

## بررسی تجربی مقاومت و جذب انرژی بتن مسلح شده با الیاف هیبریدی تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت کم

عباس صادقیان، دانشجوی دکتری گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز  
طالب مرادی شقاقی، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز  
یعقوب محمدی\*، استاد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل  
حسین تقی پور، استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ولایت، ایرانشهر

Email: yaghoubm@uma.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۰۸ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۵

### چکیده

استفاده از بتن مسلح شده با الیاف در صنایع مختلف به دلیل خواص مکانیکی مطلوب، سبکی سازه، ظرفیت جذب انرژی خوب و مقاومت اولیه زیاد تحت بارهای ضربه‌ای و همچنین نسل جدید بتن الیافی با شکل پذیری عالی و قابلیت کنترل ترک در حال توسعه می‌باشد. با توجه به اینکه بتن الیافی در معرض ضربه و بارهای شدید، به دلیل انعطاف پذیری، عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد، در این مطالعه، میزان جذب انرژی و مقاومت اولیه بتن تقویت شده با الیاف فورتا، بازالت و بارچیپ، تحت بارگذاری ضربه‌ای نفوذی مورد بررسی قرار گرفت. جهت بررسی تأثیر درصد الیاف بر خواص ضربه پذیری، هشت نمونه بتن مسلح شده با الیاف هیبریدی تحت آزمون تجربی قرار گرفت. همچنین، سطح شکست و چگونگی چسبندگی الیاف به بتن مسلح شده با الیاف، به همراه مودهای تخریب، ارزیابی شد. نتایج نشان داد که میزان مقاومت اولیه و جذب انرژی در بتن مسلح شده با الیاف هیبریدی به ترتیب ۲۹۲/۸ درصد و ۲۱۲/۳ درصد در مقایسه با بتن معمولی افزایش داشته است. با بررسی سطح شکست نمونه‌ها مشخص شد که چسبندگی بین دو الیاف بازالت و فورتا به بتن زمینه بسیار مطلوب است؛ اما جدایش بین الیاف بارچیپ و بتن زیاد است و کارایی این الیاف در تقویت بتن را کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: بتن الیافی، بتن مسلح شده، جذب انرژی، بار ضربه‌ای، مقاومت اولیه.

## ۱. مقدمه

بتن یک مصالح ساختمانی قدیمی است که قرن‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. بتن به طور گسترده در ساخت-وسازهای مهندسی عمران، ساختمان‌ها (آلبرتی و همکاران، ۲۰۱۷)، پل‌ها و سایر سازه‌های عمرانی مورد استفاده قرار گرفته است (شکروی و همکاران، ۲۰۲۰؛ محمدیان یاسوج و همکاران، ۲۰۲۱). طراحی در برابر بارهای ضربه‌ای و شدید همچنان یکی از مهم‌ترین چالش‌های مهندسان در حوزه امنیت و رشد زیرساخت-های آسیب‌پذیر و قدیمی و همچنین ایمنی ترافیک جاده-ای است (محمدیان یاسوج و همکاران، ۲۰۱۵). بارهای ضربه‌ای می‌توانند تهدیدی جدی برای محیط ساخته شده ما با عواقب خطرناک باشند. نمونه‌ای از این بارهای ضربه‌ای می‌تواند ناشی از سقوط درختان، برخورد اتومبیل‌ها و همچنین اشیای پرتاب شده به سوی سازه‌ها در طول طوفان، و ضربات ناشی از برخورد خودروهای بزرگ با پایه پل‌ها باشد (مقدسی و همکاران، ۲۰۱۷). بنابراین، سازه‌های به‌کار رفته در فرودگاه‌ها، روسازی بزرگراه‌ها و گاردریل‌های بتنی (شکروی و همکاران، ۲۰۲۰)، کف‌های صنعتی، پانل‌های دیواری، بالشتک‌های پایه‌ها و ضربه‌گیرها که مستعد شرایط بارگذاری ناگهانی و بیش از حد هستند، نیاز به مقاوم‌سازی در برابر ضربه و افزایش ظرفیت جذب انرژی بیشتر دارند (شکروی و همکاران، ۲۰۲۰).

الیاف‌ها اخیراً توجه‌ها را به خود جلب کرده‌اند، زیرا پیشرفت‌های مفیدی را در بتن سخت‌شده و اولیه ایجاد می‌کنند. برخی از این ویژگی‌ها عبارتند از: مقاومت در برابر ضربه و سایش، کاهش جمع‌شدگی پلاستیک، ترک‌خوردگی، نشست، انقباض و نفوذپذیری (بنکاردینو و همکاران، ۲۰۱۰). الیاف را می‌توان به مواد طبیعی و مصنوعی تقسیم کرد (شیمی، ۲۰۱۷). الیاف پلیمری یک طبقه‌بندی شیمیایی از الیاف مصنوعی است. الیاف پلیمری

(پلی‌پروپیلن، پلی‌وینیل کلرید، پلی‌اتیلن، ...) به‌طور معمول از مواد مختلف پتروشیمی ساخته می‌شوند (آلبرتی و همکاران، ۲۰۱۷). الیاف پلی‌پروپیلن نیز یکی از رایج‌ترین انواع الیاف مصنوعی به دلیل هزینه‌های تولید نسبتاً کم و خواص شکل‌پذیری خوب است (اصلائی و نجادی، ۲۰۱۳). الیاف پلیمری به دو دسته الیاف ماکرو و الیاف میکرو تقسیم می‌شوند. الیاف میکرو با قطر کمتر از ۱۰۰ میکرومتر و طول ۵ تا ۳۰ میلی‌متر تولید می‌شوند. میکروالیاف علی‌رغم اینکه در کاهش ترک‌خوردگی ناشی از انقباض پلاستیک مؤثر هستند، به‌سختی بر خواص مقاومت و شکل‌پذیری بتن سخت‌شده تأثیر می‌گذارند. استفاده از الیاف ماکروپلیمر<sup>۱</sup> در بتن ریزی به‌عنوان جایگزینی برای الیاف فولادی، به دلیل افزایش ظرفیت جذب انرژی با افزودن الیاف کمتر در حجم، دارای عملکرد خوبی است. علاوه بر این، مقاومت در برابر محیط‌های خورنده و آسیب کمتر به اجزای بتن (به دلیل انعطاف‌پذیری آن‌ها) نیز در ساخت چندین تونل مورد تأیید قرار گرفته که در آن‌ها از بتن مسلح با الیاف پلیمری<sup>۲</sup> استفاده شده است (یوویچیچ و همکاران، ۲۰۰۹). مطالعات زیادی در مورد بتن مسلح با الیاف پلیمری انجام شده است. با این حال، تلاش برای بهبود توسعه مدلی جهت پیش‌بینی رفتار کششی، فشاری و جذب انرژی این مواد کاملاً موفق نبوده است (بابایی و همکاران، ۲۰۱۹). در برخی از قطعات بتنی، مانند کف‌های بتنی، استفاده از الیاف با جهت‌گیری تصادفی می‌تواند رفتار شکننده را در برابر رفتار الاستوپلاستیک، انتقال بار، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و شکل‌پذیری بهبود بخشد. این پیشرفت‌ها بسیار مهم هستند زیرا می‌توانند از توسعه بتن کفی برای کاربردهای سازه‌ای حمایت کنند (آریسوی و وو، ۲۰۰۸). فلورس جانسون و لی (۲۰۱۲) در بررسی استفاده از الیاف پلی‌وینیل الکل با کسر حجمی ۳/۳ درصد در بتن کفی با چگالی ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر

