

مطالعه آزمایشگاهی مقاومت کششی و فشاری بتن پیش‌آکنده مسلح به الیاف

مقاله علمی - پژوهشی

رویا رئیسی، دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، همدان، ایران
فریدون رضایی*، دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، همدان، ایران
محمدرضا محمدعلیها، دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
و گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فنی گیزه، ۴۱۶۰۰ گیزه، کوجایلی، ترکیه
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: frezaie@basu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۹ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۹

صفحه ۳۹۲-۳۸۱

چکیده

بتن پیش‌آکنده نوع خاصی از بتن است که ابتدا، سنگدانه‌های درشت درون قالب جایگذاری شده و سپس ملات سیمان به همراه ریزدانه، جهت پر کردن فضای خالی سنگدانه‌ها درون قالب ریخته می‌شود. در این پژوهش، مقاومت فشاری و کششی بتن پیش‌آکنده مسلح به الیاف، بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. از این رو سه نوع الیاف فلزی صنعتی، الیاف فلزی بازیافتی از لاستیک و همچنین الیاف فورتافرو، هر کدام با سه میزان درصد حجمی مختلف، مورد استفاده قرار گرفتند. بدین ترتیب که، میزان ۱، ۱/۵ و ۲ درصد برای الیاف فلزی صنعتی و الیاف فورتافرو و ۰/۳۳، ۰/۶۶ و ۱ درصد برای الیاف فلزی بازیافتی از لاستیک در نظر گرفته شد. نتایج آزمایش نشان داد که استفاده از هر سه نوع الیاف به طور کلی مقاومت کششی و فشاری بتن پیش‌آکنده را افزایش می‌دهد. همچنین، با مقایسه نتایج تاثیر الیاف فلزی بازیافتی از لاستیک و فلزی صنعتی بر روی مقاومت فشاری و کششی، مشاهده شد که در درصدهای پایین، این دو الیاف تاثیر نسبتاً یکسانی در بهبود مقاومت فشاری و کششی بتن پیش‌آکنده دارند. این در حالی است که در درصدهای بالاتر، تاثیر الیاف فلزی صنعتی در بهبود خواص ذکر شده بیش‌تر است.

واژه‌های کلیدی: بتن پیش‌آکنده، الیاف فلزی بازیافتی، الیاف فلزی صنعتی، الیاف فورتافرو

۱- مقدمه

از جمله ساخت بتن‌های سنگین (O'Malley and Abdelgader 2010)، سازه‌های دریایی (Awal 1984)، بازسازی سازه‌های بتنی و در حوزه مهندسی راه آهن، برای تبدیل خط بالاستی به دال‌خط مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سال ۱۹۹۷ بتن پیش‌آکنده در راه‌آهن ژاپن معرفی و در سال ۱۹۹۸ در تاباتا-شینجوکو-تاماجی که بخشی از خط پامانوته است، اجرا گردید. در سال ۲۰۰۲ نیز چند بخش دیگر از خطوط راه‌آهن ژاپن به این نوع دال‌خط تجهیز گردید و در نهایت تا سال ۲۰۰۸، ۱۸۲ کیلومتر از خطوط متروی ژاپن به بتن پیش‌آکنده مجهز شد (Murao K, 2003). در سال ۲۰۰۹ نیز در یکی از پل‌های خط ۲ متروی یانگسان از این نوع

بتن پیش‌آکنده، که به عنوان بتن دو مرحله‌ای نیز شناخته می‌شود، نوعی از بتن است که با روش متفاوت از بتن معمولی ساخته می‌شود. برای ساخت بتن پیش‌آکنده، ابتدا سنگدانه‌های درشت در قالب‌های مشخص قرار داده شده، سپس ملات با جریان‌پذیری مورد نظر برای پر کردن فضاهای بین سنگدانه‌ها ریخته می‌شود. فرآیند تزریق ملات در بتن پیش‌آکنده را می‌توان چه از طریق مکانیزم پمپاژ و چه توسط نیروی ثقلی انجام داد. این نوع روش ساخت بتن، اولین بار تقریباً در سال ۱۹۳۷ توسط لی تورزیلو و لوئیس اس ورتز برای ساخت تونل راه‌آهن سانتافه واقع در کالیفرنیا، استفاده شد (Stodola, Akers et al. 1992). این نوع بتن در طیف وسیعی از کاربردهای سازه‌ای

علاوه بر این، افزودن ۶ درصد الیاف فولادی منجر به افزایش قابل توجهی در مقاومت خمشی و چقرمگی خمشی شد (Nehdi, Najjar et al. 2017). محمدرحسینی و همکاران به بررسی تاثیر الیاف پروپیلینی ضایعات فرش بر روی بتن پیش‌آکنده پرداختند (Mohammadhosseini, Tahir et al. 2020). نتایج نشان داد که افزودن این الیاف به بتن پیش‌آکنده باعث کاهش مقاومت فشاری می‌شود. از سوی دیگر، با اندازه‌گیری نفوذ یون کلراید مشاهده شد، در صورت استفاده ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ درصدی از الیاف پروپیلینی ضایعات فرش، نفوذ یون کلراید کاهش می‌یابد. مورالی و همکاران (Murali et al., 2024) به بررسی تاثیر گرافن اکسید و الیاف بر روی مقاومت در برابر ضربه بتن پیش‌آکنده پرداختند. صالح و همکاران (Saleh et al., 2024) در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی تاثیر الیاف فولادی بر روی مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن پیش‌آکنده‌ای که با سیمان پرلند آهکی ساخته شده‌است، پرداختند. افزودن الیاف به بتن یک رویکرد رایج برای بهبود مقاومت بتن در برابر خوردگی و حمله اسیدی شناخته شده‌است (Marcos-Meson, Michel et al. 2018). در سال‌های اخیر، الیاف مصنوعی به گزینه‌ای گسترده در میان الیاف مورد استفاده در بتن تبدیل شده‌است. الیاف مصنوعی، از جمله پلی‌پروپیلن و پلی‌اتیلن، مقاومت بسیار خوبی در برابر محیط‌های مخرب، به ویژه محیط‌های اسیدی نشان می‌دهند (Bicer, Yalciner et al. 2018). از این نظر، الیاف فورتا فرو که به عنوان الیاف کامپوزیت مصنوعی طبقه‌بندی می‌شود، از ۱۰۰ درصد پلی پروپیلن کوپلیمر خالص به شکل رشته‌های بسیار نازک پیچ خورده همراه با یک سری الیاف فیبریل شده ساخته شده‌است (Nematzadeh and Baradaran-Nasiri 2019). این الیاف، توانایی بالایی در مقاومت در برابر محیط اسیدی دارد (Nematzadeh and Fallah-Valukolaee 2017). حسن نتاج و نعمت زاده به بررسی تاثیر این الیاف بر بتن با مقاومت بالا پرداخته‌اند. آنها به این نتیجه رسیدند که افزایش کسر حجمی الیاف ابتدا باعث افزایش و سپس کاهش مقاومت فشاری و کششی بتن می‌شود (Hasan-Nattaj and Nematzadeh 2017). در مطالعه‌ای دیگر، چابان و همکاران (Chaaban et al., 2024) به بررسی تاثیر الیاف فورتا فرو بر روی مقاومت در برابر ضربه دال‌های پس تنیده پرداختند. اگرچه کارهای تحقیقاتی فراوانی بر روی

