

## Experimental investigation on effect of using fine \_ grained and dolomite powder on physical characteristics of porous concrete separately

Saeed Farzin<sup>\*1</sup>, Mehran Manouchehri<sup>2</sup>, Hojat Karami<sup>1</sup>, Seyed Farhad Mousavi<sup>3</sup>

1-Associate professor, Water and hydraulic structures Department, Faculty of Civil Engineering, Semnan University

2- Ms.c student of civil and water resources management, Faculty of Civil Engineering, Semnan University

3- Professor, Water and hydraulic structures Department, Faculty of Civil Engineering, Semnan University

### ABSTRACT

The use of porous concrete system in urban areas as a modern and applied management approach during rainfall can prevent the problems by rapid outflow of the surface runoff. In this research, effect of replacing dolomite minerals in two modes of fine-grained and powder, as part of the aggregates or part of the cement, respectively, is investigated on the structural properties of porous concrete. In order to use porous concrete in urban runoff management system, the compressive strength and porosity should be considered. Two series of samples were made for structural experiments. The 15×15×15 cm samples were designed to test the compressive strength and the 10×10×10 cm samples were made to determine the porosity percentage. Statistical analyses of the laboratory results were performed using SPSS software. According to the results, replacement of dolomite powder for cement did not have significant effect on compressive strength and porosity. On the other hand, fine-grained dolomite has greatly improved the compressive strength. In addition to increasing the compressive strength, the porosity was increased due to the mechanism of particle placement in samples receiving 10% fine aggregates. Also adding 30% fine grained, increased compressive strength by 162%. This is while the porosity percentage has fallen sharply.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 27 January 2019

**Revise Date:** 16 March 2019

**Accept Date:** 23 April 2019

### Keywords:

Urban runoff

Porous concrete

Dolomite

Compressive strength

Fine-grained

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.169233.1770

\*Corresponding author: Saeed Farzin

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

## بررسی آزمایشگاهی تاثیر استفاده از ریزدانه و پودر دولومیت به صورت مجزا بر خواص فیزیکی بتن متخلخل

سعید فرزین\*<sup>۱</sup>، مهران منوچهری نیا<sup>۲</sup>، حجت کرمی<sup>۱</sup>، فرهاد موسوی<sup>۳</sup>

۱- استادیار گروه مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران مدیریت منابع آب /دانشکده مهندسی عمران/دانشگاه سمنان/سمنان/ایران

۳- استاد گروه مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

### چکیده

امروزه، استفاده از بتن متخلخل در سیستم مدیریت رواناب شهری افزایش چشم گیری پیدا کرده است. تخلخل مناسب جهت زهکشی و انتقال به موقع آب از خصوصیات اصلی سیستم روسازی متخلخل می-باشد. داشتن مقاومت کافی متناسب با محل استفاده سیستم بتن متخلخل باید در طراحی مد نظر قرار گیرد. در این پژوهش، سعی شده با جایگزین کردن سیمان با پودر دولومیت در نسبت های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد، تخلخل ثابت و مقاومت افزایش داده شود. همچنین، تغییرات تخلخل و مقاومت فشاری با جایگزین کردن ذرات ریزدانه با ابعاد ۲/۳۶ میلی متر، مورد بررسی قرار داده شده است. بر اساس نتایج، مقاومت فشاری به دست آمده برای نمونه های دارای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد دولومیت به ترتیب ۷/۶۳، ۶/۷۷ و ۸/۳۷ مگاپاسکال بود که در مقایسه با نمونه شاهد (۷/۵۶ مگاپاسکال) افزایش چشم گیری نداشته است. جایگزین کردن ریزدانه، مقاومت فشاری را در حدود ۱۶۲٪ در نمونه دارای ۳۰٪ ریزدانه دولومیت، نسبت به نمونه شاهد بهبود داده است. افزودن ۱۰٪ ریزدانه عبور کرده از الک شماره ۸ و مانده روی الک شماره ۱۶، به دلیل ایجاد فضا بین سنگدانه های درشت دانه، تخلخل را ۷۷٪ افزایش داده و همچنین مقاومت فشاری ۹۲٪ بهبود پیدا کرده است. افزودن ۲۰ و ۳۰ درصد ریزدانه به مخلوط، مقاومت فشاری را به ترتیب ۱۰۹٪ و ۱۶۲٪ افزایش داده است. باتوجه به تخلخل نمونه دارای ۳۰٪ ریزدانه، کاملاً مشخص است که افزودن ریزدانه باعث کاهش تخلخل و بهبود مقاومت فشاری می گردد.

کلمات کلیدی: رواناب شهری، بتن متخلخل، دولومیت، مقاومت فشاری، ریزدانه

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/JSCE.2019.169233.1770	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.169233.1770	۱۴۰۰/۰۲/۳۰	۱۳۹۸/۰۲/۰۳	۱۳۹۸/۰۲/۰۳	۱۳۹۷/۱۲/۲۵	۱۳۹۷/۱۱/۰۷
سعید فرزین saeed.farzin@semnan.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

تفاوت بتن متخلخل با بتن معمولی در میزان سنگدانه می‌باشد. به این ترتیب که اگر در بتن معمولی به جای چندین اندازه مختلف سنگدانه، تنها از یک اندازه مشخص (عمدتاً درشت‌دانه) استفاده شود، بتن با تخلخل زیاد، یا به عبارتی، بتن اسفنجی ایجاد می‌شود. تخلخل زیاد باعث می‌شود که آب بتواند به راحتی از بتن عبور کرده، و زمینه استفاده این نوع بتن را در بسیاری از فعالیت‌های ساختمانی فراهم آورد [۱]. بتن متخلخل دارای مزایای فراوانی مانند وزن کم، هزینه کم ساخت و خودتراکم بودن می‌باشد. مهم‌ترین ویژگی که این نوع بتن را متمایز می‌کند و در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته، زیست‌محیطی بودن آن می‌باشد [۲].