2- PFRC

1- MPF

از کارایی، صرفه اقتصادی و مقاومت بهتری نسبت به الیاف شیشه و کربن برخوردار است.

ژو و همکاران (۲۰۲۰) یک مطالعه تجربی در مورد خصوصیات مکانیکی بتن تقویت‌شده با الیاف بازالت انجام دادند. نتایج، بیانگر این موضوع بود که الیاف بازالت باعث بهبود عملکرد بتن از جمله مقاومت در برابر ترک‌خوردگی، مقاومت فشاری و کاهش مقاومت خمشی می‌شود. فراگاسا و همکاران (۲۰۱۹) ارزیابی مدل‌سازی عددی کامپوزیت‌های تقویت‌شده بازالت را برای سرعت کم ضربه انجام دادند و آن را با نتایج تجربی مقایسه کردند.

مطالعه چلیک و بینگول (۲۰۲۰) با هدف بررسی مقاومت ضربه و خواص شکست بتن خودتراکم تقویت‌شده با الیاف بازالت، الیاف شیشه و الیاف پلی‌پروپیلن انجام شد. در این مطالعه، بازالت، شیشه و الیاف پلی‌پروپیلن، هر یک در یک زمان، در کسرهای حجمی ۰/۱۵، ۰/۲۰، ۰/۲۵ و ۰/۳۰ به‌منظور تعیین تأثیر آن‌ها بر خواص تازه و سخت‌شده به بتن اضافه شد. نتایج بتن تقویت‌شده با الیاف خودتراکم نشان داد که افزودن الیاف بازالت، الیاف شیشه و الیاف پلی‌پروپیلن همگی باعث افزایش استحکام خمشی، مقاومت ضربه‌ای و انرژی شکست شد؛ در حالی که هیچ تغییر آشکاری در مقاومت فشاری مشاهده نشد. فو و همکاران (۲۰۱۸) رفتار دینامیکی فشاری بتن تقویت‌شده با الیاف بازالت-پلی‌پروپیلن ۲ را به‌صورت آزمایشگاهی و با استفاده از یک میله فشار مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که افزودن الیاف بازالت و پروپیلن در بهبود رفتار مقاومت در برابر ضربه بتن مؤثر است.

یک پژوهش آزمایشگاهی برای بررسی رفتار دیوار برشی کوپله با استفاده از بتن الیافی توانمند HPRCC توسط شربتدار و همکاران (۱۳۹۷) انجام شد. نتایج نشان داد که حضور الیاف باعث جلوگیری از افزایش عرض و

مکعب، دریافتند که آرماتور در مقایسه با بتن کفی تقویت‌شده، مقاومت فشاری و کششی را به ترتیب ۸۴/۷ و ۵۵۸ درصد افزایش می‌دهد. رایج‌ترین انواع الیاف برای تقویت بتن، الیاف فلزی و الیاف مصنوعی است. با این حال، استفاده از مواد طبیعی به‌عنوان تقویت‌کننده به‌طور وسیعی در حال توسعه است (گورینی و همکاران، ۲۰۱۸). علاقه به استفاده از مواد تقویت‌شده با مواد طبیعی در حال افزایش است زیرا می‌توان موادی با خواص مکانیکی خوب، چگالی کم و هزینه کم تهیه کرد (وو و همکاران، ۲۰۱۸؛ فالیانو و همکاران، ۲۰۱۹). علاوه بر این، عوامل طبیعی تجدیدپذیر و پایدار هستند که اکنون اهمیت بیشتری دارند (وو و همکاران، ۲۰۱۸؛ کاندمیر و همکاران، ۲۰۲۰). حسن نتاج و نعمت‌زاده (۲۰۱۷) پژوهشی را در مورد خصوصیات مکانیکی الیاف فورتا و الیاف فولادی روی بتن‌هایی با مقاومت زیاد با سیلیس و نانوسیلیس انجام دادند. هدف از پژوهش آنها تعیین خصوصیات بتن تقویت‌شده با الیاف بود. گوتام و آواستی (۲۰۱۸)، به مقایسه خواص بتن بدون الیاف و بتن با الیاف و همچنین انواع مختلف الیاف فورتا، و مزایای الیاف فورتا نسبت به الیاف فولادی، پرداختند. آن‌ها دریافتند که بتن بدون الیاف ماهیت شکننده‌ای دارد. به‌طوری که در ترکیب بتن مسلح با الیاف فورتا<sup>۱</sup>، به‌منظور اتلاف انرژی، ترک و در نهایت شکست اتفاق می‌افتد. آدسینا (۲۰۲۱) مروری بر عملکرد کامپوزیت‌های سیمانی تقویت‌شده با بازالت خردشده از نظر خواص مکانیکی و دوام آنها داشت که این مرور، افزایش خصوصیات مکانیکی کامپوزیت‌های سیمانی را تأیید می‌کند. پاریک و ساها (۲۰۱۹) در مورد الیاف بازالت و ترکیبات آن پژوهشی انجام دادند، خواص مکانیکی و دوام الیاف بازالت مورد بررسی قرار گرفت و نسبت به الیاف کربن و شیشه مقایسه شد. نتایج بیانگر این موضوع بود که الیاف بازالت

2- BPFRC

1- FORTA

ترکیبی بر رفتار نفوذپذیری بتن، تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت کم، انجام شده است. در این مقاله، علاوه بر مشخص کردن تأثیر هر یک از الیاف بر میزان جذب انرژی و مقاومت اولیه، چگونگی رفتار بتن تقویت شده با الیاف هیبریدی و مقایسه آن با بتن معمولی صورت می‌پذیرد. همچنین، بررسی سطح شکست و رفتار هر کدام از الیاف در تخریب بتن تقویت شده مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲. شرح آزمایش

