

تأثیر نانوسیلیس، انواع الیاف و دیگر مواد افزودنی بر نفوذپذیری بتن غلتکی

یعقوب محمدی *

استاد گروه مهندسی عمران دانشگاه محقق اردبیلی.

چکیده

این تحقیق به بررسی تأثیر افزودن نانوسیلیس، الیاف فولادی، شیشه‌ای، پلی‌پروپیلن، میکروسیلیس و سرباره آهن‌گدازی بر رفتار مکانیکی و دوام بتن غلتکی پرداخته است. نمونه‌ها با نسبت‌های مختلف نانوذرات و انواع الیاف ساخته شده و تأثیرات آن‌ها بر نفوذپذیری و مقاومت فشاری بتن مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نانوسیلیس با بهبود میکروساختار و کاهش کریستال‌های هیدروکسید کلسیم، نفوذپذیری بتن را کاهش می‌دهد. همچنین، الیاف با کاهش ترک‌ها و قطع پیوستگی حفرات، نفوذپذیری بتن را بهبود می‌بخشد. ترکیب این افزودنی‌ها منجر به بهبود چشمگیر در خواص مکانیکی و دوام بتن غلتکی شده و می‌تواند در طراحی مخلوط‌های بهینه‌تر بتن کاربرد داشته باشد. نتایج این تحقیق بر تأثیر مثبت نانوذرات و انواع الیاف در افزایش عمر مفید و عملکرد بتن تأکید می‌کند. در بررسی مخلوط‌های تک جزئی حاوی نانوسیلیس و الیاف می‌بینیم که عملکرد بتن در مقابل نفوذپذیری با ترکیب این مواد بهتر از حالت تک جزئی عمل می‌کند.

واژه‌های کلیدی: بتن غلتکی، نفوذپذیری، نانوسیلیس، افزودنی‌های بتن، میکروسیلیس، سرباره آهن‌گدازه، انواع الیاف.

۱- مقدمه

شناخته شده است که علاوه بر مقاومت بالا، هزینه‌های نگهداری را کاهش می‌دهد. RCC در دو زمینه عمده، یعنی سدها و روسازی‌ها، کاربرد دارد و در این تحقیق تنها به روسازی‌ها پرداخته شده است. تحقیقات نشان داده است که مقاومت فشاری بتن غلتکی بیشتر از بتن معمولی است، هرچند مقاومت کششی آن لزوماً بیشتر نیست. در RCC، از میلگردهای تسلیح کننده و قالب استفاده نمی‌شود که این موضوع هزینه‌ها را کاهش می‌دهد [۷]. دوام و مقاومت در برابر عوامل تخریب کننده مانند ذوب و انجماد و حملات شیمیایی از اهمیت بالایی برخوردار است [۸].

بتن مسلح به الیاف فولادی (SFRC) به ویژه در ساخت دال‌ها و کف‌های صنعتی کاربرد دارد. نتایج آزمایشگاه تحقیقاتی مهندسی سازه ارتش ایالات متحده نشان می‌دهد که دال‌های SFRC به ضخامت کمتری نسبت به دال‌های بتن خالص نیاز دارند و یکی از مزایای آن‌ها، افزایش خدمت‌پذیری و کنترل ترک‌هاست. الیاف می‌توانند از ترک‌های بزرگ جلوگیری کنند و مقاومت کششی بافت را افزایش دهند. SFRC در دال‌های مسطح که تحت بارهای زیاد قرار دارند، به دلیل افزایش سختی خمشی، مقاومت در برابر ضربه و خستگی، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۹]. افزودن نانوذرات اکسید آهن، اکسید آلومینیوم، اکسید تیتانیوم، نانوسیلیس و نانورس مونتموریلونیت به بتن معمولی، تأثیر مثبتی بر مقاومت مکانیکی و دوام آن دارد [۱۰].

نفوذ آب و محلول‌های خورنده به بتن می‌تواند آسیب جدی به سازه‌ها وارد کند. بنابراین، ارزیابی نفوذ آب به عنوان معیاری برای دوام بتن اهمیت دارد [۱۱]. روش نفوذپذیری و جذب آب سطحی برای طبقه‌بندی کیفیت بتن بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۱۲-۱۳]. نفوذپذیری و تخلخل بتن به عنوان نقاط ورود عوامل خورنده می‌تواند بر یکپارچگی سازه تأثیر بگذارد [۱۴]. کاهش مصرف منابع طبیعی، کاهش آلودگی و بهبود عملکرد بتن‌ها می‌تواند به توسعه صنعت بتن کمک کند.

نانو سیلیس به عنوان یک ماده نانو ساختار، به عنوان پرکننده و تقویت کننده در بتن عمل می‌کند و قابلیت چسبندگی و مقاومت بتن را افزایش می‌دهد. میکروسیلیس نیز از ذرات سیلیس نانومتری استخراج می‌شود و خواص مکانیکی بتن را بهبود می‌بخشد. سرباره آهنگدازی که به عنوان محصول جانبی از کارخانه‌های ذوب آهن به دست می‌آید، می‌تواند با هیدروکسید کلسیم واکنش دهد و

به دلیل شرایط جوی سرد و برفی بعضی از مناطق کشور در زمستان، نیازمند استفاده از بتن خاص مقاوم در برابر یخ‌زدگی و روش‌های پیشگیرانه است. در طراحی روسازی بتنی، باید به عوامل اقلیمی مانند دما، رطوبت و نوع بتن توجه شود تا اجرای بهینه‌ای صورت گیرد. بارگذاری تکراری و شرایط محیطی می‌تواند به تخریب روسازی منجر شود.

بتن به عنوان متداول‌ترین مصالح ساختمانی در صنعت ساختمان با تولید سالانه ۷٫۵ کیلومتر مکعب به عنوان مهم‌ترین مصالح ساختمانی شناخته می‌شود که با افزایش تولید سالیانه و نگرانی‌های زیست‌محیطی مواجه است [۱]. تولید هر تن سیمان پرتلند حدود ۰٫۸ تا ۱ تن گاز CO₂ منتشر می‌کند همچنین سالانه ۷ درصد دی‌اکسید کربن ناشی از انسان را به محیط زیست اضافه می‌کند [۲]. تولید سیمان پرتلند و صنعت بتن با اصول توسعه پایدار در تعارض است به همین خاطر توسعه پایدار و حفاظت از محیط زیست به اهداف کلیدی تبدیل شده است [۳]. پژوهشگران در تلاشند تا بتن با کیفیت بالا تولید کنند که انتشار گازهای گلخانه‌ای و نیاز به منابع طبیعی را کاهش دهد [۴]. رشد جمعیت و فعالیت‌های ساختمانی، تقاضا برای سنگ‌دانه‌های طبیعی را افزایش داده و پیش‌بینی می‌شود که این تقاضا به زودی به ۶۵ میلیارد تن برسد [۵-۶]. برای حفظ تعادل بین توسعه و مسائل زیست‌محیطی، استفاده از بتن غلتکی (RCC) به عنوان یک جایگزین پایدار مطرح شده است. این نوع روسازی مزایایی از جمله صرفه‌جویی در هزینه و زمان دارد و در کاربردهای مختلفی مانند جاده‌ها و محوطه‌های صنعتی استفاده می‌شود [۷]. بتن غلتکی و بتن مسلح به الیاف فولادی به عنوان گزینه‌های پایداری معرفی شده‌اند که می‌توانند علاوه بر بهبود خواص مکانیکی و دوام، به کاهش استفاده از منابع طبیعی و کاهش اثرات زیست‌محیطی کمک کنند. استفاده از این مواد و فناوری‌ها می‌تواند به توسعه راهکارهای جدید برای بهبود کیفیت و پایداری سازه‌های بتنی منجر شود. با وجود تحقیقات انجام شده، اطلاعات در مورد تأثیر میکروسیلیس، سرباره آهن، نانوسیلیس و الیاف بر دوام بتن محدود است. این مطالعه به بررسی تأثیر این مواد بر نفوذ پذیری و دوام بتن غلتکی روسازی پرداخته است.

