

تأثیر عمل آوری بر خواص بتن‌های غلتکی روسازی راه، با و بدون دوده سیلیس*

علیرضا باقری، استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

مجتبی محمودیان، کارشناس ارشد، مهندسان مشاور دریا، خاک، پی، تهران، ایران

منصور فخری، استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

E-mail: bagheri@kntu.ac.ir

چکیده

با توجه به گستردگی سطح بتن و کم بودن مقدار آب اختلاط در بتن‌های غلتکی روسازی راه، روش و مدت زمان عمل آوری، در دستیابی به خواص مورد نظر این نوع بتن‌ها اهمیت بسیار دارد. در مطالعات آزمایشگاهی این تحقیق، تأثیر روش‌های رایج عمل آوری روسازی‌های بتنی یعنی عمل آوری با آب و استفاده از ترکیبات شیمیایی عمل آوری^۱ و همچنین تأثیر اعمال نکردن عمل آوری بر روی خواص مقاومتی و نفوذپذیری مخلوط‌های بتن غلتکی روسازی راه، بررسی شده است. مطالعه بر روی بتن‌های غلتکی روسازی راه بدون کاربرد دوده سیلیس و همچنین مخلوط‌های حاوی دوده سیلیس انجام شده است. نتایج، نشانگر تأثیر بسیار مهم روش عمل آوری بر روی خواص مقاومتی و دوام مخلوط‌های بتن غلتکی روسازی است. با در نظر گرفتن عمل آوری بتن به صورت مرطوب به عنوان مبنای مقایسه، در صورتی که عمل آوری انجام نشود، افت مقاومتی حدود ۴۵ درصد مشاهده می‌شود. عمل آوری با ترکیبات پاششی تأثیر نسبتاً کمی در بهبود وضعیت داشته است و نمونه‌های به عمل آمده با این روش ۳۵ درصد افت مقاومت، نسبت به نمونه‌های مرطوب عمل آوری شده داشته‌اند. تأثیر نوع عمل آوری بر روی خواص نفوذپذیری و جذب آب بتن‌های غلتکی از نظر کیفی مشابه فوق، اما از دیدگاه کمی شدیدتر بوده است.

واژه‌های کلیدی: بتن غلتکی روسازی (RCCP)، روش‌های عمل آوری، دوده سیلیس، خواص مقاومتی، نفوذپذیری، جذب آب

۱. مقدمه

نسبت به روسازی‌های آسفالتی، نظیر عملکرد مناسب در برابر بارهای سنگین، جاده‌های با شیب زیاد و در عین حال مزیت اقتصادی روسازی بتن غلتکی نسبت به روسازی بتنی معمولی، استفاده از این نوع روسازی در کشورما نیز بررسی است [۴، ۵]. مخلوط بتن غلتکی روسازی، بتن خشک با مقدار آب بسیار کم است که به نحوی طراحی شده که قابلیت تحمل وزن غلتکی را که برای تراکم آن بکار می‌رود داشته باشد. به علت کم بودن آب مخلوط و همچنین سطح بسیار زیاد در معرض محیط روسازی،

روسازی‌های بتن غلتکی نوع ویژه‌ای از روسازی‌های بتنی هستند که به صورت کلی در گروه روسازی‌های بتنی غیرمسلح درزدار طبقه‌بندی می‌شوند.

اجرای روسازی بتن غلتکی عمدتاً با تجهیزات و روش‌های روسازی آسفالتی انجام می‌شود که این کار افزایش سرعت اجرا و کاهش هزینه‌ها را به همراه دارد. اطلاعات در مورد خواص، عملکرد، زمینه‌های کاربرد و محدودیت‌های روسازی‌های بتن قابل دسترس اند [۱، ۲، ۳]. با توجه به مزایای فنی روسازی‌های بتنی

مقایسه با عمل آوری مرطوب بر روی نفوذپذیری نمونه‌های بتن غلتکی به عنوان مشخصه‌ای از دوام صورت گرفته، نشانگر نبود تفاوت قابل توجه بین این دو روش است [۱۲]. یادآوری می‌شود که پراکندگی نتایج در تحقیق اخیر زیاد بوده و همچنین رطوبت نسبی محیط گزارش نشده است. در تحقیق دیگری که درباره تعیین دوام بتن‌های غلتکی روسازی عمل آوری شده با ترکیبات غشایی عمل آوری در برابر نمکهای یخ‌زدا صورت گرفته، عملکرد این بتن‌ها نسبتاً ضعیف ارزیابی شده است [۱۳]. همچنین یک مورد ارزیابی گزارش شده از روسازی بتن غلتکی عمل آوری شده با ترکیبات پاششی، دوام روسازی اجرا شده را نامطلوب برآورد نموده است [۱]. با توجه به تناقض‌های موجود در بررسی‌های فوق و احتمال زیاد کاربرد روش عمل آوری با ترکیبات شیمیایی عمل آوری در کشور، در این تحقیق خواص مقاومتی و دوام بتن‌های غلتکی روسازی تحت شرایط عمل آوری مرطوب، عمل آوری با ترکیبات شیمیایی و همچنین شرایطی که در آن عمل آوری انجام نمی‌شود، مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۲-۱ تأثیر دوده سیلیس بر خواص بتن

دوده سیلیس نوعی پوزولان صنعتی با خلوص بسیار زیاد SiO_2 است که جهت افزایش و بهبود خواص بتن‌های مختلف و تولید بتن‌های توانمند بکار گرفته می‌شود [۱۴]. این ماده نزدیک به یک دهه است که در ایران در دسترس مهندسين قرار دارد. تحقیقات قبلی انجام شده نشانگر کیفیت مناسب دوده سیلیس تولید داخل کشور و شباهت آن با مواد مشابه تولید شده در خارج از کشور است [۱۵، ۱۶]. تحقیقات قبلی انجام شده در زمینه تأثیر دوده سیلیس تولید داخل کشور بر روی بتن غلتکی سده سازی، نشانگر عملکرد بسیار مؤثر این ماده در بهبود خواص مقاومتی و کاهش نفوذپذیری بوده است [۱۷].

در مورد استفاده از دوده سیلیس در بتن‌های غلتکی روسازی، تحقیق انجام شده توسط Banthia و همکاران در کانادا [۱۱]، نشانگر تأثیر نسبتاً قابل توجه استفاده از این ماده در کاهش نفوذپذیری بتن غلتکی روسازی بوده است. تحقیق مقدماتی انجام شده بر روی اثر کاربرد دوده سیلیس بر خواص مقاومتی بتن غلتکی روسازی در داخل کشور، درصد بهینه استفاده را حدود ۱۰ ذکر کرده، اما اثر دوده سیلیس در بهبود خواص مقاومتی، نسبتاً محدود ارزیابی شده است [۱۸].

عمل آوری مناسب برای این نوع بتن‌ها، به ویژه در کشورهای با اقلیم خشک و رطوبت نسبی کم، مانند ایران با اهمیت است. در این تحقیق از طریق مطالعات آزمایشگاهی، عملکرد روشهای رایج عمل آوری بر روی خواص مقاومتی و دوام بتن‌های غلتکی روسازی بررسی شده است.

با توجه به این که روسازی‌های بتن غلتکی تحت بار قابل توجهی قرار گرفته و در معرض عوامل محیطی هستند، بنابراین مدارک فنی موجود الزامات مقاومت و دوام قابل ملاحظه‌ای را در مورد این بتن‌ها به عنوان ضوابط ضروری پیش بینی می‌کنند. الزامات کشور آمریکا حداقل مقاومت نمونه استوانه‌ای بتن غلتکی روسازی را $27/5 \text{MPa}$ [۱] و برخی کشورهای اروپایی 40MPa را بر اساس نمونه مکعبی ضروری می‌دانند [۲].

برای دستیابی به الزامات مناسب دوام و مقاومت، استفاده از مواد مکمل سیمانی مورد نظر پژوهشگران بوده است [۶، ۷، ۸]. با توجه به وجود دوده سیلیس در کشور، در این تحقیق تأثیر استفاده از این ماده در بهبود خواص مقاومتی و دوام بتن‌های غلتکی روسازی، تحت شرایط مختلف عمل آوری بررسی شده است. ابتدا نتایج تحقیقات قبلی درباره موارد گفته شده مرور می‌شوند.

