

P. Paryad

Department of Civil
Engineering, Sari Branch,
Islamic Azad University, Sari,
Iran.

e-mail:

paryad.peyman@gmail.com

H. Naderpour*

Faculty of Civil Engineering,
Semnan University, Iran.

e-mail:

naderpour@semnan.ac.ir

M. K. Sharbatdar

Faculty of Civil Engineering,
Semnan University, Iran.

e-mail:

msharbatdar@semnan.ac.ir

Assessing the Effects of Volume Fraction and Diameter of Hooked-End Steel Fiber on Vebe Time and Mechanical Properties of RCCP

Using Roller Compacted Concrete Pavement (RCCP) is expanding all around the world and it shows the importance of accurate experimental assessment of this kind of concrete. In this research, in order to investigate the influence of volume fraction and diameter of hooked-end steel fiber on Vebe time, compressive strength, splitting tensile strength, flexural strength, and toughness of RCCP, ten mixtures were used. One control mixture and nine fibrous mixtures contain volume fraction of 0.25-0.75 and diameter of 0.38-0.7 mm fiber were constructed. Results showed that increment of fiber volume fraction and decrease of fiber diameter led to increase of mechanical properties and Vebe time of RCCP. Due to experiments, the factor of volume fraction was more determinative than diameter. By adding hooked-end steel fiber, load-deflection curve and toughness demonstrate sensible improvement. Some of mixtures showed softening behavior and other showed hardening behavior. Mixtures which contain higher fiber volume fraction and lesser fiber diameter showed hardening behavior. Mixture with volume fraction of 0.75 and diameter of 0.38 mm recorded the most appropriate mechanical strength and toughness, and the results of splitting tensile and flexural strength indicated increment more than about 100%.

Keywords: Roller compacted concrete pavement, Steel fiber, Mechanical properties, Vebe time, Toughness.

* Corresponding author

Received 11 January 2022, Revised 18 February 2022, Accepted 20 February 2022.

DOI: 10.22091/cer.2022.7777.1353

پیمان پاریاد

گروه عمران، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران.
پست الکترونیک:
paryad.peyman@gmail.com

حسین نادرپور*

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
پست الکترونیک:
naderpour@semnan.ac.ir

محمد کاظم شربتدار

استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ایران.
پست الکترونیک:
msharbatdar@semnan.ac.ir

بررسی اثر قطر و درصد حجمی الیاف فلزی قلاب‌دار بر زمان وی‌بی و خصوصیات مکانیکی بتن غلتکی روسازی

استفاده از بتن غلتکی روسازی در سراسر دنیا رو به افزایش است و همین موضوع اهمیت بررسی آزمایشگاهی دقیق این نوع از بتن را نشان می‌دهد. پژوهش‌های محدودی به بررسی اثر قطر الیاف فلزی و درصد مناسب حجمی آن در بتن غلتکی روسازی پرداختند. بنابراین در این تحقیق به بررسی اثر قطر و درصد حجمی الیاف فلزی قلاب‌دار بر RCCP پرداخته می‌شود. به منظور ارزیابی اثر قطر و درصد حجمی الیاف فلزی قلاب‌دار بر زمان وی‌بی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی دو نیم شدگی، مقاومت خمشی و طاقت بتن غلتکی روسازی، از ۱۰ طرح مخلوط استفاده شد. یک مخلوط کنترل بدون الیاف و نه مخلوط حاوی درصد حجمی ۰/۲۵ تا ۰/۷۵ با قطر ۰/۳۸ تا ۰/۷ میلی‌متر ساخته شد. نتایج نشان داد که افزایش درصد حجمی و کاهش قطر الیاف منجر به افزایش زمان وی‌بی و بهبود مشخصات مکانیکی می‌گردد. با توجه به آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، مولفه درصد حجمی الیاف اثر گذاری بیشتری نسبت به قطر الیاف نشان داده است. با افزودن الیاف فلزی قلاب‌دار، نمودار نیرو-تغییر مکان خمشی و در نتیجه طاقت نیز بهبود چشمگیری نشان دادند. طرح مخلوط حاوی درصد حجمی ۰/۷۵ و قطر ۰/۳۸ میلی‌متر بهترین نتایج آزمایش‌های مقاومت مکانیکی و طاقت را ثبت کرد و نتایج مقاومت کششی دو نیم شدگی و خمشی آن تا ۱۰۰ درصد افزایش نشان داد.

واژگان کلیدی: بتن غلتکی روسازی، الیاف فلزی، مشخصات مکانیکی، زمان وی‌بی، طاقت.

۱- مقدمه

بتن معمولی، اجزای تشکیل دهنده‌ی بتن غلتکی عبارت است از: سنگدانه، سیمان، آب و مواد افزودنی (در صورت نیاز). از سوی دیگر بر خلاف بتن معمولی، بتن غلتکی آب کمتری دارد و به عنوان یک بتن اسلامپ صفر شناخته می‌شود. به صورت کلی بتن غلتکی دو نوع متفاوت دارد، بتن غلتکی سدسازی^۲ (RCCD) و بتن غلتکی روسازی^۳ (RCCP). در سدسازی سیمان کمتری استفاده می‌شود و معمولاً مقاومت فشاری کمتری به نسبت بتن معمولی دارد. در حالی که بتن غلتکی روسازی سیمان بیشتری دارد و بزرگترین اندازه سنگدانه آن هم کوچکتر است [۲].

بتن غلتکی^۱ (RCC) در سال‌های اخیر به عنوان یکی از پرکاربردترین بتن‌های استفاده شده در زیرساخت‌های کشورهای جهان بوده است. از نظر روش اجرا، آسفالت و RCC هر دو شیوه‌ای شبیه به هم دارند. به عبارت دیگر، RCC معمولاً به وسیله فینیش‌های بکار رفته شده در روسازی‌های آسفالتی پخش می‌شود و پس از آن با غلتک‌های لرزاننده فشرده می‌گردد [۱]. همانند

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۱۰/۲۱، بازنگری ۱۴۰۰/۱۱/۲۹، پذیرش ۱۴۰۰/۱۲/۰۱

(DOI): 10.22091/cer.2022.7777.1353 شناسه دیجیتال

^۱ Roller compacted concrete

^۲ Roller compacted concrete dam

^۳ Roller compacted concrete pavement

هزینه مقرون به صرفه و ساخت و بهره‌برداری سریع، دو مزیت بزرگ استفاده از RCC برای روسازی راه هستند [۳]. با توجه به تاریخچه استفاده از بتن غلتکی در روسازی، اولین استفاده از آن به ساخت محوطه یک کارخانه چوب در کانادا برمی‌گردد [۴]. موارد استفاده از RCCP عبارت است از: باند فروگاه، پارکینگ وسایل نقلیه، انبار، جاده‌های اصلی و فرعی و پایگاه‌های نظامی [۵].

فاکتورهای زیادی بر کیفیت بتن غلتکی موثر است و محققان متعددی این مولفه‌ها را در تحقیقاتشان بررسی کرده‌اند. چورن^۴ و همکاران در یک تحقیق میدانی به بررسی عملکرد و کارایی RCCP پرداختند [۳]. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که زمان وی بی^۵ بهینه برای رسیدن به تراکم مطلوب ضروری است. همچنین برای اجرای بهتر بتن غلتکی یک دانه بندی جدید پیشنهاد دادند. هاشمی و همکاران به ارزیابی نسبت سنگدانه درشت به سنگدانه ریز در RCCP با دو مقدار متفاوت سیمان پرداختند [۶]. آن‌ها در تحقیق خود اعلام کردند با افزایش سیمان از ۹ درصد به ۱۲ درصد خصوصیات بتن غلتکی به صورت مشهودی بهبود پیدا کرده است و نسبت سنگدانه درشت به سنگدانه ریز نیز نقش بسیار مهمی در تخلخل بتن دارد. مشخصات مکانیکی بتن غلتکی روسازی توسط رحمانی و همکاران فرمول بندی شد [۷]. آن‌ها به مقایسه ۱۱ مخلوط بتن با نسبت‌های متفاوت آب به سیمان و مقادیر متفاوت سیمان پرداختند و با مقایسه نتایج با داده‌های موجود در استانداردهای بین‌المللی روابط خود را ارائه کردند. رحمانی و همکاران در تحقیق دیگری به بررسی اثر مقدار سیمان بر پارامترهای شکست RCCP پرداختند [۸].

