

## Experimental study of engineering properties of fiber reinforced pozzolanic concrete and evaluation of impact effect on it: A case study of local mineral pozzolan

Mojtaba Rangrazian<sup>1</sup>, Rahmat Madandoust<sup>2,3</sup>, Reza Mahjoub<sup>4</sup>, Mehdi Raftari<sup>4</sup>

1- PhD candidate in Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khorramabad Branch, Islamic Azad University, Khorramabad, Iran

2- Visiting Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khorramabad Branch, Islamic Azad University, Khorramabad, Iran

3- Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

4- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khorramabad Branch, Islamic Azad University, Khorramabad, Iran

### ABSTRACT

One of the crises facing humanity is damage to the environment. Inadequate management and attention to greenhouse gas emissions threatens human life on Earth. Given the CO<sub>2</sub> emissions from cement production, finding a way to reduce cement consumption in concrete as the most widely used building material is a priority. In this paper, a natural pozzolan from Iran with suitable physical and chemical properties for replacing part of cement in concrete was introduced and its engineering properties were investigated. To strengthen its strength, steel and polypropylene fibers were used separately and hybrids with new mineral pozzolans were used in concrete. According to previous studies and optimizations, mineral pozzolan with a weight fraction of 15% cement in concrete was used. Comparison of strength of local mineral pozzolan samples with other famous pozzolanic concretes showed that concrete with local pozzolan is more resistant than ordinary cement concrete. Also, concrete containing steel fibers and local pozzolan has higher compressive strength than other samples. Pozzolanic concrete samples containing a combination of steel fibers and polypropylene had better performance in flexural strength than other samples and the impact toughness of these samples was better than other samples. Investigations showed that the impact resistance of samples containing local mineral pozzolans was 3.75 and 8.33% higher than conventional cement concrete at 28 and 90 days, respectively. The test results generally indicate that the local mineral pozzolans studied can be a good option to replace part of the cement in concrete and while improving the engineering properties of concrete, not only greatly reduce cement consumption but also a valuable finding for environmental protection. Biology, construction and production of green concrete.

### ARTICLE INFO

Receive Date: 08 April 2022

Revise Date: 17 July 2022

Accept Date: 23 July 2022

### Keywords:

Pozzolanic concrete

Fiber concrete

Greenhouse gas

Impact effect

Drop weight Impact

SEM

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.335560.2764>

\*Corresponding author: Rahmat Madandoust

Email address: rmadandoust@guilan.ac.ir

## بررسی تجربی خواص مهندسی بتن پوزولانی تقویت شده با الیاف و ارزیابی اثر ضربه بر آن: مطالعه موردی پوزولان معدنی محلی

مجتبی رنگریزان<sup>۱</sup>، رحمت مدن دوست<sup>۲</sup>، رضا محبوب<sup>۳</sup>، مهدی رفتاری<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، گروه مهندسی عمران، واحد خرم‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم‌آباد، ایران

۲- دانشیار، استاد مدعو گروه مهندسی عمران، واحد خرم‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم‌آباد، ایران

۳- دانشیار، هیئت علمی گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۴- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد خرم‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم‌آباد، ایران

### چکیده

یکی از بحران‌های پیش روی بشر آسیب به محیط زیست است. عدم مدیریت و توجه کافی به انتشار گازهای گلخانه‌ای حیات انسان بر کره زمین را تهدید می‌کند. با توجه به انتشار گاز گلخانه‌ای  $CO_2$  ناشی از تولید سیمان، یافتن راهی جهت کاهش مصرف سیمان در بتن بعنوان پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی، اولویت دارد. در این مطالعه یک پوزولان طبیعی از ایران با خواص فیزیکی و شیمیایی مناسب برای جایگزینی بخشی از سیمان در بتن، معرفی و خواص مهندسی آن بررسی شد. برای تقویت مقاومت آن، الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن به صورت جداگانه و هیبرید با پوزولان معدنی جدید در بتن استفاده شد. با توجه به بررسی و بهینه سازی‌های قبلی، پوزولان معدنی با کسر وزنی ۱۵ درصد سیمان در بتن استفاده شد. مقایسه میزان مقاومت نمونه‌های پوزولان معدنی محلی با سایر بتن‌های پوزولانی مشهور نشان داد که بتن با پوزولان محلی، مقاومتر از بتن سیمانی معمولی می‌باشد. همچنین، بتن حاوی الیاف فولادی و پوزولان محلی از مقاومت فشاری بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها برخوردار است. نمونه‌های بتن پوزولانی حاوی ترکیبی از الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن عملکرد بهتری در مقاومت خمشی نسبت به نمونه‌های دیگر داشتند و چقرمگی ضربه ای این نمونه‌ها نیز نسبت به سایر نمونه‌ها بهتر بوده است. بررسی‌ها نشان داد مقاومت ضربه ای نمونه‌های حاوی پوزولان معدنی محلی نسبت به بتن سیمانی معمولی در ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب ۳/۷۵ و ۸/۳۳ درصد بیشتر بوده است. نتایج آزمونها بصورت کلی بیان می‌دارد پوزولان معدنی محلی مورد مطالعه، می‌تواند گزینه مناسبی برای جایگزینی بخشی از سیمان در بتن باشد و ضمن بهبود مشخصات مهندسی بتن، نه تنها مصرف سیمان را تا حد زیادی کاهش دهد که یافته ای ارزشمند برای حفاظت از محیط زیست و ساخت و تولید بتن سبز است.

کلمات کلیدی: بتن پوزولانی، بتن الیافی، گاز گلخانه‌ای، اثر ضربه، سقوط گوی، SEM

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.335560.2764
۱۴۰۱/۰۱/۱۹	۱۴۰۱/۰۴/۲۶	۱۴۰۱/۰۵/۰۱	۱۴۰۱/۰۵/۰۱	۱۴۰۲/۰۲/۳۱	doi: 10.22065/jsce.2022.335560.2764
*نویسنده مسئول:		رحمت مدن دوست			
پست الکترونیکی:		rmaidandoust@guilan.ac.ir			

## ۱- مقدمه

یکی از بحران‌های پیش روی بشر در سال‌های اخیر آسیب به محیط زیست است که مهم‌ترین پیامد آن، انتشار بیش از حد گازهای گلخانه‌ای می‌باشد. گازهای گلخانه‌ای (GHGs) به عنوان یک تله روی زمین عمل کرده و زمین را گرم می‌کنند. در این مکانیسم، زمین مانند سطح یک گلخانه است که باید مقداری از انرژی خود را از طریق جو به بیرون هدایت کند، اما به دلیل حضور بیش از اندازه گازهای گلخانه‌ای، این انرژی به سطح زیرین این گازها (داخل گلخانه) باز می‌گردد و در نتیجه جو زمین گرم‌تر می‌شود. از این رو، این گازها را گازهای گلخانه‌ای می‌نامند. اثر گلخانه‌ای یک فرآیند طبیعی است که بدون آن، حیات روی زمین به دلیل سرمای شدید غیرممکن می‌شود. 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 [۱]. عدم مدیریت و توجه کافی به انتشار گازهای گلخانه‌ای که باعث تغییرات آب و هوایی می‌شود، حیات انسان را بر روی زمین تهدید می‌کند [۲]. CO<sub>2</sub> بیشترین تولید و انتشار را در میان گازهای گلخانه‌ای دارا است [۳]. بر اساس برآوردها، انتشار CO<sub>2</sub> از کارخانه‌های سیمان، ۱۱۳ میلیارد مگاتن است که دومین تولید کننده و انتشار دهنده این گاز گلخانه‌ای می‌باشد. تقاضا برای بتن در جوامع، بسیار زیاد است. طبق مطالعات انجام شده، مصرف بتن پس از مصرف آب، به عنوان بیشترین مصرف شناخته شده است. طبق آمار، ۷ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای را تولید سیمان تشکیل می‌دهد [۴، ۵]. حدود سی و چهار درصد CO<sub>2</sub> منتشر شده از تولید سیمان که اغلب به دلیل استفاده از سوخت‌های فسیلی است، در اتمسفر آزاد می‌شود و دو سوم باقی مانده نشان دهنده انتشار CO<sub>2</sub> از فرآیند کربن زدایی سنگ آهک در طول فرآیند کلسینه شدن تولید بتن است [۶]. سهم CaO در کلینکر حدود ۶۴ تا ۶۷ درصد بوده و باقیمانده شامل اکسید سیلیکون، اکسید آهن و اکسید آلومینیوم است. بنابراین، انتشار CO<sub>2</sub> حاصل از تولید کلینکر به ازای 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 [۷]. 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.

در این مطالعه ابتدا با بهره‌گیری از نتایج آزمایشگاهی قبلی در خصوص مقدار بهینه درصد وزنی جایگزینی پوزولان معدنی محلی نسبت به مقدار سیمان در نمونه‌های بتنی که توسط نویسندگان حاضر انجام شده است، و ترکیب این مخلوط با الیاف های فولادی، پلی پروپیلنی و هیبرید فولاد و پلی پروپیلن، بررسی مشخصات مهندسی نمونه‌های بتنی حاوی پوزولان و الیاف در آزمایشهای مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و مقاومت ضربه‌ای حاصل از گوی افتان فلزی انجام و مقایسه و برتری هر کدام با تحلیل رفتار آنها ارائه شد. همچنین؛ توسط تجزیه و تحلیل پراش اشعه ایکس (XRD)، تاثیر حضور پوزولان معدنی محلی بر عناصر موجود در نمونه‌ها و فازهای اصلی کریستالی دی اکسید سیلیکون SiO<sub>2</sub>، پورتلندیت Ca(OH)<sub>2</sub> و کلسیت Ca(CO)<sub>3</sub> مورد مطالعه قرار گرفت. ریزساختارهای بین ماتریس سیمان و الیاف و همچنین مورفولوژی نمونه های بتنی و فعالیت‌های شیمیایی موثر پوزولان معدنی محلی در ارتباط با سایر اجزای ساختاری نمونه های بتنی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، بحث و تحلیل گردید.

## ۱-۱ پیشینه تحقیق

با توجه به اهمیت نقش سیمان در بتن و مصرف بالای آن در محصولات بتنی، همچنین؛ اهمیت جلوگیری از انتشار رو به رشد گاز گلخانه‌ای CO<sub>2</sub> ناشی از تولید سیمان، یکی از استراتژی‌های موفق، جایگزینی مقدار سیمان با پرکننده‌هایی که مشخصات سیمانی یا غیر سیمانی دارند می‌باشد. کاهش میزان مصرف سیمان در بتن با افزایش پرکننده‌های سیمانی که خواص مشابه پوزولان‌های طبیعی دارند [۸]، یا با استفاده از پسماند چینی (پرسولان) [۹]، یا پرکننده‌های غیر سیمانی مانند خاک‌های (پودر) آهکی [۱۰]، یا با جایگزینی بخشی از مواد سیمانی تکمیلی (SCM) ضایعات کشاورزی که می‌تواند نقش الیاف را در کامپوزیت ایفا کند [۱۱، ۱۲]. همچنین؛ خاکستر پوسته برنج (RHA) [۱۳] خاک ارّه یا خاکستر چوب (SDA) [۱۴] خاکستر روغن نخل (POFA) [۱۵] پرکننده‌های دیگری هستند که می‌توان از آنها برای جایگزینی مقداری سیمان در بتن استفاده کرد. رنجبر و مدندوست در این رابطه دریافته‌اند که افزودن ژئولیت طبیعی

(NZ) می‌تواند مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی را بهبود بخشد [۱۶]. نی و همکاران همچنین؛ بیان داشتند که استفاده از خاکستر بادی (FA) به طور قابل توجهی مقاومت بتن در برابر حمله سولفات را بدون کاهش مقاومت بهبود بخشیده است [۱۷]. گوکچه و همکاران بیان کردند که سیلیکا فوم (SF) توانایی پرکردن ذرات بین سیمان پرتلند معمولی را دارد و این کار را بهتر از مواد ریزدانه در بتن انجام می‌دهد. SF آب کمتری مصرف می‌کند و استحکام بهتری ایجاد می‌کند، بنابراین جایگزین مناسبی برای بخشی از سیمان در بتن است [۱۸]. سونگ و همکاران نشان دادند که بتن‌های حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی (GGBFS) در درازمدت دوام بهتر و همچنین؛ مقاومت بالاتری در برابر خوردگی نشان می‌دهند [۱۹]. با استفاده از استراتژی افزودن جایگزین‌های سیمان در داخل بتن، حجم ملات بتن حفظ می‌شود و افزودن آن می‌تواند ضخامت لایه آب خمیر سیمان را افزایش داده و در نتیجه، جریان پذیری ملات را با همان مقاومت بالاتر ببرد. همچنین؛ می‌تواند چگالی بتن را با حفظ و بهبود در عملکرد کلی، افزایش دهد [۲۰]. با توجه به موارد فوق، باید به این یک اشکال استراتژی توجه داشت که جایگزینی سیمان با پُرکننده‌ها در صورت داشتن واکنش شیمیایی ضعیف از سوی آن‌ها، مقاومت بتن ساخته شده را کاهش می‌دهد [۲۱].

