

بررسی همبستگی مقاومت فشاری و پربسامدترین اندازه تخلخل بتن سبک خودتراکم با آزمایش تخلخل سنج جیوه ای

وهاب نادری زرنقی^۱، علی فروغی اصل^۲، وحید نورانی^۳

۱- دانشجوی دکتری عمران - سازه های هیدرولیکی، دانشگاه تبریز

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۳- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

Vahabn66@gmail.com

چکیده

بتن کاربردی ترین مصالح مورد استفاده در جهان است. هزینه نسبتاً پایین تولید، سهولت کاربرد و مقاومت فشاری بالای بتن دلایل اصلی مقبولیت این ماده در دنیا می باشد. دوام بتن امروزه از مسائل بسیار مهم حتی مهمتر از مقاومت آن در بین تکنولوژیست ها مطرح می باشد که نه تنها به مقاومت فشاری و کششی آن وابسته است بلکه تا حد زیادی نیز به تخلخل موجود در آن بستگی دارد. تخلخل موجود در بتن به شدت تحت تأثیر نسبت آب به سیمان (w/c) و افزودنی های مجاز بتن می باشد. یکی از روش های کاهش تخلخل در بتن اضافه کردن پوزولان های سیمانی می باشد که میکروسیلیس از جمله این مواد افزودنی می باشد که ساختار منافذ را اصلاح می کند. در بررسی آزمایشگاهی این پژوهش پارامترهای مختلف چون نسبت آب به سیمان های مختلف و مقدار میکروسیلیس مورد استفاده (جایگزین سیمان بصورت ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰٪)، و مدت زمان عمل آوری (۳، ۷، ۲۸ و ۵۶ روز) به عنوان متغیرهای آزمایش ها در نظر گرفته شده و از هر طرح مخلوط سه نمونه ساخته شده و مشخصات و خواص مکانیکی نمونه ها از جمله مقاومت فشاری و تخلخل سنجی به روش تخلخل سنجی جیوه مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج حاصل نشان می دهند که با افزایش مصرف میکروسیلیس (به عنوان جایگزین سیمان) مقاومت فشاری نمونه ها، نسبت به نمونه های کنترل افزایش یافته و مقدار افزایش مقاومت های فشاری برای مصرف میکروسیلیس به میزان ۱۰ درصد ۲۲ درصد نسبت به نمونه های کنترل بوده است. همچنین نتایج نشانگر این بودند که با افزایش اندازه پربسامدترین قطر حفرات مقاومت فشاری کاهش می یابد. همچنین همبستگی خوبی بین مقاومت فشاری و اندازه پربسامدترین قطر حفرات مشاهده گردید و همچنین یک رابطه خطی بین این دو پارامتر ارائه گردید.

کلمات کلیدی: بتن سبک خودتراکم، تخلخل، مقاومت فشاری، تخلخل سنجی به روش جیوه، میکروسیلیس

۱. مقدمه

بتن به عنوان مصالح برگزیده در صنعت ساختمان پرمصرف ترین ماده مصرفی بشر شناخته می‌شود و با توجه به روند رو به رشد ساخت و ساز در کشور، صنعت بتن از صنایع مهم کشور به حساب می‌آید.

رویکرد به بتن‌های ویژه از دهه هفتاد میلادی رو به افزایش بوده و حوزه استفاده بتن‌های پرمقاومت و توانمند خصوصاً در کشورهای پیشرفته با توجه به نیازهای صنعت ساختمان رو به گسترش است. بتن سبکدانه نوآوری جدیدی در فناوری بتن محسوب نمی‌شود و این مصالح از زمان‌های قدیم شناخته شده است. شواهدی از ساخت این نوع بتن از هزاره سوم قبل از میلاد وجود دارد که در آنها مواد آتشفشانی مثل پومیس و اسکریا به کار رفته است.

با توجه به وزن نسبتاً بالا در بتن‌های معمولی، در دهه‌های اخیر توجه بسیاری از محققین به استفاده از بتن با سنگدانه‌های سبک در ساخت بناها معطوف شده است. امروزه کاربرد بتن سبک در اکثر مناطق دنیا گسترش پیدا کرده است. وزن مخصوص کمتر و خاصیت عایق بندی در مقابل صوت و حرارت از ویژگی‌هایی هستند که بتن سبکدانه را به عنوان یک ماده مناسب در صنعت ساختمان ممتاز می‌سازد. این خصوصیات، کاهش وزن مرده ساختمان و در نتیجه کاهش هزینه را به دنبال دارد. در محاسبات سازه‌های بتن مسلح اثر وزن بتن عامل محدود کننده‌های برای طراح به حساب می‌آید، وزن بالای بتن به عنوان بار مرده اثر مستقیم در افزایش نیروهای ثقلی و جانبی (نیروی زلزله) وارد بر سازه دارد، بنابراین با کاهش جرم سازه و افزایش شکل پذیری، قابلیت لرزه‌ای سازه بهبود می‌یابد. بتن سبکدانه سازه‌ای باید دارای مقاومت کافی باشد تا بتوان آن را در اعضای باربر سازه‌ای استفاده نمود [۱].

