تاثیر طول و ترکیب الیاف بر مقاومت فشاری و خمشی بتن

علی همتی[۱] ، داود نظری[۲] ، علیرضا مومن‌آبادی[۳]

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- ali.hemmati@semnaniau.ac.ir

۲- davoudnazari۷۰۷۳@gmail.com

۳- alireza.mo۵۵۱۵@gmail.com

چکیده :

استفاده از الیاف اغلب با هدف افزایش شکل‌پذیری و ظرفیت باربری بتن مورد نظر بوده و کنترل گسترش ترک به واسطه افزودن الیاف به بتن موجب این امر می‌گردد. الیاف به دلیل خاصیت پل زدن بر روی ریزترک‌ها باعث بهبود رفتار بتن بعد از ایجاد اولین ترک می‌شوند. در این مقاله ۱۵ طرح اختلاط بتن درقالب ۹۰ نمونه مکعبی به ابعاد (۱۵*۱۵*۱۵) سانتی‌متر برای انجام آزمایش مقاومت فشاری و ۴۲ نمونه به ابعاد (۶۰*۱۵*۱۵) سانتی‌متر برای انجام آزمایش مقاومت خمشی ساخته شده است. ۳طرح اختلاط به عنوان مرجع با ۳ نسبت آب به سیمان (۰/۲۴ ، ۰/۲۹ ، ۰/۳۴) بدون الیاف و با الیاف با ۳ طول مختلف الیاف پلی‌پروپیلن به ترتیب با طول‌های (۶، ۱۲، ۱۸) میلی‌مترساخته شد. یک طرح اختلاط با الیاف فلزی قلاب‌دار به طول ۴۰ میلی‌متر و نیز طرح اختلاطی دیگر با ترکیب الیاف فلزی قلاب‌دار به طول ۴۰ میلی متر و الیاف پلی‌پروپیلن به طول ۱۲ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفتند. برای افزایش روانی و کارایی بتن از ژل میکروسیلیس و فوق روان‌کننده استفاده شد. بالاترین میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه مربوط به نمونه های دارای الیاف ترکیبی با مقاومت ۷۲/۵۲ مگاپاسکال بود که ۱۲/۹ درصد نسبت به نمونه مرجع افزایش داشت. نمونه بتن دارای الیاف فلزی با میانگین مقاومت خمشی ۱۲/۸۵مگاپاسکال، بالاترین مقاومت را در بین تمامی طرح‌های اختلاط بتن این تحقیق داشته و نسبت به نمونه بدون الیاف ۶۰ درصد افزایش مقاومت خمشی را نشان می‌دهد. در نمونه‌های بتنی آزمایش شده با الیاف پلی‌پروپیلن پس از آزمایش مقاومت فشاری با افزایش طول الیاف پلی‌پروپیلن کارایی و مقاومت فشاری بتن کاهش یافت اما شکل پذیری نمونه‌های بتنی افزایش داشت. پس از آزمایش مقاومت خمشی با افزایش طول الیاف پلی‌پروپیلن مقاومت خمشی و شکل‌پذیری نمونه‌های بتنی افزایش یافت اما منجر به کاهش کارایی بتن گردید.

واژگان کلیدی:

الیاف پلی‌پروپیلن، الیاف فولادی، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی.

ویراستاری نشده

The effect of fiber length and composition on the compressive and flexural strength of concrete

A. Hemmati[۱] , D. Nazari[۲] , A. Momenabadi[۳]

۱. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran
۲.Msc , Department of Civil Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran
۳. Msc , Department of Civil Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

Abstract:

The use of fibers is often aimed at increasing the ductility and load-bearing capacity of the desired concrete, and controlling the spread of cracks by adding fibers to the concrete causes this. The fibers improve the behavior of the concrete after the first crack due to the bridging property on the micro-cracks. In this paper, ۱۵ concrete mixing designs in the form of ۹۰ cubic specimens with dimensions (۱۵ * ۱۵ * ۱۵) cm for compressive strength test and ٤۲ specimens with dimensions (۱۵ * ۱۵ * ٦۰) cm for flexural strength test have been made. ۳ mixing designs were made as a reference with ۳ water to cement ratios (۰,۲٤, ۰,۲۹, ۰,۳٤) without fibers and with fibers with ۳ different lengths of polypropylene fibers with lengths of (٦, ۱۲, ۱۸) mm, respectively. A mixing scheme with ٤۰ mm long hook metal fibers and another mixing scheme with a combination of ٤۰ mm hooked metal fibers and ۱۲ mm polypropylene fibers were investigated. Microsilica gel and super-lubricant were used to increase the smoothness and efficiency of concrete. The highest average compressive strength of ۲۸ days was related to samples with composite fibers with a resistance of ۷۲,۵۲ MPa, which was ۱۲,۹٪ higher than the reference sample. The concrete sample with metal fibers with an average bending strength of ۱۲,۸۵ MPa has the highest strength among all the concrete mixing designs of this research and shows a ٦۰٪ increase in bending strength compared to the sample without fibers. In the concrete samples tested with polypropylene fibers, after the compressive strength test, with the increase in the length of the polypropylene fibers, the workability and compressive strength of the concrete decreased, but the plasticity of the concrete samples increased. After the flexural strength test, the flexural strength and ductility of the concrete samples increased with the increase in the length of the polypropylene fibers, but it led to a decrease in the workability of the concrete.

Key words: Polypropylene fibers, steel fibers, compressive strength, flexural strength.

۱ ـ مقدمه و تاریخچه تحقیقات

بتن دارای یک نقطه ضعف مهم در خصوص مقاومت کششی می‌باشد که فاقد تحمل کرنش زیاد پس از رسیدن به مقاومت فشاری حداکثر می‌باشد و بعد از رسیدن به مقاومت فشاری حداکثر، بتن بصورت ترد دچار خرابی می‌گردد.

هدف اصلی استفاده از الیاف در بتن کنترل گسترش ترک است، به گونه‌ای که مقطع پس از تشکیل اولین ترک‌ها توانایی تحمل تغییر شکل و نیروی بیشتری را داشته باشد. الیاف به‌صورت تصادفی درون مخلوط بتن توزیع می‌شود و در عرض ترک‌ها پل زده، گسترش آن‌ها را کنترل کرده و از بهم پیوستن آن‌ها جلوگیری می‌نماید. در این حالت الگوی تشکیل و رشد ترک عامل گسیختگی، از یک ترک بزرگ به تعدادی ترک ریز تغییر می‌کند. پل زدن الیاف روی ریز ترک‌ها و جلوگیری از تشکیل ترک‌های بزرگ باعث افزایش شکل‌پذیری و توانایی جذب انرژی بتن می‌شود[۱].

