مجله علمی- پژوهشی
«عمـــران مـــدرس»
دوره یازدهم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۰

تأثیر نوع دانه‌بندی بر خواص فیزیکی و نفوذپذیری بتن متخلخل در روسازی

بهروز شیرگیر[۱]، ابوالفضل حسنی[۲*]، هادی علیزاده گودرزی[۳]

۱- دانشجوی دکتری عمران، گروه راه و ترابری دانشگاه تربیت مدرس
۲- دانشیار دانشکده عمران، گروه راه و ترابری دانشگاه تربیت مدرس
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران، گروه راه و ترابری دانشگاه تربیت مدرس

hassani@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۱۲/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۱۰/۰۸

چکیده- در پژوهش حاضر تأثیر نوع دانه‌بندی بر ویژگی‌های مقاومتی و نفوذپذیری بتن متخلخل سخت‌شده، به‌شکل آزمایشگاهی بررسی شده است؛ بنابراین ۵ نوع دانه‌بندی مرسوم برای ساخت بتن متخلخل براساس استاندارد، انتخاب و نمونه‌های آزمایشگاهی براساس آن ساخته شد. به‌دلیل نبود ریزدانه یا مقدار کم آن در ساختمان بتن متخلخل، مقاومت از طریق دو عامل قفل و بست سنگدانه‌ها و مقاومت پیوندی بین خمیر سیمان و سنگ‌دانه ایجاد می‌شود؛ پس انتخاب نوع دانه‌بندی بر ویژگی‌های مقاومتی این نوع بتن تأثیر به‌سزایی دارد. نتایج حاصل، از پراکندگی قابل‌توجهی در مقادیر مقاومتی بتن متخلخل با دانه‌بندی مختلف حکایت داشت. برای مثال اختلاف بین کمینه و بیشینه‌ی مقاومت فشاری و مقاومت خمشی به ترتیب حدود ۳۳ و ۲۰ درصد به‌دست آمده است. در ادامه برای ارائه مدل پیش‌بینی مقاومت خمشی بتن متخلخل، پارامتری به‌نام ضریب یکنواختی به‌عنوان شاخصی از دامنه توزیع دانه‌بندی، در مدل استفاده شد و مدلی با استفاده از رگرسیون خطی دو متغیره(مقاومت فشاری و ضریب یکنواختی) ساخته شد. در نتیجه مدل مناسبی با خوبی برازش ۰/۸۷۹ به‌دست آمد. در این مقاله نقش درصد ریزدانه مصرفی در تعیین مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن متخلخل نیز بررسی شده است.

کلیدواژگان: بتن متخلخل، نفوذپذیری، مقاومت، ضریب یکنواختی و دانه‌بندی

۱- مقدمه

بتن متخلخل را مخلوطی از سیمان و آب و با دانه‌بندی، بدون ریزدانه یا با ریزدانه کم و در مواردی افزودنی‌های شیمیایی تشکیل می‌دهد، به‌گونه‌ای که تخلخل آن بین ۱۵ تا ۲۵ درصد متغیر خواهد بود. نبود ریزدانه یا ریزدانه کم کاهش کارایی مخلوط تازه این نوع بتن را به‌دنبال دارد؛ بنابراین برای دستیابی به مشخصاتی مانند مقاومت و نفوذپذیری، ضروری است که عملیات تراکم در حین ساخت آن استفاده شود. در بتن متخلخل سخت‌شده، فضای خالی مؤثر، نقش اصلی و تأمین‌کننده خاصیت نفوذپذیری را دارد. فضای خالی مؤثر، آن بخش از فضای سازه متخلخل است که از طریق آن آب از سطح به داخل سازه

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-20]

نفوذ می‌کند و از بخش زیرین آن خارج می‌شود. حجم عمده این مخلوط را سنگدانه‌ها تشکیل می‌دهد و بیش‌تر سنگدانه‌ای آغشته به‌وسیله‌ی خمیر سیمان حالتی چسبناک داشته و وزن مخصوص حاصل در محدوده ۱۶۰۰ تا ۲۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب متغیر است. از این نوع بتن به‌عنوان رویه برای اولین بار در سال ۱۸۶۵ در کشور اسکاتلند و در یک معبر شهری با استفاده از عمل تراکم برای کنترل فضای خالی استفاده شد[۱].

مزایای بتن متخلخل[۲] در روسازی، شامل موارد زیر است: ۱-روسازی مورد علاقه طرفدارن محیط زیست؛ ۲-کاهش آلودگی صوتی(جذب انرژی صوتی)؛ ۳-بهبود شرایط ایمنی(ضریب اصطکاک) و ممانعت از پدیده آب سطحی(هیدروپلانینگ)؛ ٤-کاهش شیب حرارتی؛ ٥-کاهش خطر تورم در اثر یخبندان و ٦-جلوگیری از رواناب سطحی.

چهار دلیل اصلی برای توجیه مقاومت پایین بتن متخلخل وجود دارد که عبارتند از: ۱-کاهش تعداد نقاط اتصالی بین سنگدانه‌ها به‌خاطر نبود ریزدانه؛ ۲-ضعف در مقاومت پیوندی بین خمیر چسباننده و سنگدانه‌ها؛ ۳-سطح چسبندگی پایین به‌خاطر نبود ریزدانه یا ریزدانه کم و ٤-وجود حفرات زیاد. از طرفی سه روش مرسوم و در دسترس برای بهسازی ویژگی‌های مقاومتی بتن متخلخل در مطالعات گزارش شده است که عبارتند از: ۱-افزایش سطح چسبندگی خمیر سیمان با سنگدانه‌ها؛ ۲-بهبود مقاومت خمیر سیمان و ۳-تقویت مقاومت ناحیه انتقال.

یک روسازی با ضخامت ۱۲۵ میلی‌متر و تخلخل ۲۰ درصد، قادر خواهد بود حجم آب بارانی به شدت ۲۵ میلی‌متر که به‌طور مداوم می‌بارد را در فضای خالی خود ذخیره کند. مقاومت این نوع بتن کمتر از بتن معمولی است که دلیل اصلی آن وجود فضای خالی زیاد در ساختمان آن است؛ بنابراین استفاده از این نوع بتن در روسازی بار ترافیک متوسط و کم مناسب خواهد بود[۳]. به‌تازگی مطالعات زیادی با موضوع بتن متخلخل انجام شده است. در آخرین پژوهش انجام شده در قالب پایان‌نامه، به پیشرفت‌های جدید درباره‌ی بتن متخلخل اشاره شده است. در این پایان‌نامه تأثیر نوع سنگدانه بر دوام بتن متخلخل و تأثیر رژیم عمل‌آوری بتن بر مقاومت سایشی آن بررسی شده است[٤].

