



کد مقاله: ۱-۱۴۲

## بررسی تاثیر الیاف بر روی چقرمگی اعضای بتنی مسلح ساخته شده با بتن خود تراکم

حبیب اکبرزاده بنگر<sup>۱</sup>، سیده سحر عزیزی مرزناکی<sup>۲</sup>

۱- عضو هیأت علمی، دانشگاه مازندران، [h.akbarzadeh@umz.ac.ir](mailto:h.akbarzadeh@umz.ac.ir)

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه مازندران

### چکیده

بتن خود تراکم، بتنی با کارایی بالاست که بدون نیاز به ویبره و ضربه و تحت اثر وزن خود در قالب پر می شود و به راحتی از میان میلگردها عبور می نماید. در این مقاله، به بررسی افزودن الیاف های فلزی، پلی پروپیلن و پلی پروپیلن سنتتیک بر روی رفتار بتن تازه و رفتار مکانیکی بتن سخت شده با استفاده از درصد حجمی الیاف مختلف (۱٪، ۲٪، ۳٪، ۴٪) برای الیاف فلزی و ۱٪، ۲٪، ۳٪، ۴٪ برای الیاف پلی پروپیلن و ۱٪، ۲٪، ۳٪، ۴٪ برای الیاف پلی پروپیلن سنتتیک) پرداخته شده است. خصوصیات جریان پذیری بتن تازه با استفاده از آزمایش های L-BOX و T50 و Slump-flow اندازه گیری شده است. خصوصیات مکانیکی با انجام آزمایش های مقاومت فشاری با استفاده از نمونه های مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی متر و آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم با نمونه های استوانه ای ۳۰×۱۵ سانتی متر و آزمایش های مقاومت خمشی و چقرمگی خمشی با استفاده از نمونه های تیر ۱۰×۱۰×۸۴ سانتی متر به دست آمده است. نتایج به دست آمده از آزمایشات نشان می دهد که با افزایش درصد حجم الیاف، شاهد کاهش کارایی هستیم و در درصدهای حجمی بالای الیاف، خصوصیات جریان پذیری کاهش می یابد. اما از سوی دیگر خصوصیات مکانیکی شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیر مستقیم و چقرمگی خمشی افزایش می یابد همچنین با مقایسه خصوصیات نمونه های حاوی الیاف پلی پروپیلن سنتتیک با نمونه های حاوی الیاف پلی پروپیلن می توان دریافت که در نمونه های حاوی PPS، شاهد مقاومت فشاری، کششی و خمشی بالاتری نسبت به نمونه های حاوی PP هستیم. همچنین در این مقاله به بررسی نمودار های بار- تغییر مکان تیرهای بتن مسلح به ابعاد ۱۰×۱۰×۸۴ سانتی متری حاوی الیاف PPS پرداخته شده است. که نتایج نشان می دهد که استفاده از الیاف در این نوع تیرها موجب بهبود مقاومت نهایی، شکل پذیری و سختی می گردد.

**کلمات کلیدی:** بتن خود تراکم، خصوصیات جریان پذیری، خصوصیات مکانیکی، الیاف، چقرمگی

### ۱- مقدمه

بتن یکی از مصالح پر مصرف در مهندسی عمران است که با توجه به روند رو به رشد سازه های عمرانی نیاز به استفاده از مصالح ساختمانی جدید با کارایی بیشتر بسیار محسوس است. در دهه های اخیر استفاده از بتنی تحت عنوان بتن خود تراکم (SCC) در کشورهای دنیا توسعه پیدا کرده است. بتن خود تراکم به نحوی تعریف شده است که احتیاج به هیچ نوع ویبره داخلی و خارجی ندارد و تحت تاثیر وزن خود متراکم می شود و زمانی که در داخل قالب جاری می شود به طور کامل هواگیری می شود و همزمان یکنواختی خود را حفظ می نماید و همچنین به راحتی از میان میلگرد های طولی عبور می کند. به منظور دستیابی به کارایی بیشتر برای بتن خود تراکم (SCC) از سنگدانه های نرم

تر و کوچک تری استفاده می گردد [4-1]. نظریه های اولیه در مورد بتن های خودتراکم اولین بار در ژاپن شکل گرفت، اما سوئدی ها اولین اروپایی بودند که در سال ۱۹۹۰ از بتن خود تراکم در سازه ها استفاده کرد [5].

بتن معمولی ترد و شکننده است، بنابراین در صورتی که از میلگرد استفاده نشود، جهت رفع شکنندگی بتن باید مصالح دیگری نظیر الیاف به مخلوط اضافه نمود. استفاده از الیاف در بتن و ساخت بتن مسلح شده به الیاف (FRC) موجب بهبود عملکرد اعضا و تغییر و بهبود خصوصیات مکانیکی از جمله مقاومت فشاری، کششی و خمشی این اعضا می گردد. خواص مکانیکی بتن الیافی تحت تاثیر نوع، درصد، نسبت طول به قطر معادل، مقاومت زمینه، اندازه، شکل و نحوه تهیه نمونه ها و اندازه و شکل مصالح سنگدانه ای قرار دارند. الیاف، مقاومت کششی، شکل پذیری ملات و بتن را به نحو قابل توجهی افزایش می دهد. در حقیقت الیاف بعد از ترک خوردگی در میان صفحات ترک پل می زند و باعث افزایش چشمگیری در چقرمگی و ظرفیت جذب انرژی می گردد. امروزه بیشترین کاربرد بتن مسلح به الیاف به ویژه الیاف فولادی در دال ها، عرشه پل ها، روسازی پارکینگ ها، روکش ها و پوشش داخلی تونل ها و محیط های در معرض فرسایش بوده است [6].