۲. تأثیر نوع عمل آوری

امروزه اهمیت پدیده توقف واکنش هیدراتاسیون سیمان در بتن، در صورت افت رطوبت نسبی منافذ موئین به کمتر از ۸۰ درصد، همچنین اهمیت مرحله عمل آوری در دستیابی به خواص مورد نظر مقاومتی و دوام کاملاً شناخته شده است [۹، ۱۰].

همان گونه که اشاره شد با توجه به کم بودن آب مخلوط‌های بتن غلتکی روسازی و سطح در معرض زیاد آنها انتظار می‌رود که این نوع بتن‌ها نسبت به عمل آوری بسیار حساس باشند. تحقیقات انجام شده توسط Nanni [۱۱] در مورد اثر مدت زمان عمل آوری مرطوب بر روی مقاومت فشاری بتن غلتکی روسازی، نشانگر افت مقاومت نمونه‌های با یک روز عمل آوری مرطوب در مقایسه با نمونه‌های با ۲۸ روز عمل آوری مرطوب از ۲۰ تا ۴۵ درصد است. در صورت عمل آوری مرطوب به مدت ۳ روز، میزان افت مقاومت ۱۵ تا ۲۰ درصد گزارش شده است. یکی از روش‌های متداول عمل آوری سطوح بتنی، به ویژه در اقلیم‌های خشک، عمل آوری با استفاده از ترکیبات شیمیایی است. تحقیق محدودی که درباره مقایسه اثر عمل آوری بتن غلتکی روسازی با ترکیبات پاششی در

۴. مصالح مورد استفاده

۴-۱ سنگدانه‌ها

مصالح سنگی مورد استفاده در این پروژه از سه بخش شن، ماسه و پودرسنگ تشکیل شده است. شن نیمه‌شکسته با اندازه حداکثر ۱۹ میلیمتر، و ماسه طبیعی، هر دو از معادن واقع در جنوب غرب تهران تأمین شدند. در جدول ۲ نتایج آزمایش دانه‌بندی برای نمونه ماسه و شن نشان داده شده است.

مدول نرمی ماسه برابر $3/4$ تعیین شد که طبق معمول ماسه‌های کشور در مقایسه با محدوده‌های دانه‌بندی ذکر شده توسط مراجعی نظیر ASTM C33 [۱۹]، بیش از حد درشت است.

علاوه بر درشتی دانه‌بندی، مقدار مواد بسیار ریز (مواد عبوری از الک شماره ۲۰۰) غیر پلاستیک نیز برای ساخت مخلوط‌های بتن‌غلتکی در مقایسه با محدوده ۲ تا ۸ درصد از مجموع مصالح سنگی توصیه شده توسط ACI 325.10R [۱] ناکافی است.

برای اصلاح دانه‌بندی و تأمین مواد بسیار ریز تصمیم گرفته شد از ۱۵ درصد پودرسنگ و ۸۵ درصد ماسه به عنوان بخش ریزدانه مخلوط‌ها استفاده شود. به این ترتیب مدول نرمی ماسه تعدیل و برابر $3/16$ شد و همچنین درصد مواد عبوری از الک شماره ۲۰۰، ماسه از یک درصد به ۵ درصد افزایش یافت.

۴-۱-۱ دانه‌بندی ترکیبی ریزدانه و درشت‌دانه

دانه‌بندی ترکیبی شن و ماسه به نحوی انتخاب شد که در حدامکان در چارچوب محدوده‌های دانه‌بندی توصیه شده توسط مراجع معتبر قرار گیرد. در شکل ۱ مقایسه دانه‌بندی ترکیبی به دست آمده با محدوده توصیه شده ACI 325.10 [۱] ارایه شده است.

همچنین کمیسیون بین‌المللی روسازی راه (PIARC) [۲] برای دانه‌بندی ترکیبی مصالح سنگی با در نظر گرفتن مواد سیمانی به عنوان بخشی از مصالح ترکیبی، محدوده‌ای ارایه کرده است که مقایسه مصالح سنگی ترکیبی مورد استفاده در این پروژه با در نظر گرفتن ۲۷۵ و ۳۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب مواد سیمانی با این محدوده در شکل ۲ نشان داده شده است.

برای مشخص شدن وضعیت، در تحقیق حاضر اثر کاربرد دوده سیلیس در بهبود خواص مقاومتی و دوام بتن‌های غلتکی روسازی تحت شرایط مختلف عمل‌آوری، مورد بررسی قرار گرفته است.

۳. برنامه آزمایشگاهی

چنان که گفته شد، اهداف عمده از انجام آزمایش‌ها تعیین تأثیر شرایط مختلف عمل‌آوری و همچنین جایگزینی بخشی از سیمان با دوده سیلیس، بر روی خواص بتن‌های غلتکی روسازی بوده است. بر اساس محدوده‌های ذکر شده برای مقدار مواد سیمانی توسط مدارک فنی مربوط به روسازی‌های بتن‌غلتکی و همچنین مقادیر گزارش شده اجزای مخلوط بکار رفته برای برخی پروژه‌های روسازی بتن‌غلتکی اجرا شده [۱،۲]، در این تحقیق دو گروه مخلوط بتن‌غلتکی روسازی با مواد سیمانی به ترتیب برابر ۲۷۵ و ۳۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب بررسی شدند.

برای هر یک از دو گروه فوق، افزون بر مخلوط پایه، مخلوط دیگری با جایگزینی ۱۰ درصد مواد سیمانی با دوده سیلیس در نظر گرفته شد. به این ترتیب در مطالعه آزمایشگاهی ۴ نوع مخلوط بتن‌غلتکی روسازی با کدهای گفته شده در جدول ۱ مورد بررسی قرار گرفتند.

جدول ۱. مخلوط‌های بتن‌غلتکی روسازی

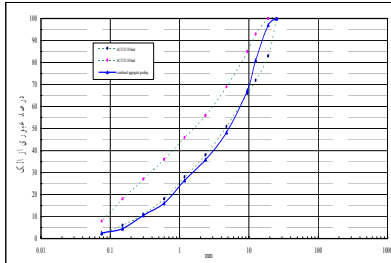
مورد بررسی در این تحقیق

نام مخلوط	مقدار مواد سیمانی	درصد جایگزینی دوده سیلیس
350 S0	۳۵۰	۰
350 S10	۳۵۰	۱۰
275 S0	۲۷۵	۰
275 S10	۲۷۵	۱۰

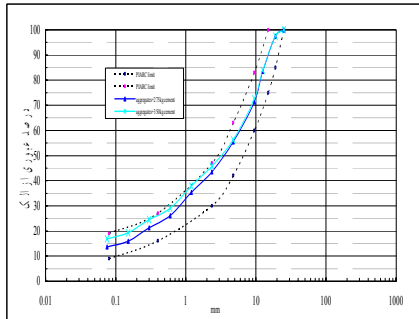
عملکرد هر مخلوط تحت شرایط مختلف عمل‌آوری بررسی شد. این شرایط عبارت بودند از عمل‌آوری در هوا که در واقع به منزله آن است که عمل‌آوری انجام نشده است، عمل‌آوری در آب و عمل‌آوری با ترکیبات شیمیایی. بنابراین به طور کلی ۱۲ سری مخلوط ساخته شد و از هر یک نمونه‌های لازم جهت تعیین خواص مقاومتی (فشاری و خمشی) و دوام (جذب آب حجمی، جذب آب مویینه و ضریب نفوذپذیری) تهیه شدند.

۴-۲ سیمان

بررسی آزمایش های مربوط به این مطالعه تحقیقاتی از سیمان پرتلند نوع ۲ استفاده شد که تجزیه شیمیایی آن بر اساس جدول ۳ است.



