ارزیابی اثر دوده سیلیس بر مشخصات نفوذ پذیری روسازی‌های بتنی حاوی الیاف

مقاله علمی – پژوهشی

حسن زیاری، استاد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
احسان سبحانی فرد*، دانشجوی دکتری، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
فریدون امیدی نسب، دانشیار، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: ehsan_sobhanifard@civileng.iust.ac.ir

دریافت :۱۴۰۲/۱۰/۰۲ – پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۵
صفحه ۳۶۲-۳۴۵

چکیده

بهبود مشخصات مقاومتی و نفوذ پذیری مخلوط‌های بتنی مورد استفاده در روسازی‌های بتنی به منظور افزایش عملکرد و دوام این روسازی‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. در این میان، استفاده از مواد نوین به جهت بهبود این خصوصیات در روسازی‌های بتنی اهمیت می‌یابد. مواد افزودنی دوده سیلیس و الیاف ماکرو پلی پروپیلن از انواع مواد نوین در صنعت روسازی هستند. تحقیق حاضر به ارزیابی اثر دوده سیلیس بر مشخصات مقاومتی و نفوذ پذیری روسازی‌های بتنی هوادار حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن در مقادیر مصرف مختلف پرداخته است. در همین راستا، دوده سیلیس در مقادیر مصرف ۵ و ۷,۵ درصد و الیاف ماکرو پلی پروپیلن در مقادیر مصرف ۰,۹ و ۱,۸ کیلوگرم بر متر مکعب به مخلوط بتنی شاهد اضافه گردید. همچنین خصوصیات مقاومتی شامل مقاومت فشاری، کششی دو نیم شدن و خمشی و خصوصیات نفوذ پذیری شامل جذب آب و عمق نفوذ پذیری تحت فشار مخلوط‌های بتنی مطابق با روش‌های استاندارد ارزیابی شده است. نتایج حاکی از آن بود که دوده سیلیس باعث تغییر چشمگیر خصوصیات مقاومتی و نفوذ پذیری مخلوط‌های بتنی حاوی الیاف می‌گردد. با افزودن دوده سیلیس، مقاومت فشاری، کششی دو نیم شدن و خمشی بتن به ترتیب حداکثر تا میزان ٤٤، ٥٤ و ٢٧ درصد افزایش یافت. همچنین دوده سیلیس باعث کاهش میزان جذب آب و عمق نفوذ پذیری حداکثر تا میزان ۱۲ و ٤٨ درصد گردید. میزان مصرف دوده سیلیس نیز تاثیر چشمگیری بر تغییر رفتار مقاومتی و نفوذ پذیری روسازی بتنی داشت. مشاهده گردید در بین خصوصیات مقاومتی، دوده سیلیس بیشترین تاثیر را بر مقاومت کششی دو نیم شدن و در بین خصوصیات نفوذ پذیری آن، بیشترین تاثیر را بر عمق نفوذ پذیری بتن داشته است. بعلاوه تغییر مقاومت فشاری بیشتر از مقاومت خمشی روسازی بتنی شده است.

واژه‌های کلیدی: الیاف ماکرو پلی پروپیلن، خصوصیات مقاومتی، دوده سیلیس، روسازی بتنی هوادار، نفوذ پذیری

۱-مقدمه

روسازی‌های بتنی همواره یکی از گزینه‌های متولیان و طراحان ساخت و توسعه راه‌ها جهت احداث محورهای جدید به حساب می‌آیند. بطورکلی این روسازی‌ها نسبت به روسازی‌های انعطاف‌پذیر عمر طراحی بالاتر و البته هزینه اولیه ساخت بیشتری دارند. همچنین لازم به ذکر است هزینه تعمیر و نگهداری روسازی‌های بتنی در طی عمر طراحی روسازی کمتر از روسازی‌های انعطاف‌پذیر است(Huang, 2004). گفتنی است از رویه‌های بتنی در کاربری‌های دیگری همچون سطوح پروازی فرودگاه‌ها، کف پارکینگ‌ها و مراکز صنعتی، محوطه بنادر و پایانه‌های باربری و اتوبوسرانی استفاده می‌شود. عملکرد

مطلوب و عمر بالای روسازی‌های بتنی و از طرفی تولید فروان سیمان در کشور، استفاده از این نوع روسازی‌ها را در اولویت‌های نخست تصمیم‌گیران حوزه حمل و نقل قرار داده است. البته روش اجرا و همچنین تجهیزات فنی موردنیاز جهت ساخت روسازی‌های بتنی اهمیت فروانی داشته و لازم است متولیان امر اهتمام لازم را داشته باشند. روسازی بتنی به طور کلی از یک دال بتنی به صورت ساده و یا مسلح تشکیل شده، که به صورت مستقیم بر سطح خاک بستر کوبیده شده قرار گرفته و یا بر روی سطح اساس دانه‌ایی یا تثبیتی اجرا می‌گردد(Mallick & El-Korchi, 2008). از انواع متداول روسازی‌های بتنی می‌توان به روسازی بتنی ساده درزدار (JPCP)، روسازی بتنی مسلح درزدار (JRCP) و روسازی بتنی مسلح پیوسته (CRCP) اشاره کرد(Huang, 2004). روسازی‌های بتنی از مقاومت، دوام و عملکرد مطلوب‌تری نسبت به روسازی‌های آسفالتی برخوردارند(Delatte, 2018). در همین راستا طراحی صحیح، استفاده از مصالح با کیفیت و اجرای مناسب می‌تواند منجر به عملکرد مطلوب این نوع روسازی‌ها در طول دوره طراحی با کمترین نیاز به عملیات تعمیر و نگهداری گردد. بنابراین در بسیاری از کاربری‌های با اهمیت بالا مانند روسازی باند فرودگاه (که حجم و زمان تعمیر و نگهداری از اهمیت بالایی برخودار است) می‌توان از انواع رویه بتنی استفاده کرد.

روسازی‌های بتنی در طول عمر خدمت دهی خود، تجت تاثیر بارگذاری‌ها و تنش‌های مختلف قرار دارند. می‌توان عوامل ایجاد تنش در روسازی‌های بتنی را به طور کلی در دو دسته شامل جریان ترافیکی و شرایط محیطی قرار داد. بارهای اعمال شده از طرف وسایل نقلیه، به طور عمده تنش‌های فشاری و خمشی در دال روسازی به وجود می‌آورد(Aliha, Ziari, Sobhani Fard, & Jebalbarezi Sarbijan, 2021; J. Chen, Wang, & Xie, 2020; Jebalbarezi, ziari, Mohammad Aliha, mojaradi, & sobhanifard, 2020; Rezaei-Tarahomi et al., 2019; Ziari, Aliha, Fard, & Sarbijan, 2022). بطورکلی میزان تنش‌های فشاری ایجاد شده در دال روسازی بتنی نسبت به تنش‌های خمشی بسیار کمتر است(Khan, Rehman, & Ali, 2020). با این حال بیشتر خصوصیات مخلوط‌های بتنی با مقاومت فشاری بتن در ارتباط بوده، از این جهت مشخصه مقاومت فشاری بتن روسازی بتنی اهمیت پیدا می‌کند. اما همانطور که گفته شد، مشخصه مقاومت خمشی مخلوط بتن مورد استفاده در روسازی بتنی، نقش مهمی در تعیین خصوصیات روسازی بتنی ایفا می‌کند. تنش‌های وارده از طرف وسایل نقلیه اغلب از نوع تنش‌های خمشی نرمال است. همچنین، مشخصه مقاومت خمشی بتن به طور مستقیم بر طراحی روسازی بتنی تاثیر داشته، به گونه‌ای که با افزایش میزان مقاومت خمشی بتن، حداقل ضخامت لازم دال روسازی بتنی کاهش می‌یابد(Khan & Ali, 2018). در برخی از موارد، تنش‌های کششی در روسازی بتنی ایجاد شده که حائز اهمیت می‌گردد. این تنش‌ها می‌تواند ناشی از اعمال بارگذاری‌های مختلف بوده و یا تحت تاثیر تغییرات محیطی ایجاد گردد. به منظور مقابله با این تنش‌ها، مشخصه مقاومت کششی بتن اهمیت پیدا می‌کند. در نتیجه، خصوصیات مقاومتی مخلوط‌های بتنی مورد استفاده در ارزیابی کیفیت و عملکرد روسازی‌های بتنی نقش مهمی ایفا کرده و ارزیابی این مشخصات در افزایش کیفیت و بهبود عملکرد این روسازی‌ها اهمیت دارد.