بتن غلتکی یا RCC به عنوان یک گزینه پایدار برای روسازی‌ها

خواص بتن را بهبود بخشد [۱۵].

غلظتی روسازی راه استفاده شد (جدول ۱ و ۲). لازم به ذکر است که وزن مخصوص سیمان، میکروسیلیس به ترتیب ۳/۱۳ و ۲/۳۳ گرم بر سانتی متر مکعب می باشد. همچنین وزن مخصوص درشت دانه و ریزدانه به ترتیب ۲/۶۴ و ۲/۶۹ گرم بر سانتی متر مکعب می باشد.

۲- روش شناسی

۲-۱- نسبت های اختلاط

مخلوط های بتن الیافی نسبت به بتن معمولی شامل سیمان و سنگ دانه های ریز بیشتری هستند و با افزایش مقدار الیاف، کاهش اسلامپ را نشان می دهند. برای ارزیابی کارآیی این مخلوط ها، از روش های زمان مخروط اسلامپ معکوس یا وی بی استفاده می شود. برای دستیابی به یکنواختی اختلاط بتن الیافی و جلوگیری از جدایی سنگ دانه ها و گلوله شدن الیاف، باید نسبت ظاهری الیاف، درصد حجمی، اندازه و دانه بندی سنگ دانه ها و روش اضافه کردن الیاف به طور دقیق کنترل شود. همچنین، مواد افزودنی مانند پوزولان ها برای بهبود کارآیی و کنترل جمع شدگی مورد استفاده قرار می گیرند.

جدول ۱- طرح اختلاط برای بتن غلظتی

شماره اختلاط	نام اختلاط	آب (kg)	سیمان (kg)	ریزدانه (kg)	درشت دانه (kg)
۱	P1RC	۱۷۱	۳۰۷	۵۳۰	۱۳۷۱
۲	P2RC	۱۶۸	۳۱۱	۴۶۶	۱۴۴۲
۳	P3RC	۱۷۷	۳۲۰	۴۸۰	۱۴۰۵
۴	P4RC	۱۸۵	۳۴۷	۵۲۸	۱۳۲۶
۵	P5RC	۱۹۳	۳۶۰	۵۲۶	۱۳۰۵

نحوه نام گذاری به این صورت می باشد که حرف C، نشان دهنده بدون کامپوزیت بتن غلظتی و شماره طرح اختلاط، اندیس اول، نشان دهنده درصد وزنی نانو سیلیس نسبت به وزن سیمان و اندیس دوم، نشان دهنده درصد الیاف فولادی نسبت به حجم بتن می باشد. M برای میکروسیلیس، I برای سرباره آهن گدازه، G برای الیاف شیشه و P برای الیاف پلی پروپیلن با درصد های متفاوت با اندیس نشان داده شده است.

۲-۲- ملاحظات طراحی

افزودن الیاف به بتن می تواند ظرفیت کرنش، مقاومت در برابر ضربه، جذب انرژی، مقاومت خستگی و کششی را بهبود بخشد که این ویژگی ها به نوع و مقدار الیاف وابسته است. روش های طراحی بتن الیافی شامل توزیع الیاف و محاسبه نیروی کششی در SFRC هستند که تفاوت ها عمدتاً در نحوه محاسبه تنش کششی و ظرفیت لنگر باقی مانده است. الیاف می توانند ترک ها را محدود کرده و مقاومت سازه را بهبود بخشند، به ویژه در کاربردهایی که نیاز به تسلیح کششی پیوسته نیست [۱۶].

۳- ساخت نمونه های آزمایشگاهی

۳-۱- ساخت نمونه های بتن غلظتی

طبق شکل ۱ ابتدا مواد شامل شن، ماسه، آب، سیمان، نانو سیلیس، میکروسیلیس، سرباره آهن گدازه و الیاف شیشه و پلی پروپیلن فولادی را آماده می کنیم. نانو سیلیس را با یک سوم آب اختلاط مخلوط کرده تا به صورت کلوئیدی درآید. سپس در میکسر، ابتدا شن، آب و ماسه را اضافه کرده و بعد سیمان و نانو سیلیس را می ریزیم. در پایان الیاف و باقی آب را اضافه می کنیم و اختلاط را به مدت ۵ دقیقه ادامه می دهیم. بعد از اختلاط، بتن را به ظرف مخصوص منتقل کرده و با بیل و کمچه مخلوط می کنیم. سپس بتن را در قالب ها می ریزیم و روی میز ویبره قرار می دهیم تا تراکم مناسب حاصل شود. بتن باید ظرف ۴۵ دقیقه بعد از اختلاط قالب گیری شود و در هیچ یک از طرح ها از فوق روان کننده استفاده نمی شود.

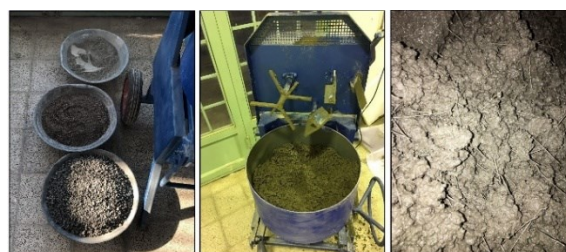
۳-۲- طرح اختلاط

در این مطالعه، میزان نفوذ پذیری بتن در مراحل مختلف بررسی شد. ابتدا ۵ طرح اختلاط برای بتن غلظتی خالص طراحی و از هر یک ۲۷ نمونه مکعبی برای آزمایش نفوذ پذیری در محیط های معمولی، کراته و سولفات ها ساخته شد. سپس، ۲۶ طرح اختلاط برای کامپوزیت های بتن غلظتی حاوی نانو سیلیس، الیاف، میکروسیلیس و سرباره آهن گدازه در نظر گرفته شد. در مجموع، ۵۴۰ نمونه مکعبی برای آزمایش نفوذ پذیری در مرحله سوم تهیه و در محیط های مختلف آزمایش شدند. از بین طرح های بتن غلظتی خالص، P2RC به عنوان پایه برای ساخت کامپوزیت های بتن

جدول ۲- طرح اختلاط برای کامپوزیت‌های بتن غلتکی حاوی نانوسیلیس، الیاف، میکروسیلیس و سرباره آهن گدازه