در سال ۲۰۱۶ ارسلان پژوهشی را پیرامون تاثیرات الیاف بازالت و شیشه خرد شده با نسبت ۰/۵، ۱/۲ و ۳ کیلوگرم بر متر مکعب بر انرژی شکست و ویژگی‌های مکانیکی بتن انجام داد. به این منظور آزمایش سه نقطه‌ای خمش روی تیرهای شیاردار انجام شد. نتایج این تحقیق نشان داد که اضافه کردن الیاف بر انرژی شکست تأثیر قابل توجهی داشته ولی اثر قابل توجهی بر مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته نمونه های بتنی ندارد[۲]. فلاح حسینی و حاجی کریمی درخصوص درصد حجمی (۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد)، طول (۱۹، ۳۰ و ۵۰ میلیمتر) و شکل هندسی الیاف (ساده و شبکه) پلی‌اولفین در بتن پر مقاومت به این نتیجه رسیدند که افزایش طول الیاف، اثر مثبتی بر مشخصات مکانیکی و شکست بتن دارد[۳]. آلبرتی و همکاران مطالعه‌ای در مورد بتن الیافی خودتراکم با ترکیب الیاف پلی‌اولفین و فولادی قلاب دار انجام دادند. نتایج بیانگر آن بود که با ترکیب این دو الیاف، مقاومت خمشی و چقرمگی شکست بتن نسبت به نمونه با الیاف تکی افزایش می یابد[۴]. یو و همکاران مطالعه‌ای روی مقایسه رفتار خمشی بتن توانمند با الیاف فلزی ترکیبی با طول مختلف (۱۳، ۱۹/۵ و ۳۰ میلیمتر) انجام داده و نشان دادند که الیاف با طول متوسط و بلند، عملکرد خمشی را بهبود می‌بخشند. همچنین، استفاده از الیاف ترکیبی کوتاه و بلند، چقرمگی و رفتار ترک خوردگی را بهبود می‌بخشند[۵]. پاکروان و همکاران با بررسی ترکیب الیاف فولادی، پلیمری و طبیعی کوتاه در بتن گزارش کردند که ترکیب این الیاف، افزایش چقرمگی و جذب انرژی بتن را به همراه دارد[۶]. کومار و همکاران تأثیر افزودن الیاف پلی پروپیلن بر روسازی های بتنی را مطالعه و گزارش دادند که این الیاف تأثیر زیادی بر افزایش مقاومت سایشی و کاهش ترک خوردگی بتن روسازی دارند[۷]. بنتگری و همکاران با مطالعه بتن های حاوی الیاف پلی پروپیلن نشان دادند که کاربرد این الیاف، اثر مثبتی بر ارتقای مشخصات مکانیکی بتن، مقاومت آن در برابر جمع شدگی و آتش سوزی دارد. اما در خصوص مقاومت فشاری، نتایج گوناگون و گاهی مغایر با یکدیگر گزارش شده است[۸]. چن و همکاران با بررسی کاربرد الیاف فولادی موجود در لاستیک دریافتند که شکل این الیاف و نسبت ابعادی آنها تاثیر زیادی بر کارایی و کیفیت بتن دارد. با افزایش مقدار این الیاف به میزان ۰/۷۵درصد حجم بتن، مقاومت فشاری استاتیکی و دینامیکی بطور قابل توجهی بهبود یافته و به مقدار بیشینه رسید [۹]. لیانگ و همکاران با بررسی روسازی های بتن غلتکی مسلح به الیاف پلی پروپیلن دریافتند که افزودن این الیاف، اثر قابل توجهی بر مقاومت فشاری و کششی بتن غلتکی دارد. الیاف با طول کوتاه در افزایش مقاومت سنین اولیه و الیاف بلند در مسلح سازی بتن پس از آن موثرتر هستند[۱۰]. لیانگ و همکاران رفتار بتن مسلح به الیاف پلی پروپیلن به طول ۱۹ و ۵۰ میلی متر را در برابر حمله سولفاتی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که وجود الیاف کوتاه سبب افزایش بیشتر دوام این بتن گردید [۱۱]. کومار و همکاران با مطالعه رفتار برشی تیرهای بتن الیافی نشان دادند که ترکیب الیاف فولادی و پلی پروپیلن باعث افزایش سختی اولیه این تیرها، افزایش شکل پذیری آنها و نیز افزایش مقاومت برشی آنها گردید[۱۲]. بهمنی و مستوفی نژاد بررسی خواص مکانیکی بتن با عملکرد بسیار بالای مسلح شده به الیاف پلی پروپیلن و الیاف ماکروی مصنوعی در بتن را در ستور کار قرار دادند. میزان کلی الیاف در همه نمونه ها معادل ۱/۵ درصد حجم بتن در نظر گرفته شد. نتایج بیانگر آن بود که تمامی نمونه‌های مسلح شده به انواع الیاف به مقاومت خمشی بیش از ۸ مگا پاسکال رسیدند[۱۳].

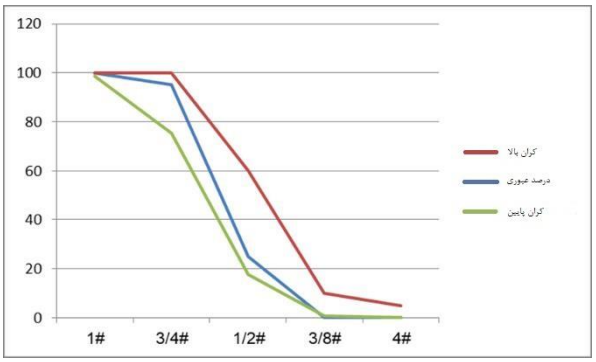
قاسمی و همکاران در سال ۱۳۹۸ بـه بررسـی اثـر ترکیـب الیـاف فولادی و پلی‌پروپیلن به همراه سنگدانه‌های بازیـافتی بـر مقاومـت بتن پرداختند. نتایج بیانگر افزایش طاقت نمونه‌ها بود[۱۴]. دنگ و همکاران اثر مشخصات الیاف بر مقاومت سایشـی بـتن بازیـافتی را مطالعـه نمودنـد. نتـایج نشـان داد کـه بـا افـزایش طـول الیـاف پلی‌پروپیلن، مقاومت سایش این بتن‌ها نیز افزایش یافت[۱۵]. علی و همکاران نیز نشان دادند که افزایش طول الیـاف سـبب افـزایش انرژی شکست نمونه هـای بـتن الیـافی مـی‌گـردد[۱۶]. دینـگ و همکاران با مطالعه بر روی الیاف پلـی وینیـل الکـل در بـتن هـای توانمند به این نتیجه رسیدند که طول ۹ تا ۱۰ میلـی متـر، طـول بهینه این الیاف برای این نوع بتن اسـت[۱۷]. انـور و همکـاران بـا مطالعه اثر طول الیاف پلی پروپیلن شامل الیاف به طول ۳، ۶ و ۱۲ میلی متر بر مشخصات بتن سبک گازی به این نتیجه رسیدند کـه مقاومت فشاری و خمشی بتن با افـزایش طـول ایـن الیـاف، زیـاد می‌شود[۱۸].

همان گونـه کـه مشـاهده مـی شـود مطالعـات متعـددی بـر روی مشخصات الیاف و نیز ترکیب آنها با یکـدیگر و اثـر آن بـر ویژگـی های بتن انجام شده است. اما ایـن بیشـتر ایـن مطالعـات بـر روی بتن‌های توانمند و خاص بـا الیـاف فولـادی، بازیـافتی یـا پلیمـری متمرکز بوده است. در حالی که معمولا مقاومت فشاری بتن حـاوی الیاف پلی‌پروپیلین نسبت به بتن معمولی افزایش چندانی ندارد اما ضرورت استفاده از آن به جهت قیمت مناسب و دسترسی آسان در کشور اجتناب ناپذیر به نظر می‌رسد. به همین منظـور الیـاف پلـی پروپیلن به طول های ۶، ۱۲ و ۱۸ میلیمتر و الیاف فولادی به طول ۴۰ میلی متر برای انجام این تحقیق انتخاب گردید. در این مقالـه، کاربرد الیاف پلی‌پروپیلن با طول‌های متفاوت با در نظر گرفتن سـه نسبت آب به سیمان و نیز در ترکیب با الیاف فولادی جهت بررسی مشخصات فشاری و خمشی بتن بررسی می شود.

