

# نقش اندازه بیشینه بعد سنگدانه و میزان ریز دانه مصرفی بر ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و هیدرولیکی بتن متخلخل

## کد مقاله: 55C

الهام شمالی<sup>۱</sup>، شهناز دانش<sup>۲</sup>، محمدامین ارشدترابی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-محیط زیست دانشگاه فردوسی مشهد

۲- عضو هیئت علمی گروه مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد

۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران-محیط زیست دانشگاه فردوسی مشهد

### چکیده:

توانایی ویژه بتن متخلخل برای نفوذ آب، امکان کاربرد این محصول را برای مدیریت رواناب‌های شهری افزایش داده است. به همین دلیل بتن متخلخل جایگزین مناسبی برای انواع سنگ فرش‌های غیر قابل نفوذ می‌باشد. از بتن متخلخل می‌توان برای بسیاری از برنامه‌های توسعه شهری مانند ساخت پارکینگ، پیاده رو، فضاهاى سبز و ... استفاده کرد. با این حال دو ویژگی سرعت نفوذ جریان و مقاومت مکانیکی بتن متخلخل می‌تواند نوع و میزان کاربرد آن را محدود نماید. در تحقیق حاضر، اثرات اندازه بیشینه بعد سنگدانه (شامل ۱۲/۵ و ۹/۵ میلیمتر) و میزان حجم ریز دانه (شامل ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد) بر ویژگی‌های فیزیکی (تخلخل)، مکانیکی (مقاومت فشاری) و هیدرولیکی (ضریب نفوذ پذیری) بتن متخلخل مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش قطر متوسط سنگدانه‌ها (که در اثر افزایش بیشینه بعد سنگدانه یا کاهش حجم ریزدانه اتفاق می‌افتد)، تخلخل و ضریب نفوذ پذیری افزایش ولی مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. افزایش ضریب نفوذ پذیری در مقابل افزایش تخلخل به صورت یک رابطه نمایی می‌باشد. به طور مثال، با افزایش ۵ درصدی تخلخل از ۱۵ به ۲۰ و ۲۵ به ۳۰ درصد، ضریب نفوذ پذیری به ترتیب به میزان ۲ و ۳ برابر افزایش یافت. همچنین مشاهده شد که منحنی دانه بندی بهینه در این پژوهش دارای قطر متوسط سنگدانه برابر ۹/۲ میلیمتر است. ضریب نفوذ پذیری در حالت بهینه برابر ۲۳۰ میلیمتر بر ثانیه و مقاومت فشاری برابر ۲۱/۷۵ مگاپاسکال است.

**واژه های کلیدی:** بتن متخلخل، رواناب، نفوذ پذیری، مقاومت فشاری، دانه بندی.

## ۱- مقدمه

در مباحث مدیریت شهری، روش‌های متنوعی برای کنترل سیلاب و مدیریت کیفیت رواناب شهری وجود دارد که سیستم‌های تزریق و به ویژه حوضچه‌های نگهداری و تزریق به صورت خشک و تر از آن جمله‌اند. در نواحی شهری که تراکم بافت شهری و تاسیساتی وجود دارد، با توجه به محدودیت زمین، استفاده از سیستم تزریق سیلاب به صورت حوضچه وجود ندارد. با این حال استفاده از روسازی‌های متخلخل در حاشیه خیابان‌ها، پارکینگ‌ها، فضاهای سبز و ... امکان پذیر بوده که به دلیل کاهش هزینه‌های اقتصادی در مقایسه با سایر روش‌ها (مانند ایجاد ترانشه)، برای مدیریت صحیح رواناب‌های شهری بسیار مورد توجه است. به همین دلیل اداره استاندارد حفاظت محیط زیست آمریکا استفاده از بتن متخلخل را به عنوان بهترین روش مدیریتی<sup>۱</sup> (BMP) معرفی نموده است [۱].

بتن متخلخل مخلوطی از سیمان، آب و سنگدانه درشت با دانه‌بندی مشخص، بدون ریزدانه یا با ریزدانه کم و در مواردی افزودنی‌های شیمیایی است به گونه‌ای که میزان تخلخل آن در محدوده ۱۵ تا ۲۵ متغیر خواهد بود. ساختار باز و منافذ پیوسته موجود در بتن متخلخل اجازه عبور آب و هوا در نتیجه کاهش رواناب سطحی را می‌دهد [۲]. یک روسازی با ضخامت ۱۲۵ میلی‌متر و تخلخل ۲۰ درصد قادر خواهد بود حجم آب بارانی به شدت ۲۵ میلی‌متر را که به طور مداوم می‌بارد، در فضای خالی خود ذخیره کند [۳]. حجم عمده بتن متخلخل را سنگدانه‌ها تشکیل می‌دهند که به وسیله خمیر سیمان به یکدیگر متصل شده‌اند. وجود حفرات زیاد بین سنگدانه‌های درشت هرچند که باعث افزایش نفوذپذیری آب می‌شود ولی از طرف دیگر به دلیل کاهش تعداد نقاط اتصال بین درشت دانه‌ها (به دلیل نبود ریزدانه)، مقاومت بتن متخلخل کاهش می‌یابد. به همین دلیل یکی از مهمترین مسائلی که در ساخت بتن متخلخل به عنوان چالش مطرح است، چگونگی ترکیب سنگدانه‌ها (به لحاظ اندازه و درصد حجمی) برای رسیدن به یک تعادل مناسب بین مقاومت و نفوذپذیری بتن متخلخل است.