شماره اختلاط	نام اختلاط	الیاف شیشه (kg)	الیاف فولادی (kg)	الیاف پلی پروپیلن (kg)	نانوسیلیس (kg)	میکروسیلیس (kg)	سرباره (kg)
۱	PRCC	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	C24-RC-G0.2	۱۵/۶۹	۰	۰	۰	۰	۰
۳	C25-RC-G0.4	۳۱/۳۹	۰	۰	۰	۰	۰
۴	C26-RC-G0.6	۴۷/۰۸	۰	۰	۰	۰	۰
۵	C1-RC-N0-S33	۰	۲۵/۹	۰	۰	۰	۰
۶	C2-RC-N0-S67	۰	۵۱/۸	۰	۰	۰	۰
۷	C3-RC-N0-S100	۰	۷۸/۵	۰	۰	۰	۰
۸	C21-RC-P0.2	۰	۰	۱۵/۶۹	۰	۰	۰
۹	C22-RC-P0.4	۰	۰	۳۱/۳۹	۰	۰	۰
۱۰	C23-RC-P0.6	۰	۰	۴۷/۰۸	۰	۰	۰
۱۱	C4-RC-N5-S0	۰	۰	۰	۱/۵۵۵	۰	۰
۱۲	C8-RC-N10-S0	۰	۰	۰	۳/۱۱۰	۰	۰
۱۳	C12-RC-N15-S0	۰	۰	۰	۴/۶۶۵	۰	۰
۱۴	C16-RC-M7.5	۰	۰	۰	۰	۲۳/۳۳	۰
۱۵	C17-RC-M15	۰	۰	۰	۰	۴۶/۶۶	۰
۱۶	C18-RC-I10	۰	۰	۰	۰	۰	۳۱/۱
۱۷	C19-RC-I20	۰	۰	۰	۰	۰	۶۲/۲
۱۸	C20-RC-I30	۰	۰	۰	۰	۰	۹۳/۳
۱۹	C5-RC-N5-S33	۰	۲۵/۹	۰	۱/۵۵۵	۰	۰
۲۰	C6-RC-N5-S67	۰	۵۱/۸	۰	۱/۵۵۵	۰	۰
۲۱	C7-RC-N5-S100	۰	۷۸/۵	۰	۱/۵۵۵	۰	۰
۲۲	C9-RC-N10-S33	۰	۲۵/۹	۰	۳/۱۱۰	۰	۰
۲۳	C10-RC-N10-S67	۰	۵۱/۸	۰	۳/۱۱۰	۰	۰
۲۴	C11-RC-N10-S100	۰	۷۸/۵	۰	۳/۱۱۰	۰	۰
۲۵	C13-RC-N15-S33	۰	۲۵/۹	۰	۴/۶۶۵	۰	۰
۲۶	C14-RC-N15-S67	۱۴۴۲	۴۶۶	۳۱۱	۱۶۸	۰	۵۱/۸
۲۷	C15-RC-N15-S100	۱۴۴۲	۴۶۶	۳۱۱	۱۶۸	۰	۷۸/۵

روش‌های متداول شامل ارتعاش نمونه RCC تازه بر روی میز ویبره، طبق شکل ۲ تحت سربار مطابق با استاندارد ASTM C1176 یا تراکم نمونه با چکش ویبره مطابق با استاندارد ASTM C1435 می‌باشد [۱۷-۱۸]. برای بتن بدون اسلامپ، میکسرهای اسپیرال و پن میکسر مؤثرتر از میکسرهای معمولی هستند [۱۹].



شکل ۱- اختلاط بتن غلتکی با پن میکسر

۲-۳- تراکم مخلوط بتن غلتکی

در مخلوط‌های بتن غلتکی (RCC) که بدون اسلامپ هستند، روش‌های ساخت نمونه‌های بتن معمولی قابل استفاده نیستند. تمام مخلوط‌ها برای انجام آزمایش‌های مرتبط با بتن سخت‌شده،

۳-۳- قالب‌گیری نمونه‌ها

دو روش A (دارای سربار) و B (بدون سربار) وجود دارد که برای بتن‌های با روانی خیلی سخت تا بی‌نهایت خشک از روش A استفاده می‌شود. بعد از اختلاط بتن، بتنی به جرم حداقل $13/4 \pm 0/7$ کیلوگرم، داخل قالب استوان‌های مخصوص می‌ریزیم، بتن را به گون‌های پخش و صاف می‌کنیم تا جدایی دانه‌ها رخ ندهد. سربار استوان‌های به جرم $22/7 \pm 0/5$ کیلوگرم را روی نمونه داخل قالب قرار می‌دهیم. تایمر و ویراتور را روشن کرده و با استفاده از چراغ قوه، بتن را از فضای حلقوی بین لبه سربار و جداره داخلی قالب مشاهده می‌کنیم. زمانی که بتن متراکم می‌شود، ملات فضای حلقوی بین سربار و دیواره داخلی قالب را پر می‌کند. زمانی که حلقه کاملی اطراف سربار تشکیل شد، ویرره و تایمر را متوقف نموده و زمان سپری شده را به عنوان زمان وی بی در روش A ثبت می‌نمائیم. دستگاه آزمایش وی بی در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۴- عمل آوری نمونه‌ها در محیط معمولی



شکل ۵- دستگاه آزمایش وی بی

۳-۵-۲- آزمایش نفوذپذیری بتن

برای تعیین نفوذپذیری آب در بتن، استانداردهای BS EN 12390-8 [۲۲] و DIN 1048-5 [۲۳] معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرند. طبق استاندارد DIN، برای سنگ‌دانه‌هایی تا قطر ۳۲ میلی‌متر، از قالب‌هایی با ابعاد $200 \times 200 \times 120$ میلی‌متر یا قالب‌های مکعبی ۲۰۰ میلی‌متر و استوانه‌ای با قطر ۱۵۰ میلی‌متر استفاده می‌شود. اگر قطر سنگ‌دانه‌ها از ۳۲ میلی‌متر بیشتر شود، قالب‌های مکعبی ۳۰۰ میلی‌متر یا استوانه‌ای با قطر ۳۰۰ میلی‌متر

در قالب‌ها ریخته می‌شوند. در این تحقیق، نمونه‌های مکعبی با ابعاد $150 \times 150 \times 150$ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این نمونه‌ها به منظور ارزیابی نفوذپذیری و مقاومت بتن استفاده می‌شوند (شکل ۳).



شکل ۲- چکش ویرره جهت تراکم بتن غلتکی



شکل ۳- قالب گیری نمونه‌های مکعبی

۳-۴- عمل آوری نمونه‌ها

پس از قالب‌گیری مخلوط‌های مورد بررسی، به منظور جلوگیری از تبخیر آب موجود، سطح کلیه نمونه‌ها با استفاده از ورق‌های پلاستیکی پوشانده شده و به مدت ۲۴ ساعت دست نخورده باقی ماند. پس از ۲۴ ساعت از ساخت نمونه‌ها، قالب‌ها را باز کرده و جهت عمل آوری، بتن‌ها را در مخزن آب با دمای 23 ± 2 درجه قرار می‌دهیم. پس از گذشت مدت زمان عمل آوری تعیین شده، نمونه‌ها را از آب خارج کرده و برای انجام آزمایشات آماده می‌کنیم (شکل ۴) [۲۰].