بر مبنای استاندارد ASTM C330 بتن سبک بتنی است که مقاومت فشاری حداقل 17 Mpa را دارا بوده و چگالی آن از 1840 kg/m^3 تجاوز نکنند [۲].

بتن خودتراکم نیز نوع جدیدی از بتن‌های با عملکرد بالا است که می‌تواند بدون جدایش و انسداد، تحت وزن خود و بدون نیاز به لرزاندن خارجی به محل مورد نظر جریان یابد و قالب را پر کند. پایداری بتن تازه به وسیله مقاومت در برابر آب انداختگی، ته نشینی و جدایش می‌شود و به چسبندگی و گرانروی مخلوط وابسته است [۳].

تفاوت قابل توجه چگالی سبکدانه‌ها و ملات در بتن‌های سبکدانه خطر جدایش و روزدگی سبکدانه‌ها و در نتیجه ایجاد یک لایه ی ضعیف در سطح بتن را افزایش می‌دهد [۴]. بتن خودتراکم به دلیل مقاومت در برابر جدایش ایده مناسبی جهت برطرف کردن این نقیضه می‌باشد و همین ایده دلیل استفاده از این دو نوع بتن در کنار هم می‌باشد [۵]. بتن خودتراکم نوع جدیدی از بتن‌های با عملکرد بالا است که می‌تواند بدون جدایش و انسداد، تحت وزن خود و بدون نیاز به لرزاندن خارجی به محل مورد نظر جریان یابد و قالب را پر کند. پایداری بتن تازه به وسیله مقاومت در برابر آب انداختگی، ته نشینی و جدایش می‌شود و به چسبندگی و گرانروی مخلوط وابسته است [۳]. بتن سبک خودتراکم اولین بار توسط پروفیسور مولر و همکاران در دانشگاه صنعتی کالر آلمان در سال ۲۰۰۳ با عنوان بتن سبک خودتراکم معرفی گردید [۶].

مشخصات مهندسی مواد سیمانی مانند مقاومت [۷]، نفوذ پذیری و قابلیت پخش [۸] به طور تنگاتنگ در ارتباط با تخلخل و یا ساختار منافذ و تخلخل داخل جسم می‌باشد. اندازه گیری تخلخل با استفاده از روش‌های مهندسی دشوار است. حتی محاسبه تخلخل نیز به این دلیل که درجه هیدراتاسیون به راحتی تعیین نمی‌شود دشوار است [۹].

منظور از تخلخل نسبت حجم منافذ داخل بتن به حجم کل آن می باشد [۱۰]. تخلخل بتن را می توان ناشی از تخلخل سنگدانه و تخلخل ملات بتن دانست. تخلخل سنگدانه ها را می توان از عوامل مهم در ارتباط با دوام بتن و همچنین تخلخل ملات سخت شده را نیز موثر در مقاومت و دوام بتن دانست [۱۱].

با توجه به اینکه مهمترین عامل کاهش مقاومت در بتن افزایش میزان تخلخل می باشد که این موضوع با توجه به نیاز بتن سبک به تخلخل می تواند توجیه مناسبی به منظور کاهش مقاومت بتن های سبک باشد لذا در این پژوهش رابطه بین این دو پارامتر بررسی گردیده است.

آزمایش تخلخل سنجی جیوه (MIP) یکی از معمول ترین آزمایش ها برای اندازه گیری تخلخل در خمیر و ملات و بتن می باشد. بسیاری از مقاله ها و نشریات، توزیع و اندازه تخلخل مواد سیمانی را بر اساس نتایج آزمایش تخلخل سنجی به روش جیوه انجام دادند [۱۲].

یکی از روش های کاهش تخلخل در بتن اضافه کردن پوزولان های سیمانی می باشد. میکروسیلیس از مواد افزودنی می باشد که ساختار منافذ را اصلاح می کند. میکروسیلیس یک ماده پوزولانی قوی است که جهت بهبود خواص مکانیکی و افزایش دوام بتن به کار می رود [۱۰]. این ماده محصول جانبی صنعت فروسیلیس است که از روی فیلتر هوای خروجی از کوره های قوس الکتریکی در صنایع فروسیلیس بدست می آید.

