

بررسی خواص مکانیکی و شکست روسازی‌های بتنی تک لایه و دولایه

محسن احمدی^۱، غلامعلی شفافبخش^{۲*}، ابوالفضل حسینی^۳

۱- دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۳- استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

*ghshafabakhsh@semnan.ac.ir

تاریخ دریافت: [۱۳۹۸/۰۹/۳۰]

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۹/۱۰/۲۳]

چکیده

به منظور گسترش روسازی‌های بتن غلتکی در راه‌ها با سرعت زیاد، اجرای یک لایه نازک از بتن با مقاومت لغزشی بالا روی بتن غلتکی و بلافاصله پس از اجرای آن پیشنهاد می‌شود. در این پژوهش به بررسی خواص مکانیکی و شکست اینگونه از روسازی‌های بتنی دو لایه‌ای پرداخته شده و با روسازی‌های رایج تک لایه‌ای بررسی شده است. از اینرو یک لایه نازک از بتن معمولی و یا بتن مسلح به الیاف پلی پروپیلن به ضخامتی نسبی ۳۰٪ ضخامت کل روسازی روی بتن غلتکی اجرا شد. آزمایش‌های مقاومت فشاری و آزمون شکست در مود I روی نمونه‌ها پس از ۲۸ روز عمل‌آوری انجام گرفت. عمده نتایج حاکی از آن است که افزودن الیاف پلی پروپیلن با مقدار مشخص شده تأثیر چندانی بر مقاومت‌های فشاری و خمشی بتن در حالت تک لایه ندارد. همچنین اجرای بتن معمولی روی بتن غلتکی تأثیر منفی بر مقاومت خمشی و شکست نمونه‌ها نسبت به حالت تک لایه ندارد. اما در نمونه‌های تک لایه یا دولایه مسلح به الیاف، به علت پل زدگی الیاف پس از ایجاد اولین ترک موجب افزایش انرژی شکست نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های غیر مسلح شده است که در ضخامت بیشتر الیاف این تغییر مشهودتر بوده است.

واژگان کلیدی: بتن غلتکی، روسازی‌های بتنی دولایه‌ای، الیاف پلی پروپیلن، مقاومت خمشی، انرژی شکست

۱- مقدمه

در پروژه‌های راهسازی و سد سازی کاربرد گسترده‌ای دارد. در روسازی راه، بتن غلتکی بعنوان رویه اصلی برای تأمین استقامت باربری سازه روسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. طرح روسازی بتن غلتکی مشابه طراحی روسازی بتنی درزدار غیر مسلح با درزهای انقباضی یا درزهای ساخت بدون داول می‌باشد. اختلاف اصلی بین بتن غلتکی و بتن معمولی در

بتن غلتکی (^۱RCC) یک ترکیب بتنی سیمانی پرتلند با اسلامپ صفر و دانه‌بندی متراکم است که توسط ماشین‌آلات متداول در بتن آسفالتی، پخش شده و به وسیله غلتک‌های فلزی چرخ لاستیکی و غلتک‌های ویبره‌ای، متراکم می‌شود [1]. بتن غلتکی

^۱ Roller Compacted concrete

ارتباط با روش ساخت روسازی، فواصل درزها و رویه است [1]. از جمله مزیت‌های این نوع روسازی نسبت به سایر روسازی‌های صلب می‌توان به عدم نیاز به آرماتور و میلگردهای داو، اجرای ساده‌تر، هزینه کمتری، عدم نیاز به فینیشر بتنی برای اجرای روسازی، میزان کمتر ترک‌های انقباضی به دلیل مصرف کمتر سیمان و... اشاره کرد. از آنجا که در این نوع روسازی پس از تسطیح و متراکم نمودن سطح بوسیله غلتک‌ها، سطح نهایی فاقد بافت درشت قابل توجه بوده و امکان ایجاد بافت در سطح نیست، مقاومت لغزشی این نوع از روسازی‌ها نسبت به سایر کمتر است. همچنین به دلیل به جا ماندن اثر غلتک‌ها روی روسازی، سطح روسازی از همواری مطلوبی برخوردار نیست. مطابق با نشریه ۳۵۴ سازمان برنامه و بودجه، بدیل مقاومت لغزشی پایین و عدم ایجاد سطحی کاملاً هموار، کاربرد این نوع روسازی در ایران تنها به روسازی محل‌هایی با سرعت ترافیک پایین محدود شده است. یکی از راهکارهایی که برای بهبود ویژگی‌های سطحی روسازی بتن غلتکی پیشنهاد شده اجرای یک لایه روکش آسفالتی روی سطح روسازی غلتکی است. در مقایسه با روسازی‌های آسفالتی که ترک خوردگی خستگی و شیار افتادگی دو خرابی عمده در کاهش عمر سرویس دهی روسازی‌های انعطاف پذیر است، در روسازی مرکب بتن غلتکی این خرابی‌ها به صورت چشمگیری کاهش یافته است [2]. اگرچه روسازی مرکب بتن غلتکی به کرات اجرا شده و در بسیاری موارد موفقیت آمیز بوده است اما این سیستم مرکب روسازی از مقاومت و دوام روسازی‌های صلب برخوردار نیست و همچنین ظهور و گسترش ترک‌های انعکاسی در سطح روسازی امری رایج است. همچنین چسبندگی کافی بین دو لایه از اهمیت بالایی برخوردار است و در صورت عدم چسبندگی لازم خرابی‌هایی همچون ترک‌های خستگی، چاله و ترک‌های لغزشی در لایه آسفالتی ایجاد می‌شود [3]. همچنین دمای بالای مخلوط آسفالتی و تبخیر رطوبت دال بتن غلتکی بدلیل اجرای لایه آسفالتی، به ترتیب موجب افزایش انبساط و جمع شدگی دال زیرین می‌شود [4]. یک راهکار به منظور رفع مشکلات فوق و گسترش کاربرد بتن غلتکی روسازی، اجرای یک لایه نازکی از بتن با کیفیت و با

مقاومت لغزشی بالا بلافاصله پس از اجرای روسازی غلتکی پیشنهاد می‌شود. در واقع روسازی پیشنهاد شده نوعی از روسازی‌های دو لایه بتنی (2LCP) است که در آن یک لایه نازکی و باکیفیت از بتن و با ویژگی‌های لغزشی و دوام بالا بر روی یک لایه ضخیم از روسازی بتنی با مصالح سنگی با کیفیت معمولی و یا حتی پایین قرار می‌گیرد. از آنجا که لایه زیرین این نوع روسازی‌ها در تماس مستقیم لاستیک اتومبیل نیست بنابراین مقاومت لغزشی و اصطکاکی سنگدانه‌ها در این لایه حائز اهمیت نیست از اینرو بخش قابل توجه‌ای از سنگدانه‌های این لایه شامل مصالح محلی با مقاومت لغزشی و سایشی کم، سنگدانه‌های بازیافتی از بتن و آسفالت و یا سرباره‌های کارخانه ذوب فلزات است. همچنین به منظور ایجاد چسبندگی کامل و جلوگیری از ایجاد درز بین دو لایه، لایه بالایی قبل از گیرش لایه زیرین روی آن اجرا می‌شود، این تکنیک ساخت "wet-on wet" نامیده می‌شود. در واقع در این نوع روسازی لایه رویه نقش عملکردی دارد و ویژگی‌های اصطکاکی و سایشی روسازی را برآورده می‌نماید و لایه زیرین نقش سازه‌ای دارد و در تحمل بارهای وارد شده مقاومت روسازی را تأمین می‌نماید.

