مهندسی عمران شریف (بهار ۱۴۰۱)
دوره‌ی ۲ - ۳۸، شماره‌ی ۱/۲، ص. ۱۰۹-۱۱۸، (پژوهشی)

Original Article

بررسی تأثیر الیاف هیبریدی در مقاومت الکتریکی و مقاومت دینامیکی بتن در برابر انفجار بتن

امین جعفرنیا (کارشناس ارشد و پژوهشگر)
رضا خدابخشی (پژوهشگر)
محمد فیاض * (استادیار)
سعید محمد (استادیار)
دانشکده‌ی مهندسی و پدافند غیرعامل، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران

در پژوهش حاضر، ۱۰ طرح اختلاط با درصدهای مختلف الیاف ساخته شده است. بتن الیافی ساخته شده از: الیاف فولادی، بارچیپ و ماکروسنتتیک بوده و ترکیب هر یک از الیاف‌های مختلف تحت بار انفجاری قرار گرفته و مقاومت بتن ومیزان خرابی هر نمونه با هر کدام از الیاف مذکور و به صورت ترکیبی در برابر انفجار به صورت آزمایشگاهی و میدانی بررسی شده است. همچنین مقاومت ویژه‌ی الکتریکی بتن الیافی هیبریدی در مقابل جریان الکتریکی ارزیابی شده است. نتایج نشان داد که میزان تخریب بتن با الیاف ماکروسنتتیک در حدود ۳۹٪ بوده است، که نسبت به سایر نمونه‌ها، مقاومت بیشتری در برابر انفجار نشان داده است. همچنین مقاومت الکتریکی بتن با الیاف ماکروسنتتیک در مقایسه با بتن پایه ۷ برابر افزایش نشان داده است، که در مناطق خورنده با نفوذ بالای یون کلراید به دلیل مقاومت الکتریکی بیشتر و در نتیجه نفوذپذیری کمتر، کاربرد ویژه‌یی داشته است.

واژگان کلیدی: بتن الیافی، الیاف فولادی، الیاف بارچیپ، الیاف ماکرو سنتتیک، انفجار، مقاومت الکتریکی.

algaminalg@gmail.com
rezakhodabakhshi65@yahoo.com
m.fayyaz@chmail.ir
mohandesi.mh@gmail.com

۱. مقدمه

الیاف در بتن نقش کنترل‌کننده‌ی ترک‌ها را دارد و باعث افزایش مقاومت‌های: ضربه، برشی و خمشی در بتن می‌شود و ظرفیت جذب انرژی بتن را افزایش می‌دهد. تأثیرگذاری الیاف در رفتار بتن به نوع و مقدار الیاف و همچنین شکل و مقاومت کششی الیاف بستگی دارد. برای ساخت بتن الیافی از مصالح معمول به همراه الیاف در ساخت بتن استفاده می‌شود. الیاف‌های: فولادی، مصنوعی و طبیعی از مهم‌ترین الیاف استفاده شده در بتن هستند. برخی از انواع الیاف با مدول و مقاومت بالا، از جمله: کربن، پلی‌وینیل الکل، فولاد، آزبست و الیاف شیشه‌یی می‌توانند به طور مؤثری استحکام بتن را افزایش دهند. با وجود این، رفتار شکننده‌ی ذاتی آنها باعث بهبود شکل‌پذیری نمی‌شود.[۱ و ۲] الیاف با استحکام کم، از جمله: پلی‌پروپیلن، نایلون و الیاف اکریلیک در بهبود شکل‌پذیری مؤثرتر هستند و مقدار ترک را کاهش می‌دهند.[۳] امروزه مطالعات گسترده‌یی بر روی رفتار بتن با الیاف مختلف صورت گرفته و در شمع سازه‌ها و سازه‌های با اهمیت و ظرفیت باربری بالا و همچنین جهت مقابله در برابر بار انفجاری مطالعه و بررسی شده‌اند.

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۱۰/۱۴، اصلاحیه ۱۴۰۰/۱/۲۵، پذیرش ۱۴۰۰/۳/۲۳.
DOI:10.24200/J302021.57086.2877

۱.۱. پیشینه‌ی پژوهش

یائو[1] و همکاران (۲۰۰۳)، بتن حاوی الیاف‌های فولادی، کربنی و پروپیلن را با درصدهای مختلف آزمایش مقاومت خمشی کرده و دریافته‌اند که اضافه کردن الیاف، بتن را نسبت به بتن معمولی مقاوم‌تر و شکل‌پذیرتر می‌سازد. بیشترین مقاومت خمشی مربوط به الیاف فولادی است، که این مسئله نشان‌دهنده‌ی خواص مناسب الیاف فولادی است. در حالی که الیاف دیگر یک تغییر اساسی همانند الیاف فولادی در مشخصات بتن ایجاد نکرده‌اند. در ادامه، ترکیب الیاف فولادی با الیاف کربنی منجر به افزایش مقاومتی بیشتر از ۳۰٪ شده است، ولی الیاف فولادی هزینه‌ی بسیار بالایی دارد.[۴] فلدمن[2] در نوشتاری نشان داد که استفاده از الیاف فولادی علاوه بر افزایش کرنش خرابی، جذب انرژی در بتن را نیز افزایش می‌دهد. در یکی از موارد استفاده از الیاف فولادی و یک الیاف کمکی دیگر، جذب انرژی نمونه در معرض هوا قرار گرفته و تا ۴۰٪ نسبت به نمونه‌ی بتن معمولی بیشتر شده است.[۵] یوتسون و همکاران (۲۰۰۶)، نیز برای مشخص کردن اثر الیاف فولادی، آزمایش‌هایی را بر روی آنها نجام دادند و دریافتند که الیاف ریزتر، مقاومت فشاری را بیشتر افزایش می‌دهند. همچنین نسبت سطح الیاف، پارامتر با اهمیتی در بررسی اثر الیاف است؛ به طوری که با بیشتر شدن نسبت سطح الیاف مقاومت کششی بیشتری در بتن

الیافی ایجاد می‌شود. یک موضوع دیگر افزایش مقاومت خمشی در الیاف با ابعاد بزرگ‌تر است.[۶] دیپا[۳] (۲۰۱۲) هم در مورد خصوصیات مقاومت بتن مسلح با الیاف ترکیبی مطالعه کرده و مقدار بهینه‌ی الیاف را برای به دست آوردن استحکام بیشینه‌ی بتن در طرح اختلاط‌های مشخص پژوهش خود معین کرده است.[۷] همچنین پاتیل[۴] (۲۰۱۳) در مورد آزمایش تجربی بر روی بتن الیافی با الیاف پلی‌پروپیلن با جایگزینی ماسه‌ی رودخانه به ماسه‌ی مصنوعی با و بدون مواد افزودنی مطالعه کرده و نتیجه گرفته است که تا اضافه شدن ۰/۵٪ بتن با الیاف پلی‌پروپیلن، درصد بهینه برای افزایش در کلیه‌ی خصوصیات مکانیکی وجود دارد.[۸] رابی و همکاران (۲۰۱۴) نیز آزمایش‌هایی را بر روی بتن الیافی با ترکیب الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن انجام دادند و تلاش کردند مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی بتن الیافی را بررسی کنند. نتایج نشان دادند که ترکیب ۰/۲۵٪ وزنی سیمان الیاف پلی‌پروپیلن و ۰/۷۵٪ وزنی سیمان الیاف فولادی؛ بهترین نتایج مقاومتی را خواهد داشت. در واقع با ترکیب اخیر، بیشترین مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی به دست آمده است. از طرفی، استفاده از الیاف فولادیِ بیشتر، بدون شک منجر به ایجاد رفتار مقاوم‌تر و تُردتر در مصالح می‌شود، که این موضوع قبلاً هم شناسایی شده است. در حقیقت مطالعات ایشان به طور ویژه به ترکیب دو الیاف مذکور با یکدیگر پرداخته و نشان داده است که دقیقاً چه ترکیبی از الیاف اخیر، بیشترین مقاومت را خواهد داشت.[۹] همچنین ملک محمد رنجبر و همکاران (۲۰۱۵)، در بررسی تأثیر الیاف فولادی در خواص تازه و سخت شده‌ی بتن خودتراکم حاوی اسکوریا، الیاف فولادی با طول ۵۰ میلی‌متر با وزن ۲۰ و ۴۰ کیلوگرم در مترمکعب را به طرح اختلاط افزوده و سپس آزمایش‌های بتن تازه و آزمایش‌های بتن سخت شده، شامل: اندازه‌گیری چگالی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، اندازه‌گیری سرعت عبور امواج اولتراسونیک، مقاومت خمشی، طاقت خمشی و جذب آب را انجام دادند و دریافتند که نسبت به طرح شاهد با افزایش حجم الیاف، جریان اسلامپ کاهش و زمان خروج کامل بتن از قیف V شکل افزایش یافته است. همچنین با افزودن مقادیر الیاف، مقاومت کششی و خمشی افزایش یافته و افزایش محسوسی در مقاومت فشاری مشاهده نشده است.[۱۰]

