

مطالعه آزمایشگاهی تأثیر عیار سیمان، اندازه سنگ‌دانه و میکروسیلیس بر نفوذپذیری بتن غلتکی

سعید خسروی^{1*}، سیدعلی اکبر حبیبی² و وحید بابادی عکاشه³

¹ دانش آموخته، کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

² دانش آموخته، کارشناسی ارشد مکانیک خاک و پی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد

³ مربی، گروه آموزشی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دهقان

khosravi@uk.ac.ir

چکیده: بتن کوبیده غلتکی بتنی با اسلامپ صفر است و عملیات حمل، پخش و تراکم آن با استفاده از ماشین‌آلات عملیات خاکی صورت می‌گیرد. کاربرد این نوع بتن در ساخت سدها و نقش نفوذپذیری در طراحی سدها، اهمیت شناخت عوامل تأثیرگذار بر روی نفوذپذیری بتن غلتکی را دو چندان کرده‌است. در پژوهش حاضر، اثر میزان عیار سیمان، حداکثر اندازه سنگ‌دانه و کاربرد میکروسیلیس و نقش عمل‌آوری مرطوب درزها بر روی نفوذپذیری بتن غلتکی موردتوجه قرار گرفت. لذا با ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی و انجام آزمایش نفوذپذیری، مقدار بهینه عیار سیمان و میکروسیلیس و همچنین تأثیر حداکثر اندازه سنگ‌دانه بررسی گردید. نتایج نشان داد که عیار بهینه سیمان 110 کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد و با افزایش حداکثر اندازه سنگ‌دانه، نفوذپذیری نیز افزایش می‌یابد. به علاوه مقدار بهینه جایگزینی میکروسیلیس با سیمان، 20 درصد مقدار سیمان بدست آمد. همچنین با رعایت شرایط مناسب اجرایی و عمل‌آوری مرطوب درزها، می‌توان نفوذپذیری از درزها را نیز کاهش داد.

کلمات کلیدی: نفوذپذیری، بتن غلتکی، عیار سیمان، میکروسیلیس، حداکثر اندازه سنگ‌دانه

Experimental Study of the Effect of Cement Content, Aggregate Size and Microsilica on the Permeability of Roller Compacted Concrete

S. Khosravi, S. A. Habibi and V. Babadi Akasheh

Abstract: roller-compacted concrete is a type of concrete with a slump of zero and is transported, spread and compacted by machinery used in soil compaction operations. The application of this type of concrete in the construction of dams and the role of permeability in the design of dams have increased the importance of identifying the factors affecting the permeability of roller-compacted concrete. In this research, the effect of cement content, the maximum aggregate size and the application of microsilica and the role of wet curing of joints on the permeability of roller-compacted concrete were studied. Using permeability tests, the optimum amount of cement replacement by microsilica and also the effect of maximum aggregate size were investigated. The results showed that optimum cement content was 110 kg/m³, and by increasing the maximum size of aggregates, permeability increased. In addition, the optimum amount of microsilica replacement with cement was 20% of the cement content. Also, the permeability of joints can be reduced by observing proper operating conditions and wet curing.

Keywords: Permeability, Roller-Compacted Concrete, Cement, Microsilica, Aggregate.

1- مقدمه

نفوذپذیری ویژگی مهم هر نوع بتن است. دو عامل تعیین کننده نفوذپذیری بتن، حباب‌های هوا و تخلخل خمیر سیمان هیدراته شده است. بتن غلتکی یک بتن خشک است و طراحی آن به گونه‌ای است که بتواند وزن یک غلتک ارتعاشی را تحمل کند. با توجه به نسبت‌های اختلاط و روش تراکم، نفوذپذیری بتن غلتکی می‌تواند به طور قابل توجهی از بتن معمولی متفاوت باشد [1]. نفوذپذیری توده بتن غلتکی یکی از مهم‌ترین پارامترهای سدهای بتن غلتکی است. این مورد به دلیل رابطه مستقیم بین این پارامتر و مسائلی مانند نشست آب از جسم سد، فشار آب منفذی، پایداری در مقابل چرخه‌های ذوب و یخبندان و الزامات دوام بتن است. نشست آب ممکن است اثر مخربی بر روی بتن غلتکی سخت شده از طریق شستن مواد سیمانی داشته باشد [2]. عواملی که بر روی نفوذپذیری بتن غلتکی تأثیر می‌گذارند را می‌توان به سه گروه نوع مصالح، نسبت‌های اختلاط، و عوامل اجرایی طبقه‌بندی کرد.

تحقیقات مختلفی در زمینه بررسی تأثیر نوع مصالح مورد استفاده در ساخت بتن غلتکی انجام شده است. مطالعه اثر نرمی سیمان نشان می‌دهد استفاده از سیمان نرم‌تر باعث کاهش نفوذپذیری بتن غلتکی می‌شود. [1] استفاده از پوزولانی مانند دوده سیلیسی، مشابه بتن معمولی، باعث کاهش نفوذپذیری بتن غلتکی می‌گردد که از دیدگاه دوام بتن نیز مناسب است. [1] در مقایسه با انواع دیگر پوزولان‌ها و نیز حالتی که افزودنی به بتن غلتکی اضافه نشده است، دوده سیلیسی به طور قابل ملاحظه‌ای کمترین ضریب نفوذپذیری را در بتن ایجاد می‌کند. با توجه به ارزان بودن سرباره ذوب در مقایسه با دوده سیلیسی و اثر قابل قبول آن در کاهش نفوذپذیری، در صورتی که نیاز به استفاده از پوزولان در مقادیر بالا باشد، استفاده از آن در ساخت بتن غلتکی پیشنهاد می‌شود [3]. نتایج مطالعات بر روی اثر نرمی سرباره ذوب‌آهن نشان می‌دهند با افزایش سطح ویژه سرباره و رساندن آن به حدود $2850 \text{ cm}^2/\text{gr}$ کاهش فراوانی (در حدود 40 درصد) در نفوذپذیری بتن غلتکی رخ می‌دهد [4].

