

## مطالعه عددی و آزمایشگاهی تأثیر افزودن همزمان الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن بر مقاومت بتن تراورس با رویکرد رسیدن به درصد بهینه‌ی الیاف (مطالعه موردی کارخانه تولید بتن تراورس کرج)

مجید قلهکی\*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان  
قاسم پاچیده، دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان  
محمدعلی کافی فلاورجانی، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

Email: mgholhaki@semnan.ac.ir

دریافت: ۹۶/۰۳/۲۳ - پذیرش: ۹۶/۰۶/۰۷

### چکیده

در چند دهه‌ی اخیر، سیستم حمل و نقل ریلی برای عبور و مرور انسان‌ها به عنوان یکی از راحت‌ترین و کم‌هزینه‌ترین سیستم‌های حمل و نقل رایج، گسترش یافته است. با توجه به اینکه یکی از مهمترین عناصر تشکیل‌دهنده‌ی خطوط ریلی، تراورس بتنی می‌باشد، لذا، مسئله‌ی بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری از این سیستم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این تحقیق، به کمک افزودن همزمان الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن به بتن تراورس (تولید شده در کارخانه‌ی تولید تراورس کرج)، مقاومت بتن بهبود بخشیده شده است. مجموعاً تعداد ۱۲۰ عدد نمونه‌ی استوانه‌ای و منشوری جهت انجام تست‌های مقاومت فشاری، کششی و خمشی در هشت طرح مختلف، که مجموع درصد الیاف به کار رفته در هر طرح ۱٪ بود، ساخته شد. با توجه به نتایج به دست آمده، بهترین طرح برای مقاومت فشاری و کششی، طرح شماره‌ی ۸ (۱٪ الیاف فولادی، بدون الیاف پلی‌پروپیلن) و برای مقاومت خمشی، طرح شماره‌ی ۶ (۰/۶ درصد الیاف فولادی و ۰/۴ درصد الیاف پلی‌پروپیلن) می‌باشد. همچنین، وجود الیاف در بتن تراورس می‌تواند تا حدود ۴۰٪ از مقدار آرماتورهای پیش‌تنیده در آن کاسته و باعث جلوگیری از وقوع ترک‌های عمیق در آن شود.

واژه‌های کلیدی: بتن تراورس، الیاف فولادی، پلی‌پروپیلن، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی

### ۱. مقدمه

مسئله‌ی بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری از این سیستم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از شکل‌های خرابی تراورس‌های بتنی، ترک‌های ناشی از بارگذاری تکراری چرخ و ترک‌های ناشی از تغییرات دما است. اگرچه، خوردگی آرماتورها در محیط‌های خورنده و دارای یون‌های مضر نیز از دیگر مسائلی است که تراورس‌های بتنی را با مشکل جدی مواجه می‌کند. در

در چند دهه‌ی اخیر سیستم حمل و نقل ریلی برای عبور و مرور انسان‌ها به عنوان یکی از راحت‌ترین و کم‌هزینه‌ترین سیستم‌های حمل و نقل رایج، گسترش یافته است. با توجه به اینکه یکی از مهمترین عناصر تشکیل‌دهنده‌ی خطوط ریلی، تراورس بتنی می‌باشد، لذا

تنش‌های کششی ایجاد می‌شود (سانجوان و مورآگس، ۱۹۹۷). با وجود اینکه الیاف فولادی در کنترل ترک تحت تنش‌های وارده به بتن مؤثر هستند، اما در تنش‌های زیاد، توانایی جلوگیری از رشد بیش از حد ترک‌ها را ندارند (کیان و استروون، ۲۰۰۰).

یائو و همکاران (۲۰۰۳) بتن حاوی الیاف فولادی، کربنی و پلی پروپیلن با درصدهای مختلف را مورد آزمایش مقاومت خمشی قرار دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در هر صورت، اضافه کردن الیاف، بتن را نسبت به بتن معمولی مقاوم‌تر و شکل‌پذیرتر می‌سازد. بیشترین مقاومت خمشی مربوط به الیاف فولادی است که این مسئله نشان‌دهنده خواص مناسب این نوع الیاف است. در حالی که الیاف دیگر، مثل الیاف فولادی، تغییر اساسی در مشخصات بتن ایجاد نکردند. نتایج نشان داد که ترکیب الیاف فولادی با الیاف کربنی منجر به بیشترین مقاومت شده است.

کورشی و همکاران (۲۰۰۸) خواص بتن با مقاومت زیاد را با افزودن الیاف فولادی بررسی کردند. نتایج آزمایش آنها نشان داد که با افزایش الیاف فولادی، مقاومت کششی به صورت خطی افزایش می‌یابد و سرعت افزایش در ۵ روز اول بیشتر می‌باشد.

زیمیل و همکاران (۲۰۰۶) در استرالیا در بررسی‌های خود نشان دادند که چگونه الیاف پلی پروپیلنی رفتار خردشدگی بتن درجا را بهبود می‌بخشند. نتایج به دست آمده دیدگاهی از نظر خردشدگی بتن با مقادیر مختلف الیاف پلی پروپیلنی را ارائه می‌دهد.

بانتیا و همکاران (۱۹۹۵) و شاه (۱۹۹۱) بتن الیافی از دو دسته از الیاف با جنس یکسان و اندازه‌های مختلف را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که الیاف کوچکتر بین ترک‌های کوچک پل زده و رشد ریزترک‌ها را کنترل کرده و از به هم پیوستن آنها جلوگیری نموده و به میزان قابل توجهی باعث بهبود

سال‌های اخیر، در کشور ایران، سالانه بیش از ۵۰۰ کیلومتر خط ریلی جدید احداث می‌شود که در حدود ۸۰۰ هزار عدد تراورس بتنی در آن استفاده می‌شود. قیمت هر تراورس بستگی به کیفیت و نحوه‌ی کاربرد آن دارد. اما به‌طور تقریبی، قیمت هر تراورس را می‌توان حدود ۲۵۰۰۰۰ تومان تخمین زد و می‌توان گفت سالانه بیش از ۲۰۰ میلیارد تومان در این بخش سرمایه‌گذاری می‌شود. حال اگر حدود ۱۰٪ این تراورس‌ها نیازمند تعمیر یا تعویض باشند، ملاحظه می‌شود که هزینه‌های مرتبط با این بخش نیز مقدار قابل ملاحظه خواهد بود. از این رو، مدیران راه‌آهن در ایران و دیگر کشورها در صدد افزایش مقاومت و دوام تراورس‌ها از طریق به-کارگیری روش‌های نوین و مواد و مصالح نوین می‌باشند.