سروش سحرخیزان و سعید سعیدی جم (۲۰۱۶) نیز بتن الیافی با نسبت آب به سیمان برابر ۰/۴۰ و عیار سیمان ۴۰۰ و درصدهای مختلف الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن را هم به صورت مجزا و هم به صورت ترکیبی بررسی کردند و نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی و آزمایش تنش - کرنش ایشان، بیان‌گر آن بوده است که با افزودن درصدهای مختلف الیاف در سن ۷ روزه، تغییر خاصی در مقاومت نمونه‌ها حاصل نشده است؛ ولی در سن ۲۸ روزه، مقاومت‌های فشاری و کششی بیش از ۲۰٪ افزایش یافته‌اند و بیشترین رشد مقاومتی مربوط به نمونه‌های حاوی ۱٪ الیاف فولادی بوده است.[۱۱]

همچنین محمد یوسف و همکاران (۲۰۱۳)، تأثیر انفجار در بتن الیافی را بررسی کردند و در نوشتار خود، نتایج حاصل از داده‌های تجربی و شبیه‌سازی عملکرد بتن مسلح با الیاف فولادی ترکیبی و همچنین بتن مسلح عادی در معرض بارگذاری انفجار را ارائه داده و مشاهده کرده‌اند که ترکیب الیاف فولادی ترکیبی در مخلوط بتن معمولی، باعث بهبود خصوصیات مکانیکی مخلوط بتن شده است. الیاف فولادی ترکیبی با ترکیب ۷۰٪ الیاف فلزی بلند و ۳۰٪ کوتاه در کسری حجمی ۱/۵٪ در مخلوط بتن در مقابل بارگیری انفجار نسبت به مخلوط بتن معمولی و بدون الیاف مقاومت بیشتری ایجاد می‌کنند.[۱۲]

آقای رضایی‌فر و همکاران (۲۰۱۷)، در پژوهشی به مطالعه‌ی آزمایشگاهی اثر دماهای مختلف در مشخصات مکانیکی بتن‌های با عیار سیمان متفاوت حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن پرداخته‌اند. اگرچه نمونه‌ها، تحت دماهای ۲۵، ۱۰۰، ۲۵۰ ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد قرارگرفتند، اما نتایج نشان داده است که آثار آتش در بتن‌های حاوی الیاف فولادی مخرب‌تر بوده و همچنین مقاومت‌های فشاری و خمشی نمونه‌ها در دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد و مقاومت کششی در دمای ۲۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، بیشترین مقادیر را به خود اختصاص داده‌اند. مقاومت‌های فشاری و کششی بتن‌های حاوی الیاف فولادی، ۴۰ و ۵۰ درصد بیشتر از بتن‌های حاوی الیاف پلی پروپیلن بوده است، اما مقاومت خمشی آنها تقریباً با یکدیگر برابر بوده است.[۱۳]

در زمینه‌ی بررسی رفتار سازه‌ی ساخته شده با بتن الیافی در برابر انفجار، یوو و بانسیا[۵] (۲۰۱۷)، مطالعاتی انجام دادند و مشاهده کردند که صفحات دارای بتن الیافی در هر دو انفجار میدانی و انفجارهای تماسی، آسیب کمتری به نمایش گذاشته‌اند.[۱۴]

همچنین قلهکی و همکارش (۲۰۱۹)، در پژوهشی به بررسی تأثیر دماهای مختلف در خصوصیات مکانیکی بتن‌ها با محتوای سیمان‌های مختلف حاوی الیاف فولاد و پلی پروپیلن پرداخته‌اند. نمونه‌ها را در دمای ۲۵، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد قرار دادند و دریافتند که آثار آتش‌سوزی در بتن حاوی الیاف فولادی آسیب‌رسان‌تر و مقاومت‌های فشاری و کششی بتن حاوی الیاف فولادی به ترتیب ۴۰ و ۵۰ درصد بیشتر از بتن حاوی الیاف پلی پروپیلن بوده است. با این حال، قدرت خمشی آنها تقریباً برابر بوده است.[۱۵]

رفتار برشی بتن الیافی ساخته شده با درصد کمی از الیاف بازیافتی نیز در سال ۲۰۱۸ توسط لئون و همکاران انجام و نشان داده شد که بتن الیافی با الیاف بازیافتی فولادی، عملکرد بهتری نسبت به بتن الیافی با الیاف فولاد تازه از خود نشان داده‌اند.[۱۶]

همچنین پاچیده (۲۰۲۰)، در مطالعه‌یی به ارزیابی عملکرد بتن حاوی فنرهای بازیافتی با درصدهای مختلف حجمی پرداخته و دریافته است که مقاومت فشاری و کششی نمونه‌های بتنی با افزودن فنرها بهبود یافته است. علاوه بر این، مقاومت فشاری بتن حاوی فنر، ۲-۳ برابر بیشتر از بتن حاوی الیاف فولاد و پلی پروپیلن بوده است.[۱۷]

در سال ۲۰۱۹، نیز ارزیابی عملکرد بتن تقویت شده با الیاف ترکیبی با درصدهای مختلفی از ترکیب‌های معدنی توسط نواز و همکاران بررسی شده است. لذا ۵ تا ۱۰ درصد سهم ماده‌ی سیمانی از خاکستر در مخلوط بتن و همچنین الیاف پلی‌پروپیلن، الیاف فولادی و فیبر ترکیبی (پلی‌پروپیلن و فولاد) با نسبت‌های مختلف از ۴ تا ۸ درصد به عنوان افزودنی برای هر یک از مخلوط‌های بتنی از درجه‌ی M۳۰ طبق روش کد IS در طرح اختلاط استفاده شده است. روان‌کننده نیز در کلیه‌ی مخلوط‌ها استفاده شده است، تا بتن کارایی بهتری داشته باشد. سپس مشاهده شد که مقاومت بیشینه‌ی فشاری نمونه پس از ۲۸ روز، ۴۴/۴۴ نیوتن بر مترمربع با ۴٪ الیاف ترکیبی (پلی‌پروپیلن و فولاد) با ۱۰٪ خاکستر بوده و مقاومت فشاری نمونه بیش از ۲۹٪ نسبت به بتن معمولی افزایش یافته است.[۱۸]

مشتاق و همکاران (۲۰۱۹)، هم در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی، به بررسی عملکرد بتن‌های حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن و فنرهای فلزی بازیافتی با استفاده از درصدهای حجمی ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ پرداخته‌اند. بدین منظور تعدادی نمونه‌ی استوانه‌یی و منشوری جهت انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی و خمشی ساخته و در سن ۲۸ روزه آزمایش کرده‌اند. نتایج نشان دادند که استفاده از فنر فلزی بازیافتی در بتن، عملکرد مطلوب‌تری نسبت به سایر الیاف‌ها در کنترل ترک‌های ناشی از کشش داشته و در درصدهای کم، استفاده از فنر، سبب

بهبود بیشتری در خصوصیات مکانیکی بتن شده است. همچنین الیاف پلی پروپیلن و فنر فلزی تا ۲ برابر طاقت خمشی بتن را افزایش داده است، که این مقدار برای استفاده از الیاف فولادی به ۱۳ برابر رسیده است.[۱۹]