شرایط محیطی و عوامل محیطی مختلف نیز، باعث بروز تنش‌ها و خرابی‌های مختلف در روسازی می‌گردد. یکی از عوامل محیطی که همواره سطح خدمت دهی و دوام روسازی را تحت تاثیر قرار داده، وجود آب در سطح آن است. از آن جا که راه‌ها همواره تحت تاثیر مستقیم بارندگی قرار داشته، عامل آب به طور عمده در سطح جاده وجود دارد. بخشی از آب موجود در سطح جاده، به کناره‌ها منتقل شده و توسط سیستم زهکشی خارج می‌گردد. با این حال، بخشی از این آب به داخل دال روسازی بتنی نفوذ می‌کند. در برخی از موارد آب در سطح روسازی جمع شده و تحت فشار مشخصی به داخل روسازی نفوذ می‌کند. نفوذ آب به داخل روسازی، باعث خوردگی میلگردهای مسلح کننده، میلگردهای انتقال بار (داول بار) و میلگردهای دوخت (تای بار) می‌گردد. همچنین، نفوذ آب به داخل روسازی بتنی می‌تواند منجر به بروز انواع خرابی در داخل آن شود. در مواردی که روسازی بتنی دارای ترک خوردگی بوده، آب از طریق روزنه‌ها و ترک‌های ایجاد شده، در داخل روسازی حرکت کرده و به سطح زیرین روسازی می‌رسد. این موضوع می تواند باعث تخریب سطح خاک بستر یا سطح اساس دانه‌ای گردد(Liu, Xiao, & Singh, 2021a, 2021b; Moelich, Van Zyl, Rabie, & Combrinck, 2021; Rong, Dong, Yuan, & Zhou, 2021; Sayahi, Emborg, Hedlund, & Cwirzen, 2021; Sayahi, Emborg, Hedlund, Cwirzen, & Stelmarczyk, 2021; Wyrzykowski et al., 2021; Zhang & Xiao, 2021). از این نظر، میزان نفوذ پذیری روسازی بتنی به منظور افزایش دوام

و عملکرد روسازی اهمیت پیدا می‌کند. بنابراین نفوذپذیری و جذب آب مخلوط بتن اهمیت داشته و نیاز است تا مورد بررسی دقیق‌تر قرار گیرد. استفاده از مواد نوین جهت بهبود خصوصیات مختلف روسازی‌های بتنی، مسئله‌ای بوده که همواره مورد توجه محققان صنعت بتن قرار گرفته است. بهبود خصوصیات مورد نظر در روسازی بتنی با به کارگیری مواد مختلف، از اهداف اصلی در این مطالعات بوده است. دوده سیلیس یکی از این مواد بوده که مورد توجه محققان قرار گرفته است. دوده سیلیس یک محصول جانبی در کوره قوس الکتریکی است. این ماده به دلیل وجود مواد ریزدانه، منافذ خالی در مخلوط‌های بتنی را پر کرده و باعث کاهش تخلخل در بتن شده، در نتیجه خصوصیات مقاومتی بتن را دستخوش تغییر می‌کند. از طرفی، دوده سیلیس می‌تواند بر خصوصیات نفوذ پذیری بتن نیز اثر گذار باشد(Mehta & Ashish, 2020; Nochaiya, Wongkeo, & Chaipanich, 2010; Ramachandran, 2018; Shyam, Anwar, & Ahmad, 2017). الیاف یکی دیگر از مواد افزودنی نوین بوده که به منظور بهبود خصوصیات روسازی بتنی به آن اضافه می‌گردد(Y. Chen, Cen, & Cui, 2018; Kurda, Silvestre, & de Brito, 2018; Ortega-Lopez, Fuente-Alonso, Santamaria, San-José, & Aragon, 2018; Rooholamini, Hassani, & Aliha, 2018; Wtaife et al., 2018). وجود الیاف در بتن، مقاومت کششی آن را افزایش داده و همچنین قابلیت جذب انرژی آن را بهبود می‌بخشد. الیاف با پل زدن در دهانه ترک، باعث افزایش مقاومت پس از ترک خوردگی بتن نیز می‌گردد(Arce, Noorvand, Hassan, Rupnow, & Dhakal, 2021; Geremew, De Winne, Demissie, & De Backer, 2021; Miri, Ehsani, & Tehrani, 2021; Paluri, Noolu, Mudavath, & Kumar Pancharathi, 2021; Zarei, Rooholamini, & Ozbakkaloglu, 2022). الیاف‌های مورد استفاده در مخلوط‌های بتنی به طور کلی شامل الیاف فلزی، مصنوعی و طبیعی می‌باشند. الیاف‌های مصنوعی به دلیل مقاومت، عملکرد و دوام مناسب در محیط قلیایی سیمان، مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. در بین الیاف‌های مصنوعی، الیاف بر پایه پلی پروپیلن از عملکرد مناسب‌تری نسبت به دیگر الیاف برخوردار است. الیاف پلی پروپیلن از نظر خصوصیات مقاومتی و هندسی شامل الیاف میکرو پلی پروپیلن و الیاف ماکرو پلی پروپیلن می‌شود. الیاف ماکرو پلی پروپیلن به دلیل مقاومت بالاتر و سادگی بیشتر در ساخت، عملکرد بهتری در سازه‌های بتنی از خود نشان داده است(Bertelsen, Ottosen, & Fischer, 2020). ارزیابی تاثیر مواد افزودنی نوین شامل دوده سیلیس و الیاف در بهبود خصوصیات مختلف روسازی‌های بتنی همواره مورد توجه برخی از محققان بوده است. برخی دیگر از محققان اثر افزودن چند ماده در طرح مخلوط روسازی بتنی را مورد بررسی قرار دادند. مدحخان و همکاران (Madhkhan, Azizkhani, & Harchegani, 2012) اثر مواد پوزولانی به همراه الیاف فلزی و پلی پروپیلن بر خصوصیات مکانیکی روسازی‌های بتنی غلتکی را مورد ارزیابی قرار دادند. پوزولان مورد استفاده در این تحقیق شامل پوزولان طبیعی رده C مطابق با استاندارد ASTM C618 بوده است. افزودن پوزولان طبیعی در مخلوط‌های بتنی حاوی الیاف فلزی و پلی پروپیلن باعث افزایش چشمگیر مقاومت فشاری می‌شود. با این حال عنوان گردید مقاومت خمشی کاهش یافته و سختی مخلوط بتنی تغییر محسوسی پیدا نکرده است. در پژوهش دیگری، طغرلی و همکاران (Toghroli et al., 2020) اثر استفاده از سنگدانه‌های حاصل از بازیافت بتن و مواد افزودنی پوزولانی شامل ماده دوده سیلیس در روسازی‌های بتنی نفوذ پذیر حاوی الیاف را مورد ارزیابی قرار داده و مشاهده نمودند که دوده سیلیس باعث بهبود خصوصیات مقاومتی روسازی بتنی می‌گردد. خان و همکاران (Khan et al., 2020) نیز تاثیر میزان مصرف دوده سیلیس در مخلوط‌های بتنی ساده و حاوی الیاف طبیعی در جهت استفاده در روسازی بتنی را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج کار آنان حاکی از آن بود که افزودن دوده سیلیس به میزان مصرف مشخص، باعث بهبود خصوصیات مقاومتی روسازی‌های بتنی می‌گردد. بررسی پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که بهبود خصوصیات مقاومتی و نفوذ پذیری مخلوط‌های بتنی مورد استفاده در روسازی‌های بتنی با استفاده از مواد و مصالح نوین، به منظور افزایش دوام و عملکرد روسازی، از اهمیت بالایی بر خوردار است. در این بین، دوده سیلیس و الیاف، به عنوان مواد نوین در روسازی بتنی، عملکرد خوبی از خود نشان داده است. با وجود انجام برخی مطالعات در این زمینه، مواردی وجود داشته که از اهمیت بالایی برخودار بوده و کمتر در تحقیقات مورد توجه قرار گرفته و نیازمند بررسی بیشتر است. کمتر پژوهشی به اثر بررسی افزودن دوده سیلیس در کنار الیاف مصنوعی بر پایه پلی پروپیلن بر خصوصیات مقاومتی روسازی بتنی پرداخته است. همچنین، اثر افزودن این دو ماده بر خصوصیات جذب آب و نفوذ پذیری مخلوط‌های بتن روسازی