امروزه، در بیشتر کشورهای دنیا، انسان‌ها با بحران کم‌آبی مواجه هستند و به اجبار دست به استحصال آب از منابع آب زیرزمینی زده‌اند، که این امر موجب افت بسیار زیاد تراز آب زیرزمینی شده است. استفاده از بتن متخلخل به عنوان پوشش معابر در مناطق شهری، که به دلیل وجود ساختمان‌ها و معابر نفوذ ناپذیر شده‌اند، می‌تواند با انتقال آب به زمین، موجب تغذیه آب زیرزمینی شود [۳]. به طور کلی، سه ویژگی اصلی سیستم بتن متخلخل که در هنگام استفاده در مناطق شهری به عنوان کفپوش باید در نظر گرفته شود عبارتند از میزان تخلخل، مقاومت فشاری و توانایی کاهش و یا حذف فلزات سنگین رواناب‌های شهری مانند مس، سرب، کادمیوم و روی [۴]. ورود فلزات سنگین به سفره‌های آب زیرزمینی بر کیفیت آنها تأثیر می‌گذارد. به همین دلیل، در ساخت بتن متخلخل باید از موادی استفاده شود که تا حد امکان بتواند مقادیر این آلاینده‌ها را کاهش دهد. بتن متخلخل علاوه بر کاهش و یا حذف فلزات سنگین، باید بتواند تا حد قابل قبولی، دیگر پارامترهای کیفی آب را نیز بهبود بخشد. از مهم‌ترین این پارامترها می‌توان به BOD، COD، TDS، EC، PH و کدورت اشاره کرد [۵].

آزاد (۱۳۹۶) با استفاده از ژئولیت، متاکائولن، دولومیت و پومیس در طرح‌های اختلاط مختلف توانست تا حد مطلوبی مقادیر COD را بهبود بخشد [۶]. علاوه بر توانایی بهبود پارامترهای کیفی رواناب و فاضلاب، بتن متخلخل باید دارای بیشترین حجم حفرات باشد. مناسب‌ترین درصد تخلخل بر طبق استانداردهای آیین‌نامه بتن آمریکا و تحقیقات سایر محققین در حدود ۲۰ تا ۲۲ درصد تعیین شده است [۷ و ۸]. هرچه درصد خلل و فرج درشت (ماکروسکوپی) بیشتر باشد، نفوذپذیری بیشتر خواهد شد [۹]. برای رسیدن به بیشترین مقدار نفوذپذیری باید از اندازه سنگدانه‌های بزرگ‌تری استفاده شود. اما به دلیل حذف ریزدانه، مقاومت فشاری بتن متخلخل به شدت کاهش خواهد یافت [۱۰]. صرف نظر از اینکه بتن سبک برای چه هدفی ساخته شده است، باید دارای مقاومت فشاری قابل قبولی باشد. پارامتر مقاومت فشاری در بتن با تخلخل زیاد و بتن معمولی تابعی از نوع سنگدانه، شرایط عمل‌آوری و نسبت آب به سیمان می‌باشد. در بتن معمولی افزایش نسبت آب به سیمان اغلب باعث کاهش مقاومت فشاری می‌گردد. ولی برای بتن متخلخل با تغییر نرخ آب به سیمان از ۲۵٪ به ۳۵٪، تغییر قابل توجهی در مقاومت فشاری ایجاد نمی‌شود [۱۱]. مقاومت این نوع بتن به دلیل داشتن فضای خالی، نبودن اتصال مناسب بین سنگدانه‌ها و ضعیف بودن چسبندگی بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها، از بتن معمولی کمتر است. از این رو استفاده از بتن متخلخل در روسازی با ترافیک کم مناسب خواهد بود [۱۲].

امروزه، افزودن سبکدانه‌ها در بتن متخلخل به منظور کاهش هزینه و بالابردن مقاومت فشاری افزایش چشم‌گیری داشته است [۱۳]. در تحقیقی، دوست‌محمدی و همکاران (۱۳۹۷) با ساخت بتن متخلخل حاوی پومیس، ژئولیت و اسکرپا به بررسی تغییرات مقاومت فشاری و درصد تخلخل طرح‌های اختلاط مختلف بتن متخلخل پرداختند. نتایج نشان داد که در تمامی نمونه‌هایی که سبک‌دانه جایگزین بخشی از سنگدانه شده بود با کاهش مقاومت شدید مواجه شدند. اما تخلخل نسبت به نمونه شاهد در تمامی موارد افزایش داشته است [۱۴].

یانگ و همکاران (۲۰۰۸) تأثیر اندازه مختلف سنگدانه‌ها با کمترین عیار سیمان روی مقاومت فشاری بتن متخلخل را بررسی کردند. طبق نتایج به‌دست آمده، مناسب‌ترین اندازه سنگدانه برای استفاده در بتن متخلخل ۹/۵ الی ۴/۷۵ میلی‌متر می‌باشد [۱۵]. لیان و ژوگ (۲۰۱۰) با تغییر در مقادیر سیمان، نسبت آب به سیمان، میکروسیلیس و اندازه مصالح سنگی، تلاش کردند تا مناسب‌ترین بتن متخلخل را ارائه دهند. نتایج ایشان نشان داد که مهم‌ترین عامل در تغییر مقاومت فشاری بتن متخلخل، نسبت آب به سیمان می‌باشد [۱۶]. کوسیچ و همکاران (۲۰۱۵) در مورد تأثیر دولومیت سنگدانه‌ای و سرباره کوره ذوب آهن روی خواص سازه‌ای بتن متخلخل تحقیقاتی انجام

دادند. نتایج ایشان حاکی از عملکرد مناسب دولومیت و خاکستر کوره ذوب آهن روی مقاومت فشاری و خمشی بتن متخلخل بود [۱۷]. با مطالعه تحقیقات گذشته این نکته قابل درک می‌باشد که بتن متخلخل کاربردهای فراوانی داشته و امروزه به منظور بهبود کارایی و عملکرد این سیستم، کانی‌های مختلفی به شکل پودر، ریزدانه و درشت‌دانه در ساخت آن به کار می‌رود. از جمله این کانی‌ها می‌توان به زئولیت، دولومیت، متاکائولن و پومیس اشاره کرد. هدف تحقیق حاضر یافتن نمونه‌ای از بتن متخلخل با بیشترین مقدار تخلخل و مقاومت می‌باشد که بتوان با ضریب اطمینان زیاد در پیاده‌روها به عنوان کفپوش مورد استفاده قرار گیرد. از این رو، در این پژوهش از پودر دولومیت و ریزدانه با نسبت‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد به عنوان جایگزین بخشی از سیمان و سنگدانه استفاده شده است. به این ترتیب که پس از مشخص شدن وزن سیمان برای هر طرح اختلاط، به ترتیب ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد از وزن آن را کاسته و با دولومیت جایگزین می‌شود.

