

## نشریه مهندسی سازه و ساخت (علمی - پژوهشی)

www.jsce.ir

### بهبود عملکرد روسازی بتن نفوذپذیر با جایگزینی سنگ دانه رسوبی تراورتن

سعید فرزین<sup>۱\*</sup>، مهسا دوست محمدی<sup>۲</sup>، حجت کرمی<sup>۳</sup>، سید فرهاد موسوی<sup>۴</sup>، امید رضائی فر<sup>۵</sup>

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- کارشناس ارشد مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۴- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۵- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

#### چکیده

افزایش سطوح نفوذناپذیر در مناطق شهری، منجر به بروز مشکلات زیادی از جمله آبگرفتگی معابر و خیابان‌ها در هنگام وقوع باران شده است که می‌تواند تردد عابران پیاده و خودروها را با مشکل مواجه سازد. از راه‌کارهای مؤثر کاهش حجم رواناب شهری و آبگرفتگی، استفاده از روسازی بتن نفوذپذیر می‌باشد. در تحقیق حاضر، تأثیر جایگزینی افزودنی تراورتن با درصدهای متفاوت، با سنگ‌دانه اصلی بتن نفوذپذیر بر خواص فیزیکی و مکانیکی این نوع بتن مطالعه شده است. ساخت نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها با سه تکرار برای هر نمونه، در آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشگاه سمنان صورت پذیرفته است. تحلیل آماری نتایج آزمایشگاهی به کمک نرم‌افزار SAS 9.4 در سطح اطمینان ۹۵٪ برای تمامی نمونه‌ها انجام شده است. با توجه به نتایج حاصل به دلیل ساختار متخلخل تراورتن، با افزایش درصد جایگزینی تراورتن با سنگ‌دانه، درصد تخلخل و ضریب نفوذپذیری افزایش می‌یابد. بیشترین درصد تخلخل مربوط به نمونه‌های T-100 و T-75 می‌باشد که به ترتیب برابر ۲۹/۱۳ و ۲۸/۷۸ درصد است. همچنین بیشترین ضریب نفوذپذیری مربوط به نمونه‌های T-100 و T-75 می‌باشد که برابر ۱/۹۶ میلی‌متر بر ثانیه است. دیگر نتایج حاکی از آن است که جایگزینی تراورتن با درصدی از سنگ‌دانه در بتن متخلخل، مقاومت فشاری نمونه‌ها را نسبت به نمونه شاهد کاهش می‌دهد. بیشترین و کمترین مقاومت فشاری برابر ۱۷/۰۳ و ۱۲/۲۲ مگاپاسکال است که به ترتیب مربوط به نمونه‌های T-100 و T-25 می‌باشد. در حالی که مقاومت فشاری نمونه شاهد برابر ۱۸/۵۴ مگاپاسکال است. براساس نتایج به دست آمده، به دلیل تخلخل و نفوذپذیری زیاد و مقاومت مناسب بتن نفوذپذیر حاوی تراورتن، این نوع بتن پتانسیل بالایی برای استفاده در روسازی‌ها به‌ویژه در مناطق با ترافیک کم دارا می‌باشد.

#### کلمات کلیدی: بتن نفوذپذیر، تراورتن، سنگ‌دانه، تخلخل، مقاومت فشاری

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
10.22065/JSCE.2018.112016.1414	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/JSCE.2018.112016.1414	۱۳۹۸/۰۹/۰۱	۱۳۹۷/۰۱/۲۹	۱۳۹۷/۰۱/۲۹	۱۳۹۶/۱۲/۲۰	۱۳۹۶/۱۰/۰۵
			* نویسنده مسئول:		سعید فرزین
			پست الکترونیکی:		Saeed.farzin@semnan.ac.ir

## Improving the Performance of Permeable Concrete Pavement by Replacing Sedimentary Travertine Aggregate

Saeed Farzin<sup>1\*</sup>, Mahsa Doostmohamadi<sup>2</sup>, Hojat Karami<sup>3</sup>, Sayed-Farhad Mousavi<sup>4</sup>, Omid Rezaeefar<sup>5</sup>

1- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

2- M.Sc. in Water Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

3- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

4- Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

5- Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

### ABSTRACT

Increase of impervious surfaces in urban areas, has led to many problems, including flooding roads and streets during rainstorms which could create difficulties for pedestrians and cars. An effective way of reducing urban runoff and waterlogging is to use permeable concrete pavement. In the present study, the effect of replacing different percentages of travertine additive with the main aggregates of permeable concrete on physical and mechanical properties of this type of concrete has been studied. Samples development and testing with three replicates for each sample was carried out at the Concrete Technology Laboratory of Semnan University. Statistical analysis of the results was carried out using SAS 9.4 software at 95% confidence level for all the samples. Results showed that due to the porous structure of travertine, increasing the percentage of travertine replacement with aggregate increased the porosity and permeability coefficient. The highest porosity was observed for T-100 and T-75 specimens, which was 29.13% and 28.78%, respectively. Also, the highest permeability coefficient (1.96 mm/s) was for T-75 and T-100 specimens. Other results indicated that replacement of travertine with a percentage of aggregates in porous concrete reduced the compressive strength of the samples compared to the control sample. Maximum and minimum compressive strengths were 17.33 and 12.22 MPa, respectively, for T-25 and T-100 specimens; While the compression strength of the control sample was 18.45 MPa. Based on the results, due to porosity, high permeability and suitable resistance of this permeable concrete with travertine, this type of concrete has high potential to be used in pavements, especially in areas with low traffic.