بتنی کمتر مورد توجه واقع شده است. بررسی اثر میزان مصرف هر یک از این افزودنی‌ها بر تغییر رفتار مقاومتی و نفوذ پذیری بتن مورد استفاده در روسازی بتنی از دیگر موارد حائز اهمیت بوده که نیازمند ارزیابی بیشتر است. بررسی موارد ذکر شده، از آن جهت حائز اهمیت بوده که می‌تواند در شناخت بهتر اثرات این افزودنی‌ها و تاثیرات آن بر خصوصیات مقاومتی و نفوذ پذیری بتن، اطلاعاتی مفید در اختیار متولیان ساخت روسازی‌های بتنی قرار دهد. ارزیابی مجموع موارد می‌تواند در ساخت یک روسازی بتنی با دوام و عملکرد بالاتر کمک شایانی کند. از این جهت، تحقیق حاضر به ارزیابی اثر دوده سیلیس بر مشخصات مقاومتی و نفوذ پذیری روسازی‌های بتنی هوادار حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن در مقادیر مصرف مختلف می‌پردازد. در ابتدا، مصالح و روش‌های آزمایشگاهی تشریح شده، سپس نتایج به دست آمده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

۲- مصالح و روش‌های آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح

۲-۱-۱- سیمان

در این تحقیق از سیمان پرتلند تیپ ۱-۴۲۵ کارخانه سیمان شرق مشهد با وزن مخصوص ۳۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب استفاده شده است. در جدول ۱ مشخصات تحلیل شیمیایی این سیمان نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ دو

مشخصه شیمیایی	مقدار (٪)	مقدار الزامات مقرارت ملی ایران شماره ی ۳۸۹
SiO_2	۲۱,۰	>۲۰,۰
Al_2O_3	٤,٦	<٦
Fe_2O_3	۳,۹	<٦
CaO	٦۲,٥	-
MgO	۲,۹	<٥
L.O.I	۱,٤	<۳
SO_3	۰,۲	<۳
IR	۰,۳	<۰,۷٥
Na_2O	۰,٥	-
K_2O	۰,٤٥	-

۲-۱-۲- مصالح سنگی

مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق شامل مصالح آهکی با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر است. مصالح سنگی ریز دانه در ابعاد ۵-۰ میلیمتر، مصالح سنگی درشت دانه ریز در ابعاد ۱۲-۵ میلیمتر و مصالح سنگی درشت دانه متوسط ۱۹-۱۲ میلیمتر مورد استفاده قرار گرفت. در جدول ۲ مشخصات فنی و مکانیکی مصالح سنگی مورد استفاده آورده شده است.

جدول ۲. مشخصات فنی و مکانیکی مصالح سنگی

نوع مصالح	اندازه (میلی‌متر)	جذب آب (درصد)	چگالی نسبی	مدول نرمی
ریزدانه	۵-۰	۱,۰۸	۲,٦۳	۳,٤٦
درشت‌دانه ریز	۱۲-۵	۰,۷۰	۲,٦۳	-
درشت‌دانه متوسط	۱۹-۱۲	۰,٥۱	۲,٦۲	-

۲-۱-۳- مواد افزودنی

مواد افزودنی مورد استفاده در ساخت طرح‌های اختلاط شامل ماده افزودنی فوق روان کننده و ماده افزودنی حباب ساز بوده است. ماده افزودنی فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات اتر با وزن مخصوص ۱٫۰۵ گرم بر سانتی متر مکعب است. همچنین از ماده افزودنی حباب ساز به منظور ایجاد حباب هوا در مخلوط‌های بتنی استفاده گردید. در جدول ۳ مشخصات فیزیکی و شیمیایی این ماده نشان داده شده است.

جدول ۳. مشخصات فنی و ظاهری ماده حباب ساز

حالت فیزیکی	مایع
رنگ	سفید
وزن مخصوص	۱٫۰۲ گرم بر سانتی متر مکعب
قابلیت انحلال	در آب
مقدار کلر	فاقد کلر
مقدار مصرف پیشنهادی (توسط عرضه کننده)	۰٫۰۳-۰٫۰۱ وزن مواد سیمانی

۲-۱-٤- الیاف

در این تحقیق از الیاف مصنوعی بر پایه پلی پروپیلن در ابعاد ماکرو با شکل ظاهری برجسته پیوسته، مطابق با استاندارد ASTM C1116 و ASTM D7508 استفاده شده است. شکل۱ نمایی از الیاف مذکور را نشان می‌دهد. مشخصات فنی و مکانیکی این الیاف در جدول ٤ آورده شده است.

شکل ۱. الیاف ماکروی مصنوعی

جدول ٤. مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف ماکرو مصنوعی

نوع الیاف	ماکرو مصنوعی
جنس الیاف	پلی پروپیلن خالص
شکل ظاهری	برجسته پیوسته
طول (میلی متر)	٤
قطر (میلی‌متر)	۰٫٦٥
مقاومت کششی (مکاپاسکال)	٤۰۰
مدول الاستیسیته (کیلوپاسکال)	٤
جذب آب	ندارد
وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۰٫۹۱

۲-۱-۵- دوده سیلیس

در این پژوهش از دوده سیلیس (میکرو سیلیس) کارخانه سمنان با وزن مخصوص ۲۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در ساخت مخلوط‌های بتنی استفاده شده است. در جدول ۵ مشخصات تحلیل شیمیایی این ماده نمایان است.

جدول ۵. مشخصات شیمیایی پودر میکرو سیلیس

مشخصه شیمیایی	مقدار (٪)
Na_2O	۰,۱۵
P2O5	۰,۱۷
TiO2	۰,۰٤
MgO	۰,۱۸
S	۰,۰٦
Fe2O3	۰,۸۹
Al2O3	۱,۳۲
K2O	۰,۲۱
L.O.I	۲,۱۷
SiO2	۹٤,۵۵

۲-۲- طرح اختلاط بتن روسازی بتنی

نسبت‌های اختلاط بتن مورد استفاده در روسازی بتنی باید به گونه‌ای تعیین شوند تا الزامات ذکر شده در ضابطه‌ی ۷۳۱، دستورالعمل طراحی، اجرا و نگهداری روسازی بتنی راه‌ها رعایت گردد. این الزامات به منظور طراحی مخلوط بتن روسازی استفاده می‌گردد. در جدول ٦ معیارهای تعیین نسبت‌های اختلاط بتن روسازی بتنی هوادار بر اساس ضابطه ۷۳۱ مشاهده می‌گردد. بدین ترتیب نسبت‌های اختلاط بتن روسازی بتنی به گونه‌ای تعیین شد تا الزامات جدول ٦ در طرح اختلاط رعایت شود.

الیاف ماکرو مصنوعی در حداقل میزان مصرف پیشنهادی توسط تولید کننده و مطابق با تحقیقات گذشته به میزان ۰,۹ و ۱,۸ کیلوگرم بر متر مکعب استفاده گردید. همچنین دوده سیلیس در دو مقدار مصرف مختلف شامل ۵ و ۷,۵ درصد استفاده شده است. این مقادیر، با توجه به مقادیر پیشنهادی در ضابطه‌ی ۷۳۱ انتخاب شده است. در جدول ۷ نسبت‌های اختلاط بتن مورد نظر در این تحقیق دیده می‌شود.

جدول ٦. معیارهای تعیین نسبت‌های اختلاط بتن روسازی بتنی مطابق با ضابطه ۷۳۱

معیار	مقدار	روش آزمایش
مقاومت فشاری	۳۰,۳	ASTM C39
مقاومت خمشی (به روش تیر ساده بارگذاری در یک سوم دهانه)	٤,۱	ASTM C78
حداقل سیمان (کیلوگرم بر متر مکعب)	۳۵۵	-
حداکثر نسبت آب به مواد سیمانی (W/CM)	۰,٤۹	-
میزان هوای بتن (درصد)	۵ تا ۸	ASTM C231

