

اثر ریزساختار فیزیکی منافذ بر مقاومت فشاری و جذب آب در بتن‌های خودتراکم حاوی میکروسیلیس و متاکائولین

پرویز قدوسی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

لیلا عادل زاده سعدآبادی *

دانشکده مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

چکیده

شناخت ریزساختار فیزیکی از جمله توزیع اندازه منافذ و نفوذپذیری بتن در مقابل آب به دلیل اثر آن بر دوام بلند مدت، حائز اهمیت است. هدف تحقیق حاضر بررسی اثر ریزساختار فیزیکی منافذ در بتن‌های خودتراکم حاوی متاکائولین و میکروسیلیس بر درصد جذب آب و جذب مویینه آب و مقاومت فشاری است. بتن‌های خودتراکم با مقدار مواد سیمانی 450 kg/m^3 و نسبت آب به سیمان $0/35$ ، $0/45$ و $0/55$ طراحی شدند. ترکیب‌های دوتایی و سه تایی سیمان، میکروسیلیس و متاکائولین برای این تحقیق ساخته شد. به منظور بررسی تفاوت اثر متاکائولین و میکروسیلیس بر ریزساختار فیزیکی، مخلوط‌های حاوی متاکائولین و جایگزینی میکروسیلیس و متاکائولین با نسبت آب به سیمان $0/45$ ساخته شد. مشخصات ریزساختار فیزیکی شامل اندازه میانه منافذ، حجم منافذ بزرگ و کوچک مویینه در بتن‌های خودتراکم پوزولانی توسط آزمایش تخلخل سنجی جیوه‌ای اندازه گیری شد. آزمایش‌های مقاومت فشاری، جذب حجمی و مویینه آب بر روی نمونه‌های بتن خودتراکم انجام شد. نتایج نشان داد که عامل موثر مهم بر مقاومت فشاری و نفوذپذیری در برابر آب، اندازه میانه منافذ و حجم منافذ بزرگ مویینه است. بتن حاوی 20 درصد متاکائولین و 8 درصد میکروسیلیس علیرغم داشتن بیشترین مقاومت فشاری 77 مگاپاسکال، کمترین تخلخل را نداشت. کمترین تخلخل با مقدار $8/6$ درصد، متعلق به بتن خودتراکم حاوی میکروسیلیس و نسبت آب به سیمان $0/35$ است.

واژه‌های کلیدی: ریزساختار منافذ، بتن خودتراکم، متاکائولین، میکروسیلیس، جذب آب.

* نویسنده مسئول: L_adelzade@Pci.iaun.ac.ir

۱- مقدمه

چن^۲ و وو^۳ [۴] نشان دادند که افزایش نسبت آب به سیمان در ملات‌های سیمانی باعث افزایش تخلخل کل می‌شود. تخلخل کل برای ملات سیمانی دارای نسبت آب به سیمان ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶ به ترتیب برابر با ۶/۷ درصد، ۱۰ درصد و ۱۲/۸ درصد است. این نتایج در تحقیقات دیگر نیز بیان شده است [۵، ۶]. توزیع اندازه منافذ ملات سیمان طبق مطالعه چن و وو [۴] و ژاوو^۴ و همکاران [۵] با نسبت آب به سیمان تغییر می‌کند. ملات‌های دارای نسبت آب به سیمان بیشتر، حجم منافذ بزرگتر داشتند و بیشینه حجم منافذ در منفذ با اندازه بزرگتری مشاهده شده است. پون و همکاران [۸] توزیع اندازه منافذ بتن‌های حاوی درصد‌های مختلف متاکائولین و ۱۰ درصد میکروسیلیس در جانشینی بخشی از سیمان را بررسی کردند. نتایج نشان دادند که خمیر حاوی متاکائولین دارای تخلخل کمتر و اندازه منافذ متوسط کوچکتر در مقایسه با خمیر مرجع و خمیر حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس است. البته میکروسیلیس نیز باعث ریز شدن اندازه منافذ شده است. ولی اثر گذاری متاکائولین در همه سطوح جایگزینی در ریز شدن منافذ بیشتر بوده است. تحقیقات متعددی بر تغییرات تخلخل کل و توزیع اندازه منافذ در ملات‌ها و بتن‌های حاوی میکروسیلیس و متاکائولین انجام شده است [۸-۱۵]. در این ارتباط نتایج متناقض و متضادی در تغییرات تخلخل کل برای بتن‌ها و ملات‌های حاوی میکروسیلیس و متاکائولین گزارش شده است. در جدول ۱ به مقایسه این نتایج پرداخته شده است. تناقض در نتایج تخلخل کل در خمیرهای حاوی میکروسیلیس و متاکائولین می‌تواند به دلیل تفاوت در نسبت آب به مواد سیمانی و مقدار مواد افزودنی معدنی باشد. واکنش پوزولانی در مقادیر جانشینی ۲۰-۳۰ درصد متاکائولین به جای بخشی از سیمان، موثر است و باعث کاهش تخلخل کل می‌شود [۱۵]. همچنین در نسبت آب به مواد سیمانی کم، به دلیل همگنی بیشتر، افزودن مواد معدنی باعث کاهش تخلخل می‌شود [۱۶].

تخلخل کل بتن یکی از پارامترهای کلیدی در تأثیر بر مقاومت فشاری شناخته شده است [۲۱، ۲۲]. بتن‌های دارای تخلخل کمتر دارای مقاومت فشاری بیشتری هستند [۲۳، ۲۴]. در تحقیقات گذشته، عمدتاً روابط لگاریتمی، خطی، نمایی بین مقاومت فشاری

امروزه از پوزولان‌ها در صنعت ساخت به‌طور گسترده استفاده می‌شود. این مواد در بهبود خواص و دوام بتن مؤثر هستند. در دوام بتن، در همه آسیب‌دیدگی‌های بتن، پدیده انتقال دخالت دارد. این پدیده شامل وارد شدن عوامل مخرب مانند گازها، آب و عناصر شیمیایی به بتن است. سپس راه یافتن عوامل مخرب به بتن از طریق منافذ مرتبط به هم انجام می‌گیرد. بنابراین ریزساختار منافذ نقش مهمی در سرعت و توسعه انتقال دارد [۱].

به‌طور کلی انتقال محلول‌ها و یون‌های مهاجم در یک بتن تحت یک یا ترکیبی از مکانیسم‌های جذب یعنی انتقال محلول ناشی از مکش منافذ مویینه، نفوذ به معنی انتقال محلول تحت گرادیان فشار و انتشار از طریق انتقال یون‌ها تحت گرادیان غلظت انجام می‌شود [۱]. عوامل مؤثر بر آسیب‌دیدگی‌های بتن، ریزساختار فیزیکی شامل اندازه منافذ، توزیع اندازه منافذ و ارتباط منافذ و مشخصات شیمیایی است [۱].

ریزساختار فیزیکی یا به عبارت دیگر، ریزساختار شامل منافذ موجود در بتن است. خمیر سیمان هیدراته شده شامل سه سیستم مهم سیستم جامد، منافذ و محلول منافذ است. سیستم‌های جامد و محلول منافذ مربوط به ساختار شیمیایی است. سیستم منافذ به ریزساختار فیزیکی مربوط است [۱]. ریزساختار منافذ در بتن‌ها در شناخت و مدل کردن پدیده‌های انتقال که بر عملکرد دوام بتن مؤثر هستند، حائز اهمیت است. اندازه منافذ و منافذ مرتبط و خم منافذ از مشخصات فیزیکی مهم هستند که خصوصیات نفوذپذیری بتن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند [۲]. بتن دارای منافذ گوناگون در اندازه‌های مختلف است. مقدار حجمی که منافذ با اندازه‌های مختلف، در حدود یک گرم از خمیر سیمان را اشغال می‌کند به توزیع اندازه منافذ موسوم است [۱]. طبق نظر میندس^۱ و همکاران [۳]، تقسیم‌بندی سنتی منافذ بتن عبارت است از، منافذ ژلی (منافذ کوچکتر از ۱۰ نانومتر که مربوط به محصولات هیدراسیون است) و منافذ مویینه که شامل دو نوع است، منافذ بزرگ مویینه با اندازه ۵۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر و منافذ کوچک مویینه با اندازه ۱۰ تا ۵۰ نانومتر هستند. در تحقیقات گذشته به اثر عوامل مختلف از جمله نسبت‌های اختلاط بر تخلخل پرداخته شده است [۴-۷].

3. Wu
4. Zhao

1. Mindess
2. Chen and Wu

مختلف باعث توزیع اندازه منافذ متفاوت می‌شود که بر رابطه مقاومت فشاری و تخلخل اثر می‌گذارد. کومار^۳ و باتاچارچی^۴ [۲۵] پیشنهاد کردند که مقاومت فشاری علاوه بر تخلخل کل تابعی از اندازه میانه منافذ $(FC = KC \frac{1-P}{\sqrt{r_m}})$ است. در این رابطه K : ثابت، C : مقدار سیمان، P : تخلخل کل، d_{50} یا r_m : اندازه میانه منافذ و FC : مقاومت فشاری است. اندازه میانه منافذ، اندازه منفذی متناظر با ۵۰ درصد حجم تجمعی تخلخل است و می‌تواند نشان-دهنده توزیع اندازه منافذ باشد.