در مطالعه‌ای دیگر تأثیر اندازه، دانه‌بندی، نوع و مقدار سنگدانه بر مدول الاستیسته استاتیکی بتن، بررسی شده است و نتایج به‌دست آمده، از تأثیر فراوان خواص سنگدانه بر ویژگی مذکور حکایت می‌کند[٥]. در یک پژوهش جامع، نحوه استفاده از بتن متخلخل به‌عنوان سازه روسازی و بررسی مزایا و معایب آن، بررسی شده است[٦]. علاوه بر پژوهش‌های مذکور، و پژوهش‌های فراوان دیگری مانند تأثیر نسبت فضای خالی، نسبت آب به سیمان، خصوصیات سیمان مصرفی، نسبت حجمی درشت‌دانه، اندازه درشت‌دانه و مقاومت بتن متخلخل[۷-۱۰]؛ مسئله اساسی که مقاومت پایین این نوع بتن است، کماکان به‌عنوان چالش اصلی، مورد بحث است.

افزایش میزان فضای خالی، از طرفی باعث افت در خواص مقاومتی شده و از طرف دیگر موجب افزایش ضریب نفوذپذیری، جذب انرژی صوتی و ایمنی در سطح روسازی خواهد شد. یکی از مهم‌ترین مسائلی که در ساخت بتن متخلخل به عنوان چالش مطرح است به‌دست آوردن دانه‌بندی بتن متخلخل است. براساس مطالعات انجام شده در خصوص دانه‌بندی بهینه بتن متخلخل نتایج بسیار ارزشمندی به‌دست آمده است. استفاده از ریزدانه(عبوری از ٤/۷٥ میلی‌متر)، به‌دلیل این‌که نقاط اتصالی بین سنگدانه‌ها را افزایش داده و در نتیجه باعث افزایش مقاومت نهایی بتن می‌شود، توصیه شده است. با افزایش اندازه بیشینه‌ی بعد سنگ‌دانه مصرفی، مقاومت بتن متخلخل

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-20]

کاهش و در عوض میزان فضای خالی و نفوذپذیری مخلوط افزایش می‌یابد. بیشینه‌ی اندازه سنگ‌دانه مناسب و قابل‌استفاده در بتن متخلخل ۲٦/۵ میلی‌متر توصیه شده است[۱۱]؛ هم‌چنین استفاده از ریزدانه کوچک‌تر از الک ٤/۷۵ میلی‌متر به مقدار ۱۰ تا ۱۵ درصد در مخلوط بتن متخلخل برای تأمین مقاومت ضمن لحاظ کردن نفوذپذیری، پیشنهاد شده است[۱۱].

در این پژوهش بررسی تأثیر نوع دانه‌بندی بر ویژگی‌های مقاومتی بتن متخلخل سخت شده از قبیل مقاومت فشاری، کششی و خمشی مد نظر است؛ هم‌چنین، ارائه مدل پیش‌بینی مقاومت خمشی بتن به‌عنوان معیار طراحی روسازی بتنی و تعیین درصد ریزدانه‌ی بهینه از اهداف اصلی است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

در این بخش، تعیین دانه‌بندی، انتخاب مواد و مصالح مورد نیاز برای ساخت بتن متخلخل، تعیین خواص و ویژگی‌های آن و ارائه روش آزمایش‌ها ارزیابی، بحث و بررسی شده است. مواد و مصالح مورد استفاده برای ساخت بتن متخلخل مشابه بتن معمولی است با این تفاوت که در بتن متخلخل درصد ریزدانه مصرفی پایین است؛ هم‌چنین برای دستیابی به مخلوطی مناسب از نظر کارایی و جلوگیری از نتایج نامطلوب، ضروری است که فرایند اختلاط به‌دقت نظارت شود. مواد تشکیل دهنده بتن متخلخل در فرایند اختلاط شامل مواد سیمانی، سنگ‌دانه، آب و در شرایطی برخی از افزودنی‌ها است.

۲-۱ انتخاب مصالح سنگدانه‌ها، سیمان و افزودنی‌ها

برای انتخاب مصالح (سنگدانه و سیمان) مناسب، مصالح از محلی انتخاب شد که پیشینه استفاده در پروژه‌های موفق را داشته است. مصالح سنگدانه‌ای مورداستفاده در این تحقیق از انباشته‌های کارخانه آکام‌شن واقع در منطقه شهریار در غرب تهران، انتخاب شد. این مصالح از نوع رودخانه‌ای و بیش‌تر از جنس سیلیس است. آزمایش‌های بررسی مرغوبیت مصالح سنگی شامل ارزش ماسه‌ای (آشتو تی-۱۷٦)، افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (آشتو تی-۱۰٤)، درصد افت وزنی در مقابل سایش به‌روش لس‌آنجلس (آشتو تی-۹٦)، شاخص تورق (بی اس ۸۱۲) و تعیین درصد شکستگی در یک وجه و دو وجه (ای.اس.تی.ام دی-۵۸۲۱) بر روی مصالح منتخب انجام و نتایج آن در جدول۱ آمده است.

جدول(۱) نتایج آزمایش‌های مرغوبیت مصالح سنگی[آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک وزارت راه و ترابری]

نوع آزمایش		مشخصه استاندارد	نتیجه آزمایش
سایش لوس آنجلس		AASHTO T-96	٪۱٤
افت وزنی ناشی از سولفات سدیم		AASHTO T-104	ریزدانه: ٪۰/۵ درشت دانه: ٪۰/۲
شکستگی در یک وجه و بیش‌تر		ASTM D-5821	٪۹۹
شکستگی در دو وجه و بیش‌تر		ASTM D-5821	٪۹۷
تطویل و تورق	تطویل	(BS-812)	----
	تورق		٪۲۰
ارزش ماسه‌ای ریزدانه(SE)		AASHTO T176	٪٦۰

آزمایش‌های تعیین وزن مخصوص حقیقی و ظاهری و درصد جذب آب مخلوط مصالح سنگی مانده روی الک ۸ (بر اساس استاندارد آشتو تی-۸۵)، روی سنگدانه‌ای عبوری از الک شماره ۸، مصالح مانده روی الک شماره ۲۰۰ (براساس استاندارد آشتو تی-۸٤) و تعیین وزن مخصوص ظاهری مصالح عبوری از الک شماره ۲۰۰ (براساس استاندارد آشتو تی-۱۰۰) انجام شد. که نتایج حاصل را می‌توان در جدول ۲ ملاحظه کرد.