در این پژوهش سعی شده است با استفاده از ماده معدنی دولومیت در اندازه‌های ریزتر از ۷۵ میکرون (به شکل پودر) و عبور کرده از الک شماره ۸ با ابعاد ۲/۳۶ میلی‌متر و مانده روی الک شماره ۱۶ با ابعاد ۱/۱۸ میلی‌متر در بتن متخلخل، خواص سازه‌ای آن مانند مقاومت فشاری، تخلخل و نفوذپذیری با یکدیگر مقایسه شوند. پیش بینی می‌شود افزودن ریزدانه دولومیت به مخلوط بتن متخلخل که از طیف سنگدانه‌های ۴/۷۵ تا ۹/۵ میلی‌متر ساخته شده است، باعث افزایش مقاومت فشاری شده و کاهش نفوذپذیری را به همراه داشته باشد. به همین دلیل از پودر دولومیت به عنوان جایگزینی از سیمان برای جلوگیری از کاهش نفوذپذیری استفاده شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مشخصات مصالح مصرفی

#### الف) سنگدانه

مصالح سنگی مورد استفاده در این پژوهش از معادن شن و ماسه سمنان تهیه شده است. با استفاده از الک‌های استاندارد اشتو عبوری از الک شمار ۳/۸ اینچ با اندازه ۹/۵ میلی‌متر و مانده روی الک شماره ۴ با اندازه ۴/۷۵ میلی‌متر برای ساخت نمونه‌ها در نظر گرفته شد. مناسب‌ترین طیف دانه بندی سنگدانه برای استفاده در بتن متخلخل که بیشترین مقاومت و تخلخل را حاصل شود ۴/۷۵ الی ۹/۵ میلی‌متر می‌باشد [۱۸ و ۱۹].



شکل (۱) نمایی از سنگ‌دانه‌های مصرفی

#### ب) سیمان

برای ساخت نمونه‌های بتن متخلخل از سیمان پرتلند تیپ ۲ کارخانه سیمان شاهرود استفاده شده است که مشخصات شیمیایی اصلی آن در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: آنالیز شیمیایی ترکیبات سیمان پرتلند تیپ ۲ شاهرود

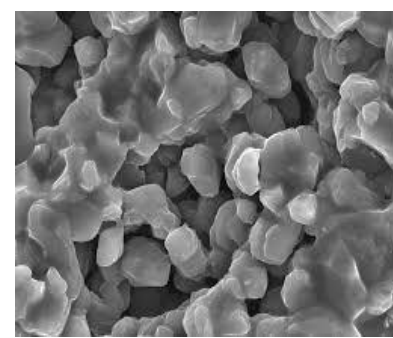
ترکیب	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
درصد	۲۱/۱۱	۴/۴۲	۳/۹۶	۶۳/۳۶	۱/۵۱	۲/۶۱	۰/۳۸	۰/۵۱

## ج) دولومیت

دولومیت با فرمول شیمیایی  $\text{Ca Mg}(\text{CO}_3)_2$  یکی از فراوانترین کانی‌ها در پوسته زمین می‌باشد که در اکثر نقاط دنیا به سهولت یافت می‌شود. علاوه بر فراوانی این کانی، یکی دیگر از مزایای آن قیمت کم در بازار می‌باشد. در این پژوهش، از سنگدانه دولومیت با اندازه عبوری از الک شماره ۴ و مانده روی الک شماره ۸ به عنوان ریزدانه و از پودر دولومیت، مش ۳۵۰ به عنوان جایگزین سیمان استفاده شده است. پودر دولومیت از آسیاب شدن سنگدانه‌های دولومیت به دست می‌آید. طبق تحقیقات میخایلووا و همکاران (۲۰۱۳) افزودن پودر دولومیت به عنوان جایگزین سیمان باعث افزایش مقاومت فشاری بتن معمولی شده است [۲۰]. مقادیر عناصر تشکیل دهنده کانی دولومیت در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲: آنالیز شیمیایی ترکیبات دولومیت

ترکیب	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	LiO
درصد وزنی	۱/۵۹	۰/۲۵	۲۱/۱	۰/۱۱	۲۹/۸	۰/۰۶	۴۹/۹



شکل (۲) از چپ به راست پودر، سنگدانه، و تصویر SEM از دولومیت

## ۲-۲- طرح اختلاط بتن متخلخل

طرح اختلاط مورد استفاده در این پژوهش بر اساس استاندارد ACI 211/3R در نظر گرفته شد [۲۱]. همچنین برای تعیین درصد جذب آب مصالح سنگی، وزن مخصوص و جذب آب سنگدانه‌ها از استاندارد C127 ASTM استفاده شده است. درصد جذب آب برای سنگدانه‌ها ۰/۴ درصد و چگالی آنها ۲/۶۵ به دست آمده است. [۲۲].

جدول ۳: طرح اختلاط و علائم اختصاری مواد

طرح اختلاط	علامت اختصاری	مقدار سنگدانه (kg)	مقدار سیمان (kg)	W/C	ریزدانه (kg)	پودر (kg)
شاهد	G	۱۴۰۰	۳۳۰	۰/۳۵	۰	۰
ریزدانه دولومیت ۱۰	Da-10	۱۲۶۰	۳۳۰	۰/۳۵	۱۴۰	۰
ریزدانه دولومیت ۲۰	Da-20	۱۱۲۰	۳۳۰	۰/۳۵	۲۸۰	۰
ریزدانه دولومیت ۳۰	Da-30	۹۸۰	۳۳۰	۰/۳۵	۴۲۰	۰
پودر دولومیت ۱۰	D10	۱۴۰۰	۲۹۷	۰/۳۵	۰	۳۳
پودر دولومیت ۲۰	D20	۱۴۰۰	۲۶۴	۰/۳۵	۰	۶۶
پودر دولومیت ۳۰	D30	۱۴۰۰	۲۳۱	۰/۳۵	۰	۹۹



یکی از عوامل مهم در طرح اختلاط بتن متخلخل و یا بتن معمولی نسبت آب به سیمان می باشد. پایین نگه داشتن این نسبت باعث افزایش مقاومت فشاری می شود [۲۳]. در این پژوهش برای تمامی نمونه ها این نسبت ۳۵٪ می باشد. حتی المقدور سعی شد، تا نسبت آب به سیمان با توجه به درصد جذب آب مصالح سنگی ثابت نگه داشته شود. مناسب ترین رطوبت سنگدانه برای استفاده در مخلوط بتن SSD که رطوبت درحالی است که سنگدانه اشباع می باشد ولی سطح آن باید خشک باشد.

