات را بدون کاهش مقاومت بهبود بخشیده است (Nie و همکاران، ۲۰۱۴). Gökçe و همکاران (۲۰۱۹) بیان کردند که دوده سیلیس (SF) توانایی پرکردن ذرات بین سیمان پرتلند معمولی را دارد و این کار را بهتر از مواد ریزدانه در بتن انجام می‌دهد. SF<sup>۱۰</sup> آب کمتری مصرف می‌کند و استحکام بهتری دارد، بنابراین جایگزین برای آن‌ها مناسب است.

Song و همکاران (۲۰۰۶) نشان دادند که بتن‌های حاوی کوره‌های سرباره (سرباره زمینی) - سرباره کوره آهن‌گدازی (GGBFS)<sup>۱۱</sup> - در درازمدت دوام بهتر و همچنین؛ مقاومت بالاتری در برابر خوردگی نشان می‌دهند. با استفاده از استراتژی افزودن جایگزین‌های سیمان در داخل بتن، حجم ملات بتن حفظ می‌شود. افزودن آن می‌تواند ضخامت لایه آب خمیر سیمان را افزایش داده و در نتیجه، جریان‌پذیری ملات را با همان مقاومت بالا ببرد. همچنین؛ می‌تواند چگالی بتن را با حفظ بهبود در عملکرد کلی افزایش دهد (Kwan و همکاران، ۲۰۱۳). با توجه به موارد فوق، باید به این یک اشکال استراتژی توجه داشت که جایگزینی سیمان با پرکننده‌ها در صورت داشتن واکنش شیمیایی ضعیف از سوی آن‌ها، مقاومت بتن ساخته شده را کاهش می‌دهد (Shi و همکاران، ۲۰۲۱).

فرآیند طبیعی است که بدون آن، حیات روی زمین به‌دلیل سرمایه شدید غیرممکن است. اما زمانی که انتشار این گازها توسط انسان از حد تعادل فراتر رود، افزایش دما در سیاره زمین خواهیم داشت و این، دقیقاً همان چیزی است که اخیراً رخ داده است (Sekoai و همکاران، ۲۰۱۶).

عدم مدیریت و توجه کافی به انتشار گازهای گلخانه‌ای که باعث تغییرات آب و هوایی می‌شود، حیات انسان را بر روی زمین تهدید می‌کند (Kang و همکاران، ۲۰۰۹). دی‌اکسیدکربن بیشترین تولید و انتشار را در میان گازهای گلخانه‌ای دارا است (Stocker و همکاران، ۲۰۱۳). بر اساس برآوردها، انتشار CO<sub>2</sub> از کارخانه‌های سیمان، ۱۱۳ میلیارد مگاتن است که دومین تولیدکننده و انتشار دهنده گاز CO<sub>2</sub> می‌باشد. تقاضا برای بتن در جوامع، بسیار زیاد است. طبق مطالعات انجام شده، مصرف بتن پس از مصرف آب، به‌عنوان بیشترین مصرف شناخته شده است. طبق آمار، ۷ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای را تولید سیمان تشکیل می‌دهد (Ramezanpour و همکاران، ۲۰۰۱؛ Worrel و همکاران، ۲۰۲۰) حدود سی و چهار درصد CO<sub>2</sub> منتشر شده از تولید سیمان که اغلب به‌دلیل استفاده از سوخت‌های فسیلی است، در اتمسفر آزاد می‌شود و دو سوم باقی مانده نشان‌دهنده انتشار CO<sub>2</sub> از فرآیند کربن‌زدایی سنگ آهک در طول فرآیند کلسینه شدن<sup>۱</sup> تولید بتن است (Izumi و همکاران، ۲۰۲۱).

سهم CaO در کلینکر<sup>۲</sup> به ۶۴ تا ۶۷ درصد باقی‌مانده شامل اکسید سیلیکون، اکسید آهن و اکسید آلومینیوم است. بنابراین، انتشار CO<sub>2</sub> حاصل از تولید کلینکر به‌ازای هر کیلوگرم کلینکر به حدود ۰/۵ کیلوگرم می‌رسد. مقدار CO<sub>2</sub> تولید شده در هر تن سیمان به کلینکر سیمان بستگی دارد. این نسبت معمولاً از ۰/۵ تا ۰/۹۵ متغیر است. برای فرآیند انتشار CO<sub>2</sub> ناشی از تولید سیمان (فرآیند تولید کلینکر) برای اجرای فرآیند کلسینه کردن مواد، در هر تن تولید کلینکر ۰/۱۳۶ مگاتن کربن تولید می‌شود (Hanein و همکاران، ۲۰۱۸). بنابراین، با توجه به حجم بالای انتشار CO<sub>2</sub> در تولید سیمان، یافتن راهی جهت کاهش مصرف سیمان در بتن با بهبود مشخصات مهندسی، برای جلوگیری از آلودگی محیط زیست ضروری می‌باشد.

با توجه به اهمیت نقش سیمان در بتن و مصرف بالای آن در محصولات بتنی، همچنین؛ اهمیت جلوگیری از انتشار روبه‌رشد گاز گلخانه‌ای CO<sub>2</sub> ناشی از تولید سیمان، یکی از استراتژی‌های موفق، جایگزینی مقدار سیمان با پرکننده‌هایی که مشخصات سیمانی یا غیرسیمانی دارند می‌باشد. کاهش میزان مصرف سیمان در بتن با

7. Palm Oil Fuel Ash  
8. Natural Zeolite  
9. Fly Ash  
10. Silica Fume  
11. Ground Granulated Blast Furnace Slag

2. Calcination  
3. Clinker  
4. Supplementary Cementitious Material  
5. Rice Husk Ash  
6. Saw Dust Ash

EN1097 آزمایش شد که برای سیمان ۳/۱۲ و برای پوزولان طبیعی ۲/۲۴ بوده است (BS, EN 1097-3: 1998). توزیع اندازه ذرات، یک تابع ریاضی است که معمولاً جرم ذرات را برحسب اندازه آن‌ها بیان می‌کند (اندازه ذرات سیمان پرتلند معمولی و پوزولان‌های طبیعی آسیاب‌شده در این مقاله). پوزولان آسیاب‌شده، یک پوزولان نرم است که می‌تواند به صورت فیزیکی حفره‌های بین دانه‌های سیمان را پر کند تا چگالی نسبی بالاتری برای بتن ایجاد نماید. بر اساس نتایج اندازه‌گیری شده، سطح ویژه سیمان پرتلند معمولی و پوزولان آسیاب‌شده طبیعی به ترتیب: ۰/۳۵ و ۱/۲۳ مترمربع بر گرم است. میانگین اندازه ذرات سیمان پرتلند معمولی و پوزولان‌های آسیاب‌شده طبیعی به ترتیب ۹/۳۴ میکرومتر و ۳/۵۵ میکرومتر است. طبق گزارش آزمایشگاهی، اندازه ذرات پوزولان طبیعی، مناسب‌تر از سیمان پرتلند معمولی است. مقداری فوق‌روان‌کننده با چگالی ۱/۰۳ گرم بر سانتی‌مترمکعب (در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد) برای افزایش جریان‌پذیری و کمک به پراکندگی ذرات در هر نمونه ملات اضافه می‌شود.

## ۲-۲- مشخصات الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن

ویژگی‌های الیاف مورد استفاده در بتن بر رفتار بتن ساخته شده تأثیر می‌گذارد. مشخصات مهندسی فولاد و الیاف پلی‌پروپیلن در جدول (۲) آورده شده است.

## ۲-۳- طرح و نسبت اختلاط

طرح اختلاط با پوزولان طبیعی در چندین آزمایش محاسبه شد و مقدار بهینه پوزولان جایگزین سیمان در بتن، ۱۵٪ وزنی سیمان بود. از آنجایی که افزودن الیاف به بتن، استحکام آن را در برابر بارهای وارده افزایش می‌دهد، از فولاد و پلی‌پروپیلن و الیاف هیبریدی آن‌ها در مخلوط ملات بتن استفاده شد. کسر حجمی الیاف اضافه شده به مخلوط، مطابق با مقادیر متوسط مورد استفاده در چندین مطالعه قبلی بود. برای محاسبه، کسر حجمی الیاف در یک مترمکعب بتن، باید درصد الیاف (که از نتایج مطالعات قبلی به دست آمده) را در چگالی الیاف ضرب کرد. در تمامی موارد از مقررات ASTM C1116 استفاده شد. برای اطمینان از عملکرد صحیح ماتریس باید چگالی و توزیع مناسب ذرات را کنترل نمود. نباید فراموش کرد که ذرات کوچکتر، تمایل به تجمع در هنگام ساخت ماتریس دارند که شکستن قطعات را پس از عمل‌آوری آسان‌تر می‌کند (Alavi Nia و همکاران، ۲۰۱۲). قبل از افزودن آب و فوق‌روان‌کننده، تمام ذرات ریز را در ظرفی با رطوبت ۹۰ درصد مخلوط شد. در مرحله اول مواد خشک سیمانی (سیمان، پوزولان آسیاب‌شده) و ماسه را هم‌زمان قرار داده و با سرعت کم به مدت دو دقیقه مخلوط، تا به مخلوط سیمانی و ماسه رسید. سپس به مدت دو دقیقه به تدریج فوق‌روان‌کننده به آب اضافه و مخلوط شد.

با مدنظر قراردادن این‌که پوزولان معدنی مورد مطالعه، پوزولانی با خواص فیزیکی و شیمیایی مطلوب از معادن ایران می‌باشد، هدف از این پژوهش، بررسی آزمایشگاهی اثر بخشی پوزولان معدنی محلی آسیاب‌شده در نمونه‌های تحت آزمون‌های فشاری و خمشی و آتش‌سوزی و با بررسی مکانیسم چرخه حیات، مقدار تأثیر آن در کاهش آلاینده CO<sub>2</sub> آن را خواهیم یافت.