اضافه کردن خاکستر پوسته برنج به عنوان یک ماده پوزولانی به بتن غلتکی نفوذپذیری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. با افزایش جایگزینی آن با سیمان ابتدا نفوذپذیری کاهش و سپس افزایش می‌یابد. مقدار بهینه جایگزینی آن در حدود 18 درصد می‌باشد. به علاوه هرچه انرژی تراکم بیشتر باشد، در یک مقدار ثابت از خاکستر پوسته برنج، نفوذپذیری کاهش می‌یابد [5]. افزودن خاکستر باطله زغال سنگ به بتن غلتکی و جایگزینی آن با سیمان، تأثیر مشابهی با اضافه کردن خاکستر پوسته برنج بر روی نفوذپذیری بتن غلتکی می‌گذارد. ترکیبات پوزولانی موجود در خاکستر باطله زغال سنگ با آهک و قلیاهای موجود در ماتریس سیمانی هیدراته شده واکنش می‌دهد و ترکیبات اضافی سیمانی ایجاد می‌کند که فضاهای خالی را پر می‌کند و نفوذپذیری را کاهش می‌دهد [6]. روبراه دانه‌های کوره بلند آسیا شده (GGBFS) نیز بر روی نفوذپذیری موثر است. با افزایش جایگزینی این ماده با سیمان در بتن غلتکی، نفوذپذیری ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. مقدار بهینه جایگزینی آن 40 درصد می‌باشد [7].

بررسی اثر دانه‌بندی مصالح سنگدانه‌ای نشان می‌دهد با افزایش درصد ماسه ابتدا نفوذپذیری کاهش می‌یابد اما پس از رسیدن به یک نقطه بهینه، با کاهش تأثیر مواد سیمانی، نفوذپذیری افزایش می‌یابد [8]. همچنین با افزایش درصد جایگزینی فیلر به جای ماسه در بافت بتن غلتکی، نفوذپذیری کاهش می‌یابد ولی شیب این تغییرات پس از جایگزینی 8 درصد تقریباً ناچیز و قابل اغماض است. [9] در بتن غلتکی دارای درزهای اجرایی جایگزینی فیلر با درصدی از ماسه باعث کاهش نفوذپذیری می‌شود که این درصد جایگزینی دارای یک مقدار بهینه با توجه به مقدار ماسه در ترکیب بتن می‌باشد [10]. در صورتی که درصد سنگ‌دانه‌های پولکی و سوزنی بکار رفته در ساخت بتن غلتکی زیاد باشد، ضریب نفوذپذیری افقی بیشتر از ضریب نفوذپذیری قائم خواهد بود. علت این امر آن است که روش‌های تراکم بتن غلتکی این ذرات را در جهت افقی آرایش می‌دهند. لذا طول خطوط جریان در جهت افقی را افزایش

مقدار متوسط سیمان ($150-190 \text{ Kg/m}^3$) و درصد متوسط خاکستر بادی (60-70 درصد) در بتن غلتکی به دستیابی به بتنی با نفوذپذیری کمتر منجر می‌شود [12].

نسبت سنگ‌دانه‌های درشت به ریز در بتن غلتکی بر روی تخلخل و در نتیجه نفوذپذیری آن تأثیرگذار است. افزایش این نسبت از 0.6 به 1.2 تخلخل بتن غلتکی را کاهش می‌دهد. این کاهش برای بتن غلتکی با 9 درصد سیمان برابر با 60 درصد و برای بتن غلتکی با 12 درصد سیمان برابر با 38 درصد است. به‌طور کلی مناسب‌ترین مقدار این نسبت از 1.2 تا 1.4 است [13].

عوامل اجرایی بر روی نفوذپذیری بتن غلتکی نیز مؤثر هستند. بانثیا و همکاران دو روش نگهداری از بتن غلتکی را بررسی کردند. روش اول استفاده از یک گشای سفید مراقبت و روش دوم پاشیدن آب در فواصل زمانی مختلف که برای 5 طرح اختلاط بررسی گردیدند. با انجام آزمایش نفوذپذیری بر روی نمونه‌ها مشخص گردید نوع مراقبت از بتن غلتکی تأثیر چندانی بر روی نفوذپذیری ندارد [1]. ضریب نفوذپذیری از سن 7 روز به 14 روز افت ناچیزی را نشان می‌دهد و پس‌از آن تا سن 21 روز تقریباً تغییر محسوسی را نشان نمی‌دهد. همچنین از سن 21 تا 28 روز نیز افت ناچیزی را نشان می‌دهد. بنابراین با افزایش سن نمونه ضریب نفوذپذیری کاهش می‌یابد [3 و 11]. یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار بر روی نفوذپذیری زمان تراکم است. امکان دستیابی به ضریب نفوذپذیری کمتر برای نمونه‌های متراکم شده با تأخیر تا 110 دقیقه وجود دارد. نتایج نشان می‌دهد ضریب نفوذپذیری نمونه‌های متراکم شده پس از 110 دقیقه افزایش زیادی دارد که به دلیل تبخیر آب مخلوط بتن است [3]. با افزودن سرباره کوره ذوب‌آهن به بتن غلتکی و ملات بین لایه‌ای هم نفوذپذیری ذاتی و هم نفوذپذیری بین لایه‌ای بتن غلتکی کاهش می‌یابد [14]. افزایش نسبت آب به سیمان در ملات مورد استفاده در بهسازی درزها باعث افزایش نفوذپذیری می‌گردد [10].

