

## ارزیابی خواص بتن متخلخل به عنوان ماده پایه جاده

حسین اردشیری<sup>۱</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران و کارمند شهرداری شیراز

Email: Hossein6263@yahoo.com

### چکیده

بتن متخلخل به عنوان ماده پایه در مسیر جاده مورد استفاده قرار می گیرد که قدرت، نفوذپذیری، ثبات، مقاومت در برابر شستشو و حجم آن رضایت بخش می باشد. در این مقاله، ویژگی های بتن متخلخل اصلاح شده با مقادیری از ماده پایه جاده معمولی مقایسه شده است. نتایج نشان می دهد که ماسه سنگ می تواند قدرت فشرده سازی و دوام بتن متخلخل به عنوان ماده پایه جاده را بهبود بخشد. بتن متخلخل، به خصوص بتن متخلخل اصلاح شده با افزودنی های مقاومتر، دارای مزایایی نسبت به سایر ماده پایه جاده ای در زمینه فرسایش و انقباض است. تجزیه و تحلیل نشان می دهد که ماسه سنگ نقطه مشترک بین یک سنگ در بتن متخلخل را تقویت می کند. و خاکستر سبک (خاکستر بادی) می تواند به طور قابل توجهی تراکم و مقاومت به خشک شدن بتن متخلخل را بهبود بخشد. علاوه بر این، نتایج نشان می دهد که تخلخل کل بتن متخلخل یک رابطه خطی با تخلخل موثر و عملکرد دارد و رابطه ای بین نفوذپذیری و تخلخل موثر وجود دارد. این بتن متخلخل اصلاح شده می تواند به عنوان مسیر پایه جاده برای پروژه های شهری و همچنین بزرگراه استفاده گردد.

**کلمات کلیدی:** ماده پایه جاده، بتن متخلخل، ماسه سنگ، نفوذپذیری، عملکرد آسفالت

### ۱- مقدمه

هر تابستان بارش سنگین می تواند زهکشی سیستم های اکثر شهرهای جنوب چین را از بین ببرد. در ۲ آوریل ۲۰۱۵، شانزده شهرستان در چین توسط دولت مرکزی در پروژه های آزمایشی Sponge City مشارکت می کنند (شکل ۱) [۱]. به عنوان یک نوع ماده مضر با نسبت زیادی از روزه، بتن متخلخل دارای زهکشی قوی است و می تواند آب های زیرزمینی را برای تامین منابع آب، تامین کند. [۲]

بنابراین، این برنامه برای پیاده رو ها و سطح زمین امیدوار کننده است. در چین حجم زیاد و بیش از حد وسایل نقلیه نیاز به بزرگراه با قابلیت تحمل بالاتری دارد. با این حال، نوع شایع مواد پایه جاده، ماده پایه نیمه سخت، به عنوان مثال سیمان تثبیت کننده تراکم و یا خاکستر آهک تثبیت کننده مواد می باشد.

رطوبت ضد ترک خوردگی و قابلیت ضد فرسایش، بنابراین آسیب آب به یکی از شایع ترین شکست های بزرگراه تبدیل شده است. بتن متخلخل به عنوان یک جایگزین نیمه سفت و سخت برای تخلیه آب سطح خیابان برای حل مشکل آلودگی آب مورد استفاده قرار می گیرد [۳]. این عملکرد فیزیکی و عملی تراکم و چسباندن [۴-۷]، جزء عوامل اصلی است که می توان به

### هجدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

عنوان نوعی از تراکم، روش تراکم، جایگزینی با شن و ماسه و سیمان درشت با مواد مکمل سیمانی قرار داد (8- SCMs) [16].

مقیاس جمع آوری بتن متخلخل یک موضوع کلیدی موثر در قدرت و نفوذپذیری آن است. نتایج حاصل از اندازه تراکم ۹،۵-۱۲،۵ میلی متر در مقاومت بالای بتن متخلخل نسبت به اندازه تراکم ۲،۳۶ - ۹،۵ میلی متر در همان تخلخل است. زیرا مقدار بیشتری از چسب بین نقاط مشترک است [۲]، در حالی که ماسه سنگ می تواند سبب بهبود توزیع چسب سیمان و در نتیجه افزایش قدرت فشاری و مقاومت خمشی گردد [۳،۸،۱۷]. نفوذ پذیری و تراکم بزرگ تر فرم بتن متخلخل، منافذ بزرگتر را تشکیل می دهند و سبب دستیابی به اتصال بهتر و بنابراین نفوذ پذیری بهتری می شود [۱۸،۱۹]. نوع جمع آوری نیز بر عملکرد اجرای بتن متخلخل تاثیر می گذارد. بتن متخلخل تهیه شده با هوای خنک کننده سرباره کوره قوس الکتریکی و سرباره فولاد مانند تراکم مقاومت مکانیکی بهتری دارد [۸،۲۰]، در حالی که آجر روغنی جایگزین تراکم طبیعی باعث کاهش قدرت فشاری مقاومت در برابر سایش بدون در نظر گرفتن دوره می شود [۲۱]. به طور معمول، افزایش رطوبت سیمان منجر به کاهش در ضریب نفوذپذیری می گردد [۷،۲۲،۲۳]. Chindaprasirt و همکاران [۲۴] چسب سیمان با جریان ۱۵۰-۲۳۰ میلیمتر برای تهیه بتن متخلخل استفاده می شود. اگرچه رطوبت بالا رطوبت سیمان را بهبود می بخشد از مخلوط بتن متخلخل، برای مسدود کردن حفره های بتنی استفاده می گردد .

مواد سیمان اضافی، افزودنی های شیمیایی و الیاف اغلب در بتن متخلخل استفاده می شود. تحقیق نشان می دهد ذرات سیلیسی سیلیسیوم به راحتی در یک منطقه کوچک تمرکز می کنند، که نمیتواند بخار سیلیکون را درک کند [۱۷].



شکل ۱ نمودار مختصات شهر اسفنجی [۱].

## هجدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

با عامل پراکندگی، بخار سیلیسیم به طور واضح خواص و دوام مکانیکی بتن متخلخل را بهبود می بخشد [۱۳،۱۷،۲۵]. بیشترین قدرت (۳۲-۴۶ مگاپاسکال) با افزودن بتن های متخلخل تهیه شده از بخار سیلیسیم، سوپلاستی کننده و پلیمر است [۲۶]. علاوه بر این استفاده از سایز کوچکتر تراکم، بتن متخلخل قویتری را بدست می دهد. محتوای خاکستر بادی می تواند مقاومت فشاری و استحکام کششی را افزایش دهد. در حالی که تمام مواد پوزولانی را نمی توان به عنوان سیمان اضافی برای بهبود بتن متخلخل استفاده کرد، خواص مکانیکی از بتن متخلخل به طور معنی داری با افزایش محتوای ترافیک و ژئولیت (نوعی سیلیکات) کاهش یافته است [۲۸،۲۹]. لاتکس، پلیمر و الیاف می توانند به طور مؤثر خواص مکانیکی و دوام یخ زدگی [۳۰-۳۵] را بهبود بخشد و فیبر نیز می تواند از دست دادن جرم در کانتابرو<sup>۱</sup> و ساییدگی سایز را کاهش دهد [۳۴،۳۵]. محتویات حفره های بتونی بطور معمول ۱۵ تا ۳۵ درصد است [۳۶].