۲- مواد و روش‌ها

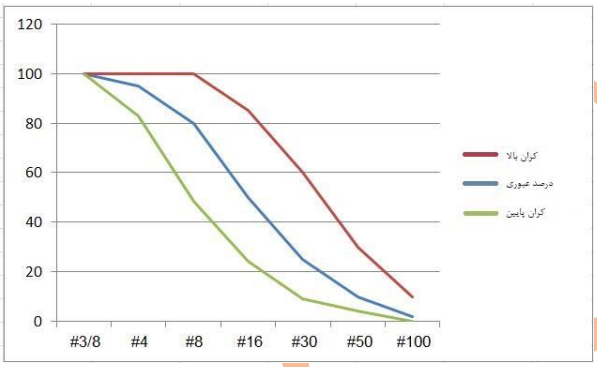
مصالح مصرفی

درشت دانه مصرفی مطابق بـا دانـه بنـدی اسـتاندارد سـنگدانه‌هـا *ASTM_C۳۳* [۱۹] تا حداکثر اندازه ۲۵ میلی‌متر تهیه شده کـه مدول نرمی آن ۳/۰۷۴ بود(شکل۱).



شکل۱: نمودار دانه بندی شن

ریز دانه مطابق دانه بنـدی مجـاز اسـتاندارد *ASTM_C۳۳* [۱۹] تهیه شده است که مدول نرمی آن طبق اسـتاندارد *ASTM-C۳۳* ، ۴/۳ تعیین شد (شکل۲).



شکل۲: نمودار دانه بندی ماسه

سیمان پرتلند تیـپ ۲ بـا اسـتاندارد *ASTM_C۱۵۰* [۲۰]، بکـار رفت که ویژگی های آن در جدول۱ ارائه شده است.

جدول ۱: ویژگی های سیمان

ویژگی‌های فیزیکی سیمان پرتلند نوع ۲		
ویژگی		*ISIRI ۳۸۹ & ASTM C-۱۵۰*
سطح مخصوص- بلین(سانتی متر بر گرم)		حداقل ۲۸۰۰
انبساط اتوکلاو(درصد)		حداکثر ۰/۸
زمان گیرش	اولیه (دقیقه)	حداقل ۴۵
	ثانویه (ساعت)	حداکثر ۶
مقاومت فشاری (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)	۳ روزه	حداقل ۱۰۰
	۷ روزه	حداقل ۱۷۵
	۲۸ روزه	حداقل ۳۱۵
ویژگی‌های شیمیایی سیمان پرتلند نوع ۲		

ویژگی	کارخانه	ISIRI ۳۸۹ & ASTM C-۱۵۰
اکسید سیلیسیم	۲۱/۱۱	حداقل ۲۰
اکسید آلومینیوم	۴/۴۸	حداکثر ۶
اکسید آهن	۳/۹۱	حداکثر ۶
اکسید منیزیم	۱/۳۷	حداکثر ۵
اکسید کلسیم	۶۳/۳۴	-
باقیمانده نامحلول	-	حداکثر ۰/۷۵
کسر وزن در اثر سرخ شدن	-	حداکثر ۳
تری اکسید گوگرد	۲/۵	حداکثر ۳
سه کلسیم آلومینات	۵/۱	حداکثر ۸

ژل میکروسیلیس (*SF-MIX*) : یکی از مناسب ترین افزودنی های بتن در مناطق همجوار با آب دریا و یا در معرض هجوم یون های خورنده کلر و سولفات می باشد که به دلیل دارا بودن ترکیب پوزولانی، علاوه بر افزایش روانی و مقاومت های مکانیکی بتن، سبب نفوذ ناپذیری در برابر آب و املاح خورنده و در نهایت افزایش دوام بتن خواهد شد. مشخصات فیزیکی و شیمیایی ژل‌میکروسیلیس در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات فیزیکی و شیمیایی ژل میکروسیلیس

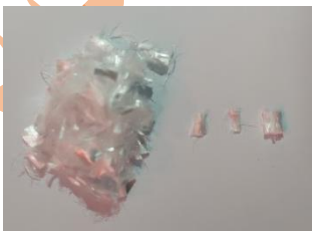
نوع ژل میکروسیلیس	ژل میکروسیلیس *SF-MIX*
حالت فیزیکی	ژله ای
رنگ	خاکستری
وزن مخصوص	۱/۳ ±۰/۰۵ (gr/cm^3)
یون کلر	ندارد
PH	۹ تا ۱۰
استاندارد	*ASTM C ۴۹۴ & C ۱۲۰۲*
میزان مصرف	۵ الی ۱۰ درصد وزن سیمان
زمان وشرایط نگهداری	تا یک سال در انبار مناسب دور از یخ زدگی و تابش مستقیم آفتاب

فوق روان‌کننده (*PX-MIX*) : محصولی پلیمری با ترکیبات خاص بر پایه پلی‌کربوکسیلات اتر بوده که نقش عمده‌ای در بهبود خواص رئولوژی بتن از جمله روانی، مقاومت فشاری و دوام به عنوان یک افزودنی سودمند دارد. این محصول بطور چشمگیری کارایی ملات و بتن را با ثابت نگه داشتن نسبت آب به سیمان افزایش می‌دهد. این محصول فاقد یون کلر بوده و هیچ گونه تاثیر نامناسبی روی بتن و آرماتورها ندارد. مشخصات فیزیکی و شیمیایی فوق روان-کننده در جدول ۳ ارائه شده است.

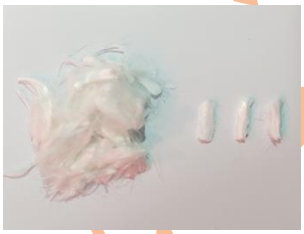
جدول ۳- مشخصات فیزیکی و شیمیایی فوق روان‌کننده

نوع فوق روان کننده :	فوق روان کننده *PX-MIX*
حالت فیزیکی :	مایع
رنگ :	زرد روشن
وزن مخصوص :	۱/۰۳ ±۰/۰۱ (gr/cm^3)
PH :	۵ الی ۶
استاندارد :	*ISIRI ۲۹۳۰ – ۲ & ASTM C ۴۹۴ TYPE F*

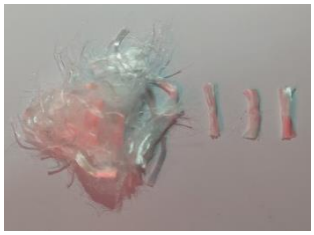
الیاف استفاده شده در این مقاله الیاف پلی‌پروپیلن و فولادی قلابی موج دار می‌باشد. الیاف پلی‌پروپیلن در طول های ۶ ، ۱۲ و ۱۸ میلی متر استفاده شد که در اشکال۳ ، ۴ ، ۵ نشان داده شده است. مشخصات این الیاف نیز در جدول۴ ارائه شده است و برای هر سه طول الیاف یکی می‌باشد.



شکل ۳- الیاف طول ۶ میلی متر



شکل ۴- الیاف طول ۱۲ میلی متر



شکل ۵- الیاف طول ۱۸ میلی متر

جدول ۴- مشخصات الیاف پلی پروپیلن

رنگ ظاهری	سفید	*درصد ازدیاد طول*	۸۰ درصد
وزن مخصوص	۰/۹۱ gr/cm^3	*غوطه وری در آب*	۳ الی ۵ ثانیه
قطر	۲۳ میکرون	*محدوده ذوب*	۱۶۵ درجه سانتی گراد
مقاومت کششی	۴۰۰*Mpa*	–	–

در این مقاله از الیاف فولادی قلاب‌دار با طول ۴۰ میلی متر استفاده شد(شکل۶) که مشخصات این الیاف نیز در جدول۵ ارائه شده است.