بر اساس مطالعات انجام شده در خصوص دانه بندی بهینه بتن متخلخل نتایج ارزشمندی به دست آمده است. استفاده از ریز دانه ( عبوری از الک ۴/۷۵ میلیمتر)، تعداد نقاط اتصالی بین سنگدانه را افزایش داده و باعث افزایش مقاومت بتن متخلخل می‌شود. علاوه بر این با افزایش بیشینه بعد سنگدانه مصرفی، مقاومت بتن متخلخل کاهش و در مقابل میزان فضای خالی و نفوذپذیری بتن افزایش می‌یابد [۴]. ژیفنگ و همکاران [۴] توصیه کردند که بیشینه اندازه سنگدانه جهت استفاده در بتن متخلخل به ۲۶/۵ میلیمتر محدود گردد. علاوه بر این شکل ظاهری سنگدانه‌ها نیز می‌تواند بر خواص بتن متخلخل تاثیر گذار باشد. نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی تنیس و همکاران [۵] نشان می‌دهد که امکان استفاده از هر دو سنگدانه‌های شکسته و گرد گوشه در ساخت بتن متخلخل وجود دارد. ولی با استفاده از سنگدانه‌های گرد گوشه ضریب نفوذپذیری افزایش و مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. اگرچه رابطه بین مقاومت بتن متخلخل و نسبت آب به سیمان به طور کامل مورد بررسی قرار نگرفته است اما، تنیس و همکاران [۵] و مینگر [۶] به ترتیب نسبت بهینه آب به سیمان را در محدوده ۰/۲۷-۰/۳۰ و ۰/۲۵-۰/۳۰ پیشنهاد کرده‌اند. کاربرد مقادیر کم سیمان به علت ضعف در مقاومت پیوندی بین خمیر چسباننده و سنگدانه‌ها، موجب کاهش مقاومت‌های مکانیکی می‌گردد و از سوی دیگر استفاده بیش از حد سیمان می‌تواند با پر کردن فضاهای خالی، سبب کاهش نفوذپذیری گردد. نتایج آزمایش‌های تورس و همکاران [۷] نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت ملات در برگیرنده سنگدانه‌ها، نفوذپذیری و تخلخل کاهش می‌یابد. نتایج کار این محققین کاهش تخلخل و نفوذپذیری با افزایش ضخامت ملات را یک رابطه غیر خطی نمایش داد به گونه‌ای که در ضخامت ملات بیشتر کاهش شدیدتری را در تخلخل و نفوذپذیری شاهد بودند. با توجه با اهمیت موضوع، در تحقیق

حاضر به بررسی اثرات اندازه و میزان ریز دانه مصرفی بر ویژگی‌های فیزیکی (تخلخل)، مکانیکی (مقاومت فشاری) و هیدرولیکی (ضریب نفوذ پذیری) بتن متخلخل پرداخته شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مواد

برای بررسی اثر اندازه سنگدانه‌ها بر ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و هیدرولیکی بتن متخلخل از سنگدانه شکسته شده، سیمان، فوق روان کننده و آب استفاده شد. در ادامه مشخصات مصالح مورد استفاده در این پژوهش ارائه گردیده است.

### سنگدانه

درشت دانه و ریزدانه مورد استفاده در این پژوهش از معادن اطراف فریمان تهیه شد که از نوع سنگدانه شکسته شده بود. آزمایش‌های مختلف کنترل کیفیت مصالح سنگی شامل تعیین وزن مخصوص حقیقی و ظاهری، درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لس آنجلس، تعیین درصد شکستگی در یک وجه و دو وجه و تعیین ضریب تطویل و تورق سنگدانه‌ها بر روی مصالح سنگی انجام شده و نتایج این آزمایش در جدول شماره ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- نتایج آزمایش‌های کنترل کیفیت مصالح سنگی

نتیجه آزمایش	استاندارد مورد استفاده	نوع آزمایش
۲/۵۸	ASTM C127	تعیین وزن مخصوص حقیقی مصالح سنگی درشت‌دانه خشک
۲/۶۹	ASTM C127	تعیین وزن مخصوص حقیقی مصالح سنگی درشت‌دانه اشباع با سطح خشک
٪۱۶	ASTM C535	درصد افت وزنی در مقابل سایش و ضربه به روش لس آنجلس
٪۹۸	ASTM D5821	تعیین درصد شکستگی در یک وجه و بیشتر
٪۸۶	ASTM D5821	تعیین درصد شکستگی در دو وجه و بیشتر
٪۱۱	ASTM D 4791	تعیین شاخص تطویل و تورق

### سیمان

از سیمان پرتلند نوع دو محصول شرکت سیمان زاوه تربت برای ساخت بتن متخلخل در این پژوهش استفاده گردید که ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سیمان مصرفی در جدول شماره ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات فیزیکی و مکانیکی سیمان پرتلند نوع دو زاوه تربت

