تحقیقات بتن
سال دوازدهم، شمارهٔ چهارم
زمستان ۹۸
ص ۱۸ – ۵
تاریخ دریافت: ۹۷/۵/۱۵
تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۰/۱۷

بررسی خواص مکانیکی بتن فوق توانمند غیر مسلح و مسلح شده به الیاف فولادی، پلی پروپیلن و پلی وینیل الکل

ابراهیم حسامی *
دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی اصفهان.
داود مستوفی‌نژاد
استاد دانشگاه صنعتی اصفهان.
محمدرضا افتخار
استادیار دانشگاه صنعتی اصفهان.

چکیده

بتن به عنوان پر مصرف‌ترین مصالح ساختمانی، مدت‌هاست جواب‌گوی نیازهای رو به گسترش جامعه‌ی بشری است، که پارامترهای آن مدام در حال تغییر است. تحقیقات دانشمندان طی دو دهه‌ی اخیر منجر به پیدایش نوع جدیدی از بتن با خواص فوق العاده و مقاومت فشاری بالا شده است که این بتن تحت عنوان بتن با عملکرد بسیار بالا (بتن فوق توانمند) شناخته شده است. هدف اصلی در تحقیق حاضر رسیدن به یک طرح اختلاط با مقاومت فشاری مناسب برای بتن با عملکرد بسیار بالا، بدون استفاده از الیاف می‌باشد. ابتدا طرح اختلاط پایه‌ای در نظر گرفته شده است و با تغییر در نوع و اندازه‌ی مصالح و هم چنین با اعمال عمل آوری‌های متفاوت مقاومت فشاری نمونه‌ها به ۲۱۲ مگاپاسگال رسیده است. جهت ایجاد شکل پذیری و جذب انرژی در بتن ساخته شده با طرح اختلاط تحقیق حاضر از الیاف پلی وینیل الکل، الیاف پلی پروپیلن و الیاف فولادی به صورت تکی و هیبریدی جهت مسلح کردن بتن استفاده شده است. حداکثر الیاف قابل استفاده، شکل پذیری، و مقاومت فشاری که الیاف ذکر شده به صورت تکی و هیبریدی برای این بتن ایجاد کرده تعیین، و با یکدیگر مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته شده است. نتایج به‌دست آمده از این مطالعه آزمایشگاهی نشان می‌دهد نمونه‌های حاوی ۲ درصد الیاف بهترین عملکرد مکانیکی را داشته، و هم چنین نمونه‌های داری ۱/۵ درصد الیاف پلی پروپیلن و ۰/۵ درصد الیاف پلی وینیل الکل بیش‌ترین شکل پذیری را برای بتن ایجاد کرده است.

واژه‌های کلیدی: بتن با عملکرد بسیار بالا، طرح اختلاط، عمل آوری، خواص مکانیکی.

* نویسنده مسئول: ebrahim.hesami888@yahoo.com

۱- مقدمه

خصوصیات فیزیکی و پایداری مطلوب بتن از یک‌سو و سهولت تولید و در دسترس بودن مصالح تشکیل دهنده‌ی آن از سوی دیگر از جمله مواردی است که بتن را به عنوان یکی از پر مصرف‌ترین مصالح در صنعت ساخت و ساز تبدیل نموده است. گسترش علم و به تبع آن افزایش و ایجاد تنوع در نیازهای جامعه، مانند نیاز به ساخت سازه‌های مرتفع با المان‌های سازه‌ای بلند و مقاطع کوچک، محدودیت‌های معماری و نیاز به دوام بالای سازه در محیط‌های مهاجم از جمله مجاورت با یون کلرید، سولفات و سیکل‌های یخ و ذوب، محققان را وادار به جستجو و تحقیق برای ساخت بتن با خواص بهتر نمود. تحقیقات دانشمندان در چند دهه‌ی اخیر منجر به پیدایش نوع جدیدی از بتن با خاصیت فوق العاده شده، که این بتن به بتن با عملکرد بسیار بالا معروف می‌باشد. کشور های مختلفی مانند کره جنوبی، فرانسه، آلمان و کانادا برای اولین بار در ساخت سازه‌های خود از بتن با عملکرد بسیار بالا استفاده کرده‌اند [۱]. ضعیف‌ترین ناحیه بتن محل اتصال خمیر سیمان و سنگ‌دانه یا همان ناحیه انتقال است، که عمدتاً ریز ترک‌هایی که در این ناحیه ایجاد می‌گردند پس از گسترش به نواحی دیگر باعث گسیختگی بتن می‌شوند. حال با حذف درشت‌دانه در واقع این ضعف برطرف شده، و ریز ترک‌های ناحیه‌ی انتقال که باعث گسیختگی نهایی بتن می‌شوند نیز محدود خواهند شد [۲ و۳].

مستوفی‌نژاد و همکاران [۴]، به بررسی عمل آوری‌های مختلف و تغییر در پارامترهای تشکیل دهنده‌ی بتن فوق توانمند پرداخته و تأثیر آن‌ها را بر روی مقاومت فشاری بتن تعیین کرده‌اند. با به کار بردن انواع روش‌های عمل آوری برای بتن فوق توانمند، به مقاومت فشاری برابر با ۲۳۳ مگاپاسکال رسیده‌اند. عمل آوری‌های بررسی شده در این تحقیق شامل، عمل آوری استاندارد، عمل آوری بخار، عمل آوری بخار همراه با عملیات حرارتی و عمل آوری اتوکلاو همراه با عملیات حرارتی است، که عمل آوری اتوکلاو همراه با حرارت بیش‌ترین مقاومت فشاری را برای نمونه ایجاد کرده است [۴].

بندیا و همکاران [۵]، تأثیر الیاف فولادی و الیاف میکرو سلولز را بر مقاومت فشاری مورد بررسی قرار داده‌اند. در این تحقیق الیاف به صورت تنها و ترکیبی در نمونه استفاده شده است. در نمونه‌هایی که حاوی الیاف سلولزی به تنهای است به دلیل کوچک بودن طول الیاف، در ترک‌های بزرگ الیاف کارآیی خود را از دست داده و لذا نمونه‌های بتن از مقاومت خمشی و جذب انرژی پایین برخوردارند. بر اساس نتایج تحقیق فوق، الیاف سلولز به تنهایی باعث افزایش خواص مکانیکی نمونه‌ها نمی‌شود، اما در نمونه‌هایی که از هر دو الیاف فولادی و سلولزی به صورت ترکیبی استفاده شده است، مقاومت خمشی و چقرمگی افزایش یافته است [۵].

یو و همکاران [۶]، اثر الیاف فولادی، پلی پروپیلن و کربن را بر مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق از الیاف فولادی،کربن و پلی‌پروپیلن به صورت تنها و ترکیبی در نمونه‌ها استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی الیاف کربن و فولاد بیش‌تر از نمونه‌ی حاوی الیاف پلی پرو پیلن و فولاد است. مقاومت کششی و خمشی نمونه‌های با الیاف فولادی و کربنی نیز بیش‌تر از نمونه‌های حاوی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن می‌باشد [۶].

اتصال الیاف و ماتریس در سطح مشترک در حالت کلی می‌تواند به صورت اصطکاکی یا شیمیایی و اصطکاکی-شیمیایی به صورت توام باشد. پیوستگی الیاف بیش‌تر به جنس الیاف (میزان آب‌دوستی و آبگریزی الیاف) استفاده یا عدم استفاده از روش‌های اصلاح سطحی الیاف و مشخصات ماتریس بستگی دارد. الیاف پلی‌پروپیلن و پلی‌اتیلن عملاً دارای چسبندگی شیمیایی بسیار کم با ماتریس سیمانی هستند؛ اما در مقابل الیاف PVA[1] و آرامید به دلیل آب‌دوستی بالا دارای چسبندگی شیمیایی بسیار بالایی با ماتریس هستند. [۷].

پان و همکاران [۸]، به بررسی تأثیر الیاف پلی وینیل الکل معمولی و روغنی بر روی خواص مکانیکی بتن پرداختند. الیاف روغنی دارای یک مایع بر روی سطح خود می‌باشد که از جذب آب جلو گیری می‌کند. الیاف پلی‌وینیل الکل روغنی به دلیل روغنی که در سطح آن وجود دارد و مانع جذب آب می‌شود، چسبندگی آن نسبت به الیاف معمولی کم‌تر می‌باشد. نتایجی که از این تحقیق به‌دست آمده نشان می‌دهد که الیاف پلی‌وینیل الکل معمولی باعث افزایش مقاومت بتن در برابر ترک خوردن می‌شود و الیاف پلی‌وینیل الکل روغنی باعث افزایش شکل پذیری می‌شود. این

[1] Polyvinyl alkol

تحقیق برای ایجاد یک حالت بهینه، از این دو الیاف به صورت هیبریدی استفاده کرده‌اند [۸].