### ARTICLE INFO

Received: 26/12/2017

Revised: 11/03/2018

Accepted: 18/04/2018

### Keywords:

Permeable concrete,  
Travertine,  
Aggregate,  
Porosity,  
Compressive strength.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2018.112016.1414

\*Corresponding author: Saeed Farzin

Email address: Saeed.farzin@semnan.ac.ir

## ۱- مقدمه

از جمله مهمترین راه کارهای مقابله با پدیده افزایش سطوح نفوذناپذیر در محیط شهری و در نتیجه افزایش حجم رواناب و آلاینده-های موجود در آن، استفاده از انواع سطوح نفوذپذیر می باشد. در این راستا، روسازی بتن نفوذپذیر از انواع روسازی های نفوذپذیر و صلب به شمار می رود که به طور معمول فاقد مصالح ریزدانه و یا دارای ریزدانه کم می باشد و دارای مزیت های اقتصادی و زیست محیطی فراوانی است [۱ و ۲]. در شکل ۱ تصویری از روسازی بتن نفوذپذیر نشان داده شده است. در بتن نفوذپذیر، مصالح درشت دانه با ملات سیمان به هم می چسبند و ساختار متخلخلی تشکیل می شود که سبب نفوذ آب می گردد. بنابراین می تواند رواناب موجود در سطح معابر را از خود عبور داده و به سفره های آب زیرزمینی منتقل کند. با کاهش رواناب سطحی، خطر ایجاد سیل کمتر شده و نیاز به تأسیسات کنترل رواناب و سیلاب کاهش می یابد [۳].



شکل ۱: روسازی بتن نفوذپذیر

با توجه به اهمیت موضوع، تاکنون تحقیقاتی صورت گرفته است که به اهم آنها در دو دهه اخیر پرداخته می شود. کولینز و همکاران (۲۰۰۸) چهار نوع روسازی نفوذپذیر متفاوت و آسفالت استاندارد را با یکدیگر مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که با استفاده از روسازی نفوذپذیر، می توان حجم رواناب سطحی را کاهش داد [۴]. هوانگ و همکاران (۲۰۱۰) برای بهبود مقاومت فشاری بتن متخلخل از ماسه به عنوان افزودنی استفاده کردند. همچنین برای بهبود خواص فیزیکی در ساخت بتن متخلخل از پلیمر استفاده کردند و بیان داشتند که استفاده از این مواد باعث افزایش مقاومت و کاهش نفوذپذیری می شود [۵]. گادیک و همکاران (۲۰۱۴) دریافتند که علاوه بر درصد تخلخل، سطح تراکم روسازی و افزودنی های مورد استفاده بر مقاومت فشاری روسازی تأثیر می گذارد [۶]. جوشقانی و همکاران (۲۰۱۵) به منظور بهینه سازی طرح اختلاط بتن متخلخل از روش تاگوچی استفاده کردند. براساس نتایج به دست آمده از این مطالعه، مقاومت نمونه های بتن متخلخل بستگی به نسبت تخلخل نمونه ها دارد و مقاومت فشاری و مقاومت خمشی با نفوذپذیری نسبت معکوس دارند [۷]. لی و همکاران (۲۰۱۷)، عملکرد روسازی بتن متخلخل را بررسی کردند. ایشان اقدام به ساخت بتن متخلخل با مقاومت زیاد کردند که نشان دهنده عملکرد خوب این نوع بتن متخلخل برای کاربرد گسترده است [۸].

شیرگیر و همکاران (۱۳۹۰)، تأثیر نوع دانه بندی بر خواص فیزیکی و نفوذپذیری بتن متخلخل را ارزیابی کردند. نتایج حاصل، از پراکندگی قابل توجه در مقادیر مقاومت بتن متخلخل با دانه بندی مختلف حکایت داشت. برای مثال، اختلاف بین کمینه و بیشینه مقاومت فشاری و مقاومت خمشی به ترتیب حدود ۳۳ و ۲۰ درصد بود [۹]. خدادوست گمچی و پاشایی گلرمز (۱۳۹۴) نشان دادند که بتن متخلخل ساخته شده از سنگ دانه هایی با اندازه یکسان، دارای نفوذپذیری بالایی می باشد ولی مقاومت آن کافی نیست. اضافه کردن مقدار کمی ماسه (تقریباً ۷٪ وزن کل سنگ دانه ها) به مخلوط، مقاومت بتن را افزایش داده و در عین حال نفوذپذیری آن حفظ می شود [۱۰]. تیموری و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی اثر اضافه کردن افزودنی های ژئولیت، پوکه معدنی، لیکا و پرلیت بر ویژگی بتن متخلخل قابل کاربرد در سیستم رواناب شهری پرداختند. نتایج نشان داد که اضافه شدن افزودنی ها باعث کاهش مقاومت بتن متخلخل می شود. بیشترین مقدار کاهش مقاومت، برای افزودنی پرلیت و برابر با ۴۸/۴ درصد گزارش شد [۱۱].