۳-۵-۱- برنامه آزمایش

۳-۵-۱- آزمایش تعیین روانی بتن غلتکی (Vebe)
طبق استاندارد ASTM C1170 [۲۱] جهت تعیین روانی RCC

فولادی و ذرات نانوسیلیس به ترتیب با نسبت‌های حجمی ۰/۳۳، ۰/۶۷ و ۱ درصد و نسبت‌های وزنی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد و الیاف شیشه با درصد‌های ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ و الیاف پلی‌پروپیلن با درصد‌های ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶، میکروسیلیس ۷/۵ و ۱۵ درصد و نهایتاً سرباره کوره‌های آهن‌گدازی با مقادیر ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد در جدول ۳ ارائه شده است. مخلوط PRCC به‌عنوان مخلوط شاهد در نظر گرفته شده است.

این مطالعه نشان می‌دهد که زمان وی‌بی مخلوط‌های بتن با افزودن الیاف شیشه، فولادی و پلی‌پروپیلن افزایش می‌یابد، به‌طوری که با افزودن ۰/۲ تا ۰/۶ درصد الیاف شیشه، زمان وی‌بی از ۱۴/۷ به ۴۹/۴ درصد افزایش می‌کند. افزایش مقدار الیاف فولادی و نانوسیلیس نیز باعث افزایش زمان وی‌بی و کاهش کارایی مخلوط‌ها می‌شود. بیشترین کاهش کارایی مربوط به الیاف فولادی است، در حالی که نانوسیلیس با افزایش لزجت، خروج ملات سیمان را در حین تراکم کاهش می‌دهد. با افزایش مقدار نانوسیلیس از ۰/۵ تا ۱/۵ درصد وزن سیمان، زمان وی‌بی از ۶/۳ درصد به ۲۱/۹ درصد افزایش می‌یابد.

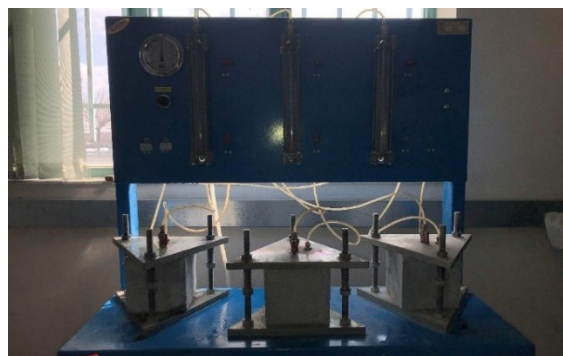
در مقابل، میکروسیلیس با مقادیر ۷/۵ و ۱۵ درصد وزن سیمان، زمان وی‌بی را به ترتیب به میزان ۵/۹ و ۸/۸ درصد کاهش می‌دهد. سرباره آهن‌گدازی نیز در سطوح جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد تغییر چشمگیری ایجاد نکرده اما در ۳۰ درصد جایگزینی، زمان وی‌بی ۱۵/۶ درصد افزایش یافته و باعث کاهش کارایی شده است. با افزایش همزمان نانوسیلیس و الیاف فولادی، زمان وی‌بی افزایش می‌یابد، که در نهایت باعث محدودیت تراکم مخلوط می‌شود. بیشترین افزایش در زمان وی‌بی مربوط به مخلوط C26-RC-N15-S100 بوده که ۱۰۶,۳ درصد افزایش داشته است. با توجه به آزمون و خطا، بیشترین مقدار مجاز نانوسیلیس و الیاف فولادی به ترتیب ۱/۵ و ۱ درصد تعیین شده است، زیرا مقادیر بیشتر منجر به مشکلات تراکم می‌شود.

۴-۲- نتایج آزمایش نفوذپذیری، مقاومت فشاری و

کششی

نتایج آزمایش نفوذپذیری ۲۸ روزه برای نمونه‌های بتن غلتکی با مقاومت فشاری بین ۲۰ تا ۴۰ مگاپاسکال و کامپوزیت‌های بتن غلتکی حاوی الیاف فولادی، شیشه، پلی‌پروپیلن، نانوسیلیس،

به کار می‌رود. در استاندارد BS EN، برای سنگ‌دانه‌هایی تا قطر ۲۵ میلی‌متر، قالب‌های مکعبی ۱۵۰ میلی‌متر به کار می‌روند. آزمایش نفوذپذیری بتن در سن ۲۸ تا ۳۵ روز انجام می‌شود و نمونه‌ها به مدت ۳ روز تحت فشار آب ۰,۵ نیوتن بر میلی‌متر مربع قرار می‌گیرند. حداکثر عمق نفوذ آب از میانگین سه نمونه محاسبه می‌شود. در این پژوهش، از استاندارد BS EN 12390-8 و قالب‌های مکعبی ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر در سن ۲۸ روز استفاده شده است، که در شکل ۶ مشهود است.



شکل ۶- دستگاه آزمایش نفوذپذیری بتن

۴-۱- نتایج و یافته‌های پژوهش

هدف این بخش، بررسی نفوذپذیری و دوام بتن غلتکی خالص و کامپوزیت‌های بتن غلتکی با افزودنی‌های مختلف شامل الیاف فولادی، شیشه، پلی‌پروپیلن، نانوسیلیس، میکروسیلیس، و سرباره کوره‌های آهن‌گدازی است. نتایج این تحقیق در سه دسته اصلی ارائه می‌شود: آزمایش‌های بتن تازه، آزمایش‌های دوام، و ارزیابی رفتار استاتیکی. در ابتدا نتایج حاصل از آزمایش‌های تعیین روانی به روش وی‌بی ارائه می‌گردد، همچنین نتایج آزمایش‌های نفوذپذیری ۲۸ روزه بررسی می‌گردد. سپس، نتایج به‌دست آمده با استفاده از نرم‌افزار اکسل تحلیل شده و روابط و همبستگی‌های بین پارامترها در قالب نمودارها و جداول ارائه می‌شود. این تحلیل جامع به هدف درک بهتر تأثیرات افزودنی‌های مختلف بر ویژگی‌های بتن غلتکی و بهبود کیفیت و دوام آن انجام می‌شود.