تاریخچه ساخت اولین روسازی‌های دولایه بتنی مربوط به ساخت اولین روسازی بتنی در شهر بلفانتیتو ایالت اوهایو در سال ۱۸۹۱ است. این مقطع روسازی آزمایشی شامل ۲ اینچ لایه رویه با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ و یک لایه سازه‌ای به ضخامت ۴ اینچ و با نسبت آب به سیمان ۰/۶ است [5]. از سال ۱۹۵۰ تا ۱۹۷۰ به دلیل ساخت روسازی بتنی مسلح درزدار مسلح به شبکه‌های فلزی (JRCP^۲) روسازی بتنی دولایه بسیار اجرا شد. در اروپا روسازی بتنی دو لایه با مشخصات متفاوت برای هر دولایه به منظور کاهش صدا، افزایش مقاومت لغزشی و کاهش هزینه‌ها مورد استقبال بیشتری نسبت به ایالات متحده قرار گرفته است. در استرالیا به طور خاص نسبت به سایر کشورها، روسازی بتنی دولایه بیشتری اجرا شده است به طوری که دستورالعمل روسازی بتنی در استرالیا هماهنگ با

۱ Two-Lift Concrete pavement

۲ Joint Reinforced Concrete Pavement

مشخصات روسازی بتنی دولایه‌ای است [5]. از سال ۱۹۳۰ در سایر کشورهای اروپایی همچون سوئیس، بلژیک، هلند، فرانسه و آلمان روسازی‌های بتنی دولایه در پروژه‌های خاص مورد استفاده قرار گرفته است. در آلمان از روسازی بتنی دولایه در روسازی فرودگاه‌ها برای بهره‌برداری از مصالح بازیافتی مورد استفاده قرار گرفته است.

امروزه در صنعت روسازی‌های بتنی استفاده از انواع الیاف در کنترل ترک خوردگی بتن جایگاه ویژه‌ای دارد. الیاف در روسازی‌های بتنی علاوه بر کاهش ضخامت دال و صرفه اقتصادی با کنترل ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی و کاهش تعداد درزها عرضی باعث کاهش نفوذ آب به بستر روسازی و در نتیجه منجر به کاهش هزینه‌های مربوط به تعمیر و نگهداری می‌شود [6]. قابلیت الیاف در بهبود خواص بتن وابسته به نوع الیاف، درصد الیاف، نسبت ظاهری الیاف، اصطکاک سطحی و مقاومت کششی الیاف است [6]. در جدول (۱) خلاصه نتایج چندین پژوهش در خصوص اثر انواع الیاف بر ویژگی‌های مکانیکی بتن نشان داده شده است. الیاف پلی‌پروپیلن از جذب انرژی و مقاومت خوردگی بالایی برخوردار است. نمودار بار-جابجایی بتن مسلح به الیاف پلی‌پروپیلن و بتن معمولی تا قبل از بار نهایی یکسان است. پس از بار نهایی، در بتن معمولی بار به طور ناگهانی کاهش می‌یابد اما در بتن الیافی با کاهش تدریجی بار همراه خواهد بود و رفتار ترد و شکننده بتن را به رفتار شکل پذیرتر تغییر می‌دهد [13]. نتایج پژوهش‌ها انجام شده حاکی از آن است که بیشترین مقدار الیاف پلی‌پروپیلن در بتن به ۰/۷ درصد حجم بتن محدود شده است و مقدار بیشتر الیاف به دلیل ایجاد خلل و فرج موجب کاهش مقاومت بتن می‌شود [14,15]. براساس نتایج یک پژوهش مقدار حجم بهینه الیاف پلی‌پروپیلن ۰/۴ پیشنهاد شده است [14].

روسازی‌های بتنی دولایه‌ای همچون روسازی‌های رایج تک لایه‌ای در طول عمر سرویس‌دهی خود دچار انواع خرابی‌ها و ترک خوردگی‌ها از جمله ترک‌های انقباضی و ترک‌های خستگی می‌شوند. استفاده از الیاف در هرکدام از لایه‌ها باعث بهبود رفتار مکانیکی و شکست روسازی می‌شود.

در سال ۲۰۰۷ روزلر و همکاران رفتار مکانیکی روسازی‌های بتنی دولایه‌ای را بررسی کردند. نتایج نشان داد که اجرای یک لایه نازک از بتن مسلح به الیاف پلی‌پروپیلن روی بتن معمولی تاثیر چندانی بر مقاومت خمشی نهایی تیر بتنی ندارد، اما باعث بهبود رفتار بعد از ترک خوردگی تیر بتنی می‌شود به‌طوری‌که میزان طاقت خمشی تیر بتنی در حالت دولایه (بتن الیافی در لایه بالا + بتن معمولی در لایه پایین) نسبت به حالت تک لایه (بتن معمولی) با ضخامت‌های معادل، به میزان ۸۰٪ درصد افزایش می‌یابد [12]. در پژوهشی دیگر رفتار ترک خوردگی نمونه‌های تیری شکل این نوع روسازی در نرم افزار آباکوس شبیه سازی شد. به منظور مقایسه و بررسی نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی، مشخصات بتن و ضخامت هر کدام از لایه‌ها مربوط به پژوهش قبلی به عنوان ورودی به نرم افزار آباکوس معرفی شد. عمده نتایج حاکی از آن بود که استفاده از بتن الیافی در هرکدام از لایه‌ها باعث افزایش انرژی شکست و افزایش قابلیت باربری بعد از ترک خوردگی می‌شود؛ اما استفاده از بتن الیافی در لایه پایین نسبت به حالتی که در لایه بالایی قرار گرفته باشد باعث افزایش بیشتر انرژی شکست و قابلیت باربری بعد از ترک خوردگی می‌شود [16]. شبیه سازی عددی روسازی دولایه بتنی غلتکی (بتن غلتکی در پایین - بتن معمولی در بالا) بوسیله المان محدود توسط فنگ و همکاران بیانگر آن است که افزایش ضخامت لایه بتن غلتکی باعث کاهش تنش‌ها و افزایش ضخامت لایه بتن معمولی تأثیر چندانی بر تنش‌های ایجاد شده در لایه زیرین ندارد [17]. پژوهش‌های انجام شده در خصوص روسازی‌های بتنی دو لایه‌ای نشان دهنده آن بوده است که اجرای بتن الیافی در لایه زیرین نسبت به لایه بالایی منجر به افزایش بیشتر انرژی شکست می‌شود [17]. از این رو عمده پژوهش‌ها بر تأثیر بتن الیافی در لایه زیرین متمرکز شده است [19, 20]. اما مقاومت در برابر ترک خوردگی لایه بالایی در کنترل ترک‌ها و کاهش نفوذ آب به لایه زیرین و سایر لایه‌های روسازی نباید نادیده گرفته شود.