بتن یک ماده‌ی ساختمانی است که در کشش عملکرد ضعیفی داشته و این مسئله باعث وقوع ترک و خزش می‌شود. ترک‌ها اغلب با گذشت زمان و افزایش تنش‌ها، بیشتر شده و در عمق بتن نفوذ می‌کنند. بنابراین، برای جلوگیری از رشد بیش از حد ترک‌ها از الیاف فولادی استفاده می‌شود (گوزیبوسکی و شاه، ۱۹۹۰؛ پادرون و زولو، ۱۹۹۰). به‌علت ترکیب شدن الیاف به‌صورت یکنواخت در بتن، در همه‌ی جهات در بتن قرار می‌گیرند. وقتی که بتن سخت می‌شود، بین الیاف و ذرات بتن پل زده شده که از رشد ریزترک‌ها جلوگیری می‌شود. البته علاوه بر الیاف فولادی، الیاف پلیمری و کربنی نیز در بتن به‌کار می‌رود. در میان الیاف پلیمری، الیاف پلی پروپیلن یکی از رایج‌ترین و محبوب‌ترین الیاف در میان محققین است (بیاسی و زنگ، ۱۹۹۸؛ سروشیان و همکاران، ۱۹۹۸؛ زولو و هیس، ۱۹۹۸؛ وانگ و همکاران، ۲۰۰۱؛ بیاسی و داهری، ۲۰۰۲؛ مو و همکاران، ۲۰۰۲).

مقاومت کششی بتن در حدود ۱۰٪ مقاومت فشاری آن می‌باشد. بنابراین، اغلب ترک‌ها در بتن تحت

## ۲. برنامه آزمایشگاهی

در این تحقیق، تعداد ۱۲۰ عدد نمونه استوانه‌ای و منشوری حاوی درصدهای مختلف از الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن به صورت توأم ساخته و روی هر یک از نمونه‌ها آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی و خمشی انجام شده است. در ادامه، به مشخصات و نتایج این آزمایش‌ها پرداخته می‌شود.

### ۲-۱. مشخصات مصالح مصرفی

در این تحقیق، از مصالح ساخت بتن در کارخانه‌ی تولید تراورس کرج استفاده گردید. بنابراین، کلیه مصالح از قبیل شن درشت‌دانه و ریزدانه و ماسه از نوع طبیعی بوده و دانه‌بندی مصالح مطابق نشریه ۳۰۱ (نشریه ۳۰۱، ۱۳۸۴) برای ساخت بتن تراورس انتخاب شده است. در نشریه مذکور، برای دانه‌بندی مصالح از ضوابط استاندارد DIN EN 13230-2 (استاندارد DIN، ۲۰۰۳) آلمان استفاده شده است.

الیاف فولادی به کار رفته در این پژوهش از شرکت صنایع مفتولی زنجان و روان‌کننده‌ی مورد استفاده (فوق‌روان‌ساز کربوکسیلاتی، BC20) از شرکت بتن شیمی خاتم می‌باشد. مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. خواص فیزیکی و مکانیکی الیاف مصرفی

خصوصیات الیاف	الیاف فولادی	الیاف پلی‌پروپیلن
مقطع	دایره	دایره
طول (میلی‌متر)	۵۰	۳۶
قطر (میلی‌متر)	۰/۸	بسیار ناچیز
قطر/طول	۶۲/۵۰	-
مقاومت کششی (مگاپاسکال)	۱۲۰۰ <	۴۰۰
چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	۷۸۵۰	۹۱۰
مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)	۱۶۰	۳/۵ - ۳/۹

مقاومت خمشی می‌شود.

پژوهش دیگری روی بتن الیافی از دو دسته الیاف با یک اندازه و دو جنس مختلف نشان داد که الیاف سخت‌تر و با مدول الاستیسیته‌ی بالاتر منجر به مقاومت در برابر اولین ترک و مقاومت نهایی شده و نوع دیگر که تقریباً انعطاف‌پذیر است منجر به بهبود مقاومت خمشی بعد از اولین ترک می‌شود (وانگ و همکاران، ۲۰۰۱).

هوانگ و همکاران (۲۰۱۱) تراورس‌های پیش‌تنیده‌ی SFRC با ۰/۷۵ درصد حجمی الیاف فولادی به طول ۳۰ میلی‌متر طراحی کردند. بارگذاری انجام شده مطابق روش AREMA (استاندارد AREMA، ۲۰۰۶) صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که تراورس‌های SFRC تحت ۳ میلیون سیکل بارگذاری بدون شکست بوده و مقاومت بالایی از خود نشان دادند. اما آن‌ها در تحقیقات خود چنین آزمایشی را روی بتن‌های تراورس معمولی انجام ندادند که نیازمند تحقیقات بیشتری در این زمینه است.

صادقی و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی تأثیر افزودن الیاف فولادی و کابل‌های پیش‌تنیده به مقدار صفر، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۱ درصد حجمی بتن بر مشخصات مکانیکی بتن تراورس پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از الیاف فولادی در بتن تراورس باعث بهبود مقاومت خمشی، ظرفیت استهلاک انرژی و مقاومت در برابر ترک می‌شود.

با توجه به مطالعات انجام شده‌ی قبلی، ملاحظه گردید که مطالعه در مورد بتن تراورس و با درصدهای مختلف الیاف پلی‌پروپیلن و فولادی و در حالت ترکیبی تاکنون به صورت جدی صورت پذیرفته است. لذا، در این مقاله به بررسی و دستیابی به درصد بهینه‌ی این الیاف پرداخته می‌شود.

مطالعه عددی و آزمایشگاهی تأثیر افزودن همزمان الیاف فولادی و پلی پروپیلن بر مقاومت بتن تراورس

با رویکرد رسیدن به درصد بهینه‌ی الیاف

(مطالعه موردی کارخانه تولید بتن تراورس کرج)

جدول ۳. درصد‌های حجمی استفاده همزمان الیاف

فولادی و پلی پروپیلن		شماره طرح
الیاف فولادی (%)	الیاف پلی پروپیلن (%)	
۰	۰	۱
۱	۰	۲
۰/۸	۰/۲	۳
۰/۶	۰/۴	۴
۰/۵	۰/۵	۵
۰/۴	۰/۶	۶
۰/۲	۰/۸	۷
۰	۱	۸

همچنین، آزمایش‌های شیمیایی روی آب مصرفی در بتن در آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان البرز انجام شده که نتایج آن در جدول ۴ آورده شده است.

## ۲-۲. طرح اختلاط بتن مصرفی

مطابق جدول ۲، نسبت آب به سیمان مورد استفاده در این پژوهش برابر با ۰/۳۸ در نظر گرفته شد. همچنین، از مجموع سنگدانه‌ها (شن و ماسه)، ۵۵٪ شن و ۴۵٪ ماسه استفاده شد و نحوه‌ی اختلاط همزمان الیاف فولادی و پلی پروپیلن به نسبت حجمی کل بتن مطابق جدول ۳ صورت گرفت. آزمایش‌ها در آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشگاه سمنان انجام گردید.