۴-۱-۱- نتایج آزمایش وی‌بی

نتایج آزمایش زمان وی‌بی مخلوط‌های بتن غلتکی خالص (دارای طبق جدول ۳، مقاومت فشاری مختلف مابین ۲۰ الی ۴۰ مگاپاسکال و مخلوط‌های کامپوزیت‌های بتن غلتکی حاوی الیاف

جدول ۴- نفوذپذیری کامپوزیت‌های بتن غلتکی

ردیف	نوع اختلاط	نفوذپذیری mm	مقاومت فشاری MPa	مقاومت کششی MPa
۱	PRCC	۶۳/۷۰	۲۵/۵۷	۳/۰۴
۲	C24-RC-G0.2	۶۰/۹۶	۲۷/۱۲	۳/۳۴
۳	C25-RC-G0.4	۵۹/۷۹	۲۷/۹	۴/۰۲
۴	C26-RC-G0.6	۶۱/۱۷	۲۸/۱۳	۴/۱۸
۵	C1-RC-N0-S33	۶۱/۷	۲۸/۲۳	۳/۷۱
۶	C2-RC-N0-S67	۶۰/۳	۲۸/۸۹	۴/۷۶
۷	C3-RC-N0-S100	۵۸/۷	۳۰/۴	۴/۹۵
۸	C21-RC-P0.2	۶۱/۸۴	۲۷/۶۲	۳/۴۷
۹	C22-RC-P0.4	۶۰/۶۲	۲۸/۱۲	۴/۲۶
۱۰	C23-RC-P0.6	۶۲/۱۷	۲۸/۵۷	۴/۷۶
۱۱	C4-RC-N5-S0	۵۲/۳	۲۵/۶۷	۳/۰۷
۱۲	C8-RC-N10-S0	۴۴/۳	۲۷/۳۲	۳/۴۶
۱۳	C12-RC-N15-S0	۶۵/۷	۲۴/۶۹	۲/۹
۱۴	C16-RC-M7.5	۵۴/۷۸	۲۷/۹۳	۳/۱۸
۱۵	C17-RC-M15	۵۰/۰۲	۲۸/۴۵	۳/۴۰
۱۶	C18-RC-I10	۵۱/۱۲	۲۸/۷۳	۳/۳۶
۱۷	C19-RC-I20	۴۸/۱۲	۲۹/۱۷	۳/۶۸
۱۸	C20-RC-I30	۴۴/۲۶	۲۹/۶۴	۳/۸۳
۱۹	C5-RC-N5-S33	۵۱/۳	۲۸/۷۸	۳/۸۳
۲۰	C6-RC-N5-S67	۴۶/۶	۳۱/۷۱	۴/۷۶
۲۱	C7-RC-N5-S100	۴۵/۷	۳۲/۱۱	۵/۸۳
۲۲	C9-RC-N10-S33	۴۲/۷	۳۰/۲۱	۳/۸۸
۲۳	C10-RC-N10-S67	۴۱/۷	۳۱/۷۵	۴/۸۵
۲۴	C11-RC-N10-S100	۴۰	۳۲/۵۴	۵/۹۱
۲۵	C13-RC-N15-S33	۶۳/۷	۲۶/۷۴	۳/۸۹
۲۶	C14-RC-N15-S67	۶۰/۷	۲۸/۶۷	۴/۶۱
۲۷	C15-RC-N15-S100	۵۷	۲۹/۹۶	۴/۴۴

با افزودن الیاف شیشه در حجم‌های ۲۰٪، ۴٪ و ۰/۶ درصد نفوذپذیری به ترتیب ۴/۳، ۶/۱ و ۴ درصد کاهش یافته که بیشترین کاهش متعلق به مخلوط C2-RC-G0.4 با اختلاف ۳/۹ میلی‌متر بیشترین کاهش را نسبت به نمونه کنترل داشته است. شفيعی و محمدی نیز در پژوهش خود نشان دادند که با افزودن الیاف شیشه

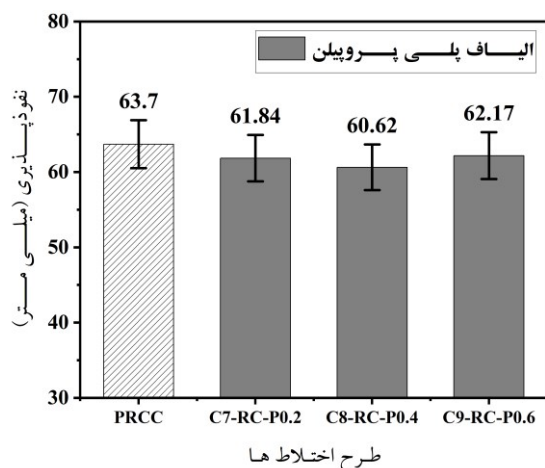
میکروسیلیس و سربراره کوره آهن‌گدازی با نسبت‌های مختلف، در جدول ۴ و اشکال ۷ تا ۱۳ ارائه شده است. مخلوط PRCC به‌عنوان مخلوط شاهد در نظر گرفته شد.

جدول ۳- روانی کامپوزیت‌های بتن غلتکی و مقایسه با مخلوط شاهد

ردیف	نوع اختلاط	زمان وی‌بی-ثانیه
۱	PRCC	۳۲
۲	C24-RC-G0.2	۳۶/۷
۳	C25-RC-G0.4	۴۱/۹
۴	C26-RC-G0.6	۴۷/۸
۵	C1-RC-N0-S33	۳۸
۶	C2-RC-N0-S67	۴۵
۷	C3-RC-N0-S100	۵۵
۸	C21-RC-P0.2	۳۵/۵
۹	C22-RC-P0.4	۳۹/۸
۱۰	C23-RC-P0.6	۴۶/۱
۱۱	C4-RC-N5-S0	۳۴
۱۲	C8-RC-N10-S0	۳۶
۱۳	C12-RC-N15-S0	۳۹
۱۴	C16-RC-M7.5	۳۰/۱
۱۵	C17-RC-M15	۲۹/۲
۱۶	C18-RC-I10	۳۱/۱
۱۷	C19-RC-I20	۳۲/۱
۱۸	C20-RC-I30	۳۷
۱۹	C5-RC-N5-S33	۴۰
۲۰	C6-RC-N5-S67	۴۸
۲۱	C7-RC-N5-S100	۶۰
۲۲	C9-RC-N10-S33	۴۱
۲۳	C10-RC-N10-S67	۵۰
۲۴	C11-RC-N10-S100	۶۲
۲۵	C13-RC-N15-S33	۴۶
۲۶	C14-RC-N15-S67	۵۵
۲۷	C15-RC-N15-S100	۶۶

۴-۲-۱- نفوذپذیری بتن غلتکی حاوی الیاف شیشه
طبق شکل ۷ میزان الیاف موجود در بتن توانسته است باعث کاهش نفوذپذیری شود.

۴-۲-۳- نفوذپذیری بتن غلطکی حاوی الیاف پلی پروپیلن طبق شکل ۹ الیاف پلی پروپیلن با مقداری یکسان با الیاف شیشه نقش مثبتی را در نفوذپذیری داشت. افزودن الیاف پلی پروپیلن باعث کاهش نفوذپذیری شد. مخلوط‌های حاوی الیاف با درصد‌های حجمی ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ به ترتیب کاهش‌های ۲/۹، ۴/۸ و ۲/۴ درصد را داشتند. بیشترین کاهش را مخلوط C8-RC-P0.4 با ۳/۱ میلی‌متر اختلاف نسبت به نمونه کنترل را داشت.