۲. مروری بر مطالعات گذشته

در سال ۱۹۸۷ Kumar و همکاران، تأثیر مقادیر مختلف میکروسیلیس بر مقدار تخلخل خمیر بتن را تحقیق کردند. بعد از عمل آوری ۲۸ روزه نمونه های بتنی در دمای ۶۰ درجه، دریافتند افزودن ۱۰ درصد میکروسیلیس تأثیر بیشتری در کاهش شعاع منافذ نسبت به افزودن ۴۰ درصد میکروسیلیس دارد [۱۳]. Cook و Hover از جمله نفراتی هستند که تحقیقات زیادی روی تخلخل مواد سیمانی با استفاده از آزمایش تخلخل سنجی جیوه انجام دادند و منحنی های جامعی از نتایج این آزمایش ها در اختیار دارند [۱۴]. در سال ۲۰۰۰ Diamond در مقاله خود چنین بیان کرد که استفاده از دستگاه MIP برای بدست آوردن نتایج معتبری از توزیع تخلخل در مواد سیمانی، رضایت بخش نمی باشد [۱۵]. بعد از Diamond تحقیقات گسترده ای روی این موضوع انجام شد و تمامی نتایج این آزمایش را به دقت تفسیر کردند و بیان کردند که اولین نفوذ جیوه در اثر فشار اولیه در مواد سیمانی، تفسیر مناسبی از ساختار منافذ داخل آن را نمی دهد (منظورشان این بود که باید مراحل افزایش فشار را برای بدست آوردن تخلخل های ریز ادامه داد) [۱۶، ۱۷].

در سال ۲۰۱۴ Hongyan در مقاله خود به بررسی پارامترهای موثر بر اندازه گیری و توزیع تخلخل تحت آزمایش MIP پرداختند و بیان کردند زمانی که وزن مخصوص نمونه در دست نمی باشد، بهتر است وزن مخصوص جیوه را 480 mM/m و زاویه برخورد جیوه به دیواره منافذ هنگام نفوذ، ۱۳۰ درجه گرفته شود. همچنین ایشان اظهار کردند که برش نمونه ها بهترین روش برای تهیه نمونه از داخل بتن یا ملات می باشد [۱۲].

۳. مواد و روش ها

۳-۱. مصالح مورد استفاده

در این پژوهش، سعی شده است که از مصالح محلی جهت ساخت نمونه ها استفاده گردد تا قابلیت کاربردی در پروژه های اجرایی داشته باشد.

در ساخت نمونه های مورد آزمایش این پژوهش از مصالح زیر و ترجیحاً مصالح محلی استفاده شده است:

- سیمان تیپ I از کارخانه سیمان صوفیان تبریز
 - آب از شبکه آبرسانی شهری تبریز
 - سبکدانه های اسکوریا به عنوان سبکدانه از معادن محلی
 - میکرو سیلیس از کارخانه فروآلیاژ- ازنا در استان لرستان
 - فوق روان ساز با پایه پلی کربوکسیلیک از شرکت های داخلی
- که در جدول (۱) مشخصات شیمیایی سیمان و میکروسیلیس مصرفی آورده شده است

جدول (۱) - مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان و میکروسیلیس

| آنالیز شیمیایی (%) | سیمان تیپ I | میکروسیلیس |
|--------------------------------------|-------------|------------|
| Cao | ۶۳/۳۲ | ۰/۳۱ |
| SiO ₂ | ۲۱/۵۷ | ۹۶/۱ |
| Al ₂ O ₃ | ۴/۶۵ | ۰/۷۵ |
| Fe ₂ O ₃ | ۳/۶۳ | ۰/۱۵ |
| MgO | ۲/۴۰ | ۰/۴۵ |
| SO ₃ | ۲/۱۵ | ۰/۲۲ |
| K ₂ O | ۰/۸۱ | ۰/۶۵ |
| Na ₂ O | ۰/۳۲ | ۱/۲۵ |
| وزن مخصوص | ۳/۱۵ | ۲/۲ |
| سطح مخصوص سیمان (cm ² /g) | ۳۲۳۴ | |
| زمان گیرش اولیه (min) | ۱۱۵ | |
| زمان گیرش نهایی (min) | ۱۷۴ | |

۲-۳. مراحل انجام پژوهش

مراحل انجام این پژوهش بر روی دو طرح اختلاط متفاوت از بتن خودتراکم سبک خواهد بود. در هر کدام از طرح اختلاط ها یک سری نمونه های بتن خود تراکم حاوی میکروسیلیس با درصدهای مختلف (۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰٪) وزن سیمان و یک سری دیگر نمونه های بتن خود تراکم بدون میکروسیلیس به عنوان نمونه های کنترل خواهد بود. پارامترهای متغیر در آزمایش ها

نسبت آب به سیمان (w/c) و مقدار میکروسیلیس مصرفی خواهد بود. در نهایت آزمایش مقاومت فشاری و تخلخل سنجی جیوه (MIP) بر روی نمونه ها انجام شده است.

