ارزیابی آزمایشگاهی تأثیرات چندجانبه‌ی الیاف بر خصوصیات مکانیکی و عملکردی روسازی‌های بتن غلتکی الیافی (FR-RCCP)

فرزام رحمتی[۱]، محمدکاظم شربتدار[۲]، جاوید خطیبی طالقانی[۳]، محمدحسین خزعلی[۴]

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران گرایش سازه از دانشگاه سمنان

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه سمنان

۳- نایب رئیس انجمن بتن ایران و عضو هیئت مدیره شرکت زرین کوه

۴- مدیر مرکز تحقیقات بتن شهید رجایی و رئیس هیئت مدیره شرکت دانش بنیان توسعه پایدار سلمان

Farzam.Rahmati@semnan.ac.ir

چکیده

بدلیل عملکرد ضعیف روسازی‌های آسفالتی در شرایط آب و هوایی مختلف، رویه‌های بتن غلتکی (RCCP) که دارای خصوصیات بارزی مانند دوام بیش‌تر و تطابق حداکثری با اصول توسعه‌ی پایدار هستند می توانند جایگزین شوند. در سال‌های اخیر با افزودن الیاف گوناگون شامل انواع فلزی، پلیمری و لاستیکی به مخلوط روسازی‌های بتنی تلاش‌هایی در جهت بهبود این مشخصات صورت پذیرفته است.

در این پژوهش به بررسی تأثیرات چندجانبه‌ی الیاف بر خواص مکانیکی و عملکردی روسازی‌های بتن غلتکی پرداخته و نتایج مطلوبی متناسب با اهداف تعیین شده حاصل گردید. به طور کلی نمونه‌هایی با نوع و درصدهای مختلف از الیاف ایرانی فلزی و پلیمری منتخب، ساخته شده و مورد آزمایش‌های متنوع مانند کارایی، زمان تراکم بتن غلتکی در حالت تازه، مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته، مقاومت خمشی، جذب انرژی(سختی)، مقاومت کششی برزیلی، مقاومت در برابر ضربه، مقاومت الکتریکی و مقاومت لغزندگی قرار گرفتند. نتایج به‌دست آمده در ابعاد آزمایشگاهی در مجموع بیان‌گر تأثیرات مثبت استفاده از الیاف در روسازی‌های بتن غلتکی بوده است. در مورد کارایی بتن غلتکی با افزودن انواع الیاف به طور عمومی با کاهش و افت عملکرد مواجه بودیم. برای مقاومت فشاری به جز نمونه‌های حاوی الیاف فلزی، تغییر و یا بهبود محسوسی در مورد سایر الیاف مشاهده نگردید. در بحث مقاومت‌های کششی و خمشی مطابق انتظار بهبودهای مناسبی در نمونه‌های حاوی انواع الیاف مورد استفاده به طور کلی و افزایش مقاومت‌های قابل تأمل در مورد برخی از نمونه‌ها را شاهد بودیم. همچنین در بررسی نتایج آزمایش‌های مقاومت در برابر ضربه و مقاومت لغزندگی بعضی نمونه‌ها با نوع و درصدهای متفاوت نتایج مطلوبی از خود نشان دادند. در مورد آزمایش مقاومت الکتریکی نیز به جز الیاف فلزی که موجب کاهش معنادار مقاومت الکتریکی در درصدهای مختلف استفاده از این الیاف گردید سایر انواع الیاف پلیمری اثر قابل ملاحظه‌ای از خود نشان ندادند. در نهایت نتایج نشان داد که الیاف کورتا اِمباس با مقادیر مصرف پیشنهادی بین ۲ تا ۲,۵ کیلوگرم در مترمکعب به عنوان الیاف با بهترین عملکرد در این پژوهش بود.

کلمات کلیدی: روسازی بتنی، بتن غلتکی، الیاف، RCCP، خواص مکانیکی و عملکردی

۱ـ مقدمه

عملکرد ضعیف روسازی‌های آسفالتی در شرایط آب و هوایی مختلف، فرسوده شدن سریع رویه، عدم دوام لازم و تغییر ویژگی‌های عملکردی در طول مدت بهره‌برداری و نیز غیر اقتصادی بودن این نوع روسازی در طول دوره‌ی بهره‌برداری نسبت به روسازی‌های بتنی و هم‌راستا نبودن با مبانی توسعه پایدار به سبب استفاده از چسباننده‌های پایه نفتی باعث شده است که مهندسان و دست‌اندرکاران این حوزه بیش از پیش در تلاش برای یافتن بهترین نوع از روسازی‌های بتنی برای استفاده در شرایط و کاربردهای گوناگون باشند. از دیگر سوی، دسترسی آسان‌تر به مصالح، سازگاری بیشتر با محیط زیست، عدم نیاز به فناوری‌های پیشرفته و همچنین تعمیر و نگهداری سهل‌تر روسازی‌های بتنی، موجب توجه ویژه به این نوع از روسازی‌ها گردیده است[۱]. همچنین با توجه به تجربیات سالیان اخیر در استفاده‌ی فراگیر از روسازی‌های بتنی در کشورهای صنعتی پیشرفته، می‌توان اظهار داشت که روسازی بتن غلتکی به طور عمومی مناسب‌ترین و مقرون به صرفه‌ترین روش در بین انواع روسازی‌های بتنی و مورد استقبال غالب مهندسان و دست‌اندرکاران این حوزه می‌باشد. پیرو این رویکرد لازم می‌نمود تا بحث استفاده از الیاف در روسازی‌های بتن غلتکی به عنوان اصلی‌ترین و شاید مناسب‌ترین روش مهندسی در بهبود ویژگی‌های مورد انتظار و به حداقل رساندن نقاط ضعف این سیستم مورد بررسی همه‌جانبه قرار گیرد. در سال‌های اخیر پژوهش‌هایی به صورت موضوعی در این زمینه انجام گرفته است که هیچکدام به صورت جامع و با دید همه‌جانبه به موضوع ورود نداشته و به ارزیابی چند نوع الیاف خاص و محدود بسنده شده است. در این پژوهش سعی گردید در حدود مقدورات به ارزیابی همه‌جانبه‌ی متداول‌ترین انواع الیاف سازه‌ای ماکرو و اثرات آن‌ها بر روی خصوصیات روسازی‌های بتن غلتکی شامل ویژگی‌های مهندسی و عملکردی با دید اجرایی پرداخته شود. پارامتر اساسی در انتخاب الیاف مورد استفاده در این تحقیق، رایج بودن آن‌ها در پروژه‌ها، آشنایی نسبی و ملموس بودن برای فعالان این حوزه و نیز تولید و عرضه‌ی صنعتی در داخل کشور بوده است.