استفاده از ملات بین لایه‌ای با عیار سیمان بیشتر باعث کاهش تخلخل و در نتیجه کاهش نفوذپذیری درز می-

می‌یابند و در نتیجه باعث افزایش نفوذپذیری در جهت افقی نسبت به جهت قائم می‌شود [3].

نسبت‌های اختلاط مصالح مورد استفاده در تهیه بتن غلتکی نیز بر روی نفوذپذیری آن تأثیرگذارند. ضریب نفوذپذیری با افزایش عیار مواد سیمانی ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد [11]. همچنین می‌توان گفت که افزایش مواد سیمانی اثر مثبت بر روی خواص مکانیکی بتن غلتکی دارد اما اثر فراوانی بر روی نفوذپذیری ندارد. بنابراین بتن غلتکی با نفوذپذیری قابل قبول با استفاده از مقدار کمتر مواد سیمانی به دست می‌آید [3].

کاهش نسبت آب به سیمان به گونه‌ای که افت رطوبت مخلوط را به میزان کمتر از رطوبت بهینه آن در پی داشته باشد، موجب افزایش شدید نفوذپذیری می‌گردد. بر اساس نتایج مطالعات انجام شده، نسبت آب به سیمان در حدود 0.5 بهترین نتیجه را برای ضریب نفوذپذیری می‌دهد [11].

در نسبت بهینه آب به سیمان برابر با 0.5، پدیده جداشدگی سنگ‌دانه‌ها قابل مشاهده است که در شرایط کارگاهی می‌تواند تأثیر منفی بر کیفیت بتن داشته باشد لذا استفاده از نسبت‌های بیشتر برای جلوگیری از جدا شدن سنگ‌دانه‌ها ضروری به نظر می‌رسد [9]. از طرف دیگر می‌توان گفت که آب محتوای بتن غلتکی بجای نسبت آب به سیمان در بتن معمولی اهمیت دارد. همچنین اگر آب محتوا از مقدار بهینه افزایش یابد تغییر فراوانی در افزایش ضریب نفوذپذیری مشاهده نمی‌گردد در حالی که کاهش آب محتوا، هرچند بسیار کم، منجر به کاهش تراکم و در نتیجه افزایش خیلی زیاد در ضریب نفوذپذیری می‌گردد [3].

استفاده از پوزولان در ساخت بتن غلتکی باعث کاهش نفوذپذیری می‌گردد اما یک مقدار بهینه برای میزان پوزولان وجود دارد که بتن غلتکی کمترین نفوذپذیری را دارد. نسبت جایگزینی بهینه برای پوزولان 30 درصد هست که با افزایش این نسبت به‌خصوص برای عمر کوتاه بتن (تا 28 روز) ضریب نفوذپذیری افزایش می‌یابد [3]. مقدار بهینه نسبت جایگزینی برای پوزولان کلاش نیز 30 درصد است که با افزایش درصد جایگزینی، نفوذپذیری افزایش می‌یابد [9].

مطابق مشخصات (ASTM C33) جهت ساختن بتن مقاوم و بادوام پیروی نماید.

2-2- سیمان

سیمان مصرفی در بتن غلتکی باید پرتلند نوع II (با حرارت هیدراسیون متوسط)، سیمان‌های پرتلند پوزولانی نوع IP (15 الی 40 درصد پوزولان) و یا سیمان‌های پرتلند سرباره‌ای نوع IS (25 الی 65 درصد سرباره) باشد که در بتن‌ریزی‌های حجیم نسبت به سیمان تیپ یک ارجحیت دارند. در اینجا با سیمان پرتلند نوع II مقدار پوزولان مصرفی حدود 50 کیلوگرم بر مترمکعب است که میانگین مصرف سیمان نیز حدود 100 کیلوگرم بر مترمکعب خواهد بود به طوری که میزان حداکثر C_3A آن کمتر از 6 درصد باشد. حداکثر درجه حرارت سیمان هنگام اختلاط نباید از 50 درجه سانتی‌گراد بیشتر باشد.

جدول 1. محدوده دانه‌بندی مصالح سنگی ریزدانه مطابق مشخصات (ASTM C33)

Table 1. Range of fine aggregate sizes according to ASTM C33

Sieve number (with square mesh)	Passing percentage
4760 micron (no. 4)	95 - 100
2380 micron (no. 8)	80 - 100
1190 micron (no. 16)	50 - 85
590 micron (no. 30)	20 - 60
297 micron (no. 50)	10 - 30
149 micron (no. 100)	3 - 10

شود. در سد پایین بروک در آمریکا، پرداخت بر روی اتصال‌های سرد کمتر از 14 ساعت انجام نشد. برای اتصال‌های با عمر 14 تا 36 ساعت سطح آن‌ها تمیز و شسته شد. برای اتصال‌های بیش از 36 ساعت یک‌لایه دوغاب بر روی لایه اجرا شد تا اتصال مناسب بین لایه‌های متوالی ایجاد شود. در نتیجه مجموع اقدامات انجام‌شده نشت از بدنه سد کاهش یافت [15].

مدل‌سازی سه‌بعدی 4 نوع لایه ضد نشت شامل بتن غلتکی درجه 3، بتن غلتکی درجه 2، بتن معمولی (CVC) و بتن غلتکی پر دوغاب (GEVR) در یک سد بتنی غلتکی ثقیلی، در نرم‌افزار ANSYS نشان می‌دهد که لایه‌های ضد نشت اجراشده با بتن معمولی (CVC) و بتن غلتکی پر دوغاب (GEVR) برای لایه نفوذناپذیر بالادست سدهای بتنی غلتکی مناسب هستند [2]. استفاده از نوعی بتن خود متراکم که دارای نفوذپذیری کم و ضد ترک خوردن است (HAIC) به‌عنوان لایه ضد نشت نیز مناسب می‌باشد. این بتن با جایگزینی جزئی سیمان با مقدار برابر از افزودنی منبسط‌کننده به دست می‌آید. استفاده از این افزودنی نفوذپذیری را به شدت کاهش می‌دهد و در نتیجه می‌تواند به‌عنوان لایه ضد نشت در سدهای بتن غلتکی استفاده شود [16].