برازش نتایج مقاومت فشاری و مدل پیشنهاد داده شده توسط کومار و باتاچارچی [۲۵] و داس^۵ و کندراپونداهان^۱ [۲۶] انجام شد و ضریب همبستگی برازش ۰/۹۶ و ثابت K برابر با ۱۷۹۶/۱ به دست آمد.

و تخلخل کل در بتن‌ها و ملات‌ها ارائه شده است. مدل‌های مختلفی برای ارتباط بین تخلخل و مقاومت فشاری پیشنهاد شده است که در جدول ۲ ارائه شده است [۲۴، ۲۵، ۲۶].

بتن‌های خودتراکم در مقایسه با بتن‌های معمولی، تخلخل کمتر و ریزتری دارند ولی به دلیل داشتن پرکننده‌ها، ارتباط بیشتری بین منافذ وجود دارد و نفوذ آب در بتن خودتراکم در مقایسه با بتن‌های معمولی بیشتر است [۲۲، ۲۳]. تارونگه^۱ و ریا^۲ [۲۴] نشان دادند، ارتباط مقاومت فشاری و تخلخل در بتن‌های خودتراکم، به مدل‌های بالشین، پاورس و هسلمن نزدیک است. ایشان یادآور شدند که تفاوت مدل‌ها در مواد پایه سیمانی به دلیل اختلاف در مصالح است. به عبارت دیگر فرایند هیدراسیون و ریزساختار فیزیکی

جدول ۱- مقایسه نتایج مطالعات مختلف برای تغییرات تخلخل کل در بتن‌های پوزولانی

منبع	ماده افزودنی معدنی	W/b یا W/c	درصد جایگزینی	ملات / بتن / خمیر	اثر بر تخلخل کل
[۱۳]	متاکائولین	W/b=۰/۵۵	-	خمیر	افزایش تخلخل
[۱۴]	متاکائولین	W/b=۰/۵۵	-	خمیر	افزایش تخلخل
[۱۵]	متاکائولین	W/b = ۰/۳۴	۲۰ درصد	خمیر	کاهش تخلخل
[۸]	متاکائولین	W/b=۰/۳۵	۱۰، ۲۰ درصد	خمیر	کاهش تخلخل
[۸]	میکروسیلیس	W/b=۰/۳۵	۵، ۱۰ درصد	خمیر	کاهش تخلخل
		W/b=۰/۳	۷ درصد	بتن	کاهش تخلخل
[۱۶]	میکروسیلیس	W/b=۰/۴۲, ۰/۳۵	۷ درصد	بتن	کاهش تخلخل موینه

جدول ۲- مدل‌های تجربی - ریاضی ارتباط تخلخل و مقاومت فشاری مصالح با پایه سیمان [۱۱]، [۲۰]، [۲۱]

ردیف	فرمول	رابطه	ثابت‌ها	نویسنده
۱	$F = F_0 (1 - b\phi)$	خطی	b	Hasselmann (برای شیشه ابداع شده است)
۲	$F = F_0 (1 - \phi)^n$	توانی	n	Balshin (برای پودرهای فلزی) و Powers (ملات)
۳	$F = F_0 \exp(-c\phi)$	نمایی	c	Ryshkevitch (سرامیک و سنگ)
۴	$F = k \ln(\phi_0/\phi)$	لگاریتمی	k	Schiller (مواد ترد غیر فلزی)

مشخصات ریزساختار بتن‌ها بر خصوصیات انتقال تأثیر می‌گذارد. از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر نفوذپذیری بتن اندازه منافذ و منافذ موینه مرتبط است. اولیور^۷ و ماسات^۸ [۲۷] سه مدل ارتباط

نفوذپذیری و ریزساختار فیزیکی بتن‌ها را مرور کردند. در این تحقیق نشان دادند که تخلخل نمی‌تواند نفوذپذیری سیالات را به خوبی نشان دهد. اما در مدل کارمان-کانزی^۹، نفوذپذیری آب

6. Kondraivendhan

7. Ollivier

8. Massat

9. Carman-Kozeny .

1. Tjaronge

2. Ria

3. Kumar

4. Bhattacharjee

5. Das

شده از بتن‌ها استفاده شد و توزیع اندازه منافذ به دست آمد. همچنین آزمایش‌های مقاومت فشاری، درصد جذب آب، ضریب جذب مویینه آب بر روی بتن‌ها انجام شد. اثر ریزساختار فیزیکی بتن‌ها برای تعیین نحوه اثرگذاری بر نفوذپذیری در مقابل آب با انجام مراحل آزمایشگاهی ارائه شده در این قسمت بررسی شد.

۲-۱- مواد و مصالح مصرفی

در این تحقیق از سیمان پرتلند نوع دو کارخانه سیمان تهران استفاده شده است. پودرسنگ آهک به عنوان پرکننده غیرفعال در مخلوط-های بتن خودتراکم استفاده شد. میکروسیلیس و متاکائولین به عنوان مواد افزودنی معدنی در بتن‌ها به کار برده شد. نتایج تجزیه شیمیایی و مشخصات فیزیکی سیمان، میکروسیلیس و متاکائولین در جدول ۳ نشان داده شده است. سنگ‌دانه‌های درشت مصرفی از نوع شکسته و آهکی و از معادن شهریار با حداکثر اندازه ۱۹/۵ میلیمتر تهیه شده است. همچنین سنگ‌دانه‌های ریز مصرفی با حداکثر اندازه ۴/۷۵ میلیمتر نیز از نوع گردگوشه آهکی و از معادن شهریار تأمین شده است. جرم حجمی انبوهی سنگ‌دانه‌های درشت و ریز در حالت اشباع با سطح خشک، به ترتیب ۲/۶ و ۲/۴۴ گرم بر سانتی متر مکعب است. درصد جذب آب برای سنگدانه-های ریز ۳/۱ درصد و سنگ‌دانه‌های درشت ۱/۸ درصد است. نتایج ترکیب شیمیایی سنگ‌دانه‌ها از طریق آزمایش XRF در جدول ۴ ارائه شده است. دانه بندی سنگدانه‌ها برای ساخت در مقایسه با سه دانه بندی طرح مخلوط بتن ایران در شکل ۱ نشان شده است. فوق‌روان‌کننده با نام فرکوپلاست P10-3R بر پایه پلی‌کربوکسیلات مصرف شد. مشخصات فوق‌روان‌کننده عبارتند از: وزن مخصوص 1100 kg/m^3 ، رنگ قهوه‌ای شفاف، حاوی کوبلیمرهای اصلاح شده پلی‌کربوکسیلیک اسید.

۲-۲- نسبت‌های مخلوط

در این تحقیق به منظور بررسی ریزساختار فیزیکی بتن‌های حاوی میکروسیلیس و متاکائولین، ۸ نسبت مخلوط بتن استفاده شد. همه مخلوط‌های بتن حاوی 450 kg/m^3 مواد سیمانی هستند. سه مخلوط بتن خودتراکم معمولی که بدون هیچ جایگزین پوزولانی

در بتن‌ها از طریق وارد شدن خم و مساحت سطح ویژه منافذ محاسبه می‌شود. همچنین در مدل مویینیگی^۱ با رابطه $k = \phi^2 / (8F)$ که در آن، نفوذپذیری به حجم منافذ مویینه و همچنین عامل شکل منافذ مرتبط شده است. اما پیش‌بینی مدل کارمان-کانزی برای بتن‌ها مناسب نیست، زیرا مقادیر خم منافذ تابعی از نسبت‌های مخلوط است. تحقیقات متعددی بر اثر مواد پوزولانی از جمله میکروسیلیس و متاکائولین بر جذب و نفوذپذیری آب انجام شده است. عمده این مطالعات، کاهش جذب آب به دلیل ریز شدن منافذ بتن‌های پوزولانی را بیان کرده‌اند [۲۷-۳۴].

کام^۲ و نیتالاث^۳ [۳۶] به مطالعه ضریب جذب مویینه آب و ارتباط با عامل شکل منافذ در بتن‌های دارای نسبت آب به سیمان مختلف پرداختند. در نتایج نشان داده شد که با افزایش نسبت آب به سیمان، ضریب جذب مویینه (اولیه و ثانویه) افزایش می‌یابد. همچنین ایشان نشان دادند که ضریب جذب مویینه آب با ضریب همبستگی ۰/۸۴ در بتن‌های معمولی و حاوی میکروسیلیس، تابعی از عامل شکل منافذ^۴ $(\beta\phi)$ است، اما ارتباط بین ضریب جذب ثانویه مویینه آب و منافذ مویینه دارای ضریب همبستگی ۰/۷۵ است. عامل شکل منافذ از نسبت ضریب مهاجرت یون‌های کلرید به ضریب خودنفوذ یون کلرید حاصل شده است.

عمده تحقیقات به مطالعه توزیع اندازه منافذ در بتن‌های حاوی میکروسیلیس و متاکائولین پرداخته‌اند، اما تحقیق در بتن‌های خودتراکم قابل توجه نبوده است، از این رو در این تحقیق نحوه نحوه اثرگذاری ریز ساختار فیزیکی منافذ بر نفوذ پذیری در برابر آب و مقاومت فشاری در بتن‌های خودتراکم مورد تحقیق قرار گرفت.