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-20]

جدول (۲) نتایج آزمایش‌های وزن مخصوص و جذب آب مصالح سنگی

توضیحات	وزن مخصوص ۲/۵۲۵		درصد جذب آب
	ظاهری (Apparent)	حقیقی (Bulk)	
مصالح مانده روی الک ۸	۲/۵۳	۲/٦۵	۲/۵
مصالح عبوری از الک نمره ۸ و مانده روی الک ۲۰۰	۲/۵۱	۲/٦۵	۳/۱
مصالح عبوری از الک ۲۰۰	۲/٦۹		
وزن مخصوص حقیقی کل مخلوط مصالح سنگی	۲/۵۳		

در این پژوهش از سیمان پرتلند معمولی که محصول تولیدی شرکت سیمان تهران است استفاده شده است. مشخصات شیمیایی و فیزیکی این نوع سیمان و محدوده‌های مجاز آن، مطابق با استاندارد ۳۸۹ به‌ترتیب در جدول۳ و ٤ آمده است. هم‌چنین برای سهولت در عملیات اختلاط ساخت نمونه‌ها، از فوق‌روان‌کننده با نام تجاری نرمال پی-۱۱٦ محصول شرکت صنایع شیمیایی پارسا استفاده شد. افزودنی مورداستفاده بر پایه نفتالین فرمالدئید است. رنگ آن قهوه‌ای تیره و دارای وزن مخصوص ۱/۰٦ گرم بر سانتی‌مترمربع و PH ۸ است.

جدول(۳) مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی منطبق بر استاندارد ملی شماره ۳۸۹

	C_3S ٪	C_2S ٪	C_3A ٪	C_4AF ٪
مقدار اندازه‌گیری شده	۵۰/۹۹	۲٤/۳۵	٤/۵۰	۱۰/۳۵

در این پژوهش پنج نوع دانه‌بندی مرسوم برای ساخت بتن متخلخل بر اساس استاندارد ASTM C-33 انتخاب شد. دانه‌بندی‌ها شامل: 89# ،9.5# ،78# ،12.5# و 67# است که در جدول ۵ شماره دانه‌بندی منتخب و درصدهای وزنی عبوری از الک‌ها آمده است. استانداردASTM C-33 و D-ASTM 488 برای روسازی، منحنی‌های متفاوتی از دانه‌بندی ارائه کرده است که در شکل ۱ منحنی‌های الف، ب و ج، نشان داده شده است. در پژوهش حاضر تعدادی از این منحنی‌ها استفاده شده است.

برای سهولت در استفاده از شماره دانه‌بندی‌ها از نام اختصاری مشخص‌شده در جدول ۵ استفاده می‌شود. در انتهای این جدول شاخصی با عنوان ضریب یکنواختی درج شده است. این ضریب از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

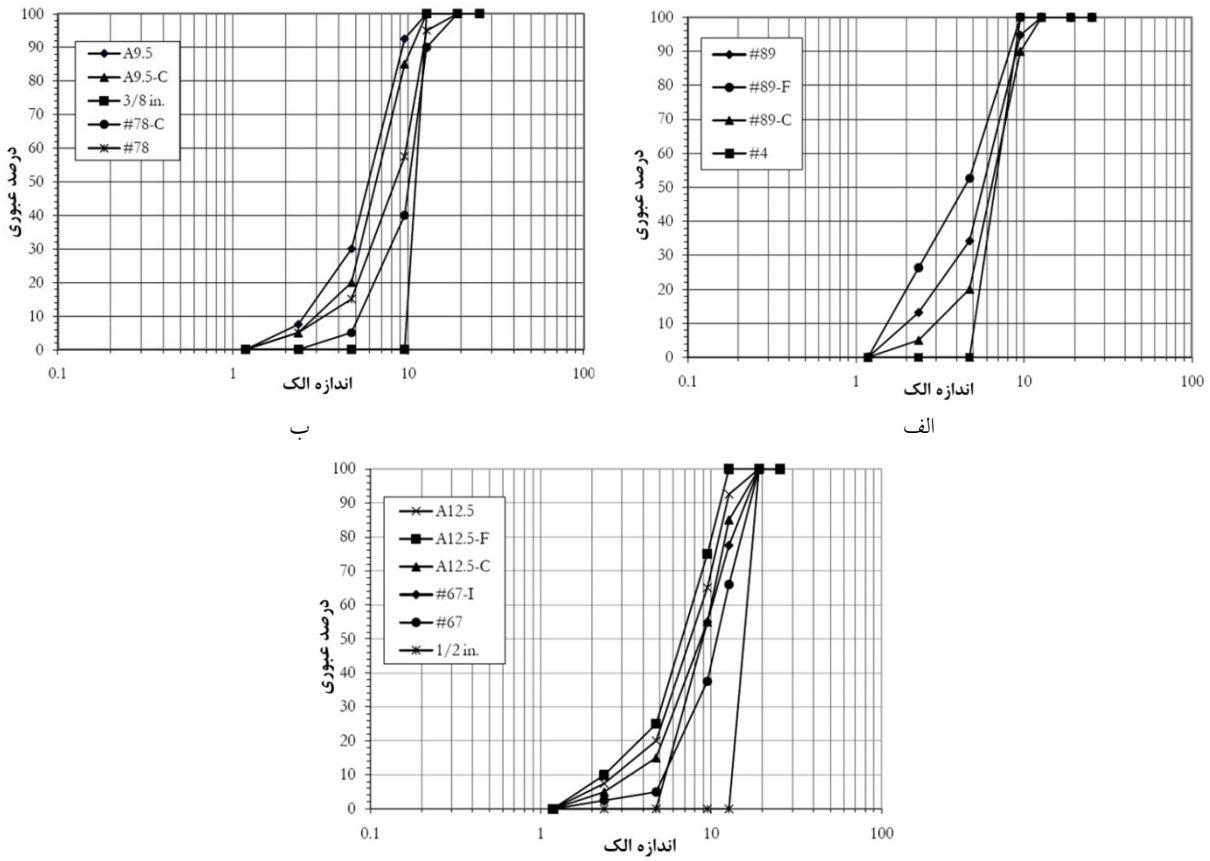
$$CU = \frac{D_{۶۰}}{D_{۱۰}} \qquad (۲)$$

D_{60}: اندازه روزنه‌ای که ٦۰ درصد سنگدانه‌ها از آن کوچک‌تر باشد و D_{10}: اندازه روزنه‌ای که ۱۰ درصد سنگدانه‌ها از آن کوچک‌تر باشد. ضریب یکنواختی بالاتر سنگ‌دانه مؤید این موضوع است که سنگدانه در محدوده وسیع‌تری از اندازه دانه‌ها گسترده شده است. انتخاب ۵ نوع دانه‌بندی براساس مقادیر متفاوت ضریب یکنواختی انجام شده است.