با توجه به مجموع ویژگی‌های مرور شده در مطالعات مختلف روشن است که بتن الیافی گزینه‌ی مناسبی برای سازه‌هایی است که در معرض بارهای شدید انفجار قرار دارند؛ زیرا در مقایسه با بتن معمولی بدون الیاف، جذب انرژی و بعضاً مقاومت بیشینه‌ی بهتر و مقاومت مناسبی در برابر انفجار دارند.[۲۰] همچنین فنگ و همکاران (۲۰۱۹)، مقاومت در برابر نفوذ بتن را با مقاومت بالا از جنس الیاف تقویت شده در زیر پرتابه با چند ضربه و نیز پتانسیل مقاومت در برابر نفوذ بتن را با مقاومت بالا با برخی از انواع الیاف با میزان الیاف ۲٪ بررسی کردند. آزمایش‌های فشرده‌سازی تک‌محوره نیز برای تعیین مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه انجام دادند و دریافتند که الیاف فولاد در بهبود مقاومت فشاری از الیاف پلی‌پروپیلن و الیاف پلی وینیل الکل بهتر است.[۲۱]

دونگ جو و همکاران (۲۰۲۱)، هم در پژوهش دیگری مقاومت در برابر ضربه‌ی بتن الیافی حاوی الیاف فولادی و پلی آمید را بررسی کردند و دریافتند که فیبرهای ترکیبی فولادی و پلی آمید، بهترین عملکرد را از نظر شکل‌پذیری و ظرفیت جذب انرژی دارند.[۲۲]

نینگ[۶] و همکاران (۲۰۲۱)، نیز در بررسی تأثیر الیاف بازالت و پلی پروپیلن در بتن به صورت ترکیبی دریافتند که الیاف مذکور، درجه‌ی شکست بتن را کاهش می‌دهند و ویژگی شکست برشی را بهبود می‌بخشند. آنها همچنین معیار هوک - براون را، که ارتباط بین منافذ و وجود الیاف را مشخص می‌کند، نشان دادند.[۲۳]

یمینی و همکاران (۲۰۲۱)، نیز در بررسی اثر الیاف فولادی و شیشه در درصدهای مختلف ترکیبی در عملکرد مکانیکی و پیچشی بتن نتیجه گرفتند که عملکرد مکانیکی بتن با افزودن الیاف هیبریدی به حجم ۱٪ حجم بتن، به طرز چشمگیری بهبود یافته است. همچنین مقاومت پیچشی در حالت ترک‌خوردگی و پس از ترک‌خوردگی در بتن تقویت شده با الیاف هیبرید بهبود پیدا کرده است.[۲۴]

۲.۱. اهمیت پژوهش

تاکنون مطالعات گسترده‌یی در مورد تأثیر انواع الیاف انجام شده و برخی از آنها نیز تأثیر استفاده از الیاف در برابر انفجار را بررسی کرده‌اند. علی‌رغم تأثیر مطلوب جذب انرژی و دوام الیاف ترکیبی، به ارزیابی عملکرد بتن‌های مذکور در برابر انفجار به دلیل محدودیت‌های مختلف، از قبیل هزینه‌ی آزمایش‌ها، زمان‌بربودن مطالعات و ایمنی توجه کمتری شده است. لذا در نوشتار حاضر، رفتار بتن الیافی ترکیبی با استفاده از الیاف فولادی، ماکروسنتتیک و الیاف بارچیپ با نسبت‌های مختلف حجمی نسبت وزن بتن و همچنین ترکیب بتن با الیاف ذکر شده با نسبت‌های مختلف و به صورت الیاف تکی در بتن بررسی شده است. همچنین با توجه به سنجه‌ی مقاومت الکتریکی و مقاومت فشاری بتن‌های ساخته شده در نوشتار حاضر، در سن‌های ۷ و ۲۸ روزه برای مقاومت فشاری و ۲۸ روزه برای مقاومت الکتریکی به همراه میزان نفوذپذیری بتن مقایسه شده و در انتها، هزینه‌ی الیاف در بتن نسبت به عملکرد هر نمونه‌ی ساخته شده برآورد شده و نمونه‌ها بر اساس اقتصادی بودن نیز ارزیابی شده‌اند. همچنین در پژوهش حاضر، با بررسی سه نوع الیاف در ترکیب‌های مختلف و انجام آزمایش‌های میدانی انفجار، به بررسی دقیق‌تر تأثیر هر یک از الیاف و نسبت‌های مختلف هرکدام از آنها پرداخته شده است.

۲. روش پژوهش

۱.۲. مواد و مصالح

مصالح استفاده شده در آزمایش جهت ساخت بتن الیافی، شامل: سنگ‌دانه، سیمان، آب، فوق روان‌کننده، الیاف فولادی، الیاف بارچیپ و الیاف ماکروسنتتیک بوده است. الیاف بارچیپ با جنس پلی اولفین و به عنوان جایگزینی برای میلگرد حرارتی و الیاف فولادی در بتن استفاده می‌شود. الیاف ماکروسنتتیک با پیوند دادن مونومرها به پلیمر، از طریق فرایندی به نام پلیمریزاسیون ساخته می‌شوند. با افزودن الیاف ماکرو سنتتیک به بتن، مقاومت مکانیکی و دوام بتن افزایش می‌یابد و بر اثر فعل‌وانفعالات فیزیکی محیط از بروز ترک‌های مویی و خطی جلوگیری می‌کند. جهت استفاده از ماسه‌ی شسته‌ی موجود برای طرح اختلاط، آزمایش‌های دانه‌بندی و موارد دیگر انجام شده است، که در حدود مجاز استاندارد ملی ایران به شماره ۳۰۲ قرار داشته است. سنگ‌دانه‌های درشت انتخاب شده در بازی ۵-۲۵ میلی‌متر بوده و مصالح درشت‌دانه به محدوده‌ی زیر ۱۹ میلی‌متر اصلاح شده‌اند. دانه‌بندی اصلاح شده در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

سیمان استفاده شده از نوع سیمان تیپ V برای مقاومت در برابر سولفات و کلراید به صورت توأم در محیط‌های دریایی استفاده شده است. آب استفاده شده از نوع آب آشامیدنی و روان‌کننده‌ی استفاده شده از نوع ۲NPC ۱۰۲ بوده است، که برای افزایش کارایی و اسلامپ بتن ۰/۳ تا ۰/۸ درصد وزن سیمان استفاده شده است. الیاف استفاده شده در آزمایش انجام شده مطابق شکل ۲ از نوع الیاف فولادی، الیاف بارچیپ و ماکروسنتتیک بوده است، که الیاف با نسبت حجمی ۱ تا ۲ درصد حجم بتن استفاده شده است.

مقدار مشخصی از الیاف فولادی در بتن می‌تواند باعث ایجاد تغییرات کیفی در خاصیت بتن، افزایش مقاومت در برابر ترک‌خوردگی، ضربه، خستگی و دوام بتن شود. الیاف بارچیپ، الیافی پلی‌پروپیلنی است که به عنوان مسلح‌کننده‌ی بتن و بعضاً در شاتکریت به کار می‌رود. سیستم مسلح با پراکنش صدها الیاف با مقاومت کششی در مخلوط بتن عمل می‌کند. الیاف ذکر شده با مسلح‌ساختن هر قسمت از ساختار بتن، از سمت جلو به عقب و بالا به پایین، هرگونه نقطه‌ی آسیب‌پذیری را در سطح بتن از بین می‌برند. الیاف ماکروسنتتیک بتن به عنوان مسلح‌کننده برای افزایش مقاومت، بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن و کنترل ترک‌خوردگی در ساختار بتن و ملات‌های پایه سیمانی صورت می‌گیرد و الیافی غیرآتش‌زاست. مشخصات الیاف در جدول ۱ ارائه شده است.

