

تأثیر افزایش دمای اولیه بر دوام بتن‌های حاوی میکروسیلیس - مقاومت بتن در برابر خوردگی

گرشاسب خزانلی^۱، مصطفی خانزادی^{۲*}، علی فصحتی^۳

۱- دکترای مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- استادیار دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- کارشناس ارشد مدیریت ساخت، دانشگاه علم و صنعت ایران

Khanzadi@iust.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱۲/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۲/۱۵

چکیده - در این مقاله تأثیر افزایش دمای اولیه بر نفوذ یون کلر و ریز ساختار بتن‌های حاوی میکروسیلیس بررسی شده است. برای این منظور دو طرح اختلاط بتن معمولی و بتن حاوی میکروسیلیس در سه دمای ساخت ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد مطالعه شده‌اند. تمامی نمونه‌ها با نسبت آب به سیمان ثابت ۰/۴۵ و عیار $400 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ در اسلامپ ثابت ساخته شده و آزمایش مقاومت الکتریکی، پتانسیل الکتریکی و نفوذ یون کلر روی نمونه‌ها انجام شده است. نتایج آزمایش‌های خوردگی نشان می‌دهد که در دمای بالا مقاومت بتن در برابر خوردگی کاهش یافته و نفوذ یون کلر افزایش پیدا می‌کند. در حالی که با افزوده شدن میکروسیلیس به طرح، مقاومت الکتریکی افزایش و نفوذ یون کلر در نمونه‌ها کاهش پیدا می‌کند. مشاهدات SEM نشان می‌دهد که ذرات میکروسیلیس هسته‌هایی برای هیدراسیون سیمان ایجاد کرده و در نتیجه ساختار همگن‌تر و منافذ کوچک‌تری را به وجود می‌آوردند.

واژگان کلیدی: دوام بتن، دمای اولیه بتن، خوردگی بتن، میکروسیلیس، ریز ساختار بتن.

۱- مقدمه

دوام سازه‌های بتنی در برابر خوردگی، به دلیل غلظت بالای یون کلرید، نگرانی عمده در برابر سازه‌ها در محیط خلیج فارس شمرده می‌شود. افزایش دمای اولیه و تأثیر آن بر ریزساختار بتن می‌تواند این نگرانی را تشدید و نرخ خوردگی بتن را به شدت افزایش دهد [۱]. به همین دلیل آیین‌نامه بتن ایران (آبا)، دمای ساخت بتن را در محیط خلیج فارس به ۳۲ درجه محدود می‌کند [۲]. ولی در عمل، اجرای این محدودیت دشوار و پرهزینه است و نگرانی‌های

فراوانی را از لحاظ دوام بلندمدت سازه‌ها در این منطقه و هزینه‌های تعمیراتی قابل تصور برای آن به وجود آورده است. بورگ^۱ نشان داده است که با افزایش دمای اولیه، مقاومت اولیه بتن افزایش و در درازمدت کاهش نشان می‌دهد. این کاهش مقاومت از سن ۷ روز به بعد مشاهده می‌شود [۳]. دمای اولیه بتن، دمای مخلوط بتنی پیش از گیرش و سخت شدن می‌باشد. در حالی که غالب مطالعات انجام شده در مورد تأثیر دما، آن را در زمان عمل‌آوری و آن هم بر مشخصات

می‌باشد. هم‌چنان که نفوذپذیری بتن بیش‌تر از حجم منافذ درشت متأثر است تا حجم کل تخلخل [۱۰]. مطالعات مورت و همکاران نیز نشان می‌دهد که در دمای بالا، تخلخل (کل تخلخل و نه تنها منافذ بزرگ‌تر) و حباب هوا، به‌ویژه در منطقه انتقالی تماس سنگدانه با خمیر، افزایش پیدا می‌کند و کریستال‌های درشت CH که عمود بر منافذ هستند، مشاهده می‌شوند [۱۱].

هم‌چنین تغییر ساختار منافذ خمیر - آن‌چنان که نتایج آزمایش‌های Soroka نشان می‌دهد - موجب افزایش نفوذپذیری می‌شود [۱۰]. چرا که حجم و ارتباط منافذ موینه (منافذ بزرگ) است که نفوذپذیری را تعیین کرده و با افزایش دما منافذ موینه افزایش پیدا می‌کند، در حالی‌که احتمالاً میزان تخلخل کاهش پیدا می‌کند [۱۷]. در این صورت با توجه به وابستگی مقاومت بتن در برابر خوردگی نسبت به نفوذپذیری آن [۱۸]، انتظار آن است که پارامترهای خوردگی از افزایش دمای ساخت به‌شدت تأثیر پذیرد. ولی نتایج بسیار اندکی از تأثیر دما، به‌ویژه دمای اولیه یا دمای ساخت بر پارامترهای خوردگی گزارش شده است.