ویژگی	مقاومت فشاری	مقاومت فشاری	مقاومت فشاری	زمان گیرش	زمان گیرش
۳ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه	اولیه	نهایی	
kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	دقیقه	دقیقه	
۲۲۴	۳۹۳	۵۴۸	۱۳۲	۲۴۸	
مقدار					

### آب و فوق روان کننده

برای ساخت و عمل‌آوری آزمون‌های بتن متخلخل از آب شرب شهر مشهد استفاده شده است. همچنین برای کاهش نسبت آب به سیمان از فوق روان کننده‌ای با نام تجاری P.C.5000 محصول شرکت رزین سازان فارس با چگالی ۱/۰۵ استفاده شد. فوق روان کننده مذکور بر پایه پلی کربوکسیلات اتر بوده و رنگ آن قهوه‌ای روشن است.

### ۲-۲- نسبت‌های اختلاط

برای تعیین نسبت‌های اختلاط از دستورالعمل تهیه طرح اختلاط بتن‌های سبک بدون ریزدانه استفاده شده است [۸]. روش عملی کار به این صورت است که ابتدا دانه‌بندی ترکیبی مورد نظر تعیین شده و چگالی توده‌ای و قطر میانگین سنگدانه‌ها محاسبه می‌شود. سپس با انتخاب ضخامت ملات سیمان دربرگیرنده سنگدانه‌ها و با استفاده از رابطه زیر حجم ملات سیمان در بتن محاسبه می‌گردد:

$$V_{pm} = \frac{6\alpha \cdot V_a \cdot t}{d_{avg}} \quad (1)$$

در رابطه بالا،  $V_{pm}$  برابر مقدار سیمان در واحد حجم بتن متخلخل ( $\text{kg/m}^3$ )،  $\alpha$  ضریب اصلاحی است که به علت کروی نبودن سنگدانه‌ها در نظر گرفته شده است (بر اساس مشاهدات عینی در تحقیق حاضر برابر ۱/۲۵ است)،  $V_a$  نسبت چگالی توده‌ای به چگالی دانه‌ای سنگدانه‌ها،  $t$  ضخامت ملات دربرگیرنده سنگدانه‌ها بر حسب میلیمتر و  $d_{avg}$  قطر میانگین مخلوط سنگدانه‌ها بر حسب میلیمتر می‌باشد. در نهایت با انتخاب نسبت آب به سیمان و با استفاده از رابطه حجم مطلق، وزن هریک از اجزای تشکیل دهنده ملات سیمان محاسبه می‌شود. در تحقیق حاضر در تمامی طرح‌های اختلاط نسبت آب به سیمان برابر ۰/۳ و ضخامت ملات در بر گیرنده سنگدانه‌ها نیز برابر ۰/۲۵ میلیمتر انتخاب شد. دانه‌بندی‌های مورد استفاده در طرح‌های اختلاط و مقدار سیمان و آب مصرفی در هر طرح اختلاط در جدول شماره ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- دانه بندی سنگدانه مورد استفاده در این پژوهش

آب $\text{kg/m}^3$	سیمان $\text{kg/m}^3$	چگالی توده‌ای $\text{kg/m}^3$	قطر میانگین mm	درصد عبوری سنگدانه از الک						کد طرح اختلاط
				#16	#8	#4	#3/8"	#1/2"	#3/4"	
۳۳/۸	۱۱۲/۷۵	۱۵۲۹	۹/۷۸	۰	۱	۵	۴۶	۸۵	۱۰۰	PC1
۳۷/۲	۱۲۴/۰۰	۱۵۸۶	۹/۲۲	۰	۳	۱۰	۵۲	۸۷	۱۰۰	PC2
۳۸/۶	۱۲۸/۶۲	۱۵۰۰	۸/۴۱	۰	۵	۲۰	۵۹	۹۰	۱۰۰	PC3
۴۲/۹	۱۴۳/۰۱	۱۶۴۴	۸/۲۹	۰	۱	۵	۷۰	۱۰۰	۱۰۰	PC4
۴۴/۸	۱۴۹/۴۲	۱۶۳۹	۷/۹۱	۰	۳	۱۰	۶۹	۱۰۰	۱۰۰	PC5
۴۸/۷	۱۶۲/۲۳	۱۶۶۷	۷/۴۱	۰	۵	۲۰	۷۲	۱۰۰	۱۰۰	PC6

## ۳-۲- آماده سازی آزمون‌ها

### نحوه اختلاط بتن و قالب گیری

به منظور یکسان نمودن شرایط ساخت آزمون‌ها و افزایش دقت نتایج آزمایش‌ها، روش اختلاط ثابتی برای ساخت طرح‌های اختلاط به شرح زیر به کار گرفته شد.