مطابق با مطالعات ذکر شده در بالا، در این تحقیق به بررسی تاثیر الیاف بر روی چقرمگی اعضای بتنی مسلح شده ساخته شده با بتن خود تراکم پرداخته می شود. تا کنون مطالعات زیادی در زمینه بتن خود تراکم مسلح شده به الیاف فولادی مورد بررسی قرار گرفته است [7-9]. اما از جمله مشکلات عمده در استفاده از الیاف فولادی در ابتدای کار مسئله تجمع و گلوله شدن الیاف و کاهش کارایی بتن، در مقادیر بالای استفاده می باشد. از جمله الیافی که به عنوان جایگزین برای الیاف فولادی مورد استفاده قرار می گیرد الیاف پلی پروپیلن می باشد که این الیاف به علت دارا بودن مدول الاستیسته پایین عمدتاً برای کنترل ترکهای بتن (ترکهای نشست و جمعشدگی پلاستیک) که در ساعات اولیه بوجود می آیند استفاده میشود. الیاف پلی پرینل با مقاومت بالا بخصوص برای مقاومت در برابر جمع شدگی ملات و بهبود کارایی بتن حتی بعد از توسعه تنشهای ناشی از ترک ها ساخته می شود. Alhozaimy به بررسی در مورد خصوصیات مکانیکی بتن های مسلح شده به الیاف پلی پروپیلن پرداخته است، نتایج نشان داده است الیاف پلی پروپیلن تاثیر قابل توجهی بر روی مقاومت فشاری و خمشی نمونه ها ندارد بلکه چقرمگی و مقاومت ضربه نمونه را به طور قابل توجهی افزایش می دهد [10]. از جمله الیاف موجود در بازار، الیاف پلی پروپیلن سنتتیک می باشد که پیش از این مطالعه ای در مورد الیاف های پلی پروپیلن سنتتیک مورد بررسی قرار نگرفته است. بدین منظور نمونه های بتنی حاوی انواع مختلف الیاف نظیر الیاف های فلزی، پلی پروپیلن PP، پلی پروپیلن سنتتیک PPS مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج مربوط به تعیین انرژی شکست با توجه به طرح اختلاط های مختلف و تاثیر درصد الیاف بر روی انرژی شکست در نمونه ها مورد بحث قرار گرفته است. همچنین در این مقاله به بررسی رفتار بتن تازه مسلح شده به الیافهای فولادی، پلی پروپیلن و پلی پروپیلن سنتتیک به وسیله آزمایشهای L-Slump – flow و T50 و BOX و مقاومت فشاری و مقاومت کششی و خمشی پرداخته شده است. همچنین در این مقاله تاثیر بتن الیافی روی رفتار تیرهای بتن مسلح با میلگردهای فلزی مورد بررسی قرار می گیرد.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی:

### ۱,۲. مصالح مصرفی:

سیمان مورد استفاده از نوع سیمان پرتلند تیپ II ساخت کارخانه سیمان مازندران (نکا) با وزن مخصوص ۳,۱۵ می باشد. همچنین از پودر سنگ اهک با وزن مخصوص ۲,۷ و سطح مخصوص  $480 \text{ m}^2/\text{kg}$  به عنوان عنصر پرکننده (فیلر) استفاده شد. پرکننده هایی چون پودر سنگ اهک به دلیل دارا بودن ذرات بسیار ریز باعث پر کردن فضای خالی بین ذرات سیمان شده و لذا درجه توپری بتن را افزایش می دهد. خصوصیات شیمیایی و فیزیکی این سیمان تیپ II و تجزیه شیمیایی پودر سنگ اهک در جدول ۱ آورده شده است. سه نوع الیاف مصنوعی از نوع پلی پروپیلن و الیاف فولادی و الیاف PPS مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۱ تصویر انواع مختلف الیاف مصرفی و جدول ۲

مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف مصرفی را نشان می دهد. به منظور بهبود کارایی مخلوط بتن از فوق روان کننده (sp) نسل سوم بر پایه کربوکسیلیک اتر با نام تجاری P10-3r با وزن مخصوص ۱,۱ گرم بر سانتی متر مکعب استفاده شده است.

جدول ۱. تجزیه شیمیایی سیمان تپ II مازندران و پودر سنگ اهک

ترکیب شیمیایی	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaCO <sub>3</sub>
سیمان	۲۱,۲۵	۴,۹۵	۳,۱۹	۰,۶۳	۶۴,۰۷	۱,۲۰	۲,۰۴	۰,۳۸	-
پودر سنگ اهک	۰,۳	۰,۱	۰,۰۲	-	-	۰,۰۲	-	-	۹۹,۳

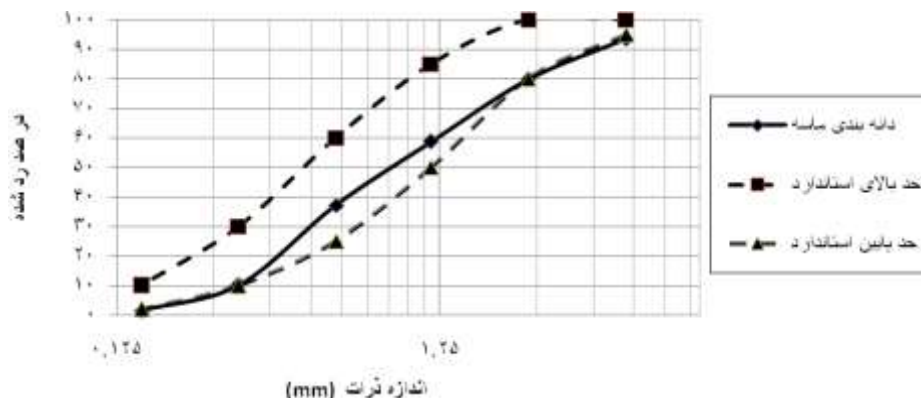


شکل ۱. انواع مختلف الیاف مصرفی

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف های مصرفی

نسبت منظر	قطر Mm	طول Mm	مقاومت کششی Kg/cm <sup>2</sup>	مدول یانگ Kg/cm <sup>2</sup> *10 <sup>5</sup>	وزن مخصوص gr/cm <sup>3</sup>	شکل ظاهری	جنس الیاف
۱۲۰	۰,۱	۱۲	۴۵۰۰	۰,۵	۰,۹۱	صاف	پلی پروپیلن
۵۰	۰,۷	۳۶	۲۱۰۰۰	۱۶	۷,۸	دو طرف قلاب دار	فولادی
۷۵۰	۰,۰۷	۵۰-۵۴	۱۴۰۰۰	۳,۵	۰,۹	صاف	پلی پروپیلن سستیک

مصالح سنگی مورد استفاده در بتن شامل مصالح سنگی درشت دانه (شن) و مصالح سنگی ریز دانه (ماسه) می باشد. آزمایش دانه بندی جهت تعیین نحوه توزیع اندازه دانه های سنگی به کار گرفته می شود که از طریق جدایش به کمک الک بر اساس ACI 211 استاندارد ASTM C33 صورت می گیرد. شکل ۲ منحنی دانه بندی ماسه مصرفی و دانه بندی استاندارد ASTM رسم شده است. شن به کار رفته در ساخت بتن خود تراکم از نوع شکسته با حداکثر اندازه ۱۰ میلیمتر با وزن مخصوص ۲,۶۸ می باشد.



شکل ۲. منحنی دانه بندی ماسه مصرفی

## ۲.۲. طرح اختلاط و روش های آزمایش

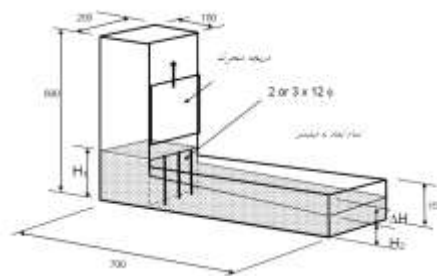
در این تحقیق از ۳ نوع الیاف، شامل الیاف فلزی با درصد های حجمی ۰,۱، ۰,۲، ۰,۳، ۰,۴ و الیاف پلی پروپیلن با درصد های حجمی ۰,۱ و ۰,۲ و پلی پروپیلن سنتتیک با درصد های حجمی ۰,۱، ۰,۲، ۰,۳، ۰,۴، مورد آزمایش و مقایسه قرار گرفت. در بین ۱۱ طرح اختلاط در نظر گرفته شده، یک طرح اختلاط خالص و فاقد الیاف بوده و به عنوان طرح شاهد در نظر گرفته شد.

