

بررسی خواص مکانیکی بتن با عملکرد بسیار بالای مسلح شده به الیاف پلی پروپیلن و الیاف ماکروی مصنوعی (بارچپ)

هادی بهمنی *

دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی اصفهان

داود مستوفی نژاد

استاد دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده

استفاده از بتن با عملکرد فوق العاده بالای مسلح شده به الیاف در تحقیقات متعددی مورد بررسی قرار گرفته است. با این وجود اکثر تحقیقات معطوف به استفاده از الیاف فولادی به عنوان مسلح کننده بوده است. در این تحقیق به بررسی جایگزین کردن الیاف فولادی با الیاف پلی پروپیلن و الیاف ماکروی مصنوعی (بارچپ) در پارامترهای مشخصات مکانیکی این بتن پرداخته شده است. همچنین استفاده ی همزمان از دو الیاف ذکر شده به صورت هیبرید، و نیز به صورت هیبرید با الیاف فولادی مورد بررسی قرار گرفت. میزان کلی الیاف در هر یک از طرح های اختلاط ۱/۵ درصد حجمی بتن در نظر گرفته شده است. تعداد ۲۸ نمونه ی مکعبی ۷۰x۷۰x۷۰ میلی متری و ۱۴ نمونه ی استوانه ای ۲۰۰x۱۰۰ میلی متری برای آزمایش مقاومت فشاری و ۲۸ نمونه ی منشوری به ابعاد ۷۰x۷۰x۳۵۰ میلی متری برای آزمایش مقاومت خمشی ساخته شد. آزمایش های مقاومت فشاری و خمشی در سن ۷ و ۲۸ روز اندازه گرفته شده است. مشخص شد که مقاومت فشاری نمونه های ساخته شده در سن ۲۸ روز در تمامی سطوح الیاف مورد استفاده بیش از ۱۰۰ مگا پاسکال بود. تمامی نمونه های مسلح شده به انواع الیاف مقاومت خمشی بیش از ۸ مگا پاسکال تامین کرد، بیشترین تنش گسیختگی مربوط به نمونه های مسلح شده به الیاف فولادی در سن ۲۸ روز به میزان ۲۳/۹ مگا پاسکال بود.

واژه های کلیدی: الیاف فولادی، الیاف پلی پروپیلن، الیاف ماکروی مصنوعی (بارچپ)، مشخصات مکانیکی.

* نویسنده مسئول: hadibahmani110@gmail.com

۱- مقدمه

نهایت منجر به افزایش مقاومت بتن در مقایسه با بتن معمولی می-گردد. الیاف موجود در این ماتریس نقش اتصال در تراز میکرو را فراهم کرده و کنترل ترک‌ها را در بتن به شدت بالا می‌برد. الیاف نقش مسلح کننده‌ی بتن را در سطح ماکرو شبیه میلگردهای بتن مسلح معمولی ایفا می‌کند [۶-۸].

اولین استفاده از این بتن در ساخت و سازهای کشور کانادا بود [۹]. بعد از آن در کشور آلمان برای ساخت پل‌های پیش تنیده مورد استفاده قرار گرفت [۱۰]. هم‌چنین از آن در نیوزیلند نیز برای ساخت این نوع از پل‌ها استفاده شده است [۱۱]. در سال‌های اخیر از آن برای تقویت المان‌های سازه‌ای در برابر بار زلزله و بار انفجار هم استفاده شده است [۱۴-۱۲].

استفاده از الیاف مصنوعی باعث کاهش قیمت نسبت به الیاف فولادی می‌شود؛ الیاف پلی پروپیلن یکی از انواع الیاف مصنوعی است که به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله مشخصاتی که الیاف پلی پروپیلن باعث بهبود آن می‌شود عبارتند از: شکل پذیری، طاقت و مقاومت ضربه‌ای بتن. که باعث شده است در بتن ریزی دال‌ها و سیستم‌های کف و کانال‌ها و مخازن از آن استفاده شود [۱۵].

سفیر عباس و همکاران در سال ۲۰۱۵ اثر الیاف فولادی را بر مقاومت فشاری مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق از الیاف به طول‌های مختلف استفاده شده است. در طرح اختلاط استفاده شده نسبت آب به سیمان برابر ۰/۲۳، نسبت میکرو سیلیس به سیمان برابر ۰/۲، نسبت ماسه‌ی سیلیسی به سیمان برابر ۱/۲ و نسبت پودر کوآرتز به سیمان برابر ۰/۳ در نظر گرفته شده است [۱۶]. در این مطالعه از نمونه‌های استوانه‌ای برای آزمایش مقاومت فشاری استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد تأثیر الیاف در مقاومت فشاری اندک می‌باشد. اثر طول الیاف بر مقاومت فشاری بی تأثیر است و هم‌چنین مشاهده شد که الیاف بر بهبود الگوی شکست موثر است. بتن با عملکرد بسیار بالا به علت مقاومت فشاری بالا بسیار ترد می‌باشد؛ به همین دلیل استفاده از الیاف می‌تواند در انعطاف پذیر کردن این بتن موثر باشد.

کیم و همکاران در سال ۲۰۱۱ اثر الیاف فولادی مختلف را بر بتن با عملکرد بسیار بالا مورد بررسی قرار دادند. الیاف مورد استفاده در این تحقیق عبارتند از: الیاف ماکروی بلند صاف، ۲ نوع الیاف ماکروی قلاب دار، الیاف ماکروی تاییده و الیاف میکرو. نسبت

گسترش پوزولان‌ها (تولید میکروسیلیس و خاکستر بادی) و مواد افزودنی شیمیایی (کاهنده قوی آب) باعث معرفی چندین نوع بتن جدید با مشخصات ایده آل شد. از جمله مواردی که منجر به تحقیقات میدانی گسترده‌ای راجع به آن‌ها شده است می‌توان از بتن مقاومت بالا و بتن مسلح شده به الیاف نام برد. این تحقیقات منجر به تکنولوژی پیشرفته از انواع بتن شد و نوع جدیدی از بتن با عملکرد بسیار بالا را تولید کرد [۳-۱]. در تحقیقات بعدی به این مسئله توجه شد که اگرچه مقاومت بالای این نوع بتن یک مزیت مناسب این بتن است، اما با افزایش مقاومت در بتن مواجه با رفتار تردتر بتن شدند. به منظور بهبود رفتار شکل پذیری این بتن یک استراتژی مناسب توسط محققان کشف شد و آن استفاده از الیاف که نقش مسلح کننده بتن را داشت بود [۴].