۲ـ مطالعات آزمایشگاهی

۲ـ۱ـ مصالح مصرفی

سیمان مورد استفاده در این پژوهش، سیمان پرتلند تیپ II کارخانه سیمان دلیجان و عیار ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب بود. همچنین مصالح سنگی استفاده شده در این پژوهش به صورت ترکیب شن شکسته‌ی کوهی با مقاومت بالا و ماسه‌ی رودخانه‌ای با نسبت میزان پرکننده‌ی زیاد بود. شن مورد استفاده از مجموعه معادن شن و ماسه شرکت ماین در استان قم و ماسه نیز از شرکت شن و ماسه صنیع‌خانی در استان تهران تهیه شد. مراحل دانه‌بندی با استفاده از AASHTO T27 و ASTM C136 (دانه‌بندی با استفاده از الک) انجام شد که نتایج بدست آمده از آن در جداول ۱ و ۲ داده شده است. نمودارهای دانه‌بندی مربوطه در شکل ۱ آورده شده است[۵-۳] .

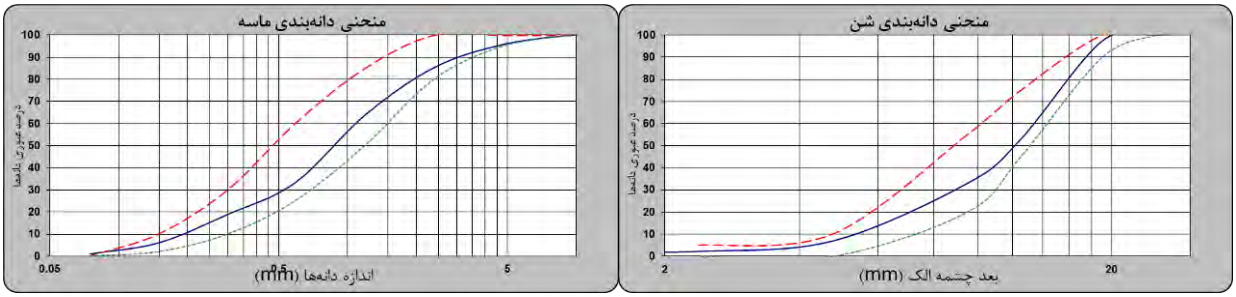
آبی که برای مخلوط بتن استفاده شده، آب شرب شهر تهران بود و کیفیت آب مصرفی مطابق با استاندارد AASHTO T26 آزمایش شد[۶]. میزان آب مصرفی در روسازی های بتن غلتکی معمولا بین ۹۰ تا ۱۲۰ کیلوگرم در هر متر مکعب می باشد. همچنین نسبت آب به سیمان بین ۰,۳ تا ۰,۴۵ می‌باشد که در این پژوهش میزان ۰,۳۵ به صورت ثابت برای کلیه‌ی نمونه‌ها در نظر گرفته شده است.

جدول۱ : جدول دانه‌بندی شن (درشت دانه)

سایز الک استاندارد (mm)	درشت‌دانه مانده روی الک (gr)	درصد مانده تجمعی	درصد عبوری تجمعی	مقدار مجاز آیین نامه
(1 in) 25	0	0	100	100
(3/4 in) 19	157.66	2.7	97.3	90-100
(1/2 in) 12.5	2576.36	47.1	52.9	45-75
(3/8 in) 9.5	1160.00	67.0	33.0	20-55
(# 4) 4.75	1514.80	93.1	6.9	0-10
(# 8) 2.36	275.20	97.8	2.2	0-5
زیر الکی	126.05	100	-	-

جدول ۲ : جدول دانه‌بندی ماسه (ریزدانه)

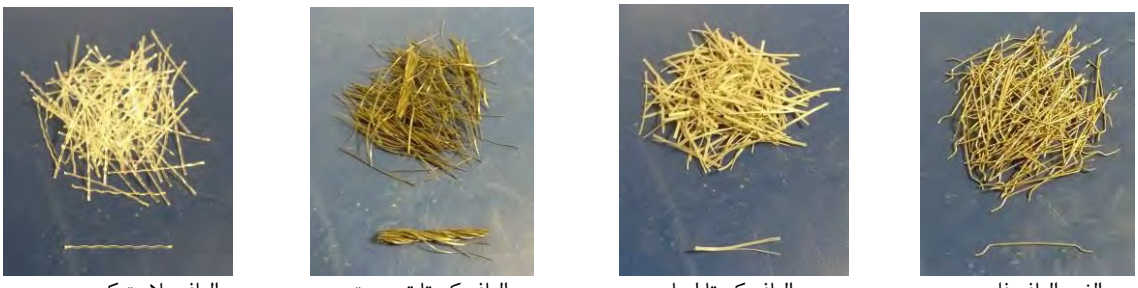
سایز الک استاندارد (mm)	درشت‌دانه مانده روی الک (gr)	درصد مانده تجمعی	درصد عبوری تجمعی	مقدار مجاز آیین نامه
(3/8 in) 9.5	0.0	0.0	100.0	100
(# 4) 4.75	63.5	4.2	95.8	95-100
(# 8) 2.36	157.2	14.7	85.3	80-100
(# 16) 1.18	321.2	36.1	63.9	50-85
(# 30) 0.6	457.9	66.7	33.3	25-60
(# 50) 0.3	214.1	80.9	19.1	10-30
(# 100) 0.15	192.7	93.8	6.2	2-10
(# 200) 0.075	76.0	98.8	1.2	0
زیر الکی	17.4	100	-	-