### ۲-۱. مصالح

در این مطالعه، برای ساخت نمونه بتنی، سنگ‌دانه‌ها از محل معمول شن و ماسه مورد استفاده در شهر اردبیل تهیه شده‌اند. مصالح ریزدانه (ماسه) از نوع طبیعی و مصالح درشت‌دانه (شن) از نوع شکسته از منطقه نمین اردبیل تهیه شده است که جهت رفع آلودگی و گردوغبار دو بار شسته شدند. مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌دانه‌ها در جدول ۱ نمایش داده شده است. در این تحقیق، از سیمان پرتلند پوزولانی تولید کارخانه سیمان اردبیل با وزن مخصوص  $3 \text{ kg/m}^3$  ۳۱۳۰ استفاده شده است. ترکیب شیمیایی این سیمان در جدول ۲ دیده می‌شود. به منظور ساخت نمونه‌های بتنی تقویت شده با الیاف، از سه نوع الیاف بارچیپ<sup>۱</sup>، فورتا<sup>۲</sup> و بازالت<sup>۳</sup> مطابق شکل ۱ استفاده شده است. الیاف‌های مورد استفاده برای تقویت بتن شامل الیاف شرکت فورتا<sup>۲</sup>، الیاف بارچیپ از شرکت (بتن الاستیک پلاستیک)<sup>۵</sup> و الیاف بازالت از شرکت بازالتکس<sup>۶</sup> تهیه شده است. مشخصات الیاف به کار رفته در بتن تقویت شده در جدول ۳ آورده شده است.

پخش ترک‌ها در نمونه‌های HPFRCC نسبت به نمونه‌ی بتن معمولی و افزایش میزان جذب انرژی، سختی نمونه‌ها و تأخیر در ایجاد گسیختگی شده و شکست برشی کششی در نمونه بتن معمولی به شکست برشی لغزشی در نمونه‌ی بتن الیافی تبدیل و با وجود حذف آرماتور دورپیچ، باعث افزایش ۲۰٪ مقاومت و ۳۷٪ شکل-پذیری نمونه تیر کوپله با HPFRCC بیشتر از نمونه مرجع شده است. در پژوهش انجام شده توسط خیرالدین و همکاران (۱۳۹۹) رفتار ضربه‌ای بتن‌های الیافی ماکروسننتیک با دورپیچ کامپوزیت، اثر مقاومت فشاری الیاف ماکروسننتیک با نام MEX-200 و درصد آن، و اثر محصورشدگی نمونه‌های استوانه‌ای بتنی در برابر ضربه وارده بر اثر سقوط آزاد وزنه به جرم مشخص به صورت آزمایشگاهی بررسی گردید و مقدار تخریب بتن مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که برای نمونه‌های با مقاومت ۲۰، ۳۰ و ۴۰ مگاپاسکال، بدون دورپیچ، با ۱ و ۱/۵ درصد الیاف به ترتیب ۳۳، ۲۵ و ۲۰ درصد، و با ۲ درصد الیاف به ترتیب ۶۶، ۵۰ و ۴۰ درصد افزایش تعداد ضربه نسبت به نمونه بدون الیاف مشاهده شد.

امروزه، الیاف نقش مهمی در طراحی و ساخت وسازهای عمرانی دارند. این مقاله به بررسی مقاومت ضربه‌ای و میزان جذب انرژی بتن‌های تقویت شده با الیاف هیبریدی بازالت، فورتا و بارچیپ تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت کم می‌پردازد. تحقیقاتی پراکنده روی تأثیر الیاف بر مقاومت نهایی فشاری بتن انجام شده است. اما مقایسه تأثیر هر کدام از الیاف بر رفتار ضربه‌پذیری به ندرت صورت گرفته است. همچنین، تحقیقات کمی در مورد تأثیر حضور الیاف به صورت

4- FORTA Co

5- Elastic Plastic Concrete (EPC)

6- basaltex

1- Barchip

2- Forta

3- Basalt

جدول ۱. مشخصات فیزیکی سنگ‌دانه‌ها

سنگ‌دانه	نوع	وزن مخصوص ( $\text{gr/cm}^3$ )	جذب آب (اشباع)	مدل نرمی
شن	شکسته	۲/۶۳	۱/۱	-
ماسه	طبیعی	۲/۶۴	۲/۵۶	۳/۲۵

جدول ۲. درصد ترکیبات موجود در سیمان اردبیل

ترکیبات تشکیل دهنده	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
درصد	۳۵-۶۰	۲۰-۳۵	۹-۱۱	۹-۱۲



شکل ۱. الیاف استفاده شده در بتن تقویت‌شده: الف) فورتا، ب) بارچیپ و ج) بازالت

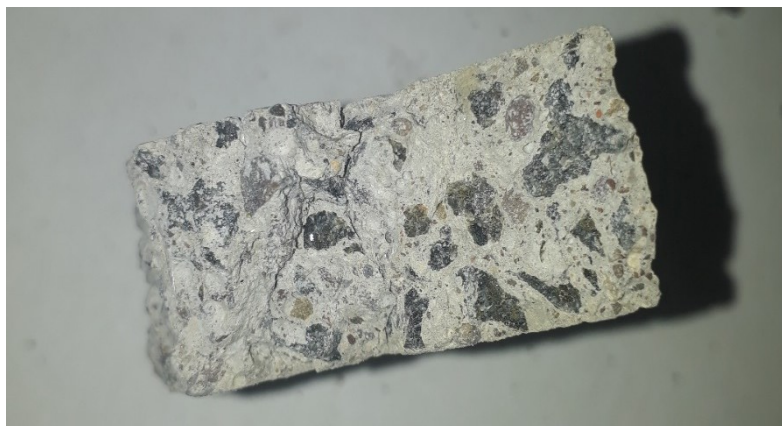
جدول ۳. مشخصات الیاف استفاده شده در تقویت بتن

نوع الیاف	مقاومت کششی (MPa)	طول هر رشته (mm)	چگالی جرمی ( $\text{gr/cm}^3$ )
بازالت	۴۸۳۹	۲۵	۲/۸
فورتا	۶۶۰	۵۴	۰/۹۱
بارچیپ	۶۴۰	۴۸	۰/۹۱

## ۲-۲. ساخت بتن‌های الیافی

بتن تقویت‌شده با الیاف، با توجه به دامنه تغییرات درصد وزنی الیاف که در جدول ۴ نشان داده شده، اختلاط بتن و الیاف انجام می‌شود. برای نمونه‌های با الیاف، ابتدا الیاف مخلوط و سپس با استفاده از مخلوط‌کن دستی در دمای محیط و به مدت ۵ دقیقه، بتن و الیاف ترکیب شده تا مخلوطی کاملاً یکدست به دست آید.