این مقاله به بررسی تأثیر دمای اولیه بالا بر نفوذ یون کلر در بتن، به‌ویژه بتن‌های حاوی میکروسیلیس می‌پردازد. بررسی دمای اولیه بالا با ساخت نمونه‌ها در دماهای متفاوت تا زمان گیرش اولیه و نگهداری در شرایط یکسان در دمای محیط، به‌منظور شبیه‌سازی شرایط محیطی خلیج فارس انجام شده است. برای این منظور تغییرات ریز ساختار بتن در اثر افزایش دمای اولیه و تأثیر آن بر مشخصات دوامی بتن در برابر نفوذ یون کلر مطالعه شده است.

۲- مطالعات آزمایشگاهی

۲-۱- طرح اختلاط و مصالح مصرفی

در این تحقیق از ماسه‌گرد گوشه رودخانه‌ای با چگالی

مکانیکی بررسی بررسی قرار کرده‌اند، ولی به‌طور معمول فرض کنترل دما در مدت طولانی عمل‌آوری به‌صورت ثابت، چندان واقعی به‌نظر نمی‌رسد، بلکه می‌توان تنها انتظار کنترل دمای بتن و قالب در زمان ریختن و ساخت بتن را داشت. نویل نیز تأکید می‌کند که افزایش دما تا زمان گیرش و سخت شدن اولیه موجب افت مقاومت نمونه می‌شود، در حالی‌که پس از این زمان افزایش دما از قانون بلوغ تبعیت کرده و موجب توسعه مقاومت می‌گردد [۴].

با این همه مطالعات زیادی رفتاری مشابه را در کاهش مقاومت نهایی بتن با افزایش دمای عمل‌آوری نشان داده‌اند [۴-۶]. با افزایش دما در زمان ساخت یا عمل‌آوری، مقاومت نمونه‌ها را در سنین اولیه افزایش نشان می‌دهد ولی در مقابل با گذشت زمان مقاومت نهایی نمونه‌های ساخته شده در دمای بالاتر کاهش پیدا می‌کند [۷]، به‌نحوی که نمونه‌های ساخته شده در دمای پایین‌تر مقاومت بالاتری را به‌دست می‌آورند [۸]. مطالعات مورت^۱ و همکاران، نشان می‌دهد که با افزایش دمای سنگدانه‌ها از ۲۰ به ۷۰ درجه مقاومت فشاری ۱۵ درصد و مقاومت کششی ۱۷ درصد کاهش نشان می‌دهد [۹].

بررسی مطالعات انجام شده در این زمینه، علت کاهش مقاومت بتن را در تغییر ریزساختار بتن - در اثر افزایش دما - با دو عملکرد افزایش میزان منافذ بزرگ [۹-۱۷] و ناهمگونی در ساختار ژل نشان می‌دهد [۱۰].

از این رو تأثیر عمده تغییر دما بر ریز ساختار بتن را باید بر ساختار منافذ مشاهده کرد [۱۰]. با افزایش دما، حجم منافذ به دلیل افزایش نرخ هیدراسیون افزایش پیدا می‌کند ولی این کاهش حجم تخلخل با افزایش اندازه منافذ و درشت‌تر شدن آن‌ها همراه است. این ساختار درشت‌تر منافذ عامل اصلی در کاهش مقاومت درازمدت بتن

۲-۲- آزمایش‌های انجام شده

به منظور تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده براساس استاندارد BS 1881-108,110 و از آزمون‌های مکعبی ۱۰۰ میلی‌متری برای مقاومت فشاری استفاده شد. برای آزمایش مقاومت الکتریکی نیز از آزمون‌های مکعبی با همان ابعاد استفاده شد. برای انجام آزمایش نیم پیل با در نظر گرفتن نکات موجود در ASTM C876 از آزمون‌های استوانه‌ای شکل به قطر ۶۰ mm و ارتفاع ۱۵۰ mm که در محور مرکزی آن‌ها، میلگرد آجدار از فولاد ST 37، به قطر اسمی ۱۲ mm و طول ۱۴۰ mm قرار داده شده بود، استفاده شد. الکتروود کالومل اشباع (SCE)، به عنوان الکتروود مرجع استفاده شد که اختلاف پتانسیل آن با میلگردهای مدفون در آزمون‌ها از راه ولت‌متر اندازه‌گیری شده است.

برای تعیین ضربه انتشار یون کلرید از عمق‌های (۰-۵)، (۵-۱۰)، (۱۰-۱۵)، (۱۵-۲۰) و (۲۰-۳۰) میلی‌متر پودر بتن تهیه شد. پودرهای تهیه شده از هر عمق در پنج وجه سه آزمون هر نمونه با یکدیگر مخلوط شده و از آن در آزمایش تعیین غلظت یون کلرید محلول در آب استفاده شد. برای تعیین غلظت یون کلرید موجود در هر عمق از روش ASTM-C1218 (که بیانگر غلظت یون کلرید محلول در آب است) استفاده شد.