رشیدداداش و همکاران در سال ۲۰۱۴ آزمایش مقاومت ضربه و مقاومت خمشی بر روی نمونه های بتنی حاوی پوزولان متاکائولین و پومس که از هیبرید الیافهای فولاد و پلی پروپیلن بهره می‌بردند، انجام داد. نتایج نشان داد هیبرید الیاف ها نتایج مثبتی بر افزایش مقاومت ضربه‌ای و خمشی نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های بتنی سیمانی معمولی دارد [۲۲]. آکای و همکاران اثر همزمان پوزولان و الیاف فولادی را بر مقاومت فشاری نمونه‌ها در سال ۲۰۱۸ مورد بررسی قرار دادند که نتایج حاصل، افزایش مقاومت فشاری را نشان داده است [۲۳]. فنگ و همکاران در سال ۲۰۱۸ با بهره‌گیری از پوزولان خاکستر بادی و سه الیاف فولادی و پلی پروپیلن و پلی ونیل الکل آزمایش های مقاومت فشاری، خمشی و مقاومت در برابر ضربه ناشی از گوی افتان فلزی را بصورت الیاف منفرد و هیبریدی به انجام رساندند. ایشان بیان داشتند که نمونه های حاوی الیاف فولادی مقاومت فشاری بهتر، نمونه های حاوی هیبرید الیاف فولادی و هیبرید الیاف فولاد و پلی پروپیلن مقاومت خمشی بهتر از سایر نمونه ها داشته اند. مقاومت ضربه‌ای نمونه های حاوی الیاف هیبرید فولاد و پلی پروپیلن بالاتر از سایر نمونه ها بوده است [۲۴]. ترکیب اثر پوزولان خاکستر بادی و الیاف در نتایج آزمایش مقاومت فشاری و خمشی توسط افروز و همکاران در سال ۲۰۱۹ نشان داد که هیبرید الیاف در نمونه های بتنی پوزولانی مقاومت فشاری و خمشی را افزایش می‌دهد [۲۵]. ناندا و همکاران در سال ۲۰۲۰ اثر استفاده از پوزولان خاکستر بادی و متاکائولین را بصورت همزمان و منفرد در ترکیب آن با الیاف پلی پروپیلن در مقاومت فشاری و مقاومت خمشی، با نمونه های ساخته شده با بتن سیمانی معمولی بررسی کردند. نتایج نشان داد در تمامی موارد افزایش مقاومت فشاری و خمشی وجود داشته است [۲۶]. چانداک و همکاران در سال ۲۰۲۱ یا جایگزینی ۱۶ درصد وزنی پوزولان متاکائولین معوض سیمان و افزودن الیاف فولادی با کسر حجمی ۱/۵ درصد مقاومت فشاری نمونه ها را بهبود بخشیدند [۲۷]. لی و همکاران در سال ۲۰۲۱ با استفاده از پوزولان سیلیکا فوم (SF) معوض بخشی از سیمان در نمونه های بتنی حاوی الیاف فولادی با طولهای متنوع آزمایشات مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و مقاومت در برابر ضربه ناشی از گوی فلزی را انجام و بیان داشتند که الیاف بلندتر تاثیر بهتری بر مقاومت فشاری دارند و ترکیب الیاف با طول های متنوع، مقاومت خمشی و مقاومت در برابر ضربه متوالی گوی را نیز بهتر مستهلک می‌نمایند [۲۸]. در سال ۲۰۲۲ کارتیک و همکاران تاثیر همزمان پوزولان خاکستر بادی، سیلیکا فوم (SF) و سرباره کوره آهن‌گدازی (GGBFS) را در نمونه های حاوی الیافهای فولادی و پلی پروپیلن بصورت منفرد در آزمایش های مقاومت فشاری و مقاومت در برابر ضربه گوی فلزی انجام دادند. نتایج نشان داد که نمونه حاوی الیاف فولادی با طول بلند از سایر نمونه‌ها مقاومت فشاری بالاتری داشته است. این نمونه بهترین نتایج را در آزمونهای ضربه نیز داشته است [۲۹].

## ۲- طرح آزمایشی

### ۲-۱- مواد و مصالح

سیمان پرتلند معمولی که در این مطالعه استفاده می‌شود، مطابق استاندارد ۲۰۱۱ است: قسمت ۱: EN197 و دارای کلاس مقاومتی ۴۲/۵ نیوتن می‌باشد. (حداقل مقاومت ۲۸ روزه این سیمان پرتلند معمولی ۴۲/۵ مگاپاسکال است) [۳۰]. پوزولان طبیعی مورد

استفاده در آزمایش، از ایران، دامنه‌های کوهستان آسیاب 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 آسیابر گزینه مناسبی است. سختی آن کم است و به راحتی می‌توان آن را آسیاب کرد. این پوزولان حاوی مقادیر قابل توجهی  $SiO_2$  و  $Al_2O_3$  است که می‌تواند هیدرات سیلیکات کلسیم و هیدرات آلومینات کلسیم را از طریق ترکیبی از هیدروکسید کلسیم تولید شده توسط هیدراسیون سیمان تشکیل دهد. نباید فراموش کرد که استفاده بیش از حد، از پوزولان آسیابر 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 آسیابر و پوزولان‌های کاربردی مشهور را نشان می‌دهد:

جدول ۱: مقایسه ترکیب شیمیایی و فیزیکی پوزولان معدنی آسیابر با سیمان، دوده سیلیس (SF)، متاکائولین (MK)، خاکستر بادی (FA)، سرباره آسیاب شده کوره آهن گدازی (GGBS) [۳۱-۳۳] زئولیت فوق ریز (SFZ) [۳۴].

(%) ترکیبات شیمیایی	سیمان	پوزولان معدنی محلی	SF	MK	FA	GGBS	SFZ
SiO <sub>2</sub>	۲۲/۹۲	۶۸/۹۸	۹۶/۸۵	۵۲/۵۲	۵۶/۷۲	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

حداقل ترکیب قابل قبول کل  $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$  طبق استاندارد ASTM C 618 برای پوزولان‌های طبیعی ۷۰ درصد کل است که این عدد برای پوزولان معدنی آسیابر معادل ۸۵/۸۳ درصد و کاملاً قابل قبول است [۳۵]. همچنین؛ نتایج حاصل از انجام آزمایش مقاومت فشاری در شکل ۱ بیان می‌دارد که پوزولان معدنی آسیابر در سنین عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه به حدود ۷۵ درصد از استحکام دست یافته که بدین ترتیب الزامات استاندارد ASTM C 311 را نیز تامین نموده است. 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 [۳۶]. شن خرد شده با حداکثر اندازه اسمی ۱۳ میلی متر 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 آسیابر طبیعی نیز مطابق با EN1097 آزمایش شد که برای سیمان ۳/۱۲ و برای پوزولان طبیعی ۲/۲۴ بوده است [۳۷].

توزیع اندازه ذرات، یک تابع ریاضی است که معمولاً جرم ذرات را بر حسب اندازه آن‌ها بیان می‌کند [اندازه ذرات سیمان پرتلند معمولی و پوزولان‌های طبیعی آسیابر مورد استفاده در این مطالعه]. پوزولان آسیابر، 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 اندازه گیری شده، سطح ویژه سیمان پرتلند معمولی و پوزولان آسیابر طبیعی به ترتیب: ۰/۳۵ و ۱/۲۳ متر مربع بر گرم است. میانگین اندازه ذرات سیمان پرتلند معمولی و پوزولان‌های آسیابر 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 فوق روان کننده با چگالی ۱/۰۳ گرم بر سانتی متر مکعب (در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد) برای افزایش جریان پذیری و کمک به پراکندگی ذرات در هر نمونه ملات اضافه می‌شود.

جدول ۲: جزئیات مخلوط پوزولان آسیاب و الیاف.

گروه	مشخصات مخلوط	سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	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									
			(%)	(kg)						%	(kg/m <sup>3</sup> )	%	(kg/m <sup>3</sup> )	فولادی		پلی پروپیلن		هیبرید	
														(%)	(kg/m <sup>3</sup> )	(%)	(kg/m <sup>3</sup> )	(%)	(kg/m <sup>3</sup> )
G1	بتن سیمانی معمولی	۴۲۹/۶	۰	۰	۲۱۵	۴/۳	۰/۵	۷۲۸/۴	۷۲۸/۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰		
G2	بتن پوزولانی معدنی	۳۶۵/۲	۱۵	۶۴/۴۴	۲۱۵	۴/۳	۰/۵	۷۲۸/۴	۷۲۸/۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰		
G3	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	۰	۰	۰		
G4	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	۴/۵۵	۰	۰	۰	۰		
G5	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	۰	۰		

## ۲-۲- مشخصات الیاف فولادی و پلی پروپیلن

ویژگی‌های الیاف مورد استفاده در بتن بر رفتار بتن ساخته شده تأثیر می‌گذارد. مشخصات مهندسی فولاد و الیاف پلی پروپیلن در جدول ۳ آورده شده است:

جدول ۳: مشخصات الیاف فولادی و پلی پروپیلن [۳۸].

نوع الیاف	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

## ۲-۳- طرح و نسبت اختلاط

طرح اختلاط با پوزولان طبیعی و مقدار بهینه پوزولان جایگزین سیمان در بتن در چندین آزمایش، ۱۵ درصد وزنی سیمان محاسبه شد. از آنجایی که افزودن الیاف به بتن، استحکام آن را در برابر بارهای وارده افزایش می‌دهد، از الیاف فولاد و پلی پروپیلن و الیاف هیبریدی آن‌ها در مخلوط ملات بتن استفاده گردید. کسر حجمی الیاف اضافه شده به مخلوط، مطابق با مقادیر متوسط مورد استفاده در چندین مطالعه قبلی انجام شد. برای محاسبه، کسر حجمی الیاف در یک متر مکعب بتن، می‌بایست درصد الیاف (که از نتایج مطالعات قبلی بدست آمده) را در چگالی الیاف ضرب نمود. در تمامی موارد از مقررات مندرج در استاندارد بتن الیافی ASTM C1116 استفاده شد [۳۹]. برای اطمینان از عملکرد صحیح ماتریس باید چگالی و توزیع مناسب ذرات کنترل شود. نباید فراموش کرد که ذرات کوچکتر، در هنگام ساخت، تمایل به تجمع در ماتریس دارند که این موضوع شکستن قطعات را پس از عمل‌آوری آسان تر و در نتیجه، بتن را ضعیف تر می‌کند [۴۰]. قبل از افزودن آب و فوق روان کننده به مخلوط بتن، تمام ذرات ریزدانه را در ظرفی با رطوبت ۹۰ درصد مخلوط می‌کنیم. در مرحله اول مواد خشک سیمانی (سیمان، پوزولان آسیاب) و ماسه را همزمان قرار داده و با سرعت کم به مدت ۲ دقیقه مخلوط، تا مخلوط سیمانی و ماسه حاصل شود. سپس به مدت ۲ دقیقه به تدریج فوق روان کننده را به آب اضافه و مخلوط شد. سپس الیاف (فولاد، پلی پروپیلن یا ترکیبی از این دو) را به مدت ۵ تا ۸ دقیقه و به تدریج و به آرامی با مقادیر تعیین شده قبلی به این مخلوط اضافه می‌نماییم.

تا اطمینان حاصل شود که همه الیاف بصورت یکنواخت در ملات پخش شده‌اند. پس از ۲۴ ساعت، نمونه‌ها از قالب خارج و نمونه‌های G1 الی G5 در جدول ۲ تا سن ۹۰ روز جهت آزمایش‌های مندرج در جدول ۴ بصورت کاملاً غوطه‌ور در آب عمل آوری شدند. همچنین جهت انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری بخش ۳-۱ و مقاومت کششی بخش ۳-۲، دو گروه دیگر از نمونه‌های G1 الی G5 جدول ۲ در شرایط محیطی و بدون بهره‌گیری از آب تا سن ۲۸ روز عمل آوری شدند.

#### ۲-۴- روش آزمایش

برای همه آزمایش‌های انجام شده، استانداردهای بین‌المللی مورد استفاده، نام آزمایش، شکل نمونه، ابعاد و سن نمونه‌ها مطابق جدول ۴ انجام شد. تجزیه و تحلیل پراش اشعه ایکس (XRD) برای تشخیص مقدار و نوع کریستال‌ها استفاده شد. سن نمونه‌ها در این آزمایش ۲۸ روز و نمونه‌ها به صورت پودر بوده‌اند. میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای بررسی مورفولوژی و ریزساختار نمونه‌ها استفاده شد. نمونه‌های ۲۸ روزه در SEM مورد بررسی قرار گرفتند. ابعاد نمونه‌ها  $4 \times 4 \times 8$  میلی‌متر بوده است. آزمایش‌های مندرج در جدول ۴ در آزمایشگاه بتن دانشگاه گیلان و آزمایش‌های XRD, SEM در آزمایشگاه دانشکده فنی دانشگاه تهران انجام شده است.

جدول ۴: ویژگی‌های آزمایش و نمونه‌های مورد مطالعه.

بخش	آزمایش	شکل	ابعاد (mm)	سن عمل آوری	استاندارد بین‌المللی
۱-۳	مقاومت فشاری	مکعب	۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰	۷، ۱۴، ۲۸، ۵۶، ۹۰	BS EN12390-3:2009 [41]
۲-۳	مقاومت کششی	منشور	۴۰×۱۰۰×۱۰۰	۷، ۱۴، ۲۸، ۵۶، ۹۰	ASTM C1609[42]
۴	ضربه حاصل از سقوط گوی فلزی	دیسک	شعاع = ۱۵۲/۴	۷، ۲۸، ۹۰	ACI 544 (2R)[43]

#### 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، 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 داشته است. همچنین؛ عمل آوری در شرایط محیطی نمونه‌های ۲۸ روزه، نسبت به عمل آوری همان نمونه غوطه‌ور در آب در ۲۸ روز، ۷ درصد کاهش یافته است.