جدول ۱. تأثیر الیاف مختلف بر ویژگی‌های مکانیکی بتن (افزایش ↑، کاهش ↓)

Authors	Year	Concrete Type	Fiber Properties			Compressive Strength(%)	Splitting Tensile Strength(%)	Flexural Strength (%)
			Type	Length (mm)	Fiber Volume Fraction (%)			
Ghasemi et al. [7]	2019	Self-compacting concrete	Steel fiber	30	0.3, 0. 5	19↓, 26↓	17↑, 9↓	27↓, 5↓
Rooholamini etal. [8]	2018	Roller compacted concrete	Polyethylene	38	0.25, 0.5, 0.75	8↓, 12↓,14↓	-	7↑, 4↑,6↓
Fallah and Nematzadeh[9]	2016	high-strength concrete	Polypropylene	39	0.25, 0.75, 1.25	8↑, 3↑, 4↑	8↑, 9↑, 27↑	-
Hesami et al. [10]	2016	Self-compacting concrete	Polypropylene	60	0.1, 0.12	2↑, 5↓	19↑, 27↑	26↑, 33↑
Saidani et al. [11]	2016	Normal concrete	Steel fibres	50	4% by cement Volume)	2↑	98↑	-
			Polypropylene	50	4% (by cement Volume)	5↓	65↑	-
Rosler et al. [12]	2005	Two– lift concrete	synthetic fiber	40	0.78	5↓	23↑	6↓

Table 1. The effect of different types of fibers on the mechanical properties of concrete(Increase↑, Decrease↓)

۲- هدف پژوهش

همان‌گونه که در بخش مقدمه توضیح داده شد یکی از محدودیت‌های اصلی بتن غلتکی مقاومت لغزشی پایین و عدم ایجاد سطحی هموار بوده و کاربرد این نوع روسازی‌ها تنها به به محل‌هایی با سرعت ترافیک پایین محدود شده است. به عنوان یک راهکار و توسعه کاربرد این نوع روسازی‌ها در سرعت ترافیک بالا اجرای یک لایه با ضخامت کمی با مقاومت لغزشی کافی بلافاصله پس از اجرای بتن غلتکی است. در پژوهش پیش‌رو ویژگی‌های مکانیکی روسازی‌های دولایه بتنی در حالتی که یک لایه از بتن معمولی و یا مسلح به الیاف پلی پروپیلن روی یک لایه بتن غلتکی اجرا شده است، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. همچنین به منظور مقایسه رفتار روسازی بتن دو لایه و روسازی‌های رایج تک لایه‌ای، علاوه بر ساخت نمونه‌ها بتنی در دولایه، نمونه‌های تیری شکل از بتن تک لایه در حالت‌های مختلف بتن معمولی، بتن الیافی و بتن غلتکی، بتن ریزی و عمل‌آوری شدند. در نمونه‌های دو لایه ضخامت لایه رویه به میزان یک سوم (۵ سانتی‌متر) ضخامت کل تیر (۱۵ سانتی‌متر) در نظر گرفته شده است. همچنین به منظور جلوگیری از ایجاد درز سرد بین لایه‌ها، لایه بالایی بلافاصله پس از اجرای لایه بتن غلتکی و در فاصله زمانی کمتر از نیم ساعت اجرا شد. پس از بتن‌ریزی نمونه‌ها و عمل‌آوری به مدت ۲۸ روز، آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و آزمون شکست روی نمونه‌ها انجام شد.

۳- مصالح مصرفی

سیمان مصرفی از نوع تیپ دو تولیدی شرکت خوزستان است. مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان به شرح جدول (۲) هست. جنس سنگدانه‌های مصرفی در ساخت بتن معمولی و بتن غلتکی یکسان بوده و هر دو سیلیسی و ترکیبی از مصالح رودخانه‌ای و شکسته هستند. بیشینه اندازه درشت دانه‌های مصرفی در بتن الیافی (FPCC) و در بتن معمولی (PCC) به ۱۲ میلی‌متر و در بتن غلتکی (RCC) به ۱۹ میلی‌متر محدود شده است. در جدول (۳) مشخصات ظاهری و فیزیکی سنگدانه‌های مصرفی آورده شده است. در شکل (۱) نمودار دانه‌بندی سنگدانه‌های مصرفی در ساخت هر دو نوع بتن نشان داده شده است. الیاف پلی پروپیلن مصرفی در این پژوهش تولید شرکت فورتا است که مشخصات فیزیکی و ظاهری آن در شکل (۲) و جدول (۴) نشان داده شده است. در ساخت نمونه‌های بتن الیافی، الیاف به میزان ۰/۴٪ حجم بتن استفاده شده قرار گرفتند. به منظور اختلاط بهتر بتن الیافی از فوق روان کننده NSF ساخت شرکت وند شیمی بر پایه نفتالین فرمالدهید سولفونات به میزان ۱٪ درصد وزن سیمان مطابق با پیشنهاد شرکت تولید کننده استفاده شد.

۴- نسبت‌های اختلاط و ساخت نمونه‌ها

در این پژوهش طرح اختلاط بتن معمولی براساس استاندارد ACI211-1 با در نظر گرفتن مقاومت فشاری استوانه‌ای ۴۰ MPa

لایه زیرین قراردادده و متراکم شد. به منظور چسبندگی کامل بین دو لایه و جلوگیری از ایجاد تشکیل درز سرد در محل اتصال دو لایه، لایه بالایی بلافاصله پس از متراکم نمودن لایه زیرین و در فاصله زمانی کمتر از ۳۰ دقیقه اجرا و متراکم شدند. در نمونه‌های یک روز پس از بتن ریزی از قالب خارج شد و تا زمان آزمایش در حوضچه عمل‌آوری قرار گرفت.

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان تیپ II

Physical Properties			Chemical properties	
Specefic Weight (gr/cm ³)	3.19		Al ₂ O ₃	4.99
			MgO	2.8
Setting time (min)	Initial	155	Fe ₂ O ₃	5.29
	Final	210	CaO	60.85
Compressive strength at 7 days		290	SO ₃	1.94
Autoclave test		.14	SiO ₂	21.36
Blain (cm ² /gr)		2800	others	2.77

Table 2. Physical and Chemical properties of Cement type II

محاسبه شد و در جدول (۵) نشان داده شده است. طرح اختلاط بتن غلتکی بر اساس روانی و مطابق با ACI 325.10R انجام گرفت. اجزای طرح اختلاط با روش سعی و خطا به شکلی انتخاب شد که مخلوط نهایی ضمن دارا بود زمان وی بی اصلاح شده مناسب به منظور کاربرد در روسازی، با انجام آزمایش مقاومت فشاری از مقاومت ۲۸ روزه ۳۰ MPa برخوردار باشد. همچنین به منظور متراکم نمودن بتن غلتکی از میز ویبره به همراه سربار متناسب با وزن مشخص مشخصات هر قالب استفاده شد. در ساخت نمونه‌های فشاری پس از آماده سازی مخلوط، بتن در قالب‌ها ریخته شد و برای بتن غلتکی به منظور دسترس به بیشینه تراکم، علاوه بر قرار گیری بر میز ویبره همزمان تحت سربار با وزن ۱۵ کیلوگرم قرار گرفتند. نمونه‌های تیری شکل در قالب‌های استاندارد به ابعاد ۱۲×۱۵×۴۵ سانتی‌متر ساخته شدند. برای متراکم نمودن نمونه‌های تیری شکل بتن غلتکی از سربار با وزن ۲۸ کیلوگرم استفاده شد. در ساخت نمونه بتنی دو لایه‌ای، پس از متراکم نمودن بتن غلتکی در قالب و به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر، یک لایه از بتن الیافی و یا بتن معمولی به ضخامت ۵ سانتی‌متر روی