طرح اختلاط مورد استفاده در این تحقیق جهت دستیابی به بتن خودتراکم بر طبق دستورالعمل ACI 237R-07 بوده است. فرایند ساخت بتن خود تراکم با الیاف همانند بتن معمولی با الیاف می باشد که الیاف در حین فرایند مخلوط کردن مصالح به مخلوط اضافه می گردد. نکته قابل توجه آن است که انتظار می رود با افزایش درصد الیاف کارایی بتن خود تراکم کاهش یابد، لذا در طرح اختلاط های مربوط به بتن خود تراکم سعی بر آن شد تا بتن فاقد الیاف دارای حداکثر کارایی مجاز طبق دستور العمل ACI 237R-07 باشد تا پس از اضافه نمودن الیاف همچنان پاسخگوی آزمایشات مربوط به کنترل کارایی بتن خود تراکم باشد.

پس از اتمام اختلاط و ساخت بتن، خواص بتن تازه خود تراکم مورد آزمایش قرار گرفت تا خصوصیات جریان پذیری بتن خود تراکم مورد ارزیابی قرار گیرد. مخلوط های بتن خود تراکم باید به ویژگی اساسی را دارا باشد. اول باید تحت اثر وزن خود تمام فضای درون قالب را پر کند. دیگر ویژگی مهم بتن خود تراکم قابلیت جاری شدن و عبور بین فضای خالی بین میلگردها بدون انسداد در آنهاست. و در نهایت بتن خود تراکم باید توانایی لازم برای مقاومت در برابر جدایش را داشته باشد. به منظور دسترسی به این خصوصیات، آزمایش هایی چون آزمایش اسلامپ، آزمایش L-BOX انجام شده است.

آزمایش های SLUMP-FLOW و T50 بهترین روش جهت تعیین قابلیت پرکنندگی بتن تازه می باشد. در این آزمایش ها بتن تازه به داخل یک قالب مخروطی شکل ریخته می شود. زمانی که مخروط به سمت بالا کشیده می شود، فاصله ی زمانی که مخروط شروع به بالا آمدن می کند تا رسیدن قطر بتن به 50 cm را T50 می نامند. زمانی که جریان متوقف شد قطر نهایی بتن با اندازه گیری دو قطر عمود بر هم در محدوده بتن پخش شده اندازه گیری می شود.

آزمایش L-BOX به منظور اندازه گیری قابلیت عبور و پر کردن بتن تازه انجام شده است. بتن تازه در قسمت عمودی L-BOX ریخته می شود و زمانی که دریاچه لعزنده آن بالا می رود بتن از قسمت عمودی به قسمت افقی جعبه L شکل جریان می یابد و بتن در مسیر خود مجبور است از میله های ارماتور عمودی عبور نماید. زمانی که بتن از حرکت متوقف شد فواصل H1 و H2 نشان داده شده در شکل ۳ اندازه گیری می شود.



شکل ۳. L-BOX

بعد از انجام آزمایش های مربوط به بتن تازه، بتن به داخل قالب های روغن کاری شده مکعبی به ابعاد  $10 \times 10 \times 10$  سانتی متر و قالب استوانه ای  $15 \times 30$  سانتی متر و قالب منشوری برای نمونه های تیر به ابعاد  $10 \times 10 \times 84$  سانتی متر ریخته می شود. این نمونه ها در شرایط آزمایشگاهی به مدت ۲۴ ساعت در قالب نگه داری شده و سپس از قالب در آورده می شود و در حوضچه های آب در دمای بین ۲۲-۲۵ درجه سانتی گراد تا سن مورد نظر برای هر آزمایش نگه داری می شود.

در این تحقیق، جهت اندازه گیری مقاومت فشاری از نمونه های بتنی مکعبی ۲۸ روزه با ابعاد  $10 \times 10 \times 10$  سانتی متر استفاده گردید. آزمایش مقاومت فشاری انجام شده طبق استاندارد B.S. 1881 : Part 116 می باشد. همچنین جهت تعیین مقاومت کششی دو نیم شدن بتن، از آزمایش برزیلی بر اساس استاندارد ASTM C496 استفاده شده است. شکل ۴ نحوه مهار نمونه استوانه ای مورد آزمایش را نشان می دهد.



(الف) (ب)

شکل ۴. الف) نحوه مهار نمونه آزمایش (ب) نمونه در زیر فک برای اعمال فشار

آزمایش مقاومت خمشی با هدف تعیین مدول گسیختگی و چقرمگی بر اساس استاندارد های ASTM C78 و ASTM C1018-94b بر روی نمونه های منشوری با ابعاد  $10 \times 10 \times 84$  سانتی متر توسط دستگاه Univesal که مکانیزم آن Strain control می باشد با سرعت  $0.5 \text{ mm/min}$  انجام شده است. شکل ۵ دستگاه Univesal مورد استفاده در آزمایش مقاومت خمشی را نشان می دهد.



شکل ۵. دستگاه Universal

همچنین جهت بررسی تاثیر الیاف PPS روی رفتار تیر های بتن مسلح شده با میلگرد فلزی، از تیر هایی به ابعاد  $10 \times 10 \times 84$  استفاده شده است. جدول ۳ مشخصات تیر های مسلح شده را نشان می دهد جهت جلوگیری از شکست برشی خاموت در تیرها استفاده شده است و دو عدد میلگرد نیز برای نگه داشتن خاموت در بالا استفاده شده است. جهت بررسی رفتار خمشی این تیرها بارگذاری سه نقطه ای با استفاده از دستگاه universal انجام گرفته است.

جدول ۳. جدول مشخصات تیر های مسلح

شماره طرح	درصد الیاف	میلگرد کششی
Cont-8	۰	۲۰۸
Ps40-8	۰/۴	۲۰۸
Ps30-8	۰/۳	۲۰۸
Cont-6	۰	۲۰۶
Ps40-6	۰/۴	۲۰۶
Ps30-6	۰/۳	۲۰۶

### ۳- نتایج و بحث

#### ۱.۳. خصوصیات بتن تازه

نتایج به دست آمده از خواص فیزیکی بتن خود تراکم در جدول ۴ ارائه شده است. طرح اختلا شماره ۱ که فاقد الیاف می باشد دارای قطر اسلامپ ۷۷۰ میلی متر و نسبت  $\frac{H_2}{H_1}$ ، ۰.۸۱ و زمان  $T_{50}$ ، ۵ ثانیه بوده که همگی در محدوده ایمن نامه ی اروپا EFNARC می باشند. قطر جریان اسلامپ بتن خود تراکم برای تمام طرح اختلاط ها ۶۸۰-۷۷۰ میلی متر به دست آمده است. مطابق با ایمن نامه اروپا EFNARC قطر جریان اسلامپ باید در محدوده ۶۰۰-۷۵۰ میلی متر باشد. نمونه حاوی الیاف همگی تقریباً دارای قطر اسلامپ در محدوده مجاز ایمن نامه می باشند.