به طور معمول، بتنی را به عنوان بتن با عملکرد بسیار بالا می‌دانند که علاوه بر داشتن مقاومت فشاری بالا بیش از ۱۰۰ مگا پاسکال، مقاومت خمشی بیش از ۸ مگا پاسکال و مقاومت کششی ۶-۱۰ مگا پاسکال و از دوام و پایداری قابل توجهی در مقایسه با سایر بتن‌ها برخوردار باشد [۵].

در مقایسه با سایر مصالح با پایه‌ی سیمان معمولی، مشخصات ساختاری بتن با عملکرد بسیار بالا مانند یکنواختی اندازه ذرات، تخلخل و ساختارهای میکروسکوپی بهبود یافته است. این نوع بتن به دلیل تخلخل و موینگی کم، تقریباً غیر قابل نفوذ است و همین امر باعث شده است تا بسیاری از ضعف‌های بتن معمولی مانند ضعف در برابر سیکل‌های یخبندان، خوردگی آرماتور و حمله‌ی یون‌های کلر در این بتن اصلاح شود [۶]. محققان با کمک گرفتن از الیاف فولادی توانستند به شکل پذیری مناسبی در بتن با عملکرد فوق العاده بالا برسند و جذب انرژی آن را بعد از ترک خوردن به طور قابل توجهی افزایش دهند.

بتن با عملکرد بسیار بالای مسلح شده به الیاف فلزی که از پیشرفته‌ترین مصالح مرکب سازه‌ای متشکل از ماتریس‌های پر مقاومت پایه‌ی سیمانی و الیاف فلزی محسوب می‌شود، دارای پایداری و مقاومت کششی بالاتر از دیگر مواد پایه سیمانی می‌باشد. از بارزترین مشخصه‌های این بتن میزان بسیار کم سنگ دانه‌ها، استفاده از الیاف و نسبت آب به سیمان محدود می‌باشد. استفاده از ریز دانه‌ها باعث به وجود آمدن یک ماتریس منسجم شده که در

۲- طرح آزمایشات

۲-۱- کلیات

در این تحقیق برای بررسی تاثیر الیاف مصنوعی و الیاف هیبریدی و مقایسه‌ی رفتار آن‌ها نسبت به الیاف فولادی در بتن با عملکرد بسیار بالای مسلح شده به الیاف ۷ سطح الیاف (بدون الیاف، الیاف پلی پروپیلن، الیاف بارچپ، الیاف فولادی، الیاف فولادی-بارچپ، الیاف پلی پروپیلن-الیاف بارچپ و الیاف فولادی-پلی پروپیلن) مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به انجام ۲ تکرار برای هر سطح، برای آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی در دو سن ۷ و ۲۸ روز به تعداد ۲۸ عدد ساخته شد. هم‌چنین در سن ۲۸ روز تعداد ۱۴ نمونه‌ی استوانه‌ای 100×200 میلی متری ساخته شد. برای آزمایش مقاومت خمشی با توجه به انجام آزمایش در دو سن ۷ و ۲۸ روز تعداد ۲۸ عدد نمونه‌ی $70 \times 70 \times 350$ میلی متری ساخته شد.

۲-۲- مصالح

سیمان مورد استفاده در این تحقیق سیمان تیپ ۴۲۵-۱ تولید شده در کارخانه سیمان سپاهان اصفهان می‌باشد. این نوع سیمان مطابق با مشخصات مطرح شده در استاندارد ملی ایران به شماره ۳۸۹-ISIRI استاندارد امریکا ASTM-C150 [۲۳] تولید می‌شود و مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان ۳۲۵-۱ را دارا می‌باشد، لیکن حرارت هیدراتاسیون بیش تر، گیرش سریع تر و مقاومت اولیه و نهایی بیش تر از ویژگی‌های آن نسبت به سیمان ۳۲۵-۱ می‌باشد. این سیمان در همه سازه‌های بتنی مسلح و غیر مسلح که نیاز به مقاومت زودرس در مقایسه با نوع ۳۲۵-۱ را دارد مانند ستون-ها، سقف‌ها، دال، پل‌ها، سازه‌هایی که نیاز به قالب برداری سریع می‌باشد و هم‌چنین در هوای سرد استفاده می‌شود. مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان مورد استفاده در جدول ۱ و ۲ نشان داده شده است.

ماسه سیلیس و پودر سیلیس مورد استفاده در این تحقیق تولید شده در کارخانه ماسه معدن چپروک می‌باشد. اندازه ماسه سیلیس مورد استفاده کم‌تر از ۱۵۰ میکرون و اندازه پودر سیلیس نیز کم‌تر از ۵۰ میکرون انتخاب شد. جدول آنالیز شیمیایی این ماسه در جدول ۳ نشان داده شده است.

آب به سیمان در این تحقیق ۰/۲ در نظر گرفته شده است. از نمونه‌های به طول $100 \times 100 \times 350$ میلی متر برای آزمایش خمش چهار نقطه‌ای استفاده شده است. مقاومت فشاری حاصل شده در حدود ۲۱۰ مگا پاسکال به دست آمده است [۱۷]. در این مطالعه از ۰، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد الیاف میکرو فولادی به همراه ۱ درصد الیاف ماکرو استفاده شده است. با افزایش الیاف میکرو مقاومت خمشی افزایش پیدا می‌کند، که نشان دهنده‌ی تأثیر مثبت استفاده‌ی هم‌زمان از الیاف ماکرو و میکرو در بتن می‌باشد. از نظر ظرفیت جذب انرژی و مقاومت خمشی می‌توان رتبه بندی الیاف را بدین صورت بیان نمود: بیشترین مقاومت و جذب انرژی مختص الیاف تاییده‌ی بلند و رتبه‌ی بعدی الیاف تاییده و کم‌ترین مقاومت را الیاف تاییده‌ی کوتاه از خود نشان دادند. بیشترین مقاومت خمشی نیز در حدود ۴۷ مگا پاسکال به دست آمده است.