- ۱- مخلوط کردن مقدار کمی از سیمان (کمتر از ۵ درصد جرمی) با سنگدانه‌ها به مدت یک دقیقه.
- ۲- اضافه نمودن تدریجی باقیمانده سیمان به همراه دو سوم آب به بتن.
- ۳- مخلوط کردن آب باقیمانده و فوق روان کننده و سپس اضافه کردن مخلوط حاصل به بتن به مدت سه دقیقه.
- ۴- استراحت دادن به مخلوط مذکور به مدت دو دقیقه و بهم زدن این مخلوط به مدت دو دقیقه دیگر.
- ۵- پس از آماده شدن بتن برای قالب‌گیری، ریختن بتن آماده شده در سه لایه در قالب‌های استوانه‌ای ۱۰ در ۲۰ سانتیمتر و متراکم نمودن هر لایه از طریق زدن ۲۵ ضربه توسط میله فولادی.

### عمل آوری آزمون‌ها و آماده سازی برای انجام آزمایش‌ها

برای عمل‌آوری آزمون‌های بتنی پس از ساخت، نمونه‌های ساخته شده به مدت ۲۴ ساعت در قالب و زیر پارچه مرطوب نگهداری شدند و سپس تا سن مورد نظر برای آزمایش داخل آب قرار گرفتند. برای انجام آزمایش‌های مورد نظر، تقریباً ۲۵ میلیمتر از ابتدا و انتهای آزمون‌ها از طریق برش زدن جدا گردیدند. به این ترتیب قسمت‌هایی از نمونه استوانه‌ای که نفوذپذیری کمتری داشتند حذف شدند و مضاف بر اینکه سطوح آزمون‌ها برای انجام آزمایش مقاومت فشاری، مسطح و موازی یکدیگر خواهد بود.

## ۲-۴- آزمایش‌ها

### تعیین درصد تخلخل

تخلخل، مقدار منافذ و فضای خالی داخل بتن است که به صورت درصدی از مجموع حجم ماده نشان داده می‌شود. در این پژوهش میزان تخلخل بتن متخلخل به روش معرفی شده در استاندارد ASTM C642 اندازه‌گیری شد. در این روش اختلاف بین وزن غوطه‌وری و وزن خشک آزمون (طبق رابطه ۲) محاسبه گردید [۹]. برای انجام این آزمایش ابتدا آزمون‌ها به مدت ۲۴ ساعت در گرمخانه با دمای ۱۰۵ درجه سانتیگراد خشک شده و سپس وزن خشک و غوطه‌وری آن‌ها در آب اندازه‌گیری شد.

$$P = \left[ 1 - \left( \frac{W_2 - W_1}{\rho_w \cdot V_s} \right) \right] \times 100 \quad (2)$$

در رابطه بالا،  $p$  نسبت تخلخل آزمون (%)،  $W_1$  وزن آزمون داخل آب (kg)،  $W_2$  وزن آزمون در حالت خشک (kg)،  $V_s$  حجم نمونه ( $\text{cm}^3$ ) و  $\rho_w$  دانسیته آب در دمای ۲۱ درجه سانتیگراد ( $\text{kg/m}^3$ ) است. آزمایش تعیین درصد تخلخل بر روی آزمون‌ها در سن ۲۸ روز انجام شد و متوسط نتایج آزمایش انجام شده بر روی سه نمونه استوانه‌ای به ابعاد ۱۰ در ۲۰ به عنوان میزان تخلخل هر طرح اختلاط در نظر گرفته شد.

### تعیین ضریب نفوذپذیری

نفوذپذیری یک ماده بیان‌کننده چگونگی ارتباط میان منافذ آن است. برای مشخص کردن نفوذپذیری یک جسم، باید ضریب نفوذپذیری (هدایت هیدرولیکی) آن تعیین شود که عبارت است از میزان جریان مایع یا گاز عبوری در واحد زمان از واحد سطح مقطع آن جسم، تحت یک گرادیان هیدرولیکی واحد. برای انجام این آزمایش سطوح جانبی آزمون بتنی پوشانده شده و هد آب افتان بر سطح فوقانی نمونه اعمال می‌شود. برای محاسبه ضریب نفوذپذیری بتن متخلخل از رابطه ۳ (بر اساس قانون دارسی و فرض جریان لایه‌ای) استفاده شد.

$$k = \frac{a \cdot L}{A \cdot t} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (3)$$

در رابطه بالا،  $k$  ضریب نفوذپذیری ( $\text{mm/sec}$ )،  $a$  سطح مقطع لوله آب ( $\text{mm}^2$ )،  $L$  طول آزمون ( $\text{mm}$ )،  $A$  سطح مقطع آزمون ( $\text{mm}^2$ )،  $t$  زمان لازم برای رسیدن ارتفاع آب از تراز  $h_1$  به  $h_2$  ( $\text{sec}$ )،  $h_1$  ارتفاع اولیه آب در لوله ( $\text{mm}$ ) و  $h_2$  ارتفاع نهایی آب در لوله ( $\text{mm}$ ) می‌باشد.

این آزمایش در سن ۲۸ روزگی انجام شد و متوسط نتیجه آزمایش بر روی سه نمونه استوانه‌ای ۱۰ در ۲۰ به عنوان میانگین ضریب نفوذپذیری هر طرح مخلوط منظور گردید.