۲۶۳۰ kg/m³ و شن با حداکثر اندازه ذرات ۱۲/۵ mm (که براساس استاندارد ASTM C136-96 دانه‌بندی شده) استفاده شده است. فوق روان‌کننده استفاده شده از نوع GLENIUM 51P است. دماهای اولیه بررسی شده عبارت بودند از ۲۰ و ۳۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد. سیمان مصرفی از نوع پرتلند تیپ ۱/۴۲۵ و محصول کارخانه سیمان تهران و میکروسیلیس مصرف شده در این تحقیق محصول کارخانه صنایع فرآلیاز ایران (ازنا) بوده که چگالی ذرات آن ۲۲۰۰ kg/m³ است. مشخصات شیمیایی میکروسیلیس در مقایسه با سیمان مصرفی در جدول ۱ آمده است.

جدول (۱) مشخصات شیمیایی سیمان و میکروسیلیس مصرفی

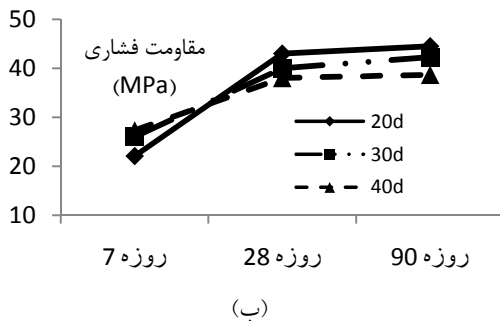
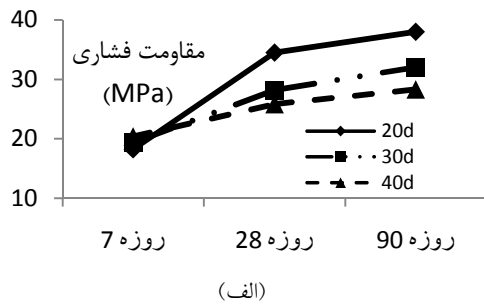
عنوان (درصد)	SiO ₂	AL ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
سیمان	۲۱/۳۸	۴/۴۵	۳/۵۱	۶۳/۰۶	۳/۲	۱/۸
میکروسیلیس	۹۳/۶	۱/۳	۰/۹	۰/۵	۱/۰	۰/۴۱

بتن مرجع با نام O و مخلوط حاوی میکروسیلیس با نام M مشخص شدند و عدد پس از آن، نشان‌دهنده دمای اولیه بتن مربوط به آن است. نسبت آب به سیمان برای تمامی مخلوط‌ها ثابت و برابر ۰/۴۵ و عیار سیمان برابر ۴۰۰ kg/m³ در نظر گرفته شد. ترکیب مخلوط‌ها در جدول ۲ آمده است.

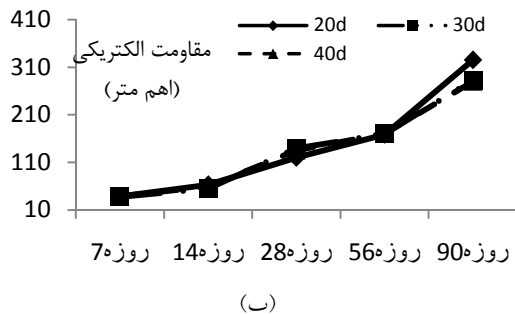
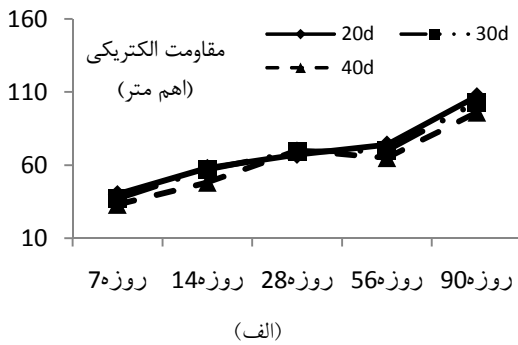
جدول (۲) طرح مخلوط نمونه‌ها

اسلامپ	دمای اولیه °C	فوق روان‌کننده	میکروسیلیس	شن	ماسه	آب آزاد	سیمان	W/C	کد طرح اختلاط
									[mm]
۸۰	۴۰	۰/۳۰	۰	۶۹۶/۹۵	۹۸۴/۳	۱۹۹/۴۵	۴۰۰	۰/۴۵	O-40d
۸۰	۳۰	۰/۲۴	۰	۶۹۶/۹۵	۹۸۴/۳	۱۹۹/۴۵	۴۰۰	۰/۴۵	O-30d
۸۰	۲۰	۰/۲۰	۰	۶۹۶/۹۵	۹۸۴/۳	۱۹۹/۴۵	۴۰۰	۰/۴۵	O-20d
۸۰	۴۰	۰/۹۲	۲۸	۶۹۴/۳۲	۹۸۱/۷۵	۱۹۸/۵۶	۳۷۲	۰/۴۵	M-40d
۸۰	۳۰	۰/۷۵	۲۸	۶۹۴/۳۲	۹۸۱/۷۵	۱۹۸/۵۶	۳۷۲	۰/۴۵	M-30d
۸۰	۲۰	۰/۶۸	۲۸	۶۹۴/۳۲	۹۸۱/۷۵	۱۹۸/۵۶	۳۷۲	۰/۴۵	M-20d

ساختار منافذ می‌باشد. با افزایش دما منافذ بزرگ افزایش یافته و آب منفذی به‌عنوان الکترولیت خوردگی افزایش پیدا می‌کند که در نتیجه مقاومت الکتریکی بتن کاهش را نشان می‌دهد.