شکل ۱. مقایسه دانه بندی ترکیبی سنگدانه ها با محدوده ACI 325.10 [۱]



شکل ۲. مقایسه دانه بندی ترکیبی سنگدانه ها و مواد سیمانی با محدود

(PIARC) [۲]

جدول ۳. تجزیه شیمیایی نمونه سیمان نوع ۲ و دوده سیلیس استفاده شده

Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	AL ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	اکسید شیمیایی
۰/۷۵	۰/۷	۲/۵۱	۳/۵۵	۲/۹۷	۴/۹۰	۲۱/۰	۶۱/۵	درصد اکسید در سیمان
۰/۲۶	۱/۰۳	-	۰/۶۶	۱/۱۶	۱/۵۶	۹۰/۴	۱/۲۹	درصد اکسید در دوده سیلیس

جدول ۴. نتایج آزمایشهای تعیین مشخصات فیزیکی سیمان استفاده شده

نوع سیمان	جرم حجمی (gr/cm ³)	نرمی (cm ² /gr)	زمان گیرش (hour: min)		درصد آب خمیر نرمال w/c (%)	مقاومت فشاری (MPa)	
			اولیه	نهایی		۷ روزه	۲۸ روزه
			نوع ۲	۳/۱۵	۲۸۰۰	۳:۱۰	۴:۰۵

جدول ۲. دانه بندی مصالح سنگی استفاده شده

دانه بندی ترکیبی*	۸۵ درصد ماسه + ۱۵ درصد پودر سنگ	پودر سنگ	ماسه	شن	الک
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱"
۹۷	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۴	3/4"
۸۱	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۶۲	1/2"
۶۷/۵	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۳۵	3/8"
۴۸/۲	۹۵/۸	۱۰۰	۹۵	۰/۸	No. 4
۳۵/۸	۷۱/۲	۹۸	۶۷	۰/۲	No. 8
۲۶/۵	۵۳	۸۷	۴۷	-	No. 16
۱۶	۳۲/۱	۶۴	۲۶/۵	-	No. 30
۱۰/۶	۲۱/۲	۵۴	۱۵/۴	-	No. 50
۴/۵	۹/۰	۴۱	۳/۳۶	-	No. 100
۲/۵۴	۵/۱	۲۸	۱/۰۳	-	No. 200
۰	۰	۰	۰	-	Pan

* درصد ترکیب مصالح سنگی برابر است با ۵۰ درصد شن، ۴۲/۵ درصد ماسه و ۷/۵ درصد پودر سنگ

۲-۵ عمل آوری با ترکیبات عمل آوری

سطوح نمونه‌ها توسط ماده عمل آوری که به صورت افشانه انجام گرفت، پوشانده شدند و نمونه‌ها در معرض شرایط محیطی آزمایشگاه با دمای ۲۳ درجه سانتیگراد و رطوبت نسبی ۳۷ تا ۴۰ درصد قرار گرفتند. ویژگی‌های ماده عمل آوری مورد استفاده به شرح زیر بوده است: کشور تولید کننده آلمان و ماده به صورت مایع و رنگ سفید شیری بوده است. مقدار مصرف توصیه شده توسط تولید کننده ۱۴۰-۱۰۰ گرم/سانتیمتر مربع بیان شده است که در این پروژه به میزان ۱۳۰ گرم/سانتیمتر مربع مصرف شد.

۳-۵ عمل آوری در شرایط محیطی آزمایشگاه

نمونه‌ها بدون حفاظت خاصی در معرض شرایط محیطی آزمایشگاه با دمای ۲۳ درجه سانتیگراد رطوبت نسبی ۳۷ تا ۴۰ درصد قرار گرفتند.

۶. طرح اختلاط

با مشخص بودن مقدار مواد سیمانی، طرح اختلاط مخلوطهای بتن غلتکی روسازی در چارچوب ضوابط کلی ACI 211.3 [۱۹] انجام شد. میزان آب به نحوی که کارایی بتن با استفاده از آزمایش میز وی بی (VeBe) اصلاح شده طبق روش ASTM C1170، حدود ۴۰ ثانیه به دست آید، تعیین شد. باید توجه شود که هرچند برای مخلوطهای بتن غلتکی سده سازی، زمان وی بی اصلاح شده عمدتاً در محدوده ۱۵ تا ۲۵ ثانیه توصیه می شود، اما زمانهای وی بی اصلاح شده پیشنهادی توسط مراجع برای بتن غلتکی روسازی طولانی تر بوده و محدوده ۳۰ تا ۵۵ ثانیه توسط مراجع توصیه شده است [۲۰]. اجزای مخلوط های مورد مطالعه به شرح جدول ۵ تعیین شدند.

جدول ۵. مقادیر اجزای مخلوط های بتن غلتکی روسازی مورد مطالعه

مقدار مصالح سنگی در حالت $SSDKg/m^3$			نسبت آب به مواد سیمانی	مقدار آب آزاد Kg/m^3	مقدار دوده سیلیس Kg/m^3	درصد دوده سیلیس	مقدار سیمان	کد مخلوط
پودر سنگ	ماسه	شن						
۱۴۲	۸۰۴	۹۴۶	۰/۴۰	۱۴۱	۰	۰	۳۵۰	350 S0
۱۳۸	۷۷۷	۹۱۴	۰/۴۴	۱۵۵	۳۵	۱۰	۳۱۵	350S10
۱۴۷	۸۳۵	۹۸۳	۰/۴۸	۱۳۳	۰	۰	۲۷۵	275 S0
۱۴۳	۸۱۲	۹۵۶	۰/۵۳	۱۴۷	۲۷/۵	۱۰	۲۴۷/۵	275 S10

همچنین مشخصات فیزیکی این سیمان که بر اساس روشهای ارایه شده در استاندارد ASTM C150 تعیین شده در جدول ۴ آمده است.

چنان که نتایج نشان می دهند ترکیب شیمیایی و خواص فیزیکی مکانیکی سیمان استفاده شده، با الزامات استاندارد ASTM C150 برای سیمان نوع ۲ سازگاری دارد.

۳-۴ آب

در ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی این پروژه و همچنین برای عمل آوری نمونه‌ها در شرایط مرطوب از آب آشامیدنی شهر تهران استفاده شده است.

۴-۴ دوده سیلیس

دوده سیلیس به رنگ خاکستری روشن از منابع داخلی تهیه شد که سطح ویژه آن براساس آزمایش جذب نیتروژن (BET) برابر ۲۰/۴ مترمربع تعیین شد.

تجزیه شیمیایی دوده سیلیس استفاده شده در این تحقیق در جدول ۳ آمده است.

۵. شرایط عمل آوری نمونه‌های بتن غلتکی

برای بررسی تأثیر شرایط مختلف عمل آوری بر خواص مقاومتی و دوام بتن‌های غلتکی، نمونه‌های ساخته شده پس از خروج از قالب‌ها به شرح زیر عمل آوری شدند:

۱-۵ عمل آوری در آب

نمونه‌ها تا سن ۲۸ روز داخل مخزن آب با دمای ۱۹ الی ۲۱ درجه سانتیگراد قرار داده شدند.

۷. آزمایشهای انجام شده

۱-۷ نوع، تعداد و سن نمونه‌های آزمایشگاهی

علاوه بر انجام آزمایش تعیین زمان وی. بی اصلاح شده بر روی بتن تازه، آزمایش‌های تعیین خواص مقاومتی (مقاومت فشاری، مقاومت خمشی) و خواص دوام (تعیین ضریب نفوذپذیری، جذب آب حجمی، میزان تخلخل و جذب مویینه) روی بتن سخت شده طبق جدول ۶ انجام شد.

جدول ۶. نوع، تعداد و سن نمونه‌های آزمایشگاهی

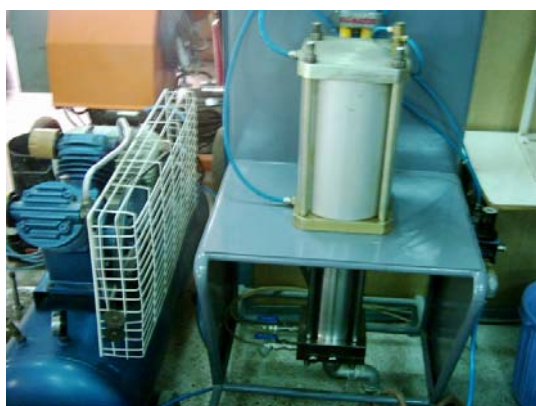
تعداد نمونه	ابعاد	سن نمونه	استاندارد	آزمایش
۳	استوانه ۱۵×۳۰	۲۸روز	ASTM C39	مقاومت فشاری
۳	منشور ۱۰×۱۰×۵۰	۲۸روز	ASTM C78	مقاومت خمشی
۲	استوانه ۱۵×۳۰	۲۸روز	USBR 4913	نفوذپذیری
۳	قطعات منشور نیمه شده باقیمانده از آزمایش مقاومت خمشی	۲۸روز	ASTM C642	جذب آب و میزان تخلخل بتن سخت شده
۳	قطعات منشور نیمه شده باقیمانده از آزمایش مقاومت خمشی	۲۸روز	RILEM	جذب آب مویینه

۴-۷ آزمایش تعیین ضریب نفوذپذیری

نفوذپذیری یکی از شاخص‌های مهم کیفی بتن است. دو عامل مهم تعیین‌کننده نفوذپذیری، یکی فضای خالی به جا مانده در بتن در اثر پرنشیدن با خمیر سیمان و دیگری تخلخل در خمیر سیمان هیدراته است. با توجه به ترکیب اختلاط و تکنیک کوبیدن بتن‌غلتکی، نفوذپذیری آن نسبت به بتن معمولی، متفاوت خواهد بود. در آزمایش‌های این طرح، ضریب نفوذپذیری نمونه‌ها با استفاده از روش و تجهیزات شرح داده شده در USBR 4913، [۲۱]، اندازه‌گیری شد.