### آزمایش تعیین مقاومت فشاری

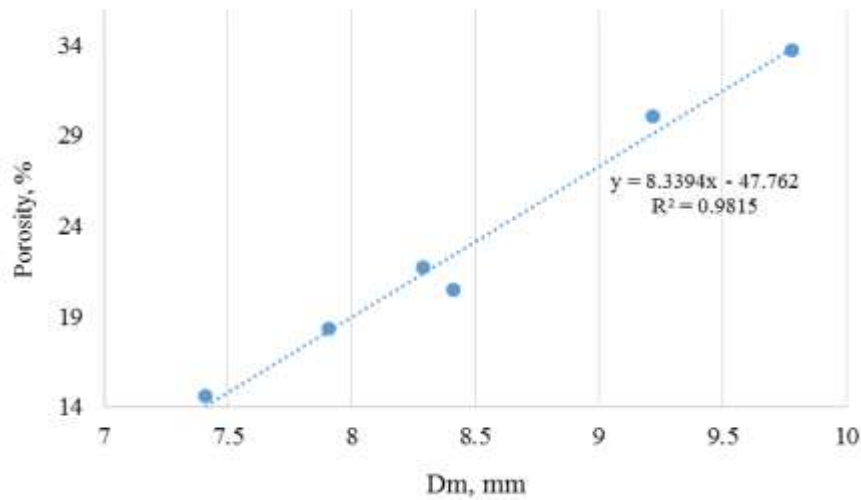
در این پژوهش مقاومت فشاری بتن مطابق استاندارد ASTM C39 و در سن ۲۸ روز انجام شد. در این سن از سه آزمون استوانه‌ای ۱۰ در ۲۰ استفاده گردید و میانگین نتایج آن‌ها به عنوان مقاومت فشاری هر طرح اختلاط گزارش شد.

## ۳- نتایج و بحث

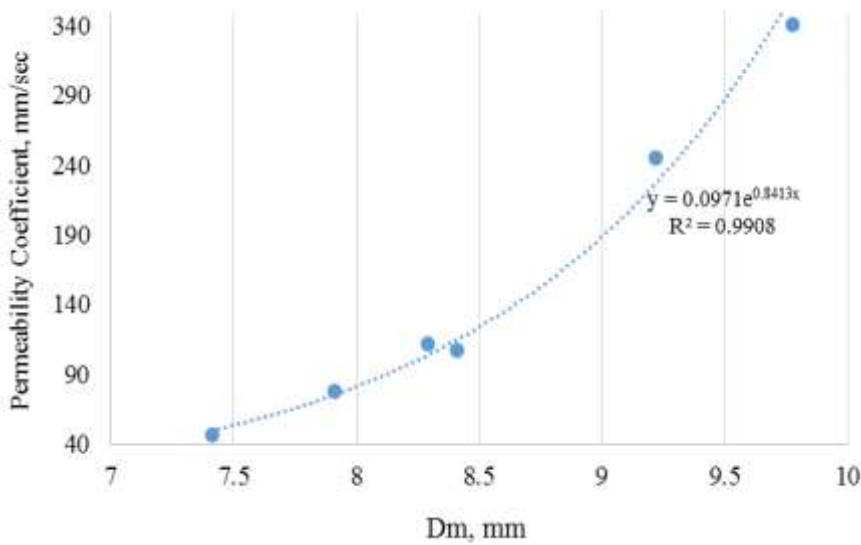
### ۳-۱- تاثیر دانه‌بندی بر تخلخل و ضریب نفوذپذیری

افزایش بیشینه بعد سنگدانه درشت از یک سو و کاهش حجم ریزدانه در مخلوط سنگدانه از سوی دیگر باعث می‌شود تا قطر میانگین سنگدانه‌ها در مخلوط بتن متخلخل افزایش یابد. همانطور که در شکل‌های ۱ و ۲ مشاهده می‌شود با افزایش قطر میانگین سنگدانه‌ها، میزان تخلخل و ضریب نفوذپذیری در بتن متخلخل افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج به دست آمده می‌توان مشاهده کرد که میزان تخلخل با افزایش قطر میانگین سنگدانه‌ها به صورت خطی و میزان ضریب نفوذ پذیری با افزایش قطر میانگین سنگدانه‌ها به صورت نمایی افزایش می‌یابد. دلیل این امر ممکن است این باشد که قابلیت نفوذ آب از بتن متخلخل بیشتر تحت تاثیر نحوه اتصال حفره‌ها به یکدیگر است تا میزان حجم کل فضاهای خالی [۱۰]. نتایج به دست آمده توسط شیفر و همکاران [۱۱] حاکی از آن است که مقدار ضریب هیدرولیکی (نفوذپذیری) برای بتن متخلخل معمولی در محدوده ۱/۵ الی ۵/۵ میلیمتر بر ثانیه متغیر است. در تحقیق حاضر برای کوچکترین قطر میانگین سنگدانه به کار گرفته شده (برابر ۷/۴۱ میلیمتر)،

ضریب هیدرولیکی معادل ۴۷ میلیمتر بر ثانیه به دست آمد که از حداکثر مقدار توصیه شده توسط شیفر و همکاران [۱۱] نیز بیشتر است.