بتن استفاده شد (Takahashi T, 2012). در مقایسه با بتن معمولی که نسبت سنگدانه درشت نسبت به حجم کل، معمولاً از ۴۰ تا ۵۰ درصد متغیر است، بتن پیش‌آکنده حاوی درصد بیشتری از سنگدانه درشت (حدوداً ۷۰ درصد) حجم کلی بتن است (Das, Lam and Tang 2021). از این رو نسبت کم‌تر ذرات ریز، مانند ماسه و مواد سیمانی، وقوع خزش و انقباض را کاهش می‌دهد. به طوریکه انقباض بتن پیش‌آکنده، تقریباً ۵۰ درصد کم‌تر از بتن معمولی است (Abdelgader and Ben-Zeitun 2004). علاوه بر این، افزایش تنش و تماس مستقیم بین ذرات سنگدانه درشت به تشکیل یک ماتریس متراکم‌تر در بتن پیش‌آکنده کمک کرده، و در نتیجه مقاومت بالاتری ایجاد می‌کند (Mohammadhosseini, Tahir et al. 2020). تقریباً ۷۰ درصد ظرفیت بارگذاری بتن از طریق تماس نقطه به نقطه سنگدانه درشت و سپس از طریق ماتریس بتنی در ساختار اسکلت انجام می‌شود (Abdelgader and Górski 2003). این ویژگی خواص مکانیکی بتن پیش‌آکنده را در مقایسه با بتن معمولی در شرایط مشابه افزایش می‌دهد (Abdelgader and Elbaden 2014). پیش‌قرار دادن سنگدانه‌ها نیاز به تراکم را از بین می‌برد و در نتیجه هزینه‌های تولید بتن پیش‌آکنده را کاهش می‌دهد (Amran, Alyousef et al. 2020). وجود مقدار کم‌تر سیمان و نسبت بیش‌تری از سنگدانه درشت در این نوع بتن، منجر به کاهش تقاضا برای سیمان می‌شود. علاوه بر این، مشاهده شده‌است که گرمای تولید شده در طول فرآیند هیدراسیون بتن پیش‌آکنده، کم‌تر از بتن معمولی است (Rajabi, Omidi Moaf and Abdelgader 2020).

افزودن الیاف به بتن به طور گسترده‌ای برای بهبود شکل‌پذیری بتن، مقاومت کششی و همچنین به حداقل رساندن ایجاد و گسترش ترک، از طریق مکانیزم پل زدن، کارآمد شناخته شده‌است (Ahmad, Zaid et al. 2022). مزیت اصلی ترکیب الیاف در بتن، بهبود عملکرد کششی آن، ظرفیت کرنش پس از قله و مقاومت خمشی بتن است (Althoey, Zaid et al. 2022). مطالعات محدودی به بررسی تاثیر استفاده از الیاف بر روی خواص مکانیکی بتن پیش‌آکنده انجام شده‌است. برای مثال نهدی و همکاران در مطالعه خود به بررسی خواص مکانیکی بتن پیش‌آکنده مسلح به الیاف فولادی پرداختند. نمونه‌های بتن با استفاده از الیاف فولادی با کسر حجمی متغیر تا ۶ درصد تهیه شد. نتایج نشان داد، که با افزایش نسبت الیاف، مقاومت فشاری و کششی بطور قابل توجهی بهبود می‌یابد.

پیش‌آکنده بطور گسترده برای سازه‌های آبی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این رو بحث خوردگی الیاف می‌تواند یک بحث مهم در این نوع بتن محسوب شود. استفاده از الیاف مصنوعی مانند فورتا‌فررو در این بتن، می‌تواند ایده‌ی جدیدی برای بررسی خواص مکانیکی بتن پیش‌آکنده محسوب شود. در این بررسی همانطور که گفته شد، الیاف فولاد صنعتی به دلیل محدود بودن مطالعه بتن پیش‌آکنده حاوی الیاف، الیاف بازیافتی به دلیل مسائل محیط زیست و الیاف فورتا‌فررو به دلیل بحث خوردگی انتخاب شده‌است. در این پژوهش در ابتدا، با افزودن الیاف فلزی بازیافتی لاستیک، الیاف فلزی صنعتی و الیاف فورتا‌فررو، به بررسی تاثیر این سه الیاف بر روی مقاومت کششی و فشاری بتن پیش‌آکنده پرداخته شده است. سپس در ادامه، تاثیر دو الیاف فلزی صنعتی و بازیافتی با یکدیگر مقایسه شده است.

۲- مشخصات مصالح

۲-۱-سیمان

سیمان مورد استفاده در این تحقیق، سیمان پرتلند نوع ۲ کارخانه سیمان تهران می‌باشد. مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی منطبق بر ASTM C150 است. جدول ۱ جزئیات این سیمان مطابق اظهار کارخانه سازنده را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مشخصات شیمیایی سیمان مورد استفاده در تحقیق

ترکیب شیمیایی	مقدار(%)
SiO ₂	۲۱/۵
Fe ₂ O ₃	۳/۱
Al ₂ O ₃	۴/۲
CaO	۶۳/۴
MgO	۲
Na ₂ O	۰/۸۴
SO ₃	۳/۷
loss on ignition	۱/۲۶

۲-۲- آب

از آب شرب شهر تهران با دمای 22 ± 2 درجه سانتی‌گراد، برای تولید و عمل‌آوری نمونه‌ها استفاده شده‌است.

تاثیر الیاف مصنوعی در بتن صورت گرفته‌است، توجه به این نکته حائز اهمیت است که استفاده از این نوع الیاف در مقایسه با سایر الیاف مصنوعی به شدت محدود است.