جدول ۲. نسبت‌های اختلاط بتن مصرفی در

آزمایش‌ها

۰/۸۰	شن ریزدانه (کیلوگرم)
۰/۴۵	شن درشت‌دانه (کیلوگرم)
۱	ماسه (کیلوگرم)
۰/۵۷	سیمان (کیلوگرم)
۰/۲۲	آب (کیلوگرم)
۰/۳۸	سیمان/آب

جدول ۴. نتایج آزمایش‌های شیمیایی روی آب مصرفی در بتن

pH	هدایت الکتریکی	سختی کل	سولفات	کلرید	نترات	نیتريت	سدیم	پتاسیم	کلسیم	مواد معلق	قلیابیت کل
۷/۴۵	-	-	۱۰۰	۵۶	-	-	۴/۵	۰/۲	-	۸۰	۶/۲

## ۲-۳. روش آزمایش

با توجه به اینکه یکی از اهداف این تحقیق، بررسی اثر افزودن الیاف بر خواص بتن تولیدی تراورس کرج می‌باشد، لذا تغییری در طرح اختلاط بتن تولیدی داده نشد. جهت افزودن الیاف پلی پروپیلن، ابتدا رشته‌های این الیاف به‌طور کامل از هم جدا شده (باقری و پرهیزکار، ۱۳۷۸) تا در هنگام اختلاط با بتن دچار جمع‌شدگی و گلوله شدن نشود. همچنین، مطابق آیین-نامه ACI (آیین‌نامه ACI، ۱۹۹۸) حدود یک دقیقه پس از افزودن الیاف، همچنان باید روند مخلوط شدن ادامه یابد تا رشته‌های الیاف به خوبی در سرتاسر بتن پراکنده شوند. اما برای افزودن الیاف فولادی، فقط کافیسیت به

تدریج آن را به بتن افزوده و به‌طور کامل مخلوط شود. به علت منفک بودن الیاف فولادی از یکدیگر، پدیده‌ی جمع‌شدگی در این الیاف رخ نخواهد داد. با توجه به این که هدف، انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی و خمشی روی بتن‌هاست، لذا با توجه به حالت‌های اختلاط همزمان الیاف در بتن، از هر نمونه تعداد ۵ عدد ساخته شد. برای نمونه‌های فشاری و کششی، قالب استوانه‌ای به قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر و برای نمونه‌های خمشی، قالب منشوری به ابعاد ۵۰\*۱۰\*۱۰ سانتی‌متر انتخاب گردید. هر قالب، در سه مرحله بتن‌ریزی و در هر بار با ۲۵ ضربه به‌صورت حلزونی به کمک ویراتور دستی، ویریه

پلی پروپیلن بسیار بیشتر از الیاف فولادی است، لذا افزایش مقاومت چشمگیر نبوده و تقریباً با نمونه‌ی شاهد (طرح شماره‌ی ۱) مقاومت یکسانی دارند. همچنین، در طرح شماره‌ی ۴ که ۰/۶ درصد الیاف پلی پروپیلن و ۰/۴ درصد الیاف فولادی دارد، به علت اینکه مقدار الیاف پلی پروپیلن زیاد و مقدار الیاف فولادی کم است، لذا بتن رفتار خوبی از خود نشان نداده و باعث کاهش مقاومت نسبت به نمونه‌های دیگر شده است. البته می‌توان این مسئله را با تحقیقات بیشتر در این رابطه به طور مجزا بررسی نمود. با توجه به نتایج به دست آمده از مقاومت فشاری نمونه‌ها، طرح شماره‌ی ۸ بهترین نتیجه و طرح شماره‌ی ۴ ضعیف‌ترین نتیجه را از خود نشان داده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱. آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها: الف) نحوی قرارگیری نمونه در زیر جک و ب) ترک در نمونه پس از انجام آزمایش

گردید. پس از مدت حداکثر ۲۴ ساعت، قالب‌ها باز و داخل حوضچه‌ی آب (دمای حدود ۲۵ درجه‌ی سلسیوس) قرار داده و نمونه‌ها پس از مدت ۲۸ روز از داخل حوضچه‌ی آب خارج گردیدند. عمل‌آوری نمونه‌ها مطابق استاندارد (ISIRI581 (INSO581, ۲۰۱۵) انجام شد. با توجه به هزینه‌بر بودن و عدم فضای کافی مناسب برای عمل‌آوری در شرایط بخار آب، در کارخانه تولید تراورس بتنی کرج بیشتر نمونه‌ها در شرایط حوضچه‌ی آب عمل‌آوری می‌شوند. همچنین، با توجه به وزن بسیار زیاد تراورس‌های بتنی، امکان انباشتن آن‌ها در فضای محدود اتاق بخار آب بسیار مشکل می‌باشد. با توجه به اینکه هدف اصلی این تحقیق، بررسی رفتار بتن می‌باشد، بنابراین وجود رطوبت برای بتن جهت عمل‌آوری کفایت می‌کند و چه در محیط بخار آب و چه در حوضچه‌ی آب، تفاوت چندانی در نتایج و مقاومت بتن ندارد.

### ۳. انجام آزمایش‌ها و بررسی نمونه‌ها

پس از خارج کردن نمونه‌ها از داخل حوضچه‌ی آب و خشک شدن آب سطحی نمونه‌ها پس از گذشت یک ساعت، مقاومت فشاری، کششی و خمشی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد.

#### ۳-۱. مقاومت فشاری

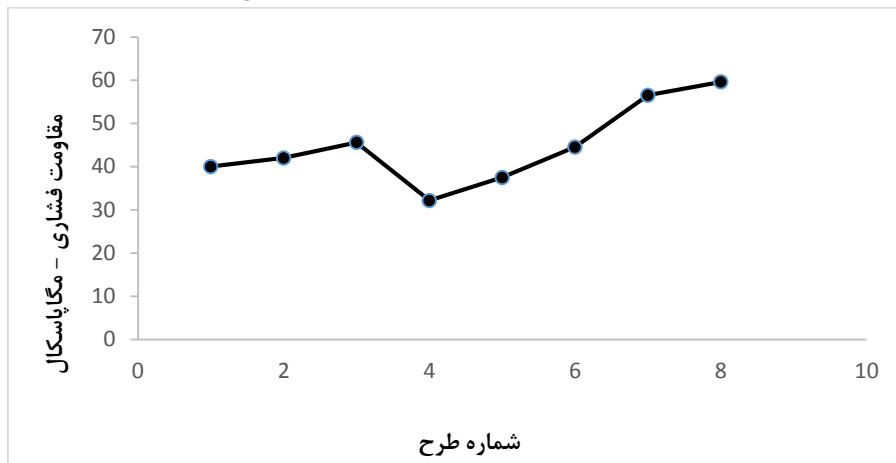
آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های استوانه‌ای توسط جک هیدرولیک با ظرفیت ۳۰۰۰ کیلونیوتن و سرعت بارگذاری ۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه، نشان داده شده در شکل ۱ انجام شد.

