

بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن‌های مسلح به الیاف پایه پلیمری براساس روش DBA

محمدحسین تقوی پارسا*^۱، مرتضی اسماعیلی^۲، محمدرضا عدل‌پرور^۳

۱- دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، دانشگاه قم، قم، ایران، mh.taghavi@stu.qom.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران، m_esmaeili@iust.ac.ir

۳- دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، دانشگاه قم، قم، ایران، adlparvar@qom.ac.ir

چکیده

امروزه استفاده از بتن‌های الیافی با توجه به نتایج پژوهش‌های تجربی در حوزه بتن و نیز بهبود ویژگی‌هایی نظیر شکل‌پذیری، کاهش میزان ترک‌ها و قابلیت حذف یا کاهش آرماتورها، نسبت به بتن‌های معمولی با افزایش چشم‌گیری همراه بوده است. هدف از این پژوهش بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن‌های مسلح به الیاف با پایه پلیمری براساس روش DBA است. در این مطالعه مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی نمونه‌های ۰٫۷، ۲۸ و ۹۰ روزه ساخته شده با الیاف پایه پلیمری، با بتن معمولی مقایسه شده است. در ضمن رابطه بین مقاومت فشاری و کششی با آیین‌نامه‌های مختلف بررسی شده است. برای ساخت نمونه‌های بتن الیافی از الیاف فورتافروفرو، بارچیپ و پلی‌پروپیلن به میزان ۰/۵ و ۱ درصد حجمی بتن استفاده شده است. در تهیه نمونه‌های بتنی از دو نوع طرح اختلاط به منظور دستیابی به بتن با مقاومت متوسط و بالا استفاده شده است. همچنین جهت بهینه‌سازی بتن‌های الیافی در سنین مختلف با در نظر گرفتن تاثیر هزینه الیاف، از روش آماری DBA استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده افزایش مقاومت فشاری دو نوع بتن الیافی با الیاف فورتافروفرو و بارچیپ و کاهش مقاومت در نمونه‌های با الیاف پلی‌پروپیلن است. با توجه به نتایج بررسی، افزایش مقاومت بتن موجب افزایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن الیافی پایه-پلیمری می‌شود. همچنین نتایج حاصل از آنالیز DBA نشان می‌دهد، در بتن‌های الیافی با مقاومت متوسط، طرح‌های حاوی ۰/۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن، ۰/۵ درصد الیاف فورتافروفرو و ۰/۵ درصد الیاف بارچیپ در سنین ۰٫۷، ۲۸ و ۹۰ روز به عنوان طرح‌های بهینه معرفی شده‌اند در حالیکه در بتن‌های الیافی با مقاومت بالا در تمامی سنین، طرح حاوی ۰/۵ درصد الیاف فورتافروفرو طرح بهینه است.

کلمات کلیدی

بتن الیافی؛ مقاومت فشاری؛ مقاومت کششی؛ مقاومت خمشی، الیاف پلیمری.

طبق تعریف کمیته ۵۴۴ انستیتو بتن آمریکا، بتن الیافی در واقع مخلوطی از سیمان، آب، سنگدانه و الیاف به صورت گسسته است. الیاف نباید طولی بیشتر از ۷۶ میلی متر و قطری بیشتر از ۱ میلی متر داشته باشند [۱]. در حال حاضر بیش از نیم قرن از استفاده بشر از بتن الیافی گذشته و طی این سالها محققین از انواع الیاف در تحقیقات خود استفاده کرده‌اند. در این میان الیاف پایه پلیمری بیشترین کاربرد را در صنعت داشته است. الیاف پلی‌پروپیلن، از هموپلیمرها^۱ که یک نوع پلیمر مورد استفاده در صنعت نساجی است، ساخته می‌شوند. ویژگی اصلی این نوع الیاف دوام مناسب در شرایط قلیایی سیلیسی و از معایب آن می‌توان به مقاومت ضعیف در برابر آتش سوزی، حساس بودن به نور و اکسیژن، مدول الاستیسیته پایین (۰/۵ تا ۸ گیگاپاسکال) و پیوستگی ضعیف با بتن اشاره کرد [۲]. الیاف بارچیب^۲ از جدیدترین نوع الیاف پایه پلیمری است که می‌تواند جایگزین الیاف فولادی باشد. سطح ظاهری این الیاف دارای برجستگی‌هایی است که باعث ایجاد درگیری مناسب با ملات بتن می‌شود. یکی از کاربردهای اخیر این نوع الیاف در سگمنت تونل بوده که به عنوان جایگزین الیاف فولادی در سگمنت پیش ساخته تونل مورد استفاده قرار گرفته است [۳].

الیاف فورتاferro^۳ متشکل از مواد ترکیبی ساخته شده از کوپلیمرها^۴ بصورت رشته‌های بسیار نازک پیچ‌خورده در هم و یک شبکه الیاف رشته‌ای است. این الیاف باعث کاهش جمع‌شدگی بتن تازه و سخت، افزایش ضربه‌پذیری و افزایش مقاومت در برابر خستگی و افزایش سختی بتن می‌شوند [۴].

کوبایاشی^۵ و همکاران به بررسی مقاومت بتن الیافی فولادی با بتن دارای الیاف پلی‌اتیلن پرداخت. نتایج تحقیق او نشان می‌دهد که مقاومت بتن تا اولین ترک در صورت استفاده از الیاف پلی‌اتیلن افزایش قابل توجهی نمی‌کند، در حالی که الیاف فولادی سختی بتن را افزایش می‌دهد. همچنین برخلاف الیاف فولادی، در صورت استفاده از الیاف پلی‌اتیلن با درصد حجمی ۳ یا بیش‌تر، بیش‌ترین حد مقاومت پس از اولین ترک، در ناحیه غیرخطی بدست می‌آید [۵].

با پیشرفت تکنولوژی استفاده از بتن با مقاومت بالا به مرور افزایش یافت. با افزایش مقاومت بتن، رفتار آن نیز تردتر می‌شود. استفاده از الیاف در بتن باعث افزایش مقاومت و شکل‌پذیری آن می‌شود [۶]. تاکنون تحقیقات بسیاری در این زمینه صورت گرفته است. نخستین بار در سال ۱۹۸۷ ونگ^۶ و همکاران مطالعاتی را در زمینه استفاده از الیاف سنتتیک انجام دادند. نتیجه تحقیقات آن‌ها نشان می‌داد؛ رفتار بتن با استفاده از این الیاف بهبود یافته و مقاومت فشاری، خمشی و کششی آن افزایش یافته است [۷]. در سال ۲۰۰۱ پانتازوپولو^۷ و همکاران با افزودن الیافی که مخلوطی از الیاف در مقیاس بزرگ و بسیار کوچک بود، مطالعات خود را روی بتن الیافی انجام دادند. تحقیقات آن‌ها نشان داد الیاف با سایز بسیار کوچک باعث افزایش سختی بتن در بیشینه مقاومت آن و الیاف با سایز بزرگ باعث افزایش طاقت بتن پس از رسیدن به مقاومت بیشینه آن است [۸]. در سال ۲۰۰۳ محمدی و همکاران با بررسی افزودن الیاف با طول‌های مختلف به بتن معمولی نشان دادند مقاومت بیشینه و طاقت بتن الیافی در این حالت نسبت به حالتی که در آن تنها از الیاف با ابعادی یکسان استفاده می‌شود بهبود می‌یابد [۹]. در سال ۲۰۰۷ کامینولی^۸ و همکاران موضوع جمع‌شدگی و طاقت بتن الیافی را بررسی کردند. آن‌ها طی تحقیقات خود با انجام تست خمش بر روی چندین دال ساخته شده از بتن الیافی به این نتیجه رسیدند که الیاف پایه‌پلیمری می‌توانند باعث کاهش جمع‌شدگی، افزایش مقاومت و افزایش سختی بتن الیافی شوند [۱۰]. در سال ۲۰۱۱ حسن و همکاران طی تحقیقاتشان بر روی نمونه‌های بتن الیافی با الیاف سنتتیک نشان دادند رفتار کششی و برشی بتن معمولی در مقایسه با بتن الیافی تردتر است. آن‌ها از سه درصد مختلف بتن الیافی استفاده کردند که نشان می‌داد افزایش درصد

¹ Homopolymer

² Barchip

³ Forta-Ferro

⁴ Copolymer

⁵ Kobayashi

⁶ Wang

⁷ Pantazopoulou

⁸ Cominoli

حجمی الیاف تا ۰/۵۱ درصد حجمی باعث بهبود بیش تر رفتار بتن الیافی می‌شود. [۱۱]. در سال ۲۰۱۳ رضانیان پور و همکاران مطالعه‌ای بر روی تاثیر الیاف پلی پروپیلن و الیاف فولادی بر روی بتن داشتند. تحقیقات آن‌ها نشان می‌داد الیاف پلی پروپیلن قابلیت پل زدن بر ریزترک‌ها را دارد ولی تاثیر چندانی بر مقاومت بتن پس از اولین ترک ندارد. همچنین جایگزینی بیش تر الیاف پلی پروپیلن نسبت به الیاف فولادی باعث کاهش مقاومت خمشی، جذب انرژی و مقاومت به ضربه می‌شود [۱۲]. در سال ۲۰۱۵ تحقیقات کامفورتی^۱ و همکاران در تحقیقاتشان که بر روی چند نمونه تیر بتنی انجام شده بود، نشان می‌داد استفاده از الیاف پایه پلیمری باعث افزایش مقاومت برشی بتن می‌شود [۱۳]. در سال ۲۰۱۷ لرج^۲ و همکاران طی تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که اگر زمان اختلاط بتن با الیاف سنتتیک و پایه پلیمری زیاد شود، باعث به وجود آمدن آسیب به الیاف و در نتیجه پایین آمدن سطح کیفیت بتن الیافی می‌شود [۱۴]. در سال ۲۰۱۸ ریکابی^۳ و همکاران طی تحقیقاتشان با استفاده از بتن الیافی کاهش میزان آرماتورها در لوله‌ها بتنی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند با توجه به افزایش مقاومت و شکل پذیری بتن الیافی نسبت به بتن معمولی، استفاده از بتن الیافی کاهش درصد آرماتورها و ضخامت لوله‌های بتنی را امکان پذیر می‌کند [۱۵].

در دهه اخیر، با گسترش دامنه تحقیقات، تمرکز مطالعات به سمت بررسی اثر نوع الیاف، درصد حجمی و اندرکنش ماتریس و الیاف سوق یافته است. پژوهش‌های انجام شده در این حوزه نشان می‌دهند که الیاف فولادی و پلیمری، به ویژه در قالب نمونه‌های الیافی ترکیبی، نقش بسزایی در افزایش مقاومت خمشی و کششی بتن ایفا می‌کنند. در همین راستا، در سال ۲۰۱۹ پژوهشی بر روی تأثیر الیاف فولادی و پلی پروپیلن در تراورس‌های بتنی، با انجام آزمایش‌های فشاری، کششی و خمشی بر روی ۱۲۰ نمونه صورت پذیرفت. نتایج نشان دادند که در حالی که مقاومت‌های فشاری و کششی در مخلوط‌های حاوی یک درصد الیاف فولادی به حداکثر می‌رسد، ترکیب ۰/۶ درصد الیاف فولادی با ۰/۴ درصد الیاف پلیمری منجر به افزایش ۳/۵ برابری مقاومت خمشی می‌شود؛ همچنین این ترکیب توانایی کاهش ۴۰ درصدی میلگردهای پیش تنیده و کنترل ترک‌های عمیق را داراست [۱۶].

در سال ۲۰۲۲ در مطالعه‌ای بر روی بتن سبک پلاستیکی، اثر الیاف فولادی، پلی پروپیلن و شیشه‌ای را بر مقاومت‌های پس از حرارت (تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد) ارزیابی شد. یافته‌ها حاکی از آن بود که الیاف فولادی نقش تعیین کننده‌ای در بهبود مقاومت (بیش از ۴۰ درصد در برخی موارد) دارند، در حالی که تأثیر الیاف پلی پروپیلن و شیشه‌ای بر عملکرد پس از حرارت به دلیل ویژگی‌های فیزیکی‌شان ناچیز بوده است [۱۷].

در سال‌های اخیر پاچیده و همکاران، با تمرکز بر جنبه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی، استفاده از فنرهای فولادی کربن پایین گالوانیزه را در بتن خودتراکم بررسی کردند. نتایج آزمایشگاهی آنان نشان داد که استفاده از فنرهایی با قطر ۱۲ میلی‌متر، مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی را به ترتیب ۲۹، ۵۲ و ۳۶ درصد افزایش می‌دهد [۱۸]. آنها همچنین عملکرد بتن حاوی فنرهای فولادی بازیافتی را در دماهای بین ۲۵ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد ارزیابی کردند. نتایج مقایسه‌ای آنان نشان داد که مقاومت فشاری بهینه در نمونه‌های حاوی فنر، ۲ تا ۳ برابر بیشتر از نمونه‌های حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن در دماهای مختلف است و استفاده از این الیاف در بتن، عرض ترک‌های ناشی از آزمایش کشش دونیم‌شدگی را تا سه برابر کاهش می‌دهد [۱۹].

