

بررسی مشخصه‌های دوام و مقاومت روسازی بتن غلتکی

سید حسام مدنی* (استادیار)

دانشکده‌ی عمران، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان

علیرضا پورخورشیدی (استادیار)

طیبه برهبرکار (استادیار)

جعفر سبحانی (استادیار)

پژوهشگاه ساختمان مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

مهندسی عمران شریف، پاییز ۱۳۹۶ (شماره ۱/۳، ص. ۳۹-۲۵)
دوری ۲ - ۳۳، شماره ۱/۳، ص. ۳۹-۲۵

پژوهش حاضر با هدف بررسی مشخصات دوام و مکانیکی روسازی‌های بتن غلتکی شامل: مقاومت فشاری، مدول گسیختگی، سایش، پوسته‌شدگی سطحی در اثر نمک‌های یخ‌زدا و نفوذ تحت فشار آب در بخش تکنولوژی بتن مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی انجام شده است. نتایج مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روز نشانگر آن هستند که در ۲۸ روز تمام مخلوط‌های مورد بررسی، مقاومت فشاری بالاتر از ۳۵ مگاپاسکال داشته‌اند. نسبت بین مدول گسیختگی و مجذور مقاومت فشاری برابر ۰/۷ به دست آمده است. نتایج نفوذپذیری تحت فشار آب بیانگر آن است که با کاهش نسبت آب به سیمان از ۰/۳۸ به ۰/۳۳ در زمان ویبی برابر، مقدار نفوذ آب از ۱۴ به ۱۰ میلی‌متر کاهش یافته و مقدار نفوذ بسیار کم ۵ میلی‌متری مخلوط‌های حاوی دوده سیلیسی و سیمان پوزولانی مؤید ریزساختار متراکم‌تر مخلوط‌های مذکور است. از نظر پوسته‌شدگی در سیکل‌های یخبندان و مجاورت نمک‌های یخ‌زدا، بیشتر مخلوط‌ها تورق بسیار شدید داشته‌اند. فقط مخلوط حاوی دوده سیلیسی با ۶۰۰ گرم بر مترمربع پوسته‌شدگی در رده‌ی بتن‌های با پوسته‌شدگی متوسط قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: روسازی بتن غلتکی، خواص مکانیکی، مشخصات دوام، پوسته‌شدگی سطحی، زمان ویبی.

۱. مقدمه

بتن غلتکی یکی از انواع بتن‌های بدون اسلامپ است که برای تراکم نیاز به اعمال نیروی خارجی دارد.^[۱] علت عدم روانی بتن غلتکی نسبت به بتن معمولی مقدار خمیر کمتر و حجم سنگ‌دانه‌ی بیشتر آن است. اخیراً در کشور ما به طراحی و اجرای روسازی‌های بتن غلتکی توجه جدی شده است. پژوهش حاضر براساس مطالعات انجام شده در بخش تکنولوژی بتن مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی به بررسی مشخصات عملکردی و دوام روسازی‌های بتن غلتکی پرداخته است. با توجه به آنکه رویه‌های بتن غلتکی در معرض شرایط آسیب‌رسان محیطی قرار دارند، لذا لازم است مشخصات مکانیکی و دوام مطلوبی داشته باشند.

از نظر مشخصه‌های دوام، رویه‌های بتن غلتکی باید بسته به شرایط محیطی، باید عملکردی مناسب در برابر یخبندان، سایش و جمع‌شدگی داشته باشند. یکی از پدیده‌هایی که در یخبندان اتفاق می‌افتد، پوسته‌شدگی سطحی بتن در اثر پاشش

* نویسنده مسئول

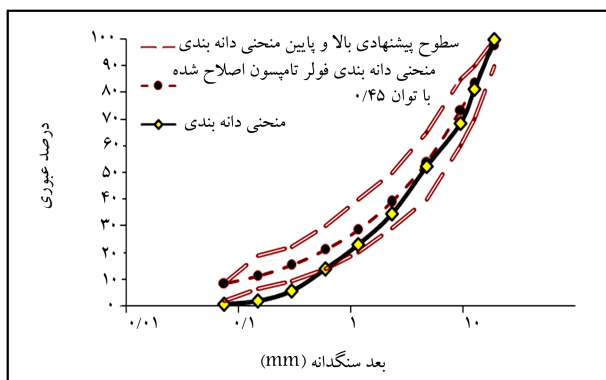
تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۲/۱۵، اصلاحیه ۱۹/۱۰/۱۳۹۴، پذیرش ۲۶/۱۰/۱۳۹۴.

h.madani@kgut.ac.ir
pourkhorshidi@bhrc.ac.ir
parhizkar@bhrc.ac.ir
sobhani@bhrc.ac.ir

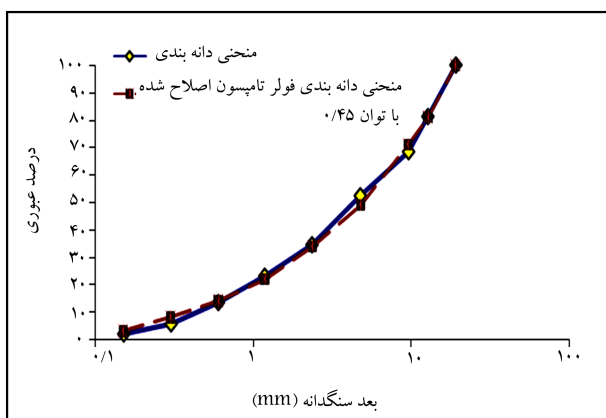
نمک‌های یخ‌زداست که در آن به دلیل یخ زدن آب حاوی نمک به تدریج سطح بتن به صورت پوسته‌هایی جدا دچار زوال سطحی می‌شود.^[۲-۴]