شکل ۲ مقاومت فشاری نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ۲ مشخص است، با افزایش مقدار الیاف فولادی در بتن (کاهش الیاف پلی پروپیلن)، مقاومت فشاری افزایش یافته است. در طرح‌های شماره ۲، ۳ و ۴ به دلیل اینکه مقدار الیاف

مطالعه عددی و آزمایشگاهی تأثیر افزودن همزمان الیاف فولادی و پلی پروپیلن بر مقاومت بتن تراورس

با رویکرد رسیدن به درصد بهینه‌ی الیاف

(مطالعه موردی کارخانه تولید بتن تراورس کرج)



شکل ۲. مقاومت فشاری طرح‌ها



شکل ۳. آزمایش مقاومت کششی و نحوه‌ی قرارگیری

نمونه‌ها در زیر جک

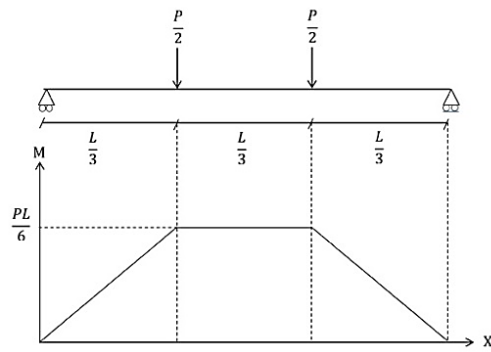
### ۳-۳. مقاومت خمشی (مدول گسیختگی)

برای انجام آزمایش مقاومت خمشی، از تست چهارنقطه‌ای استفاده شد. نحوه‌ی انجام آزمایش و نحوه‌ی شکست نمونه‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است. شکل ۶ مقاومت خمشی نمونه‌ها با توجه به تغییرات درصد الیاف فولادی و پلی پروپیلن را نشان می‌دهد.

### ۳-۲. مقاومت کششی

نحوه‌ی انجام آزمایش مقاومت کششی روی نمونه‌های استوانه‌ای در شکل ۳ نشان داده شده است. مقاومت کششی به روش تست برزیلی انجام شد.

شکل ۴ مقاومت کششی نمونه‌ها با توجه به تغییرات درصد الیاف فولادی و پلی پروپیلن را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، با توجه به درصد اختلاط سنگدانه‌هایی که در بتن تراورس استفاده می‌شود، طرح شماره ۲ (۱٪ الیاف پلی پروپیلن) کمترین مقاومت را در بین سایر طرح‌ها از خود نشان داده است. اما در طرح‌های شماره‌ی ۳ الی ۸ با شیب‌های متغیری همواره بر مقاومت کششی افزوده شده است، که این پدیده را می‌توان به نقش عمده‌ی الیاف فولادی در بتن وابسته دانست. به‌طوری که با افزایش الیاف فولادی تا مقدار ۱٪ حجمی بتن، پیوسته بر مقاومت کششی آن افزوده شده است. به‌طور کلی، با توجه به نتایج کلیه‌ی طرح‌های انجام شده، می‌توان بیان کرد که مقاومت کششی تا حدود ۱/۵ برابر نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش می‌یابد. لذا، با توجه به نتایج به‌دست آمده از مقاومت کششی نمونه‌ها، طرح شماره‌ی ۸ بهترین نتیجه و طرح شماره‌ی ۲ ضعیف‌ترین نتیجه را از خود نشان داده است.



(الف)



(ب)

شکل ۵. نحوه انجام آزمایش خمش روی نمونه‌ها: الف) جزئیات بارگذاری و ب) نحوه انجام آزمایش



شکل ۶. مقاومت خمشی (مدول گسیختگی) طرح‌ها

به‌طور کلی، بجز طرح‌های ۲ و ۳، در مابقی طرح‌ها مقاومت تا ۳۷٪ نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش یافته است. لذا، در بین کلیه‌ی طرح‌های آزمایش شده، بیشترین و کمترین مقاومت به ترتیب مربوط به طرح‌های ۶ و ۳ می‌باشد.

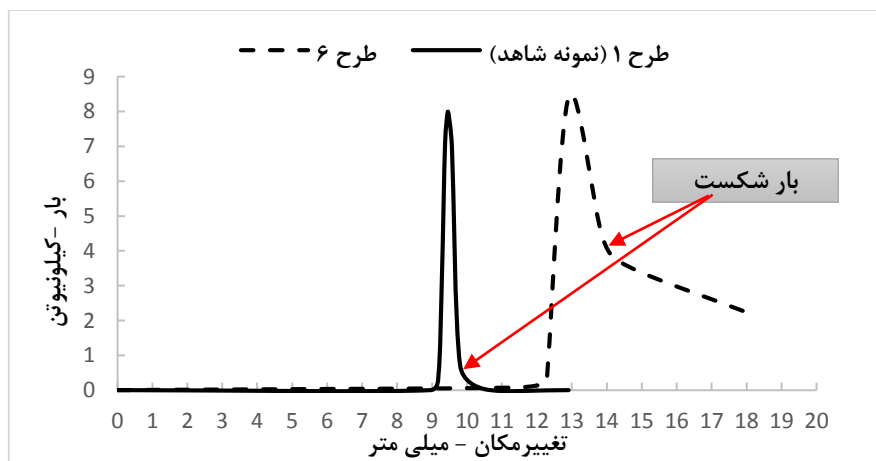
### ۳-۴. جابجایی نمونه‌ها

با توجه به اینکه تست‌های مقاومت فشاری، کششی و خمشی نمونه‌ها توسط جک هیدرولیک با قابلیت تعیین مقادیر جابجایی‌ها و رسم نمودار انجام گردید، لذا مقادیر میانگین جابجایی‌ها در هر طرح و هر تست در شکل ۷ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۶ می‌توان مشاهده نمود که در طرح‌های ۲ و ۳ که بیشترین مقدار الیاف پلی پروپیلن را دارا هستند، مقاومت خمشی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌ی شاهد (طرح ۱) کاهش می‌یابد. البته ممکن است در بتنی با طرح اختلاط متفاوت (بجز بتن تراورس)، منجر به نتایج متفاوتی شود. در طرح‌های ۴، ۵ و ۶ به‌علت اینکه درصد‌های به‌کار رفته از الیاف فولادی و پلی پروپیلن تقریباً نزدیک به هم هستند، لذا الیاف پلی پروپیلن با پل زدن و الیاف فولادی با تحمل مناسب خمشی، باعث افزایش مقاومت می‌شوند. اما در طرح‌های ۷ و ۸ به‌علت اینکه حضور الیاف پلی پروپیلن کمتر شده، لذا پدیده‌ی پل زدن کمتر رخ داده و با وجود توانمندی الیاف فولادی در برابر خمش، اما از مقاومت آن‌ها در مقایسه با طرح‌های ۴، ۵ و ۶ کاسته شده است.



شکل ۷. مقایسه جابجایی نمونه‌های فشاری، کششی و خمشی



شکل ۸. مقایسه طاقتم خمشی طرح ۶ با طرح ۱ (نمونه شاهد)



نمونه‌ی شاهد می‌باشد را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، سطح زیر نمودار بار- تغییر مکان طرح ۶ برابر ۳/۵ کیلونیوتن. میلی‌متر و برای طرح ۱ برابر با ۱ کیلونیوتن. میلی‌متر می‌باشد. این بدان معناست که طرح ۶ که به‌عنوان بهترین طرح برای مقاومت خمشی انتخاب گردید، طاقت خمشی بتن شاهد را ۳/۵ برابر افزایش داد. همچنین، طبق شکل ۸، در طرح ۶، بتن رفتار نرم‌تری نسبت به نمونه‌ی شاهد از خود نشان داده و نرم‌تر می‌شکند. پارامتر دیگری که می‌توان به کمک بار- تغییر مکان بررسی نمود، بار شکست می‌باشد. بار شکست، لحظه‌ای است که نمودار هنگام طی نمودن سیر نزولی خود دچار شکستگی ناگهانی در خود می‌شود. بنابراین، بار شکست طرح‌های ۶ و ۱ به ترتیب ۴/۳۵ و ۰/۷۲ می‌باشد.