و به عنوان مواد زهکشی، رابطه بین تخلخل و نفوذپذیری یک مسئله مهم برای طراحی مواد بتن متخلخل است. Neithalath [10] تخلخل و منافذ ساختار بتن متخلخل را با اندازه های مختلف مطالعه کرده است. ادبیات ۳۷ یک روش برای پیش بینی نفوذ پذیری بتن متخلخل فراهم می کند [۳۷]. مارتین III [38] ضریب نفوذپذیری محاسبه شده با توزیع تخلخل عمودی را دقیق تر از تخلخل متناوب محاسبه شده می داند. نفوذپذیری پیش بینی شده معادله کتز-تامپسون دارای ارزش بالاتری از نفوذپذیری آزمایش شده توسط Sumanasooriya است [۳۹]. برخی محققان رابطه آشکارتری از تخلخل و نفوذپذیری به دست آوردند [۴۰-۴۲]. در این مطالعه، یک نوع بتن متخلخل، اصلاح شده توسط تراکم و خاکستر بادی به عنوان مواد پایه جاده آماده شد. خصوصیات و عملکرد این مواد پایه جاده با چندین مواد پایه جاده معمولی مقایسه شدند. همزمان، تجزیه و تحلیل رگرسیون در رابطه بین تخلخل و ضریب نفوذپذیری بر اساس ۲۷۸ نمونه مورد بررسی قرار گرفت. این عملکرد مکانیسم بتن متخلخل را مورد بررسی قرار داد.

## ۲. آزمایش

### ۲.۱ مواد

سیمان معمولی پورتلند P.O 32.5 و خاکستر بادی (FA) به عنوان مواد سیمانی برای تهیه بتن متخلخل انتخاب شدند، و خواص آنها در جداول ۱ و ۲ ذکر شده است. سنگ آهک خرد شده و دیاباز با مقادیر مختلف در این تحقیق به عنوان ماسه سنگ مورد استفاده قرار گرفتند، که اندازه آن از ۲،۳۶ به ۲۶،۵ میلی متر متغیر بود. برای بررسی رابطه نفوذ پذیری، انواع کل تراکم ضریب و تخلخل بتن متخلخل استفاده شد. یک نوع سنگ آهک برای بررسی تاثیر تراکم و FA در بتن متخلخل انتخاب شده بود و خواص مواد پایه مختلف جاده، که در منحنی شکل نشان داده شده است. وزن مخصوص سنگ آهک ۲،۷۲ و تراکم خشک شده ۱۶۳۳ کیلوگرم در متر مکعب شن و ماسه آهکی مصنوعی به عنوان دانه های خشتی عمدتاً از اندازه ۰،۰۶ میلی متر تا ۴،۷۵ میلی متر، و منحنی درجه بندی آن در شکل ۲ نشان داده شده است.

### ۲.۲ مواد و روش ها

#### ۲.۲.۱ تجزیه و تحلیل پردازش تصویر

اندازه ذرات بتن بخش متخلخل با تجزیه و تحلیل تصویر اندازه گیری شد، در ابتدا، همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است عکس های دیجیتال به دو دسته تقسیم شد که تصاویر توسط واریانس Max تبدیل شدند، سپس برنامه ردیابی حد فاصل برای به دست آوردن تصویر منحنی مستقل نوشته شد، در نهایت، قطر و نقاط منافذ اندازه گیری محاسبه شد.

<sup>1</sup> Cantabro

### ۲.۲.۲ تخلخل

تخلخل مجموع به صورت حجم منافذ بسته و قابل دسترس است. همانطور که در معادله (۱) نشان داده شده است، تخلخل کل بتن متخلخل را می توان با استفاده از چگالی کلی و چگالی نظری محاسبه کرد، و ژنگ [۴۳] معادله را برای محاسبه چگالی ارائه کرده است.

توده نمونه های خشک در دمای C 60 به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند. حجم نمونه های (۷) با قطر و ارتفاع نمونه ها با کولیس ورنیور اندازه گیری می شود. تخلخل حجم ورودی ها قابل دسترس است که می تواند با معادله (۲) مورد ارزیابی قرار داد. با استفاده از تفاوت وزن بین وزن نمونه خشک شده در هوا و وزن نمونه آب اشباع شده در آب (m<sub>2</sub>) به این نتیجه رسیده است.

$$v_t = \left( 1 - \frac{\rho_s}{\rho_t} \right) \times 100$$

$$v_t = \left( 1 - \frac{m_1 - m_2}{v \cdot \rho_w} \right) \times 100$$

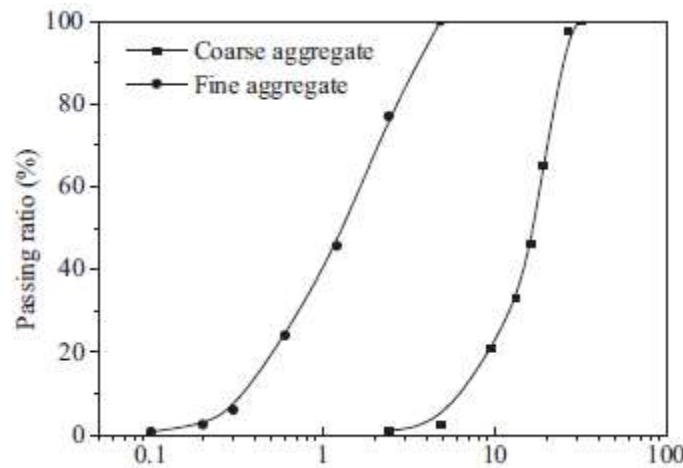
جدول ۱

خواص سیمان پرتلند.

خواص		P O32.5
باقی مانده در ۴۵ لومن غربال (%)	۰.۶	
سازگاری طبیعی (%)	۲۶.۰	
زمان تنظیم (دقیقه)		
اولیه	۱۴۰	
نهایی	۱۹۵	
(استحکام فشاری MPa)		
۷ روز	۳۱.۱	
۲۸ روز		
واجد شرایط	صدا	

جدول ۲: خواص خاکستر بادی

خواص		FA
باقی مانده در الکتروود ۴۵ لیتر (%)		۱۱.۷
سازگاری طبیعی (%)		۲۶.۰
سطح مشخصی 620		m <sup>2</sup> / kg
محتوای آب (%)		۰.۳



شکل ۲. منحنی درجه بندی مجموع

که در آن  $v_t$  - تخلخل کل (%);  $v_e$  - تخلخل موثر است (%);  $\rho_s$  و  $\rho_t$  چگالی حجم و تراکم هستند ( $g/cm^3$ );  $m_1$  جرم نمونه هایی است که در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد برای ۲۴ ساعت خشک می شوند و  $m_2$  جرم نمونه اشباع شده در آب برای ۲۴ ساعت است ( $g$ );  $v$  حجم نمونه ( $cm^3$ ) است.  $\rho_w$  چگالی آب ( $g/cm^3$ ) است.

