ارزیابی میزان تاثیر اندازه سنگدانه برخصوصیات مکانیکی و فیزیکی روسازی بتن متخلخل

امید عطایی (مسئول مکاتبات)، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

امیر گلرو، استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

علیرضا جوشقانی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

E-mail: omid.ataei@aut.ac.ir

دریافت: ۹۳/۰۴/۲۳ پذیرش: ۹۴/۰۷/۱۱

چکیده

سالانه خسارات قابل توجهی از جانب آبهای سطحی و رواناب ها به جامعه تحمیل می‌شود. این خسارات ناشی از بروز تصادف و اختلال درترافیک به سبب لغزندگی سطح معابر، تولید سیلاب و تحمیل خسارت به جان و مال شهروندان، هدر رفتن آب‌های سطحی، تشکیل رواناب و فاضلاب های آلوده و تخلیه آن در طبیعت می شود. همه این مشکلات به دلیل توسعه شهری و افزایش سطوح نفوذناپذیر به‌وجود می‌آید. روسازی بتن متخلخل ابزاری کارآمد است که به عنوان یک روسازی نفوذ پذیر می تواند تا حد زیادی جوابگوی این مشکلات باشد. تا نون حال مطالعات چندانی در خصوص اندازه سنگدانه این نوع روسازی انجام نشده است. در این مقاله سعی بر آن است که تاثیر اندازه سنگدانه بر عملکرد بتن متخلخل بررسی شود. بدین منظور ابتدا طرح اختلاط‌های مناسبی که دارای سنگدانه مصرفی درشت‌دانه و فاقد ریزدانه است طراحی می شود. در ادامه ساخت نمونه‌های استوانه‌ای و تیری شکل صورت می‌گیرد. سپس آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی، خمشی و نرخ نفوذپذیری بر روی نمونه‌ها انجام می‌شود و نتایج بدست آمده در خصوص تاثیر سنگدانه بر روی آنها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهند که در نسبت آب به سیمان و اندازه خمیر یکسان، هرچه اندازه سنگدانه افزایش پیدا می‌کند، مقاومت فشاری، کششی و خمشی کاهش می‌یابد و نرخ نفوذپذیری افزایش پیدا می‌کند.

واژه های کلیدی: روسازی بتنی، بتن متخلخل، اندازه سنگدانه، تاثیر، ویژگی‌های مکانیکی

۱. مقدمه

امروزه حمل‌ونقل نقش اساسی در جهان پیداکرده است، به‌طوری‌که تأثیر قابل‌توجهی بر سایر فعالیت‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی دارد. ازاین‌رو سالانه بودجه قابل‌توجهی از طرف دولت‌مردان به زیرساخت‌های حمل‌ونقل، به خصوص جاده اختصاص داده می‌شود. همواره یکی از دغدغه‌های مسئولین انتخاب نوع سیستم روسازی پایدار و بادوام است. انتخاب سیستم روسازی به عوامل متعددی نظیر حجم ترافیک موردنیاز، شرایط آب‌وهوایی و نوع خاک بستر منطقه، شرایط اقتصادی و مسائل زیست‌محیطی بستگی دارد.

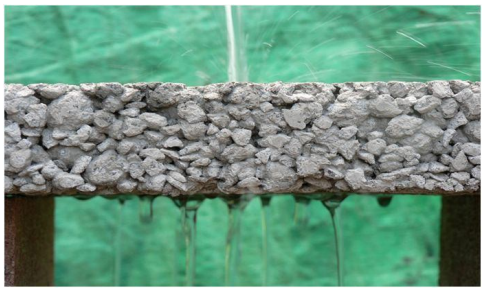
روسازی بتن متخلخل یکی از انواع روسازی‌های صلب است که به‌عنوان یک سیستم دوستدار محیط‌زیست به‌شمار می‌رود. یکی از ویژگی‌های منحصربه‌فرد این روسازی که آن را نسبت به سایر روسازی‌ها متمایز ساخته، توانایی نفوذپذیری آن است. ساختار این بتن به نحوی است که می‌تواند رواناب موجود در سطح معابر را از خود عبور دهد و وارد سفره‌های آب زیرزمینی کند. علت این امر وجود حفرات بزرگ و پیوسته در این نوع بتن است که می‌توانند از سیلاب، ایجاد خسارات مالی و جانی و تصادفات جلوگیری کند[ACI, 2010].

در کشور ما به دلیل وجود منابع فراوان مواد اولیه‌ی تشکیل‌دهنده بتن نظیر سنگدانه‌ها و تعدد کارخانه‌های تولید سیمان، افزایش قیمت فرآورده‌های نفتی و قیمت بالاتر قیر نسبت به سیمان از یک طرف و از طرفی دیگر هزینه کمتر حمل مواد، استفاده از این سیستم روسازی ازلحاظ اقتصادی در مقایسه با آسفالت توجیه‌پذیر است [Ramezanianpour, Jafari Nodoushan and Peydayesh, 2010].

با توجه به مزایای زیست محیطی و اقتصادی بتن متخلخل، استفاده از این نوع بتن در روسازی معابر، به خصوص در مناطق پر بارش، کارآمد خواهد بود و در راستای نیل به اهداف توسعه پایدار نیز است. از آنجایی که مقدار سیمان در بتن متخلخل کم است، سنگدانه ها درصد بالایی از حجم کل بتن متخلخل را تشکیل می دهند. از این رو سنگدانه نقش موثری در شکل گیری مقاومت بتن متخلخل دارد و تغییر در مقدار، اندازه و نوع سنگدانه مصرفی، مقاومت فشاری این بتن را به شدت تغییر خواهد داد. در این مقاله سعی شده میزان تاثیر اندازه سنگدانه در رفتار فیزیکی و مکانیکی بتن متخلخل مورد ارزیابی قرار گیرد.

۲. مفاهیم کلی و ادبیات موضوع

بتن متخلخل یکی از انواع روسازی‌های صلب است و به دلیل تخلخلی که در خود دارد، به‌عنوان نوع خاصی از بتن به شمار می‌رود. تخلخل این بتن به دلیل استفاده از سنگدانه‌های درشت در ساخت آن است، به‌طوری‌که فضاهای خالی به هم می‌چسبند و ساختار متخلخل این بتن را تشکیل می‌دهند. این ساختار متخلخل ویژگی‌های خاص و منحصربه‌فردی به این نوع بتن بخشیده و باعث تمایز آن با سایر روسازی‌ها می‌شود. در بتن متخلخل از مصالح ریزدانه استفاده نمی‌شود و یا به مقدار بسیار کم مورداستفاده قرار می‌گیرد، به‌طوری‌که سنگدانه‌ها از طریق خمیر سیمان که حاوی آب و سیمان است، به هم می‌چسبند [ACI, 2010, Behfarnia, Abtahi and Hejazi, 2011]. شکل ۱. مقطعی از یک لایه بتن متخلخل را نشان می‌دهد.



شکل ۱. مقطعی از یک لایه بتن متخلخل ACI Committee [522R-10, 2010].