### ۶-۳. بررسی و تفسیر نتایج آزمایش‌ها

نتایج کلی حاصل از انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی و خمشی روی نمونه‌ها در جدول ۵ آورده شده است. با توجه به این نتایج، بیشترین مقاومت فشاری، کششی و خمشی نمونه‌ها به ترتیب مربوط به طرح‌های شماره ۸، ۸ و ۶ می‌باشد. همچنین، کمترین مقاومت فشاری، کششی و خمشی نمونه‌ها به ترتیب مربوط به طرح‌های شماره ۴، ۲ و ۳ می‌باشد. لذا به‌طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که در بتن‌های حاوی همزمان الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن، افزایش مقدار الیاف فولادی عملکردی مطلوب‌تری نسبت به افزایش الیاف پلی‌پروپیلن در بهبود مقاومت بتن دارد. اما باید گفت که عملکرد مناسب الیاف پلی‌پروپیلن در درصدهای کم در پل زدن بین سنگدانه‌ها و سیمان و آب نقش به‌سزایی در بهبود مقاومت بتن دارند.

همچنین، با توجه به نتایج به‌دست آمده از تست مقاومت فشاری نمونه‌ها، به‌طور کلی، با افزودن مقدار الیاف فولادی در بتن تراورس، بر میزان مقاومت فشاری

با مقایسه‌ی مقادیر حاصل از جابجایی نمونه‌ها در آزمایش مقاومت فشاری، با توجه به اینکه در هر طرح میزان استفاده از الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن متفاوت می‌باشد، بنابراین مقادیر جابجایی آن‌ها نیز متفاوت خواهد بود. به‌طوری که طرح‌های ۲ و ۶ بیشترین جابجایی را از خود نشان داده‌اند.

با توجه به نتایج جابجایی به‌دست آمده از آزمایش مقاومت کششی نمونه‌ها، بیشترین مقدار جابجایی در طرح شماره ۶ و کمترین آن در طرح شماره ۱ (نمونه شاهد) به‌دست آمده است.

با توجه به مقادیر به‌دست آمده از جابجایی نمونه‌ها در آزمایش خمش، جابجایی در طرح‌های ۱، ۲ و ۳ تقریباً مقادیر یکسانی دارند و به‌طور مشابه در طرح‌های ۴، ۵ و ۶ نیز چنین مسئله‌ای مشاهده می‌شود. اما در طرح‌های ۷ و ۸ به تدریج از مقدار جابجایی کاسته شده است. به‌طور کلی، با تقریب مناسبی می‌توان گفت در کلیه‌ی طرح‌ها با افزایش درصد الیاف فولادی، نمونه‌ها به‌صورت نرم شکسته و جابجایی آن‌ها بیشتر می‌شود. اما در طرح‌های ۷ و ۸ به‌علت اینکه مقادیر الیاف پلی‌پروپیلن در بتن خیلی کم است، الیاف فولادی به‌صورت یک جانبه نقش تحمل خمش را بر عهده دارند.

### ۵-۳. طاقت خمشی

با توجه به اینکه مهمترین اثر الیاف بر بتن، افزایش شکل‌پذیری می‌باشد، اندازه‌گیری طاقت خمشی در کارهای اکثر محققین مورد توجه قرار داشته است. به همین جهت، در این مطالعه نیز نمونه‌های منشوری که تحت آزمایش خمش قرار گرفتند، نمودار بار-تغییر مکان برای آن‌ها رسم می‌گردد. سطح زیر نمودار بار-تغییر مکان به عنوان طاقت خمشی تعیین می‌شود. شکل ۸ منحنی بار-تغییر مکان برای طرح شماره ۶ که بیشترین مقاومت خمشی را داشته و طرح شماره ۱ که

افزوده شد. با توجه به اینکه نقش اصلی الیاف پلی پروپیلن در بتن، ایجاد پیوستگی مناسب بین سنگدانه‌ها و خمیر سیمان بوده، لذا می‌توان از این الیاف به عنوان الیاف مکمل با مقادیر کم در کنار الیاف فولادی استفاده نمود. چرا که کاربرد عمده‌ی استفاده از الیاف فولادی در بتن تراورس، بهبود مقاومت آن می‌باشد.

طبق نتایج به دست آمده از تست مقاومت کششی نمونه‌ها، به طور کلی با کاهش مقدار استفاده از الیاف پلی پروپیلن و همچنین افزایش مقدار استفاده از الیاف فولادی در بتن تراورس، به طور پیوسته بر مقاومت کششی بتن افزوده شد. لازم به ذکر است که افزایش مقاومت بتن ناشی از کاهش استفاده از الیاف پلی پروپیلن در بتن، روند مناسب‌تری نسبت به تست مقاومت فشاری داشته و با شیب مناسبی رو به بهبود می‌باشد.

طبق نتایج به دست آمده از تست مقاومت خمشی نمونه‌ها، در طرح‌های شماره ۲ و ۳ که بیشترین مقدار

استفاده از الیاف پلی پروپیلن و کمترین مقدار استفاده از الیاف فولادی را دارند، مقاومت خمشی نسبت به نمونه‌ی شاهد کمتر شده و در طرح‌های بعد افزایش یافت. به طوری که با توجه به اثر این دو نوع الیاف با یکدیگر در ترکیب با بتن در طرح شماره ۶ به بهترین وجه ممکن صورت پذیرفته و باعث بیشترین افزایش مقاومت نسبت به نمونه‌ی شاهد گردید. همچنین، طبق نتایج به دست آمده، طرح شماره ۶ تا ۳/۵ برابر طاقت خمشی بتن تراورس را افزایش می‌دهد.

شکل‌های ۹ الی ۱۱ نمودارهای بی‌بعد شده‌ی مربوط به مقاومت فشاری، کششی و خمشی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌ی شاهد و همچنین خط برازش آن‌ها را نشان می‌دهند.

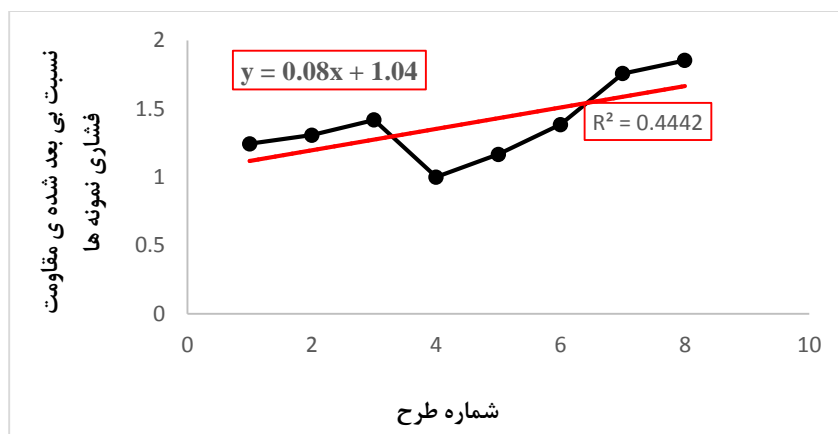
با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام شده، می‌توان با برازش خطوط درجه ۱، به پیش‌بینی مقاومت فشاری، کششی و خمشی نمونه‌ها با توجه به نوع طرح مربوطه پرداخت.

