

بررسی رسانایی هیدرولیکی و گرفتگی بتن های نفوذپذیر سبک حاوی لیکا و اسکوریا

کمیل مومنی^{۱*}، رضا قویدل^۲

۱. استادیار فنی - دپارتمان مهندسی عمران - آموزشکده فنی امام صادق(ع) - دانشگاه فنی و حرفه ای استان گیلان- ایران
۲. مدرس گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد لشت نشا

!kmomeni@tvu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۸/۱۰/۲۳ تاریخ پذیرش: ۹۹/۳/۳۱

چکیده

بتن نفوذپذیر به بتنی گفته می شود که با توجه به تخلخل بالا امکان عبور آب با سرعت بالا را از درون خود امکان پذیر می سازد. رویه های آسفالتی و بتنی جاده ها هر چند قابلیت های سازه ای و دوام بالایی دارند ولی از نظر زیست محیطی و همچنین الودگی صوتی آسیب های زیادی را به محیط زیست انسان ها وارد می کنند. یکی از این مشکلات، عدم نفوذ آب حاصل از بارندگی به زمین است، علاوه بر این جاری شدن آب باران موجب به وجود آمدن سیلاب در شهرها می شود که ممکن است خسارات مالی و جانی فراوانی را به همراه بیاورد. از سوی دیگر، آلودگی رواناب های سطحی به رس می تواند باعث ایجاد گرفتگی در تخلخل های موثر بتن نفوذپذیر شود که در نتیجه مهم ترین ویژگی این بتن را که نفوذپذیری بالا است، دچار مشکل می کند. در این پژوهش با بهره گیری از پوزولان دوده سیلیسی سعی شد تا علاوه بر نفوذپذیری بالا و گرفتگی کمتر، ویژگی های مکانیکی بهتری بدست آید. علاوه بر این با بهره گیری از سبکدانه های لیکا و اسکوریا وزن مخصوص بتن نفوذپذیر به طور محسوسی پایین آورده شد تا ضمن افزایش تخلخل داخلی و ساختاری به کاهش آلودگی های صوتی نیز کمک نماید. نتایج مشخص نمود که نمونه های حاوی لیکا عملکرد بهتری در آزمون های مکانیکی به دست می دهند. نمونه های حاوی سنگدانه اسکوریا تخلخل و نفوذپذیری در مقایسه با نمونه های حاوی لیکا دارند که هر دوی این ویژگی ها از اهمیت بالایی در بتن نفوذپذیر برخوردار هستند. جایگزینی ۱۰٪ از سیمان با دوده سیلیسی ویژگی های مکانیکی نمونه ها را بهبود بخشید. در تمام حالات، نمونه ها نفوذپذیری قابل قبولی را برای عبور سوسپانسیون های رسی حتی در غلظت های بالا (۷۵ و ۱۰۰ درصد) نشان دادند. اما اختلاف بین مخلوط ۱۰٪ با آب فاقد رس چشمگیر بود در حالی که با افزایش غلظت، اختلاف رسانایی هیدرولیکی بسیار کمتر شد.

واژگان کلیدی: بتن نفوذپذیر، بتن سبک، رسانایی هیدرولیکی، گرفتگی، درصد تخلخل

۱- مقدمه

بتن نفوذپذیر یا متخلخل نوعی کامپوزیت سیمانی است که معمولاً بین ۲۰ تا ۳۰٪ از حجم آن را مجراهای تو خالی متصل به هم تشکیل می‌دهند. سایز این حفرات و مجراها نیز معمولاً بین ۲ تا ۸ میلی‌متر است و نفوذپذیری این بتن بین ۲ تا ۶ میلی‌متر بر ثانیه برای آن تعریف شده است. این نفوذپذیری از طریق ایجاد عمدی تخلخل با بهره‌گیری از درشت دانه و حذف یا کاهش شدید ریزدانه به دست می‌آید. بیشترین ریزدانه مصرفی در ساخت بتن نفوذپذیر در مقالات ۲۰٪ است که توسط میننگر انجام شده و تعریف مشابهی نیز توسط انجمن بتن آمریکا ارائه شده است. توجه خاص به این بتن را که سابقه‌ای ۲۵ ساله دارد، می‌توان مربوط به قوانین جدید وضع شده توسط آژانس حفاظت از محیط زیست دانست که طبق آن کنترل مقدار و کیفیت آب حاصل از بارندگی بر اساس قوانین، الزامی است. علاوه بر قابلیت اصلی این بتن یعنی سرعت عبور قابل توجه آب، مقابله با پدیده جزیره گرم، کاهش نویز بین لاستیک و سطح جاده، تغذیه سفره‌های آب زیر زمینی و ایمنی بالاتر هنگام رانندگی از دیگر نکاتی هستند که می‌توان برای این بتن معرفی نمود. در حال حاضر کاربرد اصلی این بتن در پارکینگ‌ها، پیاده‌روها و در برخی موارد، جاده‌های با حجم تردد پایین است. گونده و همکارانش پژوهشی روی دو رویه نفوذپذیر ساخته شده انجام دادند. نتیجه پژوهش آنها مشخص نمود که اگر طرح اختلاط مناسبی برای بتن نفوذپذیر استفاده شود می‌توان از این بتن در اکثر جاده‌های شهری برای عمری حدود ۲۰ تا ۳۰ سال بهره برداری کرد. نتایج مطالعه روی یکی از رویه‌ها در آمریکا نشان داد که عملکرد و دوام قابل قبولی دارد و آب باران با سرعت مطلوب از روی سطح بتن خارج می‌شود. در ژاپن کاربرد معمول بتن نفوذپذیر به عنوان لایه سطحی جاده‌هاست. لایه‌های نازک بتن نفوذپذیر ساخته شده روی اساس‌های قبلی بهترین گزینه برای جایگزینی سیستم‌های نفوذناپذیر قدیمی به سیستم‌های نفوذپذیر جدید به حساب می‌آیند. دو مطالعه آزمونگاهی روی بتن نفوذپذیر با ضخامت ۲۰۰ میلی‌متر در ژاپن انجام شد. در اروپا نیز آزمون‌های انجام شده بر رویه‌های بتن نفوذپذیر ساخته شده حکایت از قابلیت بالای این بتن در کاهش نویز بین سطح جاده و لاستیک دارد. به علاوه بتن نفوذپذیر برای

ساخت جاده‌ها و ساخت لایه نهایی رویه‌ها در اروپا مصرف شده است.

