

ارزیابی رفتار مقاومتی روسازی های بتنی خود متراکم تحت تاثیر مصرف ماده ی حباب ساز و الیاف میکرو پلی پروپیلن در مقادیر مصرف مختلف

پویا مهدیقلی^{۱*}، آرمین سیاه منصور^۲

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران-راه و ترابری، دانشکده مهندس عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران-شمال، تهران، ایران،

p_mehdigholi@yahoo.com

2- کارشناس، مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، armin.sm1998@gmail.com

چکیده

تحقیق حاضر به بررسی رفتار مقاومتی روسازی های بتنی خود متراکم حاوی پودر خاک سنگ تحت تاثیر ترکیب مصرف ماده ی حباب ساز و الیاف میکرو پلی پروپیلن در مقادیر مصرف مختلف پرداخت. پس از تعیین نسبت های اختلاط بتن خود متراکم مورد استفاده در روسازی بتنی و ارزیابی خصوصیات بتن تازه مطابق با ضوابط، الیاف میکرو پلی پروپیلن در دو مقدار مصرف 0.6 و 0.9 کیلوگرم بر متر مکعب و ماده ی حباب ساز در دو مقدار مصرف 0.025 و 0.50 کیلوگرم بر متر مکعب استفاده گردید. خصوصیات مقاومتی روسازی بتنی خود متراکم شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی دو نیم شدن و مقاومت خمشی به ترتیب مطابق با استاندارد های ASTM C39، ASTM C496 و ASTM C78 ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که ماده ی حباب ساز و الیاف میکرو پلی پروپیلن تاثیر چشمگیری در تغییر رفتار مقاومتی روسازی بتنی خود متراکم دارد. افزودن ماده ی حباب ساز و الیاف، مقاومت فشاری روسازی تا میزان 25 درصد کاهش یافت. اثر ماده ی حباب ساز بیشتر از اثر الیاف در کاهش مقاومت فشاری روسازی بود. با افزودن الیاف میکرو پلی پروپیلن در روسازی بتنی حاوی ماده ی حباب ساز به میزان کمتر از 0.025 کیلوگرم بر متر مکعب، مقاومت کششی و خمشی روسازی به ترتیب تا میزان 18 و 16 درصد افزایش یافت. اما پس از افزودن ماده ی حباب ساز به میزان بیشتر از 0.050 کیلوگرم بر متر مکعب، مقاومت کششی و خمشی روسازی به ترتیب تا میزان 10 و 2 درصد کاهش یافت. مشاهده شد که ماده ی حباب ساز تاثیر منفی بیشتری در کاهش مقاومت کششی نسبت به مقاومت خمشی آن دارد.

واژه های کلیدی: روسازی بتنی خود متراکم، خصوصیات مقاومتی، ماده ی حباب ساز، الیاف میکرو پلی پروپیلن، میزان مصرف مختلف.

1- مقدمه

استفاده از مخلوط های بتن خود متراکم به منظور ساخت روسازی های بتنی، موضوعی است که در چندین سال اخیر، مورد بحث و تحلیل محققان و مجریان صنعت روسازی جهان قرار گرفته است [1-3]. مخلوط های بتن خود متراکم با توجه به خصوصیات بتن تازه ی خود، می تواند در داخل قالب قطعه ی بتنی حرکت کرده و در بین عناصر مسلح کننده بدون نیاز به عملیات تراکم، قرار گیرد [4-8]. در مورد استفاده از مخلوط های بتن خود متراکم جهت ساخت روسازی های بتنی، می توان مزایای مختلفی را مشاهده نمود. در صورت استفاده از این مخلوط های بتنی در ساخت روسازی بتنی، نیازی به استفاده از ماشین آلات مخصوص احداث روسازی (فینیشر) نبوده که این امر منجر به کاهش هزینه های مرتبط با استفاده از این دستگاه می باشد. از طرفی، استفاده از مخلوط های بتنی خود متراکم در روسازی های بتنی درزدار و پیوسته ی مسلح، عدم نیاز به عملیات تراکم را به دنبال دارد. در نتیجه هزینه و زمان اجرای روسازی کاهش می یابد. حتی در صورت استفاده از این

مخلوط ها در روسازی های بتنی درزدار غیر مسلح، الزام به استفاده از عملیات تراکم در محل میلگرد های انتقال بار (داول) و میلگرد های دوخت (تای) حذف شده و همچنین کیفیت اجرای روسازی با این مخلوط ها افزایش می یابد. از این جهت استفاده از مخلوط های بتنی خود متراکم جهت ساخت روسازی های بتنی مورد توجه قرار گرفته است.

خصوصیات مقاومتی مخلوط های بتنی مورد استفاده در روسازی بتنی، نقش مهمی در طراحی، دوام و عملکرد این روسازی ها بازی می کند. مقاومت فشاری مخلوط های بتنی، علاوه بر آن که بر دیگر رفتار مقاومتی مخلوط های بتنی تاثیر گذار بوده، یکی از الزامات تعیین کننده در تعیین نسبت های اختلاط بتن روسازی بتنی است [9-11]. مشخصه ی مقاومت کششی مخلوط بتنی مورد استفاده در روسازی بتنی از آن جهت حائز اهمیت بوده که در صورت عدم استفاده از میلگرد ها مسلح کننده در روسازی بتنی (مانند روسازی های بتنی درزدار ساده)، عامل مقاوم در برابر تنش های کششی به وجود آمده در روسازی بتنی، مقاومت کششی بتن سخت شده است. در بین مشخصات مقاومتی مخلوط های بتنی، مشخصه ی مقاومت خمشی (مدول گسیختگی) بتن، یکی از متغیر های مهم در طراحی ضخامت روسازی بوده، به طوری که این عامل به صورت مستقیم بر حداقل ضخامت مورد نیاز دال بتنی تاثیر می گذارد [12,13]. از این جهت، بررسی رفتار مقاومتی مخلوط های بتنی مورد استفاده در روسازی بتنی اهمیت پیدا می کند. این موضوع در مورد مخلوط های بتنی خود متراکم مورد استفاده در روسازی بتنی نیز دارای اهمیت بالایی می باشد.

استفاده از مواد نوین در روسازی های بتنی به منظور بهبود عملکرد و دوام روسازی های بتنی و یا کنترل و کاهش خرابی های مختلف به وجود آمده در روسازی های بتنی همواره مورد توجه محققان و متخصصان صنعت راهسازی بوده است. یکی از این مواد، ماده ی افزودنی حباب ساز است. مواد افزودنی حباب ساز به منظور ایجاد هوای عمدی در مخلوط های بتنی با هدف کنترل و کاهش خرابی های به وجود آمده در بتن ناشی از سیکل های ذوب و یخبندان مورد استفاده قرار می گیرد [14-18]. تکنیک حباب سازی در مخلوط های بتنی یکی از روش های موثر در افزایش دوام سازه های بتنی در برابر سیکل های ذوب و یخبندان بوده که می تواند تاثیر زیادی در کاهش خرابی های به وجود آمده ناشی از این سیکل ها داشته باشد [19-22]. با توجه به این موضوع که روسازی های بتنی اغلب در محل هایی مورد استفاده قرار می گیرند که سیکل های متعدد ذوب و یخ را تجربه می کنند، از این جهت افزایش دوام مخلوط های بتنی مورد استفاده در این روسازی ها در برابر این سیکل ها، بر دوام، عملکرد و سطح خدمت دهی جاده نقش مهمی بازی می کند. مواد افزودنی حباب ساز با ایجاد حباب های میکرو در مخلوط بتنی، دوام سازه ی بتنی در برابر سیکل های ذوب و یخبندان را بهبود می دهد. بنابراین، استفاده از این مواد و به کارگیری تکنیک حباب سازی در روسازی های بتنی اهمیت پیدا می کند. یکی دیگر از مواد نوین مورد استفاده در بتن که مورد توجه زیادی قرار گرفته، الیاف های مختلف است [23-28]. الیاف در مخلوط های بتنی باعث افزایش مقاومت کششی، مقاومت در برابر ضربه و بهبود جذب انرژی در برابر تنش های وارده می گردد. همچنین، پس از ترک خوردگی، الیاف با انجام عمل پل زدن، از گسترش ترک خوردگی در سازه ی بتنی جلوگیری کرده و مقاومت پس از ترک خوردگی آن را افزایش

