

Experimental study of the effect of xanthan gum on the durability of self-compacting concrete containing Micro and Nano silica in chloride environment

Alireza Masoumi¹, Reza farokhzad^{2*}, Seyed Hooman Ghasemi³

1- PhD Candidate, Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

2- Assistant professor, Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

3- Assistant professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Rowan University, USA.

ABSTRACT

The durability of concrete is one of the main criteria in the implementation and operation of concrete structures exposed to environmental risks. One of the most important causes of rebar corrosion is the presence of chloride ions. Therefore this paper investigated the effect of using xanthan gum, which is a type of polysaccharide, on the durability characteristics of self-compacting concrete. By selecting step xanthan additives in the amount of 0.2% by weight of cement, Silica fume in the amount of 5, 7, and 10% by weight of cement, and Nano silica in the amount of 2, 3, and 4% by weight of cement, mechanical and durability characteristics have been evaluated experimentally. In this paper, by controlling the rheological properties of self-compacting concrete, the parameters of migration coefficient; Chloride penetration refers to the depth to which chloride ions from the environment penetrate into the concrete; electrical specific strength and compressive strength of concrete were evaluated. Self-Compacting Concrete Benefits and the expansion of its application, multi-parameter evaluation is needed to be considered. The results indicate that xanthan gum additive improves viscosity, reduces slump flow, and reduces the separation of self-compacting concrete, and its effect on improving durability characteristics such as specific strength, migration coefficient, and penetration depth of chlorine ion, combined with each other is better than used separately. Microstructural images indicated the formation of a stable composition in the three-additive design and xanthan gum, Silica fume, and Nano-silica were evaluated to provide the desired viscosity, strength, and durability of self-compacting concrete, respectively.

ARTICLE INFO

Receive Date: 13 February 2022

Revise Date: 20 April 2022

Accept Date: 02 June 2022

Keywords:

self-compacting concrete
corrosion
migration coefficient of
chloride ions
Chloride penetration
xanthan gum

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.329497.2728>

*Corresponding author: Reza farokhzad

Email address: R.farokhzad@qiau.ac.ir

بررسی آزمایشگاهی تأثیر زانتان گام بر دوام بتن خودتراکم حاوی میکرو و نانوسیلیس در محیط کلریدی

علیرضا معصومی^۱، رضا فرخ زاد^{۱*}، سیده هومن قاسمی^۲

۱- دانشجوی دکتری، گروه عمران-مدیریت ساخت، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آبرن، آلاباما، آمریکا

چکیده

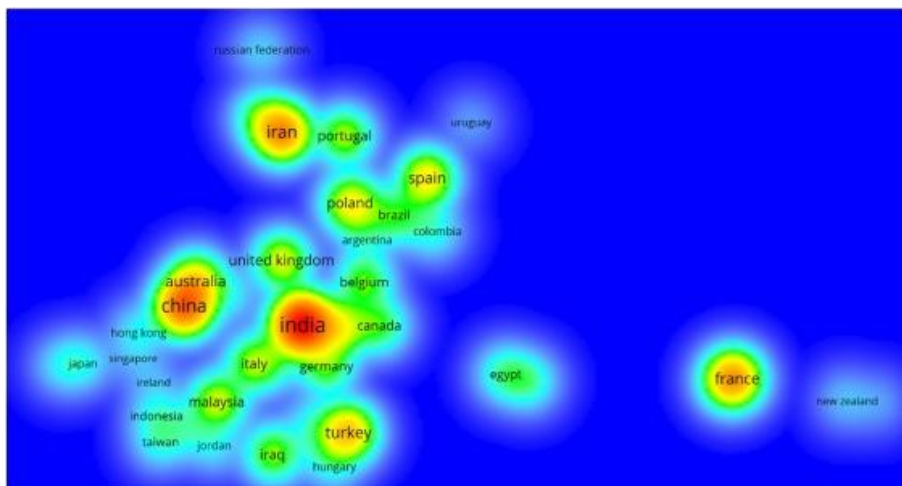
دوام بتن یکی از معیارهای اصلی در اجرا و بهره‌برداری از سازه‌های بتنی در معرض مخاطرات محیطی است. یکی از این مخاطرات خوردگی میلگرد در مجاورت کلرید است. با توجه اهمیت موضوع، در این مقاله تأثیر استفاده از زانتان گام که نوعی پلی‌ساکارید است بر مشخصات دوامی بتن خودتراکم ارزیابی شده است. با انتخاب مواد مکمل زانتان گام به مقدار ۰/۲ درصد وزن سیمان، میکرو سیلیس به مقادیر ۵، ۷ و ۱۰ درصد وزنی سیمان و نانو سیلیس به مقادیر ۲، ۳ و ۴ درصد وزنی سیمان، مشخصات مکانیکی و دوامی به صورت آزمایشگاهی ارزیابی شده است. در این مقاله ضمن رعایت خواص رئولوژی بتن خودتراکم، پارامترهای ضریب مهاجرت و میزان عمق نفوذ یون کلر، مقاومت ویژه الکتریکی و مقاومت فشاری بتن مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به اهمیت بتن خودتراکم و گسترش کاربرد آن، ارزیابی چند پارامتری ضروری است لذا در این مطالعه این ارزیابی با استفاده از ماده جدید زانتان گام به‌عنوان اصلاح‌کننده ویسکوزیته به همراه دو افزودنی دیگر به صورت ترکیبی و مجزا باهدف تعیین اولویت تأثیر مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که افزودنی زانتان گام باعث بهبود لزجت، کاهش افت اسلامپ و کاهش جاداشدگی بتن خودتراکم شده و تأثیر آن بر بهبود مشخصات دوامی از قبیل مقاومت ویژه، ضریب مهاجرت و عمق نفوذ یون کلر در حالت ترکیبی بهتر از استفاده مجزا از آن بوده است. تصاویر ریزساختاری گویای شکل‌گیری ترکیب پایدار در طرح ترکیب سه افزودنی بوده و زانتان گام، میکرو سیلیس و نانو سیلیس به ترتیب برای تأمین لزجت، مقاومت و دوام بتن خودتراکم مطلوب ارزیابی می‌شود.