پژوهش دیگری معلوم کرد که دوام پایین رویه بتن نفوذپذیر در برابر ذوب و یخبندان یک مشکل اساسی می‌تواند باشد که با اضافه کردن افزودنی‌های پلیمری و افزایش عیار سیمان این مشکل در پروژه‌های بعدی برطرف شد. چین در سال ۲۰۱۲ ایده شهر اسفنجی را مطرح نمود. این ایده مجموعه‌ای از تاسیسات و زیرساخت‌ها برای مدیریت آب حاصل از بارندگی است. چن و همکارانش [1] عملکرد رویه نفوذپذیر بزرگراه‌ها را بررسی کردند و پیشنهاد دادند که بهتر است لایه رویه نفوذپذیر بعد از گیرش اولیه لایه نفون‌پذیر زیرین اجرا شود. همچنین آنها [2] گزارش دادند که بهترین زمان برای اجرای لایه نفوذپذیر بین گیرش اولیه و نهایی لایه زیرین است. مقاومت فشاری معمولی بتن نفوذپذیر بین ۷ تا ۴۰ مگاپاسکال برای تخلخل‌های بین ۱۵ تا ۳۰٪ اندازه گیری شده است [3]. حتی مقاومت‌های بالاتر از ۴۰ مگاپاسکال نیز توسط پژوهشگران گزارش شده است. این کار توسط جایگزینی بخشی از سیمان با پوزولان‌ها به ویژه دوده سیلیسی امکان پذیر شد [4]. در سال ۲۰۱۵ بتن نفوذپذیر توانمند توسط ژونگ و همکارش [5] معرفی شد. این دو با بهینه کردن نسبت سنگدانه به خمیر سیمانی و مهندسی سایز سنگدانه توانستند ویژگی‌های دوام و مقاومت بتن نفوذپذیر را بدون کاهش نفوذپذیری بهبود بخشند. دئو و همکارش [6] تاثیر بهینه‌سازی مخلوط بر مشخصات بتن سخت شده را ارزیابی کردند. از جمله افرادی که از سبکدانه در ساخت بتن نفوذپذیر بهره جستند می‌توان به ونگسا و همکارانش [7] اشاره کرد. پژوهش‌های زیادی در زمینه مصرف سنگدانه‌های مختلف برای بهبود خصوصیات بتن نفوذپذیر انجام شده است. از جمله آنها می‌توان به مطالعه خان‌خواجه و همکارانش [8] اشاره کرد. کوسیک و همکارانش [9] نیز تاثیر نوع سنگدانه و سایز آن را بر ویژگی‌های بتن نفوذپذیر اندازه‌گیری کردند. گونیسی و همکارانش [10] سنگدانه‌های بازیافتی را در درصد‌های مختلف جایگزین سنگدانه معمولی در بتن نفوذپذیر کردند. برای تولید بتن نفوذپذیر توانمند بوت‌ا و همکارانش [11] از سه دانه‌بندی مختلف بهره‌گیری کردند. گرچه در بتن نفوذپذیر به طور معمول ریزدانه مصرف نمی‌شود ولی در برخی

که رس حاوی لای تأثیری بر گرفتگی نداشت. تحلیل گرفتگی به دلیل توزیع اندازه بزرگتر است که احتمال ته نشینی را می‌افزاید. همچنین ساختار پیوسته رس باعث چسبندگی بیشتر ذرات به همدیگر شد [26]. نتیجه پژوهش کالین و همکارانش [27] این شد که رس گرفتگی ده برابر بیشتر از ماسه را نتیجه داد. کورن [28] سرعت جریان عبوری از دال‌های نفوذپذیر پر شده با دوغاب ماسه و خاک گیاهی را بررسی کرد. برخی پژوهش‌ها مشخص کردند که گرفتگی معمولاً در سطح و لایه بالایی بتن متخلخل ایجاد می‌شود [29]. در حالی که دیگران گزارش دادند میزان گرفتگی در لایه‌های زیری نیز دقیقاً به همان اندازه لایه‌های سطحی است [30]. نتایج پژوهشی مشخص نمود که گرفتگی در رویه‌هایی که تحت چرخه‌های خیس و خشک شدگی قرار گرفتند به تأخیر می‌افتد و این رویه‌ها حدود دو برابر رویه‌هایی که دائماً تحت تماس جریان آب هستند عمر می‌کنند [31]. باید اشاره شود که گرفتگی می‌تواند تخریب بر اثر ذوب و یخبندان را نیز تسریع بخشد. برای نمونه، گوتربه [32] دوام بتن نفوذپذیر در برابر ذوب و یخبندان را در سطوح مختلف گرفتگی و اشباع آب بررسی کرد.

۲- اهداف پژوهش

در این پژوهش برای بررسی ویژگی‌های رسانی هیدرولیکی و میزان گرفتگی بتن‌های نفوذپذیر سبک، طرح‌های مختلفی با دو نوع سنگدانه تعریف شده و با تغییرات درصد دوده سیلیسی به عنوان جایگزین سیمان، تغییرات رفتار مکانیکی و هیدرولیکی نمونه‌ها مورد مطالعه قرار گرفت.

۳- برنامه آزمایشگاهی

۳-۱- مصالح

در این پروژه سیمان تیپ ۲ هگمتان مصرف شد. جدول (۱) ترکیبات شیمیایی سیمان، دوده سیلیسی، لیکا و اسکوریای مصرف شده را نمایش می‌دهد. در این پژوهش برای افزایش تراکم خمیر سیمانی و به منظور دستیابی به ویژگی‌های مکانیکی بهتر، از دوده سیلیسی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان مصرف شد. درصد‌های جایگزینی برای دوده ۱۰، ۲۰ و ۳۰٪ در نظر گرفته شد. برای تقویت مقاومت مکانیکی بتن نفوذپذیر ۱۰٪ ماسه رودخانه‌ای در ترکیب

مقالات برای بهبود مقاومت‌های مکانیکی از درصد‌های پایین ماسه بهره برداری شده است. پژوهشگرانی همچون بونیسلی و همکارانش [12] ماسه را در درصد‌های ۵ و ۱۰ به طرح‌های اختلاط اضافه کردند.

دثو و همکارانش [13] بیان داشتند که مقاومت فشاری تحت تأثیر سایز حفرات، توزیع آنها و فاصله بین حفرات است. ردار و همکارانش [14] گزارش دادند که اگرچه سختی شکست به تخلخل نمونه نفوذپذیر وابسته است، ولی افزایش سایز حفرات باعث کاهش سختی شکست می‌شود. همچنین ژونگ و ویله [15] گزارش کردند که تخلخل پارامتر لازم برای اندازه‌گیری رسانی هیدرولیکی بتن نفوذپذیر است ولی کافی نیست. در پژوهش حسامی و همکارانش [16] از شلتوک برنج به عنوان جایگزین بخشی از سیمان مصرف شد. ژونگ و همکارانش [17]. بتن نفوذپذیر را با سه خمیر سیمانی با مقاومت‌های ۳۰، ۶۰ و ۱۸۰ مگاپاسکال ساختند و تحت آزمون مقاومت ذوب یخبندان قرار دادند. آلودگی صوتی نیز یکی دیگر از موضوعاتی است که به واسطه کاربرد این بتن مورد مطالعه قرار می‌گیرد [18]. راه‌های معمول کاهش نویز بین لاستیک و جاده مانند برپایی موانع صوتی و استفاده از مصالح عایق با اینکه کاربردهایی دارند اما صرفه اقتصادی به همراه نمی‌آورند [19,20]. یکی از راه‌های به صرفه برای کاهش نویز را می‌توان اجرای یک لایه بتن نفوذپذیر بر روی سطح نفوذناپذیر زیرین دانست [21]. گره‌ارز [22] پیشنهاد داد که مصرف سنگدانه بین ۴ تا ۸ میلی‌متر برای ساخت بتن نفوذپذیر با قابلیت‌های عایق صوتی مناسب است. یکی از مشکلات اصلی رویه‌های نفوذپذیر، گرفتگی تدریجی در اثر پر شدن حفرات با ذرات گل و لای حمل شده توسط رواناب‌های سطحی است [23]. ولکر و همکارانش [24] دریافتند که مواد رسوبی درصد کمی از تخلخل بتن نفوذپذیر را شامل می‌شوند و بیشتر این مواد از مصالح کنده شده از خود رویه هستند. پژوهش دیگری بیشتر مواد رسوب کرده را از مواد رسوبی بزرگ‌تر از ۳۸ میکرون و ذرات ریز گیاهان اطراف رویه گزارش کرده است. در پژوهش دیگری مشاهده شد که ذرات درشت ماسه به دلیل عدم نفوذ به حفرات، نفوذپذیری را به طور چشمگیری کم نمی‌سازد [25]. از طرفی ماسه باعث کاهش شدید نفوذپذیری شد، در حالی

در این پژوهش در مجموع ۲۴ طرح اختلاط ساخته شد. نیمی از طرح‌های حاوی لیکا و نیمی دیگر حاوی اسکوریا بودند. همچنین درصد جایگزینی دوده سیلیسی نیز متغیر در نظر گرفته شد تا تأثیر این ذرات روی مقاومت و تخلخل بتن نفوذپذیر دیده شود. نسبت آب به مواد سیمانی در تمامی طرح‌های ثابت در نظر گرفته شد تا اثر مخرب افزایش این نسبت روی مقاومت مکانیکی حذف شود. جدول (۲) طرح‌های اختلاط این مطالعه را نمایش می‌دهد.