می دهد [29-33]. الیاف مورد استفاده در مخلوط های بتنی به طور کلی به سه دسته شامل الیاف فلزی، الیاف طبیعی و الیاف مصنوعی تقسیم بندی می شود. الیاف فلزی، با وجود عملکرد مناسب در مخلوط های بتنی، همیشه با خطر خوردگی همراه بوده، همچنین با توجه به مقدار مصرف بالای این الیاف به منظور دستیابی به خصوصیات مورد نظر، از نظر اقتصادی نیز به صرفه نمی باشد. استفاده از الیاف طبیعی همواره با مشکلات مرتبط با دوام بتن همراه است. الیاف های مصنوعی، از جمله الیاف هایی است که از نظر خصوصیات مقاومتی و دوامی مناسب بوده و همچنین با توجه به مقدار مصرف پایین آن در بتن، از نظر اقتصادی مناسب است. در بین الیاف های مصنوعی مختلف، الیاف های مصنوعی بر پایه ی پلی پروپیلن، الیاف های مقاوم، با دوام و با عملکرد بالا محسوب شده، که این موضوع باعث شده تا توجه بسیاری را به خود اختصاص دهد [34].

بررسی رفتار مقاومتی مخلوط های بتنی خود متراکم مورد استفاده در روسازی های بتنی و ارزیابی تاثیر افزودن مواد نوین بر تغییر رفتار این خصوصیات، مورد توجه برخی از محققان بوده است. زیاری و همکاران ایده ی استفاده از مخلوط های بتنی

خود متراکم در ساخت روسازی های بتنی پروازی را مطرح کرده و به بررسی خصوصیات مقاومتی و دوامی این مخلوط ها پرداختند [35]. در این تحقیق، از مواد افزودنی مختلف شامل متاکائولین، دوده ی سیلیسی، خاکستر بادی، سرباره فولاد و ماده ی افزودنی حباب ساز در ساخت مخلوط های بتنی خود متراکم روسازی بتنی فرودگاهی، استفاده گردید. نتایج به دست آمده، حاکی از آن بود که افزودن ماده ی متاکائولین باعث بهبود چشمگیر خصوصیات مقاومتی و دوامی روسازی های بتنی خود متراکم فرودگاهی می گردد. همچنین عنوان شد که افزودن ماده ی حباب ساز، باعث افزایش خصوصیات دوامی مخلوط های بتنی خود متراکم شده، اما افزودن این مواد منجر به کاهش مشخصه های مقاومتی روسازی بتنی فرودگاهی می گردد [36]. این موضوع نشان دهنده ی آن است که افزودن ماده ی حباب ساز علاوه بر تاثیر مثبت بر رفتار دوامی روسازی بتنی خود متراکم، باعث تغییر رفتار مقاومتی آن نیز می گردد. بوساری و همکاران در تحقیق خود عنوان کردند که تاثیر استفاده از سیمان های مختلف بر خصوصیات مقاومتی مخلوط های بتنی خود متراکم مورد استفاده در روسازی چشمگیر است [37]. آیوبامی و همکاران نیز به نتیجه ی مشابهی دست یافتند [38].

بررسی پیشینه ی تحقیق نشان داد که استفاده از مخلوط های بتنی خود متراکم در روسازی بتنی، با مزایای زیادی از جمله بهبود در عملکرد، دوام و کاهش هزینه و زمان اجرا به همراه است. دیده شد که خصوصیات مقاومتی مخلوط های بتنی نقش مهمی در طراحی و دوام روسازی های بتنی بازی کرده، از این جهت بررسی تغییر رفتار این خصوصیات در مخلوط های بتنی از اهمیت بالایی برخوردار است. با وجود انجام برخی از تحقیقات انجام شده در زمینه ی استفاده از مواد نوین در روسازی های بتنی خود متراکم، تحقیق کمتری به بررسی اثر ترکیبی ماده ی حباب ساز و الیاف میکرو پلی پروپیلن در مقادیر مصرف مختلف، بر تغییر رفتار مقاومتی روسازی های بتنی خود متراکم پرداخته است. بررسی این موضوع از چند جهت اهمیت پیدا می کند. در ابتدا، بررسی تغییر رفتار مقاومتی مخلوط های بتنی خود متراکم مورد استفاده در روسازی بتنی، به منظور استفاده ی این روسازی ها در مقیاس واقعی اهمیت دارد. استفاده از ماده ی حباب ساز در روسازی بتنی به منظور افزایش دوام در برابر سیکل های ذوب و یخبندان اهمیت دارد. از طرفی، افزودن الیاف به مخلوط های بتنی مورد استفاده در روسازی های بتنی میتواند باعث بهبود عملکرد روسازی های بتنی گردد. از این جهت، بررسی مجموع این موارد در کنار یکدیگر، می تواند نگاه مناسب تری و دقیق تری به منظور استفاده از هر یک از این مواد در روسازی های بتنی ارائه کند. از این جهت، تحقیق حاضر به ارزیابی این موارد می پردازد.

2- مصالح و روش های آزمایشگاهی

مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق، مصالح آهکی با حداکثر اندازه ی 19 میلیمتر و پودر خاک سنگ استفاده شد. مصالح سنگی در سه گروه دانه بندی شامل مصالح سنگی ریزدانه با اندازه ی 5-0 میلیمتر، مصالح سنگی درشت دانه با اندازه ی 12-5 میلیمتر و با اندازه ی 19-12 میلیمتر استفاده گردید. جذب آب، مدول نرمی و چگالی نسبی مصالح سنگی ریزدانه به ترتیب به میزان 1.08 درصد، 3.46 و 2.63 بود. مصالح سنگی درشت دانه 12-5 میلیمتر دارای جذب آب و چگالی نسبی به ترتیب به میزان 0.70 درصد و 2.63 و مصالح سنگی درشت دانه 19-12 میلیمتر دارای جذب آب و چگالی نسبی به ترتیب به میزان 0.51 درصد و 2.62 بود. پودر خاک سنگ مورد استفاده در این تحقیق در ابعاد 0.6-0 میلیمتر مورد استفاده قرار گرفت.

سیمان مورد استفاده در این تحقیق سیمان پرتلند تیپ 1-425 کارخانه سیمان شرق مشهد با وزن مخصوص 3150 کیلوگرم بر متر مکعب بود. نتایج آنالیز شیمیایی سیمان مورد استفاده، ارائه شده توسط آزمایشگاه کنترل و کیفیت کارخانه تولید کننده در جدول 1 آورده شده است.