## ۲-۳- دستگاه اندازه گیری نفوذپذیری

به منظور ایجاد جریان دویعدی روی نمونه های بتن متخلخل از یک کانال چوبی که دارای ۱۳۰ سانتی متر طول و ۱۱ سانتی متر عرض و یک محفظه به طول ۳۱ سانتی متر (جهت استقرار سه نمونه  $10 \times 10 \times 10$  سانتی متر بتن متخلخل) بود، استفاده شد. در انتهای محل قرارگیری نمونه ها، یک خروجی جهت اندازه گیری دبی عبور کرده از داخل نمونه ها تعبیه شد. برای جلوگیری از نشت آب، محل اتصال قطعات چوبی کانال به وسیله چسب آکوارיום به دقت نفوذناپذیر شدند. اجزای کانال و محل قرارگیری نمونه ها در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: سیستم اندازه گیری نفوذپذیری نمونه های بتن متخلخل

## ۲-۴- آزمایش نفوذپذیری

برای شبیه سازی بهتر روانایی که روی سیستم بتن متخلخل جاری می شود، در این تحقیق، مشابه با آزمایش هاسلباخ و همکاران (۲۰۰۵) از جریان افقی استفاده شد [۲۴]. برای انجام آزمایش نفوذپذیری با کانال افقی، ابتدا نمونه ها به صورت سه تایی در کنار هم قرار داده شدند. سپس برای جلوگیری از نشت آب به کناره نمونه ها، به دلیل اختلاف ابعاد نمونه ها و محفظه، دور تا دور بلوک ها با پلاستوفوم عایق بندی شد.

در مرحله بعد، نمونه ها داخل محفظه قرار گرفتند. سپس جریان با دبی ثابت روی سیستم متخلخل ایجاد شد. دو سطل مدرج برای اندازه گیری دبی عبور کرده از روی نمونه ها و دبی نفوذ کرده به داخل نمونه ها به ترتیب در انتهای دستگاه و در زیر محل قرارگیری نمونه ها تعبیه گردید که در شکل ۳ نشان داده شده اند. با مشخص بودن دبی ورودی و اندازه گیری حجم آب خروجی در زمان مشخص، مقادیر حجمی آب نفوذ کرده به داخل سیستم متخلخل قابل محاسبه می باشد. در پایان، با توجه به معادله (۱)، مقدار ضریب نفوذپذیری (K) برای هر کدام از طرح های اختلاط محاسبه گردید:

$$K = \frac{V}{TA} \quad (1)$$

که،  $V$  حجم آب اندازه‌گیری شده در داخل سطل مدرج است که در زیر محفظه نمونه‌ها قرار دارد (بر حسب لیتر)،  $T$  مدت زمانی است که هر دو شیر ورودی و خروجی باز باشند (ثانیه) و  $A$  سطح مقطع خیس شده نمونه‌ها (سانتی‌متر مربع) می‌باشد.

## ۲-۵- آزمایش تخلخل

تعیین تخلخل نمونه‌های بتن متخلخل مطابق با استاندارد ASTM C1754 انجام گرفت [۲۵]. جهت انجام آزمایش تخلخل، از هر طرح اختلاط سه نمونه  $10 \times 10 \times 10$  سانتی‌متر ساخته شد. هر سه نمونه به مدت ۲۴ ساعت در آون قرار داده شدند. پس از خشک شدن کامل نمونه‌ها، وزن خشک آن‌ها که در معادله (۲) با  $W_2$  مشخص شده، محاسبه شد. سپس، با استفاده از ترازوی مخصوص، وزن غوطه‌وری ( $W_1$ ) اندازه‌گیری شد. با مشخص بودن چگالی آب، درصد تخلخل از معادله (۲) محاسبه می‌شود:

$$A_t = \left(1 - \frac{W_2 - W_1}{\rho_w}\right) \times 100 \quad (2)$$

## ۲-۶- مقاومت فشاری

مقاومت فشاری یکی از مهم‌ترین خواص فیزیکی بتن متخلخل می‌باشد. برای انجام آزمایش مقاومت فشاری بر طبق استاندارد BS1881 از نمونه‌های  $15 \times 15 \times 15$  سانتی‌متر استفاده شد. به منظور ساخت نمونه‌های بتن متخلخل، ابتدا سنگدانه‌ها با رطوبت اشباع با سطح خشک SSD به داخل میکسر ریخته شدند و پس از اضافه نمودن پودر سیمان و یا دولومیت به مدت سه دقیقه با هم ترکیب شدند.

حجم آب محاسبه شده با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ در مرحله آخر به داخل میکسر ریخته شد و مواد به مدت دو دقیقه با یکدیگر مخلوط شدند. پس از اتمام فرایند اختلاط، مواد حاصله در سه مرحله داخل قالب‌ها ریخته شدند و در هر مرحله بر طبق استاندارد به وسیله میله مخصوص با ۲۵ ضربه متراکم شدند. پس از گذشت ۲۴ ساعت، نمونه‌ها از داخل قالب بیرون آورده شده و به مدت ۲۸ روز جهت به دست آوردن مقاومت فشاری ۲۸ روزه در داخل آب قرار گرفتند. پس از اتمام مدت عمل‌آوری، به منظور اندازه‌گیری مقاومت فشاری، بلوک‌های  $15 \times 15 \times 15$  سانتی‌متر در داخل جک فشاری مخصوص قرار گرفتند. شکل (۵) نمایانگر دستگاه مقاومت فشاری استفاده شده می‌باشد.



شکل ۵: به ترتیب از راست: ترازو، جک فشاری و نمونه‌ها در زمان عمل‌آوری

## ۳- نتایج و بحث

## ۳-۱- تأثیر افزودنی‌ها بر مقاومت فشاری

همانطور که پیشتر گفته شد، در این تحقیق، پودر دولومیت با درصدهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ به صورت وزنی جایگزین سیمان مورد نیاز برای ساخت نمونه‌های  $15 \times 15 \times 15$  سانتی‌متر شد تا تأثیر این کانی روی مقاومت و نفوذپذیری بتن متخلخل بررسی گردد. همچنین، در طرح‌های اختلاط دیگر، تأثیر افزودن درصدهای مشابهی از ریزدانه دولومیت (عبوری از الک شماره ۸) بر تغییرات نفوذپذیری و مقاومت مورد بحث قرار گرفت.