برای مقابله با پدیده‌ی یخبندان، توصیه‌های متعددی ارائه شده است. اشباع بودن بتن در پدیده‌ی یخبندان، آب کافی برای آسیب بتن در پدیده‌ی یخبندان را فراهم خواهد ساخت. به این دلیل در برخی مطالعات توصیه شده است که برای مقابله با اثر یخبندان روسازی‌های بتن غلتکی در یخ‌زدگی و پوسته‌شدگی سطحی، بتن از حالت اشباع خارج شود. بر این اساس به نظر می‌رسد کاهش نفوذپذیری بتن و حجم منافذ قابل نفوذ به کاهش سرعت اشباعیت آن در شرایط مرطوب کمک کند.^[۵،۲]

از سوی دیگر، یکی از مهم‌ترین عوامل آسیب بتن در شرایط یخبندان، پدیده‌ی پوسته‌شدگی سطحی در مجاورت نمک‌های یخ‌زداست.^[۶] لیکن برخی مراجع به این نکته تأکید دارند که آزمایش‌های استاندارد همچون ASTM C۶۷۲،^[۵] و ASTM C۶۶۶،^[۷] ضوابط سخت‌گیرانه دارند. مثلاً در پژوهشی فقط ۸ مورد از ۳۳ مورد بررسی شده در مونترآل تورق کمتر از ۱ کیلوگرم بر مترمربع داشته‌اند،^[۸] لیکن در عمل روسازی‌ها پس از ۴ سال، هیچ اثری از ضعف بتن در برابر یخبندان مشاهده



شکل ۱. دانه‌بندی استفاده شده در مقایسه با محدوده‌های دانه‌بندی پیشنهادی ACI ۳۰۵-۱۰ R.



شکل ۲. دانه‌بندی استفاده شده در مقایسه با دانه‌بندی اصلاح‌شده فولر تامپسون توان ۰/۴۵.

شده است (شکل ۲). رابطه‌ی ۱، حالت اصلاح شده‌ی منحنی فولر تامپسون را نشان می‌دهد. در صورتی که d در رابطه‌ی مذکور برابر $۰/۷۵$ قرار داده شود، مقدار درصد عبوری برابر صفر به دست خواهد آمد. این بدان معنا نیست که درصد عبوری از الک ۲۰۰ صفر است، بلکه تلاشی برای حذف زیر الک ۲۰۰ و اصلاح منحنی دانه‌بندی به این طریق است. به این ترتیب دانه‌بندی از الک ۱۰۰ به بعد انجام و در آن از نسبت حجمی ماسه، شن نخودی و شن بادامی برابر با $۰/۲۱۵$ ، $۰/۲۱۵$ و $۰/۲۱۵$ برای ساخت مخلوط‌های بتن استفاده شده است. دانه‌بندی فولر تامپسون با حذف ریزدانه‌ی زیر الک ۲۰۰ به صورت رابطه‌ی ۱ است:

$$P = \frac{100}{1 - \left(\frac{0.75}{D}\right)^n} \times \left[\left(\frac{d}{D}\right)^n - \left(\frac{0.75}{D}\right)^n \right] \quad (1)$$

در مطالعه‌ی حاضر دو نوع سیمان شامل: سیمان تپ II و سیمان پوزولانی تولید کارخانه‌ی سیمان تهران استفاده شده است. در جدول ۱، ترکیب شیمیایی سیمان‌ها ارائه شده است. یک محصول دوده‌ی سیلیسی با سطح ویژه‌ی ۲۱ مترمربع برگرم تولید شرکت ازنا تهیه شده است که عمدتاً ذرات بزرگ‌تر از ۱۰۰ نانومتر و به طور متوسط $۱۵۰-۲۰۰$ نانومتر دارد. در طرح ساخته شده با دوده‌ی سیلیسی، ماده‌ی ذکرشده قبل از اختلاط با سایر مصالح، ابتدا در غلظت ۳% با آب توسط میکسر دور بالا به مدت ۴ دقیقه مخلوط شده است. فوق روان‌ساز استفاده‌شده، از نوع پالی کربکسیلاتی و تولید شرکت BASF بوده و آب موجود در آن در مقدار آب اختلاط لحاظ شده است.

نشده است.^[۹] در پژوهش دیگری استفاده از ASTM C۱۲۶۲،^[۱۰] (استاندارد یخبندان بلوک‌های بتنی) به جای روش ASTM C۶۷۲ پیشنهاد شده است. اخیراً روشی جایگزین ارائه شده است که ضعف‌های کمتری نسبت به روش متداول ASTM C۶۷۲ دارد.^[۱۱] مثلاً برخلاف روش ASTM C۶۷۲، نفوذ سرما فقط از یک بُعد صورت می‌گیرد، نمونه‌های بتنی شرایط پیش‌اشباعی را قبل از قرارگیری در شرایط یخبندان طی می‌کنند و به صورت کمی میزان مقاومت در برابر پوسته‌شدگی گزارش می‌شود.

از دیگر مشخصه‌های عملکردی روسازی بتن غلتکی، مقاومت در برابر سایش است. با توجه به آنکه مقاومت سایشی متناسب با مقاومت فشاری است، آیین‌نامه‌ی ACI ۲۰۱،^[۱۲] یک مقاومت فشاری کمینه‌ی ۴۰ مگاپاسکال را برای کسب دوام مناسب در برابر سایش توصیه کرده است. همچنین در بررسی به عمل آمده در سال ۲۰۰۵ ،^[۱] بتن با مقاومت ۴۰ مگاپاسکال و آب به سیمان $۰/۳۵$ ، عملکرد خیلی خوبی در سایش تشخیص داشته است.