## ۲- طرح آزمایشی

### ۲-۱- مواد و مصالح

سیمان پرتلند معمولی که در این مقاله استفاده می‌شود، مطابق استاندارد ۲۰۱۱ است: قسمت ۱: EN197 (BS, EN 197-1: 2011). دارای کلاس مقاومتی ۴۲/۵ نیوتن بر میلی‌متر مربع می‌باشد (حداقل مقاومت ۲۸ روزه این سیمان پرتلند معمولی ۴۲/۵ مگاپاسکال است). پوزولان طبیعی مورد استفاده در آزمایش، از ایران، دامنه‌های کوهستان آسیاب‌شده از شهرستان سیاهکل در استان گیلان برداشت شده است. این خاکستر آتشفشانی، ریزدانه بوده و پرکننده مناسب، با خاصیت چسبندگی برای جایگزینی بخشی از سیمان در بتن خواهد بود. برای تولید بتن دوستدار طبیعت با کاهش مصرف سیمان و جایگزینی بخشی از سیمان با ماده معدنی و خواص سیمانی، پوزولان طبیعی آسیاب‌شده گزینه مناسبی است. سختی آن کم است و به راحتی می‌توان آن را آسیاب کرد. این پوزولان حاوی مقادیر قابل توجهی SiO<sub>2</sub> و Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> است که می‌تواند هیدرات سیلیکات کلسیم و هیدرات آلومینات کلسیم را از طریق ترکیبی از هیدروکسید کلسیم تولید شده توسط هیدراتاسیون سیمان تشکیل دهد. نباید فراموش کرد که استفاده بیش از حد، از پوزولان آسیاب‌شده به جای بخشی از سیمان به مقاومت نهایی بتن آسیب می‌رساند و این جایگزینی باید بهینه باشد. جدول (۱) ترکیبات شیمیایی رایج و خواص فیزیکی سیمان پرتلند مورد استفاده و پوزولان معدنی آسیاب‌شده و پوزولان‌های کاربردی مشهور را به صورت درصدی نشان می‌دهد. حداقل ترکیب قابل قبول کل SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> طبق استاندارد ASTM C618 برای پوزولان‌های طبیعی ۷۰ درصد کل است که این عدد برای پوزولان معدنی آسیاب‌شده معادل ۸۵/۸۳ درصد و کاملاً قابل قبول است (ASTM, C618: 2014). در ساخت بتن، نمونه‌های مورد آزمایش از ماسه معمولی استفاده می‌شود که با توجه به تعریف مدول نرمی ماسه، ماسه مورد استفاده ریزدانه بوده و در محدوده (مدول ریزدانه ۲/۲ تا ۲/۶) خواهد بود (Koirala و همکاران، ۲۰۱۷). شن خرد شده با حداکثر اندازه اسمی ۱۳ میلی‌متر به عنوان سنگ‌دانه درشت استفاده شد. طبق گزارشات آزمایشگاهی، شن و ماسه ۰/۲۷ درصد رطوبت و ۱/۰۲ درصد جذب آب دارند. چگالی نسبی سیمان پرتلند معمولی و پوزولان‌های آسیاب‌شده طبیعی نیز مطابق با استاندارد

جدول ۱- مقایسه ترکیب شیمیایی و فیزیکی پوزولان معدنی آسیاب با سیمان، دوده سیلیس (SF)، متاکائولین (MK)، خاکستر بادی (FA)، سرباره آسیاب شده کوره آهن گدازی (GGBS) زئولیت فوق ریز (SFZ)

ترکیبات شیمیایی (%)	سیمان	پوزولان معدنی محلی	SF Venkat و همکاران، ۲۰۲۱	MK Venkat و همکاران، ۲۰۲۱	FA Liu و همکاران، ۲۰۱۹	GGBS Sasui و همکاران، ۲۰۲۱	SFZ Chen و همکاران، ۲۰۱۹
SiO <sub>2</sub>	۲۲/۹۲	۶۸/۹۸	۹۶/۸۵	۵۲/۵۲	۵۶/۷۳	۳۳/۱۹	۶۲/۸۷
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۷/۴۱	۱۴/۹۲	۱/۸۸	۴۴/۶۵	۱۹/۳۰	۱۵/۷۴	۱۳/۴۶
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳/۰۸	۱/۹۳	۰/۵	۱/۸۴	۶/۵۸	۰/۶	۱/۳۵
CaO	۵۷/۵۱	۳/۳۴	۰/۲۵	۰/۳۴	۵/۵۴	۴۲/۱۱	۲/۷۱
MgO	۴/۱۳	۲/۸۲	۰	۰	۲/۹۸	۷/۸۹	۲/۳۸
SO <sub>3</sub>	۱/۷۷	۰/۵۷	۰	۰	۱/۱۲	۲/۶۴	۰/۴۵
K <sub>2</sub> O	۰/۶۲	۱/۰۷	۲/۴۱	۲/۶۸	۱/۸۴	۰/۴۲	۱/۳
Na <sub>2</sub> O	۰/۳۱	۲/۴۴	۰/۳۹	۰/۰۴	۰/۳۱	۰/۱۶	۲/۲
مشخصات فیزیکی							
Specific gravity	۳/۱۲	۲/۲۴	۲/۲۷	۲/۵۷	۲/۵۰	۲/۸۸	۲/۲۴
Specific surface (m <sup>2</sup> /g)	۰/۳۷	۱/۲۳	۱۶/۴۶	۲/۵۴	۰/۳۹	۰/۴۴	۰/۳۱
Particle size (μm)	۹/۳۴	۳/۳۰	۰/۱۴	۳/۵۰	۸/۷۲	۱۵/۸۷	۳/۵۵

جدول ۲- مشخصات الیاف فولادی و پلی پروپیلن

نوع فایبر	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	مقاومت کششی (MPa)	قطر (mm)	طول (mm)	ازدیاد طول (%)	مدول الاستیسیته (GPa)
فولاد	۷/۸۵	۲۴۰۰	۰/۲۲	۱۲-۱۴	۳/۵-۴	۲۱۰
پلی پروپیلن	۰/۹۱	۴۰۰	۰/۰۲۷	۱۹	۴/۵-۹	۳/۵

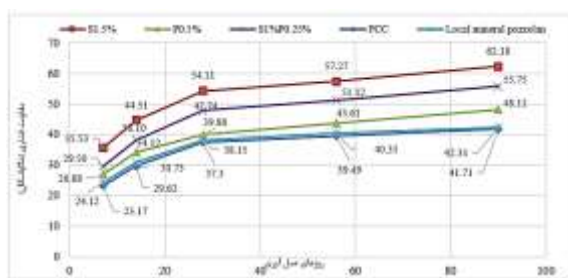
جدول ۳- جزئیات مخلوط پوزولان آسیاب و الیاف

فولادی	پلی پروپیلن	هیبرید	پوزولان معدنی		آب (kg/m <sup>3</sup> )	فوق روان کننده (kg/m <sup>3</sup> )	آب/سیمان	ماسه (kg/m <sup>3</sup> )	شن (kg/m <sup>3</sup> )	کسر حجم الیاف				وزن بتن (kg/m <sup>3</sup> )		
			%	(Kg)						Kg/m <sup>3</sup>	%	Kg/m <sup>3</sup>	%		Kg/m <sup>3</sup>	
PCC	بتن سیمانی معمولی	۴۲۹/۶	۰	۰	۲۱۵	۴/۳	۰/۵	۷۲۸/۴	۷۲۸/۴	۰	۰	۰	۰	۰	۲۱۰۵/۷	
Local Mineral Pozzolan	بتن پوزولانی معدنی	۳۶۵/۲	۱۵	۶۴/۴۴	۲۱۵	۴/۳	۰/۵	۷۲۸/۴	۷۲۸/۴	۰	۰	۰	۰	۰	۲۱۰۵/۷	
S 1.5%	بتن با ۱/۵٪ حجمی الیاف فولادی	۳۶۵/۲	۱۵	۶۴/۴۴	۲۱۵	۴/۳	۰/۵	۷۲۸/۴	۷۲۸/۴	۱/۵	۱۱۷/۷۵	۰	۰	۰	۲۲۲۳/۵	
P 0.5%	بتن با ۰/۵٪ حجمی الیاف پلی پروپیلن	۳۶۵/۲	۱۵	۶۴/۴۴	۲۱۵	۴/۳	۰/۵	۷۲۸/۴	۷۲۸/۴	۰	۰	۰/۵	۱۵۵/۴	۰	۲۱۱۰/۳	
S 1% P 0.25%	بتن هیبرید ۱/۵ و ۰/۵٪ الیاف فولاد و پلی پروپیلن	۳۶۵/۲	۱۵	۶۴/۴۴	۲۱۵	۴/۳	۰/۵	۷۲۸/۴	۷۲۸/۴	۰	۰	۰	۰	۱/۲۵	۸۰/۷۸	۲۱۸۶/۵

جدول ۴- ویژگی‌های آزمایش و نمونه

استاندارد بین‌المللی	سن عمل‌آوری (روز)	ابعاد (mm)	شکل	آزمایش
(BS EN12390-3:2009)	۷، ۱۴، ۲۸، ۵۶، ۹۰	۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰	مکعب	مقاومت فشاری
(ASTM C1609:2019)	۷، ۱۴، ۲۸، ۵۶، ۹۰	۴۰۰×۱۰۰×۱۰۰	منشور	مقاومت خمشی
(ASTM E119: 2012)	۲۸، ۹۰	۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰	مکعب	مقاومت در برابر آتش

حدود ۲۷ درصد افزایش یافت، این مقاومت در ۲۸ روز، ۲۷ درصد و در ۹۰ روز، ۳۳ درصد افزایش یافت. عمل‌آوری در شرایط محیطی نمونه‌های ۲۸ روزه نسبت به عمل‌آوری همان نمونه غوطه‌ور در آب در مدت مشابه، ۱۱ درصد کاهش یافته است.