سنگ تراورتن، جزو سنگ‌های رسوبی محسوب می‌شود که ساختاری متخلخل دارد. این سنگ، حاصل رسوبات به جا مانده از چشمه‌های آب گرم می‌باشد که از مواد معدنی کلسیت کریستالی با اندازه‌های مختلف تشکیل شده است [۱۲]. سنگ تراورتن بیشتر در رنگ‌های شفاف مانند سفید، کرم و خاکستری مشاهده می‌شود. ناخالصی، ممکن است سبب تغییر در خواص فیزیکی آن مانند مقاومت و رنگ شود. ناخالصی اکسید آهن و منیزیم باعث تولید رنگ قهوه‌ای، زرد و ناخالصی کربن باعث تولید رنگ مایل به آبی، خاکستری و سیاه در تراورتن می‌شود. خاصیت تخلخل تراورتن، در افزایش جذب آب نقش به‌سزایی دارد [۱۳].

با توجه به بررسی منابع پیشین، استفاده از بتن نفوذپذیر به جای روش‌های سنتی که باعث عدم نفوذ و مانع هدایت رواناب هستند- نتایج خوبی ارائه داده است. کاربرد این نوع بتن سبب کاهش رواناب شهری، افزایش ذخایر آب زیرزمینی و کاهش مشکلات عبور و مرور شده است. لیکن استفاده از مواد افزودنی جدید، در دسترس و مناسب‌تر در بتن نفوذپذیر که سبب بهبود نتایج گردد همواره مورد علاقه پژوهشگران می‌باشد. در این راستا، سنگ تراورتن از جمله سنگ‌های رسوبی می‌باشد که قدرت جذب زیاد و مقاومت مناسبی دارد و تا کنون کاربرد آن به عنوان افزودنی در بتن نفوذپذیر بررسی نشده است. هدف از پژوهش حاضر، بررسی اثرات درصد‌های متفاوت جایگزینی تراورتن با سنگ‌دانه بتن نفوذپذیر می‌باشد. بدین منظور، مقاومت فشاری، ضریب نفوذپذیری، درصد تخلخل و چگالی در نمونه‌های حاوی سنگ‌دانه تراورتن تعیین می‌شود و نتایج، نسبت به بتن معمولی مورد مقایسه و تحلیل قرار می‌گیرد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مصالح مصرفی

برای انجام آزمایش‌ها و ساخت نمونه‌ها، از مصالح سنگدانه، سیمان، آب و جاذب تراورتن استفاده شده است. سنگ‌دانه مورد استفاده که از معادن استان سمنان تهیه گردیده است، در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود به منظور دستیابی به مقاومت فشاری بیشتر، در این پژوهش از سنگ‌دانه شکسته استفاده شده است، زیرا درگیری بهتر دانه‌ها و اصطکاک بیشتر بین سنگ‌دانه شکسته، باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه نسبت به نمونه‌های حاوی سنگ‌دانه رودخانه‌ای می‌شود. سیمان مورد استفاده از نوع پرتلند تیپ ۵ می‌باشد که از کارخانه سیمان تهران تهیه شده است. در جدول ۱، آنالیز شیمیایی این سیمان آورده شده است. سنگ تراورتن از یک مصالح فروشی در استان سمنان تهیه شده و سپس به صورت دستی و توسط چکش خرد شده است. در شکل ۳، سنگ تراورتن و خرد کردن آن و اندازه تقریبی این افزودنی مشاهده می‌شود. اندازه سنگدانه‌های اصلی و سنگ تراورتن مورد استفاده در این تحقیق بین ۴/۷۵ تا ۹/۵ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۲: سنگ‌دانه مصرفی



شکل ۳: تصاویری از سنگ تراورتن: الف) قبل از خرد شدن، ب) خرد کردن به وسیله چکش فلزی و ج) اندازه تقریبی مصرفی در تحقیق

جدول ۱: مشخصات فنی و آنالیز شیمیایی سیمان پرتلند تیپ ۵ کارخانه سیمان تهران

مشخصات شیمیایی	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	$CaO$	$MgO$	$SO_3$	$Na_2O$	$K_2O$
میانگین (%)	۲۲/۰±۶/۴	۰/۳±۴/۴	۰/۳±۴/۴	۶۳/۱±۰/۵	۱/۷±۰/۲	۱/۵±۰/۳	۰/۲±۰/۱	۰/۵±۰/۱

## ۲-۲- طرح اختلاط

طرح اختلاط بتن شامل تعیین نسبت اجزای بتن (سیمان، آب، شن و ماسه) برای دستیابی به خواص مشخص می‌باشد. برای ساختن بتن با خواص معین لازم است مقادیر مناسب سیمان، ریزدانه، درشت‌دانه، آب و مواد افزودنی براساس استانداردهای توصیه شده تعیین گردد. در این پژوهش، طبق استاندارد ACI 211/3R [۲]، مقدار سنگ‌دانه و عیار سیمان به ترتیب برابر با ۱۳۳۰ و ۳۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب و نسبت آب به سیمان برابر ۰/۳۸ در نظر گرفته شده است. برای ساخت نمونه‌های بتن متخلخل، افزودنی تراورتن با درصدهای حجمی ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد جایگزین سنگ‌دانه اصلی گردیده است. در جدول ۲، طرح اختلاط نمونه‌های بتن متخلخل مشاهده می‌شود.