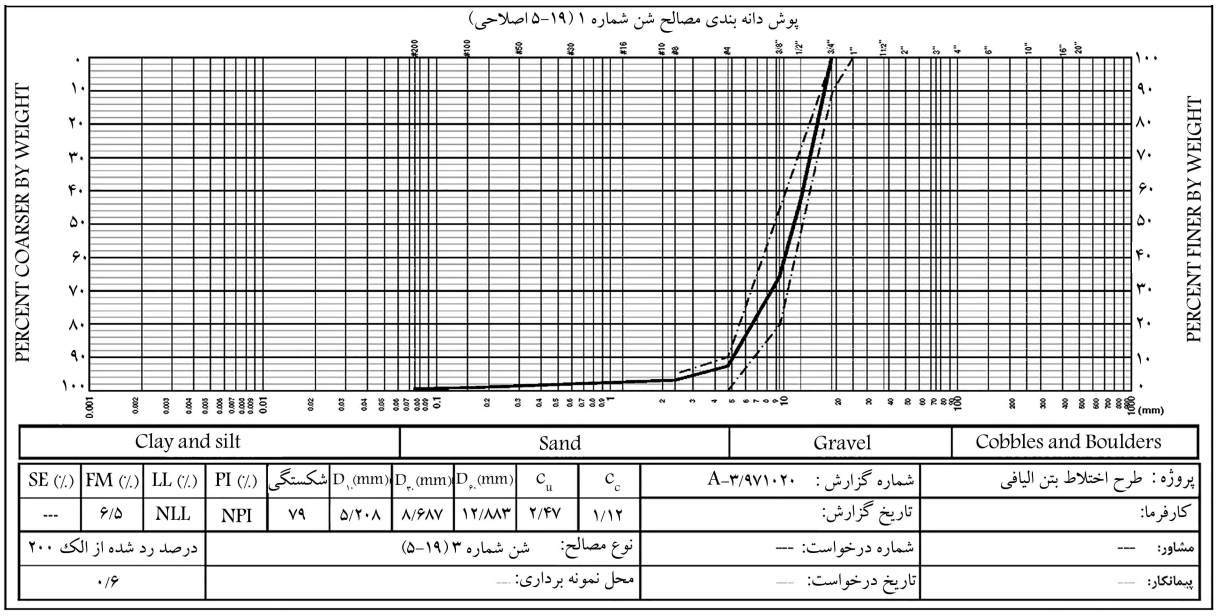
۲.۲. طرح اختلاط بتن

در روش ملی طرح بتن، ابتدا می‌توان نسبت آب به سیمان را با توجه به مقاومت هدف طرح و نوع سیمان و شکل سنگ‌دانه‌ی درشت به دست آورد و پس از آن با توجه به دوام بتن، مقدار آن کنترل شود. سپس محدوده‌ی دانه‌بندی با توجه به نوع قطعه و وسایل حمل و ریختن و با عنایت به ویژگی‌های بتن تازه، همچون: کارآیی، جداشدگی، آب انداختن و جمع‌شدگی و همچنین بیشینه‌ی اندازه‌ی سنگ‌دانه‌ی موجود مشخص و به دنبال آن با در نظر گرفتن محدوده‌ی ذکر شده، سهم سنگ‌دانه‌ها در مخلوط سنگ‌دانه تعیین می‌شود.

مقاومت فشاری متوسط لازم برای طرح مخلوط بتن یا مقاومت هدف طرح اختلاط، معمولاً به کمک مقاومت مشخص و انحراف معیار مقاومت بتن ساخته شده در کارگاه به دست می‌آید. از این رو با توجه به مقاومت مشخصه‌ی متعارف، مقدار

جدول ۱. مشخصات الیاف مصرفی در بتن.

نوع الیاف	وزن مخصوص (Kg/cm^3)	مقاومت کششی (MPa)	طول	قطر	رنگ
فولادی	۷۸۵۰	۱۲۰۰	۵۰	۰/۸	خاکستری
بارچیپ	۹۱۰	۶۴۰	۴۸	۰/۹	سفید
ماکروسنتتیک	۹۱۰	۶۶۰	۷۴	۰/۸	نارنجی

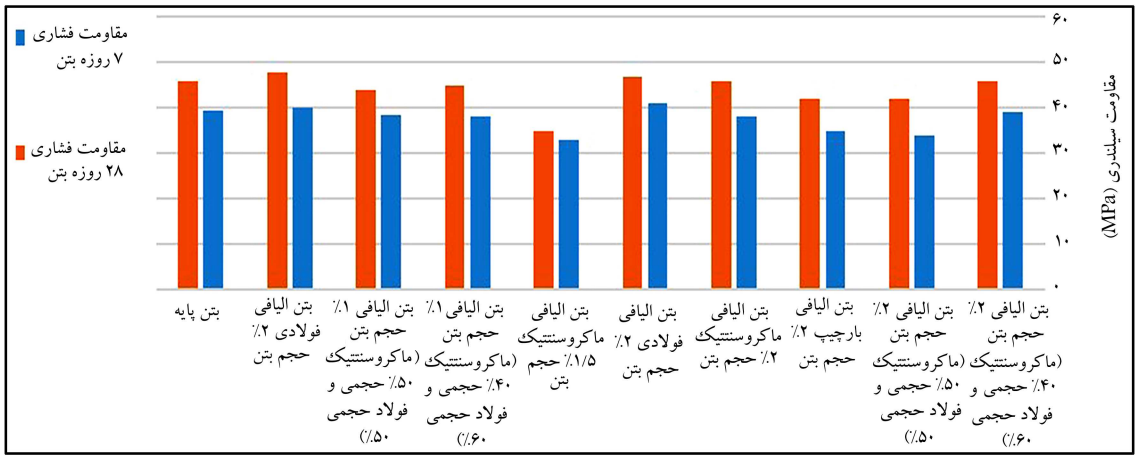


شکل ۱. دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ی اصلاح شده‌ی نهایی.

الف) الیاف فولادی؛ ب) الیاف بارچیپ؛ ج) الیاف ماکروسنتتیک.

شکل ۲. نمونه الیاف مورد استفاده.

۳۰ تا ۴۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. اگر جداشدگی در بتن مشاهده شود، می‌توان با کاهش بیشینه‌ی اندازه‌ی سنگ‌دانه، افزایش ریزی بافت دانه‌بندی، افزایش سیمان یا مواد چسباننده، افزایش مواد پودری، کاهش کارآیی و یا کاهش نسبت آب به سیمان و یا ترکیبی از موارد فوق آن را مهارکرد. استفاده از مواد مذکور، از جمله اقداماتی است که معمولاً برای جلوگیری از جداشدگی، افزودنی لزجت‌زا جهت بتن‌های خیلی روان یا خودمتراکم به کارگرفته می‌شود. این کار وقتی انجام می‌شود که نتوان به خوبی از سایر راه‌حل‌های ذکر شده استفاده کرد. در طرح مذکور، اختلاط الیاف همراه با سنگ‌دانه به جام مخلوط‌کن افزوده و سپس سایر مصالح مخلوط اضافه شدند. تراکم بتن‌ها با استفاده از میز لرزان در آزمایشگاه انجام شده است. بتن‌ها پس از عمل‌آوری ۲۴ ساعته باز شدند و پس از نام‌گذاری، در محلول آب آهک اشباع برای سنجش مقاومت‌های ۷ و ۲۸ روزه برای هر طرح اختلاط قرار داده شدند. جهت بررسی تأثیر الیاف، یک نمونه بتن پایه ساخته شده و سپس مقاومت الکتریکی و مقاومت تمام بتن‌های الیافی در برابر انفجار با آن مقایسه شده است. طبق مبحث نهم مقررات ملی،[۲۵] از آزمایش V-B یا اسلامپ معکوس جهت روانی بتن استفاده می‌شود. در طرح اختلاط کنونی با استفاده از آزمایش V-B و با افزودن فوق روان‌کننده به مخلوط، برای آن‌که زمان آزمایش V-B بین ۳ تا ۱۰ ثانیه باشد، روانی بتن بررسی شده است.[۲۶] در جدول ۲، طرح اختلاط‌های پژوهش حاضر ارائه شده است.



شکل ۳. مقایسه‌ی مقاومت‌های فشاری ۷ و ۲۸ روزه‌ی نمونه‌های بتن الیافی و بتن پایه.

جدول ۲. طرح اختلاط (کیلوگرم).

ماده	سیمان	آب	ماسه	شن	الیاف
وزن	۴۴۶	۱۷۴	۹۹۳/۸	۶۶۳	-

جدول ۳. نام‌گذاری طرح‌ها.

N	بتن پایه
A	بتن الیافی فولادی ۱٪
B	بتن الیافی ترکیبی ۱٪ (ماکروسنتتیک ۵۰٪ فولاد ۵۰٪)
C	بتن الیافی ترکیبی ۱٪ (ماکروسنتتیک ۴۰٪ فولاد ۶۰٪)
D	بتن الیافی ماکروسنتتیک ۱/۵٪
E	بتن الیافی فولادی ۲٪
F	بتن الیافی ماکروسنتتیک ۲٪
G	بتن الیافی بارچیپ ۲٪
H	بتن الیافی ترکیبی ۲٪ (ماکروسنتتیک ۵۰٪ فولاد ۵۰٪)
I	بتن الیافی ترکیبی ۲٪ (ماکروسنتتیک ۴۰٪ فولاد ۶۰٪)

۳. بحث و نتایج

۱.۳. مقاومت فشاری

مقایسه‌ی مقاومت فشاری نمونه‌های الیافی و شاهد با استفاده از دستگاه تعیین مقاومت فشاری بتن در مقاومت‌های ۷ و ۲۸ روزه در شکل ۳ مشاهده می‌شود. در جدول ۳، نیز نام‌گذاری طرح‌ها ارائه شده است.