جدول 1: مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ دو مورد استفاده در این تحقیق

K ₂ O	Na ₂ O	IR	SO ₃	L.O.I	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	مشخصه ی شیمیایی
0.45	0.50	0.3	2.0	1.4	2.9	62.5	3.9	4.6	21.0	مقدار (/.)
										مقدار الزامات مقرارت
-	-	<0.75	<3	<3	<5	-	<6	<6	>20.0	ملی ایران شماره ی 389

جهت ایجاد هوای عمدی در مخلوط های بتنی، از ماده ی حباب ساز استفاده گردید. مشخصات فنی این ماده در جدول 2 دیده می شود.

جدول 2: مشخصات فنی و ظاهری ماده ی حباب ساز مورد استفاده در این تحقیق

حالت فیزیکی	مایع
رنگ	سفید
وزن مخصوص	1.02 گرم بر سانتی متر مکعب
قابلیت انحلال	در آب
مقدار کلر	فاقد کلر
مقدار مصرف پیشنهادی (توسط عرضه کننده)	0.01-0.03 وزن مواد سیمانی

الیاف مورد استفاده در این تحقیق، الیاف مصنوعی میکرو پلی پروپیلن مطابق با استاندارد ASTM و ASTM C1116 D7508 بود. در شکل 1 الیاف مورد استفاده در این تحقیق دیده می گردد. مشخصات مکانیکی و فیزیکی این الیاف در جدول 3 مشاهده می گردد.



شکل 1: شکل ظاهری الیاف میکرو پلی پروپیلن مصنوعی مورد استفاده در این تحقیق

جدول 3: مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف میکرو پلی پروپیلن مورد استفاده در این تحقیق

نوع الیاف	ماکرو مصنوعی
جنس الیاف	پلی پروپیلن خالص
شکل ظاهری	تک رشته ای
طول (mm)	12
قطر (mm)	0.03
مقاومت کششی (Mpa)	345
مدول الاستیسیته (Gpa)	3.5
جذب آب	ندارد
وزن مخصوص (gr/cm^3)	0.91

از ماده ی فوق روان کننده بر پایه ی پلی کربوکسیلات اتر در ساخت مخلوط های بتنی خود متراکم استفاده گردید. ماده ی افزودنی مورد استفاده توانایی ایجاد روانی مورد نیاز در ساخت مخلوط های بتنی خود متراکم را دارا بود. آب آشامیدنی سیستم لوله کشی آزمایشگاه جهت ساخت مخلوط های بتنی خود متراکم مورد استفاده قرار گرفت. طرح اختلاط بتن خود متراکم روسازی مطابق با ضوابط ذکر شده در ضابطه ی 731، دستور العمل طراحی، اجرا و نگهداری روسازی بتنی راه ها، انجام گرفت. نسبت های اختلاط بتن خود متراکم به گونه ای تعیین گردید تا الزامات مورد نظر در طرح اختلاط بتن روسازی بتنی رعایت گردد. این الزامات در جدول 4 دیده می گردد.

جدول 4: معیار های تعیین نسبت های اختلاط بتن روسازی بتنی مطابق با ضابطه ی 731

معیار	مقدار	روش آزمایش
مقاومت فشاری	30.3	ASTM C39
مقاومت خمشی (به روش تیر ساده بارگذاری در یک سوم دهانه)	4.1	ASTM C78
حداقل سیمان (Kg/m^3)	320- در شرایط بدون چرخه های ذوب و یخبندان	-
	335- در شرایط با چرخه های ذوب و یخبندان	-
حداکثر نسبت آب به مواد سیمانی (W/CM)	0.53	-
هوای بتن	5 تا 8 درصد	ASTM C231

بدین ترتیب نسبت های اختلاط بتن خود متراکم مورد استفاده در روسازی بتنی به گونه ای تعیین گردید تا معیار های جدول 4 رعایت گردد. میزان مصرف ماده ی حباب ساز با توجه به مقادیر پیشنهاد شده توسط آزمایشگاه کنترل و کیفیت کارخانه تولید کننده، طوری انتخاب گردید تا امکان بررسی تغییر میزان هوای بتن بر خصوصیات مقاومتی مورد نظر در این تحقیق وجود داشته باشد. از این جهت، مقادیر 0.025 و 0.05 کیلوگرم در متر مکعب بتن تازه انتخاب گردید. در انتخاب این

مقادیر، حداکثر میزان هوای مجاز در بتن روسازی بتنی (جدول 4) نیز در نظر گرفته شد. الیاف میکرو پلی پروپیلن در مقادیر 0.6 و 0.9 کیلوگرم بر متر مکعب بتن تازه استفاده شد تا تغییر میزان مصرف الیاف بر خصوصیات مورد نظر بتن سخت شده امکان پذیر باشد. بدین ترتیب تعداد 1 طرح اختلاط بتن شاهد و 4 طرح اختلاط بتن حاوی ماده ی حباب ساز و الیاف میکرو پلی پروپیلن در این تحقیق مد نظر قرار گرفت. جدول 5، نسبت های وزنی طرح های اختلاط مورد بررسی در این تحقیق را نشان می دهد.

جدول 5: نسبت های وزنی طرح های اختلاط مورد بررسی در این تحقیق

طرح اختلاط	معرف طرح اختلاط	سیمان (Kg/m ³)	مصلح سنگی ریزدانه (0-5 mm) (Kg/m ³)	مصلح سنگی درشت دانه ریز (5-12 mm) (Kg/m ³)	مصلح سنگی درشت دانه متوسط (12-19 mm) (Kg/m ³)	پودر خاک سنگ (Kg/m ³)	آب (Kg/m ³)	فوق روان کننده (Kg/m ³)	حباب ساز (Kg/m ³)	الیاف (Kg/m ³)
شاهد	RE	400	953	347	173	267	196	3.8	0.046	0
الیافی هودار	FRC0.6- AEA0.025	400	953	347	173	267	196	3.8	0.025	0.6
الیافی هودار	FRC0.6- AEA0.050	400	953	347	173	267	196	3.8	0.050	0.6
الیافی هودار	FRC0.9- AEA0.025	400	953	347	173	267	196	3.8	0.025	0.9
الیافی هودار	FRC0.9- AEA0.050	400	953	347	173	267	196	3.8	0.050	0.9

در این تحقیق از روش های آزمایشگاهی به منظور ارزیابی خصوصیات بتن تازه و خصوصیات مقاومتی بتن سخت شده استفاده گردید. خصوصیات بتن تازه شامل جریان اسلامپ بتن تازه و مدت زمان رسیدن جریان اسلامپ به دایره ای با قطر 50 سانتی متر (T50) بود. خصوصیات مقاومتی مخلوط های بتنی خود متراکم شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی دو نیم شدن و مقاومت خمشی بتن سخت شده بود.

جریان اسلامپ بتن تازه مطابق با روش استاندارد ASTM C1611، اندازه گیری جریان اسلامپ بتن خود متراکم-روش آزمون ارزیابی گردید. در این روش مخلوط بتن خود متراکم در داخل مخروط اسلامپ در یک لایه ریخته شده و سپس به آرامی بالا کشیده می شود. پس از توقف کامل جریان اسلامپ، قطر آن در دو جهت عمود بر هم اندازه گیری گردید. میانگین نتایج به عنوان نتیجه ی آزمایش در نظر گرفته شد. در شکل 2، ارزیابی جریان اسلامپ مخلوط های بتنی خود متراکم را نشان می دهد.