۲- برنامه آزمایشگاهی

پس از ساخت نمونه‌های بتن خودتراکم حاوی متاکائولین و میکروسیلیس و همچنین بتن‌های خودتراکم مرجع که در این تحقیق به دلیل عدم استفاده از هیچ ماده پوزولانی در آنها، بتن‌های معمولی نامیده شده‌اند؛ برای اختصار در بیان نام بتن‌های خودتراکم از بتن استفاده شده است. آزمایش‌ها در دو بخش ریزساختار فیزیکی و خواص بتن انجام شد. برای تعیین ریزساختار فیزیکی بتن‌ها از آزمایش تخلخل سنجی جیوه‌ای بر روی ملات‌های جدا

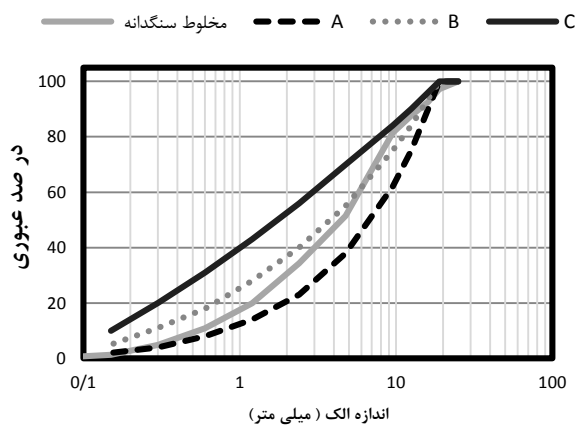
³ . Neithalath

⁴ .Pores shape factor

¹ .Cappillary

² .Cam

در جدول ۵ جزئیات نسبت مخلوط بتن‌ها نشان داده شده است.



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی مخلوط سنگدانه‌ها و طرح ملی مخلوط ایران با حداکثر اندازه سنگدانه ۱۹ میلیمتر

۲-۳- نمونه‌گیری از بتن‌های خودتراکم و نحوه عمل‌آوری آن‌ها

بلافاصله پس از پایان یافتن فرایند مخلوط کردن بتن، آزمایش‌های بتن تازه شامل اسلامپ جاری، قیف وی و حلقه جی روی مخلوط‌های بتن تازه انجام شده است. برای انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری، تخلخل سنجی جیوه‌ای، جذب مویینه و حجمی آب، مخلوط بتن خودتراکم بدون هیچ‌گونه عملیات ویریه (لرزش) داخل قالب‌های مورد نظر که قبلاً به روغن قالب مناسب آغشته شده بودند، ریخته شدند. این نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در داخل قالب و در فضای کنترل شده با دمای 20 ± 2 درجه سلسیوس و رطوبت ۹۰٪ نگهداری می‌شوند. سپس نمونه‌ها از قالب خارج شده و به مخزن عمل‌آوری آب آهک اشباع با دمای 20 ± 2 درجه سانتی‌گراد منتقل و تا سن انجام آزمایش در این وضعیت نگهداری شدند. نمونه‌ها در شکل‌های مختلف ساخته شدند؛ شامل نمونه‌های مکعبی ۱۰۰ میلی‌متری برای آزمایش‌های مقاومت فشاری، جذب مویینه آب و جذب حجمی آب. آزمایش تخلخل سنجی نیز روی ملات‌های جدا شده از بتن‌ها که در ابعاد کمتر از ۵ میلی‌متر انجام شد.

۲-۴- آزمایش‌های بتن تازه

برای بررسی کامل وضعیت بتن‌های خودتراکم در حالت تازه، آزمایش‌های گوناگون برای تعیین هر یک از خواص اصلی بتن خودتراکم انجام گرفت. برای بررسی قابلیت پرکنندگی

با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵، ۰/۴۵ و ۰/۵۵ در نظر گرفته شدند. بتن‌های خودتراکم حاوی میکروسیلیس متناظر با بتن‌های خودتراکم معمولی (با همان نسبت‌های آب به سیمان) و ۸ درصد میکروسیلیس جایگزین بخشی از سیمان شده اند، طراحی شد.

جدول ۳- خصوصیات شیمیایی و فیزیکی سیمان، میکروسیلیس،

متاکائولین

مشخصات شیمیایی و فیزیکی	سیمان پرتلند	میکروسیلیس	متاکائولین
SiO ₂	۲۰/۷۴	۹۴	۵۲/۸۰
Al ₂ O ₃	۴/۹۰	۱	۳۶/۳۰
Fe ₂ O ₃	۳/۵۰	۰/۱	۴/۲۱
MgO	۱/۲۰	۰/۶	۰/۸۱
CaO	۶۲/۹۵	۱	۰/۱
SO ₃	۳/۰۰	۱/۲	-
K ₂ O + Na ₂ O	۱/۰۵	۰/۶۷	۰/۵۶
LOI	۱/۵۶	-	۳/۵۳
باقی‌مانده نامحلول	۰/۷۴	-	-
وزن مخصوص (kg/m ³)	۳۱۵۰	۲۲۰۰	۲۶۰۰

جدول ۴- ترکیب شیمیایی سنگدانه‌ها

آنالیز شیمیایی	%
SiO ₂	۲/۶۳۳
CaO	۹۳/۲۹
Fe ₂ O ₃	۰/۶۹۶
MgO	۰/۱۷۲
Na ₂ O	۱/۴۳۱
K ₂ O	۰/۲۰۶
Al ₂ O ₃	۰/۵۴۷

مخلوط بتن خودتراکم حاوی ۲۰ درصد متاکائولین و نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ و مخلوط بتن خودتراکم حاوی ۲۰ درصد متاکائولین و ۸ درصد میکروسیلیس و نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ نیز برای بررسی هدف تحقیق در بتن‌های حاوی متاکائولین و هر دو پوزولان در نظر گرفته شدند.

آزمایش‌های جریان اسلامپ، T50 و قیف وی، بررسی قابلیت عبور آزمایش حلقه جی (اختلاف ارتفاع) و برای بررسی مقاومت جداشدگی، آزمایش قیف وی در بتن انجام گرفت. نتایج الزامات بتن خود تراکم را دارند.

جدول ۵- جزییات نسبت مخلوط‌های بتن خودتراکم

سنگدانه	پودر سنگ	متاکائولین	میکروسیلیس	سیمان	نسبت آب به مواد سیمانی	شناسه بتن
		Kg/cm ³				
۱۶۴۷	۱۵۰	۰	۰	۴۵۰	۰/۳۵	R1
۱۴۹۷	۱۵۰	۰	۰	۴۵۰	۰/۴۵	R2
۱۴۰۸	۱۵۰	۰	۰	۴۵۰	۰/۵۵	R3
۱۶۳۳	۱۵۰	۰	۳۶	۴۱۴	۰/۳۵	SF1
۱۴۸۲	۱۵۰	۰	۳۶	۴۱۴	۰/۴۵	SF2
۱۳۹۵	۱۵۰	۰	۳۶	۴۱۴	۰/۵۵	SF3
۱۴۷۷	۱۵۰	۹۰	۰	۳۶۰	۰/۴۵	MK
۱۴۶۳	۱۵۰	۹۰	۳۶	۳۲۴	۰/۴۵	MK+SF

قبل از آزمایش تخلخل سنجی، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتیگراد قرار گرفته و خشک شدند. همچنین به منظور توقف هیدراسیون تا زمان آزمایش تخلخل سنجی جیوه‌ای، در دسیکاتور نگه‌داری شدند.

جدول ۶- نتایج آزمایش‌های کارایی مخلوط‌های بتن خودتراکم

شناسه بتن	اسلامپ (mm)	T50 (S)	حلقه J (mm)	قیف V (S)
R1	۷۱۰	۵/۷۸	۷	۵/۳۱
R2	۶۴۰	۱/۲۵	۴	۳/۵۸
R3	۷۵۰	۱/۱۸	۲	۲/۱۶
SF1	۷۵۵	۱/۵۰	۷	۱۴/۳
SF2	۷۱۰	۲/۱۴	۵	۱۱/۱۱
SF3	۷۳۰	۲/۰۰	۲	۳/۱۲
MK	۷۳۰	۲/۵۸	۳	۸/۸۴
MK+SF	۷۱۰	۱/۵۹	۵	۵/۴۶

۲-۵-۲- مقاومت فشاری

مقاومت فشاری بتن‌ها با استفاده از ۳ نمونه مکعبی ۱۰۰ میلی‌متری انجام شد. نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و تا زمان انجام آزمایش مطابق استاندارد به مدت ۲۸ روز تحت عمل‌آوری قرار گرفتند.