### ۲،۲،۳ نفوذپذیری

این تجهیزات به موجب قانون Darcy برای تعیین ضریب نفوذ پذیری طراحی شده بودند، که در ادبیات ۳ و ۳۰ گزارش شده است. معادله (۳) برای محاسبه ضریب نفوذ پذیری استفاده می شود.

$$K = \frac{Q \cdot L}{A \cdot (h_1 - h_2) \cdot t}$$

جایی که  $K$  ضریب نفوذپذیری ( $cm/s$ ) است؛  $Q$  آب در حال نفوذ در طول زمان است از  $cm^3$ ؛  $t$ ؛  $L$  فاصله عمودی از نقاط اندازه گیری لوله های پیزومتریک است (سانتی متر)؛  $(-h_1 h_2)$  به معنای فشار سر (سانتی متر) است.  $A$  یک منطقه متقاطع نمونه است ( $cm^2$ ).

### ۲،۲،۴ قدرت فشاری

نمونه ها در قالب سیلندر ۱۵۰ میلی لیتر U150 تهیه شده و پس از آن در محلول در درجه حرارت  $2 \pm 2$  درجه سانتیگراد خالص سازی شدند و فروپاشی نسبی بالاتر از ۹۵ درصد است. شش نمونه برای هر نقطه داده توسط تست مقاومت فشاری بدون محدودیت تست شده بود.

### ۲،۲،۵ پایداری پویا

## هجدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

با توجه به آزمون کانتابرو در کد JTG E20-2011، نمونه ها در آب به مدت ۲۰ ساعت در دمای  $20 \pm 0.5$  درجه سانتیگراد نگهداری شده و پس از آن آب بر روی سطح آبشست می شود. جرم هر نمونه ( $m_0$ ) اندازه گیری شد. نمونه بلافاصله در دستگاه لس آنجلس قرار گرفت، تستر برای ۳۰۰ دور با سرعت  $r / \text{min} = 30-33$  شروع به کار کرد سپس مقدار باقی مانده نمونه ( $m_1$ ) وزن شده است. اگر نمونه توده بزرگترین باقی مانده در نظر گرفته شده باشد به عنوان مثال  $m_1$ . از دست دادن کانتابرو (DS) با توجه به معادله (۴)، سه نمونه موازی برای هر نقطه داده اندازه گیری شده می باشد.

$$DS = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\%$$

### ۲.۲.۶ مقاومت در برابر سایش

با توجه به آزمون مقاومت در برابر خوردگی در برابر جریان آب حاوی شن و ماسه در آزمون کد (DL / T5150-2001) برای بتن هیدرولیک ارائه شده است، نسبت از دست دادن وزن به عنوان پارامتر ارزیابی مقاومت خراشی مورد بررسی قرار گرفت.

### ۲.۲.۷ ثبات دوره

نمونه ها برای تعیین انقباض خشک مواد مختلف پایه جاده ای منشورهای ۱۰۰ میلیمتر ۱۰۰ میلیمتر ۴۰۰ میلیمتر بودند. پس از نمونه گیری در دمایی از  $2 \pm 20$  درجه سانتیگراد و فروپاشی نسبی بالاتر از ۹۵ درصد برای سه روز، پروب های مقایسه کننده با شاخص نشانگر روی سطح آنها بهبود یافت، و سپس نمونه ها متصل شده در دمای  $2 \pm 20$  درجه سانتیگراد و رطوبت نسبی  $5 \pm 60$  درصد حرارت داده شد. در همین حال، نسبت انقباض خشک در هر سن و سال و سه نمونه ثبت شده در هر نقطه داده مورد آزمایش قرار گرفتند.

### ۲.۳ طراحی آزمایش

#### ۲.۳.۱ تراکم خوب

محتوای سیمان و مواد جامد درشت ۱۵۰ کیلوگرم در متر مکعب و ۱۵۰۱ کیلوگرم در متر مکعب، و مجموع تراکم اضافی به نسبت کل ترکیبات به ترتیب به سه سطح (۰٪، ۱۰٪ و ۱۵٪) برای مطالعه تغییر ویژگی منافذ بتن متخلخل در نظر گرفته شد. اعمال روش پردازش تصویر اندازه ذره و توزیع آن در بخش نمونه به وسیله تاثیر ساختار خالص بر ساختار داخلی بتن متخلخل تعیین می شود. همچنین، همانطور که در جدول ۳ نشان داده شده است، نسبت مخلوط با ۰٪ و ۱۵٪ تراکم اضافی برای نشان دادن تاثیر تراکم خوب بر روی پیاده رو برای اجرای بتن متخلخل انتخاب شدند.

#### ۲.۳.۲ رابطه نفوذ پذیری و تخلخل

۲۷۸ نمونه با درجه بندی تراکم و دوز سیمان تهیه شد، که نسبت کل دانه به سیمان (A / C) و بافت جامد برای مطالعه رابطه بین نفوذپذیری و بتن متخلخل می باشد. نسبت مخلوط در جدول ۴ نشان داده شده است.

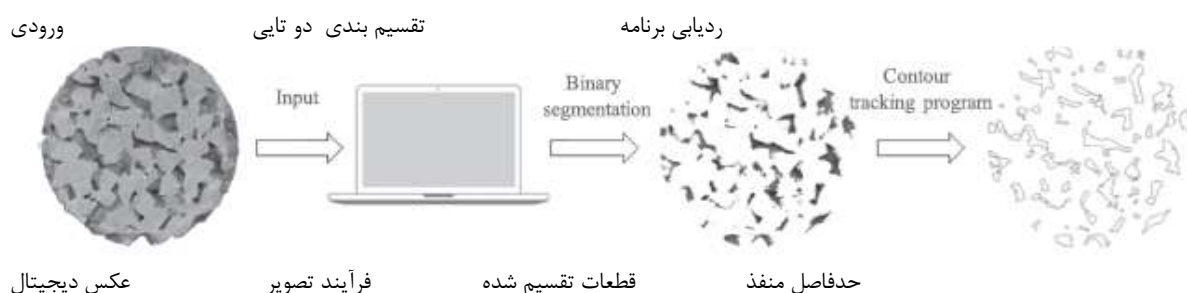
#### ۲.۳.۳ عملکرد آسفالت برای انواع مختلف بتن

عملکرد بتن متخلخل در جدول ۳ با چهار نوع مصالح بنیادی معمولی و بتن سیمان معمولی (OCC) مقایسه شده است. مواد پایه معمولی جاده شامل بتن پلاستیکی بتنی (PLC)، بتن خشک و لاجوردی است (DLC)، ماسه تثبیت شده سیمان (CSG) و ماسه تثبیت شده خاکستر سیمان (CFSG) می باشد. نسبت های ترکیبی دقیق مواد جاده معمولی و بتن سیمان معمولی در جدول ۵ نشان داده شده است. عملکرد بتنی از جمله تثبیت پویایی، مقاومت در برابر خراش و ثبات حجم تجزیه و تحلیل شده است.

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳.۱ توزیع پوسته

هنگامی که قطر متوسط ماسه سنگ ۱/۶-۱/۱۰ باشد از مجموع دانه ها سنگین تر، تراکم دقیقتر می تواند فضای بزرگتر را پر کند در حالیکه ذرات و بسته بندی دانه های درشت را تحت تاثیر قرار نمی دهد [۴۴]. از این رو، ملات سیمان در اطراف این نقاط مشترک بین ذرات بزرگتر برای تشکیل یک ادغام ساختاری و کل تراکم غنی می شود که می تواند مقدار همپوشانی را به منظور بهبود خواص بتن متخلخل افزایش دهد.