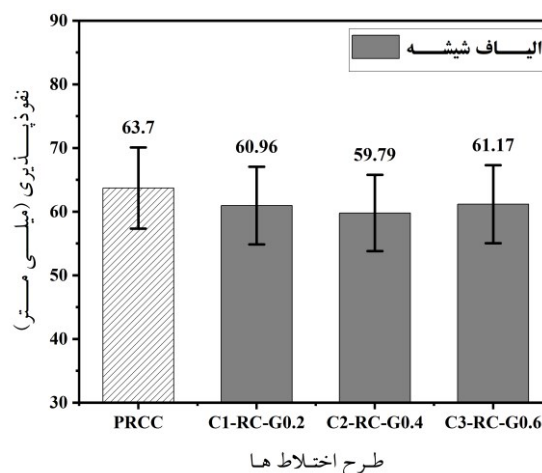


شکل ۹- نفوذپذیری بتن غلطکی حاوی پلی پروپیلن

۴-۲-۴- نفوذپذیری بتن غلطکی حاوی نانوسیلیس میکروسیلیس

در نمونه‌های بتن غلطکی بدون الیاف، با افزایش مقدار نانوسیلیس از ۰/۵٪ تا ۱/۰٪، نفوذپذیری ۲۸ روزه کاهش می‌یابد. با افزایش مقدار نانوسیلیس از ۰/۵٪ تا ۱/۰٪ وزن سیمان مصرفی، نفوذپذیری ۲۸ روزه از ۱۷/۹٪ تا ۳۰/۵٪ کاهش یافته است که شکل ۸ گویای این مسئله است. افزودن پوزولان میکروسیلیس همانند نانوسیلیس نقش کاهش‌دهنده نفوذپذیری را داشت. طبق شکل ۱۰ مخلوط C14-RC-M15 با درصد جایگزینی ۱۵ درصد وزنی سیمان با کاهش ۲۱/۵ درصدی، بیشترین تأثیر را داشت. اما نانوسیلیس در مقایسه با میکروسیلیس عملکرد بهتری را نشان داد. طبق پژوهش توکلی و همکاران [۲۶] نشان داد که افزودن نانوسیلیس در بتن غلطکی در مخلوط حاوی ۰/۷، ۱ و ۱/۵ درصد، مقاومت فشاری را به ترتیب ۱۴/۶، ۲۳، ۲۵ و ۱۷ درصد افزایش داد. نانوسیلیس با هسته‌زایی منجر به افزایش استحکام می‌شود. کاهش نفوذپذیری نیز گویای تأثیر مثبت نانوسیلیس در ماتریس بتن می‌باشد.

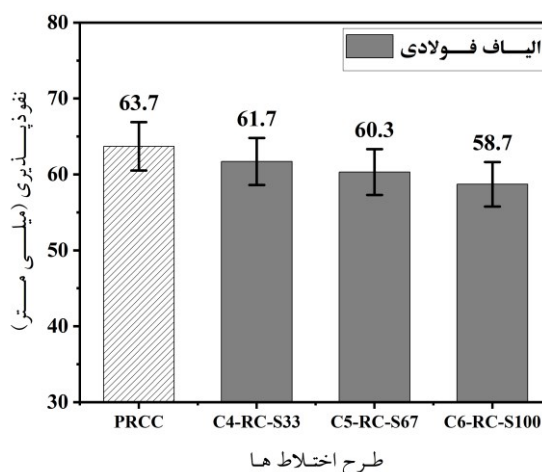
در حجم ۰/۱ و ۰/۲ درصد، میزان نفوذپذیری به ترتیب ۱۵/۷۹ و ۵/۲۶ درصد کاهش یافت که نشان‌دهنده تأثیر مثبت الیاف شیشه در کاهش نفوذپذیری است. هر چند که بازه‌ی تأثیر بهینه می‌تواند وابسته به پارامترهای دیگر بتن، متغیر باشد.



شکل ۷- نفوذپذیری بتن غلطکی حاوی انواع الیاف شیشه

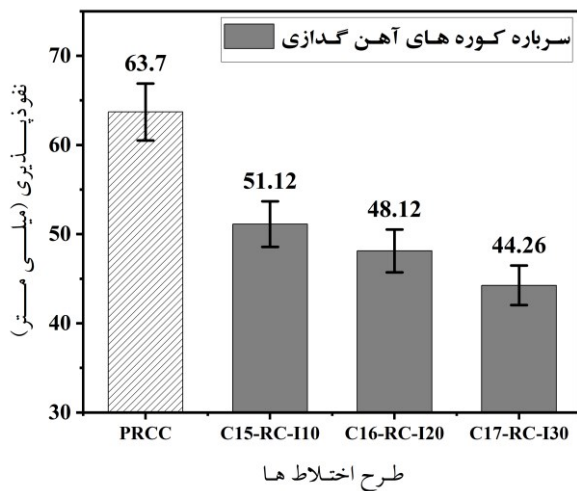
۴-۲-۴- نفوذپذیری بتن غلطکی حاوی الیاف فولادی

با افزایش مقدار الیاف فولادی، نفوذپذیری ۲۸ روزه کاهش می‌یابد. بر اساس شکل ۸ با افزایش مقدار الیاف فولادی از ۰/۳۳٪ تا ۱/۰۰٪ حجم بتن، نفوذپذیری ۲۸ روزه از ۳/۱٪ تا ۷/۸٪ کاهش یافته است. همچنین مقاومت فشاری نیز برای مقادیر ذکر شده به ترتیب، ۱۲/۹۸، ۱۰/۴۰، ۱۸/۸۹ درصد افزایش داشته است که در تایید نتایج این پژوهش، شربتدار و رحمتی با افزودن ۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب الیاف فولادی نشان دادند که خواص مکانیکی من جمله مقاومت فشاری ۲۱ درصد افزایش می‌یابد.