جدول ۲: طرح اختلاط بتن متخلخل

نام نمونه	علامت اختصاری	درصد حجمی افزودنی
شاهد	C	۰
تراورتن	T-25	۲۵
تراورتن	T-50	۵۰
تراورتن	T-75	۷۵
تراورتن	T-100	۱۰۰

## ۲-۳- روش ساخت نمونه‌های بتن متخلخل

در این پژوهش، ساخت نمونه‌های بتن نفوذپذیر و انجام آزمایش‌ها با سه تکرار برای هر نمونه، در آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشگاه سمنان انجام شده است. به منظور سهولت در انجام آزمایش‌های مربوط به تخلخل و ضریب نفوذپذیری، از نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر و برای دقیق بودن آزمایش‌های مقاومت فشاری، از نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر بر اساس

استاندارد استفاده شده است. سطح داخلی قالب‌ها به وسیله روغن چرب گردیده است تا بتن سخت شده به راحتی از قالب جدا گردد. مقادیر مصالح مصرفی در بتن مطابق طرح‌های اختلاط وزن گردیده و سپس مصالح مصرفی در دستگاه مخلوط‌کن مکانیکی مخلوط شده است. لازم به ذکر است به دلیل اینکه جاذب تراورتن از درصد جذب آب بالایی برخوردار بود، جاذب را به مدت ۲۴ ساعت در آب اشباع کرده و قبل از اختلاط آن‌ها را پهن کرده تا به صورت اشباع و با سطح خشک با دیگر مواد مخلوط شود. دلیل اشباع کردن جاذب‌ها این است که هنگام اختلاط، شیره سیمان را به خود جذب نکنند و بتن از کیفیت مطلوبی برخوردار باشد. در شکل ۴، جاذب اشباع شده نشان داده شده است. پس از اختلاط، بتن به داخل قالب‌ها ریخته شد و در ۳ لایه با کوبه استاندارد، هر لایه با ۲۵ ضربه، متراکم گردیده است. پس از ۲۴ ساعت، نمونه‌ها از داخل قالب بیرون آورده شده و برای عمل‌آوری به حوضچه‌های مخصوص منتقل گردیده اند. دوره عمل‌آوری نمونه‌های بتنی در آب به دلیل استفاده از سیمان تیپ ۵ برابر ۴۲ روز می‌باشد.



شکل ۴: نمونه تراورتن اشباع شده

## ۲-۴- آزمایش تخلخل

برای اندازه‌گیری درصد تخلخل نمونه‌ها، از استاندارد ASTM C1745 [۱۴] استفاده شده است. بدین منظور، ابتدا نمونه به مدت ۲۴ ساعت در گرم‌خانه با دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس قرار داده شده است. سپس با توزین آن، وزن خشک ( $W_2$ ) محاسبه شده است. برای به دست آوردن وزن غوطه‌وری، از ترازوی ارشمیدس استفاده شده است. ابتدا نمونه به مدت ۳۰ دقیقه در داخل ظرف آب قرار گرفته است تا تمامی هوای داخل خلل و فرج آن خارج شود. همچنین به بدنه ظرف آب ۱۰ ضربه زده شده و سپس وزن غوطه‌وری ( $W_1$ ) به دست آمده و در نهایت با استفاده از رابطه (۱) تخلخل نمونه محاسبه گردیده است.

$$A_t = \left(1 - \frac{W_2 - W_1}{\rho_w V}\right) \times 100 \quad (1)$$

در این رابطه،  $A_t$  تخلخل کل برحسب درصد،  $V$  حجم نمونه (سانتی‌متر مکعب)،  $\rho_w$  دانسیته آب در دمای ۲۱ °C (گرم بر سانتی‌متر مکعب)،  $W_2$  وزن نمونه خشک (گرم) و  $W_1$  وزن نمونه در آب (گرم) می‌باشد.

## ۲-۵- آزمایش نفوذپذیری

برای انجام آزمایش نفوذپذیری، دستگاهی به روش بار افتان در آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشگاه سمنان ساخته شده که در شکل ۵ نشان داده شده است. قصد بر آن است که نفوذپذیری در یک جهت که همان جهت ریختن بتن در قالب است، اندازه‌گیری گردد. لذا نمونه باید از اطراف به گونه‌ای محصور شود که آب در حین آزمایش از یک سطح نمونه وارد و از سطح روبرو خارج گردد. برای این منظور از فوم جهت آب‌بند کردن چهار وجه نمونه مکعبی استفاده گردیده است. ضریب نفوذپذیری از رابطه (۲) و بر اساس قانون داریسی و فرض جریان لایه‌ای محاسبه شده است. متوسط نتایج آزمایش روی سه نمونه مکعبی با ابعاد  $100 \times 100 \times 100$  میلی‌متر، به‌عنوان ضریب نفوذپذیری گزارش شده است.