ویلیام و همکاران [۱۸] تأثیر انواع الیاف روی مشخصات مکانیکی (UHPFRC)^۱ را مورد بررسی قرار دادند آن‌ها در تحقیق خود به بررسی الیاف مصنوعی هم پرداخته‌اند. به این نتیجه رسیدند که مطالعه روی مقاومت فشاری تک محوری این بتن نشان داد که الیاف تأثیر ناچیزی روی مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته‌ی نمونه‌های (UHPC)^۲ دارند؛ به جز نمونه‌های مسلح شده با الیاف فولادی که مقاومت فشاری را به دلیل صلبیت ذاتی خود بهبود می‌بخشند. که نظر آن‌ها مؤید سایر تحقیقات بود که نشان می‌داد الیاف باعث افزایش مقاومت کششی و نه لزوماً افزایش مقاومت فشاری می‌شود [۱۹-۲۲]. و نیز مشاهده کردند که دست یابی به مشخصات مدنظر بتن با عملکرد بسیار بالای مسلح شده به الیاف مصنوعی قابل امکان است.

در تحقیق حاضر به بررسی اثرات الیاف پلی پروپیلن و الیاف ماکروی مصنوعی (بارچپ) بر مقاومت فشاری با انجام آزمایش مقاومت فشاری پرداخته شد، بدین منظور نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای ساخته شد. هم‌چنین اثرات این نوع از الیاف بر شکل پذیری و مقاومت خمشی بتن با عملکرد بسیار بالای مسلح شده به الیاف با انجام آزمایش مقاومت خمشی چهار نقطه‌ای پرداخته شد، بدین منظور نمونه‌های منشوری ساخته شد.

² Ultra High Performance Concrete

¹ Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete

میکروسلیس مورد استفاده در این تحقیق محصول شرکت صنایع فرو آلیاژ ایران می‌باشد که این میکروسلیس بر اساس استاندارد ASTM C1240 تولید شده است [۲۴]. مشخصات فیزیکی میکروسلیس مورد استفاده در جدول ۴ نشان داده شده است.

در این تحقیق به دلیل روانی مناسب و مقاومت بهتر از AURUMIX – 4450 استفاده شد، این فوق روان کننده از شرکت فاسروک تهیه شد. براساس استاندارد ASTM C494 بر پایه پلی کربوکسیلات برای جبران کاهش میزان آب به مصالح سیمانی تهیه شد [۲۵].

جدول ۱- مشخصات فیزیکی سیمان مورد استفاده در این تحقیق [۳۲]

مشخصه‌ی فیزیکی	سطح مخصوص cm ² / gr	زمان گیرش		مقاومت فشاری kg / cm ²		
		اولیه (min)	ثانویه (min)	۲ روزه	۳ روزه	۷ روزه
ISIRI ۳۸۹	۲۸۰۰	۴۵	۲۴۰	۱۰۰	-	۴۲۵
سیمان مصرفی	۳۴۰۰	۱۹۰	۲۴۰	۱۸۰	۲۳۰	۳۴۰

جدول ۲- مشخصات شیمیایی سیمان مورد استفاده در این تحقیق [۳۲]

ترکیبات شیمیایی	درصد
SiO ₂	۲۱
Al ₂ O ₃	۵
Fe ₂ O ₃	۳/۴۵
CaO	۶۴
MgO	۲/۲
SO ₃	۲/۲
Na ₂ O	-
K ₂ O	-

جدول ۳- آنالیز شیمیایی ماسه‌ی چپروک [۳۳]

نوع عنصر	ماسه‌ی چپروک (درصد)	ماسه استاندارد (درصد)
SiO ₂	۹۹-	۹۸/۱
Fe ₂ O ₃	۰/۶-۰/۲	۰/۷-۰/۲
Al ₂ O ₃	۱/۷-۰/۴	۱/۶۳-۰/۵۱
CaO	۰/۲-۰/۰۷	۰/۷-۰/۴
Na ₂ O	۰/۰۱-۰	۰/۸-۰/۰۳
K ₂ O	۰/۰۶-۰/۰۲	۰/۰۸-۰/۰۲
MgO	۰	-

جدول ۴- مشخصات فیزیکی میکروسلیس [۳۴]

مشخصات	سطح ویژه m ² / gr	اندازه ذرات (nm)	وزن مخصوص (gr / cm ³)	درصد باقیمانده روی الک ۴۵ میکرون
مقدار	۲۰-۲۵	۲۲۹	۱/۹	۳/۵-۰/۱

بررسی خواص مکانیکی بتن با عملکرد بسیار بالای مسلح شده به ...

ظرفیت 50 kN استفاده شد. در این روش نمونه‌ها بر روی دو تکیه‌گاه استوانه‌ای شکل قرار می‌گیرند. در این شرایط فاصله‌ی انتهایی نمونه تا تکیه‌گاه مجاورش 25 میلی‌متر می‌باشد. با توجه به پیشنهاد استاندارد ASTM C1018 [28]، سرعت بارگذاری 0.1 میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شده است. به منظور انجام آزمایش خمش بر اساس استاندارد ذکر شده نمونه‌های بتن با عملکرد فوق‌العاده بالا مسلح به الیاف به ابعاد $350 \times 70 \times 70$ میلی‌متر ساخته شد. در این روش به منظور ترسیم منحنی بار-تغییر مکان، از سه جابه‌جایی سنج الکترونیکی (LVDT)، استفاده می‌شود.

۲-۴- طرح اختلاط و ساخت نمونه‌ها

در این تحقیق ۷ طرح اختلاط استفاده شد، که طرح اختلاط مربوط به هر مورد از طرح‌های ذکر شده پس از انجام طرح‌های مختلف به دست آمده است. ذکر این نکته قابل توجه است که میزان الیاف در تمامی طرح‌ها ثابت نگه داشته شده است (یک و نیم درصد حجم بتن)، همچنین در تمامی طرح‌ها وزن پوزولان مورد استفاده 30 درصد وزنی مواد سیمانی در نظر گرفته شده است. طرح اختلاط‌ها که در جدول ۵ آمده است با ۷ شماره مشخص شده است که شماره ۱ طرح بدون الیاف، شماره ۲ طرح با الیاف پلی‌پروپیلن، شماره ۳ طرح با الیاف بارچپ و شماره ۴ ترکیب الیاف بارچپ و پلی‌پروپیلن و شماره ۵ طرح با الیاف فولادی و شماره ۶ ترکیب الیاف فولادی و الیاف بارچپ و شماره ۷ ترکیب الیاف فولادی و الیاف پلی‌پروپیلن را مشخص می‌کند.

نحوه طرح اختلاط در این تحقیق تقریباً منطبق بر تحقیقات مرتبط با بتن با عملکرد بسیار بالا با اندکی تفاوت به دلیل استفاده از الیاف بود [23، 29، 30 - 31]. روال طرح اختلاط به صورت زیر انتخاب شد.