شکل 2: ارزیابی جریان اسلامپ بتن تازه مطابق با استاندارد ASTM C1116

مدت زمان رسیدن قطر جریان اسلامپ به دایره ای با قطر 50 سانتی متر، متغیر T_{50} بوده که در این تحقیق مورد ارزیابی قرار گرفت. این متغیر در همزمان با ارزیابی جریان اسلامپ مخلوط های بتنی خود متراکم اندازه گیری گردید. پس از پر کردن مخروط فلزی از بتن تازه و بالا کشیدن مخروط، با استفاده از زمان سنج با دقت 0.1 ثانیه، مقدار T_{50} اندازه گیری گردید. پس از انجام آزمایش های تعیین خصوصیات بتن خود متراکم تازه، دیده شده که طرح های اختلاط مورد بررسی، معیار های بتن خود متراکم تازه جهت استفاده در روسازی های بتنی را طبق ضوابط ذکر شده در ضابطه ی 731 و استاندارد های مرتبط با مخلوط های بتن خود متراکم را دارا بوده، در نتیجه می توان خصوصیات مقاومتی این مخلوط ها را مورد ارزیابی قرار داد.

مقاومت فشاری مخلوط های بتنی با استفاده از روش ASTM C39 و آزمایش بر روی آزمون های استوانه ای تعیین گردید. در این تحقیق از استوانه ای 200*100 میلیمتر استفاده شد. تعداد 3 استوانه از هر طرح اختلاط ساخته شده و تا زمان رسیدن به سن 28 روزه، در حوضچه های عمل آوری مطابق با شرایط استاندارد نگهداری گردید. اعمال بارگذاری بر روی آزمون های استوانه ای، با استفاده از دستگاه جک فشاری با ظرفیت 200 تن، صورت گرفت. در شکل 3، آزمون های استوانه ای و ارزیابی مقاومت فشاری مخلوط های بتنی خود متراکم دیده می گردد.



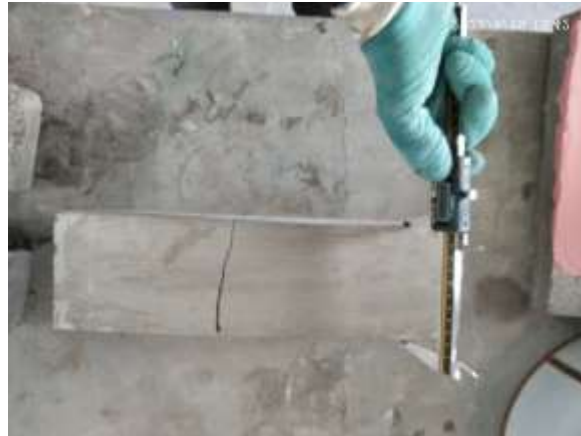
شکل 3: ارزیابی مقاومت فشاری مخلوط های بتنی خود متراکم مطابق با استاندارد ASTM C39

مقاومت کششی غیر مستقیم مخلوط های بتنی خود متراکم با استفاده از روش آزمایش استاندارد ASTM C496 تعیین گردید. در این روش آزمون های استوانه ای 100×200 میلیمتر ساخته شده و سپس تا زمان رسیدن به سن 28 روزه در شرایط استاندارد نگهداری گردید. تعداد 3 آزمون از هر طرح اختلاط ساخته شده و میانگین نتایج مد نظر قرار گرفت. بارگذاری بر روی آزمون های استوانه ای به منظور تعیین مقاومت کششی غیر مستقیم با استفاده از دستگاه جک فشاری، همانند آزمایش ارزیابی مقاومت فشاری، صورت گرفت. در شکل 4، آزمون های استوانه ای و ارزیابی مقاومت کششی غیر مستقیم مخلوط های بتنی مورد نظر در این تحقیق را نشان می دهد.



شکل 4: ارزیابی مقاومت کششی دو نیم شدن مخلوط های بتنی خود متراکم مطابق با استاندارد ASTM C496

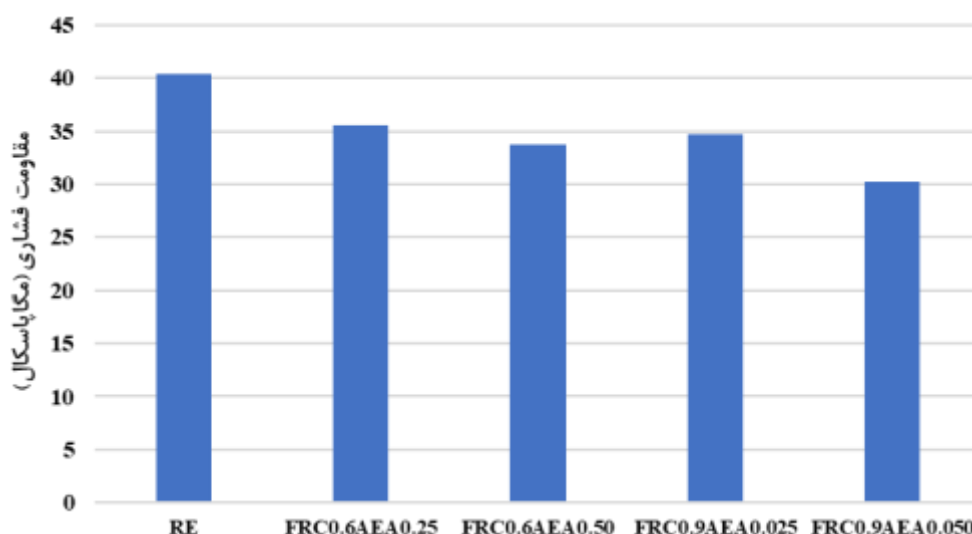
مقاومت خمشی (مدول گسیختگی خمشی) مخلوط های بتنی خود متراکم با استفاده از روش استاندارد ASTM C78 ارزیابی گردید. در این روش تیر های بتنی با ابعاد $100 \times 100 \times 350$ میلیمتر و با طول موثر 300 میلیمتر ساخته شده و به مدت 28 روز در شرایط استاندارد عمل آوری گردید. تعداد 3 تیر از هر طرح اختلاط ساخته شده و میانگین نتایج مد نظر قرار گرفت. بارگذاری خمشی با استفاده از دستگاه جک خمشی با ظرفیت 60 تن انجام گرفت. در شکل 5، تیر های بتنی گسیخته شده در تحت بارگذاری خمشی در این تحقیق را نشان می دهد.