جدول ۴. نتایج آزمایش بتن تازه

Mix NO.	Fiber vf(%)	Slump $D_{ave}$ (mm)	$T_{50}$ (sec)	L-BOX $\frac{H_2}{H_1}$	
۱	*	۷۷	۵	۰.۸۱	
۲	St	۰.۱	۷۶	۶	۰.۷۵
۳		۰.۲	۷۵	۶.۵	۰.۷۳
۴		۰.۳	۷۳	۷	۰.۷
۵		۰.۴	۷۰	۸	۰.۶۵
۶	P.P	۰.۱	۷۰	۶	۰.۸۷۵
۷		۰.۲	۶۸	۷	۰.۸۸
۸	pps	۰.۱	۷۷	۵	۰.۹۴
۹		۰.۲	۷۶	۶.۵	۰.۸۸
۱۰		۰.۳	۷۵	۸	۰.۸۸
۱۱		۰.۴	۷۰	۹	۰.۸۸

نتایج به دست آمده نشان داده است که زمان جریان اسلامپ طرح اختلاط ها کمتر از ۹ ثانیه بوده است. زمان جریان اسلامپ قابل قبول باید حداقل ۳ و حداکثر ۶ ثانیه باشد. نسبت  $\frac{H_2}{H_1}$  تمامی طرح اختلاط ها در آزمایش L-BOX در محدوده ۰.۶۵-۰.۹۴ بوده است. کمترین نسبت پیشنهاد شده توسط EFNARC، ۰.۸ می باشد. از نتایج به دست آمده از تمامی آزمایشات می توان نشان داد که با افزایش

درصد الیاف، شاهد کاهش کارایی هستیم. در تمام آزمایشات انجام شده برای بتن تازه، تمامی طرح اختلاط ها فاقد اب انداختگی و ناپایداری بوده اند.

## ۲,۳. خصوصیات مکانیکی

### ۱,۲,۳. مقاومت فشاری

نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح اختلاط ها حاوی درصد الیاف مختلف در جدول ۵ آمده است. با بررسی نتایج به دست آمده می توان دریافت که با افزایش درصد الیاف فلزی تا درصد حجمی ۰,۴٪، با افزایش مقاومت فشاری مواجه هستیم. همچنین شاهد روند نزولی مقاومت فشاری با افزایش درصد الیاف PP تا درصد حجمی ۰,۲٪ می باشیم. و با افزایش درصد الیاف PPS تا درصد حجمی ۰,۲٪ با کاهش مقاومت فشاری و با افزایش درصد الیاف تا ۰,۴٪ با افزایش مقاومت فشاری مواجه هستیم. همان طور که جدول ۵ نشان می دهد در ۰,۴٪ الیاف فلزی مقاومت فشاری حدود ۱۰,۷۲٪ نسبت به مقاومت فشاری نمونه شاهد افزایش می یابد. در اثر افزایش درصد الیاف PP تا ۰,۲٪ مقاومت فشاری ۶,۹۲٪ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته است. و با بررسی مقاومت فشاری نمونه های حاوی الیاف PPS می توان دریافت که با افزایش درصد این الیاف تا ۰,۴٪، مقاومت فشاری ۰,۷٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش می یابد. با مقایسه نتایج می توان دریافت افزودن الیاف فلزی نسبت به الیاف های دیگر مقاومت فشاری را بیشتر افزایش می دهد. همچنین با مقایسه الیاف های پلی پروپیلن و پلی پروپیلن سنتتیک، درمی یابیم که با افزایش درصد الیاف پلی پروپیلن سنتتیک، مقاومت فشاری به تدریج افزایش می یابد، اما در نمونه های حاوی الیاف پلی پروپیلن شاهد کاهش مقاومت فشاری هستیم. طرح اختلاط های بتن خود تراکم حاوی الیاف، افزایش مقاومت فشاری ناشی از افزایش درصد الیاف را می توان به علت جای گیری مناسب الیاف ها و توزیع یکنواخت آنها در ماتریس سیمان و یا به عبارتی میزان بهینه الیاف مورد نظر در بتن خود تراکم دانست.

روند کاهش مقاومت فشاری در بتن خود تراکم حاوی الیاف پلی پروپیلن ناشی از افزایش درصد حجمی الیاف را می توان به علت پدیده گلوله شدن (میل الیاف به متمرکز شدن در یک نقطه) الیاف دانست که اگر درصد افزایش الیاف از مقدار بهینه بیشتر شود شاهد توزیع غیر یکنواخت الیاف و به دنبال آن درگیری نامناسب الیاف با ماتریس سیمان می باشیم که این امر امکان تأثیرگذاری الیاف را در بهبود ساختار بتن کاهش می دهد.

جدول ۵. خصوصیات مکانیکی بتن سخت شده (۲۸ روزه)

انرژی شکست (J/M <sup>2</sup> )	چقرمگی (N.mm)	مقاومت خمشی (Mpa)	مقاومت کششی (Mpa)	مقاومت فشاری (Mpa)	درصد الیاف Vf(%)	نام اختصاری	طرح اختلاط
۱۳۱,۲	۳۰۱,۹۱	۴,۵۶	۳,۸	۵۷,۸	-	cont	۱
۷۰۲,۳	۴۷۷,۶۶	۴,۰۵	۴,۵	۶۱,۵	۰,۱	St	۲
۳۴۹۶,۳	۳۸۹۴,۷	۵,۱۱	۴,۶	۶۲,۳	۰,۲		۳
۳۸۷۷,۲	۴۸۶۸,۴	۶,۳۹	۴,۶	۶۳,۱	۰,۳		۴
۲۹۶۰,۲	۳۵۶۹,۶	۷,۱۲	۴,۷	۶۴	۰,۴		۵
۱۴۰,۷	۳۲۶,۱۴	۴,۶۲	۴,۳	۵۹,۹	۰,۱	P.P	۶
۲۰۹,۲	۲۸۸,۶۲	۳,۱۵	۳,۴	۵۳,۸	۰,۲		۷
۲۱۳	۴۱۴,۶۸	۵,۶۵	۳,۵	۵۷,۴	۰,۱	PPS	۸
۲۰۸,۷	۵۱۰,۶۴	۶,۱۷	۳,۶	۵۷	۰,۲		۹
۱۶۶,۸	۳۶۵,۸۷	۵,۱۰	۴,۴	۵۸,۵	۰,۳		۱۰
۱۸۳,۷	۴۱۷,۷۱	5.38	۴,۴	۵۸,۲	۰,۴		۱۱