۳-۳. طرح اختلاط و نحوه آماده سازی نمونه ها

در این پژوهش به استناد روش ACI-211 طرح اختلاط مناسب آرایه و با سعی و خطای متوالی و زیاد، و با تغییرات مقادیر مصالح کارآیی مورد نظر و قابل قبول بتن خودتراکم سبک به عنوان طرح اختلاط شاهد این پژوهش انتخاب گردید. در گام های بعدی با ثابت نگه داشتن تمامی پارامترهای طرح اختلاط، میکروسیلیس با درصدهای مختلف ذکر شده در قسمت قبل به عنوان جایگزین سیمان استفاده گردید و تنها با تغییر مقدار فوق روان کننده مصرفی، کارایی مورد نظر و قابل قبول دستورالعمل EFNARC 2005 نمونه ها تامین گردید. قابل ذکر است که طرح اختلاط تمامی حالت ها در جدول (۲) آورده شده است. جهت جلوگیری از افت سریع اسلامپ، سنگدانه های سبک از قبل به مدت ۳۰ دقیقه در آب اشباع و بعد از بیرون آوردن از آب در یک ظرف مشبک نظیر سرنده ریخته شدند تا آب اضافی از سطح سنگدانه ها جدا شود. سپس سنگدانه های ریز به مصالح سبک پیش خیس شده اضافه شده و به مدت ۵ دقیقه کاملاً مخلوط شدند. آنگاه سیمان و میکروسیلیس را به آنها افزوده و مجدداً تمام اجزای تشکیل دهنده بتن با هم مخلوط شدند. در انتها آب لازم و فوق روان که به طور یکنواختی باهم مخلوط شده بودند به مصالح اضافه گردیده و به مدت ۵ دقیقه کل مصالح به هم زده شدند تا بتن همگن ایجاد شود. سپس مخلوط های بتن برای آزمایش های مقاومت فشاری در قالب های فلزی ریخته شد. برای آزمایش های تخلخل سنجی و با توجه به اینکه هدف بررسی تخلخل ملات بتن می باشد لذا برای اینکه تأثیر تخلخل سنگدانه بر روی ملات حفظ شود، مخلوط را از الک شماره ۴ رد کرده و سپس ملات بدست آمده در قالب های فلزی کوچک ریخته شد. لازم به ذکر است که برای اطمینان از نتایج آزمایش ها و نتیجه گیری صحیح در هر یک از حالت های مختلف سه نمونه ساخته شده است. بعد از ۲۴ ساعت، قالب ها باز گردیده و نمونه ها تا زمان آزمایش در آب $20 \pm 2^\circ C$ نگهداری و عمل آوری شدند. نمونه های آزمایش تخلخل سنجی بعد از عمل آوری به مدت ۵۶ روز، توسط دستگاه برش از مرکز نمونه ها به اندازه $25 \times 9 \times 9$ میلی متر برش داده شد. سپس نمونه ها برای انجام آزمایش و نفوذ جیوه به داخل منافذ با استفاده از روش های و تجهیزات در دسترس باید کاملاً خشک می شدند که در این پژوهش و با توجه به پیشنهاد آقای Aligaziki و همکاران از روش خشک کردن با حلال^۱ استفاده شد [۱۸].

جدول (۲) - جدول طرح اختلاط

| وزن مخصوص | VMA | روان کننده | میکروسیلیس | شن سبکدانه | ماسه سبکدانه | مواد پودری | آب | سیمان | طرح |
|-----------|-----|------------|------------|------------|--------------|------------|-----|--------|---------|
| ۱۸۳۶ | ۱ | ۰/۸ | ۰ | ۳۰۰ | ۶۲۶ | ۳۰۰ | ۳۱۵ | ۴۰۰ | M1-S0 |
| ۱۸۳۲ | ۱ | ۰/۸ | ۱۰ | ۳۰۰ | ۶۲۲ | ۳۰۰ | ۳۱۵ | ۳۹۰ | M1-S2.5 |
| ۱۸۱۸ | ۱ | ۰/۸۵ | ۲۰ | ۳۰۰ | ۶۱۹ | ۳۰۰ | ۳۱۵ | ۳۸۰ | M1-S5 |
| ۱۸۱۵ | ۱ | ۰/۹ | ۳۰ | ۳۰۰ | ۶۱۶ | ۳۰۰ | ۳۱۵ | ۳۷۰ | M1-S7.5 |
| ۱۸۵۷ | ۱ | ۰/۹ | ۴۰ | ۳۰۰ | ۶۱۳ | ۳۰۰ | ۳۱۵ | ۳۶۰ | M1-S10 |
| ۱۸۷۲ | ۱ | ۰/۷۵ | ۰ | ۳۰۰ | ۶۲۹ | ۲۵۰ | ۳۱۵ | ۴۵۰ | M2-S0 |
| ۱۸۱۵ | ۱ | ۰/۷۵ | ۱۱/۲۵ | ۳۰۰ | ۶۲۵/۵ | ۲۵۰ | ۳۱۵ | ۴۳۸/۷۵ | M2-S2.5 |
| ۱۸۲۸ | ۱ | ۰/۷۵ | ۲۲/۵ | ۳۰۰ | ۶۲۱ | ۲۵۰ | ۳۱۵ | ۴۲۷/۵ | M2-5 |
| ۱۸۲۰ | ۱ | ۰/۸ | ۳۳/۷۵ | ۳۰۰ | ۶۱۷/۸ | ۲۵۰ | ۳۱۵ | ۴۱۶/۷۵ | M2-7.5 |
| ۱۷۷۹ | ۱ | ۰/۸۵ | ۴۵ | ۳۰۰ | ۶۱۴/۵ | ۲۵۰ | ۳۱۵ | ۴۰۵ | M2-10 |