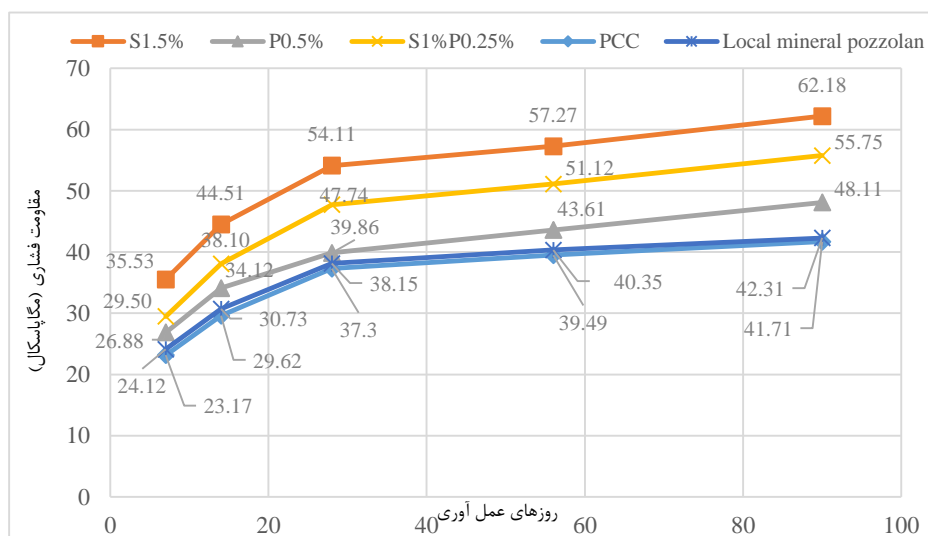
پوزولان‌های معدنی محلی در ۲۸ و ۹۰ روز عمل آوری، مقاومت فشاری ۲/۲۵ و ۱/۴۴ درصد بیشتر از بتن سیمانی ساده (PCC) نشان دادند. مقاومت فشاری نمونه ۷ روزه حاوی الیاف پلی‌پروپیلن، در مقایسه با نمونه بتن سیمانی معمولی حدود ۱۶ درصد افزایش یافته است. این مقاومت فشاری در ۲۸ روز، ۵۰ درصد و در ۹۰ روز، ۱۵ درصد افزایش یافته و همچنین؛ عمل آوری در شرایط محیطی نمونه‌های ۲۸ روزه، نسبت به عمل آوری همان نمونه غوطه‌ور در آب ۱۳ درصد کاهش داشته است. در نمونه‌های حاوی هیبرید الیاف فولاد و پلی-پروپیلن نسبت به نمونه بتن سیمانی معمولی، مقاومت فشاری نمونه ۷ روزه، حاوی الیاف هیبریدی حدود ۲۷ درصد افزایش یافت، این مقاومت در ۲۸ روز، ۲۷ درصد و در ۹۰ روز، ۳۳ درصد افزایش داشته است. عمل آوری در شرایط محیطی نمونه‌های ۲۸ روزه نسبت به عمل آوری همان نمونه غوطه‌ور در آب در مدت مشابه، ۱۱ درصد کاهش یافته است.

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. الیاف پلی‌پروپیلن با توجه به شرایط فیزیکی کوچک بهتر می‌توانند از گسترش ترک‌های ریز در بتن جلوگیری کنند. این الیاف، در پل زدن بر روی ترک‌های کوچک و در نتیجه افزایش مقاومت فشاری موثر هستند. الیاف فولادی به دلیل ابعاد بزرگتر و طول بیشتر

نسبت به اندازه ترک‌ها در ابتدای تشکیل، از گسترش ترک‌های ریز اولیّه جلوگیری نمی‌کند. با این حال، در نزدیکی لحظه شکست، الیاف فولادی با افزایش تحمّل و شکل‌پذیری از انبساط عمده در ترک‌ها جلوگیری می‌کنند. در مطالعات یو و الوسابی و همکاران نیز به این موضوع اشاره شده است [۴۴، ۴۵].

به دلیل تعداد زیاد و جهت گیری الیاف در بتن، الیاف می‌توانند غلظت تنش را در نوک ترک‌ها کاهش دهند. دوخت ترک در بتن توسط الیاف باعث کاهش انتشار ترک و 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 این زمینه برکوفسکی نیز به نتیجه مشابهی دست یافته است [۴۶]. در مورد تأثیر الیاف فولادی در آزمایش مقاومت فشاری می‌توان گفت که این الیاف به دلیل مدول الاستیسیته بالای خود (در مقایسه با الیاف پلی پروپیلن و بافت سطح ناهموار)، باعث افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه بتن سیمانی معمولی می‌شوند. آن‌ها می‌توانند، فشار را بهتر تحمّل 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. همانطور که نتایج تحقیقات افروغ ثابت و همکاران، (تأثیر الیاف هیبریدی فولاد-پلی پروپیلن بر روی بتن با مقاومت بالا) نشان داد که با جایگزینی جزئی الیاف فولادی با الیاف پلی پروپیلن، کاهش مشابهی در مقاومت فشاری وجود دارد [۴۷].

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



شکل ۱: توسعه مقاومت فشاری با افزایش سن.

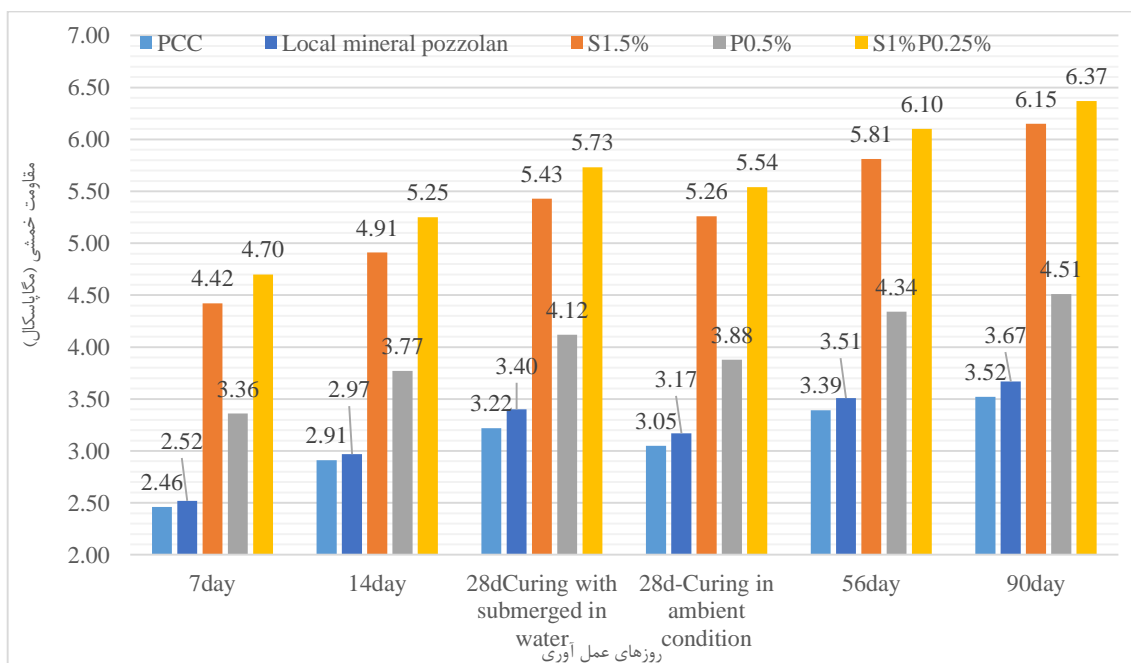


## ۲-۳- مقاومت خمشی

به منظور بررسی و تجزیه و تحلیل اثر پوزولان آسیاب و الیاف بر مقاومت خمشی، آزمایش خمشی سه نقطه ای 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 میلی متر (عرض b) × ۱۰۰ میلی متر (عمق d) و طول کل ۴۰۰ میلی متر بوده است. نام دستگاه مورد استفاده در این آزمایش، دستگاه Universal Flexural Set است و برای هر نمونه از میزان بارگذاری ۰/۲ میلی‌متر بر دقیقه استفاده شد. طبق آیین نامه، 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 جابجایی و مقدار بار مربوط به آن جابجایی توسط دستگاه، ثبت شد. طبق استاندارد ASTM C1609، حداکثر بار اعمال شده توسط دستگاه آزمایش با (P)، طول دهانه (L)، عمق (d)، عرض (b)، مدول گسیختگی (مقاومت) "f" به صورت معادله ۱ بیان می‌شود [۴۲].

$$f = PL/(bd^2).$$

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 یاپ و همکاران مطابقت دارد [۴۸]. با بررسی شکل ۲، مشاهده می‌شود که نمونه‌های هیبریدی دارای استحکام خمشی بالاتری در تمام سنین عمل‌آوری هستند. به عنوان مثال، در عمل‌آوری 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 عمل‌آوری 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 عمل‌آوری شده غوطه‌ور در آب، در سن ۲۸ روزگی نسبت به نمونه‌های عمل‌آوری 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.

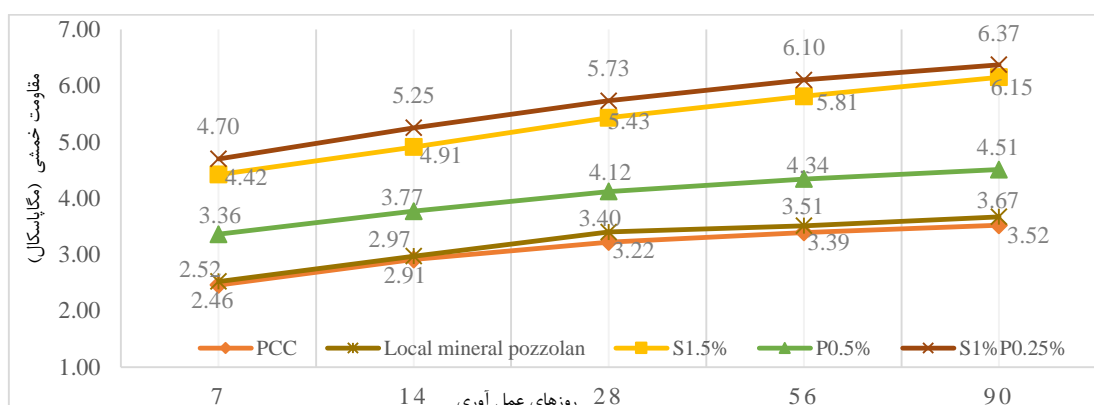


شکل ۲: مقایسه رشد مقاومت خمشی بتن با الیاف مختلف.

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 تاخیر 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). خان و همکاران و چالیک و همکاران نتایج مطالعات تجربی خود بر روی نمونه‌های بتن سیمانی معمولی با ترکیب پوزولان طبیعی را به روشی مشابه ارائه کردند [۴۹، ۵۰].

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.

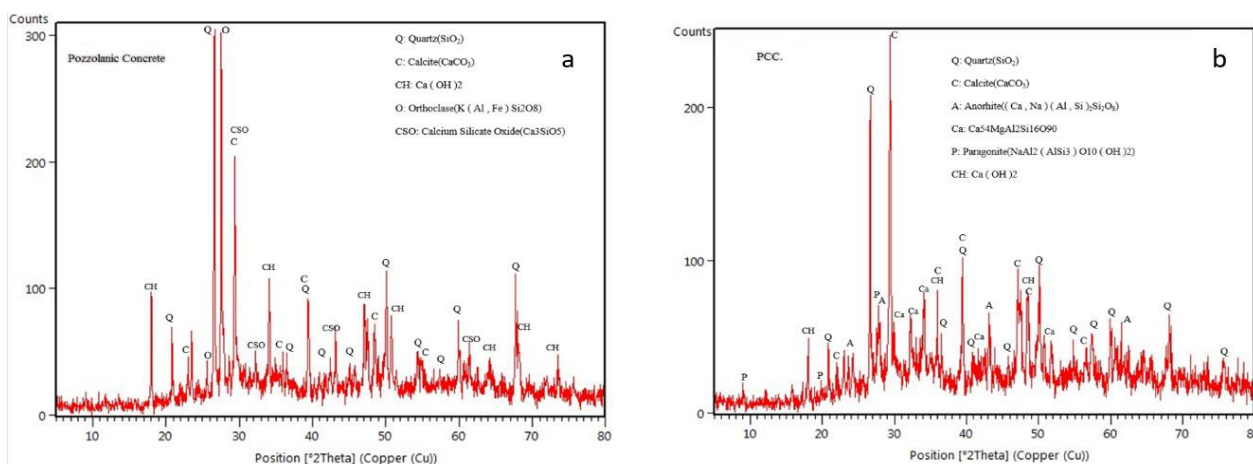


شکل ۳: رشد مقاومت خمشی با افزایش روزهای عمل‌آوری.

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 الیاف هیبریدی باعث افزایش ظرفیت باربری و شکل‌پذیری سطح مقطع پس از وقوع اولین ترک می‌شود.