در تحقیق حاضر سعی شد تا ضمن تکمیل برخی از مطالعات پیشین، عوامل دیگری که می‌توانند نفوذپذیری بتن غلتکی را تحت تأثیر قرار دهند، بررسی و معرفی گردند. بدین منظور دامنه‌ی وسیع‌تری از عیار سیمان جهت تکمیل مطالعات پیشین که بر روی تأثیر عیار سیمان بر روی نفوذپذیری بتن غلتکی انجام‌شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفت. همچنین تأثیر حداکثر اندازه سنگ‌دانه و استفاده از میکروسیلیس بر روی نفوذپذیری بتن غلتکی مورد مطالعه قرار گرفتند. از طرف دیگر نوع پرداخت درزهای اجرایی در بتن غلتکی و رابطه‌ی آن با نفوذپذیری بتن غلتکی بررسی گردید.

2- مشخصه‌ها و استانداردهای ساخت بتن غلتکی

2-1- مصالح سنگی (شن و ماسه) بتن

شن و ماسه می‌بایست از ریز تا درشت دانه‌بندی شده باشد و توزیع دانه‌بندی می‌بایست از دانه‌بندی استاندارد

به‌منظور تعیین اثر عیار سیمان بر میزان نفوذپذیری بتن غلتکی چندین طرح اختلاط با توجه به عیارهای مختلف سیمان موردبررسی قرار گرفت. آزمایش تعیین میزان نفوذپذیری طبق استاندارد اروپایی EN 12390 در آزمایشگاه و در سن 28 روزه انجام گرفت. حداکثر اندازه سنگ‌دانه‌ها در این بخش 19 میلی‌متر است. طرح اختلاط‌های مورد بررسی در این بخش در جدول 3 ارائه شده‌است.

همان‌طور که در شکل 1 مشاهده می‌شود، کاهش نفوذپذیری با افزایش عیار مواد سیمانی سیر مثبتی را طی نکرده است و در عیار 110 کیلوگرم بر مترمکعب مواد سیمانی بهترین نتیجه مشاهده می‌شود و بعد از آن با افزایش میزان عیار سیمان تغییر قابل‌توجهی در میزان نفوذپذیری شکل نگرفته است. توجهی که می‌توان بیان کرد این است که در این سری آزمایش‌ها میزان مواد سیمانی با حفظ نسبت آب به سیمان افزایش داده شده است و در نتیجه در عیار 110 کیلوگرم میزان آب مخلوط در نقطه بهینه خود قرار گرفته است. چنین موضوعی باعث افزایش چگالی در این نقطه و در نتیجه کاهش تخلخل و سرانجام کاهش ضریب نفوذپذیری گردیده است.

جدول 3. طرح اختلاط بتن غلتکی در آزمایش تعیین بهینه عیار سیمان

Table 3. Mix design of RCC in optimum cement content experiment

Mix design no.	Cement (Kg)	Microsilica content	W/C ratio	Sand (%)	Maximum size of aggregate (mm)
1	60	-	0.7	48	38
2	70	-	0.7	48	38
3	90	-	0.7	45	38
4	110	-	0.7	45	38
5	130	-	0.7	45	38
6	150	-	0.7	43	38
7	170	-	0.7	43	38
8	200	-	0.7	43	38

جدول 2. محدوده دانه‌بندی مصالح شنی بر اساس استاندارد (ASTM C33)

Table 2. Range of coarse aggregate sizes according to ASTM C33

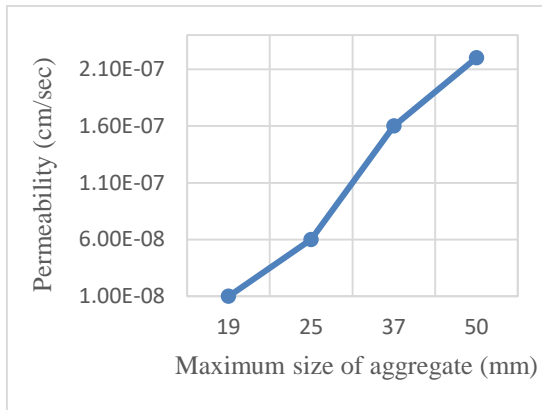
Sizes in 3 groups (American sieve number)	Passing percentage		
	I	II	III
3 in. (75 mm)	-	-	100-95
2 in. (50 mm)	-	100	20-55
1.5 in. (38 mm)	-	95-100	0-15
1 in. (25 mm)	100	35-70	0-5
3/4 in. (19 mm)	90-100	10-30	-
3/8 in. (10 mm)	30-55	0-5	-
3/16 in. (4.8 mm)	0-10	-	-

3- آزمایش‌های انجام شده

با توجه به مطالعه تحقیقات پیشین در مورد عوامل مؤثر در میزان نفوذپذیری بتن غلتکی، در این بخش سعی شد تا کاستی‌های مطالعات پیشین به‌نوعی بهبود یافته و دستاوردهای جدیدی موردبررسی قرار گیرد.