شکل ۳ نمودار پردازش تصویر تکه های بتنی متخلخل

جدول ۳: نسبت بتن مخلوط

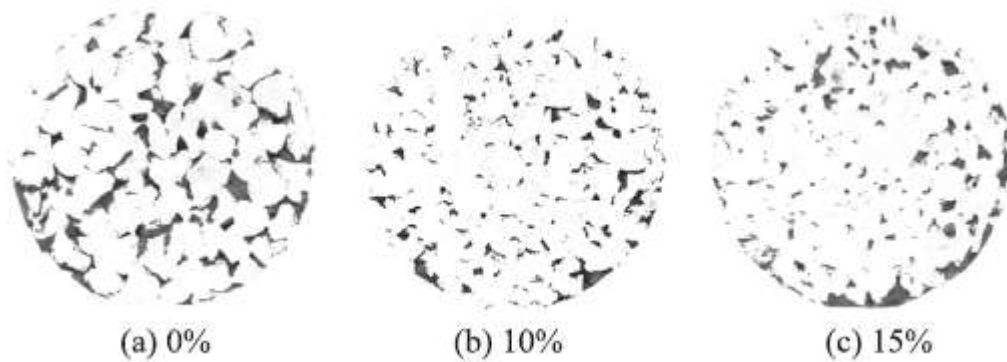
مخلوط ID	سیمان	FA	ماسه سنگ درشت	ماسه سنگ اضافی	درصد ماسه سنگ اضافی (wt%)	آب
PC-1	213	0	1704	0	0%	81
PC-2	181	0	1625	0	0%	82
PC-2F	145	36	1625	0	0%	82
PC-3	181	0	1381	244	15%	100
PC-4	150	0	1501	264	15%	85
PC-4F	120	30	1501	264	15%	85

جدول ۴: تعیین نسبت نفوذپذیری به تخلخل

Parameters	P1	P2	P3	P4	P5
W/C	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
A/C	8:1	10:1	10:1	10:1	8:1/10:1
اندازه دانه نند	40	39	1	1	9
سنگ شناسی مجموع	Diabase	Diabase	Limestone	Limestone	Diabase
محتوای سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	220	180	180	180	220
منبع نمونه	Lab	Lab	Lab	Drilled core	Full scale test
مقدار نمونه	91	116	30	14	27

جدول ۵: مخلوط معمولی مواد پایه جاده (کیلوگرم در متر مکعب).

Mixture ID	Cement	FA	Coarse aggregate	Fine aggregate	Water
PLC	140	60	1338	659	150
DLC	161	69	1400	677	115
CSG-1	141	0	1326	884	132
CSG-2	144	0	1467	763	122
CFSG-1	94.3	145	1567	551	110
CFSG-2	73.5	170	1461	600	125
OCC	340	0	1234	666	160



شکل ۴ - قسمت مقطعی از بتن متخلخل با دوزهای مختلف تراکم.

تأثیر محتوای تراکم بر روی ساختار منافذ با روش پردازش تصویر تحلیل می شود. شکل ۴ بخش های بتن متخلخل مختلف را با دوزهای مختلف تراکم نشان می دهد. در تصویر جداگانه، رنگ سفید نشان دهنده جامدات است و رنگ سیاه نشان دهنده حفره های هوا است. می توان دید که قطر و ناحیه قطر به وضوح با افزایش نسبت وزن خالص آن کاهش می یابد. اندازه منافذ به شش سطح تقسیم شده و نسبت مساحت مربوط به منافذ محاسبه شده است. مانند آنچه که در شکل ۵ نشان داده شده است، با افزایش مجموع دانه های اضافی از ۰٪ به ۱۵٪، منافذ بیش از ۷۰۵۰ lm از ۶۹٪ به ۱۷٪ کاهش می یابند و منافذ از ۱۰۵۰ lm - ۵۰lm از ۵٪ به ۴۱٪ افزایش می یابد.

بتن متخلخل با ضخامت ۱۰٪ دارای حفره های متوسطی است، در حالی که منافذ بزرگ مقدار کمتری نسبت به منافذ بتن متخلخل با ۰٪ تراکم اضافی دارند (تراکم اضافی وجود ندارد). در حالی که، تراکم خوب ۱۵٪ تراکم اضافی است که در میان دانه های درشت مانع از تخلیه آب های زیرزمینی می شود. ضخامت و اندازه خالی دو عامل اساسی برای نفوذپذیری است. محتوای مناسب از تراکم، توانایی زهکشی را افزایش می دهد.

### ۳،۲ نفوذپذیری

بر اساس نتایج آزمون نمونه های مختلف بتن متخلخل، رابطه بین تخلخل مؤثر و تخلخل کل در نظر گرفته شده است. در شکل ۶ نشان داده شده است، مقدار  $R^2 = 0.9574$  نشان دهنده یک رابطه خوب بین تخلخل مؤثر و تخلخل کل است. نتیجه همانند آنچه که توسط لیان C و همکاران تعریف شده است می باشد [۴۵].

$$V_e = 1.3269V_t - 9.2389 \quad R^2 = 0.9574$$

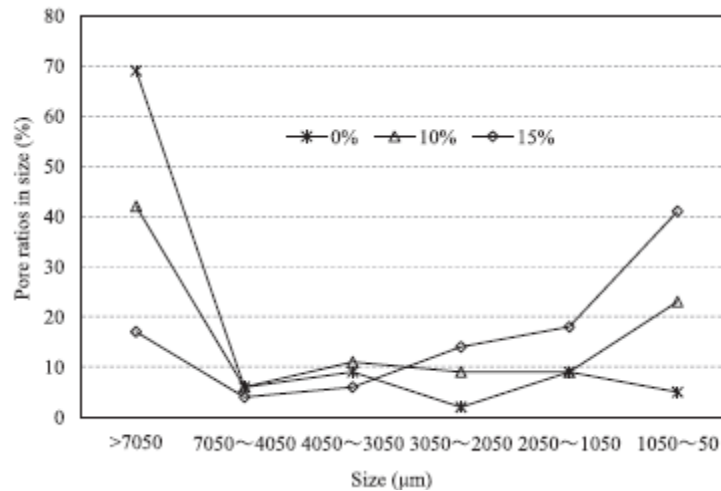
جایی که  $V_t$  تخلخل کامل است و  $V_e$  تخلخل مؤثر است. رابطه ضریب نفوذپذیری تا مؤثر بودن تخلخل پیشرفت داشته است که عملکرد قدرت را در شکل ۷ و معادله (۶) نشان می دهد.