طبق تحقیقات صورت گرفته در سال ۲۰۱۴، حدود ۹۰ میلیون ماشین وجود دارد که این تعداد در سال‌های بعدی نیز افزایش می‌یابد. در مطالعه و برآورد دیگر تعداد ماشین‌ها ۱/۲ بلیون محاسبه شده‌است، که با در نظر گرفتن اینکه هر ماشین حداقل ۴ لاستیک دارد، تعداد لاستیک‌ها ۴/۸ بلیون برآورد می‌شود، که این تعداد با افزایش تعداد ماشین‌ها در حال افزایش است (ACEA Pocket Guide 2014). هر لاستیک معمولی حدوداً از ۴۷ درصد لاستیک، ۲۲ درصد کربن سیاه، ۱۷ درصد سیم فولادی و درصدی مواد دیگر تشکیل شده‌است (Evans and Evans 2006). مطالعات زیادی در مورد تاثیر الیاف فلزی بازیافت شده لاستیک بر روی خصوصیات مکانیکی بتن صورت گرفته‌است. برای مثال احمد و همکاران (Ahmed et al., 2024) به بررسی آزمایشگاهی و عددی تاثیر این نوع الیاف بر روی مقاومت برشی تیرهای مسلح پرداختند. همچنین تاثیر استفاده همزمان سنگدانه بازیافتی و الیاف بازیافتی از لاستیک بر روی عملکرد روسازی بتنی، توسط السیف و البیداه (Alsaif, 2024) مورد مطالعه قرار گرفت. به طور کلی استفاده از الیاف فلزی بازیافت شده لاستیک در بتن، همانند استفاده از الیاف فلزی صنعتی تاثیر بسزایی بر روی رفتار خمشی و مقاومت در برابر ترک خوردگی بتن دارد (Papakonstantinou and Tobolski 2006).

مطالعاتی زیادی بر روی بررسی خواص مکانیکی بتن معمولی حاوی الیاف، صورت گرفته‌است. با این حال، تحقیقات محدودی بر روی خواص مکانیکی بتن پیش‌آکنده تولید شده با الیاف انجام شده‌است. همچنین محدود بودن منابع و حفظ محیط زیست، لزوم بازیافت مواد و مصالح را اجتناب ناپذیر کرده است. امروزه، با توجه به نیاز بشر به حمل و نقل و رشد روزافزون صنایع لاستیک، هر ساله حجم انبوهی از لاستیک‌های فرسوده وارد چرخه محیط زیست می‌شوند. از این رو استفاده مجدد ضایعات لاستیک به عنوان جایگزینی بخشی از مصالح در ساخت بتن به عنوان یک استراتژی اساسی جهت کاهش مشکلات زیست محیطی و حفظ منابع طبیعی محسوب می‌شود. استفاده از این ضایعات باعث کاهش محسوس هزینه تولید سازه‌ها می‌شود. به علاوه، همان طور که گفته شد، بتن

۲-۳- فوق روان کننده

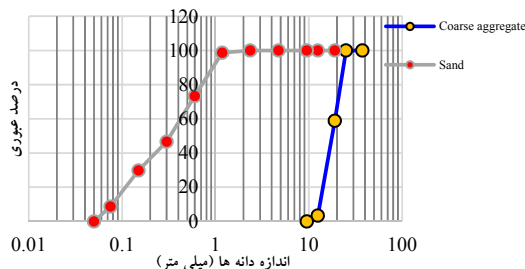
برای دستیابی به روانی مورد نیاز ملات بتن پیش‌آکنده، از فوق‌روان‌کننده‌ای که دارای رنگ زرد و بر پایه پلی‌کربوکسیلات می‌باشد استفاده شده است. فوق‌روان‌کننده مصرفی در این تحقیق، دارای مشخصات مطابق جدول ۲ است که منطبق بر آیین‌نامه ASTM C33 (Standards 2003) می‌باشد.

جدول ۲. خصوصیات فوق روان‌کننده مورد استفاده

مشخصات	محدوده استاندارد	نتایج آزمایش	آیین‌نامه مربوطه
چگالی (kg/m^3)	۰/۹۳۸-۱/۶۴۱	۱/۰۵	ASTM C 494
pH	۵/۴-۷/۴	۷	
Chlorine (ppm)	≤ 2400	۶۰۰	ASTM C 494

۲-۴- مصالح سنگی

در این تحقیق از ماسه و درشت دانه‌های سیلیسی که از اطراف شهر ملایر تهیه شده، استفاده شده است. بزرگ‌ترین قطر اسمی درشت دانه مصرفی برابر با ۱۹ میلی‌متر می‌باشد. محدوده ریزدانه مطابق جدول ۳ و شکل ۱ نیز منحنی دانه‌بندی مصالح را نشان می‌دهد. مطابق جدول ۳ دانه‌بندی ریزدانه در محدوده مجاز استاندارد ACI 304.1 R-92 (Stodola, Akers et al. 1992) است.



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی سنگدانه

جدول ۳. محدوده دانه‌بندی ریزدانه تحقیق حاضر

استاندارد ACI 304

اندازه الک (میلی‌متر)	دانه بندی تحقیق حاضر	محدوده دانه بندی مجاز مطابق استاندارد ACI 304
۲/۳۶	۱۰۰	۱۰۰
۱/۱۸	۹۹	۱۰۰-۹۵
۰/۶	۷۳	۸۰-۵۵
۰/۳	۴۷	۵۵-۳۰
۰/۱۵	۳۰	۳۰-۱۰

۲-۵- الیاف

الیاف مورد استفاده در این تحقیق، الیاف فلزی صنعتی، الیاف فلزی بازیافتی از لاستیک خودرو و الیاف فورتا‌فررو با نمای کلی مطابق شکل ۲ است. الیاف فولادی صنعتی به صورت دو سر قلاب و به طول ۳۵ میلی‌متر و قطر ۰/۸ میلی‌متر منطبق با مشخصات جدول ۴ است. الیاف فلزی بازیافتی از لاستیک داری طول با پراکندگی مطابق شکل ۳ و قطر میانگین ۰/۲ میلی‌متر است. جدول ۵ مشخصات فیزیکی الیاف فورتا‌فررو را نشان می‌دهد.