مرور جامع پژوهش‌های منتشر شده در دهه اخیر نشان می‌دهد که اگرچه پیشرفت‌های قابل توجهی در زمینه شناخت رفتار بتن‌های الیافی حاصل شده است، اما بخش عمده مطالعات موجود بر یک ویژگی مکانیکی خاص، یک نوع الیاف مشخص یا یک سن معین از بتن تمرکز داشته‌اند [۲۰-۲۲]. در مقابل، تحلیل هم‌زمان چندین شاخص عملکردی نظیر مقاومت کششی، مقاومت خمشی و ملاحظات اقتصادی، به ویژه در قالب یک چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره، به ندرت در ادبیات موضوع گزارش شده است. همچنین تاکنون مقایسه‌های بسیاری بین اثر سائز الیاف و درصد حجمی انواع الیاف بر روی مقاومت بتن با مقاومت متوسط و بالا صورت پذیرفته است. اما مقایسه جامعی بین تاثیر انواع الیاف پایه پلیمری بر روی مقاومت مکانیکی بتن با مقاومت متوسط و بالا و بهینه‌سازی بتن‌های الیافی براساس روش آماری DBA صورت نگرفته است. در این پژوهش تأثیر افزودن الیاف پایه پلیمری بر روی مقاومت فشاری،

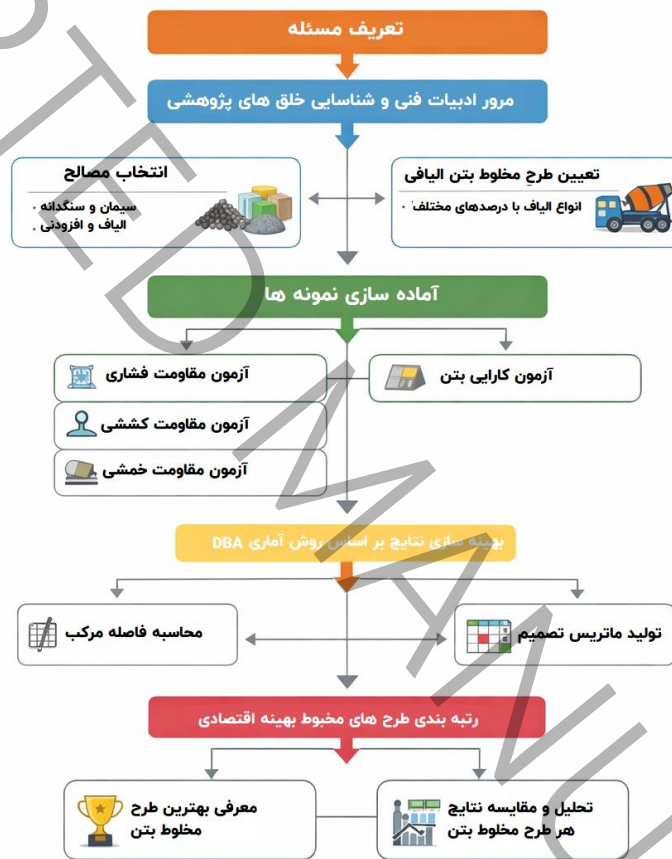
¹ Conforti

² Lerch

³ Rikabi

کششی و خمشی بتن‌های با مقاومت متوسط و بالا مورد بررسی قرار گرفته است. در انتها با استفاده از روش آماری DBA براساس هزینه تهیه الیاف به عنوان یک ویژگی بسیار مهم، بهینه‌ترین طرح الیافی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه برای بتن‌های با مقاومت متوسط و بالا معرفی شده است.

بر این اساس، نوآوری اصلی پژوهش حاضر در مقایسه با تحقیقات انجام شده در ۴ تا ۵ سال اخیر، ارائه یک رویکرد جامع ارزیابی چندمعیاره است که در آن اثر نوع و درصد الیاف بر رفتار مکانیکی بتن در سنین مختلف به صورت هم‌زمان بررسی شده و نتایج آزمایشگاهی با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره تحلیل می‌شوند. این رویکرد، خلأ موجود در ادبیات علمی، یعنی فقدان تحلیل یکپارچه عملکرد و هزینه در طرح‌های مختلف بتن الیافی، را به طور مستقیم پوشش می‌دهد. در شکل (۱) فلوجارتی مدون و هدفمند از روند انجام مقاله ترسیم شده است.



شکل ۱: فلوجارت روند انجام مقاله
Figure 1: Flowchart of the research procedure

۲- ساخت نمونه‌ها

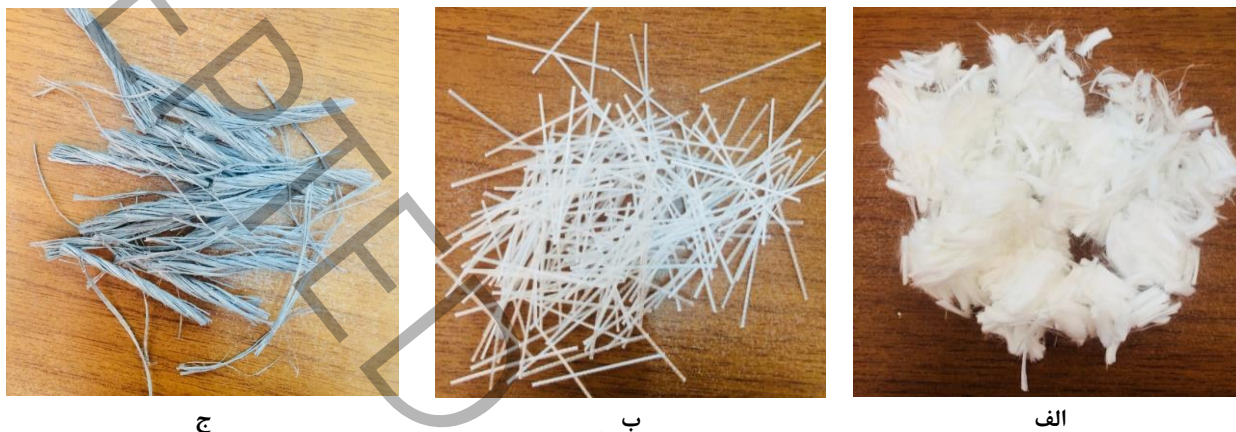
۲-۱- مصالح

مصالح مصرفی برای این پژوهش شامل سیمان پرتلند تیپ ۲ تهران-شمال، شن درشت دانه با حداکثر قطر سنگدانه ۲/۵۴ و ماسه با مدول نرمی ۵/۵۱ بوده و دانه بندی مناسب طبق راهنمای ملی طرح مخلوط بتن، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن انجام شد [۲۳]. مشخصات الیاف استفاده شده در این پژوهش در جدول ۱ بیان شده است. همچنین شکل ۲ الیاف مورد استفاده را نشان می‌دهد.

جدول ۱: مشخصات الیاف استفاده شده در پژوهش

Table 1: Properties of the fibers used in the study

ردیف	الیاف	وزن مخصوص (kg/m^3)	طول (mm)	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (MPa)
۱	پلی پروپیلن	۹۱۰	۱۲	۴۰۰	۲۷۰۰
۲	بارچیپ ۴۸	۹۱۰	۴۸	۶۴۰	۱۲۰۰۰
۳	فورتافرو	۹۱۰	۵۴	۶۶۰	۹۵۰۰



شکل ۲: الیاف مورد استفاده در طرح (الف) پلی پروپیلن، (ب) بارچیپ ۴۸، (ج) فورتافرو

Figure 2: Fibers employed in the study: (a) polypropylene, (b) BarChip 48, (c) Forta-Ferro

۲-۲- روش ساخت نمونه‌ها

روش ساخت نمونه‌های بتنی، با توجه به طرح‌های اختلاط (۱) و (۲) انجام گرفت. در طرح شماره ۲ در راستای بهبود طرح اولیه، عیار سیمان از ۳۸۰ کیلوگرم بر متر مکعب به ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب رسیده است. همچنین نسبت آب به سیمان در طرح شماره ۲ از ۰/۶۳ به ۰/۴۷ کاهش پیدا کرد. همچنین به منظور بهبود عملکرد الیاف و جلوگیری از تخلخل بیش از حد، سنگدانه‌های درشت‌تر از ۱۹ میلی‌متر (مانده روی الک ۳/۴) در طرح شماره ۲ حذف شدند. در این طرح برای افزایش روانی بتن نیز از فوق روان‌کننده بر پایه پلی‌کربوکسیلات بتن شیمی با نام تجاری NPC۱۰۲ به نسبت ۰/۶ درصد وزن سیمان استفاده شده است. مشخصات شیمیایی و فیزیکی محصول فوق روان‌کننده طبق اعلام تولید کننده در جدول شماره ۲ آمده است.

جدول ۲: مشخصات فیزیکی و شیمیایی ماده افزودنی

Table 2: Physical and chemical properties of the admixture

رنگ	حالت فیزیکی	PH	قابلیت انحلال	یون کلر	وزن مخصوص (gr/cm^3)
قهوه‌ای <td>مایع <td>۷~ <td>در آب <td>ندارد <td>۱/۰۵±۰/۰۵</td> </td></td></td></td>	مایع <td>۷~ <td>در آب <td>ندارد <td>۱/۰۵±۰/۰۵</td> </td></td></td>	۷~ <td>در آب <td>ندارد <td>۱/۰۵±۰/۰۵</td> </td></td>	در آب <td>ندارد <td>۱/۰۵±۰/۰۵</td> </td>	ندارد <td>۱/۰۵±۰/۰۵</td>	۱/۰۵±۰/۰۵

در این پژوهش برای الیاف بارچیپ ۴۸ ابتدا سنگدانه‌های خشک درشت و ریز با یکدیگر مخلوط شده سپس سیمان مورد نظر به مخلوط اضافه شد، تا سیمان به خوبی در همه جای مخلوط خشک پخش شود، سپس آب مورد نیاز اضافه شده و ۴ دقیقه اجازه اختلاط به بتن داده شد. پس از مخلوط شدن بتن، الیاف در مخلوط پخش گردید. سپس پخش الیاف با استفاده از میکسر به مدت ۳ دقیقه انجام گرفت تا الیاف به خوبی در مخلوط پخش شوند.

برای الیاف پلی پروپیلن و فورتافروفرو در ابتدا سنگدانه‌های درشت و ریز را با یکدیگر مخلوط کرده سپس الیاف اضافه گردید تا سنگدانه‌های درشت و ریز از گلوله شدن الیاف پلی پروپیلن جلوگیری کنند. همچنین برای الیاف فورتافروفرو که ظاهری رشته‌ای دارند، این مرحله را ۳ دقیقه ادامه داده، سپس سیمان را اضافه کرده و پس از آن آب مورد نیاز را افزوده و مدت ۴ دقیقه اجازه اختلاط داده شد. در شکل ۳ تصاویر نمونه‌های تهیه شده در داخل قالب بعد از عملیات ساخت و ویریه کردن نشان داده شده است.



شکل ۳: نمونه‌های ساخته شده (الف) نمونه مکعبی فشاری، (ب) نمونه استوانه‌ای کششی، (ج) نمونه تیر خمشی

Figure 3: Fabricated specimens: (a) cubic compressive, (b) cylindrical splitting tensile, (c) flexural beam

۲-۲- طرح‌های اختلاط

در ساخت نمونه‌های بتنی از دو نوع طرح اختلاط به منظور تهیه بتن‌های با مقاومت متوسط و بالا استفاده شده است. در طرح اختلاط شماره (۱) که هدف فراهم نمودن بتن با مقاومت متوسط است و بر مبنای طرح پیشنهادی کمیته ۵۴۴ انستیتو بتن آمریکا^۱ می‌باشد، از فوق روان‌کننده استفاده نشده است. در طرح اختلاط پیشنهادی شماره (۲)، ضمن استفاده از فوق روان‌کننده، عیار سیمان نیز افزایش یافته است تا بتن با مقاومت بالا تهیه شود. مقدار الیاف استفاده شده در تمام نمونه‌ها، ۰/۵ و ۱ درصد حجمی بتن می‌باشد. مشخصات طرح اختلاط (۱) و (۲) در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳: طرح اختلاط شماره (۱) و (۲)

Table 3: Properties of the fibers used in the study

شماره طرح اختلاط	سیمان (Kg/m ³)	آب (Kg/m ³)	ماسه (Kg/m ³)	شن (Kg/m ³)	فوق روان‌کننده
۱	۳۸۰	۲۴۰	۶۳۶	۱۰۷۹	ندارد
۲	۵۰۰	۲۳۴	۸۷۱	۷۱۸	۰/۶ درصد وزن سیمان

۳- آزمون‌ها

۳-۱- آزمون مقاومت فشاری

برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی، طبق استاندارد ASTM C39 [۲۴] و استاندارد ملی (به شماره ۱۶۰۸-۳) [۲۶] از نمونه‌های مکعبی ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی‌متری استفاده شد. مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه پس از عمل‌آوری در آب اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها طبق استاندارد ملی (به شماره ۱۶۰۸-۲) [۲۶] پس از ۲۴ ساعت از قالب‌ها خارج گردیده و در داخل گرمخانه در دمای ۲۰ درجه قرار داده شدند. پیش از انجام هر آزمایش مقاومت فشاری، نمونه‌ها از آب خارج و در حالت اشباع با سطح خشک آزمایش

¹ ACI 544 Committee

شدند. همچنین سرعت بارگذاری برای این نمونه‌ها مطابق با بازه پیشنهادی آیین‌نامه ASTM C39، ۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع در نظر گرفته شد.