مقالات فراوانی بر اثر استفاده از پوزولان‌ها و مواد جایگزین در بتن غلتکی روسازی اشاره کرده‌اند.

واحدی‌فرد و همکاران به بررسی مواد کمک سیمانی (دوده سیلیسی و پومیس) و اثرات آن‌ها بر کارایی، مقاومت فشاری و ذوب و یخبندان پرداختند [۹]. رایو^۶ و همکاران بر روی جایگزینی سیمان با سرباره کوره آهن گدازی^۷ (GGBS) کار کردند و اثرات درصدهای مختلف جایگزینی را بر سایش و خصوصیات مکانیکی بتن غلتکی گزارش کردند [۱۰]. عمران^۸ و همکاران در تحقیقشان بر روی اثر پودر شیشه بر بتن غلتکی پرداختند. با اضافه کردن پودر شیشه بر بتن غلتکی مشخص شد خصوصیات مکانیکی این بتن در سنین بالاتر بهبود پیدا می‌کند. و دلیل آن اثر پوزولانیک پودر شیشه می‌باشد [۱۱].

با توجه به روش اجرای RCC، به صورت متداول امکان جایگذاری داوول در این نوع بتن میسر نیست [۱۲]. به منظور کنترل انتشار ترک، کاهش ضخامت دال و بهبود خصوصیات شکست، الیاف ماکرو به بتن‌های پرتلندی اضافه شدند [۱۳، ۱۴]. با توجه به طبقه بندی استاندارد ASTM شماره ۱۱۱۶ [۱۵]، چهار نوع الیاف برای مسلح سازی بتن وجود دارد: فلزی، شیشه، سینتتیک و طبیعی. مطالعات متعددی بر روی اثرات الیاف گوناگون بر روی بتن غلتکی صورت گرفته است. اشتیاق^۹ و همکاران [۱۶] به ارزیابی عملکرد الیاف پلی‌پروپیلین در بتن غلتکی حاوی ضایعات گرد سیمان سفید^{۱۰} (WCBPD) پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها بر مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته و سرعت پالس اولتراسونیک، بهبود در خصوصیات مکانیکی و دوامی بتن را نشان داد. الگین و گرگینچی^{۱۱} [۱۷] در پی تحقیقشان بر روی اثر الیاف ماکرو سینتتیک بر مقاومت ذوب و یخبندان و نفوذ آب در RCC، به این نتیجه رسیدند که الیاف سینتتیک

⁶ Rao

⁷ Ground granulated blast furnace

⁸ Omran

⁹ Ashteyat

¹⁰ White cement bypass dust

¹¹ Algin and Gerginci

⁴ Chhorn

⁵ Vebe time

روسازی، مقاومت فشاری، کشش دو نیم شدن و خمشی اندازه‌گیری می‌شود و با استفاده از ثبت تغییرات نیرو-تغییر مکان، طاقت نیز مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مورد استفاده

در این تحقیق، از سنگدانه درشت و ریز، سیمان، آب و الیاف فلزی قلاب‌دار برای ساخت نمونه‌های بتنی استفاده شده است. سنگدانه ۷۵ الی ۸۵ درصد از حجم RCC را تشکیل می‌دهد. بنابراین سنگدانه‌ها در خصوصیات بتن غلتکی تازه و سخت شده نقش کلیدی دارند [۵]. در این تحقیق، از سنگدانه درشت (شن) طبیعی شکسته با حداکثر اندازه ۱۳ و ۱۹ میلی‌متر با وزن مخصوص $2/65 \text{ gr/m}^3$ و ریزدانه (ماسه) رودخانه‌ای با وزن مخصوص $2/66 \text{ gr/m}^3$ استفاده شده است. کلیه الزامات ASTM C33 برای سنگدانه‌ها در نظر گرفته شده و نسبت ماسه به سنگدانه ۶۰ درصد تعیین گردید. شکل ۱ منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ها را نشان می‌دهد که با توجه به راهنمای PCA رسم گردیده است [۲۱].

سیمان استفاده شده در این تحقیق سیمان تیپ دو بوده که خصوصیات شیمیایی آن در جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به تحقیقات صورت گرفته، الیاف فلزی قلاب‌دار در بتن عملکرد خمشی بهتری داشته و پل زدن بر روی ترک‌ها با این الیاف به شکل موثرتری رخ می‌دهد. به صورت کلی بالاترین پیک بار و بهترین شکل پذیری پس از پیک بار در بتن‌های حاوی الیاف فلزی قلاب‌دار گزارش شده است [۲۲-۲۴]. در نتیجه الیاف فلزی قلاب‌دار با طول ثابت ۳۵ میلی‌متر و سه قطر متفاوت (۰/۳۸، ۰/۵، ۰/۷ میلی‌متر) که تصویر آن‌ها در شکل ۲ نشان داده است برای این تحقیق انتخاب گردیدند. مشخصات مکانیکی الیاف در جدول ۲ ارائه گردیده است.

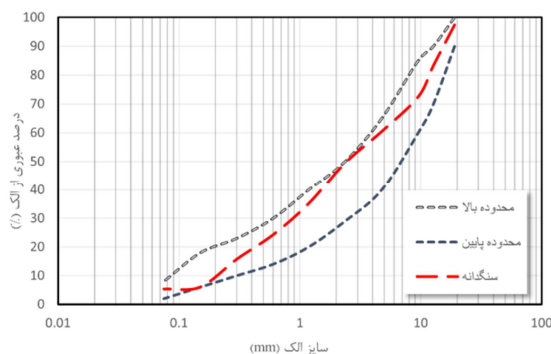
مقاومت ذوب و یخبندان و همینطور عمق نفوذ آب و جذب آب در بتن غلتکی را بهبود می‌دهد.

مدح خان و همکاران [۱۸] بر روی اثرات پوزولان و الیاف بر روی ویژگی‌های مکانیکی بتن غلتکی کار کردند و نتایج را گزارش کردند. لاهوسیک^{۱۲} و همکاران [۱۲] به بررسی الیاف ماکرو در بتن غلتکی و مقایسه عملکرد این بتن با بتن معمولی الیافی پرداختند. در این تحقیق از دو نوع الیاف فلزی و چهار نوع الیاف سینتتیک استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که هندسه الیاف، نوع و میزان مولفه‌های بسیار پر اهمیتی برای عملکرد سازه‌ای هستند. در تحقیق روح‌الامینی و همکاران [۱۹] رفتار شکست بتن غلتکی حاوی الیاف تک و ترکیبی (با نوع و طول متفاوت) مورد بررسی قرار گرفت. الیاف پلی‌پروپیلن ماکرو و الیاف کوتاه فلزی در تغییر طاقت شکست یک هم‌افزایی مناسب داشتند. ضمن اینکه موثرترین الیاف برای پل زدن بر روی ترک‌های بزرگ، الیاف فلزی بود. سوکنتاسوکول^{۱۳} و همکاران [۲۰] خصوصیات مکانیکی الیاف فلزی قلاب‌دار بر بتن غلتکی را در یک تحقیق موردی بررسی کردند. نتایج تحقیق حاکی از کاهش یک تا دو درصدی مقاومت فشاری با استفاده از مقادیر بالاتر الیاف فلزی بود. در حالیکه افزودن الیاف فلزی منجر به افزایش قابل توجه مقاومت خمشی و طاقت گردید.

با توجه به مرور ادبیات تحقیق، پژوهش‌های محدودی به بررسی اثر قطر الیاف فلزی و درصد مناسب حجمی آن در بتن غلتکی روسازی پرداختند. در این تحقیق به بررسی اثر قطر و درصد حجمی الیاف فلزی قلاب‌دار بر RCCP پرداخته می‌شود. نوع و دانه بندی سنگدانه‌ها، نوع و مقدار سیمان و طول الیاف برای مخلوط‌ها ثابت بوده و متغیرها قطر و درصد الیاف فلزی خواهد بود. برای تعیین خصوصیات مکانیکی بتن غلتکی

¹² LaHucik

¹³ Sukontasukkul



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ها با محدودیت‌های PCA

۲-۲- طرح مخلوط و آماده‌سازی نمونه‌ها

براساس استاندارد ASTM C1176 آماده سازی

نمونه‌ها بصورت لایه به لایه بر روی میز لرزاننده و زیر سربار صورت گرفت.