در مرحله ساخت نمونه‌ها، در ابتدا ترکیب بتن که برای تمامی نمونه‌ها یکسان باشد تهیه می‌شود. نمایی از ترکیبات بتن خالی بعد از انسجام و ساختار دانه‌بندی آن در شکل ۲ نشان داده شده است. برای ساخت نمونه‌های



شکل ۲. ترکیب ساختاری بتن بدون الیاف

جدول ۴. درصد تغییرات الیاف در بتن تقویت شده

درصد الیاف بازالت	درصد الیاف فورتا	درصد الیاف بارچیپ
۰/۲۵	۰/۱	۰/۱۵
۰/۵۰	۰/۳	۰/۳۰
۰/۷۵	۰/۵	۰/۴۵

دامنه تغییرات

تعداد ۱۶ نمونه مطابق جدول ۵ ساخته شده است. در جدول ۵، برای نام‌گذاری نمونه‌ها تحت بارگذاری ضربه‌ای، از سه حرف استفاده شده است که حرف اول (B) معرف الیاف بازالت، حرف دوم (F) معرف الیاف فورتا و حرف سوم (C) معرف الیاف بارچیپ در بتن می‌باشد که در ادامه به ترتیب سه عدد که نشان‌دهنده درصد هر یک از الیاف است دیده می‌شود. همچنین، جدول‌های ۶ و ۷ وزن مصالح بر اساس طرح اختلاط و نسبت بتن را نشان می‌دهند.

در پایان، هر یک از ترکیب‌های به دست آمده در داخل قالب مربوط به خود ریخته و سپس به مدت ۱۰ دقیقه روی میزی مرتعش قرار می‌گیرد. نمونه‌های ساخته شده به مدت ۲۴ ساعت در محیط آزمایشگاهی نگهداری شده، سپس قالب‌ها باز شده و نمونه‌ها طبق آیین‌نامه بتن ایران به مدت ۲۸ روز در آب عمل‌آوری می‌شوند. شانزده عدد نمونه مکعبی به ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ میلی‌متر پس از ۲۸ روز عمل‌آوری آماده می‌شوند.

با توجه به متغیرهای مورد بررسی و درصد الیاف،

جدول ۵. درصد و حجم الیاف به کار رفته در هر نمونه

نمونه	بازالت (%)	فورتا (%)	بارچیپ (%)	بازالت (kg/m <sup>3</sup> )	فورتا (kg/m <sup>3</sup> )	بارچیپ (kg/m <sup>3</sup> )
BFC-0-0-0	0	0	0	0	0	0
BFC-0.75-0.3-0.3	0.75	0.3	0.3	21	2.73	2.73
BFC-0.25-0.3-0.3	0.25	0.3	0.3	7	2.73	2.73
BFC-0.5-0.5-0.3	0.5	0.5	0.3	14	4.55	2.73

BFC-0.5-0.1-0.3	0.5	0.1	0.3	14	0.91	2.73
BFC-0.5-0.3-0.45	0.5	0.3	0.45	14	2.73	4
BFC-0.5-0.3-0.3	0.5	0.3	0.3	14	2.73	2.73
BFC-0.5-0.3-0.15	0.5	0.3	0.15	14	2.73	1.36

جدول ۶. وزن مصالح با طرح اختلاط ACI-211

سنگ‌دانه شنی	سنگ‌دانه ماسه‌ای	سیمان	آب	نسبت آب به سیمان
(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	
۱۰۲۰	۷۸۸	۴۸۰	۲۱۶	۰/۴۵

جدول ۷. بتن بر حسب نسبت

نسبت به وزن	نسبت آب به سیمان
<b>C: G.A: S.A</b>	
۱ : ۲/۱۳ : ۱/۶۴	۰/۴۵
C : سیمان، G.A : سنگ‌دانه شنی، S.A : سنگ‌دانه ماسه‌ای	

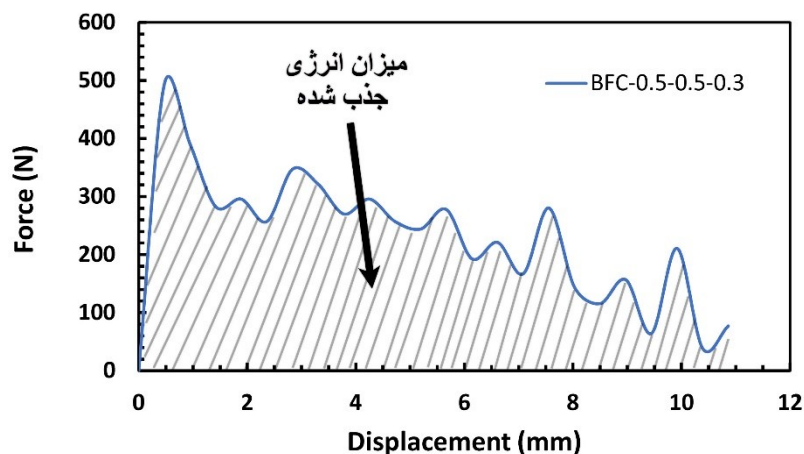
نشان داده شده است. در این دستگاه، ضربه‌زننده، به سنسور نیروسنج پیزوالکتریک و شتاب‌سنج مجهز است که نمودار نیرو- جابه‌جایی حاصل از برخورد پرتابه به نمونه بتنی را در کامپیوتری که به آن متصل است در اختیار کاربر قرار می‌دهد. مقدار انرژی جذب شده همان سطح زیر منحنی نیرو- جابه‌جایی می‌باشد که در شکل ۴ نشان داده شده است و مطابق فرمول محاسبه می‌گردد.