۲-۳- آزمون مقاومت کششی

در این پژوهش آزمایش مقاومت کششی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد 20×10 سانتی‌متری پس از ساخت و عمل‌آوری و نگهداری به مدت ۷، ۲۸ و ۹۰ روز در آب، مطابق استاندارد ASTM-C496 [۲۷] و استاندارد ملی به شماره ۶۰۴۷ [۲۸] انجام شد. مقاومت کششی غیرمستقیم مطابق رابطه شماره ۱ بدست می‌آید.

$$f_t = \frac{2P}{\pi LD} \quad (1)$$

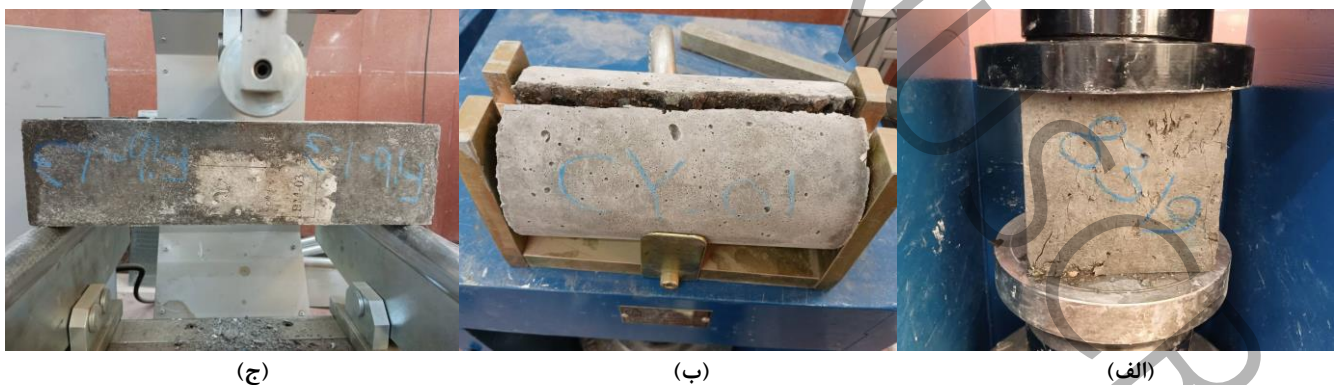
در رابطه فوق f_t مقاومت کششی غیرمستقیم بر حسب P_0 (MPa) حداکثر بار اعمالی بر حسب (N)، L طول نمونه استوانه‌ای بر حسب (mm) و D قطر نمونه استوانه‌ای بر حسب (mm) است.

۳-۳- آزمون مقاومت خمشی

به منظور تعیین مقاومت خمشی نمونه‌های منشوری با ابعاد $50 \times 10 \times 10$ در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰، از آزمایش خمش چهار نقطه‌ای مطابق با استاندارد BS1881:Part 118 [۲۹] استفاده شده است. مقاومت خمشی در این آیین‌نامه مطابق رابطه شماره ۲ بدست آمد.

$$f_r = \frac{PL}{bd^2} \quad (2)$$

در رابطه فوق f_r مقاومت خمشی بر حسب P_0 (MPa) حداکثر بار اعمالی بر حسب (N)، L فاصله تکیه‌گاه‌ها بر حسب (mm) و b و d به ترتیب عرض و ارتفاع نمونه بر حسب (mm) است. در شکل ۴ تصاویر نمونه‌های بتنی تحت آزمایش‌های فشاری، کششی و خمشی نشان داده شده است.



شکل ۴: نمونه‌ها تحت آزمون (الف) فشاری، (ب) کششی، (ج) خمشی
Figure 4: Specimens under testing: (a) compressive, (b) splitting tensile, (c) flexural

۴- نتایج آزمون‌ها

۴-۱- مقاومت فشاری

آزمون مقاومت فشاری برای بتن‌های با مقاومت متوسط بر روی نمونه‌های مکعبی انجام گرفت، سپس آزمون برای بتن‌های با مقاومت بالا با تغییر عیار سیمان و نیز افزودن فوق روان‌کننده تکرار شد. نتایج آزمون مقاومت فشاری نمونه‌ها برای طرح (۱) و (۲) به ترتیب در جداول شماره (۴) و (۵) ارائه شده است.

جدول ۴: نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های طرح ۱ (بر حسب مگاپاسکال)

Table 4: Compressive strength results of Mix Design 1 specimens (in MPa)

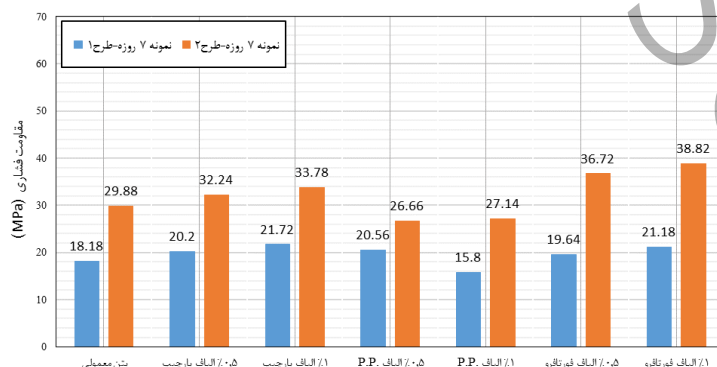
نوع نمونه	مقاومت فشاری ۷ روزه						مقاومت فشاری ۲۸ روزه						مقاومت فشاری ۹۰ روزه						
	۱#	۲#	۳#	۴#	۵#	Avg.	۱#	۲#	۳#	۴#	۵#	Avg.	۱#	۲#	۳#	۴#	۵#	Avg.	
بتن معمولی	۱۸/۴۰	۲۰	۱۷/۱	۱۶/۸	۱۸/۶	۱۸/۱۸	۲۵/۵۰	۳۳	۳۳/۱	۳۰/۵	۲۷/۳	۲۹/۸۸	۳۱/۰۰	۳۰/۴	۳۱/۲	۳۲/۹	۲۸/۳	۳۰/۷۶	
بارچیب	درصد -۰/۵	۱۹/۲۰	۲۰/۳	۲۲/۱	۱۸/۹	۲۰/۵	۲۳/۷۰	۲۹/۸	۳۲/۳	۳۲/۱	۳۳/۳	۳۲/۲۴	۳۳/۸۰	۲۹/۴	۳۱/۱	۳۰	۲۸/۱	۲۸/۴۸	
	درصد ۱	۲۲/۷۰	۲۲/۴	۲۰/۶	۲۱/۳	۲۱/۷	۲۱/۷۲	۲۴/۸۰	۲۳/۲	۲۳/۹	۳۵/۹	۳۱/۱	۳۳/۷۸	۲۲/۳۰	۳۱/۹	۳۰/۹	۳۱/۳	۲۸/۱	۳۰/۹
پلی پروپیلن	درصد -۰/۵	۲۲/۳۰	۲۱/۹	۱۷/۵	۱۹/۹	۲۱/۳	۲۰/۵۶	۲۶/۵۰	۲۱/۸	۲۸/۱	۲۸/۸	۲۸/۱	۲۶/۶۶	۲۵/۸۰	۲۷/۹	۳۱	۳۲/۷	۳۰/۲	۲۹/۵۲
	درصد ۱	۱۴/۷۰	۱۵/۸	۱۶/۵	۱۵/۹	۱۶/۱	۱۵/۸	۲۵/۸۰	۲۷/۷	۲۷/۹	۲۹/۱	۲۵/۲	۲۷/۱۴	۲۰/۲۰	۲۲/۰۰	۲۲/۲	۲۲/۸	۲۰/۵	۲۱/۵۴
فورتافرو	درصد -۰/۵	۲۱/۲۰	۱۹/۴	۱۸/۵	۱۸/۲	۲۰/۹	۱۹/۶۴	۳۸/۲۰	۳۴/۸	۳۵/۶	۳۶/۸	۳۸/۲	۳۶/۷۲	۲۴/۸۰	۲۸/۷	۲۶/۵	۲۶/۳	۳۰/۳	۲۷/۳۲
	درصد ۱	۲۲/۰۰	۲۲/۱	۲۱/۹	۱۸/۹	۲۱	۲۱/۱۸	۴۰/۲۰	۳۵/۱	۳۹/۲	۴۰/۹	۳۸/۷	۳۸/۸۲	۳۱/۸۰	۳۰/۴	۲۵/۸	۳۱/۵	۲۹/۲	۲۹/۷۴

جدول ۵: نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های طرح ۲ (بر حسب مگاپاسکال)

Table 5: Compressive strength results of Mix Design 2 specimens (in MPa)

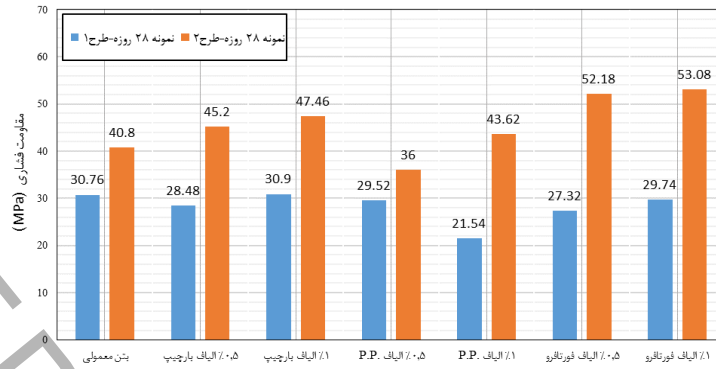
نوع نمونه	مقاومت فشاری ۷ روزه						مقاومت فشاری ۲۸ روزه						مقاومت فشاری ۹۰ روزه						
	۱#	۲#	۳#	۴#	۵#	Avg.	۱#	۲#	۳#	۴#	۵#	Avg.	۱#	۲#	۳#	۴#	۵#	Avg.	
بتن معمولی	۲۵/۵۰	۳۳	۳۳/۱	۳۰/۵	۲۷/۳	۲۹/۸۸	۴۱/۹۰	۴۲/۶	۳۵/۱	۲۹/۲	۳۵/۲	۴۰/۸	۴۵/۵۰	۴۸/۲	۳۵/۲	۴۴/۹	۲۹/۸	۴۴/۷۲	
بارچیب	درصد -۰/۵	۳۳/۷۰	۲۹/۸	۳۲/۳	۳۲/۱	۳۳/۳	۳۲/۲۴	۴۲/۰۰	۴۴/۲	۴۸/۴	۴۷/۳	۴۳/۱	۴۵/۲	۴۹/۶۰	۵۰/۱	۴۸/۸	۵۲/۱	۴۸/۰۰	۴۹/۷۲
	درصد ۱	۳۴/۸۰	۳۳/۲	۳۲/۹	۳۵/۹	۳۱/۱	۳۳/۷۸	۵۱/۰۰	۴۷/۲	۴۶/۲	۴۷/۵	۴۵/۲	۴۷/۴۶	۶۰/۷۰	۶۰/۲	۴۸/۹	۵۶/۷	۶۰/۳	۵۷/۳۶
پلی پروپیلن	درصد -۰/۵	۲۶/۵۰	۲۱/۸	۲۸/۱	۲۸/۸	۲۸/۱	۲۶/۶۶	۳۳/۸۰	۳۷/۳	۲۹/۱	۳۸/۲	۴۰/۶	۳۶/۰۰	۳۸/۹۰	۴۰/۵	۳۶/۹	۴۱/۷	۳۳/۱	۴۰/۲۲
	درصد ۱	۲۵/۸۰	۲۷/۷	۲۷/۹	۲۹/۱	۲۵/۲	۲۷/۱۴	۴۰/۵۰	۴۷/۰۰	۴۵/۱	۴۲/۳	۴۲/۲	۴۲/۶۲	۴۷/۵۰	۵۰/۳	۴۸/۹	۴۰/۱	۴۹/۰۰	۴۷/۱۶
فورتافرو	درصد -۰/۵	۳۸/۲۰	۳۴/۸	۳۵/۶	۳۶/۸	۳۸/۲	۳۶/۲۲	۵۵/۳۰	۴۸/۴	۵۲/۰۰	۵۱/۳	۵۲/۰۰	۵۲/۱۸	۶۰/۹۰	۶۰/۲	۵۷/۲	۶۰/۹	۶۱/۳	۶۰/۰۸
	درصد ۱	۴۰/۲۰	۳۵/۱	۳۹/۲	۴۰/۹	۳۸/۷	۳۸/۸۲	۵۴/۴۰	۵۱/۵	۴۸/۷	۵۵/۹	۵۲/۹	۵۲/۰۸	۶۲/۱۰	۵۹/۹	۵۸/۱	۶۲/۲	۵۹/۱	۶۰/۲۸

در اشکال (۵) تا (۷) به ترتیب مقایسه نتایج آزمون مقاومت فشاری طرح اختلاط شماره (۱) (بتن با مقاومت متوسط) و (۲) (بتن با مقاومت بالا) برای هر یک از الیاف در سنین مختلف نشان داده شده است.