میکرو سیلیس، ماسه سیلیس، پودر سیلیس و سیمان پرتلند به مدت ۵ دقیقه در سرعت پایین به طور کامل مخلوط شدند.

تمامی آب و فوق‌روان‌کننده به مصالح افزوده شد این بار به مدت ده دقیقه مخلوط کن را روشن کرده و اجازه داده تا مصالح به خوبی مخلوط شوند.

در انتها الیاف افزوده شد، این بار مخلوط کن در سرعت بالا تنظیم شده و به مدت ۵ دقیقه اجازه اختلاط داده شد.

کیفیت و الزامات آب مورد استفاده در بتن با عملکرد بسیار بالای مسلح شده به الیاف مشابه بتن معمولی می‌باشد. آب استفاده شده در این تحقیق، از آب شرب شهر اصفهان تهیه شده است که از نظر کیفیت مورد قبول است.

الیاف فولادی از مجتمع فنی بازرگانی الیاف به طول 35 میلی‌متر و قطر 0.6 میلی‌متر تهیه شد که مقاومت کششی آن بین 800 - 1000 مگا پاسکال می‌باشد. قابل ذکر است که نوع الیاف به صورت دو انتها قلاب تهیه شد. الیاف پلی‌پروپیلن از کارخانه نخ و گرانول سیرجان به طول 6 میلی‌متر تهیه شد. که مقاومت کششی آن 500 مگا پاسکال ذکر شده است. الیاف ماکروی مصنوعی (بارچپ) از شرکت دوروچم خاورمیانه به طول 50 میلی‌متر تهیه شد. که مقاومت کششی آن 700 مگا پاسکال ذکر شده است.

۲-۳-۳- شرح آزمایشات

۲-۳-۱- عمل آوری

بعد از خارج کردن نمونه‌ها از قالب، نمونه‌ها به حوضچه‌ی آب انتقال داده شدند سپس نمونه‌ها بعد از گذشت 7 و 28 روز از حوضچه‌ی آب خارج شده و مورد آزمایش قرار گرفتند.

۲-۳-۲- مقاومت فشاری

در این تحقیق برای آزمایش مقاومت فشاری از نمونه‌های مکعبی 70 میلی‌متری به دلیل طول الیاف بارچپ مورد استفاده (تقریباً 50 میلی‌متر) و نمونه‌های استوانه‌ای 100×200 میلی‌متر استفاده شد. همچنین استاندارد ASTM C109/C109M [26] مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به این استاندارد، سرعت بارگذاری باید به صورت ثابت و در محدوده‌ی 900 الی 1800 نیوتن بر ثانیه باشد. جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری از دستگاه اعمال فشار با ظرفیت نهایی 2000 کیلو نیوتن استفاده شد.

۲-۳-۲- آزمایش مقاومت خمشی

این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM C78 [27]، به وسیله - ۱ دستگاه خمش چهار نقطه‌ای انجام می‌شود. برای انجام این آزمایش در این تحقیق، از دستگاه آزمایش چهار نقطه‌ای به

جدول ۵- میزان وزنی مصالح در طرح اختلاط‌های این تحقیق (kg/m^3)

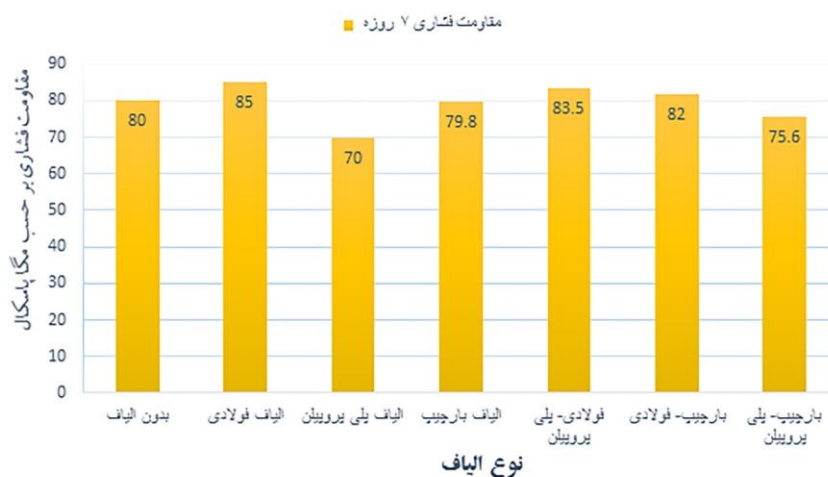
شماره	سیمان	میکروسیلیس	ماسه سیلیس	پودر سیلیس	آب	فوق روان کننده	الیاف فولادی	الیاف پلی پروپیلن	الیاف بارچپ
۱	۹۵۰	۲۸۵	۶۹۰	۱۷۳	۱۵۵	۲۴/۵	-	-	-
۲	۹۵۰	۲۸۵	۶۹۰	۱۷۳	۱۵۵	۲۸/۵	-	۱۳/۸	-
۳	۹۵۰	۲۸۵	۶۹۰	۱۷۳	۱۵۵	۲۸/۵	-	-	۱۳/۶
۴	۹۵۰	۲۸۵	۶۹۰	۱۷۳	۱۵۵	۲۸/۵	-	۶/۹	۶/۸
۵	۹۵۰	۲۸۵	۶۹۰	۱۷۳	۱۵۵	۲۸/۵	۱۱۷/۷	-	-
۶	۹۵۰	۲۸۵	۶۹۰	۱۷۳	۱۵۵	۲۸/۵	۵۸/۸	-	۶/۸
۷	۹۵۰	۲۸۵	۶۹۰	۱۷۳	۱۵۵	۲۸/۵	۷۸/۵	۴/۶	-

۳- نتایج و بحث روی آن

۳-۱- مقاومت فشاری

توانستند به مقاومت فشاری بیش از ۱۰۰ مگا پاسکال دست پیدا کنند. البته باید بیان داشت که نمونه‌های حاوی الیاف پلی پروپیلن و الیاف بارچپ چه تنها و چه هیبرید با هم باعث کاهش مقاومت فشاری نسبت به حالت بدون الیاف شدند. می‌توان درصد کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های مسلح شده به این سه سطح الیاف را در جدول ۶ مشاهده کرد، علت این کاهش مقاومت ایجاد ناحیه متخلخل در ماتریس توسط الیاف مصنوعی در بتن است. اما نمونه‌های حاوی الیاف فولادی چه تنها و چه هیبرید با الیاف مصنوعی مورد استفاده در این تحقیق باعث افزایش مقاومت فشاری شده است. در جدول ۷ درصد افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های مسلح شده به الیاف فولادی و الیاف فولادی-الیاف پلی پروپیلن و الیاف فولادی-بارچپ را می‌توان مشاهده کرد. علت این افزایش مقاومت را می‌توان در صلیبت ذاتی الیاف فولادی دانست.