$$k = (v_e/20.406)^{4.756} - 0.3894 \quad R^2 = 0.8104$$

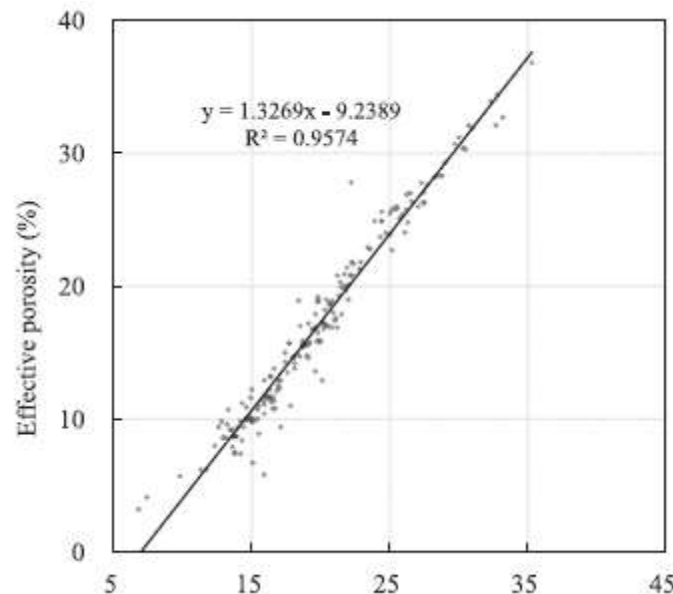


### هجدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

رابطه پیشرفت بین تخلخل موثر و ضریب نفوذ پذیری در جدول ۶ خلاصه شده است. در تخلخل از ۱۵٪ تا ۳۵٪ متغیر است. (۸)، (۹) و (۱۱) یک رابطه خطی را بین ضریب نفوذ پذیری و تخلخل نشان می دهد.



شکل ۵ تجزیه و تحلیل ویژگی های منفذ بر روی مقطعی از بتن های متخلخل



شکل ۶: رابطه تخلخل کل و تخلخل موثر

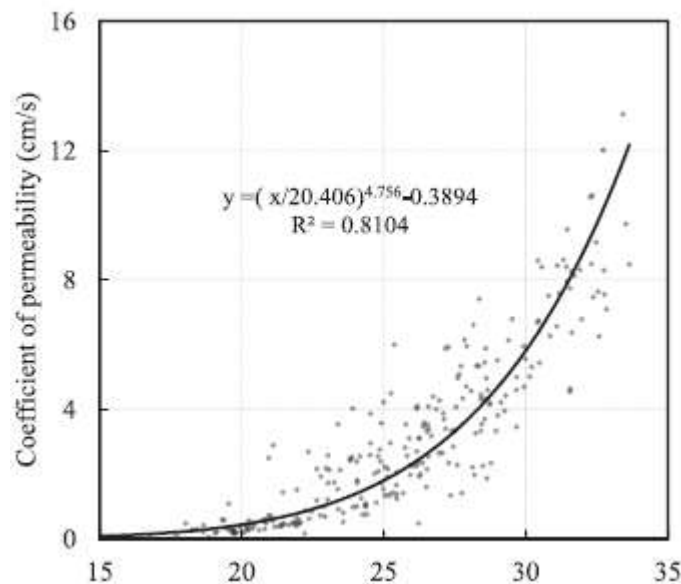
بر اساس محدوده ی باریک تخلخل، معادله (۱۰) نشان می دهد نفوذ پذیری با ذرات موثر از بتن متخلخل به صورت نمایی افزایش می یابد. در حالی که Kayhanian M و همکاران [۴۰] تخلخل را (va) در نظر می گیرند که توسط تحلیل تصویر بر روی توزیع عمودی هدایت شده منافذ به عنوان متغیر تعیین می شود، یک عملکرد قدرت در معادله (۷) به دست آمده است. نتایج متفاوت تحقیقات قبلی ممکن است به آمار و متغیر نسبت داده شود. بر اساس اطلاعات جامع پایه ۲۷۸ نمونه، نتیجه مشابهی برای ادبیات به دست آمد. به طور جدی، تخلخل عمودی منافذ به عنوان متغیر به نظر می رسد منطقی تر است، اما

### هجدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

امکان پذیر نیست. در عمل محاسبه تخلخل عمودی به صورت عمودی است. در اینجا، این تحقیق یک عملکرد قدرت را فراهم می کند که در آن نفوذ پذیری بتن متخلخل ساده و دقیق پیش بینی می شود.

#### ۳.۳. قدرت فشاری

نیروی پیوند از نقاط مشترک در میان تراکم دانه های درشت تاثیر غیر مستقیم بر عملکرد مکانیکی نمونه های بتونی تحت فشرده سازی یکنواخت دارد [۴۶]. استحکام فشاری توصیف کننده ی  $w / c$ ، محتوای اتصال دهنده، تراکم و ساختار داخلی است. مقدار بالای  $w / c$  و محتوای ناکافی از تراکم منجر به ضعف اتصال از نقاط متصل می گردد. شکل ۸ مقاومت فشاری را در مدت زمان ۷ روزه و ۲۸ روزه در مواد مختلف نشان می دهد. به دلیل  $w / c$  پایین و محتوای بالا اتصال دهنده نسبت به PLC و CSG-1، استحکام فشاری بالاتر دارد. اگرچه بتن های متخلخل پایین تر فشرده می شوند قدرت دیگر مواد پایه جاده به عنوان ساختار متخلخل آن در نظر گرفته می شود، که استحکام فشاری آنها در ۷ روز می تواند تا ۵ مگاپاسکال و تقاضای JTG / T F20-2015 (استاندارد چینی) در مواد پایه جاده در بزرگراه ترافیک سنگین ایجاد کند. در مقایسه با-PC 1، استحکام فشاری PC-4 که با تراکم خوب اصلاح شده است در ۷ روز ۵.۲ درصد و در ۲۸ روز ۲.۸٪ افزایش می یابد. شکل ۹ اثر ترکیب تراکم و FA را بر روی توسعه روند استحکام فشاری نشان می دهد، می توان مشاهده کرد که استحکام فشاری نمونه های آماده شده با ۱۵٪ اضافی سنگ آهک (PC-4) 29-48 درصد بیشتر از نمونه های دیگر در هر زمان، تنها با مجموعه ای درشت آماده شده است.



شکل ۷: رابطه بین تخلخل مؤثر و ضریب نفوذپذیری

از نظر بتن های متخلخل با ماسه سنگ و یا FA، روند توسعه مشابهی در قدرت فشاری وجود دارد که می تواند به طور قابل توجهی سبب افزایش مقاومت فشاری بتن متخلخل، به خصوص در مدت زمان طولانی گردد. با توجه به زمان پخت ۱۸۰ روز، افزایش تقریباً ۱۴٪ استحکام فشاری برای نمونه های آماده شده با فاز ۲۰٪ FA به عنوان جایگزینی برای سیمان انتخاب شده است. مقاومت فشاری بتن متخلخل از استحکام باند نقطه اتصال بین ذرات حاصل می شود. از یک طرف، ماسه های اضافی و معادل آن جایگزینی FA برای سیمان در وزن باعث افزایش تماس در میان مجموعه می شود. از سوی دیگر، استفاده از FA گرمای هیدراتاسیون را در زمان اولیه و هیدراتاسیون طولانی مدت FA کاهش می دهد.