شکل 5: ارزیابی مقاومت خمشی مخلوط های بتنی خود متراکم مطابق با استاندارد ASTM C78

3- نتایج و بحث

در این قسمت، نتایج به دست آمده از آزمایش های ارزیابی رفتار مقاومتی روسازی های بتنی خود متراکم حاوی پودر خاک سنگ تحت تاثیر ترکیب مصرف ماده ی حباب ساز و الیاف میکرو پلی پروپیلن در مقادیر مصرف مختلف ارائه شده و مورد بحث و تحلیل قرار میگیرد. شکل 6، نتایج مقاومت فشاری طرح های اختلاط بتن شاهد و الیافی به همراه ماده ی حباب ساز در مقادیر مصرف مختلف را نشان می دهد. با توجه به این نتایج، مشاهده می شود که با افزودن الیاف و ماده ی حباب ساز، مقاومت فشاری مخلوط های بتنی کاهش می یابد. مقاومت فشاری طرح های اختلاط FRC0.6-AEA0.025، FRC0.6-AEA0.050 و FRC0.9-AEA0.025 به ترتیب به میزان 12، 16، 14 و 25 درصد نسبت به طرح اختلاط بتن RE کاهش می یابد. علت کاهش مقاومت فشاری طرح های اختلاط بتن حاوی الیاف میکرو پلی پروپیلن و ماده ی حباب ساز را می توان از دو جهت مورد بررسی قرار داد. در ابتدا، افزودن الیاف میکرو پلی پروپیلن به مخلوط های بتنی باعث افزایش تخلخل و تشکیل نواحی انتقال سطحی شده، در نتیجه بر مشخصه ی مقاومت فشاری بتن تاثیر منفی می گذارد. در نتیجه، مقاومت فشاری مخلوط های بتنی حاوی این الیاف کاهش می یابد. از طرف دیگر، با افزودن ماده ی حباب ساز به بتن و افزایش میزان هوای عمدی، میزان تخلخل در مخلوط های بتنی افزایش می یابد. این موضوع باعث می گردد تا میزان تحمل بتن تحت بارگذاری خمشی کاهش یابد. در نتیجه مقاومت فشاری مخلوط های بتنی حاوی ماده ی حباب ساز کاهش می یابد. در مخلوط های بتنی مورد بررسی در این تحقیق، برآیند تاثیر منفی این دو ماده باعث کاهش مقاومت فشاری مخلوط های بتنی می گردد. این موضوع در تمامی طرح های اختلاط مورد بررسی مشاهده می گردد.

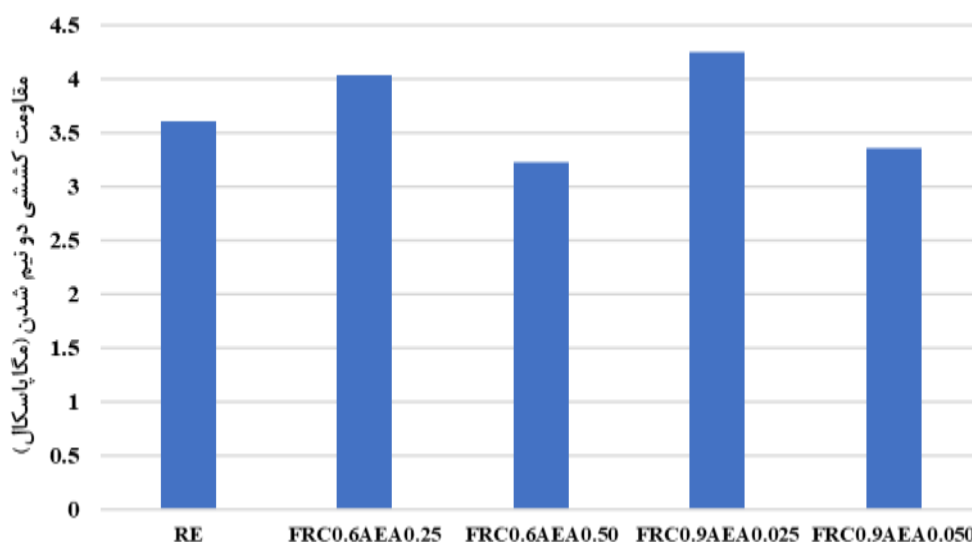


شکل 6: نتایج مقاومت فشاری مخلوط های بتنی خود متراکم حاوی الیاف میکرو پلی پروپیلن و ماده ی حباب ساز در مقادیر مصرف مختلف

با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می شود که تاثیر هر یک از مواد الیاف و حباب ساز بر تغییر رفتار مقاومت فشاری مخلوط های بتنی خود متراکم هوادار چشمگیر است. با ثابت در نظر گرفتن مقدار ماده ی حباب ساز، مشاهده می شود که با افزایش مصرف الیاف میکرو پلی مقاومت فشاری مخلوط های بتنی خود متراکم هوادار کاهش بیشتری را تجربه می کند. این موضوع را میتوان در تغییر مقاومت فشاری در طرح های اختلاط FRC0.6-AEA0.025 و FRC0.9-AEA0.025 و در تغییر مقاومت فشاری در طرح های اختلاط FRC0.6-AEA0.050 و FRC0.9-AEA0.050 مشاهده نمود. با توجه به این نتایج می توان اینطور استنباط کرد که تغییر میزان مصرف الیاف میکرو پلی پروپیلن در مخلوط های بتنی هوادار باعث تغییر رفتار مقاومت فشاری این مخلوط ها شده به طوری که افزایش بیشتر این الیاف، کاهش بیشتر مقاومت فشاری در آن را به دنبال دارد. علت کاهش بیشتر مشخصه ی مقاومت فشاری به دلیل افزایش میزان تخلخل در طرح های اختلاط بتن خود متراکم هوادار و تشکیل بیشتر نواحی انتقال سطحی در آن است. از طرف دیگر، با ثابت در نظر گرفتن میزان مصرف الیاف، مشاهده می گردد که افزایش میزان مصرف ماده ی حباب ساز، کاهش بیشتر مشخصه ی مقاومت فشاری در طرح های اختلاط بتن خود متراکم الیافی را به دنبال دارد. به عبارت دیگر، با افزایش بیشتر ماده ی حباب ساز، میزان مقاومت فشاری بیشتر کاهش می یابد. این موضوع را می توان در تغییر مقاومت فشاری در طرح های اختلاط FRC0.6-AEA0.025 و FRC0.6-AEA0.050 و در تغییر مقاومت فشاری در طرح های اختلاط FRC0.9-AEA0.025 و FRC0.9-AEA0.050 مشاهده نمود. علت این امر، افزایش میزان تخلخل مخلوط های بتنی حاوی الیاف میکرو پلی پروپیلن با افزودن ماده ی حباب ساز است. با بررسی و در نظر گرفتن اثر هر یک از مواد الیاف میکرو پلی پروپیلن و ماده ی حباب ساز بر تغییر رفتار مقاومت فشاری، می توان عنوان نمود که تاثیر تغییر ماده ی حباب ساز در تغییر مقاومت فشاری بیشتر از تاثیر الیاف میکرو پلی پروپیلن بر تغییر رفتار این مشخصه ی مقاومتی است. در نتیجه می توان اینطور استنباط کرد که تاثیر منفی ماده ی افزودنی حباب ساز در ایجاد تخلخل در مخلوط های بتنی بیشتر از تاثیر الیاف در تشکیل نواحی انتقال بین سطحی بوده، در نتیجه ماده ی حباب ساز اثر منفی بیشتری بر کاهش مقاومت فشاری مخلوط های بتنی نسبت به اثر منفی الیاف دارد.