۲-۵-۳- جذب آب

این آزمایش بر اساس دستورالعمل استاندارد ASTM-C642 [۴۲] انجام گرفت. جذب آب بتن‌ها به صورت درصد وزنی با استفاده از میانگین گیری نتایج ۳ آزمون مکعبی (۱۰۰ میلی‌متری) به دست آمدند. پس از ۲۸ روز عمل‌آوری نمونه‌ها در آب، نمونه‌ها از آب خارج و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۱۴ درجه سانتیگراد در گرمخانه قرار گرفتند. سپس از گرمخانه خارج و توزین شدند (m_0). سپس دوباره در آب غوطه‌ور شدند، تا پس از ۲۴ ساعت از آب خارج و سطح آن‌ها توسط پارچه تمیز، خشک و مورد توزین قرار گیرند (m_t). سپس طبق رابطه ۱،

۲-۵-۴- آزمایش‌های بتن سخت شده

۲-۵-۴-۱- توزیع اندازه منافذ

تخلخل کل و توزیع اندازه منافذ با استفاده از روش تخلخل سنجی با جیوه (MIP) بوسیله دستگاه Thermo Finnigan, Pascal 440 دارای فشار حداکثر ۲۱۰ مگاپاسکال تعیین شد. زاویه تماسی ۱۴۰ درجه و منافذ بین ۱۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر قابل دسترسی بود. نمونه‌هایی با ابعاد ۵ میلیمتری از بتن‌ها در سن ۲۸ روز طوری جدا شد که درشت‌دانه در ملات‌ها نباشد. استفاده از ملات‌های جدا شده از نمونه‌های بتنی در تحقیقات گذشته [۲۷، ۲۸، ۴۸، ۹۲-۹۴] برای آزمایش تخلخل سنجی مورد استفاده قرار گرفته است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ساختار فیزیکی - توزیع اندازه منافذ

در جدول ۷، مشخصات ساختار فیزیکی بتن‌های خودتراکم حاوی متاکائولین و میکروسلیس مورد آزمایش، شامل مقدار کل منافذ (بیشتر از ۱۰ میکرومتر)، حجم منافذ کوچک موئینه، حجم منافذ بزرگ موئینه و اندازه میانه منافذ (d50) ارائه شده است. بتن دارای منافذ گوناگون در اندازه‌های مختلف است. مقدار حجمی که منافذ با اندازه‌های مختلف، در حدود یک گرم از خمیر سیمان را اشغال می‌کند به توزیع اندازه منافذ موسوم است [۱]. تقسیم‌بندی سنتی منافذ بتن عبارت است از: منافذ ژلی (منافذ کوچکتر از ۱۰ نانومتر که مربوط به محصولات هیدراسیون است. همچنین منافذ موئینه که شامل دو نوع است، منافذ بزرگ موئینه با اندازه ۵۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر و منافذ کوچک موئینه با اندازه ۱۰ تا ۵۰ نانومتر هستند [۳]. اندازه میانه منافذ، اندازه منفذی متناظر با ۵۰ درصد حجم جمعی تخلخل است و می‌تواند نشان‌دهنده توزیع اندازه منافذ باشد [۲۵]. شکل ۲ توزیع اندازه منافذ برای بتن‌های مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۷- مشخصات منافذ بتن‌ها

شناسه بتن	بزرگ موئینه	کوچک موئینه	d50 (نانومتر)	تخلخل کل (%)
R1	۱۶	۳۲	۳۰	۱۰/۹
R2	۳۳	۱۸	۸۷	۱۳/۱
R3	۵۰	۳۱	۱۰۵	۱۷/۹
SF1	۱۳	۲۰	۲۵	۸/۶
SF2	۱۶	۳۰	۲۷	۱۱/۱
SF3	۲۳	۴۰	۳۰	۱۲/۷
MK	۱۲	۳۸	۲۲	۱۱/۵
MK+SF	۱۵	۳۶	۲۰	۱۱/۴

مقایسه بتن‌های بدون مواد پوزولانی (R1, R2, R3) به ترتیب با نسبت آب به سیمان ۰/۵۵، ۰/۴۵ و ۰/۳۵ نشان می‌دهد که بیشترین مقدار کل منافذ بزرگ تر از ۱۰ نانومتر متعلق به بتن با بیشترین نسبت آب به سیمان ۰/۵۵ است. مقدار تخلخل کل در این بتن ۱۷/۹ درصد است. بنابراین در این بتن‌ها، افزایش نسبت آب به سیمان موجب افزایش تخلخل شده است.

درصد جذب آب محاسبه شد.

$$\text{جذب آب \%} = \frac{m_t - m_0}{m_0} \times 100 \quad (1)$$

که در آن:

m_t : وزن آزمون مرطوب در زمان t

m_0 : وزن آزمون خشک شده در گرمخانه.

۲-۵-۴- جذب موئینه آب

این آزمایش روی نمونه‌های مکعبی ۱۰۰ میلی‌متری انجام شد. پس از ۲۸ روز عمل‌آوری نمونه‌ها در آب، نمونه‌ها از آب خارج و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۱۴ درجه سانتیگراد در گرمخانه قرار گرفتند. سپس از گرمخانه خارج و توزین شدند (m_0). سپس چنان در بالای سطح آب قرار می‌گیرد که ۵ میلی‌متر آن داخل آب باشد. در زمان‌های مختلف و ترجیحاً پس از ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۶، ۲۴ و ۷۲ ساعت وزن نمونه اندازه‌گیری و وزن آب جذب شده با استفاده از رابطه ۲ بر حسب gr/mm^2 تعیین شد. هنگام توزین، نمونه باید از درون آب خارج و به مدت ۶۰±۵ ثانیه روی سطحی که آب جذب نمی‌نماید، قرار گرفته و سپس درون ظرف دیگری گذاشته شود. وزن نمونه شامل آب جذب شده در این وضعیت می‌شود.

$$a_{cc} = \frac{m_t - m_0}{A} \quad (2)$$

که در آن:

A: سطح مقطع کف نمونه در تماس با آب (mm^2)

m_0 : وزن آزمون خشک (gr)

m_t : افزایش وزن آزمون مرطوب (gr)

a_{cc} : ارتفاع معادل آب جذب شده (بر حسب میلیمتر).

پس از برازش خط بر نقاط بدست آمده در صفحه مختصات ($a_{cc} - \sqrt{t}$) طبق رابطه ۳ ضریب جذب موئینه بدست می‌آید.

$$a_{cc} = c + s\sqrt{t} \quad (3)$$

که در آن:

c: ثابت جذب موئینه

s: ضریب جذب موئینه

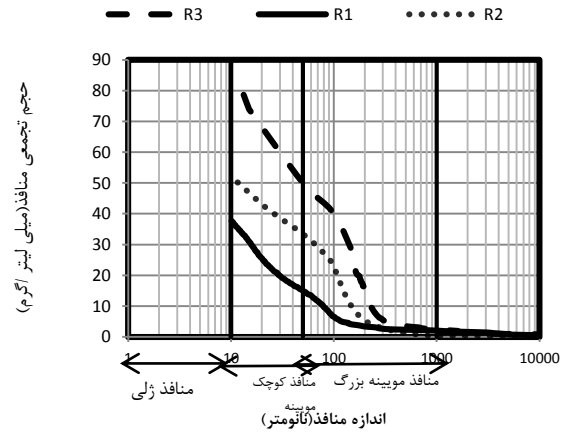
t: زمان (که در این تحقیق ساعت در نظر گرفته شده است) (h)

در بتن‌های حاوی میکروسیلیس (SF1, SF2, SF3) نیز تاثیر نسبت آب به سیمان بر اندازه تخلخل مشابه با بتن‌های بدون مواد افزودنی معدنی است. در بتن‌های میکروسیلیسی نیز با افزودن نسبت آب به سیمان از ۰/۳۵ تا ۰/۵۵، تخلخل کل از ۸/۶ درصد به ۱۲/۷ درصد افزایش یافته است.

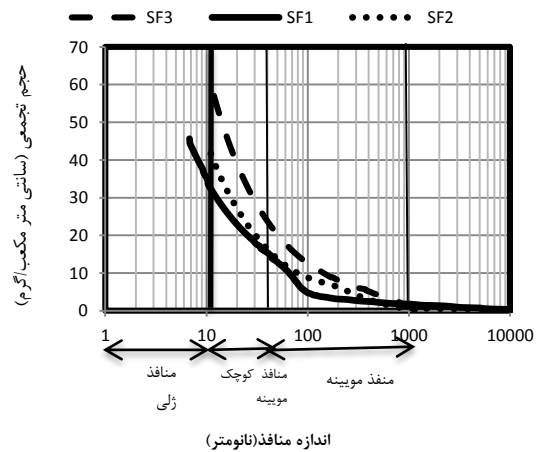
وقتی بتن‌های میکروسیلیسی با بتن‌های بدون میکروسیلیس متناظر مقایسه شود، نشان می‌دهد که اثر مهم میکروسیلیس علاوه بر کاهش تخلخل کل، تبدیل منافذ بزرگ مویینه به منافذ کوچک مویینه است. البته در نسبت آب به سیمان ۰/۳۵، بیشتر اثر بر تخلخل کل بوده است و هم منافذ کوچک و هم منافذ بزرگ مویینه کمتر شده است. در بتن R2، حجم منافذ کوچک و بزرگ و کوچک مویینه به ترتیب (mm³/g) ۲۲ و ۱۸ و در بتن میکروسیلیسی متناظر SF2، به ترتیب برابر با (mm³/g) ۱۶ و ۳۰ است، پس مشاهده می‌شود که حجم منافذ کوچک مویینه افزایش یافته است. بنابراین در بتن‌های حاوی میکروسیلیس در نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ و ۰/۵۵، حجم منافذ کوچک مویینه بیشتر شده و منافذ بزرگ مویینه دارای حجم کمتری هستند.