### ۳.۴ ثبات دینامیکی

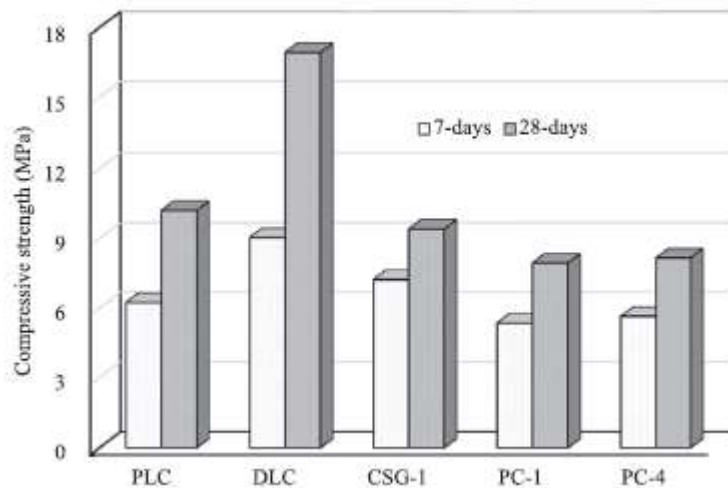
تست تلفات کانتابرو<sup>۱</sup> برای اندازه گیری مواد پایه تحت بار و ثبات جاده استفاده می شود. شکل ۱۰ ضایعات کانتابرو را از مواد پایه مختلف جاده نشان می دهد. می توان مشاهده کرد که DLC کمترین مقدار از دست دادن کانتابرو در مواد مختلف پایه راه را دارد. این از دست دادن Cantabro PLC حدود ۳ برابر بزرگتر از مقدار DLC آن است، که بیان می کند برای مقدار آب بالاتر به نسبت باند استفاده می شود. این از دست دادن کانتابرو CSG-1 حتی حدود ۴،۵ برابر بزرگتر از DLC است. به علت نسبت بالای تراکم به سیمان، سیمان نمی تواند به اندازه ی کافی تراکم را پوشش دهد. شکل ۱۰ نشان می دهد که پایداری دینامیکی بتن متخلخل پایین تر از DLC است، اما بهتر از PLC و CSG-1 است. از دست دادن کانتابرو از PC-2 در زمان پخت ۷ روز (۵،۵۳٪) به طور معنی داری کمتر از PLC در دوره ی ۲۸ روز (۶،۶٪) است. باید توجه داشت ماسه سنگ اضافی می تواند به طور قابل توجهی توانایی مقاومت در برابر بار اضافی را بهبود بخشد. در هر زمان پخت، مقدار از دست دادن PC-4 پایین تر از کانتابرو است. و در مقایسه با PC-1، از بین بردن کانتابرو PC-4 با ۱۵٪ بیشترین مقدار خالص، ۲۶،۸٪ کاهش می یابد. در شرایطی که تمام ترکیبات به اندازه کافی توسط سیمان پوشیده شده، استفاده از دانه های خرد شده دیگر می تواند به طور قابل توجهی ثبات پویایی بتن متخلخل را بهبود بخشد.

جدول ۶. مقایسه رابطه بین تخلخل و نفوذپذیری با تحقیقات قبلی

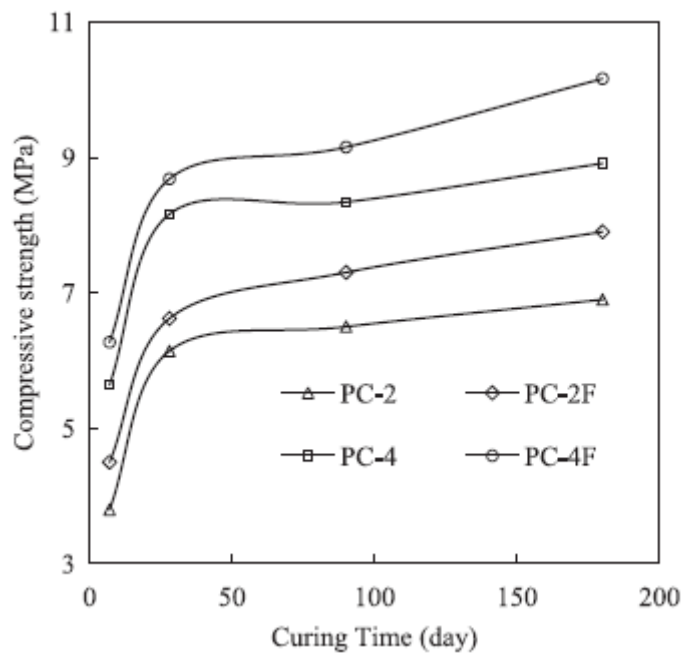
Eq. No.	Relationship	R <sup>2</sup>	Variable	Statistic	Unit of k
(6)	$k = \left(\frac{v}{20400}\right)^{4.756} - 0.3894$	0.81	$v\% = v_4(15-35\%)$	278	cm/s
(7) [40]	$k = 1.4 \times 10^{-6} v^{4.5}$	0.91	$v\% = v_4(20-32\%)$	12	cm/s
(8) [27]	$k = 0.40v - 6.88$	0.67	$v\% = v_4(15-35\%)$	12	mm/s
(9) [27]	$k = 0.32v - 3.11$	0.87	$v\% = v_4(15-35\%)$	12	mm/s
(10) [41]	$k = 0.036e^{0.141v}$	0.93	$v\% = v_4(20-30\%)$	9	cm/s
(11) [42]	$k = 0.2927v - 4.97$	0.75	$v\% = v_4(15-30\%)$	6	cm/s

<sup>1</sup> Cantabro

هجدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

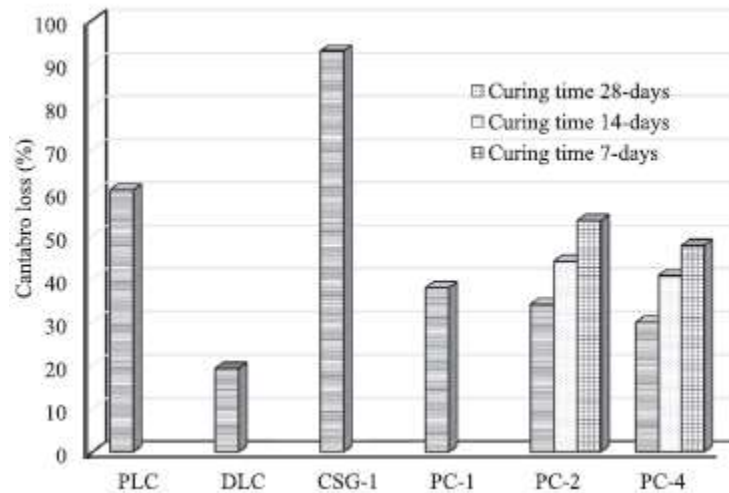


شکل ۸: قدرت فشرده مواد مختلف جاده.