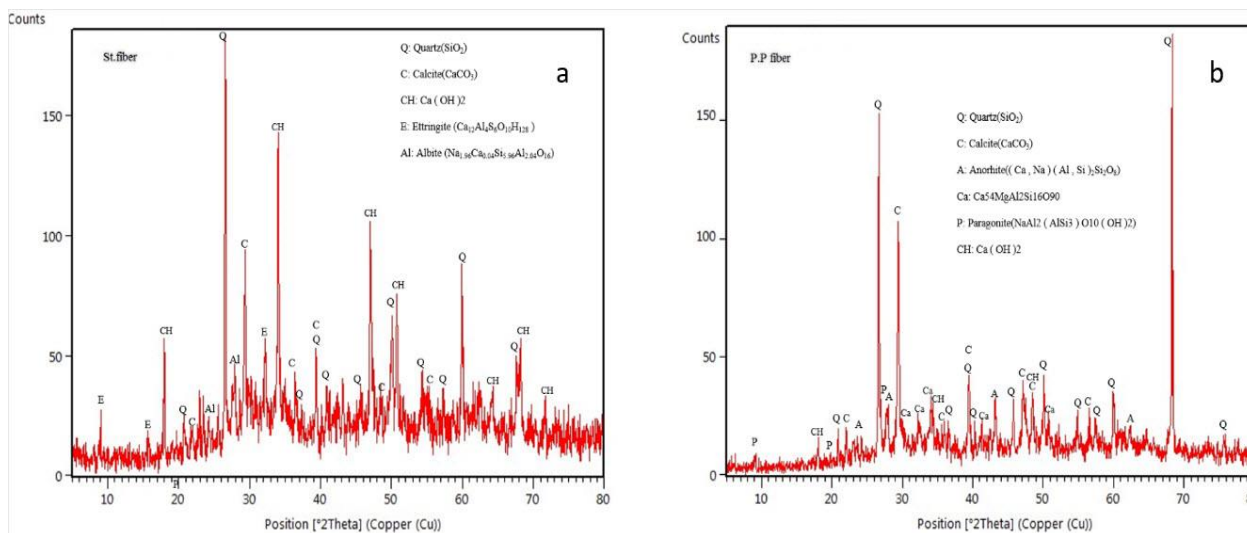
#### ۴- تجزیه و تحلیل پراش اشعه ایکس (XRD)

برای بررسی عناصر موجود در نمونه‌ها از آنالیز پراش اشعه ایکس غیر مخرب استفاده شد. این آزمایش با استفاده از دستگاه Rigaku Ultima IV انجام شد. محدوده  $2\theta$  تجزیه و تحلیل شده در حالت پیوسته ۵-۸۵ درجه با اندازه گام  $0.02^\circ$  درجه بود. تمامی نمونه‌ها در اندازه و مقدار مورد نیاز در شرایط کاری ۴۰ کیلو ولت و ۳۰ میلی آمپر با تابش  $Cu\ ka$  تهیه و از پُرکننده نیکل استفاده شد. برای تهیه تصویر قابل استفاده و کمی‌سازی نتایج از نرم افزار Profile Fit استفاده شده است.



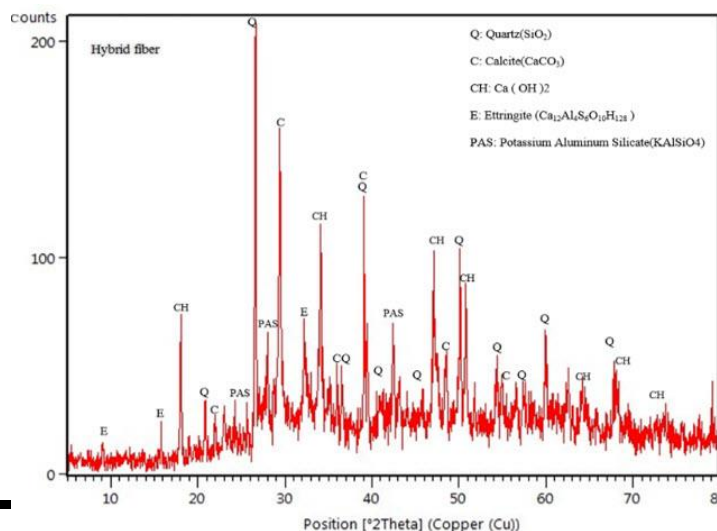
شکل ۴: مقایسه کاهش کلسیت و پرتلندیت بواسطه مقادیر مطلوب  $\text{SiO}_2$  در پوزولان معدنی محلی (فازهای C, CH؛ الف) بتن پوزولانی-کاهش قله های فاز کریستالی  $\text{Ca(OH)}_2$  و  $\text{Ca(CO)}_3$  (ب) بتن معمولی (بدون حضور پوزولان) افزایش قله کریستالی  $\text{Ca(OH)}_2$  و  $\text{Ca(CO)}_3$ .

به منظور بررسی اثر افزودن پوزولان و همچنین؛ تأثیر افزودن فولاد، پلی پروپیلن و هیبرید آن‌ها بر تغییر فاز، خواص و محتوای حجمی هر فاز، از آنالیز XRD از نمونه‌های ۲۸ روزگی استفاده شد. قله‌های اصلی فاز کریستالی هستند. همانطور که در شکل ۴، ۵، ۶، نشان داده شده است، دی اکسید سیلیکون  $\text{SiO}_2$ ، پورتلندیت  $\text{Ca(OH)}_2$ ، کلسیت  $\text{Ca(CO)}_3$  فازهای اصلی مورد مطالعه هستند. در شکل ۴-الف، یک نمونه بتن حاوی پوزولان معدنی آزمایش شد که با ۱۵ درصد وزنی سیمان جایگزین شده است، حداکثر  $\text{SiO}_2$ ،  $\text{Ca(OH)}_2$  و  $\text{Ca(CO)}_3$  به ترتیب دارای مقادیر ۲۰۰، ۳۱۰ و ۱۰۰ واحد می‌باشد. در شکل ۴-ب، مقادیر بتن سیمانی معمولی، عناصر مذکور در اکثر موارد به ترتیب ۱۸۰، ۲۵۰ و ۸۰ واحد بوده است. در مقایسه با نمونه ساخته شده با پوزولان معدنی محلی به دلیل وجود مقدار مطلوب  $\text{SiO}_2$  باعث افزایش مقاومت بتن و همچنین؛ کاهش کلسیت و پرتلندیت بتن می‌شود که همگی بر روی بتن، اثر مثبت دارند



شکل ۵: تغییرات کلسیت و پرتلندیت بواسطه مقادیر مطلوب  $\text{SiO}_2$  در پوزولان معدنی محلی (فازهای C, CH؛ الف) بتن پوزولانی با الیاف فولادی (ب) بتن پوزولانی با الیاف پلی پروپیلن.

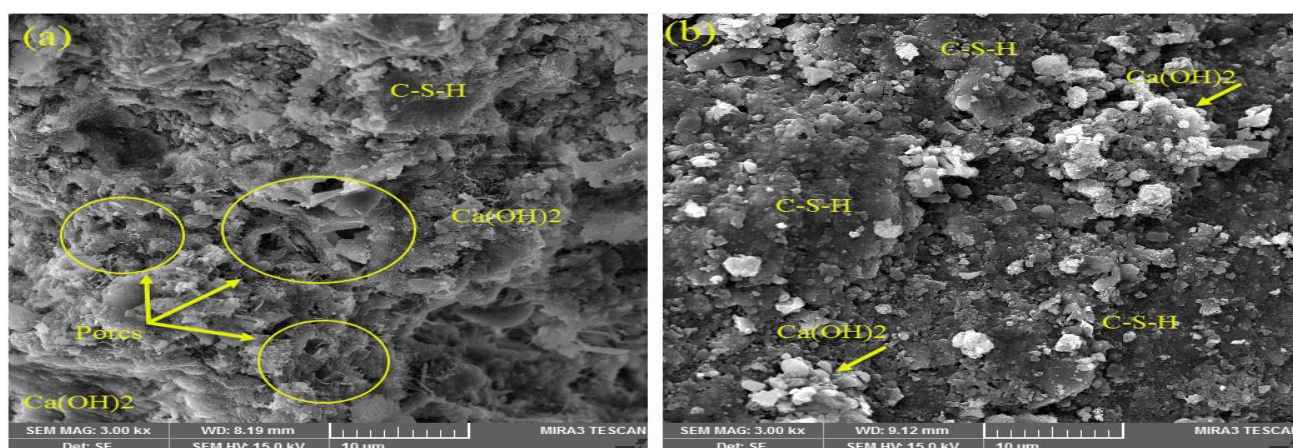
در شکل‌های ۵ الف و ب، افزودن الیاف فولادی و پلی پروپیلن و در شکل ۶ ترکیبی از الیاف فولادی و پلی پروپیلن بررسی شده است. به جز کاهش کلسیت از محدوده ۲۰۰ واحد در بتن سیمانی معمولی، در بتن‌های پوزولانی الیافی، این مقدار تا محدوده ۱۰۰ کاهش یافته است و به نظر می‌رسد به دلیل افزایش حرارت ناشی از هیدراسیون پوزولان، قسمت کوچکی از آن به پرتلندیت تبدیل شده است.



کاهش زیاد مقادیر کلسیت برای بتن مطلوب است و پرتلندیت افزایش جزئی دارد.

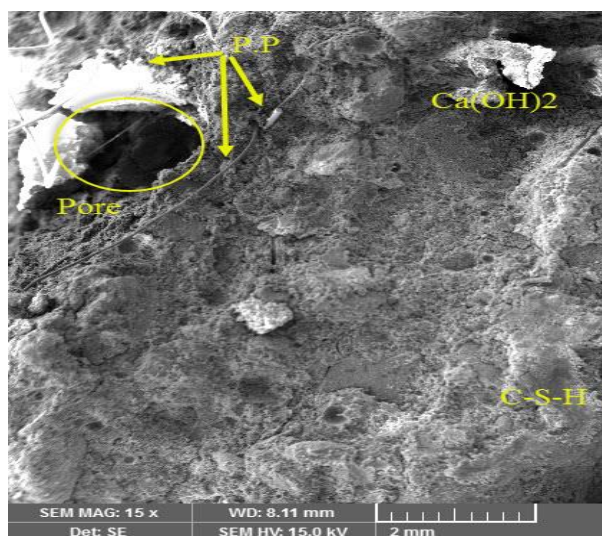
## ۵- میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) ریزساختارهای بین ماتریس سیمان و الیاف و همچنین؛ تأثیر پوزولان‌ها و الیاف بر ساختار خمیر سیمان، نحوه حذف حفره‌ها و نتایج فعالیت شیمیایی را بررسی می‌کند. در این مطالعه، پس از عمل‌آوری ۲۸ روزه، نمونه‌های بتن سیمانی معمولی، نمونه‌های حاوی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن و هیبریدهای آن‌ها تحت بررسی قرار گرفتند. ابتدا قطعات کوچکی از نمونه (حدود  $4 \times 8 \times 8$  میلی متر) که حاوی بتن و الیاف بود با طلا-پالادیوم پوشانده و آزمایش توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل HRSEM: TESCAN MIRA3 انجام شد. با مقایسه شکل‌های ۷-الف و ۸ (بتن سیمانی معمولی) و ۷-ب (بتن پوزولانی)، به نظر می‌رسد که در نمونه حاوی پوزولان معدنی واکنش بسیار خوب پوزولانی، کلسیت تولید شده در اثر هیدراسیون بتن، توسط  $\text{SiO}_2$  مصرف شده، بتن منسجم‌تری با حفره‌های کمتر، و اترینگیت کمتر و همچنین؛ کلسیت کمتر تولید می‌کند که نتیجه فعالیت پوزولانی خوب این پوزولان است.

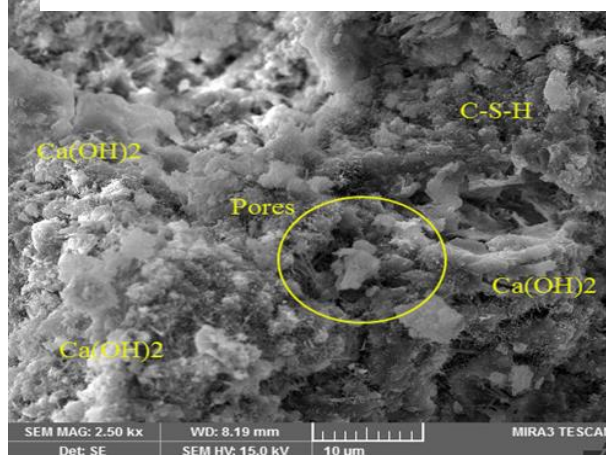


شکل ۷: تأثیر واکنش مطلوب پوزولانی؛ (الف) حضور کلسیت و وجود حفره در بتن سیمانی معمولی، (ب) ترکیب  $\text{SiO}_2$  در پوزولان معدنی محلی با کلسیت  $(\text{Ca}(\text{OH})_2)$  و تشکیل ژل C-S-H بیشتر در بتن پوزولانی.

الیاف پلی پروپیلن مخلوط، بتن را ناهمگن می‌کند. تقریباً در تمام میکروگراف‌های SEM، ژل‌های کلسیم سیلیس هیدرات (C-S-H) معمولاً با رنگ روشن‌تر و دانه‌های تیره‌تر به نظر می‌رسند، در حالی که ذرات نیمه تیره، شن هستند. همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، تخلخل نسبتاً زیادی در نمونه حاوی پلی پروپیلن مشاهده می‌شود که باعث ناهمگنی نمونه می‌شود. علاوه بر این، اثر پل زدن توسط الیاف پلی پروپیلن ظاهر شده است که می‌تواند منجر به بهبود استحکام خمشی شود. از طرفی الیاف پلی پروپیلن از نظر شیمیایی بی‌اثر بوده و در محیط قلیایی خمیر سیمان بسیار پایدار هستند. بنابراین، وارد واکنش هیدراسیون سیمان، نمی‌شوند و آن را تسریع نمی‌کنند. میکروگراف نشان می‌دهد که ژل C-S-H به عنوان یک اتصال دهنده در بین الیاف و مصالح مانند ماتریس عمل می‌کند که می‌تواند منافذ را مسدود کرده و نفوذپذیری را کاهش دهد. در واقع، نفوذپذیری کمتر و تخلخل مویرگی کمتر ارتباط نزدیکی با هم دارند.