ییلدریم و همکاران [۱۰]، اثر الیاف فولادی، سلولز و پلی پروپیلن، به صورت هیبریدی بر مقاومت در برابر ضربه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج به دست آمده نشان داد که نمونه‌های حاوی الیاف نسبت به نمونه‌های بدون الیاف مقاومت در برابر ضربه و جذب انرژی بیشتری دارند و نمونه‌های که دارای الیاف به صورت هیبریدی می‌باشند نسبت به نمونه‌هایی که از یک نوع الیاف برای مسلح کردن آن‌ها استفاده شده دارای مقاومت در برابر ضربه و جذب انرژی بیشتری می‌باشند [۹ و ۱۰].

۲- مصالح مصرفی

سیمان ماده‌ی اصلی چسباننده در بتن است. سیمان‌های مختلف بسته به درصد ترکیباتی که دارند می‌توانند ویژگی‌های شیمیایی متفاوتی از خود نشان دهند. در این تحقیق سیمان‌های استفاده شده در طرح مخلوط‌های مختلف عبارت‌اند از: سیمان شهرکرد تیپ ۵، سیمان شهرکرد تیپ ۱ ویژه (۴۲۵-۱)، سیمان سپاهان تیپ ۱ ویژه (۴۲۵-۱)، این سیمان‌ها مطابق با مشخصات مطرح شده در استاندارد ملی ایران به شماره ۳۸۹- ISIRI استاندارد امریکا ASTM – C150 [۱۱] تولید می‌شود، که ویژگی آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است. استفاده از سنگ‌دانه‌های بسیار ریز و الیاف در بتن باعث کاهش کارایی بتن شده، که جهت جبران کاهش کارایی به‌وجود آمده به آب طرح مخلوط فوق روان کننده اضافه می‌شود. در این تحقیق از فوق روان کننده Auramix 4450 بر پایه پلی کربوکسیلات شرکت فسروک استفاده شده که ۶۰ درصد آن آب می‌باشد. کیفیت و الزامات آب مصرفی در بتن با عملکرد بسیار بالا، همانند بتن معمولی باید تمیز و عاری از مواد زیان آور باشد. آب استفاده شده در این تحقیق، از آب شرب شهر اصفهان تهیه شده است که از نظر کیفیت مورد قبول می‌باشد. مواد پوزولانی به دلیل دارا بودن خاصیت پوزولانی و اندازه‌ی بسیار ریز آن که باعث پر شدن فضای خالی بتن می‌شود. در صورت استفاده‌ی درست از آن، تأثیر قابل توجهی در بهبود دوام، افزایش مقاومت، کاهش نفوذ پذیری و کاهش تخلخل در بتن با عملکرد بسیار بالا دارد. [۳]. میکروسیلیس استفاده شده در این تحقیق، میکروسیلیس ازنا است، که ویژگی فیزیکی و شیمیایی آن در جدول ۲ آورده شده است.

درصد زیادی از حجم بتن با عملکرد بسیار بالا را مصالح سنگی تشکیل می‌دهد، لذا کیفیت مصالح سنگی در خواص بتن حاصله می‌تواند از اهمیت قابل توجهی برخوردار باشد. استفاده از ماسه مناسب در تولید بتن با عملکرد بسیار بالا، باعث کاهش میزان افت ناشی از خشک شدن و افزایش مقاومت فشاری و به تبع آن افزایش مقاومت خمشی می‌شود. ماسه سیلیس و پودر سیلیس استفاده شده در این تحقیق، ماسه و پودر تولید شده در کارخانه‌ی سیلیس بلور نگین اصفهان است. که مشخصات آن‌ها مطابق جدول ۳ می‌باشد.

جدول ۱- آنالیز شیمیایی سیمان شهرکرد تیپ ۵، سیمان شهرکرد تیپ ۱ ویژه و سیمان سپاهان تیپ ۱ ویژه [۱۲ و ۱۳]

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	CL	L.O.I	Blain (cm^2/gr)
سیمان شهرکرد تیپ ۵	۲۱/۸	۴/۵	۵/۲	۶۴/۶	≤ ۱/۶۵	≤ ۱/۵	≤ ۰/۰۳	≤ ۱/۳	≥ ۲۹۰۰
سیمان سپاهان تیپ ۱	۲۱/۲	۵/۲۵	۳/۸۵	۶۵/۰	≤ ۱/۶۵	≤ ۱/۷	≤ ۰/۰۳	≤ ۱/۳	≥ ۳۰۰۰
سیمان سپاهان تیپ ۱	۲۱/۰	۵/۰	۳/۴۵	۶۴/۰	۲/۲	۲/۲	۰/۰۲۵	۱/۹	۳۴۰۰

جدول ۲- آنالیز شیمیایی میکروسیلیس [۱۴]

CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	SO_3	MgO	K_2O	Na_2O	L.O.I
۰/۳-۰/۸	۹۴	۰/۳-۱/۲	۰/۶-۰/۸	۰/۰۵-۰/۲۳	۰/۸-۱/۶	۰/۲-۰/۵	۰/۲۲	۱/۵۸-۱/۷۷

جدول ۳- آنالیز شیمیای ماسه سیلیس [۱۵]

L.O.I	Al_2O_3	MgO	CaO	Fe_2O_3	Tio_2	SiO_2	Na_2O	K_2O
۰	۰/۲۷	۰/۰۵	۰/۴۴	۰/۰۲	۰/۰۱۴	۹۹/۱۰	۰/۰۱	۰/۰۰۸

الیاف استفاده شده در تحقیق حاضر عبارت است از: ۱- الیاف پلی پروپیلن اصلاح شده (کورتا) ماکرو، شرکت نانو نخ سیرجان، ۲- الیاف پلی وینیل الکل میکرو، شرکت میسون تولید چین، ۳- الیاف فولادی دمبلی شکل، شرکت همارا صنعت منفرد در تبریز می‌باشد. مشخصات الیاف مصرف شده در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴- مشخصات الیاف مصرف شده [۱۶ و۱۷]

نوع الیاف	مقاومت کششی (MPa)	وزن (gr/cm^3)	طول (mm)
پلی وینیل الکل	۸۸۰-۱۶۰۰	۱/۳	۶
کورتا	۴۵۰-۸۰۰	۰/۹۱	۳۸
فولادی	۱۰۰۰-۱۸۰۰	۷/۸۵	۳۶

۳- شرح آزمایش

هدف از انجام این تحقیق به‌دست آوردن یک طرح اختلاط با مقاومت فشاری بالا است. با تغییرات در مصالح ساخت بتن با عملکرد بسیار بالا، و در نظر گرفتن عمل آوری‌های مختلف به یک طرح بهینه دست یافته، و سپس شکل پذیری بتن با عملکرد بسیار بالای مسلح شده به الیاف مورد بررسی قرار گرفته شده است. مراحل کار تحقیق حاضر به ۳ بخش تقسیم می‌شود که عبارت‌اند از:

۱- به‌دست آوردن یک طرح اختلاط با مقاومت فشاری بالا با در نظر گرفتن عمل آوری‌های مختلف، بدون استفاده از الیاف و فشرده سازی.

۲- تعیین حداکثر الیاف قابل استفاده در بتن با عملکرد بسیار بالا، با شرایط آزمایشگاهی موجود.

۳- مقایسه‌ی خواص مکانیکی بتن با عملکرد بسیار بالای مسلح شده با الیاف فولادی با بتن با عمکرد بسیار بالای مسلح شده به الیاف پلی وینیل الکل و پلی پروپیلن اصلاح شده (کورتا) به صورت هیبریدی با درصدهای مختلفی از الیاف ذکر شده.

۳-۱- بخش اول: به‌دست آوردن طرح مخلوط با مقاومت فشاری بالا

با مطالعه مراجعه مختلف، که در زمینه‌ی بتن با عملکرد بسیار بالا تحقیقاتی انجام داده‌اند، این موضوع روشن می‌شود که هر کدام از محققین از روش‌های مختلفی برای ساخت بتن استفاده کرده، و نتایج گوناگونی را کسب کرده‌اند؛ به عبارتی برای طرح مخلوط، چگونگی مخلوط کردن، چگونگی متراکم کردن و عمل آوری بتن، روش‌های مختلفی پیش گرفته‌اند و اصول مشخصی را ارائه نکرده‌اند. بنابراین راه رسیدن به طرح اختلاط بتن با عملکرد بسیار بالا، تغییر مقادیر مصالح یک طرح اختلاط پایه (اولیه) می‌باشد. جهت دست‌یابی به طرح مخلوط مورد نظر چندین گام طی شده است که در ادامه به‌طور مفصل توضیح داده شده‌اند.