۳-۴- آزمایش‌ها

آزمون مقاومت فشاری روی نمونه‌های مکعبی با بعد ۱۵۰ میلی‌متر و با نرخ ۹۰۰ نیوتن بر ثانیه بارگذاری انجام شد. آزمون در سنین ۷ و ۲۸ روز صورت گرفت.

آزمون کشش غیرمستقیم طبق استاندارد ASTM C496 [34] انجام می‌گیرد. این آزمایش که به آزمون برزیلی نیز معروف است روی نمونه‌های استوانه‌ای انجام می‌شود. استوانه‌های به قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر به صورت خوابیده زیر دستگاه جک بتن شکن قرار گرفته و بار به آرامی و به میزان ۱٫۴ مگاپاسکال بر دقیقه به نمونه وارد می‌شود. شکل (۱)، نمونه شکسته شده در آزمون کشش غیرمستقیم را نمایش می‌دهد.

شکل ۱. نمونه شکسته شده در آزمون مقاومت کشش غیرمستقیم



Fig. 1. Fractured specimen in splitting tensile strength
تعیین جذب آب نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM C642 [35] انجام شد. به دلیل تخلخل بالای بتن نفوذپذیر و حضور

سنگدانه‌ها مصرف شد. دانه‌بندی ماسه مصرف شده مطابق با استاندارد [33] ASTM C778 بود. در نیمی از طرح‌های اختلاط تولیدشده در این پژوهش سنگدانه لیکا به عنوان سبکدانه مصرف شد. لیکای مصرف شده دارای سایز بین ۴ تا ۱۰ میلی‌متر و از معادن داخل کشور تهیه شد. اسکوریای مصرف شده نیز محدوده دانه‌بندی بین ۴ تا ۱۰ میلی‌متر داشت و از معادن داخل کشور تهیه شد.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی مواد مصرف شده

Scoria	Leca	Silica Fume	Cement	Comp
10.76	3	1.5	64.38	CaO
45.53	62	85	21.08	SiO ₂
15.87	18	1	5.36	Al ₂ O ₃
13.89	7	2	3.64	Fe ₂ O ₃
5.65	3	-	2	MgO
1.02	4	-	0.82	K ₂ O
3.46	1	-	0.5	Na ₂ O
-	-	-	2.1	SO ₃
-	-	3	-	C
-	-	-	0.28	IR ¹
0.93	1.36	3.5	0.9	² L.O.I

Table 1. Chemical composition of the materials used

۳-۲- ساخت، قالب‌گیری و عمل‌آوری

در ساخت این نوع بتن خمیر سیمانی جداگانه تولیدشده و سپس به مقدار موردنیاز به مخلوط سنگدانه‌ها اضافه می‌شود. بدین منظور ابتدا خمیر سیمانی شامل سیمان، دوده سیلیسی و آب باهم مخلوط شده تا خمیری با روانی مطلوب به دست آید. سپس به این خمیر به مقدار موردنظر که برای چسباندن سنگدانه‌ها به هم کافی بوده و همچنین نه‌چندان زیاد که باعث کاهش شدید درصد تخلخل خمیر سیمانی شود به سنگدانه‌ها اضافه شدند و مخلوط کردن تا زمان به دست آمدن مخلوطی همگن ادامه پیدا کرد. ۴۸ ساعت پس از قالب‌گیری نمونه‌ها از قالب بیرون آورده شدند و تا زمان آزمون در حوضچه‌های آب‌آهک نگهداری شدند.

۳-۳- طرح اختلاط

1. Insoluble Residue
2. Loss On Ignition

جدول ۲. طرح های اختلاط بکار رفته

Mix	Cement (kg/m3)	Water (kg/m3)	W/B (kg/m3)	Silica Fume (kg/m3)	scoria(4-10) Aggregates (kg/m3)	leca(4-10) Aggregates (kg/m3)	Fine Aggregates (kg/m3)
L220_0	220	55	0.25	0	-	700	70
L220_10	198	55	0.25	22	-	700	70
L220_20	176	55	0.25	44	-	700	70
L220_30	154	55	0.25	66	-	700	70
L260_0	260	65	0.25	0	-	700	70
L260_10	234	65	0.25	26	-	700	70
L260_20	208	65	0.25	52	-	700	70
L260_30	182	65	0.25	78	-	700	70
L340_0	340	85	0.25	0	-	700	70
L340_10	306	85	0.25	34	-	700	70
L340_20	272	85	0.25	68	-	700	70
L340_30	238	85	0.25	102	-	700	70
S220_0	220	55	0.25	0	700	-	70
S220_10	198	55	0.25	22	700	-	70
S220_20	176	55	0.25	44	700	-	70
S220_30	154	55	0.25	66	700	-	70
S260_0	260	65	0.25	0	700	-	70
S260_10	234	65	0.25	26	700	-	70
S260_20	208	65	0.25	52	700	-	70
S260_30	182	65	0.25	78	700	-	70
S340_0	340	85	0.25	0	700	-	70
S340_10	306	85	0.25	34	700	-	70
S340_20	272	85	0.25	68	700	-	70
S340_30	238	85	0.25	102	700	-	70

Table 2. Mixing schemes used

به دلیل حضور تخلخل های به هم پیوسته زیاد، روش های معمولی اندازه گیری رسانایی هیدرولیکی در مورد بتن نفوذپذیر مؤثر نیست.