جدول ۷. نسبت‌های وزنی طرح‌های اختلاط مورد بررسی

طرح اختلاط	شاهد	دوده سیلیسی و الیافی	دوده سیلیسی و الیافی	دوده سیلیسی و الیافی	دوده سیلیسی و الیافی
معرف طرح اختلاط	RE	SF0.9-5	SF0.9-7.5	SF1.8-5	SF1.8-7.5
سیمان (کیلوگرم بر متر مکعب)	٤٠٠	٤٠٠	٤٠٠	٤٠٠	٤٠٠
دوده سیلیس (کیلوگرم بر متر مکعب)	٠	٢١,٠٥	٢١,٠٥	٢١,٠٥	٣٢,٤٣
مصالح سنگی ریزدانه (٠-٥ میلی متر) (کیلوگرم بر متر مکعب)	١٠٦٨	١٠٦٨	١٠٦٨	١٠٦٨	١٠٦٨
مصالح سنگی درشت دانه ریز (٥-١٢ میلی متر) (کیلوگرم بر متر مکعب)	٤٤٥	٤٤٥	٤٤٥	٤٤٥	٤٤٥
مصالح سنگی درشت دانه متوسط (١٢-١٩ میلی متر) (کیلوگرم بر متر مکعب)	٢٦٦	٢٦٦	٢٦٦	٢٦٦	٢٦٦
آب (کیلوگرم بر متر مکعب)	١٨٠	١٨٠	١٨٠	١٨٠	١٨٠
فوق روان کننده (کیلوگرم بر متر مکعب)	١,٤	١,٤	١,٤	١,٤	١,٤
الیاف (کیلوگرم بر متر مکعب)	٠	٠,٩	٠,٩	١,٨	١,٨

۲-۳- روش‌های آزمایشگاهی

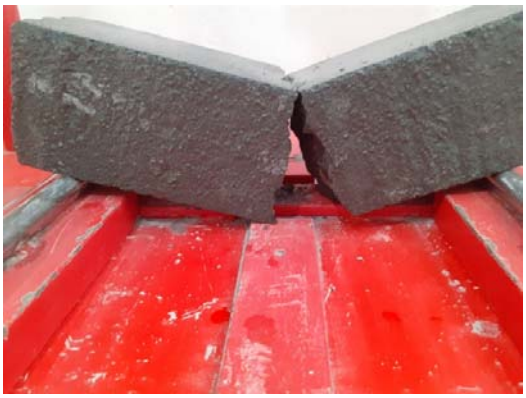
خصوصیات مقاومتی بتن سخت شده شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیر مستقیم و مقاومت خمشی در طرح‌های اختلاط بتن مورد نظر در این تحقیق با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی مطابق با استاندارد ارزیابی گردید. در این قسمت جزئیات روش‌های به کار گرفته شده بررسی می‌گردد. مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی با استفاده از روش ASTM C39 و آزمایش بر روی آزمونه‌های استوانه‌ای تعیین گردید. در این تحقیق از استوانه‌ای ۱۰۰X۲۰۰ میلیمتر استفاده شده است. تعداد ۳ استوانه از هر طرح اختلاط ساخته شده و تا زمان رسیدن به سن ۲۸ روزه، در حوضچه‌های عمل آوری مطابق با شرایط استاندارد نگهداری گردید. اعمال بارگذاری بر روی آزمونه‌های استوانه‌ای، با استفاده از دستگاه جک فشاری با ظرفیت ۲۰۰ تن صورت گرفت. در شکل ۲، آزمونه‌های استوانه‌ای و ارزیابی مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی نشان داده شده است.

شکل ۲. ارزیابی مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی مطابق با استاندارد ASTM C39

همچنین مقاومت کششی غیر مستقیم مخلوط‌های بتنی با استفاده از روش آزمایش استاندارد ASTM C496 تعیین گردید. در این روش آزمونه‌های استوانه ای ۱۰۰x۲۰۰ میلیمتر ساخته شده و سپس تا زمان رسیدن به سن ۲۸ روزه در شرایط استاندارد نگهداری گردید. تعداد ۳ آزمونه از هر طرح اختلاط ساخته شده و میانگین نتایج مد نظر قرار گرفت. بارگذاری بر روی آزمونه‌های استوانه‌ای به منظور تعیین مقاومت کششی غیر مستقیم با استفاده از دستگاه جک فشاری، همانند آزمایش ارزیابی مقاومت فشاری، صورت گرفت. در شکل ۳ آزمونه‌های استوانه‌ای و ارزیابی مقاومت کششی غیر مستقیم مخلوط‌های بتنی مورد نظر نشان داده شده است.

شکل ۳. ارزیابی مقاومت کششی دو نیم شدن مخلوط‌های بتنی مطابق با استاندارد ASTM C496

مقاومت خمشی (مدول گسیختگی خمشی) مخلوط‌های بتنی با استفاده از روش استاندارد ASTM C78 ارزیابی گردید. در این روش تیرهای بتنی با ابعاد ۳۵۰x۱۰۰x۱۰۰ میلیمتر و با طول موثر ۳۰۰ میلیمتر ساخته شده و به مدت ۲۸ روز در شرایط استاندارد عمل آوری گردید. تعداد ۳ تیر از هر طرح اختلاط ساخته شده و میانگین نتایج مد نظر قرار گرفت. بارگذاری خمشی با استفاده از دستگاه جک خمشی با ظرفیت ۶۰ تن انجام گرفت. شکل ٤ تیرهای بتنی گسیخته شده تحت بارگذاری خمشی در این تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل ٤. ارزیابی مقاومت خمشی مخلوط های بتنی مطابق با استاندارد ASTM C78

در ادامه جذب آب مخلوط‌های بتنی با استفاده از روش آزمایشگاهی مطابق با استاندارد BS-1881-122 تعیین گردید. در این روش آزمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۵۰x۱۵۰x۱۵۰ میلیمتر ساخته شد. تعداد ۳ آزمونه از هر طرح اختلاط ساخته شده و میانگین نتایج در نظر گرفته شده است. پس از ساخت آزمونه‌ها و نگهداری هر آزمونه در حوضچه‌های عمل آوری مطابق با استاندارد به مدت ۲۸ روز، آزمونه‌ها در گرمخانه به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد نگهداری گردید. پس از آن، آزمونه‌ها در شرایط دمایی استاندارد به مدت ۲٤ ساعت خنک شده است. سپس وزن آزمونه ثبت شده و پس از آن آزمونه‌ها در داخل آب به مدت ۳۰ دقیقه غوطه ور شده است. وزن آزمونه پس از غوطه وری در آب ثبت می‌گردد. میزان جذب آب هر آزمونه نسبت به وزن خشک آن محاسبه شده و میانگین نتایج در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۵ آزمونه‌های مکعبی در آزمایش ارزیابی جذب آب بتن مشاهده می‌شود.

شکل ۵. آزمونه‌های مکعبی جهت ارزیابی جذب آب بتن مطابق با استاندارد BS-1881-122

همچنین آزمایش تعیین عمق نفوذ پذیری بتن تحت فشار آب با استفاده از روش استاندارد BS EN 12390-8 تعیین گردید. در این روش از آزمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۵۰X۱۵۰X۱۵۰ میلیمتر در آزمایش استفاده شده است. تعداد سه آزمونه از هر طرح اختلاط ساخته شده و میانگین نتایج در نظر گرفته شد. آزمونه‌ها پس از ساخت به مدت ۲۸ روز در حوضچه‌های عمل آوری مطابق با استاندارد نگه‌داری شده و سپس مورد آزمایش قرار گرفته است. هر آزمونه به مدت ۷۲ ساعت تحت فشار آب به میزان ۱۵۰ کیلو پاسکال قرار گرفت. سپس عمق نفوذ آزمونه مطابق با استاندارد تعیین گردید. در شکل ٦ ارزیابی عمق نفوذ پذیری بتن تحت فشار آب مشاهده می‌گردد.

شکل ٦. آزمونه‌های مکعبی جهت ارزیابی جذب آب بتن مطابق با استاندارد BS EN 12390-8

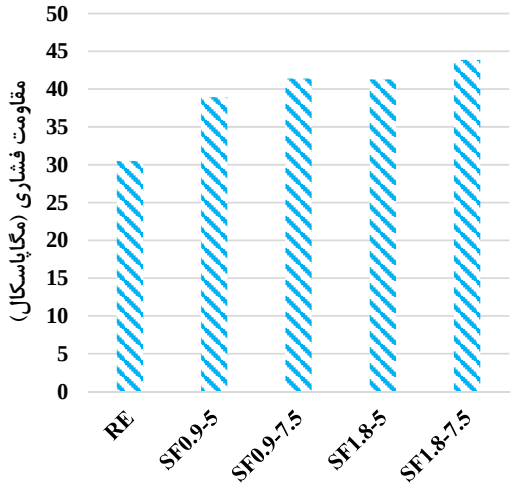
۳- تحلیل و بررسی

در این قسمت نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده به منظور ارزیابی مشخصات مقاومتی و نفوذ پذیری مخلوط‌های بتنی شاهد و حاوی دوده سیلیس و الیاف ماکرو پلی پروپیلن در مقادیر مصرف مختلف ارائه شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