از نظر خواص مقاومتی نیز لازم است روسازی بتن غلتکی، مشخصه‌های کافی داشته باشد. به‌عنوان نمونه، آیین‌نامه‌ی ACI-۳۲۵ مقاومت فشاری دست‌کم ۲۸ مگاپاسکال را برای ساخت روسازی بتن غلتکی لازم دانسته است. همچنین در آیین‌نامه‌ی مذکور، یک مدول گسیختگی (مقاومت خمشی) $۴-۵$ مگاپاسکال توصیه شده است. لیکن، تهیه‌ی نمونه‌های منشوری برای آزمایش مدول گسیختگی به ویژه برای بتن غلتکی کمی دشوار است و لازم است روابطی برای تعیین مقدار مدول گسیختگی به صورت تابعی از مقاومت فشاری ارائه شود.^[۱۳]

مشخصات مصالح موجود در ایران متفاوت از مناطقی همچون امریکای شمالی است و نمی‌توان انتظار داشت نسبت‌های اختلاط مشابه، خواص و کارایی یکسانی را به ارمغان آورند. مثلاً مقدار سیمان در اغلب مطالعات انجام‌شده در امریکای شمالی در محدوده‌ی $۲۵۰-۳۰۰$ کیلوگرم بر مترمکعب و عمدتاً ۳۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب قرار دارد. این مقدار سیمان در نسبت‌های آب به سیمان $۰/۳۵$ و کمتر توانسته است حجم خمیر کافی را برای پرکردن منافذ سنگ‌دانه‌ها و دست‌یابی به کارایی بتن تأمین کند. لیکن به دلیل مقدار کم فیلا (عبوری از الک ۷۵ میکرومتر) ماسه‌های تولیدی در ایران امکان دستیابی به منحنی‌های دانه‌بندی شبیه موارد ارائه شده در بولتن RD۱۳۵،^[۶] ممکن نیست که این مسئله قطعاً سبب تغییر در مقدار سیمان و افزودنی‌های پودری مخلوط برای جبران خمیر کمتر خواهد شد. بر این اساس، مطالعه‌ی حاضر به بررسی تأثیر عواملی همچون مقدار و نوع سیمان و نسبت آب به سیمان در خواص مکانیکی و دوام مخلوط‌های بتن غلتکی در کارایی اولیه‌ی یکسان پرداخته است. پارامترهای مورد بررسی شامل مقاومت در برابر پوسته‌شدگی سطحی در حضور نمک‌های یخ‌زدا، مقدار نفوذپذیری، سایش سطحی، مقاومت فشاری و مدول گسیختگی هستند.

۲. مصالح و روش‌ها

۲.۱. مصالح

برخی مراجع، دانه‌بندی ایده‌آل را دانه‌بندی منطبق بر منحنی فولر تامپسون (با توان $۰/۴۵$) $(0.75)^n \times (D/D_{max})^{1.4}$ (درصد عبوری) دانسته‌اند.^[۱۴،۹،۲] لیکن منحنی مذکور مطابق شکل ۱، نمی‌تواند بر محدوده‌های پیشنهادی منطبق شود. به همین لحاظ در مطالعه‌ی حاضر با توجه به کم فیلا بودن ماسه‌های ایران از منحنی دانه‌بندی اصلاح‌شده فولر تامپسون با حذف زیر الک ۲۰۰ و توان $۰/۴۵$ استفاده

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان تیپ II و پوزولانی مورد استفاده در مخلوط های بتن.

	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O, ۰.۶۵K ₂ O ⁺	LOI	سطح ویژه بلین (cm ² /g)
سیمان تیپ II	۲۲٫۵	۶۱٫۷	۴٫۴۸	۳٫۱۸	۴٫۰۸	۱٫۸	۰٫۷۴	۱٫۱۷	۲۸۱۴
سیمان پوزولانی	۲۶٫۵	۵۳٫۶	۵٫۸۴	۳٫۲۷	۳٫۷۲	۲٫۱۴	-	۳٫۶۸	۳۰۰۰

جدول ۲. طرح مخلوط های بتن اصلی استفاده شده در مطالعه ی حاضر.

مخلوط	سیمان	دوده ی سیلیسی	ماسه	شن نخودی	شن بادامی	آب	فوق روان ساز
(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)
Rccp - ۳۵° - ۰٫۳۳	۳۵۰	۰	۱۱۵۷	۴۱۶	۴۱۴	۱۱۵٫۸	۳٫۵
Rccp - ۳۵° - ۰٫۳۵	۳۵۰	۰	۱۱۴۴	۴۱۱	۴۱۰	۱۲۲٫۵	۲٫۲۷
Rccp - ۳۵° - ۰٫۳۸	۳۵۰	۰	۱۱۳۰	۴۰۶	۴۰۵	۱۳۳٫۰	۰
Rccp - ۳۲۵ - ۰٫۴۰	۳۲۵	۰	۱۱۴۴	۴۱۱	۴۱۰	۱۳۰٫۰	۰
Rccp - ۳۷۵ - ۰٫۳۶	۳۷۵	۰	۱۱۱۴	۴۰۱	۳۹۹	۱۳۵٫۰	۰
Rc - poz - ۳۵° - ۰٫۳۵	۳۵۰	۰	۱۱۴۴	۴۱۱	۴۱۰	۱۲۲٫۵	۳٫۰
Rc - SF/۷ - ۳۵° - ۰٫۳۷	۳۲۵٫۵	۲۴٫۵	۱۱۳۳	۴۰۷	۴۰۶	۱۲۹٫۵	۳٫۰

۴٫۹ کیلوپاسکال روی میز ویبی اصلاح شده^[۲۰] استفاده شده است. متأسفانه به دلیل سنگینی سربره ی تهیه شده برای تراکم با میز ویبی اصلاح شده کار با آن بسیار مشکل است، لذا از آن استفاده نشده است. دیگر روش مرسوم تراکم مخلوط های منشوری، استفاده از چکش است. به این منظور از چکش های مشابه نمونه های معرفی شده در استاندارد ASTM C ۱۴۳۵ استفاده شده است.^[۲۱]

در مطالعه ی حاضر، به صورت مشابه یک صفحه ی منشوری به وسیله ی یک شفت (با مجموع وزن ۶٫۸ کیلوگرم) به چکش متصل شده است. بتن در ۳ لایه، درون قالب منشوری با ابعاد افقی ۱۰ سانتی متر در ۴۰ سانتی متر و ارتفاع ۷٫۵ سانتی متر تراکم شده است. در لایه ی آخر، یک هابر برای جلوگیری از سرریز نمونه ها بر روی قالب ها قرار داده شده است. تصویر کوبه ی قالب منشوری و قالب به همراه هابر نمونه های منشوری در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳. قالب و کوبه ی نمونه های منشوری.