جدول ۳. مشخصات فیزیکی ریزدانه‌ها و درشت دانه‌های مصرفی

Properties	Standard	Standard limitation (fine aggregate/coarse Aggrgate)	FineAggregate	Coarse Aggregate	
				RCC	PCC
Maximum nominal size (mm)	ASTM C125	- / 19	5.6	19	12
Density (kg/m ³)	ASTM C127&ASTMC 128	- / -	2580	2680	2710
Water saturated surface dry absorption (%)	ASTM C127&ASTM C128	- / -	3	1.3	1.5
Passing sieve No. 200(%)	ASTM C33	3 / 1	2.44	.870	0.15
Los Angeles abrasion loss(%)	ASTM C131	- / 40	-	21	18
Fineness modulus	ASTM C 125	2.3-3.1 / -	2.8	-	-
Sand equivalent(%)	ASTM D2419	Minimum75 / -	73	-	-

Table 3.The physical properties of fine and coarse aggregates

شکل ۱. منحنی دانه بندی ریزدانه و درشت دانه مصرفی در ساخت بتن معمولی و بتن غلتکی

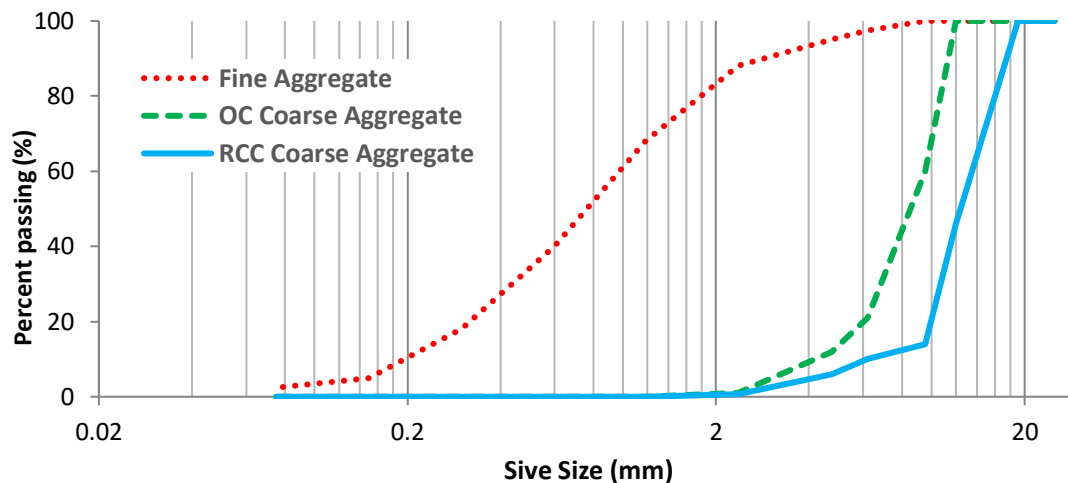


Fig. 1. Grading of coarse and fine aggregate for producing of ordinary concrete and roller compacted concrete

شکل ۲. الیاف پلی پروپیلین درهم تنیده مورد استفاده در این پژوهش



Fig. 2. The Twisted bundle polypropylene fibers used in this research

جدول ۴: مشخصات الیاف پلی پروپیلین مصرفی

Fibre	Material	Cross Section	Length (mm)	Specific Density	Tensile Capacity (MPa)	Modulus of Elasticity (GPa)
Macro Synthetic (twisted bundle)	Polyethylene	Circular	3.6	0.91	610	9.5

Table 4. Specifications of polypropylene fibers

جدول ۵. طرح اختلاط‌های مورد استفاده برای بتن معمولی (PCC)، بتن الیافی (FPCC) و بتن غلتکی (RCC)

	Water	Cement	Fine Aggregate (kg)	Coarse Aggregate (kg)	Fiber (kg)	Super plastizer (Liter)
PCC	164	377	807	860	0	1
FPCC	164	377	807	860	3.6	1
RCC	140	288	1029	748	0	0

Table 5. Mix designs of ordinary concrete(PCC), fibrous Concrete(FPCC) and Roller compacted concrete(RCC)

۵- نتایج و بحث

تحلیل یک طرفه ANOVA در سطح ۹۵٪ سطح اطمینان استفاده شده است که در جدول (۶) خلاصه نتایج برای هر کدام از پارامترها نشان داده شده است.

در ادامه نتایج آزمون‌های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و انرژی شکست ارائه شده است. به منظور مقایسه نتایج از

۱-۱- مقاومت فشاری

محاسبه می‌شود:

$$f = \frac{3PS}{2W(h - a_0)^2} \quad (1)$$

در این شکل بارگذاری W عرض تیر به مقدار ۱۲ سانتی‌متر، h ارتفاع کل تیر ۱۵ سانتی‌متر، a_0 عمق اولیه ترک ۵ سانتی‌متر، S دهانه بارگذاری ۴۰ سانتی‌متر و l طول کل تیر ۴۵ سانتی‌متر است. مطابق با تحلیل ANOVA اختلاف معناداری بین مقاومت خمشی نمونه‌ها وجود ندارد ($P=0.252$). یکی از نتایجی که از جدول (۶) گرفته می‌شود آن است که افزودن الیاف پلی پروپیلن در حجم مشخص شده تاثیری بر مقاومت خمشی نمون مسلح شده به الیاف (FPCC) نسبت نمونه کنترلی (PCC) ندارد. در پژوهشی مشابه که از الیاف پلی پروپیلن با ویژگی‌ها و حجم یکسان مانند پژوهش پیش‌رو در بتن غلتکی استفاده شده بود نتایج حاکی از آن بود که افزودن الیاف پلی پروپیلن تأثیر چندانی بر مقاومت خمشی بتن ندارد [8]. در پژوهشی دیگر که اثر الیاف پلی پروپیلن بر مقاومت خمشی بتن بررسی شد نتایج نشان دهنده آن است که استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن باعث کاهش مقاومت خمشی بتن می‌شود [12]

مطابق با شکل (۵) بطور کلی مقاومت خمشی نمونه‌های دو لایه مشابه با نمونه‌های تک لایه می‌باشد. جایگزینی ۵ سانتی‌متر از بتن معمولی و بتن الیافی با بتن غلتکی در قسمت بالایی نمونه‌های تیری شکل تاثیری بر کاهش میانگین مقاومت خمشی نمونه‌ها ندارد. با بررسی دقیق‌تر نتایج مقاومت خمشی نمونه‌های دو لایه مشخص می‌شود که افزودن الیاف در لایه بالایی تاثیری بر مقاومت خمشی این نمونه‌ها ندارد. در مقادیر کم، الیاف پلی‌پروپیلن تأثیر مثبت کمی بر مقاومت ترک خوردگی اولیه و بار نهایی بتن دارند اما منجر به بهبود مقاومت کششی به میزان قابل توجهی می‌شود [22, 23]. در پژوهشی دیگر که توسط روسلر و همکاران انجام شده است اثر جایگزینی بتن حاوی الیاف پلی‌پروپیلن با بتن معمولی در نمونه‌های دولایه بررسی شده است. بطور مشابه پژوهش به این نتیجه رسیده‌اند که بارنهایی قابل تحمل نمونه‌های دو لایه (بتن الیافی + بتن معمولی) مشابه با نمونه‌های تک لایه (بتن معمولی)

آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد 150×300 میلی‌متر مطابق با استاندارد ASTM C39 پس از ۲۸ روز عمل‌آوری صورت پذیرفت و نتایج در شکل (۳) نشان داده شده است. مطابق با تحلیلی ANOVA صورت گرفته اختلاف بین مقاومت فشاری سه طرح اختلاط (RCC, PCC, FPCC) سطح ۹۵ درصد اطمینان ($P=0.0038$) معنادار است. مطابق با شکل (۳) همانطور که ملاحظه می‌شود مقاومت فشاری بتن معمولی (PCC) بیشتر از بتن غلتکی (RCC) است. این مقدار اختلاف را می‌توان به دلیل نسبت آب به سیمان کمتر نسبت داد. همچنین افزودن الیاف پلی پروپیلن به بتن معمولی (FPCC) باعث کاهش اندک (۱۰٪) مقاومت فشاری بتن می‌شود. مطابق با پژوهش‌های پیشین افزودن الیاف تأثیر چندانی بر افزایش مقاومت فشاری بتن ندارد و در مقادیر بالای الیاف، کاهش مقاومت فشاری گزارش شده است [7, 8, 12]. در حقیقت عامل اصلی بر مقاومت فشاری بتن مقاومت سنگدانه‌ها، خمیر سیمان و اتصال بین این دو ناحیه است و افزودن الیاف در صورتی که نمونه‌ها به خوبی متراکم شده باشند تأثیر اندکی بر بهبود مقاومت فشاری دارد [18]. مقاومت سنگدانه‌ها، مقاومت خمیر سیمان و ناحیه تماس سطحی سه عامل اصلی بر مقاومت فشاری بتن هستند [19]. در هنگام بارگذاری، ترک از ناحیه انتقال سطحی (ضعیف‌ترین ناحیه) آغاز می‌شود در صورتی که الیاف تنها قادر به افزایش مقاومت خمیر سیمان است [20].

۲-۵- مقاومت خمشی

بارگذاری خمشی سه نقطه‌ای روی تیر با ترک اولیه مطابق با شکل (۴) براساس استاندارد JCI-S-001-2003 پس از ۲۸ روز عمل‌آوری نمونه‌ها انجام شد در این سیستم بارگذاری همزمان با بارگذاری در وسط دهانه تیر، میزان بازشدگی دهانه ترک ($CMOD^1$) ثبت می‌شود. سرعت بارگذاری در این آزمایش براساس کنترل بازشدگی دهانه ترک و به میزان 0.05 mm/min انجام شد. مقاومت خمشی نمونه‌های تیری شکل از رابطه زیر

^۱ Crack Mouth Opening Displacement

است و استفاده از الیاف تاثیری بر بار نهایی و مقاومت خمشی نمونه‌ها نداشته است [16].

$$W_1 = 0.75 \left(\frac{S}{L} m_1 + 2m_2 \right) g \times CMOD_c \quad (3)$$

در رابطه فوق G_f انرژی شکست w_0 (J/mm²) سطح زیر نمودار بار-بازشدگی دهانه ترک W_1 (N.mm) کار انجام شده توسط وزن نمونه و تجهیزات نصب شده روی تیر A_{lig} (N.mm) مقطع نمونه $(w \times (h-a_0))$ (mm²)، m_1 جرم نمونه (kg)، S دهانه بارگذاری (mm)، L طول کل تیر (mm)، m_2 جرم تجهیزات نصب شده روی نمونه (kg)، g شتاب جاذبه (9.807 m/s^2)، $CMOD_c$ میزان بازشدگی دهانه ترک در زمان گسیختگی نمونه (mm) است.

۳-۵- انرژی شکست

مانند آنچه که در قسمت قبل توضیح داده شد آزمون شکست تحت مود I مطابق با استاندارد JCI-S-001-2003 پس از ۲۸ روز عمل‌آوری روی نمونه‌های تیری شکل با ترک اولیه انجام شد. نمودار بار-بازشدگی دهانه ترک نمونه‌ها در شکل (۵) نشان داده شده است. مطابق با استاندارد JCI-S-001-2003 انرژی شکست از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$G_f = \frac{0.75 W_0 + W_1}{A_{lig}} \quad (2)$$

جدول ۶. تحلیل ANOVA و Tukey روی نتایج مقاومت فشاری، خمشی و انرژی شکست در سطح ۹۵٪ اطمینان

ANOVA statistical analysis.						
		Sum of Squares	Df	Mean Square	F	Sig.
Compressive Strength	Between Groups	133.77	2	66.88	12.27	0.0038
	Within Groups	24.67	6	4.11		
	Total	158.43	8			
Flexural strength	Between Groups	0.2758	4	0.0689	1.88	0.252
	Within Groups	0.1835	5	0.0367		
	Total	0.4592	9			
Fracture energy	Between Groups	289491	4	72373	48.55	0.000
	Within Groups	7454	5	1491		
	Total	296945	9			
Pairwise Tukey statistical analysis						
		RCC	PCC	FPCC	RCC-PCC	RCC-FPCC
Compressive Strength	RCC	-	S	S		
	PCC		-	N		
	FPCC			-		
Flexural strength	RCC	-	N	N	N	N
	PCC		-	N	N	N
	FPCC			-	-	N
	RCC-PCC				-	N
	RCC-FPCC					-
Fracture energy	RCC	-	N	S	N	S
	PCC		-	S	N	S
	FPCC			-	S	S
	RCC-PCC				-	S
	RCC-FPCC					-

Table 6. ANOVA and Tukey Pairwise statistical analysis on the results of compressive strength, flexural strength and fracture energy