ساختار متخلخل روسازی این نوع بتن باعث شده است که به‌عنوان یک زهکش در سطح معابر عمل کرده و رواناب حاصله از بارش باران و برف را از خود عبور داده و به سفره‌های آب زیرزمینی انتقال می‌دهد. این امر باعث کاهش رواناب‌های سطحی و خطر ایجاد سیل می‌شود و درنهایت نیاز به تأسیسات کنترل رواناب و سیلاب را کاهش می‌دهد، از طرفی با نفوذ آب به زمین، منجر به بالا آمدن سطح آب‌های زیرزمینی می‌شود [AbediKoupaei et al. 2011, Henderson, 2012].

تاکنون تحقیقات جامع اندکی در ارتباط با بتن متخلخل انجام‌شده است و بیش‌تر افراد اقدام به تعریف، توضیح در مورد عملکرد، نحوه‌ی اجرا و روش‌های تعمیر و نگهداری، به‌صورت ارائه یک گزارش کرده‌اند که در ادامه به بررسی چند مورد از تحقیقات انجام‌شده در ارتباط با بتن متخلخل پرداخته می‌شود.

یانگ و همکاران در سال ۲۰۰۳ میلادی مطالعه‌ای آزمایشی بر روی روسازی بتن متخلخل و مواد تشکیل‌دهنده آن انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که برخی از عوامل به‌خصوص درجه تراکم، تخلخل و نسبت سنگدانه‌ها به سیمان (A/C) در استحکام خمشی تأثیرگذارند. نویسندگان همچنین دریافتند که با استفاده از مصالح و روش‌های مرسوم مقاومت فشاری پائینی به دست آمد. همچنین استفاده از سنگدانه‌های کوچکتر، میکرو سیلیس و فوق روان کننده‌ها مقاومت فشاری بتن متخلخل را تا حد زیادی افزایش داد [Yang and Jiang, 2003].

غفوری در سال ۱۹۹۵ میلادی با انجام مطالعه‌ای بر روی بتن متخلخل، دریافت که تنش ناشی از،از دست دادن آب در بتن متخلخل در مقیاس بسیار کوچک‌تری نسبت به بتن معمولی است، اما درزمانی زودتر رخ می‌دهد. برخی از دلایل ممکن برای این پدیده مربوط به کم‌حجم بودن خمیر و سنگدانه است [Ghafoori, 1995].

جیما و رانگاراجو در سال ۲۰۱۴ میلادی دریافتند که، افزایش مقدار خمیر سیمان به معنای افزایش مقاومت کلی مخلوط بتن متخلخل است. افزایش در سطح خمیر سیمان، می تواند به راحتی از طریق استفاده از سنگدانه ریز بدست آید. با استفاده از سنگدانه ریز، سطح مخصوص سنگدانه ها بیش تر شده و خمیر سیمان سطح گسترده تری از سنگدانه ها را پوشش می دهد [Jimma, 2014].

گادیک و همکاران در سال ۲۰۱۳ میلادی طی انجام مطالعه‌ای بیان کردند که متغیر های مختلفی بر مقاومت فشاری بتن متخلخل تاثیر می گذارد که شامل نسبت تخلخل، مقدار ریزدانه، مواد افزودنی، و سطح تراکم روسازی در هنگام اجرا است. به طور کلی، نسبت تخلخل بالا به مقاومت فشاری پایین تر منجر می شود. بنابراین، برنامه های کاربردی بتن متخلخل عمدتا به جاده ها با حجم ترافیک کم، پارکینگ، محل عبور ماشین، و پیاده رو ها محدود شده است. علاوه بر این، عملکرد آنها در آب و هوای سرد منجر به نگرانی می‌شود که دلیل آن ساختارهای باز است که ممکن است در اثر ذوب و یخ آسیب ببینند[Gaedicke, 2013].

اوسیک و همکاران در سال ۲۰۱۴ میلادی تاثیر سنگدانه بر بتن متخلخل را بررسی کردند و دریافتند که دانه بندی و اندازه سنگدانه های درشت، نسبت آب به مواد سیمانی و میزان تراکم، بر اندازه حفرات اثر می‌گذارند و معمولا ۲-۸ میلیمتر هستند. معمولا برای ساخت بتن متخلخل از درشت دانه های با اندازه یکسان استفاده می شود، که می توان به راحتی به درصد حفرات بیش از ۱۵٪ رسید. این طرح های اختلاط عمدتا دارای نفوذپذیری بالا و مقاومت ناکافی اند. اندازه سنگدانه، دانه بندی و مقدار سنگدانه مصرفی در مخلوط بتن متخلخل، همگی از عوامل تاثیر گذار بر مقاومت فشاری بدست آمده هستند[Osic, 2014].

در سال ۱۳۹۰، شیرگیر و همکاران در مطالعه‌ای تأثیر نوع دانه-بندی بر ویژگی‌های مقاومتی و نفوذپذیری بتن متخلخل سخت شده را بررسی کردند. در این مقاله نقش درصد ریزدانه مصرفی در تعیین مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن متخلخل نیز بررسی شد. نتایج این پژوهش در ادامه ارائه می‌گردد:

- استفاده از ریزدانه باعث افزایش نقاط تماس سنگدانه‌ها و متعاقب آن افزایش مقاومت فشاری و کاهش نفوذپذیری را در پی خواهد داشت.
- در بتن متخلخل مقاومت فشاری و نفوذپذیری به‌شدت تحت تأثیر دانه‌بندی است.
- با افزایش عدد مربوط به ضریب یکنواختی سنگدانه‌ها، مقادیر مقاومت خمشی و فشاری بتن متخلخل افزایش و نفوذپذیری آن کاهش پیدا می کند [Shirgir, Hasani and Alizade Goodarzi, 2011].

پس از بررسی ادبیات موضوع مشاهده شد که هنوز خلا مطالعاتی در حوزه بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی روسازی بتن متخلخل بر اساس طرح اختلاط بهینه از پیش تعیین شده وجود دارد که این مقاله در پی پوشش این خلا است.

۳. بیان مساله و قلمرو تحقیق

مواد اصلی تشکیل دهنده بتن متخلخل آب، سیمان و سنگدانه هستند، که کیفیت و مقدار مصرفی از هر کدام، ویژگی‌های بتن تازه و سخت شده را تحت تاثیر قرار می‌دهند. به دلیل آن که مصالح سنگی درصد زیادی از حجم بتن را به خود اختصاص می‌دهد، تغییر در اندازه و کیفیت مصالح سنگی، رفتار بتن را به میزان قابل ملاحظه‌ای تغییر خواهد داد. در این پژوهش هدف اصلی، بررسی میزان تاثیر اندازه سنگدانه بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی روسازی بتن متخلخل است.