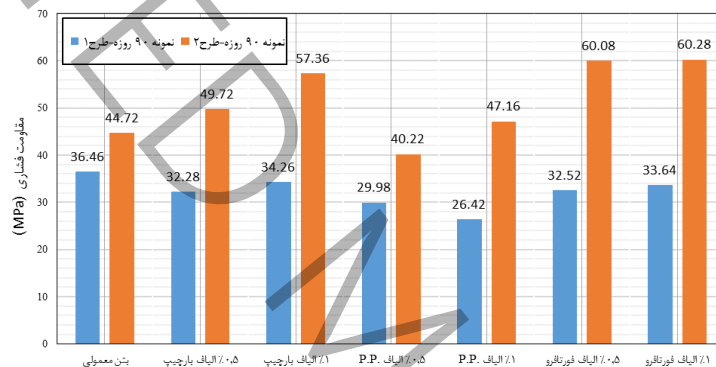
شکل ۵: نتایج آزمون مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه‌ها

Figure 5: 7-days compressive strength test results of the specimens



شکل ۶: نتایج آزمون مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها

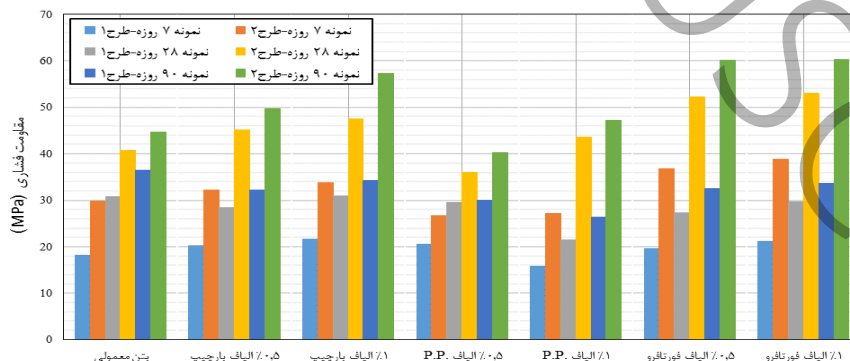
Figure 6: 28-days compressive strength test results of the specimens



شکل ۷: نتایج آزمون مقاومت فشاری ۹۰ روزه نمونه‌ها

Figure 7: 90-days compressive strength test results of the specimens

همانطور که از نمودارهای فوق مشاهده می‌گردد، با افزودن عیار سیمان و فوق روان‌کننده نتایج آزمون مقاومت فشاری برای کلیه الیاف بهبود یافت. در این میان الیاف فورتافرو بیش‌ترین میزان افزایش مقاومت فشاری را نسبت به بتن معمولی داشته است. همچنین افزودن ۰/۵ درصد حجمی بتن از الیاف پلی‌پروپیلن، جز در بتن‌های با مقاومت متوسط و در سن ۷ روز، مقاومت بتن را کاهش می‌دهد. در ادامه نتایج آزمون مقاومت فشاری کلیه نمونه‌ها در شکل شماره (۸) نشان داده شده است.



شکل ۸: نتایج آزمون مقاومت فشاری نمونه‌های طرح اختلاط ۱ و ۲

Figure 8: Compressive strength test results of Mix Design 1 and 2 specimens

نتایج مقاومت فشاری نشان می‌دهد که اثر افزودن الیاف به بتن به‌طور مستقیم به نوع طرح اختلاط و درصد حجمی الیاف وابسته است. در طرح اختلاط شماره (۱)، که برای دستیابی به بتن با مقاومت متوسط طراحی شده است، افزایش درصد حجمی الیاف در برخی موارد منجر به کاهش مقاومت فشاری شده است. این رفتار به‌ویژه در نمونه‌های حاوی ۱ درصد حجمی الیاف مشهود بوده و نشان می‌دهد که در این طرح اختلاط، افزایش مقدار الیاف می‌تواند منجر به اختلال در تراکم و یکنواختی مخلوط گردد. در مقابل، در طرح اختلاط شماره (۲)، که دارای عیار سیمان بالاتر و فوق‌روان‌کننده است، افزودن الیاف به‌ویژه الیاف فورتافرو موجب بهبود یا حفظ مقاومت فشاری شده است که بیانگر نقش تعیین‌کننده کیفیت خمیر سیمان در عملکرد بتن الیافی است.

۲-۴- مقاومت کششی

همانند آزمون مقاومت فشاری، آزمایش کشش غیرمستقیم برای طرح اختلاط شماره (۱) و (۲) انجام گرفت. نتایج این آزمون برای طرح (۱) و (۲) به ترتیب در جداول شماره (۶) و (۷) قابل مشاهده است. همچنین در اشکال (۹) تا (۱۱) مقایسه نتایج آزمون هر دو طرح در سنین مختلف برای هر یک از الیاف، نشان داده شده است.

جدول ۶: نتایج مقاومت کششی نمونه‌های طرح ۱ (برحسب مگاپاسکال)

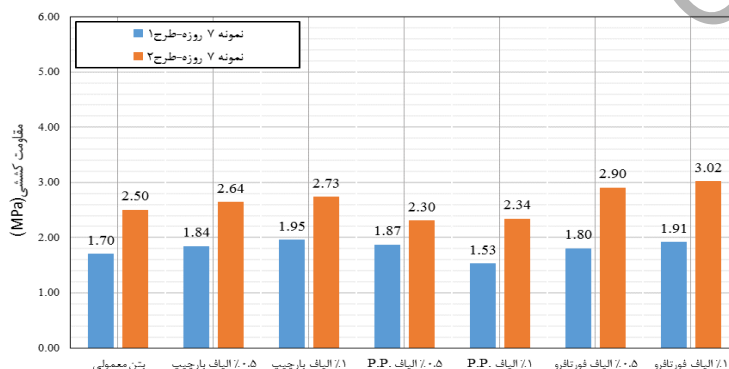
Table 6: Tensile strength results of Mix Design 1 specimens (in MPa)

نوع نمونه	مقاومت کششی ۷ روزه						مقاومت کششی ۲۸ روزه						مقاومت کششی ۹۰ روزه					
	۱#	۲#	۳#	۴#	۵#	Avg	۱#	۲#	۳#	۴#	۵#	Avg	۱#	۲#	۳#	۴#	۵#	Avg
بتن معمولی	۱/۷۱	۱/۸۳	۱/۶۲	۱/۶۰	۱/۷۳	۱/۷۰	۲/۵۷	۲/۵۳	۲/۵۸	۲/۶۸	۲/۴۲	۲/۵۵	۲/۷۳	۲/۸۹	۲/۹۵	۲/۸۷	۲/۹۶	۲/۸۸
بارچپ	درصد ۰/۵	۱/۷۷	۱/۸۵	۱/۹۸	۱/۷۵	۱/۸۶	۲/۱۰	۲/۴۸	۲/۵۷	۲/۵۱	۲/۴۰	۲/۴۱	۲/۹۳	۲/۰۷	۲/۶۰	۲/۸۹	۲/۶۵	۲/۶۳
	درصد ۱	۲/۰۲	۲/۰۰	۱/۸۷	۱/۹۱	۱/۹۵	۱/۹۵	۲/۶۵	۲/۶۲	۲/۵۶	۲/۴۰	۲/۵۶	۲/۹۳	۲/۷۰	۲/۶۰	۲/۸۹	۲/۶۵	۲/۷۵
پلی پروپیلن	درصد ۰/۵	۱/۹۹	۱/۹۶	۱/۶۵	۱/۸۲	۱/۹۱	۱/۸۷	۲/۲۴	۲/۳۹	۲/۵۷	۲/۶۶	۲/۵۲	۲/۴۸	۲/۱۳	۲/۲۵	۲/۶۹	۲/۶۸	۲/۷۲
	درصد ۱	۱/۴۵	۱/۵۳	۱/۵۸	۱/۵۴	۱/۵۵	۱/۵۳	۱/۸۴	۱/۹۷	۱/۹۸	۲/۰۳	۱/۸۶	۱/۹۳	۲/۳۹	۲/۴۲	۲/۰۵	۲/۲۷	۲/۲۸
فورتافرو	درصد ۰/۵	۱/۹۱	۱/۷۹	۱/۷۳	۱/۷۰	۱/۸۹	۱/۸۰	۲/۱۷	۲/۴۴	۲/۲۹	۲/۲۸	۲/۵۳	۲/۳۴	۲/۲۹	۲/۹۶	۲/۳۳	۲/۸۳	۲/۹۲
	درصد ۱	۱/۹۷	۱/۹۸	۱/۹۶	۱/۷۵	۱/۹۰	۱/۹۱	۲/۶۲	۲/۵۳	۲/۲۴	۲/۶	۲/۴۶	۲/۴۹	۲/۸۲	۲/۷۴	۲/۸	۲/۷۳	۲/۵۰

جدول ۷: نتایج مقاومت کششی نمونه‌های طرح ۲ (برحسب مگاپاسکال)

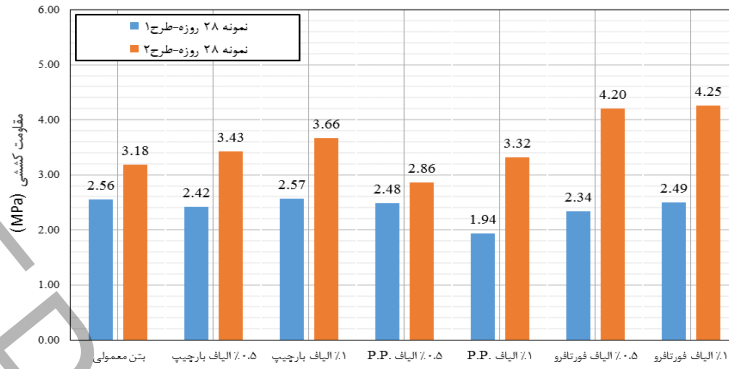
Table 7: Tensile strength results of Mix Design 2 specimens (in MPa)

نوع نمونه	مقاومت کششی ۷ روزه						مقاومت کششی ۲۸ روزه						مقاومت کششی ۹۰ روزه					
	۱#	۲#	۳#	۴#	۵#	Avg	۱#	۲#	۳#	۴#	۵#	Avg	۱#	۲#	۳#	۴#	۵#	Avg
بتن معمولی	۲/۲۲	۲/۶۸	۲/۶۹	۲/۵۴	۲/۳۵	۲/۴۹	۳/۲۱	۳/۰۵	۳/۳۵	۳/۰۴	۳/۲۵	۳/۱۸	۳/۴۵	۳/۶۴	۳/۸۱	۳/۴۰	۳/۷۴	۳/۴۱
بارچپ	درصد ۰/۵	۲/۷۳	۲/۵۰	۲/۶۴	۲/۶۳	۲/۷۰	۲/۶۴	۳/۳۴	۳/۵۵	۳/۶۱	۳/۴۹	۳/۳۲	۳/۴۲	۳/۷۳	۳/۷۶	۳/۶۸	۳/۸۷	۳/۶۲
	درصد ۱	۲/۷۹	۲/۶۹	۲/۷۳	۲/۸۵	۲/۵۷	۲/۷۳	۳/۶۷	۳/۸۶	۳/۳۳	۳/۴۱	۳/۴۵	۳/۶۶	۴/۳۰	۴/۲۸	۳/۶۹	۴/۱۳	۴/۲۸
پلی پروپیلن	درصد ۰/۵	۲/۲۹	۱/۹۵	۲/۴۰	۲/۴۴	۲/۴۰	۲/۹۶	۲/۶۷	۲/۹۴	۲/۷۸	۲/۸۹	۲/۸۵	۳/۰۲	۳/۲۱	۲/۹۰	۳/۱۸	۳/۲۷	۳/۱۲
	درصد ۱	۲/۲۴	۲/۳۷	۲/۳۹	۲/۴۶	۲/۲	۲/۳۳	۳/۴۱	۳/۳۸	۳/۳۰	۳/۲۹	۳/۲۱	۳/۳۲	۳/۵۹	۳/۷۷	۳/۶۹	۳/۰۹	۳/۶
فورتافرو	درصد ۰/۵	۲/۹۸	۲/۷۹	۲/۸۳	۲/۹۰	۲/۹۸	۲/۸۹	۴/۲۵	۴/۰۵	۴/۳۱	۴/۲۲	۴/۱۹	۴/۲۰	۴/۲۵	۴/۲۸	۴/۳۰	۴/۳۰	۴/۲۶
	درصد ۱	۳/۱۰	۲/۸۰	۳/۰۴	۳/۱۳	۳/۰۱	۳/۰۲	۴/۲۷	۴/۲۸	۴/۳۱	۴/۲۵	۴/۱۶	۴/۲۵	۴/۳۶	۴/۲۶	۴/۱۹	۴/۳۶	۴/۳۳



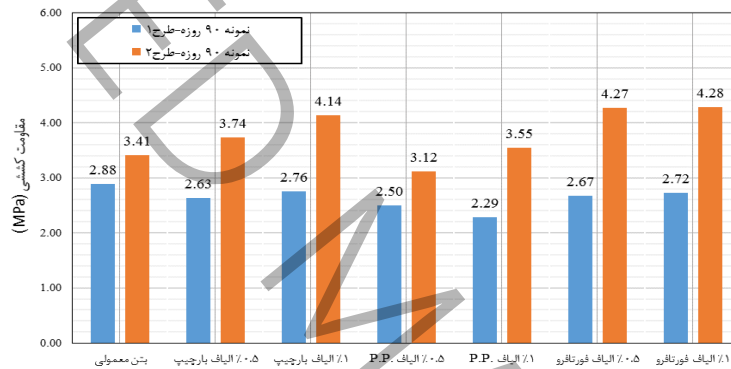
شکل ۹: نتایج آزمون مقاومت کششی ۷ روزه نمونه‌ها