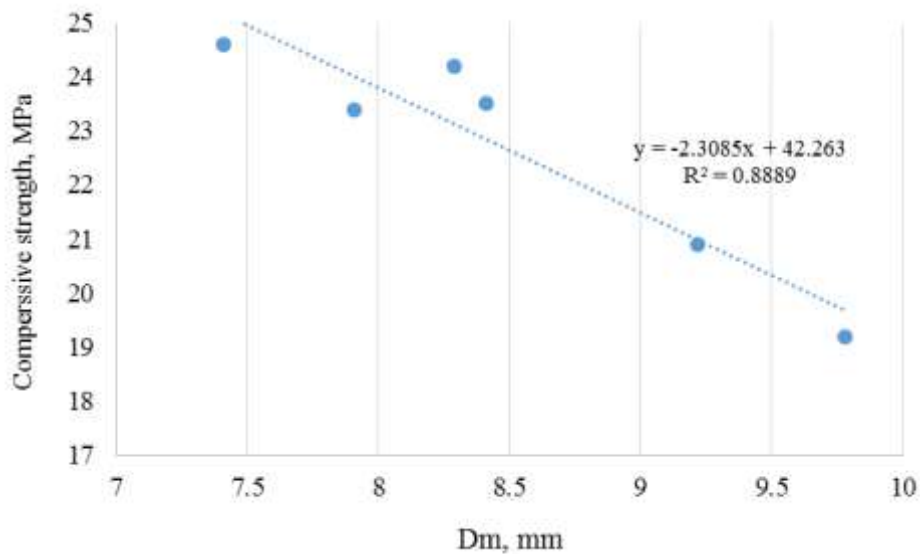
شکل ۱- ارتباط بین دانه بندی و تخلخل آزمونه‌ها



شکل ۲- ارتباط بین دانه بندی و ضریب نفوذ پذیری

### ۲-۳- تاثیر دانه‌بندی بر مقاومت فشاری

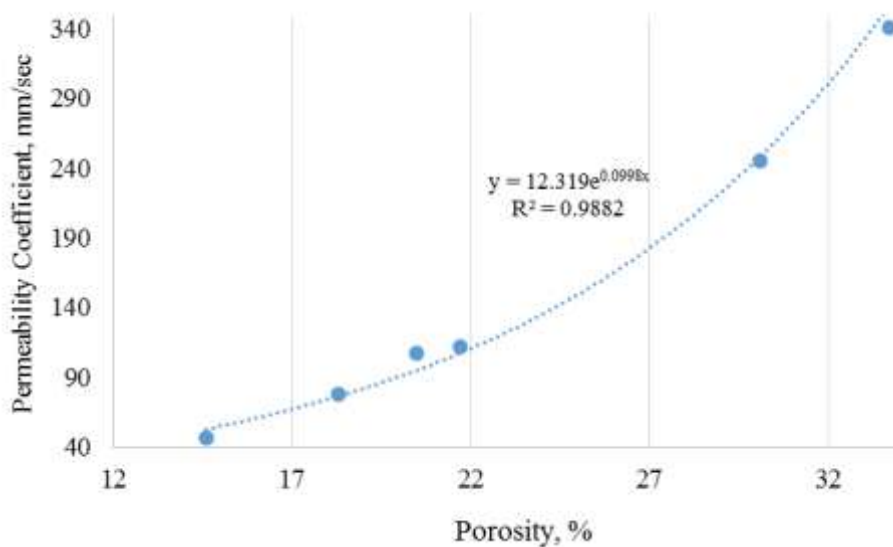
در شکل شماره ۳ اثر افزایش قطر میانگین سنگدانه‌ها بر مقاومت فشاری نشان داده شده است. نتایج به دست آمده در این پژوهش بیانگر آن است که با افزایش قطر میانگین سنگدانه‌ها در بتن متخلخل، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. به عنوان مثال با افزایش قطر میانگین سنگدانه‌ها از ۷/۵ به ۱۰ میلیمتر، مقاومت فشاری ۲۸ درصد کاهش می‌یابد. به طور کلی دو عامل قفل و بست سنگدانه‌ها و مقاومت پیوندی خمیر سیمان و سنگدانه، تامین کننده خواص مقاومتی بتن متخلخل است. با استفاده از ریزدانه بیشتر در مخلوط سنگدانه‌ها و کاهش میانگین قطر سنگدانه‌ها نقاط تماس بین آن‌ها بیشتر می‌شود و این امر منجر به افزایش مقاومت فشاری بتن متخلخل می‌گردد [۴].



شکل ۳- ارتباط بین دانه بندی و مقاومت فشاری

### ۳-۳- ارتباط بین تخلخل و ضریب نفوذپذیری

نتایج ارائه شده در شکل شماره ۴ دلالت بر آن دارند که با افزایش فضای خالی در آزمون‌های بتن متخلخل (تخلخل)، ضریب نفوذپذیری افزایش می‌یابد و این افزایش روند نمایی را نمایش می‌دهد. نتایج به دست آمده توسط نپتون نیز حاکی از آن است که ارتباط بین تخلخل و نفوذپذیری در بتن متخلخل به صورت نمایی است [۹]. به عنوان مثال همان گونه که از شکل شماره ۴ برمی‌آید، با افزایش ۵ درصدی تخلخل از میزان ۱۵ تا ۲۰ درصد، ضریب نفوذپذیری ۲ برابر ولی به ازای همین مقدار افزایش تخلخل از ۲۵ تا ۳۰ درصد، ضریب نفوذپذیری سه برابر افزایش می‌یابد. این رفتار همان گونه که در بخش ۳-۱ نیز توضیح داده شد، می‌تواند ناشی از نوع و شکل اتصالات درونی در یک محیط متخلخل باشد.