۲.۲. طرح اختلاط، نحوه ی ساخت و قالب گیری نمونه ها

در مخلوط ها، تأثیر تغییرات نسبت آب به مواد سیمانی با در نظر گرفتن ۳ نسبت ۰٫۳۳، ۰٫۳۵، ۰٫۳۸ و تغییرات مقدار سیمان با لحاظ کردن ۳ مقدار ۳۲۵، ۳۵۰ و ۳۷۵ کیلوگرم بر مترمکعب و مقایسه ی سیمان های حاوی مواد پوزولانی (دوده ی سیلیس و پوزولان طبیعی) در پارامترهای دوام و خواص مکانیکی بررسی شده است. پس از ساخت، زمان ویبی مخلوط های بتن غلتکی تحت روش استاندارد ASTM C ۱۱۷۰^[۱۵] تعیین و به گونه یی تنظیم شده است که بلافاصله پس از ساخت، حدوداً ۱۰-۲۰ ثانیه بوده و پس از حدود ۳۰ تا ۴۰ دقیقه از زمان ساخت به حدود ۳۰-۵۰ ثانیه افزایش یافته است. این زمان ویبی به این دلیل انتخاب شده است که معمولاً مدت زمانی بین زمان ساخت و اجرای بتن غلتکی لازم است. لازم به ذکر است که زمان ویبی مناسب روسازی های بتن غلتکی در برخی مراجع ۳۰-۴۰ ثانیه^[۱۶] و در برخی دیگر ۵۰-۷۵ ثانیه^[۱۷] پیشنهاد شده است. همچنین در ساخت برخی مخلوط ها که بدون فوق روان ساز، زمان ویبی اولیه ی بالایی داشته اند، از فوق روان ساز استفاده شده است. لازم به ذکر است که هر مخلوط اصلی به منظور تهیه ی نمونه های استوانه یی و منشوری، ۲ بار ساخته شده است. در جدول ۲، طرح مخلوط ها ارائه شده است. پس از قالب گیری نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت تحت پوشش پارچه ی مرطوب عمل آوری و سپس در مخزن های آب اشباع از آهک در دمای ۱ ± ۲۳ درجه ی سانتی گراد تا زمان انجام آزمایش ها نگهداری شده اند.

۳.۲. روش تهیه ی نمونه های استوانه یی و منشوری

در مطالعه ی حاضر، نمونه های استوانه یی با قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتی متر طبق روش استاندارد ASTM C ۱۱۷۶^[۱۸] با استفاده از میز ویبی اصلاح شده در ۴ لایه تراکم شده اند. برای تراکم نمونه های منشوری، روش استاندارد تدرین نشده است. در برخی مطالعات برای تراکم نمونه های مذکور از میز ویبی استفاده شده است. مثلاً برای تراکم نمونه ها از سربره با تنش ۷٫۳۲ کیلوپاسکال^[۱۹] و از تنش

۴.۲. آزمایش تعیین مقاومت در برابر یخبندان (ذوب و انجماد)،

مطابق پیش‌نویس جایگزین استاندارد ASTM C672

پدیده‌ی یخبندان و آب شدن به‌صورت‌های مختلف می‌تواند دوام روسازی بتن غلنتکی را تحت تأثیر قرار دهد. یکی از انواع آسیب‌ها، پوسته‌شدگی سطحی بتن در اثر پاشش نمک‌های یخ‌زداست. [۲۳، ۲۲، ۱۷، ۹، ۱۲] روش آزمایش استفاده شده در مطالعه‌ی حاضر، برای بررسی پوسته‌شدگی سطحی برگرفته از روش تعیین‌شده در پژوهشی در سال ۲۰۱۲، [۱۱] به‌عنوان پیش‌نویس جایگزین ASTM C672، [۵] است.

۵.۲. آزمایش تعیین نفوذپذیری تحت فشار آب

نفوذپذیری تحت فشار آب مطابق با استاندارد EN ۱۲۳۹۰-۸، [۲۵] در سن ۲۸ روزه انجام شده است.

۶.۲. آزمایش تعیین مقاومت در برابر سایش

مقاومت در برابر سایش مطابق روش مشخص‌شده در استاندارد BS EN ۱۳۳۸، [۲۶] روی نمونه‌های ۲۸ روزه به‌دست آمده از برش نمونه‌های منشوری انجام شده است. در شکل ۴، تصویر دستگاه سایش و سطح ساییده شده ارائه شده است.

۷.۲. آزمایش تعیین مدول گسیختگی

مدول گسیختگی (مقاومت خمشی) نمونه‌های منشوری در سن ۲۸ روزه مطابق با استاندارد ASTM C78 تعیین شده است. در مطالعه‌ی حاضر مدول گسیختگی، بیشینه‌ی تنش کششی است که بتن تحت نیروهای خمشی قبل از گسیختگی تحمل می‌کند. برای این منظور از روش بار تک‌قطبیه‌ی در وسط نمونه استفاده شده است. در آزمایش مذکور، فاصله‌ی تکیه‌گاه‌ها برابر ۲۴ سانتی‌متر تنظیم و بار در وسط فاصله‌ی ذکرشده وارد و بیشینه‌ی تنش معادل بار گسیختگی در وسط نمونه به‌عنوان مدول گسیختگی تعیین شده است.