جدول(٤) مشخصات فیزیکی سیمان مصرفی منطبق بر استاندارد ملی شماره ۳۸۹

	سطح مخصوص Cm^2/gr	زمان گیرش		مقاومت فشاری (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)		
		اولیه(دقیقه)	نهایی(دقیقه)	۳روزه	۷روزه	۲۸روزه
مقدار مجاز طبق استاندارد ۳۸۹	>۲۸۰۰	>٤۵	<۳٦۰	>۱۰۰	>۱۷۵	>۳۱۵
مقدار اندازه‌گیری‌شده	۲۸۵۳	۱٦۵	۲۱۰دقیقه	۱۵۰	۲۱۳	۳۲۵

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-20]



شکل(۱) الف، ب و ج: منحنی دانه‌بندی سنگدانه براساس استاندارد ASTM C-33 و ASTM D-488

جدول (۵) جدول دانه‌بندی انتخابی(مصرفی)

	درصد عبوری بر اساس دانه‌بندی مختلف				
شماره الک(اندازه)	دانه‌بندی شماره #89	دانه‌بندی شماره #9.5	دانه‌بندی شماره #78	دانه‌بندی شماره #67	دانه‌بندی شماره #12.5
۱–(۲۵/٤)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۳/٤–(۱۹/۵)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۱/۲–(۱۲/۷)	۱۰۰	۱۰۰	۹۵	٦٦	۹۲
۳/۸–(۹/۵)	۹۵	۹۳	۵۸	۳۸	٦۵
٤–(٤/۷۵)	۳٤	۳۰	۱۵	۵	۲۰
۸–(۲/۳٦)	۱۳	۷	۵	۳	۸
۱٦–(۱/۱۸)	۰	۰	۰	۰	۰
ضریب یکنواختی	۳/۱	۲/٦	۲/۹۷	۲/۳٦	۳/۲۱
نام اختصاری	A	B	C	D	E

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-20]

براساس مطالعات و تحقیقات انجام شده، طرح اختلاط با فرض چگالی مخلوط ۱۹۳۰ کیلوگرم به شرح جدول ٦ به‌دست می‌آید[۳]. در این طرح نسبت وزنی سیمان به سنگدانه، ۰/۲۲ و نسبت وزنی آب به سیمان، ۰/۲۹ انتخاب شده است. نسبت وزنی آب به سیمان اضافه بر مقدار جذب آب مصالح سنگدانه‌ای است؛ به‌عبارت دیگر بایستی مصالح سنگدانه‌ای به‌شکل اشباع با سطح خشک استفاده شوند.

جدول(٦) طرح اختلاط انتخابی بتن متخلخل

مصالح	مقدار وزنی (کیلوگرم بر مترمکعب)	درصد وزنی
سیمان تیپ ۲ (کیلوگرم)	۳۲۵	۱۷
درشت دانه (کیلوگرم)	۹۷۷	۵۱
ریزدانه (کیلوگرم)	۵۰۳	۲٦
آب (کیلوگرم)	۹۵	۵
فوق روان‌کننده	۲/۷	۱
وزن مخصوص (کیلوگرم بر مترمکعب)	۱۹۳۰	----------

۲-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها و شرح آزمایش‌ها

آزمایش‌های مقاومت فشاری و خمشی به ترتیب بر اساس استانداردهای انگلیس و آمریکا روی نمونه‌های مکعبی و منشوری انجام شد. از هر دانه‌بندی ۱۰ نمونه برای انجام آزمایش‌های مربوط ساخته شد. از مجموع ۸ نمونه، ۵ نمونه منشوری به ابعاد ۵×۵×۲۰ سانتی‌متر برای انجام آزمایش مقاومت خمشی و ۵ نمونه مکعب به ابعاد ۱۰ سانتی‌متر برای انجام آزمایش مقاومت فشاری آماده شد؛ هم‌چنین نمونه‌های استوانه‌ای به قطر و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر برای انجام آزمایش نفوذپذیری و تعیین درصد تخلخل به تعداد ۳ نمونه از هر نوع دانه‌بندی ساخته شد.

۲-۲-۱- آزمایش‌های تعیین‌کننده مقاومت بتن متخلخل

مقاومت فشاری نمونه‌ها براساس استاندار: بی.اس ۱۸۸۱، بخش ۱۰۸، روی نمونه مکعبی ۲۸ روزه انجام شده است. دستگاه مورد استفاده در آزمایشگاه مواد دانشگاه تربیت مدرس با نام تجاری اینسترون[1] مستقر است که از دقت بسیار بالایی برخوردار بوده، قابلیت بارگذاری به‌شکل تنظیمات دیجیتالی تا محدوده ۲۰ تن را دارد. سرعت تغییرشکل طبق استاندارد برای این آزمایش ۱/۳ میلی‌متر در دقیقه اتخاذ شده است.

آزمایش خمش روی نمونه منشوری به روش استاندارد ای.اس.تی.ام سی ۲۹۳ با استفاده از بارگذاری سه‌نقطه‌ای روی تیر ساده انجام شد. نتایج این آزمایش به‌عنوان مدول گسیختگی ارائه می‌شود که معیار طراحی روسازی بتنی است. مقاومت حاصل از این آزمایش تابع شرایطی مانند ابعاد نمونه، نحوه آماده‌سازی، شرایط رطوبت، نحوه عمل‌آوری و ... است. برای این آزمایش نیز از دستگاه مذکور استفاده شده است. تصویری از این دستگاه در شکل ۲ هنگام انجام آزمایش خمشی و فشاری نشان داده شده است.

براساس توصیه استاندارد مربوطه سرعت بارگذاری مطابق با ابعاد نمونه تحت آزمایش از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$r = \frac{Sbd^2}{L} \qquad (۲)$$

r: نرخ بارگذاری (مگانیوتن بر دقیقه)؛

S: نرخ افزایش تنش تاری نهایی(بین ۰/۹ تا ۱/۲ مگاپاسکال بر دقیقه)؛

b: متوسط عرض نمونه(متر)؛

d: متوسط ارتفاع نمونه(متر)؛

L: طول دهنه بارگذاری(متر)؛

با توجه به ابعاد نمونه‌های این آزمایش نرخ بارگذاری معادل ۰/۸۳ کیلونیوتن بر دقیقه به‌دست آمد.