مطابق شکل ۳ مشخص است که کمترین مقاومت فشاری در ۷ و ۲۸ روز مربوط به بتن الیافی ماکروسنتتیک با نسبت حجمی ۱/۵٪ نسبت به حجم بتن بوده است. در مقاومت ۷ روزه، بتن با الیاف فولادی به نسبت ۲٪، بهترین عملکرد را با مقاومت فشاری بیش از ۴۱ مگاپاسکال از خود نشان داده است، در صورتی که مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده در مقاومت ۲۸ روزه با نسبت حجمی ۱٪ بیشترین مقاومت فشاری را از خود نشان داده است. در مقاومت‌های ۷ و ۲۸ روزه، بتن با الیاف فولادی بهترین عملکرد را از خود نشان داده و الیاف بارچیپ با مقاومت فشاری ۳۵ مگاپاسکال در ۷ روزه و ۴۲ مگاپاسکال در ۲۸ روزه کمتر از سایر الیاف عمل کرده است. در بتن با الیاف هیبرید نیز در مقاومت‌های ۷ و ۲۸ روزه، بتن با الیاف ماکروسنتتیک و با نسبت ۲٪ حجم بتن و نسبت ماکروسنتتیک ۴۰٪ و الیاف فولادی ۶۰٪، بهترین عملکرد فشاری را داشته است؛ در حالی که با همین نسبت حجمی با افزایش نسبت ماکروسنتتیک و الیاف فولادی به نسبت ۱ به ۱، ضعیف‌ترین عملکرد فشاری در بتن‌های هیبریدی را داشته است.

۲.۳. آزمایش مقاومت الکتریکی

برای انجام آزمایش مقاومت الکتریکی از استاندارد AASHTO T۳۵۸ استفاده شده است. ازجمله ویژگی‌های فیزیکی بتن می‌توان به مقاومت ویژه‌ی الکتریکی آن اشاره کرد. مقاومت ویژه‌ی الکتریکی بتن، شاخصی برای تعیین میزان مقاومت بتن در برابر عبور جریان الکتریکی و به عنوان یکی از مشخصه‌های بتن، نشان‌دهنده‌ی برخی از خواص مهم آن از جمله نفوذپذیری و به موازات آن جذب آب بتن است. مقاومت الکتریکی بتن به خصوص در مناطق خورنده با نفوذ بالای یون کلراید کاربرد دارد و هر چه مقاومت الکتریکی بیشتر باشد، نفوذپذیری کمتری خواهد داشت. شاخصه‌ی مقاومت الکتریکی بتن در سازه‌های بتن مسلح واقع در معرض خوردگی، کاربردی است. در روند خوردگی، بر سطح میلگرد دو منطقه‌ی آندی و کاتدی به وجود می‌آید، که اختلاف پتانسیل دارند و انتقال یون‌های هیدروکسیل از کاتد به آند تحت تأثیر مقاومت ویژه‌ی الکتریکی بتن صورت می گیرد. هر چه مقاومت ویژه‌ی الکتریکی بتن بیشتر باشد، از شدت خوردگی کاسته می‌شود. به عبارت دیگر، خوردگی با جریان بتن آند و کاتد، نسبت مستقیم و با مقاومت الکتریکی، نسبت عکس دارد. مقایسه‌ی مقاومت الکتریکی نمونه‌ی بتن‌های ساخته شده همراه با مشخصات نمونه در جدول ۴ ارائه شده است. همچنین مقایسه‌ی مقاومت الکتریکی نمونه بتن‌های ساخته شده در شکل ۴ مشاهده می‌شود. مقاومت الکتریکی بتن نیز مطابق رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود:

$$\rho = R\frac{A}{L} \quad (۱)$$

که در آن،

R: مقاومت الکتریکی نشان داده شده توسط اُهم‌متر؛

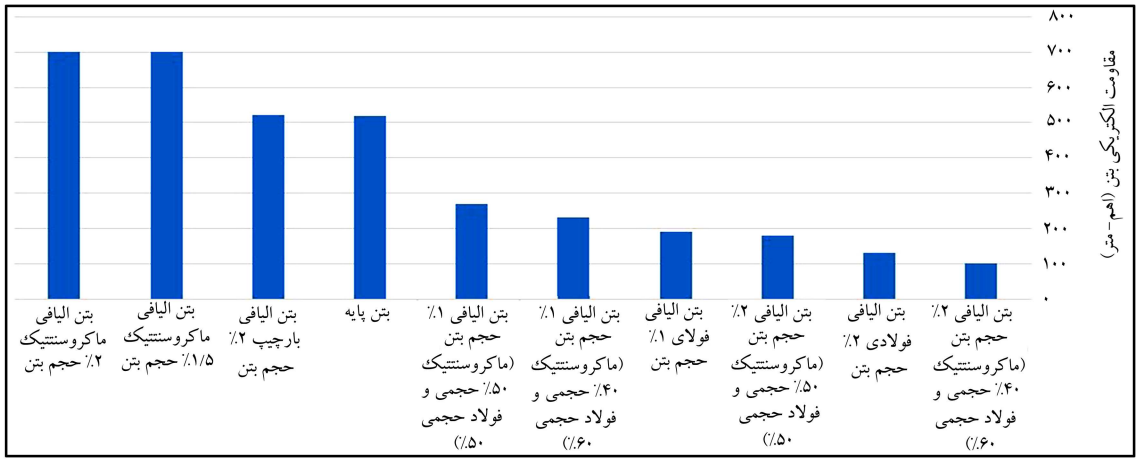
A: مساحت مقطع بتن بر حسب مترمربع؛

L: ارتفاع نمونه‌ی بتن بر حسب متر؛

ρ: مقاومت الکتریکی ویژه بر حسب اُهم در متر.

جدول ۴. مقاومت الکتریکی حجمی بتن.

کد نمونه	نمونه	عمر نمونه	ابعاد (Cm)		مقاومت الکتریکی
			قطر	ارتفاع	Ω
۳	بتن بدون الیاف	۲۸ روزه	۱۰	۲۰	۱۴۰۰
۳-۱	بتن الیافی فولادی ۱٪	۲۸ روزه	۱۰	۲۰	۵۲۶
۳-۲-۲	بتن الیافی فولادی ۲٪	۲۸ روزه	۱۰	۲۰	۳۷۲
۳-۳-۱	بتن الیافی ماکروسنتتیک ۱/۵٪	۲۸ روزه	۱۰	۲۰	۱۸۰۰
۳-۳-۲	بتن الیافی ماکروسنتتیک ۲٪	۲۸ روزه	۱۰	۲۰	۱۸۰۰
۳-۴-۱	بتن الیافی ترکیبی ۵۰-۵۰ و ۱٪ ماکروسنتتیک ـ فولادی	۲۸ روزه	۱۰	۲۰	۷۲۶
۳-۴-۲	بتن الیافی ترکیبی ۵۰-۵۰ و ۲٪ ماکروسنتتیک ـ فولادی	۲۸ روزه	۱۰	۲۰	۵۱۲
۳-۵-۱	بتن الیافی ترکیبی ۴۰-۶۰ و ۱٪ ماکروسنتتیک ـ فولادی	۲۸ روزه	۱۰	۲۰	۶۲۴
۳-۵-۲	بتن الیافی ۴۰-۶۰ و ۲٪ ماکروسنتتیک ـ فولادی	۲۸ روزه	۱۰	۲۰	۳۰۴
۳-۶-۲	بتن الیافی بارچیپ ۲٪	۲۸ روزه	۱۰	۲۰	۱۴۰۰



شکل ۴. مقاومت الکتریکی ۲۸ روزه‌ی بتن‌های الیافی.