### ۳-۲. دستگاه تست

نمونه‌های بتنی تقویت شده با الیاف توسط دستگاه تست ضربه دراپ هامر که انرژی لازم جهت اعمال ضربه نفوذی را به‌واسطه سقوط آزاد وزنه با جرم ۲ کیلوگرم از ارتفاع یک متری تأمین می‌کند، مورد آزمون تجربی قرار گرفت. شکل کلی دستگاه سقوط وزنه و آهنربایی که ضربه زننده را تا ارتفاع یک متری بالا می‌برد در شکل ۳



شکل ۳: دستگاه تست سقوط وزنه جهت آزمون ضربه نفوذی



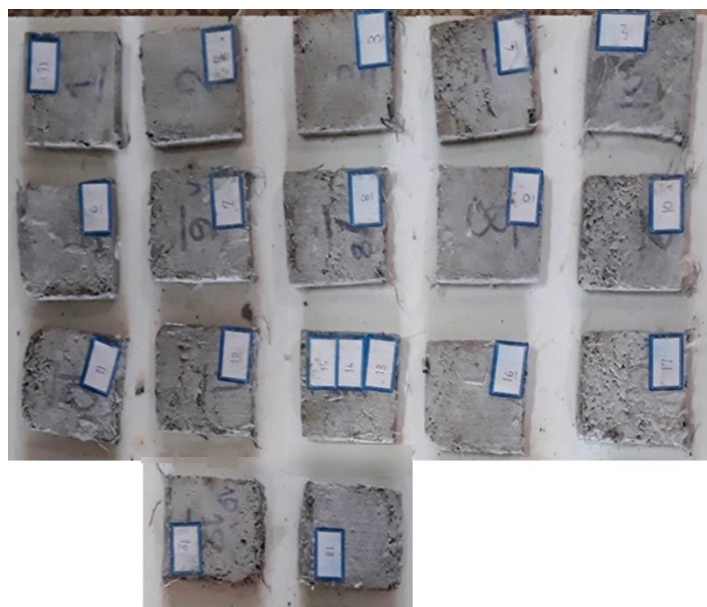
شکل ۴. نحوه محاسبه میزان جذب انرژی

ضربه نفوذی نشان داده شده است. نمونه بتن بدون فاز تقویت‌کننده توسط الیاف، همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود، شکست تردی را تجربه کرده که میزان مقاومت و جذب انرژی بسیار کمی دارد. در ادامه، تأثیر حضور الیاف بر مقاومت اولیه ضربه و جذب انرژی در بتن تقویت‌شده با الیاف به صورت تکی و الیاف ترکیبی مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد.

$$E_a = \int_{x_1}^{x_2} F(x) dx \quad (1)$$

#### ۴. نتایج و بحث

مکانیزم‌های اصلی جذب انرژی به واسطه نفوذ ضربه زنده در ساختار بتن‌های الیافی شامل شکست الیاف، ترک خوردن بتن زمینه و سوراخ شدن کلی نمونه است. در شکل ۵، نمونه‌های آماده‌شده بتنی قبل از آزمایش



شکل ۵. نمای کلی از تمامی نمونه‌ها قبل از تست ضربه نفوذی





شکل ۶. نمونه بتن بدون تقویت توسط الیاف

BFC-0-0-0، در میزان مقاومت اولیه و جذب انرژی به ترتیب ۲۹۲/۸ و ۲۱۲/۳ درصد افزایش داشته است. در واقع، تأثیر برهم‌کنش الیاف با یکدیگر منجر به بهبود رفتار ضربه‌پذیری در بتن هیبریدی می‌شود. در این قسمت، بررسی تغییر درصد هر یک از الیاف در بتن تقویت‌شده با الیاف هیبریدی انجام می‌شود. با بررسی شکل ۷ می‌توان دید که چسبندگی بین دو الیاف بازالت و فورتا به بتن زمینه مطلوب است و تنها در مورد الیاف بارچیپ جدایش بین الیاف و بتن زمینه رؤیت می‌شود.

#### ۴-۱. تأثیر درصد وزنی الیاف بر رفتار

#### ضربه‌پذیری بتن هیبریدی

در شکل ۷ تصاویر سطح شکست نمونه بتن هیبریدی تقویت‌شده با الیاف فورتا، بارچیپ و بازالت آورده شده است. نتایج جدول ۸ نشان می‌دهد که استفاده از الیاف هیبریدی در تقویت بتن نسبت به نمونه بتن خالی عملکرد بهتری داشته است. به طوری که نمونه بتن -BFC-0.15-0.3-0.5 با تقویت الیاف هیبریدی نسبت به نمونه



شکل ۷. سطح شکست نمونه بتنی تقویت‌شده با الیاف هیبریدی

جدول ۷. نتایج میزان جذب انرژی و مقاومت اولیه

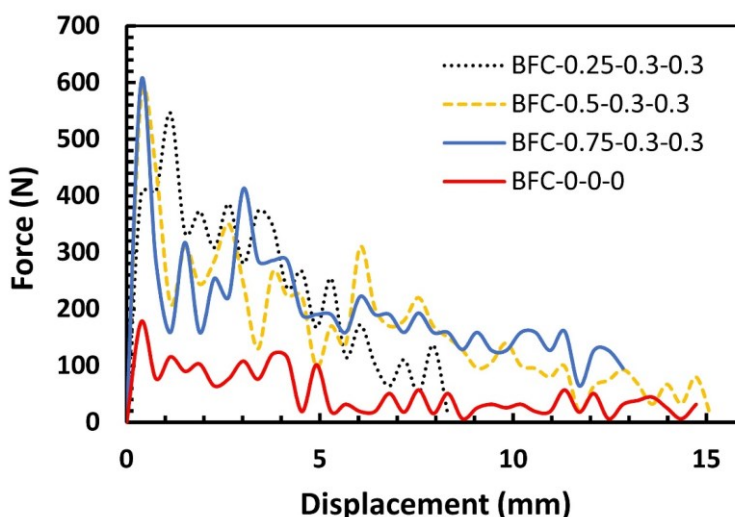
Sample name	Energy absorption (J)	Peak force (N)
BFC-0-0-0	0.7479	177.818
BFC-0.75-0.3-0.3	2.5636	603.3125
BFC-0.25-0.3-0.3	2.0573	546.1566
BFC-0.5-0.5-0.3	2.533	493.827
BFC-0.5-0.1-0.3	1.434	406.442
BFC-0.5-0.3-0.45	0.49880	204.097
BFC-0.5-0.3-0.3	2.5296	578.983
BFC-0.5-0.3-0.15	2.33584	698.572

#### ۴-۲. تأثیر درصد وزنی الیاف بازالت بر رفتار

##### ضربه پذیری بتن هیبریدی

شکل ۸، تأثیر تغییرات درصد الیاف بازالت بر رفتار نمودار نیرو- جابه‌جایی نشان شده است. در بتن هیبریدی نیز همانند بتن تقویت شده تک الیاف، افزایش درصد وزنی الیاف بازالت باعث افزایش مقاومت در ناحیه خطی می‌شود. این افزایش، در نمونه‌های BFC-0.25-0.3-0.3، BFC-0.5-0.3-0.3، BFC-0.75-0.3-0.3، به ترتیب برابر ۱۲۸/۵۷، ۲۲۳/۹۲ و ۲۳۹/۲۸ درصد نسبت به بتن معمولی می‌باشد. کاهش شدید مقاومت در محدوده جابه‌جایی ۰/۰۱ الی ۰/۰۳ برخلاف بتنی که فقط با