برای اندازه گیری رسانایی هیدرولیکی بتن نفوذپذیر دستگاه هد ثابت آب که در شکل (۲) به نمایش در آمده است، ساخته شد. در این دستگاه قطر داخلی ورودی دستگاه ۱۰ سانتی متر و قطر خروجی آب ۶ سانتی متر در نظر گرفته شد. همان گونه که در شکل نمایش داده شده است نمونه استوانه ای با قطر ۱۰ سانتی متر بین دو رینگ آلومینیومی قرار گرفت و به طور کامل نسبت به عبور آب عایق شد. با پر کردن هد آب به ارتفاع مورد نظر نرخ عبور آب از داخل نمونه با اندازه گیری سرعت پر شدن لوله خروجی دستگاه اندازه گیری شد. برای جلوگیری از خروج آب از حفرات جانبی نمونه استوانه ای، بعد جانی نمونه به طور کلی با چسب عایق شد. ضریب نفوذپذیری بتن متخلخل

حفرات در مقیاس میلی متر در مقایسه با حفرات موجود در بتن معمولی در مقیاس میکرومتر، روش خاصی برای اندازه گیری تخلخل بتن نفوذپذیر به کار گرفته شد. ابتدا نمونه ها در سن ۲۸ روز از حوضچه های آب آهک بیرون آورده شدند. سپس به مدت ۳ ساعت در دمای آزمونگاه روی سطح مشبک قرار داده شدند تا آب اضافی خارج شده و نمونه ها به شرایط اشباع با سطح خشک برسند. پس از اندازه گیری وزن، در قالب استاندارد نمونه که از پیرامون عایق شده است، قرار گرفته و دوباره وزن شود. سپس قالب حاوی نمونه کاملاً تا سطح نمونه با آب پر می شود و وزن مجموع اندازه گیری میشود. اختلاف بین وزن نمونه قبل از پر شدن حفرات با آب و بعد از آن میزان کل تخلخل مؤثر بتن نفوذپذیر را تعیین می کند. از آنجایی که بتن نفوذپذیر رسانایی هیدرولیکی به مراتب بالاتری نسبت به بتن معمولی دارد (۳-۱۰ تا ۴-۱۰ میلی متر بر ثانیه در مقایسه با ۱۲-۱۰ میلی متر بر ثانیه)

مقاومت به همراه داشت. جایگزینی ۱۰٪ دوده به جای سیمان در طرح های حاوی لیکا حداقل ۲۱٪ افزایش مقاومت ایجاد نمود که در طرح های حاوی اسکوریا این افزایش در بهترین حالت ۱۷٪ بود. می توان گفت که دوده سیلیسی به دلیل عیار پایین سیمان و مقدار آهک مازاد کمتر متعاقب آن، در درصد های کمتر مصرف بهینه شده و درصد های بالاتر منجر به افت مقاومت شده اند.

۴-۲- مقاومت کشش دونیم شدن

شکل (۴) نتایج آزمون مقاومت کشش غیرمستقیم را برای نمونه های حاوی لیکا و اسکوریا نمایش می دهد. مشابه با نتایج به دست آمده برای مقاومت فشاری، مقاومت کشش غیرمستقیم نیز به شدت تحت تأثیر عیار مواد سیمانی بوده است. در بتن های حاوی لیکا، در عیار ۲۶۰ با جایگزینی ۱۰٪ دوده، حداکثر ۱۰٪ افزایش می یابد. در حالی که برای بتن های حاوی اسکوریا، این افزایش بسیار کمتر بوده و در این دسته نیز برای عیار ۲۶۰ حدود ۸٪ است. تخلخل بالای اسکوریا را می توان دلیل احتمالی اصلی بر کاهش رشد مقاومت و اثر دوده دانست

برای بررسی همبستگی نتایج مقاومت فشاری و مقاومت کششی شکل (۵)، همان گونه که در شکل (الف) دیده می شود برآزش نمایی به خوبی و با ضریب بسیار بالایی به نتایج سازگار شده است. ضریب ۰٫۹۶ اعلام می دارد که مشابه با گزارش هایی که در مورد بتن معمولی به دست آمده است برای بتن نفوذپذیر نیز رابطه معناداری بین مقاومت فشاری و کشش غیرمستقیم برقرار می باشد. در شکل (ب) نیز این رابطه بین مقاومت ها برای نمونه های حاوی اسکوریا مشاهده می شود.

۴-۳- جذب آب

شکل (۶) جذب آب نمونه های مختلف را در سن ۲۸ روز نمایش می دهد. همان طور که انتظار می رفت افزایش عیار مواد سیمانی جذب آب را تحت تأثیر قرار داده است و باعث کاهش آن شده است.

با بهره گیری از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$K = \frac{A_1 l}{A_2 t} \log\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (1)$$

در این رابطه A_1 و A_2 سطح مقطع نمونه و سطح مقطع دستگاه هد ثابت، l طول نمونه، h_1 هد اولیه آب، h_2 هد نهایی خروجی، و t زمان رسیدن به تعادل می باشند. برای آزمون میزان گرفتگی حفرات بتن های نفوذپذیر تولید شده با سنگدانه های متفاوت، از سوسپانسیون رسی بهره گیری شد. درصد های مختلف رس در قالب سوسپانسیون با آب مخلوط و سپس به جای آب معمولی در دستگاه هد ثابت از این سوسپانسیون ها به عنوان سیال عبوری استفاده شد و در نتیجه اختلاف زمان عبور مایع از داخل نمونه نسبت به آب شهر اندازه گیری شد. شکل (۲) نمونه آزموده شده را نمایش می دهد.

شکل ۲. دستگاه هد ثابت (بالا)، نمونه نفوذپذیر پس از انجام آزمون گرفتگی (پایین)



Fig. 2. Constant head device (top), permeable sample after clogging test (bottom)

۴- نتایج و تفسیر

۴-۱- مقاومت فشاری

شکل (۳) مقاومت فشاری نمونه های مختلف را در سنین ۷ و ۲۸ روز نمایش می دهد. همان گونه که مشاهده می شود افزایش عیار سیمان از ۲۲۰ به ۳۴۰ برای نمونه های حاوی لیکا ۶۳٫۵٪ و برای نمونه های حاوی اسکوریا ۷۲٫۸٪ (بهینه هر دسته) افزایش

شکل ۳. مقاومت فشاری طرح‌های مختلف در سنین ۷ و ۲۸ روز

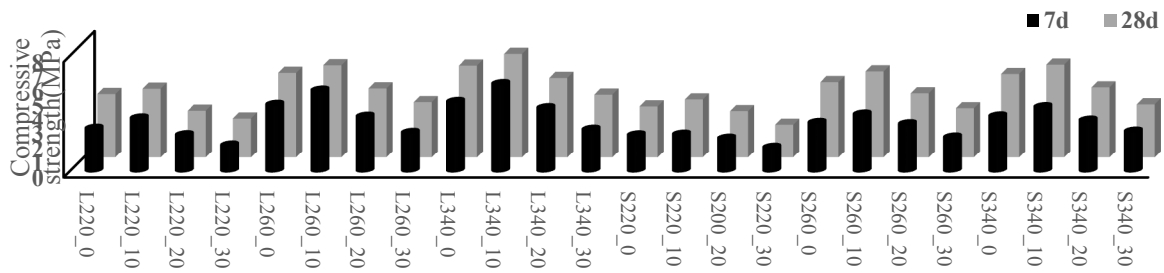


Fig. 3. Compressive strength of different samples at 7 and 28 days

شکل ۴. نتایج آزمون مقاومت کششی دو نیم شدن در سن ۲۸ روز برای نمونه‌های مختلف

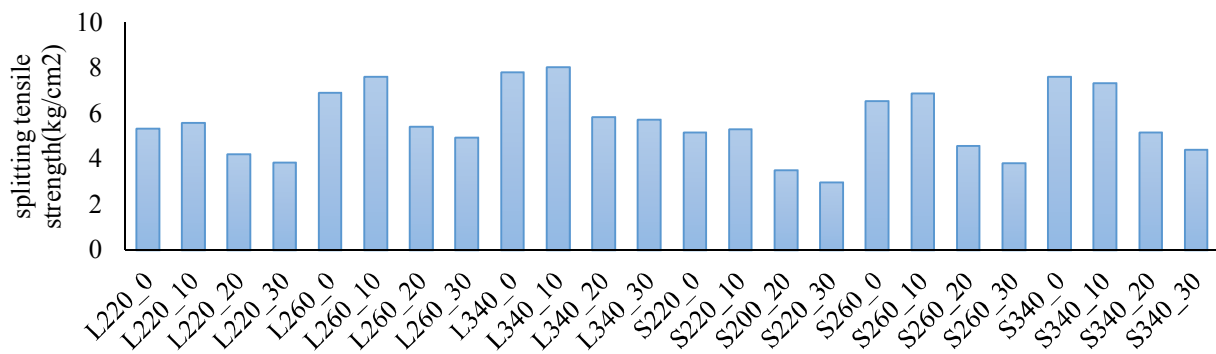


Fig. 4. The results of the Splitting tensile strength test at 28 days for different samples