1- INSTRON

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-20]

شکل (۲) تصویری از دستگاه مورد استفاده برای آزمایش فشاری و خمشی

۲-۲-۲- آزمایش تخلخل و نفوذپذیری

میزان تخلخل بتن متخلخل نیز به روش اختلاف بین وزن غوطه‌وری و وزن نمونه خشک و طبق رابطه (۳) محاسبه می‌شود[۱۲]. ابتدا نمونه به مدت ۲٤ ساعت در گرم‌خانه با درجه حرارت ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد نگه‌داری می‌شود با توزین آن، وزن خشک(W_2) بدست می‌آید. سپس نمونه خشک شده در آب وزن شده و وزن غوطه‌وری(W_1) بدست می‌آید سپس با استفاده از رابطه (۳) تخلخل نمونه محاسبه می‌شود. متوسط نتایج آزمایش روی سه نمونه استوانه‌ای به قطر و ارتفاع ۱۰سانتی‌متر، به‌عنوان درصد تخلخل گزارش خواهد شد.

$$P = \left[1 - \left(\frac{W_2 - W_1}{\rho_w . Vol}\right)\right] 100 (\%) \qquad (۳)$$

P: تخلخل کل (%)؛

W_1: وزن نمونه در آب (کیلوگرم)؛

W_2: وزن نمونه خشک در هوا (کیلوگرم)؛

Vol: حجم نمونه (سانتی متر مکعب)؛

ρ_w: دانسیته آب در دمای ۲۱درجه سانتی‌گراد(کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع).

خواص نفوذپذیری و تخلخل بتن، بهترین ویژگی برای توصیف یک ماده نفوذپذیر و متخلخل است. تخلخل مقدار منافذ و حفرات داخل بتن است که به‌صورت درصدی از مجموع حجم ماده نشان داده می‌شود. نفوذپذیری نیز بازتابی از چگونگی ارتباط میان منافذ است. این خواص به‌کمک یکدیگر اجازه تشکیل کانال‌های باریکی برای عبور آب به داخل جسم بتن و خروج از سمت دیگر را ممکن می‌سازد. برای مشخص کردن نفوذپذیری یک جسم، باید ضریب نفوذپذیری آن تعیین شود که عبارت است از میزان جریان مایع یا گاز عبوری(معمولاً بر حسب لیتر) در واحد زمان از واحد سطح مقطع، تحت یک شیب هیدرولیکی واحد. معمولاً به‌طور کمّی نفوذپذیری بتن با ضریب نشت مایع(سیال) مشخص می‌شود. نفوذپذیری بتن متخلخل را می‌توان با استفاده از یک آزمایش ساده تعیین کرد اما نتایج بیش‌تر نسبی است. در چنین آزمایشی سطوح جانبی یک نمونه بتنی پوشانده شده و آب تحت فشار(هد آب) بر سطح فوقانی نمونه اعمال می‌شود. زمانی که جریان پایدار پدید آمد مقدار آبی که از ضخامت معین در مدت زمان مشخصی عبور می‌کند، اندازه‌گیری می‌شود. میزان ضریب نفوذپذیری متوسط، طبق رابطه (٤) و براساس قانون دارسی و فرض جریان لایه‌ای محاسبه می‌شود[۱۳]. در این مقاله از آزمایش

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-20]

هد افتان برای تعیین نفوذپذیری استفاده شده است. متوسط نتایج آزمایش روی سه نمونه استوانه‌ای به قطر و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر، به‌عنوان ضریب نفوذپذیری گزارش می‌شود. در شکل ۳ تصویری از دستگاه تعیین نفوذپذیری بتن متخلخل که برای انجام این پروژه ساخته شده است را می‌بینید

$$k = \frac{a.L}{A.t}.\ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \qquad (٤)$$

k: ضریب نفوذپذیری، (سانتی‌متر بر ثانیه)؛

a: مساحت سطح مقطع لوله آب (سانتی‌مترمربع)؛

L: طول نمونه (سانتی‌متر)؛

A: مساحت سطح مقطع نمونه (سانتی‌مترمربع)؛

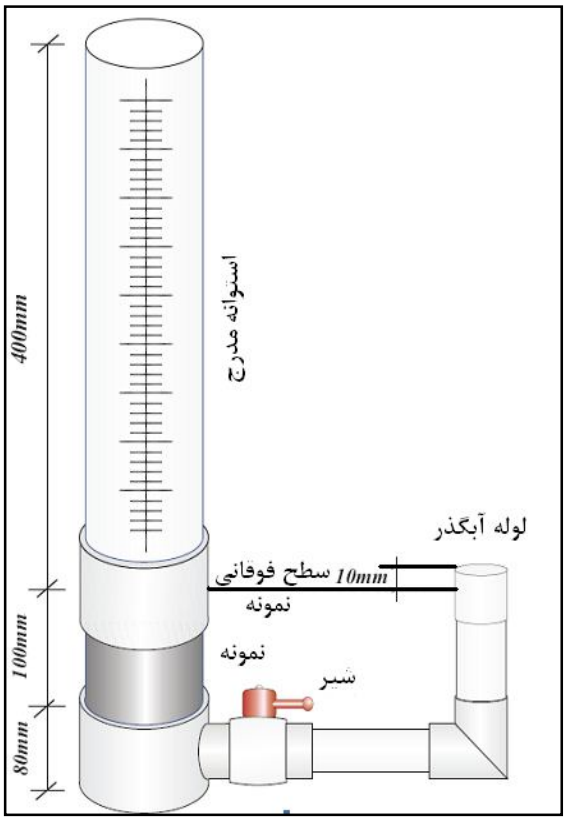
t: زمان لازم برای رسیدن ارتفاع آب از سطح h_1 به h_2(ثانیه)؛

h_1: ارتفاع اولیه آب در لوله (سانتی‌متر)؛

h_2: ارتفاع نهایی آب در لوله (سانتی‌متر).

۳- نتایج و تفسیر آن

محدوده‌های موردقبول برای مقاومت فشاری براساس مطالعات انجام شده از مقادیر ۳/٤٤ تا ۲۷/٥٦ مگاپاسکال و برای مقاومت خمشی از ۱/۰۳ تا ۳/۷۸ مگاپاسکال متغیر است[١٤]؛ هم‌چنین مقدار ضریب هدایت هیدرولیکی (نفوذپذیری) برای بتن متخلخل معمولی از محدوده ۱۰ الی ۳۲ سانتی‌متر بر دقیقه متغیر است[١٤]. میانگین مقاومت فشاری و خمشی بتن متخلخل با دانه‌بندی‌های مختلف برای سن ۲۸ روزه در شکل ٤ نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که اختلاف زیادی بین مقادیر مقاومت فشاری وجود دارد و این اختلاف بین مقادیر بیشینه و کمینه حدود ۳۳ درصد است.