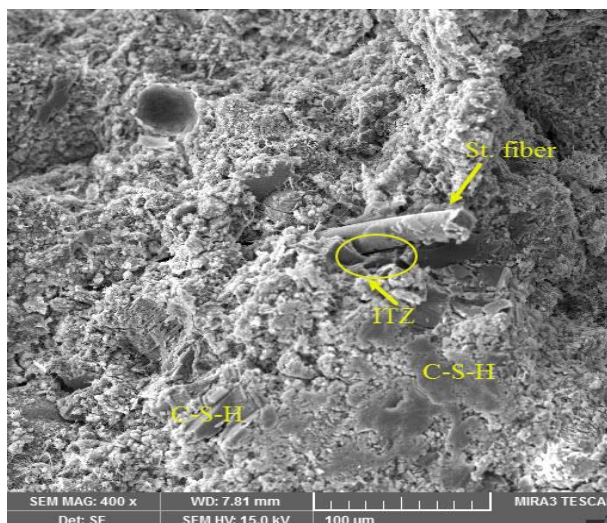


شکل ۸: بتن سیمانی معمولی در سن ۲۸ روزگی.  
شکل ۹: بتن پوزولانی حاوی الیاف پلی پروپیلن در سن ۲۸ روزگی.



با مقایسه نمونه پلی پروپیلن با نمونه بتن سیمانی معمولی شکل ۸ و ۹ می‌توان نتیجه گرفت که دلیل منافذ بیشتر در نمونه پلی پروپیلن، وجود الیاف و اختلاط ناهمگن آن با ملات بتن است که باعث به دام افتادن هوا در مخلوط و ایجاد منافذ می‌شود. همچنین؛ تصاویر نشان می‌دهد که میزان و اندازه ژل‌ها C-S-H و کریستال‌ها  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  در بتن حاوی الیاف پلی پروپیلن به دلیل وجود پوزولان معدنی محلی، بیشتر است. این افزایش باعث می‌شود ژل C-S-H الیاف را محصور کند و بین آن‌ها پیوند ایجاد کند که می‌تواند منجر به کاهش چشمگیر منافذ و تخلخل مویرگی شود. با این حال، به دلیل آب‌گریزی سطح الیاف پلی پروپیلن، ضخامت لایه آب در منطقه انتقال سطحی (ITZ) بین الیاف و خمیر سیمان، باعث رشد کریستال می‌شود. با این حال، تعداد زیادی کریستال مضر روی سطح الیاف پلی پروپیلن رسوب

می‌کنند اما به طور کامل به الیاف نمی‌چسبند. اسمرزوسکی و همکاران مشاهدات مشابهی داشت [۵۱]. این امر، قدرت چسبندگی خمیر سیمان را کاهش می‌دهد. به عبارت دیگر، آگریزی این الیاف اجازه می‌دهد تا پرتلندیت (کریستال‌های هیدروکسید کلسیم ماکرو) به راحتی رشد کند و منطقه انتقال بین سطحی (ITZ) را متخلخل‌تر کند. به همین دلیل، بیشتر الیاف توسط مقدار کمی ژل C-S-H احاطه شده‌اند و بین خمیر سیمان و الیاف پلی‌پروپیلن، ناسازگاری وجود دارد که ممکن است باعث ایجاد حفره و همچنین؛ مقاومت فشاری کمتر شود. اما به دلیل ناسازگاری مذکور، ناحیه انتقال، دارای سوراخ‌های بیشتری در الیاف و ماتریس است، بنابراین، تخلخل ضعیف نمونه پلی‌پروپیلن مشاهده می‌شود و این امر منجر به مقاومت فشاری کمتری می‌شود. علاوه بر همه موارد عنوان شده، ناهمگونی مخلوط پلی‌پروپیلن، باعث افزایش تعداد فضاهای خالی در ملات می‌شود. در مقایسه با این نمونه با ریزساختار بتن سیمانی معمولی، به نظر می‌رسد بتن سیمانی معمولی فشرده‌تر و یکنواخت‌تر باشد. اما همانطور که گفته شد اثر قوی C-S-H به دلیل وجود پوزولان و خاصیت پل زدن الیاف پلی‌پروپیلن تا حدودی از ضعف حفره‌ها می‌کاهد. با بررسی تصویر نمونه بتن سیمانی معمولی، می‌توان دریافت که در نتیجه هیدراسیون، فراوان و ذرات کریستالی در اطراف سنگدانه‌های نمونه بتن سیمانی معمولی، ژل C-S-H تشکیل شده است. اما، این کریستال‌های ناشی از هیدراسیون دارای منافذ بزرگی هستند و یک بلوک ژل کامل و پیوسته را تشکیل نمی‌دهند. در همین حال، حفره‌های آشکار و شکاف‌های وسیعی در منطقه انتقال سطحی (ITZ) وجود دارد که باعث شل شدن ناحیه سطحی می‌شود. این نتایج در شکل ۸ قابل توجه است. در رابطه با بتن سیمانی معمولی، لایه ای از ژل‌های  $\text{Ca(OH)}_2$  و C-S-H مستقیماً روی دانه‌های سنگدانه بعد از منطقه انتقال سطحی (ITZ) بین ماتریس و سنگدانه تشکیل می‌شود، منطقه ای متشکل از بلورهای بزرگ  $\text{Ca(OH)}_2$  و اترینگیت ((محصول هیدراسیون سیمان پرتلند در حضور هیدروکسید کلسیم) (هگزا کلسیم آلومینات سه سولفات هیدرات)  $(\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26(\text{H}_2\text{O}))$  با تخلخل بالاتر. علاوه بر این، در شکل ۷-ب دیده می‌شود که کریستال‌های  $\text{Ca(OH)}_2$  عمود بر سنگدانه هستند و روی ژل C-S-H همپوشانی دارند.

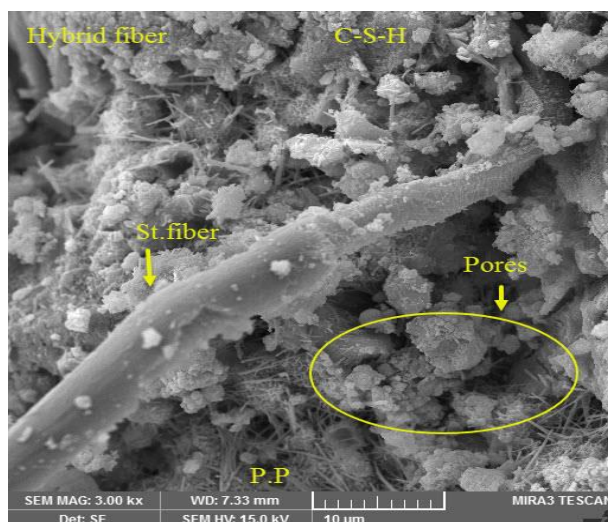


شکل ۱۰: بتن پوزولانی حاوی الیاف فولادی در سن ۲۸ روزگی.

با مطالعه ریزساختار در نمونه‌های حاوی الیاف فولادی در شکل ۱۰، می‌توان دریافت که در ناحیه انتقال سطحی (ITZ) در اطراف الیاف فولادی، اجزای سیمان واکنش هیدراسیون مطلوب و کافی داشتند و همین امر باعث شده است که سطح الیاف فولادی با سیمان هیدراته تقریباً قابل قبول پوشانده شود. علاوه بر آن، الیاف فولادی به خوبی به ماتریس چسبیده و به دلیل خواص فیزیکی مطلوب، با الیاف فولادی فشرده و یکپارچه شده است. الیاف فولادی می‌تواند با جذب یا انتقال حرارت ناشی از واکنش هیدراسیون خمیر اطراف، واکنش هیدراسیون خمیر اطراف را افزایش داده و در نتیجه بر خلاف الیاف پلی‌پروپیلن که تأثیری در انتقال حرارت ندارند، الیاف فولادی با ماتریس اطراف، منسجم می‌شود. الیاف فولادی در کاهش دما و جلوگیری از تبخیر آب مویرگی و بهم ریختن نسبت W/C موثرتر هستند. توجه به این نکته ضروری است که سطح الیاف فولادی نسبت به سطح سنگدانه‌ها زبرتر است. این الیاف علاوه بر کاهش منافذ، استحکام پیوند در منطقه انتقال سطحی (ITZ) بین الیاف فولادی و ملات سیمان را افزایش می‌دهد که در الیاف پلی‌پروپیلن به میزان قابل توجهی کمتر است. زبری زیاد و چسبندگی خوب بین الیاف فولادی و ملات باعث انتقال و توزیع نیروها از الیاف به ماتریس و افزایش مقاومت می‌شود. به دلیل همگن بودن فلز، میزان حفره‌ها و تخریب در این نمونه‌ها کمتر از نمونه‌های حاوی پلی‌پروپیلن است که در استحکام بالاتر نیز نقش عمده ای دارد.

در نمونه حاوی ترکیبی از الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن، هیچ منطقه انتقال سطحی واضح و مشخصی (ITZ) مشاهده نشد. در بررسی پوسته سطحی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن و درگیری سطحی آن‌ها مشاهده می‌شود که این سطوح توسط خمیر سیمان هیدراته، پوشیده شده و همگن هستند. نکته قابل توجه دیگر ساختار شبکه ای است که الیاف پلی‌پروپیلن هنگام توزیع در اطراف الیاف فولادی تشکیل می‌دهند. این امر نه تنها نقش هم افزایی اثرات پل زدن الیاف بر روی ترک‌ها را افزایش می‌دهد، بلکه جداسازی اجزای بتن را از یکدیگر را نیز بهبود می‌بخشد و تا حد زیادی از انتشار ترک‌ها جلوگیری می‌کند و ضمن افزایش قابلیت اطمینان بتن، به دلیل هم افزایی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن، مقاومت نمونه نیز افزایش می‌یابد. با توجه به خاصیت جلوگیری از تکثیر و اتصال ریز ترک‌ها و پل زدن بر روی آن‌ها توسط الیاف پلی‌پروپیلن و جلوگیری از ترک‌های بزرگتر توسط الیاف فولادی، چقرمگی این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های دیگر بیشتر است. این محتوا در شکل ۱۱ قابل مشاهده است.

تمام موارد فوق، پوزولان معدنی محلی تأثیر مثبتی در بهبود مقاومت و چقرمگی ماتریس بتن دارد. علاوه بر این، پرتلندیت  $Ca(OH)_2$  و حفره‌های بتن‌های حاوی پوزولان‌های معدنی محلی در اثر فعالیت پوزولانی نسبت به بتن سیمانی معمولی، کاهش می‌یابد و در نتیجه کاهش پرتلندیت، منجر به کاهش قلیائیت بتن می‌گردد.



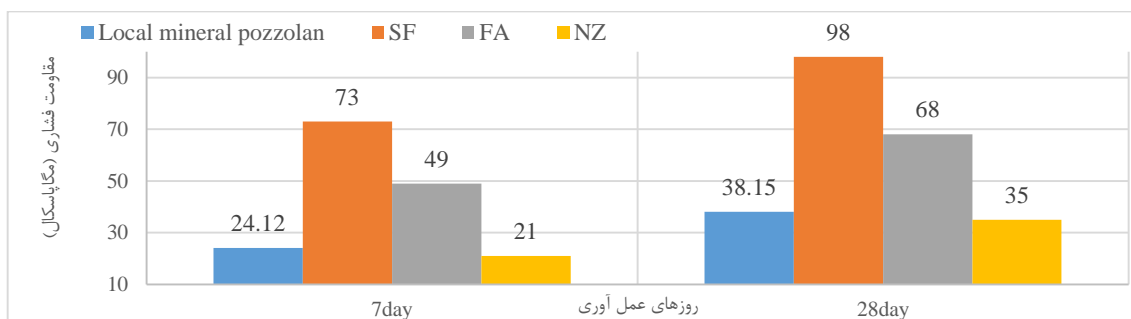
شکل ۱۱: بتن پوزولانی حاوی هیبرید الیاف فولاد و پلی پروپیلن در سن ۲۸ روزگی.

## ۶- مقایسه نتایج با بتن‌های 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، پوزولان‌های معدنی محلی، مقاومت اولیه کمتری در ۷ و ۲۸ روز عمل‌آوری نسبت به بتن‌های پوزولانی سیلیکا فوم (SF) 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 می‌تواند به دلیل فعالیت مطلوب پوزولانی معدنی محلی باشد. این مقایسه در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

جدول ۵: مقدار رشد مقاومت فشاری در ۲۱ روز.

روزهای عمل‌آوری	Local Mineral Pozzolan (MPa) پوزولان معدنی محلی (MPa)	SF: سیلیکا فوم (MPa) [52]	FA: خاکستر بادی (MPa) [52]	NZ: زئولیت طبیعی (MPa) [51]
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



شکل ۱۲: مقایسه مقاومت فشاری نمونه های حاوی پوزولان معدنی محلی با سه پوزولان پر کاربرد در فاصله ۲۱ روز عمل‌آوری.