Figure 9: 7-days tensile strength test results of the specimens



شکل ۱۰: نتایج آزمون مقاومت کششی ۲۸ روزه نمونه‌ها

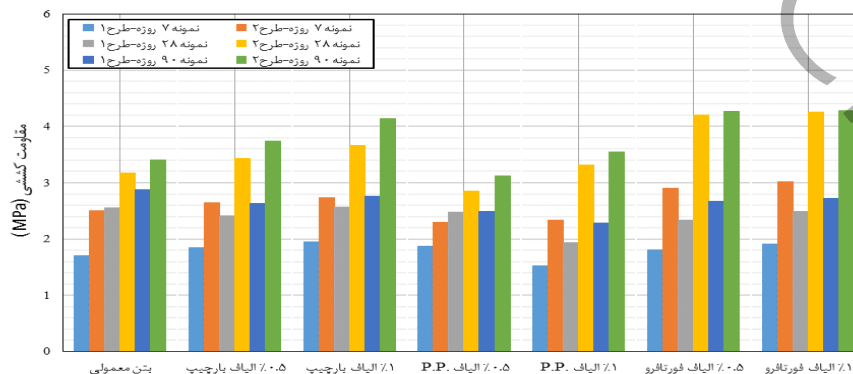
Figure 10: 28-days tensile strength test results of the specimens



شکل ۱۱: نتایج آزمون مقاومت کششی ۹۰ روزه نمونه‌ها

Figure 11: 90-days tensile strength test results of the specimens

همانطور که از جداول (۶) و (۷) و نیز نمودارهای شماره (۹) تا (۱۱) مشخص است، افزایش عیار سیمان و فوق روان کننده نتایج آزمون مقاومت کششی را برای کلیه الیاف بهبود می‌دهد. الیاف فورتافرو بیشترین میزان افزایش مقاومت کششی را نسبت به بتن معمولی داشته است. همچنین افزودن ۰/۵ درصد حجمی بتن، از الیاف پلی پروپیلن، جز در بتن‌های با مقاومت متوسط و در سن ۷ روز، مقاومت بتن را کاهش می‌دهد. در ادامه نتایج آزمون مقاومت کششی کلیه نمونه‌ها در شکل شماره (۱۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۲: نتایج آزمون مقاومت کششی نمونه‌های طرح اختلاط ۱ و ۲

Figure 12: Tensile strength test results of Mix Design 1 and 2 specimens

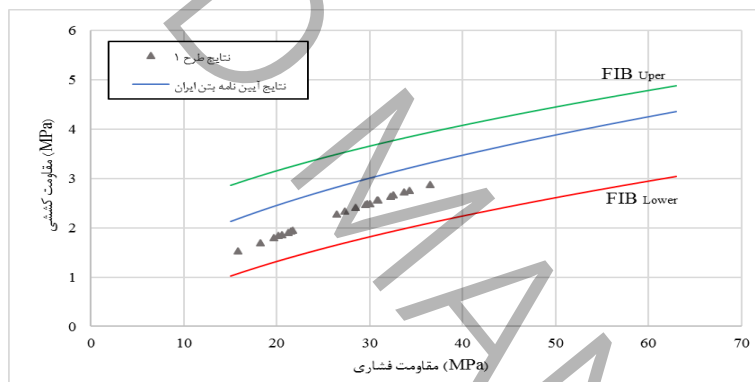
بررسی نتایج مقاومت کششی نشان می‌دهد که پاسخ بتن الیافی به افزایش درصد حجمی الیاف همواره یکنواخت نیست. در برخی نمونه‌ها، به‌ویژه در طرح اختلاط شماره (۱)، افزایش درصد الیاف به ۱ درصد حجمی با کاهش مقاومت کششی همراه بوده است. این موضوع بیانگر آن است که در صورت عدم تأمین شرایط مناسب اختلاط و پخش یکنواخت الیاف، افزایش مقدار الیاف لزوماً به بهبود عملکرد کششی منجر نمی‌شود. در مقابل، در طرح اختلاط شماره (۲)، رفتار کششی نمونه‌ها پایدارتر بوده و اثر منفی افزایش درصد الیاف کمتر مشاهده شده است.

۳-۴- رابطه مقاومت فشاری و کششی

در آیین‌نامه بتن ایران (آبا - ویرایش ۱۳۹۳) [۳۰] برای بتن‌های بدون الیاف، رابطه‌ای میان مقاومت کششی و فشاری از طریق معادله شماره (۱) تعریف می‌شود.

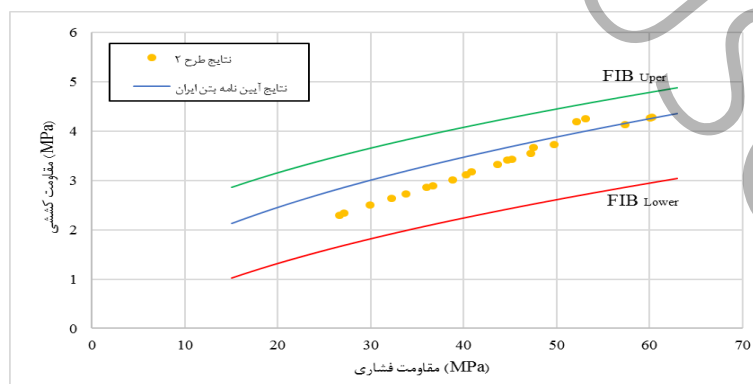
$$f_t = 0.23\sqrt{f_c^3} \quad (3)$$

در رابطه فوق f_t مقاومت کششی و f_c مقاومت فشاری بر حسب مگاپاسکال می‌باشند. در نمودار شکل ۱۳ و ۱۴ نتایج حاصل از آزمون‌های انجام شده بر روی نمونه‌ها، با رابطه ۱ و ۲ با محدوده بالا و پایین ارائه شده در آیین‌نامه FIB [۳۱] مقایسه گردیده است.



شکل ۱۳: نمودار مقاومت کششی بر حسب مقاومت فشاری طرح شماره (۱)

Figure 13: Tensile strength versus compressive strength for Mix Design No. 1



شکل ۱۴: نمودار مقاومت کششی بر حسب مقاومت فشاری طرح شماره (۲)

Figure 14: Tensile strength versus compressive strength for Mix Design No. 2

همانطور که در نمودارهای اشکال (۱۳) و (۱۴) مشاهده می‌گردد، نتایج مربوط به هر دو طرح در محدوده پیشنهاد شده توسط آئین‌نامه FIB قرار می‌گیرد. در این میان نمونه‌های بتنی با مقاومت بالا و مسلح به الیاف طرح (۲) در مقایسه با طرح (۱) با تقریب بهتری توسط رابطه ارائه شده در آئین‌نامه بتن ایران قابل پیش‌بینی هستند. با این حال قرار گرفتن نتایج هر دو طرح در محدوده ارائه شده و نزدیکی به رابطه آئین‌نامه بتن ایران صحت نتایج را تایید می‌کند.

۴-۴- مقاومت خمشی

آزمایش خمش چهار نقطه‌ای نیز همانند آزمایش مقاومت فشاری و کششی برای نمونه‌های بتنی با مقاومت متوسط و بالا انجام گرفت. نتایج این آزمون برای طرح (۱) و (۲) به ترتیب در جداول شماره (۸) و (۹) قابل مشاهده است. همچنین در اشکال (۱۵) تا (۱۷) مقایسه نتایج آزمون هر دو طرح در سنین مختلف برای هر یک از الیاف، نشان داده شده است.

جدول ۸: نتایج مقاومت خمشی نمونه‌های طرح ۱ (برحسب مگاپاسکال)

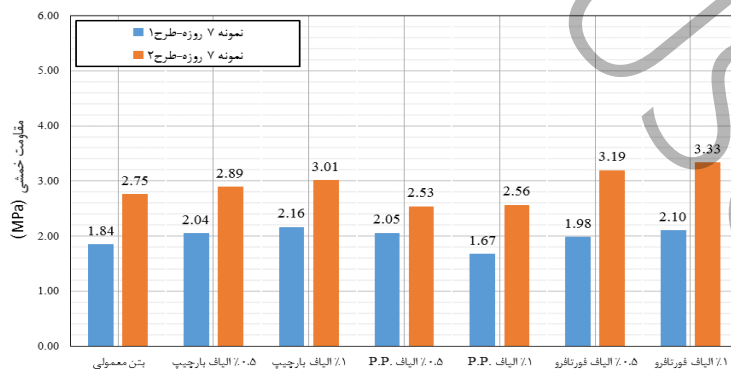
Table 8: Flexural strength results of Mix Design 1 specimens (in MPa)

نوع نمونه	مقاومت کششی ۷ روزه						مقاومت کششی ۲۸ روزه						مقاومت کششی ۹۰ روزه					
	۱#	۲#	۳#	۴#	۵#	Avg	۱#	۲#	۳#	۴#	۵#	Avg	۱#	۲#	۳#	۴#	۵#	Avg
بتن معمولی	۱/۸۷	۱/۹۸	۱/۷۸	۱/۷۴	۱/۸۴	۱/۸۴	۲/۸۳	۲/۷۸	۲/۸۴	۲/۹۳	۲/۶۴	۲/۸۰	۳/۰۰	۲/۱۸	۳/۲۰	۳/۱۵	۳/۲۳	۳/۱۵
بارچپ	۰/۵ درصد	۱/۹۵	۲/۰۴	۲/۲۰	۱/۹۵	۲/۰۵	۲/۲۹	۲/۷۰	۲/۸۱	۲/۷۴	۲/۶۳	۲/۶۳	۳/۲۲	۲/۲۸	۲/۸۶	۳/۱۰	۲/۹۲	۲/۸۸
	۱ درصد	۲/۲۴	۲/۲۰	۲/۰۷	۲/۱۱	۲/۱۶	۲/۹۲	۲/۸۸	۲/۸۲	۲/۸۷	۲/۶۶	۲/۸۳	۳/۲۲	۲/۹۷	۲/۸۶	۳/۱۲	۲/۹۰	۳/۰۱
پلی پروپیلن	۰/۵ درصد	۲/۱۹	۲/۱۶	۱/۸۲	۲/۰۰	۲/۱۰	۲/۴۶	۲/۶۳	۲/۸۳	۲/۹۳	۲/۸۰	۲/۷۳	۲/۴۲	۲/۴۸	۲/۹۶	۲/۹۷	۲/۹۹	۲/۷۶
	۱ درصد	۱/۶۰	۱/۶۸	۱/۷۲	۱/۶۷	۱/۶۹	۲/۰۲	۲/۱۷	۲/۱۸	۲/۲۳	۲/۰۲	۲/۱۲	۲/۶۳	۲/۶۶	۲/۲۶	۲/۵۰	۲/۵۲	۲/۵۱
فورتافرو	۰/۵ درصد	۲/۱۰	۱/۹۷	۱/۸۹	۱/۸۷	۲/۰۸	۲/۳۹	۲/۶۸	۲/۵۲	۲/۵۱	۲/۷۸	۲/۵۸	۲/۵۲	۲/۲۶	۲/۵۶	۳/۱۱	۳/۲۱	۲/۹۳
	۱ درصد	۲/۱۷	۲/۱۸	۲/۱۶	۱/۹۳	۲/۱۰	۲/۸۸	۲/۷۸	۲/۴۶	۲/۸۶	۲/۷۱	۲/۷۴	۳/۱۰	۳/۰۱	۳/۰۶	۳/۰۰	۲/۷۳	۲/۹۸

جدول ۹: نتایج مقاومت خمشی نمونه‌های طرح ۲ (برحسب مگاپاسکال)

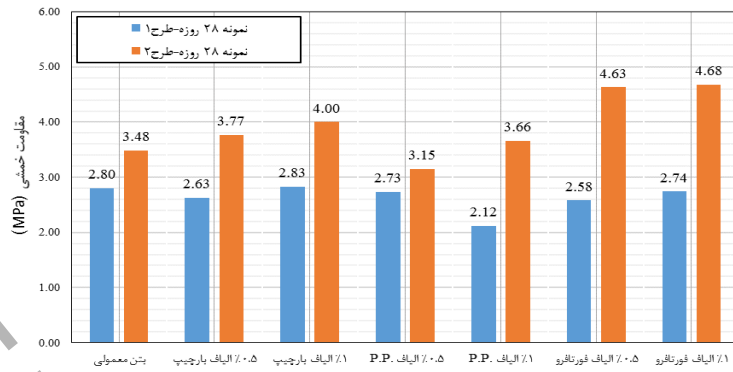
Table 9: Flexural strength results of Mix Design 2 specimens (in MPa)