شکل ۶- الیاف فلزی

جدول ۵- مشخصات الیاف فولادی قلاب‌دار

نوع جنس	فولاد کم‌کربن و نورد سرد
رنگ	خاکستری و مسی
وزن مخصوص	۷/۸ ± ۰/۱ g/cm^3
طول	۳۵-۵۰*mm*
قطر	۰/۸-۱/۲ *mm*
مقاومت کششی	۷۰۰-۱۲۰۰ *Mpa*
مقاومت خمشی	۱۸۰-۲۱۰ *Mpa*

آب استفاده شده در این مقاله، از آب شرب شهرسمنان تهیه شده که از نظر کیفیت مورد قبول است.

شرح آزمایشات

آزمایش مقاومت فشاری

در این مقاله برای آزمایش مقاومت فشاری از نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۵۰*۱۵۰*۱۵۰ میلی‌متر استفاده شد. همچنین استاندارد ملی ایران ۶۰۴۸ نیز مورد استفاده قرار گرفته است[۲۱].

آزمایش مقاومت خمشی

این آزمایش بر اساس استاندارد *ASTM C ۲۹۳*، [۲۲] به وسیله‌ی دستگاه خمش جک یونیورسال *SANTAM* و به صورت خمش سه‌نقطه‌ای انجام گرفته است.

آزمایش اسلامپ

این آزمایش بر اساس استاندارد *ASTM-C ۱۴۳* [۲۳] انجام گرفته است. نتایج بدست آمده از آزمایش اسلامپ در این مقاله قبل از اضافه نمودن فوق روان کننده، ژل میکروسیلیس و الیاف، در نسبت آب به سیمان ۰/۲۴ در طرح‌های مختلف طرح اختلاط محدوده ۱۰ الی ۲۰ میلی‌متر و در نسبت آب به سیمان ۰/۲۹ در طرح‌های مختلف طرح اختلاط در محدوده ۲۰ الی ۳۵ میلی‌متر و در نسبت آب به سیمان ۰/۳۴ اسلامپ اندازه‌گیری شده در طرح‌های مختلف طرح اختلاط در محدوده ۳۵ الی ۵۰ میلی‌متر بوده است.

عمل‌آوری

بعد از خارج کردن نمونه‌ها از قالب، با رعایت الزامات مبحث نهم مقررات ملی ساختمان نمونه‌ها به حوضچه‌ی آب انتقال داده شدند سپس نمونه‌ها بعد از گذشت ۷ و ۲۸ روز از حوضچه‌ی آب خارج شده و مورد آزمایش قرار گرفتند.

طرح اختلاط

در ابتدا برای رسیدن به یک طرح اختلاط هدف، چند طرح اختلاط بتن را مورد بررسی قرار داده و برای هر طرح سه نمونه بتن مکعبی به ابعاد (۱۵*۱۵*۱۵) سانتی‌متر ساخته شد و پس از عمل‌آوری و انجام آزمایش مقاومت فشاری بر اساس استاندارد ملی ایران ۶۰۴۸ [۲۱] با استفاده از جک بتن‌شکن، مقاومت ۷ روزه تمامی طرح‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نسبت های آب به سیمان مختلف (۰/۲۳، ۰/۲۶، ۰/۲۹، ۰/۳۲، ۰/۳۵ و ۰/۳۸) انتخاب و

ویراستاری نشده

نمونه های بتنی ساخته شد. رسیدن به مقاومت فشاری حدود ۵۰ مگاپاسکال به عنوان هدف اولیه این تحقیق مورد نظر بود که از میان این تعداد طرح اختلاط‌هایی که مقایسه شد، یک طرح به نام طرح ($T_M۲$) به عنوان طرح اختلاط مرجع انتخاب گردید. مقاومت فشاری میانگین نمونه های مکعبی با این طرح اختلاط برابر ۵۱/۸۵ مگاپاسکال بود. نسبت آب به سیمان در این طرح مرجع ۰/۳۴ بود که منجر به بالاترین مقاومت فشاری گردید.

پس از انجام آزمایش‌های مورد نیاز، ۱۴ طرح انجام گرفته در این پژوهش به شرح ذیل می‌باشد(جدول۶). از طرح اختلاط ($T_M۲$) تمامی پارامترها را ثابت در نظر گرفته و فقط پارامتر نسبت آب به سیمان را متغیر فرض نموده و نمونه‌های مرجع با نسبت آب به سیمان (۰/۲۴ ، ۰/۲۹ ، ۰/۳۴) به ترتیب به نام‌های ($M۰$، $M۱$، $M۲$) در ابعاد مکعبی (۱۵*۱۵*۱۵) سانتی‌متر برای انجام آزمایش مقاومت فشاری به تعداد ۱۸ نمونه و در ابعاد (۶۰*۱۵*۱۵) سانتی‌متر برای انجام آزمایش مقاومت خمشی به تعداد ۹ نمونه بتنی ساخته شد. علت انتخاب این نسبت های آب به سیمان که با گام های کاهشی ۰/۰۵ از نسبت مرجع ۰/۳۴ در نظر گرفته شده، بررسی امکان افزایش بیشتر مقاومت فشاری و خمشی بتن با کاهش نسبت آب به سیمان بود.

مشخصات سایر طرح های اختلاط شامل نمونه های بتنی حاوی الیاف پلی پروپیلن با طول های مختلف ۶، ۱۲ و ۱۸ میلی متر و نسبت های متفاوت آب به سیمان ۰/۲۴، ۰/۲۹ و ۰/۳۴، نمونه های بتنی حاوی الیاف فولادی قلاب دار به طول ۴۰ میلی متر با نسبت آبه سیمان ۰/۲۹ که میانگین سه نسبت آب به سیمان فوق الذکر است و نیز ترکیب الیاف فولادی قلابدار ۴۰ میلی متری و الیاف پلی پروپیلن ۱۲ میلی متری با نسبت آب به سیمان ۰/۲۹ در جدول۶ ارائه شده است.

پس از عمل‌آوری تمامی نمونه‌های فوق، آزمایش مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه طبق استاندارد $ASTM_C۳۳$ [۱۹] و آزمایش مقاومت خمشی ۲۸ روزه طبق استاندارد $ASTM\ C۲۹۳$ انجام گرفت [۲۲]. ضمنا میانگین وزن مخصوص بتن مرجع ۲۲۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب و برای بتن الیافی با الیاف پلی‌پروپیلن ۲۲۸۹ کیلوگرم برمترمکعب، برای بتن با الیاف فولادی ۲۳۵۸کیلوگرم برمترمکعب و برای بتن با الیاف ترکیبی ۲۳۶۷ کیلوگرم برمترمکعب اندازه گیری شد.

همان گونه که در شکل ۷ نشان داده شده، الیاف کوتاه معمولا بر روی ترک های ریز پل می زنند و از به هم پیوستن آنها و شکل گرفتن ترک های بزرگتر جلوگیری می نمایند. این شرایط می تواند منجر به افزایش مقاومت و طاقت بتن گردد. با افزایش بارگذاری و تشکیل ترک های بزرگتر، الیاف با طول بلند وارد عمل شده و با گسترش این ترک ها مقابله می کنند که می تواند منجر به افزایش شکل پذیری بتن شود [۶].