طبق نتایج به دست آمده از تست مقاومت کششی نمونه‌ها، در طرح‌های شماره ۲ و ۳ که بیشترین مقدار

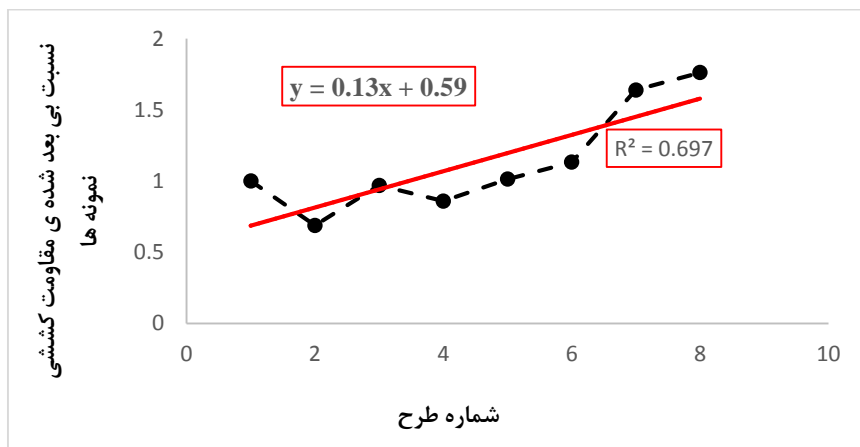
استفاده از الیاف فولادی و کمترین مقدار استفاده از الیاف پلی پروپیلن را دارند، مقاومت خمشی نسبت به نمونه‌ی شاهد کمتر شده و در طرح‌های بعد افزایش یافت.

جدول ۵. بهترین و ضعیف‌ترین طرح‌ها

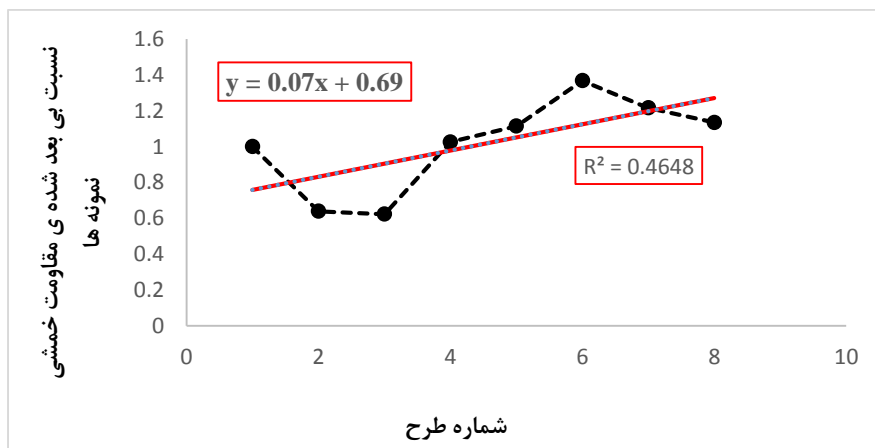
نوع آزمایش	بهترین طرح	ضعیف‌ترین طرح
مقاومت فشاری	۸ (الیاف فولادی - ۰٪ الیاف پلی پروپیلن)	۴ (الیاف فولادی - ۰٪ الیاف پلی پروپیلن)
مقاومت کششی	۸ (الیاف فولادی - ۰٪ الیاف پلی پروپیلن)	۲ (الیاف فولادی - ۱٪ الیاف پلی پروپیلن)
مقاومت خمشی	۶ (الیاف فولادی - ۰٪ الیاف پلی پروپیلن)	۳ (الیاف فولادی - ۰٪ الیاف پلی پروپیلن)



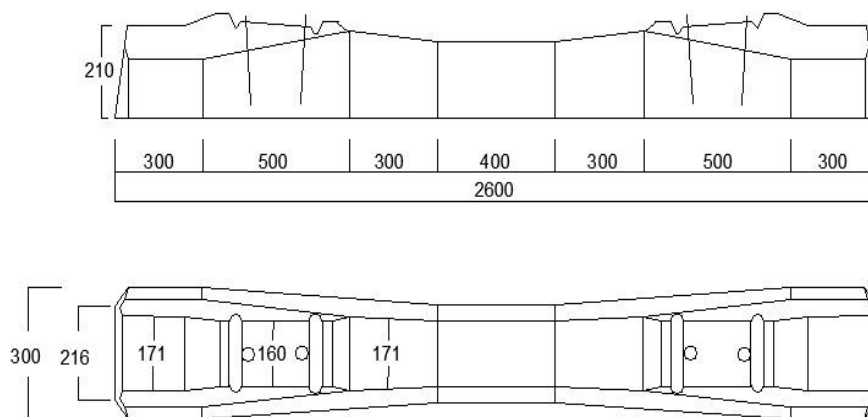
شکل ۹. خط برازش نمودار بی‌بعد شده‌ی مقاومت فشاری نمونه‌ها



شکل ۱۰. خط برازش نمودار بی بعد شده ی مقاومت کششی نمونه ها

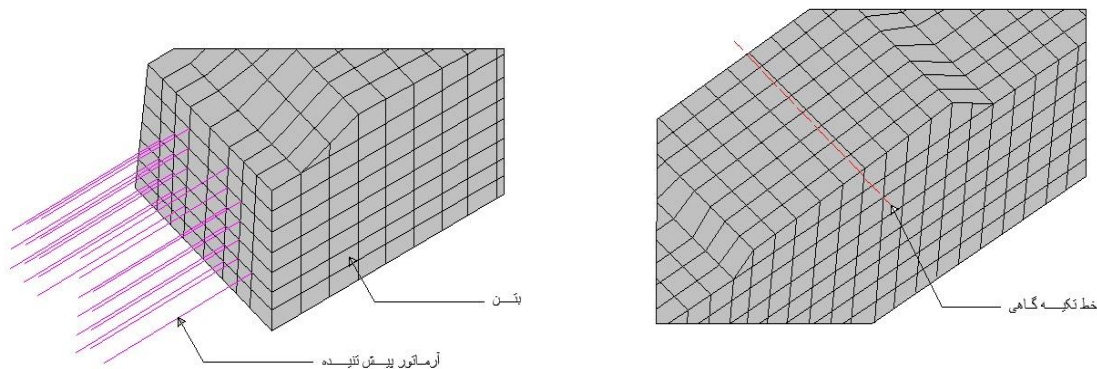


شکل ۱۱. خط برازش نمودار بی بعد شده ی مقاومت خمشی نمونه ها



شکل ۱۲. مشخصات هندسی تراورس بتنی تولید شده در کارخانه ی کرج

مطالعه عددی و آزمایشگاهی تأثیر افزودن همزمان الیاف فولادی و پلی پروپیلن بر مقاومت بتن تراورس با رویکرد رسیدن به درصد بهینه‌ی الیاف  
(مطالعه موردی کارخانه تولید بتن تراورس کرج)



شکل ۱۳. مش بندی بتن تراورس به همراه آرماتورهای پیش تنبیده

نمی‌توان به طور کامل از حضور آرماتورهای پیش‌تنبیده در آن صرف‌نظر نمود. اما استفاده از الیاف (الیاف فولادی-الیاف پلی‌پروپیلن) در تراورس بتنی، می‌تواند مقدار قابل توجهی از آرماتورهای پیش‌تنبیده را کاسته و سبب بهبود رفتار بتن در تحمل تنش‌های فشاری، کششی و خمشی از جانب قطار گردد. با توجه به اینکه مسئله‌ی ترک و مودهای شکست در تراورس بتنی، به لحاظ مسائل تعمیر و نگهداری، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده، لذا حضور الیاف در بتن، به همراه آرماتورهای پیش‌تنبیده می‌تواند سبب بهبود خواص مقاومتی تراورس بتنی گردد.