الیاف بازالت تقویت شده است، در بتن هیبریدی مشاهده نمی‌گردد. نمونه BFC-0.25-3-3 در جابه‌جایی بزرگ دچار شکست کامل شده است. ولی دو نمونه BFC-0.5-0.3-0.3 و BFC-0.75-0.3-0.3 عملکرد مشابه داشته و نسبت به بتن خالی عملکرد بهتری دارند. همان‌طور که در نمودار دیده می‌شود، مقاومت اولیه و جذب انرژی نمونه BFC-0.25-0.3-0.3، نسبت به بتن خالی ۲۰۸ و ۱۷۸ درصد بیشتر می‌باشد. مقاومت اولیه و جذب انرژی نمونه BFC-0.5-0.3-0.3 نسبت به بتن خالی به ترتیب ۲۲۵ و ۲۴۰ درصد و همچنین مقاومت اولیه و جذب انرژی نمونه BFC-0.75-0.3-0.3 نسبت به بتن بدون الیاف به ترتیب ۲۴۰ و ۲۴۵ درصد بیشتر می‌باشد.



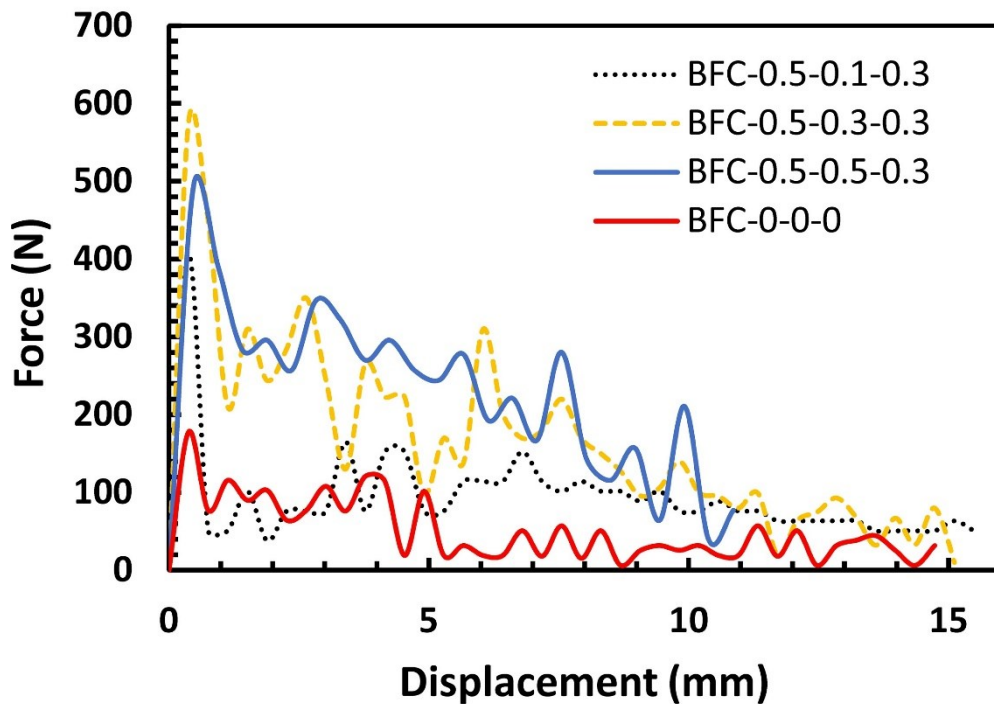
شکل ۸. مقایسه تأثیر درصد وزنی الیاف بازالت بر نمودار نیرو- جابه‌جایی نمونه‌های بتن حاوی الیاف هیبریدی

#### ۳-۴. تأثیر درصد وزنی الیاف فورتا بر رفتار

##### ضربه پذیری بتن هیبریدی

تأثیر الیاف فورتا در نمودار نیرو- جابه‌جایی برای بتن ترکیبی در شکل ۹ نشان داده شده است. در ناحیه خطی، افزایش درصد وزنی الیاف فورتا باعث افزایش مقاومت می‌گردد. همان‌طور که در نمودار دیده می‌شود، مقدار مقاومت اولیه و جذب انرژی نمونه BFC-0.5-0.1-0.3 نسبت به بتن معمولی به ترتیب ۱۲۸ و ۹۳ درصد بیشتر شده است. از طرفی، دیده می‌شود که در نمونه BFC-0.5-0.3-0.3، با افزایش الیاف فورتا تا ۰/۳ درصد وزنی،

مقدار مقاومت اولیه و جذب انرژی نسبت به بتن معمولی به ترتیب ۲۲۴/۴ و ۲۳۸/۲ درصد افزایش یافته است که نشان از بهبود عملکرد ضربه‌پذیری بتن ترکیبی، در الیاف فورتا با ۰/۳ درصد وزنی دارد. در ادامه، دیده می‌شود که با بیشتر شدن درصد الیاف فورتا در نمونه BFC-0.5-0.5-0.3 نسبت به نمونه BFC-0.5-0.3-0.3 جذب انرژی ثابت بوده، ولی مقدار مقاومت اولیه تا ۱۴/۴ درصد کاهش می‌یابد. در واقع، افت مقاومت اولیه در ناحیه خطی، با افزایش درصد الیاف فورتا، ناشی از تمرکز تنش موضعی در بتن، به‌واسطه تجمع زیاد الیاف در بتن است.



شکل ۹. مقایسه تأثیر درصد وزنی الیاف فورتا بر نمودار نیرو- جابه‌جایی نمونه‌های بتن حاوی الیاف هیبریدی