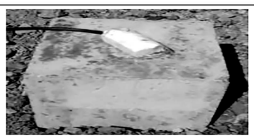
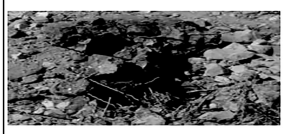
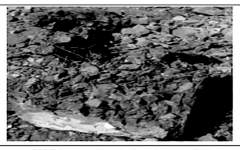
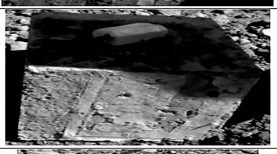
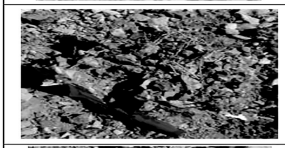
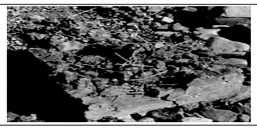
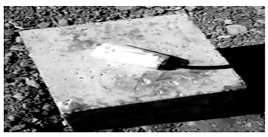
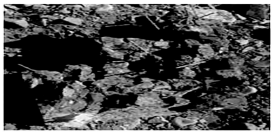
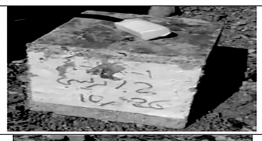
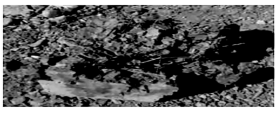
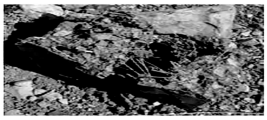
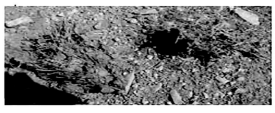
همان‌طورکه مشاهده می‌شود، بتن با الیاف ماکروسنتتیک با نسبت حجمی ۲٪ حجم بتن، بهترین عملکرد را با مقاومت الکتریکی ۷۰۰ اهم - متر از خود نشان داده و بعد از آن نیز بتن با همان الیاف و با نسبت حجمی ۱/۵٪، عملکرد مطلوبی را داشته است؛ که نشان از عملکرد مناسب بتن با الیاف ماکروسنتتیک در برابر خوردگی و در نتیجه کاربرد بالای این گونه بتن در مناطق با یون کلراید بالاست. نمونه‌ی بتن با الیاف فولادی بارچیپ با نسبت حجمی ۲٪ حجم بتن، عملکرد مطلوبی با مقاومت الکتریکی ۵۴۰ اهم - متر از خود نشان داده است. در بتن‌های ساخته شده با الیاف هیبریدی نیز بتن الیافی با الیاف ماکروسنتتیک و الیاف فولادی با نسبت حجمی ۱٪ الیاف هیبریدی بیشترین مقاومت الکتریکی را داشته‌اند. کمترین مقاومت الکتریکی نیز مربوط به بتن الیافی با الیاف ماکروسنتتیک و الیاف فولادی با نسبت حجمی ۲٪ بوده است، که با مقاومت الکتریکی نزدیک به ۱۰۰ اهم - متر، عملکرد ضعیفی را از خود نشان داده است.

۴.۳. آزمایش انفجار

برای انجام آزمایش انفجار، آیین‌نامه‌ی مستقلی وجود ندارد. برای مقایسه‌ی عملکرد بتن‌های حاوی الیاف‌های مختلف، نمونه‌های بتنی با ابعاد ۱۵ × ۱۵ × ۱۵ سانتی‌متر ساخته و با شرایط یکسان بر روی بستر خاک قرار داده شدند و سپس میزان ۳۲ گرم ماده‌ی منفجره‌ی C۴ در وسط نمونه‌ها قرار داده شد. با توجه به این‌که برای شبیه‌سازی موج بلاست، نیاز به جرم معادل TNT دارد، ماده‌ی منفجره‌ی C۴ نسبت به TNT میزان انرژی بیشتری با ضریب ۱/۱۴ آزاد می‌کند. با استفاده از ضریب اخیر، جرم معادل TNT به کار برده شده در آزمایش کنونی، ۳۶/۵ گرم بوده است.

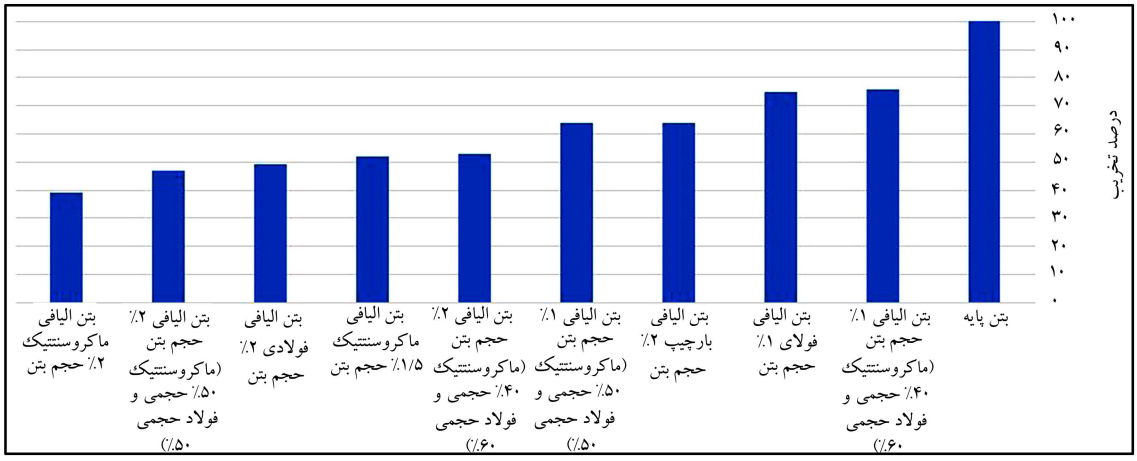
انفجارها ازنظر موقعیت نسبت به سازه به دو گروه اصلی انفجار داخلی و انفجار خارجی تقسیم‌بندی می‌شوند. انفجار خارجی را نیز می‌توان در سه گروه انفجار در

جدول ۵. تأثیر انفجار در بتن الیافی.

نمونه	نمونه ی ساخته شده قبل از اعمال بار انفجاری	نمونه تحت بار انفجاری
طرح ۳ بدون الیاف نمونه به طور کامل از بین رفت. درصد تخریب: ۱۰۰٪		کاملا تخریب شد
طرح ۱-۳ ۱٪ فولادی حدودا نصف مقطع ضلع پایین کاملا از بین رفته و از مابقی نمونه به طور میانگین ۷۵ mm باقی مانده است. درصد تخریب: ۷۵٪		
طرح ۲-۲-۳ ۲٪ فولادی حدودا به طور میانگین ۷۷ mm از کل نمونه باقی مانده است. درصد تخریب:۴۹٪		
طرح ۱-۳-۳ ۱/۵٪ ماکروسنتتیک حدودا ۷۲ mm از کل نمونه باقی مانده است. درصد تخریب:۵۲٪		
طرح ۲-۳-۳ ۲٪ ماکروسنتتیک حدودا ۹۲ mm از کل نمونه باقی مانده است. درصد تخریب: ۳۹٪		
طرح ۱-۴-۳ ۱٪ ترکیبی ۵۰-۵۰ فولادی و ماکروسنتتیک حدودا یک چهارم مقطع ضلع پایین کاملا از بین رفته و از مابقی نمونه به طور میانگین ۷۲ mm باقی مانده است. درصد تخریب : ۶۴٪		
طرح ۲-۴-۳ ۲٪ ترکیبی ۵۰-۵۰ فولادی و ماکروسنتتیک به طور میانگین ۸۰ mm باقی مانده است. درصد تخریب: ۴۷٪		
طرح ۱-۵-۳ ۱٪ ترکیبی ۴۰-۶۰ فولادی و ماکروسنتتیک نمونه به قطعات زیاد و ریز تبدیل شد و تقریبا ۳۶ mm به صورت تکه تکه باقی مانده است. درصد تخریب: ۷۶٪		
طرح ۲-۵-۳ ۲٪ ترکیبی ۶۰-۴۰ فولادی و ماکروسنتتیک به طور میانگین ۷۰ mm باقی مانده است. درصد تخریب: ۵۳٪		
طرح ۲-۶-۳ ۲٪ بارچیپ حدودا یک سوم از مقطع نمونه کاملا از بین رفته و مابقی دو تکه شده و ارتفاع آن تقریبا ۸۱ mm بوده است. درصد تخریب: ۶۴٪		