اندازه میانه منافذ در بتن‌های میکروسیلیسی در مقایسه با بتن‌های متناظر بدون مواد افزودنی معدنی، کاهش یافته است. در بتن SF1، اندازه میانه منافذ برابر با ۲۵ نانومتر و در بتن‌های SF2 و SF3 به ترتیب ۲۷ و ۳۰ نانومتر است. همچنین اندازه میانه منافذ در R1, R2, R3، به ترتیب ۳۰، ۸۷ و ۱۰۵ نانومتر به دست آمد. بنابراین افزایش نسبت آب به سیمان در همه بتن‌ها باعث افزایش اندازه میانه منافذ و به عبارت دیگر درشت شدن منافذ می‌شود. اما این اثر در بتن‌های بدون میکروسیلیس بیشتر است.

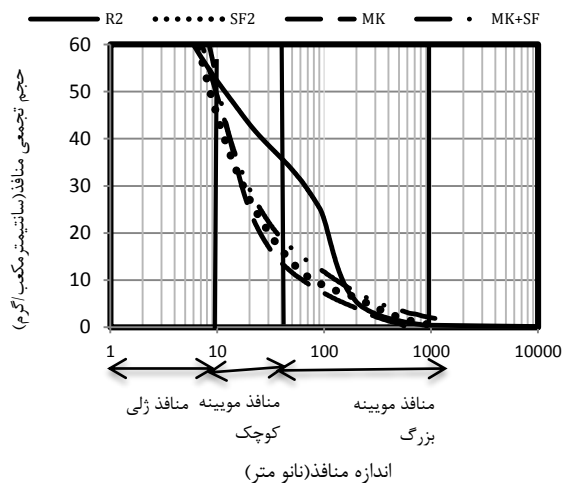
توزیع اندازه منافذ در بتن‌های SF2, MK، تقریباً مشابه هستند. اگرچه افزودن هم‌زمان میکروسیلیس و متاکائولین تا حدی باعث ریز شدن بیشتر منافذ شده است. بتن SF2 دارای اندازه میانه منافذ ۲۷ و ۲۰، MK, MK+SF، به ترتیب دارای اندازه میانه منافذ ۲۰ و ۲۲ هستند. کمترین درصد تخلخل کل در همه بتن‌های آزمایش شده، متعلق به بتن SF1 است. کمترین اندازه میانه منافذ هم به بتن حاوی متاکائولین و میکروسیلیس با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ تعلق دارد. بنابراین اثر نسبت آب به سیمان کمتر بر تخلخل کل و افزودن مواد افزودنی معدنی متاکائولین و میکروسیلیس در ریزتر کردن منافذ است.



الف



ب



ج

شکل ۲- مقایسه توزیع اندازه منافذ در انواع بتن‌های خودتراکم الف. بتن‌های خودتراکم بدون مواد افزودنی معدنی، ب. بتن‌های خودتراکم حاوی میکروسیلیس ج. بتن‌های خودتراکم با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ حاوی مواد پوزلانی

۲-۳- ارتباط ساختار منافذ و مقاومت فشاری

در شکل ۳ مقاومت فشاری بتن‌ها پس از ۲۸ روز عمل‌آوری ارائه شده است. بیشترین مقاومت فشاری در بتن‌های خودتراکم معمولی (R1, R2, R3) متعلق به بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵، با مقاومت فشاری ۴۹ مگاپاسکال است. با افزایش نسبت آب به سیمان از ۰/۳۵ تا ۰/۵۵، مقاومت فشاری ۳۵ درصد کاهش یافته است. در همه انواع بتن‌ها (معمولی و میکروسیلیسی)، افزایش نسبت آب به سیمان باعث کاهش مقاومت فشاری بتن شده است. در تحقیق [۲۹] نشان داده شد، کاهش نسبت آب به سیمان در بتن‌های حاوی میکروسیلیس، مقاومت فشاری را افزایش می‌دهد.

C: مقدار سیمان (در تحقیق حاضر، این متغیر Cm مواد سیمانی

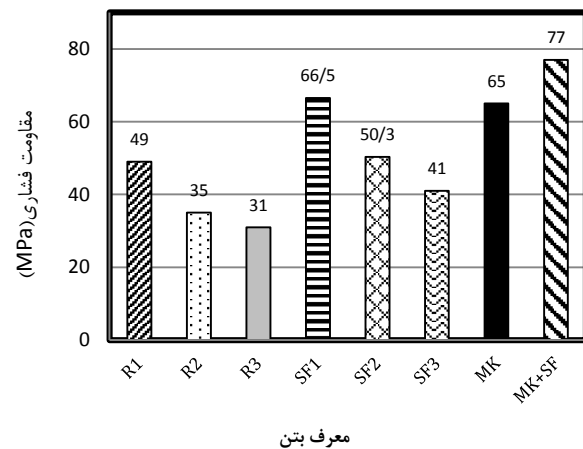
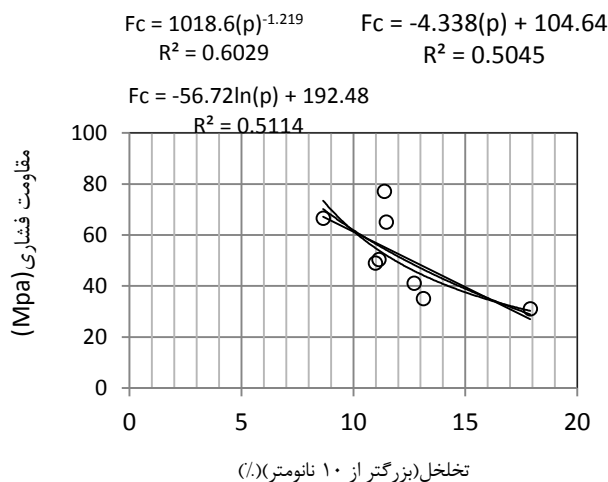
فرض شده است).

P: تخلخل کل

d50 یا \bar{m} : اندازه میانه منافذ

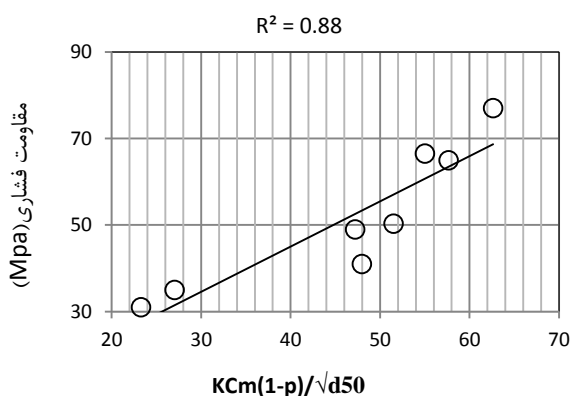
Fc: مقاومت فشاری

ضریب همبستگی برازش نتایج حاصل از رابطه ۴ و نتایج واقعی مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز، ۰/۸۸ است (شکل ۵). همچنین ضریب K برابر با ۲۰۳۲ است. این مدل نشان می‌دهد، توزیع اندازه منافذ شامل اندازه میانه منافذ می‌تواند در خواص مکانیکی از جمله مقاومت فشاری بتن‌ها موثرتر از تخلخل کل باشد.



شکل ۳- نتایج مقاومت فشاری بتن‌ها در سن ۲۸ روز

شکل ۴- ارتباط مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز و تخلخل کل (بزرگتر از ۱۰ نانومتر)



شکل ۵- ارتباط مقاومت فشاری واقعی و مقاومت فشاری حاصل

از رابطه ۴

در تحقیقات گذشته، عمدتاً روابط لگاریتمی، خطی، نمایی بین مقاومت فشاری و تخلخل کل در بتن‌ها و ملات‌ها ارائه شده است [۹، ۲۴، ۲۵]. در این تحقیق ارتباط بین مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز و تخلخل کل در بتن‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. روابط خطی، لگاریتمی و نمایی بین تخلخل کل (درصد کل منافذ بزرگتر از ۱۰ نانومتر) و مقاومت فشاری به ترتیب دارای ضریب همبستگی ۰/۵۱، ۰/۵۰ و ۰/۶ است. بنابراین می‌توان گفت، عامل دیگری علاوه بر تخلخل کل می‌تواند بر مقاومت فشاری موثر باشد.