با توجه به شکل ۱ و ۲ می‌توان مشاهده کرد که نمونه‌های مسلح شده به ۱/۵ درصد الیاف فولادی در سن ۷ و ۲۸ روز به ترتیب به مقاومت فشاری ۸۵ و ۱۳۰ مگا پاسکال رسیده‌اند این در حالی است که نمونه‌های مسلح شده به ۱/۵ درصد الیاف پلی پروپیلن در سن ۷ و ۲۸ روز به ترتیب به مقاومت فشاری ۷۰ و ۱۱۲ مگا پاسکال رسیده‌اند. می‌توان بیان داشت که نمونه‌های حاوی ۱/۵ درصد الیاف فولادی بیش‌ترین مقاومت فشاری را در هر دو سن ۷ و ۲۸ روز و نمونه‌های حاوی ۱/۵ درصد الیاف پلی پروپیلن کم‌ترین مقاومت فشاری را در هر دو سن ۷ و ۲۸ روز ایجاد کردند. باید بیان داشت تمامی نمونه‌های مسلح شده به انواع الیاف مورد استفاده در این تحقیق چه در حالت نمونه‌های مکعبی و چه استوانه‌ای



شکل ۱- مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه‌های مکعبی



شکل ۲- مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی نمونه‌های مکعبی

جدول ۶- کاهش مقاومت فشاری نسبت به حالت بدون الیاف

نوع الیاف	در سن ۷ روز (%)	در سن ۲۸ روز (%)
بارچیب	۱/۰	۲/۰
پلی پروپیلن	۱۲/۵	۸/۱
بارچیب + پلی پروپیلن	۵/۵	۴/۹

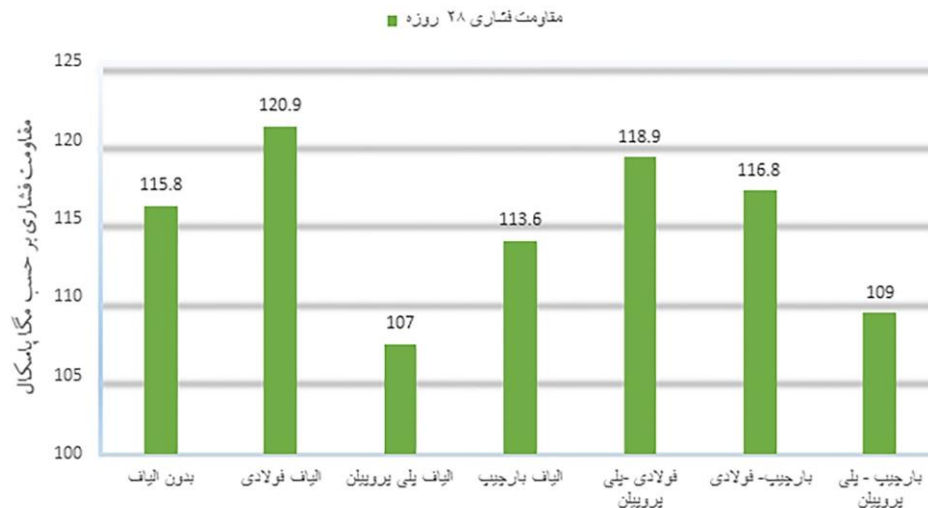
جدول ۷- درصد افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی الیاف فولادی

نوع الیاف	سن ۷ روز (%)	۲۸ روز (%)
فولادی	۶/۲	۵/۹
پلی پروپیلن + فولادی	۴/۳	۳/۴
بارچیب + فولادی	۲/۵	۱/۲

در جدول ۸ ضریب تبدیل مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی به نمونه‌های استوانه‌ای در سن ۲۸ روز را مشاهده کرد، با توجه به شکل ۲ و ۳ می‌توان بیان داشت که تمامی نمونه‌های مکعبی مقاومت فشاری بیش‌تری نسبت به نمونه‌های استوانه‌ای دارند، که علت آن را می‌توان در رابطه با وجود ضعف در بتن نمونه نسبت داد. اصولاً بتن جسم کاملاً همگن و با کنترل کیفیت عالی نبوده و همیشه احتمال وجود نقاط وضعی در آن وجود خواهد داشت. این نقاط ضعف، مقاومت فشاری نمونه‌ی آزمایشگاهی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. هرچه بعد نمونه بزرگ‌تر بوده و حجم بتن بیش‌تر باشد، احتمال وجود نقاط ضعیف بیش‌تر، افزایش یافته و مقاومت نمونه کاهش می‌یابد.

جدول ۸- نسبت مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی به نمونه‌های استوانه‌ای در سن ۲۸ روز

نوع الیاف	ضریب تبدیل
بدون الیاف	۱/۰۶
الیاف بارچیب	۱/۰۶
الیاف فولادی	۱/۰۷
الیاف پلی پروپیلن	۱/۰۴
الیاف فولادی - پلی پروپیلن	۱/۰۷
الیاف فولادی - بارچیب	۱/۰۶
الیاف بارچیب - پلی پروپیلن	۱/۰۵



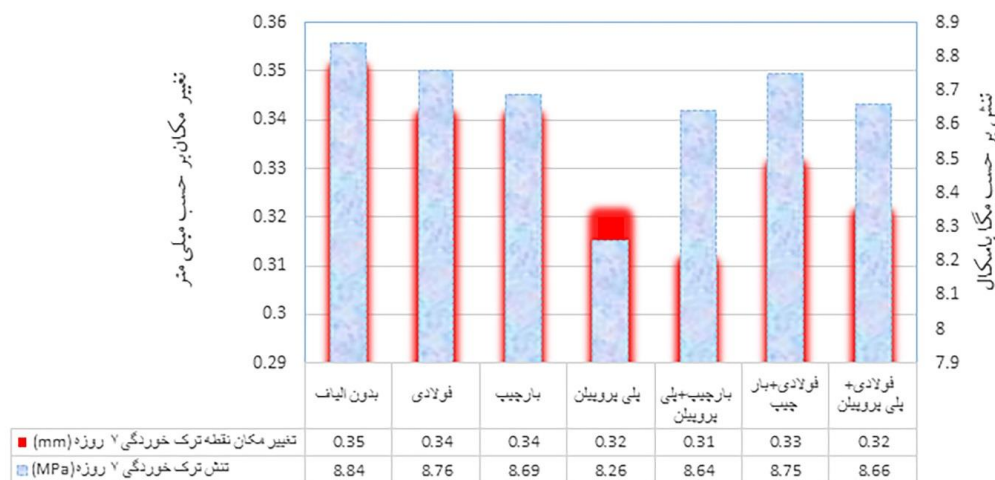
شکل ۳- مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای در سن ۲۸ روز