$$K = \frac{aL}{At} \ln(h_1/h_2) \quad (2)$$

که در این رابطه،  $K$  نفوذپذیری برحسب میلی‌متر بر ثانیه،  $a$  سطح مقطع محفظه شیشه‌ای برحسب میلی‌متر مربع،  $A$  سطح مقطع نمونه برحسب میلی‌متر مربع،  $t$  زمان افت هد آب از  $h_1$  تا  $h_2$  بر حسب ثانیه،  $h_1$  ارتفاع اولیه ستون آب برحسب میلی‌متر و  $h_2$  ارتفاع نهایی ستون آب برحسب میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۵: دستگاه اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری

## ۲-۶- آزمایش مقاومت فشاری

طبق استاندارد BS 1881 [۱۵]، برای آزمایش مقاومت فشاری از نمونه‌های مکعبی با ابعاد  $150 \times 150 \times 150$  میلی‌متر استفاده شده است. پس از عمل‌آوری ۴۲ روزه نمونه‌ها، آن‌ها را به مدت ۲۴ ساعت در معرض هوای آزاد قرار داده تا خشک شوند و سپس با استفاده از جک بارگذاری موجود در آزمایشگاه سازه دانشگاه سمنان، مقاومت فشاری نمونه‌ها اندازه‌گیری شده است.

## ۳- نتایج و بحث

تجزیه واریانس برای پارامترهای درصد تخلخل، ضریب نفوذپذیری، مقاومت فشاری و چگالی نمونه‌های بتن متخلخل حاوی تراورتن به روش LSD در سطح اطمینان ۹۵٪ انجام شده است. نتایج حاصل، به ترتیب در جداول ۳ تا ۶ ارائه شده است. با توجه به نتایج، مقدار F برای نمونه‌ها و بلوک در سطح ۱٪ معنی‌دار شده که نشان دهنده وجود تفاوت معنی‌دار بین نمونه‌ها می‌باشد. ضریب همبستگی برای پارامترهای مقاومت فشاری، درصد تخلخل و ضریب نفوذپذیری، بیش از ۹۴٪ است که نشان دهنده رابطه خطی بین نمونه‌ها می‌باشد. پارامتر چگالی نمونه‌های حاوی تراورتن تقریباً با هم یکسان هستند و تفاوت چندانی ندارند. به همین دلیل ضریب همبستگی برای پارامتر چگالی این نمونه‌ها ۰/۴۸ است که نشان‌دهنده این است که ارتباطی بین چگالی نمونه‌ها وجود ندارد.

جدول ۳: نتایج تجزیه واریانس درصد تخلخل

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	P	ضریب تغییرات	R <sup>2</sup>
نمونه	۴	۱۸۵/۹۱۹۱	۴۶/۴۷۹۷	۳۵/۱۵	<۰/۰۰۰۱	-	-
بلوک	۲	۰/۰۱۵۰	۰/۰۰۷۵	۰/۰۱	۰/۹۹۴۶	-	-
خطا	۸	۱۱/۲۱۸۵	۱/۴۰۲۳	-	-	۴/۴۱۷۵	۰/۹۴۳۰
کل	۱۴	۱۹۷/۱۵۲۷	-	-	-	-	-

جدول ۴: نتایج تجزیه واریانس ضریب نفوذپذیری

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	P	ضریب تغییرات	R <sup>2</sup>
نمونه	۴	۰/۸۶۳۲	۰/۲۱۵۸	۱۱۷/۴۷	<۰/۰۰۰۱	-	-
بلوک	۲	۰/۰۰۲۲	۰/۰۰۱۱	۰/۶۰	۰/۵۷۱۱	-	-
خطا	۸	۰/۰۱۴۶	۰/۰۰۱۸	-	-	۲/۳۷۷۷	۰/۹۸۳۳
کل	۱۴	۰/۸۸۰۱	-	-	-	-	-

جدول ۵: نتایج تجزیه واریانس مقاومت فشاری

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	P	ضریب تغییرات	R <sup>2</sup>
نمونه	۴	۹۹/۸۸۹۰	۲۴/۹۷۲۲	۵۱/۳۴	<۰/۰۰۰۱	-	-
بلوک	۲	۰/۲۴۶۴	۰/۱۲۳۲	۰/۲۵	۰/۷۸۲۲	-	-
خطا	۸	۳/۸۹۱۰	۰/۴۸۶۳	-	-	۴/۷۴۴۰	۰/۹۶۲۵
کل	۱۴	۱۰۴/۰۲۶۴	-	-	-	-	-

جدول ۶: نتایج تجزیه واریانس چگالی

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	P	ضریب تغییرات	R <sup>2</sup>
نمونه	۴	۰/۰۰۳۱	۰/۰۰۰۷	۱/۸۹	<۰/۰۰۰۱	-	-
بلوک	۲	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۵	۰/۹۵۲۹	-	-
خطا	۸	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۰۴	-	-	۱/۱۳۲	۰/۴۸۸۶
کل	۱۴	۰/۰۰۶۴	-	-	-	-	-