شکل ۱- توسعه مقاومت فشاری با افزایش سن

در یک تعریف کلی، الیاف موجود در بتن با کاهش تنش در ترک‌ها، انتشار ترک‌ها را کاهش داده و مقاومت فشاری بتن را بهبود می‌بخشد. همان‌طور که می‌دانیم، ترک‌های ریز در بتن وجود دارد که به دلیل شرایط فیزیکی کوچک الیاف پلی‌پروپیلن، بهتر می‌توانند از گسترش این ترک‌های ریز جلوگیری کنند. این الیاف، در پل زدن ترک‌های کوچک و در نتیجه افزایش مقاومت فشاری مؤثر هستند. الیاف فولادی به دلیل ابعاد بزرگتر و طول بیشتر نسبت به اندازه ترک‌ها در ابتدای تشکیل، از گسترش ترک‌های ریز اولیه جلوگیری نمی‌کند. با این حال، در نزدیکی لحظه شکست، الیاف فولادی با افزایش تحمل و شکل‌پذیری از انبساط عمده در ترک‌ها جلوگیری می‌کنند. ترک‌های ریز در بتن وجود دارد که به دلیل شرایط فیزیکی کوچک الیاف پلی‌پروپیلن، بهتر می‌توانند از گسترش این ترک‌های ریز جلوگیری کنند. این الیاف، در پل زدن ترک‌های کوچک و در نتیجه افزایش مقاومت فشاری مؤثر هستند. الیاف فولادی به دلیل ابعاد بزرگتر و طول بیشتر نسبت به اندازه ترک‌ها در ابتدای تشکیل، از گسترش ترک‌های ریز اولیه جلوگیری نمی‌کند. با این حال، در نزدیکی لحظه شکست، الیاف فولادی با افزایش تحمل و شکل‌پذیری از انبساط عمده در ترک‌ها جلوگیری می‌کنند. به دلیل تعداد زیاد و جهت‌گیری الیاف در بتن، الیاف می‌توانند غلظت تنش را در نوک ترک‌ها کاهش دهند. دوخت ترک در بتن توسط الیاف باعث کاهش انتشار ترک و

پس از ۲۴ ساعت، نمونه‌ها از قالب خارج شدند و چهار گروه از نمونه‌ها به صورت غوطه‌ور در آب، تا سن ۹۰ روز و چهار گروه دیگر در شرایط محیطی تا سن ۲۸ روز عمل‌آوری شدند. جزئیات مخلوط پوزولان آسیاب و الیاف در جدول (۳) آمده است.

#### ۴-۲- روش تست

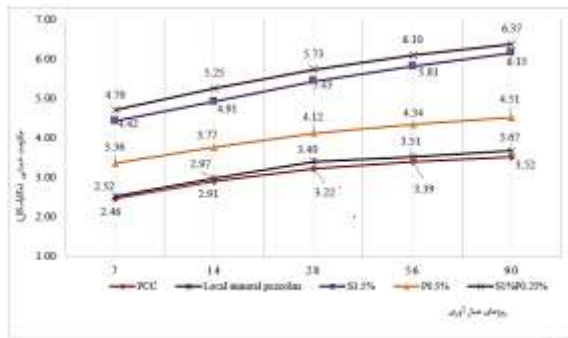
برای همه آزمایش‌های انجام شده، استانداردهای بین‌المللی مورد استفاده، نام آزمایش، شکل نمونه، ابعاد و سن نمونه‌ها مطابق جدول (۴) انجام شد.

#### ۳- نتایج و بحث

##### ۳-۱- مقاومت فشاری

شکل (۱) نتایج مقاومت فشاری مخلوط‌های بتن الیافی حاوی پوزولان‌های معدنی محلی با نسبت آب به سیمان ۰/۵ را نشان می‌دهد. طبق انتظار، با افزایش سن بتن، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. با این حال، برای بتن‌های ساخته شده با پوزولان‌های معدنی محلی، افزایش مقاومت بیشتری در سنین بالاتر به دلیل پاسخ پوزولانی خوب و اثر حضور الیاف مشاهده شده است. در مقایسه با نمونه بتن سیمانی معمولی<sup>۱۲</sup>، مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه حاوی الیاف فولادی حدود ۵۳ درصد افزایش یافت. این مقاومت فشاری در ۲۸ روز، ۴۵ درصد و در ۹۰ روز ۴۹ درصد افزایش یافت. همچنین؛ عمل‌آوری در شرایط محیطی نمونه‌های ۲۸ روزه، نسبت به عمل‌آوری همان نمونه غوطه‌ور در آب در ۲۸ روز، ۷ درصد کاهش یافته است.

پوزولان‌های معدنی محلی در ۲۸ و ۹۰ روز عمل‌آوری، مقاومت فشاری ۲/۲۵ و ۱/۴۴ درصد بیشتر از بتن سیمانی ساده نشان دادند. مقاومت فشاری نمونه ۷ روزه حاوی الیاف پلی‌پروپیلن، در مقایسه با نمونه بتن سیمانی معمولی حدود ۱۶ درصد افزایش یافته است. این مقاومت فشاری در ۲۸ روز، ۵۰ درصد و در ۹۰ روز، ۱۵ درصد افزایش یافته است. همچنین؛ عمل‌آوری در شرایط محیطی نمونه‌های ۲۸ روزه، نسبت به عمل‌آوری همان نمونه غوطه‌ور در آب ۱۳ درصد کاهش داشته است. در نمونه‌های حاوی هیبرید الیاف فولاد و پلی‌پروپیلن نسبت به نمونه بتن سیمانی معمولی، مقاومت فشاری نمونه ۷ روزه، حاوی الیاف هیبریدی



شکل ۲- رشد استحکام خمشی با افزایش روزهای عمل آوری

نام دستگاه مورد استفاده در این تست، دستگاه Universal Flexural Set است و برای هر نمونه از میزان بارگذاری ۰/۲ میلی-متر بر دقیقه استفاده شد. طبق استاندارد مندرج در جدول (۴)، تیر بر روی تکیه‌گاه قرار می‌گیرد که حرکتی ندارد و ثابت است و می‌توان آن را در جهت عمودی ثابت در نظر گرفت. در طول آزمایش، مقادیر جابه‌جایی و مقدار بار مربوط به آن جابجایی توسط دستگاه، ثبت شد. طبق استاندارد ASTM C1609، حداکثر بار اعمال شده توسط دستگاه تست با (P)، طول دهانه (L)، عمق (d)، عرض (b)، مدول گسیختگی (مقاومت) "f" به صورت  $f = PL/(bd^2)$  بیان می‌شود.

پوزولان معدنی محلی در ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب ۵/۵۹ و ۴/۲۶ درصد مقاومت کششی بیشتری نسبت به بتن سیمانی معمولی نشان داد. نتایج تجربی نشان داده است که مقاومت خمشی حاصل از ترکیبی از نمونه‌های الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن، نتایج بهتری به دست می‌دهد و این، با یافته‌های Yap و همکاران (۲۰۱۳) مطابقت دارد. با بررسی شکل (۲)، مشاهده می‌شود که نمونه‌های هیبریدی دارای استحکام خمشی بالاتری در تمام سنین عمل آوری هستند. به عنوان مثال، در عمل آوری ۲۸ روزه به روش غوطه‌ور در آب، مقاومت خمشی نمونه هیبریدی حدود ۷۸ و ۳۹ و ۵ درصد به ترتیب، بیشتر از نمونه بتن سیمانی معمولی و نمونه حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و نمونه با الیاف فولادی بود. همچنین؛ در عمل آوری ۹۰ روزه، نمونه هیبریدی مقاومت خمشی بیشتری در حدود ۸۱ و ۴۱ و ۳/۵ درصد به ترتیب، از نمونه بتن سیمانی معمولی و نمونه با الیاف پلی‌پروپیلن و نمونه با الیاف فولادی داشت. نمونه‌های عمل آوری شده غوطه‌ور در آب، در سن ۲۸ روزگی نسبت به نمونه‌های عمل آوری شده در شرایط محیطی، مقاومت خمشی بالاتری داشتند. این افزایش مقاومت برای نمونه بتن سیمانی معمولی ۵/۵ درصد، برای نمونه حاوی پوزولان معدنی ۷/۲۵ درصد، برای نمونه حاوی الیاف فولادی ۳/۲ درصد، برای نمونه حاوی الیاف پلی‌پروپیلن ۶ درصد و برای نمونه حاوی الیاف هیبریدی ۳/۴ درصد است.

افزایش مقاومت فشاری می‌شود. البته این امر مستلزم استفاده از مقادیر کافی الیاف است. همچنین؛ باید توجه داشت که مصرف زیاد الیاف، منجر به پدیده گلوله شدن می‌شود در ارتباط با تأثیر الیاف فولادی در تست مقاومت فشاری می‌توان گفت که این الیاف به دلیل مدول الاستیسیته بالای خود (در مقایسه با الیاف پلی‌پروپیلن و بافت سطح ناهموار)، باعث افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه بتن سیمانی معمولی می‌شوند. آن‌ها می‌توانند، فشار را بهتر تحمل کنند و تنش را با انسجام در ماتریس توزیع کنند. استفاده از الیاف در کسرهای با حجم بالا باعث متراکم شدن الیاف در مخلوط و ایجاد منافذ و تخلخل می‌شود. همچنین؛ مقاومت فشاری نمونه‌های بتن الیافی را در مقایسه با نمونه‌های بتن ساده کاهش می‌دهد. این یافته‌ها را می‌توان در نمونه‌های حاوی الیاف هیبریدی نیز مشاهده کرد که به دلیل چگالی الیاف در کسر حجمی، مقاومت فشاری کمتری نسبت به نمونه‌های حاوی الیاف فولادی داشتند نیز می‌توان مشاهده کرد. همان‌طور که نتایج تحقیقات افروغ ثابت و همکاران، (تأثیر الیاف هیبریدی فولاد- پلی‌پروپیلن بر روی بتن با مقاومت بالا) نشان داد که با جایگزینی جزئی الیاف فولادی با الیاف پلی‌پروپیلن، کاهش مشابهی در مقاومت فشاری وجود دارد (Afroughsabet و همکاران، ۲۰۱۵).

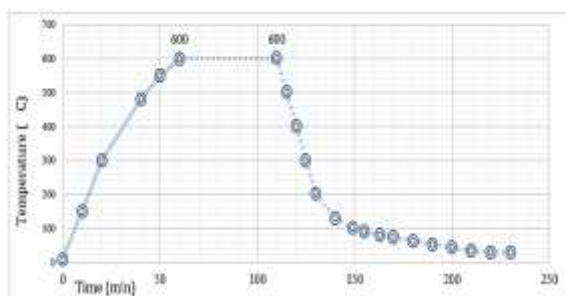
طبق یافته‌های آزمایشگاهی، نمونه‌های حاوی الیاف هیبریدی با حجم بالا، جریان‌پذیری ضعیفی دارند. علاوه بر این، مقاومت فشاری در نمونه‌های هیبریدی فولاد و پلی‌پروپیلن به دلیل وجود منافذ و اختلاط نامناسب، کاهش می‌یابد. یافته‌های آزمایشگاهی انتظار افزایش مقاومت در نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن را ندارند، اما با افزودن الیاف فولادی، مقداری مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. کاهش مقاومت فشاری در نمونه‌های ۲۸ روزه با عمل آوری در شرایط محیطی را می‌توان به واکنش پوزولانی و سطح جذب آب بالای پوزولان آسیاب، نسبت داد که منجر به واکنش هیدراتاسیون ناقص می‌شود. مقایسه افزایش مقاومت فشاری نسبت به روزهای عمل آوری بتن در شکل (۱) نشان داده شده است.