شکل ۳. نتایج آزمون‌های مقاومت فشاری پس از ۲۸ روز عمل آوری

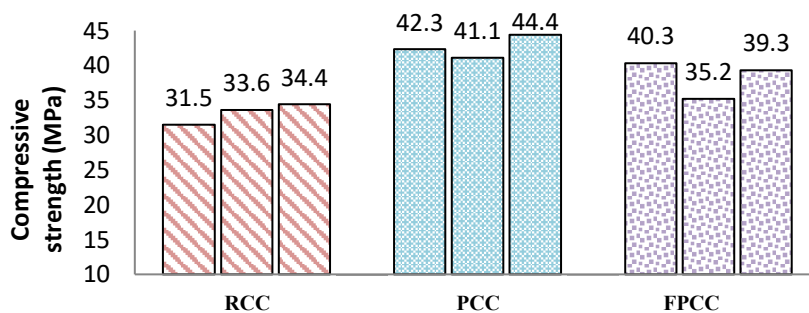


Fig. 3. Results of compressive strength after 28 days curing

شکل ۴. بارگذاری خمشی سه نقطه‌ای تیر بتنی با ترک اولیه

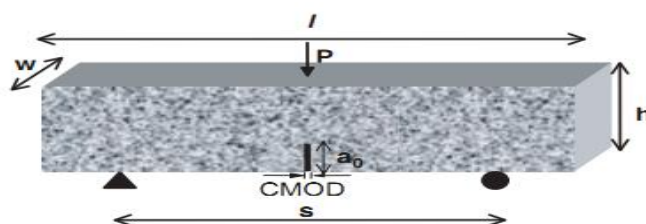


Fig. 4. Three-point bending test on single edge notched beam

شکل ۵. نمودار روند تغییرات مقاومت خمشی نمونه‌های تیری شکل در یک و دو لایه

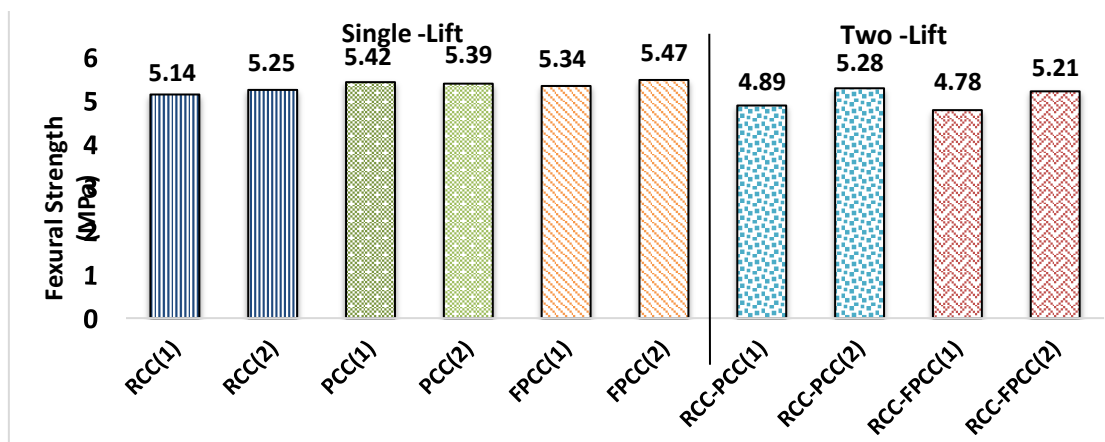


Fig. 5. Flexural strength of beam shaped samples in single and two-lifts

مطابق با شکل (۶) تا قبل از بارنهایی، نمودار بار-جابجایی نمونه‌های تک لایه یا دو لایه به صورت مسلح یا غیر مسلح یکسان است. نمونه‌های غیرمسلح (RCC, PCC, RCC-PCC) رفتار شکننده از خود نشان داده بطوری که بلافاصله بعد از تحمل بیشینه بار، با کاهش شدید بار و نهایت شکست ناگهانی نمونه آزمایش به پایان می‌رسد. اما در نمونه‌های مسلح به الیاف (FPCC, RCC-FPCC) پس از بار حداکثر، بار به صورت تدریجی کاهش می‌یابد و رفتار بتن از حالت ترد به حالت شکل‌پذیر تغییر می‌یابد. نتایج پژوهش‌های پیشین نشان داده که در نمونه‌های بتنی مسلح به الیاف، مقاومت اولین ترک متناسب است با مقاومت کششی بتن و الیاف تنها پس از ترک خوردگی بتن قادر به تحمل تنش‌های کششی هستند [23]. مطابق با

مطابق با شکل (۶) تا قبل از بارنهایی، نمودار بار-جابجایی نمونه‌های تک لایه یا دو لایه به صورت مسلح یا غیر مسلح یکسان است. نمونه‌های غیرمسلح (RCC, PCC, RCC-PCC) رفتار شکننده از خود نشان داده بطوری که بلافاصله بعد از تحمل بیشینه بار، با کاهش شدید بار و نهایت شکست ناگهانی نمونه آزمایش به پایان می‌رسد. اما در نمونه‌های مسلح به الیاف

پلزدگی الیاف در بتن نسبت داد. چسبندگی مناسب بین الیاف و خمیر سیمان منجر به تغییر محل تنش‌ها از نوک ترک به نواحی اطراف می‌شود که در پایان باعث کاهش تمرکز تنش و توزیع یکنواخت‌تر تنش در بتن می‌شود [24]. همچنین در نمونه‌های دو لایه‌ای در صورت استفاده از بتن الیافی در لایه بالایی انرژی شکست نمونه دولایه (بتن الیافی + بتن غلتکی) به میزان چشمگیری نسبت به نمونه تک لایه (بتن غلتکی) افزایش قابل توجهی می‌یابد. این مشاهدات با نتایج پژوهشهای پیشین هماهنگی دارد [25, 26].

جدول (۶)، برخلاف مقاومت خمشی اختلاف معناداری بین انرژی شکست نمونه‌ها وجود دارد ($P=0.00$). براساس تحلیل انرژی Tukey شکست نمونه‌های غیر مسلح (RCC, PCC) یکسان است. اما افزودن الیاف به بتن، باعث تغییر مقاومت در برابر شکست نمونه‌های الیافی نسبت به نمونه‌های غیرمسلح می‌شود. در شکل (۷) نمودار تغییرات انرژی شکست نمونه‌ها به منظور بررسی و مقایسه بهتر نشان داده شده است. مطابق با این شکل در نمونه‌های تک لایه، افزودن الیاف در نمونه‌ها منجر به افزایش قابل توجه انرژی شکست نسبت به نمونه‌های غیر مسلح می‌شود. که این میزان افزایش را می‌توان به خواص

شکل ۶. نمودار بار-بازشدگی دهانه ترک آزمون شکست نمونه‌های تک لایه و دولایه در حالت‌های مختلف