جدول ۴. مشخصات الیاف فولادی صنعتی مورد استفاده

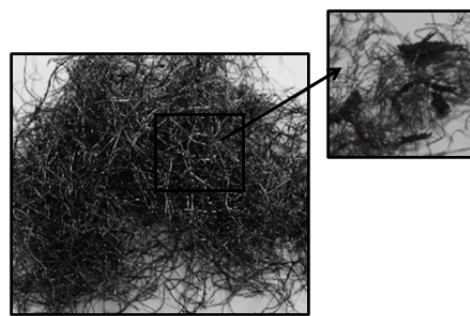
طول (mm)	قطر (mm)	وزن مخصوص (kg/m^3)	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت کششی (MPa)
۵۴	۰/۳۴	۹۱۰	۴/۷	۵۷۰-۶۶۰

جدول ۵. مشخصات فیزیکی الیاف فورتا‌فررو مورد استفاده

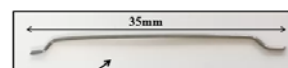
طول (میلی‌متر)	۳۵
قطر (میلی‌متر)	۰/۸
چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	۷۸۵۰
مقاومت کششی (مگاپاسکال)	۱۲۰۰

۳- ساخت نمونه‌ها

در این تحقیق برای ساخت نمونه‌ها پس از تمیز کردن و روغن‌کاری قالب‌ها، ابتدا سنگدانه‌ها و الیاف در قالب جایگذاری شد و سپس ملات با روانی مناسب، برای پر کردن فضای خالی ریخته شد. جهت بررسی خاصیت روانی ملات برای تهیه بتن پیش‌آکنده، آزمایش مخروط جریان سیمان مطابق استاندارد ASTM C939 (Standards 2003) انجام گردید. در این آزمایش ۱۷۲۵ میلی‌لیتر دوغاب در قیفی با لوله تخلیه به اندازه ۱۲/۷ میلی‌متر ریخته و زمان خروج این مقدار از ملات ثبت و به عنوان نتیجه آزمایش ارائه می‌شود. جهت انجام مقاومت فشاری از نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر استفاده گردید. مقاومت کششی با استفاده از نمونه‌های استوانه‌ای ۱۵۰ در ۳۰۰ میلی‌متر مورد ارزیابی قرار گرفت. برای هر طرح مخلوط، ۳ نمونه ساخته شده‌است. در مجموع تعداد ۶۰ نمونه جهت انجام آزمایش‌های محاسبه پارامترهای مکانیکی، ساخته شد. نمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعت از قالب باز شد و سپس برای سپری کردن دوره عمل‌آوری در حوضچه آب با دمای 22 ± 2 درجه سانتی‌گراد منتقل گردید. شکل‌های ۴ و ۵، به ترتیب آزمایش تعیین مقاومت فشاری و کششی را نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)



(ج)

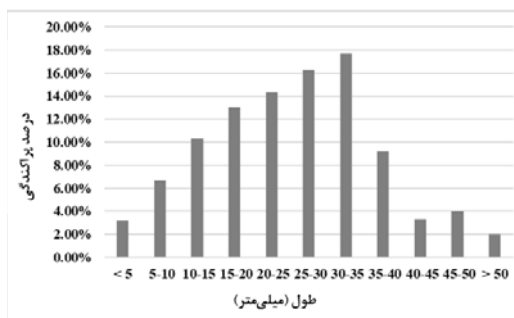
شکل ۲. الیاف مورد استفاده (الف) الیاف فلزی بازیافتی از لاستیک (ب) الیاف فلزی صنعتی (ج) الیاف فورتا فرو



شکل ۲. آزمایش تعیین مقاومت کششی



شکل ۳. آزمایش تعیین مقاومت فشاری



شکل ۳. پراکندگی طول الیاف فلزی بازیافتی از لاستیک مورد استفاده

۴- طرح مخلوط

برای جداسازی و استخراج الیاف مورد نیاز است. شکل ۸ عملکرد الیاف را در ناحیه ترک نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، الیاف به صورت یک پل از شکست و گسیختگی ناگهانی نمونه جلوگیری کرده و در نتیجه، نیرو و انرژی بیشتری برای ادامه گسیختگی مورد نیاز است. همچنین این نکته حائز اهمیت است که، با توجه به شکل ۷ الیاف فورتافرو به طور محسوس‌تری از افت شاخه نزولی نمودار بار-جابجایی نمونه‌های تحت کشش جلوگیری می‌کند.

جدول ۶. طرح مخلوط نمونه‌های مورد بررسی

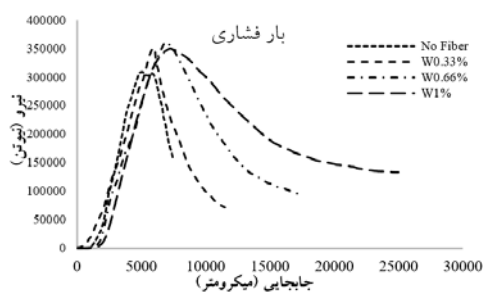
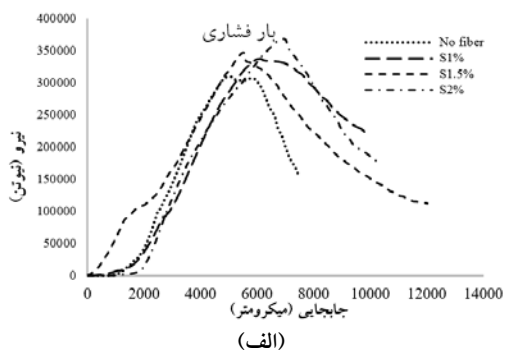
نام طرح	نوع الیاف	درصد الیاف
PAC	-	-
PAC.W0.33%	بازیافتی	۰/۳۳
PAC.W0.66%	بازیافتی	۰/۶۶
PAC.W1%	بازیافتی	۱
PAC.S1%	صنعتی	۱
PAC.S1.5%	صنعتی	۱/۵
PAC.S2%	صنعتی	۲
PAC.F1%	فورتا	۱
PAC.F1.5%	فورتا	۱/۵
PAC.F2%	فورتا	۲

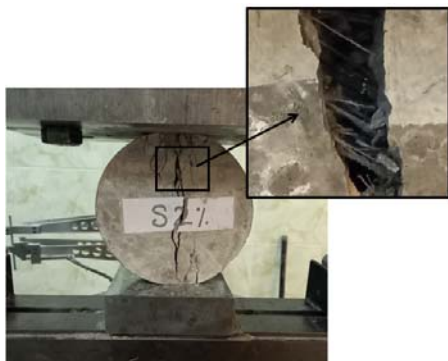
در این تحقیق، تاثیر حجم‌های مختلف الیاف بر پارامترهای مقاومت فشاری، کششی و مکانیک شکست بتن پیش‌آکنده حاوی الیاف فولادی صنعتی، الیاف فلزی بازیافتی از لاستیک خودرو و الیاف فورتافرو مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. بنابراین سه درصد حجمی از هرکدام از الیاف‌های ذکر شده در ساخت بتن پیش‌آکنده استفاده شده‌است. ده طرح اختلاط مختلف با ۰/۳۳، ۰/۶۶، ۱ درصد الیاف فلزی بازیافتی از لاستیک خودرو و ۱/۵ و ۲ درصد الیاف فولادی صنعتی و الیاف فورتافرو و یک طرح مخلوط بتن بدون الیاف مورد بررسی قرار گرفته‌شده‌است. در تمامی طرح‌ها مقدار سیمان و ماسه برای تولید ملات ۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ به صورت ثابت در نظر گرفته‌شده‌است. همچنین میزان فوق روان کننده برای بتن پیش‌آکنده بدون الیاف ۰/۲ درصد و برای نمونه‌های دارای الیاف ۰/۳ درصد در نظر گرفته شد. آزمایش لازم برای بررسی روانی ملات مطابق استاندارد ACI 304.1 R-92 (Stodola, Akers et al. 1992) انجام شده است تا از خاصیت روانی ملات اطمینان حاصل گردد. جزییات طرح مخلوط‌ها در جدول ۶ قابل مشاهده‌است. کدگذاری طرح‌ها در جدول ۶ با کد PAC، F، W، S که به ترتیب معرف بتن پیش‌آکنده، درصد الیاف فورتافرو، الیاف فلزی بازیافتی از لاستیک خودرو و الیاف فلزی صنعتی است.