نمونه‌های استفاده شده جهت تست فشار و خمش به ترتیب، نمونه‌ها مکعبی ۷۰ میلی متری و آیین نامه در نظر گرفته شده ASTM C109/109M [۱۸] ، نمونه‌های ۳۵۰ × ۷۰ × ۷۰ و آیین نامه در نظر گرفته شده ASTM C1018 [۱۹] و ASTM C78-10 [۲۰] می‌باشد.

- **گام اول: تعیین طرح مخلوط پایه** (جدول ۵)

جدول ۵- طرح اختلاط پایه [۴]

۱	۱۱۰۰	سیمان
۰/۳	۳۳۰	میکروسیلیس
۰/۱۸	۲۰۰	ماسه‌ی سیلیسی۱ (۰/۲-۰/۵) (mm)
۰/۷۲۷	۸۰۰	ماسه‌ی سیلیسی۲ (۰/۵-۱/۴) (mm)
۰/۰۳	۳۳	فوق روان کننده
۰/۱۶	۱۸۱	آب
۰/۱۴	-	مواد سیمانی/ آب

- **گام دوم: تغییر در اندازه‌ی ماسه‌ی سیلیسی، سیمان و فوق روان کننده**

یکی از مصالح تشکیل دهنده‌ی بتن با عملکرد بسیار بالا، ماسه‌ی سیلیسی است. ماسه‌ی سیلیسی مقاومت بیش‌تری نسبت به ماسه‌های دیگر دارد؛ بنابراین در افزایش مقاومت فشاری بتن UHPC[1] نقش به سزایی ایفا می‌نماید. هم چنین کاهش اندازه‌ی سنگ‌دانه‌های در طرح مخلوط بتن باعث افزایش مقاومت فشاری

[1] Ultra high performance concrete

می‌شود، به همین منظور در این تحقیق به جای ماسه‌ی سیلیسی نوع ۱ با اندازه‌ی ۰/۵-۰/۲ میلی‌متر از پودر سیلیس با اندازه‌ی ۰/۱-۰ میلی‌متر استفاده شد. ماسه‌ی سیلیسی نوع ۲ با اندازه‌ی ۱/۴-۰/۵ میلی‌متر به ماسه‌ی سیلیسی با اندازه‌ی ۰/۴-۱/ میلی متر ۰ تغییر داده شد. این کاهش اندازه در سنگ دانه‌ها باعث افزایش وزن مخصوص طرح می‌شود. برای این‌که وزن مخصوص طرح ثابت بماند، میزان پودر سیلیس از ۱۸ درصد به ۱۵/۵ درصد کاهش داده شد؛ وهم چنین سیمان طرح پایه از ۱۱۰۰ کیلوگرم در هر متر مکعب به ۱۰۵۰ کیلوگرم بر هر متر مکعب کاهش داده شد.

کاهش سیمان در اقتصادی شدن طرح نیز بسیار مؤثر است. از طرف دیگر کاهش اندازه‌ی سنگ دانه‌ی مصرفی در طرح مخلوط باعث افزایش سطح مخصوص دانه‌ها می‌شود، که به تبع آن نیاز به آب افزایش یافته، و طرح مخلوط با کاهش روانی رو به رو می‌شود. با توجه به این‌که فوق روان کننده تأثیری در کسب مقامت فشاری بتن ندارد، لذا جهت رفع کاهش روانی، با ثابت نگه داشتن کل آب طرح اختلاط، میزان فوق روان کننده از ۳ درصد به ۴ درصد افزایش داده شده است. در جدول ۶، اولین طرح مخلوط بتن UHPC نشان داده شده است، که نسبت به طرح پایه افزایش مقاومت فشاری داشته است. طرح اختلاط به‌دست آمده در این گام به طرح مخلوط شماره‌ی (۱) نامگذاری شده است.

- **گام سوم: تغییر در میران نسبت آب به مواد سیمانی**

نسبت آب به مواد سیمانی تأثیر زیادی بر روی مقاومت فشاری بتن دارد و نسبت بهینه‌ی آن باعث بهبود فرآیند هیدراسیون می‌شود. در طرح مخلوط پایه‌ی مورد نظر، مقدار آب مصرفی توسط محقق طرح کاملاً بهینه گردیده است؛ اما با توجه به تغییر اندازه‌ی سنگ دانه‌ها در طرح حاضر، سطح مخصوص مصالح نیز به تبع آن تغییر خواهد کرد. بدیهی است که با تغییر در سطح مخصوص مصالح، مقدار بهینه‌ی آب مصرفی نیز تغییر می‌کند، به همین منظور در این گام میزان آب کل مصرفی به میزان یک درصد افزایش داده شد؛ که افزایش مقاومت فشاری نسبت به گام قبل داشته اشت. طرح اختلاط گام سوم، طرح مخلوط شماره‌ی (۲) نامگذاری شده است.

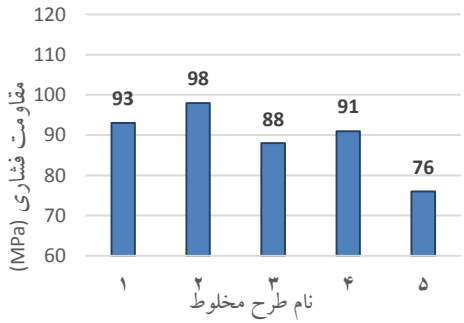
- **گام چهارم: کاهش مجدد در میزان نسبت آب به مواد سیمانی**

با توجه به روند صعودی مقاومت فشاری، در این مرحله نیز نسبت آب به مواد سیمانی مطابق جدول ۶ به میزان یک درصد مجدداً افزایش داده شده که نسبت به گام سوم کاهش مقاومت فشاری داشته است. طرح مخلوط گام سوم، طرح مخلوط شماره‌ی (۳) نامگذاری شده است.

- **گام پنجم: تغییر در نوع سیمان مصرفی**

در طرح اختلاط‌های گام اول تا چهارم، داده شده، سیمان استفاده شده سیمان سپاهان تیپ ۱ ویژه (۴۲۵-۱) می‌باشد. لذا در این گام تغییر نوع سیمان طرح مد نظر قرار گرفت. به همین منظور در طرح اختلاط شماره‌ی (۲)، با بیش‌ترین مقاومت فشاری، نوع سیمان از سیمان سپاهان به سیمان شهرکرد تیپ ۱ ویژه (۴۲۵-۱) و سیمان تیپ ۵ تغییر داده شد و سایر نسبت مصالح مطابق با طرح مخلوط شماره (۲) ثابت در نظر گرفته شد. در این تحقیق طرح اختلاط با سیمان شهرکرد تیپ ۱ ویژه با نام طرح شماره‌ی (۴) و طرح مخلوط با سیمان شهرکرد تیپ ۵ با نام طرح شماره‌ی (۵) نام گذاری شده است. مقادیر مقاومت فشاری نیز در این گام نسبت به مقدار حداکثر به‌دست آمده کم‌تر شده است.

در تمام مراحل پنج گانه‌ی فوق نمونه‌های مکعبی بتن با عملکرد بسیار بالا، با طرح اختلاط‌های به دست آمده بعد از قالب گیری در دمای معمولی آزمایشگاه قرار گرفتند. نمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعت از قالب خارج و درون آب با دمای ۱۵ °C به مدت ۷ روز مورد عمل آوری استاندارد قرار گرفتند. بعد از اتمام عمل آوری، بر روی نمونه‌ها آزمایش مقاومت فشاری انجام شده که نتایج آن در جدول۶ و شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- نمودار مقاومت فشاری طرح‌های مختلف

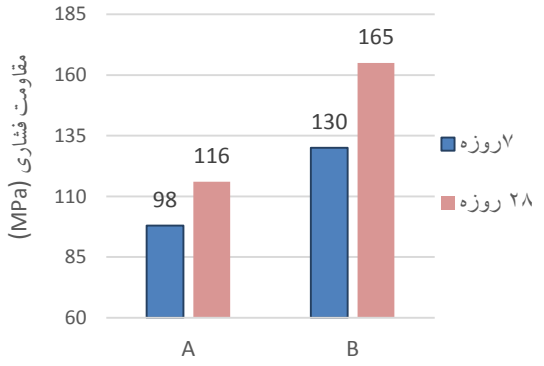
جدول ۶- طرح مخلوط‌های به‌دست آمده از مراحل پنج گانه‌ی تحقیق حاضر