نوع نمونه	مقاومت کششی ۷ روزه						مقاومت کششی ۲۸ روزه						مقاومت کششی ۹۰ روزه					
	۱#	۲#	۳#	۴#	۵#	Avg	۱#	۲#	۳#	۴#	۵#	Avg	۱#	۲#	۳#	۴#	۵#	Avg
بتن معمولی	۲/۴۴	۲/۹۵	۲/۹۶	۲/۷۹	۲/۵۹	۲/۷۵	۳/۴۸	۳/۳۶	۳/۶۳	۳/۳۴	۳/۵۸	۳/۴۸	۳/۸۰	۴/۰۰	۳/۰۹	۳/۷۴	۴/۱۱	۳/۷۵
بارچپ	۰/۵ درصد	۳/۰۰	۲/۷۵	۲/۸۸	۲/۸۶	۲/۹۷	۳/۶۷	۳/۹۱	۳/۹۷	۳/۸۴	۳/۶۵	۳/۷۷	۴/۱۰	۴/۱۴	۴/۰۵	۴/۳۶	۳/۹۸	۴/۱۱
	۱ درصد	۳/۰۷	۲/۹۷	۳/۰۰	۳/۱۴	۲/۸۵	۴/۰۴	۴/۱۱	۴/۲۲	۳/۸۰	۳/۷۵	۴/۰۰	۴/۷۳	۴/۷۱	۴/۰۶	۴/۴۹	۴/۶۶	۴/۵۳
پلی پروپیلن	۰/۵ درصد	۲/۵۲	۲/۱۵	۲/۶۴	۲/۶۸	۲/۵۳	۳/۲۶	۲/۹۸	۳/۲۳	۳/۱۱	۳/۱۸	۳/۱۵	۳/۲۲	۳/۵۳	۳/۳۱	۳/۵۰	۳/۶۰	۳/۴۵
	۱ درصد	۲/۴۶	۲/۶۱	۲/۶۳	۲/۶۸	۲/۵۶	۳/۷۵	۳/۷۲	۳/۶۳	۳/۶۲	۳/۵۶	۳/۶۶	۳/۹۸	۴/۱۵	۴/۰۶	۳/۴۶	۳/۹۶	۳/۹۲
فورتافرو	۰/۵ درصد	۳/۲۸	۳/۰۷	۳/۱۱	۳/۱۹	۳/۱۹	۴/۶۸	۴/۴۸	۴/۷۴	۴/۶۴	۴/۶۱	۴/۶۳	۴/۶۸	۴/۷۱	۴/۷۳	۴/۷۳	۴/۶۶	۴/۷۰
	۱ درصد	۳/۴۱	۳/۰۸	۳/۳۶	۳/۴۵	۳/۳۳	۴/۷۰	۴/۷۱	۴/۷۴	۴/۶۸	۴/۵۸	۴/۶۸	۴/۸۰	۴/۶۹	۴/۷۲	۴/۸۰	۴/۶۵	۴/۷۳



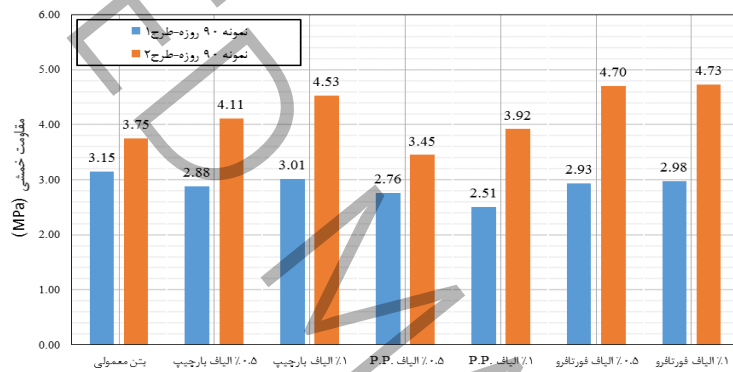
شکل ۱۵: نتایج آزمون مقاومت خمشی ۷ روزه نمونه‌ها

Figure 15: 7-days flexural strength test results of the specimens



شکل ۱۶: نتایج آزمون مقاومت خمشی ۲۸ روزه نمونه‌ها

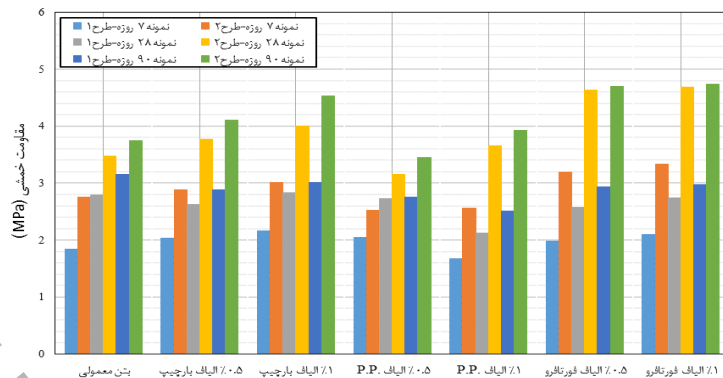
Figure 16: 28-days flexural strength test results of the specimens



شکل ۱۷: نتایج آزمون مقاومت خمشی ۹۰ روزه نمونه‌ها

Figure 17: 90-days flexural strength test results of the specimens

همانطور که از جداول (۸) و (۹) و نیز نمودارهای شماره (۱۵) تا (۱۷) مشخص است، افزایش مقاومت بتن نتایج آزمون مقاومت خمشی را برای کلیه الیاف بهبود می‌دهد. در حقیقت با افزایش مقاومت بتن، تاثیر وجود الیاف در افزایش مقاومت خمشی بیشتر خواهد بود. الیاف فورتافرو بیشترین میزان افزایش مقاومت خمشی را نسبت به بتن معمولی داشته است. همچنین افزودن ۰/۵ درصد حجمی بتن از الیاف پلی پروپیلن، جز در بتن‌های با مقاومت متوسط و در سن ۷ روز، مقاومت بتن را کاهش می‌دهد. در ادامه نتایج آزمون مقاومت خمشی کلیه نمونه‌ها در شکل شماره (۱۸) نشان داده شده است.



شکل ۱۸: نتایج آزمون مقاومت خمشی نمونه‌های طرح اختلاط ۱ و ۲

Figure 18: Flexural strength test results of Mix Design 1 and 2 specimens

نتایج آزمون مقاومت خمشی نشان می‌دهد که عملکرد خمشی بتن الیافی بیش از سایر خواص مکانیکی به نوع الیاف و درصد حجمی آن حساس است. کاهش مقاومت خمشی در برخی نمونه‌های حاوی ۱ درصد الیاف، به‌ویژه در طرح اختلاط شماره (۱)، حاکی از آن است که افزایش بیش‌ازحد الیاف می‌تواند موجب کاهش پیوستگی ماتریس بتن و ایجاد نواحی ضعیف در مقطع گردد. این رفتار در نمونه‌های طرح اختلاط شماره (۲) شدت کمتری داشته و نشان‌دهنده تأثیر مثبت طرح اختلاط غنی‌تر بر کنترل رفتار خمشی بتن الیافی است.

۴-۵- بهینه‌سازی نتایج با استفاده از روش آماری DBA

روش DBA^۱ یک روش آماری به منظور یافتن یک گزینه بهینه در میان تمام گزینه‌های موجود در یک فرآیند است. به منظور پیاده‌سازی روش DBA، در یک مطالعه آماری n گزینه‌ای و دارای m ویژگی، یک گزینه به عنوان بهینه انتخاب می‌شود. این گزینه‌ها و ویژگی‌های مورد مطالعه، تحت عنوان ماتریس معیار به صورت زیر قابل توصیف هستند [۳۲].

$$\begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1m} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{n1} & X_{n2} & \cdots & X_{nm} \end{bmatrix} \quad (۴)$$

بنابراین یک بردار در فضای m بعدی تشکیل می‌شود که n گزینه قابل بررسی را معرفی می‌نماید. این نکته باید اشاره شود که در هر یک از m ویژگی (خصوصیت) یک گزینه در بدترین وضعیت قرار دارد که برای تشکیل ماتریس معیار این خصوصیت برای آن گزینه صفر در نظر گرفته شده و مقدار عددی آن ویژگی برای سایر گزینه‌ها از قدر مطلق تفاضل بدترین وضعیت از مقدار ویژگی موجود در هر گزینه به دست می‌آید.

در مرحله بعد می‌بایست فاصله بین مقادیر یک خصوصیت در تمام گزینه‌ها با بیشترین مقدار آن خصوصیت (مقدار بهینه) به دست آید. این کار منجر به تشکیل ماتریس دیگری به صورت زیر خواهد شد:

$$\begin{bmatrix} Z_{op1} - Z_{11} & Z_{op2} - Z_{12} & \cdots & Z_{opm} - Z_{1m} \\ Z_{op1} - Z_{21} & Z_{op2} - Z_{22} & \cdots & Z_{opm} - Z_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{op1} - Z_{n1} & Z_{op2} - Z_{n2} & \cdots & Z_{opm} - Z_{nm} \end{bmatrix} \quad (۵)$$

^۱ Distance Based Approach

در ماتریس فوق Z_{opj} بیشترین مقادیر عددی Z_{ij} در هر خصوصیت می‌باشند. در نهایت فاصله مرکب (CD) برای هر گزینه تا وضعیت بهینه از رابطه ۶ محاسبه می‌شود [۳۳]:

$$CD_i = \left[\sum_{j=1}^m (Z_{opj} - Z_{ij})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

که در آن CD_i فاصله مرکب هر گزینه تا وضعیت بهینه با توجه به خصوصیات معرفی شده برای آن است. گزینه بهینه در میان n حالت دارای کمترین فاصله مرکب است.

در مقاله حاضر ۶ نوع بتن الیافی با مقاومت متوسط و ۶ نوع بتن الیافی با مقاومت بالا مطرح شده است. از آنجا که یکی از ویژگی‌های تعیین‌کننده در انتخاب نوع و مقدار الیاف در بتن‌های الیافی، هزینه مورد نیاز جهت تامین الیاف است، علاوه بر خصوصیات مکانیکی (مقاومت فشاری، کششی و خمشی)، هزینه تامین الیاف به عنوان یک ویژگی به سه ویژگی مذکور اضافه شده است. در حقیقت در این تحقیق سعی شده است تا با استفاده از روش DBA یک طرح الیافی در گروه بتن‌های با مقاومت متوسط و یک طرح الیافی در گروه بتن‌های با مقاومت بالا در سنین مختلف به عنوان طرح بهینه معرفی شوند. برای این منظور در ابتدا ضوابط و خصوصیت‌های تعیین شده در این تحقیق برای تمامی طرح‌های اختلاط تعیین می‌شوند. خواص مکانیکی شامل مقاومت فشاری، کششی و خمشی به همراه هزینه مصرفی (با فرض قیمت سال ۱۴۰۵ شمسی) جهت تهیه الیاف برای یک متر مکعب بتن به عنوان ویژگی‌های طرح‌های اختلاط در نظر گرفته شده‌اند. در جداول ۱۰ الی ۱۵ مقادیر معیار برای تمامی گروه‌ها ارائه شده است. لازم به ذکر است این مقادیر مستقیماً از نتایج آزمایشگاهی استخراج شده و رفتار مشاهده شده در بخش نتایج مکانیکی، مبنای اصلی امتیازدهی و رتبه‌بندی طرح‌ها در روش DBA را تشکیل می‌دهد. در جداول ۱۰ تا ۱۵ عدد صفر در ستون مقاومت‌ها نشان‌دهنده‌ی ضعیف‌ترین عملکرد مکانیکی در میان گزینه‌های همان گروه است و سایر اعداد، بیانگر مقدار مطلق فاصله (تفاضل) هر گزینه از این وضعیت بدترین بر حسب مگاپاسکال است و نه مقاومت مربوطه. همچنین عدد صفر در ستون هزینه، معرف گران‌ترین الیاف در گروه مربوطه است و سایر اعداد هزینه، مقدار مطلق فاصله ریالی هر گزینه از گران‌ترین حالت را نشان می‌دهند.

جدول ۱۰: مقادیر معیار برای بتن‌های الیافی با مقاومت متوسط در سن ۷ روز

Table 10: Criterion values for normal-strength fiber-reinforced concretes at 7 days

سن نمونه	نمونه	درصد الیاف	خواص مکانیکی (MPa)			هزینه الیاف مصرفی برای ۱ متر مکعب بتن (ریال)
			مقاومت خمشی	مقاومت کششی	مقاومت فشاری	
۷ روزه	بارچپ	۰/۵	۰/۳۷	۰/۳۱	۴/۴	۲,۷۰۰,۰۰۰
		۱	۰/۴۹	۰/۴۲	۵/۹۲	.
	پلی پروپیلن	۰/۵	۰/۳۸	۰/۳۴	۴/۷۶	۴,۰۵۰,۰۰۰
		۱	.	.	.	۲,۷۰۰,۰۰۰
فورتافرو	۰/۵	۰/۳۱	۰/۲۷	۳/۸۴	۲,۷۰۰,۰۰۰	
	۱	۰/۴۳	۰/۳۸	۵/۳۸	.	

جدول ۱۱: مقادیر معیار برای بتن‌های الیافی با مقاومت بالا در سن ۷ روز

Table 11: Criterion values for high-strength fiber-reinforced concretes at 7 days

سن نمونه	نمونه	درصد الیاف	خواص مکانیکی (MPa)			هزینه الیاف مصرفی برای ۱ متر مکعب بتن (ریال)
			مقاومت	مقاومت	مقاومت	

¹ Composite Distance

		فشاری	کششی	خمشی		
۷ روزه	بار چپ	۵/۵۸	۰/۳۴	۰/۳۶	۰/۵	۲,۷۰۰,۰۰۰
		۷/۱۲	۰/۴۳	۰/۴۸	۱	.
	پلی پروپیلن	.	.	.	۰/۵	۴,۰۵۰,۰۰۰
		۰/۴۸	۰/۰۳	۰/۰۳	۱	۲,۷۰۰,۰۰۰
فورتافرو	۱۰/۰۶	۰/۵۹	۰/۶۶	۰/۵	۲,۷۰۰,۰۰۰	
	۱۲/۱۶	۰/۷۲	۰/۱۸	۱	.	