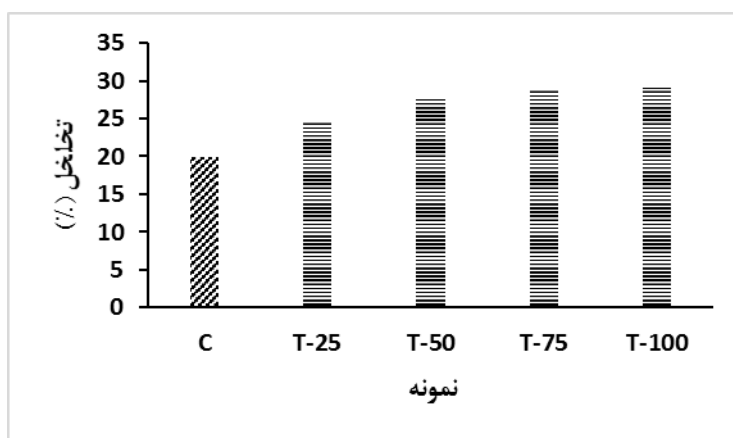
در شکل‌های ۶ تا ۹، تغییرات درصد تخلخل، ضریب نفوذپذیری، مقاومت فشاری و چگالی برای نمونه‌های حاوی تراورتن نشان داده شده است. با توجه به شکل ۶ بیشترین درصد تخلخل مربوط به نمونه‌های T-100 و T-75 می‌باشد که به ترتیب برابر ۲۹/۱۳ و ۲۸/۷۸



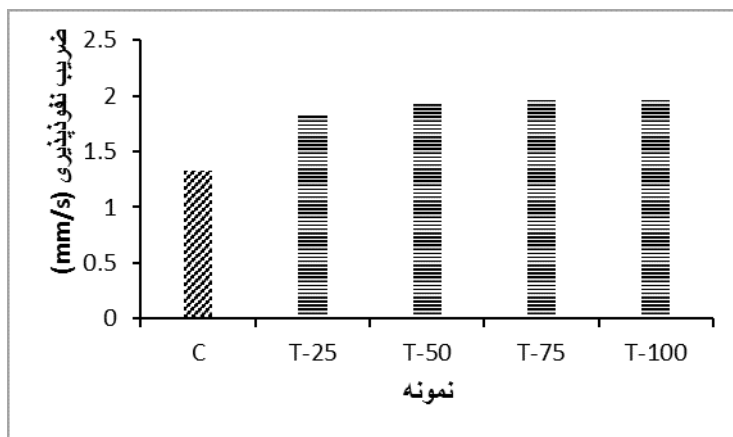
درصد است. در شکل ۷ تغییرات ضریب نفوذپذیری نمونه‌های حاوی تراورتن مشاهده می‌شود. با توجه به این شکل بیشترین ضریب نفوذپذیری مربوط به نمونه‌های T-75 و T-100 به مقدار ۱/۹۶ میلی‌متر بر ثانیه است. کمترین ضریب نفوذپذیری نیز در نمونه T-25 و به میزان ۱/۸۲ میلی‌متر بر ثانیه می‌باشد. با توجه به شکل‌های ۶ و ۷، مشاهده می‌شود با افزایش درصد جایگزینی تراورتن، به دلیل ساختار متخلخل تراورتن، درصد تخلخل نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته و همچنین با افزایش فضای خالی نمونه‌ها، ضریب نفوذپذیری نیز افزایش یافته است که تیموری و همکاران نیز در سال ۱۳۹۵ [۱۱] به این نتیجه دست یافتند که استفاده از جادب، باعث بهبود ضریب نفوذپذیری می‌شود. در مورد پارامتر مقاومت فشاری نیز، با توجه به شکل ۸، بیشترین و کمترین مقاومت مربوط به نمونه‌های T-25 و T-100 می‌باشد که به ترتیب برابر ۱۷/۰۳ و ۱۲/۲۲ مگاپاسکال است. چگالی نمونه‌های حاوی درصدهای مختلف تراورتن در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به این نمودار به دلیل ارتباط مستقیم چگالی با وزن مخصوص نمونه‌ها، چگالی نمونه‌های حاوی تراورتن تقریباً ثابت است و اختلاف چندانی با یکدیگر و نمونه شاهد ندارند.

در ادامه، در جدول ۷، بیشترین اختلاف خواص فیزیکی و مکانیکی بتن نفوذپذیر حاوی تراورتن با نمونه شاهد آورده شده است. با توجه به این جدول، مقدار افزایش درصد تخلخل برای نمونه‌های T-25، T-50، T-75 و T-100 نسبت به نمونه شاهد، به ترتیب برابر ۱۹/۶۷، ۲۸/۰۶، ۳۱/۰۶ و ۳۱/۸۹ درصد می‌باشد. به دلیل خلل و فرج موجود در ساختار تراورتن، با افزایش درصد جایگزینی تراورتن، درصد تخلخل افزایش یافته است.