جدول ۱- خصوصیات شیمیایی سیمان

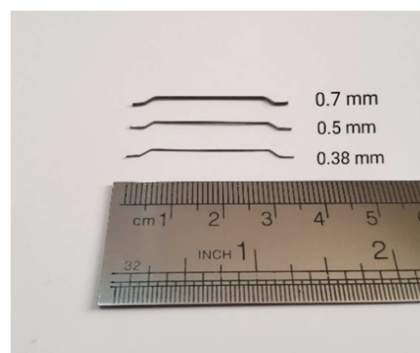
ترکیبات شیمیایی (%)							
SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO
۲/۶۱	۰/۵۱	۰/۳۸	۱/۵۱	۳/۹۶	۴/۴۲	۲۱/۱۱	۶۳/۳۶

در مجموع ۶۰ نمونه استوانه‌ای با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر ساخته شدند که از این میان ۳۰ نمونه برای مقاومت فشاری و ۳۰ نمونه دیگر برای مقاومت کشش دو نیم شدگی بودند. به منظور ساخت تیرهای منشوری، هر لایه از بتن با قرار دادن سرباری معادل پنج کیلوپاسکال فشرده گردید. فشرده سازی نمونه‌ها در سه لایه انجام شد و فشرده سازی هر لایه تا نمایان شدن شیره در اطراف سربار ادامه پیدا کرد. تمام نمونه‌ها بعد از ساخت در شرایط آزمایشگاهی به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شده و سپس از قالب خارج شدند. نمونه‌ها برای ۲۸ روز در دمای ۲۴ درجه سانتیگراد نگهداری شدند. پروسه عمل‌آوری بر اساس استاندارد ASTM C192 صورت پذیرفت [۲۶].

۲-۳- روش آزمایش

در این تحقیق روش آزمایش به گونه‌ای طراحی شد تا اثر قطر و درصد حجمی الیاف فلزی قلابدار بر بتن غلتکی روسازی بررسی گردد. مقاومت فشاری، کششی و

در این پژوهش یک طرح مخلوط بدون الیاف به عنوان طرح کنترل و نه طرح مخلوط الیافی به ترتیب با قطرهای ۰/۳۸، ۰/۵ و ۰/۷ میلی‌متر و درصدهای حجمی ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ درصد ساخته شدند. مقادیر طرح مخلوطها در جداول ۳ و ۴ قابل مشاهده هستند. نام گذاری مخلوطها با الگوی SF-Dd-Vv صورت پذیرفته است که به ترتیب بخش اول به بتن غلتکی با الیاف فلزی، بخش دوم به قطر الیاف بر حسب میلی‌متر و بخش سوم به درصد حجمی اشاره دارد.



شکل ۲- هندسه الیاف فلزی قلابدار

با توجه به بدون اسلامپ بودن بتن غلتکی روسازی، به منظور اندازه‌گیری کارایی RCCP آزمون وی بی مورد استفاده قرار گرفت. بر اساس استاندارد ASTM C1170 [۲۵]، زمان وی بی اصلاح شده به زمان شکل گرفتن حلقه شیره بتن میان سربار ۲۲/۷ کیلوگرمی و دیواره ظرف حاوی بتن گفته می‌شود.

خمشی با نرخ تغییرات جابجایی ۰/۱ میلی‌متر بر دقیقه نشان می‌دهد. انجام شد. شکل ۳ چینش انجام شده برای تست‌ها را

جدول ۲- مشخصات مکانیکی الیاف

نوع الیاف	قطر (mm)	طول (mm)	نسبت طول به قطر	قابلیت افزایش طول (%)	مقاومت کششی (MPa)	وزن مخصوص (kg/m ³)
فلزی قلاب‌دار	۰/۳۸	۳۵	۹۲	کمتر از ۴	۲۴۸۰	۷۸۷۰
فلزی قلاب‌دار	۰/۵	۳۵	۷۰	کمتر از ۴	۲۴۸۰	۷۸۷۰
فلزی قلاب‌دار	۰/۷	۳۵	۵۰	کمتر از ۴	۲۴۸۰	۷۸۷۰

جدول ۳- طرح مخلوط پایه (کنترل)

واحد وزن (kg/m ³)					آب به سیمان
ریزدانه	درشت‌دانه mm(۱۳-۱۹)	درشت‌دانه mm(۵-۱۳)	آب	سیمان	
۱۱۵۸/۹۳	۵۴۰/۸۴	۲۳۱/۷۹	۱۴۰	۳۵۰	۰/۴

جدول ۴- طرح مخلوط‌های حاوی الیاف

SF-D0.7-V0.75	SF-D0.7-V0.5	SF-D0.7-V0.25	SF-D0.5-V0.75	SF-D0.5-V0.5	SF-D0.5-V0.25	SF-D0.38-V0.75	SF-D0.38-V0.5	SF-D0.38-V0.25	Control	کد مخلوط
۰/۷	۰/۷	۰/۷	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۳۸	۰/۳۸	۰/۳۸	-	قطر (mm)
۰/۷۵	۰/۵	۰/۲۵	۰/۷۵	۰/۵	۰/۲۵	۰/۷۵	۰/۵	۰/۲۵	-	درصد حجمی

LVDT^{۱۴} که تغییر مکان وسط دهانه را اندازه‌گیری می‌کردند ثبت می‌شد.



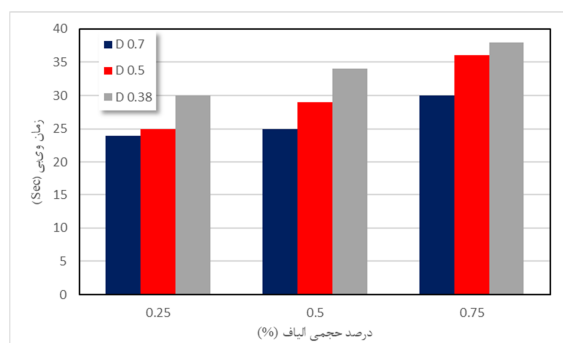
شکل ۳- چینش تست‌های انجام شده، الف: مقاومت فشاری، ب: وی‌بی، ج: مقاومت خمشی، د: مقاومت کشش دو نیم شدگی

مقاومت فشاری بر اساس استاندارد ASTM C39 و با آزمایش سه نمونه استوانه‌ای برای هر مخلوط انجام شد [۲۷]. به منظور بدست آوردن مقاومت کششی دو نیم شدگی بر اساس استاندارد ASTM C496 سه نمونه استوانه‌ای برای هر مخلوط در حلقه مخصوص تست قرار داده شد و نتایج ثبت گردید [۲۸].

برای آزمایش خمشی چهار نقطه‌ای، برای هر مخلوط سه تیر ساخته شد و بر اساس استاندارد ASTM C1609 مورد آزمایش قرار گرفت [۲۹]. هر نمونه ۹۰ درجه نسبت به سطح پرداخت شده چرخانده شد و سپس تیرها بر روی تکیه‌گاهی به فاصله ۳۰ سانتی‌متر قرار داده شدند. منحنی نیرو-تغییر مکان برای محاسبه پارامترهای اشاره شده در استاندارد ۱۶۰۹ استفاده گردید. تغییر مکان توسط دو

¹⁴ Linear variable displacement transducers

نقش تعداد الیاف در محدود سازی بتن تازه دارد. دلیل اصلی کاهش کارایی بتن، شکل گیری شبکه الیاف در ماتریس RCCP است [۳۰]. از سوی دیگر سطح مخصوص بتن غلتکی حاوی الیاف بیشتر از بتن غلتکی ساده می باشد و این می تواند منجر به صرف زمان بیشتر برای رسیدن به تراکم مناسب بتن غلتکی شود [۲۰].



شکل ۴- اثر درصد حجمی و قطر الیاف بر زمان وی بی.