#### ۴-۴. تأثیر درصد وزنی الیاف بارچپ بر رفتار

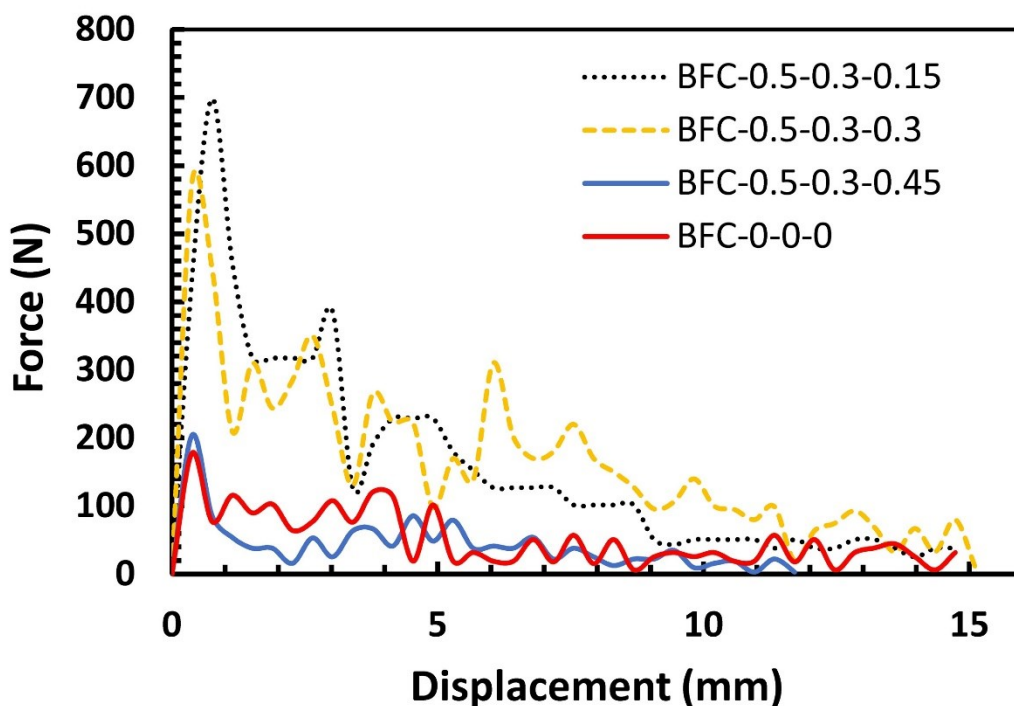
##### ضربه پذیری بتن هیبریدی

همان‌طور که در نمودار نیرو- جابه‌جایی شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد هرچقدر درصد وزنی الیاف بارچپ در بتن هیبریدی بیشتر شده، مقدار مقاومت اولیه و جذب انرژی کمتری را شاهد هستیم. با این وجود، افزودن درصد وزنی کمی از این الیاف باعث افزایش مقاومت

اولیه و جذب انرژی می‌شود؛ به‌طوری که در نمونه BFC-0.5-0.3-0.15 که کمترین درصد الیاف بارچپ را دارد، مقدار مقاومت اولیه و جذب انرژی نسبت به بتن معمولی به ترتیب ۲۹۴ و ۲۱۴ درصد افزایش داشته است. همچنین، در نمونه BFC-0.5-0.3-0.3 مقدار مقاومت اولیه و جذب انرژی نسبت به بتن معمولی ۲۲۵ و ۲۴۰ درصد افزایش داشته است. همان‌طور که در نمودار دیده

و جذب انرژی نمونه BFC-0.5-0.3-0.45 نسبت به نمونه BFC-0.5-0.3-0.15 به ترتیب ۷۰/۷ و ۷۸/۶ درصد کاهش یافته است. نمونه BFC-0.5-0.3-0.45 در ناحیه خطی و غیرخطی رفتار مشابهی با بتن بدون الیاف دارد و می‌توان نتیجه گرفت که افزایش مقدار زیاد الیاف بارچپ، عملکرد بتن هیبریدی را به شدت کاهش می‌دهد.

می‌شود، در نمونه BFC-0.5-0.3-0.45 مقدار جذب انرژی نسبت به بتن معمولی ۵۱ درصد کاهش یافته است. در مقایسه نمونه BFC-0.5-0.3-0.15 با نمونه‌های BFC-0.5-0.3-0.3 و BFC-0.5-0.3-0.45 مشخص شده که افزایش الیاف بارچپ باعث کاهش مقاومت اولیه و جذب انرژی شده است؛ به طوری که میزان مقاومت اولیه



شکل ۱۰. مقایسه تأثیر درصد وزنی الیاف بارچپ بر نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌های بتن حاوی الیاف هیبریدی

## ۵. نتیجه‌گیری

مقایسه قرار گرفتند. نتایج حاصل از این مطالعه را می‌توان به صورت خلاصه در موارد زیر بیان کرد:

- چسبندگی بین بتن و الیاف بارچپ در بارگذاری ضربه‌ای کم است. به همین دلیل، انتقال تنش مؤثری بین الیاف و بتن ایجاد نشده است. حضور الیاف بارچپ به‌طور میانگین، تا ۴۹ درصد عملکرد ضربه‌پذیری بتن را کاهش می‌دهد.
- چسبندگی الیاف بازالت و بتن زمینه بسیار مطلوب است. در نتیجه، تمرکز تنش بین نقاط اتصال و فصل مشترک این الیاف و بتن کاهش یافته و تنش لازم برای

در تحقیق حاضر، اثر افزودن الیاف بر رفتار ضربه سرعت کم بتن‌های الیافی به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. بتن‌های تقویت شده به صورت ترکیبی، با استفاده از الیاف بازالت در بازه ۰/۲۵ الی ۰/۷۵ درصد وزنی، الیاف فورتا در بازه ۰/۱ الی ۰/۵ درصد و الیاف بارچپ در بازه ۰/۱۵ الی ۰/۴۵ درصد وزنی، ساخته شده و با پرتابه نوک کروی تحت ضربه نفوذی قرار گرفتند. نمودارهای نیرو-جابجایی نمونه‌ها مورد بررسی و

- پارگی الیاف را که مهم‌ترین مکانیزم تخریب جهت افزایش مقاومت و جذب انرژی در بتن است فراهم می‌کند.
- افزودن الیاف بازالت، میزان مقاومت اولیه و جذب انرژی در بتن را به ترتیب ۴۹/۵ و ۹۸/۶ درصد افزایش می‌دهد.
- افزایش درصد وزنی الیاف بازالت همواره جذب انرژی را افزایش می‌دهد. ولی در مقادیر زیاد الیاف بازالت، به‌واسطه پدیده کلوخه شدن، مقاومت اولیه کاهش یافته است.
- با مقایسه بین بتن تقویت‌شده با الیاف هیبریدی و بتن تقویت نشده، مشخص شد که بتن هیبریدی در میزان مقاومت اولیه و جذب انرژی به ترتیب ۲۹۲/۸ و ۲۱۲/۳ درصد بهبود داشته است.