یکی از مدل‌های ارتباط توزیع اندازه منافذ و تخلخل کل و مقاومت فشاری، مدل کومار ۱ و باتاچارچی [۲۵] طبق رابطه ۴ است:

$$F_c = K C \frac{1-P}{\sqrt{d_{50}}} \quad (4)$$

K: ثابت

² Bhattacharjee

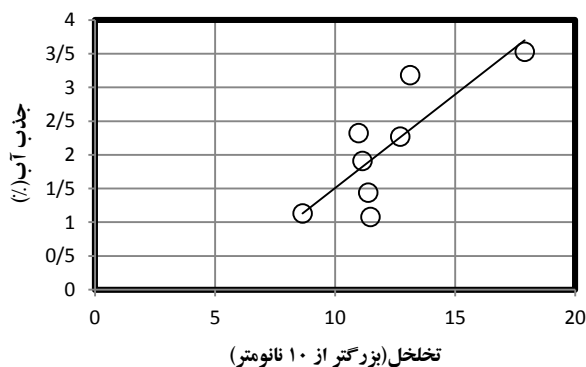
¹ Kumar

موجب کاهش ۵۱ درصدی جذب آب شده است. این کاهش برای نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ و ۰/۵۵ به ترتیب برابر با ۴۰ و ۳۵ درصد است. در نسبت آب به سیمان بیشتر، افزودن میکروسیلیس اثری قابل توجه در کاهش جذب آب دارد. اثر استفاده توام میکروسیلیس و متاکائولین باعث کاهش ۵۴ درصدی در جذب آب شد وقتی با بتن معمولی متناظر در نسبت آب به سیمان یکسان مقایسه شد.

جدول ۸- درصد جذب و ضریب جذب مویینه آب در بتن‌ها

شناسه بتن	درصد جذب (%)	ضریب جذب مویینه (mm/√h)
R1	۲/۳۲	۰/۱۲
R2	۳/۱۸	۰/۲۳
R3	۳/۵۳	۰/۲۷
SF1	۱/۱۳	۰/۰۱۴
SF2	۱/۹۱	۰/۰۲۰
SF3	۲/۲۷	۰/۰۶۰
MK	۱/۰۸	۰/۰۱۷
MK+SF	۱/۴۴	۰/۰۱۶

ارتباط بین درصد جذب آب و تخلخل کل در بتن‌ها که در شکل ۶ ارائه شده است، نشان می‌دهد، عامل بهبود درصد جذب آب، تخلخل کل نیست. در بتن‌های حاوی تخلخل کل در محدوده‌ی ۱۱ درصد، درصد جذب‌های مختلف مشاهده شده است. بنابراین به منظور تعیین عامل مؤثر بر درصد جذب آب، ارتباط درصد جذب آب و منافذ بزرگ مویینه و منافذ کوچک مویینه به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است.



شکل ۶- ارتباط بین درصد جذب و تخلخل کل (بزرگتر از ۱۰ نانومتر)

درصد جذب آب در همه بتن‌ها ارتباط مشخصی با حجم منافذ کوچک مویینه ندارند. منافذ کوچک مویینه عامل مؤثر بر جذب

مقایسه بین بتن‌های حاوی میکروسیلیس با بتن‌های معمولی نظیر حاوی سیمان پرتلند، نشان می‌دهد که میکروسیلیس در افزایش مقاومت اثرگذار است و سبب افزایش مقاومت فشاری بتن‌ها شده است. در نسبت‌های آب به سیمان ۰/۳۵، ۰/۴۵ و ۰/۵۵، جایگزینی ۸ درصد میکروسیلیس به ترتیب باعث افزایش ۳۷٪، ۳۳٪ و ۲۸٪ مقاومت فشاری شده است. طبق شکل ۵ و نتایج توزیع اندازه منافذ، میکروسیلیس با کاهش تخلخل و همچنین تبدیل منافذ بزرگ به کوچک و کوچک شدن ساختار منافذ بر افزایش مقاومت فشاری تاثیر گذاشته است.

چنانچه بتن حاوی متاکائولین با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ (MK) با بتن دارای میکروسیلیس با همان نسبت آب به سیمان (SF2) مقایسه شود، تاثیرگذاری متاکائولین در مقاومت کاملاً مشخص است. بتن حاوی متاکائولین طبق جدول ۷ حجم منافذ کوچک مویینه بیشتری دارد. بیشترین مقاومت از بین همه بتن‌های آزمایش شده، متعلق به بتن حاوی هر دو پوزولان میکروسیلیس و متاکائولین و نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ (MK+SF) است. استفاده هر دو پوزولان متاکائولین و میکروسیلیس در مقایسه با استفاده فقط متاکائولین و یا فقط میکروسیلیس در بتن تفاوت در مقاومت فشاری نشان داده است. به عبارت دیگر، استفاده هم‌زمان از دو پوزولان باعث بهبود مقاومت فشاری می‌شود. افزایش مقاومت فشاری در استفاده از ترکیب‌های سه تایی مواد پوزولانی مانند میکروسیلیس و متاکائولین مشاهده شده است [۱۲].

۳-۳- ارتباط ساختار منافذ و درصد جذب آب

نتایج درصد جذب آب و ضریب جذب مویینه آب در بتن‌ها در جدول ۸ ارائه شده است. مقایسه درصد جذب آب در همه بتن‌های معمولی نشان می‌دهد که بیشترین درصد جذب آب متعلق به بتن حاوی سیمان پرتلند با نسبت آب به سیمان ۰/۵۵ (R3) با مقدار ۳/۵۳ درصد است. در بتن‌های حاوی میکروسیلیس و نسبت‌های مختلف آب به سیمان، نیز افزایش آب به سیمان باعث افزایش درصد جذب آب شده است. بنابراین کاهش نسبت آب به سیمان در بهبود عملکرد بتن در جذب آب مؤثر است.

مقایسه بتن‌های حاوی میکروسیلیس و بتن‌های معمولی متناظر نشان از کاهش درصد جذب آب در بتن‌های حاوی میکروسیلیس دارد. به عنوان مثال، استفاده از میکروسیلیس در نسبت آب به سیمان ۰/۳۵

است. مقایسه ضریب جذب مویینه در همه بتن‌های بدون مواد افزودنی معدنی نشان می‌دهد که بیشترین ضریب جذب مویینه متعلق به بتن حاوی سیمان پرتلند با نسبت آب به سیمان $0/55 (R3)$ است.

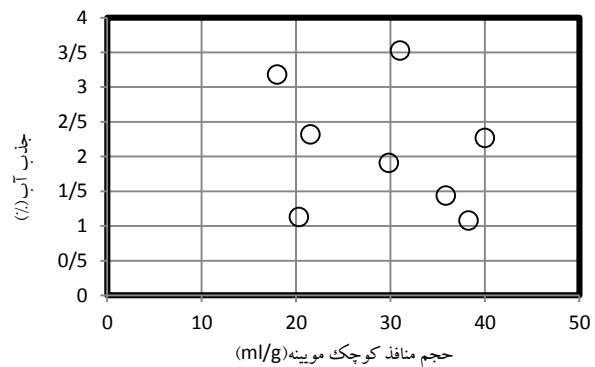
در بتن‌های میکروسیلیسی (SF1, SF2, SF3) نیز که دارای نسبت‌های آب به سیمان مختلف هستند، ضریب جذب مویینه بزرگتر در بتن میکروسیلیسی حاوی نسبت آب به سیمان بزرگتر به دست آمده است. بتن‌های میکروسیلیسی دارای نسبت آب به سیمان $0/35$ ، $0/45$ و $0/55$ ، به ترتیب دارای ضریب جذب مویینه $0/14$ ، $0/20$ و $0/60$ (mm/h) هستند. همانند درصد جذب آب، مقایسه ضرایب جذب مویینه در بتن‌های میکروسیلیسی در نسبت‌های مختلف آب به سیمان با بتن‌های بدون میکروسیلیس متناظر نشان می‌دهد، میکروسیلیس باعث کاهش ضریب جذب مویینه به اندازه $8/75$ ، $11/5$ و $4/5$ برابر به ترتیب در نسبت آب به سیمان $0/35$ تا $0/55$ می‌شود. نتایج مشابه در تحقیقات متعدد گزارش شده است (رفرنس). در بتن‌های دارای نسبت آب به سیمان $0/45$ ، ضریب جذب مویینه دو بتن متاکائولینی (MK, MK+SF) تقریباً یکسان است. این دو بتن دارای توزیع اندازه منافذ مشابهی هستند. همچنین مقایسه بتن‌های پوزولانی و بتن معمولی نشان می‌دهد که متاکائولین و میکروسیلیس باعث کاهش ضریب جذب مویینه می‌شود.

به منظور تعیین عوامل مؤثر بر ضریب جذب مویینه آب، ارتباط بین ضریب جذب مویینه آب و تخلخل کل، حجم منافذ بزرگ مویینه و حجم منافذ کوچک مویینه بررسی شده است که به ترتیب در شکل‌های ۹ تا ۱۱ ارائه شده است.

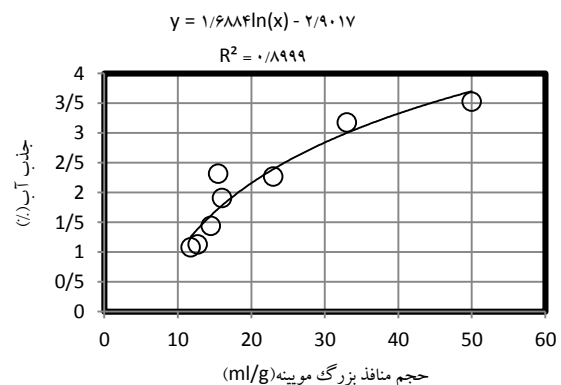
طبق شکل ۹، تخلخل کل در بهبود ضریب جذب مویینه عامل مؤثر نیست. زیرا چنانچه دیده می‌شود، در محدوده تخلخل ۱۱ درصد، ضریب جذب مویینه آب در بتن‌ها متفاوت است. همچنین ضریب جذب مویینه آب در همه بتن‌ها ارتباط مشخصی با حجم منافذ کوچک مویینه ندارند.

