

بررسی تأثیر افزودنی آب‌بند بر مقاومت و جذب آب بتن غلتکی

مقاله علمی - پژوهشی

محسن عموزاده عمرانی*، گروه مهندسی عمران، واحد سوادکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، سوادکوه، ایران
پویان نظریان، دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد آیت‌الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران
سید امیرحسام ساداتی، گروه مهندسی عمران، واحد آیت‌الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Mo.Omrani@iau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۳

صفحه ۱۶۶-۱۴۹

چکیده

بتن غلتکی روسازی راه، یکی از انواع روسازی بتنی بوده که به علت افزایش سرعت اجرا و روش ساخت، یک فناوری نوین و در حال پیشرفت است. اما در کشور ایران، با توجه به مشکلات اجرا در ضخامت‌های زیاد، کاهش ضخامت این نوع روسازی به همراه حفظ مقاومت، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مقاومت خمشی و مقاومت در برابر خستگی از جمله مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در طراحی ضخامت روسازی‌ها محسوب می‌شوند، که این پارامترها در ارتباط مستقیم با مقاومت فشاری تک‌محوری بتن هستند. همچنین، با توجه به اهمیت دوام روسازی‌های بتنی (از نقطه نظر امکان نفوذ آب، مواد و املاح خوردنده)، کاهش درصد جذب آب بتن غلتکی روسازی، یکی از اصلی‌ترین پارامترهاست؛ بنابراین، استفاده از افزودنی‌های مؤثر و همچنین طرح اختلاط مناسب می‌تواند تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای در افزایش مقاومت و کاهش درصد جذب آب بتن غلتکی در روسازی داشته باشد. در پژوهش حاضر، مقاومت فشاری نمونه‌های بتن غلتکی در دو سن ۷ روز و ۲۸ روز تعیین و مورد ارزیابی قرار گرفته است. آب‌بند پودری با درصدهای مختلف، برای این نوع روسازی بررسی گردید، که نتیجه آن پیشنهاد طرح اختلاط با دانه‌بندی پیوسته بود. از طرفی با افزودن ۱/۵، ۳، ۴/۵ و ۶ درصد پودر آب‌بند، جذب آب به ترتیب ۴۶/۹، ۶۳/۸، ۷۱/۸ و ۷۶/۸ درصد کاهش یافت که موجب افزایش مقاومت و افزایش دوام بتن غلتکی روسازی گردید. همچنین با افزایش سیمان از ۴۰۰ کیلوگرم در مترمکعب به ۴۵۰ کیلوگرم در مترمکعب، میزان جذب آب از ۳/۵ به ۲/۵ درصد کاهش یافته است.

واژه‌های کلیدی: بتن غلتکی، پودر آب‌بند PP، مقاومت فشاری، جذب آب

۱- مقدمه

استفاده از بتن غلتکی، در ساخت سدها است و فکر استفاده از چنین مصالحی از صنعت سدسازی آغاز شده است (ACI 207.5R, 1999). البته استفاده از این مصالح، به سدسازی محدود نیست، بلکه یکی دیگر از کاربردهای مهم و رو به گسترش آن، استفاده در روسازی راه‌های بتنی است (ACI 325.10R, 1999). از مزایای روسازی بتن غلتکی نسبت به بتن معمولی عدم نیاز به قالب‌بندی، آرماتورهای تسلیح، میلگردهای اتصال و درز است. همچنین در صورت اجرای مناسب، این نوع بتن، مقاومت بالا و دوام

بتن غلتکی نوعی از بتن سیمان پرتلند است که از اختلاط مصالح سنگی درشت‌دانه و ریزدانه، سیمان و آب به مقدار کم ساخته شده و با اسلامپ نزدیک به صفر، توسط فینیشر مخصوص آسفالت پخش‌شده و توسط غلتک‌های ارتعاشی متراکم می‌گردد (Hazaree et al, 2011; Omran et al, 2017). در واقع بنا بر آنچه در متون فنی آمده است، بتن غلتکی، بتنی است که با غلتک کوبیده می‌شود و این بتن قبل از سخت‌شدن، باید نیروی ناشی از وزن غلتک‌ها و پس از گیرش، نیروهای وارد برسازه را تحمل نماید. عمده‌ترین زمینه

آزمایش، هرچه فضای خالی پیوسته در بتن بیشتر باشد، میزان جذب آب ۳۰ دقیقه افزایش می‌یابد. بتن غلتکی ماهیتاً، بتنی با درز در صفحات افقی بین لایه‌هاست و همین مطلب موجب می‌گردد تا نفوذپذیری سازه‌های ساخته‌شده با بتن غلتکی بیش از سایر سازه‌های بتنی متعارف اهمیت داشته باشد؛ چرا که تعداد این درزهای افقی در بدنه سازه‌های بتن غلتکی تقریباً پنج تا هفت برابر بیشتر از سازه‌های بتنی معمولی است. بنابراین علاوه بر میزان نفوذپذیری توده بتن، نفوذپذیری درزها تأثیر قابل توجهی بر میزان نفوذپذیری سازه‌ها دارند (Azizmohammadi et al, 2017). هدف پژوهش حاضر بررسی تاثیر افزودنی آب‌بند پودری PP بر جذب آب بتن غلتکی است. از این رو، بررسی روش‌های نفوذناپذیر کردن سازه‌های بتن غلتکی و مقایسه این روش‌ها، امری ضروری است که در پژوهش‌های قبلی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از آب‌بند پودری PP به عنوان افزودنی، به منظور بررسی جذب آب بتن غلتکی جنبه نوآوری پژوهش حاضر بوده است. PP ماده‌ای آب‌بندکننده است که بدون ایجاد اثر نامطلوب بر روی بتن، تمام نقاط آن را آب‌گریز می‌نماید. در طراحی و تولید سازه‌های بتنی که در معرض شرایط سخت و آسیب‌های جوی قرار می‌گیرند، نفوذپذیری بتن عامل تعیین‌کننده‌ای برای پیش‌بینی و ارزیابی دوام آن است، هر اندازه قابلیت عبور آب کمتر باشد بتن از دوام و استحکام بیشتری برخوردار است. این ماده با سایر ذرات میکرونیوز، به عنوان یک فیلر ضد آب مؤثر برای پر نمودن فضاهای ریز میکروسکوپی خالی بین اجزای بتن عمل می‌کند و بدین ترتیب از نفوذ آب به لایه‌های داخلی بتن جلوگیری به عمل می‌آورد.

۲- پیشینه تحقیق

اولین کاربرد بتن غلتکی به شکل امروزی در ساخت محوطه‌هایی برای کارخانه‌های چوب و الوار با بارگذاری سنگین در ونکوور کانادا در سال ۱۹۷۰ بود. گسترش این نوع روسازی عمدتاً به علت بحران نفتی دهه ۷۰ میلادی بوده که باعث افزایش هزینه‌های اجرای آسفالت در سطح جهان شده بود. این فناوری جدید سبب کاهش هزینه‌های اجرایی به میزان ۳۰ درصد شده است. در مناطقی از دنیا از روسازی بتن غلتکی به عنوان یک راه‌حل اقتصادی و جدید برای بازسازی و نوسازی جاده‌ها استفاده می‌شود (Modares and Hosseini, 2015). فرداد در سال ۱۳۹۷، به بررسی تاثیر پدیده‌ی کرناسیون بر مشخصات فنی روسازی بتن غلتکی پرداخت. در این تحقیق، بتن غلتکی با نسبت آب به سیمان ثابت ۳۲ در عیارهای ۲۷۰، ۳۰۰، ۳۳۰

رضایت‌بخشی را در مقابل شرایط محیطی خواهد داشت (Courard et al, 2010). کارایی بتن غلتکی بسیار مهم بوده و بر روی تراکم‌پذیری آن تأثیر بسیار دارد. بتن غلتکی مزایای دیگری نیز دارد که سبب برتری آن نسبت به روسازی‌های آسفالتی و بتنی معمولی شده است که از آن جمله می‌توان به مواردی چون: اجرای سریع، هزینه‌های اجرایی کمتر به میزان حدود ۱۵ تا ۴۰ درصد نسبت به بتن معمولی، نیاز به حداقل تعمیر و نگهداری، اجازه عبور ترافیک بلافاصله بعد از تراکم سطح روسازی، مصرف کمتر سیمان نسبت به سایر روسازی‌های بتنی اشاره نمود. همچنین در صورت طراحی درست، مقاومت فشاری و دوام بسیاری نیز دارد. مسئله امکان آب‌انداختگی در روسازی‌های بتن معمولی از مواردی است که باید مدنظر قرار گرفته و کنترل شود. در بتن‌های غلتکی به علت کم‌بودن آب اختلاط، پدیده آب‌انداختگی رخ نمی‌دهد (Naik et al, 2001). همه این ویژگی‌ها باعث شده‌اند که روسازی بتن غلتکی در مقایسه با روسازی آسفالتی و بتن معمولی هزینه کمتری داشته باشد و گزینه مناسبی برای بسیاری از کاربردها باشد. روسازی بتن غلتکی با محیط‌زیست سازگارتر بوده و در ساخت و بهره‌برداری از آن انرژی کمتری مصرف می‌گردد. عملکرد روسازی بتن غلتکی به مقدار زیادی به خصوصیات مکانیکی آن، از جمله: مقاومت فشاری، خمشی و مدول الاستیسیته بستگی دارد (Taherkhani and Sazgar, 2019). آنچه مسلم است، برتری‌های فراوان در روش اجرای بتن غلتکی، موجب گسترش روزافزون و رویکرد جهانی به آن شده است. در حال حاضر به دلایل متعدد، لزوم استفاده از روسازی‌های بتنی در سطح کشور به خوبی آشکار شده است. از جمله این دلایل، افزایش چشمگیر قیمت قیر به دنبال اجرای قانون هدفمندی یارانه‌ها و مشکلات عدیده روسازی‌های آسفالتی در محل‌های خاص همانند نواحی و سواحل جنوب، پایانه‌های بار و نواحی صنعتی است. بتنی بادوام است که شکل اولیه، کیفیت و قابلیت خدمت‌دهی خود را در شرایط محیطی خودش حفظ نماید. تخریب بتن، از طریق وارد شدن عوامل مخرب نظیر گازها، آب، عناصر شیمیایی و راه یافتن این عوامل از طریق منافذ است. بنابراین هرچه بتن دارای منافذ و فضاهای خالی پیوسته کمتری باشد، دوام آن در برابر عوامل مخرب بالاتر خواهد بود. حجم این منافذ به وسیله سرعت جذب آن‌ها سنجیده می‌شود، که هرچه حجم منافذ پیوسته داخل بتن کمتر باشد، دوام آن در برابر عناصر مخرب افزایش می‌یابد. یکی از مهم‌ترین عوامل در شدت آسیب‌دیدگی بتن، رفتار سطحی بتن است. باتوجه‌به آزمایش جذب آب ۳۰ دقیقه بر اساس BS1881 می‌توان این آزمایش را معیاری برای سنجش رفتار سطحی بتن قرارداد. در این

نمونه حاوی صد در صد مصالح بازیافتی و سرباره، تقریباً یک سوم مقاومت فشاری نمونه شاهد شده بود؛ اما، در مقاومت کششی و خمشی این آهنگ کاهش، کندتر شده بود. همچنین، تنها نمونه حاوی ۲۵ درصد مصالح خرده آسفالتی و سرباره، حداقل مقاومت فشاری لازم را مطابق با استانداردهای مربوطه دارا بود. نتایج آزمایش چقرمگی نشان داد که با افزایش مصالح خرده آسفالتی و سرباره فولاد، مقدار بار حداکثر کاهش یافته؛ ولی با توجه به افزایش انعطاف پذیری مخلوطهای بتن غلتکی، قابلیت جذب انرژی و به تبع آن چقرمگی افزایش یافته بود (Amouzadeh Omrani et al, 2022).