هوای آزاد، انفجار هوایی و انفجار سطحی تقسیم‌بندی کرد. لازم به ذکر است که تمامی خرج‌ها به صورت تماسی و بدون فاصله بر روی نمونه‌ها قرار گرفته و نوع انفجار نیز انفجار سطحی بوده است، که نتایج آن به همراه تصاویر بتن‌های ساخته شده در جدول ۵ ارائه شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، بتن پایه بدون الیاف تحت بار انفجاری کاملاً تخریب شد، در حالی که بتن با الیاف ماکروسنتتیک با نسبت حجمی ۲٪، بیشترین مقاومت را در برابر بار انفجاری نشان داده و میزان تخریب نمونه ۳۹٪ بوده است و پس از آن بتن هیبریدی با الیاف ماکروسنتتیک و الیاف فولادی با نسبت حجمی ۲٪، بیشترین مقاومت را با میزان تخریب ۴۷٪ از خود نشان داده است. نتایج تخریب در بتن‌های ساخته شده از الیاف فولادی و ماکروسنتتیک با نسبت حجمی بیشتر از ۱٪ حجم بتن، عملکرد مطلوبی در مقابل انفجار نشان داده است؛ در صورتی که نمونه‌های بتن ساخته شده با نسبت حجمی ۱٪ و بتن با الیاف بارچیپ با نسبت



شکل ۵. تخریب سطحی نمونه‌های بتن الیافی ۲۸ روزه تحت بار انفجاری.

۲٪ حجمی بتن، عملکرد ضعیف‌تری در مقابل انفجار از خود نشان داده‌اند.

یکی از نکات حائز اهمیت انتخاب نسبت‌های ترکیب الیاف در نمونه‌ی بتنی است. به نحوی که انتخاب این نسبت‌ها در عملکرد نمونه‌های بتنی حاوی این الیاف در برابر تخریب تحت بار انفجاری مؤثر است.

انتخاب نوع الیاف برای مقاومت در برابر بار انفجار است. همان طورکه از نتایج جدول ۳ مشاهده می‌شود، در میزان مساوی از الیاف ۲٪ به ترتیب نمونه‌های حاوی الیاف‌های ماکروسنتتیک، فولادی و بارچیپ عملکرد بهتری را در برابر بار انفجار از خود نشان داده‌اند.

در تحقیقاتی که کیم و همکاران (۲۰۱۷)، بر روی درصدهای مختلف الیاف فولادی و میکرو پلی اتیلن و چند الیاف دیگرکردند، آزمایش‌های انفجار را به صورت تماسی انجام دادند و به صورت چشمی به بررسی میزان تخریب پرداختند و مشاهده کردند که ترکیب‌های مختلف الیاف، تأثیر متفاوتی در میزان تخریب و مقاومت نمونه‌ی بتنی دارند.[۲۷]

۴. هزینه‌ی مازاد تولید بتن الیافی

هزینه‌ی مازاد ناشی از تولید بتن نسبت به الیاف مصرف شده در طرح اختلاط بتن در جدول ۶ ارائه شده است.

در نمونه‌های ساخته شده، الیاف بارچیپ با وجود عملکرد ضعیف‌تر در مقاومت الکتریکی و مقاومت در برابر انفجار، بیشترین هزینه را برای بتن داشته است. همچنین الیاف بارچیپ در کشور تولید نمی‌شود و نیاز به واردات آن است، که باعث افزایش هزینه‌ها می‌شود. پس از آن، بتن با الیاف فولادی با نسبت حجمی ۲٪، بیشترین هزینه را نسبت به سایر نمونه‌ها داشته است. نمونه‌ی بتن الیافی ماکروسنتتیک ۱/۵٪ حجم بتن، کمترین هزینه را داشته است، که با توجه به مقاومت الکتریکی بالا و همچنین عملکرد مطلوب آن در برابر بار انفجاری، استفاده از الیاف ماکروسنتتیک در پروژه‌ها مقرون به‌صرفه است. همچنین بتن هیبریدی با الیاف فولادی و ماکروسنتتیک به نسبت حجمی ۱٪ و نسبت ۱-۱ الیاف پس از نمونه‌ی اخیر، کمترین هزینه‌ی مازاد استفاده از الیاف را داشته است، که با توجه به عملکرد حد وسط در مقاومت الکتریکی و مقاومت در برابر انفجار، استفاده از الیاف فولادی و ماکروسنتتیک نسبت به الیاف بارچیپ با نسبت حجمی ۱/۵٪ علاوه بر هزینه‌ی کم به دلیل عملکرد ضعیف‌تر توصیه نمی‌شود؛ اما به دلیل عملکرد بالاتر مقاومت فشاری نمونه‌ی مذکور نسبت به بتن الیافی ماکروسنتتیک با نسبت حجمی ۱/۵٪ در پروژه‌هایی که عملکرد فشاری بتن مطرح است، استفاده از آن مقرون به‌صرفه است.

۵. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، بتن الیافی با نسبت‌های حجمی ۱٪ و ۲٪ الیاف فولادی، بارچیپ و ماکروسنتتیک و ترکیب هر یک از الیاف با الیاف فولادی با نسبت‌های حجمی مختلف، مقاومت الکتریکی نمونه‌ها و مقاومت در برابر انفجار نمونه‌های ساخته شده و نیز مقاومت فشاری و هزینه‌ی استفاده از الیاف بررسی شده است. نتایج نشان داد که:

- بتن با الیاف فولادی با نسبت حجمی ۱ و ۲ درصد، بیشترین مقدار مقاومت فشاری را از خود نشان داده و بتن با الیاف ماکروسنتتیک با نسبت حجمی ۱/۵٪، کمترین میزان مقاومت فشاری را داشته است. در بتن هیبریدی نیز بتن با الیاف ماکروسنتتیک و الیاف فولادی با نسبت ۲٪ حجم بتن و نسبت ماکروسنتتیک ۴۰٪ و الیاف فولادی ۶۰٪ بیشترین مقاومت فشاری را داشته است.
- بیشترین مقاومت الکتریکی در نمونه‌های ساخته شده مربوط به بتن الیافی با الیاف ماکروسنتتیک با نسبت حجمی ۲ و ۱/۵ درصد بوده است. همچنین بتن هیبریدی متشکل از الیاف ماکروسنتتیک و الیاف فولادی با نسبت حجمی ۱٪، بیشترین مقاومت الکتریکی را داشته است، که منجر به کاهش میزان نفوذپذیری بتن و در نتیجه عملکرد مطلوب در برابر نفوذ یون کلراید در مناطق ساحلی مانند خلیج فارس بوده است.
- مقاومت انفجاری بتن نیز با استفاده تخریب حاصل شده‌ی بتن الیافی تحت ماده‌ی منفجره‌ی C۴ با نسبت ۱/۱۴ برابر انرژی آزاد شده نسبت به TNT اندازه‌گیری شد. بتن الیافی با الیاف ماکروسنتتیک با نسبت ۲٪ حجمی بتن، بیشترین مقاومت را در برابر ماده‌ی منفجره و در بتن هیبریدی نیز بتن با الیاف فولادی و ماکروسنتتیک با نسبت حجمی ۲٪، بیشترین مقاومت را برابر انفجار از خود نشان دادند.
- افزایش میزان الیاف فولادی و ماکروسنتتیک بیش از ۱٪ حجم بتن و ترکیب

جدول ۶. مشخصات و هزینه‌ی مازاد استفاده از الیاف در طرح.