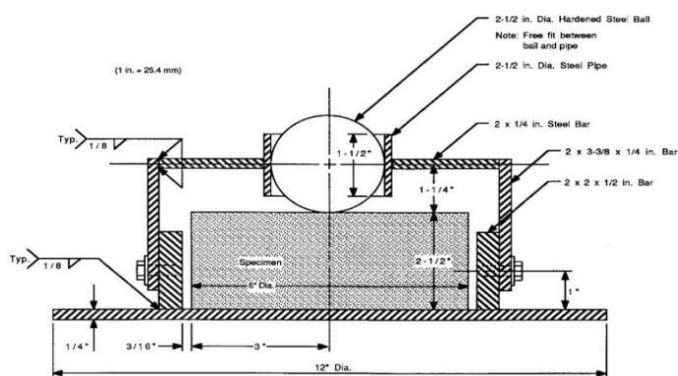


## ۷- ضربه سقوط آزاد گوی

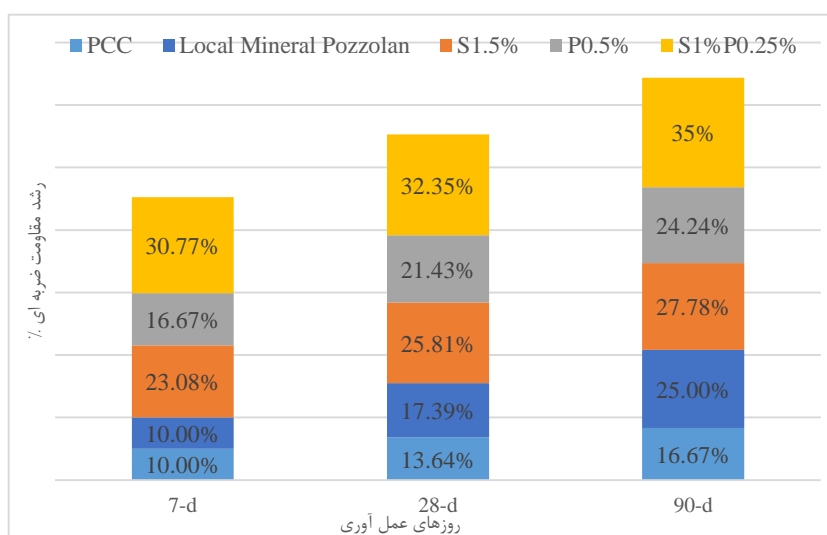
آزمایش مقاومت در برابر ضربه سقوط آزاد گوی، مطابق با ضوابط کمیته (2R) ACI 544 انجام شد [۳۶]. روش آزمایش به شرح این است: یک چکش ۴/۵۴ کیلوگرمی به طور مکرر از ارتفاع ۴۵۷ میلی متری به یک توپ فولادی سخت شده به قطر ۶۳/۵ میلی متر که دقیقاً در مرکز سطح بالایی نمونه دیسک بتنی ثابت شده، ضربه می‌زند. مکانیسم ضربه به این صورت است که وقتی چکش به توپ فولادی برخورد می‌کند چون توپ فولادی مماس با نمونه بتنی است، ضربه را به نمونه بتنی منتقل می‌کند. دستگاه آزمایش و ابعاد استاندارد آن در شکل ۱۳ قابل مشاهده است.

تعداد ضربه‌هایی که توسط آن اولین ترک قابل مشاهده ایجاد گردید، به عنوان (N1) ثبت شد. تعداد ترک‌هایی که پس از آن شکست نهایی نمونه رخ داد (N2) نامگذاری و ثبت شد. با استفاده از رابطه ۲، انرژی لازم برای ترک اولیه (E1) و انرژی لازم برای گسیختگی نهایی (E2) بر حسب ژول محاسبه شد.

$$E = N \times W \times H$$



شکل ۱۳: دستگاه آزمایش ضربه و ابعاد دستگاه.



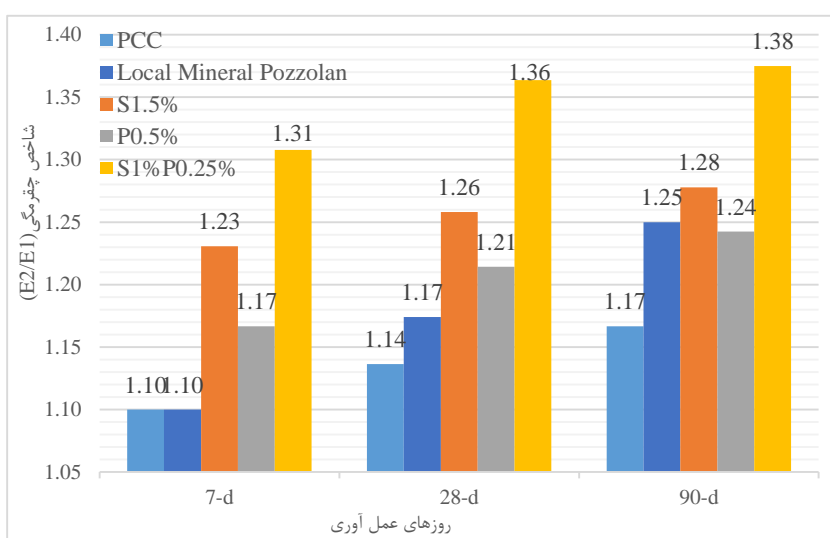
شکل ۱۴: درصد رشد مقاومت ضربه از ترک اولیه (N1) تا شکست دیسک بتنی (N2).

در معادله ۲،  $N$  تعداد ضربات ناشی از سقوط وزنه برای ایجاد ترک و  $W$  نشان دهنده وزن چکش و  $H$  نشان دهنده ارتفاع سقوط وزنه است. با انجام آزمایش بر روی نمونه‌های دیسک بتنی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه، نتایج به‌دست آمده عبارتند از: تعداد ضربه چکش به اولین ترک ( $N1$ )، تعداد ضربه چکش تا شکست نهایی نمونه‌ها ( $N2$ )، شاخص شکل‌پذیری (از تقسیم انرژی ضربه شکست نهایی بر انرژی ضربه اولین ترک به‌دست می‌آید) و انرژی جذب شده که از اختلاف انرژی ضربه شکست نهایی از انرژی ضربه اولین ترک به‌دست می‌آید در شکل ۱۴، ۱۵ و ۱۶ ارائه شده است.

با بررسی نتایج آزمایشگاهی در می‌یابیم که در نمونه بتن سیمانی معمولی، از سن ۷ تا ۲۸ روزگی، ۳۶ درصد افزایش مقاومت در برابر ضربه و از سن ۲۸ تا ۹۰ روزگی، ۲۲ درصد افزایش مقاومت در برابر ضربه مشاهده شده است. در همین نمونه، رشد چقرمگی شکست از ۷ تا ۲۸ روز و از ۲۸ تا ۹۰ روز به ترتیب: ۳/۶ و ۲/۶ درصد است. همچنین، رشد جذب انرژی از سن ۷ تا ۲۸ روزگی ۲۰۱ درصد و از ۲۸ تا ۹۰ روزگی ۳۳ درصد است. در نتایج نمونه بتن سیمانی معمولی، اعداد بدست آمده نشان می‌دهد که مقاومت به ضربه در این نمونه‌ها در سن ۷ روزگی بسیار ضعیف است و با ادامه عمل‌آوری در ۲۸ روزگی به میزان قابل توجهی افزایش خواهد یافت.

نمونه‌های بتنی حاوی پوزولان معدنی محلی، رشد افزایش مقاومت در برابر ضربه در ۷ الی ۲۸ و از ۲۸ تا ۹۰ روزگی به ترتیب: ۷۳/۹ و ۴۳/۷۶ درصد می‌باشد. رشد چقرمگی شکست، در نمونه‌های بتن پوزولانی از سن ۷ الی ۲۸ روز، ۶/۳۷ درصد و از سن ۲۸ الی ۹۰ روز، ۶/۸۴ درصد می‌باشد. جذب انرژی در سنین ۷ الی ۲۸ روز، ۲۹۹/۹ درصد رشد داشته است.

این رشد، در سن ۲۸ الی ۹۰ روزگی نمونه‌ها ۵۱/۰۱ درصد می‌باشد. این موضوع در مقایسه با بتن سیمانی معمولی نشان از فعالیت پوزولانی و تولید ژل C-S-H و استحکام نمونه بتنی در ۲۸ روز ابتدای ساخت نمونه دارد و با تحلیل یافته‌های تصاویر بخش SEM مطابقت دارد. در مورد نمونه‌های حاوی الیاف فولادی، مقاومت ضربه از سن ۷ تا ۲۸ روزگی ۱۲ درصد و از سن ۲۸ تا ۹۰ روزگی ۷/۶ درصد افزایش یافته است. در این نمونه‌ها چقرمگی شکست از ۷ تا ۲۸ روز و از ۲۸ تا ۹۰ روز، به ترتیب: ۲/۴ و ۱/۵ درصد رشد دارند. این اعداد برای رشد جذب انرژی به ترتیب: ۱۶۶ و ۲۵ درصد است. نمونه‌های حاوی پلی‌پروپیلن ۲۹ درصد افزایش در ۷ تا ۲۸ روز و ۱۳ درصد افزایش مقاومت در برابر ضربه از ۲۸ روز به ۹۰ روز داشتند. چقرمگی شکست در این نمونه‌ها در سن ۷ تا ۲۸ روزگی ۳/۴ درصد و در سن ۲۸ تا ۹۰ روزگی ۲/۴ درصد افزایش یافت. درصد جذب انرژی در سنین ۷ تا ۲۸ روزگی ۲۰۰ درصد و از ۲۸ تا ۹۰ روزگی ۳۳ درصد افزایش یافته است. رشد مقاومت به ضربه برای نمونه‌های هیبریدی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن در سن ۷ تا ۲۸ روزگی ۵ درصد و از سن ۲۸ تا ۹۰ روزگی ۸ درصد بوده است. چقرمگی شکست ۳/۸٪ در ۷ تا ۲۸ روز و ۱/۴٪ در ۲۸ تا ۹۰ روز افزایش یافت. این نمونه‌ها در سنین اعلام شده برای رشد در جذب انرژی به ترتیب ۱۷۵٪ و ۲۵٪ می‌باشند. شکل ۱۴، ۱۵، ۱۶.



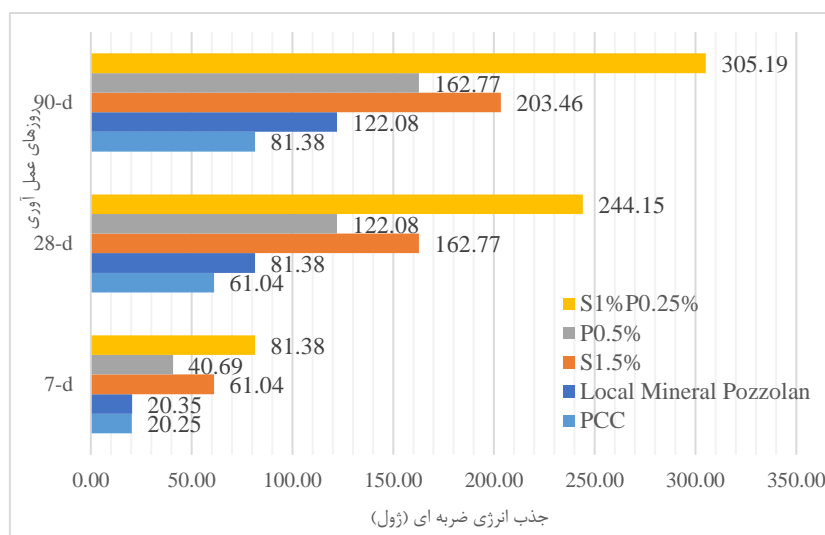
شکل ۱۵: شاخص شکل‌پذیری در برابر ضربه.

در بررسی و طبقه بندی نتایج، نمونه‌های حاوی ترکیبی از الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن در سن ۹۰ روزگی در آزمون‌های مقاومت ضربه و درصد جذب انرژی، چقرمگی شکست نتیجه بهتری نسبت به سایر نمونه‌ها داشتند. و سپس در رتبه دوم، نمونه‌های حاوی الیاف فولادی نتایج مطلوب تری داشتند. ضعیف ترین نتایج آزمایشگاهی برای نمونه بتن سیمانی معمولی است که فاقد هر گونه الیاف است. نمونه‌های حاوی پلی‌پروپیلن نتایج بهتری نسبت به نمونه بتن سیمانی معمولی داشتند اما بهتر از نمونه‌های حاوی الیاف فولادی نبودند.

مقاومت ضربه ای در مرحله شکست نهایی در نمونه‌های حاوی فولاد هیبریدی و پلی‌پروپیلن در سن ۹۰ روزگی ۹۶ درصد بیشتر از نمونه بتن سیمانی معمولی و ۳۴ درصد بیشتر از نمونه حاوی پلی‌پروپیلن با شرایط مشابه و در مقایسه با نمونه حاوی الیاف فولادی با شرایط ذکر شده، حدود ۲۰ درصد بیشتر است. جذب انرژی نمونه‌های هیبریدی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن در سن ۹۰ روزگی ۲۷۵ درصد بیشتر از نمونه بتن سیمانی معمولی و به ترتیب حدود ۸۴ درصد و ۵۰ درصد بیشتر از نمونه‌های پلی‌پروپیلن و فولاد با شرایط ذکر شده است که نتیجه بسیار خوبی است. چقرمگی شکست در نمونه‌های هیبریدی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن به ترتیب ۱۸، ۱۱ و ۸ درصد بیشتر از نمونه بتن سیمانی معمولی و نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و نمونه‌های حاوی الیاف فولادی است.

یافته‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که نمونه‌های حاوی الیاف، معمولاً در آزمایش مقاومت در برابر ضربه، به سه قطعه شکسته می‌شوند. اما حتی زمانی که شکسته می‌شوند، قطعات شکسته شده آن‌ها توسط الیاف درون نمونه‌ها به هم متصل هستند.