در مقایسه با زمان وی بی مخلوط کنترل (۲۵ ثانیه)، طرح های SF-D0.7-V0.25، SF-D0.7-V0.5 و SF-D0.5-V0.25 تغییراتی در زمان وی بی نداشتند. به نظر می رسد برای تاثیر گذاری بر وی بی در پی تشکیل شبکه ی الیاف، به حداقلی از تعداد الیاف نیاز است. مجموعاً در این تحقیق محدوده زمان وی بی از ۲۴ تا ۳۸ ثانیه ثبت شد (زمان وی بی تمام مخلوط ها در جدول ۵ نشان داده شده است). با توجه به ACI 325، زمان وی بی مناسب برای RCCP بین ۳۰ تا ۴۰ ثانیه است [۵]. در دو تحقیق دیگر این زمان در محدوده ۴۷ تا ۶۵ ثانیه [۳]، [۳۱] و در پژوهشی دیگر از ۳۰ تا ۷۵ ثانیه پیشنهاد شده است [۳۲].

۲-۳- مقاومت فشاری

با توجه به شکل ۵ که اثرات قطر و درصد الیاف بر مقاومت فشاری در آن به تصویر کشیده شده است، می توان فهمید که در مقدار ثابت الیاف، مخلوط های حاوی الیاف با قطر بیشتر مقاومت فشاری بالاتری دارند.

طراقت بر اساس سطح زیر منحنی نیرو-تغییر مکان تا تغییر مکان مشخص شده محاسبه گردیده است که در این پژوهش 1/100، 1/150، 1/300، 1/600 و 1/100 طول دهانه می باشد. مقاومت باقی مانده خمشی با توجه به معادله ۱ محاسبه می گردد که در آن P بار (نیوتن)، L طول دهانه (۳۰۰ میلی متر)، b عرض (۱۰۰ میلی متر)، و d عمق (۱۰۰ میلی متر) می باشد. $R_{T.150}$ که نسبت مقاومت خمشی معادل می باشد با استفاده از معادله ۲ محاسبه شده است که f_1 مقاومت اولین پیک (مگاپاسکال)، T_{150} سطح زیر منحنی نیرو- تغییر مکان تا تغییر مکان L/150 (نیوتن.متر)، b عرض (۱۰۰ میلی متر) و d عمق (۱۰۰ میلی متر) می باشد.

$$f = \frac{PL}{bd^2} \quad (1)$$

$$R_{T.150} = \frac{150 \cdot T_{150}}{f_1 bd^2} \cdot 100\% \quad (2)$$

۳- تجزیه و تحلیل نتایج

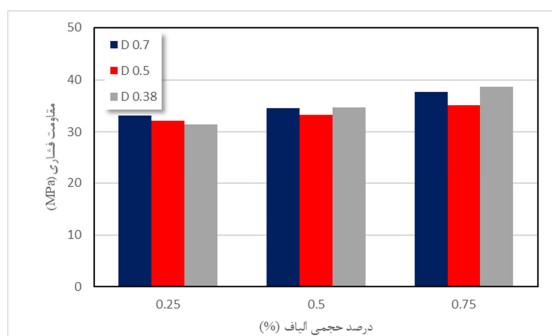
۳-۱- زمان وی بی

اثر قطر و درصد حجمی بر زمان وی بی در شکل ۴ به تصویر کشیده شده است. همانطور که نشان داده شده است زمان وی بی با افزایش درصد حجمی افزایش و با کاهش قطر الیاف افزایش پیدا می کند. در مخلوط های با قطر ۰/۷ میلی متر، با افزایش درصد حجمی از ۰/۲۵ به ۰/۷۵ درصد، مقادیر زمان وی بی تا ۲۵ درصد افزایش پیدا می کند (۳۰-۲۴ ثانیه). به صورت مشابه برای قطر ۰/۵ و ۰/۳۸ میلی متر، با افزایش درصد حجمی، مقادیر زمان وی بی به ترتیب ۴۴ (۳۶-۲۵ ثانیه) و ۲۷ درصد (۳۸-۳۰ ثانیه) افزایش پیدا می کند. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است بالاترین زمان وی بی در مخلوط حاوی ۰/۷۵ درصد الیاف و با قطر ۰/۳۸ میلی متر ثبت شده است. افزایش زمان وی بی نتیجه افزایش درصد حجمی و از سوی دیگر کاهش قطر الیاف می باشد و این نشان از

جدول ۵- نتایج زمان وی‌بی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی دو نیم شدگی.

کد مخلوط	زمان وی‌بی (Sec)	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی دو نیم شدگی (MPa)
Control	۲۵	۳۰/۳۰	۳/۰۲
SF-D0.7-V0.25	۲۴	۳۳/۰۹	۳/۹۳
SF-D0.7-V0.5	۲۵	۳۴/۵۳	۴/۶۴
SF-D0.7-V0.75	۳۰	۳۷/۷۲	۴/۷۹
SF-D0.5-V0.25	۲۵	۳۲/۲۰	۳/۵۸
SF-D0.5-V0.5	۲۹	۳۳/۳۵	۴/۷۶
SF-D0.5-V0.75	۳۶	۳۵/۱۳	۵/۸۳
SF-D0.38-V0.25	۳۰	۳۱/۴۲	۴/۴۴
SF-D0.38-V0.5	۳۴	۳۴/۷۵	۵/۱۵
SF-D0.38-V0.75	۳۸	۳۸/۶۸	۶/۳۱

[۳۷].



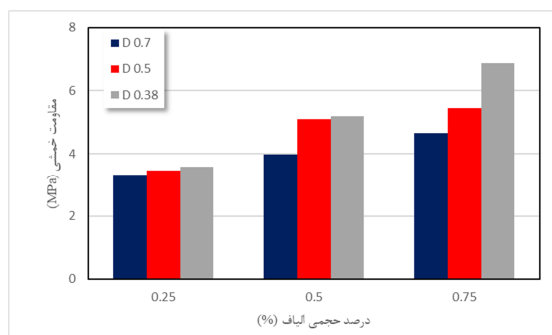
شکل ۵- اثر درصد حجمی و قطر الیاف بر مقاومت فشاری.

۳-۳- مقاومت کششی دو نیم شدگی

شکل ۶ اثر درصد حجمی و قطر الیاف بر مقاومت کششی دو نیم شدگی در RCCP را نشان می‌دهد. همانطور که نشان داده شده است افزایش درصد حجمی و کاهش قطر الیاف تاثیر بسیار مشهودی بر افزایش مقاومت کششی دو نیم شدگی دارد. به طوری که در مخلوط SF-D0.38-V0.75 شاهد بهبود ۱۰۰ درصدی مقاومت کششی دو نیم شدگی نسبت مخلوط کنترل هستیم. با بررسی نتایج مشخص است که هر دو فاکتور درصد حجمی و قطر بر مقاومت کششی اثرگذارند اما درصد حجمی تاثیرگذاری بیشتری نسبت به قطر الیاف دارد. سری مخلوط‌های حاوی الیاف با قطر ۰/۳۸ میلی‌متر در

با توجه به بررسی نتایج مشخص است که درصد حجمی الیاف نسبت به قطر آن تعیین کنندگی بیشتری در تغییر مقاومت فشاری دارد. PCA محدوده قابل قبول برای مقاومت فشاری بتن غلتکی روسازی را ۲۸ تا ۴۱ مگاپاسکال ذکر کرده است که نتایج این تحقیق هم در همین بازه مقاومتی هستند (جدول ۵). همینطور که نشان داده شده است در مقایسه با مقاومت فشاری مخلوط بدون الیاف (۳۰/۳ مگاپاسکال)، افزودن الیاف فلزی قلاب‌دار اثر مثبتی بر مقاومت فشاری بتن داشته و موجب افزایش مقادیر مقاومت فشاری شده است (از درصد حجمی ۰/۲۵ تا ۰/۷۵). در پژوهش مدح‌خان و همکاران [۱۸] نیز مقاومت فشاری با افزودن الیاف فلزی به RCCP افزایش داشته است. در تحقیقات مشابه در بتن معمولی نیز با استفاده از الیاف فلزی (تا یک درصد حجمی) مقاومت فشاری ۲۰ تا ۲۶ درصد افزایش داشته است [۳۳، ۳۴]. این در حالی است که برخی تحقیقات دیگر تغییر محسوسی را در نتایج خود گزارش نکردند [۱۲، ۳۵، ۳۶]. افزایش مقاومت فشاری با افزودن الیاف فلزی می‌تواند ناشی از محاصره و محدودسازی ترک‌ها برای انتشار بیشتر باشد. هرچه الیاف بیشتری استفاده گردد منجر به همپوشانی موثرتر با ریزترک‌ها می‌گردد [۱۸].