3-1- بررسی اثر عیار سیمان

از دیدگاه بتنی، افزایش مواد سیمانی با حفظ نسبت آب به سیمان به ارتقا خواص مکانیکی و فیزیکی مخلوط می‌انجامد؛ بنابراین انتظار می‌رود که با افزایش مواد سیمانی شاهد افزایش میزان مقاومت‌های مکانیکی، چگالی و ضریب ارتجاعی و کاهش تخلخل و نفوذپذیری باشیم. از طرفی دیدگاه خاکی در مورد آب مخلوط و رطوبت بهینه تأکید دارد که افزایش میزان آب از رطوبت بهینه، به کاهش مقاومت مکانیکی بتن و افزایش نفوذپذیری می‌انجامد، گرچه این افزایش با حفظ نسبت آب به سیمان و مقدار مواد سیمانی صورت می‌گیرد. در این زمینه شکرچی‌زاده و همکاران تحقیقاتی را انجام داده‌اند که محدوده اندکی از عیار مورد استفاده در بتن‌های غلتکی را موردبررسی قرار داده است [8]. در پژوهش حاضر به‌منظور بررسی بیشتر، از دامنه گسترده‌تری از مقادیر عیار سیمان استفاده شده است (طرح اختلاط موردبررسی به طرح اختلاط شکرچی زاده و همکاران شبیه است).



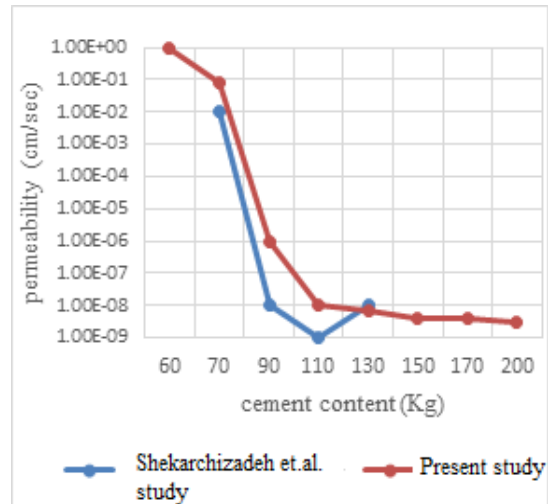
شکل 3. تأثیر حداکثر اندازه سنگدانه بر نفوذپذیری بتن غلتکی در نمونه 28 روزه

Fig. 3. The effect of maximum size of aggregate on the permeability of RCC for 28-day samples

3-3- بررسی تأثیر کاربرد میکروسیلیس

پودر میکروسیلیس یک ماده پوزولانی قوی است که جهت بهبود خواص مکانیکی و افزایش دوام بتن به کار می‌رود. این ماده محصول جانبی صنعت فروسیلیس است که از روی فیلتر هوای خروجی از کوره‌های قوس الکتریکی در صنایع فروسیلیس به دست می‌آید. سالانه 110000 تن پودر میکروسیلیس در دنیا به مصرف می‌رسد که بر این اساس، برآورد میزان مصرف سالانه بتن حاوی میکروسیلیس در دنیا، 6 میلیون مترمکعب است. در دهه پنجاه میلادی اولین آزمایش‌ها بر روی تأثیرات میکروسیلیس بر روی بتن در نروژ به انجام رسید. در دهه 80 میلادی استفاده آن در بتن شکل اقتصادی به خود گرفت [17].

پودر میکروسیلیس به رنگ خاکستری روشن تا تیره عرضه می‌شود. رنگ مشاهده‌شده به دلیل حضور اکسید آهن و کربن در ساختار میکروسیلیس است. هرچه میکروسیلیس تیره‌تر باشد مقدار کربن بیشتری دارد. ذرات میکروسیلیس دارای سطح مخصوص تقریبی 20000 هستند. ذرات منفرد میکروسیلیس تقریباً صد برابر ریزتر از ذرات سیمان می‌باشند. پودر میکروسیلیس ذرات بسیار ریز با ساختار غیر کریستالی و آمورف است که اندازه ذرات آن در حدود 1.0 – 2.0 میکرون است. بخشی از ذرات آن به هم جوش خورده و کلوخه تشکیل می‌دهند. در شکل 4 ابعاد ذرات سیمان و میکروسیلیس

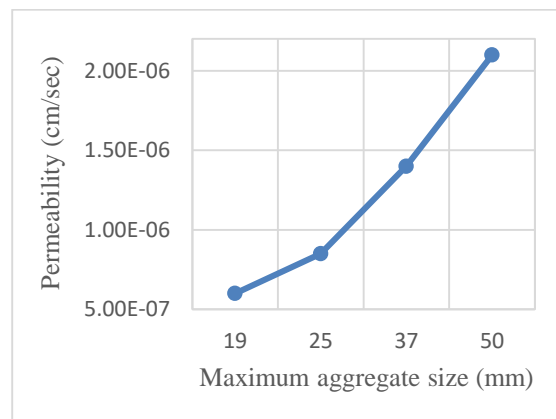


شکل 1. اثر عیار سیمان بر روی نفوذپذیری

Fig. 1. The effect of cement content on permeability

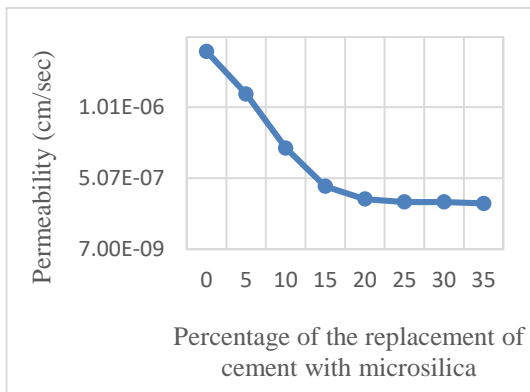
3-2- بررسی تأثیر حداکثر اندازه سنگدانه

عامل دیگری که تأثیر آن بر روی نفوذپذیری بتن غلتکی بررسی گردید حداکثر بعد سنگدانه‌ها هست. برای بررسی تأثیر اندازه بیشینه‌ی سنگدانه بر نفوذپذیری، نمونه‌ها در سنین ثابت 7 و 28 روزه با نسبت‌های آب به سیمان 0.7 مورد آزمایش قرار گرفته است، نتایج حاصله در سنین 7 و 28 روزه در شکل‌های شماره 2 و 3 ارائه شده‌اند. مشاهده می‌گردد که با افزایش حداکثر اندازه سنگدانه، نفوذپذیری افزایش می‌یابد. علت این امر را می‌توان به ایجاد ریزترک در ناحیه انتقال بتن با افزایش حداکثر اندازه سنگدانه نسبت داد.