	طرح مخلوط شماره (۱)		طرح مخلوط شماره (۲)		طرح مخلوط شماره (۳)		طرح مخلوط شماره (۴)		طرح مخلوط شماره (۵)	
سیمان (kg)	سپاهان تیپ ۱		سپاهان تیپ ۱		سپاهان تیپ ۱		شهرکرد تیپ ۱		شهرکرد تیپ ۵	
	۱۰۵۰	۱	۱۰۵۰	۱	۱۰۵۰	۱	۱۰۵۰	۱	۱۰۵۰	۱
میکروسیلیس (kg)	۳۱۵	۰/۳	۳۱۵	۰/۳	۳۱۵	۰/۳	۳۱۵	۰/۳	۳۱۵	۰/۳
پودر سیلیس (kg) mm (۰-۰/۱)	۱۶۲/۸	۰/۱۵	۱۶۲/۸	۰/۱۵	۱۶۲/۸	۰/۱۵	۱۶۲/۸	۰/۱۵	۱۶۲/۸	۰/۱۵
ماسه‌ی سیلیسی (kg) mm (۰/۱-۰/۴)	۷۶۴	۰/۷۳	۷۶۴	۰/۷۳	۷۶۴	۰/۷۳	۷۶۴	۰/۷۳	۷۶۴	۰/۷۳
فوق روان کننده (kg)	۴۲	۰/۰۴	۴۲	۰/۰۴	۴۲	۰/۰۴	۴۲	۰/۰۴	۴۲	۰/۰۴
آب (kg)	۱۷۳	۰/۱۶	۱۸۱	۰/۱۷	۱۸۹	۰/۱۸	۱۸۱	۰/۱۷	۱۸۱	۰/۱۷
مواد سیمانی/ آب	–	۰/۱۴	–	۰/۱۵	–	۰/۱۶	–	۰/۱۵	–	۰/۱۵
مقاومت فشاری ۷ روزه (MPa)	۹۳		۹۸		۸۸		۹۱		۷۶	

- **گام ششم: تغییر در نحوی عمل آوری**

عمل آوری نقش به سزایی در افزایش مقاومت فشاری بتن با عملکرد بسیار بالا دارد. از جمله عمل آوری‌های مؤثر بر مقاومت فشاری بتن، عمل آوری در آب داغ یا همان بخار می‌باشد. مقاومت فشاری بتن با عملکرد بسیار بالا تحت عمل آوری آب داغ بیش‌تر از مقاومت فشاری تحت عمل آوری استاندارد خواهد شد [۲ و۳]. در این تحقیق عمل آوری نمونه‌ها با آب با دمای $60\ ^{\circ}C$ مورد آزمایش قرار گرفت.

با توجه به عملکرد مناسب طرح مخلوط شماره (۲) به لحاظ کسب مقاومت فشاری بیش‌تر، دو نمونه‌ی مکعبی از طرح اختلاط شماره‌ی (۲) بعد از قالب گیری در دمای معمولی آزمایشگاه قرار گرفتند. نمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعت از قالب خارج و درون آب با دمای $60\ ^{\circ}C$ به مدت ۷ و ۲۸ روز مورد عمل آوری قرار گرفتند. بعد از اتمام عمل آوری، بر روی نمونه‌ها آزمایش مقاومت فشاری صورت پذیرفت. مقاومت فشاری به‌دست آمده برای سنین ۷ و ۲۷ روزه به ترتیب برابر است با ۱۳۰ MPa و ۱۶۵ MPa می‌باشد. در این گام ۲ نمونه هم از طرح مخلوط شماره‌ی (۲) ساخته شد و به مدت ۲۸ روز تحت عمل آوری استاندارد قرار گرفت تا بتوان با نمونه ۲۸ روزه عمل آوری با آب داغ مقایسه گردد. مقاومت فشاری ۲۸ روزه به‌دست آمده با عمل آوری استاندارد برابر با ۱۱۶ MPa می‌باشد. به منظور مقایسه نتایج، عمل آوری در حالت استاندارد با A و عمل آوری در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد، با B نشان داده شده است (شکل ۲).



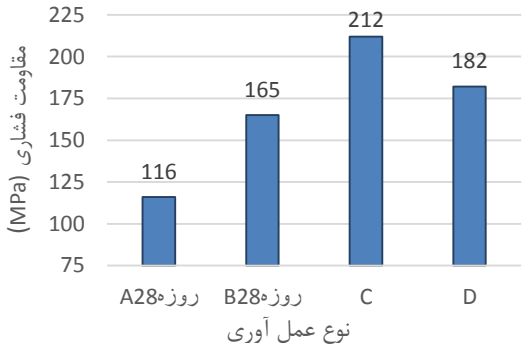
شکل ۲- نمودار مقاومت فشاری نمونه‌ها تحت عمل آوری A و B

- **گام هفتم: تغییر مجدد در عمل آوری**

عملیات حرارتی یک عامل سودمند برای افزایش مقاومت فشاری است. حرارت باعث افزایش سرعت واکنش‌های میکروسیلیس با هیدروکسید کلسیم موجود می‌گردد. در منابع مختلف از دمای $^{\circ}C$ ۲۵۰ به عنوان بهترین دما، برای اوج واکنش‌های میکروسیلیس و افزایش زنجیره‌ی ژل هیدرات سیلیکات کلسیم یاد شده است [۲]. در این تحقیق از دو نوع عمل آوری C و D به شرح زیر با دستگاه اتوکلاو در جهت افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی استفاده شده است.

عمل آوری C، تحت فشار ۲ بار و دمای ۱۱۹ °C و اون با دمای ۲۲۰ °C می‌باشد، نمونه‌ها ۳ روز در درون اتوکلاو و ۷ روز در درون اون قرار می‌گیرند. عمل آوری D نیز مشابه با عمل آوری C نمونه‌ها ۳ روز در فشار ۲ بار و دمای ۱۱۹ °C در اتوکلاو قرار می‌گیرند و در ادامه نمونه‌ها به مدت ۱۱ روز درون حوضچه آب با دمای ۶۰ °C ادامه عمل آوری را تجربه می‌کنند.

برای هر دو نوع عمل آوری C و D از طرح مخلوط شماره (۲) با ۲ تکرار استفاده شده است. نتایج مقاومت فشاری در حالات مختلف عمل آوری در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- نمودار مقاومت فشاری تحت عمل‌آوری مختلف

۳-۲- بخش دوم: تعیین حداکثر الیاف قابل استفاده در بتن UHPC

بتن با عملکرد بسیار بالا بتنی بسیار متراکم و یکنواخت می‌باشد. همین ویژگی باعث می‌شود که این بتن دارای مقاومت فشاری بسیار بالایی باشد. اما این مقاومت بالا باعث کاهش انعطاف پذیری در بتن، به علت افزایش خاصیت شکنندگی می‌شود. معمولاً برای بهبود و افزایش قابلیت انعطاف پذیری و جذب انرژی بیشتر بتن، بدون کاهش در مقاومت فشاری استفاده از الیاف به عنوان تقویت کننده‌ی بتن با عملکرد بسیار بالا توصیه می‌شود. هدف اصلی در این بخش از تحقیق حاضر بررسی تأثیر درصد الیاف پلی وینیل الکل میکرو و الیاف پلی پروپیلن اصلاح شده ماکرو (کورتا) به صورت هیبریدی بر روی مقاومت فشاری، شکل پذیری و طاقت بتن با عملکرد بسیار بالا می‌باشد. قابل ذکر است که از الیاف ماکرو و میکرو در طرح‌ها به صورت مساوی استفاده شده است.

عمل آوری صورت گرفته در این بخش از تحقیق حاضر، عمل آوری مرطوب (آب با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد) می‌باشد. در این عمل آوری بعد از نگهداری نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در قالب، نمونه‌ها به مدت ۱۴ روز در حوضچه‌ی آب قرار می‌گیرند.