شکل ۳. نحوه قرار گرفتن نمونه خمشی زیر دستگاه



شکل ۴. تجهیزات آزمایش تعیین ضریب نفوذپذیری بتن

۲-۷ نحوه ساخت نمونه‌های استوانه‌ای ۱۵×۳۰ سانتیمتر

بتن غلتکی

تهیه نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM C1176 و اعمال سربار به شکل استوانه فولادی به قطر ۱۴/۳ میلیمتر و وزن ۹/۱ کیلوگرم انجام شد.

۳-۷ نحوه ساخت نمونه‌های منشوری

از استاندارد ASTM C78 برای تعیین مقاومت خمشی بتن استفاده شد. برای ساخت نمونه‌های خمشی قالبهای منشوری ۱۰×۱۰×۵۰ cm مورد استفاده قرار گرفتند و برای متراکم کردن بتن داخل قالب‌های منشوری، میز لرزان و سربار با وزن ۲۵/۷ کیلوگرم/سانتیمتر مربع بکار گرفته شد.

۷-۵ تعیین جذب آب و درصد تخلخل بتن سخت شده
جذب آب و درصد تخلخل نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM 642 تعیین شدند. طبق این استاندارد، نمونه‌ها هر شکلی می‌توانند داشته و قطعاتی از نمونه‌های استوانه‌ای، مکعبی و یا منشوری باشند. اما حجم نمونه نباید کمتر از ۳۵۰ سانتیمتر مکعب شود. در این پروژه از قطعات منشور نیمه شده، حاصل از آزمایش مقاومت خمشی، برای تعیین درصد جذب آب و تخلخل استفاده شده است.

۸-۲ مقاومت فشاری و خمشی

نتایج حاصل از آزمایش‌های تعیین مقاومت‌های فشاری و خمشی در جدول ۷ ارائه شده است. نتایج نشانگر آن هستند که با کاربرد مخلوط بتن غلتکی به مقدار ۳۵۰ کیلوگرم سیمان در متر مکعب، مقاومت ۲۸ روزه نمونه استوانه‌ای برابر $44/5 \text{ MPa}$ حاصل شده است. شایان توجه است که الزامات مقاومتی تعیین شده توسط منبع فنی آمریکا و برخی کشورهای اروپایی برای روسازی‌های بتن غلتکی مقادیر حداقل $27/5 \text{ MPa}$ الی 32 MPa را قید می‌کنند [۱،۲،۲۳] که مقاومت به دست آمده در این تحقیق با حاشیه ایمنی زیادی، این الزامات را برآورده می‌سازد.

مخلوط حاوی ۲۷۵ کیلوگرم سیمان در متر مکعب، مقاومت فشاری استوانه‌ای ۲۸ روزه برابر $33/9 \text{ MPa}$ را به دست داده است که هر چند این مقدار بیش از مقادیر الزامات حداقل مقاومتی بالاست، اما ممکن است حاشیه ایمنی لازم را بسته به الزامات پروژه مورد نظر تأمین نکند.

تأثیر پارامترهایی چون روش عمل‌آوری و جایگزینی بخشی از سیمان با دوده سیلیس بر مقاومت فشاری و مقاومت خمشی مخلوط‌های حاوی مقادیر مختلف مواد سیمانی در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است نحوه عمل‌آوری، تأثیر بسیار قابل توجهی بر روی مقاومت نمونه‌های بتن غلتکی دارد.

در صورت اعمال نکردن عمل‌آوری (نگهداری در محیط آزمایشگاه با دمای ۲۳ درجه سانتیگراد و رطوبت نسبی ۳۷ تا ۴۰ درصد)، تنها ۵۵ درصد مقاومت قابل حصول با عمل‌آوری مرطوب، به دست آمده است. با کاربرد ترکیبات عمل‌آوری پاششی، مقاومت قابل حصول به طور میانگین ۶۵ درصد مقاومت نمونه‌های مربوط به شرایط عمل‌آوری مرطوب شده است. بررسی نتایج آزمایش‌های مقاومت خمشی نیز روند مشابهی را

۷-۶ تعیین جذب مویینه

از دیگر شاخص‌های دوام بتن مقدار جذب مویینه است. این آزمایش بر روی نمونه‌های بتن غلتکی مطابق با استاندارد RILEM [۲۲] انجام شد. ابتدا نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در گرم‌خانه با دمای ۶۰ درجه سانتیگراد نگهداری شدند تا به وزن ثابت برسند. سپس نمونه‌ها به نحوی در ظرف آب قرار داده شدند که حدوداً ۵ میلیمتر از ارتفاع آنها در داخل آب قرار می‌گرفت. در فواصل زمانی ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۴، ۸، ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعت وزن نمونه ثبت شد. برای محاسبه جذب مویینه، با فرض ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، وزن مخصوص آب، مقدار حجم آب جذب شده محاسبه شد. با مشخص بودن سطح مقطع نمونه‌ها و حجم آب جذب شده، ارتفاع آب جذب شده i بر حسب میلیمتر قابل محاسبه است.

۸ تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی

۸-۱ تأثیر کاربرد دوده سیلیس بر کارایی (زمان وی. بی اصلاح شده)

چنان‌که از نتایج مقادیر اجزاء مخلوط‌های بتن غلتکی روسازی در جدول ۵ مشخص است، مقدار آب اختلاط لازم برای دستیابی به زمان وی. بی اصلاح شده حدود ۴۰ ثانیه، برای مخلوط‌های حاوی ۱۰ درصد دوده سیلیس در مقایسه با مخلوط‌های کنترل حدوداً ۱۰ درصد بیشتر بوده است.

شایان توجه است که نتایج گزارش شده در خصوص تأثیر جایگزینی ۱۰ درصد مواد سیمانی با دوده سیلیس برای مخلوط‌های بتن غلتکی سدسازی با خمیر سیمان کم (حاوی حداکثر ۱۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب مواد سیمانی) نشانگر افزایش نیافتن آب اختلاط مخلوط‌های حاوی دوده سیلیس نسبت به

باقری، محمودیان و فخری

در این نوع بتن‌ها می‌تواند تأثیر منفی بیشتری نسبت به بتن‌های معمولی داشته باشد.

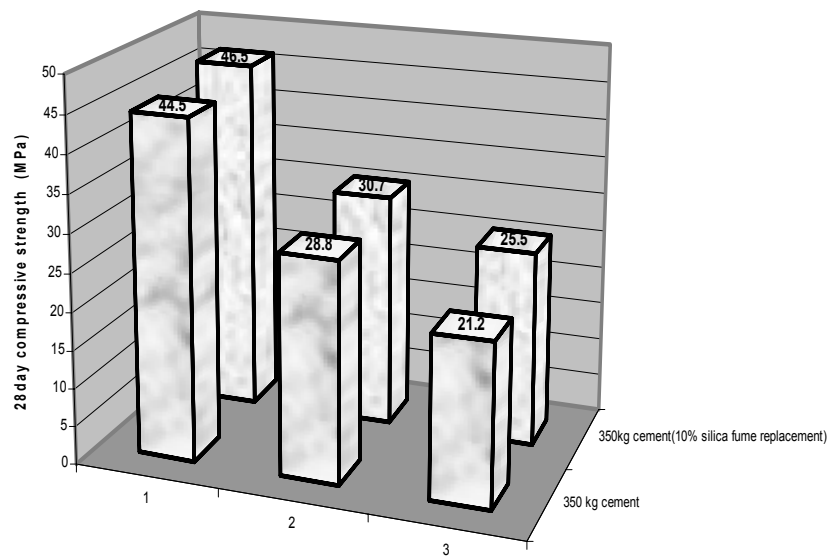
جایگزینی ۱۰ درصد از مواد سیمانی با دوده سیلیس نیز تأثیر جزیی در افزایش مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌ها (به صورت میانگین حدود ۸ درصد) داشته است. این میزان افزایش، کمتر از مقادیر افزایش، گزارش شده برای بتن‌های معمولی است. از دلایل این امر افزایش آب اختلاط مورد نیاز بتن برای حفظ کارایی آن در صورت کاربرد دوده سیلیس بوده است که باعث افزایش نسبت آب به مواد سیمانی، در برابر مخلوط‌های بدون دوده سیلیس شده است. همچنین ضریب راندمان کمتر دوده سیلیس در بتن‌های با نسبت آب به مواد سیمانی کم، از دیگر دلایل عملکرد ضعیف دوده سیلیس در این نوع بتن‌ها است.