امینی و همکاران در سال ۱۴۰۲، به مطالعه آزمایشگاهی تاثیر براده آهن بر روسازی بتن غلتکی پرداختند. هدف از این مطالعه، بررسی اثر براده آهن بر روی خواص مکانیکی بتن غلتکی در روسازی راه بود. در تمامی طرح اختلاطها، مقدار سنگدانهها ثابت، سیمان از نوع تیپ دو و آب مورد استفاده از نوع شرب بود. همچنین به جزء طرح اختلاط شاهد، پنج طرح دیگر با براده آهن به میزان ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۲ درصد وزنی بتن به کار رفته و عیار سیمان ۳۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب و نسبت آب به سیمان ۴۲ در نظر گرفته شده بود. سه نوع آزمایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی بر روی این نمونهها انجام شد و نتایج نشان داد که با افزودن براده آهن به مخلوط بتن غلتکی، مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن افزایش یافته است (Amini et al, 2023). در پژوهش دیگری در سال ۱۴۰۲، مباشر و جباری به بررسی تاثیر افزودنی ترکیبی مواد بازیافتی حاصل از لاستیک فرسوده خودرو بر خصوصیات دوام بتن غلتکی پرداختند. پس از طرح اختلاط، نمونههای ساخته شده با ترکیب مواد بازیافتی خرده لاستیک، به مدت ۲۸ و ۹۰ روز عملآوری شدند. نتایج آزمایشها نشان داد در بهترین حالت، با افزودن ۳ درصد خرده لاستیک و افزودن ۵ درصد الیاف فلزی لاستیک در بتن غلتکی، مقاومت فشاری در شرایط آزمایش سیکل ذوب و یخبندان به میزان ۱/۹ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته است. همچنین مقاومت فشاری بتن غلتکی در محیط سولفاتده نیز با افزودن ۳ درصد خرده لاستیک و افزودن ۵ درصد الیاف فلزی، به میزان ۷/۱۴ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته است. درصد سایش بتن غلتکی نیز با افزودن ۳ درصد خرده لاستیک و افزودن ۱۰ درصد الیاف فلزی لاستیک، به میزان ۱/۸ درصد نسبت به نمونه شاهد، کاهش داشته است. در خصوص بتن غلتکی حاوی الیاف نخی لاستیک نیز، با وجود مشکلات اختلاط این الیاف در بتن، تنها شاهد افزایش مقاومت سایشی نسبی در بتن بوده ایم و در دیگر خصوصیات مورد بررسی نمونههای

۳۵۰ ساخته و آزمایشات مقاومت فشاری، جذب موئینگی، مقاومت الکتریکی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز انجام شده بود. در نهایت نتایج حاکی از آن بود که افزایش عیار سیمان، پارامترهای دوامی را بهبود بخشیده است. همچنین وقوع پدیده کربناتایون، تاثیر بسزایی در عملکرد فیزیکی و دوامی بتن غلتکی ایجاد نموده است (Fardad, 2018). در پژوهشی عموزاده عمرانی و حصیرچیان در سال ۱۳۹۹، به بررسی اثر سرباره فولاد و مصالح خرده آسفالتی بر خصوصیات مکانیکی و آلایندهی روسازی بتن غلتکی پرداختند. بدین منظور، آزمایشهای مقاومت فشاری، کشش غیرمستقیم و خمش سه نقطه ای روی نمونههای ۷ و ۲۸ روزه انجام شد همچنین، آزمایش سایش کانتابرو و آزمایش تراوش مواد آلاینده روی نمونههای ۲۸ روزه انجام شد. نتایج نشان داد که جایگزینی مصالح سنگی طبیعی با سرباره فولاد و مصالح خرده آسفالتی باعث کاهش مقاومتهای فشاری، کششی و خمشی روسازی بتن غلتکی می گردد. همچنین مصالح ضایعاتی استفاده شده در این پژوهش، به دلیل نتایج رضایت بخش، اثرات زیست محیطی مثبت و صرفه اقتصادی، قابلیت استفاده در بتن غلتکی را دارا بودند (Amouzadeh Omrani and Hasirchian, 2020). در پژوهش دیگری، چوبدار و همکاران در سال ۱۴۰۰، به بررسی استفاده از ماکرو الیاف بر خصوصیات مکانیکی روسازی بتن غلتکی پرداختند. هدف از این مطالعه آزمایشگاهی، تعیین مزایای الیاف ماکرو در بتن غلتکی برای روسازیها با اندازه گیری تغییر در خواص مکانیکی و مقایسه آن با بتن الیاف معمولی برای روسازیها بود. شش نوع الیاف، چهار نوع مصنوعی و دو فولاد، با شکل های فیبر مختلف در مخلوط های RCC در دو سطح دوز (۲/۰ درصد و ۴/۰ درصد حجمی) ترکیب شدند. افزودن ماکرو فیبرهای مصنوعی، حداکثر تراکم خشک را بر روی مخلوط کنترل RCC با کاهش اصطکاک داخلی بین سنگدانهها افزایش داد. در حالی که الیاف فولادی تاثیر محدودی بر بتن غلتکی داشت. افزودن فیبرها، مقاومت خمشی RCC را افزایش نداد. اما به طور قابل توجهی ظرفیت مقاومت پس از به حداکثر رسیدن و مقاومت باقی مانده RCC را بهبود بخشید (Chobdar et al, 2021). عموزاده عمرانی و همکاران (۱۴۰۱) در پژوهشی، به بررسی امکان استفاده از مصالح خرده آسفالت بازیافتی و سرباره فولاد به عنوان جایگزین بخشی از مصالح در روسازیهای بتن غلتکی پرداختند. نمونهها پس از طرح اختلاط، به مدت ۷ و ۲۸ روز عملآوری شدند. نتایج آزمایشها نشان داد که با افزایش جایگزینی مصالح خرده آسفالتی و سرباره فولاد در نمونه های بتن غلتکی، مقاومت فشاری به صورت قابل ملاحظه ای کاهش یافته است؛ به طوری که مقاومت فشاری در

پارامترهای غالب مؤثر بر آرایش مزوساختاری سنگدانه‌ها در اسکلت بتنی هنگام فشرده‌سازی با مکانیسم‌های مختلف، به طور جامع مورد مطالعه قرار گرفت و با نمونه‌های فشرده‌شده میدانی با استفاده از چندین تکنیک پردازش تصویر مقایسه شد. نتایج نشان داد، استفاده از MP می‌تواند ویژگی‌های مورفولوژیکی سنگدانه‌ها را به دلیل شکستن ذرات در طول فرآیند تراکم تغییر دهد. از سوی دیگر، VT و GY می‌توانند فواصل بین ذره‌ای مشابهی را با نمونه‌های میدانی نشان دهند، اما نتوانستند عملکرد مشابهی را از نظر استحکام و دوام نشان دهند (Selvam et al, 2023). با بررسی مطالعات گذشته در خصوص تأثیر افزودنی‌های مختلف بر بهبود عملکرد بتن غلتکی، با توجه به پیشنهادها، مختلف، مسائل مبهم زیادی در این رابطه وجود دارد. استفاده از آب‌بند پودری PP به عنوان افزودنی، به منظور بررسی جذب آب بتن غلتکی جنبه نوآوری پژوهش حاضر بوده است. PP ماده‌ای آب‌بندکننده است که بدون ایجاد اثر نامطلوب بر روی بتن، تمام نقاط آن را آب‌گریز می‌نماید.

۳- روش تحقیق

بتن غلتکی یک روش جدید جهت اجرای بتن در کارهای عمرانی است که ایده استفاده از آن به دهه‌های ۱۹۳۰ و ۱۹۴۰ در انگلستان و به عنوان لایه زیراساس جاده‌ها و روسازی محوطه فرودگاه‌ها باز می‌گردد. بتن غلتکی از اوایل دهه ۱۹۶۰ میلادی، از سوی کارشناسان و محققان به‌عنوان مصالح و تکنیک اجرای قابل استفاده در سدسازی مطرح گردیده و دیری نپایید که مورد توجه و توسعه روز افزون قرار گرفت. رواج استفاده از بتن غلتکی به عوامل متعددی بستگی داشت که مهم‌ترین آن‌ها سادگی در تولید و به‌کارگیری و عدم نیاز به تجهیزات و تأسیسات اجرایی ویژه است. بتن غلتکی به‌اختصار، متشکل از مصالح سنگ‌دانه‌ای و سیمانی و درصد کمی آب است که به صورت مخلوط نسبتاً خشک و بدون اسلامپ، در لایه‌های نازک و وسیع پخش شده و با استفاده از غلتک‌های ساده و ارتعاشی متراکم می‌گردد. همچنین در مقایسه با بتن معمولی، هزینه‌های اجرایی این بتن به واسطه پیوستگی در اختلاط، حمل‌ونقل و پخش کردن بتن، ساده‌سازی طراحی‌ها و صرفه‌جویی در پرداخت سود سرمایه‌گذاری در دوره اجرایی، بسیار کمتر است. اما از طرفی، به دلیل وجود مقاطع متخلخل و کسری فیلرها و ریزدانه‌ها در بتن و در نتیجه به‌وجود آمدن فضاهای خالی میان سنگ‌دانه‌ها، معمولاً بتن دچار ضعف نفوذپذیری و افت کیفی خواهد شد. بتن نفوذپذیر در برابر نفوذ آب و یون‌های مخرب ضعیف است و در نتیجه موجب کاهش دوام و آسیب به بتن

بتنی، بهبود خاصی مشاهده نشد (Mubasher and Jabari, 2023).