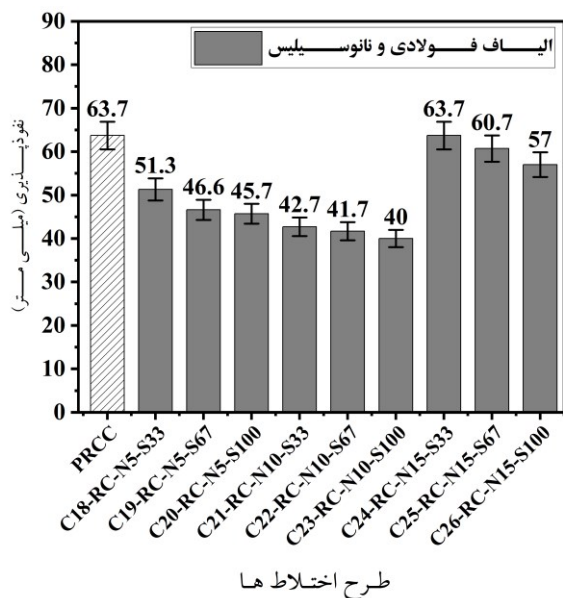


شکل ۸- نفوذپذیری بتن غلطکی حاوی الیاف فولادی

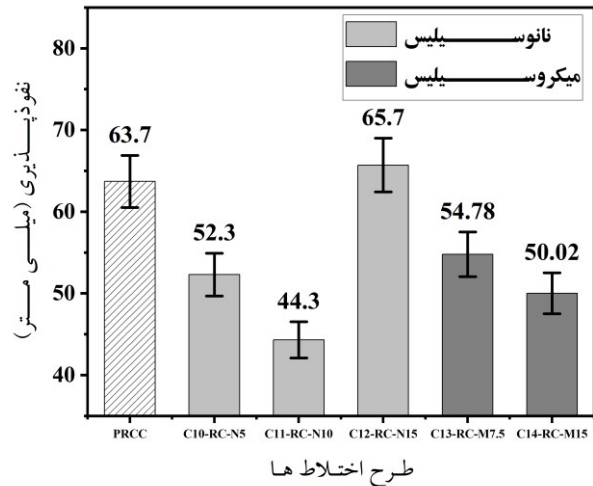
C23-RC-N10-S100 است. نانوسیلیس میکروساختار بتن و مقاومت آن در برابر نفوذ آب را بهبود می‌دهد. نانوسیلیس با کریستال‌های هیدروکسید کلسیم واکنش داده و ژل C-S-H تولید می‌کند، که فضاهای خالی بین سنگ‌دانه‌ها و خمیر سیمان را پر کرده و ساختار بتن را چگال‌تر می‌کند. این امر باعث بهبود دوام و مشخصات مکانیکی بلندمدت بتن می‌شود. الیاف فولادی نیز با کاهش ترک‌های ناشی از جمع‌شدن^۱ بتن و شکستن پیوستگی حفرات و کانال‌ها، نفوذپذیری را کاهش می‌دهند.



شکل ۱۱- نفوذپذیری بتن غلطکی حاوی سرباره کوره‌های آهن‌گدازی



شکل ۱۲- نفوذپذیری بتن غلطکی کامپوزیتی حاوی الیاف فولادی و نانوسیلیس



شکل ۱۰- نفوذپذیری بتن غلطکی حاوی نانوسیلیس و میکروسیلیس

۴-۲-۵- نفوذپذیری بتن غلطکی حاوی سرباره

طبق شکل ۱۱ افزودن سرباره در درصدهای وزنی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ باعث کاهش نفوذپذیری شد. مخلوط‌های حاوی سرباره به ترتیب کاهش‌های ۱۹/۷، ۲۴/۵ و ۳۰/۵ درصد را نشان دادند. مخلوط C17-RC-I30 بیشترین میزان کاهش نفوذپذیری با ۳۰/۵ درصد کاهش و اختلاف ۱۹/۴ میلی‌متر نسبت به نمونه کنترل را نشان داد. افزودن سرباره در درصد وزنی ۳۰ با افزودن نانوسیلیس به مقدار ۱ درصد در مقدار نفوذپذیری برابری می‌کند اما اگر از لحاظ کاهش مصرف سیمان بررسی کنیم استفاده از سرباره گزینه محیط زیست دوست‌تری می‌باشد.

۴-۲-۶- میزان نفوذپذیری بتن غلطکی حاوی الیاف فولادی و نانوسیلیس

با توجه به شکل ۱۲ در نمونه‌های بتن غلطکی حاوی ۰/۵٪ و ۱/۰٪ نانوسیلیس، با افزایش مقدار الیاف فولادی از ۰/۳۳٪ تا ۱/۰۰٪ حجم بتن، نفوذپذیری ۲۸ روزه به ترتیب از ۱۹/۵٪ تا ۲۸/۳٪ و ۳۳/۰٪ تا ۳۷/۲٪ کاهش می‌یابد.

در نمونه‌های بتن غلطکی حاوی ۰/۳۳٪، ۰/۶۷٪ و ۱/۰۰٪ الیاف فولادی، با افزایش نانوسیلیس از ۰/۵٪ تا ۱/۰٪ وزن سیمان، نفوذپذیری ۲۸ روزه به ترتیب کاهش یافته و بهبود یافته است. بیشترین کاهش نفوذپذیری ۲۸ روزه (۳۷/۲٪) مربوط به نمونه

۳-۴- همبستگی پارامترها و مقایسه آن‌ها

۱-۳-۴- رگرسیون خطی بین نفوذپذیری و مقاومت کششی و فشاری

مخلوط C15-RC-N15-S100 بیشترین کاهش در روانی را نشان داد، در حالی که مخلوط‌های حاوی میکروسیلیس ۷٫۵ و ۱۵ درصد و سرباره ۱۰ درصد، روانی بیشتری نسبت به مخلوط شاهد داشتند. الیاف فولادی بیشترین کاهش روانی را ایجاد کرد و پس از آن الیاف شیشه و پلی‌پروپیلن قرار گرفتند. نانوسیلیس نیز با افزایش مقدار، روانی را کاهش داد و ترکیب نانوسیلیس با الیاف فولادی تأثیر کاهشی بیشتری داشت.

افزودن الیاف و پوزولان‌ها به جز در مخلوط C12-RC-N15-S0، باعث کاهش نفوذپذیری بتن شد. الیاف شیشه و پلی‌پروپیلن در نسبت‌های ۰٫۲، ۰٫۴ و ۰٫۶ درصد رفتار مشابهی داشتند و در نسبت‌های پایین‌تر، نفوذپذیری کمتر بود. افزایش درصد الیاف فولادی به طور پیوسته نفوذپذیری را کاهش داد. نانوسیلیس با ۰٫۵ و ۱ درصد وزنی عملکرد خوبی نشان داد، اما در ۱٫۵ درصد نفوذپذیری افزایش یافت. مخلوط‌های حاوی نانوسیلیس ۱ درصد و سرباره ۳۰ درصد، نفوذپذیری را از ۶۳٫۷ میلی‌متر به ۴۴٫۳ میلی‌متر کاهش دادند. مخلوط‌های C21-RC-N10-S33، C21-RC-N10-S100 و C21-RC-N10-S67 بیشترین کاهش نفوذپذیری را نشان دادند. ترکیب نانوسیلیس و الیاف فولادی عملکرد بهتری نسبت به استفاده تکی از هر کدام داشت.

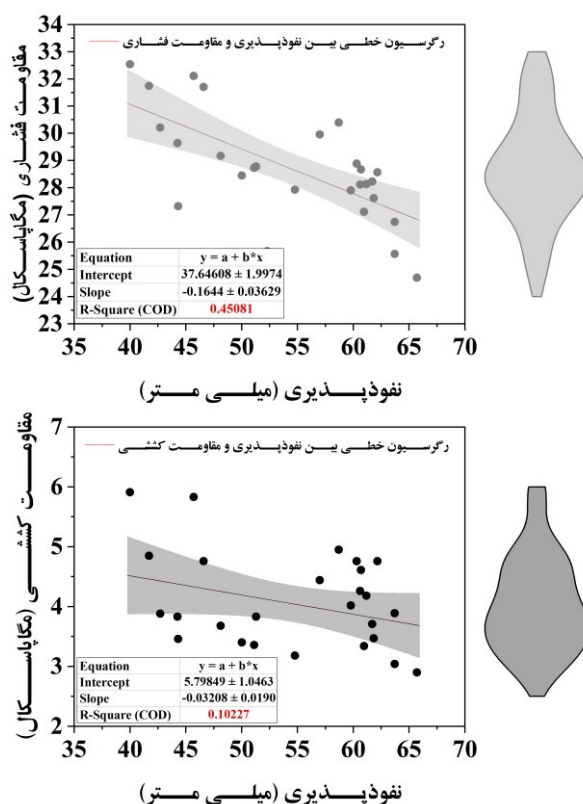
سپاسگزاری

از اداره راه و شهرسازی استان اردبیل بابت حمایت مالی طرح و معاونت محترم پژوهشی و فناوری دانشگاه محقق اردبیلی تشکر و قدردانی می‌گردد.