شکل (۱) مقاومت‌های فشاری، الف- بتن مرجع؛ ب- میکروسیلیسی



شکل (۲) مقاومت الکتریکی، الف- بتن مرجع؛ ب- میکروسیلیسی

۳- نتایج و تحلیل آن‌ها

۳-۱- خواص مکانیکی

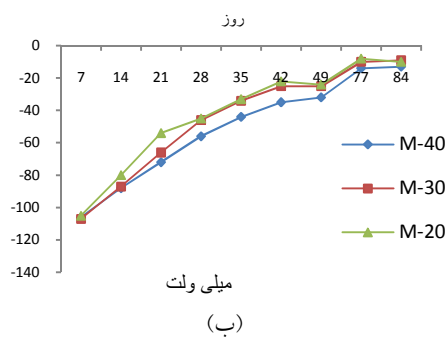
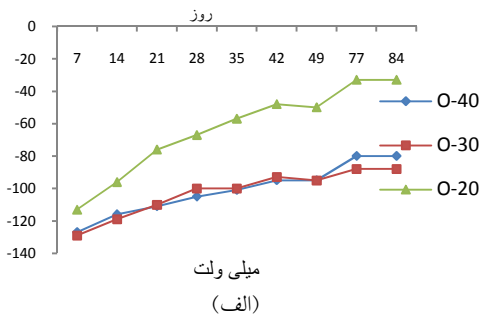
شکل ۱، نمایانگر نتایج مقاومت فشاری بتن مرجع و میکروسیلیسی است. همان‌گونه که پیش‌بینی می‌شد، با افزایش دمای اولیه بتن سرعت هیدراسیون و کسب مقاومت‌های اولیه افزایش پیدا می‌کند ولی به‌دلیل سرعت بالای تشکیل محصولات هیدراسیون، فرصت کافی برای پخش شدن یکنواخت این محصولات وجود نداشته [۱۱] و تجمع آن‌ها حول ذرات سیمان مانع از هیدراسیون کامل ذرات سیمان می‌شود که تخلخل بیش‌تری را در بتن ایجاد می‌کند [۱۰]. از این رو در مقایسه با دماهای اولیه پایین‌تر، در تمام مخلوط‌ها، بتن مقاومت پایین‌تری در سنین بالاتر خواهد داشت.

در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس، میکروسیلیس با کریستال‌های هیدروکسید کلسیم ترکیب می‌شود و آن را به ترکیبات سیلیکات کلسیم پایدار تبدیل می‌کند. هم‌چنین میکروسیلیس چسبندگی مخلوط بتن و در نتیجه چسبندگی بین خمیر سیمان و سنگدانه را افزایش می‌دهد که این چسبندگی باعث همگن شدن و پایداری بتن می‌شود. بخشی از کسب مقاومت در سنین اولیه، ناشی از مقداری تسریع در هیدراسیون سیمان پرتلند است و کسب مقاومت در سنین بعدی- که می‌تواند اساسی باشد- بیش‌تر به دلیل واکنش پوزولانی است که باعث بهبود ساختار منافذ با حذف جزء ضعیف هیدروکسید کلسیم و جایگزینی آن با جزء قوی‌تر سیلیکات کلسیم هیدراته می‌شود.

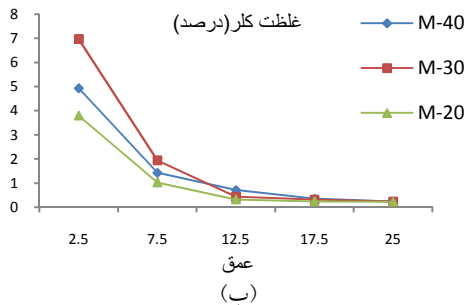
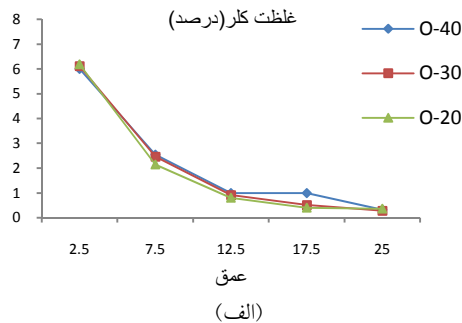
۳-۲- مقاومت در برابر خوردگی

شکل ۲ نشان‌دهنده تأثیرپذیری مقاومت الکتریکی بتن از تأثیر دما است. با افزایش دما، مقاومت الکتریکی نمونه‌ها کاهش پیدا می‌کند. این پدیده به‌ویژه از سنین ۹۰ روزه به بالا قابل لمس است. مشاهده این پدیده به نوعی اثبات‌کننده تأثیر افزایش دما بر

موئینه، نفوذ یون کلر به بتن سخت تر می شود.