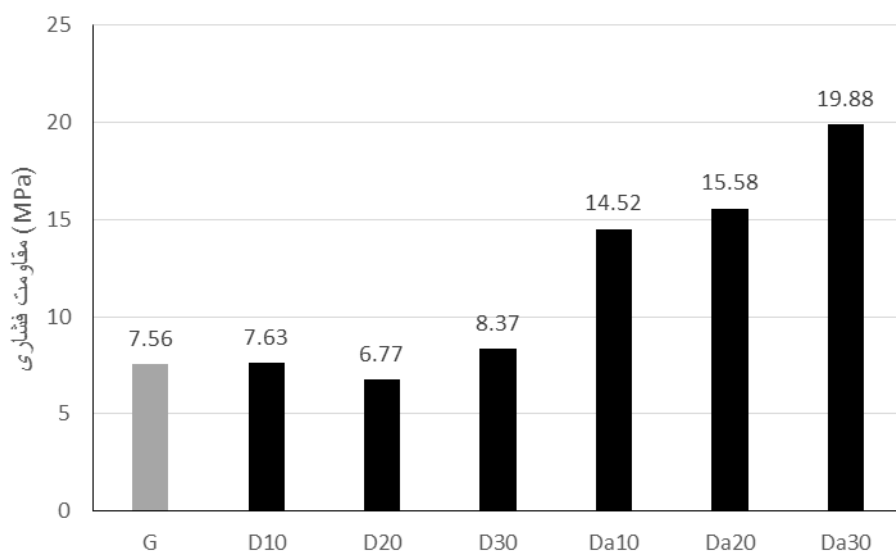
برای تشخیص روند کاهش و یا افزایش مقاومت فشاری به‌واسطه افزودنی‌ها، تعداد سه نمونه مکعبی  $15 \times 15 \times 15$  سانتی‌متر بدون جاذب به عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شد. با توجه به نتایج به‌دست آمده از آزمایش جک فشاری استاندارد، تأثیر افزودن پودر و ریزدانه دولومیت در شکل (۶) آورده شده است. در نمونه‌هایی که دولومیت به صورت پودر به‌کار رفته، زمانی که ۱۰٪ پودر جایگزین سیمان شده است مقاومت فشاری برای نمونه مکعبی  $7/66$  مگاپاسکال می‌باشد، در مقایسه با نمونه شاهد با  $7/56$  مگاپاسکال،  $1/3$ ٪ افزایش پیدا کرده است. برطبق نتایج به‌دست آمده و شکل (۶)، نمونه D20 با  $1/0$ ٪ کاهش مواجه شده است که این کاهش ممکن است به دلیل خطاهای انسانی به‌وجود آمده باشد، چرا که نمونه دارای  $3/0$ ٪ دولومیت با مقاومت فشاری  $8/37$  مگاپاسکال نسبت به نمونه شاهد، افزایشی  $11$  درصدی داشته است. با توجه به نمونه‌های D10 و D20 می‌توان اعلام کرد که جایگزین نمودن دولومیت به صورت پودر به جای سیمان، باعث افزایش قابل توجه مقاومت فشاری نشده است.

با دانستن این موضوع که حذف ریزدانه از بتن متخلخل کاهش شدید مقاومت فشاری را به دنبال خواهد داشت، افزایش ریزدانه نیز به طور حتم باید باعث بالارفتن مقاومت فشاری گردد. در این خصوص در تحقیق حاضر، دولومیت ریزدانه عبوری از الک شماره ۸ به عنوان بخشی از سنگدانه با نسبت‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد به مخلوط بتن اضافه شد، و تغییرات مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد مورد بحث قرار گرفت. در شکل (۶) کاملاً واضح است که در نمونه Da-10 تنها با افزودن  $1/0$ ٪ ریزدانه دولومیت، مقاومت فشاری  $9/2$ ٪ افزایش یافته و از  $7/56$  مگاپاسکال برای نمونه شاهد به  $14/52$  مگاپاسکال رسیده است. این افزایش می‌تواند به دلیل سختی سنگدانه دولومیت و مهم‌تر از آن پر شدن بخشی از فضاهای خالی بتن متخلخل باشد.

زمانی که از  $2/0$ ٪ ریزدانه استفاده شده است مقاومت فشاری حاصل شده برای نمونه Da-20 با افزایش چشم‌گیر نسبت به نمونه شاهد، برابر با  $15/85$  مگاپاسکال گردید. این مقدار در مقایسه با نمونه شاهد افزایشی بیش از  $100$  درصد (حدود  $109$ ٪) داشته است. با توجه به افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های Da-20 و Da-10 در مقایسه با نمونه شاهد (G)، نرخ این افزایش در این دو نمونه نسبت به یکدیگر بسیار ناچیز بوده است. به طوری که با افزایش  $1/0$ ٪ ریزدانه در نمونه Da-10 تنها در حدود  $1$ ٪ افزایش مقاومت فشاری مشاهده شده است. همچنین، با توجه به شکل (۶) برای نمونه Da-30 بیشترین مقدار مقاومت فشاری ( $19/87$  مگاپاسکال) مشاهده شد. این نمونه نسبت به نمونه G با افزایش بیش از یک برابر و در حدود  $162$ ٪ بیشترین نرخ افزایش مقاومت فشاری را به خود اختصاص داد. با دقت بر نمودارها و نتایج به‌دست آمده به سهولت می‌توان درک کرد که افزودن ریزدانه باعث افزایش بسیار زیاد مقاومت فشاری شده، که این امر ممکن است سبب کاهش نفوذپذیری، که آن هم یکی از ویژگی‌های بتن متخلخل می‌باشد، گردد. لذا، در بخش بعدی، روند تغییرات نفوذپذیری با افزودن ریزدانه به بتن متخلخل مورد بحث قرار می‌گیرد.

نتایج تحلیل آماری با استفاده از SPSS در جدول (۴) آورده شده است. با توجه به سطح معنی‌داری، یا به اختصار Sig، کمتر از  $0/5$ ، فرض همگنی میانگین‌ها با اطمینان بیش از  $95$ ٪ رد می‌شود. این بدین معنی می‌باشد که افزودن ریزدانه به نمونه‌های بتن متخلخل با اطمینان  $95$ ٪ باعث افزایش مقاومت فشاری می‌گردد.