شکل ۶. جذب آب نمونه‌های مختلف در سن ۲۸ روز

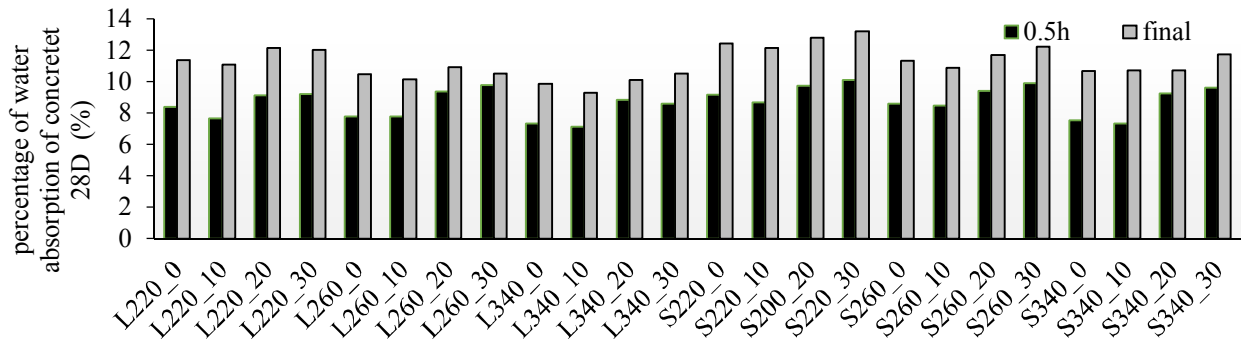


Fig. 6. Water absorption of different samples at 28 days

شکل ۷. درصد تخلخل طرح‌های مختلف در سن ۲۸ روز

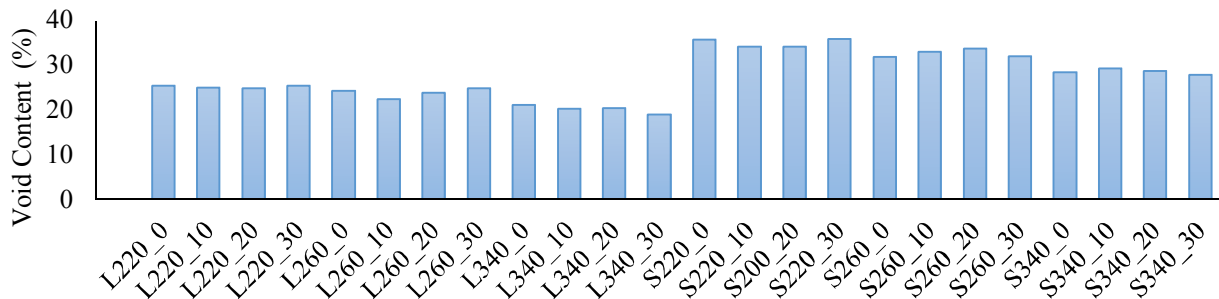
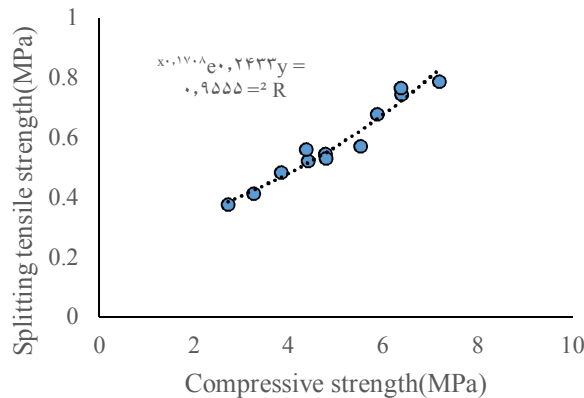
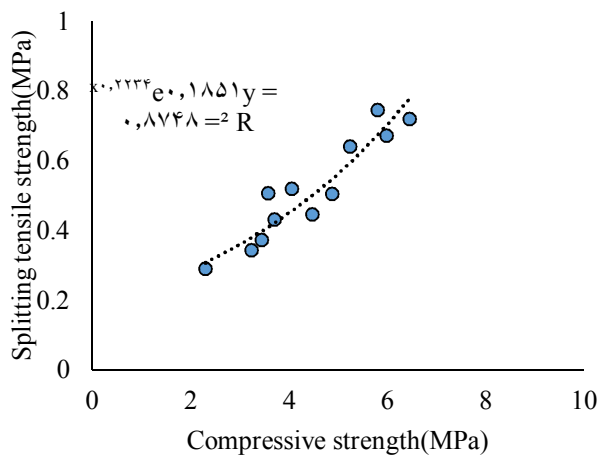


Fig. 7. Void Content of different samples at 28 days

شکل ۵. رابطه بین مقاومت فشاری و کشش غیرمستقیم (الف) لیکا (ب) اسکوریا



(الف)



(ب)

Fig. 5. Relationship between compressive strength and Splitting tensile strength (a) Leca (b) Scoria

داشت. همانگونه که در نمودار دیده می شود، اختلاف تخلخل نمونه های حاوی اسکوریا با نمونه های لیکا بسیار زیاد بوده و حداقل ۹،۷٪ و تا سقف ۸۹،۶٪ اختلاف مشاهده می شود. ضمن اینکه تاثیر دوده سیلیسی برای نمونه های حاوی لیکا (درصد بهینه ۱۰) حداکثر ۸،۲٪ و برای نمونه های حاوی اسکوریا حداکثر ۴،۵٪ است.

به طور کل هر دو نمونه های حاوی لیکا و اسکوریا نتایج قابل قبولی را در آزمون تخلخل نمایش داده اند و با توجه به نزدیک بودن نتایج آزمون های مکانیکی، به نظر می رسد تنها آزمون نرخ عبور بتواند تعیین کند که کدام سنگدانه شرایط مناسب تری برای مصرف در بتن نفوذپذیر دارد.