۲-۳- نتایج مقاومت خمشی

۱-۲-۳- نتایج مقاوت خمشی ۷ روزه

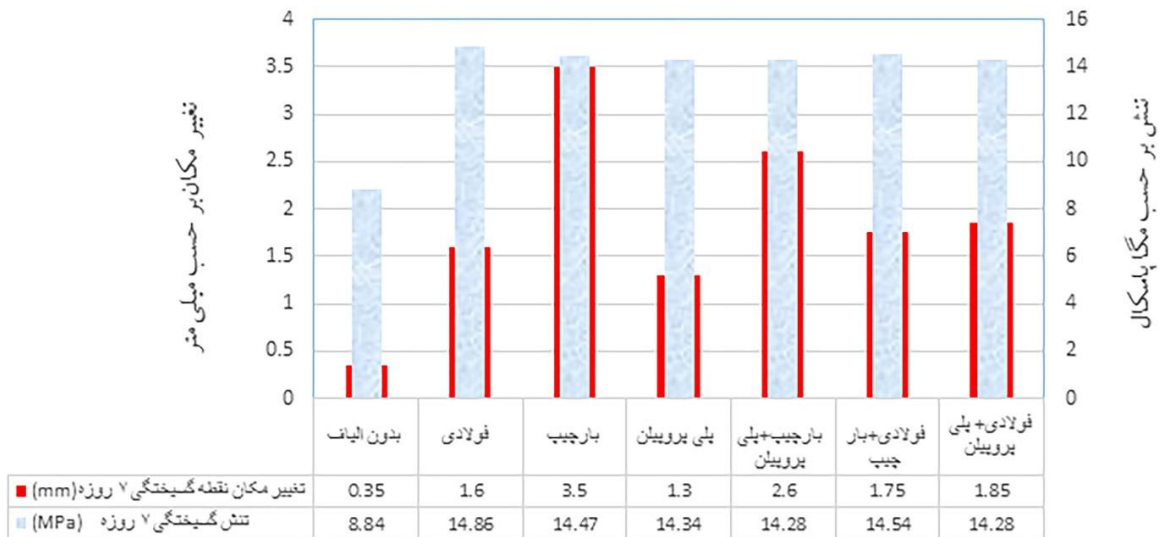
تنش گسیختگی مربوط به نمونه‌های حاوی ۱/۵ درصد الیاف فولادی به میزان ۱۴/۸ مگا پاسکال و کم‌ترین آن مربوط به نمونه‌های بدون الیاف بود. می‌توان بیان داشت که الیاف باعث جدا شدن نقطه تنش گسیختگی و تنش ترک خوردگی شده است و باعث شده است که نمونه‌ها حتی بعد از ترک خوردگی بتوانند تنش‌های بیش‌تری را تحمل کند. نمونه‌های حاوی الیاف مصنوعی هم توانسته است تنش گسیختگی نزدیک به الیاف فولادی را تامین کند. اما نقش الیاف مصنوعی در جابه‌جایی متناظر با نقطه تنش گسیختگی بارز می‌شود، می‌توان از شکل ۵ مشاهده کرد که بیش‌ترین جابه‌جایی متناظر با نقطه تنش گسیختگی مربوط به نمونه‌های حاوی ۱/۵ درصد الیاف بارچیب به میزان ۳/۵ میلی‌متر بود.

در شکل ۴ می‌توان نتایج تنش متناظر با نقطه ترک خوردگی و جابه‌جایی متناظر با آن را مشاهده کرد. در سن ۷ روز بیش‌ترین تنش ترک خوردگی مربوط به نمونه‌های بدون الیاف به میزان ۸/۸ مگا پاسکال و کم‌ترین میزان تنش ترک خوردگی در سطوح الیاف مورد استفاده مربوط به حالت الیاف ۱/۵ درصد الیاف پلی پروپیلن به میزان ۸/۲ مگا پاسکال می‌باشد باید توجه داشت که بیش‌ترین جابه‌جایی متناظر با نقطه ترک خوردگی در این سن نیز مربوط به حالت بدون الیاف بود. هم‌چنین با توجه به شکل ۵ می‌توان نتایج مربوط به تنش گسیختگی و جابه‌جایی متناظر با آن را مشاهده کرد. بیش‌ترین میزان



شکل ۴- تنش و تغییر مکان متناظر با نقطه ترک خوردگی در سن ۷ روز

بررسی خواص مکانیکی بتن با عملکرد بسیار بالای مسلح شده به ...



شکل ۵- تنش و تغییر مکان نقطه‌ی گسیختگی در سن ۷ روز

سن مربوط به نمونه‌های حاوی ۱ درصد الیاف فولادی و ۰/۵ درصد الیاف پلی پروپیلن به میزان ۱۲/۶ مگا پاسکال است. در مورد جابه‌جایی متناظر با نقطه ترک خوردگی در سن ۲۸ روز می‌توان مشاهده کرد که کم‌ترین میزان جابه‌جایی متناظر با آن مربوط به نمونه‌های حاوی ۱/۵ درصد الیاف پلی پروپیلن به میزان ۰/۴۵ میلی‌متر بود.