بحث و بررسی نتایج

نمودار بار-جابجایی تحت بار فشاری و کششی

منحنی بار-جابجایی برای بتن پیش‌آکنده بدون الیاف و مسلح به الیاف فلزی صنعتی، الیاف فلزی بازیافتی از لاستیک و الیاف فورتافرو، تحت بار فشاری و کششی به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده‌است. همان طور که مشاهده می‌شود در هر دو بارگذاری فشاری و کششی، به طور کلی افزودن الیاف باعث افزایش بار نهایی شده و همچنین از افت ناگهانی منحنی جلوگیری می‌کند. از این رو بتن غیرمسلح با ماهیت ترد و شکننده، با مسلح شدن به هر یک از الیاف‌ها، رفتاری شبه ترد و شکل‌پذیر بخود می‌گیرد. همچنین جذب انرژی با افزودن الیاف بطور قابل توجهی افزایش می‌یابد. علت این امر را می‌توان به دلیل جهت گیری تصادفی الیاف در بتن دانست. از این رو مسیر ترک پیچیده‌تر شده و به طور قابل توجهی انرژی بیشتری

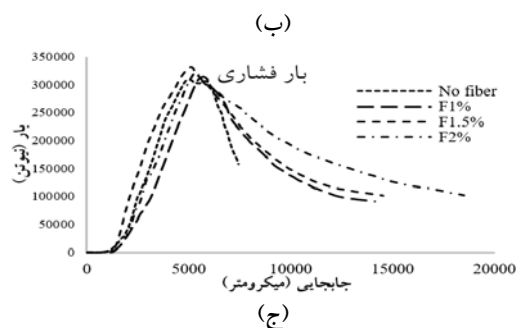




شکل ۶. نمایی از عملکرد الیاف در ناحیه گسیختگی

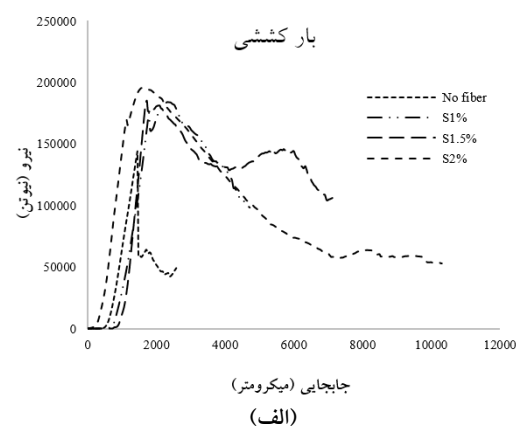
مقاومت فشاری

مقاومت فشاری بتن‌های پیش‌آکنده مسلح به الیاف فلزی صنعتی، الیاف فلزی بازیافتی از لاستیک و الیاف فورتافرو در شکل ۹ نشان داده شده‌است. مقاومت فشاری کلیه نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه در بازه ۳۰ مگاپاسکال تا ۳۷/۱۱ مگاپاسکال قرار دارد. همانطور که از نمودار شکل پیداست، افزودن سه نوع الیاف به طور کلی باعث افزایش مقاومت فشاری بتن پیش‌آکنده می‌شود. بیش‌ترین و کم‌ترین افزایش مقاومت فشاری به ترتیب در بتن پیش‌آکنده مسلح به ۲ درصد الیاف فولادی صنعتی و ۱ درصد الیاف فورتافرو مشاهده می‌شود. جدول ۷ درصد بهبود مقاومت فشاری بتن پیش‌آکنده را نشان می‌دهد. با توجه به این جدول، ۰/۳۳ درصد الیاف فلزی بازیافتی از لاستیک، ۱۳/۶ درصد مقاومت فشاری را افزایش می‌دهد. همچنین افزودن ۰/۶۶ و ۱ درصد از این نوع الیاف، تقریباً به یک مقدار باعث افزایش مقاومت فشاری می‌شوند. همچنین استفاده از ۱ و ۱/۵ درصد الیاف فورتافرو به ترتیب ۲/۵ و ۱۰/۶۹ درصد مقاومت فشاری را افزایش می‌دهد که با افزایش درصد الیاف به ۲ درصد، این درصد بهبود به ۵/۲۱ درصد کاهش می‌یابد. روند افزایش مقاومت فشاری در هنگام افزودن ۱، ۱/۵ و ۲ درصد الیاف فلزی صنعتی به صورت صعودی و به ترتیب برابر ۱۲، ۱۶/۲۴ و ۲۳/۴۸ درصد است. افزودن الیاف به کنترل شروع و انتشار میکروترک‌هایی که تحت بار تشکیل می‌شوند کمک می‌کند. همچنین وجود الیاف تنش را به طور یکنواخت در سراسر ماتریس بتن توزیع می‌کند و از متمرکز شدن تنش‌هایی که می‌تواند منجر به ترک شود جلوگیری می‌کند. از این رو با افزودن الیاف، بتن به یک ماده متراکم‌تر و همگن‌تر تبدیل می‌شود که می‌تواند بار بالاتری را قبل از شکست تحمل کند (Ravichandran et al., 2022).