در شکل ۱۴، نتایج حاصل از تست مقاومت خمشی (تست ممان منفی) نمونه‌ی واقعی تراورس بتنی پیش‌تنبیده، مدل ساخته شده در نرم‌افزار ANSYS (تراورس بتنی پیش‌تنبیده)، نمونه‌ی بتنی بدون الیاف و آرماتور و همچنین نمونه‌ی خمشی ساخته شده با الیاف (بهترین طرح خمشی = طرح شماره ۶ (۰/۶ درصد الیاف فولادی- ۰/۴ درصد الیاف پلی‌پروپیلن)) با یکدیگر مقایسه شده است.

#### ۴. مقایسه‌ی نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی

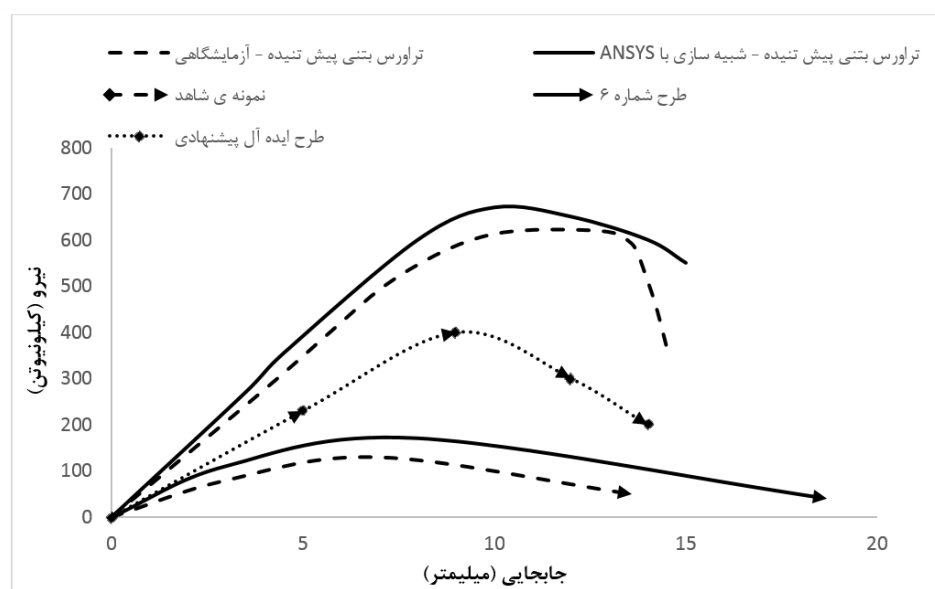
به منظور درک بهتر از نتایج به‌دست آمده از نمونه‌های آزمایشگاهی، نمونه‌های تراورس ساخته شده در کارخانه‌ی تراورس کرج با همان مشخصات بتن و سیستم پیش‌تندگی در آن، به کمک نرم‌افزار ANSYS مدل‌سازی شده و تست مقاومت خمشی روی آن صورت گرفته است. جزئیات نمونه‌های تراورس بتنی و مش‌بندی آن در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است.

از آنجایی که در سیستم حمل و نقل و ریلی، میزان تنش‌های وارد بر ریل، پابند و تراورس (بتنی، فلزی، چوبی) بسیار زیاد بوده، و هدف اصلی در این تحقیق بررسی مقاومت تراورس‌های بتنی می‌باشد، بنابراین آرماتور به تنهایی پاسخگوی تنش‌های وارد شده نمی‌باشد. در نتیجه باید از کابل‌های پیش‌تنبیده جهت تحمل تنش‌های زیاد استفاده نمود. از آنجایی که طبق تحقیقات اخیر، به‌کار بردن الیاف در بتن سبب بهبود مشخصات مقاومتی آن می‌شود، اما در رابطه با تراورس‌های بتنی به علت تنش‌های بسیار زیاد وارده از طرف قطار روی آن‌ها، حتی با افزودن درصدی از الیاف مختلف نیز

ایده آل که می تواند ترکیبی از الیاف و آرماتور پیش تنیده در بتن باشد، پیشنهاد شد. با توجه به این مطلب، منحنی ایده آل تحت بار حدود ۴۰۰ کیلونیوتن جابجایی معادل با ۹ میلی متر خواهد داشت.

وجود الیاف پلی پروپیلن در بتن باعث پل زدن در بین سنگدانه ها و سیمان شده و از وقوع ترک های عمیق جلوگیری خواهد کرد. لذا، این مطلب نیز به خودی خود حائز اهمیت است که نیاز به تحقیقات بیشتر در این زمینه دارد.

با توجه به نتایج به دست آمده از شکل ۱۴ می توان دریافت که اختلاف بین مقادیر حاصل از تست مقاومت خمشی تراورس بتنی پیش تنیده در آزمایشگاه و شبیه سازی عددی بسیار ناچیز بوده و لذا می توان از درستی تحلیل حاصل از شبیه سازی تراورس اطمینان حاصل نمود. همچنین، با توجه به نمودارهای رسم شده از نمونه ی شاهد و طرح شماره ی ۶ که بیشترین مقاومت خمشی را داشته، و با توجه به مقادیر تراورس بتنی پیش تنیده، در نهایت منحنی ای در قالب منحنی



شکل ۱۴. مقایسه ی نتایج حاصل از نمونه های آزمایشگاهی و شبیه سازی شده

به طور کلی، با افزایش مقدار الیاف فولادی، مقاومت کششی تا ۱۵۰٪ افزایش یافته و فقط در برخی از طرح ها، مقاومت کششی کمتر از نمونه ی شاهد شد. با توجه به نتایج حاصل از آزمایش مقاومت خمشی نمونه ها، بین طرح های ۳ الی ۶، مقاومت افزایش یافته و بین طرح های ۱ الی ۳ (صفر الی ۰/۴ درصد الیاف فولادی) و ۶ الی ۸ (۰/۶ الی ۱ درصد الیاف فولادی) مقاومت کاهش می یابد. اما به طور کلی، با افزایش مقادیر الیاف فولادی، روند افزایش مقاومت سیر صعودی داشته است.