۶- مراجع

- [1] E. A. Whitehurst, "Sonoscope tests concrete structures," in *Journal Proceedings*, 1951, pp. 433-444.
- [2] F. Sanchez and K. Sobolev, "Nanotechnology in concrete—a review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 11, pp. 2060-2071, 2010.
- [3] R. Zerbino, G. Giaccio, and G. C. Isaia, "Concrete incorporating rice-husk ash without processing," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 1, pp. 371-378, 2011.
- [4] T. R. Naik, R. Kumar, B. W. Ramme, and F. Canpolat, "Development of high-strength, economical self-consolidating concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 30, pp. 463-469, 2012.

طبق شکل ۱۳ با توجه به میزان R^2 میزان همبستگی نفوذپذیری و مقاومت کششی ۲۸ روزه مقدار بسیار کمی می‌باشد در نتیجه مدل آن قابل قبول نیست. با توجه به میزان R^2 برای نفوذپذیری و مقاومت فشاری که برابر ۴۰/۰۸ درصد است، میزان همبستگی نفوذپذیری و مقاومت فشاری ۲۸ روزه مقدار کمی می‌باشد، اما نشان‌دهنده ارتباط بین این دو پارامتر است.



شکل ۱۳- رگرسیون خطی بین نفوذ پذیری و مقاومت فشاری و کششی

۵- نتیجه گیری

این پژوهش به بررسی تأثیر الیاف شیشه، فولادی، پلی‌پروپیلن و ذرات نانوسیلیس، میکروسیلیس و سرباره کوره‌های آهن‌گدازی بر بتن غلتکی پرداخته است. نتایج نشان می‌دهد که این افزودنی‌ها می‌توانند خواص مکانیکی و دوام بتن را بهبود بخشند. در ادامه، نتایج مربوط به روانی و نفوذپذیری بتن غلتکی بیان شده است. - افزودن الیاف و مواد پوزولانی باعث کاهش روانی بتن شد.

of Roller-Compacted Concrete Using a Vibrating Table.

[22] BS EN 12390-8., 2009. Testing hardened concrete, Part 8 Depth of penetration of water under pressure.

[23] DIN 1048-5., 1991. Testing methods for concrete; hardened concrete, specially prepared specimens.

[24] Shafiei S, Mohammadi Y. Effect of AR-glass fibers and natural micronized zeolite on mechanical and permeability properties of concrete exposed to normal, sodium chloride, and magnesium sulfate environments. *Construction and Building Materials*. 2024 Dec 27;457:139288.

[25] Sharbatdar MK, Rahmati F. Experimental evaluation of multi-functional effects of fibers on mechanical and performance properties of Roller-compacted concrete pavements (RCCP). *Construction and Building Materials*. 2022 Jan 17;316:125890.

[26] Tavakoli D, Dehkordi RS, Divandari H, de Brito J. Properties of roller-compacted concrete pavement containing waste aggregates and nano SiO₂. *Construction and Building Materials*. 2020 Jul 20;249:118747.

[5] M. Kuhar, "World aggregates market," *SEMCO Publ*, pp. 2–4, 2014.

[6] K. Slattery, "Global developments in the aggregate industry," *Glob. Aggregates Information, Netw.*, 2014.

[7] J. R. Berry and S. D. Tayabji, "Report on roller-compacted concrete pavements," *Farmingt. Hills, MI ACI Comm. Rep.*, 2001.

[8] L. Basheer and D. J. Cleland, "Freeze–thaw resistance of concretes treated with pore liners," *Constr. Build. Mater.*, vol. 20, no. 10, pp. 990–998, 2006.

[9] J. I. Daniel *et al.*, "Report on fiber reinforced concrete," *Rep. by ACI Comm.*, vol. 544, 2002.

[10] Y. Fan, S. Zhang, S. Kawashima, and S. P. Shah, "Influence of kaolinite clay on the chloride diffusion property of cement-based materials," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 45, pp. 117–124, 2014.

[11] M. A. Wilson, M. A. Carter, and W. D. Hoff, "British Standard and RILEM water absorption tests: A critical evaluation," *Mater. Struct.*, vol. 32, pp. 571–578, 1999.

[12] W. Kubissa and R. Jaskulski, "Measuring and time variability of the sorptivity of concrete," *Procedia Eng.*, vol. 57, pp. 634–641, 2013.

[13] M. Jalal, A. R. Pouladkhan, H. Norouzi, and G. Choubdar, "Chloride penetration, water absorption and electrical resistivity of high performance concrete containing nano silica and silica fume," *J. Am. Sci.*, vol. 8, no. 4, pp. 278–284, 2012.

[14] J. Rapoport, C.-M. Aldea, S. P. Shah, B. Ankenman, and A. Karr, "Permeability of cracked steel fiber-reinforced concrete," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 14, no. 4, pp. 355–358, 2002.

[15] S. Kawashima, "Nanomodification of cementitious materials: Fresh state and early age." Northwestern University, 2013.

[16] A. C. I. C. 544, "Guide to design with fiber-reinforced concrete," American Concrete Institute, 2018.

[17] ASTM C1176-92., 2017. Standard Practice for Making Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Table.

[18] ASTM C1435-99., 2017. Standard Practice for Molding Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer.

[19] A. Kavussi and A. Modarres, "Laboratory fatigue models for recycled mixes with bitumen emulsion and cement," *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 10, pp. 1920–1927, 2010.

[20] C. ASTM, "Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory," *C192/C192M*, 2007.

[21] ASTM C1170-06., 2017. Standard Test Methods for Determining Consistency and Density

The effect of nanosilica, types of fibers and other additives on the permeability of rolled compacted concrete

Yaghoub Mohammadi *

Professor, Civil Engineering Department, University Of Mohaghegh Ardabili.

Abstract

This research has investigated the effect of adding nano-silica, steel, glass, polypropylene, micro-silica and Blast iron slag on the mechanical behavior and durability of rolled compacted concrete. The samples were made with different ratios of nanoparticles, types of fibers and their effects on permeability and compressive strength of concrete were evaluated. The results showed that nanosilica reduces the permeability of concrete by improving the microstructure and reducing calcium hydroxide crystals. Also, fibers improve the permeability of concrete by reducing cracks and breaking the continuity of pore. The combination of these additives leads to a significant improvement in the mechanical properties and durability of rolled concrete and can be used in the design of more optimal concrete mixes. The results of this research emphasize the positive effect of nanoparticles and types of fibers in increasing the useful life and performance of concrete. In the investigation of single-component mixtures containing nanosilica and fibers, we see that the performance of concrete against permeability with the combination of these materials works better than the single-component state.

Keywords: Roller compacted concrete, permeability, nanosilica, concrete additives, microsilica, Blast iron slag, types of fibers.

* Corresponding Author: yaghoubm@uma.ac.ir