شکل ۷: چگونگی عملکرد الیاف با طول های متفاوت در بتن [۶]

ویرایشگاری نشده

جدول ۶: طرح‌های اختلاط بتن

مصالح و مواد افزودنی / نام‌طرح	W/C	سیمان (kg/m^3)	شن (kg/m^3)		ماسه (kg/m^3)	آب (kg/m^3)	ژل میکروسیلیس (kg/m^3)	فوق روان کننده (kg/m^3)	الیاف پلی پروپیلن (kg/m^3)	الیاف فلزی (kg/m^3)
			حداکثر اندازه ۲۵mm	حداکثر اندازه ۱۲/۵mm						
T-M۲	۳۲ %	۶۵۰	۴۳۱/۸۸	۳۵۹/۹	۶۴۷/۸۲	۱۶۱/۲	۴۵/۵	۳/۹	-	-
M۰	۲۴ %	۶۵۰	۴۳۱/۸۸	۳۵۹/۹	۶۴۷/۸۲	۱۰۷/۹	۴۵/۵	۳/۹	-	-
M۱	۲۹ %	۶۵۰	۴۳۱/۸۸	۳۵۹/۹	۶۴۷/۸۲	۱۴۰/۴	۴۵/۵	۳/۹	-	-
M۲	۳۴ %	۶۵۰	۴۳۱/۸۸	۳۵۹/۹	۶۴۷/۸۲	۱۷۲/۹	۴۵/۵	۳/۹	-	-
P۰	۲۴ %	۶۵۰	۴۳۱/۸۸	۳۵۹/۹	۶۴۷/۸۲	۱۰۷/۹	۴۵/۵	۳/۹	۹/۱	-
P۱	۲۹ %	۶۵۰	۴۳۱/۸۸	۳۵۹/۹	۶۴۷/۸۲	۱۴۰/۴	۴۵/۵	۳/۹	۹/۱	-
P۲	۳۴ %	۶۵۰	۴۳۱/۸۸	۳۵۹/۹	۶۴۷/۸۲	۱۷۲/۹	۴۵/۵	۳/۹	۹/۱	-
F۱	۲۹ %	۶۵۰	۴۳۱/۸۸	۳۵۹/۹	۶۴۷/۸۲	۱۴۰/۴	۴۵/۵	۳/۹	-	۷۸/۵
H۱	۲۹ %	۶۵۰	۴۳۱/۸۸	۳۵۹/۹	۶۴۷/۸۲	۱۴۰/۴	۴۵/۵	۳/۹	۹/۱	۷۸/۵

۳- نتایج و بحث

نتایج آزمایش مقاومت فشاری

با استفاده از نتایج به دست آمده از دستگاه آزمایش (جک بتن شکن) در این تحقیق می‌توان اظهار داشت که طرح اختلاط بتن الیافی با الیاف ترکیبی ($H1$) با الیاف فلزی قلاب‌دار به طول ۴۰ میلی‌متر و الیاف پلی‌پروپیلن به طول ۱۲ میلی‌متر بهترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه را در بین تمام طرح‌های اختلاط بتن این تحقیق داشته است.

پس از شکست نمونه‌های مکعبی استاندارد به ابعاد(۱۵*۱۵*۱۵) سانتی‌متر و آشکار شدن عمق بتن به واسطه ترک‌های بزرگتر مشاهده گردید که الیاف‌های فلزی قلاب‌دار به طول ۴۰ میلی‌متر در داخل بتن بین ترک‌ها پل زده و باعث جلوگیری از گسترش ریز ترک‌ها به ترک‌های بزرگتر شده است و الیاف پلی‌پروپیلن نیز نقش جلوگیری از به‌وجود آمدن و گسترش ریز ترک‌ها را دارد و الیاف‌ها در بین ترک‌های ریز بتن پل می‌زنند. وجود این دو الیاف که در فوق به آن اشاره شد در کنار هم بهترین نقش را ایفا کرده و موجب افزایش شکل‌پذیری و ظرفیت باربری در بتن شده است.

در بین طرح‌های اختلاط (P) با طول مختلف الیاف پلی پروپیلن (۶، ۱۲ و ۱۸ میلی متر) و نسبت های مختلف آب به سیمان (۰/۲۴، ۰/۲۹ و ۰/۳۴)، میانگین مقاومت فشاری در مورد نمونه های با نسبت آب به سیمان ۰/۲۴، مربوط به نمونه (P-۰-۶) با

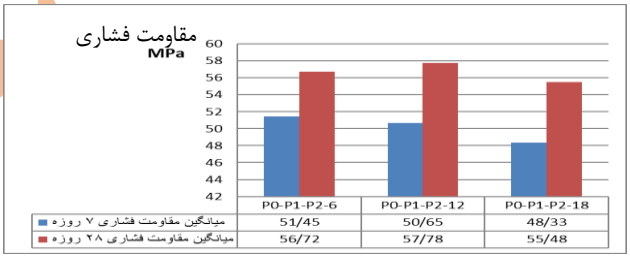
۶۳/۹۹ مگاپاسکال می‌باشد. در نسبت آب به سیمان ۰/۲۹، بالاترین میانگین مقاومت فشاری مربوط به طرح اختلاط (P ۱-۱۲) به میزان ۶۰/۲۴ مگاپاسکال و در نسبت آب به سیمان ۰/۳۴، بیشینه میانگین مقاومت فشاری مربوط به طرح اختلاط (P ۲-۱۲) با مقدار ۵۱/۲۷ مگاپاسکال است. همان گونه که مشاهده می شود با افزایش نسبت آب به سیمان، مقاومت فشاری نمونه های دارای الیاف پلی پروپیلن کاهش یافته اما طول الیافی که منجر به این مقدار بیشینه می شود، افزایش می یابد. یعنی در نسبت آب به سیمان کمتر، الیاف با طول کمتر و در نسبت آب به سیمان بیشتر، طول الیاف بزرگتر منجر به بیشترین مقاومت فشاری برای بتن می گردد.

پس از شکست نمونه‌ها برای آزمایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه و مشاهده عمق ترک ها در بتن می‌توان اظهار داشت که الیاف پلی‌پروپیلن با طول ۱۸ میلی‌متر پل زدن بهتری را نسبت به الیاف پلی‌پروپیلن با طول ۶ و ۱۲ میلی‌متر در بین ریز ترک‌ها داشته و شکست نمونه‌ها هم نرم‌تر بود اما به واسطه مقاومت پایین الیاف فوق (به لحاظ جنس و مشخصات هندسی و مکانیکی) پس از گسترش ریز ترک‌ها به ترک‌های بزرگتر، پل زدن الیاف پلی پروپیلن بلند کامل نشده منجر به پاره شدن الیاف‌ها گردید.

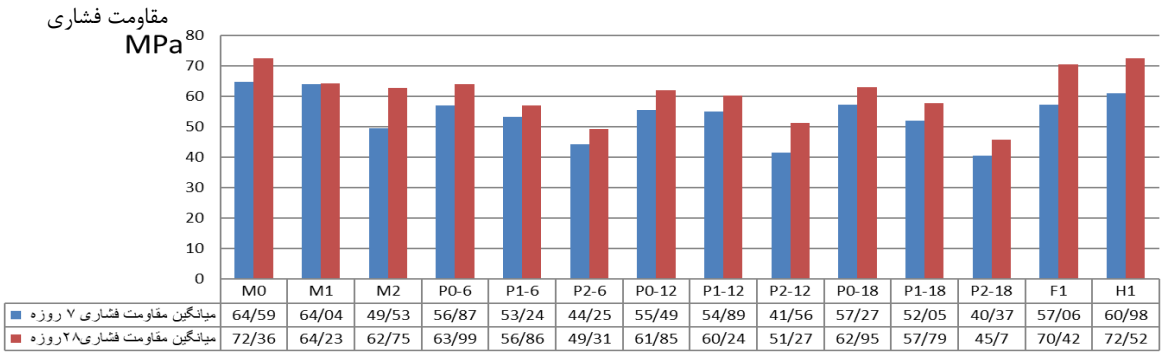
در طرح‌های اختلاط با الیاف پلی‌پروپیلن، الیاف با طول ۱۲ میلی‌متر بالاترین میانگین مقاومت فشاری را نسبت به سایر طول‌های الیاف این طرح از خود نشان داد(شکل۸).