۴. آزمایش ها و نتایج پژوهش

۴-۱- بتن تازه

برای مشخص کردن ویژگی های بتن تازه خودتراکم آزمایش های مختلفی ارایه شده است. در این پژوهش آزمایش جریان اسلامپ به دو صورت میانگین حداکثر اقطار پخش بتن و تعیین زمان رسیدن پخش بتن به قطر ۵۰۰ میلیمتر اندازه گیری شد. آزمایش قیف V برای تعیین قابلیت پرکنندگی بتن خود تراکم، آزمایش حلقه J برای تعیین قابلیت عبور و آزمایش اندازه گیری زمان تخلیه قیف V بعد از ۵ دقیقه سکون بتن برای تعیین مقاومت در مقابل جداسدگی سنگدانه های بتن خودتراکم تازه استفاده شده است. در شکل (۳) آزمایش های جریان اسلامپ، قیف V و حلقه J نشان داده شده است و همچنین نتایج آزمایش های بتن تازه در جدول شماره (۳) آورده شده است.



ج- آزمایش حلقه J



ب- آزمایش قیف V



الف - آزمایش جریان اسلامپ

شکل ۱. آزمایش های نمونه های بتن تازه

جدول (۳) - نتایج آزمایش های کارایی بتن تازه

| طرح | Slump flow (mm) | T ₅₀₀ (sec) | J-ring (mm) | V-Funnel (sec) | L-Box |
|---------|-----------------|------------------------|-------------|----------------|-------|
| M1-S0 | ۶۹۰ | ۳ | ۶۸۰ | ۵ | ۰/۸۱ |
| M1-S2.5 | ۷۲۰ | ۳ | ۷۱۰ | ۵ | ۰/۸۱ |
| M1-S5 | ۷۴۵ | ۲ | ۷۳۰ | ۴ | ۰/۸۵ |
| M1-S7.5 | ۷۶۰ | ۲ | ۷۴۰ | ۵ | ۰/۹ |
| M1-S10 | ۷۸۰ | ۲ | ۷۶۰ | ۴ | ۰/۹۸ |
| M2-S0 | ۷۱۰ | ۳ | ۶۹۰ | ۵ | ۰/۸۱ |
| M2-S2.5 | ۷۲۰ | ۳ | ۷۱۰ | ۵ | ۰/۸۱ |
| M2-S5 | ۷۴۰ | ۲ | ۷۳۰ | ۴ | ۰/۸۳ |
| M2-S7.5 | ۷۶۰ | ۲ | ۷۵۰ | ۴ | ۰/۸۵ |
| M2-S10 | ۷۹۰ | ۲ | ۷۸۰ | ۴ | ۰/۹ |

همانطوری که در جدول (۳) ملاحظه می شود با ساخت نمونه های مختلف تلاش شده است که مقادیر آزمایش جریان اسلامپ تمامی نمونه در محدوده ۷۰۰ تا ۸۰۰ میلیمتر قرار گیرد که با توجه به دستورالعمل EFNARC 2005 برای بسیاری

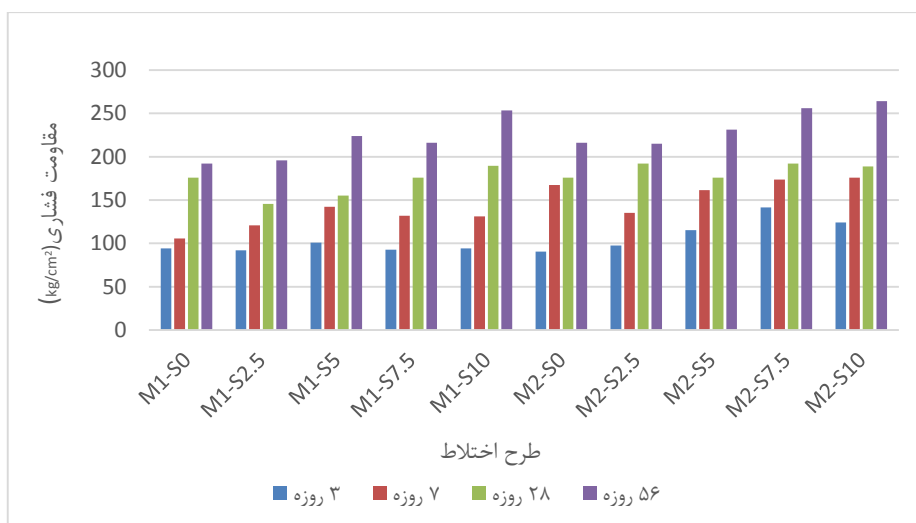
از کاربردهای متداول مناسب است. در ضمن نتایج آزمایش‌های زمان قیف V و زمان T500 برای تمامی نمونه‌ها به ترتیب کمتر از ۸ و بیشتر از ۲ ثانیه بوده که با توجه به دستورالعمل EFNARC 2005 از نظر پایداری عملکرد خوبی داشته‌اند [۱۹]. در آزمایش حلقه J، در تمامی نمونه‌های بتن تازه، اختلاف ارتفاع بتن در داخل حلقه نسبت به ارتفاع بتن در خارج آن کمتر از ۱۰ میلیمتر بوده که نشانگر توانایی عبور مناسبی است.