### ۲,۲,۳. مقاومت کششی غیر مستقیم

مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه ها در سن ۲۸ روز حاوی درصد حجمی الیاف مختلف در جدول ۵ آورده شده است. مطابق با نتایج به دست آمده می توان دریافت که با افزایش درصد الیاف تا ۰,۴ درصد، با روند صعودی مقاومت کششی مواجه بوده به طوری که در ۰,۴٪ الیاف فلزی مقاومت کششی حدود ۲۳,۴٪ نسبت به مقاومت کششی نمونه شاهد افزایش می یابد. همچنین جدول ۵ نشان می دهد که در اثر افزایش درصد الیاف PP تا ۰,۲٪ مقاومت کششی ۹,۵ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته است. و با بررسی مقاومت کششی نمونه های حاوی الیاف PPS می توان دریافت که با افزایش درصد این الیاف تا ۰,۴٪، مقاومت کششی ۱۵,۶٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش می یابد. با مقایسه نتایج مربوط به مقاومت کششی نیز همچون مقاومت فشاری می توان دریافت افزودن الیاف فلزی نسبت به الیاف های دیگر مقاومت کششی را بیشتر افزایش می دهد. همچنین با مقایسه الیاف های پلی پروپیلن و پلی پروپیلن سنتتیک، درمی یابیم که با افزایش درصد الیاف پلی پروپیلن سنتتیک، مقاومت کششی به تدریج افزایش می یابد، اما در نمونه های حاوی الیاف پلی پروپیلن شاهد کاهش مقاومت کششی هستیم.

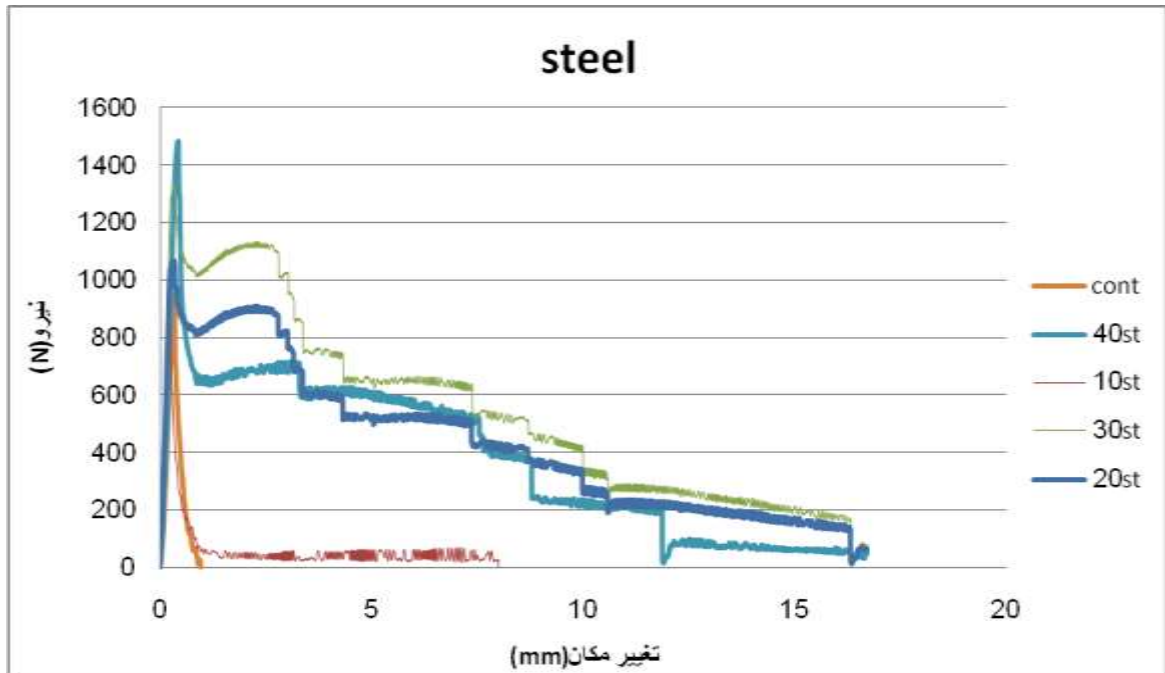
### ۳,۲,۳. مقاومت خمشی

مقاومت خمشی تیرها در جدول ۵ نشان داده شده است. مطابق با نتایج به دست آمده مشاهده می شود نرخ تغییر مقاومت خمشی با افزایش درصد الیاف حجمی الیاف فلزی و PPS نسبت به نمونه شاهد صعودی است. به طوری که همانگونه که ملاحظه می شود با توجه به جدول ۵ نمونه های حاوی ۰,۴ درصد حجمی الیاف فولادی افزایش مقاومت خمشی نسبت به نمونه شاهد در حدود ۵۶ درصد را نشان می دهد و در نمونه های حاوی الیاف PPS ملاحظه می شود که نمونه های حاوی ۰,۲ درصد حجمی الیاف افزایش مقاومت خمشی در حدود ۳۵ درصد نسبت به نمونه شاهد و همچنین نمونه های حاوی ۰,۴ درصد حجمی الیاف PPS افزایش مقاومت فشاری در حدود ۱۷ درصد نمونه شاهد را نشان می دهد و نرخ تغییرات مقاومت خمشی با افزایش درصد حجمی پلی پروپیلن نسبت به بتن شاهد نزولی است. به طوریکه نمونه های حاوی ۰,۱ درصد حجمی الیاف ۰,۳ درصد افزایش مقاومت خمشی و نمونه های حاوی ۰,۲ درصد حجمی الیاف PP در حدود ۳۰ درصد کاهش مقاومت خمشی را نشان می دهد.