### ۳-۲- مقاومت خمشی

به منظور بررسی و تجزیه و تحلیل اثر پوزولان آسیاب و الیاف بر مقاومت خمشی، آزمایش خمشی سه نقطه‌ای با نمونه‌های منشوری شکل ساخته شده از مخلوط الیاف مختلف، انجام شد که نتایج حاصل در شکل (۲) آمده است. ابعاد تیرهای آزمایش شده در مقطع ۱۰۰ میلی‌متر (عرض b) × ۱۰۰ میلی‌متر (عمق d) و طول کل ۴۰۰ میلی‌متر بوده است.

شده در جدول (۳) ساخته شد. عمل آوری نمونه‌ها در غوطه‌ور شدن در آب برای مدت زمان نوشته شده در جدول (۴) انجام شد. در هر سنی که مورد آزمایش قرار گرفت، سه نمونه بتن سیمانی معمولی ساخته شد و مانند نمونه‌های دیگر تحت آزمون قرار گرفت، این نمونه‌ها را قادر می‌سازد نمونه‌های مقاوم در برابر آتش را با نمونه‌های بتن سیمانی معمولی مقایسه کنیم.

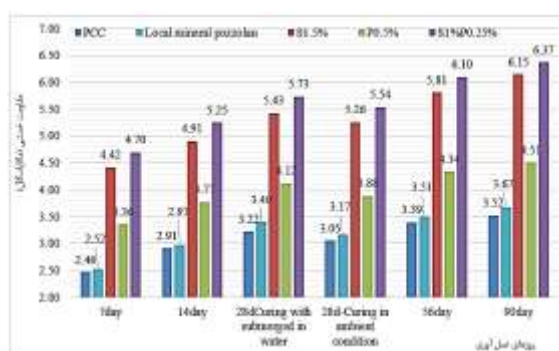
در ابتدا، سه نمونه کلی (برای میانگین) از هر سن از آزمایش مقصد وزن شده و سپس تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند. سپس برای آزمایش مقاومت در برابر آتش، نمونه‌های باقی‌مانده در سنین مورد نظر (۲۸ و ۹۰ روزه) در کوره الکتریکی ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد با سرعت حرارت‌دهی ۱۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه، قرار داده شده و به مدت یک ساعت در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد در دمای ثابت باقی ماند. سپس نمونه‌ها از کوره الکتریکی خارج و در دمای محیط نگهداری می‌شوند تا تا دمای محیط خنک شوند. منحنی‌های دما و زمان برای نمونه‌ها همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده است محاسبه و ترسیم شد.



شکل ۴- منحنی زمان و دمای کوره الکتریکی

شکل این منحنی مشابه فرآیند ارجاع شده به ISO 834-14 و ASTM E119 است و با یافته‌های (Abdul Awal و همکاران، ۲۰۱۵؛ Gai-Fei Peng و همکاران، ۲۰۰۶) مشابه است. پس از سرد شدن نمونه‌ها، وزن آن‌ها کنترل شد و سپس میزان کاهش وزن آن‌ها محاسبه و به صورت مقایسه‌ای در شکل (۵) ترسیم شد. کاهش جرم در نمونه‌های حاوی پوزولان معدنی محلی مشاهده شده است. علت را می‌توان به اندازه بسیار کوچک آن و قرار گرفتن آن بین سنگ‌دانه‌ها مرتبط دانست. با بررسی شکل (۵)، درمی‌یابیم که نمونه‌های بتن سیمانی معمولی بیشترین کاهش جرم را دارند. بتن حاوی الیاف فولادی و الیاف ترکیبی فولاد پلی‌پروپیلن به ترتیب کمترین افت جرم را داشتند و بتن حاوی پلی‌پروپیلن کمتر از بتن سیمانی معمولی کاهش جرم داشت اما وزن خود را بیشتر از نمونه‌های حاوی فولاد و هیبرید از دست داد.

در نمونه‌های بتنی بدون الیاف مقاومت خمشی پایینی مشاهده شده است. اما وجود الیاف در بتن باعث افزایش شکل‌پذیری آن و افزایش مقاومت خمشی با توزیع نیرو و تأخیر در شکست نمونه می‌شود. این مشاهدات با یافته‌های تحقیقات قبلی که فعالیت پوزولانی آسیاب در تشکیل هیدرات‌های سیمان با کاهش تخلخل و افزایش انسجام ماتریس سیمان هیدراته افزایش می‌یابد و منجر به افزایش قابل توجه استحکام تا ۹۰ روز می‌شود مطابقت دارد (شکل (۳)). Khan و همکاران (۲۰۱۱) و Celik و همکاران (۲۰۱۴) نتایج مطالعات تجربی خود بر روی نمونه‌های بتن سیمانی معمولی با ترکیب پوزولان طبیعی را به روشی مشابه ارائه کردند.



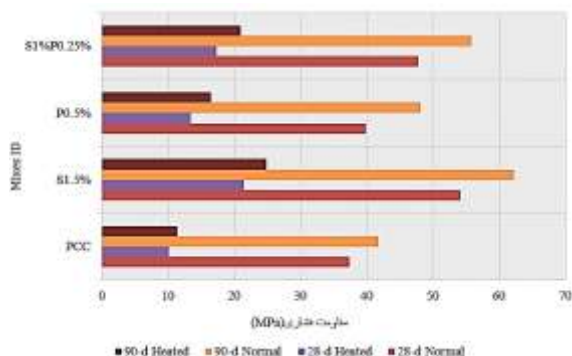
شکل ۳- مقایسه رشد مقاومت خمشی بتن با الیاف مختلف

نتایج نشان می‌دهد که الیاف پلی‌پروپیلن به دلیل طول کوتاه و مدول الاستیسیته کم، نتوانسته‌اند تأثیر زیادی بر مقاومت خمشی داشته باشند و نسبت به نمونه بتن سیمانی معمولی بهبود قابل توجهی نداشته‌اند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که طول الیاف، عامل مهمی در میزان مدول خمشی است. در نمونه‌های منشوری با الیاف ترکیبی فولاد و پلی‌پروپیلن مشاهده شد که الیاف پلی‌پروپیلن تا حدودی از رشد ترک‌های ریز جلوگیری می‌کند اما با افزایش فشار، اثر الیاف فولادی بعد از ترک اولیه و ظهور اولین نقطه حداکثر بار می‌باشد که ظرفیت باربری و شکل‌پذیری سطح مقطع نمونه‌ها را افزایش می‌دهد. بررسی یک نمونه منشور پس از بارگذاری تا شکست، نشان می‌دهد که تعدادی الیاف فولادی از قسمت شکست خارج می‌شوند. به عبارت دیگر، وقوع چنین پدیده‌هایی در داخل سطح مقطع منشور به دلیل عملکرد مناسب فیبر هیبریدی باعث افزایش ظرفیت باربری و شکل‌پذیری سطح مقطع پس از وقوع اولین ترک می‌شود.

#### ۴- مقاومت در برابر آتش

به منظور بررسی مقاومت پوزولان معدنی محلی و مطالعه اثر الیاف و ترکیب آن‌ها در برابر آتش، نمونه‌هایی با ترکیبات اشاره

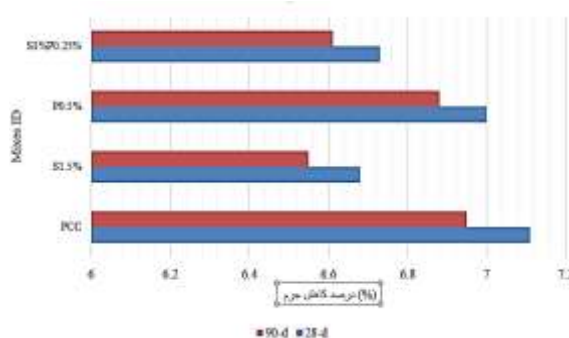
ریزترک‌ها جلوگیری کرده و با توزیع یکنواخت ریزترک‌ها در سطح سطح، مقاومت فشاری را افزایش می‌دهند. در مطالعات Gai-Fei Peng و همکاران (۲۰۰۶) نیز به مورد مشابهی اشاره شده است. این الیاف همچنین در توزیع تنش و افزایش نسبی استحکام در نمونه‌ها مؤثر هستند. الیاف فولادی بر فشار داخلی ماتریس ناشی از بخار آب در دماهای بالا غلبه و همچنین از عبور ترک در داخل ماتریس بتن جلوگیری می‌کنند.



شکل ۶- مقاومت فشاری نمونه‌های قرار داده شده در کوره در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد با نمونه‌های معمولی

نمونه‌های حاوی هیبریدهای الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن دارای خواص بین دو الیاف ذکر شده به صورت جداگانه هستند. کاهش مقاومت فشاری این نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های فولادی را می‌توان به منافذ ایجاد شده از ذوب الیاف پلی‌پروپیلن و منافذی که قبلاً به دلیل تعداد زیاد الیاف و توزیع غیریکنواخت الیاف در ساخت الیاف وجود داشت، مرتبط دانست. نباید فراموش کرد که در تمامی نمونه‌هایی که در آن‌ها از الیاف استفاده شده است، وجود پوزولان‌های معدنی محلی در این نمونه‌ها به دلیل ساختار فیزیکی کوچک و قابلیت مطلوب برای قرارگیری بین مصالح سنگی در بتن، علاوه بر این نحوه مطلوب قرارگیری، آب بین منافذ و حفره‌ها را از بین می‌برد و به هیدراتاسیون کمک می‌کند. با توجه به دلایل شیمیایی ساختاری آن، باعث می‌شود ماتریس بهتر با الیاف یکپارچه شود، که در کل مقاومت فشاری را در مقایسه با نمونه‌هایی که الیاف وجود ندارند افزایش می‌دهد.