نوع مصالح	درصد استفاده	آدرس طرح	مقدار مصرف در ۱ مترمکعب (kg)	وزن مخصوص	انبار یا شرکت خریداری شده	تولید داخل دارد؟	هزینه‌ی مازاد برای ۱ متر مکعب بتن طرح ۳ (تومان)	توضیحات	تصویر
الیاف فولادی موج‌دار	٪۱ ٪۲	۳-۱ ۳-۲-۲	۷۸/۵ ۱۵۷	۷۸۵۰ Kg/m^3	شرکت میسون	بله	۷۰۶۵۰۰ ۱۴۱۳۰۰۰	الیاف فولادی از جنس فولاد سخت	
الیاف ماکروسنتتیک	٪۱/۵ ٪۲	۳-۳-۱ ۳-۳-۲	۱۳/۶۵ ۲۷/۳	۹۱۰ Kg/m^3	شرکت کیمیکس	بله	۴۷۷/۷۵۰ ۶۳۷/۰۰۰	الیاف سنتتیک پلاستیکی سخت	
فولادی ـ سنتتیک (۵۰-۵۰)	٪۱ ٪۲	۳-۴-۱ ۳-۴-۲	فولادی: ۳۹/۲۵ سنتتیک: ۴/۵۵ فولادی: ۷۸/۵ سنتتیک: ۹/۱		شرکت میسون و کیمیکس	بله	۵۱۲/۵۰۰ ۱/۰۲۵/۰۰۰		
فولادی ـ سنتتیک (۴۰-۶۰)	٪۱ ٪۲	۳-۵-۱ ۳-۵-۲	فولادی: ۴۷/۱ سنتتیک: ۳/۶۴ فولادی: ۹۴/۲ سنتتیک: ۷/۲۸		شرکت میسون و کیمیکس	بله	۵۵۱/۳۰۰ ۱/۱۰۲/۶۰۰		
الیاف بارچیپ	٪۲	۳-۶-۲	۱۸/۲	۹۱۰ Kg/m^3	ایران الیاف	خیر	۱/۹۶۵/۵۰۰	الیاف پایه‌ی پلی‌پروپلین	

دو الیاف اخیر در بتن هیبریدی باعث افزایش عملکرد بتن در برابر انفجار شده است. در صورتی که الیاف بارچیپ و الیاف با نسبت حجمی ۱٪ (الیاف فولادی و الیاف ماکروسنتتیک) مقاومت کمتری در مقابل بار انفجاری از خود نشان داده‌اند. کمترین میزان هزینه‌ی مازاد استفاده از الیاف در بتن مربوط به استفاده ۱/۵٪ حجم بتن از الیاف ماکروسنتتیک بوده است، که به دلیل هزینه‌ی کم الیاف ماکروسنتتیک) و مقاومت بالای آن در برابر مقاومت الکتریکی و مقاومت در برابر بار انفجاری استفاده از الیاف ماکروسنتتیک در بتن برای مقابله در برابر انفجار و جریان الکتریکی مقرون به‌صرفه بوده است.

پانوشت‌ها

1. Yao
2. Feldman
3. Deepa
4. Patil
5. Yoo & Banthia
6. Qiang

منابع (References)

1. Soe, K.T., Zhang, Y.X. and Zhang, L.C. "Material properties of a new hybrid fibre-reinforced engineered cementitious composite", *Construction and Building Materials*, **43**, pp. 399-407 (2013).
2. Halvaei, M., Jamshidi, M., Pakravan, H.R. and et al. "Interfacial bonding of fine aggregate concrete to low modulus fibers", *Construction and Building Materials*, **95**, pp. 117-123 (2015).
3. Halvaei, M., Jamshidi, M. and Latifi, M. "Investigation on pullout behavior of different polymeric fibers from fine aggregates concrete", *Journal of Industrial Textiles*, **45**(5), pp. 995-1008 (2016).
4. Yao, W., Li J. and Wu, K. "Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction", *J. Cement and Concrete Research*, **33**(1), pp. 27-30 (2003).
5. Feldman, D. and Zheng, Z. "Synthetic fibres for fibre concrete composites", *In High performance polymers and*

polymer matrix composites: symposium held April 13-16, 1993, San Francisco, California, U.S.A. / editors, Ronald K. Eby et al.' in Materials Research Society Symposia Proceedings v. 305, Materials Research Society, Sburgh, pp. 123-128 (1993).

6. Sorelli, L.G., Meda, A. and Plizzari, G.A. "Bending and uniaxial tensile tests on concrete reinforced with hybrid steel fibers", *Journal of Materials in Civil Engineering*, **17**(5), pp. 519-552 (2006).
7. Deepa, A.S. "Strength characteristics of hybrid fiber reinforced concrete", *IGRA ISSN*, **1**(5), pp. 2277-8160 (2012).
8. Sathe, A.P. and Patil, A.V. "Experimental investigation on polypropylene fiber reinforced concrete with artificial", *International Journal of Science and Researc (IJSR)*, ISSN, **6.14**, pp. 2319-7064 (2013).
9. Selina Ruby, G., Geethanjali, G., Varghese, C.J. and et al. "Influence of Hybrid Fiber on Reinforced Concrete", *International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering*, **03**, pp. 40-43 (2014).
10. Ranjbar, M.M., Ghasemzadeh Mosavinejad, S.H., Charkhtab, Sh. and et al. "Investigation of effect of steel fibers on fresh and hardened properties of self-compacting lightweight concrete with scoria", *Journal of Concrete Research*, **8**(1), pp. 41-54 (2015).
11. Saharkhizan, S. and Saeidijam, S. "Evaluation of mechanical properties of concrete containing a combination of steel and polupropylene fibers", *Journal of Concrete Research*, **8**(2), pp. 129-138 (2016).
12. Yusof, M.A., Mohamad Nor, N., Ismail, A. and et al. "Performance of hybrid steel fibers reinforced concrete subjected to air blast loading", *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013 (2013).
13. Gholhaki, M., Pachideh, Gh. and Rezayfar, O. "An experimental study on mechanical properties of concrete containing steel and polypropylene fibers at high temperatures", *Journal of Structural and Construction Engineering*, **4**(3), pp.167-179 (2017).
14. Yoo, D.-Y. and Banthia, N. "Mechanical and structural behaviors of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete subjected to impact and blast", *Construction and Building Materials*, **149**, pp. 416-431 (2017).
15. Pachideh, Gh. and Gholhaki, M. "An experimental study on the effects of adding steel and polypropylene fibers to concrete on its resistance after different temperatures", *Journal of Testing and Evaluation*, **47**(2), pp. 1606-1620 (2019).
16. Leone, M., Centonze, G., Colonna, D. and et al. "Fiber-reinforced concrete with low content of recycled steel fiber: Shear behaviour", *Construction and Building Materials*, **161**, pp. 141-155 (2018).
17. Pachideh, Gh., Gholhaki, M. and Moshtagh, A. "Performance of concrete containing recycled springs in post-fire conditions", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, **173**(1), pp. 3-16 (2020).
18. Nawaz, M., Dubey, S. and Bajpai, Y.K. "Performance evaluation on hybrid fiber reinforced concrete with various percentage of mineral admixture" (2019).
19. Pachideh, Gh., Gholhaki, M. and Moshtagh, A. "The effect of quantity and type of fibers and recycled metal springs on concrete properties", *Journal of Structural and Construction Engineering*, **6**(4), pp. 231-247 (2019).
20. Ren, G.M., Wu, H., Fang, Q. and et al. "Triaxial compressive behavior of UHPCC and applications in the projectile impact analyses", *Constr. Build. Mater.*, **113**, pp. 1-14 (2016).
21. Feng, J., Gao, X., Li, J. and et al. "Penetration resistance of hybrid-fiber-reinforced high-strength concrete under projectile multi-impact", *Construction and Building Materials*, **202**(3), pp. 341-352 (2019).
22. Tran, T.K., Tran, N.T. and Klm, D.J. "Enhancing impact resistance of hybrid ultra-high-performance fiber-reinforced concretes through strategic use of polyamide fibers", *Construction and Building Materials*, **271**, 121562 (2021).
23. Fu, Q., Xu, W., Li, D. and et al. "Dynamic compressive behaviour of hybrid basalt-polypropylene fibre-reinforced concrete under confining pressure: Experimental characterisation and strength criterion", *Cement and Concrete Composites*, **118**, 103954 (2021).
24. Saravanakumar, P., Sivakamidevi, M., Meena, K. and et al. "An experimental study on hybrid fiber reinforced concrete beams subjected to torsion", *Materials Today: Proceedings*, **45**(7), pp. 6818-6821 (2021).
25. Iranian National Building Code, Part 9th , "Design and Construction of concrete buildings", (2013-1392).
26. Han-Soo, K., Se-Hun, J. and Seung-Hak, Sh. "Column shortening analysis of tall buildings with lumped construction sequences", *Struct. Design Tall Spec. Build.*, **21**(10), pp. 764-776 (2012).
27. Nam, J., Kim, H. and Kim, G. "Experimental investigation on the blast resistance of fiber-reinforced cementitious composite panels subjected to contact explosions", *International Journal of Concrete Structures and Materials*, **11**, pp. 29-43 (2017).