۴-۱- بتن سخت شده

۴-۱-۱. مقاومت فشاری

در این پژوهش یک سری نمونه‌های مکعبی شکل 100×100 میلیمتری از بتن خود تراکم بدون استفاده از میکروسیلیس به عنوان نمونه‌های کنترل یا شاهد و یک سری دیگر نمونه‌هایی با استفاده از میکروسیلیس با درصد‌های مختلف ۲/۵، ۵، ۷/۵، ۱۰ به عنوان جایگزین سیمان، تهیه گردیده و پس از ۳، ۷، ۲۸ و ۵۶ روز عمل آوری در دمای 20 ± 2 درجه سانتیگراد و در آب معمولی، مطابق آیین‌نامه‌های ASTM C39 و ASTM C496 تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری قرار گرفتند. لازم به ذکر است که برای اطمینان از نتایج آزمایش‌ها و نتیجه‌گیری صحیح در هر یک از حالت‌های مختلف سه نمونه ساخته شده است.

نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها در اشکال (۲) ارائه شده است



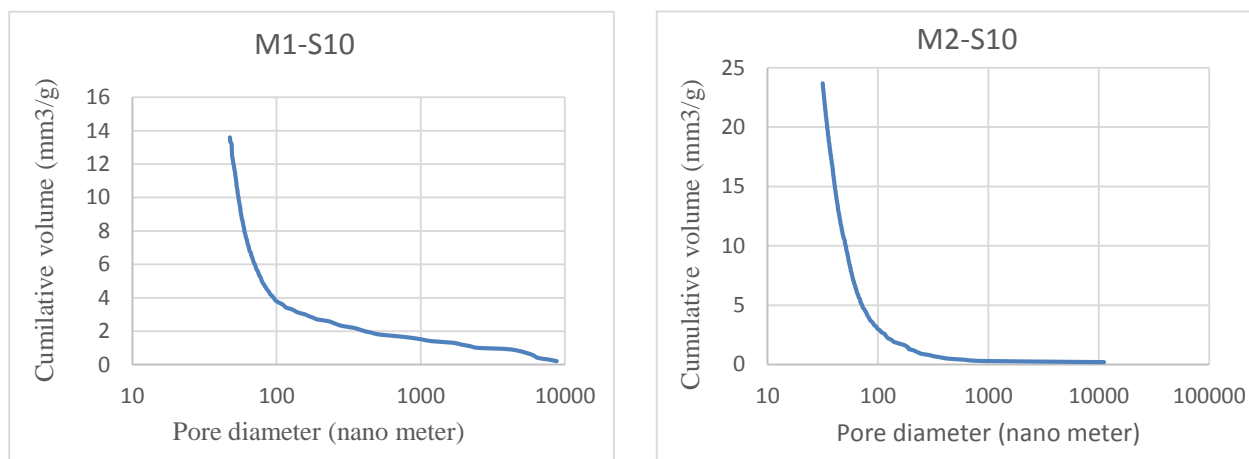
شکل ۲. مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌ها با درصد‌های مختلف میکروسیلیس

همان‌طور که از اشکال (۲) مشاهده می‌شود، با افزایش درصد مصرف میکروسیلیس به عنوان جایگزین سیمان، مقاومت فشاری نمونه‌های بتن خودتراکم سبک افزایش می‌یابد و بیشترین مقدار افزایش مقاومت فشاری، مربوط به نمونه‌هایی است که در آن ۱۰ درصد میکروسیلیس به عنوان جایگزین سیمان استفاده شده است که مقدار این افزایش ۲۲ درصد نسبت به نمونه‌های کنترل می‌باشد. علت این پدیده را اینگونه می‌توان بیان کرد که افزودن میکروسیلیس، ضخامت فاز انتقالی در ملات را در

مقایسه با ملات حاوی تنها سیمان پرتلند و زاویه چرخش کریستال های CH در فاز انتقالی را کاهش می دهد، و از این رو ویژگی های مکانیکی و دوام بتن حاوی میکروسیلیس را بهبود می بخشد [۲۰]. همچنین میکروسیلیس با توجه به ذرات بسیار ریز، نقش پرکننده را نیز دارا بوده و خواص مکانیکی بتن خودتراکم حاوی میکروسیلیس را بهبود می دهد [۲۱].