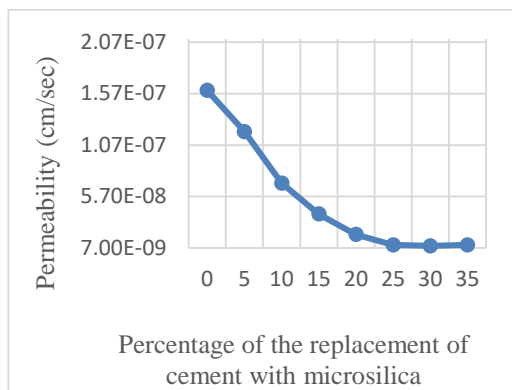
شکل 2. تأثیر حداکثر اندازه سنگدانه بر نفوذپذیری بتن غلتکی در نمونه 7 روزه

Fig. 2. The effect of maximum size of aggregate on the permeability of RCC for 7-day samples



شکل 5. میزان نفوذپذیری در بتن‌های 7 روزه دارای میکروسیلیس

Fig. 5. Permeability in 7-day samples containing microsilica



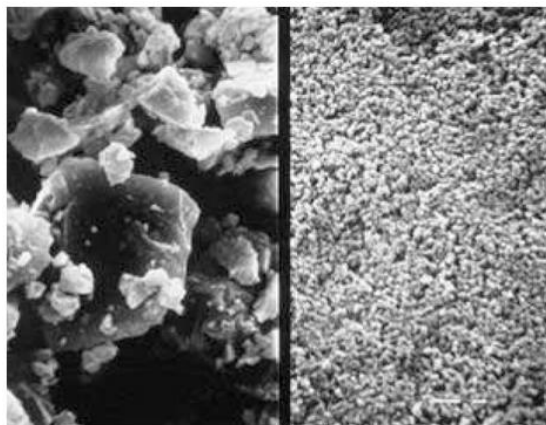
شکل 6. میزان نفوذپذیری در بتن‌های 28 روزه حاوی میکروسیلیس

Fig. 6. Permeability in 28-day samples containing microsilica

همان‌طور که در شکل 4 توضیح داده شد، ساختار میکروسیلیس به قدری ریز است که اگر 10 درصد سیمان را با آن جایگزین کنیم به ازای هر ذره سیمان بیش از یک میلیون ذره میکروسیلیس وجود خواهد داشت. ذرات میکروسیلیس در بتن سخت شده، فضاهای خالی ایجاد شده در اطراف ذرات سیمان را پر می‌کند و بنابراین نفوذپذیری کاهش می‌یابد. همچنین افزایش واکنش هیدراسیون و بهبود لایه مرزی نیز باعث کاهش نفوذپذیری می‌گردد.

کاهش نفوذپذیری در بتن‌های حاوی میکروسیلیس در مقابل موادی مانند یون کلر، باعث شده است که معمولاً عرشه پل‌ها، سازه‌های پارکینگ و سازه‌های دریایی به وسیله میکروسیلیس مقاوم گردند. جایگزینی 5 درصد

نشان داده شده است. درجه کلوخه شدن ذرات بستگی به فرآیند تولید و دمای کوره دارد. این ذرات به دلیل سطح مؤثر بالا دارای جاذبه زیادی بوده و تمایل به کلوخه شدن دارند. یک آزمون مهم در خصوص توزیع ذرات میکروسیلیس، میزان باقیمانده میکروسیلیس روی الک 45 میکرون است.



شکل 4. سیمان پرتلند (سمت چپ) و ذرات میکروسیلیس (سمت راست) با بزرگی تصویر یکسان

Fig. 4. Portland cement (left), microsilica particles (right) with the same magnification

وزن مخصوص میکروسیلیس حدوداً 2.2 است در حالی که وزن مخصوص سیمان 3.1 است که خود نشانگر سبک بودن پودر میکروسیلیس است.

طرح اختلاط استفاده شده در این بخش طرح شماره 4 از جدول 3 می‌باشد (حداکثر اندازه سنگ‌دانه‌ها 38 میلی‌متر است) که مقادیر مختلف سیمان در آن با میکروسیلیس جایگزین می‌شود. نتایج برای نمونه‌های 7 روزه و 28 روزه در شکل‌های 5 و 6 ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش میزان میکروسیلیس به جای سیمان تا 20 درصد، نفوذپذیری کاهش پیدا می‌کند و پس از آن نفوذپذیری تغییر کمی دارد در نتیجه، می‌توان میزان بهینه استفاده از میکروسیلیس به جای سیمان را 20 درصد بیان کرد.

- نبود امکان حذف تمامی وقفه‌های برنامه‌ریزی شده کارگاهی.
- شرایط نامساعد آب و هوایی (دما - رطوبت - باد - باران).
- نبود امکان انجام آزمایش‌های لازم پیش از اجرا و پس از اجرا، برای اطمینان از وجود اتصال بین لایه‌ها و به‌منظور کنترل مشخصات مکانیکی درزها.