فروولوا و سالایویچ (۲۰۱۷)، زبری قسمتی از روسازی ساخته شده با خرده‌های لاستیک را ارزیابی کردند. همچنین گزارش دادند که افزودن لاستیک خردشده، باعث افزایش مقاومت لغزشی سطح جاده می‌شود. واضح است که لاستیک خردشده، به عنوان جایگزینی برای جزئی از سنگ‌دانه‌ها به کار گرفته شده است. همچنین آن‌ها نشان دادند که استفاده از نانو سیلیس در مخلوط بتن، موجب افزایش مقاومت لغزشی سطح روسازی RCC می‌شود (Frolova and Salaiova, 2017).

از طرفی توکلی و همکاران در سال ۲۰۲۰، با استفاده از مواد زائد به عنوان جایگزین سنگ‌دانه‌های ریز در روسازی بتن غلتکی، به بررسی خصوصیات آن پرداختند. علاوه بر این، آن‌ها برای کاهش اثرات منفی احتمالی مخلوط‌های سرامیکی ضایعاتی و همچنین بهبود خواص مکانیکی سیمان، از نانو SiO₂ در طراحی مخلوط استفاده کردند. پس از آماده‌سازی مخلوط‌ها، زمان وی بی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، جذب آب، مقاومت در برابر سایش و لغزش را اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان داد، مخلوط با مواد زائد، مقاومت به لغزش بیشتری نسبت به مخلوط شاهد داشت. به‌طورکلی، مخلوط‌های سرامیکی ضایعاتی، ویژگی‌های مکانیکی بهتری را نشان دادند و مخلوط‌های حاوی ضایعات شیشه از نظر جذب آب و مقاومت لغزشی، عملکرد بهتری داشتند. علاوه بر آن، استفاده از نانو SiO₂ منجر به بهبود خصوصیات مکانیکی بتن غلتکی می‌شود (Tavakoli et al, 2020).

شیخ و همکاران (۲۰۲۲)، به پژوهشی تحت عنوان "تولید بتن غلتکی سبز با استفاده از سنگدانه‌های ریز سرباره مس" پرداختند. در این پژوهش آزمایشگاهی که شامل ۷ طرح اختلاط (۰ تا ۶۰ درصد سنگدانه‌های سرباره مس ریز) بود، اثرات استفاده از سنگدانه‌های سرباره مس ریز بر مقاومت و خواص ریزساختاری بتن‌های فشرده غلتکی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که عملکرد مقاومت فشاری نمونه حاوی CS، نسبت به نمونه شاهد بهبود یافته است و همچنین افزایش CS، استحکام کششی و خمشی RCC را افزایش داده بود. نتایج نشان داد که این استفاده از CS می‌تواند به جمع‌آوری ضایعات سرباره مس از طبیعت، تولید بتن غلتکی‌های سازگار با طبیعت، کاهش آلاینده‌ها و صرفه‌جویی در انرژی و حفظ محیط‌زیست کمک کند (Sheikh et al, 2022). در پژوهش دیگری سلوام و همکاران در سال ۲۰۲۳، به ارزیابی اثر مکانیسم‌های مختلف تراکم بر ساختار داخلی بتن غلتکی پرداختند. در این مطالعه،

و اعمال سربارها و زمان عمل‌آوری متفاوت بر روی نمونه‌ها است. در ادامه از نمونه‌های ساخته شده مغزه‌گیری به عمل آمده و بر روی آن‌ها آزمایش‌های مربوط به نفوذپذیری و جذب آب، صورت می‌گیرد. برای کنترل مخلوط ساخته شده در هر پیمان، آزمایش‌های تعیین زمان وی بی اصلاح شده، آزمایش تعیین وزن مخصوص و آزمایش مقاومت فشاری انجام می‌پذیرد.

آب‌بند پودری PP: ماده افزودنی آب‌بند پودری بتن، یک فیلر میکرونیزه آب‌گریز و ضد آب است و به واسطه ساختار فیزیکی خاص خود، به راحتی داخل مخلوط بتنی پخش می‌شود و تمام خلل‌و فرج میان سنگ‌دانه‌ها را پر نموده و به این ترتیب کسری فیلر و ریزدانه‌ها را در داخل مخلوط بتنی برطرف می‌کند. در نهایت، بتن نفوذپذیر شده و در برابر نفوذ آب، یون‌های مخرب و مواد شیمیایی خورنده به داخل بتن، ایمن می‌شود. مشخصات آب‌بند پودری در جدول (۱) ارائه شده است.

خواهد شد. برای پر کردن فضای خالی بین سنگ‌دانه‌ها، استفاده از ماده افزودنی آب‌بند پودری گزینه مناسبی است. آب‌بند پودری، ماده‌ای است بر پایه اسیدهای چرب (که حاوی مواد پرکننده خلل‌و فرج و مواد دافع آب است)، که طی واکنش با ترکیبات حاصل از هیدراتاسیون سیمان، در داخل منافذ و حفره‌ها جاری شده و نقش دافع آب و رطوبت را به عهده می‌گیرد. نفوذناپذیری بتن از عوامل تعیین‌کننده برای پیش‌بینی و ارزیابی دوام و استحکام بتن است. اگر بتن با طرح اختلاط صحیح و با نسبت آب به سیمان و مواد سنگی مرغوب تولید گردد، نفوذپذیری آن کاهش می‌یابد. همچنین مصرف مقدار کنترل شده‌ای از مواد آب‌بند پودری به مخلوط برای کاهش نفوذپذیری، باعث ایجاد بتن مرغوب می‌گردد.

۴- روش تحقیق

شیوه تحقیق در پژوهش حاضر، به صورت مطالعات آزمایشگاهی بوده و شامل ساخت نمونه‌های بتن غلتکی با یک طرح اختلاط ثابت

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و شیمیایی آب‌بند پودری Pas Proof

حالت فیزیکی	پودر
رنگ	سفید
وزن مخصوص (گرم بر سانتی متر مکعب)	0.725 ± 0.05
یون کلر	ندارد
pH	7 ± 1

خمیر در طراحی بتن غلتکی روسازی‌ها، در ادامه جزئیات بیشتری از این روش‌ها ارائه شده است.

۴-۱- طرح اختلاط بتن غلتکی

پس از انتخاب مصالح مناسب (سنگ‌دانه، آب، سیمان و در صورت نیاز مواد افزودنی)، باید نسبت اختلاط هر یک از این مواد در مخلوط بتن غلتکی مشخص شود. به‌طورکلی روش‌های طرح مخلوط بتن غلتکی را می‌توان در دو گروه روش مبتنی بر تراکم خاک و روش مبتنی بر محدودیت روانی یا کارایی تقسیم‌بندی کرد. مستقل از آن‌که چه روشی برای طرح مخلوط بتن غلتکی استفاده شود، مخلوط طراحی شده باید به اندازه کافی خمیر داشته باشد تا بتواند سطح سنگ‌دانه را پوشش دهد و فضاهای خالی بین آن‌ها را پر کند. همچنین دارای مقاومت مکانیکی مناسب و کارایی مطلوب باشد، تا امکان رسیدن به چگالی مناسب به‌آسانی فراهم شود. از طرفی دارای دوام کافی در شرایط آب‌وهوایی موردنظر باشد. با توجه به فراوانی استفاده از روش مبتنی بر تراکم خاک و روش حجم بهینه

۴-۱-۱- طرح مخلوط بتن غلتکی به روش تراکم خاک

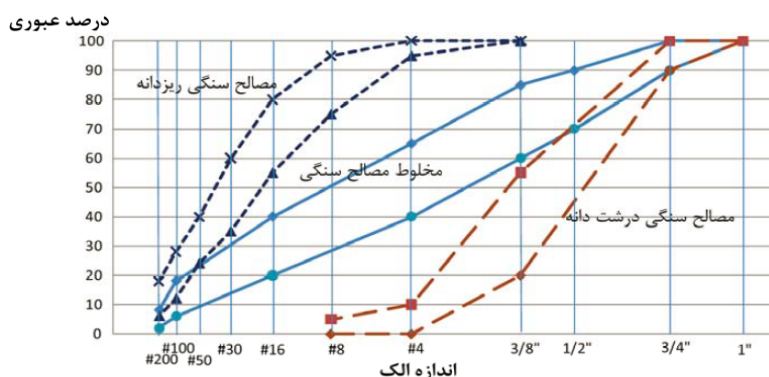
روش تراکم خاک متداول‌ترین روش برای طرح مخلوط بتن غلتکی روسازی‌ها است. برای طرح مخلوط بتن غلتکی به این روش، مراحل زیر طی می‌شود.

انتخاب دانه‌بندی مصالح سنگی

محدوده دانه‌بندی مناسب برای مصالح سنگی مورد استفاده در بتن غلتکی پژوهش حاضر، در شکل (۱) و جدول (۲) نشان‌داده شده است.

جدول ۲. دانه بندی مخلوط سنگ دانه بتن غلتکی

درصد عبوری	اندازه الک
۱۰۰	۲۵ میلی متر (۱ اینچ)
۹۰-۱۰۰	۱۹ میلی متر (۳/۴ اینچ)
۷۰-۹۰	۱۲/۵ میلی متر (۱/۲ اینچ)
۶۰-۸۵	۹/۵ میلی متر (۳/۸ اینچ)
۴۰-۶۵	۴/۷۵ میلی متر (شماره ۴)
۲۰-۴۰	۱/۱۸ میلی متر (شماره ۱۶)
۶-۱۸	۰/۱۵ میلی متر (شماره ۱۰۰)
۲-۸	۰/۰۷۵ میلی متر (شماره ۲۰۰)



شکل ۱. حدود دانه بندی سنگ دانه بتن غلتکی (1inch=25mm)

چگالی خشک و درصد رطوبت بهینه، از روش تراکم پروکتور اصلاح شده (ASTM D1557) استفاده می‌شود. روش دیگر، تعیین تغییرات چگالی-رطوبت در بتن غلتکی استفاده شده از میز ارتعاشی (ASTM C1170/C1170M) است.

ساخت نمونه‌های بتن غلتکی

بر اساس درصد رطوبت بهینه بدست آمده به ازای هر درصد سیمان از گام قبل، نمونه‌های بتن غلتکی با استفاده از چکش ارتعاشی (ASTM C1435/C1435M) یا روش میز ارتعاشی (ASTM C1176/C1176M) ساخته می‌شوند.