کلمات کلیدی: بتن خودتراکم، خوردگی، ضریب مهاجرت یون کلر، نفوذپذیری، زانتان گام

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.329497.2728	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.329497.2728	۱۴۰۱/۱۲/۲۹	۱۴۰۱/۰۳/۱۲	۱۴۰۱/۰۳/۱۲	۱۴۰۰/۰۱/۳۱	۱۴۰۰/۱۱/۲۴
				نویسنده مسئول:		
				رضا فرخ زاد		
				R.farokhzad@qiau.ac.ir	پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

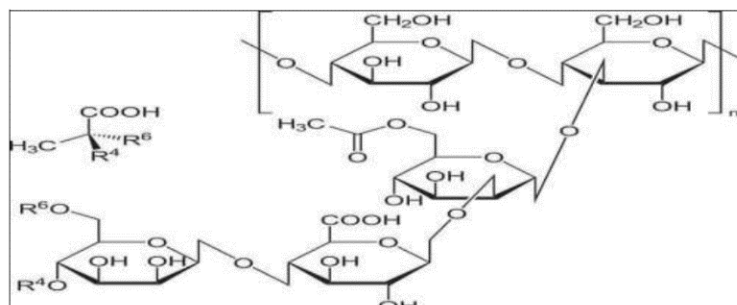
بتن در مفهوم وسیع، به هر ماده یا ترکیبی که از یک ماده چسبنده با خاصیت سیمانی شدن تشکیل شده باشد گفته می‌شود. این ماده چسبنده عموماً حاصل فعل و انفعال سیمان‌های هیدرولیکی و آب می‌باشد. بتن از پرکاربردترین مصالح ساختمانی است. کاربرد بتن را می‌توان در تمامی کارهای عمرانی از قبیل ساختمان، مخازن، نیروگاه‌ها، سازه‌های دریایی، جاده و راه‌ها، مسیرهای انتقال آب و سدها مشاهده کرد. علاوه بر این، مشکلاتی مانند طراحی‌های پیچیده، تراکم آرماتور در اعضای سازه، کاهش تعداد نیروی کار ماهر، رشد سریع صنعت ساخت‌وساز و کیفیت آن، معرفی بتن خودتراکم (SCC) را برای غلبه بر این مشکلات ضروری کرد. بتن خودتراکم برای اولین بار در دهه ۱۹۸۰ در ژاپن به‌عنوان روشی برای تولید بتن باکیفیت معرفی شد، محققان ژاپنی در سال ۱۹۸۶ در دانشگاه توکیو ابتدا آن را تولید و اوزاوا و همکاران و تیم تحقیقاتی او از دانشگاه توکیو اولین مدل بتن خودتراکم را در سال ۱۹۸۹ ارائه کردند [۱]. تفاوت‌های اصلی بین بتن خودتراکم و بتن معمولی از نظر ترکیب وجود دارد، اولین مورد، استفاده از محتوای کمتر سنگ‌دانه درشت است که معمولاً به‌منظور به حداقل رساندن تمایل به جداسدگی انجام می‌شود، دوم محتوای ذرات ریز بیشتری به‌ویژه با ریزدانه‌های کمتر از $125 \mu\text{m}$ دارد و سوم استفاده از افزودنی‌های فوق روان کننده (SPA) برای دستیابی به کارایی لازم که برای بتن خودتراکم ضروری است، این سه شرط برای تولید مخلوطی با نسبت ویسکوزیته-جریان پذیری مناسب و بدون امکان جدا شدن اجزای بتنی، اجازه می‌دهد مخلوط تازه جاری شود [۲]. تاکنون مطالعات زیادی در زمینه بهبود کیفیت بتن انجام شده که اکثر آن‌ها تغییر در ترکیب بتن را بررسی کرده‌اند، باین‌حال استفاده از افزودنی‌ها و همچنین جایگزین کردن مصالح متداول مورد استفاده در بتن با مصالح جدید همیشه مورد توجه بوده است. استفاده از مواد سیمانی-پوزولانی در تولید بتن خود تراکم به‌عنوان جایگزینی جزئی سیمان به دلایل مختلفی از جمله کاهش هزینه تولید به دلیل ارزان‌تر بودن مواد سیمانی، پایداری بتن به دلیل کاهش مصرف سیمان و همچنین