(SF-D0.7-V0.25)، با افزایش درصد حجمی و کاهش قطر الیاف مقاومت خمشی افزایش داشته تا جایی که در مخلوط SF-D0.38-V0.75 ۱۰۵ درصد افزایش رخ داده است. تاثیر الیاف فولادی بر مقاومت خمشی به مراتب بیشتر از مقاومت کششی و فشاری است. علت آن را می‌توان این گونه توضیح داد که رفتار شکل پذیر بتن های حاوی الیاف فولادی در ناحیه کششی بتن، توزیع الاستیک تنش و کرنش را به نحوی تغییر می‌دهد که در ناحیه کششی توزیع تنش به صورت پلاستیک و در ناحیه فشاری به صورت الاستیک خواهد بود. در نتیجه تار خنثی به سمت ناحیه فشاری جابجا می‌شود.

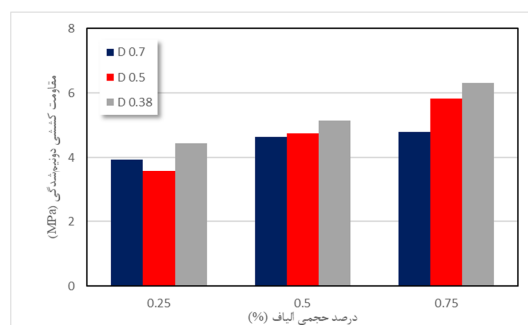


شکل ۷- اثر درصد حجمی و قطر الیاف بر مقاومت خمشی

جدول ۶ نتایج کامل مقاومت خمشی، مقاومت باقیمانده در تغییر مکان 1/600 و 1/150 دهانه (F_{600} و F_{150})، طاقت در تغییر مکان 1/600، 1/300، 1/150 و 1/100 دهانه (به ترتیب T_{600} ، T_{300} ، T_{150} و T_{100}) و نسبت معادل مقاومت خمشی ($R_{T,150}$) را ارائه داده است. چهار مخلوط از نه مخلوط مقادیری پایین تر از مقاومت خمشی مخلوط کنترل دارند. به نظر می‌رسد این کاهش مقاومت به دلیل دشواری رسیدن به تراکم مطلوب در غیاب استاندارد مناسب روش ساخت تیرهای بتن غلتکی می‌باشد. این مشکل در تحقیقی مشابه نیز گزارش شده است [۱۲].

منحنی‌های نیرو-تغییر مکان خمشی مخلوط‌های بتن غلتکی روسازی با قطر و درصد‌های حجمی گوناگون در شکل ۸ و ۹ نشان داده شده‌اند. استاندارد ASTM C1609 نقطه پایانی منحنی را تغییر مکان 1/150 طول

درصدهای ۰/۲۵ تا ۰/۷۵ بالاترین مقادیر را داشته است. کمترین سیر افزایشی را سری مخلوط‌های حاوی الیاف با قطر ۰/۷ میلی‌متر ثبت کرده‌اند.



شکل ۶- اثر درصد حجمی و قطر الیاف بر مقاومت کششی دو نیم‌شدگی.

مقادیر مقاومت کششی دونیم شدگی در جدول ۵ نشان داده شده‌اند. شاید بتوان اصلی‌ترین دلیل افزایش مقاومت کششی را پیوند اصطکاکی بین الیاف و ماتریس بتن برشمرد. ضمن اینکه جلوگیری از رشد ریز ترک‌ها در ناحیه انتقال اطراف سنگدانه‌های درشت و ملات اطراف آن‌ها نیز از اهمیت بالایی در این مورد برخوردار است. تحقیقات متعددی افزایش مقاومت کششی دونیم شدگی را گزارش کرده‌اند [۲۲، ۳۸، ۳۹].

۳-۴- مقاومت خمشی و طاقت

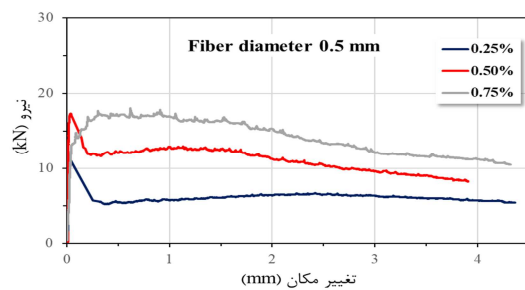
اثر فاکتورهای مورد مطالعه در این تحقیق بر مقاومت خمشی در شکل ۷ به تصویر کشیده شده است. همانطور که نشان داده شده است بالاترین میزان مقاومت خمشی در مخلوط SF-D0.38-V0.75 ثبت شده است. همانند مقاومت کششی دونیم شدگی، هم درصد و هم قطر الیاف بر مقاومت خمشی اثرگذارند. اما با بررسی دقیق‌تر اثر درصد حجمی الیاف بیشتر از قطر آن است. افزایش مقاومت خمشی نتیجه افزایش درصد حجمی و کاهش قطر الیاف می‌باشد. در میان مخلوط‌های این مطالعه، مخلوط‌های حاوی الیاف با کوچکترین قطر (۰/۳۸ میلی‌متر) بالاترین مقادیر را ثبت کردند و روند رشدشان (با افزایش درصد حجمی) نیز صعودی‌تر بود. در قیاس با مخلوط حاوی الیاف ۰/۷ میلی‌متر و ۰/۲۵ درصد الیاف

تست‌هایی که ترک دقیقاً به نقطه زیرین LVDT رسیده است و آزمایش زودتر خاتمه یافته است. در مخلوط کنترل پروسه تحمل نیرو بلافاصله پس از ترک خوردگی پایان یافت و این به معنای سقوط ناگهانی نمودار است

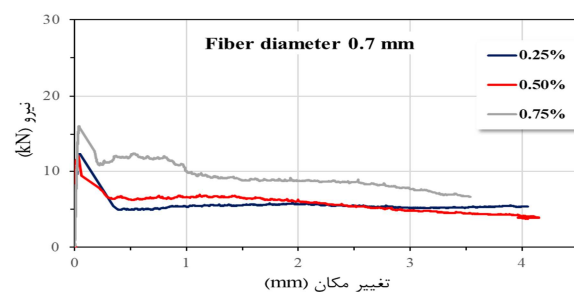
دهانه می‌داند. با این وجود در این تحقیق به منظور رصد بهتر و کامل‌تر رفتار بتن غلتکی روسازی حاوی الیاف فلزی قلاب‌دار، نقطه پایان منحنی تغییر مکانی برابر با 1/75 طول دهانه (۴ میلی‌متر) در نظر گرفته شد (غیر از

جدول ۶- اثر درصد حجمی و قطر الیاف بر عملکرد خمشی و طاقت.

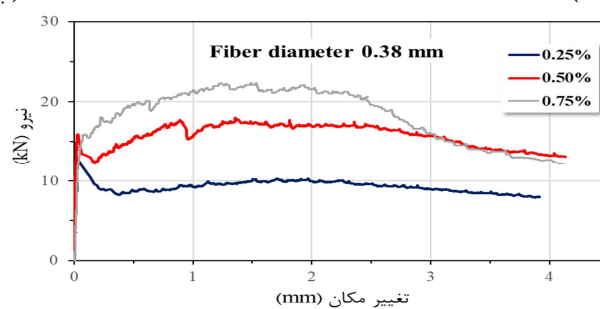
کد مخلوط	مقاومت خمشی (MPa)	F ₆₀₀ (MPa)	F ₁₅₀ (MPa)	T ₆₀₀ (N.m)	T ₃₀₀ (N.m)	T ₁₅₀ (N.m)	T ₁₀₀ (N.m)	R _{T, 150} (%)
Control	۴/۶۸	-	-	-	-	-	-	-
SF-D0.7-V0.25	۳/۳۳	۱/۵۳	۱/۵۱	۳/۶۳	۶/۲۴	۱۱/۴۹	۱۶/۳۰	۵۲/۱۰
SF-D0.7-V0.5	۳/۹۹	۲/۰۴	۲/۰۳	۳/۸۹	۷/۴۰	۱۴/۴۹	۲۰/۶۶	۵۲/۹۵
SF-D0.7-V0.75	۴/۶۵	۳/۵۵	۲/۹۲	۵/۹۶	۱۱/۸۴	۲۲/۲۳	۳۱/۳۲	۷۲/۲۵
SF-D0.5-V0.25	۳/۴۷	۱/۶۲	۱/۹۵	۳/۰۷	۵/۸۷	۱۲/۰۸	۱۸/۴۳	۵۸/۷۶
SF-D0.5-V0.5	۵/۱۱	۳/۶۱	۳/۳۸	۶/۴۲	۱۲/۵۸	۲۴/۹۲	۳۵/۳۰	۷۱/۸۶
SF-D0.5-V0.75	۵/۴۵	۴/۹۶	۴/۷۹	۷/۱۹	۱۵/۵۳	۳۲/۲۴	۴۷/۱۲	۱۲۳/۱۸
SF-D0.38-V0.25	۳/۵۹	۲/۷۰	۳/۰۸	۴/۳۳	۹/۲۳	۲۰/۰۱	۲۹/۴۷	۸۴/۱۲
SF-D0.38-V0.5	۵/۱۹	۴/۰۳	۴/۹۲	۶/۸۶	۱۴/۱۲	۳۰/۲۱	۴۶/۲۰	۹۲/۳۵
SF-D0.38-V0.75	۶/۸۸	۶/۲۳	۶/۱۰	۸/۸۷	۱۹/۵۹	۴۰/۸۳	۵۹/۱۷	۱۲۵/۹۸