در شکل 7 نتایج مقاومت کششی دو نیم شدن طرح های اختلاط بتن شاهد و الیافی به همراه ماده ی حباب ساز در مقادیر مصرف مختلف را نشان می دهد. با توجه به نتایج به دست آمده دیده می شود که افزودن الیاف میکرو پلی پروپیلن و ماده ی حباب ساز، مقاومت کششی دو نیم شدن مخلوط های بتنی، رفتار متفاوتی از خود نشان می دهد. با افزودن الیاف میکرو پلی پروپیلن و ماده ی حباب ساز در طرح اختلاط FRC0.6-AEA0.025 مقاومت کششی دو نیم شدن مخلوط بتنی

شاهد (RE) به میزان 11 درصد افزایش می یابد. تغییر میزان مقاومت کششی دو نیم شدن در این طرح اختلاط را می توان از دو جهت تحلیل کرد. اول، با افزودن الیاف میکرو پلی پروپیلن، مقاومت کششی و میزان جذب انرژی بتن تحت بارگذاری کششی افزایش می یابد. همچنین، پس از ایجاد اولین ترک در بتن ناشی از بارگذاری کششی، الیاف در محل ترک خوردگی عمل پل زدن را انجام داده و مانع از گسترش بیشتر ترک خوردگی و شکست کامل نمونه می گردد. در نتیجه، میزان بار مورد نیاز جهت گسیختگی بتن افزایش می یابد. مجموع این موارد باعث افزایش مقاومت کششی دو نیم شدن بتن حاوی الیاف میکرو پلی پروپیلن می شود. از طرفی، ماده ی افزودنی حباب ساز با ایجاد تخلخل در مخلوط بتنی، خصوصیات مقاومتی آن را تحت تاثیر قرار داده و از میزان مقاومت آن تحت بارگذاری های کششی می کاهد. دیده می شود، در طرح اختلاط FRC0.6-AEA0.025، اثر مثبت افزودن الیاف میکرو پلی پروپیلن در افزایش مقاومت کششی دو نیم شدن بتن بر اثر منفی ماده ی حباب ساز در کاهش این مشخصه ی مقاومتی غلبه کرده، و باعث می گردد تا مقاومت کششی دو نیم شدن این مخلوط بتنی افزایش یابد. با ثابت نگه داشتن میزان ماده ی حباب ساز و افزایش میزان مصرف الیاف میکرو پلی پروپیلن در طرح اختلاط FRC0.9-AEA0.025 مقاومت کششی این مخلوط بتنی تا میزان 18 درصد نسبت به مخلوط بتنی RE افزایش می یابد. این نتیجه نشان دهنده ی اثر افزایشده ی الیاف میکرو پلی پروپیلن در افزایش بیشتر مقاومت کششی دو نیم شدن بتن و غلبه ی بیشتر بر اثر منفی ماده ی حباب ساز در کاهش مقاومت کششی آن، است.

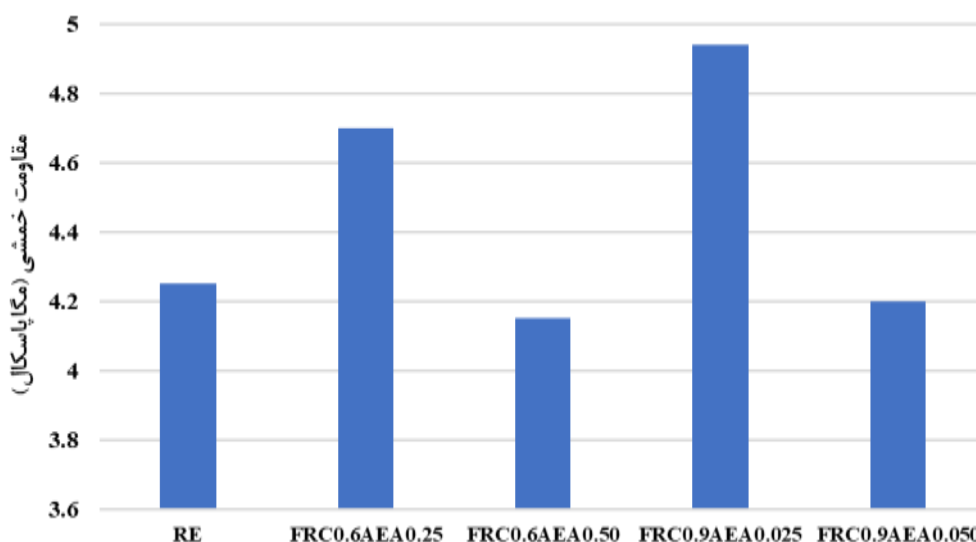


شکل 7: نتایج مقاومت کششی دو نیم شدن مخلوط های بتنی خود متراکم حاوی الیاف میکرو پلی پروپیلن و ماده ی حباب ساز در مقادیر مصرف مختلف

با بررسی بیشتر نتایج شکل 7، مشاهده می شود که با ثابت نگه داشتن میزان مصرف الیاف میکرو پلی پروپیلن و افزایش میزان ماده ی حباب ساز در طرح اختلاط FRC0.6-AEA0.050، مقاومت کششی دو نیم شدن این طرح اختلاط نسبت به طرح اختلاط بتن RE به میزان 10 درصد کاهش می یابد. این نتیجه حاکی از آن است که پس از افزودن بیشتر ماده ی حباب ساز در طرح اختلاط بتن FRC0.6-AEA0.025، اثر منفی این ماده در کاهش مقاومت کششی دو نیم شدن از اثر مثبت الیاف میکرو پلی پروپیلن در افزایش مقاومت کششی آن بیشتر شده و این موضوع باعث شده تا مقاومت کششی دو نیم شدن بتن کاهش یابد. مشابه این مورد، در طرح اختلاط FRC0.9-AEA0.050 رخ داده، به طوری که با ثابت نگه داشتن میزان مصرف الیاف میکرو پلی پروپیلن در طرح اختلاط FRC0.9-AEA0.025 و افزایش میزان مصرف ماده ی حباب ساز به میزان 0.05 کیلوگرم بر متر مکعب، مقاومت کششی دو نیم شدن این مخلوط بتنی نسبت به طرح اختلاط بتن RE به میزان 7 درصد کاهش می یابد. از بررسی این نتایج می توان اینطور استنباط کرد که پس از مصرف ماده ی حباب ساز از یک میزان

مشخص (در اینجا 0.025 کیلوگرم بر متر مکعب)، تاثیر منفی این ماده در کاهش مقاومت کششی دو نیم شدن مخلوط بتنی بر اثر مثبت آن در افزایش مقاومت کششی دو نیم شدن، غلبه کرده و باعث شده تا مقاومت کششی دو نیم شدن بتن کاهش یابد.

شکل 8 نتایج مقاومت خمشی طرح های اختلاط بتن شاهد و الیافی به همراه ماده ی حباب ساز در مقادیر مصرف مختلف را نشان می دهد. بررسی نتایج به دست آمده حاکی از رفتار متفاوت مقاومت خمشی مخلوط های بتنی متاثر از مصرف ماده ی حباب ساز و الیاف میکرو پلی پروپیلن است. با افزودن ماده ی حباب ساز و الیاف میکرو پلی پروپیلن در طرح اختلاط FRC0.6-AEA0.025 مقاومت خمشی این طرح اختلاط نسبت به طرح اختلاط بتن RE به میزان 10 درصد افزایش می یابد. همانطور که در قسمت قبل تشریح گردید، اثر مثبت الیاف میکرو پلی پروپیلن در افزایش مقاومت کششی، جذب انرژی و طاقت خمشی بتن بر اثر منفی ماده ی حباب ساز در کاهش مقاومت خمشی آن غلبه می کند. در نتیجه مقاومت خمشی بتن افزایش می یابد. دیده می گردد که با مصرف بیشتر الیاف میکرو پلی پروپیلن و ثابت نگه داشتن ماده ی حباب ساز در طرح اختلاط FRC0.9-AEA0.025، مقاومت خمشی این طرح اختلاط نسبت به طرح اختلاط RE به میزان 16 درصد افزایش می یابد. این موضوع نشان دهنده ی اثر مثبت بیشتر الیاف در افزایش مقاومت خمشی مخلوط های بتنی است.