آزمایش مقاومت روی نمونه‌های بتن غلتکی و تعیین درصد مواد سیمانی مناسب

ابتدا آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های ساخته شده در گام قبل، انجام می‌شود و سپس نمودار مقاومت فشاری-درصد مواد

انتخاب درصدی از مواد سیمانی

مقدار مواد سیمانی بر اساس مشخصات پروژه، ملاحظات اقتصادی، در دسترس بودن مصالح و ملاحظات مربوط به ساخت بتن غلتکی انتخاب می‌شود. همچنین برای استفاده از بتن غلتکی در لایه رویه، انتخاب مقدار سیمان (بدون مواد مکمل) بین ۱۱ تا ۱۳ درصد وزن مصالح (مجموع وزن سیمان و مصالح خشک) برای شروع آزمایش مناسب است.

ترسیم منحنی چگالی خشک - مرطوب

به ازای هر درصد مواد سیمانی که در مرحله قبل مشخص شد، مخلوط سنگ دانه و مواد سیمانی با درصد‌های مختلف رطوبت (معمولاً سه درصد متفاوت)، ساخته شده و منحنی تغییرات چگالی خشک-رطوبت رسم می‌گردد. برای بیشتر سنگ دانه‌ها، درصد رطوبت بهینه معمولاً بین ۵ تا ۸ درصد است. بنابراین درصد رطوبتی که برای ساخت نمونه‌ها استفاده می‌شود بهتر است بین محدوده گفته شده یا براساس تجارب قبلی باشد. به منظور تعیین حداکثر

انتخاب دانه بندی مورد نظر برای سنگدانه

اولین گام در این روش، انتخاب دانه بندی سنگدانه با حداقل فضای خالی پس از تراکم است. برای تهیه دانه بندی با حداکثر تراکم می توان از روش اصلاح شده فولر-تامسون استفاده کرد (رابطه ۱ یا شکل ۲).

$$P_i = \left(\frac{d_i}{D}\right)^{0.45} \times 100 \quad (1)$$

در رابطه (۱)، d_i اندازه الک بر حسب میلی متر، D بزرگترین اندازه اسمی سنگدانه بر حسب میلی متر و P_i درصد عبوری از الک به اندازه d_i است. همان طور که در شکل (۲) مشاهده می شود، درصد سنگدانه ریز عبوری از الک شماره ۲۰۰ (۰/۰۷۵ میلی متر) بین ۵ الی ۱۵ درصد است. این مقدار شامل سنگدانه ریز و مواد سیمانی (پوزولان) است که به عنوان فیلر به کار برده می شود. از آنجا که منحنی های فولر-تامسون، دانه بندی در شرایط ایده آل (ماسه طبیعی و سنگدانه مکعبی شکل) را ارائه می دهد. بنابراین، این دانه بندی ها برای شرایط دیگر به صورت تقریبی خواهد بود؛ زیرا حجم فضای خالی پس از تراکم علاوه بر اندازه سنگدانه ها، به شکل، تیز گوشگی و بافت سطحی سنگدانه ها و همچنین روش تراکم بستگی دارد. به طور طبیعی سنگدانه گرد گوشه و مکعبی شکل دارای ساختار متراکم هستند، در حالی که سنگدانه دارای درصد زیاد سنگدانه های تیز گوشه و سنگدانه های تخت و دراز، منجر به ایجاد ساختار باز در دانه بندی می شوند.

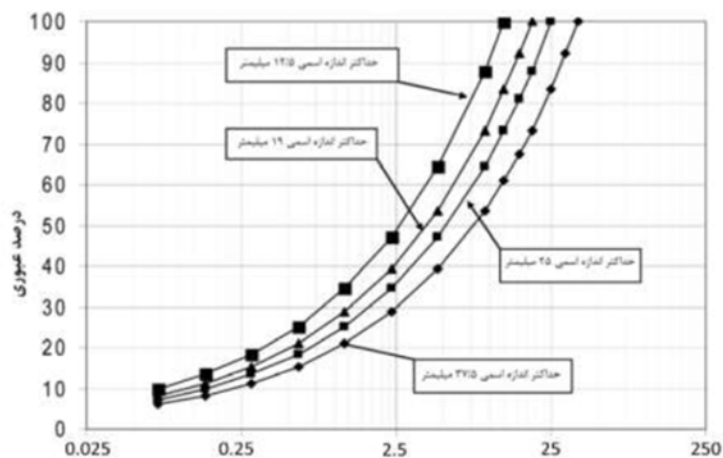
سیمانی نمونه ها رسم می گردد. در این نمودار به ازای مقاومت فشاری متوسط مورد نیاز، درصد مواد سیمانی بهینه مشخص می شود.

محاسبه نسبت های مخلوط

چنانچه بین درصد مواد سیمانی مورد نیاز (بدست آمده از مرحله قبل) و درصد سیمان هایی که در ساخت نمونه ها استفاده شده است، تفاوت قابل ملاحظه ای وجود داشته باشد، لازم است منحنی دیگری که تغییرات چگالی خشک-رطوبت نمونه های دارای درصد مواد سیمانی منتخب را داشته باشد، رسم گردد تا به این ترتیب، درصد رطوبت بهینه مشخص شود. در صورتی که درصد مواد سیمانی بدست آمده از مرحله قبل با درصد سیمان هایی که در ساخت نمونه ها استفاده شده است، تفاوت چندانی نداشته باشد، درصد رطوبت بهینه با درون یابی مشخص می شود. همچنین در شرایط خاص، معیار دوام می تواند عامل تأثیرگذار در انتخاب نسبت آب به سیمان باشد. پس از انتخاب نهایی درصد مواد سیمانی و درصد رطوبت بهینه، مقدار مصالح مورد نیاز برای مخلوط محاسبه می گردد. محاسبات مربوط به وزن و حجم مصالح، باید بر اساس شرایط اشباع با سطح خشک سنگدانه باشد.

۴-۱-۲- طرح مخلوط بتن غلتکی به روش حجم بهینه خمیر

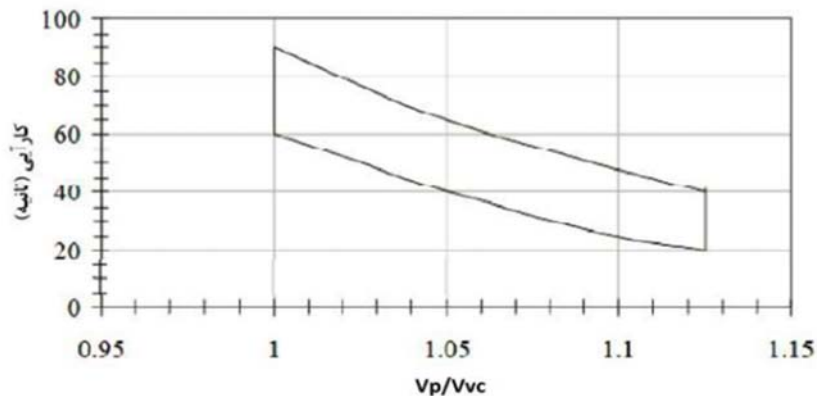
روش حجم بهینه ی خمیر پیچیدگی محاسباتی و جزئیات بیشتری داشته اما تعداد نمونه های آزمایشگاهی مورد نیاز برای رسیدن به طرح اختلاط را کاهش می دهد. در ادامه، مراحل مختلف روش حجم بهینه خمیر آمده است.



شکل ۲. منحنی فولر - تامسون برای سنگدانه (با اندازه های متفاوت)

+ حجم مواد سیمانی + حجم هوای محبوس + سنگدانه عبوری از الک شماره ۲۰۰) به حجم فضای خالی سنگدانه متراکم (V_{vc}) است (شکل ۳). برای تخمین اولیه نسبت V_p/V_{vc} می‌توان از شکل (۳) استفاده کرد. با توجه به این که پارامتر V_{vc} در ابتدا اندازه‌گیری شده است، بنابراین با معلوم بودن نسبت V_p/V_{vc} ، مقدار خمیر V_p بدست می‌آید.

اندازه‌گیری فضای خالی مخلوط سنگدانه و تعیین حجم خمیر به ازای کارایی مشخص پس از تعیین دانه‌بندی سنگدانه، حجم فضای خالی مخلوط سنگدانه با استفاده از روشی استاندارد مانند ASTM C29 یا AASHTO T19 اندازه‌گیری می‌شود. کارایی مخلوط بتن غلتکی هوازایی نشده، تابعی از نسبت حجم خمیر (V_p) (حجم آب



شکل ۳. ارتباط بین کارایی و نسبت حجم خمیر به حجم فضای خالی در بتن غلتکی بدون مواد هوازا

۴-۲- آزمایش مقاومت فشاری

توانایی تحمل نیروهای مختلف، یکی از ضروری‌ترین شرایطی است که بتن غلتکی بایستی واجد آن باشد. آزمایش مقاومت فشاری به دو روش ASTM بر روی نمونه‌های استوانه‌ای 150×300 میلی‌متری و BS بر روی نمونه‌های مکعبی 150 یا 200 میلی‌متری انجام می‌شود. سپس بتن در چند لایه درون قالب ریخته شود. به منظور جلوگیری از چسبندگی ملات به جداره قالب، باید یک لایه نازک روغن معدنی به دیواره داخلی قالب‌ها مالیده شود. نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت از قالب بیرون آورده می‌شوند. در محیط آزمایشگاه به منظور جلوگیری از کاهش رطوبت نمونه‌های قالب‌گیری شده، بایستی آن‌ها را به مدت بیش از ۲۰ ساعت و کمتر از ۴۸ ساعت در دمای $23 \pm 1/7$ درجه سانتی‌گراد نگهداری کنند. همچنین نمونه به نحوی زیر دستگاه آزمایشگاه قرار گیرد که جهت بار، عمود بر جهت بتن‌ریزی نمونه در قالب، اعمال گردد. در پژوهش حاضر، پس از عمل‌آوری، نمونه‌های بتنی جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری قرار داده شدند. طبق استاندارد ASTM، جهت تعیین مقاومت فشاری، نیروی قائم بایستی با سرعت $0/35 - 0/15$ مگاپاسکال بر ثانیه ($psi/s50-20$) به نمونه‌ها اعمال شود.