۳-۲-۱- طرح اختلاط

هدف اصلی در این بخش بررسی مقاومت فشاری و شکل پذیری بتن با عملکرد بسیار بالای مسلح شده به درصدهای مختلف الیاف می‌باشد. پنج طرح اختلاط بتن الیافی ارائه شده در این تحقیق در جدول ۷ نشان داده شده است

جدول ۷- طرح اختلاط ارائه شده

طرح اختلاط	سیمان (kg)	میکروسیلیس (kg)	پودر سیلیس (۰/۱-۰) (kg)	ماسه سیلیس (۰/۴-۰/۱) (kg)	فوق روان کننده (kg)	آب (kg)	الیاف پلی وینیل الکل ٪	الیاف پلی پروپیلن اصلاح شده (کورتا)٪
A_0	۱۰۵۰	۳۱۵	۱۶۲/۸	۷۶۴	۴۲	۱۸۱	۰	۰
$A_{1.5}$	۱۰۵۰	۳۱۵	۱۶۲/۸	۷۶۴	۴۷/۵	۱۷۹	۰/۷۵	۰/۷۵
A_2	۱۰۵۰	۳۱۵	۱۶۲/۸	۷۶۴	۵۲/۵	۱۷۶	۱	۱
$A_{2.5}$	۱۰۵۰	۳۱۵	۱۶۲/۸	۷۶۴	۵۷/۷	۱۷۳	۱/۲۵	۱/۲۵
A_3	۱۰۵۰	۳۱۵	۱۶۲/۸	۷۶۴	۶۳	۱۶۹	۱/۵	۱/۵

چنان‌چه در جدول ۷ ملاحظه می‌شود میزان آب و فوق روان کننده در طرح اختلاط بتن الیافی متفاوت است. در بتن الیافی با افزایش الیاف میزان کارایی بتن کاهش می‌یابد. به همین جهت برای حفظ کارایی بتن میزان فوق روان کننده افزایش داده شده است. از آن‌جا که فوق روان کننده‌ی استفاده شده در تحقیق حاضر دارای ۶۰ درصد آب می‌باشد؛ لذا با افزایش فوق روان کننده میزان آب کل

طرح نیز افزایش می‌یابد. در این تحقیق به جهت ثابت ماندن شرایط و خصوصیات طرح، میزان آب کل ثابت نگه داشته شده است. پس به همین دلیل به اندازه آب اضافه شده توسط فوق روان کننده از آب طرح اختلاط کسر شده است.

۳-۲-۲- نتایج مقاومت فشاری

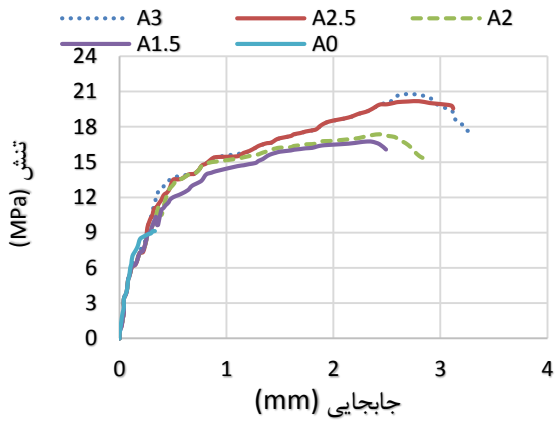
درشکل ۴ نتایج مقاومت فشاری با عمل‌آوری B در سن ۱۴ روز گزارش شده است. با توجه به این نمودار می‌توان به تفسیر اثر درصد الیاف بر روی مقاومت فشاری پرداخت.

شکل ۴- نمودار مقاومت فشاری با درصدهای مختلف الیاف

همان طور که از شکل ۴ مشخص می‌باشد. استفاده ۳ درصد الیاف بیش‌ترین کاهش مقاومت فشاری را به همراه دارد، چون ۱/۵ درص الیاف میکرو پلی وینیل الکل در این طرح استفاده شده، و این الیاف باعث ایجاد تخلخل در بتن و به تبع آن کاهش مقاومت فشاری می‌شود. طرح‌هایی که ۲ و ۱/۵ درصد الیاف در آن استفاده شده، چون میزان الیاف پلی وینیل الکل در آن‌ها کم است و از طرفی الیاف ماکرو که در افزایش مقاومت فشاری اثر مثبت دارد کاهش مقاومت فشاری ناشی از الیاف میکرو را جبران کرده و کاهش مقاومت بسیار ناچیز در حدود ۲ درصد می‌باشد.

۳-۲-۳- نتایج آزمایش خمش

در شکل ۵ نتایج مقاومت خمشی (بار-تغییر مکان) نمونه‌های بتن الیافی در سن ۱۴ روزه نشان داده شده است. با توجه به این شکل می‌توان به تفسیر اثر درصد الیاف بر روی شکل پذیری بتن پرداخت.



شکل ۵- نمودارهای خمشی برای طرح اختلاط‌های A_0، $A_{1.5}$، A_2، $A_{2.5}$، A_3.

شکل ۵ نشان می‌دهد که عضو بعد از اولین ترک (نقطه LOP[1] در محدود ۹ مگاپاسکال) با شیب ملایم افزایش باربری دارد تا لحظه‌ای که به اوج ظرفیت باربری (نقطه MOR[2]) خود می‌رسد، سپس با کاهش مقاومت رو به رو می‌شود تا این‌که عضو گسیخته می‌شود.

آیین نامه ASTM C1018 [۱۸] برای بررسی شکل پذیری عضو بتنی مسلح شده با الیاف از شاخص‌های طاقت (I_5، I_{10} و I_{20}) و برای بررسی میزان تحمل عضو در برابر بار بعد از ایجاد ترک از شاخص $R_{10,5}$ و $R_{20,10}$ استفاده کرده، که نحوه‌ی محاسبه‌ی آن‌ها در زیر بیان شده است.

شاخص طاقت I_5: شاخص مربوط به جابجایی معادل با ۳ برابر جابجایی در لحظه‌ی اولین ترک، از ابتدای بار گذاری.

شاخص طاقت I_{10}: شاخص مربوط به جابجایی معادل با ۵/۵ برابر جابجایی در لحظه‌ی اولین ترک، از ابتدای بار گذاری.

شاخص طاقت I_{20}: شاخص مربوط به جابجایی معادل با ۱۰/۵ برابر جابجایی در لحظه‌ی اولین ترک، از ابتدای بار گذاری.

$R_{5,10}$: نشان دهنده‌ی متوسط تحمل نمونه در برابر بار وارده در فاصله‌ی بین جابجایی‌های معادل با شاخص‌های I_5 و I_{10} می‌باشد، که از رابطه‌ی (۱) محاسبه می‌شود.

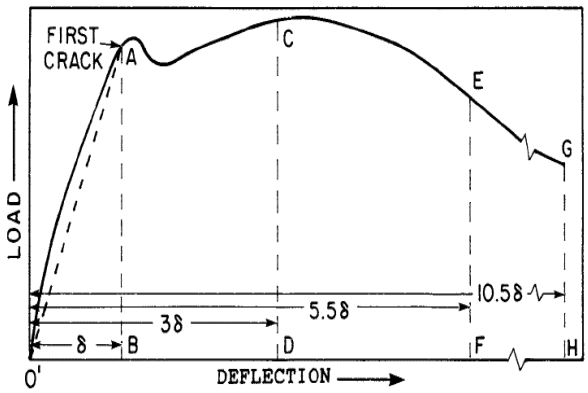
$$R_{5,10} = (I_{10} - I_5) \qquad (۱)$$

$R_{10,20}$: متوسط تحمل نمونه در برابر بار وارده در فاصله بین جابجایی‌های معادل با شاخص‌های I_{10} و I_{20} می‌باشد، که از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

[1] Limit of proportion

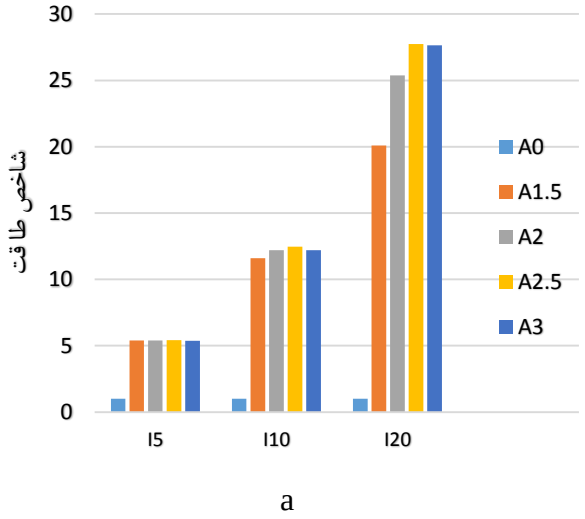
[2] Modulus of Rupture

$$R_{10,20} = (I_{20} - I_{10}) \quad (۲)$$

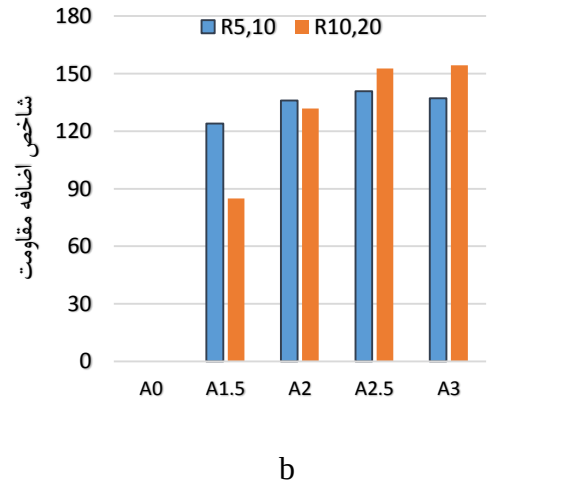


شکل ۶- نمودار محاسبه‌ی شاخص‌های طاقت [۱۹]