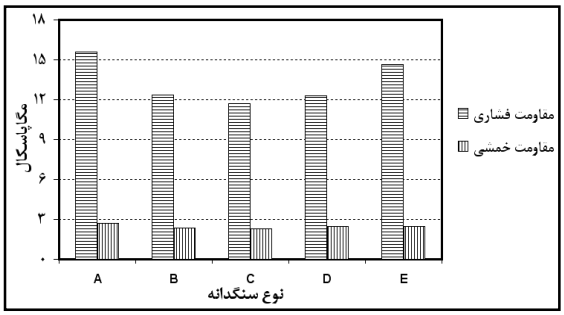


شکل (۳) تصویری از دستگاه آزمایش نفوذپذیری بتن متخلخل

۳-۱- تأثیر دانه‌بندی برخواص مقاومتی بتن متخلخل

نتایج حاصل نشان‌دهنده اهمیت و نقش بالای دانه‌بندی در خواص بتن متخلخل است. این تفاوت در مقادیر مقاومت کششی ۳۰ درصد و خمشی ۳۰ - ۲۰ درصد است. مقادیر بیشینه و کمینه‌ی مقاومت فشاری و کششی متعلق به دانه‌بندی A و D است در جایی که برای مقاومت خمشی مقادیر کمینه و بیشینه متعلق به دانه‌بندی A و C است. به هر حال دانه‌بندی نوع A، بیش‌ترین مقاومت فشاری و خمشی را به خود اختصاص داده که مقدار آن به ترتیب ١٥/٣٦ و ۲/۷۳ است. در جدول ۷ نتایج مربوط به خواص مقاومتی و نفوذپذیری بتن متخلخل را می‌بینید.

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-20]



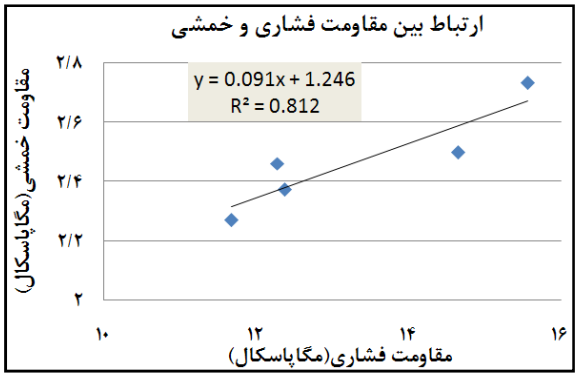
شکل (٤) مقادیر کمی مقاومت فشاری، کششی و خمشی برای ۵ نوع دانه‌بندی

جدول(۷) نتایج مربوط به خواص مقاومتی و نفوذپذیری بتن متخلخل

میانگین	A	B	C	D	E
مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	۱۵/۵٦	۱۲/۳۸	۱۱/٦۷	۱۲/۲۷	۱٤/٦۵
مقاومت خمشی (مگاپاسکال)	۲/۷۳	۲/۳۷	۲/۲٦	۲/٤٦	۲/٤۹
نفوذپذیری (cm/min)	۹/۷	۲۲/۹	۳۱/۹	۲٦/۹	۱۱/٦
درصد تخلخل(٪)	۲۳/۳	۲٤/۱٦	۲۵/۸۲	۲۳/۹۲	۲٤/۷۸
ضریب یکنواختی	۳/۱	۲/٦	۲/۹۷	۲/۳٦	۳/۲۱

۳-۲- ارتباط بین مقاومت فشاری و مقاومت خمشی بتن متخلخل

تعیین ارتباط بین مقاومت فشاری و خمشی بتن به این خاطر سودمند است که در بیش‌تر مواقع مغزه‌گیری از محل موردمطالعه به‌صورت استوانه‌ای به سهولت انجام می‌گیرد و با توجه به این‌که آزمایش مقاومت خمشی روی تیر منشوری انجام‌پذیر است نمونه‌گیری به‌صورت منشوری از محل، ساده نخواهد بود؛ از این‌رو پیش‌بینی مقاومت خمشی به‌عنوان معیاری برای طراحی در روسازی بتنی از اهمیت زیادی برخوردار است. مطالعات قبلی انجام گرفته در این خصوص ارتباط مستقیم بین مقاومت فشاری و خمشی را نشان داده است که در این‌جا نیز چنین انتظاری از نتایج وجود دارد. در شکل ۵ رابطه بین مقاومت خمشی و فشاری مشخص است. در مدل ارائه شده، پارامتر Y به‌عنوان متغیر وابسته (مقاومت خمشی) و X به‌عنوان متغیر مستقل (مقاومت فشاری) در نظر گرفته شده است.



شکل (۵) رابطه بین مقاومت خمشی و فشاری

در بتن متخلخل نوع دانه‌بندی و ویژگی‌های آن تأثیر به‌سزایی بر خواص مقاومتی و نفوذپذیری بتن دارد از شاخص‌های مهم دانه‌بندی، ضریب یکنواختی است که این پارامتر به‌نوعی توصیف‌گر وسعت دامنه توزیع دانه‌بندی است. از این‌رو انتظار می‌رود با افزایش عدد مربوط به ضریب یکنواختی، مقدار مقاومت فشاری یا خمشی بتن افزایش و درعوض خواص نفوذپذیری آن کاهش یابد؛ نتایج حاصل نیز مؤید این موضوع است. به‌همین منظور به‌نظر می‌رسد با دخیل کردن این پارامتر در رابطه پیش‌بینی مقاومت خمشی، مدل پیش‌بینی بهتری به‌دست آید. نتایج حاصل از مدل‌سازی و پرداخت، این موضوع را تأیید می‌نماید. با وارد نمودن متغیر توصیف‌گر(ضریب یکنواختی) در رابطه پیش‌بینی مقاومت خمشی نتایج حاصل حکایت از بهبود مدل رگرسیون فعلی نسبت به مدل رگرسیون قبلی دارد به‌گونه‌ای که خوبی برازش حاصل، از ۰/۸۱۲ به ۰/۸۷۹ افزایش یافت. در جدول ۷ سایر نتایج پرداخت مدل رگرسیون خطی نشان داده شده است.

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-20]

جدول(۷) نتایج حاصل از پرداخت مدل رگرسیون خطی

خوبی برازش اصلاح شده(R^2)	آزمون(F)	آزمون(t)	انحراف از معیار	ضرایب رگرسیون	ضرایب	تعداد نمونه‌ها(n)
۰/۸۷۹	۱۵/۵۷	۵/٦٤٧	۰/۲٦۲	۱/٤۷۷	عدد ثابت	۵
		-۲/۰۵٦	۰/۰۲۳	۰/۱۲۳	X_1	
		۵/۲٦۱	۰/۱۱۱	-۰/۲۲۹	X_2	

شکل کلی مدل پیش‌بینی به‌صورت زیر ارائه می‌شود.

$$Y = ۱/۴۷۷ + ۰/۱۲۳X_۱ - ۰/۲۲۹X_۲ \qquad (۲)$$

Y: مقاومت خمشی؛

X_1: مقاومت فشاری و

X_2: ضریب یکنواختی دانه‌بندی.