الف- دانه‌بندی شن ب-دانه‌بندی ماسه

شکل ۱ : منحنی دانه‌بندی شن و ماسه به همراه محدوده‌های استاندارد

ضمناً در این پژوهش از چهار نوع مختلف الیاف سازه‌ای به منظور ارزیابی اثرات مربوطه بهره گرفته شد. این الیاف شامل الیاف فولادی دو سر قلاب (Hooked End)، الیاف کورتا امباس، الیاف کورتا توییست، الیاف پلاستیکی سینوسی (دندانه‌دار) بودند و همگی دارای منبع تولید و عرضه‌ی داخلی در کشور می‌باشند که در شکل ۲ ارائه شده است.



الف- الیاف فلزی ب-الیاف کورتا امباس ج- الیاف کورتا توییست د- الیاف پلاستیکی سینوسی

شکل ۲ : الیاف های مصرفی در ازمایشات

۲ـ۲ـ نسبت‌های مخلوط و معرفی نمونه‌ها

در این پژوهش با عنایت به در نظر داشتن اهداف اجرایی، طرح مخلوط بتن غلتکی اولیه با توجه به سوابق موجود به دست آمد. در ادمه‌ی کار و با انجام آزمایش‌های مقدماتی و با اعمال تغییرات در سهم اجزای مخلوط بتن، یک طرح مخلوط ثابت جهت بررسی اثر الیاف مختلف حاصل شد. با توجه به نتایج به دست آمده در مرحله مقدماتی و با عنایت به توصیه‌ی استاندارد مبنی بر مناسب بودن زمان تست وی‌بی اصلاح شده با سربار ۲۲٫۷ کیلوگرم در بین محدوده‌ی ۳۰ تا ۴۰ ثانیه برای روسازی‌های بتن غلتکی، نسبت آب به سیمان ۰٫۳۵ برای نسبت مخلوط مرجع، نسبت‌های نهایی مخلوط مبنا به صورت جدول ۳ تعیین گردید.

جدول ۳ : طرح مخلوط نهایی مرجع (بتن غلتکی شاهد)

کد طرح مخلوط مرجع	سیمان kg/m³	سهم وزنی شن	سهم وزنی ماسه	نسبت آب به سیمان W / C	زمان Vebe اصلاح شده (sec)
RC	**350**	**0.35**	**0.65**	**0.35**	**30**

به منظور بررسی هرچه دقیق‌تر اثر الیاف بر رفتار و عملکرد بتن‌های غلتکی روسازی، نسبت‌های مخلوط بتن به صورت عمومی ثابت در نظر گرفته شده و تنها پارامتر متغیر در روند آزمایشات شامل نوع و درصد الیاف اضافه شده به مخلوط بوده است. درصدهای در نظر گرفته شده برای استفاده از الیاف با توجه به سوابق فنی و اجرایی موجود در حوزه بتن الیافی و مقادیر رایج در صنعت بوده است.

برای معرفی نمونه‌ها نیز با توجه به جدول ۴ کدگذاری نمونه‌ها به صورت عبارت عمومی RC X I، از سه بخش RC که ابتدای اصطلاح مخفف روسازی بتن غلتکی می‌باشد، X نماینده نوع الیاف مورد استفاده و I یک عدد دو رقمی که نمایانگر میزان استفاده از الیاف به کیلوگرم در متر مکعب بتن می‌باشد، تشکیل شده است. برای الیاف فولادی که اوزان مصرف بالاتری در بتن دارند (به طور کلی حدود ۱۰ برابر الیاف پلیمری)، عدد I مستقیماً وزن الیاف مورد استفاده در یک مترمکعب بتن را نشان می‌دهد. همچنین برای سایر الیاف که از نوع پلیمری هستند عدد I نمایانگر مضرب ۱۰ از میزان الیاف مورد استفاده به کیلوگرم در مترمکعب بتن می‌باشد. بنابراین به عنوان مثال کد RCE20 مخفف نسبت‌های مخلوط بتن غلتکی حاوی ۲ کیلوگرم الیاف کورتا امباس در یک متر مکعب بتن و RC نیز طرح شاهد می‌باشد.