جدول ۱۲: مقادیر معیار برای بتن‌های الیافی با مقاومت متوسط در سن ۲۸ روز

Table 12: Criterion values for normal-strength fiber-reinforced concretes at 28 days

سن نمونه	نمونه	درصد الیاف	خواص مکانیکی (MPa)			هزینه الیاف مصرفی برای ۱ متر مکعب بتن (ریال)
			مقاومت فشاری	مقاومت کششی	مقاومت خمشی	
۲۸ روزه	بار چپ	۰/۵	۵/۵۸	۰/۴۸	۰/۵۱	۲,۷۰۰,۰۰۰
		۱	۷/۱۲	۰/۶۳	۰/۷۱	.
	پلی پروپیلن	۰/۵	.	۰/۵۵	۰/۶۱	۴,۰۵۰,۰۰۰
		۱	۰/۴۸	.	.	۲,۷۰۰,۰۰۰
فورتافرو	۱۰/۰۶	۰/۴۱	۰/۴۶	۰/۵	۲,۷۰۰,۰۰۰	
	۱۲/۱۶	۰/۵۶	۰/۶۲	۱	.	

جدول ۱۳: مقادیر معیار برای بتن‌های الیافی با مقاومت بالا در سن ۲۸ روز

Table 13: Criterion values for high-strength fiber-reinforced concretes at 28 days

سن نمونه	نمونه	درصد الیاف	خواص مکانیکی (MPa)			هزینه الیاف مصرفی برای ۱ متر مکعب بتن (ریال)
			مقاومت فشاری	مقاومت کششی	مقاومت خمشی	
۲۸ روزه	بار چپ	۰/۵	۹/۲	۰/۵۷	۰/۶۲	۲,۷۰۰,۰۰۰
		۱	۱۱/۴۶	۰/۸۱	۰/۸۵	.
	پلی پروپیلن	۰/۵	.	.	.	۴,۰۵۰,۰۰۰
		۱	۷/۶۲	۰/۴۷	۰/۵۱	۲,۷۰۰,۰۰۰
فورتافرو	۱۶/۱۸	۱/۳۵	۱/۴۸	۰/۵	۲,۷۰۰,۰۰۰	
	۱۷/۰۸	۱/۴	۱/۵۳	۱	.	

جدول ۱۴: مقادیر معیار برای بتن‌های الیافی با مقاومت متوسط در سن ۹۰ روز

Table 14: Criterion values for normal-strength fiber-reinforced concretes at 90 days

سن نمونه	نمونه	درصد الیاف	خواص مکانیکی (MPa)			هزینه الیاف مصرفی برای ۱ متر مکعب بتن (ریال)
			مقاومت فشاری	مقاومت کششی	مقاومت خمشی	
۹۰ روزه	بار چپ	۰/۵	۶/۹۴	۰/۳۵	۰/۳۷	۲,۷۰۰,۰۰۰
		۱	۹/۳۶	۰/۴۷	۰/۵	.
	پلی پروپیلن	۰/۵	۷/۹۸	۰/۲۱	۰/۲۵	۴,۰۵۰,۰۰۰

	۰	۰	۰	۲,۷۰۰,۰۰۰
فورتافرو	۰/۵	۰/۴۲	۰/۳۸	۵/۷۸
	۱	۰/۴۷	۰/۴۴	۸/۲

جدول ۱۵: مقادیر معیار برای بتن‌های الیافی با مقاومت بالا در سن ۹۰ روز

Table 15: Criterion values for high-strength fiber-reinforced concretes at 90 days

سن نمونه	نمونه	درصد الیاف	خواص مکانیکی (MPa)			هزینه الیاف مصرفی برای ۱ متر مکعب بتن (ریال)
			مقاومت خمشی	مقاومت کششی	مقاومت فشاری	
۹۰ روزه	بارچیپ	۰/۵	۰/۶۶	۰/۶۱	۹/۵	۲,۷۰۰,۰۰۰
		۱	۱/۰۸	۱/۰۱	۱۷/۱۴	۰
	پلی پروپیلن	۰/۵	۰	۰	۰	۴,۰۵۰,۰۰۰
		۱	۰/۴۷	۰/۴۳	۶/۹۴	۲,۷۰۰,۰۰۰
	فورتافرو	۰/۵	۱/۲۵	۱/۱۵	۱۹/۸۶	۲,۷۰۰,۰۰۰
		۱	۱/۲۸	۱/۱۶	۲۰/۰۶	۰

در مرحله بعد شاخص عملکرد ترکیبی (اثر مقاومت‌های مکانیکی) و شاخص اقتصادی (نسبت هزینه به عملکرد) به ترتیب با استفاده از میانگین و انحراف معیار طبق روابط (۷) و (۸) در مورد هر ویژگی که در روابط (۲) تا (۴) مطرح شد، مقادیر استاندارد شده به دست می‌آید. در جداول ۱۶ تا ۲۱ این مقادیر ارائه شده است.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (7)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (8)$$

جدول ۱۶: مقادیر استاندارد شده برای بتن‌های الیافی با مقاومت متوسط در سن ۷ روز

Table 16: Standardized values for normal-strength fiber-reinforced concretes at 7 days

سن نمونه	نمونه	درصد الیاف	خواص مکانیکی (MPa)			مقدار استاندارد شده معیار هزینه الیاف در روش DBA
			مقاومت خمشی	مقاومت کششی	مقاومت فشاری	
۷ روزه	بارچیپ	۰/۵	۰/۲۵	۰/۱۵	۰/۱۸	۰/۴۵
		۱	۱/۰۱	۰/۹۵	۰/۹۷	-۱/۳۴
	پلی پروپیلن	۰/۵	۰/۳۲	۰/۳۶	۰/۳۷	۱/۳۴
		۱	-۲/۰۹	-۲/۱۲	-۲/۱	۰/۴۵
	فورتافرو	۰/۵	-۰/۱۳	-۰/۱۵	-۰/۱۱	۰/۴۵
		۱	۰/۶۴	۰/۶۶	۰/۶۹	-۱/۳۴

جدول ۱۷: مقادیر استاندارد شده برای بتن‌های الیافی با مقاومت بالا در سن ۷ روز
Table 17: Standardized values for high-strength fiber-reinforced concretes at 7 days

سن نمونه	نمونه	درصد الیاف	خواص مکانیکی (MPa)			مقدار استاندارد شده معیار هزینه الیاف در روش DBA
			مقاومت خمشی	مقاومت کششی	مقاومت فشاری	
۷ روزه	بار چپ	۰/۵	-۰/۱	-۰/۰۴	-۰/۰۷	۰/۴۵
		۱	۰/۳	۰/۳	۰/۰۲۷	-۱/۳۴
	پلی پروپیلن	۰/۵	-۱/۳۲	-۱/۳۲	-۱/۳۱	۱/۳۴
		۱	-۱/۲	-۱/۲	-۱/۲	۰/۴۵
	فور تافرو	۰/۵	۰/۹۱	۰/۹	۰/۹۲	۰/۴۵
		۱	۱/۳۸	۱/۳۹	۱/۳۹	-۱/۳۴

جدول ۱۸: مقادیر استاندارد شده برای بتن‌های الیافی با مقاومت متوسط در سن ۲۸ روز
Table 18: Standardized values for normal-strength fiber-reinforced concretes at 28 days

سن نمونه	نمونه	درصد الیاف	خواص مکانیکی (MPa)			مقدار استاندارد شده معیار هزینه الیاف در روش DBA
			مقاومت خمشی	مقاومت کششی	مقاومت فشاری	
۲۸ روزه	بار چپ	۰/۵	۰/۰۹	۰/۱۹	-۰/۰۷	۰/۴۵
		۱	۰/۹۶	۰/۹۱	۰/۲۷	-۱/۳۴
	پلی پروپیلن	۰/۵	۰/۵۱	۰/۵۳	-۱/۳۱	۱/۳۴
		۱	-۲/۱۲	-۲/۱۲	-۱/۲	۰/۴۵
	فور تافرو	۰/۵	-۰/۱۳	-۰/۱۴	۰/۹۲	۰/۴۵
		۱	۰/۵۶	۰/۵۸	۱/۳۹	-۱/۳۴

جدول ۱۹: مقادیر استاندارد شده برای بتن‌های الیافی با مقاومت بالا در سن ۲۸ روز
Table 19: Standardized values for high-strength fiber-reinforced concretes at 28 days

سن نمونه	نمونه	درصد الیاف	خواص مکانیکی (MPa)			مقدار استاندارد شده معیار هزینه الیاف در روش DBA
			مقاومت خمشی	مقاومت کششی	مقاومت فشاری	
۲۸ روزه	بار چپ	۰/۵	-۰/۳۹	-۰/۴۱	-۰/۱۹	۰/۴۵
		۱	۰/۰۴	۰/۰۸	۰/۲۲	-۱/۳۴
	پلی پروپیلن	۰/۵	-۱/۵۴	-۱/۵۶	-۱/۸۶	۱/۳۴
		۱	-۰/۵۹	-۰/۶۱	-۰/۴۸	۰/۴۵
	فور تافرو	۰/۵	۱/۲۱	۱/۱۸	۱/۰۷	۰/۴۵
		۱	۱/۲۹	۱/۲۸	۱/۲۴	-۱/۳۴

جدول ۲۰: مقادیر استاندارد شده برای بتن‌های الیافی با مقاومت متوسط در سن ۹۰ روز
Table 20: Standardized values for normal-strength fiber-reinforced concretes at 90 days

سن نمونه	نمونه	درصد الیاف	خواص مکانیکی (MPa)			مقدار استاندارد شده معیار هزینه الیاف در روش DBA
			مقاومت خمشی	مقاومت کششی	مقاومت فشاری	

۹۰ روزه	بارچپ	۰/۵	۰/۲۴	۰/۲۵	۰/۱۸	۰/۴۵
		۱	۱	۰/۹۹	۰/۹۷	-۱/۳۴
	پلی پروپیلن	۰/۵	-۰/۴۷	-۰/۶۲	۰/۵۲	۱/۳۴
		۱	-۱/۹۵	-۱/۹۳	-۲/۰۹	۰/۴۵
	فورتافرو	۰/۵	۰/۵۱	۰/۴۳	-۰/۲	۰/۴۵
		۱	۰/۸۲	۰/۸۱	۰/۵۹	-۱/۳۴

جدول ۲۱: مقادیر استاندارد شده برای بتن‌های الیافی با مقاومت بالا در سن ۹۰ روز

Table 21: Standardized values for high-strength fiber-reinforced concretes at 90 days

سن نمونه	نمونه	درصد الیاف	خواص مکانیکی (MPa)			مقدار استاندارد شده معیار هزینه الیاف در روش DBA
			مقاومت خمشی	مقاومت کششی	مقاومت فشاری	
۹۰ روزه	بارچپ	۰/۵	-۰/۲۸	-۰/۲۸	-۰/۳۷	۰/۴۵
		۱	۰/۶۳	۰/۶۶	۰/۶۶	-۱/۳۴
	پلی پروپیلن	۰/۵	-۱/۷۱	-۱/۷۲	-۱/۶۶	۱/۳۴
		۱	-۰/۶۹	-۰/۷۱	-۰/۷۲	۰/۴۵
	فورتافرو	۰/۵	۰/۹۹	۰/۹۹	۱/۰۳	۰/۴۵
		۱	۱/۰۶	۱/۰۱	۱/۰۶	-۱/۳۴

در نهایت فاصله مرکب برای کلیه طرح‌های اختلاط در سنین مختلف مطابق رابطه ۶ محاسبه می‌شود. نتایج روش DBA در جداول ۲۲ تا ۲۶ ارائه شده است.