با توجه به شکل‌های ۵ و ۷ و جدول ۸ که حاصل نتایج تست خمش می‌باشد، مشخص است که با افزایش الیاف پلی پروپیلن اصلاح شده و الیاف پلی وینیل الکل شکل پذیری افزایش می‌یابد و عضو بارهای بیش‌تری را بعد از ایجاد اولین ترک تحمل می‌کند.



a



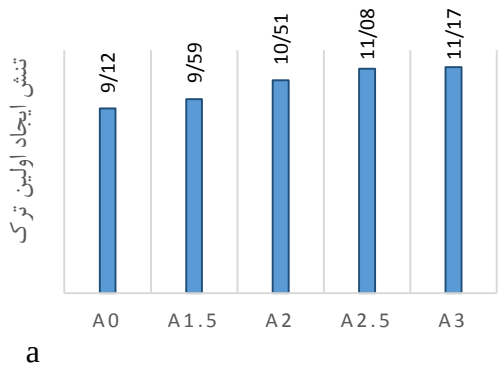
b

شکل ۷- نمودار شاخص طاقت و شاخص تحمل بار بعد از ترک

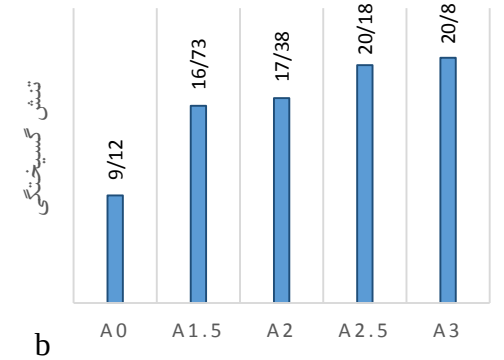
جدول ۸- بررسی شاخص طاقت و شاخص تحمل بار بعد از ترک

نام طرح	شاخص طاقت				تحمل بار بعد از ترک خوردگی
	I_5	I_{10}	I_{20}	$R_{5,10}$	$R_{10,20}$
A_0	۱	۱	۱	۰	۰
$A_{1.5}$	۵/۳۹	۱۱/۵۹	۲۰/۰۸	۱۲۴/۰۱	۸۴/۸۹
A_2	۵/۳۸	۱۲/۱۹	۲۵/۳۸	۱۳۶/۰۳	۱۳۱/۷۸
$A_{2.5}$	۵/۴۲	۱۲/۴۶	۲۷/۷۳	۱۴۰/۸۹	۱۵۲/۶۴
A_3	۵/۳۶	۱۲/۲۲	۲۷/۶۴	۱۳۷/۰۹	۱۵۴/۲۵

با توجه به این که الیاف پلی وینیل الکل یک الیاف آب دوست می‌باشد لذا مقداری از آب اختلاط را جذب می‌کند و سپس در فرآینده هیدراسیون شرکت کرده و چسبندگی قوی با بتن برقرار می‌کند. و همین چسبندگی باعث جلوگیری از ایجاد لغزش بین الیاف و بتن شده، به همین دلیل الیاف پلی وینیل الکل اجازی ترک خوردگی و باز شدن ترک‌های ریز در بتن را نمی‌دهد تا لحظه‌ای که خود الیاف گسیخته شود. چون الیاف پلی وینیل الکل دارای مقاومت کششی و مدول الاسیسیته‌ی بالایی است؛ پس در نتیجه تنش برای ایجاد اولین ترک در بتن را افزایش می‌دهد. در شکل ۸ نتایج تأثیر الیاف بر تنش ایجاد اولین ترک نشان داده شده است.



a



b

شکل ۸- نمودارهای تش گسیختگی و تنش ایجاد اولین ترک در بتن

۳-۳- بخش سوم: مقایسه خواص مکانیکی بتن UHPC مسلح شده با الیاف PP[1] اصلاح شده و الیاف PVA با بتن UHPC مسلح شده به الیاف فولادی

هدف اصلی در این بخش از تحقیق بررسی مقاومت فشاری، شکل پذیری و طاقت نمونه‌های مسلح شده به الیاف مختلف و مقایسه‌ی نتایج با نمونه‌های بدون الیاف می‌باشد. با توجه به این‌که بسیاری از محققان بیان کرده‌اند، الیاف در اندازه‌های خاص در یک محدوده‌ی مشخص از ترک‌ها کار می‌کنند، به این صورت که الیاف میکرو به عنوان یک پل برای جلوگیری از ترک‌های میکرو، و الیاف ماکرو در کنترل ترک‌های بزرگ‌تر نقش دارند، و در نتیجه گیری‌های خود نیز ذکر کرده‌اند که الیاف به صورت هیبریدی با اندازه‌های مختلف و نوع‌های مختلف نقش مهمی را در مقابله با ترک خوردگی بتن در مقیاس‌های مختلف ایفا می‌کنند [۷]؛ لذا نشان می‌دهد استفاده‌ی الیاف به صورت هیبریدی نسبت به الیاف تکی عملکرد بهتری دارند. در این تحقیق نیز الیاف به صورت تکی و هیبریدی در بتن UHPC استفاده شده است تا عملکرد آن‌ها بر خواص مکانیکی بتن مورد بررسی قرار گیرد.

جهت مقایسه عملکرد الیاف فولادی، الیاف PP اصلاح شده و الیاف PVA در بتن با عملکرد بسیار بالا، لازم است طرح اختلاط‌های ارائه شود. با در نظر گرفتن نتایجی که از بخش قبل به‌دست آمد، ۲ درصد الیاف هم کاهش مقاومت کم‌تری ایجاد کرده، و هم شکل پذیری مناسبی را برای بتن UHPC ایجاد کرده است؛ در نتیجه حداکثر الیافی که در طرح اختلاط‌ها استفاده شده است ۲ درصد می‌باشد. برای تعیین درصد بهینه الیاف ماکروPP اصلاح شده و میکرو PVA در بتن UHPC طرح اختلاط‌های مطابق جدول ۹ ارائه شده است. برای تعیین درصد الیاف فولادی از تحقیق‌های صورت گرفته در این زمینه استفاده شد، که اکثر محقیق ۲ درصد الیاف را پیشنهاد کرده‌اند در این تحقیق نیز از ۲ درصد الیاف استفاده شد. درصد استفاده الیاف بسیار به امکانات آزمایشگاه مثلاً مخلوط کن وابسته می‌باشد.

جدول ۹- طرح اختلاط بتن الیافی

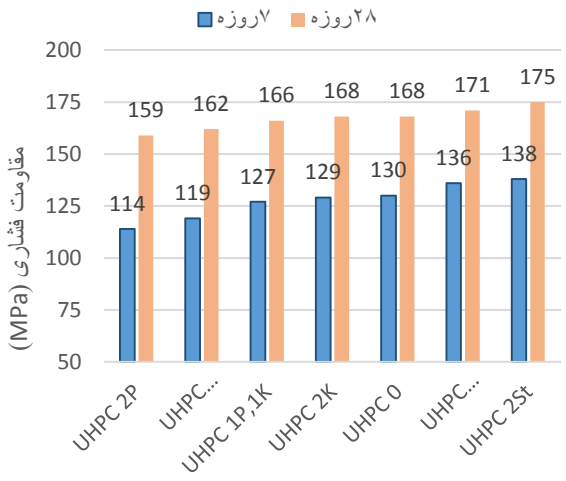
نام طرح‌ها	درصد الیاف پلی وینیل الکل	درصد الیاف پلی پروپیلن اصلاح شده(کورتا)	درصد الیاف فولادی
UHPC 0	۰	۰	۰
UHPC 2P	۲	۰	۰
UHPC 1.5P,0.5K	۱/۵	۰/۵	۰
UHPC 1P,1K	۱	۱	۰
UHPC 0.5P,1.5K	۰/۵	۱/۵	۰
UHPC 2K	۰	۲	۰
UHPC 2St	۰	۰	۲

۳-۳-۱- نتایج مقاومت فشاری

مقاومت فشاری نمونه‌های تقویت شده با الیاف پلی وینیل الکل، پلی پروپیلن اصلاح شده (کورتا) و فولاد و تأثیر این الیاف بر روی مقاومت فشاری ۷ روزه و ۲۸ روزه بتن با عملکرد بسیار بالا، با عمل آوری (B) در آب با دمای ۶۰°C در شکل ۹ آورده شده است.

به طور کلی با توجه به نتایج به‌دست آمده در ارتباط با تأثیر الیاف بر روی مقاومت فشاری، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

- مقاومت فشاری بتن مسلح شده به الیاف فولادی به دلیل این‌که الیاف مانع از جدا شدن بتن از هم تحت اثر فشار می‌شود، افزایش یافته.