جدول ۴ : مشخصات تفصیلی طرح‌های اختلاط و کدهای مربوطه

کد طرح مخلوط	سیمان kg/m³	سهم وزنی شن در کل سنگدانه	سهم وزنی ماسه در کل سنگدانه	نسبت آب به سیمان W / C	الیاف			
					نوع الیاف	نسبت اختلاط (درصد حجمی)	چگالی الیاف kg/m³	نسبت اختلاط kg/m³
RC	350	0.35	0.65	0.35	-	0.00	-	0.0
RCM10	350	0.35	0.65	0.35	فولادی	0.13	7500	10.0
RCM15	350	0.35	0.65	0.35	فولادی	0.20	7500	15.0
RCM20	350	0.35	0.65	0.35	فولادی	0.27	7500	20.0
RCM25	350	0.35	0.65	0.35	فولادی	0.33	7500	25.0
RCM30	350	0.35	0.65	0.35	فولادی	0.40	7500	30.0
RCE10	350	0.35	0.65	0.35	کورتا امباس	0.11	910	1.0
RCE15	350	0.35	0.65	0.35	کورتا امباس	0.16	910	1.5
RCE20	350	0.35	0.65	0.35	کورتا امباس	0.22	910	2.0
RCE25	350	0.35	0.65	0.35	کورتا امباس	0.27	910	2.5
RCT10	350	0.35	0.65	0.35	کورتا توییست	0.11	925	1.0
RCT15	350	0.35	0.65	0.35	کورتا توییست	0.16	925	1.5
RCT20	350	0.35	0.65	0.35	کورتا توییست	0.22	925	2.0
RCT25	350	0.35	0.65	0.35	کورتا توییست	0.27	925	2.5
RCP10	350	0.35	0.65	0.35	پلاستیکی	0.11	915	1.0
RCP15	350	0.35	0.65	0.35	پلاستیکی	0.16	915	1.5
RCP20	350	0.35	0.65	0.35	پلاستیکی	0.22	915	2.0
RCP25	350	0.35	0.65	0.35	پلاستیکی	0.27	915	2.5

۲ـ۳ـ آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه های بتن مورد نظر مطابق با طرح‌های اختلاط پیش‌بینی شده و بر اساس اطلاعات ارائه شده در بخش‌های پیشین، با استفاده از یک میکسر (Pan Type) با حجم کاری ۴۰ لیتر و هر نمونه در دو مرحله ساخته شد(حجم نهایی ۸۰ لیتر). روش قالب‌گیری نمونه‌های بتنی مطابق با دستورالعمل استاندارد ASTM C1435 به روش استفاده از چکش تراکم بوده است[۷]. عمل‌آوری نمونه‌های ساخته شده نیز در حوضچه‌ی حاوی آب شرب و با دمای کنترل شده در محدوده‌ی استاندارد به مدت ۲۸ روز انجام گرفت.

۲ـ۴ـ شیوه‌ی انجام آزمایشات

- **زمان تراکم به روش وی‌بی اصلاح شده**

در تمام طول اجرای آزمایشات به ازای هر ساخت و نمونه‌گیری بتن، تست وی‌بی اصلاح شده تحت سربار استاندارد ۲۲,۷ کیلوگرم (ASTM C1170) (شکل ۳) در کارگاه انجام گرفت[۸].

شکل ۳: دستگاه وی‌بی اصلاح شده و تشکیل رینگ کامل شیره‌ی بتن مطابق دستورالعمل اجرای آزمایش

- **مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته**

مقاومت فشاری به عنوان یکی از پارامترهای مهم برای ارزیابی کیفیت بتن تلقی می‌شود که در زمینه‌ی بهره‌برداری در روسازی راه خصوصاً وقتی از بتن غلتکی به عنوان سطح نهایی تردد استفاده می‌شود. مقدار مقاومت فشاری برای روسازی بتن غلتکی در راهسازی عمدتاً در محدوده‌ی ۲۸ تا ۴۱ مگاپاسکال قابل قبول است [۱۰-۹] . نمونه‌ها و دستگاه مورد استفاده برای این آزمایش مطابق با استاندارد ASTM C39 می‌باشد[۱۱]. همچنین در این پژوهش به منظور ارزیابی هرچه دقیق‌تر مشخصات مهندسی بتن غلتکی مسلح شده با الیاف، همزمان با اجرای تست مقاومت فشاری از کرنش‌سنج‌های دیجیتال جهت به دست آوردن مدول الاستیسیته بتن غلتکی الیافی بهره گرفته شد که با استفاده از دیتالاگر بطور همزمان نیرو و کرنش اندازه گیری شد و نمودار تنش ـ کرنش مربوطه ترسیم شد. تمامی آزمونه‌های ۱۰*۲۰ و ۱۵*۳۰ سانتی متری به منظور تست مقاومت فشاری مطابق استاندارد ASTM C617 و به بهترین شکل ممکن مطابق شکل ۴ کپینگ شده تا نتایج حاصل دارای کمترین انحراف و دقت بالا باشند[۱۲].

شکل ۴ : کپینگ نمونه‌های استوانه‌ای و نصب کرنش‌سنج‌های دیجیتال

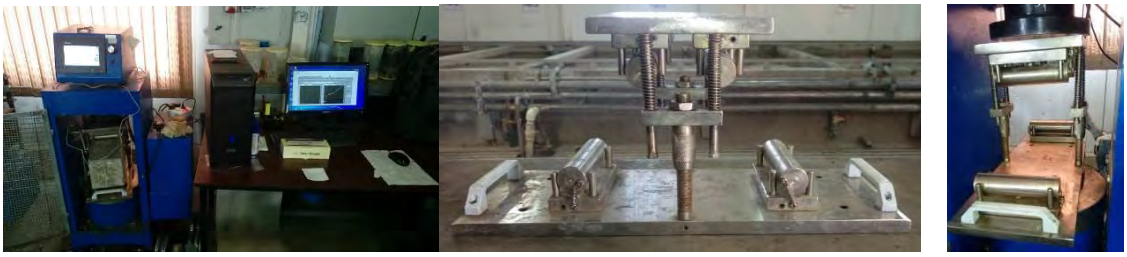
- **عملکرد خمشی**

مقاومت خمشی و مدول گسیختگی نه تنها یکی از شاخصه‌های مهم روسازی است، بلکه برای طراحی آن نیز یک معیار مهم تلقی می‌شود. به دلیل مشکل بریدن نمونه‌های تیری از مقطع واقعی روسازی و عدم وجود روش آزمایش استاندارد برای تیرهای ساخته شده در آزمایشگاه و صحرا، اطلاعات کمی در خصوص مقاومت خمشی وجود دارد,[۱۰,۱۳] . دستگاه مقاومت خمشی مورد استفاده مطابق شکل ۵ از نوع چهار نقطه‌ای بوده و آزمایش به منظور تعیین مدول گسیختگی بر اساس خمش خالص و میزان جذب انرژی بتن حاوی الیاف مطابق با دستورالعمل استاندارد ASTM C1609 انجام گرفته است[۱۴]. رابطه‌ای که مقاومت خمشی را بر اساس این سیستم بارگذاری محاسبه می‌کند، مطابق با دستورالعمل آزمایش ASTM C1609 به صورت ذیل است:

$$f_p = \frac{PL}{bd^2} \qquad (۱)$$

f_p : تنش ماکزیمم یا مدول گسیختگی (مگاپاسکال)
P : مجموع بار در نقطه‌ی پیک (قله) منحنی بار ـ خیز (نیوتن)
L : طول دهانه (میلیمتر)
b : عرض تیر (میلیمتر)
d : ارتفاع تیر (میلیمتر)

همچنین به منظور بدست آوردن مقدار سختی یا جذب انرژی (T^D_{150}) نمونه‌ی تیر بتنی نیاز به محاسبه‌ی سطح زیر نمودار بار ـ خیز (خمش خالص) از آغاز بارگذاری تا مقدار خیز حداکثر معادل $\frac{1}{150}$ طول تحت بارگذاری تیر (فاصله دو تکیه‌گاه که در این آزمایش برابر با ۴۵۰ میلی‌متر است) می‌باشد.



شکل ۵ : دستگاه تست مقاومت خمشی تیر منشوری (بارگذاری ۴ نقطه‌ای)

- **مقاومت کششی برزیلی**

یکی از مشخصه‌های مهم و می‌توان گفت بدیهی بتن، مقاومت بیشتر آن در برابر تنش فشاری نسبت به تنش‌های کششی است و از آنجا که در دال‌های روسازی تحت بار ترافیکی قسمت پایین دال تحت کشش است و این امر باعث شکست بتن می‌شود لذا تقویت بتن در برابر کشش می‌تواند شکست آن را در برابر بارهای این چنینی به تأخیر بیاندازد. برای حل این نقص استفاده از الیاف در بتن می‌تواند تا حدود زیادی مقدار مقاومت در برابر تنش کششی را افزایش دهد[۱۵،۱۸] . در این پژوهش با استفاده از الیاف ماکرو سازه‌ای سعی شد این پارامتر بهبود یابد. نمونه‌ها و دستگاه مورد استفاده برای این آزمایش مطابق با دستورالعمل استاندارد ASTM C496 می‌باشد[۱۹]. این آزمایش مطابق شکل ۶ نیز مانند تست مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های با هر دو سایز ۱۰*۲۰ و ۱۵*۳۰ سانتی متری به منظور مقایسه و بررسی تأثیر ابعاد آزمونه‌ی قالب‌گیری، انجام گردید.

$$T = 2P/\pi ld \qquad (۲)$$

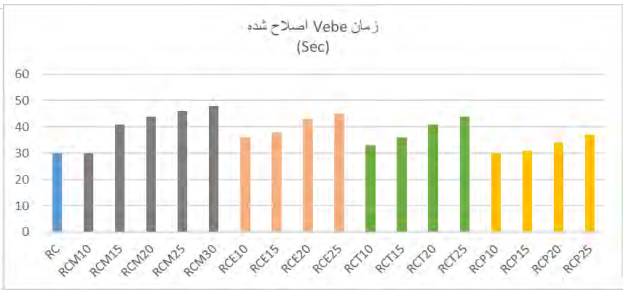
T : مقاومت کششی برزیلی (مگاپاسکال)
P : حداکثر بار تحمل شده (نیوتن N)
l : طول استوانه بر حسب میلیمتر
d : قطر استوانه بر حسب میلیمتر

شکل ۶ : دستگاه مقاومت کششی برزیلی و نحوه‌ی استقرار دستگاه و انجام آزمایش

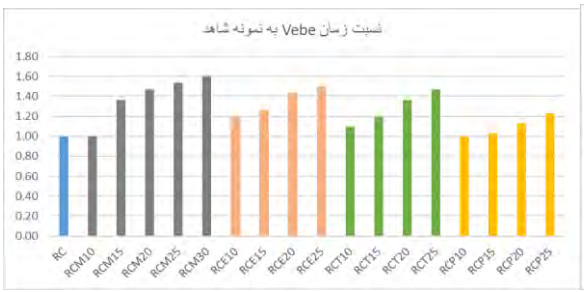
۳ـ گزارش و تحلیل نتایج آزمایشگاهی

۳ـ۱ـ کارایی بتن تازه (آزمایش وی‌بی اصلاح شده)

آزمایش زمان تراکم برای کلیه‌ی نسبت‌های مخلوط این پژوهش انجام گرفته و نتایج به دست آمده در روند ساخت طرح‌های اختلاط مطابق اشکال ۷ و ۸ می‌باشند. نتایج به‌دست آمده از این آزمون به صورت عمومی بیان‌گر این موضوع است که برای هر دو نوع کلی الیاف فلزی و غیر فلزی شاهد افزایش زمان و به تبع آن انرژی تراکم خواهیم بود. مقایسه‌ها حاکی از آن است که الیاف پلاستیکی سینوسی کمترین تأثیر را بر این پارامتر داشته و کارایی بتن غلتکی را کمتر کاهش می‌دهند.