شکل ۶: تغییرات مقاومت فشاری طرح‌های اختلاط

جدول ۴: نتایج تحلیل SPSS مقاومت فشاری

## Independent Samples Test

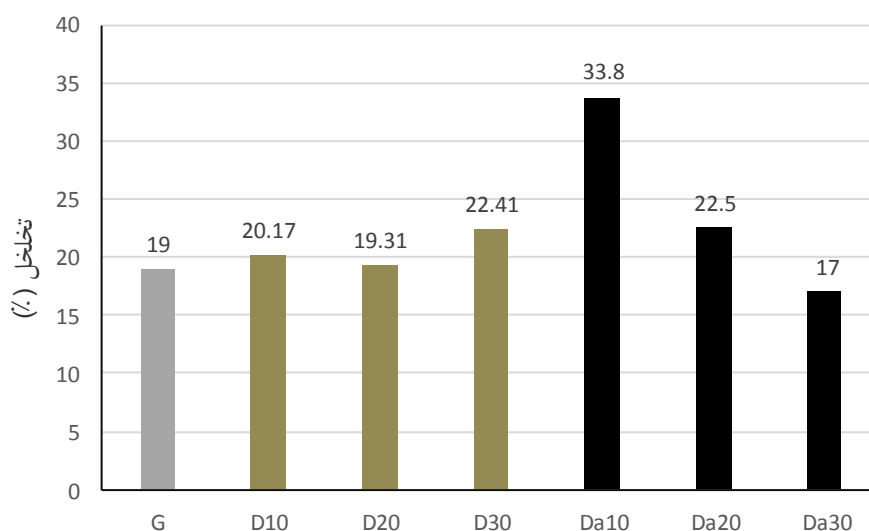
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means				
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference
افزودنی	Equal variances assumed	۵/۰۰۰	۰/۰۷۵	-۵/۰۰۰	۴	۰/۰۰۶	-۹/۰۷۰۰۰	۱/۰۰۰۰
	Equal variances not assumed			-۵/۰۰۰	۲/۰۰۰	۰/۰۲۴	-۹/۰۷۰۰۰	۱/۰۰۰۰

## ۳-۲- تأثیر افزودنی‌ها بر تخلخل

علاوه بر مقاومت فشاری، پارامتر دیگری که بیشترین حد آن در سیستم متخلخل انتظار می‌رود، تخلخل می‌باشد. تخلخل دارای رابطه مستقیم با نفوذپذیری می‌باشد. در این تحقیق، سعی شده تا با درصد‌های مختلف ریزدانه و پودر دولومیت مناسب‌ترین نمونه که از نظر مقاومت فشاری و تخلخل در بیشترین حد خود قرار دارد انتخاب شود. به همین خاطر روند تغییرات تخلخل نسبت به افزایش پودر دولومیت و ریزدانه دولومیت در شکل‌های ۷ و ۸ آورده شده است. نمونه شاهد که از سنگدانه‌های طیف ۴/۷۵ تا ۱۲/۵ میلی‌متر ساخته شده، دارای ۱۹٪ تخلخل می‌باشد. با توجه به ثابت بودن اندازه سنگدانه‌ها در تمام طرح‌های اختلاط، انتظار می‌رود در نمونه‌هایی که پودر دولومیت به عنوان جایگزین سیمان استفاده شد، تخلخل برای تمامی طرح‌های اختلاط تقریباً یکسان باشد. اما با توجه به شکل ۷، درصد حفرات برای نمونه D10 در حدود ۲۰/۱۷ می‌باشد که تقریباً ۵٪ نسبت به نمونه G بیشتر شده است. عدم تراکم یکسان به دلیل شرایط آزمایشگاهی را می‌توان به عنوان عاملی برای افزایش تخلخل نمونه D10 در نظر گرفت. نمونه D20 با تخلخل ۱۶/۳۱ درصد نسبت به نمونه شاهد حدود ۳٪ کاهش داشته است. در فرایند اختلاط، همواره سعی بر این بود که نسبت آب به سیمان ثابت نگه داشته شود. از این رو، در مواردی، افزودن آب باعث افزایش شیره سیمان شده و کاهش تخلخل را به دنبال داشته است. در نمونه D30 نیز افزایش تخلخل مشاهده می‌شود. با دقت به نمودار، عدد ثبت شده برای نمونه D30 برابر است با ۲۲/۴۱ درصد که این مقدار نسبت به نمونه شاهد ۳/۴۱ واحد، معادل ۱۷٪، افزایش داشته است. همانطور که پیشتر گفته شد، با توجه به بازه سنگدانه مصرفی، افزایش و یا کاهش تخلخل ممکن است دلایلی از قبیل خطای انسانی، تفاوت در میزان تراکم و افزایش شیره بتن موجب تغییر درصد‌های تخلخل گردیده است.

با توجه به شکل ۷، بیشترین مقدار تخلخل مشاهده شده در این تحقیق ۳۳/۸ درصد می‌باشد که مرتبط است با نمونه Da-10، که ۷۷٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته است. کاهش ۱۰٪ وزنی درشت‌دانه و جایگزین کردن ۱۰٪ ریزدانه، فضای خالی بسیار مناسبی در بین سنگدانه‌ها ایجاد نموده که باعث افزایش چشم‌گیر درصد تخلخل شده است. همچنین، استفاده از ۲۰٪ ریزدانه در نمونه‌ها، افزایش تخلخل را به دنبال داشته است. به گونه‌ای که در Da-20، ۱۷٪ افزایش تخلخل نسبت به G مشاهده می‌شود. اما نسبت به طرح اختلاط قبلی، یعنی جایی که ۱۰٪ ریزدانه جایگزین شد، حدود ۵۰٪ کاهش تخلخل داشته است. کاهش فضای خالی به واسطه افزودن ۱۰٪ ریزدانه بیشتر، می‌تواند یکی از دلایل کاهش تخلخل باشد. در Da-30، کاهش منافذ به واسطه ریزدانه به قدری بوده که تخلخل در این نمونه از مقدار تخلخل نمونه شاهد حدود دو واحد کمتر به دست آمده است.

تخلخل به دست آمده برای نمونه ساخته شده با ۳۰٪ ریزدانه ۱۷٪ بوده است که این عدد نشان دهنده پرشدن حفرات خالی بین درشت‌دانه‌ها در بتن متخلخل می‌باشد. نتایج به دست آمده از شکل ۷ حاکی از این موضوع می‌باشد که وجود ۱۰٪ ریزدانه عبوری از الک شماره ۸ با قرارگیری در اطراف درشت‌دانه‌ها باعث به وجود آمدن فضای خالی بین آن‌ها شده، و با افزودن ۱۰٪ و ۲۰٪ ریزدانه دولومیت، حفرات خالی پر گردیده و باعث کاهش درصد تخلخل در نمونه‌های Da-20 و Da-30 شده است. با دقت در نتایج جدول ۵ و به دست آمدن سطح معنی‌داری کمتر از ۰/۵، واضح است که میانگین دو گروه شامل ریزدانه و پودر دولومیت دارای تفاوت معنی‌داری با یکدیگر می‌باشند و با اطمینان بیش از ۹۵٪ افزودن ریزدانه به مخلوط بتن باعث تغییر تخلخل شده است.