بتن های حاوی لیکا نسبت به اسکوریا کاهش جذب آب بیشتری را با جایگزینی ۱۰٪ دوده نشان می دهند و حداکثر ۹٪ کاهش جذب آب اولیه در عیار ۲۲۰ و ۶٪ کاهش جذب آب نهایی در عیار ۳۴۰ قابل مشاهده است که می تواند به دلیل جذب آب کمتر لیکا نسبت به اسکوریا باشد

۴-۴- درصد تخلخل

تغییرات درصد تخلخل در نمونه های مختلف شکل (۷) به شکل و ماهیت سنگدانه ها وابسته است. همان طور که در آزمون مقاومت فشاری اشاره شد افزایش عیار مواد سیمانی اگرچه باعث افزایش مقاومت می شود ولی کاهش تخلخل را نیز در پی

۴-۵- رسانایی هیدرولیکی و گرفتگی

افزایش عیار مواد سیمانی به ۲۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب همان‌گونه که در شکل (۸) دیده می‌شود، کاهش نسبی نفوذپذیری را نتیجه داده است. همان‌گونه که از داده‌ها می‌توان استنباط نمود، افزایش دوده سیلیسی در طرح‌های لیکا منجر به کاهش نفوذپذیری شده است که به ازای جایگزینی ۱۰٪ دوده، بیشینه ۸٫۲٪ (در عیار ۲۶۰) کاهش را نشان می‌دهد. اما در نمونه‌های حاوی اسکوریا تغییرات بسیار کمتر است و به بیشینه ۱٫۹٪ در مقادیر نفوذپذیری می‌رسد. اما اختلاف نفوذپذیری بین نمونه‌های حاوی لیکا و اسکوریا قابل توجه است و نمونه‌های اسکوریا حداقل ۹٫۱٪ نفوذپذیری بیشتری از خود نشان می‌دهند. با افزایش مقدار رس در آب تا ۵۰٪ حدود ۱۳٫۸٪ دیگر نیز رسانایی کاهش می‌یابد و به افت متوسط ۶۰٫۷٪ می‌رسد. با افزایش مقدار رس به ۷۵٪، روند افت رسانایی کندتر می‌شود و به ۴٪ نسبت به سوسپانسیون ۵۰٪ می‌رسد. در غلظت ۱۰۰٪ رس، همچنان روند کند کاهش رسانایی ادامه دارد و متوسط ۶٫۸٪ کاهش نسبت به سوسپانسیون پیشین قابل مشاهده است. در مجموع با افزایش ۱۰۰٪ رس نسبت به آب معمولی، متوسط کاهش رسانایی به ۷۳٫۹٪ می‌رسد که می‌توان گفت با توجه به غلظت بسیار بالای رس کاملاً مورد انتظار بوده و عملکرد بسیار خوب بتن نفوذپذیر را در سیلاب‌های پر گل و لای به خوبی نمایش می‌دهد. کاهش شدید رسانایی در سوسپانسیون ۲۵٪ فارغ از نوع سبکدانه و مقدار افزودنی، بیانگر اثر رس در ایجاد گرفتگی داخلی این بتن است و چسبندگی آن به دیواره‌های مجراهای متصل تخلخل نمونه را می‌توان از دلایل اصلی این افت شدید برشمرد. اما با افزودن سوسپانسیون حاوی رس، مقادیر نفوذپذیری دچار کاهش می‌شوند که بیشترین میزان این افت مربوط به سوسپانسیون ۲۵٪ و با مقدار افت متوسط ۴۶٫۹٪ می‌باشد. تعداد مسیرهای عبور آب نقش مهمی را در نفوذپذیری بتن متخلخل بازی می‌کند. در صورتی که تعداد زیادی مسیر برای عبور آب موجود باشد حتی در صورت

وجود سوسپانسیون‌های با درصد بالا، بازهم تعدادی از مسیرها برای عبور آب باز خواهد بود. علاوه بر این پیچ‌وخم موجود در مسیر نیز جز پارامترهای تعیین‌کننده است، پیچ‌وخم بیشتر در مسیر به معنای ته‌نشینی بیشتر ذرات و گرفتگی بیشتر حفرات است. روند نتایج به دست آمده با سوسپانسیون ۱۰۰٪، مشابه با نمودارهای قبلی است و کاهش بیشتر ضریب با افزایش درصد رس مشاهده شده است. نکته جالب توجه، نفوذپذیری قابل توجه برای تمامی نمونه‌ها در سوسپانسیون با ۱۰۰٪ رس است که حکایت از ویژگی‌های هیدرولیکی قابل توجه نمونه‌های تولید شده است.

شکل (۹) رابطه بین تخلخل و نفوذپذیری را برای نمونه‌های حاوی اسکوریا و لیکا نمایش می‌دهد. شکل (الف) نمایش می‌دهد که رابطه‌ی نمایی با تقریب خوبی روی نقاط سازگار شد. ضریب برازش ۰٫۷۷۶، اثبات می‌کند که می‌توان با تقریب خوبی نفوذپذیری بتن متخلخل را از روی درصد تخلخل آن پیش‌بینی نمود. در شکل (ب) مربوط به نمونه‌های اسکوریا نیز ضریب برازش حاکی از رابطه معنادار بین نتایج است.

شکل ۸. تغییرات رسانایی هیدرولیکی بر اساس میزان غلظت سوسپانسیون‌های رسی برای طرح‌های مختلف برحسب mm/s

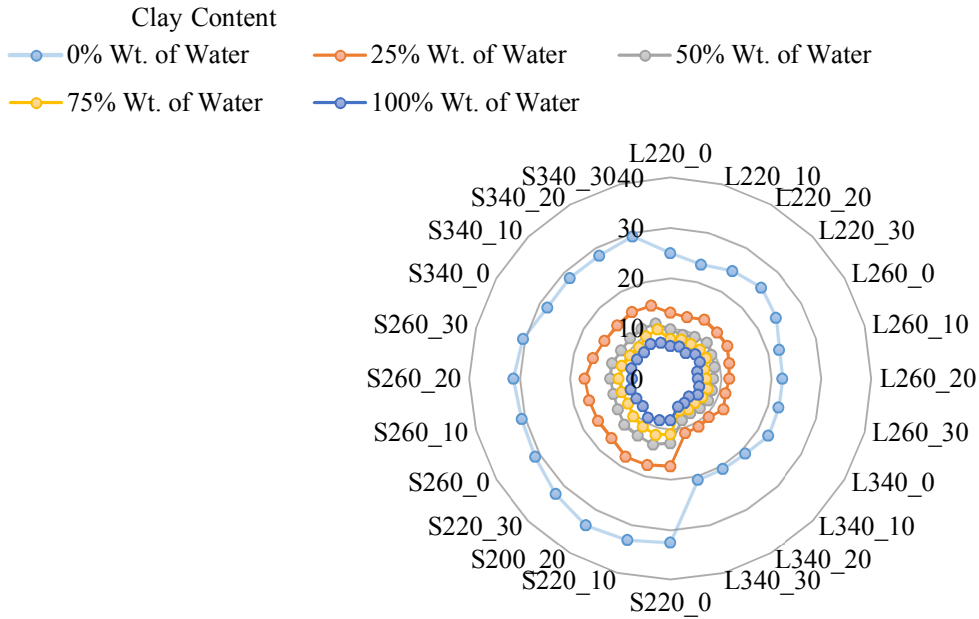


Fig 8. Hydraulic conductivity changes based on the concentration of clay suspensions for different samples (mm/s)