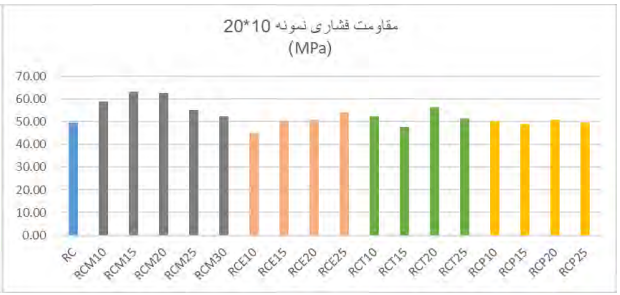
شکل ۷ : نمودار مقایسه زمان تراکم به روش وی‌بی اصلاح شده



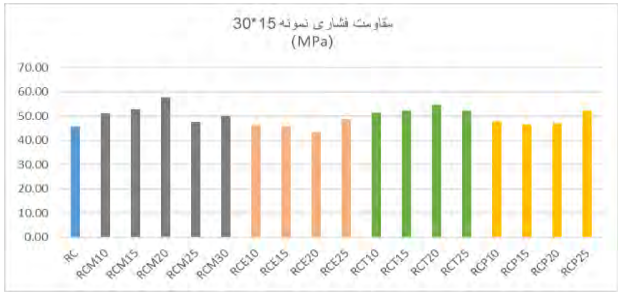
شکل ۸ : نمودار نسبت زمان تراکم به نمونه شاهد

۳ـ۲ـ مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته

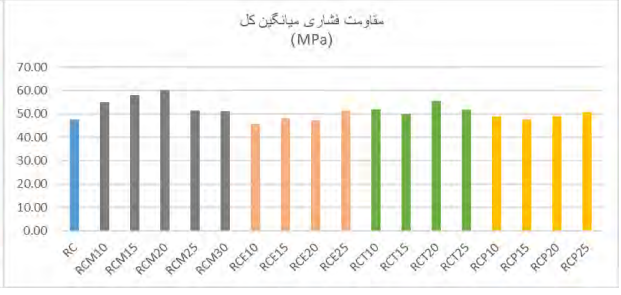
آزمایش مقاومت فشاری برای نمونه‌های با هر دو اندازه ۱۰*۲۰ و ۱۵*۳۰ سانتی متری انجام گردید که تست مدول الاستیسیته نیز با استفاده از کرنش سنج‌های دیجیتال همزمان با آزمایش فشاری نمونه‌های ۱۵*۳۰ صورت پذیرفت. نتایج حاصل مطابق اشکال ۷ تا ۱۲می‌باشند. در مورد آزمایش مقاومت فشاری همان‌طور که بر اساس تجارب موجود گذشته انتظار می‌رفت، به طور عمومی تأثیر چشم‌گیری با افزودن الیاف پلیمری به بتن حاصل نگردید. تنها در مورد الیاف فلزی در بیشترین میزان اثرگذاری، افزایش ۲۷ درصدی مقاومت فشاری در نمونه‌های حاوی ۲۰ کیلوگرم الیاف فلزی نسبت به نمونه شاهد مشاهده شد.



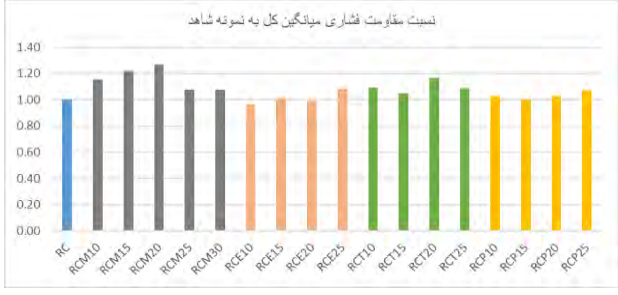
شکل۹: نمودار مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه ۱۰*۲۰



شکل۱۰ : نمودار مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه ۱۵*۳۰



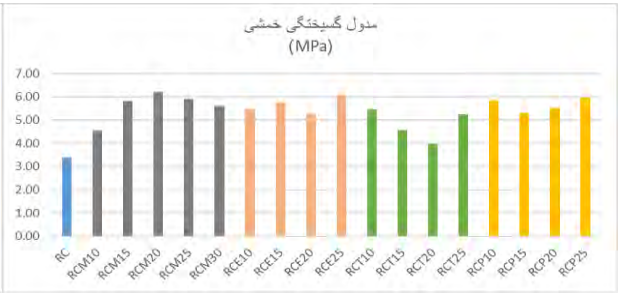
شکل۱۱ : نمودار مقایسه مقاومت فشاری میانگین



شکل ۱۲ : نمودار مقایسه نسبت مقاومت فشاری میانگین کل به نمونه شاهد

۳ـ۳ـ عملکرد خمشی

آزمایش مقاومت خمشی برای نمونه‌های تیر منشوری با ابعاد ۱۵*۱۵*۶۰ سانتی متری مطابق دستورالعمل ذکر شده در بخش قبل انجام گردید که نتایج حاصل مطابق اشکال ۱۳ و ۱۴ ارائه می‌گردد. در نتایج به‌دست آمده از آزمایش مقاومت خمشی یا مدول گسیختگی خمشی مطابق با پیش‌بینی‌ها و انتظارات قبلی، افزایش قابل ملاحظه‌ی مقاومت به واسطه‌ی استفاده از الیاف به طور کلی مشاهده شد بطوریکه نمونه‌ی حاوی ۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب الیاف فلزی با ۸۳ درصد و نمونه‌ی حاوی ۲,۵ کیلوگرم الیاف کورتا امباس با ۸۰ درصد افزایش در مقاومت خمشی بیشترین تأثیرات مثبت را بر این پارامتر از خود نشان داده‌اند.