(ب)

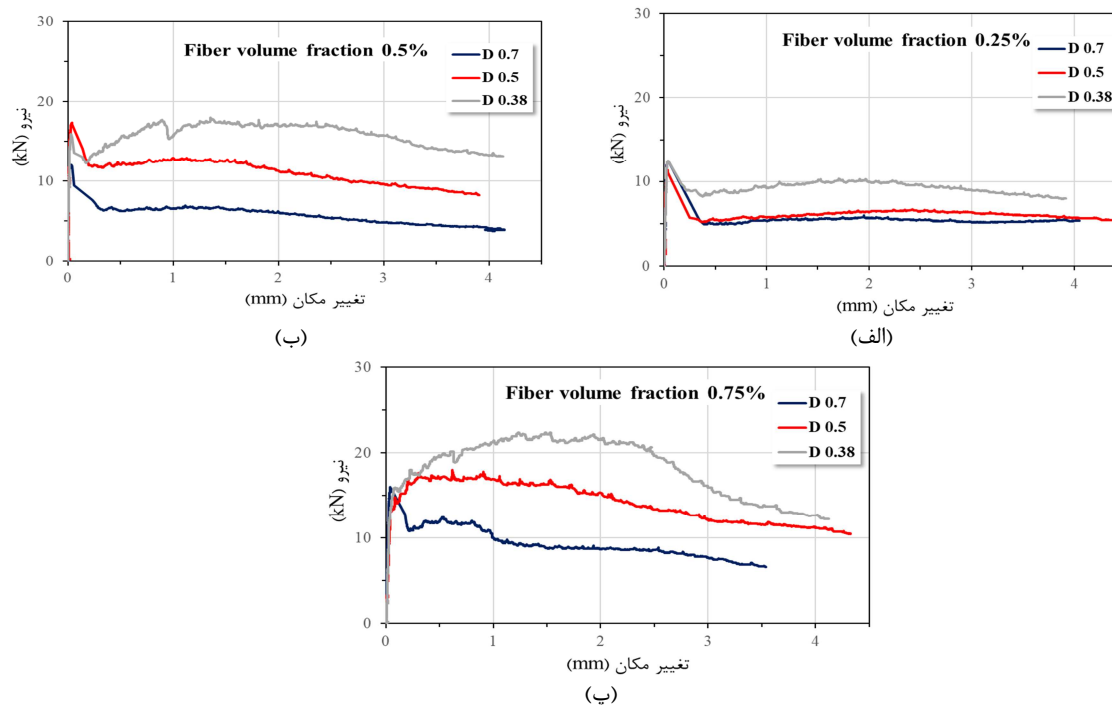


(الف)



(پ)

شکل ۸- اثر درصد حجمی و قطر الیاف بر گراف‌های نیرو-تغییر مکان خمشی بر اساس قطر الیاف.



شکل ۹- اثر درصد حجمی و قطر الیاف بر گراف‌های نیرو-تغییر خمشی مکان بر اساس درصد حجمی الیاف

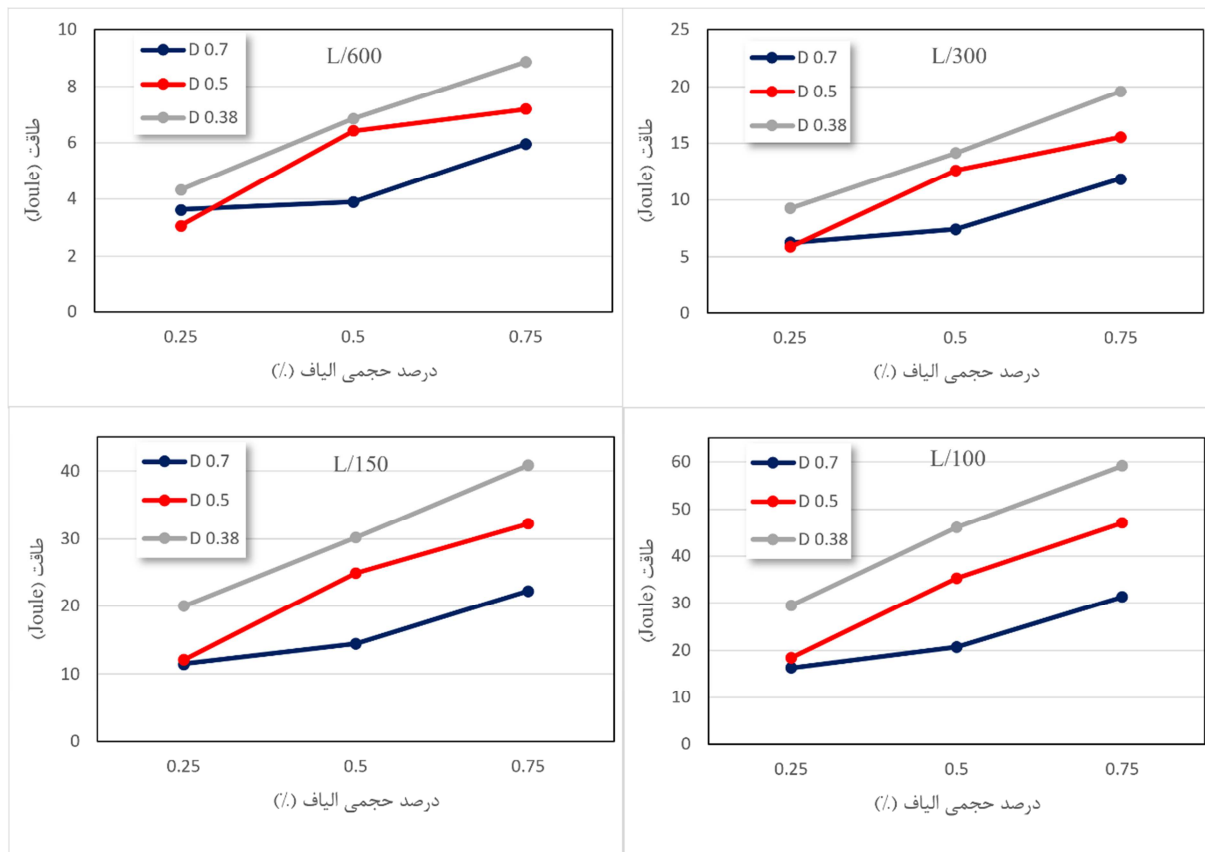
خطی‌تر در محور تغییر مکان می‌شود. پیک دوم در نمودارها به دلیل باز شدن تدریجی قلاب‌های انتهایی الیاف در مخلوط RCCP است. با کاهش قطر و افزایش درصد حجمی الیاف، پیک دوم بالاتر می‌رود تا جایی که مقدارش از پیک اول نیز بیشتر می‌شود و رفتارش سخت‌شونده تعبیر می‌گردد.