شکل ۹. رابطه بین تخلخل و نفوذپذیری (الف) لیکا (ب) اسکوریا

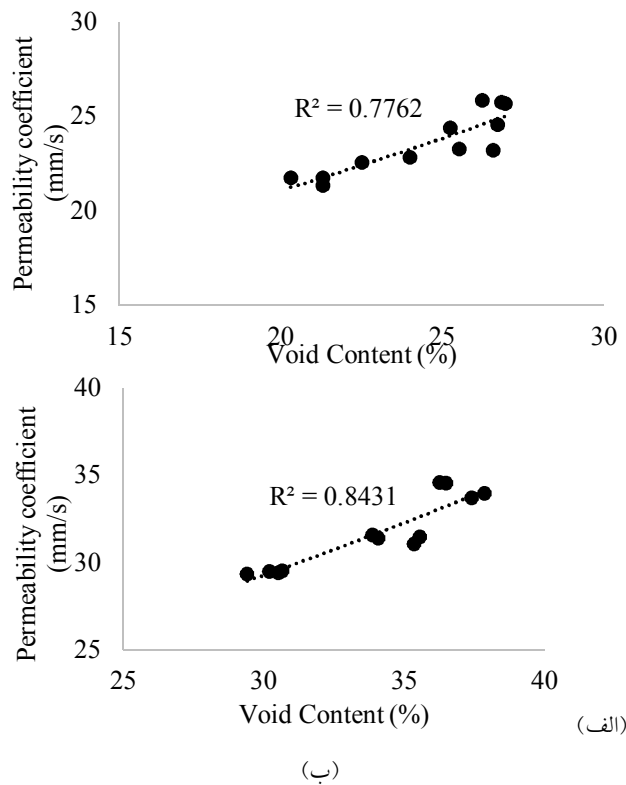


Fig 9. Relationship between Void Content and Permeability coefficient (a) Leca (b) Scoria

جمع بندی و نتیجه گیری

در این پژوهش با بهره گیری از سنگدانه های سبک اسکوریا و لیکا ساخت بتن نفوذپذیر سبک مورد آزمون قرار گرفت. درحالی که تمام سنگدانه های درشت از اسکوریا و لیکا انتخاب شده بود برای بهبود و مکانیکی از ۱۰٪ ماسه نیز استفاده شد. همچنین برای تقویت خمیر سیمانی از درصدهای مختلف جایگزینی دوده سیلیسی به جای سیمان بهره گیری شد. آزمون های مختلفی شامل مقاومت فشاری، کشش غیرمستقیم، جذب آب، درصد تخلخل و نفوذپذیری روی نمونه ها انجام شد و با توجه به نتایج به دست آمده از آزمون های می توان نتیجه گیری های زیر را ارائه داد:

- در آزمون مقاومت فشاری مشخص شد که نمونه های حاوی لیکا عملکرد بهتری نسبت به نمونه های حاوی اسکوریا داشتند. البته تمامی نمونه ها مقاومت بین ۴ تا ۷ مگا پاسکال از خود نشان دادند.

- افزایش عیار مواد سیمانی منجر به افزایش مقاومت فشاری شد. هرچند نرخ افزایش برای نمونه های حاوی ۲۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب نسبت به نمونه های با عیار ۳۴۰ بیشتر بود.

- افزودن دوده سیلیسی به میزان ۱۰ درصد منجر به تقویت خمیر سیمانی و در نتیجه بالا رفتن مقاومت فشاری شد. گرچه با افزایش بیشتر دوده سیلیسی کاهش شدید مقاومت دیده شد. این کاهش در تمامی نمونه های حاوی اسکوریا و لیکا با روند مشابهی نتیجه شد.

- جایگزینی سیمان با دوده سیلیسی به مقدار ۱۰٪ تاثیر مثبتی روی مقاومت کشش غیر مستقیم داشت. مشابه با نتایج به دست آمده در آزمون مقاومت فشاری افزایش بیشتر دوده سیلیسی کاهش مقاومت را بدنبال داشت.

- در آزمون جذب آب مشخص شد که نمونه های حاوی اسکوریا جذب به مراتب بالاتری نسبت به نمونه های لیکا دارند. با توجه به نفوذپذیر بودن بتن تولید شده جذب آب اندازه گرفته شده بالاتر از حد بتن معمولی بود.

- در اندازه گیری درصد تخلخل نمونه مشخص شد که نمونه های اسکوریا با تخلخلی حدود ۳۳ تا ۳۴٪ تخلخل بیشتری نسبت به نمونه های لیکا (حدود ۲۵٪) داشتند.

- افزایش عیار مواد سیمانی کاهش درصد تخلخل را در پی داشت. با افزایش عیار سیمان و در نتیجه افزایش خمیر سیمانی تخلخل اندازه گیری شده کاهش پیدا کرد.

- نمونه های حاوی اسکوریا نفوذپذیری به مراتب بالاتری نسبت به نمونه های حاوی لیکا از خود نشان دادند. هر چند افزایش عیار مواد سیمانی کاهش نرخ نفوذ را در پی داشت.

- با افزودن رس و ساخت سوسپانسیون هایی با درصدهای مختلف رس، ضریب نفوذپذیری نمونه ها کاهش یافت ولی حتی در سوسپانسیون با ۱۰۰٪ رس تمامی نمونه ها ضریب های قابل قبولی ارائه دادند و ویژگی های هیدرولیکی آنها طبق استانداردهای معین جهانی بود.

۶- مراجع

References

- [1] Chen Y., Zhang Q., Gao Y., 2010, Experiment on mechanical performance of porous concrete applied to surface layer of highway pavement, *China J. Highway Transport* 23 (2) 18-24.
- [2] Li X., Yang Q., 2013, Impact analysis of porous concrete overlay timing on tunnel pavement, *J. East China Jiaotong Univ.* 30 (1) 41-45.
- [3] Lian C., Zhuge Y., Beecham S., 2011, The relationship between porosity and strength for porous concrete, *Constr. Build. Mater.* 25 4294-4298.
- [4] Chen Y., Wang K., Wang X., Zhou W., 2013, Strength, fracture and fatigue of pervious concrete, *Constr. Build. Mater.* 42 97-104.
- [5] Zhong R., Wille K., 2015, Material design and characterization of high performance pervious concrete, *Construction and Building Materials*, 98, 51-60.
- [6] Deo O., Neithalath N., 2011, Compressive response of pervious concretes proportioned for desired porosities, *Construction and Building Materials*, 25, 4181-4189.