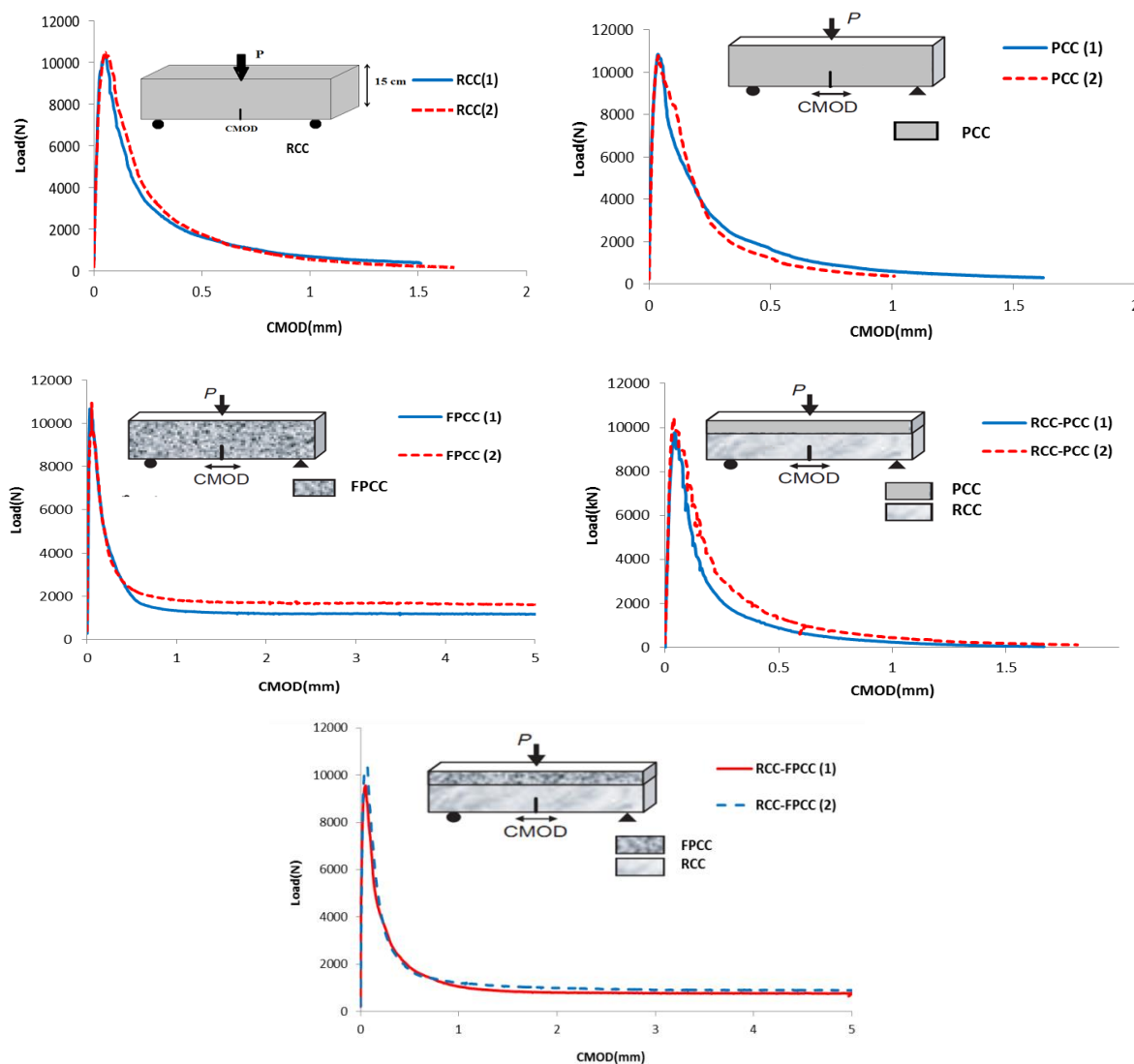


Fig. 6. Load – CMODT beam samples in single and two lifts in Fracture test

شکل ۷. نمودار تغییرات انرژی شکست نمونه‌های تک لایه و دولایه در حالت‌های مختلف

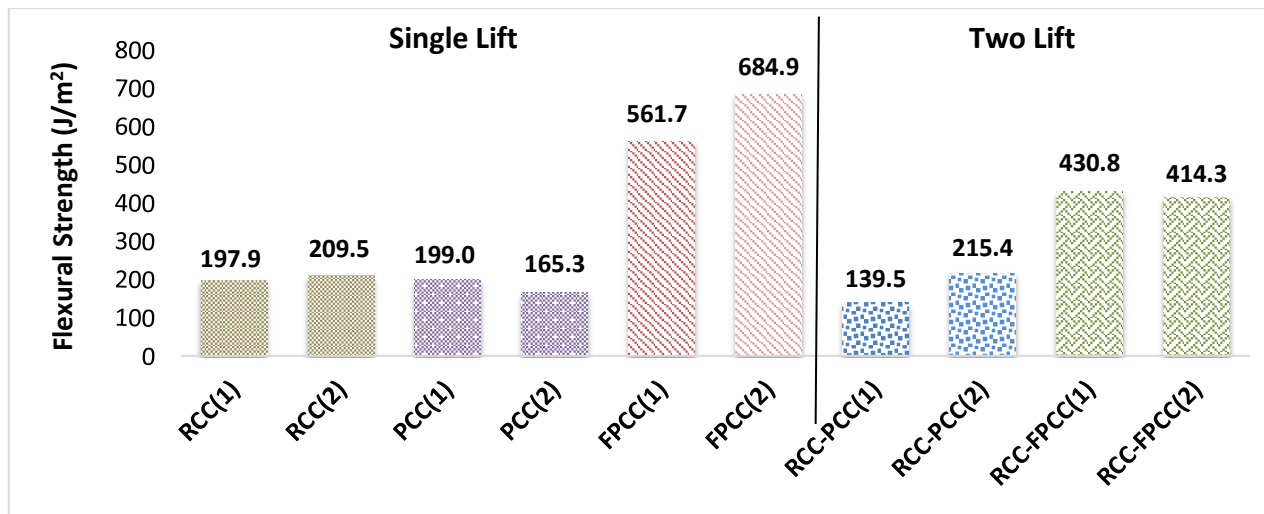


Fig. 7. Fracture energy of sample in single and two lift

۶- نتیجه گیری

می‌شود.

در نمونه‌های دو لایه، جایگزینی بتن معمولی با بتن تکی تأثیر منفی بر کاهش انرژی شکست نمونه‌ها نسبت به بتن غلتکی در حالت تک لایه ندارد. اما استفاده از بتن مسلح الیاف در لایه بالا مقدار انرژی شکست را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد.

- به عنوان یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان تأکید داشت که جایگزینی بتن معمولی و بتن الیافی با بتن غلتکی در نمونه‌های دو لایه تأثیر منفی قابل توجهی بر مقاومت خمشی و شکست نمونه‌ها نسبت به بتن غلتکی در حالت تک لایه ندارد و اجرای این سیستم از بتن غلتکی در خیابان‌ها و بزرگراه‌ها با سرعت بالا امکان پذیر است.

۷- مراجع

- [1]. Mannaul 354. 2008 Guidance for Design and Implementation of Roller Concrete pavement of Road in Iran, Planning and Budget Organization (In Persian).
- [2]. Composite Pavement Systems -HMA/PCC Composite Pavement. 2013 vol. 1, Transportation Research Board (TRB), Washington, DC,
- [3]. Rith M., Kim Y. K., Hong S. J. & Lee S. W. 2017 Effect of horizontal loading on RCC-base composite pavement performance at heavy duty area, denitrification and phosphorus removal. Construction and Building Materials, 131, 741-745.
- [4]. Tetsya S., Kim Y. K., Lee S. W., CHON B. J., Park J. Y., Han S. H. 2019 Early Age Behavior of Crack Movement in RCC base of HMA-RCC Composite Pavement, Proceedings of the 8th CECAR, Tokyo, 352

در این پژوهش رفتار مکانیکی و شکست نمونه‌های بتن در حالت تک لایه و دولایه در حالت‌های مختلف بتن غلتکی، بتن معمولی و بتن الیافی مورد آزمایش قرار گرفت. در حالت دولایه تأثیر جایگزینی بتن معمولی و بتن الیافی با بتن غلتکی در قسمت فوقانی تیر بتنی به میزان یک سوم ضخامت کل تیر بررسی شد. عمده نتایج به شرح ذیل است:

- به دلیل نسبت کمتر آب به سیمان در نظر گرفته شده مقاومت فشاری بتن معمولی بیشتر از بتن غلتکی است. همچنین افزودن الیاف پلی پروپیلن به بتن معمولی باعث کاهش اندک مقاومت فشاری بتن می‌شود.

- مقاومت خمشی بتن معمولی مشابه با بتن غلتکی، و استفاده از الیاف پلی پروپیلن تأثیری بر مقاومت خمشی بتن ندارد.

- در نمونه‌های بتن‌ریزی شده در دو لایه جایگزینی بتن معمولی و بتن الیافی به میزان ۵ سانتی‌متر با بتن غلتکی تأثیری بر کاهش مقاومت خمشی نسبت به حالت تک لایه از بتن غلتکی ندارد. همچنین مشابه نمونه‌های تک لایه، استفاده از الیاف در لایه فوقانی تأثیر چندانی بر مقاومت خمشی نمونه‌ها ندارد.