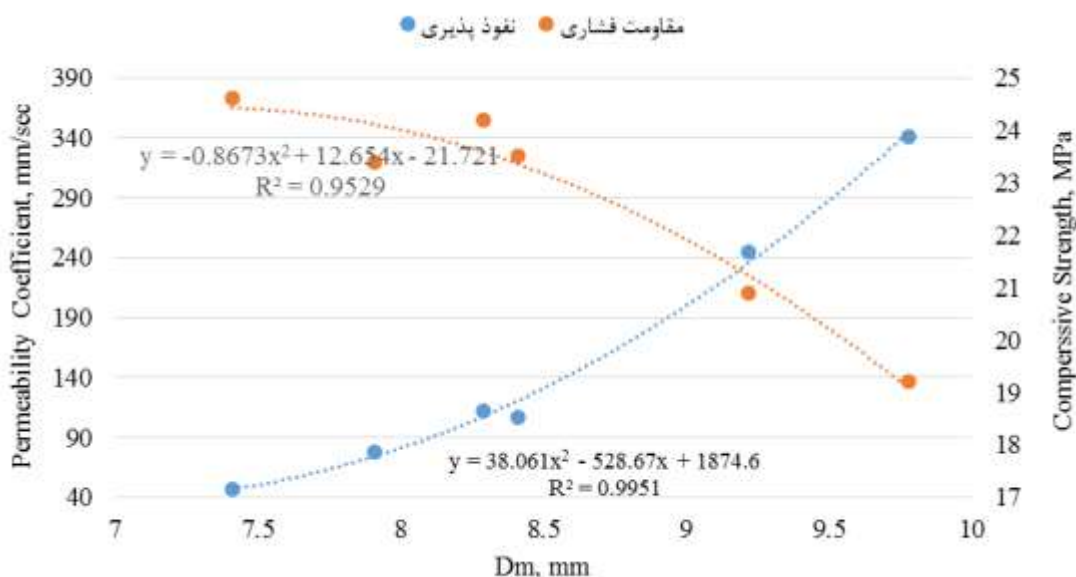


شکل ۴- ارتباط بین تخلخل و نفوذپذیری آزمونه‌ها

### ۳-۴- ارتباط بین قطر متوسط سنگدانه، مقاومت فشاری و نفوذپذیری

یکی از مهم ترین چالش‌های مرتبط با بتن متخلخل، انتخاب دانه بندی بهینه برای آن است. از مهمترین پارامترهایی که می‌تواند بر دانه‌بندی مخلوط سنگدانه اثر بگذارد، قطر متوسط سنگدانه‌های مورد استفاده در بتن متخلخل می‌باشد. در شکل شماره ۵ ارتباط بین قطر متوسط با دو عامل نفوذپذیری و مقاومت فشاری بتن متخلخل به نمایش در آمده است. همان گونه که در این شکل مشخص است، با کاهش قطر متوسط، مقاومت فشاری افزایش و نفوذ پذیری کاهش می‌یابد. با کاهش قطر متوسط مخلوط سنگدانه مورد استفاده در بتن متخلخل تعداد نقاط تماس بین سنگدانه‌ها افزایش یافته و در نتیجه نیروهای تماسی و در نهایت مقاومت آزمون بتن متخلخل بیشتر خواهد شد. این در حالی است که اتصال و ارتباط بین فضاهای خالی بین سنگدانه کاهش و در نتیجه نفوذ پذیری کمتری به دست می‌آید.

بر اساس نتایج نمایش داده شده در نمودار شکل ۵، می‌توان نقطه‌ای را به عنوان میانگین بهینه قطر سنگدانه‌ها تعیین نمود. اطلاعات مربوط به مقادیر دانه‌بندی، مقاومت فشاری و نفوذ پذیری در این نمودار وارد شده و با استفاده از رگرسیون خطی درجه دو، ارتباط بین نفوذ پذیری و قطر متوسط از یک سو، و مقاومت فشاری و دانه بندی از سوی دیگر رسم شده است. محل تلاقی دو منحنی، نقطه بهینه را نتیجه می‌دهد. عدد مربوط به این نقطه، میانگین قطر ۹/۲ میلی‌متر است. مقادیر نفوذ پذیری و مقاومت فشاری متناظر با این نقطه به ترتیب برابر ۲۳۰ میلی‌متر بر ثانیه و ۲۱/۷۵ مگا پاسکال می‌باشد. با توجه به ویژگی‌های مربوط به ۶ نوع دانه بندی تشریح شده در بخش‌های قبلی و نتایج مقاومت فشاری و نفوذ پذیری حاصل از این دانه بندی‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که دانه بندی مربوط به طرح اختلاط PC2 بهترین شرایط را برای دستیابی به نقطه بهینه فراهم می‌سازد. همان طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود قطر متوسط برای دانه بندی طرح مذکور برابر ۹/۲۲ میلی‌متر است. نفوذ پذیری و مقاومت فشاری مربوط به طرح اختلاط PC2 نتایجی به ترتیب معادل ۲۴۵ میلی‌متر بر ثانیه و ۲۰/۹ مگا پاسکال را نشان دادند که نزدیک‌ترین اعداد به نتایج به دست آمده از نمودار است.