شکل ۷: مقایسه تأثیر افزودنی‌ها بر درصد تخلخل

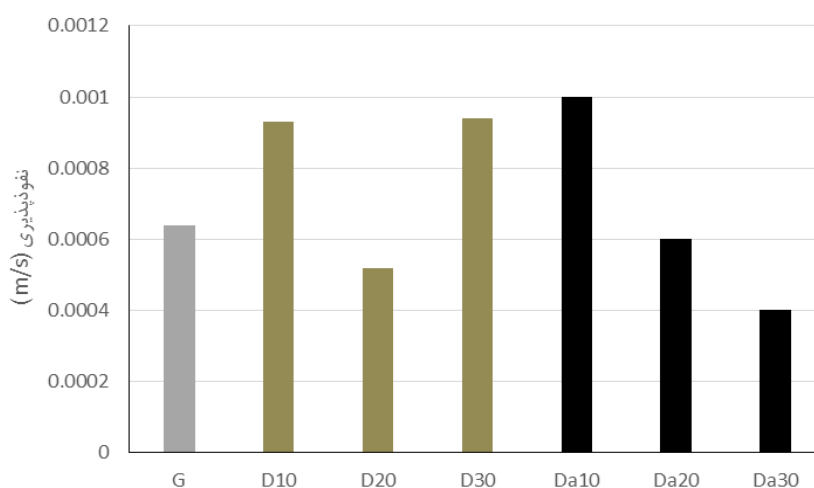
جدول ۵: نتایج تحلیل SPSS تخلخل  
Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means				
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference
افزودنی	Equal variances assumed	۵/۰۰۰	۰/۰۸۹	-۵/۰۰۰	۴	۰/۰۱۶	-۱۷/۰۷۰۰۰	۱۰/۰۰۰۰
	Equal variances not assumed			-۵/۰۰۰	۲/۰۰۰	۰/۰۲۴	-۲۴/۰۷۰۰۰	۱۶/۰۰۰۰

## ۳-۳- تأثیر افزودنی‌ها بر نفوذپذیری

در بتن متخلخل و یا هر محیط متخلخل دیگر، نفوذپذیری رابطه مستقیم با تخلخل ماکروسکوپی دارد. یعنی بالا بودن تخلخل ماکروسکوپی نشان‌دهنده نفوذپذیری زیاد می‌باشد و برعکس [۲۶]. اما باید توجه داشت که در اندازه‌گیری تخلخل تمام فضاهای خالی محاسبه می‌گردد. اما به جهت مشخص شدن مقدار نفوذپذیری فقط مجراهایی با توانایی انتقال آب از سطح بالایی نمونه به سطح پایینی نمونه مؤثر می‌باشند. بنابراین، ممکن است در مقایسه نمونه‌ها از بُعد نفوذپذیری و تخلخل تا حدودی اختلاف وجود داشته باشد. در بررسی نفوذپذیری و با توجه به شکل ۸، همانطور که انتظار می‌رفت، حداکثر نفوذپذیری  $1 \times 10^{-3}$  لیتر بر ثانیه می‌باشد که مربوط است به نمونه Da10. همچنین، حداقل نفوذپذیری  $1 \times 10^{-4}$  لیتر بر ثانیه می‌باشد که این رقم مربوط به تیمار Da30 است. برای نمونه شاهد، مقدار نفوذپذیری برابر است با  $64 \times 10^{-5}$  لیتر بر ثانیه. این در حالی است که نمونه Da20 با داشتن تخلخل بیشتر نسبت به G دارای نفوذپذیری کمتری در حدود  $61 \times 10^{-5}$  لیتر بر ثانیه می‌باشد. این کاهش ممکن است به دلیل کمتر بودن مسیرهای جریان در داخل نمونه Da20 نسبت به مسیرهای جریان در نمونه G باشد. نفوذپذیری‌های به‌دست آمده برای D10، D20 و D30 به ترتیب برابرند با  $93 \times 10^{-5}$ ،  $53 \times 10^{-5}$  و  $94 \times 10^{-5}$  لیتر بر ثانیه که با مقادیر تخلخل هر کدام از این تیمارها متناسب می‌باشند.

با به‌دست آمدن سطح معنی‌داری کمتر از ۵٪ و با توجه به جدول ۶، فرض همگن بودن میانگین‌ها با احتمال بیش از ۹۵٪ رد شده و تفاوت معنی‌داری بین میانگین نمونه‌ها وجود دارد، که به دلیل تأثیرگذاری ریزدانه روی نفوذپذیری نمونه‌های بتن متخلخل می‌باشد.



شکل ۸: مقایسه نفوذپذیری طرح اختلاطها

جدول ۵: نتایج تحلیل SPSS نفوذپذیری

## Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means				
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference
افزودنی	Equal variances assumed	.000	.0001	.00001	4	.0001	.00013	.00022
	Equal variances not assumed			.00001	3.000	.0001	.00013	.00022

## ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، با به کارگیری رویکرد کاهش درصدی از سیمان و جایگزین نمودن پودر دولومیت و کاهش بخشی از سنگدانه (درشت دانه) و افزودن ریزدانه به نمونه‌های بتن متخلخل، تغییرات مقاومت فشاری، تخلخل و نفوذپذیری نمونه‌ها به منظور استفاده در سیستم‌های زهکشی رواناب شهری و کفپوش پارکینگ‌ها و پیاده‌روها مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر به دست آمده است:

- افزودن پودر دولومیت به عنوان بخشی از سیمان تا حدودی باعث افزایش مقاومت فشاری شده ولی تأثیر چندانی بر تخلخل و نفوذپذیری نداشته است.

- افزودن ریزدانه دولومیت با ابعاد عبوری از الک نمره ۴ و مانده روی الک شماره ۸ از ۱۰ تا ۳۰ درصد باعث افزایش چشم‌گیر مقاومت فشاری شده است.

- بیشترین مقدار تخلخل به دست آمده مربوط است به نمونه Da10. افزودن ۱۰٪ ریزدانه عبوری از الک شماره ۴ و مانده روی الک شماره ۸ باعث افزایش ۷۷٪ مقدار تخلخل شده است.