شکل (۳) تغییرات پتانسیل های نیم پیل (الف) بتن مرجع؛ (ب) میکروسیلیسی



شکل (۴) پروفیل یون کلر، الف- بتن مرجع؛ ب- میکروسیلیسی

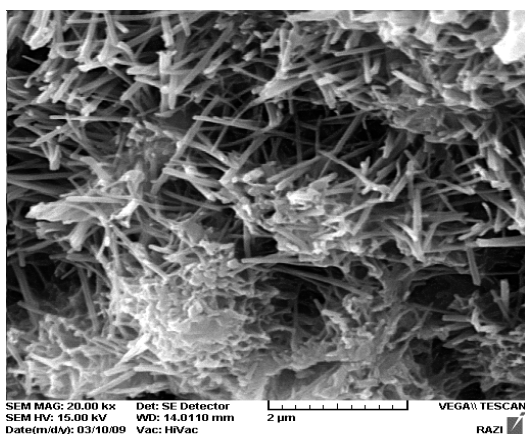
شکل ۲-ب نشان می دهد - در حالی که عکس این روند را با افزودن میکروسیلیس می توان دید- که مقاومت الکتریکی نمونه های حاوی میکروسیلیس به مراتب بالاتر از نمونه های مشابه OPC می باشند. با توجه به واکنش میکروسیلیس با بلورهای بزرگ و ناپایدار $Ca(OH)_2$ و تبدیل آن ها به بلورهای کوچک، حجم فضاها خالی موجود در بتن کم شده و تخلخل بتن کم می شود. در حقیقت واکنش پوزولانی میکروسیلیس باعث کوچک شدن منافذ و چسبندگی بیشتر مخلوط بتن می شود. در این صورت حفرات موئینه کم تر شده و مقاومت الکتریکی بتن افزایش پیدا می کند.

شکل ۳ تغییرات پتانسیل های نیم پیل میلگردهای قرار گرفته در آزمون های بتنی را در طول زمان و در دماهای مختلف نشان می دهد. در این شکلها پتانسیل های نیم پیل میلگردها نسبت به الکتروود مرجع کالومل اشباع (SCE) می باشند. همان گونه که از شکل ۳ مشخص است، مقدار اختلاف پتانسیل بین میلگرد و سطح بتن در تمامی نمونه ها با گذشت زمان تقریباً صعودی است. در نمونه های OPC، مقدار اختلاف پتانسیل خوردگی دمای ۳۰ و ۴۰ درجه تقریباً بر هم منطبق و بیش تر از دمای ۲۰ درجه می باشد.

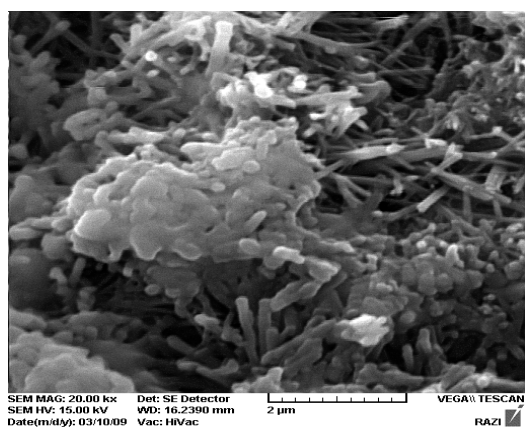
ولی در نمونه های میکروسیلیسی اختلاف پتانسیل خوردگی دمای ۴۰ درجه بیش ترین و دمای ۲۰ درجه کم ترین می باشد. مقایسه پروفیل نفوذ یون کلر در شکل ۴، نیز نشان دهنده همین نتیجه گیری است.