۴-۱-۱. تخلخل سنجی به روش جیوه

در این پژوهش جهت انجام این آزمایش روی نمونه ها از دستگاه های Porosimeter PASCAL 140 ©Thermo و Finnigan Italia و Porosimeter PASCAL 440 © Thermo Finnigan Italia موجود در آزمایشگاه گروه پلیمر دانشگاه تربیت مدرس تهران استفاده شده است. در شکل (۳) مقدار جیوه نفوذ کرده در مقابل قطر حفره ها برای نمونه هایی با ۱۰ درصد میکروسیلیس به صورت نمونه آورده شده است. نتایج پربسامدترین اندازه حفرات نیز در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۳. توزیع تخلخل حفرات برای طرح های اختلاط حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس

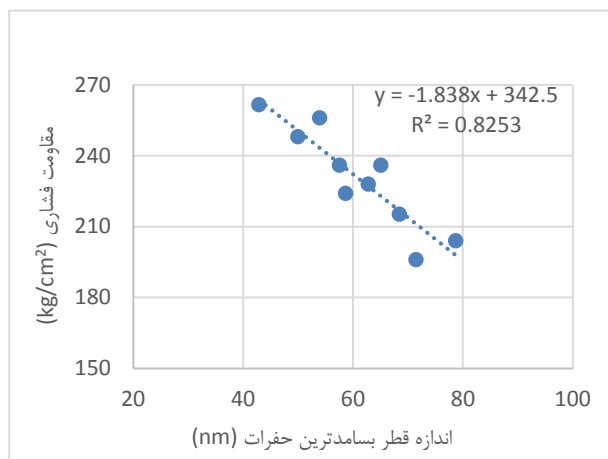
همانطور که در شکل (۴) دیده می شود با افزایش مقدار میکروسیلیس مصرفی اندازه پربسامدترین یا بیشترین قطر حفرات با همان اندازه کمتر می شود، و چون مقاومت بتن سبک بیشتر از تخلخل تاثیر می پذیرد لذا با کاهش قطر حفرات در ۱۰ درصد میکروسیلیس مصرفی شاهد افزایش مقاومت فشاری هستیم.

همبستگی بین مقاومت فشاری و اندازه پربسامدترین قطر حفرات در شکل (۵) و معادله (۱) نشان داده شده است که موید رابطه خطی بین این دو خاصیت است و مقدار این همبستگی ۰/۸۲۵۳ می باشد که مقدار قابل قبولی می باشد.

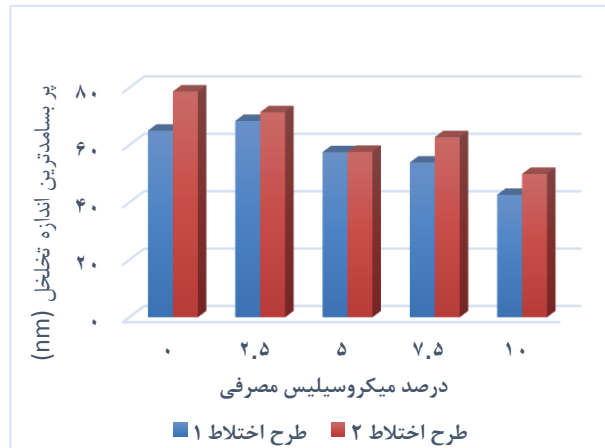
$$f'_c = -2.2975 d + 428.23 \quad (\text{معادله ۱})$$

که در آن

d اندازه پربسامدترین قطر حفرات بر حسب نانو متر و f'_c مقاومت فشاری بر حسب kg/m^2 می باشد.



شکل ۵. همبستگی مقاومت فشاری و پربسامدترین اندازه حفرات



شکل ۴. پربسامدترین اندازه حفرات در مقادیر مختلف میکروسیلیس مصرفی

۷- نتیجه گیری

با توجه به نتایج آزمایش ها می توان نتیجه گیری های زیر را ارائه داد:

۱- با افزایش میزان مصرف میکروسیلیس به عنوان جایگزین سیمان، به علت واکنش میکروسیلیس با هیدروکسید کلسیم طی هیدراتاسیون سیمان، هیدرات سیلیکات کلسیم تشکیل می شود و همچنین ذرات بسیار ریز میکروسیلیس به عنوان فیلرنیز عمل کرده و به این ترتیب مقاومت فشاری نمونه ها نسبت به نمونه های کنترل افزایش پیدا می کند و بیشترین مقدار افزایش مقاومت فشاری برابر ۲۲ درصد نسبت به نمونه های کنترل، مربوط به نمونه هایی است که دارای ۱۰ درصد میکروسیلیس به عنوان جایگزین سیمان هستند.