۳-۱- خصوصیات مقاومتی

در شکل ۷ نتایج مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی شاهد و حاوی دوده سیلیس و الیاف ماکرو پلی پروپیلن در مقادیر مصرف مختلف مشاهده می‌شود. بطورکلی با افزودن دوده سیلیس و الیاف ماکرو پلی پروپیلن، مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی افزایش می‌یابد. مقاومت فشاری طرح‌های اختلاط SF0.9-5، SF0.9-7.5، SF1.8-5 و SF1.8-7.5 نسبت به طرح اختلاط RE (شاهد) به ترتیب به میزان ۲٦، ۳۵، ۳۵ و ٤٤ درصد افزایش یافته است. در تحقیقات گذشته دیده شده است که افزودن الیاف ماکرو پلی پروپیلن تاثیر نامحسوسی بر تغییر مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی دارد. از این جهت، افزایش مقاومت به وجود آمده در مخلوط‌های بتنی به میزان زیادی وابسته به دوده سیلیس است. با افزودن دوده سیلیس به مخلوط‌های بتنی حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن، از میزان تخلخل مخلوط بتنی کاسته می‌شود. این موضوع به دلیل ذرات بسیار ریز دوده سیلیس است. همچنین ماتریس سیمان و سنگدانه نیز به دلیل حضور ماده دوده سیلیس بهبود می‌یابد. در نتیجه میزان مقاومت مخلوط بتنی حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن تحت تنش‌های فشاری افزایش می‌یابد. با توجه به این موضوع می‌توان استنباط کرد که اثر مثبت دوده سیلیس در کاهش میزان تخلخل بتن و بهبود ماتریس سیمان و سنگدانه آن، باعث افزایش چشمگیر مقاومت فشاری می‌گردد. در نتیجه می‌توان گفت دوده سیلیس تاثیر محسوسی بر افزایش مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن مورد استفاده در روسازی‌های بتنی دارد. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که با افزودن بیشتر دوده سیلیس از ۵ به ۷,۵ درصد در مخلوط‌های بتنی حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن به میزان ۰,۹ و ۱,۸ کیلوگرم بر متر مکعب، میزان مقاومت فشاری بتن بیشتر افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، روند افزایشی مقاومت فشاری با افزودن بیشتر ماده دوده سیلیس ادامه می‌یابد. این موضوع به این معناست که با افزودن بیشتر دوده سیلیس، حجم بیشتری از آن به منظور کاهش بیشتر تخلخل و بهبود ماتریس سیمان و سنگدانه وجود دارد. از این جهت میزان تنش فشاری قابل تحمل بتن حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن با افزایش میزان

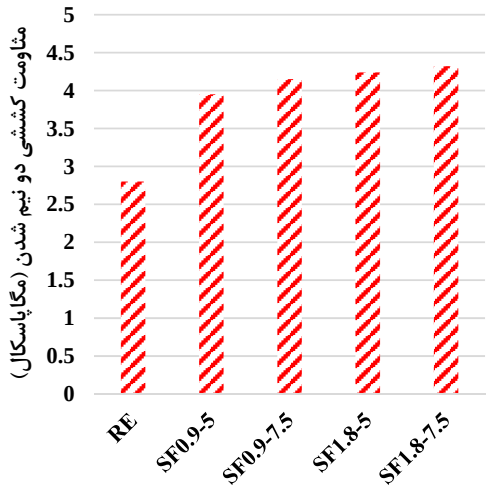
مصرف دوده سیلیس افزایش می‌یابد. از طرفی، با بررسی بیشتر نتایج مشاهده می‌شود که با ثابت در نظر گرفتن میزان دوده سیلیس در طرح‌های اختلاط مورد بررسی، با افزایش میزان الیاف ماکرو پلی پروپیلن، مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی افزایش می‌یابد. همانطور که در قسمت‌های قبل ذکر گردید، در تحقیقات گذشته دیده شده است که الیاف ماکرو پلی پروپیلن تاثیر نامحسوسی بر مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی داشته و در مواردی باعث افزایش مقاومت فشاری می‌گردد. علت افزایش مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن، می تواند به علت بهبود قابلیت جذب انرژی و سختی بتن حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن بوده که باعث افزایش قابلیت باربری بتن تحت تنش‌های فشاری می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان گفت وجود دوده سیلیس باعث بهبود تاثیر مثبت الیاف بر مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی می‌گردد. با این حال، نتایج نشان می‌دهد که اثر مثبت دوده سیلیس در افزایش مقاومت فشاری مخلوط بتنی، از اثر مثبت الیاف بیشتر است. به عبارت دیگر دوده سیلیس باعث چشمگیر شدن اثر الیاف ماکرو پلی پروپیلن در افزایش مقاومت فشاری بتن می‌شود.



شکل ۷. مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی حاوی دوده سیلیس و الیاف ماکرو پلی پروپیلن در مقادیر مصرف مختلف

شکل ۸ نتایج مقاومت کششی دو نیم شدن مخلوط‌های بتنی شاهد و حاوی دوده سیلیس و الیاف ماکرو پلی پروپیلن در مقادیر مصرف مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده دیده می‌شود که افزودن دوده سیلیس باعث افزایش مقاومت کششی دو نیم شدن مخلوط‌های بتنی حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن می‌شود. مقاومت کششی دو نیم شدن طرح‌های اختلاط SF0.9-5، SF0.9-7.5، SF1.8-5 و SF1.8-7.5 نسبت به طرح اختلاط RE (شاهد) به ترتیب به میزان ۴۱، ۴۸، ۵۱ و ۵۴ درصد افزایش می‌یابد. افزایش مقاومت کششی مخلوط‌های بتن حاوی دوده سیلیس و الیاف ماکرو پلی پروپیلن، متاثر از وجود هر دو ماده افزودنی است. در تحقیقات گذشته دیده شده است که افزودن الیاف ماکرو پلی پروپیلن، باعث افزایش مقاومت کششی دو نیم شدن مخلوط‌های بتنی می‌شود. از طرفی با افزودن دوده سیلیس، از تخلخل مخلوط بتنی کاسته شده و همچنین ماتریس سیمان و سنگدانه نیز بهبود می‌یابد. در نتیجه، قابلیت باربری مخلوط بتنی تحت باربری کششی افزایش می‌یابد. با این حال، با توجه به شدت افزایش مقاومت کششی دو نیم شدن مخلوط‌های بتنی حاوی دوده سیلیس و الیاف ماکرو پلی پروپیلن، مشاهده می‌گردد که تاثیر وجود دوده سیلیس در افزایش مقاومت کششی دو نیم شدن مخلوط‌های بتنی حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن چشمگیر است. به عبارت دیگر، دوده سیلیس باعث افزایش اثر مثبت الیاف ماکرو پلی پروپیلن در افزایش مقاومت کششی دو نیم شدن بتن می‌گردد. با ثابت در نظر گرفتن هر یک از این مواد افزودنی و بررسی تاثیر ماده دیگر، مشاهده می‌گردد که اثر الیاف در افزایش مقاومت کششی دو نیم شدن بتن از اثر دوده سیلس در افزایش این مشخصه مقاومتی بتن بیشتر است. این موضوع به علت تاثیر بیشتر الیاف در افزایش تحمل باربری مخلوط بتنی تحت تنش‌های کششی، نسبت به دوده سیلیس است. با بررسی بیشتر نتایج دیده می‌شود که افزایش میزان مصرف دوده سیلیس باعث افزایش بیشتر مقاومت کششی دو نیم شدن مخلوط‌های بتنی حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن می‌شود. به بیان دیگر، با افزایش درصد دوده سیلس، روند افزایشی

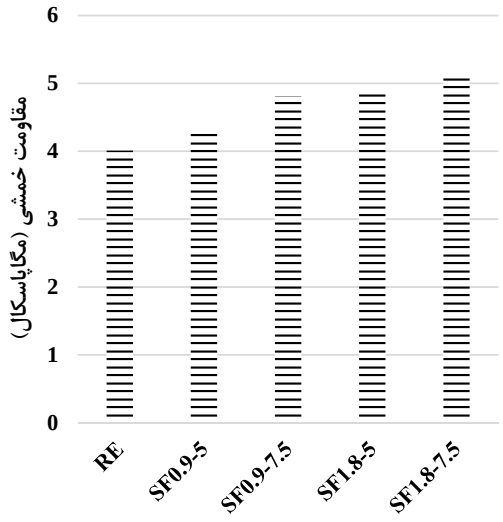
مقاومت کششی دو نیم شدن مخلوط‌های بتنی ادامه می‌یابد. به عبارت دیگر مصرف بیشتر دوده سیلیس منجر به کاهش تخلخل و بهبود ماتریس سیمان و سنگدانه می‌شود. از این جهت، قابلیت باربری مخلوط‌های بتنی با مصرف بیشتر دوده سیلیس افزایش بیشتری می‌یابد. با توجه به این موضوع، می‌توان عنوان کرد که میزان مصرف ماده دوده سیلیس تاثیر چشمگیری بر تغییرات مقاومت کششی دو نیم شدن مخلوط‌های بتنی حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن دارد.