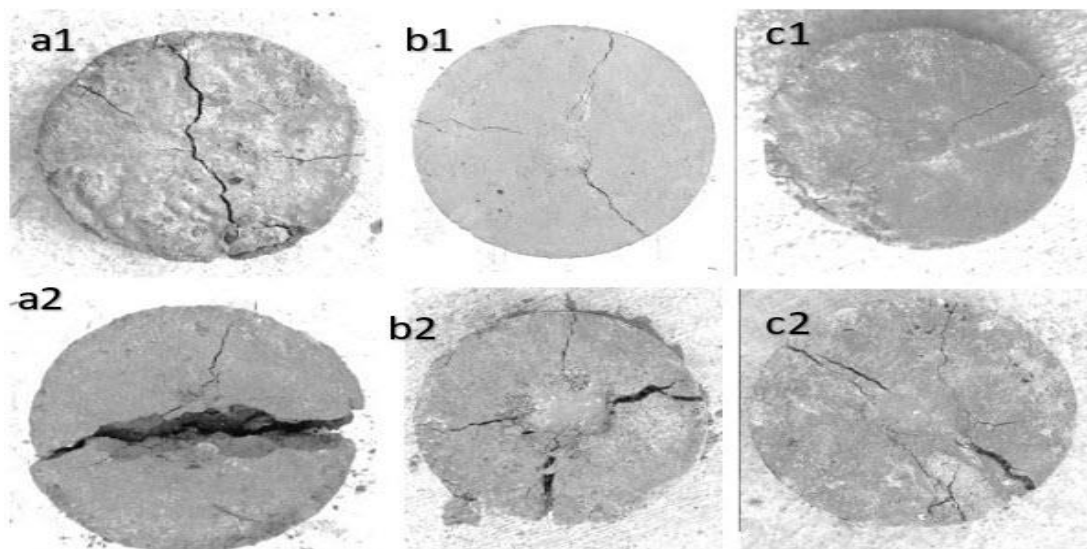
در نمونه‌های بدون الیاف، شکست نمونه در برابر ضربه اغلب با پودر شدن همراه است. نمونه‌های حاوی هیبریدهای الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن، همانطور که قبلاً ذکر شد، مقاومت مطلوب تری نسبت به نمونه‌های دیگر دارند. به این دلیل که این نمونه‌ها تأثیر مؤثرتری در پل زدن با الیاف فولادی دارند و می‌توانند نقش مهم تری در بهبود چقرمگی شکست داشته باشند. الیاف پلی‌پروپیلن نیز به دلیل انعطاف پذیری خوب، اثر پل زدن را بر روی ترک‌های اولیه و ریزترک‌ها افزایش می‌دهند. این مکانیسم را باید در بتن‌های حاوی هیبریدهای الیافی در نظر گرفت که در آن، الیاف فولادی به جذب انرژی ضربه کمک می‌کنند و می‌توانند انرژی ضربه را بهتر و بیشتر حذف کنند. همچنین، الیاف پلیمری از رشد ریز ترک‌ها و تکثیر، توسعه و بزرگ شدن آن‌ها جلوگیری می‌کند. پس، این ترکیب می‌تواند ترکیبی مناسب و در برابر ضربه، مقاوم تر باشد. این مسائل با یافته‌های لی و همکاران مطابقت دارد [۵۳].



شکل ۱۶: جذب انرژی ضربه ای در واحد ژول (E1-E2).

با توجه به اظهارات اخیر، می‌توان دریافت که تقویت بتن با الیاف، به طور کلی، به مقاومت در برابر ضربه کمک می‌کند. به عبارت دیگر، هم مقاومت در برابر ترک اول و هم مقاومت در برابر شکست نهایی را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، ضمن افزایش سختی، با توزیع انرژی ضربه وارد شده در ماتریس و سایر الیاف، جذب انرژی را افزایش می‌دهد. با ظاهر شدن ترک در بتن، الیاف بیرون زده و الیاف اغلب کشیده می‌شوند. بتن‌های حاوی هیبریدهای الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن با استفاده از الیاف فولادی اولین ترک را به تاخیر می‌اندازد و با

کمک الیاف پلی‌پروپیلن از انتشار سریع ترک‌ها جلوگیری می‌کند و این باعث افزایش مقاومت ضربه ای بتن می‌شود. شکل ۱۶ و ۱۷ تاثیر الیاف در جذب انرژی ضربه‌ای را توضیح می‌دهد.



شکل ۱۷: مقایسه چقرمگی در برابر ضربه شماره ۱ اولین ترک و شماره ۲ شکست نهایی ناشی از ضربه تکرار شونده گوی فلزی افتان: a بتن سیمانی معمولی ، b بتن پوزولانی حاوی الیاف فولادی، c بتن پوزولانی حاوی هیبرید الیاف فولادی و پلی پروپیلن

با استفاده از روابط تحلیل رگرسیون نتایج مقاومت ضربه، رابطه خطی بین تعداد ضربات تا اولین ترک و تعداد ضربات تا شکست برای نمونه‌های بتن سیمانی معمولی، بتن حاوی پوزولان معدنی محلی و بتن‌های الیاف فولادی، الیاف پلی‌پروپیلن و هیبریدهای الیاف فولاد و پلی‌پروپیلن در نمودار رسم شد. در شکل ۱۸ برای هر یک و ضریب همبستگی ( $R^2$ ) و برای هر یک از این نمونه‌ها (معادلات ۳ تا ۷) به ترتیب با مقادیر ۰/۹۹۸۹، ۰/۹۹۳۱، ۰/۹۹۹۵، ۰/۹۹۹۷ و ۱ معادلات پیش بینی توسعه یافته برای قدرت شکست به شرح زیر بود:

$$Y = 1.1977X - 1.023 \text{ نمونه‌های بتن سیمانی معمولی}$$

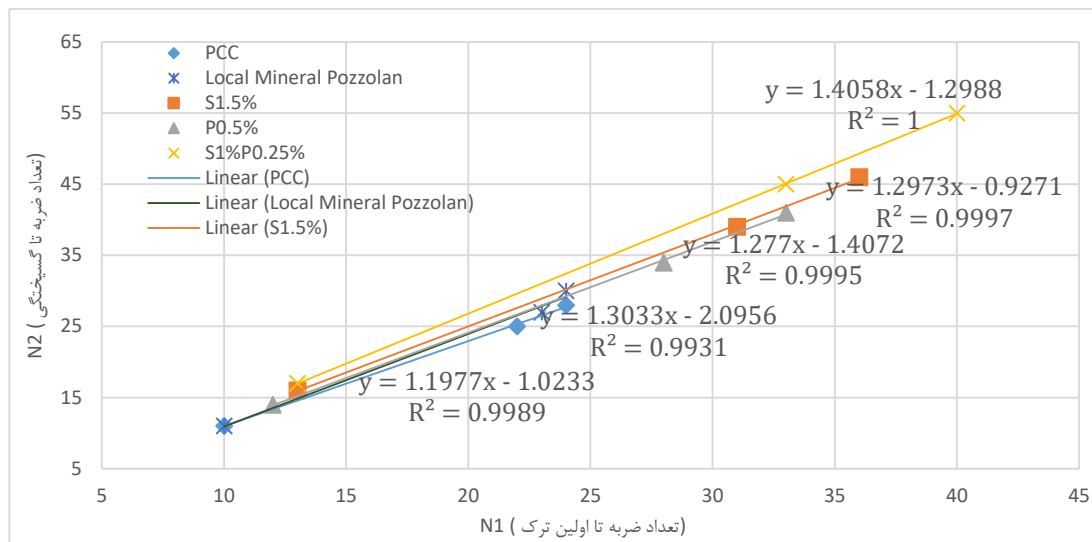
$$Y = 1.3033X - 2.0956 \text{ نمونه‌های پوزولان معدنی محلی}$$

$$Y = 1.277X - 1.4072 \text{ نمونه‌های با الیاف فولادی}$$

$$Y = 1.2973X - 0.9271 \text{ نمونه‌های با الیاف پلی‌پروپیلن}$$

$$Y = 1.4058X - 1.2988 \text{ نمونه‌های با فولاد هیبریدی و الیاف پلی‌پروپیلن}$$

Y پیش بینی مقاومت ضربه ای نمونه تا مرحله شکست نمونه است و X به عنوان تعداد ضربه ای که اولین ترک در نمونه ظاهر شود.



شکل ۱۸: پیش بینی مقاومت ضربه ای نمونه‌ها و ضریب همبستگی مابین تعداد ضربه و گسیختگی در هر نمونه.

به گفته اوستل و همکاران، برای یک مدل معقول، ضریب همبستگی  $R^2$  در صورتی قابل قبول است که  $0.7$  یا بالاتر باشد [۵۴]. این موضوع همچنین؛ در مطالعات رحمانی و همکاران استفاده و تایید شده است [۵۵]. بنابراین، روابط بین تعداد ضربه به اولین ترک و پیش بینی تعداد ضربه به شکست نهایی برای نمونه‌های آزمایش شده در معادلات ۳ تا ۷ با موفقیت به دست آمده است. از آنجایی که در آزمایش مقاومت به ضربه، نمونه‌های هیبریدی تحت تأثیر چقرمگی ضربه در طول آزمایش قرار می‌گیرند، شاخص اثر ترکیبی  $\alpha$  که سودمندی یا ناکارآمدی یک ترکیب هیبریدی را اندازه‌گیری می‌کند، در این مطالعه مورد ارزیابی قرار گرفت [۵۶].

$$\alpha = \frac{EH - E0}{\sum (Ei - E0)bi}$$

بدین صورت که  $bi = Vi / V$  کسر حجمی یک نوع الیاف را در حجم کل الیاف نشان می‌دهد، حجم  $Vi$  برابر با  $SF$  یا  $PP$  است،  $Ei$  چقرمگی ضربه ای بتن با استفاده از یک نوع الیاف،  $E0$  برابر است با چقرمگی ضربه ای بتن سیمانی معمولی و فاقد الیاف،  $EH$  چقرمگی ضربه ای بتن حاوی هیبرید الیافها است. اگر  $\alpha > 1$  باشد، اثر ترکیبی برای بهبود چقرمگی ضربه مثبت است، در حالی که  $\alpha < 1$  به معنای منفی بودن اثر ترکیبی است. در این مطالعه اثر ترکیبی بر روی یک نمونه حاوی ترکیبی از الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن که بر اساس نتایج آزمایشگاهی در ۹۰ روز مقاومت ضربه بالاتری نسبت به نمونه‌های دیگر داشت، کنترل و با معادله ۸ مقایسه شد که پاسخ بیش از ۱ است ( $\alpha > 1$ ) و نتایج آزمایشگاهی این تحقیق را تایید می‌کند.

## ۸- نتیجه گیری

در این مطالعه، 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 گلخانه‌ای از کارخانه‌های سیمان و کاهش آلودگی‌های زیست محیطی هدف اصلی این کار است. با بررسی بتن ساخته شده با این پوزولان، نتایج زیر حاصل شده است:

- ۱- پوزولان آسیاب، نوعی پوزولان معدنی محلی با خواص سیمانی مطلوب است که قابل استفاده در بتن است و باید از درصد بهینه آن استفاده کرد. طبق آخرین آزمایشات آزمایشگاهی، مقدار ۱۵ درصد وزنی سیمان برای تعویض در بتن بهینه است.
- ۲- این پوزولان معدنی با توجه به اندازه ذرات خود، بین سنگدانه‌های ریز و درشت قرار گرفته، حفره‌ها را پر کرده و باعث خارج شدن آب مویرگی شده و از این طریق به هیدراسیون کمک می‌کند، بنابراین، نسبت آب به سیمان و افزایش استحکام فشاری و دوام را بهبود می‌بخشد.

۳- پوزولان معدنی به دلیل واکنش‌های پوزولانی خوب خود توانست سرعت استحکام را بهبود بخشد، این پوزولان از پرتلندیت و هیدراسیون سیمان و آب و  $\text{SiO}_2$  استفاده نموده و ژل C-S-H منسجم تر و قوی تری ساخت. پوزولان معدنی محلی، ژل C-S-H بیشتری نسبت به نمونه بتن سیمانی معمولی تولید کرد و حفره‌ها را به طور قابل توجهی کاهش داد. پرتلندیت بسیار کمتری در نمونه‌های حاوی این پوزولان مشاهده شد. همچنین؛ چسبندگی سنگدانه به ماتریس بهبود یافته است.

۴- 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 الیاف، جداسازی در سطح الیاف و ماتریس به دلیل تنش‌های کششی عمود بر مسیر مورد انتظار ترک پیشرونده، آغاز شد. هنگامی که ترک پیشرونده به سطح درز مابین ماتریس و الیاف 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.

۵- نتایج نشان داد که با افزایش سن بتن، مقاومت فشاری در تمامی نمونه‌ها در هر طرح مخلوط افزایش می‌یابد. نمونه ای که به صورت غوطه‌ور در آب عمل‌آوری شد، در مقایسه با نمونه ای که در شرایط محیطی عمل‌آوری شد، از استحکام بیشتری برخوردار بود.

۶- الیاف فولادی مقاومت فشاری را بهتر از الیاف دیگر بهبود می‌بخشد. الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن مقاومت فشاری محوری را تا حدی افزایش می‌دهند، 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 نداشت. ترکیب دو نوع الیاف در نمونه‌های هیبریدی مقاومت فشاری تک محوری را به طور قابل توجهی افزایش نداد و تأثیر بیشتر آن بهبود در جلوگیری از انتشار ترک بود.

۷- 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 به طور قابل توجهی چقرمگی شکست را بهبود می‌بخشند. الیاف سخت تر با مدول الاستیسیته بالاتر منجر به مقاومت در برابر اولین ترک و استحکام نهایی می‌شود و نوع دیگری که تقریباً انعطاف پذیر است منجر به بهبود استحکام خمشی و افزایش ظرفیت کرنش پس از اولین ترک می‌شود.