شکل ۹: تأثیر ماسه سنگ و FA بر مقاومت فشاری

هجدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

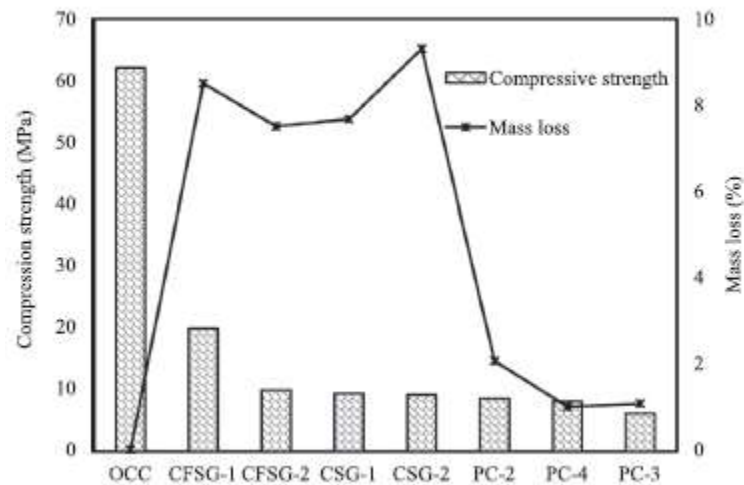


شکل ۱۰. از دست دادن Cantabro از مواد مختلف پایه راه

### ۳.۵ مقاومت در برابر سایش

استفاده از بتن متخلخل به عنوان مواد پایه جاده می تواند مشکل آسیب آب بزرگراه را حل کند [۳]. همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، مقاومت بتن های مختلف براساس T5150-2001/ DL است (استاندارد چینی). از لحاظ OCC، CSG و CFSG می توان مشاهده کرد که مقاومت خراشی ارتباط مثبتی با قدرت فشرده سازی دارد. اما مقاومت در برابر خراش مربوط به یکپارچگی بتن است. از دست دادن توده CSG و CFSG بالاتر از ۷.۵٪ است که ۹-۴ برابر بزرگتر از تخلخل بتن است. مجموع اینها نمی تواند به طور موثری متصل شود از آنجا که محتوای مازاد ضریب خوب منجر به یکپارچگی ضعیف از CSG و CFSG می شود. با توجه به بتن متخلخل، خمیر سیمان در اطراف نقطه همجواری تراکم بزرگ، که تضمین قدرت بالای پیوند در نقطه متصل است. با اصلاح ۱۵٪ تراکم اضافی، بیشتر نقاط اتصال بین مقیاس درشت تشکیل شده و نتایج نشان می دهد که از دست دادن توده PC-3 و PC-4 به میزان ۴۷٪ و ۵۰٪ در مقایسه با PC-2 کاهش می یابد.

هجدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست



شکل ۱۱. مقاومت فشاری و کاهش وزن انواع بتن های مختلف.

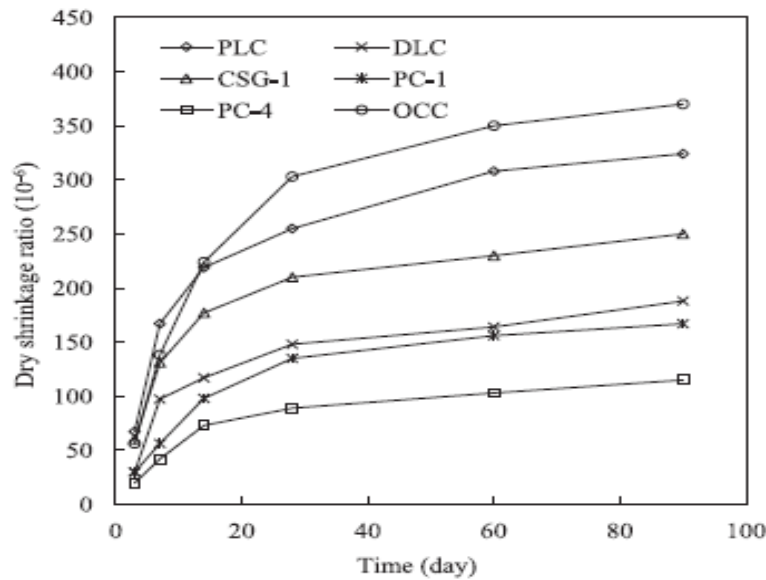
### ۳.۶. انقباض خشک

انقباض خشک برای ارزیابی توانایی ضد ترک در انواع مواد مختلف پایه راه استفاده می شود. همانطور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، انقباض خشک عمدتاً در دوره ۱۴-۰ روز رخ می دهد و نسبت انقباض خشک پس از مدت زمان ۲۸ روز، پایدار می ماند.

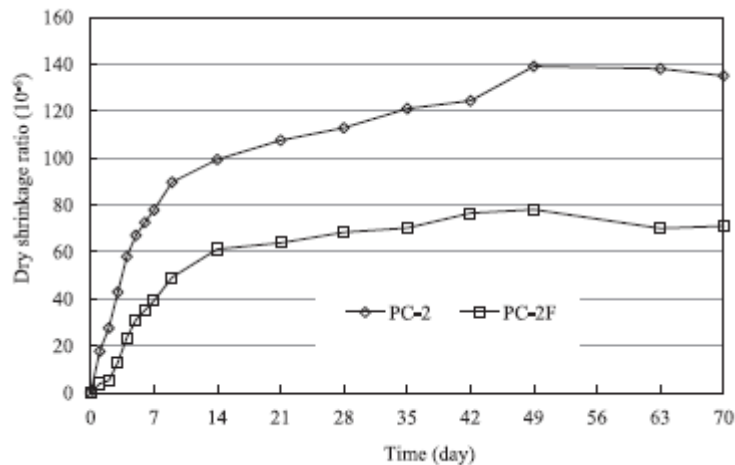
OCC دارای بالاترین نسبت خمش خشک بین انواع مختلف بتن برای بالا بودن محتوای سیمان می باشد، در حالی که بتن متخلخل دارای کمترین مقدار انقباض است. نسبت خمش خشک بتن متخلخل تقریباً ۳۱-۴۵ درصد OCC و بتن متخلخل با تراکم (PC-4) دارای کمترین مقدار انقباض است. توسعه انقباض خشک از بتن های متخلخل تهیه شده با فاز در شکل ۱۳ در مقایسه با بتن معمولی متخلخل نشان داده شده است.

با این حال، در ۷۰ روز، PC-2F دارای نسبت انقباض خشک تقریباً ۵۰٪ کمتر از PC-2 است. تراکم درشت تشکیل یک ساختار از بتن متخلخل است که توسط سیمان محدود می شود. با اصلاح تراکم و FA، سیمان نازک تر بر روی سطح خمیر به کاهش انقباض منجر می شود [۴۷]. علاوه بر این، اثر میکروارگانیک نیز باعث افزایش حجم پایداری بتن متخلخل می شود [۴۸].

هجدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست



شکل ۱۲. نسبت خمش خشک مواد مختلف جاده.



شکل ۱۳. تاثیر فیزیکی بر کاهش خشک بتن متخلخل.

#### ۴. نتیجه گیری

ثبات دینامیکی، مقاومت در برابر خراش و ثبات حجم در مقایسه با جاده های مختلف در این مقاله مورد بررسی قرار گرفت. مواد پایه بر اساس پایگاه داده های بزرگ، ارتباطات تخلخل و نفوذ پذیری بررسی شده است.

(۱) جمعیت زیاد منطقه نقاط مشترک را در میان تراکم برای کاهش نسبت منافذ که بزرگتر از  $70.50 \mu\text{m}$  است افزایش می دهد و نسبتهای منافذ را تا  $10.50 \mu\text{m} - 50 \mu\text{m}$  افزایش می دهد.