رابطه دقیق بین V_p و V_{vc} به روش تعیین V_{vc} و خواص رئولوژی خمیر بستگی دارد. کارایی مورد نیاز برای بتن غلتکی روسازی معمولاً بین ۴۰ الی ۶۰ تائیه است. به منظور تعیین نسبتاً دقیق حجم خمیر مورد نیاز برای دستیابی به کارایی مورد نظر، لازم است یک یا دو مخلوط آزمایشی تهیه و آزمایش شود. کارایی بتن غلتکی مطابق با روش A استاندارد ASTM C1170، وی بی اصلاح شده با وزنه $22/7$ کیلوگرم، انجام می‌گردد.

انتخاب نسبت آب به سیمان بر اساس مقاومت فشاری مورد نیاز

پس از تعیین حجم خمیر، باید نسبت آب به سیمان بر اساس مقاومت مورد نیاز تعیین شود. نسبت آب به سیمانی که منجر به خصوصیات مکانیکی مورد نظر برای بتن غلتکی می‌شود، وابسته به ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی سیمان و خصوصیات سنگدانه است. برای تعیین نسبت آب به سیمان بهینه و اندازه‌گیری مقاومت خمشی (یکی از پارامترهای طراحی ضخامت لایه بتن غلتکی)، باید دو یا سه مخلوط آزمایشی ساخته و آزمایش شود. همچنین در شرایط خاص، معیار دوام می‌تواند عامل تأثیرگذار در انتخاب نسبت آب به سیمان باشد.

۴-۳- آزمایش جذب آب موئینه بتن، استاندارد C1585

در این آزمایش‌ها معمولاً مقدار آب جذب شده در واحد سطح، ارتفاع نم موئینه و آهنگ جذب آب موئینه، تعیین و گزارش می‌شود که در همه دستورها به صورت یکسان نیست و در هر دستور به برخی از این پارامترها پرداخته می‌شود. دستور آزمایش RILEM CPC11.2 از جمله دستورهای آزمایش قدیمی در این زمینه است که سال‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. اخیراً دستور استاندارد ASTM C1585 ارائه شده است که با دقت بیشتری شرایط آزمایش و شکل نمونه را مشخص نموده است. در این آزمایش از یک قرص بتنی به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۵۰ میلی‌متر استفاده می‌شود که بخش تحتانی آن به میزان ۱ تا ۳ میلی‌متر در آب قرار گرفته است و رطوبت محیط اطراف نمونه نیز کنترل می‌گردد و در نهایت، آهنگ جذب آب موئینه در بازه‌های زمانی مختلف بدست

می‌آید. لازم به ذکر است که در این استاندارد، دو مقدار آهنگ جذب آب اولیه و ثانویه بدست می‌آید، که معمولاً نرخ جذب آب ثانویه به مراتب کم‌تر از نرخ جذب آب اولیه است. در حالی که در روش RILEM فقط یک نرخ جذب آب بدست می‌آید. نگاه ASTM به نرخ جذب آب از RILEM منطقی‌تر به نظر می‌رسد و اشکال موجود در روش RILEM و مشکلات برازش یک خط بر چهار نقطه موجود در این روش را حل نموده است. ضمن اینکه تعداد نقاط رسم شده در صفحه مختصات را به مقدار قابل توجهی افزایش داده است و با برازش دو خط به دو مجموعه از این نقاط، برخورد واقع بینانه‌تری داشته است. هنوز طبقه‌بندی خاصی در مورد کیفیت بتن‌ها با کاربرد این آزمایش مطرح نشده است و آنچه در جدول (۳) مشاهده می‌شود، عمدتاً مربوط به آزمایش‌های انجام شده بر اساس دستور RILEM است.

جدول ۳. محدوده پذیرش جذب آب موئینه بتن بادوام

کیفیت بتن	عالی	خیلی خوب	خوب	متوسط	ضعیف
جذب آب ($\text{mm/h}^{0.5}$)	کمتر از ۱/۰	۱/۰ تا ۱۵/۰	۱۵/۰ تا ۲۰/۰	۲۰/۰ تا ۲۵/۰	بیشتر از ۲۵/۰

هرچند سازوکار برخی خرابی‌ها در ایران و حتی جنوب کشور مربوط به جذب آب موئینه است، اما در دستورهای استاندارد ایران، این آزمایش برای بتن جایگاهی ندارد و طبعاً مشخصات استاندارد و محدودیت خاصی نیز مطرح نگردیده است. به هر حال به نظر می‌رسد برای شرایط E و F کیفیت عالی و یا بهتر از آن، برای شرایط D کیفیت خیلی خوب یا عالی، برای B و C حالت خوب یا خیلی خوب و برای رده A، کیفیت خوب یا متوسط کاربرد دارد.

دانه‌بندی آزمایش جذب موئینی

بندکننده فعال: این ماده شامل ترکیبات شیمیایی آب که با رطوبت و آهک آزاد موجود در داخل بتن وارد واکنش شده، ترکیبات کریستالی غیرمحلول تشکیل می‌دهند که منافذ و ترک‌های بتن را پر می‌کند. این ماده حتی در معرض فشار هیدرواستاتیک قوی نیز نفوذ می‌نماید و خود جزئی از بتن می‌شود. در واقع تنها فضاهای خالی را پر کرده و افزایش حجم ایجاد نمی‌نماید. از آنجا که این ماده با آب موجود در بتن تازه واکنش می‌دهد، به منظور آغاز فرآیند، نیاز به پاشش مجدد آب نیست. مشخصات دانه‌بندی آزمایش جذب موئینی را در جدول (۴) مشاهده می‌کنید.

۴-۴- آزمایش جذب آب کوتاه‌مدت بتن، استاندارد

BS-1881PART122

در BS 1881 در سال‌های گذشته آزمون مکعبی خشک ۱۰۰ میلی لیتری در آب غرق می‌شد و پس از یک ساعت درصد وزنی آب جذب شده گزارش می‌شد. آزمایش BS 1881 part122، عمدتاً برای قطعات بتنی پیش‌ساخته پس از مغزه‌گیری به قطر ۷۵ میلی‌متر انجام می‌شود که باید دارای طول معینی باشد و نمونه کاملاً خشک شده در آن، غرقاب می‌شود و درصد جذب آب نیم ساعته بدست می‌آید. این آزمایش کیفیت سطحی بتن مورد نظر را بدست می‌دهد. در انگلیس کیفیت جداول بتنی و برخی قطعات پیش‌ساخته با این آزمایش کنترل می‌شود. برای مثال جذب آب نیم ساعته یک جدول نباید از ۲ درصد بیشتر باشد. در آزمایش‌های جذب آب کوتاه‌مدت، حساسیتی در مورد شکل و اندازه نمونه وجود دارد و نسبت سطح به حجم اهمیت پیدا می‌کند. در استاندارد BS 1881 ضرایب تصحیح خاصی پیش‌بینی شده است تا در صورت تغییر قطر و طول نمونه نسبت به قطر و طول استاندارد، بتوان نتایج تصحیح شده را محاسبه نمود. توصیه‌های انجمن تحقیقات و اطلاعات صنعت ساختمان برای مناطق عربی در حاشیه خلیج فارس و دریای سرخ و غیره، حداکثر جذب آب کوتاه‌مدت طبق BS 1881 را ۲ درصد مطرح نموده است. در آیین‌نامه پیشنهادی پایایی بتن در حاشیه خلیج فارس، معیارهای زیر برای شرایط مختلف محیطی حاکم با روش BS 1881 part122 ارائه شده است.

جدول ۴. دانه‌بندی آزمایش جذب مویینگی

اندازه الک	عبوری	حد استاندارد	مانده تجمعی	مانده روی هر الک	وزن سنگ‌دانه برای نمونه‌های با ۱/۵۰۰ کیلو سنگ‌دانه
۱	۱۰۰	۱۰۰	۰	۰	گرم
۳/۴	۱۰۰	۹۰-۱۰۰	۰	۰	۰
۱/۲	۸۵	۷۰-۹۰	۱۵	۱۵	۲۲۵
۳/۸	۷۰	۶۰-۸۵	۳۰	۱۵	۲۲۵
۴	۵۵	۴۰-۶۵	۴۵	۱۵	۲۲۵
۱۶	۳۵	۲۰-۴۰	۶۵	۲۰	۳۰۰
۱۰۰	۱۵	۶-۱۸	۸۵	۲۰	۳۰۰
۲۰۰	۵	۰-۸	۹۵	۱۰	۱۵۰
عبوری از ۲۰۰	۰		۱۰۰	۵	۷۵
جمع			۱۰۰	۱۰۰	۱۵۰۰

جدول ۵. مقادیر مجاز درصد جذب آب کوتاه‌مدت در شرایط مختلف محیطی در آیین‌نامه پایایی

شرایط محیطی	A	C و B	F و E, D
درصد جذب آب (درصد)	حداکثر ۴	حداکثر ۳	حداکثر ۲

$$\text{درصد آب جذب شده} = \frac{m - m_0}{m_0} \times 100 \quad (2)$$

در رابطه فوق، m وزن نمونه مرطوب و m₀ وزن نمونه خشک است.

به نظر می‌رسد لازم است با تجدید نظر در مورد شرایط E و F مقدار حداکثر جذب آب نیم ساعته را به ۱/۵ درصد محدود کرد.

یافته‌های پژوهش

با توجه به هدف پژوهش بررسی شد که افزودن آب‌بند پودری PP بر جذب آب بتن غلتکی چه تاثیری دارد. روندی که در مکانیزم آب‌بندی این محصول طی می‌شود، شیمیایی و زمان‌بر است. در واقع هر کریستال نقطه شروعی برای تشکیل کریستال‌های بعدی است. اگرچه ترکیبات شیمیایی بندکننده برای همیشه فعال باقی‌مانده و سازه را در مقابل نفوذ آب محافظت می‌کنند، اما در مدت زمان قابل قبولی از زمان اعمال، سطح را تا عمق مناسبی آب‌بند می‌نمایند. حداقل زمان لازم برای خشک شدن این ماده سه روز است و ممکن است یک ماه تا حصول ماکزیمم خواص نیاز باشد. عوامل محیطی از جمله دمای محیط، دانسیته بتن، میزان رطوبت موجود و شرایط جوی، همگی بر زمان پروسه آب‌بندی تاثیرگذارند. برای ایجاد و رشد کریستال‌های بیشتر جهت آب‌بند نمودن ترک‌ها، زمان بیشتری لازم است. پودر نفوذگر در شرایط محیطی خشک غیرفعال شده و به محض تماس

۴-۵- آزمایش جذب آب در بتن سخت شده، استاندارد

ASTM C642

در این آزمایش، آزمون‌های عمل‌آوری شده، پس از خشک شدن در محیط آزمایشگاه توزین می‌شوند (وزن خشک اولیه). با ثبت دقیق زمان به مدت تقریباً ۳ روز داخل آب غوطه‌ور می‌شوند تا به یک وزن ثابت برسند. در این مدت در زمان‌هایی، از داخل آب خارج شده و سطح آن‌ها با یک پارچه خشک می‌گردد و سپس توزین می‌شوند. معمولاً پس از گذشت یک روز روند تغییرات وزن آزمون‌ها اندک است. مقدار درصد جذب آب آزمون‌ها در هر زمان با استفاده از رابطه (۲) بدست می‌آید. سپس بارسم نمودار زمان - درصد جذب آب، می‌توان نحوه تغییر وزن و جذب آب طرح‌ها را با استفاده از فرمول زیر مشاهده نمود.