شکل ۹- مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه با عمل آوری B

[1]Polypropylene

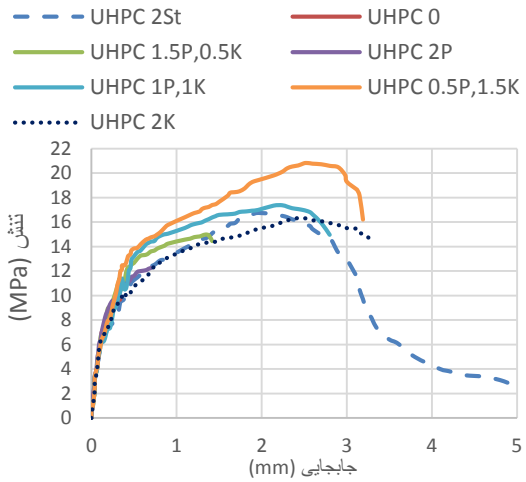
-مقاومت فشاری بتن مسلح الیاف پلی پروپیلن اصلاح شده (کورتا) تقریباً ثابت ماند است الیاف کورتا عملکردی نزدیک به الیاف فولادی دارد.

- مقاومت فشاری بتن مسلح شده با الیاف پلی وینیل الکل کاهش یافته است. دلیل کاهش ایجاد شده درمقاومت فشاری این می‌باشد که الیاف پلی وینیل الکل باعث ایجاد تخلخل در بتن گردید که همین امر سبب کاهش در مقاومت می‌شود.

- مقاومت فشاری بتن مسلح شده به صورت هیبریدی (۱/۵ درصد الیاف PP اصلاح شده و ۰/۵ درصد الیاف PVA) افزایش مقاومت داشته است. دلیل افزایش مقاومت فشاری این است که الیاف کورتا که باعث کاهش در مقاومت فشاری نمی‌شود و ۰/۵ درصد الیاف پلی وینیل الکل به دلیل حجم کم آن تخلخلی در بتن ایجاد نکرده و چسبندگی خوبی که این الیاف با بتن برقرار می کند. همین عوامل باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌شود.

۳-۳-۲- نتایج آزمایش خمش

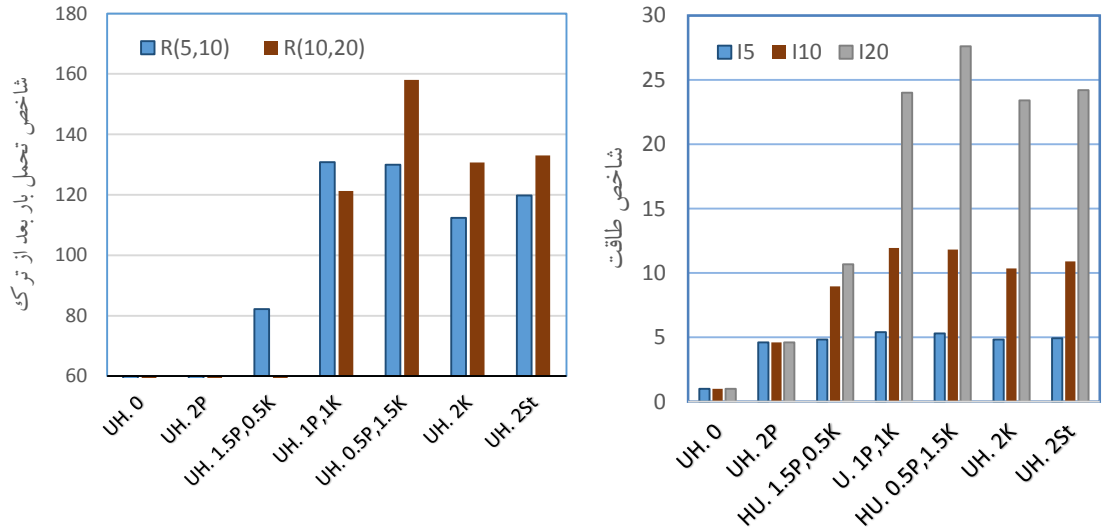
در شکل ۱۰ نتایج مقاومت خمشی (بار-تغییر مکان) نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه با عمل آوری B گزارش شده است، با توجه به این شکل می‌توان به تفسیر اثر درصد الیاف بر روی شکل پذیری بتن پرداخت. همان طور که در شکل ۱۰ مشخص است، الیاف ماکرو (الیاف فولادی و الیاف پلی پروپیلن اصلاح شده کورتا) باعث افزایش سطح زیر نمودار بار-جابجایی می‌شوند. و الیاف میکرو پلی وینیل الکل به دلیل چسبندگی قوی که با بتن دارد بیش‌تر باعث افزایش تنش ایجاد اولین ترک می‌شود.



شکل ۱۰- نمودار بار-جابجایی نمونه‌ها با ۲ درصد الیاف

شکست نمونه‌هایی که دارای الیاف ماکروی بیش‌تری هستند یا به عباری شکل پذیر می‌باشند، به این صورت است که نمودار بار-تغییر مکان تا لحظه ایجاد اولین ترک به صورت خطی با شیب نسبتاً زیادی افزایش بار دارد؛ پس از ایجاد ترک در عضو (نقطه‌ی LOP) شیب افزایش بار ملایم‌تر شده تا لحظه‌ای که به نقطه اوج تحمل بار (نقطه‌ی MOR) می‌رسد ، سپس با شیب منفی (کاهش در تحمل بار) به سمت پایین حرکت کرده تا در یک لحظه عضو کلاً گسیخته می‌شود.

نتایج به‌دست آمده برای شاخص های طاقت و میزان تحمل بار در عمل آوری با آب با دمای ۶۰ °C در شکل ۱۱ و جدول ۱۰ آورده شده است.



شکل ۱۱- نمودارهای شاخص طاقت و شاخص تحمل بار بعد از ترک

جدول ۱۰- بررسی شاخص طاقت و شاخص تحمل بار بعد از ترک خوردگی

نام طرح‌ها	I_5	I_{10}	I_{20}	$R_{5,10}$	$R_{10,20}$
UHPC 0	۱	۱	۱	۰	۰
UHPC 2P	۴/۶۱	۴/۶۱	۴/۶۱	۰	۰
UHPC 1.5P,0.5K	۴/۸۳	۸/۹۴	۱۰/۶۶	۸۲/۲	۱۷/۲
UHPC 1P,1K	۵/۴	۱۱/۹۴	۲۴	۱۳۰/۸	۱۲۱
UHPC 0.5P,1.5K	۵/۳	۱۱/۸	۲۷/۶	۱۳۰	۱۵۸
UHPC 2K	۴/۷	۱۰/۳۴	۲۳/۴۱	۱۱۲/۸	۱۳۰/۷
UHPC 2St	۴/۹۲	۱۰/۹	۲۴/۲	۱۱۹/۸	۱۳۳

با توجه به نمودارها و جداول مربوط به شاخص طاقت می‌توان موارد زیر را بیان کرد؛مدول گسیختگی (MOR) در نمونه‌های تقویت شده با الیاف نسبت به نمونه‌های فاقد الیاف افزایش یافته است. علت بهبود این است که الیاف با افزایش مقاومت کششی بتن، و مهار ترک‌های تولید شده در سطح بتن، با ایجاد یک پل ما بین دو طرف ترک، اجازه جدا شدن بیش‌تر را به بتن نمی‌دهد، با افزایش مقدار الیاف، مدول گسیختگی افزایش می‌یابد و علت این امر مربوط به مقدار الیاف در سطح بتن می‌باشد، زیرا به نیروی بیشتری نیاز است که بتواند بر تمامی الیاف پخش شده در اطراف ترک غلبه کرده و نمونه را گسیخته نماید. تنش برای ایجاد اولین ترک (LOP) در بتن برای نمونه‌هایی که در آن‌ها از الیاف پلی وینیل الکل استفاده شده افزایش یافته است. و این افزایش رابطه‌ی مستقیمی با افزایش الیاف پلی وینیل الکل دارد. دلیل افزایش تنش برای ایجاد اولین ترک این می‌باشد که الیاف پلی وینیل الکل استفاده شده از نوع معمولی است، و الیاف پلی وینیل الکل معمولی دارای خاصیت آب‌دوستی می‌باشد، این ویژگی باعث می‌شود الیاف مقداری از آب اختلاط را در خود جذب کرده و در فرآینده هیدراسیون شرکت کرده که باعث افزایش مقاومت فشاری و چسبندگی الیاف با بتن می‌شود. همین چسبندگی از لغزش الیاف در بتن جلوگیری کرده و اجازه ترک خوردن به بتن را نمی‌دهد تا زمانی که خود الیاف پاره گردد. تحمل بار بعد از ترک خوردن بتن در نمونه‌هایUHPC 0.5P,1.5K بیشتر از نمونه‌های بتن مسلح شده به الیاف فولادی می‌باشد، چون الیاف کورتا دارای وزن مخصوص کمتری نسبت به الیاف فولادی می‌باشد در نتیجه حجم الیاف بیشتری در بتن قرار می‌گیرد همین امر باعث می‌شود که نمونه بار بیشتری را تحمل کند.