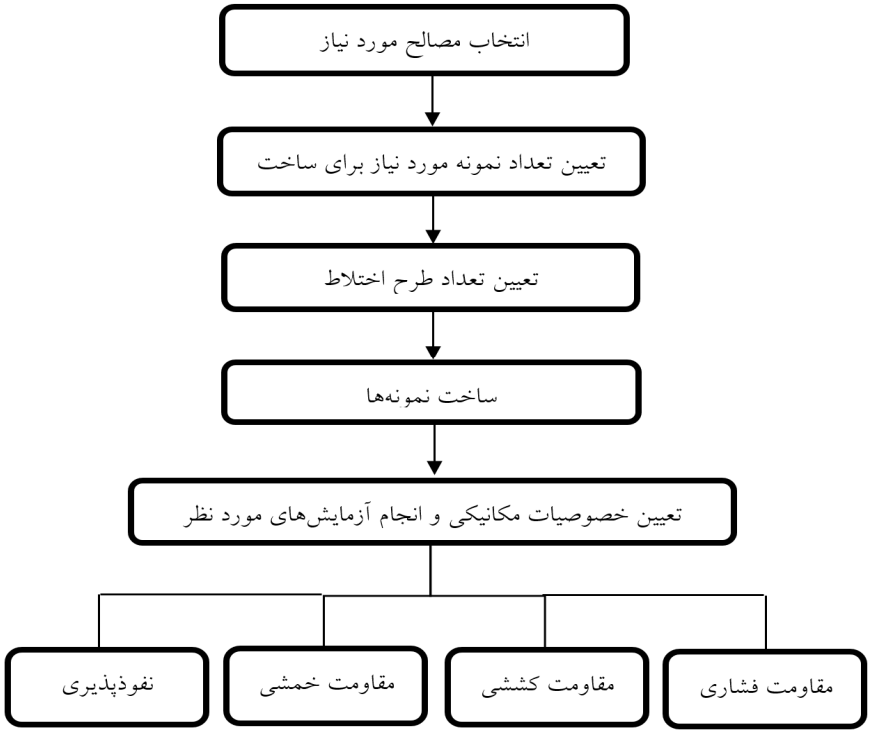
۴. روش تحقیق

به منظور بررسی تاثیر اندازه سنگدانه بر رفتار بتن متخلخل فرآیند انجام پژوهش مطابق فلوچارت شکل ۲. انجام شد.

همانطور که در شکل ۲. مشاهده می‌شود، ابتدا مصالح مصرفی مورد نیاز انتخاب شد و با توجه به تعداد تکرار هر نمونه تعداد کل نمونه‌ها در هر طرح تعیین شد. در ادامه با توجه به سه اندازه سنگدانه مورد نظر تعداد طرح اختلاط تعیین شد و نمونه‌ها در هر طرح ساخته شدند. در انتها در سنین از پیش تعیین شده آزمایش-های مورد نظر بر روی نمونه‌ها انجام شد و نتایج بدست آمده مورد ارزیابی قرار گرفت.

۴-۱ انتخاب مصالح مصرفی

سیمان پرتلند مصرفی در این پروژه، از نوع ۴۲۵-۱ و آب مصرفی، آب شرب شهر تهران می‌باشد. از آنجا که حداقل سه‌چهارم حجم بتن متخلخل را سنگدانه‌ها تشکیل می‌دهند لذا کیفیت این مواد از اهمیت فراوانی برخوردار است. نه‌تنها ممکن است سنگدانه مقاومت بتن ساخته‌شده را محدود نماید (زیرا سنگدانه‌های ضعیف نمی‌توانند بتن با مقاومت بالا بسازند) بلکه خواص سنگدانه‌ها به میزان چشمگیری بر نفوذپذیری و عملکرد بتن متخلخل تأثیر خواهد گذاشت. بتن متخلخل برای داشتن مقاومت کافی و نفوذپذیری مناسب، نیاز به تجزیه‌وتحلیل دقیقی از خواص سنگدانه دارد. اندازه سنگدانه‌های استفاده‌شده، همه یکسان است.



شکل ۲. روند انجام پژوهش

برای بهبود عملکرد در نفوذپذیری، ریزدانه‌ها در طرح اختلاط حذف شدند. بتن‌های متخلخل موردبررسی در این تحقیق دارای سه اندازه سنگدانه هستند: ۴/۷۵ تا ۹/۵ میلیمتر، ۹/۵ تا ۱۲/۵ میلیمتر و ۱۲/۵ تا ۱۹ میلیمتر است که الک‌های #۴، ″۳/۸ و ″۱/۲ است. مشخصات این سنگدانه‌ها در مصالح ریزدانه (ماسه) در ساخت نمونه‌های بتن متخلخل کاربرد چندانی ندارد و مصالح درشت‌دانه (شن) از نوع شکسته هستند. قابل‌ذکر است که کلیه مصالح سنگی مصرفی پروژه پس از تهیه، به‌منظور افزایش دقت درنتیجه‌گیری و بهبود شرایط مقایسه و ثابت نگه‌داشتن دانه‌بندی سنگدانه‌ها در طول آزمایش، به‌طور دقیق توسط الک‌های استاندارد، دانه‌بندی و به‌صورت مجزا درون کیسه‌های پلاستیکی و در فضایی بسته نگهداری شده و به‌صورت تفکیک‌شده و دقیقاً به میزان موردنیاز در هر نوبت مورد استفاده قرار گرفتند. در آزمایش‌های اولیه‌ای که در این پروژه و به‌منظور بررسی اثر اندازه سنگدانه صورت گرفت، عملکرد مطلوب این دانه‌بندی از حیث خواص مکانیکی و نفوذپذیری، مورد تأیید قرار گرفت. جدول ۲ معرف وضعیت دانه‌بندی انتخاب‌شده برای این مصالح سنگی هستند.

۴-۲ تعیین تعداد نمونه

در این پژوهش نمونه‌ها در سه سن ۷، ۲۸ و ۵۶ روز، در هر سن ۳ نمونه آزمایش مقاومت فشاری، ۳ نمونه آزمایش مقاومت کششی، ۲ نمونه آزمایش مقاومت خمشی و در کل ۳ نمونه آزمایش نفوذپذیری برای ساخت طرح در نظر گرفته شد. درمجموع در هر طرح ۲۷ نمونه بتن متخلخل ساخته شد.

۴-۳ تعیین تعداد طرح اختلاط

در این پژوهش با توجه به سه اندازه سنگدانه موجود و انتخاب دو نسبت آب به سیمان و ثابت در نظر گرفتن درصد خمیر سیمان به میزان ۱۸ درصد، در مجموع ۶ طرح اختلاط به منظور بررسی تاثیر اندازه سنگدانه ساخته شد. جدول جزئیات شش طرح اختلاط ساخته شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که اعداد آورده شده در ستون سنگدانه در جدول ۳، شماره الکی است که سنگدانه بر روی آن مانده است.

۴-۴ تعیین تعداد نمونه

در این پژوهش نمونه‌ها در سه سن ۷، ۲۸ و ۵۶ روز، در هر سن ۳ نمونه آزمایش مقاومت فشاری، ۳ نمونه آزمایش مقاومت کششی، ۲ نمونه آزمایش مقاومت خمشی و در کل ۳ نمونه آزمایش نفوذپذیری برای ساخت طرح در نظر گرفته شد. درمجموع در هر طرح ۲۷ نمونه بتن متخلخل ساخته شد.