- در نمونه‌های تک لایه انرژی شکست بتن غلتکی و بتن معمولی اختلاف معناداری مشاهده نشد اما افزودن الیاف پلی پروپیلن به بتن معمولی باعث افزایش انرژی شکست نمونه‌ها

- [17]. Fang X., Jing Z., Shao-Qin R., Ming-Kai Z., Jian-Ping C., 2013 Mechanical Analysis of RCC-PCC Journal of Geotechnical Engineering, volume 18, 3351 - 3363
- [18]. Yoo D.Y., Banthia N. 2016 Mechanical properties of ultra-high -performance fiber-reinforced concrete: A review, Cement and Concrete Composites. 17, 267-280.
- [19]. Ollivier J.P., Maso J.C., Bourdette B. 1995 Interfacial transition zone in concrete. Advanced cement based materials, 2, 30-8.
- [20]. Kunieda M., Ueda N., Nakamura H. 2014 Ability of recycling on fiber reinforced concrete, Constr. Build. Mater. 67, 315-320
- [21]. Signorini C., Sola A., Malchiodi B., Nobili A., Gatto A. 2020 Failure mechanism of silica coated polypropylene fibres for Fibre Reinforced Concrete (FRC), Constr. Build. Mater. 236 (2020).
- [22]. Santos A.G., Rincón J.M., Romero M., Talero R, 2005, Characterization of a polypropylene fibered cement composite using ESEM, FESEM and mechanical testing, Constr. Build. Mater. 19 (5), 396-403.
- [24]. Qin Y., Zhang X., Chai J., Xu Z., Li Sh., 2019 Experimental study of compressive behavior of polypropylene-fiber reinforced and polypropylene-fiber-fabric-reinforced concrete, Constr. Build. Mater. 194, 216-225.
- [23]. Castoldi R. d. S., Souza L. M. S. d, Silva F. A., 2019, Comparative study on the mechanical behavior and durability of polypropylene and sisal fiber reinforced concretes, Constr. Build. Mater. 211, 617-628.
- [25]. Park K., Paulino G. H., Roesler J., 2010 Cohesive fracture model for functionally graded fiber reinforced concrete. Cement and Concrete Research, 40(6), 956-965.
- [26]. Brand, A. S., Amirkhanian, A. N., & Roesler, J. R. 2014 Flexural Capacity of Full-Depth and Two-Lift Concrete Slabs with Recycled Aggregates. Transportation Research Record, 2456(1), 64-72
- [5]. Composite Pavement Systems, Volume 2: PCC/PCC 2013 Composite Pavements. Washington, DC: The National Academies Press.
- [6]. Ahmadi M., Hassani A., Soleimani M. R., Yusefi H. 2015 Performance of environmentally friendly fiber concrete in concrete pavement., Omran Modares Journal 16 (1), 179-188.
- [7]. Ghasemi M., Ghasemi M. R. 2019 Studying the fracture parameters and size effect of steel fiber-reinforced self-compacting concrete. Construction and Building Materials. 201, 447-460
- [8]. Rooholamini H., Hassani A., Aliha M.R.M. 2018 Evaluating the effect of macro-synthetic fibre on the mechanical properties of roller compacted concrete pavement using response surface methodology Construction and Building Materials. 159, 517-529
- [9]. Fallah S., Nematzadeh M. 2017 Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume, Construction and Building Materials. 132 170-187.
- [10]. Hesami S., Hikouei I. S., Emadi, S. A. A., 2016 Mechanical behavior of self-compacting concrete pavements incorporating recycled tire rubber crumb and reinforced with polypropylene fiber, Journal of Cleaner Production. 133, 228-234
- [11]. Saidani M., Sarairoh D., Gerges M. 2016 Behaviour of different types of fibre reinforced concrete without admixture, Engineering Structure. 113, 328-334
- [12]. Roesler, J. R., A. Bordelon, C. Gaedicke, K. Park, and G. H. Paulino. 2006 Fracture Behavior of Properties of Functionally Graded Fiber-Reinforced Concrete. Proc., Multiscale and Functionally Graded Materials Conference, Ko Olina, Hawaii, American Institute of Physics, Melville, N.Y.,
- [13]. Aliha M.R.M, Razmi A., Mousavi A. 2018 Fracture study of concrete composites with synthetic fibers additive under modes I and III using ENDB specimen, Constr. Build. Mater. 190, 612-622.
- [14]. Rooholamini H., Hassani A., Aliha M.R.M, 2018 Evaluating the effect of macro synthetic fibre on the mechanical properties of roller-compacted concrete pavement using response surface methodology, Constr. Build. Mater. 159 517-529.
- [15]. Tabatabaeian M., Khaloo A., Joshaghani A., Hajibandeh E. Experimental investigation on effects of hybrid fibers on rheological, mechanical, and durability properties of high-strength SCC, Constr. Build. 368
- [16]. Roesler, J., Paulino, G., Gaedicke, C., Bordelon, A., & Park, K. 2007. Fracture Behavior of Functionally Graded Concrete Materials for Rigid Pavements. Transportation Research Record, 2037(1), 40-49

Evaluation of mechanical and fracture properties of single and two-lifts concrete pavements

M. Ahmadi¹, Gh. Shafabakhsh^{2*}, A. Hasani³

1- PhD candidate of Transportation Engineering, Faculty of Civil Eng., Semnan University

2- Professor, Transportation Eng. Dept., Faculty of Civil Eng., Semnan University

3-Professor, Transportation Eng. Dept., Faculty of Civil Eng., TarbiatModares University

*ghshafabakhsh@semnan.ac.ir

Abstract:

Roller compacted concrete (RCC) is a Portland cemented concrete mix with zero slump and dense aggregate dispersed by conventional machinery in asphalt concrete and compacted by rollers. No need for reinforcement and dowel bars, easier implementation, relatively less cost, no need for a finisher, and less shrinkage cracking are the main advantages of this type of pavement over the other rigid pavements. Low skid resistance and uneven surface are the main limitations of roller-compacted concrete. According to manual 354 (Guidance for Design and Implementation of Roller Compacted Concrete pavement of Road in Iran), its application is limited to urban streets and parking lots with low speed. To overcome this limitation and improve the skid resistance of RCC, casting a thin layer of concrete with high skid resistance immediately after implementation and compaction of RCC has been suggested.

In the present study, this kind of two lift concrete pavement (2LCP) mechanical and fracture properties were evaluated and compared with typical single lift concrete pavements. Therefore, a thin layer of plain concrete and polypropylene fiber reinforced concrete with a relative thickness of 30% of total pavement thickness has been cast of RCC pavement. The main objectives of casting a layer of fiber Reinforced concrete on RCC are providing an even surface with high skid resistance and improving the flexural and cracking resistance of these composed systems. Compressive strength and mode I fracture tests were performed on samples after 28 days of curing. In the two-lift concrete pavement system, to prevent cold joints between the layers, the layers' differential implementation times were limited to 30 minutes.

The results showed that due to the lower water to cement ratio, plain concrete's compressive strength is higher than roller -concreted concrete. Also, the addition of polypropylene fibers to plain concrete reduces the compressive strength of concrete slightly. In two-lift concrete specimens, replacement of plain concrete or fiber reinforced concrete by 5 cm with roller concrete does not decrease flexural strength than a single layer of RCC. Like single-layer specimens, the use of fibers in the upper layer does not increase the specimens' flexural strength. The fracture energy of the roller compacted concrete is slightly higher than normal concrete in single layer concrete pavement, but the addition of polypropylene fibers increases the specimens' fracture energy considerably. Similar to compressive strength, the bending strength of normal concrete is greater than roller-compacted concrete. In two lifts concrete specimens, replacement of plain concrete with roller-compacted concrete reduces the fracture energy, but the use of fiber-reinforced concrete in the upper layer compensates fracture energy reduction. As a general conclusion, it can be stated that replacement of plain concrete and fiber concrete with roller-compacted concrete in two lifts specimens had no significant adverse effect on flexural strength and fracture strength of the specimens compared to single-layer roller compacted. It's possible to implement roller compacted concrete for the high-speed street and highway with the bottom layer in two-lift concrete pavements.

Keywords: Roller compacted concrete, Fiber, two- lift concrete pavement