شکل ۸ مقاومت کششی دو نیم شدن مخلوط های بتنی حاوی دوده ی سیلیس و الیاف ماکرو پلی پروپیلن در مقادیر مصرف مختلف

شکل ۹ مقادیر مقاومت خمشی مخلوط‌های بتنی شاهد و حاوی دوده سیلیس و الیاف ماکرو پلی پروپیلن در مقادیر مصرف مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده دیده می‌شود که افزودن دوده سیلیس باعث افزایش مقاومت خمشی مخلوط‌های بتنی حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن در مقادیر مصرف مختلف می‌شود. مقاومت خمشی طرح‌های اختلاط SF0.9-5، SF0.9-7.5، SF1.8-5 و SF1.8-7.5 نسبت به طرح اختلاط RE (شاهد) به ترتیب به میزان ۸، ۲۰، ۲۲ و ۲۷ درصد افزایش می‌یابد. همانند تغییرات مقاومت کششی دو نیم شدن، افزایش مقاومت خمشی مخلوط‌های بتنی حاوی دوده سیلیس و الیاف ماکرو پلی پروپیلن متاثر از هر دو ماده است. با افزودن الیاف به مخلوط‌های بتنی، قابلیت جذب انرژی و مقاومت کششی بتن افزایش یافته، در نتیجه، مقاومت مخلوط بتنی تحت تنش‌های خمشی افزایش می‌یابد. از طرفی افزودن دوده سیلیس منجر به کاهش تخلخل مخلوط بتنی و بهبود ماتریس سیمان و سنگدانه در این مخلوط‌ها شده است. در نتیجه، مقاومت خمشی مخلوط‌های بتنی حاوی دوده سیلیس افزایش می‌یابد. با ثابت در نظر گرفتن اثر الیاف ماکرو پلی پروپیلن، مشاهده می‌گردد که افزایش میزان مصرف دوده سیلیس باعث افزایش بیشتر مقاومت خمشی بتن می‌گردد. به عبارت دیگر، با افزایش درصد دوده سیلیس در مخلوط‌های بتنی، میزان مقاومت خمشی بتن بیشتر افزایش می‌یابد. بررسی بیشتر نتایج نشان می‌دهد که با ثابت در نظر گرفتن هر یک از مواد دوده سیلیس و الیاف ماکرو پلی پروپیلن و بررسی اثر ماده دیگر، اثر الیاف ماکرو پلی پروپیلن در افزایش مقاومت خمشی بتن بیشتر از اثر دوده سیلیس در افزایش این مشخصه مقاومتی است. به عبارت دیگر، اثر مثبت الیاف ماکرو پلی پروپیلن از اثر مثبت ماده دوده سیلیس در افزایش مقاومت خمشی بتن بیشتر است.

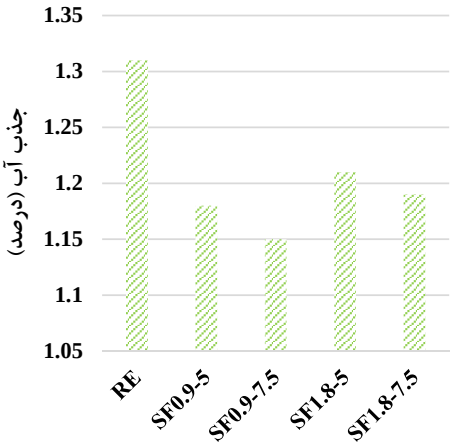
با بررسی نتایج به دست آمده در این قسمت، می توان گفت افزودن دوده سیلیس به مخلوط‌های بتنی حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن باعث افزایش چشمگیر مقاومت فشاری، کششی دو نیم شدن و مقاومت خمشی می‌گردد. همچنین مشاهده می‌شود که میزان مصرف دوده سیلیس تاثیر چشمگیری بر تغییر رفتار خصوصیات مقاومتی طرح اختلاط‌های بررسی شده دارد. در بین خصوصیات مقاومتی ارزیابی شده، دوده سیلیس بیشترین تاثیر را بر مقاومت کششی دو نیم شدن بتن داشته و همچنین تغییرات مقاومت فشاری بتن از مقاومت خمشی آن بیشترشده است.



شکل ۹. مقاومت خمشی مخلوط‌های بتنی حاوی دوده سیلیس و الیاف ماکرو پلی پروپیلن در مقادیر مصرف مختلف

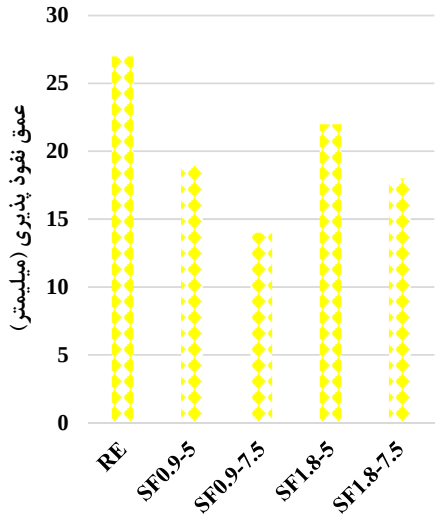
۳-۲- خصوصیات نفوذ پذیری

شکل ۱۰ نتایج جذب آب مخلوط‌های بتنی شاهد و حاوی دوده سیلیس و الیاف ماکرو پلی پروپیلن در مقادیر مصرف مختلف را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که تغییر رفتار جذب آب مخلوط‌های بتنی حاوی دوده سیلیس و الیاف ماکرو پلی پروپیلن متفاوت است. با افزودن دوده سیلیس و الیاف به مخلوط بتنی شاهد، میزان جذب آب مخلوط بتنی SF0.9-5 به مقدار ۱۰ درصد کاهش می‌یابد. دوده سیلیس باعث کاهش مقدار منافذ مخلوط بتنی می‌گردد. در نتیجه فضای خالی کمتری جهت جذب آب در بتن وجود دارد. به عبارت دیگر، قابلیت جذب آب حجم ثابتی از مخلوط بتنی کاهش می‌یابد. در نتیجه با افزودن دوده سیلیس، قابلیت جذب آب بتن کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، با افزودن الیاف به مخلوط بتنی، بخشی از ماتریس سیمان و سنگدانه با الیاف ماکرو پلی پروپیلن پر می‌گردد. الیاف باعث افزایش تخلخل در مخلوط بتنی و به دنبال آن افزایش قابلیت جذب آب در بتن می‌گردد. نتیجه به دست آمده نشان می‌دهد اثر مثبت دوده سیلیس بر اثر منفی الیاف ماکرو پلی پروپیلن غلبه کرده و منجر به کاهش جذب آب مخلوط بتنی حاوی دوده سیلیس و الیاف ماکرو پلی پروپیلن نسبت به طرح اختلاط بتن شاهد می‌گردد. در نتیجه می‌توان گفت دوده سیلیسی باعث بهبود رفتار جذب آب مخلوط‌های بتنی حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که با ثابت در نظر گرفتن الیاف ماکرو پلی پروپیلن، افزایش دوده سیلیس منجر به کاهش بیشتر جذب آب مخلوط‌های بتنی حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن می‌گردد. میزان جذب آب طرح‌های اختلاط SF0.9-5، SF0.9-7.5، SF1.8-5 و SF1.8-7.5 نسبت به طرح اختلاط RE (شاهد) به ترتیب به میزان ۱۰، ۱۲، ۷ و ۹ درصد کاهش می‌یابد. این موضوع حاکی از آن است که افزایش میزان دوده سیلیس در مخلوط بتنی باعث کاهش بیشتر منافذ و تخلخل بتن می‌گردد. از این جهت، با افزایش میزان مصرف دوده سیلیس در مخلوط‌های بتنی حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن، جذب آب این مخلوط‌ها بیشتر کاهش می‌یابد. با ثابت در نظر گرفتن میزان دوده سیلیس در طرح‌های اختلاط بتن، دیده می‌شود که با افزایش میزان الیاف ماکرو پلی پروپیلن، میزان جذب آب مخلوط‌های بتنی افزایش می‌یابد. این موضوع به دلیل آن است که با افزایش میزان مصرف الیاف، تخلخل مخلوط‌های بتنی ناشی از افزایش تعداد الیاف در آن، بیشتر شده، در نتیجه میزان جذب آب مخلوط بتنی افزایش می‌یابد.