## ۶. مراجع

- خیرالدین، ع.، وحیدپور، م. و بینش، م. ۱۳۹۹. "بررسی رفتار ضربه‌ای بتن‌های الیافی ماکروسنتتیک با دورپیچ کامپوزیت GFRP". مصالح و سازه‌های بتنی، ۵(۱): ۲۱۷-۲۰۰.
- شربتدار، م. ک.، شایانی، ا. و خیرالدین، ع. ۱۳۹۷. "بررسی آزمایشگاهی رفتار دیوار برشی کوپله با استفاده از بتن الیافی توانمند HPRCC در تیر رابط با آرایش آرماتورگذاری متفاوت". مهندسی عمران شریف، ۳۴(۲): ۱۳-۳.
- مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان. ۱۳۹۹. "طرح و اجرای ساختمان‌های بتن آرمه".
- Adesina, A. 2021. "Performance of cementitious composites reinforced with chopped basalt fibres—An overview". *Constr. Build. Mater.*, 266: 120970.
- Alberti, M. G., Enfedaque, A. and Gálvez, J. C. 2017. "Fibre reinforced concrete with a combination of polyolefin and steel-hooked fibres". *Composite Struct.*, 171: 317-325.
- Arisoy, B. and Wu, H. C. 2008. "Material characteristics of high performance lightweight concrete reinforced with PVA". *Constr. Build. Mater.*, 22(4): 635-645.
- Aslani, F. and Nejadi, S. 2013. "Self-compacting concrete incorporating steel and polypropylene fibers: Compressive and tensile strengths, moduli of elasticity and rupture, compressive stress–strain curve, and energy dissipated under compression". *Composites Part B: Eng.*, 53: 121-133.
- Bencardino, F., Rizzuti, L., Spadea, G. and Swamy, R. N. 2010. "Experimental evaluation of fiber reinforced concrete fracture properties". *Composites Part B: Eng.*, 41(1): 17-24.
- Babaie, R., Abolfazli, M. and Fahimifar, A. 2019. *J. Mech. Behav. Mater.*, 28(1): 119-134.
- Çelik, Z. and Bingöl, A. F. 2020. "Fracture properties and impact resistance of self-compacting fiber reinforced concrete (SCFRC)". *Mater. Struct.*, 53(3): 1-16.
- Flores-Johnson, E. A. and Li, Q. M. 2012. "Structural behaviour of composite sandwich panels with plain and fibre-reinforced foamed concrete cores and corrugated steel faces". *Composite Struct.*, 94(5): 1555-1563.
- Falliano, D., De Domenico, D., Ricciardi, G. and Gugliandolo, E. 2019. "Compressive and flexural strength of fiber-reinforced foamed concrete: Effect of fiber content, curing conditions and dry density". *Constr. Build. Mater.*, 198: 479-493.
- Fragassa, C., de Camargo, F. V., Pavlovic, A. and Minak, G. 2019. "Explicit numerical modeling assessment of basalt reinforced composites for low-velocity impact". *Composites Part B: Eng.*, 163: 522-535.
- Fu, Q., Niu, D., Zhang, J., Huang, D., Wang, Y., Hong, M. and Zhang, L. 2018. "Dynamic compressive mechanical behaviour and modelling of basalt–polypropylene fibre-reinforced concrete". *Arch. Civ. Mech. Eng.*, 18(3): 914-927.
- Guerini, V., Conforti, A., Plizzari, G. and Kawashima, S. 2018. "Influence of steel and macro-synthetic fibers on concrete properties". *Fibers*, 6(3): 47.
- Gautam, A. and Awasthi, A. 2018. "Use of FORTA-FERRO fiber in structural concrete mix: A review". *Int. Res. J. Eng. Technol.*, 5(05).
- Hasan-Nattaj, F. and Nematzadeh, M. 2017. "The effect of forta-ferro and steel fibers on mechanical properties of high-strength concrete with and without silica fume and nano-silica". *Constr. Build. Mater.*, 137: 557-

572.

- Jovičić, V., Šušteršič, J. and Vukelič, Ž. 2009. "The application of fibre reinforced shotcrete as primary support for a tunnel in flysch". *Tunn. Undergr. Sp. Tech.*, 24(6): 723-730.
- Kandemir, A., Pozegic, T. R., Hamerton, I., Eichhorn, S. J. and Longana, M. L. 2020. "Characterisation of natural fibres for sustainable discontinuous fibre composite materials". *Mater.*, 13(9): 2129.
- Moghadasi, M., Marsono, A. K. and Mohammadyan-Yasouj, S. E. 2017. "A study on rotational behaviour of a new industrialised building system connection". *Steel Composite Struct.*, 25(2): 245-255.
- Mohammadyan-Yasouj, S. E., Marsono, A. K., Abdullah, R. and Moghadasi, M. 2015. "Wide beam shear behavior with diverse types of reinforcement". *ACI Struct. J.*, 112(2): 199-208.
- Mohammadyan-Yasouj, S. E., Ahangar, H. A., Oskoei, N. A., Shokravi, H., Koloor, S. S. R. and Petrù, M. 2021. "Experimental study on the effect of basalt fiber and sodium alginate in polymer concrete exposed to elevated temperature". *Processes*, 9(3): 510.
- Pareek, K. and Saha, P. 2019. "Basalt fiber and its composites: An overview". *Proceedings of National Conference on Advances in Structural Technologies (CoAST-2019)*, Vol. 1, p. 3.
- Shokravi, H., Shokravi, H., Bakhary, N., Rahimian Koloor, S. S. and Petrù, M. 2020a. "A comparative study of the data-driven stochastic subspace methods for health monitoring of structures: A bridge case study". *Appl. Sci.*, 10(9): 3132.
- Shokravi, H., Shokravi, H., Bakhary, N., Heidarrezaei, M., Rahimian Koloor, S. S. and Petrù, M. 2020b. "Vehicle-assisted techniques for health monitoring of bridges". *Sensors*, 20(12): 3460.
- Shokravi, H., Shokravi, H., Bakhary, N., Heidarrezaei, M., Rahimian Koloor, S. S. and Petrù, M. 2020c. "Application of the subspace-based methods in health monitoring of civil structures: A systematic review and meta-analysis". *Appl. Sci.*, 10(10): 3607.
- Shokravi, H., Shokravi, H., Bakhary, N., Rahimian Koloor, S. S. and Petrù, M. 2020d. "Health monitoring of civil infrastructures by subspace system identification method: An overview". *Appl. Sci.*, 10(8): 2786.
- Shimpi, N. G. 2017. "Biodegradable and biocompatible polymer composites: Processing, properties and applications". Woodhead Publishing.
- Wu, Y., Song, W., Zhao, W. and Tan, X. 2018. "An experimental study on dynamic mechanical properties of fiber-reinforced concrete under different strain rates". *Appl. Sci.*, 8(10): 1904.
- Zhou, H., Jia, B., Huang, H. and Mou, Y. 2020. "Experimental study on basic mechanical properties of basalt fiber reinforced concrete". *Mater.*, 13(6): 1362.