طاق‌ت پارامتر ارزشمندی است که به منظور اندازه‌گیری ظرفیت جذب انرژی استفاده می‌شود. طاق‌ت تحت بارگذاری خمشی و براساس رفتار خمشی تیر با تیکه‌گاه‌های ساده تعیین گردید. تیر بتنی حاوی الیاف فولادی تحت خمش به تدریج دچار ترک خوردگی و تغییر شکل گردید. اما پیوستگی و مقاومت خود را حتی پس از تغییر شکل‌های زیاد حفظ کرد. این درحالیست که تیر بتنی فاقد الیاف با اندکی تغییر شکل به طور ناگهانی دو قطعه شد. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ اثر قطر و درصد حجمی الیاف بر طاق‌ت را نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که طاق‌ت با افزایش درصد حجمی و کاهش قطر الیاف افزایش دارد (مخصوصاً برای T_{100} و T_{150}). سری مخلوط‌های با قطر ۰/۷ میلی‌متر پایین‌ترین مقادیر را در طاق‌ت نشان دادند. مخلوط‌های با قطر ۰/۷ و ۰/۵ میلی‌متر در درصد حجمی

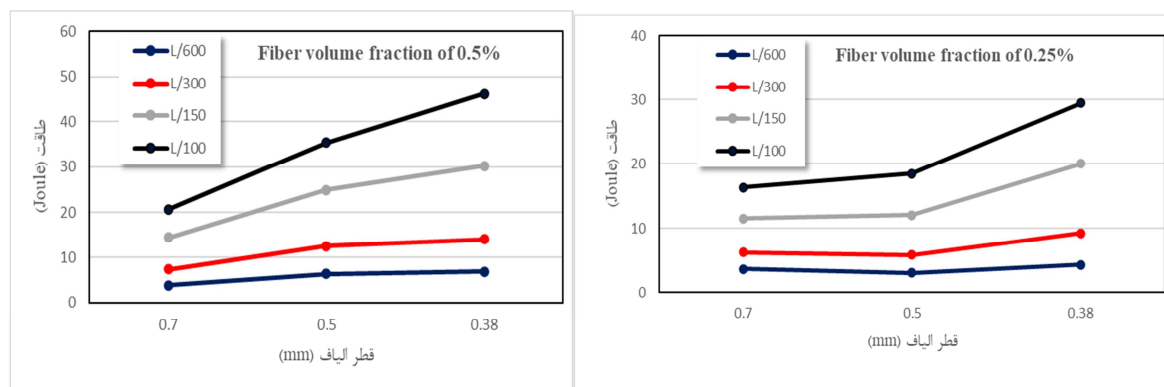
با توجه به نمودارها، با اضافه کردن الیاف فلزی قلابدار رفتار پس ترک خوردگی مخلوط‌ها تغییرات بسیار محسوسی داشته در حالیکه این اثر در رفتار پیش ترک خوردگی بسیار ناچیز است. به صورت کلی دو نوع منحنی نیرو- تغییر مکان در این پژوهش مشاهده شد: رفتار سخت‌شونده و رفتار نرم‌شونده. سه مخلوط از نه مخلوط رفتار سخت‌شونده نشان دادند (SF-D0.5- $V_{0.75}$ ، SF-D0.38- $V_{0.75}$ و SF-D0.38- $V_{0.75}$) در حالیکه باقی مخلوط‌ها رفتار نرم‌شونده نشان دادند. مخلوط حاوی ۰/۷۵ درصد الیاف با قطر ۰/۳۸ میلی‌متر بهترین رفتار را در ناحیه پس از ترک خوردگی نشان داده است. عملکرد مناسب پیوند بین الیاف فلزی و ماتریس بتن و همچنین مقدار الیاف می‌تواند دلیل بارپذیری با وجود ترک خوردگی باشد [۴۰]. همانطور که مشاهده می‌شود افزایش میزان الیاف و کاهش قطر منجر به بهبود رفتار در نمودار نیرو- تغییر مکان می‌گردد. وقتی قطر کاهش پیدا می‌کند، تعداد الیاف به شکل معناداری افزایش پیدا می‌کند و این منجر به پوشش دادن تعداد بیشتری ترک برای پل زدن بر روی آن‌ها می‌شود. استفاده از قطر کوچک‌تر و درصد بیشتر الیاف منجر به رفتاری غیر

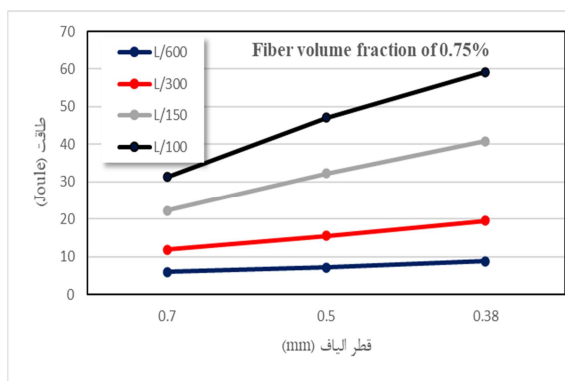
مخلوط‌های حاوی الیاف قطر ۰/۷ و ۰/۵ میلی‌متر میزان مهمی است چرا که در این نقطه روند رشدشان تغییر معنادار دارد. نتایج نشان می‌دهد که مخلوط SF-D0.38-V0.75 بیشترین میزان جذب انرژی را دارد. دلیل آن می‌تواند تعداد بیشتر الیاف و درگیری مکانیکی بیشتر بین بتن و قلاب‌های الیاف باشد [۲۲].

۰/۲۵ مقادیری نزدیک به هم دارند اما در ۰/۵ و ۰/۷۵ درصد مقادیرشان در طاقت تغییر فاحشی را نشان می‌دهد. سری مخلوط‌های حاوی الیاف قطر ۰/۵ میلی‌متر تا درصد ۰/۵ روند رشد بیشتری نسبت به مخلوط‌های حاوی الیاف قطر ۰/۷ میلی‌متر دارند. این روند در درصد ۰/۵ تغییر کرده و مخلوط‌های با قطر ۰/۷ میلی‌متر روند صعودی بیشتری دارند. درصد حجمی ۰/۵ برای



شکل ۱۰- اثر درصد حجمی و قطر الیاف بر طاقت (بر مبنای تغییر مکان خالص).





شکل ۱۱- طراقت اثر درصد حجمی و قطر الیاف بر طراقت (بر مبنای درصد حجمی الیاف)

۴- نتیجه گیری

۴- در مقدار ثابت الیاف، مخلوط‌های حاوی الیاف با

قطر بیشتر مقاومت فشاری بالاتری دارند. با توجه به بررسی نتایج مشخص است که درصد حجمی الیاف نسبت به قطر آن تعیین کنندگی بیشتری در تغییر مقاومت فشاری دارد.

۵- با استفاده از الیاف فلزی قلابدار با قطر ۰/۳۸ میلی‌متر و درصد ۰/۷۵، مقادیر مقاومت کششی دونیم شدگی و خمشی تا ۱۰۰ درصد افزایش داشته است.

۶- در این تحقیق بهترین مشخصات مکانیکی در بازه تایید شده ACI برای زمان وی بی توسط طرح مخلوط حاوی الیاف فلزی قلابدار با قطر ۰/۳۸ میلی‌متر و درصد ۰/۷۵ کسب شده است.

۷- محدود سازی انتشار ترک و پل زدن بر روی ترک توسط الیاف، دو دلیل اصلی بهبود مشخصات مکانیکی در این تحقیق هستند.

۸- برخی مخلوط‌ها در نمودار نیرو-تغییر مکان رفتار نرم شونده و برخی دیگر رفتار سخت شونده نشان دادند. طرح‌های حاوی قطر کوچکتر و درصد حجمی بیشتر رفتار سخت شونده از خود نشان دادند.

در این تحقیق به بررسی اثر درصد حجمی و قطر الیاف فلزی قلابدار بر زمان وی بی و خصوصیات مکانیکی بتن غلتکی روسازی پرداخته شده است. نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده عبارت است از:

۱- زمان وی بی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی دو نیم شدگی و مقاومت خمشی با افزایش درصد حجمی و کاهش قطر الیاف فلزی قلابدار، افزایش پیدا می‌کنند. علاوه بر این این دو فاکتور بر نمودار نیرو-تغییر مکان و در نتیجه طراقت تاثیر چشمگیری دارد.