همان‌گونه که از نتیجه مدل رگرسیون خطی ارائه شده مشخص است خوبی برازش حاصل از رگرسیون، ۰/۸۷۹ عدد مناسبی است. با توجه به نتایج حاصل از پرداخت مدل رگرسیون که در جدول ۷ نشان داده شده است نتایج زیر ارائه می‌شود:

کل مدل پیش‌بینی به‌خاطر بالا بودن عدد مربوط به خوبی برازش از اعتبار بالایی برخوردار است. در این مدل متغیر مقاومت فشاری رابطه مستقیم با مقاومت خمشی دارد که این امر طبیعی است و پیشتر نیز در سایر مطالعات مشاهده شده است. هم‌چنین وزن و اهمیت این توصیف‌گر، ۰/۱۲۳ عددی نسبتاً بالا و منطقی است، به عبارت دیگر با افزایش ۱۰ واحد مقاومت فشاری، حدود ۱/۲ واحد مقاومت خمشی افزایش می‌یابد.

متغیر ضریب یکنواختی ۰/۲۲۹- با مقاومت خمشی رابطه معکوس دارد به‌عبارت دیگر هر چه دامنه دانه‌بندی وسعت پایین‌تری داشته باشد مقاومت کم‌تری حاصل می‌شود وزن و اهیمت این توصیف‌گر ۰/۲۲۹ است. به‌عبارت دیگر با افزایش ۱ واحد در ضریب یکنواختی، ۰/۲۳ واحد از مقاومت خمشی کاسته می‌شود.

عدد ثابت موجود در مدل رگرسیون از نظر کمی، عدد نسبتاً بالایی است. بالا بودن این عدد بیان‌گر آن است که سهم آن بخش از ویژگی‌ها و پارامترهایی که می‌تواند در کنار متغیر مقاومت فشاری و ضریب یکنواختی توصیف‌کننده مقاومت خمشی بتن باشد، زیاد است؛ به‌عبارت دیگر پارامترهای دیگری به‌عنوان توصیف‌کننده متغیر مقاومت خمشی وجود دارند که در مدل رگرسیون بالا لحاظ نشده است.

آزمون t در سطوح معنی‌داری بیش از ۹۷ درصد برای تمام ضرایب قابل قبول است، به‌عبارت دیگر هر سه ضریب(ضرایب متغیر مستقل و عدد ثابت) سطح معنی‌دار بالایی دارند؛ هم‌چنین آزمون F مدل که سطح معنی‌داری کل مدل رگرسیون را نشان می‌دهد عدد قابل‌قبول ۱۵/۵۷ را دارد.

۳-۲- ارتباط دانه‌بندی با مقاومت فشاری و نفوذپذیری

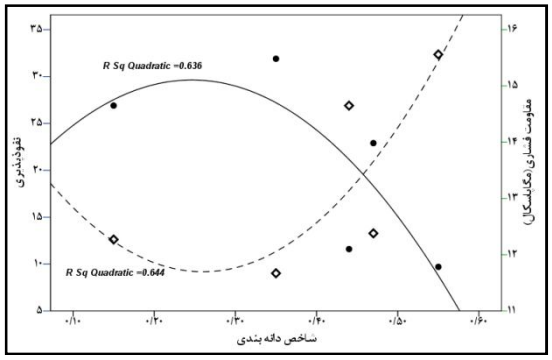
یکی از مهم‌ترین مسائل مرتبط با بتن متخلخل، انتخاب دانه‌بندی بهینه آن است. طی مطالعاتی که در سال ۲۰۰۸ درباره‌ی دانه‌بندی بهینه بتن متخلخل انجام شد، نتایج بسیار مهمی به‌دست آمد. به‌دلیل نبود ریزدانه یا ریزدانه کم در ساختمان بتن متخلخل، دو عامل قفل و بست سنگدانه‌ها و مقاومت پیوندی خمیر سیمان و سنگدانه، تأمین‌کننده خواص مقاومتی آن است؛ به‌همین خاطراستفاده از ریزدانه، افزایش نقاط تماس سنگدانه‌ها و متعاقب آن افزایش مقاومت فشاری در بتن متخلخل را به‌دنبال خواهد داشت.

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-20]

از طرفی با افزایش درصد ریزدانه مصرفی فضای خالی و درنتیجه نفوذپذیری بتن کاهش می‌یابد[۱۱].

برای تعیین درصد بهینه ریزدانه مصرفی، شاخصی از دانه‌بندی تعریف می‌شود که این شاخص نسبت سنگدانه عبوری از الک شماره ٤ به مانده روی این الک است. این شاخص به این دلیل تعریف شده است که مرز بین ریزدانه و درشت‌دانه الک شماره ٤ است. در شکل ٦ ارتباط بین شاخص نسبت ریزدانه به درشت‌دانه با نفوذپذیری و مقاومت فشاری (به‌عنوان شاخص مقاومتی) ترسیم شده است. همان‌گونه که در شکل مشخص است با افزایش نسبت ریزدانه مصرفی، مقاومت فشاری افزایش و از طرفی نفوذپذیری نمونه رو به کاهش است. استفاده از ریزدانه نقاط اتصالی بین سنگدانه‌ها را افزایش داده و باعث افزایش مقاومت نهایی بتن می‌شود و در عوض با افزایش قطر سنگدانه‌ها، تعداد نقاط تماسی بین سنگدانه‌ها کاهش یافته بنابراین نیروهای تماسی و درنهایت مقاومت نمونه بتنی کمتر خواهد شد، درعوض اتصال و ارتباط بین فضاهای خالی سنگدانه‌ها افزایش و در نتیجه نفوذپذیری بیش‌تری به‌دست می‌آید.

بدین ترتیب در نمودار شکل ٦ می‌توان نقطه‌ای به‌عنوان نقطه بهینه به‌دست آورد. با استفاده از این نمودار می‌توان نقطه بهینه مربوط به درصد ریزدانه را ملاحظه کرد. اطلاعات مربوط به مقادیر دانه‌بندی، مقاومت فشاری و نفوذپذیری در این نمودار وارد شده و با استفاده از رگرسیون غیرخطی درجه دو، ارتباط بین نفوذپذیری و شاخص دانه‌بندی از یک طرف و مقاومت فشاری و دانه‌بندی از طرف دیگر رسم شده است. خوبی برازش حاصل از رگرسیون برای هر دو نمودار تقریباً یکسان و برابر ۰/٦٤ به‌دست آمده است. محل تلاقی این دو منحنی نقطه بهینه را نتیجه می‌دهد. عدد مربوط به این نقطه که نسبت عبوری از الک شماره ٤ به مانده روی آن است، حدود ٤٦ درصد است. مقادیر نفوذپذیری و مقاومت فشاری متناظر این نقطه به ترتیب ۲۰ سانتی‌متر بر دقیقه و ۱۳/۵ مگاپاسکال به‌دست آمده است. با توجه به خصوصیات ۵ نوع دانه‌بندی تشریح شده در بخش‌های قبلی و نتایج مقاومت فشاری و نفوذپذیری حاصل از این دانه‌بندی‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که دانه‌بندی ای.اس.تی.ام ۹/۵، نزدیک‌ترین شرایط را به نقطه بهینه دارد. عدد مربوط به نسبت عبوری از الک ٤ به مانده روی این الک برای دانه‌بندی مذکور ۰/٤۷ است. نفوذپذیری مربوط به این دانه‌بندی، ۲۳ سانتی‌متر بر دقیقه و متوسط مقاومت فشاری آن ۱۲/۳۸ مگاپاسکال است که نزدیک‌ترین اعداد به نقطه بهینه به‌دست آمده از نمودار، به‌شمار می‌آیند.