حفظ منابع طبیعی ضروری است، اگرچه استفاده از بتن خود تراکم در ساخت‌وسازهای امروزی از زمان شروع آن به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است، اما هنوز به کاربردهای خاصی محدود می‌شود [۳]. شناخته‌شده‌ترین مواد جدیدی که توانسته‌اند خواص مکانیکی و فیزیکی بتن را ارتقا دهند، مواد نانو و میکرو هستند که طبق آزمایش‌های انجام شده استفاده از ترکیب نانو و میکرو سیلیس به‌طور هم‌زمان در بتن معمولی موجب افزایش مقاومت فشاری و دوام بتن گردیده است [۴]. همچنین در بتن خودتراکم با توجه به خصوصیاتشان در سطوح بسیار ریز توانسته‌اند در خصوصیات مقاومت فشاری، خمشی و دوامی تحولی بزرگ ایجاد کنند. SCC دارای جریان پذیری بالا، قابلیت عبور و مقاومت در برابر جداسدگی است. ویژگی‌های دوام آن با انجام آزمایش جذب آب اشباع شده و نفوذ کلرید از طریق بررسی سریع برای همه انواع نسبت‌های اختلاط SCC قابل اجراست و افزودن نانو سیلیس خواص دوام را با جذب کمتر آب و کاهش عمق کلرید می‌تواند افزایش دهد [۶]. بهبود رفتار بتن با انواع مختلف نانو و تأثیرگذاری هر کدام از جمله نانو آلومین، نانو سیلیس و نانو تیتانیوم نیز مورد آزمایش قرار گرفته است [۷]. همچنین ترکیبات دیگر با میکرو سیلیس مانند بررسی خواص رئولوژی و مقاومت فشاری در بتن معمولی به همراه ژئولیت و میکرو سیلیس در سنین مختلف و همچنین در بتن خودتراکم حاوی میکرو سیلیس و پودر پامیس و بهبود آن تأیید گردیده است [۸، ۹]. استفاده از میکرو سیلیس به‌تنهایی نیز بسیاری از خواص بتن از جمله مقاومت فشاری و خمشی خزش و انقباض بتن را بهبود می‌بخشد همچنین استفاده تنهایی از آن در بتن خودتراکم باعث افزایش کارایی، بهبود رئولوژی و عملکرد دوامی به استناد نتایج آزمایش‌های RCPT و SEM گردید [۱۰، ۱۱]. تلاش‌های زیادی برای یافتن دلایل بهبود خواص مکانیکی بتن خودتراکم انجام شده است. شکل ۱ تراکم قابل توجهی از کشورهایی را نشان می‌دهد که SCC را از سال ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۹ مورد بررسی قرار داده‌اند. آمار علم‌سنجی برای صنایع ساختمانی برای شناسایی کاربرد فزاینده SCC حیاتی است. این مجموعه از پایگاه داده از موتور جستجوی Scopus که قابل‌اعتمادترین داده‌های ثبت شده برای جامعه علمی است، جمع‌آوری شده است [۱۲]. ارزیابی جامع و چند پارامتری تأثیر این افزودنی‌ها بر مشخصات دوامی بتن خودتراکم در این مقاله مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این تحقیق تأثیر افزودنی دیگری به نام زانتان گام در خواص بتن خودتراکم به همراه نانو و میکرو سیلیس مورد ارزیابی قرار گرفته است.