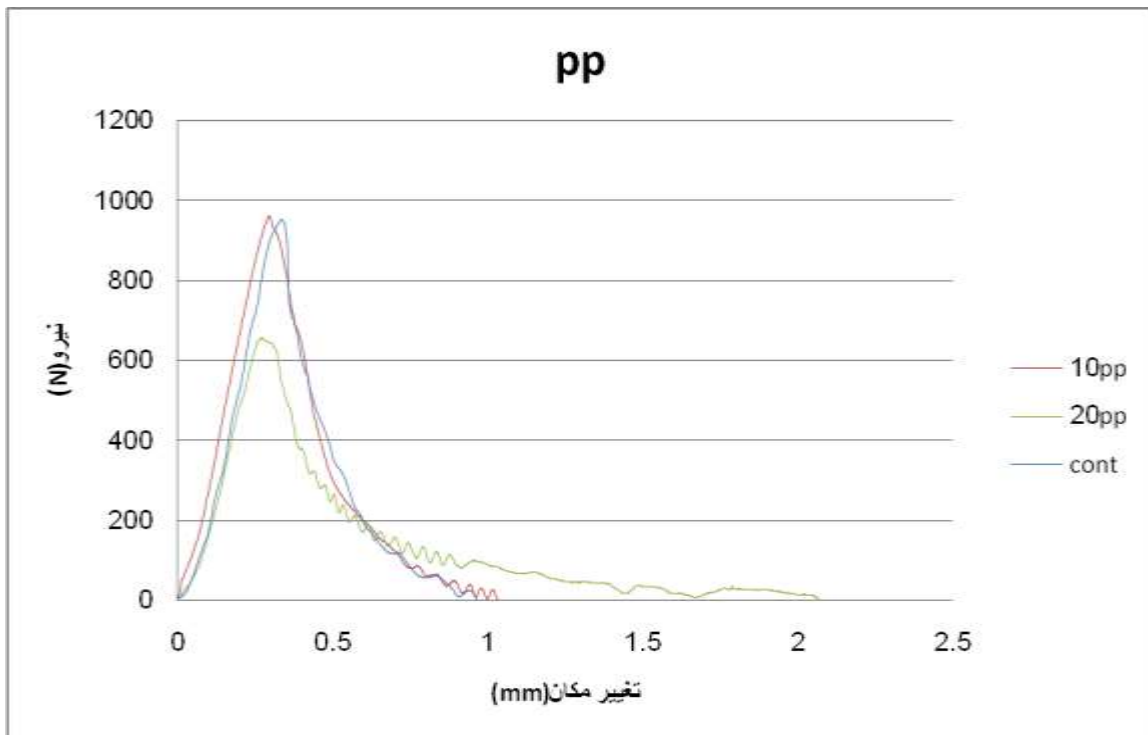
### ۴,۲,۳. رابطه بار-تغییر مکان

نمودارهای بار-تغییر مکان برای تمام نمونه های تیر در شکل های ۶ تا ۸ نشان داده شده است. همان طور که در شکل های مذکور مشاهده می شود با افزایش درصد حجمی الیاف فلزی و PPS، حداکثر بار خمشی افزایش می یابد. با توجه به نتایج به دست آمده می توان نتیجه گرفت که درصد بهینه به ترتیب برای الیاف فلزی ۰,۴ و برای الیاف PPS برابر با ۰,۲ درصد می باشد.

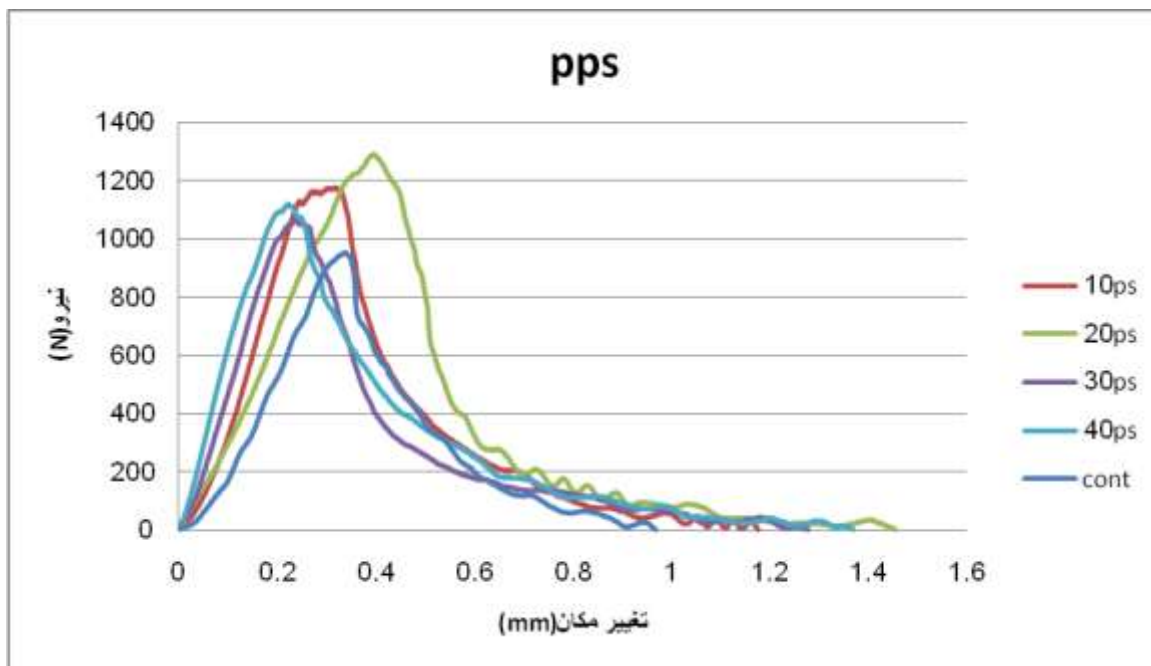




شکل ۶. منحنی نیرو-تغییر مکان، نمونه های حاوی درصد های مختلف الیاف فلزی



شکل ۷. منحنی نیرو-تغییر مکان، نمونه های حاوی درصد های مختلف الیاف پلی پروپیلن



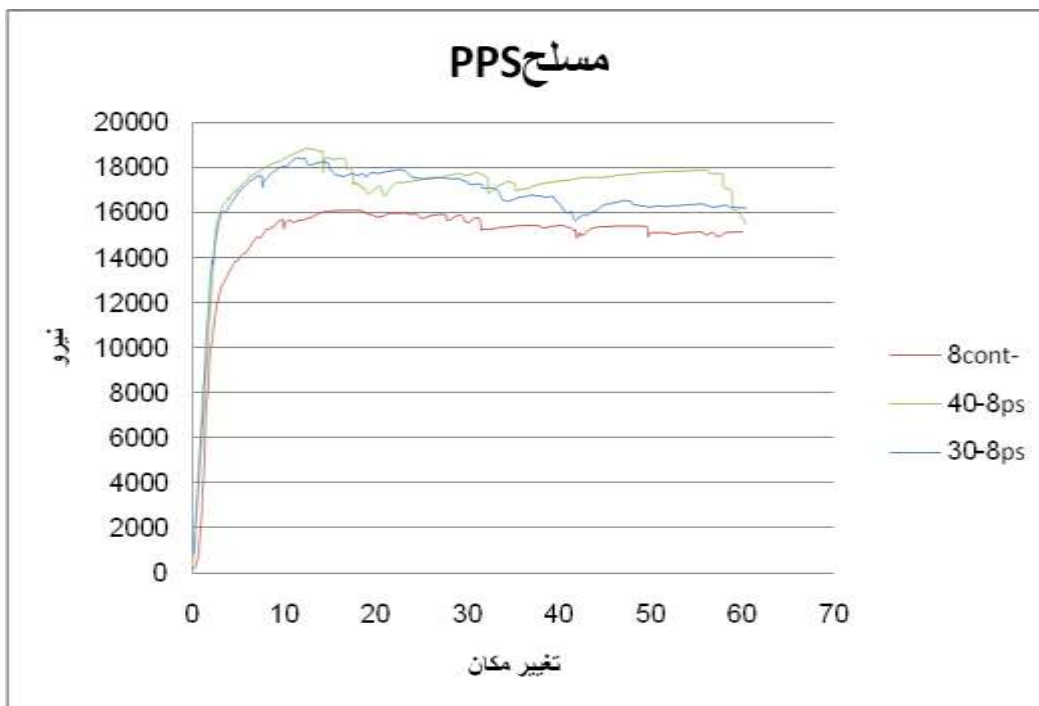
شکل ۸ منحنی نیرو-تغییر مکان، نمونه های حاوی درصد های مختلف الیاف PPS