آنچنان که در شکل ۵ و جدول ۳ مشاهده می شود، تغییرات ضریب انتشار نسبت به دما در مورد نمونه های میکروسیلیسی به شدت کم تر از نمونه های مشابه در بتن های معمولی است چرا که با توجه به خاصیت چسبندگی و عمل کردن میکروسیلیس به عنوان یک پرکننده سیمان، با پر شدن منافذ به وسیله محصولات واکنشی میکروسیلیس با بتن و کم شدن تخلخل ناحیه انتقالی و دیگر حفرات

که در عکس ۲-الف مشاهده می‌شود- رشد کریستال‌ها کاهش پیدا کرده و بافت آمورف‌تری مشاهده می‌شود. با افزایش عمر نمونه‌ها و توسعه واکنش هیدراسیون ساختار متراکم‌تر با محصولات C-S-H مشاهده می‌گردد. در حالی که در نمونه‌های ساخته شده در دمای بالاتر ۳۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد، منافذ رشد یافته و به‌ویژه در عکس ۴ الف برای نمونه‌های ساخته شده در دمای ۴۰ درجه، منافذ بزرگ به همراه کریستال‌های عمود بر سطح سنگدانه مشاهده می‌شود. به همین دلیل کاهش مقاومت فشاری بتن با دما دیده می‌شود که در این صورت ضریب انتشار یون کلر تا $214 \text{ mm}^2/\text{year}$ افزایش پیدا می‌کند.

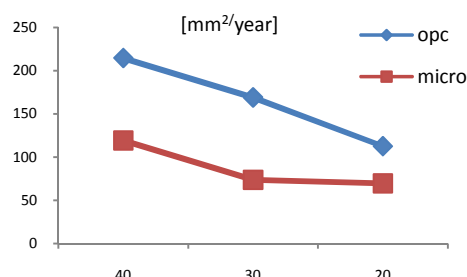


الف- بتن پایه ۳ روزه ۲۰ درجه سانتی‌گراد



ب- بتن میکروسیلیسی ۳ روزه ۲۰ درجه سانتی‌گراد

عکس (۱) تصویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه‌های ۳ روزه در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد



شکل (۵) ضریب انتشار یون کلرید بتن مرجع و میکروسیلیسی

جدول (۳) ضرایب انتشار، C_s محاسباتی و ضرایب همبستگی خطوط برازش شده از داده‌های پروفیل کلرید

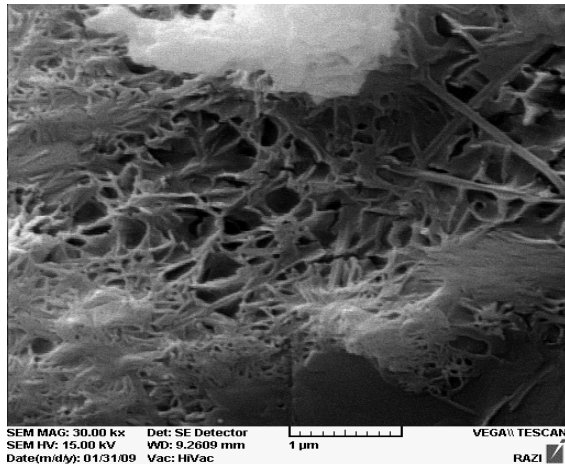
نام طرح	D [mm ² /year]	C_s محاسباتی	R^2
O-40d	۲۱۴/۵	۷/۷۱	۰/۸۷۲۵
O-30d	۱۶۸/۹۷	۸/۷۵	۰/۹۴۵۳
O-20d	۱۱۲/۶۶	۱۰/۷۳	۰/۹۸۲۸
M-40d	۱۱۹/۲۱	۸/۰۲	۰/۹۳۵
M-30d	۷۳/۸۷	۱۵/۳۹	۱
M-20d	۶۹/۸۲	۸/۵۴	۱

D: ضریب انتشار یون کلرید بتن،
R2: ضریب همبستگی خط برازش شده

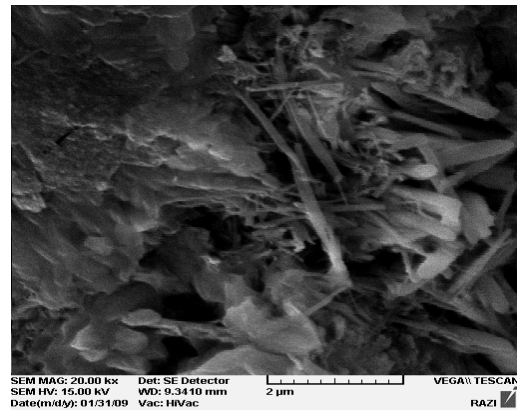
۳-۳- بررسی ریزساختار

همان طور که عکس‌های میکروسکوپی به‌خوبی نشان می‌دهد، در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس ساختار متراکم‌تر با منافذ کوچک‌تر مشاهده می‌شود که در عمل پوشش بتنی با کیفیت‌تری را در مقابل نفوذ یون کلر به وجود می‌آورد. از این رو تأثیر افزایش دما را به‌شدت کاهش داده و اختلاف مقادیری را که بین دمای ۲۰ و ۴۰ در بتن OPC مشاهده می‌شود، در این حالت وجود ندارد. آن‌چنان که در عکس ۱ الف به‌خوبی مشهود است، بتن پایه ساخته شده در دمای ۲۰ درجه ساختاری متخلخل با کریستال‌های مشهود ایتترگایت و شش ضلعی هیدروکسید کلسیم دارد. ولی با افزایش عمر نمونه‌ها تا ۹۰ روز- همان‌طور