میانگین مقاومت فشاری نمونه های بتنی با الیاف پلی پروپیلن با طول های مختلف در شکل ۸ نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل مشخص است، الیاف به طول ۱۲ میلی متر در تمام نسبت های آب به سیمان به طور میانگین بیشترین مقاومت فشاری را برای بتن در پی داشته اند. لذا چنین به نظر می رسد که الیاف ۱۲ میلی متری در هر دو مورد ریز ترک ها و ترک های بزرگ، عملکرد بهتری به لحاظ پل زدن دارند. هر چند که به علت مقاومت کششی کم الیاف پلی پروپیلن، این اثر در ریز ترک ها بیشتر به چشم می خورد.

در طرح‌های اختلاط بتن مرجع (M) بهترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه مربوط به طرح اختلاط بتن (M۰) بود که بتن این طرح اختلاط بتن، بتن بدون الیاف و مقاومت فشاری ۲۸ روزه بالای ۷۰ مگاپاسکال را داشته که به نظر می‌رسد نسبت آب به سیمان (۰/۲۴) در این طرح اختلاط بتن و به جای آن افزودن فوق روان کننده برای افزایش کارایی بتن همچنین افزودن ژل میکروسیلیس موجب افزایش چشم‌گیر مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن در این طرح شده است استفاده از این افزودنی‌ها در ساخت بتن گرچه مقاومت فشاری را افزایش داد اما منجر به بهبود رفتار بتن از نظر شکل‌پذیری نگردید و شکستن نمونه‌های طرح فوق بعد از آزمایش توسط دستگاه آزمایش (جک بتن شکن) به صورت کاملا ترد به گونه‌ای که نمونه بعد از شکست کاملا از هم فرو پاشید.



شکل۸: میانگین مقاومت فشاری طرح های P به تفکیک طول الیاف



شکل۹: نمودار میانگین مقاومت فشاری تمام طرح ها

میانگین مقاومت فشاری تمام طرح‌های اختلاط بتن

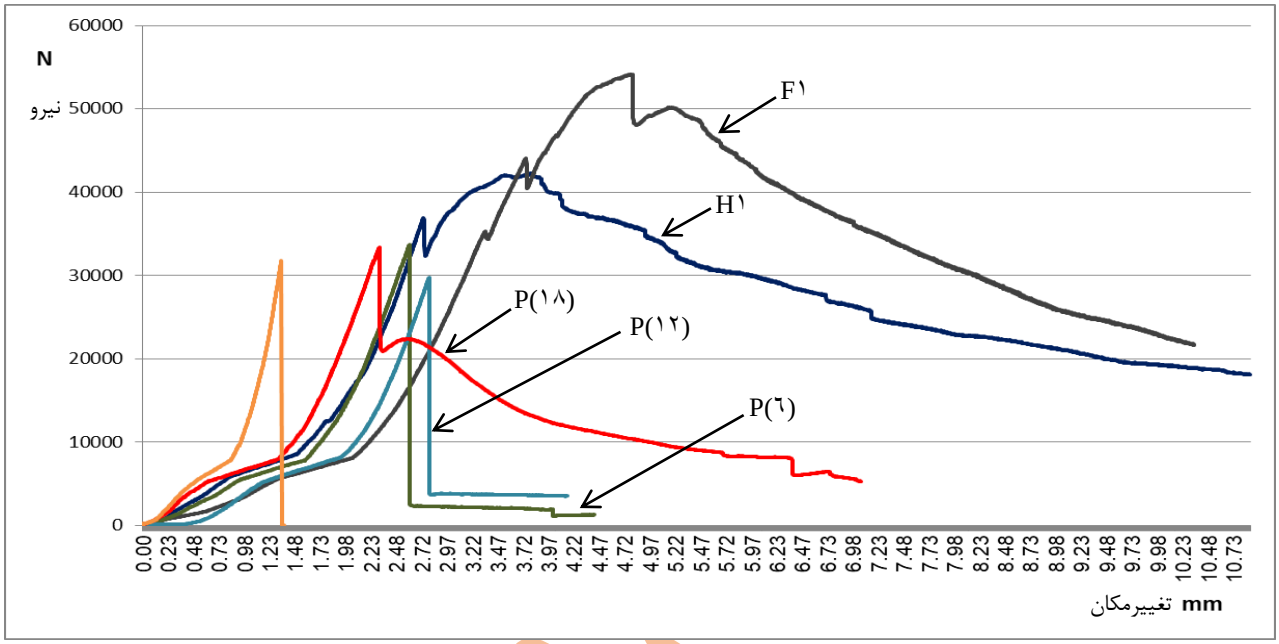
(شکل۹)مربوط به نمودار میانگین مقاومت فشاری تمام طرح‌های اختلاط بتن می‌باشد همانطور که مشاهده می‌شود در بین تمام طرح‌های اختلاط بتن مرجع و بتن الیافی با الیاف پلی‌پروپیلن، طرح‌های اختلاط بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۲۴ بیشترین مقاومت فشاری را نسبت به بتن‌های ساخته شده با نسبت آب به سیمان ۰/۲۹ و ۰/۳۴ را داشته‌اند ضمن اینکه مقاومت فشاری بتن‌های الیافی پلی پروپیلن نسبت به بتن بدون الیاف با نسبت آب به سیمان یکسان، کاهش مقاومت دارد. در حالی که در مورد بتن الیاف فولادی و ترکیبی، افزایش مقاومت دیده می شود. کاهش مقاومت بتن حاوی الیاف پلی پروپیلن معمولا به سبب مقاومت کششی پایین این الیاف در مقایسه با الیاف فولادی است که در مراجع متعددی به آن اشاره شده است [۶]. اما در بین بتن‌های الیافی با الیاف پلی‌پروپیلن بالاترین میانگین مقاومت مربوط به طرح اختلاط (P۰-۶) با مقاومت فشاری ۶۳/۹۹ مگاپاسکال بوده اما به طور کلی مهم‌ترین نتایج بدست آمده در تمام طرح‌های مربوط به این تحقیق در طرح‌های اختلاط (H۱،F۱،M۰) مشاهده شد که میانگین مقاومت فشاری آن‌ها بالای ۷۰ مگاپاسکال بود. طرح اختلاط M۰ بتن بدون الیاف و نسبت آب به سیمان آن ۰/۲۴بوده که به میانگین مقاومت فشاری ۷۲/۳۶ مگاپاسکال رسید. طرح اختلاط F۱ بتن با الیاف فلزی قلاب‌دار به طول ۴۰ میلی‌متر و نسبت آب به سیمان ۰/۲۹ بود و میانگین مقاومت فشاری آن به ۷۰/۴۲ مگاپاسکال رسید. همچنین در طرح اختلاط H۱ بتن با الیاف ترکیبی که در ساخت آن از الیاف فلزی قلاب‌دار به طول ۴۰ میلی متر و الیاف پلی‌پروپیلن به طول ۱۲ میلی‌متر استفاده شد و نسبت آب به سیمان این طرح اختلاط ۰/۲۹ بود و به میانگین مقاومت فشاری ۷۲/۵۳ مگاپاسگال که بالاترین میانگین مقاومت فشاری در این تحقیق بود رسید ضمن اینکه مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح فوق به ۷۶/۱۶ مگاپاسکال رسید و بالاترین مقاومت فشاری در این تحقیق را از آن خود کرد. همچنین بالاترین مقاومت فشاری این طرح نسبت به طرح مرجع M۱، ۱۶/۴ درصد رشد داشته است.