نمونه‌هایی که در معرض آتش هستند دچار تخریب سطحی شده و تغییر رنگ می‌دهند. گرمایی که به سطح بتن برخورد می‌کند باعث توزیع تنش فشاری می‌شود و با افزایش آن تنش کششی عمود بر تنش فشاری مذکور ایجاد می‌شود. در نهایت با افزایش دما تنش فشاری و در نتیجه تنش کششی افزایش می‌یابد و اگر این تنش کششی بیشتر از مقاومت کششی بتن باشد باعث ریزش سطح بتن می‌شود (Ozaw و همکاران، ۲۰۱۲).



شکل ۵- کاهش جرم پس از قرار گرفتن در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد

کاهش جرم در بتن مخلوط با پوزولان معدنی محلی می‌تواند به دلیل خروج آب بین سنگ‌دانه‌ها و خمیر سیمان باشد که با افزایش سرعت انتقال حرارت افزایش می‌یابد. یکی دیگر از دلایل مهم کاهش وزن بتن پس از قرار گرفتن در معرض آتش، تبخیر آب آزاد در ژل هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) و تجزیه هیدروکسید کلسیم  $Ca(OH)_2$  است. این امر همچنین باعث می‌شود که ماتریس سیمان خاصیت اتصال خود را از دست داده و مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش یابد. در مطالعات Qianmin Ma و همکاران (۲۰۱۵) و Jianzhuang Xiao و همکاران (۲۰۰۶) موارد مشابهی اشاره شده است.

الیاف پلی‌پروپیلن پس از رسیدن به حرارت ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد تأثیری در بهبود مقاومت فشاری بتن ندارند. نتیجه مشابهی توسط Poon و همکاران (۲۰۰۴) گزارش شده است. الیاف پلی‌پروپیلن در دمای حدود ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد ذوب می‌شوند و هنگامی که رطوبت موجود در منافذ در اثر گرما تبخیر می‌شود، می‌تواند از طریق منافذ به جامانده از الیاف پلی‌پروپیلن مذاب از بتن خارج شود و به همین دلیل، پوسته پوسته شدن در بتن‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن کمتر از سایر نمونه‌های بتنی است (Gai-Fei Peng و همکاران، ۲۰۰۶).

به طور کلی الیاف فولادی به دلیل خواص فیزیکی خود می‌توانند بر خواص مکانیکی بتن پس از قرار گرفتن در معرض گرما تأثیر مثبت داشته باشند. یکی دیگر از دلایل کاهش مقاومت به‌ویژه در مورد نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و نمونه‌های الیاف هیبریدی پلی‌پروپیلن و فولاد، ذوب بخشی از الیاف داخل بتن به دلیل قرار گرفتن در معرض دمای بالا می‌باشد.

شکل (۶) کاهش مقاومت فشاری پس از قرار گرفتن در معرض آتش را با بتن سیمانی معمولی مقایسه می‌کند. مشاهده می‌شود که تمام نمونه‌ها در معرض کاهش مقاومت هستند. مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی الیاف فولادی کمتر تحت تأثیر حرارت قرار می‌گیرد. الیاف فولادی به دلیل افزایش فشار بارگذاری از رشد



تن دی اکسید کربن (CO<sub>2</sub>) چه مقدار انرژی جذب می کند. هرچه GWP بزرگتر باشد، یک گاز معین در مقایسه با CO<sub>2</sub> در آن بازه زمانی بیشتر زمین را گرم می کند. دوره زمانی معمولاً برای GWP ها ۱۰۰ سال است. GWP ها واحد اندازه گیری مشترکی را ارائه می دهند که اجازه می دهد تا تخمین های انتشار گازهای مختلف را بتوان بر اساس آن اندازه گیری کرد.

CO<sub>2</sub>، طبق تعریف، دارای GWP به مقدار واحد و بدون در نظر گرفتن دوره زمانی است، زیرا گازی است که به عنوان مرجع استفاده می شود، CO<sub>2</sub> برای مدت طولانی در سیستم آب و هوایی باقی می ماند. انتشار CO<sub>2</sub> باعث افزایش غلظت CO<sub>2</sub> در جو می شود که هزاران سال ادامه خواهد داشت.

#### ۶-۱- عوامل انتشار CO<sub>2</sub> از مواد و حمل و نقل

جدول (۶) ضریب انتشار CO<sub>2</sub> از هر قسمت از مخلوط بتن (GWP) و جدول (۷) مسافت حمل مصالح و مواد خام بتن را تا محل آزمایش نشان می دهد. طبق مطالعات قبلی، ضریب انتشار CO<sub>2</sub> برای تولید بتن ۰/۱۰۰ (Kg CO<sub>2</sub>/Kg) است (Kim و همکاران، ۲۰۱۵؛ Yang و همکاران، ۲۰۱۵؛ Yang و همکاران، ۲۰۱۵؛ Kelechi و همکاران، ۲۰۲۲). جدول (۸) مجموع انتشار CO<sub>2</sub> از هر بخش از مواد خام، تولید بتن تازه، حمل و نقل و مجموع کلی هر سه بخش آن ها را نشان می دهد. جهت محاسبه میزان انتشار گاز CO<sub>2</sub> ناشی از تولید بتن تازه در جدول (۱۰)، مطابق آنچه پیشتر گفته شد داریم:  $2101/4 \times 0/100 = 16/81$

به منظور محاسبه مقدار CO<sub>2</sub> منتشر شده از تولید بتن گروه G1، در خصوص سیمان، مقدار ضریب GWP سیمان از جدول (۶) در مقدار سیمان نمونه بتنی که قبلاً جزئیات آن در جدول (۲) ردیف G1 آمده است ضرب می شود:  $429/6 \times 0/84 = 360/86$  همچنین مطابق بررسی و مطالعات قبلی، حمل و نقل با کامیون دیزلی ۱۰ تن به ازای هر تن کیلومتر، ۰/۱۲۲ کیلوگرم CO<sub>2</sub> در هر کیلومتر تولید می کند (Kawai و همکاران، ۲۰۰۵). جدول (۹) مجموع CO<sub>2</sub> منتشر شده ناشی از حمل مصالح KgCO<sub>2</sub> جهت ردیف G1 در جدول (۸) را شرح می دهد.

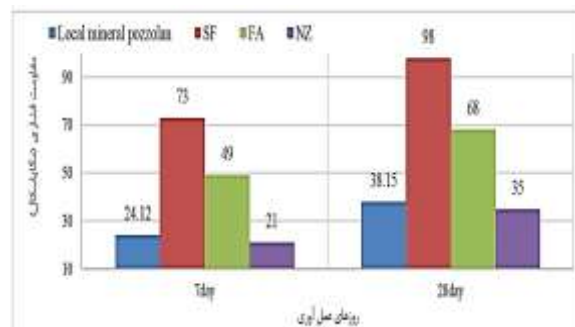
آلودگی CO<sub>2</sub> منتشر شده برای هر گروه بتن، از مجموع CO<sub>2</sub> منتشر شده در اثر حمل در هر جزء مخلوط بتن به دست می آید. همچنین مجموع آلودگی منتشر شده ناشی از ساخت بتن از مجموع ردیف های مواد خام و تولید بتن تازه و حمل و نقل مواد خام مطابق جدول (۱۰) حاصل می شود.

همان گونه که در شکل (۸) نشان داده شده است: افزودن ۱۵ درصد وزنی پوزولان معدنی جایگزین سیمان به بتن می تواند انتشار CO<sub>2</sub> را تا ۱۵/۲۰ درصد به ازای هر متر مکعب بتن تولیدی،

در دمای ۴۵۰ درجه سانتی گراد باعث تجزیه شیمیایی خمیر سیمان می شود بنابراین تجزیه اترینگیت<sup>۱۳</sup> منجر به جمع شدن بتن در ناحیه انتقال می شود. در دمای ۵۵۰ درجه سانتی گراد، هیدروکسید کلسیم و کربنات کلسیم تجزیه می شوند و اکسید کلسیم (آهک) تولید می شود که در صورت ترکیب با رطوبت، به دلیل ماهیت منبسط شونده، تخریب بتن را تسریع می کند. هیدرات سیلیکات کلسیم (C-H-S) که یکی از عوامل اصلی مقاومت در ماتریس است، در دمای بالای ۵۵۰ درجه سانتی گراد تجزیه می شود که باعث افزایش حجم حفره ها در بتن و در نتیجه کاهش مقاومت فشاری می شود (Gai-Fei Peng و همکاران، ۲۰۰۸؛ Abdul Awal و همکاران، ۲۰۱۵).

#### ۵- مقایسه نتایج با بتن های پوزولانی دیگر

همانطور که در جدول (۵) نشان داده شده است، در شرایط مشابه و جایگزینی ۱۵ درصد وزنی پوزولان به جای سیمان در نمونه بتن، پوزولان های معدنی محلی، مقاومت اولیه کمتری در ۷ و ۲۸ روز عمل آوری نسبت به بتن های پوزولانی دوده سیلیس و خاکستر بادی دارند اما میزان افزایش مقاومت فشاری در ۲۱ روز در بتن حاوی پوزولان معدنی، بیشتر از دو پوزولان گفته شده است. این افزایش قدرت می تواند به دلیل فعالیت مطلوب پوزولانی معدنی محلی باشد. این مقایسه در شکل (۷) به خوبی قابل مشاهده و تطبیق است.



شکل ۷- افزایش میزان نرخ مقاومت

#### ۶- ارزیابی تأثیر پارامترهای مخلوط بتن بر محیط زیست

پتانسیل گرمایش جهانی (GWP)<sup>۱۴</sup> اثرات گرمایش جهانی انتشار گازهای گلخانه ای را که در چرخه عمر یک محصول یا سیستم در یک زمان خاص در آینده رخ می دهد را نشان می دهد. این فاکتور برای امکان مقایسه اثرات گرمایش جهانی گازهای مختلف ایجاد شد. به طور خاص، این معیاری است که نشان می دهد انتشار یک تن گاز در یک دوره زمانی معین، نسبت به انتشار یک

پوزولان معدنی محلی آسیاب یک پوزولان مطلوب با کارایی موثر با مشخصات پوزولان‌های پُرکاربرد در دنیا می‌باشد و برای جلوگیری از انتشار بیشتر آلودگی CO<sub>2</sub> از صنایع سیمان و تولید بتن دوستدار محیط زیست کاربردی است.

کاهش دهد که این مقدار با مطالعات مشابه در سه پوزولان سیلیکافوم (SF) خاکستر بادی (FA)، سرباره کوره آهن‌گدازی (GGBS) تطابق دارد (Yang K-H و همکاران، ۲۰۱۵).