### ۵.۲.۳. چقرمگی خمشی

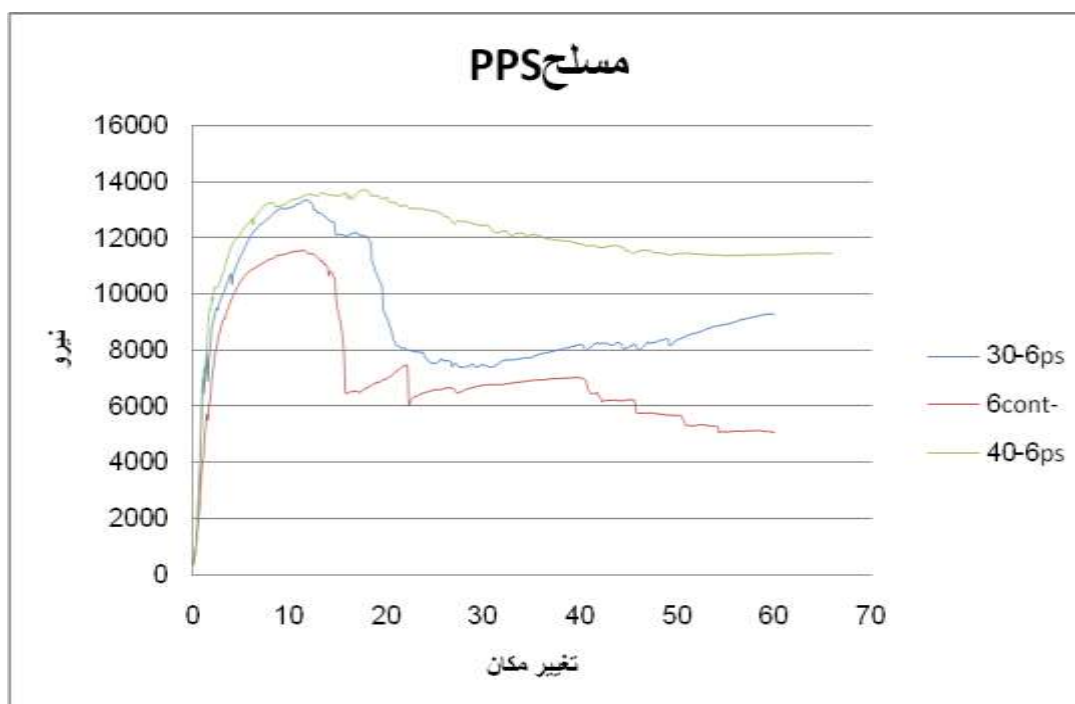
چقرمگی خمشی، قابلیت جذب انرژی بتن را نشان می دهد. به طوری که به سطح زیر نمودار بار-تغییر مکان چقرمگی خمشی گفته می شود. نتایج مربوط به چقرمگی طرح اخلاط های مختلف در جدول ۵ آورده شده است. با بررسی نتایج مذکور مشاهده می شود که نمونه های حاوی ۰٫۳ و ۰٫۴ درصد حجمی الیاف فلزی به ترتیب ۱۵ و ۱۰ برابر، چقرمگی را نسبت به نمونه شاهد افزایش می دهند. همچنین نمونه های حاوی ۰٫۲ و ۰٫۴ درصد حجمی الیاف PPS به ترتیب در حدود ۷۰ و ۳۸ درصد چقرمگی را نسبت به نمونه شاهد افزایش می دهد. و در نمونه های حاوی ۰٫۱ و ۰٫۲ درصد حجمی الیاف PP چقرمگی به ترتیب ۸ درصد افزایش و ۴ درصد کاهش داشته است. با مقایسه نتایج می توان نتیجه گرفت که افزودن الیاف چقرمگی خمشی را به طور چشمگیری افزایش میدهد.

### ۶.۲.۳. بررسی رفتار تیرهای بتن مسلح حاوی الیاف

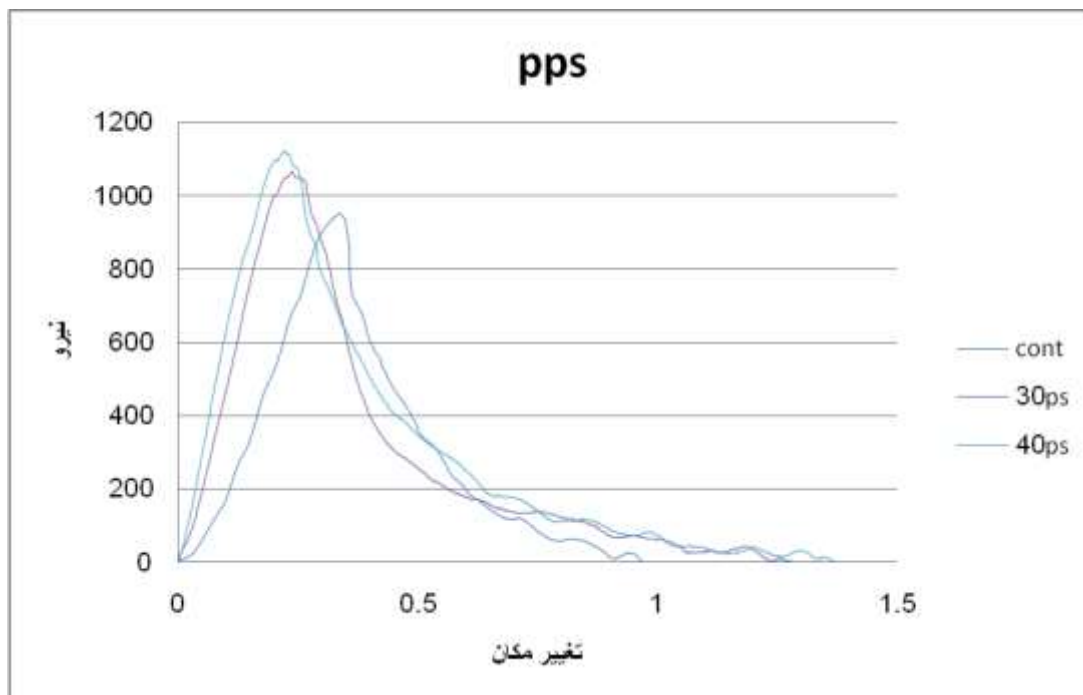
شکل های ۹ و ۱۱ نمودار بار - تغییر مکان تیرهای بتن مسلح حاوی الیاف PPS نشان می دهد.