۴-۵ تعیین تعداد طرح اختلاط

در این پژوهش با توجه به سه اندازه سنگدانه موجود و انتخاب دو نسبت آب به سیمان و ثابت در نظر گرفتن درصد خمیر سیمان به میزان ۱۸ درصد، در مجموع ۶ طرح اختلاط به منظور بررسی تاثیر اندازه سنگدانه ساخته شد. جدول جزئیات شش طرح اختلاط ساخته شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که اعداد آورده شده در ستون سنگدانه در جدول ۳، شماره الکی است که سنگدانه بر روی آن مانده است.

جدول ۱. مشخصات سنگدانه استفاده شده.

آزمایش	استاندارد ASTM	#۴	″۳/۸	″۱/۲

درصد جذب، ٪	C ۱۲۷	۱/۷۰۷	۱/۶۵۷	۱/۵۰۵
وزن مخصوص	C ۱۲۷	۲/۵۵	۲/۶۱	۲/۶۸
وزن مخصوص اشباع با سطح خشک	C ۱۲۷	۲/۵۷	۲/۶۲	۲/۶۹
وزن مخصوص ظاهری	C ۱۲۷	۲/۵۹	۲/۶۴	۲/۷۱
چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	C ۲۹	۱۶۸۹	۱۶۰۶	۱۵۸۱

جدول ۲. دانه‌بندی سنگدانه‌ها

اندازه الک، میلیمتر (اینچ)	#۴	۳/۸″	۱/۲″
	درصد عبوری، ٪		
(۱) ۲۵/۴	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
(۳/۴) ۱۹	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
(۱/۲) ۱۲/۵	۱۰۰	۱۰۰	۰
(۳/۸)۹/۵	۱۰۰	۰	۰
(#۴) ۴/۷۵	۰	۰	۰
(#۸) ۲/۳۶	۰	۰	۰

جدول ۳. مشخصات فنی شش طرح اختلاط.

شماره	کد طرح	سنگدانه	نسبت آب به سیمان
۱	*N1 - 18.27.3*	۱/۲"	۰/۲۷
۲	*N2 - 18.37.3*	۱/۲"	۰/۳۷
۳	*N3 - 18.27.1*	#۴	۰/۲۷
۴	*N4 - 18.37.1*	#۴	۰/۳۷
۵	*N5 - 18.27.2*	۳/۸"	۰/۲۷
۶	*N6 - 18.37.2*	۳/۸"	۰/۳۷

۶-۴ ساخت نمونه‌ها

روند ساخت و عمل‌آوری هر یک از نمونه‌ها همانند بتن سازه ای **ساختمانی** و بر اساس استاندارد ASTM C192M-02 انجام شد و عمل‌آوری لازم برای هر یک تا زمان رسیدن به سن بارگذاری ادامه یافت. در ادامه نحوه ساخت نمونه‌ها در ۶ طرح اختلاط مختلف و نحوه انجام عمل‌آوری بیان می‌شود.

۱-۴-۴ نمونه‌های استوانه‌ای

ساخت نمونه‌های مقاومت فشاری مطابق با استاندارد ASTM C 39M-03 انجام شد. به ترتیبی که از قالب‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰ سانتیمتر و ارتفاع ۲۰ سانتیمتر استفاده شد (شکل ۳).

نمونه‌ها جهت عمل‌آوری اولیه، توسط پوشش پلاستیکی، به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شدند. بعد از ۲۴ ساعت پوشش پلاستیکی برداشته شد و قالب‌ها باز شدند. سپس جهت انجام عمل‌آوری طبق استاندارد، نمونه‌های بتن متخلخل بلافاصله بعد از خارج شدن از قالب، درون حوضچه حاوی آب و آهک قرارگرفته و بسته به سن موردنیاز برای ۷، ۲۸ و ۵۶ روز تحت عمل‌آوری قرار گرفتند.

شکل ۳. نمایی از یک نمونه استوانه‌ای شکل.

۲-۴-۴ نمونه‌های تیری شکل

ساخت نمونه‌های مقاومت خمشی مطابق با استاندارد ASTM C 293- 02 انجام شد. به ترتیبی که از قالب‌های مکعب مستطیل تیری شکل به ابعاد ۱۰×۱۰×۵۰ سانتیمتر استفاده شد. در هر طرح اختلاط ۶ نمونه آزمایش خمشی ساخته شد. عمل‌آوری همانند نمونه‌های استوانه‌ای انجام شد. **Error! Reference source**

not found. (الف) نمایی از نمونه‌های تیری شکل مربوط به آزمایش مقاومت خمشی را نشان می‌دهد.

۴-۵ انجام آزمایش‌های مورد نظر

در ادامه نحوه انجام هر یک از آزمایش‌ها بیان می‌شود:

۴-۵-۱ مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری مطابق با استاندارد ASTM C39M-03 انجام شد. به‌منظور انجام این آزمایش، نمونه‌های بتن متخلخل، از دستگاه بارگذاری با یک فک ثابت و یک فک متغیر استفاده شد. فک فوقانی ثابت بوده و فک تحتانی متحرک است. نحوه انجام آزمایش به ترتیبی است که ابتدا سطح فوقانی نمونه‌های استوانه‌ای که به دلیل ساختار متخلخل بتن ناهموار است، با انجام عملیات سرپوش گذاری[1] هموار می‌گردد. به‌منظور اجرای صحیح عملیات سرپوش گذاری، ابتدا سطوح ناهموار نمونه‌ها توسط دستگاه برش هموار گردید.

در ادامه نمونه بر روی فک تحتانی قرار می‌گیرد و با سرعت ۲/۱ مگاپاسکال بر دقیقه طبق استاندارد فوق الذکربارگذاری انجام می‌شود. نمونه تحت فشار قرارگرفته و مقدار نیروی وارده از طریق عقربه مخصوص قابل‌مشاهده است. این افزایش نیرو هنگام بروز اولین ترک در بتن متوقف‌شده و عددی که عقربه نشان می‌دهد همان حداکثر نیروی فشاری قابل‌تحمل نمونه بتن متخلخل است. شکل ۴ (ب) نمایی از یک نمونه استوانه‌ای شکسته شده بعد از آزمایش مقاومت فشاری است.

برای محاسبه مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای بتن متخلخل از رابطه (۱) استفاده می‌شود:

$$S_P = \frac{P \times 1000}{\frac{((d\times 10)^2\times \pi)}{4}} \qquad (۱)$$

شکل ۴. (الف) نمونه‌های تیری شکل آزمایش مقاومت خمشی. (ب) نمونه استوانه‌ای شکسته شده در آزمایش مقاومت فشاری.

در رابطه (۱)، S_P مقاومت فشاری بتن متخلخل (مگاپاسکال)، P حداکثر نیروی وارد بر نمونه استوانه‌ای بتن متخلخل (کیلو نیوتن) و d قطر نمونه استوانه‌ای (سانتیمتر) است.

۴-۵-۲ مقاومت کششی

در آزمایش مقاومت کششی از استاندارد ASTM C496M-04 استفاده شد. مقاومت کششی از طریق انجام آزمایش کشش غیرمستقیم (آزمایش برزیلی) به دست می‌آید. دستگاه بارگذاری در این آزمایش همان دستگاه آزمایش مقاومت فشاری است. به ترتیبی که نمونه استوانه‌ای به‌صورت افقی روی فک تحتانی قرارگرفته و با سرعت ثابت ۲/۱ مگاپاسکال بر دقیقه طبق استاندارد فوق الذکر به سمت بالا حرکت می‌کند. نحوه‌ی قرارگیری نمونه بین دو فک در **Error! Reference source not found.**۴ (الف) نشان داده شده است.