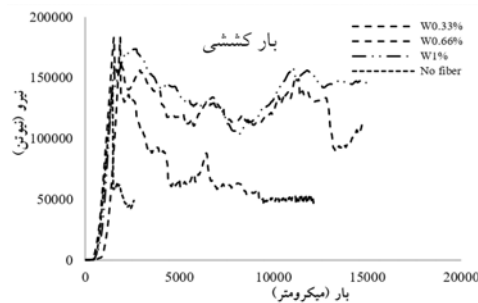


شکل ۴. نمودار بار-جابجایی تحت بار فشاری مسلح به الیاف (الف فلزی صنعتی ب) فلزی بازیافتی از لاستیک

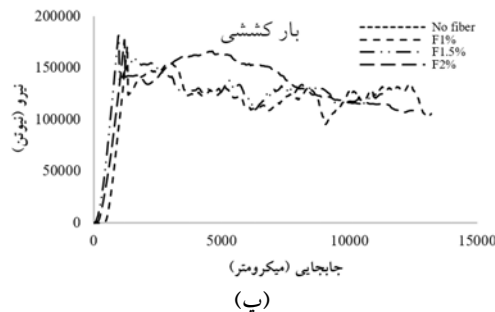
ج) فورتافرو



(الف)



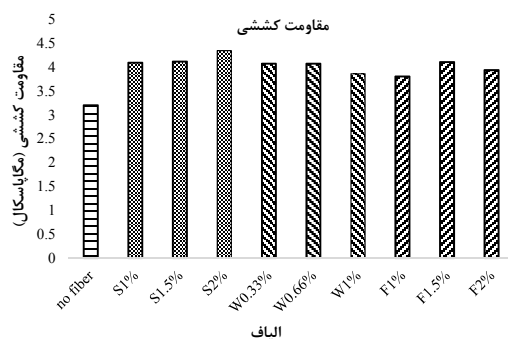
(ب)



(ب)

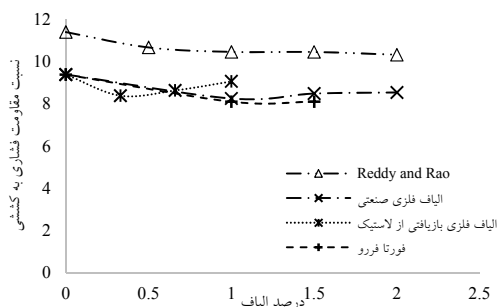
شکل ۵. نمودار بار-جابجایی تحت بار کششی مسلح به الیاف (الف فلزی صنعتی ب) فلزی بازیافتی از لاستیک ج) فورتافرو

این افزایش در هر نوع از الیاف‌های فلزی صنعتی، فلزی بازیافتی از لاستیک و فورتافرو به ترتیب در درصد‌های ۲، ۰/۶۶ و ۱/۵ مشهودتر و برابر با ۳۵/۷۳، ۲۷/۱۲ و ۲۸/۲۲ درصد است. همانطور که مشاهده می‌شود در الیاف‌های فلزی بازیافتی از لاستیک و فورتافرو با افزایش درصد الیاف از ۰/۶۶ به ۱ درصد و ۱/۵ به ۲ درصد، مقدار بهبود مقاومت کششی کاهش می‌یابد. این در حالی است که این روند در الیاف فولادی صنعتی صعودی است.

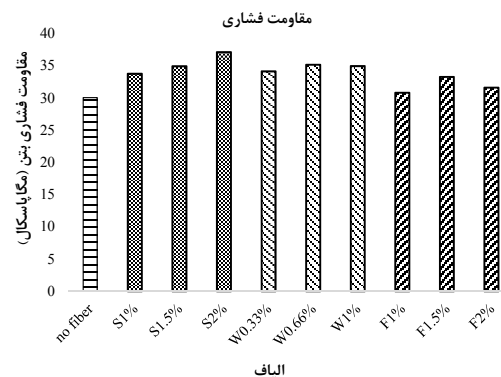


شکل ۸. تغییرات مقاومت فشاری با تغییر در حجم و نوع الیاف

ردی و راوو (Reddy & Rao, 2020) در مطالعه‌ای به بررسی تاثیر الیاف فلزی بر روی مقاومت فشاری و کششی بتن ساخته شده با سیمان سه گانه پرداختند. نسبت مقاومت فشاری به کششی مطالعه ذکر شده و مطالعه‌ی حاضر در نمودار شکل ۱۱ نشان داده شده‌است. همان طور که مشاهده می‌شود، به طور کلی روند این نسبت به صورت نزولی می‌باشد. این بدان معناست که، تاثیر الیاف بر روی مقاومت کششی بیشتر از مقاومت فشاری می‌باشد.



شکل ۹. مقایسه نسبت مقاومت فشاری به کششی در برابر درصد الیاف مطالعه حاضر و مطالعه‌ی ردی و راوو (Reddy & Rao, 2020)



شکل ۷. تغییرات مقاومت فشاری با تغییر در حجم و نوع الیاف

جدول ۷. درصد بهبود مقاومت فشاری در درصد‌های مختلف الیاف

الیاف	درصد بهبود مقاومت فشاری (%)
S1%	۱۲
S1.5%	۱۶/۲۴
S2%	۲۳/۴۸
W0.33%	۱۳/۶
W0.66%	۱۶/۹۵
W1%	۱۶/۳
F1%	۲/۵
F1.5%	۱۰/۶۹
F2%	۵/۲۱

مقاومت کششی

شکل ۱۰ بیانگر مقاومت کششی بتن‌های پیش‌آکنده مسلح به الیاف فولادی صنعتی، الیاف فولادی بازیافتی از لاستیک و الیاف فورتافرو می‌باشد. بر اساس شکل ۹، با افزایش حجم الیاف‌های مذکور، مقاومت کششی به طور کلی افزایش می‌یابد. همانطور که در قسمت قبل گفته شد، الیاف با پراکندگی تصادفی در بتن، روند انتشار ترک‌ها را کنترل کرده و از گسترش آن‌ها جلوگیری می‌کنند. الیاف به عنوان نوعی پل میان دو سطح ترک عمل کرده و باعث توزیع بارها در محل ترک‌ها می‌شوند. این امر بهبود در مقاومت کششی بتن را به همراه دارد.

مقایسه تاثیر الیاف فولادی صنعتی و بازیافتی

با توجه به اینکه ابعاد و اندازه الیاف بر روی اثرگذاری الیاف تاثیر می‌گذارد، به منظور مقایسه نتایج مربوط به بتن پیش‌آکنده مسلح به الیاف فلزی صنعتی و الیاف فلزی بازیافتی لاستیک، ضریبی مطابق رابطه ۱ به نام ضریب الیاف (RI) تعریف شده است (Karimi et al., 2023). در این رابطه v_f درصد حجمی الیاف، ξ ، l و d به ترتیب ضریب شکل، طول و قطر الیاف است.