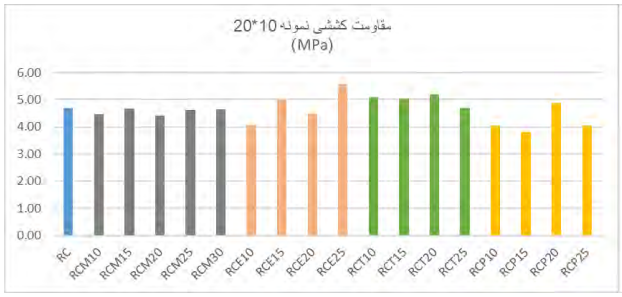
شکل۱۳ : نمودار مقایسه‌ای آزمایش مقاومت خمشی (مدول گسیختگی)

شکل۱۴ : نمودار مقایسه‌ای نسبت مدول گسیختگی خمشی به نمونه شاهد

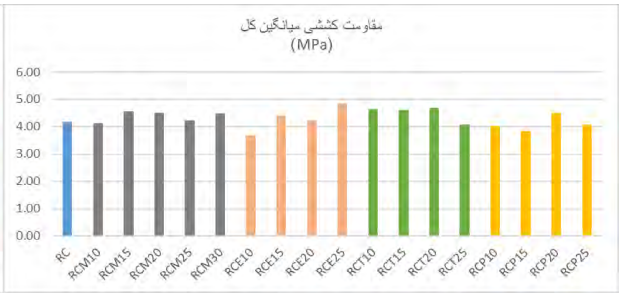
۳ـ۴ـ مقاومت کششی برزیلی

آزمایش مقاومت کششی به روش برزیلی نیز برای نمونه‌های با هر دو اندازه ۱۰*۲۰ و ۱۵*۳۰ سانتی متری انجام گردید که نتایج حاصل نتایج حاصل مطابق اشکال ۱۵ تا ۱۸ ارائه می‌گردد. مطابق نتایج مقایسه شده در اشکال مربوطه و در تحلیل نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (برزیلی) برخلاف پیش‌بینی‌ها و انتظارات، در میانگین نتایج ، اثرات چشم‌گیری با استفاده از الیاف فلزی و پلیمری در نمونه‌ها مشاهده نشد به طوری که الیاف فلزی در حالت میانگین کل، ۵ درصد و الیاف پلیمری تنها ۳ درصد موجب افزایش مقاومت کششی شد. اما در مقادیر مصرف خاصی مانند الیاف فلزی با دوز مصرف ۲۰ کیلوگرم در مترمکعب و الیاف کورتا اِمباس با دوز مصرف ۲,۵ کیلوگرم در مترمکعب به ترتیب افزایش ۲۵ و ۱۹ درصدی مقاومت کششی دیده شد.

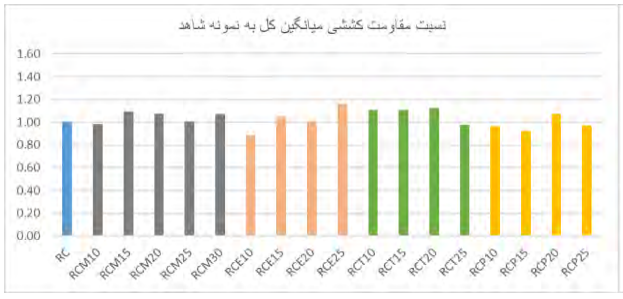
شکل۱۵ : نمودار مقایسه مقاومت کششی نمونه‌های ۱۵*۳۰



شکل۱۶: نمودار مقایسه مقاومت کششی نمونه‌های ۱۰*۲۰



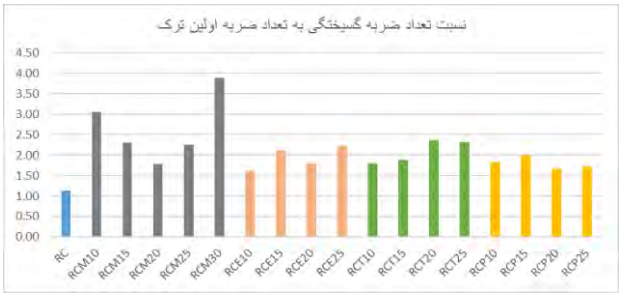
شکل۱۷ : نمودار مقایسه مقاومت کششی میانگین کل



شکل ۱۸ : نمودار مقایسه نسبت مقاومت کششی میانگین کل به نمونه شاهد

۳ـ۵ـ مقاومت در برابر ضربه

در روند این آزمایش با توجه به این موضوع که آزمونه‌های مورد نیاز از برش استوانه‌های بتنی ۱۵*۳۰ سانتی متری به قطعات با ارتفاع ۶۳,۵ میلی‌متر تهیه می‌گردد و تراکم استوانه‌ها نیز در سه لایه انجام می‌شود، تمامی آزمونه‌ها با توجه به محل برش از استوانه‌ی اولیه (از پایین به سمت بالا معادل تراکم زیاد، متوسط و کم) شماره‌گذاری گردید تا بتوان در تحلیل‌ها به طور دقیق‌تری اظهار نظر انجام داد. نتایج این آزمایشات بصورت تعداد ضربات برای ایجاد اولین ترک و تعداد ضربات برای شکست نهایی هر نمونه بدست می آید. نمونه‌ی بتنی حاوی ۲ کیلوگرم بر مترمکعب الیاف کورتا امباس و نمونه‌ی حاوی ۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب الیاف فلزی به ترتیب با بهبود چشم‌گیر ۲۹۰ و ۲۷۰ درصدی بیشترین تأثیر مثبت را بر روی مقاومت در برابر ضربه‌ی بتن غلتکی از خود نشان دادند. همچنین تحلیل نتایج مقایسه‌ی ارائه شده در شکل ۱۹ به وضوح نمایان‌گر این موضوع است که نمونه‌ی بتن غلتکی حاوی ۳۰ کیلوگرم الیاف فلزی بهترین عملکرد را از نظر تحمل ضربات بیشتر پس از وقوع اولین ترک تا زمان گسیختگی کامل تا حدود ۴ برابر را داراست در حالی که سایر الیاف پلیمری در این مورد تقریباً عملکرد یکسانی از خود نشان داده‌اند. این موضوع از منظر مباحث سازه‌ای دارای اهمیت و جایگاه ویژه‌ای می‌باشد.