شکل ۹. منحنی نیرو-تغییر مکان، نمونه های مسلح حاوی درصد های مختلف الیاف PPS



شکل ۱۰. منحنی نیرو-تغییر مکان، نمونه های مسلح حاوی درصد های مختلف الیاف PPS



شکل ۱۱. منحنی نیرو-تغییر مکان، نمونه های حاوی درصد های مختلف الیاف PPS

همانطور که شکل‌های ۹ تا ۱۱ نشان می‌دهد، استفاده از الیاف در تیرهای مسلح باعث افزایش ظرفیت خمشی مقطع می‌گردد. تاثیر الیاف روی سختی اولیه تیر های بتن مسلح بسیار ناچیز می باشد، دلیل آن ترک های خمشی در این مرحله آن چنان زیاد نمی باشد که الیاف وارد عمل شود بلکه ترک های اولیه توسط میلگرد کششی کنترل می شود. در تیرهای با فولاد کششی کمتر رفتار الیاف باعث شکل پذیری بیشتر تیر می گردد. تاثیر افزایش مقدار الیاف در نمونه های مسلح شده با درصد میلگرد طولی کمتر بیشتر می باشد. دلیل آن را می توان این طور گفت که وقتی درصد میلگرد طولی، بالا می رود ، خود میلگرد سختی کششی تیر را به شدت افزایش می دهد که افزایش سختی کششی در اثر الیاف در مقابل افزایش سختی میلگرد ناچیز می باشد.

#### ۴- نتیجه گیری

بررسی های آزمایشگاهی به منظور مطالعه بر روی خصوصیات جریان پذیری و خصوصیات مکانیکی بتن خود تراکم مسلح شده به الیاف های فلزی، پلی پروپیلن و پلی پروپیلن سنتتیک انجام شده است. نتایج به دست آمده در این تحقیق نشان داده است که با افزودن الیاف، کارایی بتن خود تراکم کاهش می یابد. در تمامی آزمایشات بتن تازه، تمامی طرح اختلاط ها فاقد اب انداختگی و جدا شدگی سنگدانه و ماتریس سیمان بوده است. با توجه به نتایج حاصله از این تحقیق آزمایشگاهی در بتن های خود تراکم حاوی الیاف فلزی، مقدار ۰,۴ درصد حجمی، مقدار بهینه برای توزیع مناسب الیاف در بتن خود تراکم می باشد. روند کاهش مقاومت فشاری در بتن خود تراکم حاوی الیاف پلی پروپیلن ناشی از افزایش درصد حجمی الیاف را می توان به علت پدیده گلوله شدن الیاف دانست که اگر درصد افزایش الیاف از مقدار بهینه بیشتر شود شاهد توزیع غیر یکنواخت الیاف و به دنبال آن درگیری نامناسب الیاف با ماتریس سیمان می باشیم. مقاومت کششی نمونه با افزایش درصد الیاف فولادی افزایش می یابد و در نمونه های حاوی الیاف PPS ابتدا به نسبت نمونه شاهد کاهش مقاومت کششی ایجاد می شود ولی با افزایش درصد الیاف شاهد روند صعودی مقاومت کششی می باشیم. نمونه های حاوی الیاف پلی پروپیلن نیز در درصدهای حجمی پایین باعث افزایش مقاومت کششی می شوند ولی با افزایش درصد الیاف شاهد کاهش مقاومت کششی هستیم. با توجه به داده های

به دست آمده از آزمایش مقاومت خمشی می توان نتیجه گرفت که درصد بهینه الیاف برای مقاومت خمشی به ترتیب برای الیاف فولادی ۰،۴، و برای الیاف PPS برابر ۰،۲ درصد حجمی می باشد. افزایش درصد PP باعث کاهش مقاومت خمشی نمونه خواهد شد. به منظور دستیابی به بتن با چقرمگی بالا، درصد بهینه الیاف برای نمونه‌های حاوی الیاف فولادی ۰،۳ درصد بوده و برای نمونه‌های حاوی PPS برابر ۰،۲ درصد بوده است. البته نمونه‌های حاوی الیاف فولادی به طرز قابل توجهی چقرمگی بتن را افزایش می دهند. همچنین از مقایسه نمودار های نیرو - تغییر مکان بدست آمده از آزمایش تیرهای بتن مسلح شده حاوی الیاف PPS با نمونه تیرهای ساخته شده با الیاف PPS بدون میلگرد شاهد افزایش ظرفیت خمشی هستیم. همچنین می توان دریافت که در تیرهای با فولاد کششی کمتر، رفتار الیاف باعث شکل پذیری بیشتر تیر می گردد. تأثیر افزایش مقدار الیاف در نمونه‌های مسلح شده با درصد میلگرد طولی کمتر بیشتر می باشد. دلیل آن را می توان این طور گفت که وقتی درصد میلگرد طولی، بالا می رود ، خود میلگرد سختی کششی تیر را به شدت افزایش می دهد که افزایش سختی کششی در اثر الیاف در مقابل افزایش سختی میلگرد ناچیز می باشد

## مراجع

- [1]Okamura, H.M.and Ouchi,M.;"Self-compacting concrete"; *J Adv Concr Technol*, No.1(2003)5-15.
- [2]Bouzoubaa,N.and Lachemi,M.;"Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash- preliminary results"; *Cem Concr Res*31, (2001)413-20.
- [3]Bartos,P.J.M.;"Self-compacting concrete"; *Concrete* 33,No.4(1999)9-14.
- [4]Khaloo,A., Molaeiraisi,E., Hosseini,P.and Tahsiri,H.;"Mechanical performance of self-compacting concrete reinforced with steel fibers";*Constr Build Mater*51,(2014)179-186.
- [5]Kim,J.K.and Han,S.H.; "Mechanical properties of self-flowing concrete";*High-Perform Concr: Des Mater Adv Concr Technol*172,(1997)637-52.
- [6]Khaloo, A.R.and Afshari,M.;"Flexural behavior of small steel fibre reinforced concrete slabs";*Cem Concr Compos*27,( 2005)141-9.
- [7]Bentur ,A.and Mindess,S.;"Fibre reinforced cementitious composites";London, New York: Elsevier Applied Science.(1990)602.
- [8]Balaguru,P.N. and Shah,S.P.;"Fiber-reinforced cement composites";McGraw-Hill.(1992)531.
- [9]Bentur, A.;"Fibre reinforced cementitious composites";2<sup>th</sup> edition,Taylor & Francis.(2006)602.
- [10]Alhozaimy,A.M.,Soroushian,P.and Mirza,F.;"Mechanical Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete and the Effects of Pozzolanic Materials";*Cem Concr Compos*18,(1996)85-92.