شکل 8: نتایج مقاومت خمشی مخلوط های بتنی خود متراکم حاوی الیاف میکرو پلی پروپیلن و ماده ی حباب ساز در مقادیر مصرف مختلف

با ثابت نگه داشتن میزان مصرف الیاف میکرو پلی پروپیلن و افزایش میزان مصرف ماده ی حباب ساز در طرح اختلاط FRC0.6-AEA0.0.50 مقاومت خمشی این طرح اختلاط نسبت به طرح اختلاط RE به میزان 2 درصد کاهش می یابد. همچنین در طرح اختلاط FRC0.9-AEA0.025 با افزایش میزان مصرف ماده ی حباب ساز تا میزان 0.050 کیلوگرم بر متر مکعب، مقاومت خمشی طرح اختلاط FRC0.6-AEA0.050 به میزان 1 درصد کاهش می یابد. این موارد نشان دهنده ی این موضوع است که با افزایش میزان مصرف ماده ی حباب ساز از یک میزان مشخص (در اینجا 0.025 کیلوگرم بر متر مکعب) اثر مثبت الیاف در افزایش مقاومت خمشی بتن کمتر از اثر منفی ماده ی حباب ساز در کاهش این مشخصه ی مقاومتی بتن شده، در نتیجه، مقاومت خمشی بتن کاهش می یابد با بررسی همزمان نتایج شکل 7 و 8، می توان به این موضوع اشاره کرد که در هر دو مشخصه ی مقاومتی، اثر الیاف میکرو پلی پروپیلن در افزایش مقاومت کششی و خمشی، نزدیک به یکدیگر است. همچنین، دیده می شود که پس از مصرف بیشتر ماده ی حباب ساز از میزان 0.025 کیلوگرم بر متر مکعب، اثر مثبت الیاف میکرو پلی پروپیلن کاهش یافته و کمتر از اثر منفی ماده ی حباب ساز می گردد. در نتیجه، هر دو مشخصه ی مقاومتی کاهش

می یابد. اما دیده می شود که تاثیر منفی ماده ی حباب ساز، در کاهش مقاومت کششی دو نیم شدن بتن بیشتر از اثر این ماده در کاهش مقاومت خمشی آن است. به عبارت دیگر، ماده ی حباب ساز باعث تغییر بیشتر مقاومت کششی دو نیم شدن مخلوط های بتنی حاوی الیاف میکرو پلی پروپیلن می گردد.

4- نتیجه گیری

4-1- روابط

تحقیق حاضر به ارزیابی رفتار مقاومتی روسازی های بتنی خود متراکم حاوی پودر خاک سنگ تحت تاثیر ترکیب مصرف ماده ی حباب ساز و الیاف میکرو پلی پروپیلن در مقادیر مصرف مختلف پرداخت. مهم ترین نتایج به دست آمده از این تحقیق به شرح زیر است:

- افزودن الیاف میکرو پلی پروپیلن و ماده ی حباب ساز تاثیر چشمگیری در تغییر رفتار مقاومت فشاری، مقاومت کششی دو نیم شدن و مقاومت خمشی مخلوط های بتنی مورد استفاده در روسازی های بتنی خود متراکم دارد.
- مقاومت فشاری مخلوط های بتنی خود متراکم با افزودن الیاف میکرو پلی پروپیلن و ماده ی حباب ساز تا میزان 25 درصد کاهی می یابد. دیده شد که اثر ماده ی حباب ساز در کاهش مقاومت فشاری مخلوط های بتنی خود متراکم بیشتر از اثر منفی الیاف در کاهش این مشخصه ی مقاومتی است.
- مشاهده شد که افزودن الیاف میکرو پلی پروپیلن به مخلوط های بتنی خود متراکم هوادار، باعث افزایش مقاومت کششی دو نیم شدن آن تا میزان 18 درصد می گردد.
- پس از افزودن ماده ی حباب ساز از یک میزان مصرف مشخص، که در این تحقیق به مقدار 0.025 کیلوگرم بر متر مکعب بود، مقاومت کششی دو نیم شدن مخلوط های بتنی خود متراکم حاوی الیاف میکرو پلی پروپیلن تا میزان 10 درصد کاهش می یابد.
- افزودن الیاف میکرو پلی پروپیلن به مخلوط های بتنی خود متراکم هوادار، باعث افزایش مقاومت خمشی آن تا میزان 16 درصد می گردد.
- پس از افزودن ماده ی حباب ساز از یک میزان مصرف مشخص مقاومت خمشی مخلوط های بتنی خود متراکم حاوی الیاف میکرو پلی پروپیلن تا میزان 2 درصد کاهش می یابد. این میزان مصرف مشخص در این تحقیق به مقدار 0.025 کیلوگرم بر متر مکعب بود.
- اثر منفی ماده ی حباب ساز در کاهش مقاومت کششی دو نیم شدن مخلوط های بتنی حاوی الیاف میکرو پلی پروپیلن بیشتر از اثر منفی این ماده در کاهش مقاومت خمشی این مخلوط های بتنی است.

5- منابع

- [1] A.P. Akgungor, O. Sevim, I. Kalkan, I. Demir, Restrained shrinkage cracking of self-consolidating concrete roads, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 25 (2018) 1021–1030.
<https://doi.org/10.1515/secm-2017-0146>.
- [2] K. Wang, S.P. Shah, T. Voigt, A novel self-consolidating concrete for slip-form application, Transp. Res. Board. (2006) 1–11.
- [3] G. Lu, Development of self-consolidating concrete for slip form paving, 2005.
- [4] G. Ramesh, Self-Compacting Concrete: A Review, Indian J. Struct. Eng. 1 (2021) 9–12.
<https://doi.org/10.54105/ijse.a1303.111221>.
- [5] Z. Zhang, J. Xiao, Q. Zhang, K. Han, J. Wang, X. Hu, A state-of-the-art review on the stability of self-consolidating concrete, Constr. Build. Mater. 268 (2021) 121099.