شکل ۵- ارتباط بین قطر متوسط سنگدانه، نفوذ پذیری و مقاومت فشاری

### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش اندازه بیشینه بعد سنگدانه و میزان ریز دانه مصرفی در مخلوط سنگدانه‌ها به عنوان پارامترهای تاثیر گذار بر ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و هیدرولیکی بتن متخلخل مورد بررسی قرار گرفت. از مهمترین نتایج حاصل از این پژوهش می‌توان به اختصار به موارد ذیل اشاره کرد:

- استفاده از بتن متخلخل به عنوان یک روسازی نفوذ پذیر برای کاهش خطر سیلاب‌های شهری، تغذیه سفره‌های آب زیر زمینی و کاهش آلودگی رواناب ناشی از بارندگی در مدیریت شهری و توسعه پایدار بسیار حایز اهمیت است.



- (۲) با افزایش قطر میانگین سنگدانه‌ها در مخلوط بتن متخلخل، که در اثر کاهش میزان مصرف ریز دانه و یا افزایش بیشینه بعد سنگدانه درشت به وجود می‌آید، تخلخل و ضریب نفوذ پذیری بتن متخلخل افزایش می‌یابد.
- (۳) به دلیل کاهش نقاط اتصال بین سنگدانه‌ها و نیز افزایش میزان حفرات موجود، با افزایش قطر میانگین سنگدانه‌ها در مخلوط بتن متخلخل، مقاومت فشاری بتن کاهش می‌یابد.
- (۴) مقایسه میزان تخلخل و ضریب نفوذ پذیری به دست آمده برای تمامی آزمون‌ها دلالت بر آن داشت که با افزایش تخلخل نمونه‌ها، ضریب نفوذ پذیری به صورت نمایی افزایش می‌یابد. این بدان معنا است که تاثیر افزایش قطر میانگین سنگدانه‌ها بر میزان افزایش ضریب نفوذپذیری بیش از تاثیر آن بر میزان افزایش تخلخل است. زیرا قابلیت نفوذ آب از بتن متخلخل بیشتر تحت تاثیر نحوه اتصال حفره‌ها به یکدیگر است تا میزان حجم کل فضاهاى خالی.
- (۵) برای دستیابی به منحنی دانه بندی بهینه برای بتن متخلخل، علاوه بر در نظر گرفتن مقاومت فشاری، منظور نمودن ضریب نفوذپذیری نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بر اساس نتایج به دست آمده در این پژوهش، دانه بندی بهینه شامل سنگدانه‌هایی با قطر متوسط برابر با ۹/۲ میلیمتر است. در این دانه‌بندی، مقاومت فشاری برابر با ۲۱/۷۵ مگاپاسکال و ضریب نفوذ پذیری آن‌ها برابر ۲۳۰ میلیمتر بر ثانیه می‌باشد. نتایج به دست آمده برای مقاومت فشاری و ضریب نفوذ پذیری برای منحنی دانه بندی بهینه در محدوده قابل قبول معرفی شده توسط سایر محققین قرار می‌گیرد.

## ۵- مراجع

1. Dunn, C., Brown, S., Young, G.K., Stein, S., Mistichelli, M.P., (1995), "Current Water Quality Best Management Practices Design Guidance", Transportation Research Board, TRR No. 1493.
2. Croney, David, and Paul Croney., (1998), "Design and Performance of Road Pavements", New York McGraw Hill.
3. Kevern, J. T., (2008), "Advanced in Pervious Concrete Technology", Doctor of Philosophy Dissertation, Iowa State University, Ames, Iowa.
4. Ma, W., & Zhou, M. (2008). "The aggregate gradation for the porous concrete pervious road base material", Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., 23(3), 391-394.
5. Tennis, P.D., Leming, M.L., Akers, D.J., (2004), "Pervious Concrete Pavements", Portland Cement Association, Skokie Illinois.
6. Meininger, R. (1988), "No-fines pervious concrete for paving", ACI Concrete International.
7. Torres A., Jiong Hu, Amy Ramos, (2015), "The effect of the cementitious paste thickness on the performance of pervious concrete", Construction and Building Materials, pp. 850-859.
8. Chandra, S., & Berntsson, L. (2002). "Lightweight aggregate concrete", Elsevier
9. Montes. F, Haselbach. LM, Valavala. S, (2005), "A New Test Method for Porosity Measurements of Portland Cement Pervious Concrete", Journal of ASTM International.
10. Delatte, N., Miller, D., & Mrkajic, A. (2007), "Field performance investigation on parking lot and roadway pavements: final report", Silver Spring (MD): RMC Research & Education Foundation.
11. Schaefer V. R., Wang K., Suleiman, M.T., and Kevern J., (2006), "Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Climates", National Concrete Pavement Technology Center, Iowa State Univ., Ames, Iowa, pp 85.