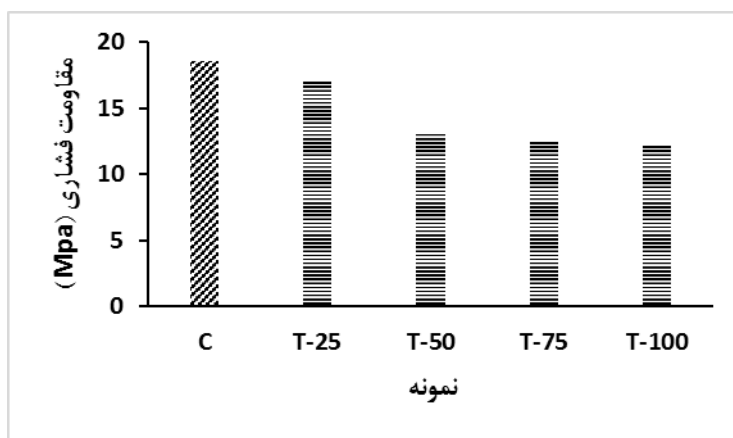
همچنین مشاهده می‌شود که ضریب نفوذپذیری نمونه‌های حاوی تراورتن نسبت به نمونه شاهد بهبود یافته است. ضریب نفوذپذیری نمونه‌ها با جایگزینی ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد تراورتن با سنگ‌دانه اصلی به ترتیب ۲۶/۹۲، ۳۱/۴۴، ۳۲/۱۴ و ۳۲/۱۴ درصد نسبت به نمونه شاهد، افزایش یافته است. با توجه به جدول ۷، با افزایش درصد جایگزینی تراورتن، مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش یافته است. مقاومت فشاری نمونه‌ها با جایگزینی ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد تراورتن با سنگ‌دانه اصلی به ترتیب ۸/۱۴، ۲۸/۸۵، ۳۲/۴۱ و ۳۴/۰۸ درصد نسبت به نمونه شاهد، کاهش یافته است. براساس نتایج حاصل بهترین نمونه از نظر مقاومتی نمونه T-25 می‌باشد که کمترین کاهش را نسبت به نمونه شاهد داشته است. همانطور که در ستون آخر جدول ۷ مشاهده می‌شود، به دلیل نزدیک بودن وزن مخصوص تراورتن (۱/۳۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب) با وزن مخصوص سنگ‌دانه اصلی نمونه‌های بتن متخلخل (۱/۳۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب)، با افزایش درصد جایگزینی تراورتن با سنگ‌دانه بتن متخلخل، چگالی نمونه‌ها تقریباً ثابت است و تغییر چندانی ندارد. همچنین با توجه به جدول ۷ مشاهده می‌شود که با افزایش درصد تخلخل نمونه‌ها مقاومت فشاری کاهش می‌یابد که با نتایج گادیک و همکاران در سال ۲۰۱۴ [۶] مطابقت دارد. ایشان نیز در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که افزایش فضای خالی نمونه‌ها و افزایش تخلخل، باعث کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌شود.



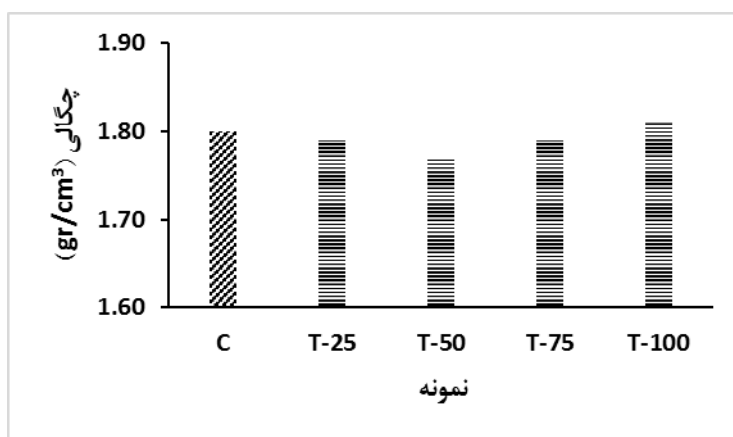
شکل ۶: تغییرات درصد تخلخل نمونه‌های بتن متخلخل حاوی درصدهای مختلف تراورتن



شکل ۷: تغییرات ضریب نفوذپذیری نمونه‌های بتن متخلخل حاوی درصد‌های مختلف تراورتن



شکل ۸: تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتن متخلخل حاوی درصد‌های مختلف تراورتن



شکل ۹: تغییرات چگالی نمونه‌های بتن متخلخل حاوی درصد‌های مختلف تراورتن

جدول ۷: بیشترین اختلاف خواص فیزیکی بتن متخلخل حاوی تراورتن با نمونه شاهد

ردیف	کد آزمایشگاهی	تخلخل (%)	ضریب نفوذپذیری (میلی متر بر ثانیه)	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)
۱	C	-	-	-	-
۲	T-25	+۱۹/۶۷	+۲۶/۹۲	-۸/۱۴	-۰/۵۵
۳	T-50	+۲۸/۰۶	+۳۱/۴۴	-۲۸/۸۵	-۱/۶۶
۴	T-75	+۳۱/۰۶	+۳۲/۱۴	-۳۲/۴۱	-۰/۵۵
۵	T-100	+۳۱/۸۹	+۳۲/۱۴	-۳۴/۰۸	+۰/۵۵

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش به منظور بهبود عملکرد بتن متخلخل، به دلیل خاصیت جذب آب زیاد و مقاومت مناسب تراورتن، از این سنگ رسوبی به عنوان جایگزین سنگدانه اصلی بتن متخلخل استفاده شده است. نتایج به دست آمده عبارتند از:

- با جایگزینی تراورتن، ساختار بتن متخلخل و حذف متناظر سنگدانه اصلی، مقاومت فشاری نمونه‌ها، به دلیل خلل و فرج موجود در ساختمان تراورتن، کاهش می‌یابد.

- به دلیل تخلخل زیاد نمونه‌های بتن متخلخل حاوی جاذب، این نوع بتن برای کاهش حجم رواناب شهری مناسب است.