$$RI = \xi \frac{l}{d} v_f \quad (1)$$

شکل ۱۲ روند تغییرات مقاومت فشاری و کششی در برابر ضریب الیاف برای الیاف‌های فلزی صنعتی و الیاف فلزی بازیافتی را نشان می‌دهد. در درصد‌های پایین‌تر، الیاف صنعتی و بازیافتی تقریباً عملکرد مشابهی دارند، در صورتی که در درصد‌های بالاتر اثرگذاری الیاف صنعتی محسوس‌تر و بیش‌تر است. سنسوات و همکاران (Senesavath et al., 2022) در مطالعه‌ای تاثیر الیاف بازیافتی از لاستیک را با الیاف صنعتی بر روی مقاومت فشاری و کششی بتن معمولی مقایسه نمودند. در این مطالعه مشابه با نتایج بدست آمده برای بتن پیش‌آکنده در مطالعه حاضر، مشاهده شد که، الیاف فلزی بازیافتی از لاستیک به ویژه در شکل خالص شده‌ی آن، نتایجی مشابه با الیاف صنعتی در بهبود مقاومت فشاری و کششی بتن معمولی دارد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه مقاومت فشاری و کششی بتن پیش‌آکنده مسلح به الیاف فلزی صنعتی، فلزی بازیافتی از لاستیک و فورتافرو، مورد بررسی قرار گرفته شد. پس از بررسی و ارزیابی داده‌های آزمایشگاهی، می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

- به طور کلی هر سه الیاف فلزی صنعتی، بازیافتی از لاستیک و فورتافرو، مقاومت فشاری و کششی بتن پیش‌آکنده را افزایش می‌دهند. همچنین هر سه الیاف ذکر شده، تاثیر بهتری در افزایش مقاومت کششی در مقایسه با مقاومت فشاری بتن پیش‌آکنده را دارند.

- افزودن ۱، ۱/۵ و ۲ درصد الیاف فلزی صنعتی مقاومت فشاری بتن پیش‌آکنده را به ترتیب ۱۲، ۱۶/۲۴ و ۲۳/۴۸ درصد افزایش می‌دهد. افزودن همین مقدار الیاف فورتافرو، مقاومت فشاری بتن پیش‌آکنده را ۱۰/۲، ۱۰/۲، ۶۹/۵ و ۵/۲۱ درصد افزایش می‌دهد. همچنین استفاده از ۰/۶۶ درصد الیاف فلزی بازیافتی، بیش‌ترین تاثیر را نسبت به سایر درصد‌های همین الیاف (۰/۳۳ و ۱ درصد)، در افزایش مقاومت فشاری دارد.

- روند افزایش مقاومت کششی در الیاف فلزی صنعتی صعودی بوده، و با افزودن ۱ تا ۲ درصد از این الیاف مقاومت کششی را از ۲۷/۷۴ درصد به ۳۵/۷۳ درصد افزایش می‌دهد. این درحالی است که روند افزایش مقاومت کششی الیاف فلزی بازیافتی و فورتافرو، صعودی نبوده و بیش‌ترین افزایش به ترتیب در درصد‌های ۰/۶۶ و ۱/۵ این الیاف‌ها مشاهده شد.

- با افزودن سه الیاف ذکر شده، رفتار بتن پیش‌آکنده از حالت ترد به شبه‌ترد و شکل‌پذیر تبدیل می‌شود.

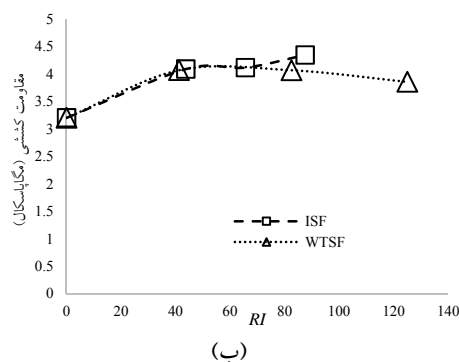
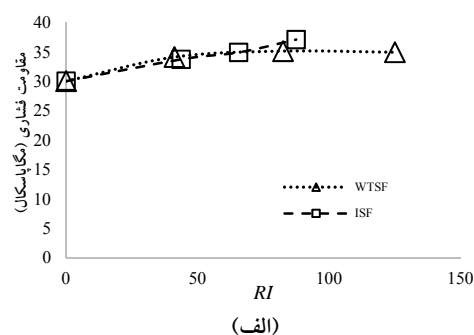
- هر سه الیاف از افت ناگهانی نمودار بار-جابجایی جلوگیری می‌کند، اما عملکرد الیاف فورتافرو در این امر محسوس‌تر می‌باشد.

- تاثیر الیاف فلزی بازیافتی و صنعتی، بر روی بهبود مقاومت فشاری و کششی بتن پیش‌آکنده در درصد‌های پایین تقریباً مشابه می‌باشد. اما با افزایش درصد الیاف، الیاف فلزی صنعتی عملکرد بهتری در بهبود مقاومت‌های ذکر شده دارد.

۶- مراجع

-ACEA Pocket Guide (2014). The Automobile Industry Pocket Guide, *The European Automobile Manufacturers Association*.

-Abdelgader, H. and A. Elbaden (2014). Concreting method that produce high modulus



شکل ۱۰. مقایسه تاثیر الیاف فلزی صنعتی و بازیافتی از لاستیک بر روی الف) مقاومت فشاری ب) مقاومت کششی