شکل ۱۰. جذب آب مخلوط‌های بتنی حاوی دوده سیلیس و الیاف ماکرو پلی پروپیلن

شکل ۱۱ نتایج عمق نفوذ مخلوط‌های بتنی شاهد و حاوی دوده سیلیس و الیاف ماکرو پلی پروپیلن در مقادیر مصرف مختلف را نشان می‌دهد. این نتایج حاکی از رفتار متفاوت عمق نفود مخلوط‌های بتنی متاثر از افزودن دوده سیلیس و الیاف ماکرو پلی پروپیلن است. با افزودن میکرو سیلیس و الیاف ماکرو پلی پروپیلن به مخلوط بتنی شاهد، میزان عمق نفوذ مخلوط بتنی SF0.9-5 به میزان ۳۰ درصد کاهش می‌یابد. همانطور که قبلا ذکر گردید، دوده سیلیس باعث کاهش میزان منافذ مخلوط بتنی و تخلخل در آن می‌گردد. از این جهت قابلیت نفوذ پذیری بتن متاثر از این موضوع کاهش می‌یابد. از طرفی الیاف ماکرو پلی پروپیلن منجر به افزایش میزان تخلخل در بتن شده و اثر منفی بر نفوذ پذیری بتن دارد. به عبارت دیگر با افزودن الیاف ماکرو پلی پروپیلن به مخلوط‌های بتنی، نفوذ پذیری بتن افزایش می‌یابد. با توجه به این موارد و همچنین نتیجه به دست آمده، مشاهده می‌گردد که اثر مثبت دوده سیلیس در کاهش نفوذ پذیری بتن بر اثر منفی الیاف ماکرو پلی پروپیلن در افزایش نفوذ پذیری آن غلبه کرده، در نتیجه میزان عمق نفوذ مخلوط بتنی حاوی دوده سیلیس و الیاف ماکرو پلی پروپیلن کاهش می‌یابد. همچنین نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با ثابت در نظر گرفتن میزان الیاف ماکرو پلی پروپیلن، طرح‌های اختلاط مورد بررسی، با افزایش میزان مصرف دوده سیلیس، میزان عمق نفوذ مخلوط‌های بتنی حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن بیشتر کاهش می‌یابد. میزان جذب آب طرح‌های اختلاط SF0.9-5، SF0.9-7.5، SF1.8-5 و SF1.8-7.5 نسبت به طرح اختلاط RE (شاهد) به ترتیب به میزان ۳۰، ۴۸، ۱۹ و ۳۳ درصد کاهش می‌یابد. همچنین مشخص گردید با ثابت در نظر گرفتن میزان دوده سیلیس در طرح اختلاط‌های بتن حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن، با افزایش میزان الیاف، عمق نفوذ بتن افزایش می‌یابد. این موضوع می‌تواند ناشی از آن باشد که با افزایش میزان مصرف الیاف ماکرو پلی پروپیلن در مخلوط بتنی، تخلخل بتن بیشتر شده، در نتیجه نفوذ پذیری آن افزایش می یابد.



شکل ۱۱. عمق نفوذ پذیری مخلوط‌های بتنی حاوی دوده سیلیس و الیاف ماکرو پلی پروپیلن

با توجه به نتایج به دست آمده در این قسمت می‌توان نتیجه گرفت افزودن دوده سیلیس باعث تغییر چشمگیر رفتار نفوذ پذیری مخلوط‌های بتنی حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن می‌گردد. علاوه بر این، دوده سیلیس تاثیر بیشتری بر عمق نفوذ پذیری بتن تحت فشار نسبت به جذب آب آن دارد. همچنین میزان مصرف دوده سیلیس تاثیر محسوسی بر تغییر رفتار نفوذ پذیری بتن دارد.

٤- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به ارزیابی اثر دوده سیلیس بر مشخصات مقاومتی و نفوذ پذیری روسازی‌های بتنی هوادار حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن در مقادیر مصرف مختلف پرداخته است. مهم ترین نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر به شرح ذیل است:

-افزودن دوده سیلیس منجر به تغییر چشمگیر رفتار مقاومتی مخلوط‌های بتنی حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن در مقادیر مصرف شده است.

-مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن، با افزودن دوده سیلیس حداکثر تا میزان ٤٤ درصد افزایش یافته، همچنین میزان مصرف دوده سیلیس تاثیر زیادی بر تغییرات مقاومت فشاری بتن حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن دارد.

-با افزودن دوده سیلیس به مخلوط‌های بتنی حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن، مقاومت کششی دو نیم شدن این مخلوط‌ها، حداکثر تا میزان ٥٤ درصد افزایش یافته و میزان مصرف (درصد) دوده سیلیس باعث تغییر چشمگیر تغییرات مقاومت کششی دو نیم شدن بتن می‌شود.

-در مخلوط‌های بتنی حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن در مقادیر مصرف مختلف، افزودن دوده سیلیس باعث افزایش مقاومت خمشی بتن حداکثر تا ۲۷ مگاپاسکال شد. همچنین مشاهده شد که میزان مصرف دوده سیلیس تاثیر محسوسی بر تغییر رفتار مقاومت خمشی مخلوط‌های بتنی حاوی این الیاف دارد.

-در بین خصوصیات مقاومتی مخلوط‌های بتنی حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن، دوده سیلیس بیشترین تاثیر را بر تغییر مقاومت کششی دو نیم شدن بتن داشته و مقاومت خمشی دارای کمترین میزان تغییر بوده است.

-افزودن دوده سیلیس باعث تغییر چشمگیر رفتار نفوذ پذیری مخلوط‌های بتنی حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن در مقادیر مصرف مختلف شده است.

-در مخلوط‌های بتنی حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن در مقادیر مصرف مختلف، افزودن دوده سیلیس باعث کاهش جذب آب بتن حداکثر تا میزان ۱۲ درصد شد. همچنین میزان مصرف دوده سیلیس تاثیر محسوسی بر تغییرات جذب آب بتن‌های حاوی این الیاف داشته است.

-افزودن دوده سیلیس به مخلوط‌های بتنی حاوی الیاف ماکر پلی پروپیلن در مقادیر مصرف مختلف، باعث کاهش چشمگیر عمق نفوذ پذیری بتن حداکثر تا میزان ٤٨ درصد شده است. درصد مصرف دوده سیلیس نیز تاثیر چشمگیری بر تغییرات عمق نفوذ پذیری بتن های حاوی این الیاف داشته است.

-در بین خصوصیات نفوذ پذیری مخلوط‌های بتنی حاوی الیاف ماکرو پلی پروپیلن، دوده سیلیس تاثیر بیشتری بر تغییرات عمق نفوذ پذیری نسبت به تغییرات جذب آب دارد.

۵- مراجع

-Aliha, M., Ziari, H., Sobhani Fard, E., & Jebalbarezi Sarbijan, M. (2021). Heterogeneity effect on fracture parameters of a multilayer asphalt pavement structure containing a top-down crack and subjected to moving traffic loading. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, *44*(5), 1349-1371.

-Arce, G. A., Noorvand, H., Hassan, M. M., Rupnow, T., & Dhakal, N. (2021). Feasibility of low fiber content PVA-ECC for jointless pavement application. *Construction and Building Materials*, *268*, 121131.

-Bertelsen, I., Ottosen, L., & Fischer, G. (2020). Influence of fibre characteristics on plastic shrinkage cracking in cement-based materials: A review. *Construction and Building Materials*, *230*, 116769.

-Chen, J., Wang, H., & Xie, P. (2020). Finite element modeling of mechanical responses of concrete pavement with partial depth repair. *Construction and Building Materials*, *240*, 117960.

-Chen, Y., Cen, G., & Cui, Y. (2018). Comparative study on the effect of synthetic fiber on the preparation and durability of airport pavement concrete. *Construction and Building Materials*, *184*, 34-44.

-Delatte, N. (2018). *Concrete pavement design, construction, and performance*: Crc Press.

-Geremew, A., De Winne, P., Demissie, T. A., & De Backer, H. (2021). Treatment of natural fiber for application in concrete pavement. *Advances in Civil Engineering*, *2021*, 1-13.