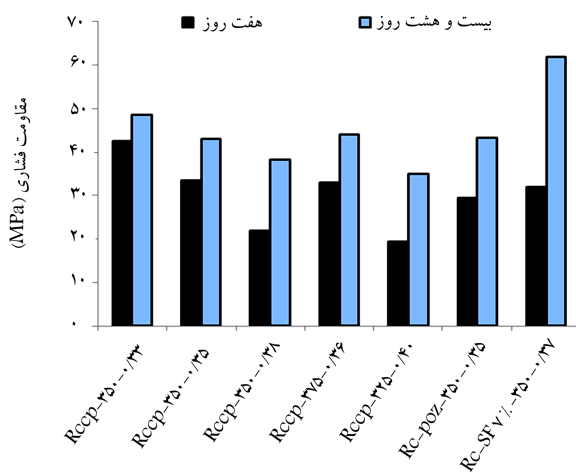
۳. نتایج مطالعات آزمایشگاهی

۱.۳. مقاومت فشاری

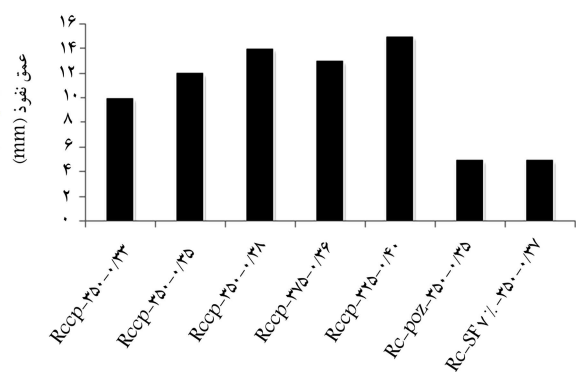
در شکل ۵، مقاومت فشاری مخلوط‌های اصلی در سنین ۷ و ۲۸ روزه ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است، مخلوط‌ها در سن ۷ روزه، مقاومت‌های فشاری مناسبی داشته‌اند و حتی مقاومت تا ۴۲ مگاپاسکال برای مخلوط با سیمان ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و آب به سیمان ۰/۳۳ مشاهده می‌شود. هر چند در سن ۷ روزه، مخلوط‌های ۰/۳۸-۳۵۰ و ۰/۴-۳۲۵ RCCP به مقاومت فشاری ۲۷/۶ مگاپاسکال پیشنهادی در آیین‌نامه‌ی ACI ۳۰۹R-۰۵، [۱۷] نرسیده‌اند؛ اما در سن ۲۸ روزه، برای تمام مخلوط‌ها مقاومت فشاری بیش از ۳۵ مگاپاسکال به‌دست آمده است. بیشترین مقاومت در سن ۲۸ روزه، مربوط به مخلوط حاوی ۷٪ دوده‌ی سیلیسی به میزان ۶۱ مگاپاسکال است. همچنین نتایج نشان دهنده‌ی مقاومت مناسب مخلوط پوزولانی در سن ۷ روزه (۳۰ مگاپاسکال) و سن ۲۸ روزه (۴۲ مگاپاسکال) هستند.

۲.۳. نفوذ تحت فشار آب مخلوط‌های بتن غلنتکی

میزان بیشترین نفوذ آب تحت فشار مطابق روش استاندارد EN ۱۲۳۹۰-۸، [۲۵] در شکل ۶ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که با کم شدن نسبت آب به سیمان



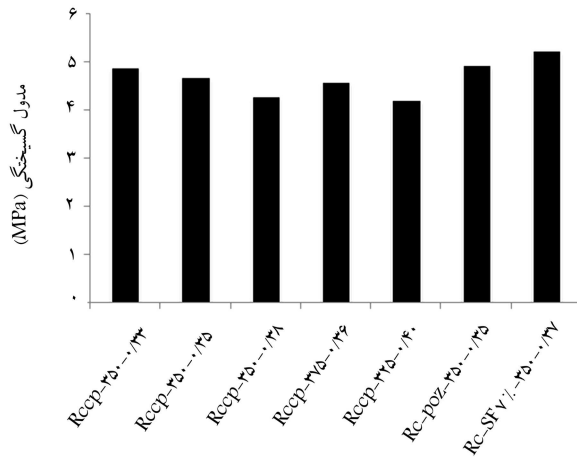
شکل ۵. مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی در سنین ۷ و ۲۸ روزه.



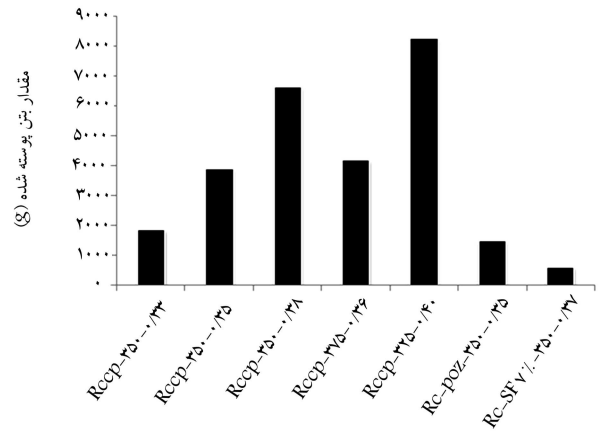
شکل ۶. نفوذ تحت فشار آب مخلوط‌های بتنی در ۲۸ روزه.