۸- در آزمایش مقاومت فشاری، الیاف فولادی در نمونه های بتنی، بدلیل مدول الاستیسیته بالای خود، با افزایش شکل پذیری، از گسترش عمده در ترک‌ها ممانعت کرده و مقاومت فشاری را افزایش داده است. این درحالی است که ترکیب الیاف فولادی با الیاف پلی پروپیلن و تولید نمونه‌های بتنی هیبریدی، بدلیل تراکم الیاف و اختلاط نامناسب ناشی از آن که نتیجتاً ایجاد حفره نیز نموده، مقاومت فشاری را در نمونه های هیبریدی الیاف کاهش داده است. در آزمایش مقاومت خمشی، عملکرد الیاف پلی پروپیلن در نمونه های هیبریدی، در جلوگیری از رشد ترک‌های ریز و اولیه، در افزایش ظرفیت خمشی نسبت به نمونه‌های حاوی الیاف فولادی موثر واقع شده و بخش الیاف فولادی در نمونه های هیبریدی، ظرفیت باربری و شکل پذیری را پس از ظهور اولین نقطه حداکثر بار، افزایش دادند.

۹- تجزیه و تحلیل XRD نمونه‌ها نشان داد که  $\text{Ca(OH)}_2$  و  $\text{Ca(CO)}_3$  با افزودن الیاف در بتن تغییر معنی داری نداشتند و تغییرات قابل توجهی نتیجه فعالیت پوزولانی بود که می‌تواند مقدار  $\text{SiO}_2$  را در نمونه افزایش دهد. و همچنین؛ باعث افزایش استحکام و کاهش پرتلندیت و کلسیت می‌شود.

۱۰- بررسی عکس‌های SEM نشان داد که: به دلیل خصوصیات غیرآب‌گریزی الیاف فولادی، آن‌ها بهتر به ماتریس چسبیده‌اند. در مقابل، الیاف پلی‌پروپیلن خاصیت آبریز داشتند و به همین دلیل کریستال‌ها و ورقه‌های مضر در اطراف آن‌ها تشکیل می‌شد به طوری که به خوبی با الیاف پیوند نمی‌خورد و در نتیجه تخلخل در این نمونه‌ها بیشتر مشاهده می‌شد. با این حال، به دلیل خاصیت پل زدن ظریف الیاف پلی‌پروپیلن، تا حدی ضعف ناشی از منافذ را جبران می‌کنند. نمونه‌های حاوی الیاف هیبریدی نیز به دلیل وجود سوراخ‌هایی در این نمونه‌ها که می‌تواند ناشی از تراکم الیاف و اختلاط نامناسب نمونه باشد، دو خاصیت فوق را نشان دادند.

۱۱- 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.

۱۲- با بررسی نتایج تجربی مقاومت ضربه ای نمونه‌ها، مشخص شد که بهترین مقاومت ضربه ای و چقرمگی متعلق به نمونه‌های بتن پوزولانی حاوی هیبریدهای الیاف فولادی و پلی پروپیلن است. این نمونه‌ها هم خاصیت الیاف پلی پروپیلن برای جلوگیری از گسترش ریزترک‌ها و پل زدن آن‌ها و هم خاصیت الیاف فولادی برای جلوگیری از گسترش ترک‌های بزرگتر را داشتند.

## مراجع

۱. Sekoai P.T., Y.K.O., *Biofuel Development Initiatives in Sub-Saharan Africa: Opportunities and Challenges*. Climate, 2016. 4(2).
۲. Kang Y., K.S., Ma X., *Climate change impacts on crop yield, crop water productivity and food security – A review*. 2009. 19:(12) p. 1665-1674.
۳. Stocker T.F., Q.D., 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(Cambridge University Press): p. 1535PP.
۴. Rahimpour M.R., F.M., Makarem M.A., *Advances in Carbon Capture : Methods, Technologies and Applications*. 1st Edition ed. Chapter 1 - CO2 emission sources, greenhouse gases, and the global warming effect, ed. M.O.D. Kelvin O.Yoro. 2020: Elsevier Science, 2020. 570.
۵. Worrell E., P.L., Martin N., Hendriks C., Meida L., *Carbon dioxide emissions from the global cement industry*. Annu. Rev. Energy Environ, 2001. 26: p. 303-329.
۶. Izumi Y., I.A., Ho H.J., *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.
۷. Hanein T., G.-M.J., Bannerman M., *Carbon footprint of calcium sulfoaluminate clinker production*. Journal of Cleaner Production, 2018. 172: p. 2278-2287.
۸. Cobîrzan N., B.A.A., Moşonyi E., *Investigation of the natural pozzolans for usage in cement industry*. Procedia Technol, 2015. 19: p. 506-511.
۹. Jacoby P.C., P.F., *Pozzolanic effect of porcelain polishing residue in Portland cement*. Journal of Cleaner Production, 2015. 100: p. 84-88.
۱۰. Senhadji Y., E.G., Mouli M., Khelafi H., Benosman, *Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar*. Powder Technology, 2014. 254: p. 314-323.
۱۱. Thomas B.S., Y.J., Hung Mo K., Abdalla 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.
۱۲. Wu L., X.F., Zhao P., Qiu Y., *Fabrication, Tensile and Bending Properties of Wheat Straw/Polylactic Acid Green Composites*. Advanced Materials Research, 2013 :627 .p. 715-721.
۱۳. Christopher F., B.A., Ahmed S., *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(2): p. ۶۹۲-۶۷۵ .
۱۴. Muralidhar Kamath, S.P., Mithesh Kumar, *Micro-characterisation of alkali activated paste with fly ash-GGBSmetakaolin binder system with ambient setting characteristics*. Construction and Building Materials, 2021. 277.
۱۵. Alyousef R., M.H., Tahir M.Md., Alabduljabbar H., *Green concrete composites production comprising metalized plastic waste fibers and palm oil fuel ash*. Materials Today: Proceedings, 2021. 39: p. 911-916.
۱۶. Ranjbar M.K., M.R., Mousavi Y., Yosefi S., *Effects of natural zeolite on the fresh and hardened properties of self-compacted concrete*. Construction and Building Materials, 2013. 47: p. 806-813.
۱۷. Nie CZ. Q., Z.C., 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(5).
۱۸. Gökçe H., H.D., Ramyar K., *Effect of fly ash and silica fume on hardened properties of foam concrete*. Construction and Building Materials, 2019. 194: p. 1-11.

- ۱۹ . Song H., S.V., *Studies on the corrosion resistance of reinforced steel in concrete with ground granulated blast-furnace slag—An overview*. Journal of Hazardous Materials, 2006. 138(2): p. 226-233.
- ۲۰ . Kwan A.K.H., C.J.J., *Adding fly ash microsphere to improve packing density, flowability and strength of cement paste*. Powder Technology, 2013. 234: p. 19-25.
- ۲۱ . Shi B., W.Z., 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.
- ۲۲ . Rashiddadash P., R.A.A., Mahdikhani M., *Experimental investigation on flexural toughness of hybrid fiber reinforced concrete (HFRC) containing metakaolin and pumice*. Construction and Building Materials, 2014 : ۱۰۱ .p. 313–320.
- ۲۳ . Akcay B., T.M.A., *Performance evaluation of silica fume and metakaolin with identical finenesses in self compacting and fiber reinforced concretes*. Construction and Building Materials, 2018. 185: p. 436-444.
- ۲۴ . Jun Feng , W.S., Hongzhou Zhai, Lei Wang, Haolin Dong , Qi Wu, *Experimental Study on Hybrid Effect Evaluation of Fiber Reinforced Concrete Subjected to Drop Weight Impacts*. Materials, 2018. 11(12).
- ۲۵ . Afroz M., V.S., Patnaikuni I., *Effects of hybrid fibers on the development of high volume fly ash cement composite*. Construction and Building Materials, 2019. 215: p. 984-997.
- ۲۶ . Nanda R.P., M.A.K., Behera B., *Influence of metakaolin and Recron 3s fiber on mechanical properties of fly ash replaced concrete*. Construction and Building Materials, 2020. 236: p. 120949.
- ۲۷ . Chandak M., P.P.Y., *Influence of Metakaolin and steel fibers on stress strain behavior of concrete*. Journal of Physics: Conference Series, 2021. 1913.
- ۲۸ . Li J., W.J., Wu Ch., Liu Zh., Li j., *Hybrid fibre reinforced ultra-high performance concrete beams under static and impact loads*. Engineering Structures, 2021. 245: p. 112921.
- ۲۹ . Karthik S., R.M.K.S., Murali G., *Investigations on the Response of Novel Layered Geopolymer Fibrous Concrete to Drop Weight Impact*. buildings, 2022. 12(2).
- ۳۰ . BS, *Composition, specifications and conformity criteria for common cements, in Cement Part 1*. EN 197-1:2011, BSI Standards Publication.
- ۳۱ . Liu G., F.M.V.A., Brouwers H. J. H. , *Waste glass as binder in alkali activated slag–fly ash mortars*. Materials and Structures, 2019. 52.
- ۳۲ . Venkat G.N., C.K., Ahmed E., NagendraBabu V., *Comparative study on mechanical properties and quality of concrete by part replacement of cement with silica fume, metakaolin and GGBS by using M–Sand as fine aggregate*. Materials Today: Proceedings, 2021. 43.
- ۳۳ . Sasui S., K.G., Nam J., Van Riessen A., Nyarko M.H., *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(15).
- ۳۴ . Chen J.J., N.P.L., Kwan A.K.H., Li L.G., *Lowering cement content in mortar by adding superfine zeolite as cement replacement and optimizing mixture proportions*. Cleaner production, 2019. 210: p. 66-76.
- ۳۵ . ASTM, *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. C618 2014.
- ۳۶ . Koirala M., R.J.B., *CONSTRUCTION SAND, QUALITY AND SUPPLY MANAGEMENT IN INFRASTRUCTURE PROJECT*. International Journal of Advances in Engineering & Scientific Research,, 2017. 14(4).
- ۳۷ . BS, *Tests for mechanical and physical properties of aggregates, in Part 3: Determination of loose bulk density and voids*. EN 1097-3:1998: BSI Standards Publication.
- ۳۸ . Xu L., L.Q., Chi Y., Yang Y., Yu M., Yan Y., *Axial compressive performance of UHPC filled steel tube stub columns containing steel-polypropylene hybrid fiber*. Construction and Building Materials, 2019. 204: p. 754-767.
- ۳۹ . ASTM, *Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete, in Fiber-Reinforced Concrete -C 1116.2006*, ASTM: U.S.
- ۴۰ . Alavi Nia A., H.M., Nili M., Afrough Sabet 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 : p. 62-73.
- ۴۱ . BS, *Testing hardened concrete in Part 3: Compressive strength of test specimens*. EN 12390-3:2009, BSI: UK.



- ۴۲ . ASTM, *Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete ,C1609*, in *Using Beam With Third-Point Loading*. 2019: U.S.A.
- ۴۳ . Surendra P. Shah , J.I.D., Charles H. Henager Sr., Henry J. Molloy, R. N. Swamy, Claire G. Ball, Antoine E. Naaman, George J. Venta, Gary L. Vondran, Marvin E. Criswell, Charles W. Josifek, Ronald F. Zollo, et al., *Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete*, in *ACI 544.2R-89*. 2009, ACI Committee: U.S.A.
- ۴۴ . Yue J.G., W.Y.N., Beskos D.E., *Uniaxial tension damage mechanics of steel fiber reinforced concrete using acoustic emission and machine learning crack mode classification*. Cement and Concrete Composites, 2021. 123.
- ۴۵ . Alwesabi E.A.H., A.B.B.H., Alshaikh I.M.H., Zeyad A.M., Altheeb A., Alghamdi H., *Experimental investigation on fracture characteristics of plain and rubberized concrete containing hybrid steel-polypropylene fiber*. Structures, 2021. 33: p. 4421-4432.
- ۴۶ . Berkowski P., K.-K.M., *Effect of Fiber on the Concrete Resistance to Surface Scaling Due to Cyclic Freezing and Thawing*. Procedia Engineering, 2015. 111: p. 121-127.
- ۴۷ . Afroughsabet V., O.T., *Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers*. Construction and Building Materials, 2015. 94: p. 73-82.
- ۴۸ . Yap S.Y., A.U.J., Jumaat M.Z., *Enhancement of mechanical properties in polypropylene- and nylon-fibre reinforced oil palm shell concrete*. Materials & Design, 2013. 49.
- ۴۹ . Khan M.I., A.A.M., *Properties of natural pozzolan and its potential utilization in environmental friendly concrete*. Canadian Journal of Civil Engineering 2011. 38: p. 71-78.
- ۵۰ . Celik K., J.M.D., Mancio M., Meral C., Emwas A.H., Mehta P.K., Monteiro P.J.M., *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: p. 136-147.
- ۵۱ . Ramezani pour A.A., K.A., 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. 25: p. 589-596.
- ۵۲ . Mohamed O.A., N., O.F., *Compressive strength and stability of sustainable self-consolidating concrete containing fly ash, silica fume, and GGBS*. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2017. 11: p. 406-411.
- ۵۳ . Qinghua Li, X.Z., Shilang Xu, Xiang Gao, *Influence of steel fiber on dynamic compressive behavior of hybrid fiber ultra high toughness cementitious composites at different strain rates*. Construction and Building Materials, 2016. 125: p. 490-500.
- ۵۴ . Ostle B, T.K., Hicks CR, Mcelrath GW ,*Engineering statistics: the industrial experience*. New York Duxbury Press 1996.
- ۵۵ . Tara Rahmani, B.K., Mohammad Shekarchi, Abdollah Safari, *Statistical and experimental analysis on the behavior of fiber reinforced concretes subjected to drop weight test* .Construction and Building Materials, 2012. 37: p. 360-369.
- ۵۶ . Wang, P.H., Z.; Zhou, D.; Wang, X.; Zhang, C, *Impact mechanical properties of concrete reinforced with hybrid carbon fibers*. Journal of vibration and shock, 2012. 31: p. 14-18.