## ۵. نتیجه گیری

در این تحقیق، روی ۱۲۰ عدد نمونه ی بتن تراورس تولیدی کارخانه ی کرج حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن به صورت همزمان، آزمایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی انجام شد که در مجموع ۸ طرح با درصد های مختلف الیاف ساخته و نتایج زیر به دست آمد:

از مجموع ۸ طرح مختلف، در آزمایش های مقاومت فشاری، با افزایش تدریجی الیاف فولادی و به تبع آن کاهش الیاف پلی پروپیلن، مقاومت فشاری نمونه ها تا ۸۴٪ افزایش یافت.

پلی پروپیلن) بیشترین جابجایی و طرح ۸ (۱٪ الیاف فولادی - ۰٪ الیاف پلی پروپیلن) کمترین جابجایی را دارا بودند.

وجود الیاف در بتن باعث جلوگیری از وقوع ترک‌های عمیق در بتن شده و پیوستگی در بتن را افزایش می‌دهد. همچنین، الیاف باعث بهبود خواص مقاومتی در تراورس بتنی شده و لذا به کمک نتایج به دست آمده می‌توان به طور تقریبی در حدود ۴۰٪ از آرماتورهای پیش‌تنیده در بتن کاسته و الیاف را جایگزین آن نمود.

استفاده‌ی همزمان از الیاف فولادی و پلی پروپیلن تا ۳/۵ برابر طاقت خمشی بتن تراورس را افزایش می‌دهد.

## ۶. سپاسگزاری

بدین وسیله از جناب آقای مهندس مازنی که در فراهم آوردن و هماهنگی گزارش‌ها و آزمایش‌های بتن تراورس کارخانه‌ی تولید تراورس کرج کمک شایانی در پیشبرد این تحقیق کردند، صمیمانه قدردانی می‌گردد.

در بین کلیه‌ی طرح‌ها، بهترین طرح برای مقاومت فشاری، کششی و خمشی به ترتیب طرح‌های ۸، ۸ و ۶ بود. این بدان معناست که هنگام اختلاط همزمان الیاف فولادی و پلی پروپیلن برای رسیدن به مقاومت بیشینه، باید مقدار الیاف فولادی در بتن بیشتر از مقدار الیاف پلی پروپیلن باشد.

در بین کلیه‌ی طرح‌ها، ضعیف‌ترین طرح برای مقاومت فشاری، کششی و خمشی به ترتیب طرح‌های ۴، ۲ و ۳ می‌باشد. این بدان معناست که به طور کلی، اگر مقدار استفاده از الیاف پلی پروپیلن در بتن بیشتر از الیاف فولادی باشد، نتیجه‌ی مطلوبی حاصل نشده و مقاومت آن کاهش می‌یابد. اما با این وجود، تأثیر خوب الیاف پلی پروپیلن در پل زدن بین سنگدانه‌های بتن غیر قابل انکار است.

از منحنی‌های برازش شده‌ی به دست آمده می‌توان دریافت که بیشترین شیب منحنی برازش به ترتیب در آزمایش‌های کشش، فشار و خمش حاصل شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از مقادیر جابجایی نمونه‌ها، طرح ۶ (۰/۶٪ الیاف فولادی - ۰/۴٪ الیاف

## ۷. مراجع

- ACI 544.3R. 1998. "Guide for Specifying Mixing, Placing and Finishing Fiber Reinforced Concrete". ACI Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute, Michigan.
- AREMA. 2006. "Manual for Railway Engineering (Chapter 30), Concrete ties". American Railway Engineering and Maintenance-of-way Association.
- Bagheri, A. R. and Parhizkar, T. 1999. "Application of fiber in cement and cement products". Constr. Res. Center Pub., 300: 75-83. (In Persian).
- Banthia, N., Moncef, A., Chokri, K. and Sheng, J. 1995. "Uniaxial tensile response of microfiber reinforced cement composites". J. Mater. Struct., 28(183): 507-517.
- Bayasi, Z. and Dhaheri, M. A. 2002. "Effect of exposure to elevated temperature on polypropylene fiber-reinforced concrete". ACI Mater. J., 99(1): 22- 26.
- DIN EN 13230-2. 2003. "EN-railway applications: Track: Concrete sleepers and bearers- Prestressed monoblock sleepers". Part 2, Deutsches Institut für Normung.
- Grzybowski, M. and Shah, S. P. 1990. "Shrinkage cracking of fiber reinforced concrete". ACI Mater. J., 87(2): 138-148.
- Hwang, C. L., Chen, C. T., Lee, L. S., Bui, L. A. T., Hou, B. S. and Hsieh, H. Y. 2011. "The material and mechanical property of heavy-duty prestressed concrete sleeper". Appl. Mech. Mater., 97-98: 408-413.
- INSO581. 2015. "concrete-making curing concrete test specimens in the laboratory- code of practice". 2<sup>nd</sup> revision.

- Management and Planning Organization. 2005. "Technical and general characteristics of railroad upstream line pavement". pp. 40-46. (In Persian).
- Mu, B., Meyer, C. and Shimanovich, S. 2002. "Improving the interface bond between fiber mesh and cementitious matrix", *Cement Concrete Res.*, 32(5): 783-787.
- Padron, I. and Zollo, R. F. 1990. "Effect of synthetic fibers on volume stability and cracking of Portland cement concrete and mortar", *ACI Mater. J.*, 87(4): 327-332.
- Qian, C. X. and Stroeven, P. 2000. "Development of hybrid polypropylene-steel fibre- reinforced concrete". *Cement and Concrete Res.*, 30: 63-69.
- Quresh, L. A., et. al. 2008. "Effect of mixing steel fibers and silica fume on properties of high strength concrete". *Proceedings of International Conference on Concrete: Constructions Sustainable Option*, Dundee.UK, pp. 173-185.
- Sadeghi J., Kian, A. R. T. and Khabbazi, A. S. 2016 "Improvement of mechanical properties of railway track concrete sleepers using steel fibres". *J. Mater. Civ. Eng.*, 28(11).
- Sanjuan, M. A. and Moragues, A. 1997. "Polypropylene-x mortar mixes: Optimization to control plastic shrinkage". *Compos. Sci. Technol.*, 57: 655-660.
- Shah, S. P. 1991. "Do fibers increase the tensile strength of cement-based matrices". *ACI Mater. J.*, RILEM, 88(6): 595-602.
- Soroushian, P., Elyamany, H., Tlili, A. and Ostowari, K. 1998. "Mixed-mode fracture properties of concrete reinforced with low volume fractions of steel and polypropylene fibers". *Cement and Concrete Compos.*, 20: 67-78.
- Wang, K., Shah, S. P. and Phuaksuk, P. 2001. "Plastic shrinkage cracking in concrete materials- Influence of fly ash and fibers". *ACI Mater. J.*, 98(6): 458-464.
- Yao, W., Li, J. and Wu, K. 2003. "Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction". *Cement Concrete Res.*, 33: 27-30.
- Zeiml, M., Leithner, D., Lackner, R. and Mang, H. A. 2006. "How do polypropylene fibers improve the spalling behavior of in-situ concrete?". *Cement Concrete Res.*, 36: 929-942.
- Zollo, R. F. and Hays, C. D. 1998. "Engineering material properties of a fiber reinforced cellular concrete". *ACI Mater. J.* 95(5): 631-635.