(۲) تخلخل موثر دارای به ترتیب رابطه خطی با تخلخل کل و عملکرد قدرت با ضریب نفوذپذیری است. در مقایسه با تحقیقات قبلی، این مقاله یک تابع قدرت با یک پایگاه داده بزرگ ترجیحا رابطه نفوذپذیری و تخلخل را فراهم می کند .

(۳) استحکام فشاری بتن متخلخل کمتر از سایر مواد پایه جاده ای است. با این حال، ۷ روز فشار مقاومت بتن متخلخل با کمتر از ۵ MPa می تواند مواد سیمان، و تراکم را برای بهبود استحکام باند بتن متخلخل بکار برد.

(۴) از نظر عملکرد آسفالت از بتن متخلخل، کانتایرو در ۲۸ روز بالاتر از بتن خشک از دست می دهد. تلفات جرمی در اثر فرسایش آب ۱/۶ تا ۱/۵ برابر دیگر مواد پایه جاده ای است. به طور کلی، بتن متخلخل عملکرد مطلوبی در ثبات دینامیکی، مقاومت و حجم ثبات، به خصوص بتن متخلخل اصلاح شده دارد .

## مراجع

- [1] [http://news.xinhuanet.com/politics/2015-10/17/c\\_128327284.htm](http://news.xinhuanet.com/politics/2015-10/17/c_128327284.htm) Apr. 2017
- [2] O. Deo, N. Neithalath, Compressive behavior of pervious concretes and a quantification of the influence of random pore structure features, *Mater. Sci.Eng. A* 528 (1) (2010) 402–412.
- [3] Z. Yang, W. Ma, W. Shen, et al., The aggregate gradation for the porous concrete pervious road base material, *J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed.* 23 (3) (2008) 391–394.
- [4] P. Chindaprasirt, S. Hatanaka, N. Mishima, et al., Effects of binder strength and aggregate size on the compressive strength and void ratio of porous concrete, *Int. J. Miner. Metall. Mater.* 16 (6) (2009) 714–719.
- [5] J.D. Luck, S.R. Workman, M.S. Coyne, et al., Solid material retention and nutrient reduction properties of pervious concrete mixtures, *Biosyst. Eng.* 100 (3) (2008) 401–408.
- [6] B.E. Jimma, P.R. Rangaraju, Film-forming ability of flowable cement pastes and its application in mixture proportioning of pervious concrete, *Constr. Build. Mater.* 71 (2014) 273–282.
- [7] O. Deo, N. Neithalath, Compressive response of pervious concretes proportioned for desired porosities, *Constr. Build. Mater.* 25 (11) (2011) 4181–4189.
- [8] K. CosiC, L. Korat, V. Ducman, et al., Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete, *Constr. Build. Mater.* 78 (2015) 69–76.
- [9] F. Tittarelli, M. Carsana, M. Ruello, Effect of hydrophobic admixture and recycled aggregate on physical-mechanical properties and durability aspects of no-fines concrete, *Constr. Build. Mater.* 66 (1) (2014) 30–37.
- [10] A. Joshaghani, A.A. Ramezani pour, Mechanical characteristic of pervious concrete considering the gradation and size of coarse aggregates and void ratio, *Res. J. Environ. Earth Sci.* 6 (9) (2014) 437–442.
- [11] M. Carsana, F. Tittarelli, L. Bertolini, Use of no-fines concrete as a building material: Strength, durability properties and corrosion protection of embedded steel, *Cem. Concr. Res.* 48 (2013) 64–73.
- [12] F. Tittarelli, M. Carsana, T. Bellezze, Corrosion behavior of reinforced no-fines concrete, *Corros. Sci.* 70 (2013) 119–126.
- [13] J. Yang, G. Jiang, Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials, *Cem. Concr. Res.* 33 (3) (2003) 381–386
- N. Neithalath, Extracting the performance predictors of enhanced porosity Concretes from electrical conductivity spectra, *Cem. Concr. Res.* 37 (5) (2007) 796–804.
- [15] A. Bonicelli, F. Giustozzi, M. Crispino, Experimental study on the effects of fine sand addition on differentially compacted pervious concrete, *Constr. Build. Mater.* 91 (2015) 102–110.
- [16] L.M. Haselbach, S. Valavala, F. Montes, Permeability predictions for sand-clogged Portland cement pervious concrete pavement systems, *J. Environ.*



- Manage. 81 (1) (2006) 42–49.
- [17] C. Lian, Y. Zhuge, Optimum mix design of enhanced permeable concrete – an experimental investigation, *Constr. Build. Mater.* 24 (12) (2010) 2664–2671.
- [18] M. Neithalath, M.S. Sumanasooriya, O. Deo, Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction, *Mater. Charact.* 61 (8) (2010) 802–813.
- [19] A. Joshaghani, A. Ramezaniapour, O. Ataei, et al., Pervious concrete pavement mixture design by using the Taguchi method, *Constr. Build. Mater.* 101 (2015) 317–325.
- [20] W. Yeih, T. Fu, J. Chang, et al., Properties of pervious concrete made with air-cooling electric arc furnace slag as aggregates, *Constr. Build. Mater.* 93 (2015) 737–745.
- [21] H.A. Ibrahim, H.A. Razak, F. Abutaha, Strength and abrasion resistance of palm oil clinker pervious concrete under different curing method, *Constr. Build. Mater.* 147 (2017) 576–587.
- [22] A. Torres, J. Hub, A. Ramos, The effect of the cementitious paste thickness on the performance of pervious concrete, *Constr. Build. Mater.* 95 (2015) 850–859.
- [23] A. Yahia, K.D. Kabagire, New approach to proportion pervious concrete, *Constr. Build. Mater.* 62 (2014) 38–46.
- [24] P. Chindaprasirt, S. Hatanaka, T. Chareerat, et al., Cement paste characteristics and porous concrete properties, *Constr. Build. Mater.* 22 (5) (2008) 894–901.
- [25] A.R. Bagheri, H. Zanganeh, M.M. Moalemi, Mechanical and durability properties of ternary concretes containing silica fume and low reactivity blast furnace slag, *Cem. Concr. Compos.* 34 (5) (2012) 663–670.
- [26] Y. Chen, K. Wang, X. Wang, Strength, fracture and fatigue of pervious concrete, *Constr. Build. Mater.* 42 (5) (2013) 97–104.
- [27] R. Zhong, K. Wille, Material design and characterization of high performance pervious concrete, *Constr. Build. Mater.* 98 (2015) 51–60.
- [28] A. Joshaghani, A. Moazenian, R.A. Shuaibu, Experimental study on the use of trass as a supplementary cementitious material in pervious concrete, *J. Environ. Sci. Eng. A* 1 (2017) 39–52.
- [29] A. Joshaghani, The effects of zeolite as supplementary cement material on pervious concrete, in: *International Concrete Sustainability Conference Washington D.C.*, 2016.
- [30] W. Shen, L. Shan, T. Zhang, Investigation on polymer–rubber aggregate modified porous concrete, *Constr. Build. Mater.* 38 (2013) 667–674.