نتایج آزمایش مقاومت خمشی

با استفاده از نتایج بدست آمده از دستگاه آزمایش(جک یونیورسال)، و بررسی نمودارهای استخراج شده(شکل۱۰)، مقایسه انهدام نمونه‌ها (اشکال۱۱، ۱۲، ۱۳) در این تحقیق می‌توان اظهار داشت که بتن الیافی(F۱) با الیاف فلزی قلاب‌دار به طول ۴۰ میلی‌متر با میانگین مقاومت خمشی ۱۲/۸۵مگاپاسکال بیشترین مقاومت خمشی ۲۸ روزه را در بین تمام طرح‌ها داشته است، که به نظر می‌رسد مقاومت کششی بالاتر الیاف فلزی نسبت به الیاف پلی‌پروپیلن و طول بلندتر آنها سبب می‌شود که الیاف فلزی عملکرد پل زدن بهتری بر روی ترک های بزرگ داشته باشند که افزایش مقاومت خمشی را به دنبال خواهد داشت. پس از شکست نمونه تیرهای بتنی با ابعاد (۶۰*۱۵*۱۵) سانتی‌متر و بررسی نوع ترک‌های ایجاد شده مشاهده گردید که الیاف فلزی قلاب‌دار به طول ۴۰ میلی‌متر در داخل بتن بین ترک‌ها پل زده و سبب جلوگیری از گسترش ریز ترک‌ها و تبدیل به ترک‌های بزرگتر می‌شود. الیاف پلی‌پروپیلن نیز نقش جلوگیری از به وجود آمدن و گسترش ریز ترک‌ها را دارد و الیاف‌ها در بین ترک‌های ریز بتن پل می‌زنند.

در طرح (H۱) که بتن الیافی از نوع الیاف ترکیبی بوده، وجود این دونوع الیاف که به آن اشاره شد در کنار هم بهترین نقش را ایفا کرده و موجب افزایش شکل‌پذیری در بتن شده و نمونه‌های بتنی این طرح بعد از نمونه‌های طرح (F۱) بیشترین مقاومت خمشی را دربین تمام طرح‌ها داشته و با توجه به نمودارهای نیرو-تغییرمکان طرح‌های اختلاط، این طرح شکل‌پذیری فوق‌العاده بهتری را نسبت به سایر طرح‌های اختلاط بتن داشته است. در بین طرح‌های اختلاط (P) بتن با الیاف پلی‌پروپیلن، بیشترین مقاومت خمشی را در بین ۹ طرح، طرح اختلاط (P۰-۱۸) با میانگین مقاومت خمشی ۹/۴۱ مگاپاسکال از خود نشان داد. پس از شکست نمونه‌ها برای آزمایش مقاومت خمشی ۲۸ روزه توسط دستگاه آزمایش و مشاهده ترک‌های ناشی از شکست می‌توان اظهار داشت که الیاف پلی‌پروپیلن با طول ۱۸ میلی‌متر پل‌زدگی بهتری را نسبت به الیاف پلی‌پروپیلن با طول ۶ و۱۲ میلی‌متر در بین ترک‌ها داشته و منجر به شکستی نرم‌تر در نمونه‌ها شد اما به واسطه مقاومت پایین الیاف فوق، پس از گسترش ریز ترک‌ها و پل زدن الیاف منجر به پاره شدن الیاف‌ها می‌شود. طرح اختلاط (P۰-۱۸) در بین طرح‌های

بتن الیافی بـا الیـاف پلـی‌پـروپیلن شـکل‌پـذیری بهتـر و شکسـتی
فوق‌العاده نرم‌تر را از خود نشان داد(شکل۱۴).



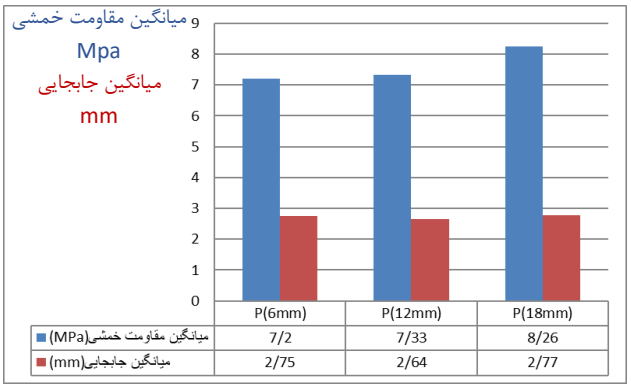
شکل۱۰: نمودار نیرو-تغییرمکان مقایسه طرح های($P(٦-١٢-١٨)$،$H١$،$F١$ و نمونه بدون الیاف

شکل۱۱: مقایسه انهدام نمونه های با

شکل۱۲: مقایسه انهدام نمونه های با $w/c=$ ۰/۲۹

شکل۱۳: مقایسه انهدام نمونه های با $w/c=$ ۰/۳٤

طرح‌های اختلاط بتن مرجع (M) بهترین مقاومت خمشی ۲۸ روزه مربوط به طرح (M ۰) بود که این طرح بتن بدون الیاف با نسبت آب به سیمان ۰/۲۴ بوده که به جای بالا بردن نسبت آب به سیمان از افزودن فوق روان‌کننده برای افزایش کارایی بتن استفاده شد همچنین افزودن ژل میکروسیلیس سبب افزایش چشم‌گیر مقاومت خمشی ۲۸ روزه بتن در این طرح شده است. استفاده از این افزودنی‌ها در ساخت بتن گرچه مقاومت خمشی را افزایش داده اما منجر به بهبود رفتار بتن از نظر شکل‌پذیری نگردید و شکست نمونه‌های طرح‌های مرجع بعد از آزمایش توسط دستگاه(جک یونیورسال) به صورت کاملا ترد به گونه‌ای که نمونه بعد از شکست کاملا دو نیم شد.

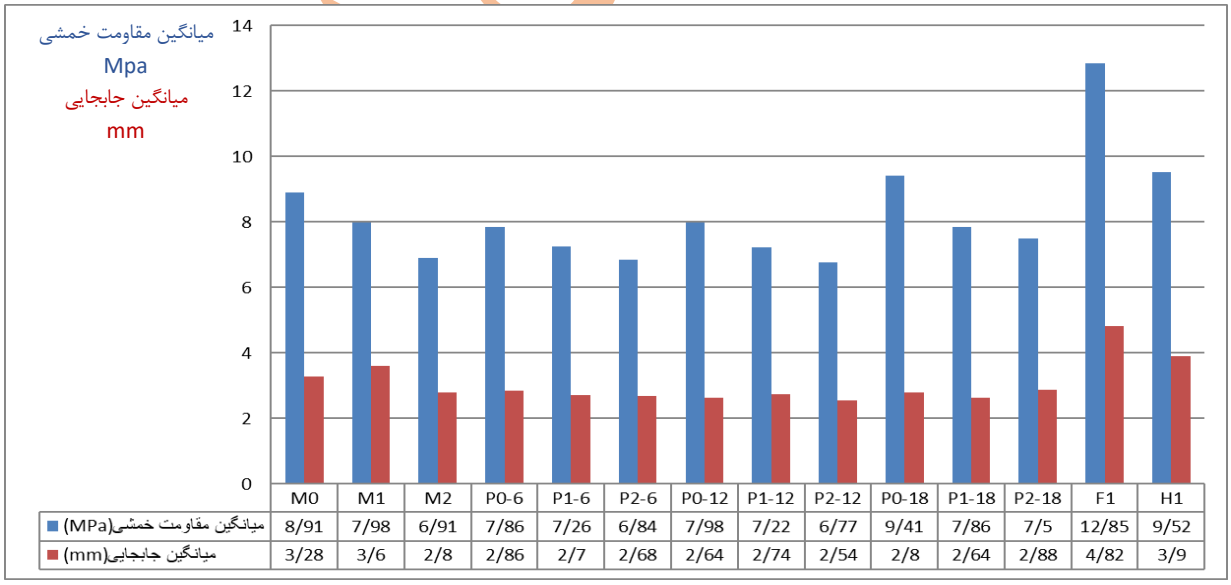


شکل۱۴: مقایسه میانگین مقاومت خمشی و میانگین جابجایی به تفکیک طول الیاف

میانگین مقاومت خمشی تمام طرح‌های اختلاط بتن

شکل ۱۵ مربوط به میانگین مقاومت خمشی ۲۸ روزه و میانگین جابجایی تمامی طرح‌های اختلاط بتن در این تحقیق می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود در بین تمامی طرح‌ها، طرح‌های اختلاط با نسبت آب به سیمان ۰/۲۴ بیشترین مقاومت خمشی را نسبت به نمونه‌های بتنی ساخته شده با نسبت آب به سیمان ۰/۲۹ و ۰/۳۴ داشته است.