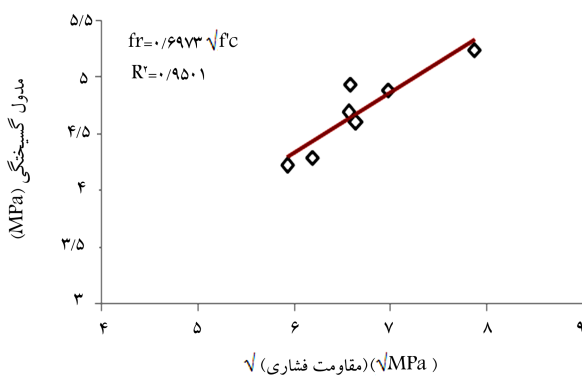
شکل ۴. سطح ساییده شده‌ی نمونه.



شکل ۸. مدول گسیختگی مخلوط‌های بتنی در ۲۸ روز.



شکل ۷. وزن ذرات جدا شده از سطح نمونه‌های بتن در اثر نمک‌های یخ‌زدا.



شکل ۹. نسبت مدول گسیختگی به جذر مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی در سن ۲۸ روزه.

نفوذپذیری نمونه‌ها کاهش پیدا کرده است. میزان نفوذ برای مخلوط‌های حاوی ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب سیمان از ۱۴ میلی‌متر به ۱۲ میلی‌متر و ۱۰ میلی‌متر با کاهش نسبت آب به سیمان از ۰/۳۸ به ۰/۳۵ و ۰/۳۳ کاهش یافته است. با تغییر مقدار سیمان از ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب به ۳۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب مقدار نفوذ آب به میزان ۳ میلی‌متر افزایش یافته است. مخلوط حاوی ۳۷۵ کیلوگرم بر مترمکعب سیمان تفاوت چندانی نسبت به مخلوط حاوی ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب سیمان نداشته است. کمترین مقدار نفوذ آب مربوط به مخلوط‌های حاوی دوده سیلیسی و سیمان پوزولانی به میزان ۵ میلی‌متر بیانگر نفوذپذیری اندک این مخلوط‌هاست. نفوذپذیری کمتر مخلوط‌های پوزولانی و دوده سیلیسی سبب می‌شود که در صورت قرار گرفتن بتن در شرایط خشک و خارج شدن بتن از حالت اشباع، بتن‌های مذکور دیرتر دچار اشباع‌شدگی شوند و در شرایط واقعی مقاومت بالاتری در برابر یخبندان نشان دهند.

۳.۳. پوسته‌شدگی سطحی بتن در اثر نمک‌های یخ‌زدا

مقدار ذرات جدا شده از سطح نمونه‌های بتنی در اثر نمک‌های یخ‌زدا در شکل ۷ ارائه شده است. براساس معیارهای ارائه شده در پیش‌نویس جایگزین پیشنهادی استاندارد ASTM C672^[۱۱] فقط مخلوط حاوی دوده سیلیسی با مقدار پوسته‌شدگی سطحی ۶۰۰ گرم بر مترمربع در رده ۳، که معادل پوسته‌شدگی متوسط با کمی سنگ‌دانه‌ی درشت، در معرض دید (۵۰۰-۱۳۰۰ گرم بر مترمربع) قرار گرفته است. مخلوط حاوی سیمان پوزولانی و مخلوط حاوی ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب سیمان و آب به سیمان ۰/۳۳ در رده ۴ (۱۳۰۰ تا ۲۱۰۰ گرم بر مترمربع) که معادل پوسته‌شدگی متوسط و تا حدودی شدید، که سنگ‌دانه‌ی درشت در بخش‌هایی به وضوح در سطح مشخص است، قرار گرفته‌اند. سایر مخلوط‌ها، پوسته‌شدگی شدید داشته‌اند و در رده ۵ پژوهش مذکور^[۱۱] قرار گرفته‌اند. پوسته‌شدگی شدید بتن‌های معمولی با مصالح ایران در مطالعه‌ی در سال ۲۰۱۱^[۲۷] نیز گزارش شده است.

۴.۳. مدول گسیختگی مخلوط‌های بتن غلتکی

مدول گسیختگی مخلوط‌های بتنی در شکل ۸ ارائه شده است. مدول گسیختگی طرح‌ها بین ۴/۲۲ تا ۵/۲۵ مگاپاسکال متغیر است. شایان ذکر است که مدول گسیختگی روسازه‌های بتن غلتکی ساخته شده عمدتاً بین ۳/۵ تا ۵ مگاپاسکال گزارش شده است. همان‌طور که در شکل مذکور مشخص است، با کم شدن نسبت

آب به سیمان، مدول گسیختگی ارتقاء پیدا کرده و مخلوط‌های حاوی دوده سیلیسی و سیمان پوزولانی عملکرد مناسب‌تری نسبت به سایر مخلوط‌ها داشته‌اند. کم شدن مقدار سیمان از ۳۵۰ به ۳۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب، سبب کاهش مدول گسیختگی شده و افزایش مقدار سیمان به ۳۷۵ کیلوگرم بر مترمکعب تأثیری در مقدار مدول گسیختگی نداشته است.

در شکل ۹، نسبت مدول گسیختگی به جذر مقاومت فشاری با ضریب همبستگی مناسب ۰/۹۵ برابر ۰/۷ حاصل شده است. در آیین‌نامه‌ی ACI۳۲۵-۱۰^[۱۷] مقدار مدول گسیختگی در محدوده‌ی $\sqrt{f'c}$ (۰/۹۲ - ۰/۷۵)^[۱۷] در آیین‌نامه‌ی ACI۳۱۸-۱۱^[۲۸] برابر $\sqrt{f'c}$ (۰/۶۳ - ۰/۶۳) و در استاندارد IMPC-۰۶^[۲۹] در محدوده‌ی $\sqrt{f'c}$ (۰/۸۳ - ۰/۶۲) ذکر شده است. با توجه به نتایج موجود پیشنهاد می‌شود برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها برای محاسبات طراحی از رابطه‌ی $fr = 0.63 \sqrt{f'c}$ استفاده شود.