منافذ کوچک مویینه و تخلخل کل، عامل مؤثر بر ضریب جذب مویینه آب در بتن‌ها شامل بتن‌های معمولی و بتن‌های پوزولانی نیستند. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که در همه بتن‌ها ضریب جذب مویینه آب با ضریب همبستگی $0/83$ ، با حجم منافذ بزرگ مویینه ارتباط دارد. بنابراین حجم منافذ بزرگ مویینه در مقایسه با تخلخل کل و حجم منافذ کوچک مویینه بر جذب آب نقش مؤثرتری دارد.

آب در بتن‌ها شامل بتن‌های معمولی و بتن‌های پوزولانی نیست. بنابراین کاهش نسبت آب به سیمان به دلیل کاهش منافذ بزرگ مویینه، بر درصد جذب آب مؤثر است. در همه بتن‌ها درصد جذب آب با ضریب همبستگی $0/89$ ، با حجم منافذ بزرگ مویینه ارتباط دارد. بنابراین حجم منافذ بزرگ مویینه در مقایسه با تخلخل کل و حجم منافذ کوچک مویینه بر جذب آب نقش مؤثرتری دارد. می‌توان گفت، از بین مشخصات ریزساختار فیزیکی منافذ شامل تخلخل کل، حجم منافذ بزرگ مویینه، حجم منافذ کوچک مویینه، حجم منافذ بزرگ مویینه و در بهبود درصد جذب آب نقش مؤثر و مشخص‌تری دارند. خصوصیات دوام بتن شامل نفوذپذیری، علاوه بر اندازه منافذ مخصوصاً منافذ بزرگ مویینه به ارتباط منافذ نیز بستگی دارد [۲۵، ۴۳].



شکل ۷- ارتباط بین درصد جذب آب و حجم منافذ کوچک مویینه



شکل ۸- ارتباط بین درصد جذب آب و حجم منافذ بزرگ مویینه

۳-۴- ارتباط ساختار فیزیکی و ضریب جذب مویینه آب همانگونه که در جدول ۹ نشان داده شده است، افزایش نسبت آب به سیمان در بتن‌های حاوی سیمان پرتلند موجب افزایش ضریب جذب مویینه شده است. وقتی نسبت آب به سیمان از $0/35$ به $0/45$ افزایش یافته است، ضریب جذب مویینه ۴۷ درصد کاهش یافته

نحوه تاثیر مواد پوزولانی بر آن بررسی شد. نتایج زیر از تحقیق حاضر به دست آمد:

- کاهش نسبت آب به سیمان در بتن‌های معمولی و بتن‌های میکروسیلیسی عامل بهبود تخلخل است. اگرچه اثر مهم افزودن میکروسیلیس تبدیل منافذ بزرگ به کوچک در بتن در مقایسه با بتن‌های معمولی متناظر است. میکروسیلیس و متاکائولین باعث افزایش منافذ کوچک مویینه و کاهش منافذ بزرگ مویینه شده است.

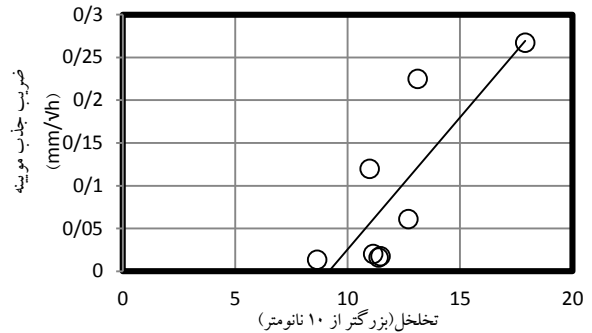
- مقایسه تخلخل کل در بتن‌ها نشان داد که کمترین درصد تخلخل کل متعلق به بتن حاوی میکروسیلیس با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ (SF1) است. این بتن در مقایسه با بتن حاوی هر دو پوزولان متاکائولین و میکروسیلیس ۳۲ درصد تخلخل کل کمتری دارد.

- مقاومت فشاری در بتن‌های مورد مطالعه طبق رابطه $FC = 2032 \times C \frac{1-P}{\sqrt{d_{50}}}$ ، تابعی از تخلخل کل و اندازه میانه منافذ است. ضریب همبستگی این رابطه ۰/۸۸ به دست آمد. مقایسه تغییرات تخلخل کل بتن‌ها در مقایسه با بتن R3 نشان داد که، کاهش تخلخل کل به اندازه ۵۲ درصد و ۳۶ درصد (در دو بتن MK و MK+SF) به ترتیب موجب افزایش مقاومت فشاری با مقادیر ۱۱۴ درصد و ۱۰۹ و ۱۴۳ درصد شده است. بنابراین تخلخل کل به تنهایی عامل مهم بر مقاومت فشاری بتن‌ها نیست.

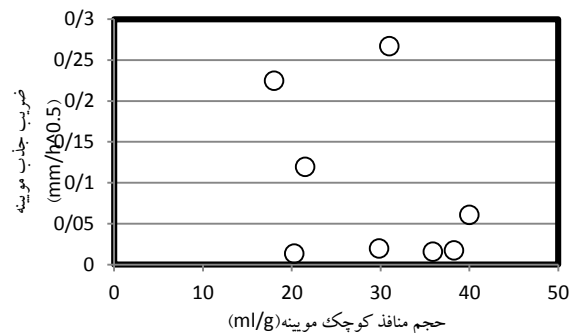
- استفاده از میکروسیلیس در نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ موجب کاهش ۵۱ درصدی جذب آب شده است. این کاهش برای نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ و ۰/۵۵ به ترتیب برابر با ۴۰ و ۳۵ درصد است. در نسبت آب به سیمان بیشتر، افزودن میکروسیلیس اثری قابل توجه در کاهش جذب آب دارد. اثر استفاده توام میکروسیلیس و متاکائولین باعث کاهش ۵۴ درصدی در جذب آب شد وقتی با بتن معمولی متناظر در نسبت آب به سیمان یکسان مقایسه شد. توزیع اندازه منافذ بخصوص حجم منافذ بزرگ مویینه بر درصد کاهش جذب آب و ضریب جذب مویینه اثر دارد.

۵- مراجع

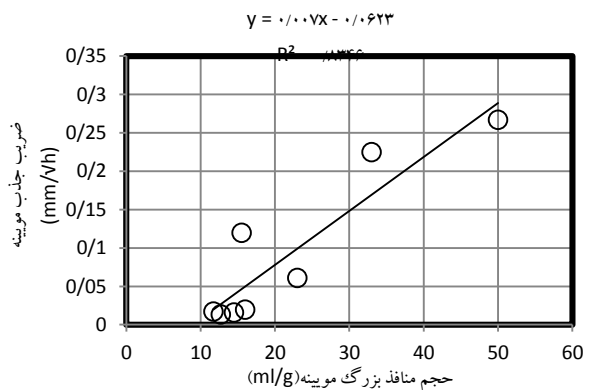
[1] Ghoddousi. P, Parhizkar. T, Ramezani pour, A.A, and Mozaffari. N, "Concrete technology in the invironmental conditions of persion gulf(Vol.2): in persian". tehran: Building and Housing Research Center, 2004.



شکل ۹- ارتباط بین ضریب جذب مویینه و تخلخل کل (بزرگتر از ۱۰ نانومتر)



شکل ۱۰- ارتباط بین ضریب جذب مویینه آب و حجم منافذ کوچک مویینه



شکل ۱۱- ارتباط بین ضریب جذب مویینه آب و حجم منافذ بزرگ مویینه در بتن‌ها

۴- نتیجه‌گیری

در رابطه با دوام و ساختار فیزیکی منافذ در بتن حاوی مواد پوزولانی از جمله متاکائولین و میکروسیلیس تمرکز اصلی مطالعات در مواد افزودنی معدنی بر تشخیص عوامل بهبود دهنده دوام، مقدار بهینه استفاده در مخلوط‌ها و روش‌های آزمایشگاهی جدید بوده است. در این تحقیق به مشخص کردن ریزساختار فیزیکی (شامل تخلخل کل، توزیع اندازه منافذ) پرداخته شده و