با توجه به نمودار در بین بتن‌های الیافی با الیاف پلی‌پروپیلن بالاترین میانگین مقاومت خمشی مربوط به طرح (P ۰-۱۸) با میانگین مقاومت خمشی ۹/۴۱مگاپاسکال می‌باشد. بطور کلی بالاترین نتایج بدست آمده مربوط به طرح $F1$ با میانگین مقاومت خمشی ۱۲/۸۵مگاپاسکال می‌باشد.



شکل۱۵: نمودار میانگین مقاومت خمشی و میانگین جابجایی تمامی طرح ها

۴- نتیجه گیری

به طور کلی می توان بیان کرد که استفاده از الیاف سبب عملکرد بهتر بتن می گردد. در خصوص الیاف پلی‌پروپیلن با افزایش طول الیاف، کارایی بتن کاهش اما به جهت کم شدن قابلیت پل زدن آنها بر روی ریز ترکها، شکل‌پذیری و ظرفیت خمشی بتن افزایش یافت. در بین تمام طرح‌های اختلاط این مقاله، نمونه‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۲۴ بالاترین مقاومت فشاری و خمشی را در مقایسه با طرح‌های مشابه از خود نشان دادند. استفاده از ترکیب الیاف فلزی و الیاف پلی‌پروپیلن در بتن به جهت ترکیب قابلیت پل زدن بر روی ریز ترک ها و ترک های بزرگ، منجر به افزایش شکل پذیری و ظرفیت خمشی در بتن گردید.

منابع

[۱] Daneti, S.B., Wee, T.H. and Thangayah, T. “Effect of polypropylene fibers on the shrinkage cracking behavior of lightweight concrete”, *Magazine of Concrete Research*, ۶۳(۱۱), pp. ۸۷۱–۸۸۱ (۲۰۱۱).

[۲] Emin Arsalan, M. “Effects of basalt and glass chopped fibers addition on fracture energy and mechanical properties of ordinary concrete: CMOD measurement”, *Construction and Building Materials*, ۱۱٤, pp.۳۸۳-۳۹۱ (۲۰۱٦).

[۳] Haji Karimi, P., Fallah Hosseini, S. “Investigating the effect of volume percentage, length and geometric shape of polyolefin fibers on the mechanical characteristics and fracture characteristics of high strength concrete”, *Concrete research*, ۱۲(۱), pp.۵۹-۷۰ (in Persian) (۲۰۱۷)

[٤] Alberti, M., Enfedaque, A. and Gálvez, J. “Fibre reinforced concrete with a combination of polyolefin and steel-hooked fibres”. *Composite Structures*, ۱۷۱, pp.۳۱۷-۳۲۵ (۲۰۱۷).

[٥] Yoo, D.Y., Kim, S.W. and Park, J.J. “Comparative flexural behavior of ultra-high-performance concrete reinforced with hybrid straight steel fibers”, *Construction and Building Materials*, ۱۳۲, pp.۲۱۹-۲۲۹ (۲۰۱۷).

[٦] Pakravn, H., Latifi, M. and Jamshidi, M. “Hybrid short fiber reinforcement system in concrete: A review”, *Construction and Building Materials*, ۱٤۲, pp.۲۸۰-۲۹٤ (۲۰۱۷).

[۷] Kumar, R., Goel, P. and Mathur, R. “Suitability of concrete reinforced with synthetic fiber for the construction of pavements”. *۳rd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*. (۲۰۱۳).

[۸] Bentegri, I., Boukendakdji, O., Kadri, E.H., Ngo, T.T., Soualhi, H. “Rheological and tribological behaviors of polypropylene fiber reinforced Concrete”. *Construction and Building Materials*, ۲٦۱ (۲۰۲۰).

[۹]. Chen, M., Si, H., Fan, X., Xuan, Y. and Zhang, M. "Dynamic compressive behaviour of recycled tyre steel fibre reinforced concrete", *Construction and Building Materials*, ۳۱٦ (۲۰۲۲).

[۱۰] Liang, N., You, X., Yan, R., Miao, O. and Liu, X. "Experimental investigation on the mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced roller-compacted concrete pavements", *International Journal of Concrete Structures and Materials*, ۱٦(۱) (۲۰۲۲).

[۱۱] Liang, N., Mao, J., Yan, R., Liu, X. and Zhou, X. "Corrosion resistance of multiscale polypropylene fiber-reinforced concrete under sulfate attack", *Case Studies in Construction Materials*, ۱٦ (۲۰۲۲).

[۱۲] Rajeev Kumar, P., Balaji Shankar, S., Vidhya, K., Sawant, R.S. and Arun, M. “The steel and polypropylene reinforced concrete beams: Shear behavior”, *Materials Today: Proceedings*, (۲۰۲۱).

[۱۳] Bahmani, H., Mostufinejad, D. “Investigation of mechanical properties of concrete with very high performance reinforced with polypropylene fibers and synthetic macro fibers”, *Concrete research*, ۱۲(۱), pp.۱۵-۲٦ (in Persian) (۲۰۱۸).

[۱٤] Ghasemi, S., Shafaei, J., Jalali, M., “Experimental evaluation of the effect of steel and polypropylene fibers and recycled aggregates on the mechanical properties of concrete”, *Sharif Journal of Civil Engineering*, ۳۸-۲(۳-۲), pp.۲۱-۳۲ (۲۰۲۲) (in Persian).

[۱۵] Deng Q., Zhang R., Liu C., Duan Z. and Xiao, J. “Influence of fiber properties on abrasion resistance of recycled aggregate concrete”, *Construction and Building Materials*, ۳٦۲ (۲۰۲۳).

[١٦]. Ali, A.Y.F., El-Emam, H.M., Seleem, M.H., Sallam, H.E.M. and Moawad, M. “Effect of crack and fiber length on mode ١ fracture toughness of matrix-cracked FRC beams”, *Construction and Building Materials*, ٣٤١ (٢٠٢٢).

[١٧]. Ding, C., Guo, L. and Chen, B. “An optimum Polyvinyl alcohol fiber length for reinforced high ductility cementitious composites based on theoretical and experimental analyses”, *Construction and Building Materials*, ٢٥٩ (٢٠٢٠).

[١٨] Pehlivanlı Z.O., Uzun, I. “Effect of polypropylene fiber length on mechanical and thermal properties of autoclaved aerated concrete”, *Construction and Building Materials*, ٣٢٢ (٢٠٢٢).

[١٩] ASTM C٣٣, “Standard Specification for Concrete Aggregates”, (٢٠١٦).

[٢٠] ASTM C١٥٠, “Standard Specification for Portland Cement”, (٢٠١٥).

[٢١] ISIRI ٦٠٤٨, “Determination of compressive strength of cylindrical specimens-Test methods”, (٢٠١٧).

[٢٢] ASTM C٢٩٣, “Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading), (٢٠١٦).

[٢٣] ASTM C١٤٣, “Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete”, (٢٠١٥).

ویراستاری نشده