- Marcos-Meson, V., A. Michel, A. Solgaard, G. Fischer, C. Edvardsen and T. L. Skovhus (2018). Corrosion resistance of steel fibre reinforced concrete-A literature review. *Cement and Concrete Research* 103, 1-20.
- Mohammadhosseini, H., M. M. Tahir, A. Alaskar, H. Alabduljabbar and R. Alyousef (2020). Enhancement of strength and transport properties of a novel preplaced aggregate fiber reinforced concrete by adding waste polypropylene carpet fibers. *Journal of Building Engineering* 27: 101003.
- Nehdi, M. L., M. F. Najjar, A. M. Soliman and T. M. Azabi (2017). Novel eco-efficient Two-Stage Concrete incorporating high volume recycled content for sustainable pavement construction. *Construction and Building Materials* 146: 9-14.
- Nematzadeh, M. and A. Baradaran-Nasiri (2019). Mechanical performance of fiber-reinforced recycled refractory brick concrete exposed to elevated temperatures. *Computers and Concrete, An International Journal*, 19-35.
- Nematzadeh, M. and S. Fallah-Valukolaee (2017). Effectiveness of fibers and binders in high-strength concrete under chemical corrosion. *Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal* 64(2): 243-257.
- O'Malley, J. and H. S. Abdelgader (2010). Investigation into viability of using two-stage (pre-placed aggregate) concrete in Irish setting. *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China* 4: 127-132.
- Papakonstantinou, C. G. and M. J. Tobolski (2006). Use of waste tire steel beads in Portland cement concrete. *Cement and Concrete Research* 36(9): 1686.
- Rajabi, A. M., F. Omid Moaf and H. S. Abdelgader (2020). Evaluation of mechanical properties of two-stage concrete and conventional concrete using nondestructive tests. *Journal of Materials in Civil Engineering* 32(7): 04020185.
- Standards, A. S. o. T. a. M. (2003). ASTM C 33. Standard specification for concrete aggregates.
- Stodola, P. R., D. Akers, J. Bennet Jr, A. Cheff, T. Clapp, J. Cope and D. Green (1992). Guide for the use of preplaced aggregate concrete for structural and mass concrete applications. *ACI Mater. J* 88, 650-668.
- of elasticity. *MATEC Web of Conferences, EDP Sciences*.
- Abdelgader, H. S. and A. Ben-Zeitun (2004). Effect of grout proportions on tensile strength of two-stage concrete measured by split and double-punch tests. *Structural Concrete* 5(4). 173-177.
- Abdelgader, H. S. and J. Górski (2003). Stress-strain relations and modulus of elasticity of two-stage concrete. *Journal Of Materials In Civil Engineering* 15(4), 329-334.
- Ahmad, J., O. Zaid, C. L.-C. Pérez, R. Martínez-García and F. López-Gayarre (2022). Experimental research on mechanical and permeability properties of nylon fiber reinforced recycled aggregate concrete with mineral admixture. *Applied Sciences*, 12(2): 554.
- Althoey, F., O. Zaid, J. de-Prado-Gil, C. Palencia, E. Ali, I. Hakeem and R. Martínez-García (2022). Impact of sulfate activation of rice husk ash on the performance of high strength steel fiber reinforced recycled aggregate concrete. *Journal of Building Engineering* 54: 104610.
- Amran, Y. M., R. Alyousef, H. Alabduljabbar, M. Khudhair, F. Hejazi, A. Alaskar, F. Alrshoudi and A. Siddika (2020). Performance properties of structural fibred-foamed concrete. *Results in Engineering* 5: 100092.
- Awal, A. (1984). Manufacture and properties of prepacked aggregate concrete. Masters Res. Thesis, Faculty of Eng., Civil, and Environmental Eng., *University of Melbourne*.
- Bicer, K., H. Yalciner, A. P. Balkis and A. Kumbasaroglu (2018). Effect of corrosion on flexural strength of reinforced concrete beams with polypropylene fibers. *Construction and Building Materials* 185: 574-588.
- Das, K. K., E. S. Lam and H. H. Tang (2021). Partial replacement of cement by ground granulated blast furnace slag and silica fume in two stage concrete (preplaced aggregate concrete). *Structural Concrete* 22: E466-E473.
- Evans, A. and R. Evans (2006). The composition of a tyre: typical components. *The Waste & Resources Action Programme* 5.
- Hasan-Nattaj, F. and M. Nematzadeh (2017). The effect of forta-ferro and steel fibers on mechanical properties of high-strength concrete with and without silica fume and nano-silica. *Construction and Building Materials* 137: 557-572.

- Murao K, A. H. (2003). Development of Low-maintenance Tracks. *Journal of east Technical Review*.
- Ravichandran, D., Prem, P. R., Kaliyavaradhan, S. K., & Ambily, P. (2022). Influence of fibers on fresh and hardened properties of Ultra High Performance Concrete (UHPC)—A review. *Journal of Building Engineering*, 57, 104922.
- Reddy, S. V. B., & Rao, P. S. (2020). Experimental studies on mechanical properties and impact characteristics of ternary concrete with steel fiber. *Materials Today: Proceedings*, 27, 788-797.
- Saleh, Majed Ali, Su, Zhihao, & Zhang, J. (2024). Novel sustainable steel fiber reinforced preplaced aggregate concrete incorporating Portland limestone cement. *Scientific Reports*, 14(1), 10937.
- Senesavath, S., Salem, A., Kashkash, S., Zehra, B., & Orban, Z. (2022). The effect of recycled tyre steel fibers on the properties of concrete. *Pollack Periodica*, 17(1), 43-49.
- Takahashi T, I. K., Fuchigami S, Momoya Y. (2012). Development of Pre-Packed Concrete Trackbed for Shinkansen. *Railway Technical Research Institute Report*.
- Ahmed, S., Elshazli, M. T., Zaghlal, M., Alashker, Y., & Abdo, A. (2024). Improving Shear Behavior of Rubberized Concrete Beams through Sustainable Integration of Waste Tire Steel Fibers and Treated Rubber. *Journal of Building Engineering*, 110649.
- Alsaif, A., Albidah, Abdulrahman. (2024). Production of rubberized concrete utilizing reclaimed asphalt pavement aggregates and recycled tire steel fibers. *Structures*.
- Chaaban, S., Temsah, Y., Jahami, A., & Darwiche, M. (2024). Structural Response of Post-Tensioned Slabs Reinforced with Forta-Ferro and Conventional Shear Reinforcement under Impact Load. *Fibers*, 12(10), 79.
- Karimi, H. R., Ebneabbasi, P., Shahni Karamzadeh, N., & Khedri, E. (2023). Effect of water to cement (W/C) ratio and age on mechanical behavior of tire-recycled steel fiber reinforced concrete. *Structural Concrete*, 24(2), 2460-2474.
- Murali, G., Karthikeyan, K., Senthilpandian, M., Wong, L. S., Abid, S. R., & Kumar, A. H. (2024). Synergistic effects of graphene oxide, steel wire mesh and fibers on the impact resistance of preplaced aggregate concrete. *Journal of Building Engineering*, 95, 110363.

An Experimental Study on the Tensile and Compressive Strength of Fiber-Reinforced Preplaced Aggregate Concrete

Roya Raeisi, Ph.D., Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

Ferydoon Rezaei, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

Mohammad Reza Mohammad Aliha, Associate Professor, School of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran and Department of Mechanical Engineering, Engineering Faculty, Gebze Technical University, 41400 Gebze, Kocaeli, Turkey.

E-mail: frezaie@basu.ac.ir

Received: January 2024- Accepted: April 2025

ABSTRACT

Preplaced aggregate concrete (PAC) is a distinct type of concrete in which coarse aggregate is first arranged in the mold, and the spaces between the aggregates are then filled with a mortar composed of cement and fine aggregates. This study experimentally investigated fiber-reinforced preplaced aggregate concrete's compressive and tensile strength. Thus, three types of fibers (Industrial steel fiber, waste tire steel fiber, and Forta ferro fiber) were utilized with three different volume percentages. For industrial steel fibers and Forta Ferro fibers, the percentages used were 1%, 1.5%, and 2%, while for metal fibers recycled from rubber, the percentages were 0.33%, 0.66%, and 1%. Test results revealed that utilizing these three types of fibers significantly enhanced PAC's tensile and compressive strengths. Moreover, comparing the compressive and tensile strengths revealed that industrial steel fibers and waste tire steel fibers produced nearly identical effects. However, industrial steel fibers significantly impacted the tensile and compressive strengths at higher fiber percentages.

Keywords: Waste Tire Steel Fiber, Industrial Steel Fiber, Forta Ferro Fiber, Preplaced Aggregate Concrete