جدول ۲۲: نتایج روش DBA برای بتن‌های الیافی با مقاومت متوسط در سن ۷ روز

Table 22: DBA method results for normal-strength fiber-reinforced concretes at 7 days

سن نمونه	نمونه	درصد الیاف	مجموع مجذور فاصله از معیار	فاصله مرکب از معیار	رتبه بندی نمونه‌ها	برترین نمونه
۷ روزه	بارچپ	۰/۵	۲/۶۴	۱/۶۲	۲	پلی پروپیلن ۰/۵ درصد
		۱	۷/۱۹	۲/۶۸	۴	
	پلی پروپیلن	۰/۵	۱/۱۹	۱/۰۹	۱	
		۱	۲۹/۲۲	۵/۴۱	۶	
	فورتافرو	۰/۵	۴/۴۵	۲/۱۱	۳	
		۱	۷/۴۹	۲/۷۴	۵	

جدول ۲۳: نتایج روش DBA برای بتن‌های الیافی با مقاومت بالا در سن ۷ روز

Table 23: DBA method results for high-strength fiber-reinforced concretes at 7 days

سن نمونه	نمونه	درصد الیاف	مجموع مجذور فاصله از معیار	فاصله مرکب از معیار	رتبه بندی نمونه‌ها	برترین نمونه
۷ روزه	بارچپ	۰/۵	۷/۱۶	۲/۶۸	۲	فورتافرو ۰/۵ درصد
		۱	۱۰/۷۹	۳/۲۹	۴	
	پلی پروپیلن	۰/۵	۲۱/۸۵	۴/۶۷	۶	
		۱	۲۰/۹	۴/۵۷	۵	
	فورتافرو	۰/۵	۱/۴۸	۱/۲۱	۱	
		۱	۷/۱۹	۲/۶۸	۳	

جدول ۲۴: نتایج روش DBA برای بتن‌های الیافی با مقاومت متوسط در سن ۲۸ روز

Table 24: DBA method results for normal-strength fiber-reinforced concretes at 28 days

سن نمونه	نمونه	درصد الیاف	مجموع مجذور فاصله از معیار	فاصله مرکب از معیار	رتبه بندی نمونه‌ها	برترین نمونه
۲۸ روزه	بارچپ	۰/۵	۴/۲۱	۲/۰۵	۲	فورتافرو ۰/۵ درصد
		۱	۸/۴۵	۲/۹۱	۵	
	پلی پروپیلن	۰/۵	۷/۶۲	۲/۷۶	۴	
		۱	۲۶/۱۳	۵/۱۱	۶	
	فورتافرو	۰/۵	۳/۳۲	۱/۸۲	۱	
		۱	۷/۴۶	۲/۷۳	۳	

جدول ۲۵: نتایج روش DBA برای بتن‌های الیافی با مقاومت بالا در سن ۲۸ روز

Table 25: DBA method results for high-strength fiber-reinforced concretes at 28 days

سن نمونه	نمونه	درصد الیاف	مجموع مجذور فاصله از معیار	فاصله مرکب از معیار	رتبه بندی نمونه‌ها	برترین نمونه
۲۸ روزه	بارچپ	۰/۵	۸/۵۱	۲/۹۲	۳	فورتافرو ۰/۵ درصد
		۱	۱۱/۳۴	۳/۳۵	۵	
	پلی پروپیلن	۰/۵	۲۵/۶۸	۵/۰۷	۶	
		۱	۱۰/۸۶	۳/۳	۴	
	فورتافرو	۰/۵	۰/۸۴	۰/۹۲	۱	
		۱	۷/۱۹	۲/۶۸	۲	

جدول ۲۶: نتایج روش DBA برای بتن‌های الیافی با مقاومت متوسط در سن ۹۰ روز

Table 26: DBA method results for normal-strength fiber-reinforced concretes at 90 days

سن نمونه	نمونه	درصد الیاف	مجموع مجذور فاصله از معیار	فاصله مرکب از معیار	رتبه بندی نمونه‌ها	برترین نمونه
۹۰ روزه	بارچپ	۰/۵	۲/۵۵	۱/۶	۱	بارچپ ۰/۵ درصد
		۱	۷/۱۹	۲/۶۸	۴	
	پلی پروپیلن	۰/۵	۴/۹۶	۲/۲۳	۳	
		۱	۲۷/۳۵	۵/۲۳	۶	
	فورتافرو	۰/۵	۲/۷۱	۱/۶۵	۲	
		۱	۷/۴	۲/۷۲	۵	

جدول ۲۷: نتایج روش DBA برای بتن‌های الیافی با مقاومت بالا در سن ۹۰ روز

Table 27: DBA method results for high-strength fiber-reinforced concretes at 90 days

سن نمونه	نمونه	درصد الیاف	مجموع مجذور فاصله از معیار	فاصله مرکب از معیار	رتبه بندی نمونه‌ها	برترین نمونه
۹۰ روزه	بارچپ	۰/۵	۶/۳۲	۲/۵۱	۲	فورتافرو ۰/۵ درصد
		۱	۷/۶۶	۲/۷۷	۴	
	پلی پروپیلن	۰/۵	۲۲/۵۳	۴/۷۵	۶	
		۱	۹/۹۸	۳/۱۶	۵	
	فورتافرو	۰/۵	۰/۸	۰/۹	۱	

مطابق روش DBA، در بتن‌های الیافی با مقاومت متوسط، طرح‌های حاوی ۰/۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن، ۰/۵ درصد الیاف فورتافرو و ۰/۵ درصد الیاف بارچیب به ترتیب در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز به عنوان طرح‌های بهینه معرفی شده‌اند. در حالیکه در بتن‌های الیافی با مقاومت بالا در تمامی سنین، طرح حاوی ۰/۵ درصد الیاف فورتافرو به عنوان طرح بهینه معرفی شده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن‌های مسلح به الیاف با پایه پلیمری براساس روش DBA مورد بررسی قرار گرفت. همچنین اثر مقاومت بتن بر روی بتن‌های الیافی بررسی و طی آن مقاومت فشاری، کششی و خمشی نمونه‌های ۰/۵، ۲۸ و ۹۰ روزه ساخته شده با الیاف فورتافرو، بارچیب و پلی‌پروپیلن به میزان ۰/۵ و ۱ درصد حجمی بتن، با بتن معمولی مقایسه گردید. از نتایج این تحقیق می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

- (۱) با توجه به نتایج بررسی، با افزایش مقاومت بتن به دلیل بهبود عملکرد بین خمیر سیمان و الیاف، افزایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن الیافی پایه پلیمری حاصل می‌شود.
- (۲) وجود الیاف در بتن با مقاومت متوسط تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری ندارد و در بعضی موارد کاهش مقاومت فشاری گزارش شد. به طوری که در طرح شماره (۱)، نمونه‌های ۹۰ روزه بتن معمولی بیشترین مقاومت را کسب کرد که این اتفاق به دلیل درشت بودن سنگدانه‌ها در طرح شماره (۱) است. با توجه به نتایج، تأثیر الیاف بر روی افزایش مقاومت فشاری بتن با مقاومت بالا، بسیار بیشتر از بتن با مقاومت متوسط است.
- (۳) همانطور که از نتایج به دست می‌آید، الیاف پلی‌پروپیلن در طرح اختلاط شماره (۱) مقاومت فشاری را تا ۱۵ درصد نسبت به بتن معمولی کاهش داده است. همچنین با افزودن نیم درصد حجمی از این الیاف به بتن در هر دو طرح اختلاط، مقاومت کششی به میزان ۱۲ درصد کاهش داشته است. دلیل این اتفاق آن است که این نوع الیاف چسبندگی خوبی با بتن ندارند.
- (۴) الیاف نیم درصد بارچیب در طرح شماره (۱) مقاومت اولیه را حدود ۱۰ درصد افزایش و مقاومت ۲۸ روزه و ۹۰ روزه را ۱۱ درصد کاهش داده است، ولی در طرح شماره (۲) این میزان الیاف، مقاومت ۹۰ روزه بتن را به میزان ۱۰ درصد افزایش داده است. همچنین افزودن یک درصد حجمی از این الیاف نیز همواره مقاومت ۹۰ روزه بتن را تا ۲۹ درصد افزایش داده است.
- (۵) در این پژوهش بیشترین مقاومت فشاری کسب شده با میانگین ۶۰ مگاپاسکال مربوط به الیاف فورتافرو با ۰/۵ و ۱ درصد حجمی می‌باشد. در مورد الیاف فورتافرو، افزودن هر میزان از این الیاف در طرح اختلاط شماره (۱) مقاومت اولیه را حدود ۲۰ درصد افزایش و در مقاومت ۲۸ روزه و ۹۰ روزه تأثیر چندانی نداشته است. اما افزودن یک درصد حجمی از این نوع الیاف همواره مقاومت بتن الیافی را در طرح شماره (۲) تا ۲۰ درصد افزایش داده است.
- (۶) مطابق روش DBA، در بتن‌های الیافی با مقاومت متوسط، طرح‌های حاوی ۰/۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن، ۰/۵ درصد الیاف فورتافرو و ۰/۵ درصد الیاف بارچیب به ترتیب در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز به عنوان طرح‌های بهینه معرفی شده‌اند. در حالیکه در بتن‌های الیافی با مقاومت بالا در تمامی سنین، طرح حاوی ۰/۵ درصد الیاف فورتافرو به عنوان طرح بهینه معرفی شده است.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

f_c مقاومت فشاری بتن، MPa

f_t مقاومت کششی بتن، MPa

- [1] ACI Committee 544, State-of-the-art report on fiber reinforced concrete (ACI 544.1R-96), American Concrete Institute, Detroit, 1996, pp. 2-3.
- [2] A. Bentur, S. Mindess, Fibre reinforced cementitious composites, CRC Press, 2014.
- [3] A.G. Nitschke, R. Winterberg, Performance of macro synthetic fiber reinforced tunnel linings, in: Proceedings of the 2016 World Tunneling Congress, 2016.
- [4] F. Hasan-Nattaj, M. Nematzadeh, 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 (2017) 557-572.
- [5] K. Kobayashi, R. Cho, Flexural behaviour of polyethylene fibre reinforced concrete, *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 3(1) (1981) 19-25.
- [6] P. Bhargava, U.K. Sharma, S.K. Kaushik, Compressive stress-strain behavior of small scale steel fibre reinforced high strength concrete cylinders, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 4(1) (2006) 109-121.
- [7] Y. Wang, S. Backer, V.C. Li, An experimental study of synthetic fibre reinforced cementitious composites, *Journal of Materials Science*, 22(12) (1987) 4281-4291.
- [8] S.J. Pantazopoulou, M. Zanganeh, Triaxial tests of fiber-reinforced concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 13(5) (2001) 340-348.
- [9] S.K. Kaushik, Y. Mohammadi, Investigation on mechanical properties of steel fibre reinforced concrete with mixed aspect ratio of fibres, *Journal of Ferrocement*, 33(1) (2003) 1-14.
- [10] L. Cominoli, C. Failla, G. Plizzari, Steel and synthetic fibres for enhancing concrete toughness and shrinkage behaviour, in: Proceedings of the International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Coventry, United Kingdom, 2007, pp. 11-13.
- [11] M.J. Hasan, M. Afroz, H.M.I. Mahmud, An experimental investigation on mechanical behavior of macro synthetic fiber reinforced concrete, *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 11(3) (2011) 18-23.
- [12] A.A. Ramezaniapour, P. Rashid Dadash, Polypropylene-steel fiber reinforced concrete, *Journal of AUT*, 44 (2013) 75-83. (In Persian)
- [13] A. Conforti, F. Minelli, A. Tinini, G.A. Plizzari, Influence of polypropylene fibre reinforcement and width-to-effective depth ratio in wide-shallow beams, *Engineering Structures*, 88 (2015) 12-21.
- [14] J.O. Lerch, H.L. Bester, A.S. Van Rooyen, R. Combrinck, W.I. de Villiers, W.P. Boshoff, The effect of mixing on the performance of macro synthetic fibre reinforced concrete, *Cement and Concrete Research*, 103 (2018) 130-139.
- [15] F.T. Al Rikabi, S.M. Sargand, J. Kurdziel, H.H. Hussein, Experimental investigation of thin-wall synthetic fiber-reinforced concrete pipes, *ACI Structural Journal*, 115(6) (2018) 1671-1681.
- [16] G. Pachideh, M. Gholhaki, Using steel and polypropylene fibres to improve the performance of concrete sleepers, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, 173(9) (2019) 690-702. <https://doi.org/10.1680/jstbu.18.00154>
- [17] M. Khalily, V. Saberi, H. Saberi, V. Mansouri, A. Sadeghi, G. Pachideh, An experimental study on the effect of high temperatures on performance of the plastic lightweight concrete containing steel, polypropylene and glass fibers, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(12) (2022) 284-307. (In Persian) doi: 10.22065/jsce.2021.254752.2277
- [18] G. Pachideh, H. Ketabdari, Investigation of the mechanical properties of self-compacting concrete containing recycled steel springs; experimental and numerical investigation, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 27(14) (2023) 4026-4045. <https://doi.org/10.1080/19648189.2023.2169355>
- [19] G. Pachideh, M. Gholhaki, A. Moshtagh, Performance of concrete containing recycled springs in post-fire conditions, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, 173(1) (2018) 3-16. <https://doi.org/10.1680/jstbu.18.00042>

- [20] S. Ahmad, P. Bhargava, U.K. Sharma, S.K. Kaushik, High-temperature performance of fiber reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, 157 (2017) 256-266.
- [21] A.A. El-Abbasy, Tensile, flexural, impact strength, and fracture properties of UHPFRC: A comprehensive review, *Construction and Building Materials*, 408 (2023) 133621.
- [22] M. Safiuddin, S.N. Raman, M.F.M. Zain, Mechanical properties of fiber reinforced concrete: A review, *Materials Today: Proceedings*, 68 (2022) 2066-2071.
- [23] Building and Housing Research Center (BHRC), The national method for concrete mix design, BHRC Publication No. S-479, 2008. (In Persian)
- [24] ASTM C39/C39M-12, Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- [25] INSO 1608-3, Hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens - Test method, 1st ed., Iranian National Standardization Organization, 2015. (In Persian)
- [26] INSO 1608-2, Hardened concrete - Part 2: Making and curing specimens for strength tests, 1st ed., Iranian National Standardization Organization, 2015. (In Persian)
- [27] ASTM C496/C496M-11, Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004.
- [28] INSO 6047, Concrete - Determination of the splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens - Test method, 1st rev., Iranian National Standardization Organization, 2016. (In Persian)
- [29] British Standards Institution, BS 1881-118: Testing concrete - Method for determination of flexural strength, BSI, London, 1983.
- [30] Permanent Committee for Revising the Iranian Concrete Code, Iranian concrete code (ABA), Vol. 1: Regulations, 3rd ed., Management and Planning Organization of Iran, 2014. (In Persian)
- [31] fib (Fédération Internationale du Béton), fib model code for concrete structures 2010, Ernst & Sohn, Berlin, 2013.
- [32] R. Kumar, R.K. Garg, Optimal selection of robots by using distance based approach method, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 26(5) (2010) 500-506.
- [33] A. Widiyanto, S. Kato, N. Maruyama, Optimizing selection of appropriate power generation systems in Indonesia by using distance based approach method, *Journal of Energy Resources Technology*, 126(1) (2004) 63-71.