مجدد با رطوبت فعال می‌گردد. بتن آب‌بند شده توسط این پودر در تماس دائم با محیط دارای pH در محدوده‌ی ۴ تا ۱۱ و همچنین تماس دوره‌ای با محیط دارای pH در محدوده‌ی ۲ تا ۱۲ کاملاً مقاوم است. همچنین جدول (۶)، مصالح مورد نیاز برای ۸ نمونه را با درصد‌های مختلف آب نشان می‌دهند.

جدول ۶. مصالح مورد استفاده برای نمونه‌ها

مصالح مورد نیاز برای ۸ نمونه	بدون آب‌گریز (گرم)	۱ درصد (گرم)	۲ درصد (گرم)	۳ درصد (گرم)	۴ درصد (گرم)
شن و ماسه	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰
سیمان ۱۵ درصد	۲۶۲	۲۶۲	۲۶۲	۲۶۲	۲۶۲
آب ۰.۴۰	۱۰۵	۱۰۵	۱۰۵	۱۰۵	۱۰۵
آب ۰.۴۵	۱۱۸	۱۱۸	۱۱۸	۱۱۸	۱۱۸
آب ۰.۵۰	۱۳۱	۱۳۱	۱۳۱	۱۳۱	۱۳۱
آب‌گریز	۰	۳	۵	۸	۱۰

زمان وی بی

با توجه به مشخصات ارائه شده در جدول (۷)، زمان وی بی برابر ۴۵ ثانیه بدست آمد.

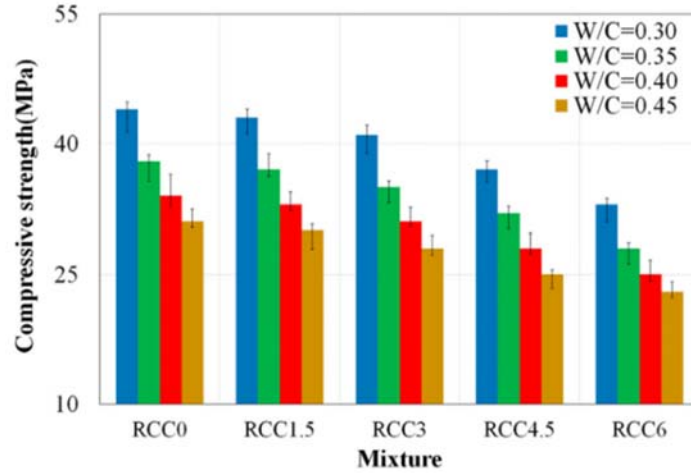
جدول ۷. زمان وی بی

اندازه نمونه	پارامتر
قطر ۱۰ ارتفاع ۵	ابعاد (سانتی‌متر)
۰/۰۰۰۳۹	حجم
۹۰۰ گرم	وزن تقریبی با احتساب ۲۴۰۰ وزن مخصوص

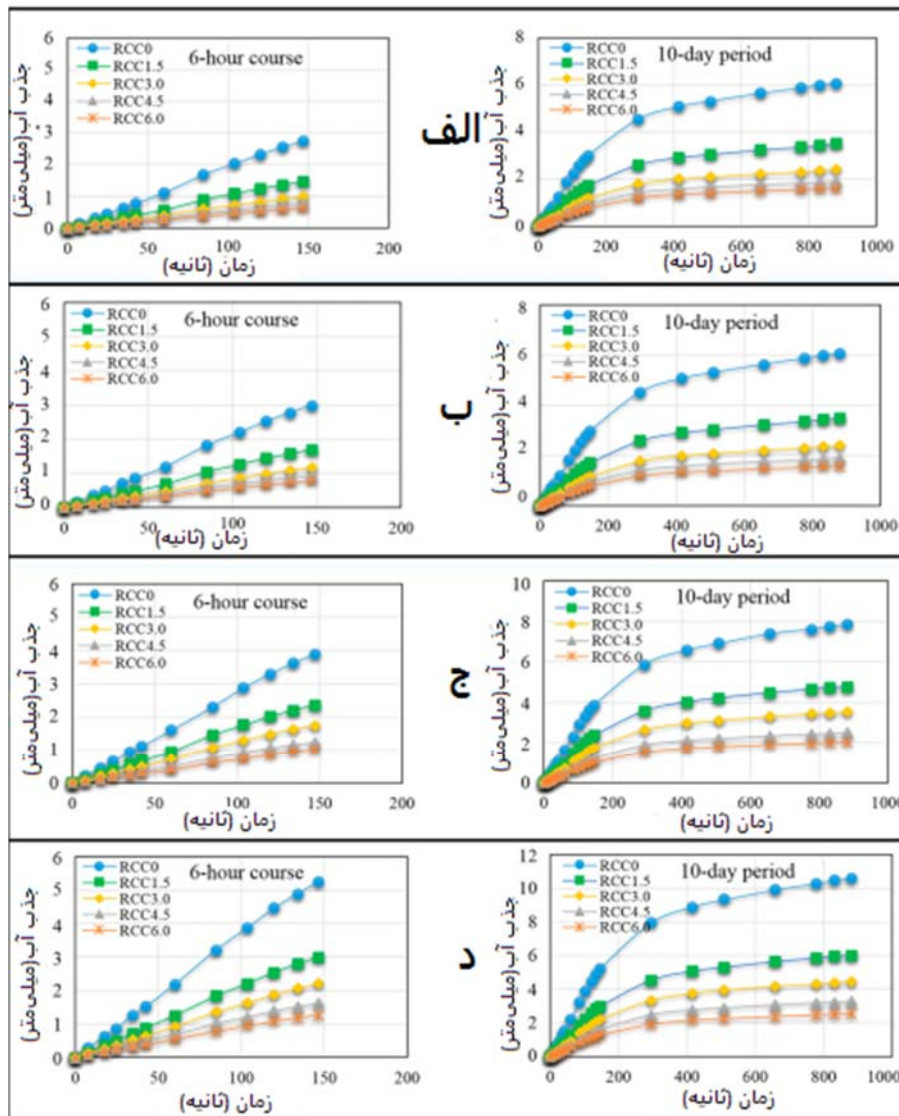
مقاومت فشاری

شکل (۴)، مقاومت فشاری بتن‌های غلتکی مختلف مورد مطالعه را پس از ۲۸ روز عمل‌آوری مقایسه می‌کند. بر این اساس، برای هر میزان آب‌بند، مقاومت فشاری با افزایش نسبت W/C کاهش می‌یابد. بنابراین، یکی از ملاحظات فنی در استفاده از یک افزودنی آب‌بند، ایجاد رفتار متعادل بین خواص استحکام و دوام است.

در پژوهش حاضر، برخی از عوامل عمومی مؤثر بر جذب آب بتن در استانداردهای مختلف، از جمله عیار بتن، نسبت آب به سیمان و نیز اثر استفاده از پودر آب‌بند PP بر جذب آن بر اساس آزمون‌ها مورد بحث و بررسی قرار گرفت. همچنین نتایج بدست آمده از تحلیل شکل‌های شماره ۵ تا ۹ در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرد. باید توجه شود که متوسط نتایج بدست آمده از هر آزمون برای هر طرح اختلاط مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۴. مقاومت ۲۸ روزه نمونه‌های بتن غلتکی مختلف



شکل ۵. جذب آب نمونه‌ها

جذب آب

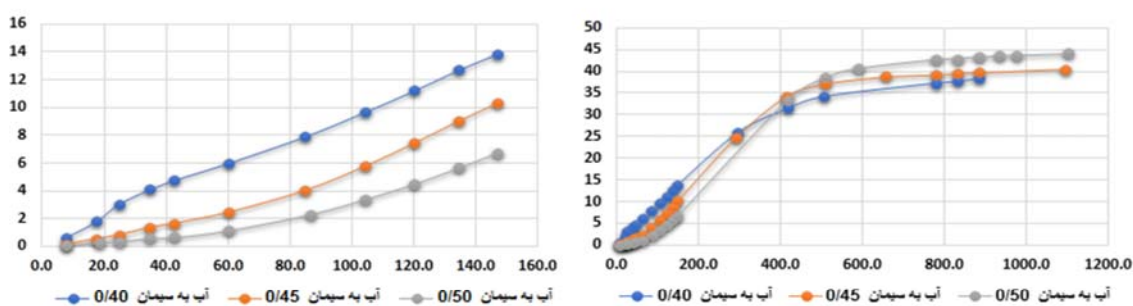
و ۰,۴۵ نیز صادق بود که به ترتیب در شکل (۵) (ج) و (د) نشان داده شده است. شکل (۵) نشان می‌دهد که بیشترین کاهش در جذب آب مربوط به نمونه حاوی ۱,۵ درصد پودر آب‌بند بود که با افزایش محتوای افزودنی، این مقدار کاهش یافت.

جذب آب بر اساس آب‌گریز ۷ روزه

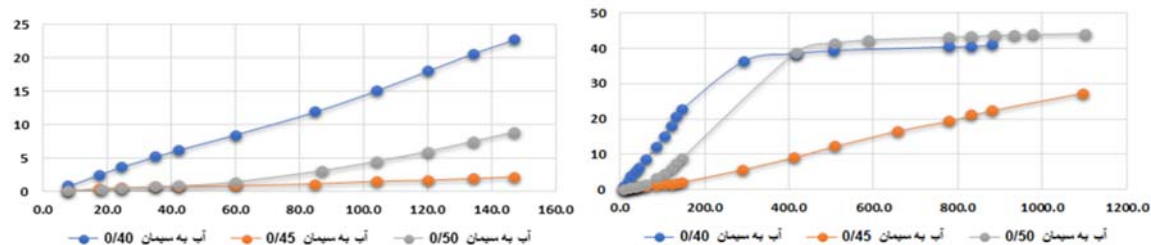
شکل (۶) و (۷)، تأثیر نسبت W/C بر جذب آب بتن غلتکی برای مقادیر ۱ الی ۴ درصد پودر آب‌بند را در بازه زمانی ۷ روز نشان می‌دهد. با توجه به این اشکال می‌توان مشاهده کرد که برای درصدهای مختلف پودر آب‌بند، جذب آب بتن غلتکی با افزایش نسبت W/C افزایش می‌یابد. با این حال، سرعت کاهش جذب آب با افزایش مقدار پودر آب‌بند کاهش یافت. همچنین شیب اولیه منحنی زمان جذب آب با افزایش نسبت W/C افزایش یافته است. این نشان دهنده عمق زیاد نفوذ آب در بتن و افزایش سرعت جذب آب اولیه است. از طرفی افزایش نسبت W/C منجر به افزایش فضای خالی می‌شود. این روند برای همه نمونه‌های بتن غلتکی با درصدهای مختلف پودر آب‌بند یکسان بود.

همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است، افزودن پودر آب‌بند، باعث کاهش جذب آب می‌شود. در واقع با در نظر گرفتن شیب منحنی، می‌توان بیان کرد که علاوه بر کاهش میزان جذب آب، میزان جذب نیز در پایان ۶ ساعت کم‌تر بوده است. همچنین در مدت زمان ۶ ساعت و برای نسبت آب به سیمان ۰,۳، با افزودن ۱,۵، ۳، ۴,۵ و ۶ درصد پودر آب‌بند، جذب آب، به ترتیب ۴۶,۹، ۶۳,۸، ۷۱,۸ و ۷۶,۸ درصد کاهش یافت. علاوه بر این، شکل (۵) تأثیر پودر آب‌بند را بر جذب آب بتن در طی ۱۰ روز نشان می‌دهد. که افزودن پودر آب‌بند، باعث کاهش سرعت جذب آب ثانویه (۱۰ روز) شد. با این حال، این روند کاهش برای میزان جذب آب ثانویه بسیار کم‌تر از روند اولیه بود. دلیل شیب زیاد منحنی جذب آب در زمان‌های اولیه این است که در ابتدا بتن پتانسیل موئینگی بالایی داشت. بنابراین، آب در ابتدا به دلیل تأثیر نیروهای موئینگی به بتن نفوذ می‌کند، اما به مرور زمان و با افزایش رطوبت بتن، خاصیت موئینگی اثر خود را به دلیل نفوذ بیشتر رطوبت به داخل نمونه از دست می‌دهد. از این رو، نفوذ و انتشار آب در منافذ بتن کاهش می‌یابد. شکل ۵ (ب)، اثر افزودنی‌ها را بر جذب آب با نسبت آب به سیمان ۰,۳۵ نشان می‌دهد. روند کاهش جذب آب به دلیل افزودن پودر آب‌بند با نسبت آب به سیمان ۰,۳ بود. این روند برای بتن با نسبت آب به سیمان ۰,۴

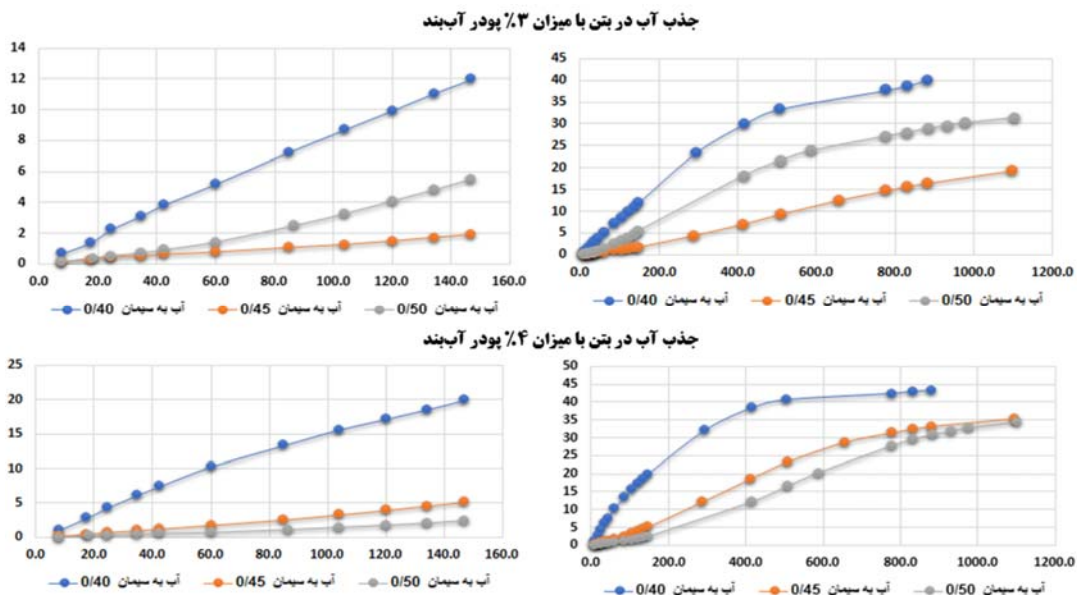
جذب آب در بتن با میزان ۱٪ پودر آب‌بند



جذب آب در بتن با میزان ۲٪ پودر آب‌بند



شکل ۶. جذب آب در بتن بر اساس آب‌گریز ۷ روزه با میزان ۱ درصد و ۲ درصد پودر آب‌بند (در ۶ ساعت)

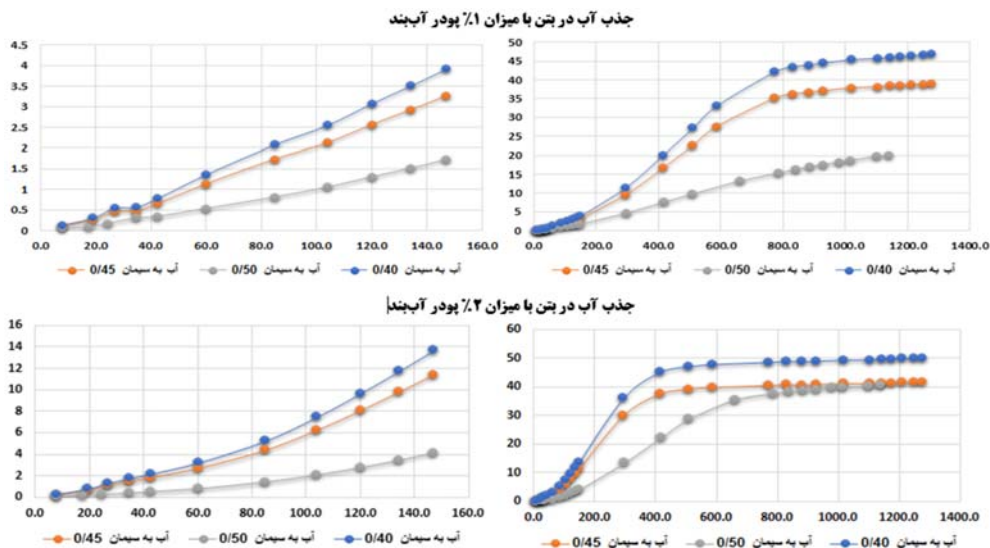


شکل ۷. جذب آب در بتن بر اساس آب گریز ۷ روزه با میزان ۳ درصد و ۴ درصد پودر آب بند (در ۶ ساعت)

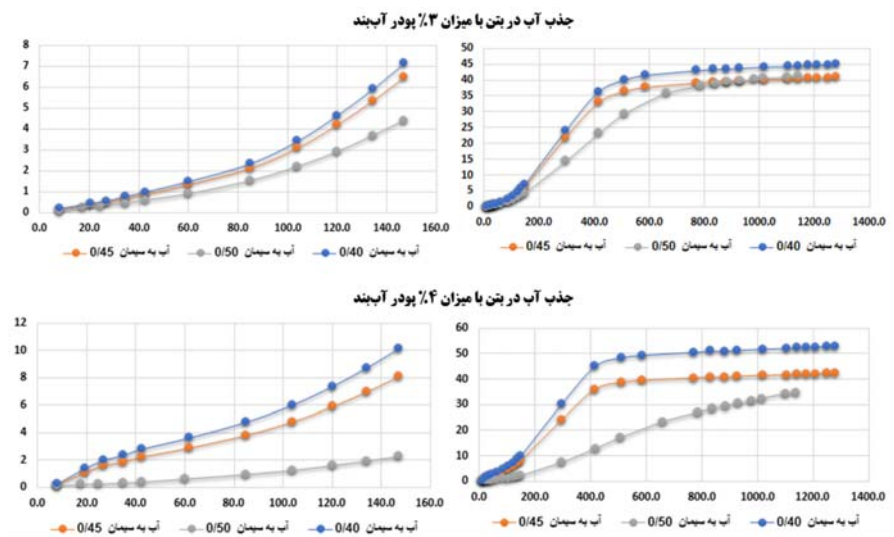
جذب آب بر اساس آب گریز ۲۸ روزه

(۹)، تأثیر نسبت w/c بر جذب آب بتن غلتکی برای مقادیر ۱ الی ۴ درصد پودر آب بند را در بازه زمانی ۲۸ روز نشان می دهد. با توجه به این اشکال می توان مشاهده کرد که برای درصدهای مختلف پودر آب بند، جذب آب بتن غلتکی با افزایش نسبت w/c افزایش می یابد. با این حال، سرعت کاهش جذب آب با افزایش مقدار پودر آب بند کاهش یافت. همچنین شیب اولیه منحنی زمان جذب آب با افزایش نسبت w/c افزایش یافته است. که این روند برای همه نمونه های بتن غلتکی با درصدهای مختلف پودر آب بند یکسان بود.