جدول ۵- مقدار رشد مقاومت فشاری در ۲۱ روز

روزهای عمل‌آوری	Local Mineral Pozzolan (MPa) پوزولان معدنی محلی	SF: سیلیکا فوم (MPa) Mohamed و همکاران، ۲۰۱۷	FA: خاکستر بادی (MPa) Mohamed و همکاران، ۲۰۱۷	NZ: ژئولیت طبیعی (MPa) Ramezani pour و همکاران، ۲۰۱۲
۷ روز	۲۴/۱۲	۷۳	۴۹	۲۱
۲۸ روز	۳۸/۱۵	۹۸	۶۸	۳۵
نرخ افزایش مقاومت	%۵۸/۱۷	%۳۲/۲۵	%۳۸/۷۸	%۶۶/۶۷

جدول ۶- ضریب انتشار CO<sub>2</sub> از هر قسمت از مخلوط بتن (KgCO<sub>2</sub>/Kg)

فاکتور ضریب انتشارگرما GWP	سیمان و همکاران، (۲۰۱۳)	پوزولان معدنی محلی (Seo و همکاران، ۲۰۱۳)	آب و Kim همکاران، (۲۰۱۵)	فوق روان‌کننده (Müller و همکاران، ۲۰۱۴)	ماسه و Kim همکاران، (۲۰۱۵)	شن و Habert همکاران، (۲۰۱۳)	فایبر فولادی و Kim همکاران، (۲۰۱۵)	فایبر پلی‌پروپیلن و Joshi همکاران، (۲۰۰۴)	هیبرید فایبرها
KgCO <sub>2</sub> /Kg	۰/۸۴	۰/۰۱۶	۰/۰۰۰۱۹۶	۰/۹۴۴	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۴۳	۱/۶	۱/۸۵	۱/۷۳

جدول ۷- مسافت حمل مصالح

مسافت	سیمان	پوزولان معدنی محلی	آب	فوق روان‌کننده	ماسه	شن	فایبر فولادی	فایبر پلی‌پروپیلن	هیبرید فایبرها
تا محل پروژه (رشت)	همدان	سیاهکل	رشت	تهران	بندرانزلی	رودبار	کرج	قزوین	بندرانزلی
(Km)	۵۳۸	۱۲۵	۰	۳۲۰	۴۱	۸۸	۲۷۷	۱۹۳	۳۵

جدول ۸- CO<sub>2</sub> تولیدشده از هر کدام از اجرای بتن به تفکیک

نام مخلوط	سیمان	پوزولان معدنی محلی	آب	فوق روان‌کننده	ماسه	شن	فایبر فولادی	فایبر پلی‌پروپیلن	هیبرید فایبرها	مجموع CO <sub>2</sub> منتشر شده از مواد خام بتن
بتن سیمانی معمولی G1	۳۶۰/۸۶	۰	۰/۰۴۲	۴/۰۶	۱/۸۹۳	۳/۱۳	۰	۰	۰	۳۶۹/۹۹
پوزولان معدنی محلی G2	۳۰۶/۷۷	۱/۰۳۱	۰/۰۴۲	۴/۰۶	۱/۸۹۳	۳/۱۳	۰	۰	۰	۳۱۶/۹۳
بتن با ۱/۵٪ حجمی الیاف فولادی G3	۳۰۶/۷۷	۱/۰۳۱	۰/۰۴۲	۴/۰۶	۱/۸۹۳	۳/۱۳	۱۸۸/۴	۰	۰	۵۰۵/۳۳
بتن با ۰/۵٪ حجمی الیاف پلی‌پروپیلن G4	۳۰۶/۷۷	۱/۰۳۱	۰/۰۴۲	۴/۰۶	۱/۸۹۳	۳/۱۳	۰	۸/۴۲	۰	۳۲۵/۳۵
بتن هیبرید ۱/۵ و ۰/۵٪ الیاف فولاد و پلی‌پروپیلن G5	۳۰۶/۷۷	۱/۰۳۱	۰/۰۴۲	۴/۰۶	۱/۸۹۳	۳/۱۳	۰	۰	۱۳۹/۷۴	۴۵۶/۶۷

جدول ۹- مجموع CO<sub>2</sub> منتشر شده ناشی از حمل مصالح KgCO<sub>2</sub> جهت ردیف G1

موادخام	سیمان	پوزولان معدنی محلی	آب	فوق روان کننده	ماسه	شن	فایبر فولادی	فایبر پلی پروپیلن	هیبرید فایبرها	مجموع CO <sub>2</sub> منتشر شده ناشی از حمل مصالح KgCO <sub>2</sub>
مقدار مواد خام (T)	۰/۴۲۹۶	۰	۲۱۵	۰/۰۰۴۳	۰/۷۲۸	۰/۷۲۸	۰	۰	۰	
مسافت (Km)	۵۳۸	۱۲۵	۰	۳۲۰	۴۱	۸۸	۰	۰	۰	
انتشار CO <sub>2</sub> به ازای هر تن کیلومتر (KgCO <sub>2</sub> )	۰/۱۲۲	۰/۱۲۲	۰/۱۲۲	۰/۱۲۲	۰/۱۲۲	۰/۱۲۲	۰	۰	۰	
مجموع	۲۸/۲۰	۰	۰	۰/۱۶۷	۳/۶۴	۷/۸۱	۰	۰	۰	۳۹/۸۱

جدول ۱۰- مجموع CO<sub>2</sub> منتشر شده

Group ID.	Mix ID.	CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> ) مواد خام	CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> ) Fresh concrete production	CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> ) Transportation	CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> ) Total pollution
G1	بتن سیمانی معمولی	۳۶۹/۹۹	۱۶/۸۱	۳۹/۸۱	۴۲۶/۶۱
G2	پوزولان معدنی محلی	۳۱۶/۹۳	۱۶/۸۱	۳۶/۵۸	۳۷۰/۳۲
G3	بتن با ۱/۵٪ حجمی الیاف فولادی	۵۰۵/۳۳	۱۷/۷۹	۴۰/۵۶	۵۶۳/۶۸
G4	بتن با ۰/۵٪ حجمی الیاف پلی پروپیلن	۳۲۵/۳۵	۱۶/۸۹	۳۶/۶۹	۳۷۸/۹۳
G5	بتن هیبرید ۱/۵ و ۰/۵٪ الیاف فولاد و پلی پروپیلن	۴۵۶/۶۷	۱۷/۴۹	۳۶/۹۳	۵۱۱/۰۹

می کند، بنابراین، نسبت آب به سیمان و افزایش استحکام فشاری و دوام را بهبود می بخشد.

۲) افزودن الیاف باعث افزایش مقاومت فشاری بتن شد. تحت فشار فزاینده، ترکها شروع شده و به سمت جلو حرکت کردند. با نزدیک شدن ترک به فیبر، جداسازی در سطح فیبر و ماتریس به دلیل تنش های کششی عمود بر مسیر مورد انتظار ترک پیش-رونده، آغاز شد. هنگامی که ترک پیش رونده به سطح درز مابین ماتریس و فیبر رسید، شدت تنش در بالای ترک کاهش یافت و در نتیجه انتشار ترک حذف و مسدود شد. این فرآیند اثر پل زدن یا جلوگیری از ترک خوردن الیاف در بتن را داشت.

۳) نتایج نشان داد که با افزایش سن بتن، مقاومت فشاری در تمامی نمونه ها در هر طرح مخلوط افزایش می یابد. نمونه ای که به صورت غوطه ور در آب عمل آوری شد، در مقایسه با نمونه ای که در شرایط محیطی عمل آوری شد، از استحکام بیشتری برخوردار بود.

۴) الیاف فولادی مقاومت فشاری را بهتر از الیاف دیگر بهبود می بخشد. الیاف فولادی و پلی پروپیلن مقاومت فشاری محوری را تا حدی افزایش می دهند، اما کسر حجمی الیاف باید در محدوده بهینه باشد. مقاومت فشاری تک محوری در مقایسه با مقاومت فشاری شامل هر دو نوع الیاف (هیبرید) افزایش معنی داری



شکل ۸- تأثیر کاهش انتشار CO<sub>2</sub> در بتن حاوی پوزولان در مقایسه با بتن سیمانی معمولی

## ۷- نتیجه گیری

در این مقاله، اثر افزودن پوزولان محلی جدید به نام آسیاب برای جایگزینی بخشی از سیمان در بتن بررسی شده است. کاهش مصرف سیمان برای کنترل انتشار گازهای گلخانه ای از کارخانه های سیمان و کاهش آلودگی های زیست محیطی ضمن حفظ و ارتقاء مشخصات مهندسی بتن با رویکرد مطالعه رفتار این بتن در برابر آتش از اهداف این کار بوده است. نتایج زیر از آزمایشات مرتبط حاصل شده است:

۱) این پوزولان معدنی با توجه به اندازه ذرات خود، بین سنگ دانه های ریز و درشت قرار گرفته، حفره ها را پر کرده و باعث خارج شدن آب مویرگی شده و از این طریق به هیدراتاسیون کمک