- [14] Frías. M and Cabrera. J, "Pore size distribution and degree of hydration of metakaolin–cement pastes," *Cement and Concrete Research*, vol. 30, no. 4, pp. 561–569, 2000.
- [15] Ambroise .J, Maximilien. S, and Pera .J, "Properties of metakaolin blended cements," *Advanced Cement Based Materials*, vol. 1, no. 4, pp. 161–168, 1994.
- [16] Cwirzen.A and Penttala.V, "Aggregate–cement paste transition zone properties affecting the salt–frost damage of high-performance concretes," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 4, pp. 671–679, 2005.
- [17] Diamond.S, "A critical comparison of mercury porosimetry and capillary condensation pore size distributions of portland cement pastes," *Cement and concrete research*, vol. 1, no. 5, pp. 531–545, 1971.
- [18] Odler.I and Rößler.M, "Investigations on the relationship between porosity, structure and strength of hydrated Portland cement pastes. II. Effect of pore structure and of degree of hydration," *Cement and Concrete Research*, vol. 15, no. 3, pp. 401–410, 1985.
- [19] chiller.K.K, "Strength of porous materials," *Cement and Concrete Research*, vol. 1, no. 4, pp. 419–422, 1971.
- [20] Chen.X, Wu.S, andZhou.J, "Influence of porosity on compressive and tensile strength of cement mortar," vol. 40, pp. 869–874, 2013.
- [21] Lian.C, Zhuge.Y, and Beecham.S, "The relationship between porosity and strength for porous concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 11, pp. 4294–4298, 2011.
- [22] El .A and Georges.S, "Porosity of self-compacting concrete," *Procedia Engineering*, vol. 123, pp. 145–152, 2015.
- [23] Assié.S, Escadeillas.G, and Waller.V, "Estimates of self-compacting concrete 'potential' durability," *Construction and Building Materials*, vol. 21, no. 10, pp. 1909–1917, 2007.
- [24] Tjaronge.M.W and Ria.U, "Porosity , pore size and compressive strength of self compacting concrete using sea water," *Procedia Engineering*, vol. 125, pp. 832–837, 2015.
- [25] Kumar.R and Bhattacharjee.B, "Porosity , pore size distribution and in situ strength of concrete," *Cement and Concrete Research* ,33 vol. 33, pp. 155–164, 2003.
- [26] Das.B.B and Kondraivendhan.B, "Implication of pore size distribution parameters on compressive strength , permeability and hydraulic diffusivity of concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 28, no. 1, pp. 382–386, 2012.
- [2] Atahan. H. N, Oktar O.N, and Tas. M. A, "Effects of water – cement ratio and curing time on the critical pore width of hardened cement paste," *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 3, pp. 1196–1200, 2009.
- [3] Mindess.S , Young .J. F, and Darwin.D, "concrete". Prentice Hall, 2003.
- [4] Chen .X and Wu.S, "Influence of water-to-cement ratio and curing period on pore structure of cement mortar," *Construction and Building Materials*, vol. 38, pp. 804–812, 2013.
- [5] Zhao .H, Xiao. Q, Huang.D, and Zhang.S, "Influence of Pore Structure on Compressive Strength of Cement Mortar," , *The Scientific World Journal* , Hindawi Publishing Corporation , 2014.
- [6] Bentur, A, "The pore structure of hydrated cementitious compounds of different chemical composition," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 63, no. 7-8, pp. 381–386, 1980.
- [7] Okpala.D.C, "Pore structure of hardened cement paste and mortar," *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, vol. 11, no. 4, pp. 245–254, 1989.
- [8] Poon.C.S, Lam.L , Kou.S, Wong.Y.L , and Wong.R, "Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes," *Cement and Concrete Research*, vol. 31, no. 9, pp. 1301–1306, Sep. 2001.
- [9] Nežerka.V , Bílý.P , Hrbek. V, and Fládr.J, "Impact of silica fume, fly ash, and metakaolin on the thickness and strength of the ITZ in concrete," *Cement and Concrete Composites*, vol. 103, pp. 252–262, 2019.
- [10] Qin.Z, Ma.C , Zheng.Z , Long.G , and Chen.B, "Effects of metakaolin on properties and microstructure of magnesium phosphate cement," *Construction and Building Materials*, vol. 234, p. 117353, 2020.
- [11] Li .Y, Chen. Y, Wei. J, He. X, Zhang. H, and Zhang . W, "A study on the relationship between porosity of the cement paste with mineral additives and compressive strength of mortar based on this paste," *Cement and Concrete Research*, vol. 36, no. 9, pp. 1740–1743, 2006.
- [12] Bartoníc .E, Kuzielová. E, and Matúš. Z, "The correlation between porosity and mechanical properties of multicomponent systems consisting of Portland cement – slag – silica fume – metakaolin ~ emlic," *Construction and Building Materials*, vol. 135, pp. 306–314, 2017.
- [13] Khatib. J. M and Wild .S, "Pore size distribution of metakaolin paste," *Cement and Concrete Research*, vol. 26, no. 10, pp. 1545–1553, 1996.

- Test,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 25, no. 3, pp. 411–418, 2013.
- [39] Duan.P, Shui.Z, Chen.W, and Shen.C, “Efficiency of mineral admixtures in concrete: Microstructure, compressive strength and stability of hydrate phases,” *Applied Clay Science*, vol. 83–84, pp. 115–121, 2013.
- [40] Liu.J, Ou.G, Qiu.Q,Chen.X, Hong.J, and F. Xing.F, “Chloride transport and microstructure of concrete with / without fly ash under atmospheric chloride condition,” *Construction and Building Materials*, vol. 146, pp. 493–501, 2017.
- [41] Duan.P, Shui.Z, Chen.W, and Shen.C, “Enhancing microstructure and durability of concrete from ground granulated blast furnace slag and metakaolin,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 2, no. 1, pp. 52–59, 2013.
- [42] Astm C642-97, “Standard Test Method for Density , Absorption , and Voids in Hardened Concrete,” *Annual Book of ASTM Standards*, no. March, pp. 1–3, 1997.
- [43] Popovics.S, *Strength and related properties of concrete: A quantitative approach*. John wiley & sons, 1998.
- [27] Ollivier .J.P and Massat.M, “Permeability and microstructure of concrete • a review of modelling,” *Cement and Concrete Research*, vol. 22, pp. 503–514, 1992.
- [28] Kapoor.K,Singh.S.P , and Singh.B, “Water Permeation Properties of Self Compacting Concrete Made with Coarse and Fine Recycled Concrete Aggregates,” *International Journal of Civil Engineering*,Vol.16, pp. 47-56, 2018.
- [29] Güneysi.E , Gesoğ lu.M, Karaoğ lu.S, and Mermerdaş.K, “Strength, permeability and shrinkage cracking of silica fume and metakaolin concretes,” *Construction and Building Materials*, vol. 34, pp. 120–130, 2012.
- [30] Shi.Z, Shui.Z, Li.Q, and Geng.H, “Combined effect of metakaolin and sea water on performance and microstructures of concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 74, pp. 57–64, Jan. 2015.
- [31] .Hassan .A. A. A, M. Lachemi.M, and Hossain. K. M. A, “Effect of metakaolin and silica fume on the durability of self-consolidating concrete,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 34, no. 6, pp. 801–807, 2012.
- [32] R. Madandoust.M and S. Y. Mousavi.S.Y, “Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing metakaolin,” *Construction and Building Materials*, vol. 35, no. 3, pp. 752–760, 2012.
- [33] Ramezaniapour.A.A, Pilvar.A, Mahdikhani.M, and Moodi.F, “Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength,” *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 5, pp. 2472–2479, 2011.
- [34] Ramezaniapour .A.A and Jovein.H.B, “Influence of metakaolin as supplementary cementing material on strength and durability of concretes,” *Construction and Building Materials*, vol. 30, pp. 470–479, 2012.
- [35] Ghoddousi.G and Parhizkar.T, “The effect of Concrete Quality on Performance of Surface Treatment materials,” in *Sustainable construction materials and technologies*, 2007, pp. 78–84.
- [36] Cam.H.T and Neithalath.N, “Moisture and ionic transport in concretes containing coarse limestone powder,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 32, no. 7, pp. 486–496, Aug. 2010.
- [37] European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems, “EFNARC , Guidelines for self-compacting concrete.” p. 32, 2002.
- [38] ilho.J.H,Medeiros .M. H. F, Pereira.E, Helene.P, and Isaia.G.C, “High-Volume Fly Ash Concrete with and without Hydrated Lime: Chloride Diffusion Coefficient from Accelerated

The effect of the pores physical microstructure on water transport and compressive strength in self-compacting concretes containing silica fume and metakaolin

Parviz Ghoddousi

School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Leyla adelzade Saadabadi *

Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

Abstract

Understanding the physical microstructure, including pores size distribution and water absorption of concrete, because of its effect on long-term durability is important. The aim of the present study is to investigate the effect of physical microstructure of pozzolanic self-compacting concretes on compressive strength and water permeability. Self-compacting concrete mixes were designed with total cementitious material content of 450 kg/m^3 with water to cementitious material ratio of 0.35, 0.45 and 0.55. The binary and ternary blends of cement, silica fume and metakaolin were used for the purpose of present study. In order to investigate the difference between the effect of metakaolin and silica fume on the physical microstructure, mixtures containing binary and ternary blends of cement, silica fume and metakaolin with water to cement ratio of 0.45 were considered. Pore physical microstructure characteristics including median pore size, volume of large and small capillary pore in self-compacting concretes were investigated. Pore size distribution of self-compacting concrete samples were measured by mercury porosity test. The compressive strength, water absorption and capillary water sorptivity were performed on samples. The results showed that an important effective factor on compressive strength and water permeability is the medium size of the pores and the volume of large capillary pores. The concrete containing 20% metakaolin and 8% silica fume did not have the lowest porosity despite having the highest compressive strength. The lowest porosity with 8.6% belongs to self-compacting concrete containing silica fume with water to cement ratio of 0.35.

Keywords: pores physical micro-structure, self-compacting concrete, metakaolin, silica fume, water absorption.

* Corresponding Author: L_adelzade@pci.iaun.ac.ir