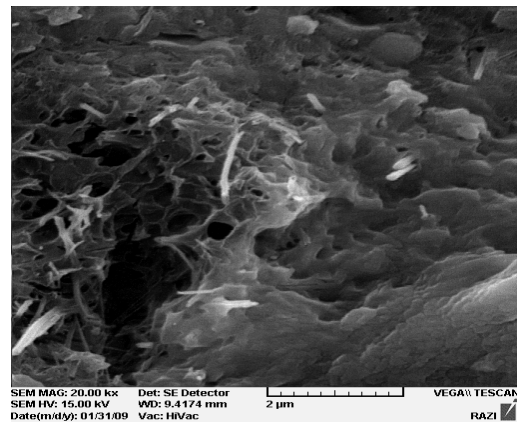
شده را در دماهای متفاوت ارائه می‌دهد.



الف- بتن پایه ۹۰ روزه ۳۰ درجه سانتی‌گراد

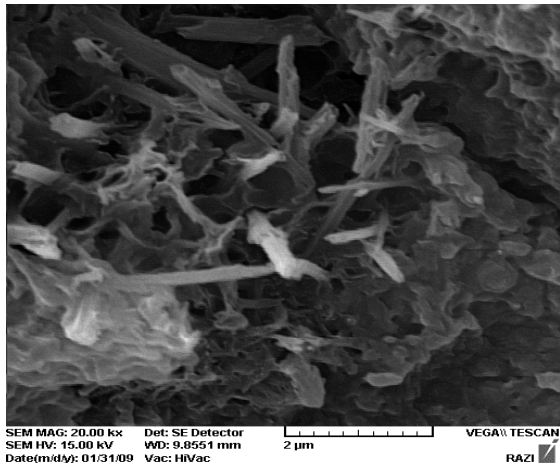


الف- بتن پایه ۹۰ روزه ۲۰ درجه سانتی‌گراد



ب- بتن میکروسیلیسی ۹۰ روزه ۲۰ درجه سانتی‌گراد

عکس (۲) تصویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه‌های ۹۰ روزه در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد



ب- بتن میکروسیلیسی ۹۰ روزه ۳۰ درجه سانتی‌گراد

عکس (۳) تصویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه‌های ۹۰ روزه در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد

۴- نتیجه‌گیری

افزایش دمای اولیه بتن در زمان ساخت و ریختن، موجب افزایش سرعت هیدراسیون و در نتیجه توزیع نامتوازن محصولات در مخلوط می‌شود. بررسی عکس‌های میکروسکوپی به وضوح نشان‌دهنده منافذ بزرگ‌تر و مرتبط در ساختار بتن با افزایش دما است که این موضوع منجر به افزایش نفوذ یون کلر و کاهش مقاومت نمونه‌ها در

با افزوده شدن میکروسیلیس به نمونه‌ها ساختار بتن به نحو چشمگیری بهبود یافته است. عکس ۲-ب، به خوبی ساختاری آمورف با ترکیبات C-S-H را در دمای ۲۰ درجه نشان می‌دهد. اندازه منافذ کاهش یافته است و دلیل کاهش عمق نفوذ یون کلر و پتانسیل الکتریکی را بیان می‌کند. با افزایش دمای بتن تا ۴۰ درجه، کریستال‌ها رشد پیدا کرده و حجم منافذ نسبت به حالتی که نمونه در دمای ۲۰ درجه ساخته شده است، افزایش پیدا می‌کند ولی در مقایسه با نمونه‌های بتن پایه ساخته شده در همان دما، اندازه منافذ کوچک‌تر می‌باشد. این امر به خوبی علت اختلاف کم مقاومت مکانیکی و عمق نفوذ نمونه‌های حاوی میکروسیلیس ساخته

and curing on chloride penetration into concrete exposed to editerranean Sea climate; *ACI Mater. J.* 84 (4) (1990) 333– 339 (Jul–Aug).

[۲] آیین‌نامه بتن ایران (آبا); سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۸۳.

[3] Burg, Ronald G.; The influence of Casting and curing temperature on the properties of fresh and hardened concrete; *Research and Development Bulletin RD113*, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, U.S.A., 1996.

[4] Neville A. M.; "Properties of concrete"; Longman, ISBN 0-582-23070-5

[5] Burg R. G.; "The influence of casting and curing temperature on the properties of fresh and hardened concrete"; *Research and Development Bulletin RD113T*, PCA R&D Serial No. 2023, 1996.

[6] Mouret M, etc; "Micro structural features of concrete in relation to initial temperature SEM and ESEM characterization"; *Cement and Concrete Research*, No.29, pp. 369–375, 1999.

[7] Abdullah A, Almusallam; "Effect of enviromental conditions on the properties of fresh and hardened concrete"; *Cement and Concrete composites*, Vol. 23, pp. 353-361, 2001.