افزایش نیرو تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که نمونه در اثر کشش ناشی از فشار ترک بخورد و عقربه ثابت شود. عددی که عقربه نیروسنج در لحظه ترک خوردن نشان می‌دهد، حداکثر نیروی کششی قابل‌تحمل توسط نمونه بتن متخلخل است. از رابطه (۲) به‌منظور محاسبه مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای بتن متخلخل استفاده می‌شود:

$$\boldsymbol{S_T = \frac{2\times P\times 10}{d\times h\times \pi}} \qquad (۲)$$

در رابطه (۲)، S_T مقاومت کششی نمونه استوانه‌ای بتن متخلخل (مگاپاسکال)، P حداکثر نیروی واردشده بر نمونه استوانه‌ای (کیلو نیوتن)، d قطر نمونه (سانتیمتر) و h ارتفاع نمونه استوانه‌ای است.

۴-۵-۳ مقاومت خمشی

جهت انجام آزمایش مقاومت خمشی استاندارد ASTM C293-02 مورداستفاده قرار گرفت. در این آزمایش از دستگاه بارگذاری تک نقطه‌ای استفاده می‌شود. روش انجام آزمایش به نحوی است که ابتدا نمونه‌ی تیری شکل بتن متخلخل روی تکیه‌گاه‌ها در دو طرف دستگاه قرار می‌گیرد. طول نمونه ۵۰ سانتی‌متر است و فاصله بین دو تکیه‌گاه ۴۰ سانتی‌متر است. نحوه قرارگیری نمونه تیری شکل بر دستگاه آزمایش خمش تک نقطه‌ای در شکل ۵ (ب) قابل‌مشاهده است.

شکل ۵. (الف) طریقه قرارگیری نمونه استوانه‌ای در آزمایش مقاومت کششی. (ب) نحوه قرارگیری نمونه تیری شکل در دستگاه آزمایش مقاومت خمشی تک نقطه‌ای.

دستگاه بارگذاری به ترتیبی عمل می‌کند که میله فولادی در بالای نمونه قرار می‌گیرد و ثابت بوده و دو تکیه‌گاه با سرعت ۱ میلیمتر بر ثانیه به سمت بالا حرکت می‌کند. بارگذاری تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که اولین ترک در نمونه بتنی ایجاد شود. پس از توقف بارگذاری، عددی که روی نمایشگر دیجیتالی نمایان است، بیانگر حداکثر نیروی واردشده بر نمونه بتن متخلخل تیری شکل است. در این پژوهش، برای محاسبه مقاومت خمشی بتن متخلخل از رابطه (۳) استفاده می‌شود:

$$S_F = \frac{1.5 \times F \times 10 \times L \times 10}{(b \times 10)^3} \qquad (۳)$$

در رابطه (۳)، S_F مقاومت خمشی (مگاپاسکال)، F حداکثر نیروی وارده بر نمونه تیر خمشی (کیلو نیوتن)، L فاصله بین دو تکیه‌گاه (سانتیمتر) و b عرض نمونه تیری شکل (سانتیمتر) است.

۴-۵-۴ نفوذپذیری

تعیین نفوذپذیری بتن متخلخل هنوز روش استانداردی ندارد و با استفاده از دستگاه گیلسون[۲] که نرخ افت هد آب را با استفاده از **Error! Reference source not found.** اندازه می گیرد انجام می‌شود. در این تحقیق دستگاهی شبیه دستگاه گیلسون طراحی و ساخته شد. این دستگاه عملکردی مشابه گیلسون دارد، ولی اندازه قطر استوانه مدرج آن با قطر استوانه مدرج دستگاه گیلسون متفاوت است. در این روش، سطح جانبی نمونه استوانه‌ای شکل در ابتدا توسط ملات سیمان مخصوص آب‌بندی، آب‌بند می‌شود. سپس استوانه مدرج به همراه پایه سیمانی آن روی نمونه قرار می‌گیرد. محل اتصال نمونه و پایه استوانه مدرج توسط لاستیک و دو عدد بست فلزی آب‌بند می‌شود. نحوه انجام آزمایش بدین ترتیب است که زمان سپری‌شده برای رسیدن آب از یک ارتفاع اولیه به ارتفاع ثانویه (اختلاف ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر) اندازه‌گیری می‌شود. با داشتن مقادیر ارتفاع اولیه (h_1) و ثانویه (h_2) برحسب میلیمتر، زمان سپری‌شده (t) برحسب ثانیه، سطح مقطع‌های استوانه مدرج (A) و نمونه استوانه‌ای (a) برحسب میلیمترمربع و ارتفاع نمونه (L، طول مسیر عبور آب) برحسب میلیمتر، با استفاده از رابطه (۴) ضریب نفوذپذیری (K) هر نمونه به دست می‌آید.

$$K = \frac{aL}{At} \times \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \qquad (۴)$$

۴-۵-۵ تعیین خصوصیات مکانیکی بتن متخلخل

با استفاده از وزن بتن تازه و همچنین بتن سخت شده در حالت خشک و غوطه‌ور در آب، می‌توان با به‌کارگیری فرمول‌های مربوطه، وزن مخصوص و میزان تخلخل را به دست آورد.

۵. ارائه و تحلیل نتایج

در این قسمت نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها ارائه می‌شود.

۵-۱ بررسی خصوصیات مکانیکی

ویژگی‌های مکانیکی شش طرح اختلاط جدید در جدول ۴ آمده است. با استفاده از وزن بتن تازه و بتن سخت شده در حالت خشک و غوطه ور در آب، می توان چگالی و میزان تخلخل را به دست آورد.

جدول ۴. ویژگی‌های مکانیکی شش طرح اختلاط جدید.

شماره	کد طرح	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	درصد تخلخل (٪)
۱	*N1 - 18.27.3*	۱۷۷۱	۳۰/۴
۲	*N2 - 18.37.3*	۱۸۴۷	۳۰/۱
۳	*N3 - 18.27.1*	۱۸۰۵	۲۷/۶
۴	*N4 - 18.37.1*	۱۹۲۱	۲۷/۲
۵	*N5 - 18.27.2*	۱۷۶۴	۲۹/۱
۶	*N6 - 18.37.2*	۱۸۷۲	۲۸/۸

همان‌طور که در جدول قابل‌مشاهده است که هرچه اندازه سنگدانه کاهش پیدا می‌کند، فضاهای خالی بین آنها کاهش یافته و اندازه حفرات تقلیل می‌یابد. بدین ترتیب بتن متراکم تر شده و در نتیجه چگالی افزایش پیداکرده و تخلخل کاهش می‌یابد. آئین نامه و استانداردهای گوناگون مقادیر مختلفی از حداقل و حداکثر تخلخل در بتن متخلخل ارائه داده‌اند. درصد تخلخل استانداردی که منطبق بر اکثر آئین نامه ها باشد، ۱۵ تا ۳۵ درصد است. مقادیر درصد تخلخل به دست آمده در بازه فوق قرار گرفته اند.