۳-۲-۲- نتایج مقاومت خمشی در سن ۲۸ روز

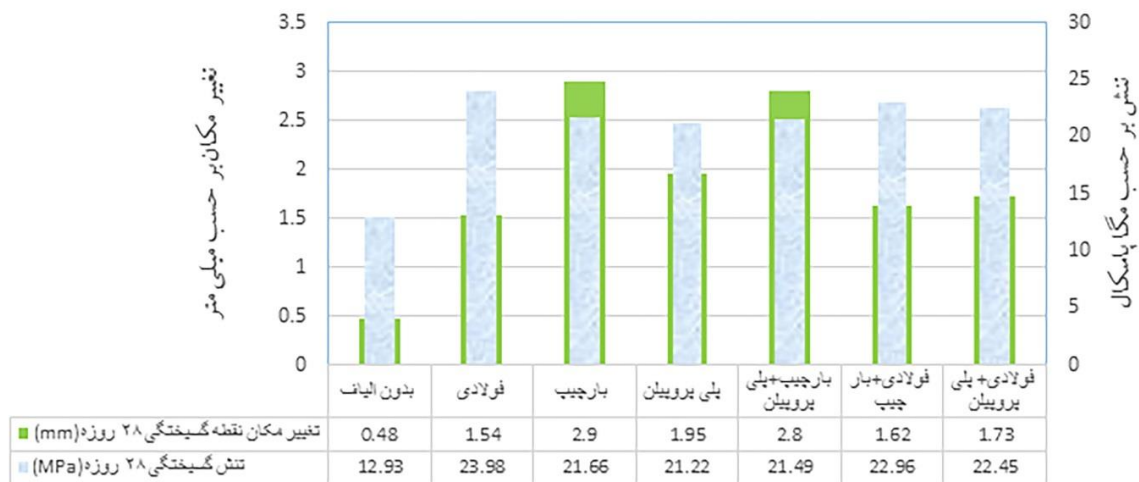
در شکل ۶ می‌توان نتایج تنش ترک خوردگی و جابه‌جایی متناظر با آن در سن ۲۸ روز را مشاهده کرد. در سن ۲۸ روز نیز مانند سن ۷ روز بیش‌ترین تنش ترک خوردگی مربوط به نمونه‌های بدون الیاف به میزان ۱۲/۹ مگا پاسکال و کم‌ترین میزان تنش ترک خوردگی در این



شکل ۶- تنش و تغییر مکان نقطه‌ی ترک خوردگی در سن ۲۸ روز

شده به الیاف پلی پروپیلن به میزان ۲۱/۲ مگا پاسکال بود. از شکل ۷ می‌توان به این نتیجه رسید که بیش‌ترین جابه‌جایی مربوط به تنش گسیختگی در سن ۲۸ روز مربوط به نمونه‌های حاوی الیاف بارچیب به میزان ۲/۹ میلی‌متر است.

در شکل ۷ می‌توان نتایج تنش و جابه‌جایی متناظر با نقطه گسیختگی در سن ۲۸ روز را مشاهده کرد. بیش‌ترین تنش گسیختگی مربوط به نمونه‌های حاوی ۱/۵ درصد الیاف فولادی به میزان ۲۳/۹ مگا پاسکال و کم‌ترین میزان تنش گسیختگی مربوط به نمونه‌های مسلح



شکل ۷- تنش و تغییر مکان نقطه‌ی گسیختگی در سن ۲۸ روز

۴- نتیجه گیری

کاهش مقاومت فشاری ۲ درصد نسبت به حالت بدون الیاف شد و توانسته است شکل پذیری مناسب را تامین کند که این الیاف می‌تواند جایگزین مناسب‌تری برای الیاف فولادی در این بتن باشد. ۴- در میان الیاف هیبریدی مورد استفاده ترکیب ۰/۷۵ الیاف فولادی ۰/۷۵ الیاف بارچیب توانست نتایج بهتری تامین کند که به دلیل هزینه بالاتر الیاف فولادی در خور خود قابل توجه است. ۵- در کل هم از نظر اقتصادی و هم از نظر شکل پذیری استفاده از دو الیاف ماکروی مصنوعی (بارچیب) و الیاف پلی پروپیلن در این بتن توصیه می‌شود.

۵- مراجع

- [1] B. Graybeal, UHPC making strides, Public roads, Federal highway Administration, McLean, VA 2009. 72 (4): p. 17-21.
- [2] K. Wille, A.E. Naaman, G.J. Parra-Montesinos, Ultra-high performance concrete with compressive strength exceeding 150 MPa (22 ksi): a simpler Way, ACI Mater. J. 2011. 108 (1): p. 46-54.
- [3] F. De Larrad, T. Sedrn, Optimization of ultra-high performance concrete by the use of packing model, Cem. Concr. Res. 1994. 24 (6): p. 997-1009.
- [4] Hsu LS, Hsu T. Stress strain behavior of steel-fiber high-strength concrete under compression. ACI Struct J 1994. 91(4): p. 448-57.
- [5] Resplendino, J., and Toulemonde, F., "Designing and Building with UHPFRC", John Wiley & Sons, 2013.
- [6] رمضانیان پور، ع.ا.؛ فیروز مکان، ش. و. و عبادی، ت.؛ «بررسی اثر محلول کلوئیدی نانو سیلیس بر خواص مالت»؛ ششمین کنگره

در این تحقیق برای به دست یافتن به نتایج مورد نظر تعداد ۲۸ عدد نمونه‌ی مکعبی ۷۰×۷۰×۷۰ میلی‌متری و ۱۴ عدد نمونه‌ی استوانه‌ای ۱۰۰×۲۰۰ میلی‌متری برای آزمایش مقاومت فشاری و تعداد ۲۸ عدد نمونه ۷۰×۷۰×۳۵۰ میلی‌متری برای آزمایش مقاومت خمشی ساخته شد نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که:

۱- مقاومت فشاری بالای ۱۰۰ مگا پاسکال بعد از ۲۸ روز در نمونه‌های مکعبی و هم در نمونه‌های استوانه‌ای در تمامی سطوح الیاف دست پیدا شد. البته همان‌طور که قابل مشاهده است و در نتایج آورده شده است نمونه‌های حاوی الیاف مصنوعی باعث کاهش مقاومت فشاری شده‌اند که می‌تواند ناشی از ایجاد فضای متداخل در ماتریس باشد. اما الیاف فولادی چه تنها و چه هیبرید که مورد استفاده قرار گرفته است باعث افزایش ناچیز مقاومت فشاری شده است. قابل ذکر است که این نتیجه مؤید این نکته است که الیاف تاثیر چندانی در مقاومت فشاری ندارد.

۲- استفاده از الیاف مصنوعی تقریباً نتایجی مشابه با الیاف فولادی در تامین میزان مدول گسیختگی و جابه‌جایی متناظر با آن را تامین کرده است که می‌تواند با توجه به وزن کم‌تر مورد استفاده از این الیاف در یک متر مکعب نسبت به حالت الیاف فولادی و هزینه کم‌تر قابل توجه است.