۲- با بررسی نتایج بدست آمده در این تحقیق مشاهده می‌گردد که درصد حجمی الیاف نسبت به قطر الیاف، تعیین کنندگی بیشتری برای تاثیر بر مشخصات مکانیکی دارد.

۳- به نظر می‌رسد نقطه شروع اثر گذاری بر زمان وی بی، تشکیل شبکه‌ای از الیاف به وسیله حداقلی از تعداد الیاف فلزی قلابدار است. چرا که زمان وی بی طرح‌های حاوی ۰/۲۵ درصد الیاف با قطر ۰/۷ و ۰/۵ میلی‌متر و طرح حاوی ۰/۵ درصد الیاف با قطر ۰/۷ میلی‌متر نسبت به مخلوط کنترل تغییری نداشته است.

مراجع

[1] PCA, *Guide for Roller-Compacted Concrete Pavements*. 2010: Portland Cement Association.

- [2] Wang, C., et al., *Experimental investigations of dynamic compressive properties of roller compacted concrete (RCC)*. Construction and Building Materials, 2018. 168: p. 671-682.
- [3] Chhorn, C., S.J. Hong, and S.-W. Lee, *A study on performance of roller-compacted concrete for pavement*. Construction and Building Materials, 2017. 153: p. 535-543.
- [4] Ulrich, A., *First placing of roller compacted concrete (RCC) with high-power compaction screeds in the Federal Republic of Germany*. Construction and Building Materials, 1987. 1(3): p. 123-129.
- [5] ACI, *325.10R-95. Report on Roller-Compacted Concrete Pavements*. 1995, American Concrete Institute.
- [6] Hashemi, M., et al., *The effect of coarse to fine aggregate ratio on the fresh and hardened properties of roller-compacted concrete pavement*. Construction and Building Materials, 2018. 169: p. 553-566.
- [7] Rahmani, E., M.K. Sharbatdar, and M.H.A. Beygi, *A comprehensive investigation into the effect of water to cement ratios and cement contents on the physical and mechanical properties of Roller Compacted Concrete Pavement (RCCP)*. Construction and Building Materials, 2020. 253: p. 119177-119177.
- [8] Rahmani, E., M.K. Sharbatdar, and M.H.A. Beygi, *Influence of cement contents on the fracture parameters of Roller compacted concrete pavement (RCCP)*. Construction and Building Materials, 2021. 289: p. 123159-123159.
- [9] Vahedifard, F., M. Nili, and C.L. Meehan, *Assessing the effects of supplementary cementitious materials on the performance of low-cement roller compacted concrete pavement*. Construction and Building Materials, 2010. 24(12): p. 2528-2535.
- [10] Rao, S.K., P. Sravana, and T.C. Rao, *Abrasion resistance and mechanical properties of Roller Compacted Concrete with GGBS*. Construction and Building Materials, 2016. 114: p. 925-933.
- [11] Omran, A., et al., *Production of roller-compacted concrete using glass powder: Field study*. Construction and Building Materials, 2017. 133: p. 450-458.
- [12] LaHucik, J., et al., *Mechanical properties of roller-compacted concrete with macro-fibers*. Construction and Building Materials, 2017. 135: p. 440-446.
- [13] Roesler, J.R., V.G. Cervantes, and A.N. Amirkhanian, *Accelerated performance testing of concrete pavement with short slabs*. International Journal of Pavement Engineering, 2012. 13(6): p. 494-507.
- [14] Altoubat, S.A., et al., *Simplified method for concrete pavement design with discrete structural fibers*. Construction and Building Materials, 2008. 22(3): p. 384-393.
- [15] ASTM, *C 1116/C 1116M-10a (2015), Standard specification for fiber-reinforced concrete*. 2015: ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [16] Ashteyat, A.M., et al., *Mechanical and durability behaviour of roller-compacted concrete containing white cement by pass dust and polypropylene fibre*. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2019: p. 1-18.
- [17] Algin, Z. and S. Gerginci, *Freeze-thaw resistance and water permeability properties of roller compacted concrete produced with macro synthetic fibre*. Construction and Building Materials, 2020. 234: p. 117382-117382.
- [18] Madhkhani, M., R. Azizkhani, and M.E.T. Harchegani, *Effects of pozzolans together with steel and polypropylene fibers on mechanical properties of RCC pavements*. Construction and Building Materials, 2012. 26(1): p. 102-112.
- [19] Rooholamini, H., A. Hassani, and M.R.M. Aliha, *Fracture properties of hybrid fibre-reinforced roller-compacted concrete in mode I with consideration of possible kinked crack*. Construction and Building Materials, 2018. 187: p. 248-256.
- [20] Sukontasukkul, P., et al., *Case investigation on application of steel fibers in roller compacted concrete pavement in Thailand*. Case studies in construction materials, 2019. 11: p. e00271-e00271.
- [21] PCA, *Guide Specification for Construction of Roller-Compacted Concrete Pavements*. 2004: Portland Cement Association.
- [22] Li, B., et al., *Effects of fiber type, volume fraction and aspect ratio on the flexural and acoustic emission behaviors of steel fiber reinforced concrete*. Construction and Building Materials, 2018. 181: p. 474-486.
- [23] Cao, Y.Y.Y. and Q.L. Yu, *Effect of inclination angle on hooked end steel fiber pullout behavior in ultra-high performance concrete*. Composite Structures, 2018. 201(June): p. 151-160.
- [24] Tuyan, M. and H. Yazici, *Pull-out behavior of single steel fiber from SIFCON matrix*. Construction and Building Materials, 2012. 35: p. 571-577.
- [25] ASTM, *C 1170/C 1170M-08, Standard Test Method for Determining Consistency and Density of Roller-Compacted Concrete Using a Vibrating Table*. 2008: ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [26] ASTM, *C192 / C192M-16a Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*. 2016: ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [27] ASTM, *C 39/C 39M-05, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. 2005: ASTM International, West Conshohocken, PA.

- [28] ASTM, *C 496/C 496M-04, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. 2004: ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [29] ASTM, *C 1609/C 1609M-12, Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete*. 2012: ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [30] Rooholamini, H., A. Hassani, and M.R.M. Aliha, *Evaluating the effect of macro-synthetic fibre on the mechanical properties of roller-compacted concrete pavement using response surface methodology*. Construction and Building Materials, 2018. 159: p. 517-529.
- [31] Chhorn, C., et al., *Evaluation on compactibility and workability of roller-compacted concrete for pavement*. International Journal of Pavement Engineering, 2019. 20(8): p. 905-910.
- [32] Chhorn, C. and S.W. Lee, *Consistency control of roller-compacted concrete for pavement*. KSCE Journal of Civil Engineering, 2017. 21(5): p. 1757-1763.
- [33] Han, J., et al., *Effects of steel fiber length and coarse aggregate maximum size on mechanical properties of steel fiber reinforced concrete*. Construction and Building Materials, 2019. 209: p. 577-591.
- [34] Yazıcı, Ş., G. İnan, and V. Tabak, *Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC*. Construction and Building Materials, 2007. 21(6): p. 1250-1253.
- [35] Şahin, Y. and F. Köksal, *The influences of matrix and steel fibre tensile strengths on the fracture energy of high-strength concrete*. Construction and Building Materials, 2011. 25(4): p. 1801-1806.
- [36] Buratti, N., C. Mazzotti, and M. Savoia, *Post-cracking behaviour of steel and macro-synthetic fibre-reinforced concretes*. Construction and Building Materials, 2011. 25(5): p. 2713-2722.
- [37] Abbass, W., M.I. Khan, and S. Mourad, *Evaluation of mechanical properties of steel fiber reinforced concrete with different strengths of concrete*. Construction and Building Materials, 2018. 168: p. 556-569.
- [38] Afrouhsabet, V. and T. Ozbakkaloglu, *Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers*. Construction and Building Materials, 2015. 94: p. 73-82.
- [39] Hesami, S., S. Ahmadi, and M. Nematzadeh, *Effects of rice husk ash and fiber on mechanical properties of pervious concrete pavement*. Construction and Building Materials, 2014. 53: p. 680-691.
- [40] Wu, Z., et al., *Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete*. Construction and Building Materials, 2016. 103: p. 8-14.