۵.۳. مقاومت سایشی مخلوط‌های بتن غلتکی

عرض ساییده شده‌ی نمونه‌ها در شکل ۱۰ ارائه شده است. همان‌طور که مشهود است، تفاوت چندانی بین میزان سایش نمونه‌های بتنی وجود نداشته و سایش نمونه‌ها بین ۱۹/۷ تا ۲۱/۴ متغیر بوده است. کاهش نسبت آب به سیمان از ۰/۳۸ به ۰/۳۳، سبب کاهش اندکی (۱۷ میلی‌متری) عرض سایش شده است. همچنین نمونه‌های

مطلوب دارند. این مقاومت برای اغلب مخلوط‌ها عمدتاً بالای ۴۰ مگاپاسکال و بیشتر از مقدار ۲۸ مگاپاسکال پیشنهادی در آیین‌نامه‌ی ۱۰-ACI ۳۲۵R است. مخلوط پوزولانی، مقاومت‌های فشاری ۲۸ روزه‌ی مناسب و مخلوط حاوی دوده‌ی سیلیسی نسبت به سایر مخلوط‌ها، مقاومت فشاری بالاتری (۶۱ مگاپاسکال) داشته‌اند.

با توجه به ضعف‌های روش استاندارد ASTM C672 و عملکرد سخت‌گیرانه‌ی آن در تعیین مقاومت در برابر پوسته‌شدگی سطحی بتن در مجاورت نمک‌های یخ‌زدا، در مطالعه‌ی حاضر از روش پیش‌نویس پیشنهادی برای جایگزین استاندارد استفاده شده است. لیکن نتایج این روش نیز نشان‌دهنده‌ی عملکرد ضعیف اغلب مخلوط‌های بتن غلتکی در برابر پدیده‌ی یخبندان در مجاورت نمک‌های یخ‌زدا بوده است. به نظر می‌رسد انجام مطالعات میدانی بیشتر و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، برای بررسی نتایج پیش‌نویس مذکور لازم باشد.

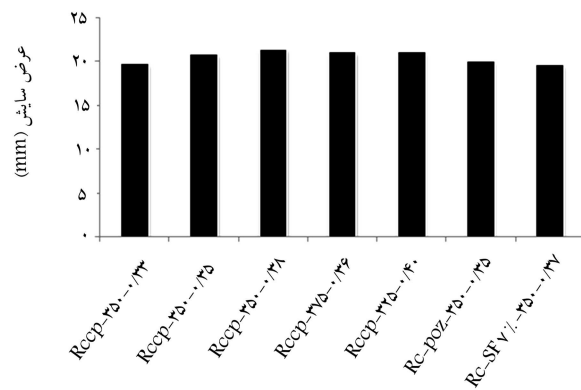
مخلوط حاوی دوده‌ی سیلیسی بهترین عملکرد را در برابر پدیده‌ی پوسته‌شدگی سطحی بر اثر نمک‌های یخ‌زدا داشته است و براساس رده‌بندی پیش‌نویس پیشنهادی در سال ۲۰۱۲^[۱۱] در گروه پوسته‌شدگی متوسط قرار گرفته است. مخلوط حاوی سیمان پوزولانی و مخلوط حاوی آب به سیمان ۰٫۳۳ در رده‌ی مخلوط‌های با پوسته‌شدگی قابل توجه و سایر مخلوط‌ها در رده‌ی پوسته‌شدگی بسیار شدید قرار گرفته‌اند. مدول گسیختگی مخلوط‌های بتن غلتکی در محدوده‌ی ۴٫۲ تا ۵٫۲ مگاپاسکال بوده است. کم شدن نسبت آب به سیمان، سبب افزایش مدول گسیختگی شده است. مخلوط حاوی دوده‌ی سیلیسی بیشترین مدول گسیختگی را نسبت به دیگر مخلوط‌ها داشته است. نسبت مجذور مدول گسیختگی به مقاومت فشاری مخلوط‌ها حدود ۰٫۷ محاسبه شده است. مقدار نفوذ تحت فشار آب مخلوط‌های حاوی دوده‌ی سیلیسی و سیمان پوزولانی نسبت به سایر مخلوط‌ها کمتر بوده است. همچنین کم شدن نسبت آب به سیمان سبب کم شدن نفوذپذیری شده است. کم شدن نفوذپذیری می‌تواند سبب دیرتر اشباع شدن مخلوط‌های بتن و بالطبع مقاومت بالاتر در برابر یخبندان شود.

قدردانی

این پروژه بخشی از پژوهش‌های انجام شده در راستای پروژه «تدوین دستورالعمل ساخت و اجرای روسازی بتن غلتکی» بوده است و نویسندگان لازم می‌دانند از حمایت‌های مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی تشکر کنند.

منابع (References)

1. Dellatte, N.J., *Concrete Pavement Design, Construction, and Performance*, CRC Press, 2nd ed. (2014).
2. Gauthier, P. and Merchand, J. "Design and construction of roller compacted concrete pavements in Quebec", Centre de Recherche Sur Les Infrastructures en Beton (CRIB) Department de Genie Civil, Universite Laval (2005).
3. Valenza, J.J. and Scherer, G.W.A. "Review of salt scaling: I. Phenomenology", *Cement and Concrete Research*, **37**(7), pp. 1007-1021 (2007).



شکل ۱۰. میزان سایش نمونه‌های بتنی در سن ۲۸ روزه.