۵-۲ آزمایش مقاومت فشاری

نتایج مقاومت فشاری شش طرح اختلاط جدید در شکل ۶ آمده است. هرچه اندازه سنگدانه کاهش پیدا می‌کند، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. مقاومت فشاری ۲۸ روزه استانداردی که منطبق بر اکثر آئین نامه ها باشد، ۳/۵ تا ۲۸ مگاپاسکال است. مقادیر مقاومت فشاری بدست آمده در بازه فوق قرار گرفته اند. این در حالی است که مقاومت فشاری روسازی بتن معمولی مقادیری در حدود ۲۰ تا ۳۵ مگاپاسکال است. این کاهش مقاومت بتن متخلخل در مقایسه با بتن های معمولی امری بدیهی است، چرا که ساختار بتن معمولی متراکم تر از بتن متخلخل بوده و به تبع آن نسبت به بتن های متخلخل، مقاومت فشاری بیشتری نیز کسب خواهد نمود. در ادامه چند نمودار آماری از این ۶ طرح اختلاط، جهت بررسی مقاومت فشاری و تحلیل عوامل مؤثر بر آن ارائه می‌شود.

هم چنین،

شکل ۶ بیانگر رابطه معکوس مقاومت فشاری بتن متخلخل و اندازه سنگدانه در نسبت آب به سیمان و میزان خمیر سیمان ثابت است. از طرفی نمودار نشان می‌دهد که مقدار مقاومت فشاری بتن متخلخل در اثر افزایش نسبت آب به سیمان، به‌طور میانگین افزایش پیداکرده است. این یک تفاوت عمده بین بتن معمولی و بتن متخلخل است، چراکه در بتن‌های معمولی هرچه نسبت آب به مواد سیمانی افزایش می‌یابد، از میزان مقاومت فشاری کاسته می‌شود.دلیل این امر آن است که بتن متخلخل به دلیل مقدار کم خمیر سیمان، حساسیت بسیار بالایی به نسبت آب به سیمان دارد. در این بتن هرچه نسبت آب به سیمان افزایش یابد، پوشش خمیر سیمان روی سنگدانه‌ها بهتر انجام می‌شود و آب بیشتری برای انجام فرآیند هیدراتاسیون وجود دارد. درنتیجه هیدراتاسیون بهتر و کامل‌تر انجام می‌شود و باعث می‌شود بتن متخلخل مقاومت نهایی بالاتری به دست آورد.

۵-۳ آزمایش مقاومت کششی

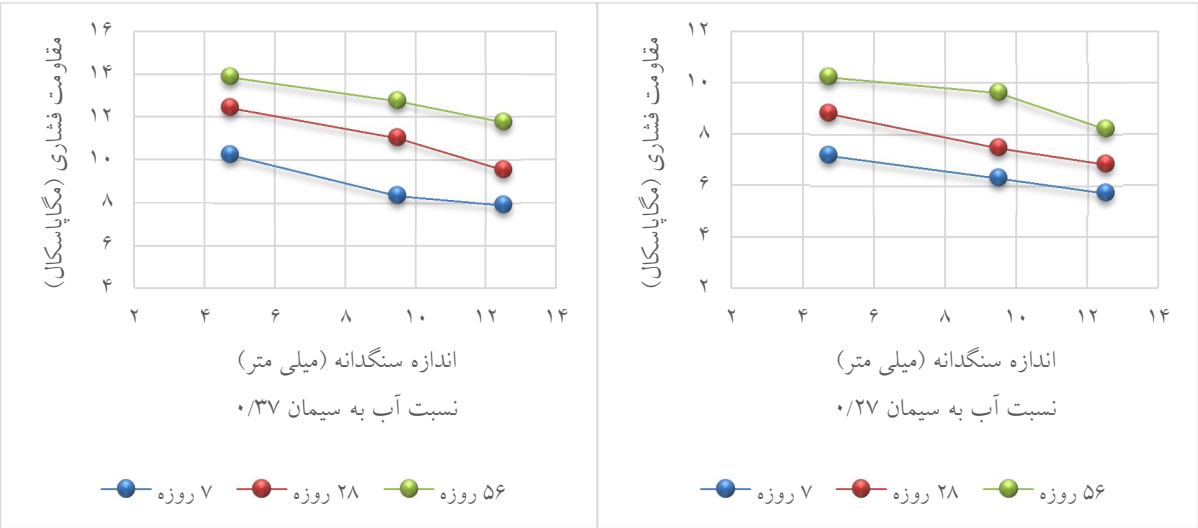
نتایج مقاومت کششی شش طرح اختلاط جدید در شکل ۷ آمده است. همان‌طور که در این شکل قابل‌مشاهده است هرچه اندازه سنگدانه کاهش پیدا می‌کند، مقاومت کششی افزایش می‌یابد. مقاومت کششی ۲۸ روزه استانداردی که منطبق بر اکثر آئین نامه ها باشد، ۰/۸۵ تا ۳ مگاپاسکال است. مقادیر مقاومت کششی بدست آمده در بازه فوق قرار گرفته اند. این در حالی است که مقاومت کششی روسازی بتن معمولی مقادیری در حدود ۲ تا ۵ مگاپاسکال است.در ادامه چند نمودار آماری از این ۶ طرح اختلاط، جهت بررسی مقاومت کششی و تحلیل عوامل مؤثر بر آن ارائه می‌شود.

شکل ۷ نشان می‌دهدکه در نسبت آب به سیمان و درصد خمیر سیمان یکسان، هرچه اندازه سنگدانه افزایش پیدا می‌کند، مقاومت کششی بتن متخلخل کاهش پیدا می‌کند. همچنین می‌توان نتیجه گرفت، در بتن متخلخل برای درصد خمیر سیمان یکسان، هرچه مقدار نسبت آب به سیمان افزایش پیدا می‌کند، مقاومت کششی افزایش می‌یابد. دلیل این امر، پوشش مناسب سنگدانه و افزایش چسبندگی سنگدانه‌ها در نسبت آب به سیمان بالاتر است.