نشان می‌دهد. بنابراین بر اساس نتایج به دست آمده، عملکرد مواد عمل‌آوری پاششی در مقایسه با عمل‌آوری مرطوب ضعیف ارزیابی می‌شود. گرچه با کاربرد ترکیبات عمل‌آوری در مقادیر بیش از حد متعارف و دستیابی به ضخامت‌های بیشتر برای غشای ایجاد شده، بتوان عملکرد این نوع عمل‌آوری را بهبود بخشید، اما به نظر می‌رسد که نسبت‌های کم آب به مواد سیمانی در بتن‌های غلتکی روسازی باعث حساسیت بیشتر این نوع بتن‌ها به روش عمل‌آوری است. با توجه به این که در این نوع بتن‌های خشک با مقدار کم آب، واکنش هیدراتاسیون سیمان موجب کاهش رطوبت نسبی در حفره‌های مویین می‌شود، بنابراین جبران نکردن رطوبت در منافذ بتن از طریق عمل‌آوری مرطوب

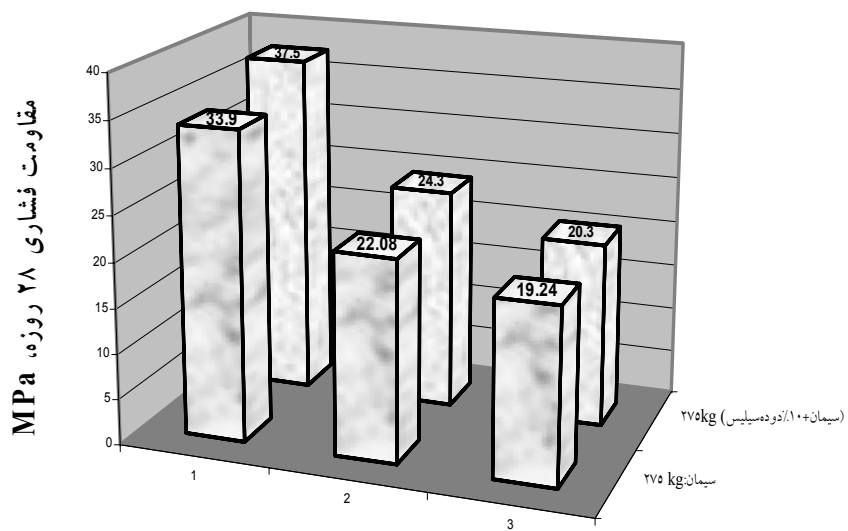
جدول ۷. نتایج آزمایش‌های تعیین مقاومت‌های فشاری و خمشی

نحوه عمل‌آوری	شماره مخلوط	مقدار مواد سیمانی (Kg)	درصد جایگزینی دوده سیلیس	مقدار آب (Kg/m ³)	نسبت آب به مواد سیمانی	f_c - میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)	f_r - میانگین مقاومت خمشی ۲۸ روزه (MPa)
عمل‌آوری در آب	W350S0	۳۵۰	۰	۱۴۱	۰/۴۰	۴۴/۵۰	۶/۳۴
	W350S10	۳۵۰	۱۰	۱۵۵	۰/۴۴	۴۶/۵۰	۶/۸۹
	W275S0	۲۷۵	۰	۱۳۳	۰/۴۸	۳۳/۹۰	۵/۹۷
	W275S10	۲۷۲	۱۰	۱۴۷	۰/۵۳	۳۷/۵۰	۶/۳۰
عمل‌آوری باتریکیات عمل‌آوری	C350S0	۳۵۰	۰	۱۴۱	۰/۴۰	۲۸/۸۰	۴/۱۹
	C350S10	۳۵۰	۱۰	۱۵۵	۰/۴۴	۳۰/۷۰	۴/۴۴
	C275S0	۲۷۵	۰	۱۳۳	۰/۴۸	۲۲/۰۸	۳/۴۲
	C275S10	۲۷۵	۱۰	۱۴۷	۰/۵۳	۲۴/۳۰	۳/۶۰
بدون عمل‌آوری (عمل‌آوری در هوای آزاد)	A350S0	۳۵۰	۰	۱۴۱	۰/۴۰	۲۲/۳۷	۳/۸۸
	A350S10	۳۵۰	۱۰	۱۵۵	۰/۴۴	۲۵/۵۰	۴/۱۰
	A275S0	۲۷۵	۰	۱۳۳	۰/۴۸	۱۹/۲۴	۳/۱۰
	A275S10	۲۷۵	۱۰	۱۴۷	۰/۵۳	۲۰/۳۰	۳/۲۴

تأثیر عمل آوری بر خواص بتن‌های غلتکی روسازی راه، با و بدون دوده سیلیس

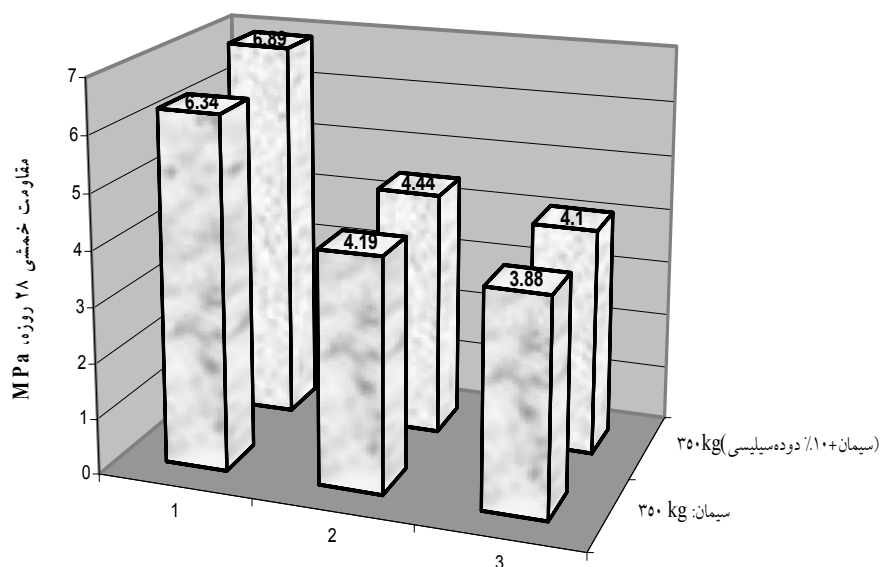


۵- الف) مخلوطهای حاوی ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمربع مواد سیمانی