حاوی دوده‌ی سیلیسی و سیمان پوزولانی نسبت به مخلوط‌های مشابه اندکی سایش کمتر داشته‌اند، که نشانگر تأثیر کم این مواد در کاهش سایش تحت آزمون حاضر است. اغلب مخلوط‌ها (به جز مخلوط حاوی دوده‌ی سیلیسی، مخلوط پوزولانی و مخلوط با آب به سیمان ۰٫۳۳) در رده‌ی ۲ (سایش متوسط کف پوش بتنی) طبق استاندارد BS EN ۱۳۳۸ قرار می‌گیرند که در رده‌ی مذکور، مقدار سایش باید بین ۲۰ تا ۲۳ میلی‌متر قرار گیرد. مخلوط حاوی دوده‌ی سیلیسی و مخلوط با آب به سیمان ۰٫۳۳ با سایش کمی کمتر از ۲۰ میلی‌متر در رده‌ی مطلوب از نظر سایش (عرض سایش کمتر از ۲۰ میلی‌متر) طبق استاندارد BS EN ۱۳۳۸ قرار دارد. در آیین‌نامه‌ی ۱۰-ACI ۲۰۱، کمینه‌ی مقاومت ۴۰ مگاپاسکال برای مقاومت مناسب در برابر سایش پیشنهاد شده است. گزارش‌ها نیز حاکی از مقاومت خوب در برابر سایش مخلوط‌های حاوی آب به سیمان ۰٫۳۵ و مقاومت فشاری ۴۰ مگاپاسکال هستند.^[۱۲]

۴. نتیجه‌گیری

مطالعه‌ی حاضر به بررسی مشخصات عملکردی و دوام مخلوط‌های بتن غلتکی مورد استفاده در روسازی پرداخته است. نتایج بیانگر آن است که مخلوط‌های بتن غلتکی که در محدوده‌ی زمان ویبی مناسب تولید شده باشند، مقاومت فشاری

4. Mindess, S., Young, J.F. and Darwin, D., *Concrete*, Prentice Hall, 2nd ed. (2003).
5. ASTM C672/C672M-03., *Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals*, Annual Book of ASTM standards, **04.02** (2004).
6. PCA Research and Development Bulletin RD135., *Frost Durability of Roller-Compacted Concrete Pavements*, Portland cement association (2004).
7. ASTM C666/C666M-03., *Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing*, Annual Book of ASTM Standards, **04.02** (2003).

8. Delagrave, A., Merchand, J., Pigeon, M. and Boisvert, J. "Deicer salt scaling resistance of roller-compacted concrete pavements", *ACI Materials Journal*, **94**(2), pp. 163-169 (1997).
9. Harrington, D., Abdo, F., Adaska, W. and Hazaree, C., *Guide for Roller Compacted Concrete Pavements*, National Concrete Paving Technology center (1997).
10. ASTM C1262., *Standard Test Method for Evaluating the Freeze-Thaw Durability of Dry-Cast Segmental Retaining Wall Units and Related Concrete Units*, Book of ASTM Standards, **04.05** (1998).
11. Hooton, R.G. and Vassilev, D., *Deicer Scaling Resistance of Concrete Mixtures Containing Slag Cement, Part 2: Evaluation of Different Laboratory Scaling Test Methods*, National Concrete Pavement Technology Center (2012).
12. ACI 201.2R-08., *Guide to Durable Concrete*, (2008).
13. ERMCO., *ERMCO Guide to Roller Compacted Concrete for Pavements*, ERMCO Guide to Roller-Compacted Concrete (2013).
14. Marchand, J., Gange, R., Ouellete, E. and Lapage, S. "Mixture proportioning of roller compacted concrete: A review", *ACI Special Publication*, **SP171**, pp. 457-486 (1997).
15. ASTM C1170-06., *Standard Test Method for Determining Consistency and Density of Roller-Compacted Concrete Using a Vibrating Table*, Annual Book of ASTM Standards, **04.02** (2006).
16. Cannon, R.W. "Proportioning workable concrete mixtures with specific gravity of cement-water paste", *ACI Materials Journal*, **102**(5) (2005).
17. ACI 325.10R-95., *Report on Roller-Compacted Concrete Pavements*, American Concrete Institute, (2001).
18. ASTM C1176-05., *Standard Practice for Making Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Table*, Annual Book of ASTM standards, **04.02** (2006).
19. Pittman, D.W. and Ragan, S.A. "Drying shrinkage of roller-compacted concrete for pavement applications", *ACI Materials Journal*, **95**(1), pp. 19-26 (1998).
20. Vahedifard, F., Nili, M. and Meehan, C.L. "Assessing the effects of supplementary cementitious materials on the performance of low-cement roller compacted concrete pavement", *Construction and Building Materials*, **24**, pp. 2528-2535 (2010).
21. ASTM C1435., *Standard Practice for Molding Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds using a Vibrating Hammer*, Annual Book of ASTM Standards, **04.02** (1999).
22. Gange, R. "Proportioning for non-air-entrained RCCP", *Concrete International*, **21**(5), pp. 37-41 (May 1999).
23. Valenza, J.J. and Scherer, G.W. "A review of salt scaling: II. Mechanisms", *Cement and Concrete Research*, **37**(7), pp. 1022-1034 (2007).
24. Liu, Z., Hansen, W., Freeze-thaw durability of high strength concrete under deicer salt exposure, *Construction and Building Materials* **102**, pp: 478-485, (2016).
25. BS EN 12390-8., *Testing Hardened Concrete-Part 8: Depth of Penetration of Water under Pressure*, British Standards (2006).
26. BS EN 1338:2003., *Concrete Pavement Blocks, Requirements and Test Methods*, British Standards (2003).
27. Nili, M. and Zaheri, M. "Deicer salt-scaling resistance of non-air-entrained roller-compacted concrete pavements", *Construction and Building Materials*, **25**(4), pp. 1671-1676 (2011).
28. ACI 318-11., *Building Code requirements for Structural Concrete (ACI 318-11) and Commentary (ACI 318R-11)*, ACI Committee 318 Structural Building Code (2011).
29. Taylor, P.C., Kosmatka, S.H. and Voigt, G.F. "Integrated materials and construction practices for concrete pavement: A State-of-the-practice manual", National Concrete Pavement Technology Center/Center for Transportation Research and Education, Iowa State University (2006).