بر اساس تجربیات این محققین، عمل‌آوری مرطوب درزهای بتن غلتکی می‌تواند به بهبود وضعیت نفوذپذیری بتن غلتکی منجر شود. به‌منظور انجام عملیات عمل‌آوری مرطوب، استفاده از ماشین‌آلات معمولی آبیاری گزینه‌ای قابل قبول و حتی مطلوب است. بدین منظور پیشنهاد می‌شود که برای بهبود اتصال بین لایه‌ها، عمل‌آوری مرطوب سطح آزاد لایه در طول زمان‌گیری بتن غلتکی انجام شود. عمل‌آوری مرطوب سطح لایه همچنین موجب کنترل افزایش درجه حرارت سطحی لایه می‌گردد و سطح لایه و درون آن را از اثرات نور خورشید حفظ می‌کند. به‌علاوه، عمل‌آوری مرطوب موجب می‌شود که بتن غلتکی آب از دسته رفته را که بر اثر تبخیر به وجود آمده را جبران نماید و در نتیجه از خشک‌شدگی سطحی آن جلوگیری می‌کند.

5- نتیجه‌گیری

با گسترش کاربردهای بتن غلتکی و استفاده از آن‌ها در ساخت سدها، شناخت عوامل تأثیرگذار بر روی نفوذپذیری بتن غلتکی اهمیت ویژه‌ای دارد. در این پژوهش مطالعات پیشین تکمیل و عوامل مؤثر دیگر بر روی نفوذپذیری بتن غلتکی نیز بررسی و معرفی گردید. بر این اساس وسیعی از عیار سیمان مورد بررسی قرار گرفت و مشخص گردید که با افزایش عیار سیمان ابتدا نفوذپذیری کاهش می‌یابد و با رسیدن عیار سیمان به یک مقدار بهینه، افزایش سیمان تأثیر محسوسی بر روی نفوذپذیری نخواهد داشت. همچنین با افزایش حداکثر بعد سنگ‌دانه به دلیل ایجاد ریزترک در ناحیه-ی انتقال بتن نفوذپذیری افزایش می‌یابد. استفاده از

میکروسیلیس باسیمان نسبت به کاهش W/C بتن از 0.5 به 0.4 در مقابله با نفوذ یون کلر مؤثرتر عمل می‌کند.

4- کاهش نفوذپذیری از درزهای بتن غلتکی

با توجه به مشاهدات و تجربیات محققین این پژوهش، از عوامل مؤثر بر شکل‌گیری درز خوب از نظر آب‌بندی و اتصال می‌توان به این موارد اشاره کرد:

- وجود محتوای آب نسبتاً زیاد در مخلوط بتن غلتکی.
- وجود مقدار کافی خمیر در سطح (با یا بدون ملات اضافه‌شده).
- استفاده از مصالحی که کنترل جداشدگی دانه‌ها در آن‌ها میسر است (با به‌کارگیری روش اجرایی مناسب استفاده از مصالح با ضریب شکل خوب، اعمال محدودیت برای اندازه بزرگ‌ترین سنگ‌دانه).
- اجرای لایه جدید روی لایه قبل با بیشترین سرعت ممکن.
- به‌کارگیری روش‌های اجرایی که تخریب سطحی لایه‌ها ناشی از تردد ماشین‌آلات را محدود می‌کنند (انتقال بتن غلتکی به محل اجرا فقط توسط تسمه‌نقاله).
- استفاده از روش‌های مناسب تراکم به‌گونه‌ای که امکان تحکیم یکنواخت مصالح در سرتاسر ضخامت لایه فراهم شود.
- عمل‌آوری مرطوب سطح لایه.
- چون وجود درزها نفوذپذیری را به‌شدت افزایش می‌دهد با استفاده از لایه‌های ضخیم‌تر می‌توان تعداد درزها را کاهش داد و بدین‌صورت میزان نفوذپذیری را کاهش داد.
- عوامل نامطلوب:
- وجود محتوای آب کم در مخلوط بتن غلتکی.
- استفاده از مصالحی در مخلوط که خطر جداشدگی سنگ‌دانه‌ها در آن‌ها زیاد است.
- به‌کارگیری درصد کمی از مواد سیمانی که در نتیجه استفاده از ملات پر سیمان را بین لایه‌ها می‌طلبند.

مرطوب موجب می‌شود که بتن غلتکی آبی را که در اثر تبخیر از دست می‌دهد، جبران نماید و در نتیجه از خشک شدگی سطحی آن جلوگیری می‌کند. به منظور انجام عملیات عمل آوری مرطوب، استفاده از ماشین آلات معمولی آبیاری گزینه‌ای قابل قبول و حتی مطلوب است.

مراجع

- [1] Banthia, N.; Marchand, J.; Boisvert, J.; "Permeability of roller compacted concrete", Journal of Material and Civil Engineering, p.p. 27-40, 1992.
- [2] Li, M.; Guo, X.; Shi, J.; Zhu, Z.; "Seepage and stress analysis of anti-seepage structures constructed with different materials in an RCC gravity dam", Journal of Water Science and Engineering, p.p. 326-334, 2015.
- [3] Khalili Khorram, V.; Mansouri, A.; Voeoughifar, H.R.; "A laboratory investigation on the effective parameters over the penetrability of roller compacted concrete", 3rd international conference on concrete and development, Tehran, 2009.
- [4] Bagheri, A. R.; Makhdoom, O.; "The investigation of the effect of blast furnace slag on compressive strength and permeability of bulk concreting in roller-compacted dams", 7th international congress on civil engineering, Tehran, 2006 (in Persian).
- [5] Khalilzadeh Vahidi, E.; Mokhtari Malekabadi, M.; Rezaei, A.; Roshani, M. M.; Roshani, G. H.; "Modeling of mechanical properties of roller compacted concrete containing RHA using ANFIS", Journal of Computers and Concrete, p.p. 435-442, 2017
- [6] Mohammadi Rad, S. A.; Modarres, A.; "Durability properties of non-air entrained roller compacted concrete pavement containing coal waste ash in presence of de-icing salts", Journal of Cold Regions Science and Technology, p.p. 48-59, 2017.
- [7] Aghaeipour, A.; Madhkhan, M.; "Effect of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) on RCCP durability", Journal of Construction and Building Materials, p.p. 533-541, 2017.
- [8] Ala, M. J.; Maghrebi, M. G.; "The effect of aggregate size distribution on permeability and compressive strength of roller-compacted concrete in dam construction", national conference on architectural and civil engineering and urban development, Mazandaran, 2015 (in Persian).
- [9] Ehsani zonooz, E.; Forooghi asl, A.; "The