- مقاومت فشاری نمونه‌ها با جایگزینی ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد تراورتن با سنگدانه اصلی به ترتیب ۸/۱۴، ۲۸/۸۵، ۳۲/۴۱ و ۳۴/۰۸ درصد نسبت به نمونه شاهد، کاهش یافته است.

- بیشترین و کمترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه‌های T-25 و T-100 می‌باشد که به ترتیب برابر ۱۷/۰۳ و ۱۲/۲۲ مگاپاسکال است.

- به دلیل خلل و فرج موجود در ساختار تراورتن، با افزایش درصد جایگزینی تراورتن و حذف متناظر سنگدانه، درصد تخلخل افزایش می‌یابد.

- بیشترین درصد تخلخل مربوط به نمونه‌های T-100 و T-75 می‌باشد که به ترتیب برابر ۲۹/۱۳ و ۲۸/۷۸ درصد است.

- ضریب نفوذپذیری نمونه‌ها با جایگزینی ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد تراورتن با سنگدانه اصلی به ترتیب ۲۶/۹۲، ۳۱/۴۴، ۳۲/۱۴ و ۳۲/۱۴ درصد نسبت به نمونه شاهد، افزایش یافته است.

- براساس نتایج حاصل از این پژوهش، نمونه T-25 را می‌توان به عنوان بهترین نمونه از نظر خواص فیزیکی به منظور استفاده در روسازی معرفی کرد. زیرا علاوه بر این که در این نمونه، ضریب نفوذپذیری و درصد تخلخل نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است، مقاومت فشاری آن نیز ۸/۱۴ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش داشته که نشان دهنده عملکرد مطلوب این نمونه می‌باشد.

- در ادامه پژوهش حاضر، پیشنهاد می‌شود که درصد‌های دیگر جایگزینی تراورتن در نمونه بتن متخلخل مورد آزمایش قرار گیرد. همچنین پیشنهاد می‌شود که روسازی بتن متخلخل حاوی تراورتن، در منطقه‌ای به صورت آزمایشی اجرا شود و عملکرد آن در جمع آوری رواناب شهری بررسی گردد.

## مراجع

- [1] Barbosa, A. E., Fernandes, J. N. and David, L. M. (2012). *Key issues for sustainable urban stormwater management*. Journal of Water Research, Vol. 46, No. 20, pp. 6787-6798.
- [2] ACI Committee 211. (2006). *Guide for Selecting Proportions for No-slump Concrete*. ACI 211.3R Report.
- [3] Henderson, V. (2012). *Evaluation of the performance of pervious concrete pavement in the Canadian climate*. PhD Thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada.
- [4] Collins, K. A., Hunt, W. F. and Hathaway, J. M. (2008). *Hydrologic comparison of four types of permeable pavement and standard asphalt in eastern North Carolina*. Journal of Hydrologic Engineering, Vol. 13, No. 12, pp. 1146-1157.
- [5] Huang, B., Wu, H., Shu, X. and Burdette, E. G. (2010). *Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete*. Construction and Building Materials, Vol. 24, pp. 818-823.
- [6] Gaedicke, C., Marines, A. and Miankodila, F. (2014). *A method for comparing cores and cast cylinders in virgin and recycled aggregate pervious concrete*. Construction and Building Materials, Vol. 52, pp. 494-503.
- [7] Joshaghani, A., Ramezani-pour, A. A., Ataei, O. and Golroo, A. (2015). *Optimizing pervious concrete pavement mixture design by using the Taguchi method*. Construction and Building Materials, Vol. 101, pp. 317-325.
- [8] Li, J., Zhang, Y., Liu, G. and Peng, X. (2017). *Preparation and performance evaluation of an innovative pervious concrete pavement*. Construction and Building Materials, Vol. 138, pp. 479-485.
- [9] Shirgir, B., Hasani, A. and Alizadeh Goodarzi, H. (2011). *The Influence of aggregate gradation on the permeability and mechanical properties of porous concrete*. Modares Civil Engineering Journal. Vol. 11, No. 1, pp. 49-60.
- [10] Khodadoost Gomchi, M. and Pashai Golmorz, L. (2015). *Investigating the Effect of Application of Porous Concrete on Urban Public Lanes in Lake Urmia Basin on Urmia Lake Revival*. Fourth National Conference on New Materials and Structures.
- [11] Teymouri, E., Mousavi, S. F., Karami, H., Farzin, S. and Javaheri-Tehrani, M. (2016). *Experimental investigation of the effect of different additives on characteristics of porous concrete, applicable in urban runoff system*. Transportation Infrastructure Engineering, Vol. 2, No. 2, pp. 51-65.
- [12] Khanlari, Gh., Naseri, F. and Aryafar, N. (2011). *Possibility of Evaluation of Travertine Engineering Properties Using Their Physical Properties (Case Study of Sarab Mine)*. Second Seminar of Earth Sciences, Islamic Azad University, Ashtian Branch.
- [13] www.elimastone.com.
- [14] ASTM C1754/C1754M-12, (2012). *Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete*. ASTM International, USA.
- [15] British Standard, Testing Concrete, (1983). *Method for Making Test Cubes from Fresh Concrete*. BS 1881, Part 108.