٤- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر یک طرح اختلاط با مقاومت فشاری بالا به دست آمده است. میزان سیمان موجود در آن kg/m^3 ۱۰۵۰، نسبت آب به مواد سیمانی (w/c) ۰/۱۵ و فوق راون کننده به میزان ۰/۰۴ که تحت عمل آوری حرارتی (C) به مقاومت فشاری MPa ۲۱۲ رسیده است. الیاف استفاده شده الیاف فولادی، الیاف پلی وینیل الکل و الیاف پلی پروپیلن اصلاح شده (کورتا) می‌باشد. حداکثر الیاف استفاده شده ۲ درصد است که به صورت تکی و هیبریدی استفاده شده است. نتیجه‌های زیر از نتایج آزمایش‌ها به دست آمده است:

۱- عمل آوری نقش به سزایی در افزایش مقاومت فشاری بتن با عملکرد بسیار بالا دارد. عمل آوری در آب با دمای $60^{o}C$ نسبت به عمل آوری درآب با دمای $15^{o}C$ مقاومت فشاری را به میزان ۴۲ ٪ افزایش داده است.از میان عمل آوری‌های انجام شده عمل آوری حرارتی (C) بیش‌ترین مقاومت فشاری (۲۱۲ MPa) را برای نمونه‌ها ایجاد کرده است.

۲- الیاف پلی وینیل الکل به صورت تکی و در حجم زیاد باعث گلوله شده در بتن UHPC می‌گردد و در نتیجه تخلخل در بتن را افزایش داده که همین امر سبب کاهش ۶ ٪ مقاومت فشاری می‌شود. اما الیاف PVA به دلیل خاصیت آب دوستی پیوند قویی با بتن UHPC برقرار می‌کند که باعث افزایش ۲۰ ٪ در تحمل تنش‌های بیش‌تر برای ایجاد اولین ترک در نمونه‌ها می‌شود.

۳- الیاف فولادی و الیاف پلی پروپیلن از ایجاد ترک‌های کششی ناشی ازتنش‌های فشار در نمونه‌ها جلوگیری کرده و انسجام بیش‌تری را برای بتن UHPC ایجاد می‌کنند که باعث افزایش ۴ ٪ در مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌شوند.

۴- حداکثر الیاف قابل استفاده در بتن UHPC که باعث کاهش در مقاومت فشاری نمی‌شود ۲ ٪ حجمی می‌باشد. طرح‌های حاوی الیاف هیبریدی شکل پذیری بیش‌تری برای نمونه‌ها ایجاد کرده است. نمونه UHPC 0.5P,1.5K تنش خمشی ۲۱ MPa را تحمل کرده است و نسبت به طرح حاوی الیاف فولاد (UHPC 2St) حدود۱۹ ٪ بار بیش‌تری بعد از ترک خوردن تحمل کرده است. دلیل افزایش شکل پذیری در نمونه‌های UHPC 0.5P,1.5K نسبت به نمونه‌های UHPC 2St، وزن مخصوص الیاف می‌باشد. وزن مخصوص الیاف پلی پروپیلن (کورتا) ۰/۱۲۵ وزن مخصوص الیاف فولادی می‌باشد، به همین دلیل در یک درصد حجمی یکسان، الیاف کورتا بیش‌تر از الیاف فولادی در ترک‌ها قرار می‌گیرد. در نتیجه نیروی زیادی لازم است تا این الیاف را گسیخته سازد.

۵- مراجع

[1]. Schmidt, M., and Fehling, E., "Ultra-hight-performance Concrete: research, Developme and Application in Europe", ACI Special publication, Vol. 228, pp.51-78, 2005.

[2]. Ipek, M., Yilmaz, K., Sumer, M. and Saribiyik, M., "Efect of presetting pressure applied to mechanical behaviours of reactive powder concrete during setting phase", Construction and Building Materials., Vol. 25, No. 1, pp. 61-68, 2011.

[3]. Yazici, H., Yardimci Mert Y., Yigiter, H., Aydin Serdar and Turkel Selcuk, "Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag", Cement & Concrete Composites., Vol. 32, No. 8, pp. 639-648, 2010.

[4]. Mostofinejad, D., Rostami Nikoo, M., Hosseini, S.A., " Determination of optimized mix design and curing conditions of reactive powder concrete (RPC) ", Construction and Building Materials, Vol. 123, No. 1, pp. 756-767, 2016.

[5]. Banthia, N. F., Majdzadeh, J. Wu, and Bindiganavil, V., " Fiber synergy in Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HyFRC) in flexure and direct shear ", Cement and Concrete Composites, Vol. 48, pp. 91-97, 2014.

[6]. Yao, W., Li, J. and Wu, K., "Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction", Cement and concrete research, Vol. 33, No. 1, pp. 27-30, 2003.

[7]. Kanda, T., and Li, V.C., "Interface property and apparent strength of high-strengh hydrophilic fiber in cement matrix", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 10, No. 1, pp. 5-13, 1998.

[8]. Pan, Z., Wu, C., Liu, J., Wang, W., and Liu, J., "Study on mechanical properties of cost-effective polyvinyl alcohol engineered cementitious composites (PVA-ECC)", Construction and Building Materials, Vol. 78, No. 1, pp 397-404, 2015.

[9]. Yazici, H., Yardimci, M. Y., Aydin S. and Karabulut Anil s., "Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes", Construction and Building Materials, Vol. 23, No. 3, pp. 1223-1231, 2009.

[10]. Yildirim, S.T., Ekinci, C.E., and Findik, F., "Properties of hybrid fiber reinforced concrete under repeated impact loads", Russian Journal of Nondestructive Testing, Vol. 46, No. 7, pp. 538-546. 2010.

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

[۱۲]. آنالیز کارخانه سیمان شهرکرد، ۱۳۹۶.

[۱۳]. آنالیز کارخانه سیمان سپاهان، ۱۳۹۶.

[۱۴]. بررسی میکروسیلیس ازنا، شرکت بنیاد بتن نور اصفهان، ۱۳۹۶.

[۱۵]. بررسی ماسه‌ی سیلیس، شرکت مهندسی صنعت گستر لیدوما، ۱۳۹۵.

[۱۶]. آنالیز الیاف، شرکت میسون ونانو نخ سیرجان، ۱۳۹۶.

[۱۷]. مشخصات الیاف فولادی،شرکت بتن تبریز، ۱۳۹۶.

[18]. 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, 9 pp.

[19]. ASTM C 1018, "Standard Test Method for Flexural Toughness and First Crack Strength of Fiber Reinforced Concrete", ASTM International, USA, 8p, 1997.

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

Investigation of the Mechanical Properties of Ultra High Performance Concrete Unarmed and Armed with Steel fibers, Polypropylene and Polyvinyl alcohol

Ebrahim Hesami *
MSc. Student, Isfahan University of Technology (IUT)
Davood Mostofinejad
Professor, Isfahan University of Technology (IUT)
Mohammad Reza Eftekhar
Assistant Professor, Isfahan University of Technology (IUT)

Abstract

Concrete as the most consuming material Construction has long been a response to the growing needs of the human community, whose parameters are constantly changing. Scientists' research over the past two decades has led to the emergence of a new type of concrete with high properties and high compressive strength, which is known as concrete with ultra high performance. The main goal of the present study is to achieve a mixing design with a compressive strength suitable for ultra high performance concrete, without the use of fibers. First, the basic mixing plan has been considered, and with the change in the type and size of materials and also by applying different curing, the compressive strength of the samples has reached 212 MPa. To create ductility and absorption of energy in concrete made with mixing design The present research has used polyvinyl alcohol fibers, polypropylene fibers and steel fibers as a single and hybrid for the reinforcement of concrete. Maximum usable fibers, ductility, and compressive strength that make the fibers mentioned Single and hybrid for this concrete are determined and compared with each other. The results of this experimental study showed that samples containing 2% fiber had the best mechanical performance, as well as samples of 1.5% polypropylene fibers and 0.5% polyvinyl alcohol fibers The most ductility for concrete has been created.

Keywords: High performance concrete, mixing plan, curing, mechanical properties.

* Corresponding Author: ebrahim.hesami888@yahoo.com