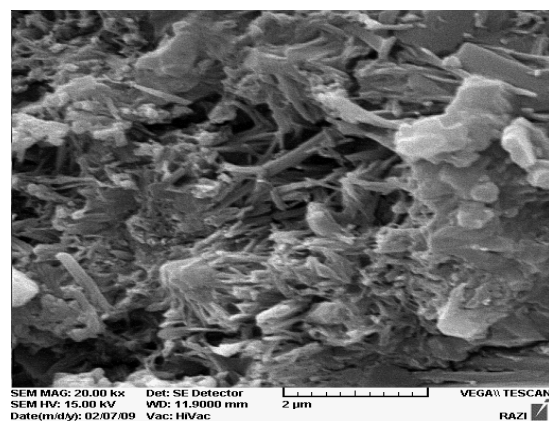
[8] Ortiz J., Agullo L, Garcia T, ; "Influence of environmental temperature on the concrete compressive strength: simulation of hot and weather conditions"; *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, pp. 1970-1979, 2005.

[9] Mouret M., Bascoul A., Escadeillas G.; "Drops in concrete strength in summer to the aggregate temperature"; *Cement and Concrete Research*, 27, No. 3, pp. 345-357, 1997.

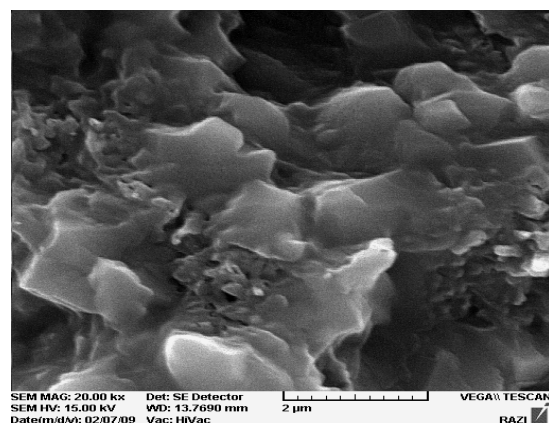
[10] Soroka I.; "Concrete in hot environments"; *E & FN Spon, an imprint of Chapman & Hall*, 1993

[11] Mouret M., Bascoul A., Escadeillas G.; "Microstructural feature of concrete in relation to initial temperature- SEM and ESEM characterization"; *Cement and Concrete Research*, 29, pp. 369-375, 1999.

برابر خوردگی می‌شود. با افزودن میکروسیلیس به مخلوط، اندازه و توزیع منافذ بهبود پیدا می‌کند، در نتیجه تأثیر افزایش دما بر پارامترهای نفوذ کلر و خوردگی کاهش می‌یابد. از این رو مشاهده می‌شود که اختلاف رفتار خوردگی (ضریب نفوذ یون کلر و پتانسیل الکتریکی) نمونه‌های ۴۰ درجه با نمونه‌های حاوی میکروسیلیس ساخته شده در ۲۰ درجه- نسبت به آن‌چه در مورد نمونه‌های پایه مشاهده شد- کاهش پیدا می‌کند.



الف- بتن پایه ۹۰ روزه ۴۰ درجه سانتی‌گراد



ب- بتن میکروسیلیسی ۹۰ روزه ۴۰ درجه سانتی‌گراد

عکس (۴) تصویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه‌های ۹۰ روزه در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد

۵- منابع

[1] Jaegermann, C.; Effect of water- cement ratio

- [16] Ke-fang Tan, Nichols John M, "Performance of concrete under elevated curing temperature", *Journal of wuhan university of technology-Material science edition*, Vol. 19, No. 3, Sept. 2004.
- [17] Klingstedt G., Fjallberg L.; "Cement hydration and Microstructure at elevated temperature (A Literature study)"; Swedish Cement & Concrete Research Institute, Stockholm, 1993.
- [18] Khatib J.M., Mangat P.S.; "Influence of high-temperature and low-humidity curing on chloride penetration in blended cement concrete"; *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, pp.1743-1753, 2002.
- [12] Kjellson K. O., Detwiler R. J., Gjro O. E.; "Development of microstructure in plain cement pastes hydrated at different temperature"; *Cement and Concrete Research*, Vol. 21, pp. 179-189, 1991.
- [13] Verbeck G.J., Copeland L.E.; "Some physical and chemical aspects of high pressure steam curing"; *Menzel Symp. On High Pressure Curing*. (ACI Spec. Pub. SP32). ACI, Detroit, MI, USA, pp. 1-13, 1972.
- [14] Kjellson K. O., Detwiler R. J.; "Reaction kinetics of portland cement mortars hydrated at different temperature"; *Cement and Concrete research*, Vol. 12 (1), pp. 12-20, 1992.
- [15] Kjellson K. O.; "Heat curing and post-heat curing regimes of high-performance concrete: Influence on microstructure and C-S-H composition"; *Cement and Concrete research*, Vol. 26, No. 2, pp. 295-307, Feb. 1996.