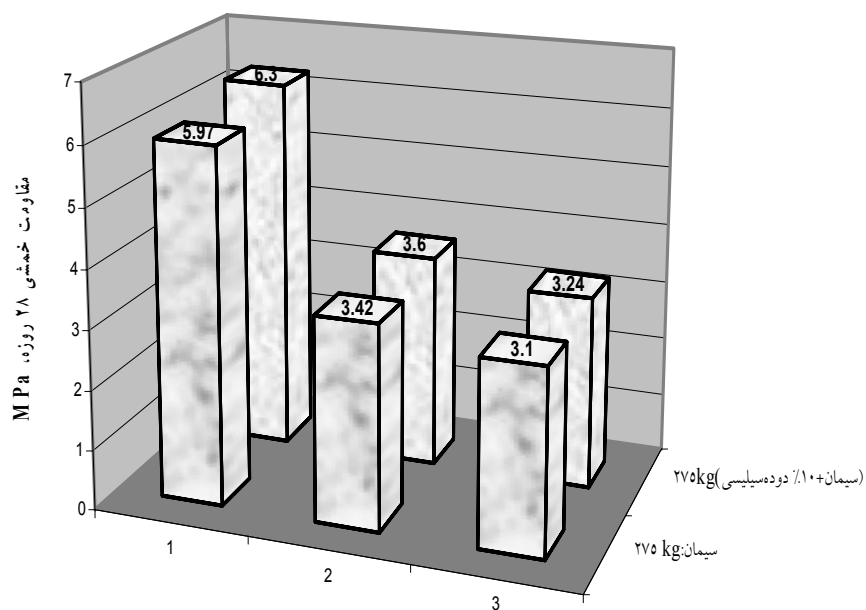


۵- ب) مخلوطهای حاوی ۲۷۰ کیلوگرم بر مترمربع مواد سیمانی

شکل ۵. تأثیر روشهای مختلف عمل آوری بر مقاومت فشاری بتن غلتکی
 (۱- عمل آوری با آب، ۲- عمل آوری با ترکیبات عمل آوری، ۳- بدون عمل آوری)



۶- الف) مخلوطهای حاوی ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمربع مواد سیمانی



۶- ب) مخلوطهای حاوی ۲۷۵ کیلوگرم بر مترمربع مواد سیمانی

شکل ۶. تأثیر روشهای مختلف عمل آوری بر مقاومت خمشی بتن غلتکی

(۱- عمل آوری با آب، ۲- عمل آوری با ترکیبات عمل آوری، ۳- بدون عمل آوری)

تأثیر عمل آوری بر خواص بتن‌های غلتکی روسازی راه، با و بدون دوده سیلیس

۳-۸ تعیین ضریب نفوذپذیری

از ویژگی‌های مهم دوام بتن، ضریب نفوذپذیری آن است. در این پروژه آزمایش تعیین ضریب نفوذپذیری بر روی نمونه‌های حاوی ۲۷۵ کیلوگرم مواد سیمانی انجام شد. نتایج حاصل در جدول ۸ ارایه شده اند.

نتایج به دست آمده نشانگر امکان دستیابی به نفوذپذیری کم ($1/61E-11$ cm/s) برای مخلوطهای بتن غلتکی عمل آوری شده در آب، با وجود خشک بودن و روش اجرایی ویژه بتن غلتکی هستند. نفوذپذیری نمونه‌های عمل آوری شده توسط ترکیبات عمل آوری پاششی، افزایش قابل توجهی نسبت به نمونه‌های مربوط به عمل آوری مرطوب نشان می‌دهد و نمونه‌های عمل آوری شده در هوای آزمایشگاه، بیشترین نفوذپذیری را دارند. کاربرد دوده سیلیس با وجود این که نسبت آب به سیمان این مخلوطها قدری بیشتر از مخلوطهای کنترل است، باعث کاهش ضریب نفوذپذیری می‌شود. روند کلی مشاهده شده از نتایج آزمایش تعیین ضریب نفوذپذیری، مشابه نتایج به دست آمده از آزمایش های های مقاومت است.

۴-۸ درصد وزنی جذب آب و درصد حجمی تخلخل

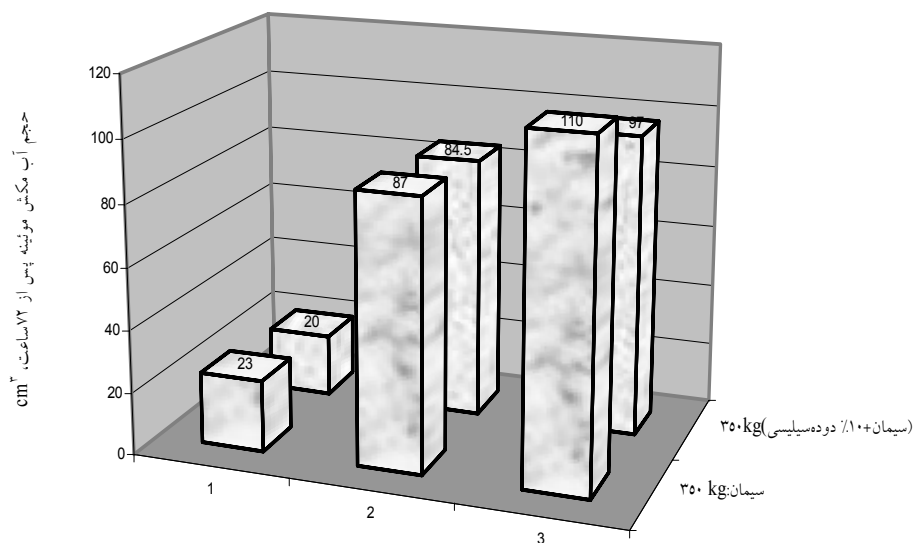
در جدول ۸ نتایج حاصله برای درصد وزنی جذب آب ۴۸ ساعته، درصد وزنی جذب آب پس از ۴۸ ساعت غوطه وری و ۵ ساعت جوشاندن در آب و همچنین درصد حجمی تخلخل محاسبه شده ارایه شده است.

نتایج نشانگر آن هستند که با مخلوطهای بتن غلتکی روسازی امکان دستیابی به بتن‌های با درصد کم جذب آب (حدود ۳/۵ درصد) فراهم است. با کاهش مقدار مواد سیمانی از ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب به ۲۷۵ کیلوگرم/مترمکعب، شاهد افزایش درصد جذب آب از ۳/۵ درصد به ۴/۲ درصد وزنی هستیم.

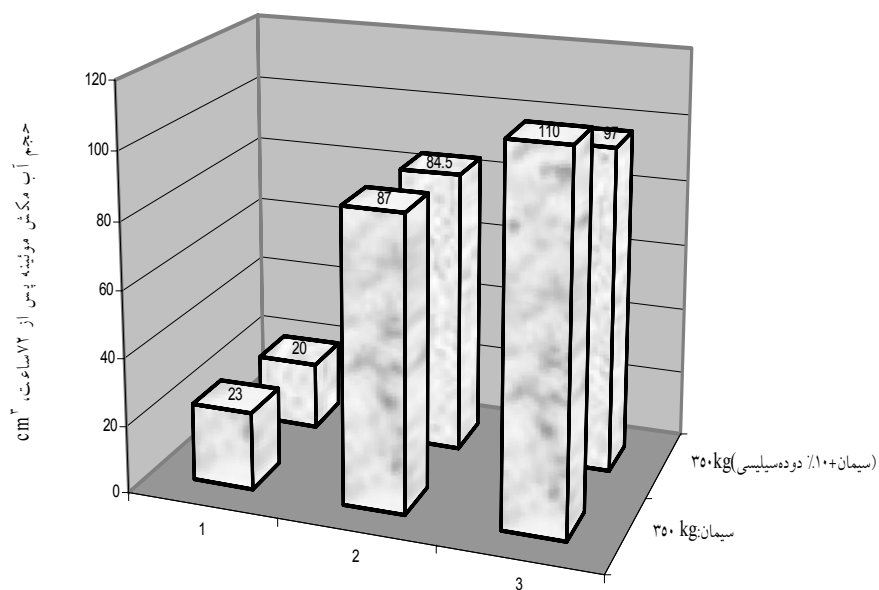
باید گفت که عمل آوری مرطوب، موجب افزایش چشمگیر درصدهای نفوذ شده و مقادیر جذب آب به حدود ۶ درصد افزایش می‌یابد. کاربرد دوده سیلیس در صورت انجام عمل آوری مرطوب باعث کاهش درصد جذب بتن‌های غلتکی روسازی می‌شود، اما نتایج نشانگر آن هستند که در صورت اعمال نکردن شرایط عمل آوری مرطوب، افزودن دوده سیلیس موجب کاهش جذب آب نمی‌شود.