- Building Materials, 2015, 94, 73-82. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.051>
- Alavinia AHM, Nili M, Afroughsabet V, "An experimental and numerical study on how steel and polypropylene fibers affect the impact resistance in fiber-reinforced concrete", International Journal of Impact Engineering, 2012, 46, 62-73. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2012.01.009>
- Alyousef RMH, Tahir MMD, Alabduljabbar H, "Green concrete composites production comprising metalized plastic waste fibers and palm oil fuel ash", Materials Today: Proceedings, 2021, 39, 911-916. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.023>
- ASTM 2006, Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete. Fiber-Reinforced Concrete - C 1116. U.S: ASTM.
- ASTM C618 2014, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.
- BS EN 197-1:2011, Composition, specifications and conformity criteria for common cements. Cement Part 1. BSI Standards Publication.
- BS EN 1097-3:1998, Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Part 3: Determination of loose bulastm 2019k density and voids. BSI Standards Publication.
- BS EN 12390-3:2009, Testing hardened concrete Part 3: Compressive strength of test specimens. UK. BSI.
- Poon CS, Lam ZHSL, "Compressive behavior of fiber reinforced high-performance concrete subjected to elevated temperatures", Cement and Concrete Research, 2004, 34, 22. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.02.011>
- Celik KJMD, Mancio M, Meral C, Emwas AH, Mehta PK, Monteiro PJM, "High-volume natural volcanic pozzolan and limestone powder as partial replacements for Portland cement in self-compacting and sustainable concrete", Cement & Concrete Composites, 2014, 45, 136-147. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.09.003>
- Chen JJ, NPL, Kwan AKH, Li LG, "Lowering cement content in mortar by adding superfine zeolite as cement replacement and optimizing mixture proportions", Cleaner production, 2019, 210, 66-76. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.007>
- Christopher F, Ahmed SBA, "Structure and properties of mortar and concrete with rice husk ash as partial replacement of ordinary Portland cement - A review", International Journal of Sustainable Built Environment, 2017, 6, 675-692. <https://doi.org/10.1016/j.ijjsbe.2017.07.00>
- Cobirzan N, Mosonyi E, "Investigation of the natural pozzolans for usage in cement industry", Procedia Technology, 2015, 19, 506-511. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2015.02.072>
- E119, A. 2012, Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials. E119-14. United States: ASTM International.
- Gai-Fei Pnng WW, Jie Zhao Y, Ye-Feng Liu, Song-Hua bian, Li-Hong Zhao, "Explosive spalling and residual mechanical properties of fiber-toughened high-performance concrete subjected to high
- نداشت. ترکیب دو نوع الیاف در نمونه‌های هیبریدی مقاومت فشاری تک‌محوری آن را به‌طور قابل توجهی افزایش نداد و تأثیر بیشتر آن بهبود انتشار ترک در نمونه‌های هیبریدی بود.
- ۵) در نمونه‌های منشوری با الیاف ترکیبی فولاد و پلی‌پروپیلن مشاهده شد که الیاف پلی‌پروپیلن تا حدودی از رشد ترک‌های ریز جلوگیری می‌کند اما با افزایش فشار، اثر الیاف فولادی بعد از ترک اولیه و ظهور اولین نقطه حداکثر بار می‌باشد که ظرفیت باربری و شکل‌پذیری سطح مقطع نمونه‌ها را افزایش می‌دهد. الیاف کوچکتر که بین ترک‌های کوچک پل می‌شوند، رشد ریزترک‌ها را کنترل می‌کنند و از اتصال آن‌ها جلوگیری می‌کنند و الیاف بزرگتر از ایجاد و گسترش ترک‌های بزرگ جلوگیری می‌کنند و به‌طور قابل توجهی چقرمگی شکست را بهبود می‌بخشند.
- ۶) پوزولان‌های معدنی محلی مقاومت اولیه کمتری در ۷ و ۲۱ روز عمل‌آوری نسبت به بتن‌های پوزولانی با دوده سیلیس و خاکستر بادی داشتند، اما میزان افزایش مقاومت در ۲۱ روز بیشتر از پوزولان‌ها بود.
- ۷) بتن‌های حاوی الیاف فولادی به‌دلیل توانایی در انتقال بخار آب مویرگی به خارج از نمونه‌ها پس از قرار گرفتن در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به سایر نمونه‌ها استحکام بهتری داشتند. نمونه‌های حاوی الیاف هیبریدی استحکام مشابهی با الیاف پلی‌پروپیلن داشتند.
- ۸) ارزیابی اثر کاهش آلودگی CO<sub>2</sub> در کلیه نمونه‌های بتنی ساخته شده با پوزولان معدنی محلی و مقایسه آن با بتن سیمانی ساده نشان داد که جایگزینی ۱۵ درصد وزنی این پوزولان معدنی محلی با سیمان می‌تواند انتشار آلودگی CO<sub>2</sub> را تا ۱۵/۲۰ درصد کاهش دهد.
- ۹) پوزولان معدنی با ایجاد واکنش مطلوب پوزولانی با پرتلندیت، از افزایش اندازه مقدار پرتلندیت در نزدیکی سنگ‌دانه‌ها جلوگیری کرد. به این ترتیب ناحیه انتقال مرزی (ITZ) را تقویت کرد و پیوند بین کل و ماتریس را بهبود بخشید و اثرات خوبی در تقویت نمونه‌های بتنی و کاهش مصرف سیمان در بتن داشت و می‌توان آن را به‌عنوان ماده‌ای کاهش‌دهنده آلودگی و دوستدار محیط‌زیست معرفی کرد.

#### ۸- مراجع

- Abdul Awal ASM, Mohammad Ismail IAS, "Effect of cooling regime on the residual performance of high-volume palm oil fuel ash concrete exposed to high temperatures", Construction and Building Materials, 2015, 98, 875-883. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.001>
- Afroughsabet VOT, "Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers", Construction and

- <https://doi.org/10.1139/L10-112>.
- Kim SW, Kang DH, Ahn KL, Yun HD, "Mechanical Properties and Eco-Efficiency of Steel Fiber Reinforced Alkali-Activated Slag Concrete", *Materials*, 2015, 8, 7309-7321.  
<https://doi.org/10.3390/ma8115383>
- Koirala M, "Construction Sand, Quality and supply management in infrastructure project", *International Journal of Advances in Engineering and Scientific Research*, 2017, 14.
- Kwan AKH, "Adding fly ash microsphere to improve packing density, flowability and strength of cement paste", *Powder Technology*, 2013, 234, 19-25.  
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.09.016>
- Liu G, Brouwers HJH, "Waste glass as binder in alkali activated slag-fly ash mortars", *Materials and Structures*, 2019, 52.  
<https://doi.org/10.1617/s11527-019-1404-3>
- Mohammed OA, "Compressive strength and stability of sustainable self-consolidating concrete containing fly ash, silica fume, and GGBS", *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2017, 11, 406-411.  
<https://doi.org/10.1007/s11709-016-0350-1>
- Muller HS, Vogel M, "Assessment of the sustainability potential of concrete and concrete structures considering their environmental impact, performance and lifetime", *Construction and Building Materials*, 2014, 67, 321-337.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.039>
- Muralidhar Kamath SP, Mithesh Kumar, "Micro-characterisation of alkali activated paste with fly ash-GGBS metakaolin binder system with ambient setting characteristics", *Construction and Building Materials*, 2021, 277.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122323>
- Nie CZ, Shu X, He Q, Huang B, "Chemical, Mechanical, and Durability Properties of Concrete with Local Mineral Admixtures under Sulfate Environment in Northwest China", *Materials*, 2014, 7.  
<https://doi.org/10.3390/ma7053772>
- Ozawa M, Kamada T, Morimoto H, "Study of mechanisms of explosive spalling in high-strength concrete at high temperatures using acoustic emission", *Construction and Building Materials*, 2012, 37, 621-628.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.070>
- Qianmin MA, Zhiman Zhao RG, Zhiwei L, Kecheng H, "Mechanical properties of concrete at high temperature a review", *Construction and Building Materials*, 2015, 93, 371-383.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.131>
- Rahimpour MR, Makarem MA, "Advances in Carbon Capture: Methods, Technologies and Applications", Elsevier Science, 2020, 545-557.  
<https://doi.org/10.1016/C2018-0-05339-6>
- Ramezani-pour AA, Sarvari M, Ahmadi B, "Use of Natural Zeolite to Produce Self-Consolidating Concrete with Low Portland Cement Content and High Durability", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2012, 589-596, 25.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT:1099-5967\(2012\)14:5\(589\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT:1099-5967(2012)14:5(589))
- temperatures", *Cement and Concrete Research*, 2006, 36, 723-727.  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.12.014>
- Gai-Fei Peng Z-SH, "Change in microstructure of hardened cement paste subjected to elevated temperatures", *Construction and Building Materials*, 2008, 22, 593-599.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.11.002>
- Gökce H, Ramyar K, "Effect of fly ash and silica fume on hardened properties of foam concrete", *Construction and Building Materials*, 2019, 194, 1-11.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.036>
- Habert G, Šanja A, Rossi P, "Lowering the global warming impact of bridge rehabilitations by using ultra high performance fibre reinforced concretes", *Cement and Concrete Composites*, 2013, 38, 1-11.  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.11.008>
- Hanien T, Bannerman M, "Carbon footprint of calcium sulfoaluminate clinker production", *Journal of Cleaner Production*, 2018, 172, 2278-2287.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.183>
- Izumi Y, Ho HJ, "Calculation of greenhouse gas emissions for a carbon recycling system using mineral carbon capture and utilization technology in the cement industry", *Journal of Cleaner Production*, 2021, 312.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127618>
- Jacoby PC, "Pozzolanic effect of porcelain polishing residue in Portland cement", *Journal of Cleaner Production*, 2015, 100, 84-88.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.096>
- Jianzhuang Xiao HF, "On residual strength of high-performance concrete with and without polypropylene fibres at elevated temperatures", *Fire Safety Journal*, 2006, 41, 115-121.  
<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2005.11.004>
- Joshi SV, Mohanty AK, Arora S, "Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?", *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*, 2004, 35, 371-376.  
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2003.09.016>
- Kang Y, Max KS, "Climate change impacts on crop yield, crop water productivity and food security- A review", *Progress in Natural Science*, 2009, 19, 1665-1674.  
<https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2009.08.001>
- Kawai K, Kobayashi K, Sano S, "Inventory Data and Case Studies for Environmental Performance Evaluation of Concrete Structure Construction", *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2005, 3, 435-456.  
<https://doi.org/10.3151/jact.3.435>
- Kelechi SE, Mohammed A, Obianyo I, Ibrahim YE, "Equivalent CO<sub>2</sub> Emission and Cost Analysis of Green Self-Compacting Rubberized Concrete", *Sustainability*, 2022, 14, 137.  
<https://doi.org/10.3390/su14010137>
- Khan MI, "Properties of natural pozzolan and its potential utilization in environmental friendly concrete", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2011, 38, 71-78.