- با وجود رابطه مستقیم بین تخلخل ماکروسکوپی و نفوذپذیری ممکن است در بعضی از نمونه‌ها نسبت تخلخل و نفوذپذیری خطی نباشد، این مسأله به دلیل مؤثر بودن مسیرهای مرتبط به هم جریان بر نفوذپذیری و تأثیر تمامی حفرات روی تخلخل می‌باشد.

- زیاد شدن نسب آب به سیمان باعث افزایش شیره بتن شده که موجب قطع ارتباط مسیرهای جریان در نمونه بتن متخلخل می‌شود و کاهش نفوذپذیری را به دنبال خواهد داشت.

- با توجه به تغییر بسیار زیاد مقاومت فشاری در نمونه‌های دارای ریزدانه، کاملاً واضح است که یکی از مهمترین عوامل افزایش مقاومت وجود ریزدانه در بتن متخلخل می‌باشد.

## منابع

- [1] Henderson, V. and Tighe, S. (2012). "Evaluation of pervious concrete pavement performance in cold weather climates." *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 13, 3. pp 197-208.
- [2] Kim, H. H., Kim, C. S., Jeon, J. H. and Park, C. G. (2016). "Effects on the Physical and Mechanical Properties of Porous Concrete for Plant Growth of Blast Furnace Slag, Natural Jute Fiber, and Styrene Butadiene Latex Using a Dry Mixing Manufacturing Process. *Materials*, 9(2), 84.
- [3] Gurujji, A. L. and Rana, A. V. (2015). "Ground Water Recharging Throgh Pervious Concrete Pavement." *Patel Institute of Technology and Research Centre*, pp 132-139.
- [4] Ghasemi, M. A., Mokhtarani, N. and Kavusi, A. (2016). "Removal of Heavy Metals from Surface Runoff Using Permeable Pavement Aggregate Layers." *Journal of Transportation Engineering*. Vol. 7(3), pp 629-640.
- [5] Moghaddam, A. R., Ghallehban Tekmedash, M. and Esmaili, M. (2013). "Investigation of temporal and spatial trend of water quality parameters in view of weather fluctuations using GIS; Mashhad Plain." *Water and Soil Conservation*. Vol. 20(3). pp 211-244.
- [6] Azad, A. (2017). "Application of porous concrete containing adsorbent as a new approach in improving the quality of urban runoff." *Master of Science Thesis*. Semnan University.
- [7] Mahalingam, R. and Vaithiyalingam Mahalingam, Sh. (2016). "Analysis of Pervious Concrete Properties." *Gradevinar*. Vol (6). pp 493-501.
- [8] Bentz, D. P. (2008). "Virtual Pervious Concrete: Microstructure, Percolation, and Permeability." *ACI Materials Journal*. Vol. 105(3), 297.
- [9] Lim, E., Fwa, T. F. and Tan, K. H. (2015). "Laboratory evaluation of clogging behavior of pervious concrete pavements." *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 11, 1603-1612.

- [10] Hidayah, N. and Putra Jaya, R. (2014). "Effect of Coarse Aggregate Sizes on Properties of Porous Concrete Paving Blocks." *Advanced Materials Research*. Vol. 911. pp 433-437.
- [11] Kovac, M. and Sicakova, A. (2017). "Changes of Strength Characteristics of Pervious Concrete Due to Variations in Water to Cement Ratio." In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 92, No. 1.
- [12] Teymouri, E., Mousavi, S. F., Karami, H. and Farzin, S. (2016). "Performance of Porous Concrete Containing Additive in Reduction of Urban Runoff." *Journal of Structural Engineering*. Vol. 13(1). pp 33-44.
- [13] Tennis, P. (2004). "Pervious Concrete Pavement." *Portland Cement Assoc.*
- [14] Doostmoammadi, M., Karami, H., Farzin, S. and Mousavi, S. F. (2018). "Experimental Study of the Influence of Natural Lightweight Aggregates on Some Physical Properties of Porous Concrete Pavement and Providing the Relationship between Compressive Strength and Porosity". *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*. Vol. 4(1), pp 87-99.
- [15] Lian, C. and Zhuge, Y. (2010). "Optimum mix design of enhanced permeable concrete—an experimental investigation". *Construction and Building Materials*. Vol 24(12), pp 2664-2671.
- [16] Yang, Z., Ma, W., Shen, W. and Zhou, M. (2008), "The Aggregate Gradation for the Porous Concrete Pervious Road Base Material." *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition*, Vol. 23(3), pp 391-394.
- [17] Ćosić, K., Korat, L., Ducman, V and Netinger, I. (2015), "Influence of Aggregate Type and Size on Properties of Pervious Concrete." *Construction and Building Materials*, Vol. 78, pp 69-76.
- [18] Lian, C. and Zhuge, Y. 2010. "Optimum Mix Design of Enhanced Permeable Concrete – An Experimental Investigation." *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp 2664-2671.
- [19] Yang, Z., Ma, W., Shen, W and Zhou, M. (2008), "The Aggregate Gradation for the Porous Concrete Pervious Road Base Material." *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition*, Vol. 23(3). pp 391-394.
- [20] Mikhailova, M., Yakovlev, G. Maeva and I. Senkov, S. (2013). "Effect of Dolomite Limestone Powder on the Compressive Strength of Concrete." *Procedia Engineering*. Vol. 57. pp 775-780.
- [21] ACI Committee 211. 2006. "Guide for Selecting Proportions for No-slump Concrete." *ACI 211.3R Report*.
- [22] ASTM C127. 2001. "Density, Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate." *American Society for Testing and Materials*.
- [23] Rahmani, K. Shamsai, A. Saghafian, B. and Peroti, S. 2012. "Effect of Water and Cement Ratio on Compressive Strength and Abrasion of Microsilica Concrete." *Journal of Scientific Research*. Vol. 12(8). pp 1056-1061.
- [24] Haselbach, M., Valavala, S. and Montes, F. (2015)." Permeability Predictions for Sand-Clogged Portland Cement Pervious Concrete Pavement Systems." *Journal of Environmental Management*. Vol. 81. pp 42-49.
- [25] ASTM C1754/C1754M-12. 2012. *Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete*. ASTM International, USA.
- [26] Shirgir, B. Hassani, A. and Alizadeh Goodarzi, H. 2010. "The Influence of Aggregate Gradation on the Permeability and Mechanical Properties of Porous Concrete". *Modares Civil Engineering Journal*. Vol. 11(1). pp 49-60.