جدول ۸. نتایج آزمایش های تعیین ضریب نفوذپذیری، درصد تخلخل و جذب آب نمونه‌های بتن غلتکی

نحوه عمل آوری	شماره مخلوط	مقدار مواد سیمانی (Kg)	درصد جایگزینی دوده سیلیسی	ضریب نفوذپذیری (cm/sec)	درصد وزنی جذب آب بعد از ۴۸ ساعت استغراق	درصد وزنی جذب آب پس از استغراق و جوشاندن	درصد حجمی تخلخل (فضای خالی نفوذپذیر)
عمل آوری در آب	W350S0	۳۵۰	۰	-	۳/۴۹	۳/۶۲	۸/۳۷
	W275S0	۲۷۵	۰	۱/۶۱E-۱۱	۴/۲۰	۴/۳۲	۹/۹۱
	W350S10	۳۵۰	۱۰	-	۲/۶۹	۲/۷۹	۶/۲۳
	W275S10	۲۷۵	۱۰	۶/۴E-۱۲	۳/۴۴	۳/۵۲	۷/۸۴
عمل آوری با ترکیبات عمل آوری	C350S0	۳۵۰	۰	-	۵/۶۵	۵/۶۵	۱۳/۷۵
	C275S0	۲۷۵	۰	۲/۱۸E-۹	۵/۹۰	۶/۲۰	۱۴/۴۸
	C350S10	۳۵۰	۱۰	-	۵/۹۰	۵/۹۵	۱۳/۷۲
	C275S10	۲۷۵	۱۰	۵/۲۵E-۱۰	۵/۹۵	۶/۱۰	۱۴/۳۵
بدون عمل آوری (در هوای آزاد)	A350S0	۳۵۰	۰	-	۵/۷۵	۶/۳۵	۱۵/۰۹
	A275S0	۲۷۵	۰	۲/۶۴E-۹	۶/۱۰	۶/۷۰	۱۵/۴۰
	A350S10	۳۵۰	۱۰	-	۶/۰۰	۶/۳۵	۱۳/۸۶
	A275S10	۲۷۵	۱۰	۲/۳۶E-۹	۶/۲۷	۶/۸۰	۱۴/۹۰



۷- الف) مخلوطهای حاوی ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمربع مواد سیمانی



۷- ب) مخلوطهای حاوی ۲۷۵ کیلوگرم بر مترمربع مواد سیمانی

شکل ۷. تأثیر روشهای مختلف عمل آوری بر جذب آب مویینه بتن غلتکی
(۱- عمل آوری با آب، ۲- عمل آوری با اندود پوششی، ۳- بدون عمل آوری)

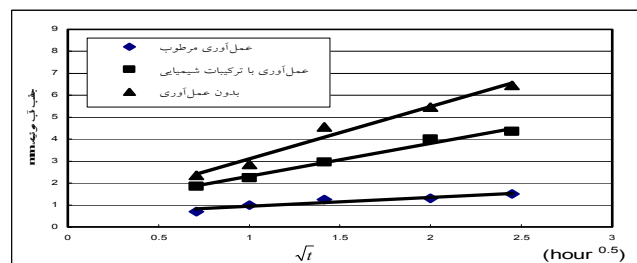
۵-۸ جذب مویینه

برازش شده به نتایج آزمایشگاهی بدون احتساب نقطه مرجع، ضریب جذب مویینه S با واحد $\text{mm/h}^{0.5}$ نامیده می‌شود [۹]. در نمودارهای ۸ و ۹ نتایج آزمایش جذب آب مویینه نمونه‌ها نشان داده شده‌اند. همان‌گونه که مشخص است ضریب جذب مویینه برای نمونه‌های حاوی ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب مواد سیمانی کمتر از مقدار مربوط به مخلوط‌های حاوی ۲۷۵ کیلوگرم بر مترمکعب مواد سیمانی است. روش عمل آوری تأثیر بسیار زیادی بر روی ضریب جذب مویینه نمونه‌ها دارد و با تغییر در نحوه عمل آوری از حالت کاملاً مرطوب به عمل آوری با مواد پاششی، شاهد افزایش چشمگیر ضریب نفوذپذیری خواهیم بود. عمل آوری بدون تمهیدات خاص (در معرض شرایط محیطی آزمایشگاه) باعث قدری افزایش در ضریب نفوذپذیری، نسبت به حالت عمل آوری با مواد پاششی است.

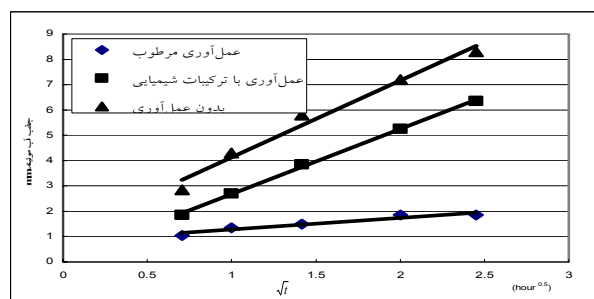
تأثیر جایگزینی بخشی از سیمان با دوده سیلیس در کاهش ضریب نفوذپذیری نمونه‌های عمل آوری شده در آب نسبتاً محدود بوده است. باید توجه کرد که کاربرد دوده سیلیس اثر محسوسی در کاهش جذب آب مویینه نمونه‌های عمل آوری شده با مواد پاششی عمل آوری شده در شرایط محیطی آزمایشگاه ندارد.

در شکل ۷ حجم آب مویینه جذب شده توسط نمونه‌ها طی ۷۲ ساعت ارایه شده است. چنان‌که مشخص است حجم آب جذب شده توسط نمونه‌های عمل آوری شده در آب برای نمونه‌های حاوی ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب سیمان، ۲۳ مترمکعب است. جایگزینی ۱۰ درصد مواد سیمانی با دوده سیلیس موجب قدری کاهش در مقدار جذب مویینه شده است. نمونه‌های عمل آوری شده با ترکیبات پاششی دارای مقدار جذب آب مویینه به میزان قابل توجهی بیش از نمونه‌های عمل آوری شده در آب هستند و بیشترین مقدار جذب آب مویینه مربوط به نمونه‌های عمل آوری نشده (در معرض شرایط دمایی و رطوبتی آزمایشگاه) است. مخلوط‌های حاوی ۲۷۵ کیلوگرم بر مترمکعب مواد سیمانی دارای جذب آب بیشتری نسبت به مخلوط‌های مشابه حاوی ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب مواد سیمانی هستند، اما تأثیر تغییرات در روش عمل آوری و جایگزینی بخشی از سیمان با دوده سیلیس، با آن‌چه برای مخلوط‌های حاوی ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب مواد سیمانی گفته شد، مشابه است.

بین جذر زمان (\sqrt{t}) با حجم آب جذب شده بر واحد سطح نمونه، طی ساعات اولیه، رابطه خطی وجود دارد. شیب خط

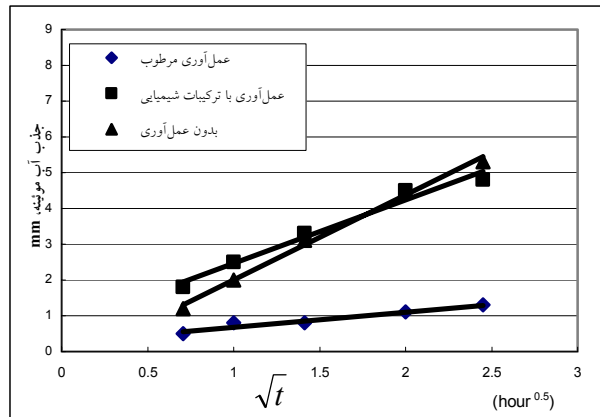


۸- الف) بتن غلتکی حاوی ۳۵۰ کیلوگرم سیمان

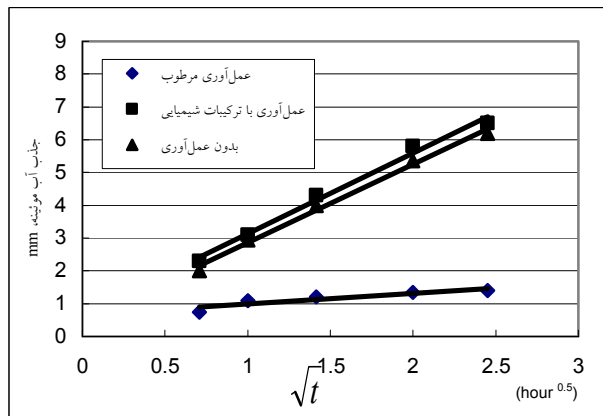


۸- ب) بتن غلتکی حاوی ۲۷۵ کیلوگرم سیمان

شکل ۸، رابطه بین جذر زمان و میزان جذب مویینه نمونه‌های بتن غلتکی بدون دوده سیلیس در شرایط مختلف عمل آوری