۴-۵ آزمایش مقاومت خمشی

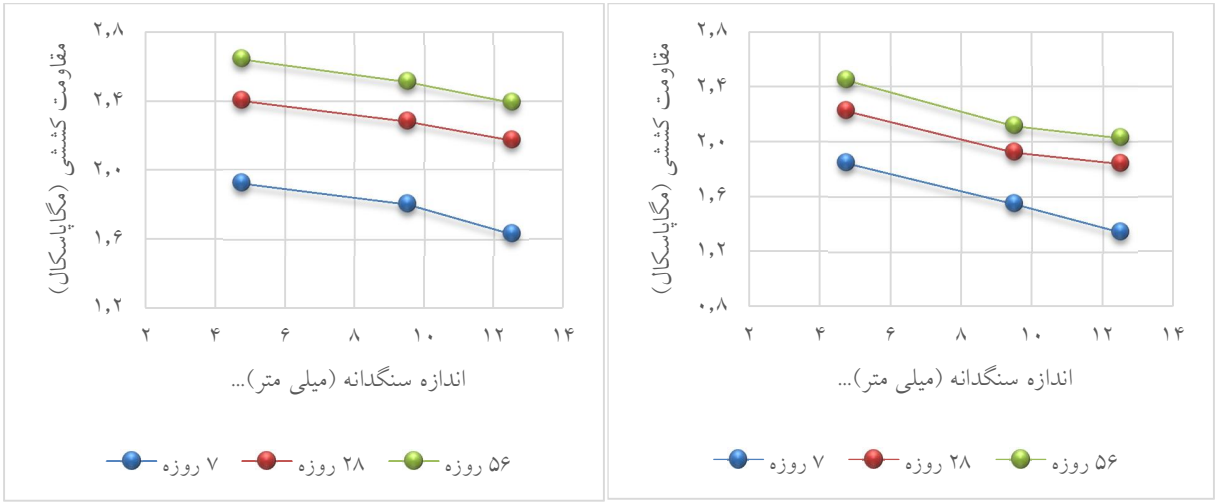
نتایج مقاومت خمشی شش طرح اختلاط جدید در شکل ۸ آمده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می شود هرچه اندازه سنگدانه کاهش پیدا می‌کند، مقاومت خمشی افزایش می‌یابد. مقاومت خمشی ۲۸ روزه استانداردی که منطبق بر اکثر آئین نامه ها باشد، ۱ تا ۴ مگاپاسکال است. مقادیر مقاومت خمشی بدست آمده در بازه فوق قرار گرفته اند. متقابلا مقاومت خمشی بتن متخلخل از بتن های معمولی (معمولا بین ۳ تا ۵ مگاپاسکال) کمتر خواهد بود. علت این امر ساختار متخلخل و تراکم پایین این نوع بتن است. در ادامه چند نمودار آماری از این ۶ طرح اختلاط، جهت بررسی مقاومت خمشی و تحلیل عوامل مؤثر بر آن ارائه می‌شود.

همانند آنچه برای مقاومت فشاری و کششی در بتن متخلخل ارائه شد، شکل ۸ نشان می‌دهد در نسبت آب به سیمان و درصد خمیر سیمان یکسان، هرچه اندازه سنگدانه افزایش پیدا می‌کند، مقاومت خمشی بتن متخلخل کاهش پیدا می‌کند. همچنین می‌توان نتیجه گرفت، در بتن متخلخل، برای درصد خمیر سیمان یکسان، هرچه مقدار نسبت آب به سیمان افزایش پیدا می‌کند، مقاومت کششی افزایش می‌یابد. دلیل این امر، پوشش مناسب سنگدانه و افزایش چسبندگی سنگدانه‌ها در نسبت آب به سیمان بالاتر است.



شکل ۶. رابطه مقاومت فشاری و اندازه سنگدانه در نسبت آب به سیمان ۰/۲۷ و ۰/۳۷ در درصد خمیر یکسان.

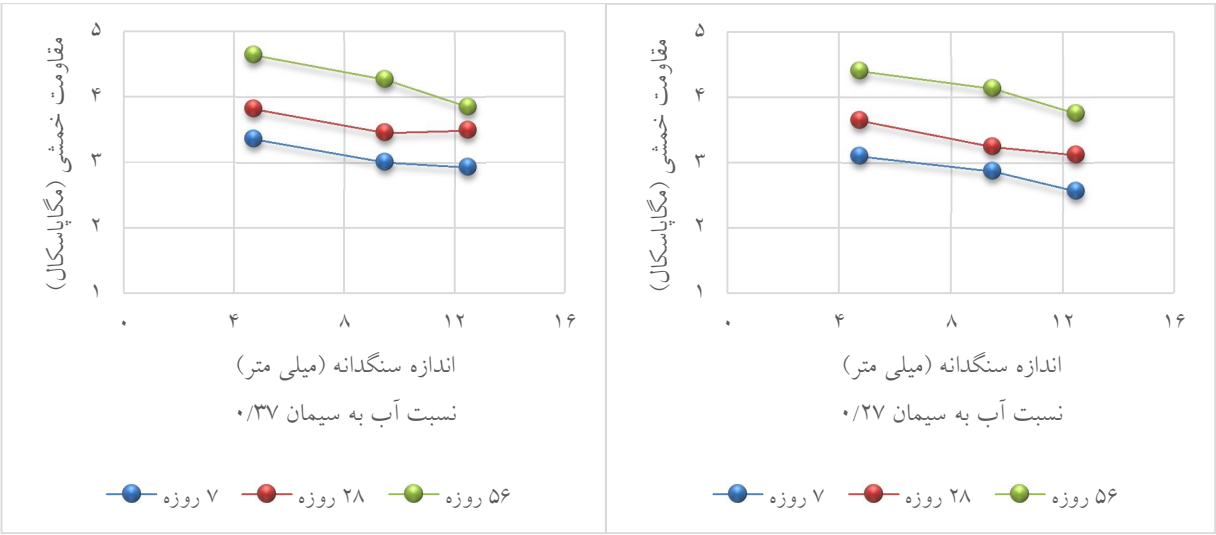
.



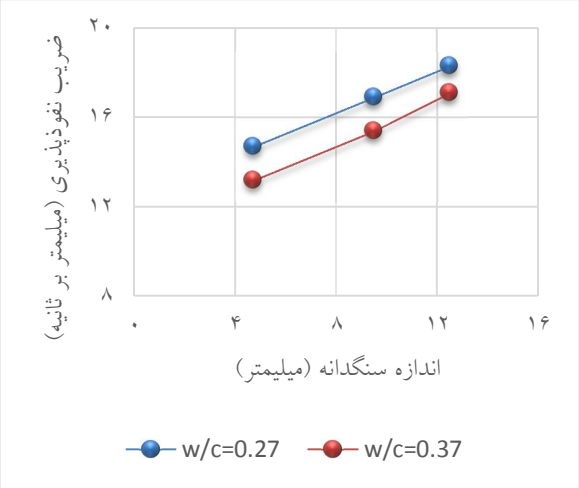
شکل ۷. رابطه مقاومت کششی و اندازه سنگدانه در نسبت آب به سیمان ۰/۲۷ و ۰/۳۷ در درصد خمیر یکسان

۵-۵ آزمایش نفوذپذیری

نتایج آزمون نفوذپذیری شش طرح اختلاط جدید در شکل ۹ آمده است. نتایج نشان می‌دهد که در طرح اختلاط با اندازه سنگدانه بزرگ و نسبت آب به سیمان کم، نرخ نفوذپذیری بیشتری حاصل‌شده است.



شکل ۸. رابطه مقاومت خمشی و اندازه سنگدانه در نسبت آب به سیمان ۰/۲۷ و ۰/۳۷ در درصد خمیر یکسان.



شکل ۹. رابطه نفوذپذیری و اندازه سنگدانه.