- [18] Bernhard R., Wayson R., 2005, An introduction to tire-pavement noise. Final Research Report SQDH 2005-1. Purdue University, West Lafayette, IN, USA.
- [19] Marolf A., Neithalath N., Sell E., Wegner K., Weiss J., Olek J., 2004, Influence of aggregate size and gradation on the acoustic absorption of enhanced porosity concrete, *ACI Mater. J.* 101 (1) 82–91.
- [20] Ohiduzzaman M.D., Sirin O., Kassem E., Rochat J.L., 2016, State-of-of-the-art review on sustainable design and construction of quieter pavements – part 1: traffic noise measurement and abatement techniques, *Sustainability* 8 (8) 742–769.
- [21] Neithalath N., Weiss J., Olek J., 2006, Characterizing enhanced porosity concrete using electrical impedance to predict acoustic and hydraulic performance, *Cem. Concr. Res.* 36 (11) 2074–2085.
- [22] Gerharz B., 1999, Pavements on the base of polymer-modified drainage concrete, *Colloids Surface A* 152 205–209.
- [23] Pratt, C.J., Mantle, J.D., Schofield, P.A., 1995, UK research into the performance of permeable pavement, reservoir structures in controlling stormwater discharge quantity and quality. *Water Sci. Technol.* 32 (1), 63-69.
- [24] Welker, A.L., Gilbert Jenkins, J.K., McCarthy, L., Nemirovsky, E., 2013, Examination of the material found in the pore spaces of two permeable pavements. *J. Irrig. Drain. Eng.* 139, 278-284.
- [25] Kayhanian, M., Anderson, D., Harvey, J.T., Jones, D., Muhunthan, B., 2012, Permeability measurement and scan imaging to assess clogging of pervious concrete pavements in parking lots. *J. Environ. Manage* 95 (1), 114-123.
- [26] Deo, O., Neithalath, N., 2011, Compressive response of pervious concretes proportioned for desired porosities. *Constr. Build. Mater.* 25 (11), 4181-4189.
- [27] Coughlin, J.P., Campbell, C.D., Mays, D.C., 2012, Infiltration and clogging by sand and clay in a pervious concrete pavement system. *J. Hydro. Eng.* 17 (1), 68e73. CRMA, 2009. Specifier's Guide for Pervious Concrete Pavement Design. Colorado Ready Mix Concrete Association, 24 pp.
- [7] Wongsu Y. Z. A., Sata V., Chindaprasirt P., 2013, Use of lightweight aggregates in pervious concrete, *Construction and Building Materials*, 48, 585-591.
- [8] Khankhaje E., Salim M. R., Mirza J., Hussin M. W., Rafiezonooz M., 2016, Properties of sustainable lightweight pervious concrete containing oilpalm kernel shell as coarse aggregate, *Construction and Building Materials*, 126, 1054-1065.
- [9] Cosic K., Korat L., Ducman V., Netinger I., 2015, Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete, *Construction and Building Materials*, 78, 69-76.
- [10] Guneyisi E., Gesoglu M., Kareem Q., Ipek S., 2014, Effect of different substitution of natural aggregate by recycled aggregate on performance characteristics of pervious concrete, *Mater Struct*, 49, 521–536.
- [11] Rafique M. A., Bhutta, K. Tsuruta, Mirza J., 2012, Evaluation of high-performance porous concrete properties, *Construction and Building Materials*, 31, 67-73.
- [12] Bonicelli A., Giustozzi F., Crispino M., 2015, Experimental study on the effects of fine sand addition on differentially compacted pervious concrete, *Construction and Building Materials*, 91, 102-110.
- [13] Deo O., Neithalath N., 2010, Compressive behavior of pervious concretes and quantification of the influence of random pore structure features, *Mater. Sci. Eng.*, 528 402–412.
- [14] Rehder B., Banh K., Neithalath N., 2014, Fracture behavior of pervious concretes: the effects of pore structure and fibers, *Eng. Fract. Mech.* 118 1–16.
- [15] Zhong R., Xu M., Netto R.V., Wille K., 2016, Influence of pore tortuosity on hydraulic conductivity of pervious concrete: characterization and modeling, *Constr. Build. Mater.* 125 1158–1168.
- [16] Hesami S., Ahmadi S., Nematzadeh M., 2014, Effects of rice husk ash and fiber on mechanical properties of pervious concrete pavement, *Construction and Building Materials*, 53, 680-691.
- [17] Zhong R., Wille K., 2018, Influence of matrix and pore system characteristics on the durability of pervious concrete, *Construction and Building Materials*, 162, 132-141.

- IFAI Publishing, Boston, Massachusetts. St. Paul, Minnesota, pp. 783-798.
- [32] Guthrie, W.S., Carson, B.D., Dennis, L.E., 2010, Effects of soil clogging and watersaturation on freeze-thaw durability of pervious concrete. *J. Transp. Res. Board* 2164, 89-97.
- [33] ASTM C778, Standard Specification for Standard Sand, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- [34] ASTM C496, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- [35] ASTM C642, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- [28] Kevern, J.T., 2015, Evaluating permeability and infiltration requirements for pervious concrete. *J. Test. Eval.* 43 (3), 544-553.
- [29] Yong, C.F., McCarthy, D.T., Deletic, A., 2013, Predicting physical clogging of porous and permeable pavements. *J. Hydrol.* 481, 48-55.
- [30] Chopra, M., Wanielista, M., Ballock, C., Spence, J., 2007, Construction and Maintenance Assessment of Pervious Concrete Pavements. *Stormwater Management Academy University of Central Florida*
- [31] Mackey, R.E., Koerner, G.R., 1999, Biological clogging of geotextile filters - a five-year study. In: *Geosynthetics 99 Conference Proceedings*, 28-30 April 1999.

Investigation of hydraulic conductivity and clogging of permeable Lightweight Concrete containing Leca and Scoria

K. Momeni^{1*}, R. Ghavidel²

1. PHD of Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Imam sadeq Astaneh ashrafiyeh, Guilan Branch, Technical and Vocational University (TVU), Guilan, Iran
2. PHD, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University of Lashenesha-Zibakenar Branch, Lashtenesha, Guilan, Iran

* kmomeni@tvu.ac.ir

Abstract:

Pervious concrete is a concrete that, given its high porosity, allows higher rates of water infiltration through it. Although asphalt and concrete pavements have high structural and durability capabilities, they have a considerable high impact on the environment in terms of environmental as well as acoustic noise production. One of these problems are the drastic decrease in rainwater penetration to the ground and the consequent flooding disasters in the cities, which can lead to significant financial and life damage. On the other hand, surface clay pollution runoff can lead to clogging and take negative impact at effective permeability of such concrete. Thus making the most important feature of this concrete, which is high permeability, would be accompanied by some difficulties. In this study, using silica fume, it's been tried to make a permeable concrete in order to have desirable mechanical properties, high permeability and less clogging. In addition, with the use of leca and scoria lightweight aggregates, the specific gravity of pervious concrete was significantly reduced to help noise pollution reduction by increasing internal and structural porosity. The compressive strength test showed that the samples containing Leca have better performance than the samples containing Scoria. However, all samples exhibited resistance between 4 and 7 MPa. Increasing level of cementitious materials resulted in increased compressive strength. However, the rate of increase for samples containing 260 kg/m³ found to be higher than for samples with 340 kg/m³. Also, replacing cement with silica fume by 10% had a positive effect on indirect tensile strength. Similar to the results obtained in the compressive strength test, a further increase in silica fume resulted in a decrease in resistance. Regarding hydraulic conductivity, the specimens containing scoria aggregates have higher porosity and permeability, which both have high importance in pervious concrete. In all cases, the samples showed acceptable permeability for slurry passage even at high concentrations, but the difference between the 10% clay suspensions compared to clay-free water was significant, while the hydraulic conductivity decrease rate was much lower with increasing the concentration of clay. Concerning the clogging of specimens, the results showed that the increase in silica fume in the Leca mixtures resulted in a decrease in permeability, with a maximum reduction of 8.2% (260 kg/m³ cement content) for the replacement of 10%. But in the samples containing Scoria, the variation is much less, reaching a maximum of 1.9% in permeability values. However, the permeability difference between the samples containing Leca and Scoria is significant, and the samples of Scoria exhibit at least 10.9% higher permeability. With the increase in the amount of clay in water up to 50%, the conductivity decreased about 13.8% to an average drop of 60.7%. By increasing the amount of clay to 75%, the conductivity drop is slower, reaching 6.4% compared to the 50% suspension. At a 100% clay concentration, the slow conductivity decrease continues, with an average decrease of 6.8% compared to the previous suspension. Overall, with a 100% increase in clay content compared to clay-free water, the average conductivity decrease reaches 73.9%, which can be said to be quite expected given the very high concentration of clay and the excellent performance of permeable concrete in muddy floods. The trend of results obtained with 100% suspension is similar to previous observations and further decrease of coefficient is observed with increasing clay percentage. Interestingly, significant permeability was observed for all specimens in 100% clay suspension, indicating significant hydraulic properties of the specimens produced.

Keywords: Permeable Concrete, Lightweight Concrete, Hydraulic Conductivity, Clogging, Porosity Percentage