شکل(٦) ارتباط بین درصد ریزدانه، مقاومت فشاری و نفوذپذیری

۴- نتیجه‌گیری

پس از انجام آزمایش‌ها و تحلیل آن نتایج زیر به‌عنوان یافته‌های این پژوهش ارائه می‌شود:

در ساختمان بتن متخلخل به‌دلیل نبود ریزدانه یا ریزدانه کم، دو عامل قفل و بست سنگدانه‌ها و مقاومت پیوندی خمیر سیمان و سنگدانه، تأمین‌کننده خواص مقاومتی آن است؛ پس استفاده از ریزدانه افزایش نقاط تماس سنگدانه‌ها و متعاقب آن افزایش مقاومت فشاری را در پی خواهد

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-20]

داشت. از طرفی با افزایش درصد ریزدانه، فضای خالی و در نتیجه نفوذپذیری بتن کاهش می‌یابد.

اختلاف زیادی بین مقادیر مقاومت فشاری نمونه‌های با دانه‌بندی متفاوت مشاهده شد و این اختلاف بین مقادیر بیشینه و کمینه حدود ۳۳ درصد است که نشان‌دهنده اهمیت دانه‌بندی در بتن متخلخل است؛ نفوذپذیری نیز به‌شدت تحت تأثیر نوع دانه‌بندی است.

با افزایش عدد مربوط به ضریب یکنواختی، مقدار مقاومت فشاری یا خمشی بتن افزایش و در عوض خواص نفوذپذیری آن کاهش می‌یابد؛ هم‌چنین با وارد کردن متغیر توصیف‌گر(ضریب یکنواختی) به عنوان در مدل پیش‌بینی به عنوان مقاومت خمشی، نتایج حاصل حکایت از بهبود مدل پیشنهادی دارد. خوبی برازش حاصل از رگرسیون، ۰/۸۷۹ به‌دست آمد که عدد بالایی است.

برای تعیین درصد بهینه ریزدانه مصرفی، شاخصی از دانه‌بندی تعریف شد که این شاخص نسبت سنگدانه عبوری از الک شماره ٤ به مانده روی این الک است. در یافتن مقدار بهینه ریزدانه مصرفی، این شاخص نقش مهمی دارد. نتایج حاصله نشان داد که از میان ۵ دانه‌بندی تحت آزمایش، خصوصیات دانه‌بندی ای.اس.تی.ام ۹/۵ و نتایج مقاومت فشاری، نفوذپذیری و شاخص دانه‌بندی آن نزدیک‌ترین شرایط را به نقطه بهینه دارد.

۵- مراجع

[1] Croney, David, and Paul Croney., *Design and Performance of Road Pavements*, New York McGraw Hill 1998.

[2] Bruce K. Ferguson., *Porous Pavement*, Tailor and Francis Group 2005.

[3] Tennis, P. D., et al., *Pervious Concrete Pavements*, Portland Cement Association, Silver Spring, Maryland 2004; pp 32.

[4] Kevern, J. T., *Advanced in Pervious Concrete Technology*, Doctor of Philosophy Dissertation, Iowa State University, Ames, Iowa, 2008.

[5] Crouch, L. K., et al., *Aggregate Effects on Pervious Portland Cement Concrete Static Modulus of Elasticity*, Journal of Materials in Civil Engineering ASCE / July 2007.

[6] Scholz M, Grabowiecki P., *Review of permeable pavement systems*, *Building and Environment, 2007*; *3830–3836.*

[7] Schaefer VR, et al., *Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Weather Climates*, Iowa Concrete Paving Association 2006; pp85.

[8] Yang J, Jiang G. "Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials". *Cement & Concrete Research*: 2003; 33:381–6.

[9] Meininger, R. "No-fines pervious concrete for paving", ACI Concrete International 1988; 10-8:20–2.

[10] Fujiwara H, e. "Properties of high-strength porous concrete", *ACI SP179*. 1998.

[11] Zhifeng Y., et al., *The Aggregate Gradation for the Porous Concrete Pervious Road Base Material*, Mater. Sci. Ed. Jun 2008.

[12] Montes. F, et al., "A New Test Method for Porosity Measurements of Portland Cement Pervious Concrete", *Journal of ASTM International* 2005; V.2, No. 1, pp.13.

[13] Narayanan N, Jason W, and Jan O. "Characterizing Enhanced Porosity Concrete using electrical impedance to predict acoustic and hydraulic performance" Cement and Concrete Research: 2006; 36:2074–2085.

[14] Schaefer V. R., Wang K., Suleiman, M.T., and Kevern J. *Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Climates,* National Concrete Pavement Technology Center, Iowa State Univ., Ames, Iowa, 2006, 85 pp.

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-20]

The Influence of Aggregate Gradation on the Permeability and Mechanical Properties of Porous Concrete

B. Shirgir[1], A. Hassani[2*], H. Alizadeh Goodarzi[3]

1- Ph.D. Candidate, Department of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
2- Associate Prof., Department of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
3- M.Sc. Candidate, Department of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

hassani@modares.ac.ir

Abstract:
The influence of aggregate gradation on the permeability and mechanical properties of porous concrete was investigated. A standard mix and five standard aggregate gradations were selected. Since porous concrete contains no or little fine aggregate, its structure is formed by the interlocking of the coarse aggregates. So the aggregate gradation is a very important characteristic as it influences such properties of porous concrete as strength and permeability. There was statistically significant difference between the results from the strength and water permeability of porous concrete with different aggregate gradations. For example, the difference between minimum and maximum compressive strength was 33%, and a 20% difference was obtained for flexural strength. It was found that the uniformity coefficient has influence on the flexural strength of porous concrete. In order to develop the flexural bending strength prediction model, the two parameters of compressive and uniformity coefficient were explained using linear regression model. The obtained Goodness of fit (R^2) for this model was 0.879. The results of the current investigation showed how fine aggregate influenced the compressive and permeability of porous concrete.

Keywords: Porous concrete, Permeability, Strength, Uniformity coefficient

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-20]