شکل ۹ نشان می‌دهد که در نسبت آب به سیمان ثابت، نرخ نفوذپذیری و اندازه سنگدانه رابطه مستقیمی باهم دارند. به ترتیبی که هرچه اندازه سنگدانه افزایش پیدا می‌کند، نرخ نفوذپذیری نیز افزایش می‌یابد. دلیل این امر افزایش تعداد و اندازه حفرات بتن متخلخل در اثر افزایش اندازه سنگدانه است. همچنین می‌توان مشاهده کرد که هرچه نسبت آب به سیمان بیش‌تر می‌شود، پوشش سنگدانه بهتر انجام‌شده و عمل هیدراتاسیون نیز بهتر انجام می شود، درنتیجه میزان خلل و فرج و ضخامت حفرات کمتر می‌شود. این امر موجب می‌شود مقاومت فشاری افزایش و نفوذپذیری کاهش پیدا کند. از حیث نفوذپذیری، روسازی بتن معمولی در قیاس با بتن متخلخل، با توجه به ساختار متراکمی که دارد، کاملا نفوذ ناپذیر است.

۶. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

ساختار بتن متخلخل ویژگی‌های خاصی به این بتن بخشیده و آن را نسبت به سایر روسازی‌ها متمایز ساخته است. خلل و فرج موجود در این بتن و ارتباط این حفرات باهم باعث نفوذپذیری بالای این بتن شده و این امکان را فراهم می‌کند که رواناب تشکیل‌شده از آب باران در سطح روسازی نمانده و به لایه‌های زیرین روسازی نفوذ کند.

تخلخل موجود در بتن متخلخل باعث می‌شود که چگالی این بتن در مقایسه با بتن‌های معمولی کاهش یابد. کاهش چگالی و وجود درصد بالایی از حفرات منجر به کاهش مقاومت بتن متخلخل در قیاس با بتن معمولی می‌شود. ازاین‌رو باید سعی شود که تعادلی بین تخلخل یا نفوذپذیری و مقاومت برقرار گردد. مهم‌ترین عامل در برقراری این تعادل اندازه سنگدانه، درصد خمیر سیمان و نسبت آب به سیمان است. به‌منظور دسترسی به مقاومت‌های بالاتر و نفوذپذیری قابل قبول، باید از درصد خمیر سیمان بالاتری استفاده کرد. درنهایت نتایج مهم این پژوهش به صورت زیر خلاصه می شود:

- اندازه سنگدانه، نسبت آب به سیمان و مقدار خمیر سیمان تأثیر قابل‌توجهی بر خواص بتن متخلخل دارد.
- مقاومت بتن متخلخل ناشی از دو عامل قفل و بست سنگدانه و چسبندگی بین خمیر سیمان و سنگدانه است.
- هرچه اندازه سنگدانه کمتر باشد، فضای خالی بین دانه-های سنگی بهتر پر می‌شود، در نتیجه قفل و بست سنگدانه‌ها بهتر انجام می‌شود.
- هرچه اندازه سنگدانه کمتر باشد، پوشش خمیر روی سنگدانه بهتر انجام شده و دانه‌ها سنگی در تماس بیشتری با یکدیگر بوده، در نتیجه چسبندگی بین خمیر سیمان و سنگدانه بیشتر خواهد شد.
- در اندازه خمیر و نسبت آب به سیمان یکسان، هرچه اندازه سنگدانه کمتر باشد، تخلخل کمتر، بتن متراکم‌تر، چسبندگی بین خمیر و سنگدانه بیشتر، مقاومت فشاری افزایش و نرخ نفوذپذیری کاهش می‌یابد.
- در اندازه خمیر و نسبت آب به سیمان یکسان، هرچه اندازه سنگدانه بیشتر باشد، تخلخل بیشتر، چسبندگی بین خمیر و سنگدانه کمتر، مقاومت فشاری افزایش و نرخ نفوذپذیری کاهش می‌یابد.
- با استفاده از ریزدانه مقدار مقاومت افزایش و از میزان نفوذپذیری کاسته می شود.
- بر اساس آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی، خمشی و نفوذپذیری و نتایج بدست آمده، حداکثر اندازه سنگدانه بهینه بین ۴/۷۵ تا ۹ میلیمتر توصیه می‌شود.

۷. پی‌نوشت‌ها

1-Capping
2-Gilson

۸. مراجع

بهفرنیا، کیاچهر، ابطحی، سید مهدی و حجازی، سید احمدرضا (۱۳۹۰) "بررسی آزمایشگاهی بتن متخلخل و اثر افزودنی‌ها بر مشخصات مکانیکی آن"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، ایران، سمنان، دانشگاه سمنان، اردیبهشت ۱۳۹۰.

– رمضانیانپور، علی‌اکبر، جعفری ندوشن، محسن و پیدایش، منصور (۱۳۸۹) "مقایسه فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی روسازی‌های بتنی و آسفالتی در ایران"، دومین کنفرانس ملی بتن ایران، ایران، تهران، مرکز همایش‌های بین‌المللی رازی، مهرماه ۱۳۸۹.

– عابدی کوپائی، جهانگیر، مصطفی‌زاده فرد، بهروز، سقائیان نژاد، سهیلا، بهفرنیا، کیاچهر و سقائیان نژاد، سید حسین (۱۳۹۱) "کاهش میزان کدورت رواناب‌های شهری با استفاده از بتن متخلخل جاذب"، همایش ملی جریان و آلودگی آب، ایران، تهران، دانشگاه تهران، خرداد ۱۳۹۱.

– شیرگیر، بهروز، حسنی، ابوالفضل و علیزاده گودرزی، هادی (۱۳۹۰) "*تأثیر نوع دانه‌بندی بر خواص فیزیکی و نفوذپذیری بتن متخلخل در روسازی*"، مجله علمی– پژوهشی عمران مدرس، دوره یازدهم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۰.

- ACI Committee 522R-10 (2010) "Pervious concrete", American Concrete Institute.

- ASTM C 39M-03, (2003) “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens”, USA: American Society for Testing and Materials

- ASTM C 192M-02, (2002) “Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory”, USA: American Society for Testing and Materials

- ASTM C 293, (2002) “Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)”, USA: American Society for Testing and Materials

- ASTM C 496M, (2004) “Standard Test Method for Compressive Stress of Porcelain Enamels by Loaded-Beam Method”, USA: American Society for Testing and Materials

- Ghafoori, N. (1995) "Deve1opment of no-fines concrete pavement applications", Journal of Transportation Engineering, An International Journal, Vol. 126, No. 3, May-June, pp. 283-288.

- Henderson, V. (2012) “Evaluation of the performance of pervious concrete pavement in the Canadian climate”, Ph.D Thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada.

- Yang, J., Jiang, G. (2003) “Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials”, Cement and Concrete Research, Vol. 33, Issue 3, March, pp. 381-386.

- B, E, Jimma. P, Rangaraju. (2014) "Film-forming ability of fl (2014 cement pastes and its application in mixture proportioning of pervious concrete", Construction and Building Materials, Vol. 71, Issue 2, August, pp. 273-282.

- Gaedicke, C., Marines, A. and Miankodila, F. (2013) “A method for comparing cores and cast cylinders in virgin and recycled aggregate pervious concrete“, Construction and Building Materials, Vol. 52, Issue 3, December, pp. 494-503.

- Osic´, K, C., Korat, L., Ducman, V. and Netinger, I. (2014) “Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete”, Construction and Building Materials, Vol. 78, Issue 1, December, pp. 69-76.