۹- الف) بتن غلتکی حاوی ۳۵۰ کیلوگرم سیمان و ۱۰ درصد دوده سیلیس



۹- ب) بتن غلتکی حاوی ۲۷۵ کیلوگرم سیمان و ۱۰ درصد دوده سیلیس

شکل ۹. رابطه بین جذر زمان و میزان جذب مویینه نمونه‌های بتن غلتکی حاوی دوده سیلیس تحت شرایط مختلف عمل آوری

۹. نتیجه گیری

کارایی برابر با مخلوطهای کنترل شد. مقدار افزایش در آب لازم برای اختلاط، حدود ۱۰ درصد بوده است. کاربرد دوده سیلیس تأثیر نسبتاً کمی در افزایش مقاومت های فشاری و خمشی مخلوطها داشته است که علاوه بر کم بودن نسبت آب به سیمانی، افزایش آب اختلاط و در نتیجه افزایش نسبت آب به سیمان از دلایل این امر هستند. تأثیر کاربرد دوده سیلیس بر خواص جذب آب و نفوذپذیری مخلوطها، مشابه با آنچه برای خواص مقاومتی ذکر شد، بوده است. بررسی انجام شده نشانگر تأثیر بسیار چشمگیر روش عمل آوری، بر خواص مقاومتی و دوام مخلوط های بتن غلتکی روسازی بوده است.

بکار بستن عمل آوری باعث افت مقاومتهای فشاری، حدود ۴۵ درصد نسبت به مخلوطهای کنترل که تحت عمل آوری مرطوب بوده اند شده است. عمل آوری با ترکیبات شیمیایی تأثیر نسبتاً کمی در بهبود وضعیت داشته است. میزان افت مقاومت

باوجود کارایی کم و خشک بودن مخلوطهای بتن غلتکی راهسازی، نتایج به دست آمده از بررسی آزمایشگاهی، نشانگر امکان کسب مقاومتهای قابل توجه و پاسخگویی به الزامات مقاومتی مورد نظر مراجع بین‌المللی با مواد و مصالح داخل کشور است. مقاومت فشاری به دست آمده برای مخلوط حاوی ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب سیمان، برابر ۴۴/۵MPa روی نمونه استوانه‌ای بود که با حاشیه ایمنی قابل توجهی الزامات استانداردها و مشخصات فنی کشورهای مختلف را برای بتن غلتکی روسازی راه پاسخگوست. مقدار مواد سیمانی، تأثیر قابل توجهی بر مقاومت این نوع مخلوطها دارد. کاهش مقدار سیمان از ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، به ۲۷۵ کیلوگرم بر مترمکعب، موجب افت مقاومت فشاری از ۴۴/۵MPa به ۳۳/۹MPa شد. کاربرد دوده سیلیس به میزان ۱۰ درصد برای جایگزینی بخشی از سیمان، باعث افزایش مقدار آب اختلاط لازم به منظور دستیابی به

نتایج آزمایشهای تعیین خواص دوام نظیر مقدار تخلخل، جذب آب و نفوذپذیری نیز همانند نتایج آزمایش های تعیین خواص مقاومتی، نشانگر تأثیر عمده روش عمل آوری در کیفیت بتن های غلتکی روسازی راه است. با توجه به این که اقلیم کشور عمدتاً گرم و خشک است، ضروری است در الزامات عمل آوری دقت ویژه صورت گیرد و عمل آوری به وسیله ترکیبات شیمیایی به عنوان تنها روش عمل آوری قابل توصیه نیست.

در صورت کاربرد این مواد نسبت به مخلوطهای کنترل حدود ۳۵ درصد بوده است. تأثیر منفی بکارنبردن عمل آوری مرطوب بر مقاومت‌های خمشی بتن های غلتکی روسازی مطالعه شده، بیشتر از تأثیر مشاهده شده بر مقاومت‌های فشاری بوده است. با توجه به این که عملکرد روسازی های بتنی به صورت خمشی است، روند مشاهده شده، لزوم توجه بیشتر به شرایط عمل آوری بتن های غلتکی روسازی را مورد تأکید قرار می دهد.

۱۰. مراجع

8. Rindal, D. B. and Horrigmoe, G. (1993) "High quality roller compacted concrete pavements", Utilization of High Strength Concrete, Vol. 2, Norwegian Concrete Association, pp 913-920.
9. Neville, A. M. (1995) "Properties of concrete", 4th. edition, London, Longman, 1995.
10. Mindess, S. and Young, F. (2003) "Concrete", 2nd edition, London, Prentice Hall Inc.
11. Nanni, A. (1988) "Curing of roller compacted concrete: strength development", Journal of Transportation Engineering, Vol. 114, No.6.
12. Banthia, N.[et al.]"Permeability of roller compacted concrete", ASCE Journal of Materials in Civil Eng., Vol. 4, No. 1, 1992
13. Delagrave, A., Marchand, J., Pigeon, M. and Boisvert, J. (1997) "Deicer salt scaling resistance of roller compacted concrete pavements", ACI – Materials Journal, March-April 1997.
14. ACI 234R (1996) "Guide for the use of silica fume in concrete", Detroit, American Concrete Institute.
15. گنجیان، اسماعیل (۱۳۷۶) "خواص مکانیکی و فیزیکی میکروسیلیس، ایران"، سمینار بین المللی کاربرد میکروسیلیس در بتن، تهران، ایران.
16. Famili, H. and Bagheri, A. R. (1998) "Effects of Iranian silica fume on water demand and strength of concrete", Proceedings of the Sixth NCB International Conference on Cement and Building Materials, New Delhi.
1. ACI 325.10 (2003) "State of the art report on roller compacted concrete pavements", Detroit, American Concrete Institute.
2. PIARC (1995) "The use of roller compacted concrete for roads", Paris, International Association of Road Congresses.
3. U.S.A.C.E (1995) "Roller compacted concrete pavement design and construction", United States Army Corps of Engineers, Technical Letter No. ETL 110-3-475.
۴. باقری، علیرضا، فخری، منصور، محمودیان، مجتبی (۱۳۸۲) "شناخت خواص و بررسی کاربرد بتن غلتکی در روسازی راه"، مجله مقاومت مصالح و ژئوتکنیک، سال بیستم، بهار ۱۳۸۲.
۵. مرکز تحقیقات و آموزش وزارت راه و ترابری (۱۳۸۳) "دستورالعمل طراحی و اجرای بتن غلتکی در روسازی راههای کشور"، مجری طرح دانشکده عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران: مرکز تحقیقات و آموزش وزارت راه و ترابری.
6. Naik, T.R., Chun, Y., Kraus, R., Singh, S., Pennock, C. and Ramme, W. (2001) "Strength and durability of roller compacted HVFA concrete pavements", Practice Periodical on Structural Design and Construction, November 2001, pp. 154-165.
7. Ghaffori, N., Zhang, Z. "Sulfate resistance of roller compacted concrete", ACI Materials Journal, July – August 1998, pp. 347-355.

21. USBR (1994) "Test designation 4913, procedure for determining water permeability of concrete", United States Bureau of Reclamation.
22. CPC 11.2 (1994) "Water absorption of concrete by capillarity", RILEM Technical Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials.
23. Anderson, R. (1987) "Swedish experience with RCCP", ACI Concrete International, pp. 18-24.

۱۷. باقری، علیرضا، محمودیان، مجتبی "اثر دوده سیلیس بر مقاومت و نفوذپذیری مخلوط‌های بتن غلتکی سدسازی با خمیر سیمان کم تا متوسط"، نشریه علمی پژوهشی دانشگاه مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، سال ۱۵، شماره ۱، ۱۳۸۲

۱۸. شریفی، سید محسن (۱۳۸۰) "اثر دوده سیلیسی در ارضاء خواص بتن غلتکی مورد استفاده در روسازی راه"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه تهران.

پانویس ها

1. Capillary absorption
2. Oven S

19. ASTM C33 "Standard specifications for aggregates for concrete", American Society for Testing and Materials, Volume 4.02.

20. ACI 211.3R (1997) "Guide for selecting proportions for no - slump concrete", Detroit, American Concrete Institute.