میکروسیلیس بجای سیمان نیز باعث کاهش نفوذپذیری می‌شود. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، مقدار بهینه درصد جایگزینی میکروسیلیس بجای سیمان 20 درصد می‌باشد. همچنین رعایت شرایطی که می‌توانند باعث ایجاد درزهای مناسب از نظر نفوذپذیری و اتصال شوند به همراه عمل آوری مرطوب درزها، منجر به کاهش نفوذپذیری از درزهای بتن غلتکی می‌گردد. چون وجود درزها نفوذ پذیری را به شدت افزایش می‌دهد با استفاده از لایه های ضخیم‌تر می‌توان تعداد درزها را کاهش داد و بدین صورت میزان نفوذ پذیری را کاهش داد. بکارگیری ملات بین لایه‌های نقش عمده‌ای در کاهش نفوذپذیری بین لایه‌های بتن غلتکی داشته و میزان نفوذپذیری بین لایه‌های بتن غلتکی را به نفوذپذیری ذاتی آن نزدیکتر می‌کند.

با توجه به مشاهدات و تجربیات میدانی محقق از عوامل موثر بر شکل‌گیری درز خوب از نظر آب بندی و اتصال می‌توان به این موارد اشاره کرد: وجود مقدار کافی خمیر در سطح (با یا بدون ملات اضافه شده)، استفاده از مصالحی که کنترل جدا شدگی دانه‌ها در آنها میسر است (با به کارگیری روش اجرایی مناسب استفاده از مصالح با ضریب شکل خوب، اعمال محدودیت برای اندازه بزرگترین سنگ‌دانه)، اجرای لایه جدید روی لایه قبل با بیشترین سرعت ممکن، بکارگیری روش‌های اجرایی که تخریب سطحی لایه‌ها ناشی از تردد ماشین آلات را محدود می‌کنند (انتقال بتن غلتکی به محل اجرا فقط توسط تسمه نقاله)، استفاده از روش‌های مناسب تراکم به گونه‌ای که امکان تحکیم یکنواخت مصالح در سرتاسر ضخامت لایه فراهم شود، عمل آوری مرطوب سطح لایه، چون وجود درزها نفوذ پذیری را به شدت افزایش می‌دهد با استفاده از لایه های ضخیم‌تر می‌توان تعداد درزها را کاهش داد و بدین صورت میزان نفوذ پذیری را کاهش داد. عموماً برای بهبود اتصال بین لایه‌ها عمل آوری سطح آزاد لایه در طول زمان گیرش در بتن غلتکی ضروری است. عمل آوری مرطوب سطح لایه همچنین موجب کنترل افزایش درجه حرارت سطحی لایه می‌گردد و سطح لایه و درون آنرا از اثرات نور خورشید حفظ می‌کند. عمل آوری

- concrete in high roller-compacted concrete dams*”, Journal of Construction and Building Materials, p.p. 861-870, **2017**.
- [17] Ayoobi, M. R.; “*The application of microsilica grout in concrete industry*”, specialized training of concrete additives, **2015** (in Persian)
- permeability of roller-compacted concrete*”, 8th international congress on civil engineering, Shiraz, **2008** (in Persian).
- [10] Nia omran, M. E.; Alimoradi, F.; “*The investigation of effective factors on the permeability of construction joints of roller-compacted concrete dams*”, 4th national conference on concrete of Iran, Tehran, **2012** (in Persian).
- [11] Shekarchizadeh, M.; Fakher, A.; Eftekhar, M. H.; Zare-rami, K.; “*The investigation of the permeability level of roller-compacted concrete and the comparison between permeability and other concrete properties*”, 6th national congress on civil engineering, Semnan, **2011** (in Persian).
- [12] Yerramala, A.; Babu, K. G.; “*Transport properties of high volume fly ash roller compacted concrete*”, Journal of Cement and Concrete Composites, p.p. 1057-1062, **2011**.
- [13] Hashemi, M.; Shafigh, P.; Bin Karim, M. R.; Atis, C. D.; “*The effect of coarse to fine aggregate ratio on the fresh and hardened properties of roller-compacted concrete pavement*”, Journal of Construction and Building Materials, p.p. 553-556, **2018**.
- [14] Rapel, M.; Manafpour, M.; Manafpour, A. R.; “*experimental study of the effect of blast furnace slag and inter-layer grout on body and inter-layer permeability of roller-compacted concrete dams*”, 8th national congress on civil engineering, Babol, **2014** (in Persian).
- [15] Abdo, F. Y.; “*Roller-compacted concrete dams: design and construction trends*”, Hydro Review, p.p. 1-5, **2008**.
- [16] Li, M.; Zhang, M.; Hu, Y.; Zhang, J.; “*Mechanical properties investigation of high fluidity impermeable and anti-cracking*