- <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121099>.
- [6] N. Gupta, R. Siddique, R. Belarbi, Sustainable and Greener Self-Compacting Concrete incorporating Industrial By-Products: A Review, J. Clean. Prod. 284 (2021) 124803. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124803>.
 - [7] A. Singh, Z. Duan, J. Xiao, Q. Liu, Incorporating recycled aggregates in self-compacting concrete: a review, J. Sustain. Cem. Mater. 9 (2020) 165–189. <https://doi.org/10.1080/21650373.2019.1706205>.
 - [8] S. Kadhim, The Effects of Using Steel Fibers on Self-Compacting Concrete Properties: A Review, Eng. Technol. J. 38 (2020) 1666–1675. <https://doi.org/10.30684/etj.v38i11a.1678>.
 - [9] R. Goyena, A.. Fallis, Pavement Engineering - Principles and Practice, 2019. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
 - [10] G. Griffiths, N. Thom, Concrete Pavement Design Guidance Notes, 2007.
 - [11] N.J. Delatte, Concrete pavement design, construction, and performance, Crc Press, 2014.
 - [12] M. Khan, M. Ali, Effectiveness of hair and wave polypropylene fibers for concrete roads, Constr. Build. Mater. 166 (2018) 581–591. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.167>.
 - [13] M. Khan, A. Rehman, M. Ali, Efficiency of silica-fume content in plain and natural fiber reinforced concrete for concrete road, Constr. Build. Mater. 244 (2020) 118382. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118382>.
 - [14] H.A. Shah, Q. Yuan, S. Zuo, Air entrainment in fresh concrete and its effects on hardened concrete-a review, Constr. Build. Mater. 274 (2021) 121835. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121835>.
 - [15] J. Hu, F. Zhao, Y. Kuang, D. Yang, M. Zheng, L. Zhao, Microscopic characteristics of the action of an air entraining agent on cemented paste backfill pores, Alexandria Eng. J. 59 (2020) 1583–1593. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.04.005>.
 - [16] C. Zhou, X. Pei, W. Li, Y. Liu, Mechanical and damping properties of recycled aggregate concrete modified with air-entraining agent and polypropylene fiber, Materials (Basel). 13 (2020). <https://doi.org/10.3390/MA13082004>.
 - [17] G. Ke, J. Zhang, B. Tian, J. Wang, Characteristic analysis of concrete air entraining agents in different media, Cem. Concr. Res. 135 (2020) 106142. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106142>.
 - [18] S.Y. Chung, P. Sikora, T. Rucinska, D. Stephan, M. Abd Elrahman, Comparison of the pore size distributions of concretes with different air-entraining admixture dosages using 2D and 3D imaging approaches, Mater. Charact. 162 (2020) 110182. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110182>.
 - [19] J.F. Natalli, H.D. Andrade, J.M.F. Carvalho, K. Defáveri, J. Castro Mendes, A.M.C. Sarmanho, R.A.F. Peixoto, Performance of Lightweight Concrete with Expansive and Air-Entraining Admixtures in CFST Columns, J. Mater. Civ. Eng. 32 (2020) 04020121. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003143](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003143).
 - [20] M. Qiao, G. Shan, J. Chen, S. Wu, N. Gao, Q. Ran, J. Liu, Effects of salts and adsorption on the performance of air entraining agent with different charge type in solution and cement mortar, Constr. Build. Mater. 242 (2020) 118188. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118188>.
 - [21] Ł. Sadowski, D. Stefaniuk, M. Różańska, I. Usydus, J. Szymanowski, The Effect of Waste Mineral Powders on the Structure of Air Voids in Low-Strength Air-Entrained Concrete Floor Screeds, Waste and Biomass Valorization. 11 (2020) 2211–2225. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0429-0>.
 - [22] M. Khanzadeh Moradllo, C. Qiao, R.M. Ghantous, M. Zaw, H. Hall, M.T. Ley, W.J. Weiss, Quantifying the freeze-thaw performance of air-entrained concrete using the time to reach critical saturation modelling approach, Cem. Concr. Compos. 106 (2020) 103479. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103479>.
 - [23] A. Zarei, H. Rooholamini, T. Ozbakkaloglu, Evaluating the Properties of Concrete Pavements Containing Crumb Rubber and Recycled Steel Fibers Using Response Surface Methodology, Int. J. Pavement Res. Technol. (2021). <https://doi.org/10.1007/s42947-021-00049-7>.
 - [24] J. Blazy, R. Blazy, Polypropylene fiber reinforced concrete and its application in creating architectural forms of public spaces, Case Stud. Constr. Mater. 14 (2021) e00549. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00549>.
 - [25] B. Alam, İ.Ö. Yaman, Fatigue performance of PVA fibre reinforced cementitious composite overlays, Int. J. Pavement Eng. 22 (2021) 822–828. <https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1647341>.
 - [26] F.M.T. Alireza Miri, Rojina Ehsani, A Numerical Simulation of the Electrical Resistivity of Concrete Pavements Containing Steel Fibers, Airf. Highw. Pavements. (2021) 356–364.
 - [27] M. A. Abdulridha, M. M. Salman, Q. S. Banyhussan, EFFECT POLYPROPYLENE OF FIBER ON DRYING SHRINKAGE CRACKING OF CONCRETE PAVEMENT USING RESPONSE SURFACE METHODOLOGY, J. Eng. Sustain. Dev. 25 (2021) 10–21. <https://doi.org/10.31272/jeasd.25.3.2>.
 - [28] H.M. Shakir, A.F. Al-Tameemi, A.A. Al-Azzawi, A review on hybrid fiber reinforced concrete pavements technology, J. Phys. Conf. Ser. 1895 (2021) 012053. <https://doi.org/10.1088/1742->

- 6596/1895/1/012053.
- [29] M. Haghnejad, A. Modarres, Effect of freeze-thaw cycles on the response of roller compacted concrete pavement reinforced by recycled polypropylene fibre under monotonic and cyclic loadings, *Road Mater. Pavement Des.* 0 (2020) 1–17. <https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1794942>.
 - [30] M. Ahmadi, G.A. Shafabakhsh, A. Hassani, Fracture and mechanical performance of Two-Lift Concrete Pavements made of Roller Compacted Concrete and Polypropylene Fibers, *Constr. Build. Mater.* (2020) 121144. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121144>.
 - [31] I. Hussain, B. Ali, T. Akhtar, M. Sohail, Case Studies in Construction Materials Comparison of mechanical properties of concrete and design thickness of pavement with different types of, *Case Stud. Constr. Mater.* 13 (2020) e00429. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00429>.
 - [32] B. Ali, L.A. Qureshi, S.U. Khan, Flexural behavior of glass fiber-reinforced recycled aggregate concrete and its impact on the cost and carbon footprint of concrete pavement, *Constr. Build. Mater.* 262 (2020) 1–58. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.120820>.
 - [33] E.A. Nabi, Replacement of M30 Concrete with M20 Concrete using Waste Tyre Steel Fiber in Rigid Pavement, *Int. J. Eng. Res. Technol.* 9 (2020) 255–260.
 - [34] I.M.G. Bertelsen, L.M. Ottosen, G. Fischer, Influence of fibre characteristics on plastic shrinkage cracking in cement-based materials: A review, *Constr. Build. Mater.* 230 (2020) 116769. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116769>.
 - [35] H. Ziari, P. Hayati, J. Sobhani, Air-Entrained Air Field Self-Consolidating Concrete Pavements□: Strength and Durability, *Int. J. Civ. Eng.* (2016). <https://doi.org/10.1007/s40999-016-0104-4>.
 - [36] H. Ziari, P. Hayati, J. Sobhani, Airfield self-consolidating concrete pavements (ASCCP): Mechanical and durability properties, *Constr. Build. Mater.* 72 (2014) 174–181. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.047>.
 - [37] A.A. Busari, J.O. Akinmusuru, B.I.O. Dahunsi, A.S. Ogbiye, J.O. Okeniyi, Self-compacting concrete in pavement construction: Strength grouping of some selected brands of cements, *Energy Procedia.* 119 (2017) 863–869. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.139>.
 - [38] B. Ayobami, A. Joseph, D. Bamidele, O. Tokunbo, N. Ben, International Journal of Advanced and Applied Sciences Pavement construction using self-compacting concrete□: Mechanical properties, *Int. J. Adv. Appl. Sci.* 4 (2017) 50–55.