همان طور که در شکل (۸) و (۹) نشان داده شده است، افزودن پودر آب بند، سبب کاهش جذب آب می شود. در واقع با در نظر گرفتن شیب منحنی، می توان بیان کرد که علاوه بر کاهش میزان جذب آب، میزان جذب نیز در پایان ۶ ساعت کمتر بوده است. در مدت زمان ۶ ساعت و برای نسبت های w/c ۰/۴۰، ۰/۴۵ و ۰/۵۰ با افزودن ۱ الی ۴ درصد پودر آب بند، جذب آب کاهش یافته است. این می تواند یکی از دلایل کاهش زمان VB یا زمان مورد نیاز برای تراکم بتن های غلتکی حاوی این نوع افزودنی باشد. همچنین شکل (۸) و



شکل ۸. جذب آب در بتن بر اساس آب گریز ۲۸ روزه با میزان ۱ درصد و ۲ درصد پودر آب بند (در ۶ ساعت)



شکل ۹. جذب آب در بتن بر اساس آب گریز ۲۸ روزه با میزان ۳ درصد و ۴ درصد پودر آب بند (در ۶ ساعت)

۵- نتیجه گیری

زمان‌های عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه بر روی نمونه‌ها انجام شد. بر اساس نتایج بدست آمده، دامنه درصد جذب آب حاصله برای مقادیر مختلف سیمان و پودر آب بند PP در حدود ۳ الی ۴ درصد بدست آمده است. همچنین افزایش مواد سیمانی، باعث افزایش جذب آب شده است. با افزایش سیمان، مقدار مویبندی افزایش یافت که با جایگزین نمودن مقدار مشخصی پودر آب بند PP به جای

در تحقیق حاضر، تأثیر افزودنی آب بند بر جذب آب بتن غلتکی با نسبت‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. متغیرهای اصلی شامل نسبت W/C (۰/۴۰، ۰/۴۵ و ۰/۵۰) و درصد افزودنی آب بند (۱ الی ۴ درصد نسبت به وزن سیمان) بودند. بدین منظور، علاوه بر آزمایش مقاومت فشاری، آزمایش‌های جذب آب موئینه بتن، آزمایش جذب آب کوتاه مدت بتن و جذب آب در بتن سخت شده در

یافته است. همچنین، بر اساس نتایج بدست آمده، مصرف پوزولان در بتن، باعث کاهش میزان جذب آب بتن (با هدف افزایش دوام آن در مقایسه با نمونه‌های فاقد مواد سیمانی) می‌گردد.

۵) افزایش مقدار سیمان مصرفی در بتن در شرایط ثابت بودن آب طرح اختلاط باعث افزایش جذب آب موئینه و جذب آب گردیده است. ولی درصد جذب آب نیم ساعته بتن با افزایش سیمان کاهش یافته است. همچنین، آب‌بند پودری PP با درصدهای مختلف آن، جهت این نوع روسازی بررسی گردید که نتیجه آن پیشنهاد طرح اختلاط با دانه‌بندی پیوسته و افزودن میزان ۱ درصد، ۲ درصد، ۳ درصد و ۴ درصد آب‌بند پودری PP به آن است که موجب افزایش مقاومت و افزایش دوام بتن غلتکی روسازی می‌گردد.

۶- سپاسگزاری

نویسندگان مقاله حاضر، از پرسنل و کارشناسان محترم آزمایشگاه دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، جهت همکاری و راهنمایی صمیمانه در انجام آزمایش‌های مربوطه، کمال تشکر و قدردانی را می‌نمایند.

سیمان در طرح اختلاط مربوطه، این مقدار به‌طور چشمگیری کاهش یافت. مهم‌ترین نتایج حاصل را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد.

۱) در مدت زمان ۶ ساعت و برای نسبت آب به سیمان ۰/۳، با افزودن ۱/۵، ۳، ۴/۵ و ۶ درصد پودر آب‌بند، جذب آب به ترتیب ۶۳/۸، ۷۱/۸ و ۷۶/۸ درصد کاهش یافت. نتایج بدست آمده از میزان جذب آب سطحی برای مقادیر مختلف مواد سیمانی نشان می‌دهد که با افزایش سیمان از ۴۰۰ کیلوگرم در مترمکعب به ۴۵۰ کیلوگرم در مترمکعب، میزان جذب آب از ۳/۵ به ۲/۵ درصد کاهش یافته است.

۲) برای نسبت آب به سیمان ۰/۴ مقادیر اندیس موئینگی حدود ۴/۵ به‌دست‌آمد که این مقدار مساوی حداکثر موئینگی مجاز پیشنهادی است.

۳) پایین بودن ضریب تغییرات نتایج حاصل از انجام آزمایش اندازه‌گیری جذب آب موئینه بتن، مبین این مطلب است که این آزمون از دقت خوبی برخوردار است. با توجه به سرعت بالای روش جذب آب موئینه بتن و نیز دقت مطلوب، می‌توان گفت شاخص موئینگی بتن شاخص مناسبی در پیش‌بینی دوام بتن به‌منظور رد و یا قبول آن است.

۴) در هر سه آزمون جذب آب، روند تغییرات میزان جذب آب و نسبت آب به سیمان، با افزایش مقدار آب مصرفی، افزایش

۷- مراجع

- ACI 207.5R, (1999). Roller compacted concrete.
- ACI 325.10R, (1999). Roller compacted concrete pavement.
- Amini, N, Abdi Kordani, A, Toloui Kia, H. (2023). Laboratory study of the effect of iron filings on roller concrete pavement, *Road* (In Persian). doi: 10.22034/road.2023.361774.2089
- Amouzadeh Omrani, M, Hasirchian, M. (2020). Assessing the Effect of Steel Slag and Reclaimed Asphalt Pavement on Mechanical Properties and Pollution of Roller Compacted Concrete Pavement. *Transportation Infrastructure Engineering*, 6(2), 87-108 (In Persian). doi: 10.22075/jtie.2020.19754.1444

- Amouzadeh Omrani, M, Hassannezhad, A, & Shahbazi, V. (2022). Investigating the Possibility of Using Recycled Asphalt Pavement (RAP) and Steel Slag as a Substitute for Part of the Materials in Roller Compacted Concrete (RCC) Pavements. *Concrete Structures and Materials*, 7(1), 5-22 (In Persian). doi:10.30478/JCSM.2022.336813.1263
- Azizmohammadi, M, Toufigh, V, & Qahmian, M. (2017). evaluation and modeling of permeability of horizontal seams in rolled concrete, the second national congress of civil engineering, architecture and urban planning, Tehran (In Persian). doi: 10.22034/tri.2021.122013.
- Chobdar, A, Farajollahi, A, & Ameli, A. (2021). Investigating the use of macro fibers on the mechanical properties of rolled concrete pavement. *Research Journal of Transportation*, 18(1), 135-144 (In Persian).

-Courard, L., Michel, F., & Delhez, P. (2010). Use of concrete road recycled aggregates for roller compacted concrete. *Construction and Building Materials*, 24(3), 390-395.

-Fardad, M. (2018). Investigating the impact of carbonation phenomenon on the technical characteristics of rolled concrete pavement. *Road*, 26(96), 159-145 (In Persian).

-Frolova, O., & Salaiová, B. (2017). Analysis of road cover roughness on "control" road section with crumb tire rubber. *Procedia Engineering*, 190, 589-596.

-Hazaree, C., Ceylan, H., & Wang, K. (2011). Influences of mixture composition on properties and freeze-thaw resistance of RCC. *Construction and Building Materials*, 25(1), 313-319.

-Jofré, C. (2019). Roller Compacted Concrete: Making Concrete Pavements Available to the Whole Pavement Building Industry. *European Concrete Paving Association (EUPAVE)*, 16. **doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130072**

-Moddaress, A., & Hosseini, S. (2015). Investigating the behavioral characteristics of rolled concrete containing small asphalt materials. *Transportation Engineering*, 7(2), 297-314. (In Persian).

-Mubasher, M., & Jabari, M. (2023). The effect of the combined additive of recycled materials obtained from used car tires on the durability properties of rolled concrete. *Concrete Materials and Structures*, 8(1), 152-171 (In Persian). **doi: 10.30478/jcsm.2023.378522.1309**

-Naik, T. R., Chun, Y. M., Kraus, R. N., Singh, S. S., Pennock, L. L. C., & Ramme, B. W. (2001). Strength and durability of roller-compacted HVFA concrete pavements. *Practice Periodical on*

Structural Design and Construction, 6(4), 154-165.

-Omran, A., Harbec, D., Tagnit-Hamou, A., & Gagne, R. (2017). Production of roller-compacted concrete using glass powder: Field study. *Construction and Building Materials*, 133, 450-458. **doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.099**

-Selvam, M., Kalyan, N. S. S. P., Kannan, K. R., & Singh, S. (2023). Assessing the effect of different compaction mechanisms on the internal structure of roller compacted concrete. *Construction and Building Materials*, 365, 130072.

-Sheikh, E., Mousavi, S. R., & Afshoon, I. (2022). Producing green Roller Compacted Concrete (RCC) using fine copper slag aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 368, 133005. **doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133005**

-Taherkhani, H., & Sazgar, H. (2019). Investigating the mechanical properties of pavement roller concrete containing recycled concrete aggregates. *Transportation Engineering*, 10(4(41)), 787-806 (In Persian).

-Tavakoli, D., Dehkordi, R. S., Divandari, H., & de Brito, J. (2020). Properties of roller-compacted concrete pavement containing waste aggregates and nano SiO₂. *Construction and Building Materials*, 249, 118747.

doi: 10.30478/jcsm.2022.336813.1263

Investigating the Effect of Waterproofing Additive on the Strength and Water Absorption of Roller Compacted Concrete

Mohsen Amouzadeh Omrani, Department of Civil Engineering, Sava. C., Islamic Azad University, Savadkooh, Iran.

Pouyan Nazarian, Ph.D., Student, Department of Civil Engineering, Am.C., Islamic Azad University, Amol, Iran.

Seyed Amir Hesam Sadati, Department of Civil Engineering, Am.C., Islamic Azad university, Amol, Iran.

E-mail: Mo.Omrani@iau.ac.ir

Received: January 2025- Accepted: April 2025

ABSTRACT

Road pavement roller concrete is one of the types of concrete pavement, which is a new and developing technology due to the increase in execution speed and construction method. But in Iran, due to the problems of implementation in large thicknesses, reducing the thickness of this type of pavement along with maintaining the resistance is of particular importance. Bending strength and fatigue resistance are among the most important effective parameters in the design of pavement thickness, which are directly related to the uniaxial compressive strength of concrete. Also, considering the importance of the durability of concrete pavements (from the point of view of the possibility of penetration of water, corrosive materials and salts), reducing the percentage of water absorption of pavement roller concrete is one of the main parameters; Therefore, the use of effective additives as well as the appropriate mixing plan can have a significant effect on increasing the resistance and reducing the percentage of water absorption of rolled concrete in the pavement. In the present research, the compressive strength of rolled concrete samples at two ages of 7 days and 28 days has been determined and evaluated. Pas proof (PP) powder sealant with different percentages was investigated for this type of pavement, the result of which was the proposal of a mixing plan with continuous granulation. On the other hand, by adding 1.5, 3, 4.5, and 6 percent of waterproofing powder, water absorption decreased by 46.9, 63.8, 71.8, and 76.8 percent, respectively, which increased the strength and durability of the pavement roller concrete. Also, with the increase of cement from 400 kg/m³ to 450 kg/m³, the amount of water absorption has decreased from 3.5% to 2.5%.

Keywords: Roller Compacted Concrete, Waterproofing Powder, Compressive Strength, Water Absorption