-Huang, Y. H. (2004). *Pavement analysis and design* (Vol. 2): Pearson Prentice Hall Upper Saddle River, NJ.

-Jebalbarezi, M., ziari, H., Mohammad Aliha, M. R., mojaradi, b., & sobhanifard, E. (2020). Simulation of heterogeneous asphalt mixture using random aggregate generation and packing algorithm. *Journal of Transportation Research*.

-Khan, M., & Ali, M. (2018). Effectiveness of hair and wave polypropylene fibers for concrete roads. *Construction and Building Materials*, *166*, 581-591.

-Khan, M., Rehman, A., & Ali, M. (2020). Efficiency of silica-fume content in plain and natural fiber reinforced concrete for concrete road. *Construction and Building Materials*, *244*, 118382.

-Kurda, R., Silvestre, J. D., & de Brito, J. (2018). Life cycle assessment of concrete made with high volume of recycled concrete aggregates and fly ash. *Resources, Conservation and Recycling*, *139*, 407-417.

-Liu, Q., Xiao, J., & Singh, A. (2021a). Plastic shrinkage and cracking behavior of mortar containing recycled sand from aerated blocks and clay bricks. *Sustainability*, *13*(3), 1096.

-Liu, Q., Xiao, J., & Singh, A. (2021b). Quantification of plastic shrinkage and cracking in mortars containing different recycled powders using digital image correlation technique. *Construction and Building Materials*, *293*, 123509.

-Madhkhan, M., Azizkhani, R., & Harchegani, M. T. (2012). Effects of pozzolans together with steel and polypropylene fibers on mechanical properties of RCC pavements. *Construction and Building Materials*, *26*(1), 102-112.

-Mallick, R. B., & El-Korchi, T. (2008). *Pavement engineering: principles and practice*: CRC Press.

-Mehta, A., & Ashish, D. K. (2020). Silica fume and waste glass in cement concrete production: A review. *Journal of Building Engineering*, *29*, 100888.

-Miri, A., Ehsani, R., & Tehrani, F. M. (2021). A Numerical Simulation of the Electrical Resistivity of Concrete Pavements Containing Steel Fibers *Airfield and Highway Pavements 2021*, 356-364.

-Sayahi, F., Emborg, M., Hedlund, H., Cwirzen, A., & Stelmarczyk, M. (2021). The severity of plastic shrinkage cracking in concrete: a new model. *Magazine of Concrete Research*, *73*(6), 315-324.

-Shyam, A., Anwar, A., & Ahmad, S. A. (2017). A Literature review on study of silica fume as partial replacement of cement in concrete. *International Journal of Advanced Engineering, Managment and Science (IJAEMS)*, *3*, 250-253.

-Toghroli, A., Mehrabi, P., Shariati, M., Trung, N. T., Jahandari, S., & Rasekh, H. (2020). Evaluating the use of recycled concrete aggregate and pozzolanic additives in fiber-reinforced pervious concrete with industrial and recycled fibers. *Construction and Building Materials*, *252*, 118997.

-Wtaife, S., Alsabbagh, A., Essa, T., Alshammari, E., Shaban, A., & Suksawang, N. (2018). Analysis of flexural capacity of fiber reinforced concrete pavements. *International Journal of Technology and Engineering Studies*, *4*(6), 203-210.

-Wyrzykowski, M., Ghourchian, S., Münch, B., Griffa, M., Kaestner, A., & Lura, P. (2021). Plastic shrinkage of mortars cured with a paraffin-based compound–Bimodal neutron/X-ray tomography study. *Cement and Concrete Research*, *140*, 106289.

-Zarei, A., Rooholamini, H., & Ozbakkaloglu, T. (2022). Evaluating the properties of concrete pavements containing crumb rubber and recycled steel fibers using response surface methodology. *International Journal of Pavement Research and Technology*, *15*(2), 470-484.

-Zhang, H., & Xiao, J. (2021). Plastic shrinkage and cracking of 3D printed mortar with recycled sand. *Construction and Building Materials*, *302*, 124405.

-Ziari, H., Aliha, M. R. M., Fard, E. S., & Sarbijan, M. J. (2022). Mixed mode I+ II fracture parameters and cracking trajectory of heterogeneous multilayer pavement structure containing reflective crack. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, *45*(10), 2958-2977.

-Moelich, G., Van Zyl, J., Rabie, N., & Combrinck, R. (2021). The influence of solar radiation on plastic shrinkage cracking in concrete. *Cement and Concrete Composites*, *123*, 104182.

-Nochaiya, T., Wongkeo, W., & Chaipanich, A. (2010). Utilization of fly ash with silica fume and properties of Portland cement–fly ash–silica fume concrete. *Fuel*, *89*(3), 768-774.

-Ortega-Lopez, V., Fuente-Alonso, J. A., Santamaria, A., San-José, J. T., & Aragon, A. (2018). Durability studies on fiber-reinforced EAF slag concrete for pavements. *Construction and Building Materials*, *163*, 471-481.

-Paluri, Y., Noolu, V., Mudavath, H., & Kumar Pancharathi, R. (2021). Flexural fatigue behavior of steel fiber-reinforced reclaimed asphalt pavement–based concrete: an experimental study. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, *26*(1), 04020053.

-Ramachandran, G. (2018). Latest trends in civil engineering. *Curr Trends Civ Struct Eng*.

-Rezaei-Tarahomi, A., Ceylan, H., Gopalakrishnan, K., Kim, S., Kaya, O., & Brill, D. R. (2019). Artificial neural network models for airport rigid pavement top-down critical stress predictions: Sensitivity evaluation *Airfield and Highway Pavements 2019: Innovation and Sustainability in Highway and Airfield Pavement Technology* (pp. 302-312): American Society of Civil Engineers Reston, VA.

-Rong, H., Dong, W., Yuan, W., & Zhou, X. (2021). An improved ring test to assess cracking resistance of concrete under restrained shrinkage. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, *113*, 102976.

-Rooholamini, H., Hassani, A., & Aliha, M. (2018). Evaluating the effect of macro-synthetic fibre on the mechanical properties of roller-compacted concrete pavement using response surface methodology. *Construction and Building Materials*, *159*, 517-529.

-Sayahi, F., Emborg, M., Hedlund, H., & Cwirzen, A. (2021). Effect of steel fibres extracted from recycled tyres on plastic shrinkage cracking in self-compacting concrete. *Magazine of Concrete Research*, *73*(24), 1270-1282.

Evaluation of the Effect of Silica Fume on the Permeability Characteristics of Concrete Pavements Containing Fibers

Hassan Ziari, Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.

Ehsan Sobhani Fard, Ph.D., Student, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.

Fereidoun Omidinasab, Associate Profeesor, Department of Engineering, Lorestan University, KhoramAbad, Lorestan, Iran.

E-mail: ehsan_sobhanifard@civileng.iust.ac.ir

Received: June 2024- Accepted: September 2024

ABSTRACT

It is very important to improve the strength and permeability characteristics of concrete mixtures used in concrete pavements in order to increase the performance and durability of these pavements. Meanwhile, the use of new materials to improve these characteristics in concrete pavements becomes important. Silica fume and polypropylene macro fibers are among the types of new materials in the pavement industry. The present research has evaluated the effect of silica fume on the resistance and permeability characteristics of air-entrained concrete pavements containing macro polypropylene fibers in different amounts. In this regard, silica fume in consumption amounts of 5% and 7.5% and polypropylene macro fibers in consumption amounts of 0.9 kg/m^3 and 1.8 kg/m^3 were added to the reference concrete mixture. Also, the strength properties including compressive, splitting tensile and flexural strength and permeability properties including water absorption and penetration depth under pressure of concrete mixtures have been evaluated according to standard methods. The results indicated that silica fume significantly changes the strength and permeability properties of concrete mixtures containing fibers. With the addition of silica fume, the compressive, tensile, and flexural strength of concrete increased up to 44%, 54%, and 27%, respectively. Also, silica fume decreased the amount of water absorption and penetration depth up to 12 and 48 percent. The consumption of silica fume also had a significant effect on the change in the strength behavior and permeability of the concrete pavement. It was observed that among the strength properties, silica fume had the greatest impact on the splitting tensile strength and among its permeability properties, it had the greatest impact on the penetration depth of concrete. In addition, the change in compressive strength is greater than the flexural strength of concrete pavement.

Keywords: Polypropylene Macro Fibers, Resistance Characteristics, Silica Fume, Air-Entrained Concrete Pavements, Permeability