شکل۱۹: نمودار مقایسه نسبت مقاومت ضربه گسیختگی به اولین ترک

۴ـ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

- الیاف فلزی در مقادیری که از یک حداقل بالاتر باشند اثرات مثبت مناسبی بر روی مقاومت فشاری خواهند داشت و نمونه حاوی ۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب الیاف فلزی تا ۲۷ درصد مقاومت فشاری را بهبود بخشید.
- نمونه‌ی دارای الیاف فلزی به میزان ۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب تا ۸۳ درصد و نمونه‌ی دیگری حاوی ۲,۵ کیلوگرم الیاف کورتا امباس تا ۸۰ درصد، مقاومت و عملکرد خمشی را بهبود بخشیدند.
- نمونه حاوی الیاف فلزی با دوز ۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب و نمونه‌ی حاوی الیاف کورتا امباس با دوز ۲,۵ کیلوگرم بر مترمکعب به ترتیب افزایش ۲۵ و ۱۹ درصدی افزایش در مقاومت کششی بتن غلتکی حاوی الیاف داشتند.
- در این تحقیق به طور میانگین الیاف فلزی و کورتا امباس توانستند در مقادیر مصرف به ترتیب ۲۵ و ۲۰ کیلوگرم در مترمکعب بهبودهای چشم‌گیر ۲۷۰ و ۲۹۰ درصدی در افزایش مقاومت در برابر ضربه را به ثبت برسانند.
- در نهایت با توجه به جمع‌بندی صورت پذیرفته از نتایج، شامل تست‌های مکانیکی و عملکردی نتیجه گرفت که **الیاف کورتا اِمباس** با مقادیر مصرف پیشنهادی ۲ تا ۲,۵ کیلوگرم بر مترمکعب بهترین و بیشترین تأثیرات مثبت را بر روی بهبود عملکرد بتن غلتکی مورد بررسی در این پژوهش از خود نشان داد.

۵ـ قدردانی

در پایان از کلیه‌ی عزیزانی که در پیشرفت امور این پژوهش یاری‌رسان بوده‌اند، به ویژه همکاران و مسئولان مجموعه‌ی مرکز تحقیقات بتن شهید رجایی و کارشناسان آزمایشگاه بتن دانشگاه سمنان که در اجرای هرچه مطلوب‌تر آزمایشات این تحقیق اثر بخش بوده‌اند، تقدیر و تشکر فراوان به عمل می‌آید.

۶ـ مراجع

[1] S. Mindess, J. F. Young, and D. Darwin, *Concrete*. Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ, 1981.
[2] *ACI 309.1R-08: Report on Behavior of Fresh Concrete During Vibration*, vol. 22. ACI Committee 309, 2008, p.22.
[3] *ASTM C702 / C702M-18, Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
[4] *AASHTO T 27, Standard Method of Test for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2014.
[5] *ASTM C136 / C136M-14, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
[6] *AASHTO T 26, Standard Method of Test for Quality of Water to Be Used in Concrete | AASHTO Store*. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008.
[7] *ASTM C1435 / C1435M-14, Standard Practice for Molding Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
[8] *ASTM C1170 / C1170M-14: Standard test method for determining consistency and density of roller-compacted concrete using a vibrating table*. ASTM International West Conshohocken, PA, 2014.
[۹] سازمان برنامه و بودجه کشور, ضابطه شماره ۷۳۱ : دستورالعمل طراحی، اجرا و نگه‌داری روسازی بتنی راه‌ها. ایران, ۱۳۹۶.
[10] D. Harrington, F. Abdo, W. Adaska, C. V Hazaree, H. Ceylan, and F. Bektas, "Guide for roller-compacted concrete pavements," *Inst. Transp. Iowa state univerisity*, no. August, p. 104, 2010.
[11] *ASTM C39 / C39M-18, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
[12] *ASTM C617 / C617M-15, Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
[۱۳] معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور, نشریه شماره ۳۵۴ : راهنمای طراحی و اجرای بتن غلتکی در روسازی راه‌های کشور. ایران, ۱۳۸۸.
[14] *ASTM C1609 / C1609M-12, Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
[15] S. P. Shah *et al.*, "Measurement of properties of fiber reinforced concrete," *ACI Mater. J.*, vol. 85, no. 6, pp. 583–593, 1988.
[16] J. LaHucik, S. Dahal, J. Roesler, and A. N. Amirkhanian, "Mechanical properties of roller-compacted concrete with macro-fibers," *Constr. Build. Mater.*, vol. 135, pp. 440–446, 2017.
[17] *ACI 544.2R: Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete*. American Concrete Institute, ACI Committee 544, 1999.
[18] M. KAGAYA, T. SUZUKI, S. KOKUBUN, and H. TOKUDA, "A STUDY ON MIX PROPORTIONS AND PROPERTIES OF STEEL FIBER REINFORCED ROLLER-COMPACTED CONCRETE FOR PAVEMENTS," *JSCE (Japan Society of Civil Engineers)*, vol. 50, no. 669, Translation from Proceedings of JSCE, Akita-Japan, Feb-2001.
[19] *ASTM C496 / C496M-17, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
[20] ASTM 303, *ASTM E303-93(2018), Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester*, vol. 93, no. Reapproved. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, pp. 1–5.
[21] *AASHTO-T-358-15: Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2015.
[22] شرکت دانش بنیان توسعه پایدار سلمان, "اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بتن," 2018 . [Online]. Available: https://salmanco.com/دستگاه-تعیین-مقاومت-الکتریکی-بتن./