۲- با افزایش میزان مصرف میکروسیلیس در نمونه ها به عنوان جایگزین سیمان، با توجه به عملکرد فیزیکی و شیمیایی میکروسیلیس، خواص مکانیکی بتن خودتراکم بهتر شده و مقاومت فشاری نمونه ها نسبت به نمونه های کنترل افزایش پیدا می کند، و با مصرف ۱۰، ۷/۵، ۵ و ۲/۵ درصد میکروسیلیس به عنوان جایگزین سیمان، مقاومت فشاری نمونه ها نسبت به نمونه های شاهد به ترتیب ۲۲، ۱۵، ۱۰ و در نهایت برای ۲/۵ درصد خیلی ناچیز افزایش می یابد.

۳- با افزایش میکروسیلیس مصرفی به عنوان جایگزین سیمان، اندازه قطر پربسامدترین حفرات کاهش می یابد.

۴-۳- همبستگی چشمگیری بین مقاومت فشاری و قطر حفرات در بتن خودتراکم سبک وجود دارد، به طوری که یک رابطه خطی بین خواص مکانیکی نمونه ها قابل ارائه است.

۸- مراجع و منابع

- ۱- انتظاری، ع.، بررسی رفتار سازه ای بتن سبکدانه، دانشکده عمران، ۱۳۹۱، دانشگاه تبریز: تبریز.
2. ASTM C330, in *Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete*. 2005, Annual Book of ASTM Standard: Philadelphia, USA.
3. Khayat, K., A. Ghezal, and M. Hadriche, *Utility of statistical models in proportioning self-consolidating concrete*. Materials and Structures, 2000. **33**(5): p. 338-344.
4. Madandoust, R., M.M. Ranjbar, and S.Y. Mousavi, *An investigation on the fresh properties of self-compacted lightweight concrete containing expanded polystyrene*. Construction and Building Materials, 2011. **25**(9): p. 3721-3731.
5. Khayat, K., C. Hu, and H. Monty. *Stability of self-consolidating concrete, advantages, and potential applications*. in *Self-Compacting Concrete: Proceedings of the First International RILEM Symposium*. 1999.
6. Yasar, E., et al., *Strength properties of lightweight concrete made with basaltic pumice and fly ash*. Materials Letters, 2003. **57**(15): p. 2267-2270.
7. Kumar, R. and B. Bhattacharjee, *Porosity, pore size distribution and in situ strength of concrete*. Cement and concrete research, 2003. **33**(1): p. 155-164.
8. Zhang, M.-h. and H. Li, *Pore structure and chloride permeability of concrete containing nano-particles for pavement*. Construction and Building Materials, 2011. **25**(2): p. 608-616.
- ۹- نویل، آ.ج.ج. بروکس، تکنولوژی بتن، ویرایش دوم. انتشارات نگارنده دانش.
10. Claisse, P., J. Cabrera, and D. Hunt, *Measurement of porosity as a predictor of the durability performance of concrete with and without condensed silica fume*. Advances in cement research, 2001. **13**(4): p. 165-174.
11. Kayyali, O., *Porosity of concrete in relation to the nature of the paste—aggregate interface*. Materials and Structures, 1987. **20**(1): p. 19-26.
12. Ma, H., *Mercury intrusion porosimetry in concrete technology: tips in measurement, pore structure parameter acquisition and application*. Journal of porous materials, 2014. **21**(2): p. 207-215.
13. Kumar, A., S. Komarneni, and D.M. Roy, *Diffusion of Cs+ and Cl- through sealing materials*. Cement and Concrete Research, 1987. **17**(1): p. 153-160.
14. Cook, R.A. and K.C. Hover, *Mercury porosimetry of hardened cement pastes*. Cement and Concrete research, 1999. **29**(6): p. 933-943.
15. Diamond, S., *Mercury porosimetry: an inappropriate method for the measurement of pore size distributions in cement-based materials*. Cement and concrete research, 2000. **30**(10): p. 1517-1525.
16. Zeng, Q., et al., *Pore structure characterization of cement pastes blended with high-volume fly-ash*. Cement and Concrete Research, 2012. **42**(1): p. 194-204.
17. Zhou, J., G. Ye, and K. Van Breugel, *Characterization of pore structure in cement-based materials using pressurization–depressurization cycling mercury intrusion porosimetry (PDC-MIP)*. Cement and Concrete Research, 2010. **40**(7): p. 1120-1128.
18. Aligizaki, K.K., *Pore structure of cement-based materials: testing, interpretation and requirements*. 2005: CRC Press.
19. Bibm, C. and E. Ermco, *EFNARC. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use*, The Self-Compacting Concrete European Project Group, 2005.
20. Claisse, P., J. Cabrera, and D. Hunt, *Measurement of porosity as a predictor of the performance of concrete with and without Silica Fume*. Advances in Cement Research, 2001. **13**(4): p. 165a174.
21. Behnood, A. and H. Ziari, *Effects of silica fume addition and water to cement ratio on the properties of high-strength concrete after exposure to high temperatures*. Cement and Concrete Composites, 2008. **30**(2): p. 106-112.