۳- در میان دو الیاف مصنوعی که در این تحقیق مورد استفاده قرار داده شد الیاف بارچیب توانست نتایج بهتری نسبت به الیاف پلی پروپیلن تامین کند. می‌توان اشاره کرد که این الیاف باعث تنها

These. Hong Kong, China: Departement of Science and Technology, University of Hong Kong; 1998.

[20] Lu XB, Cheng-Tzu TH. Behavior of high strength concrete with and without steel fiber reinforcement in triaxial compression. *Cem Concr Res.* 2006. 36(9): p. 1679-1685.

[21] Wille K, El-Tawil S, Naaman AE. Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading. *Cem Concr Compos* 48. 2014. p. 53-66.

[22] Nguyen DL, Ryu GS, Koh KT, Kim DJ. Size and geometry dependent tensile behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *Compos Part B* 58. 2014. p. 279-292.

[23] ASTM C150/C150M-16, Standard specification for portland cement, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

[24] ASTM C1240-15, Standard specification for silica fume used in cementitious mixtures, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

[25] ASTM C494/C494M-05a, Standard specification for chemical admixtures for concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005.

[26] ASTM C109/C109M-07," Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.

[27] ASTM C78-10, "Standard test method for flexural strength of concrete," ASTM International, USA, 2010.

[28] ASTM C 1018-97, "Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete," ASTM International, U.S.A., 1998.

[29] A. Cwirzen, V. Penttala, C. Vornanen, Reactive powder based concretes: mechanical properties, Durability and hybrid use with OPC, *Cem. Concr. Res.* 38. 2008. p. 1217-1226.

[30] C.M. Tam, W.Y. Tam Vivian, K.M. Ng, Assessing drying shrinkage and water permeability of reactive powder concrete produced in Hong Kong, *Constr. Build. Mater.* 2012. 26 (1): p. 79-89.

[31] Z. Yunsheng, S. Wei, L. Sifeng, J. Chujie, L. Jianzhong, Preparation of C200 green reactive powder concrete and its static-dynamic behaviors, *Cem. Concr. Compos.* 2008. 30 (9): p. 831-838.

[32] <http://www.sepahancement.com/>.

[33] <http://www.ifi.co.ir/>.

[34] <http://www.cfs.chirookco.ir/>.

ملی مهندسی عمران، ۶ و ۷ اردیبهشت، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

[7] Habel, K., Denarie, E., and Bruhwiler, E., "Experimental investigation of composite ultra-high-performance fiber-reinforced concrete and conventional concrete members," *ACI Struct J.* 2007. 104 (1): p. 93-101.

[8] Graybeal, B.A., "Compressive behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *ACI Mater. J.* 2007. 104 (2): p. 146-148.

[9] V. Perry, D. Zakariasen, First use of ultra-high performance concrete for an innovative train station canopy, 25, *Concrete Tecnology Today-Portland Cement Association*, Perry, 2004.

[10] E. Fehling, K. Bunje, M. Schmidt, Gärtnerplatz – bridge over river Fulda in Kassel: multispan hybrid UHPC-steel bridge, in: *Designing and Building with UHPFRC*, John Wiley & Sons, Inc., 2013, pp. 0-136.

[11] M. Rebentrost, G. Wight, Perspective on UHPCs from a specialist construction company, in: *Designing and Building with UHPFRC*, John Wiley & Sons Inc, 2013, pp. 189-208.

[12] G.J. Parra-Montesinos, S.W. Peterfreund, S.-H. Chao, Highly damage-tolerant beam-column joints through use of high-performance fiber-reinforced cement composites, *ACI Struct. J.* 2005.

[13] J. Magnusson, M. Hallgren, Reinforced high strength concrete beams subjected to air blast loading, in: *Structures Under Shock and Impact VIII*, Wit Press, 2004, pp. 53-62.

[14] M. Zhang, M. Sharif, G. Lu, Impact resistance of high-strength fibre-reinforced concrete, *Mag. Concr. Res.* 59 2007. p. 199-210.

[15] Hannant, D.S. "Fiber cements and fiber concretes," Wiley, New York, 1987, p. 219.

[16] Abbas, S., Soliman, A.M., and Nahdi, M.L., "Exploring mechanical and durability properties of ultra- high performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages. *Constr. and Build. Mater.* 2015. 75 (1): p. 429-441.

[17] Kim, D.J., Park, S. H., Ryu, G. S., and Koh, K. T., "Comparative flexural behavior of hybrid ultra-high performance fiber reinforced concrete with different macro fibers, *Constr. Build. Mater.* 2011. 25 (12): p. 4144-4155.

[18] Kinda Hannawi , Hui Bian, William Prince-Agbodjan, Balaji Raghavan "Effect of different types of fibers on the microstructure and the mechanical behavior of ultra-high performance fiber-reinforced concretes." *Compos Part B* 86. 2016. p. 214-220.

[19] Li FM. Fracture characterization of fiber reinforced concrete in direct uniaxial tension.

Mechanical properties of ultra high performance concrete reinforced by polypropylene fibers and synthetic macro fibers (barchip)

Hadi bahmani *

M.Sc. Student, Faculty of Civil Engineering, Technical University of Isfahan

Davood mostofinejad

Prof., Faculty of Civil Engineering, Technical University of Isfahan

Abstract

The use of concrete with ultra high performance reinforced steel fiber has been investigated in numerous studies. However, most research has focused on the use of steel fibers as reinforced. In this study, the replacement of steel fibers with polypropylene fibers and synthetic fibers (barchip) was investigated in the parameters of the mechanical properties of this concrete. The same use was also made of two hybrid fibers, as well as hybrid with steel fibers has been investigated. The total fiber content in each mixing plan is considered to be 1.5% vol. A total of 28 specimens 70x70mm cubes and 14, 100x200mm cylindrical specimens were made for compressive strength testing and 28 specimens of 70x70x 350mm were used to test the flexural strength. The compressive and flexural strength tests were measured at 7 and 28 days. the compressive strength of samples made at 28 days of age at all levels of the fibers used was more than 100 MPa ., the highest rupture stress relates to 28-day steel fiber reinforced specimens of 23.9 MPa.

Keywords: steel fibers, polypropylene fibers, synthetic macro fibers (barchip), mechanical properties.

* Corresponding Author: hadibahmani110@gmail.com