- concrete by part replacement of cement with silica fume, metakaolin and GGBS by using M-Sand as fine aggregate", *Materials Today: Proceedings*, 2021, 43.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.819>
- Worrell E, Martin N, Hendriks C, Meida L, "Carbon dioxide emissions from the global cement industry", *Annu. Rev. Energy Environ*, 2001, 26, 303-329.  
<https://doi.org/10.1146/annurev.energy.26.1.303>
- Wu L, Zhao P, Qiu Y, "Fabrication, Tensile and Bending Properties of Wheat Straw/Polylactic Acid Green Composites", *Advanced Materials Research*, 2013, 627, 715-721.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.627.715>
- Yang K-H, Cho M-S, Tae S-H, "Effect of supplementary cementitious materials on reduction of CO<sub>2</sub> emissions from concrete", *Journal of Cleaner Production*, 2015, 103, 1-10.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.018>
- Yang K-H, Song K-I, "Assessment of CO<sub>2</sub> reduction of alkali-activated concrete", *Journal of Cleaner Production*, 2015, 39, 265-272.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.001>
- Yap SY, Jumaat MZ, "Enhancement of mechanical properties in polypropylene-and nylon-fibre reinforced oil palm shell concrete", *Materials & Design*, 2013, 49.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.02.070>
- <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133766>
- Rangbar MK, Mousavi Y, Yosefi S, "Effects of natural zeolite on the fresh and hardened properties of self-compacted concrete", *Construction and Building Materials*, 2013, 47, 806-813.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.097>
- Sasui S, Nam J, Vab Riessen A, Nyarko MH, "Effects of waste glass as a sand replacement on the strength and durability of fly ash/GGBS based alkali activated mortar", *Ceramics International*, 2021, 47.  
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.04.121>
- Sekoai PT, "Biofuel development initiatives in sub-saharan africa: opportunities and challenges", *Climate*, 2016, 4 (2), 33.  
<https://doi.org/10.3390/cli4020033>
- Senhadji Y, Mouli EG, Khelafi M, Benosman H, "Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar", *Powder Technology*, 2014, 254, 314-323.  
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.01.046>
- Seo Y, "Estimation of materials-induced CO<sub>2</sub> emission from road construction in Korea", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 625-631.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.003>
- Shi B, WZ, Liu P, Zhou F, Peng Ch, "Pozzolanicity verification of combustion metamorphic rocks from coalfield fire zones in China", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2021, 69.  
<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104390>
- Song H, "Studies on the corrosion resistance of reinforced steel in concrete with ground granulated blast-furnace slag an overview", *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 138, 226-233.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.07.022>
- Stocker TF, Plattner G, Tignor M, Allen S, "The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", *The Physical Science Basis*, 2013, 1535PP.
- Thomas BS, Hung MOK, Abdolla J, Hawileh R, Ariyachandra E, "Biomass ashes from agricultural wastes as supplementary cementitious materials or aggregate replacement in cement/geopolymer concrete- A comprehensive review", *Journal of Building Engineering*, 2021, 40.  
<https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102332>
- Venkat GN, Ahmed E, Nagendrababu V, "Comparative study on mechanical properties and quality of

## EXTENDED ABSTRACT

# Experimental Study on Properties and Resistance of Local Mineral Pozzolanic Concrete against Fire and Evaluation of Its Ability to Reduce CO<sub>2</sub> Emissions

Mehdi Raftari<sup>a,\*</sup>, Rahmat Madandoust<sup>a,b</sup>, Reza Mahjoub<sup>a</sup>, Mojtaba Rangrazian<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Department of Civil Engineering, Khorramabad Branch, Islamic Azad University, Khorramabad, Iran

<sup>b</sup> Department of Civil Engineering, University of Guilan, P.O. Box 3756, Rasht, Iran

**Received:** 17 May 2022; **Review:** 04 April 2023; **Accepted:** 08 May 2023

### Keywords:

Pozzolanic fiber concrete, mechanical properties of concrete, fire effect, greenhouse gas, global warming potential (GWP), Green concrete.

## 1. Introduction

Global warming is mainly due to pollution from greenhouse gas emissions and often carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). Reducing greenhouse gases and analyzing and monitoring the environment is one of the human concerns today. Cement factories are major producers of greenhouse gases. Finding a cementitious material (pozzolan) that can be replaced in a part of concrete cement will play an important role in reducing cement consumption and CO<sub>2</sub> emission pollution. The local mineral pozzolans studied have similar properties to world famous pozzolans and have relevant standards.

## 2. Methodology

In order to investigate the effect of local mineral pozzolan on engineering properties and fire resistance of concrete, according to previous studies and optimizations, 15% by weight of local mineral pozzolan replaced part of the cement in concrete and tests were performed according to Table 1.

**Table 1.** Test and specimens' properties

Test	Shape	Dimension (mm)	Days of Cured	Standards
Compressive Strength	Cubic	100×100×100	7,14,28,56,90	BS EN12390-3:2009 (BS, EN 12390-3:2009)
Flexural Strength	prism	400×100×100	7,14,28,56,90	ASTM C1609 (ASTM, 2019)
Fire Resistance	Cubic	100×100×100	28,90	ASTM E119 (E119, 2012)

Also, in order to evaluate the effect of local mineral pozzolan on reducing CO<sub>2</sub> emissions, related studies were performed and compared with similar pozzolans.

### 3. Results and discussion

#### 3.1. Compressive Strength

Local mineral pozzolans showed 28.25 and 1.44% higher compressive strength than plain cement concrete (PCC) at 28 and 90 days of curing. The compressive strength of the 7-day sample containing polypropylene fibers has increased by about 16% compared to the typical cement concrete sample. This compressive strength increased by 50% in 28 days and by 15% in 90 days. also; The environmental processing of 28-day samples decreased by 13% compared to the processing of the same water-immersed sample. In samples containing hybrid steel and polypropylene compared to conventional cement concrete, the compressive strength of the 7-day sample containing hybrid fibers increased by about 27%, this resistance increased by 27% in 28 days and by 33% in 90 days. Found. The environmental processing of 28-day-old samples decreased by 11% compared to the processing of the same sample immersed in water during the same period.

#### 3.2. Flexural Strength

Local mineral pozzolans showed 28.59 and 4.26 percent higher tensile strength than ordinary cement concrete in 28 and 90 days, respectively. Experimental results have shown that the flexural strength of a combination of steel fiber and polypropylene samples gives better results. In the 28-day immersion treatment, the flexural strength of the hybrid sample was about 78, 39 and 5%, respectively, higher than that of the conventional cement concrete sample and the sample containing polypropylene fibers and the sample with steel fibers. also; In 90-day processing, the hybrid sample had higher flexural strength of about 81, 41 and 3.5%, respectively, than the sample of ordinary cement concrete and the sample with polypropylene fibers and the sample with steel fibers. Water-immersed treated specimens had a higher flexural strength at 28 days of age than ambient-treated specimens. This increase in strength is 5.5% for a sample of ordinary cement concrete, 7.25% for a sample containing mineral pozzolans, 3.2% for a sample containing steel fibers, 6% for a sample containing polypropylene fibers and 3.4% for a sample containing hybrid fibers.

Low flexural strength has been observed in fiber-free concrete samples. However, the presence of fibers in concrete increases its ductility and flexural strength by distributing force and delaying the failure of the sample. These observations are consistent with previous research findings that mill pozzolanic activity in the formation of cement hydrates increases with decreasing porosity and increasing the cohesion of the hydrated cement matrix, leading to a significant increase in strength of up to 90 days.

#### 3.3. Fire Resistance

Initially, three general samples (for the average) of each age were weighed from the destination test and then subjected to compressive strength tests. Then, to test the fire resistance, the remaining samples at the desired ages (28 and 90 days) are placed in an electric oven at 600°C with a heating rate of 10°C/min, and for one hour at 600°C. Remained at a constant temperature. The samples are then taken out of the electric oven and stored at room temperature to cool to ambient temperature. Temperature and time curves were calculated and plotted for the samples. After cooling the samples, their weight was controlled and then their weight loss was calculated. Mass reduction was observed in samples containing local mineral pozzolans. The cause can be related to its very small size and its location between the aggregates. We find that ordinary cement concrete samples have the highest mass reduction. Concrete containing steel fibers and steel-polypropylene composite fibers had the lowest mass loss, respectively, and concrete containing polypropylene had less mass loss than conventional cement concrete, but lost more weight than samples containing steel and hybrids.

#### 3.4. Evaluating the effect of concrete mixture parameters on the environment

By applying pre-studied coefficients of greenhouse gas emission capacity from each of the concrete components and comparing it with similar studies in three silica foam (SF) fly ash (FA) pozzolans, the smelting furnace slag (GGBS) is consistent (Yang K-H et al., 2015). Asyabar local mineral pozzolan is a desirable and effective pozzolan with the characteristics of the most widely used pozzolans in the world and is used to prevent the further spread of CO<sub>2</sub> pollution from the cement industry and the production of environmentally friendly concrete.



#### 4. Conclusions

Steel fibers improve compressive strength better than other fibers. Steel fibers and polypropylene increase the axial compressive strength to some extent, but the volume fraction of the fibers must be within the optimal range. Uniaxial compressive strength did not increase significantly compared to the compressive strength of both types of fibers (hybrids). The combination of the two types of fibers in hybrid specimens did not significantly increase its uniaxial compressive strength and its greater effect was to improve crack propagation in hybrid specimens. In prismatic samples with composite steel and polypropylene fibers, it was observed that polypropylene fibers to some extent prevent the growth of fine cracks, but with increasing pressure, the effect of steel fibers after the initial cracking and the appearance of the first point is the maximum load. Increasing. Smaller fibers bridged between small cracks control the growth of fine cracks and prevent them from joining, and larger fibers prevent large cracks from forming and spreading, and significantly improve fracture toughness. Concretes containing steel fibers had better strength than other samples due to their ability to transfer capillary water vapor out of the samples after being exposed to a temperature of 600°C. Samples containing hybrid fibers had the same strength as polypropylene fibers. Evaluation of the effect of reducing CO<sub>2</sub> pollution in all concrete samples made with local mineral pozzolans and comparing it with plain cement concrete showed that replacing 15% by weight of these local mineral pozzolans with cement can reduce CO<sub>2</sub> pollution emissions by 15.20%. The chemical reaction of pozzolan in the concrete binder reduced the content of portlandite and calcite. This pozzolan also decreased the number of pores and enhanced the integrity of the interfacial transition zone (ITZ) in the concrete compared to ordinary (Portland) cement concrete.

#### 5. References

- ASTM, "Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete, C1609. Using Beam with Third-Point Loading", U.S.A., 2019.
- ASTM, "Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials", E119-14. E119, A. 2012.
- BS, "Testing hardened concrete Part 3: Compressive strength of test specimens", UK, BSI. EN 12390-3: 2009.
- Yang K-H, Cho M-S, Tae S-H, "Effect of supplementary cementitious materials on reduction of CO<sub>2</sub> emissions from concrete", *Journal of Cleaner Production*, 2015, 103, 1-10.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.018>