شکل ۱: تراکم مطالعات SCC در کشورهای مختلف از ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۹ [۱۲]

۱-۱ ساختار شیمیایی و فیزیکی زانتان گام

زانتان گام که در سال ۱۹۵۰ کشف شد و یک پلی ساکارید با وزن مولکولی بالا است که توسط فرآیندهای تخمیر مختلف تشکیل می‌شود و خواص رئولوژیکی خارق‌العاده، آن را به یک عامل تثبیت‌کننده بسیار مفید برای سیستم‌های مبتنی بر آب تبدیل می‌کند و کاربردهای بسیار زیادی از صنایع غذایی گرفته تا حفاری نفت دارد [۱۳]. پودر صمغ زانتان به رنگ سفید تا کرم‌رنگ محلول در آب سرد و گرم است، اما در اکثر حلال‌های آلی نامحلول است. محلول‌های صمغ زانتان در مقایسه با سایر محلول‌های پلی ساکارید حتی در غلظت‌های پایین، ویسکوزیته بالایی از خود نشان می‌دهند. این خاصیت آن را به‌عنوان قوام دهنده و تثبیت‌کننده مؤثرتر می‌کند. محلول‌های صمغ زانتان بسیار شبیه پلاستیک هستند [۱۴]. رفتار شبه پلاستیک صمغ زانتان کیفیت حسی را در محصولات نهایی افزایش می‌دهد، پردازش را آسان می‌کند و قابلیت جریان پذیری خوب را تضمین می‌کند. محلول‌های صمغ زانتان دارای pH متغیر هستند یعنی در هر دو شرایط اسیدی و قلیایی پایدار هستند. علاوه بر این، صمغ زانتان دارای پایداری حرارتی است که باعث برتری آن نسبت به سایر پلی ساکاریدهای محلول در آب می‌شود. صمغ زانتان بی‌مزه است [۱۵]. صمغ زانتان گام توسط تخمیر هوازی کشت خالص کربوهیدرات با باکتری *Xanthomonas campestris* تولید می‌شود [۱۶]. یک پلی ساکارید با زنجیره بلند با تعداد زیادی زنجیره جانبی تری ساکارید است. زنجیره اصلی شامل β -(۱،۴) و (۱،۳) واحدهای D-گلوکز مرتبط (شکل ۲) می‌باشد.



شکل ۲: ساختار شیمیایی زانتان گام [۱۴].

۲- مصالح مصرفی، برنامه ساخت و آزمایش ها

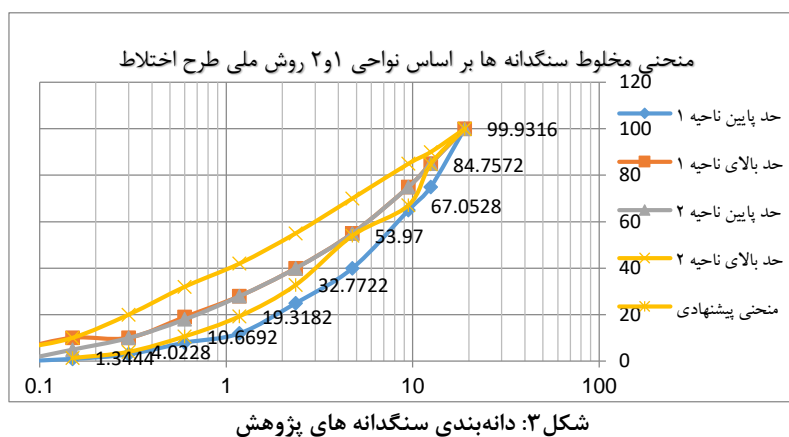
۲-۱ مصالح مصرفی

سیمان مورد استفاده از تیپ ۲ کارخانه سیمان هگمتان تأمین شده است. آنالیز فیزیکی و شیمیایی مربوط به آن در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: آنالیز شیمیایی و فیزیکی سیمان تیپ ۲

مقایسه با استاندارد	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	LOI	C ₃ A
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
ISIRI-389	min20	Max6	max ۶	***	Max5	max3	***	***	max3	max8
EN-197-1 (32.5R)	***	***	***	***	***	Max3.5	***	***	Max5	***
Hegmatan Cement	۲۱,۲۷	۴,۹۵	۴,۰۳	۶۲,۹۵	۱,۵۵	۲,۲۶	۰,۶۵	۰,۴۹	۲,۱۱	۶,۳۰

سنگدانه مصرفی با حداکثر اندازه ۱۹ میلی متر از شرکت عمران بتن اکباتان در همدان از معدن سیدان تهیه شده که دانه بندی سنگدانه ها در شکل ۳ نشان داده شده است. پودر سنگ به میزان حدود ۱۰ درصد وزنی مصالح سنگی به عنوان ماده اصلاح کننده لزجت مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور تنظیم کارایی از فوق روان کننده پلی کریوکسیلاتی استفاده شد. مقادیر مصالح ثابت مصرفی در هر مترمکعب بتن شامل ماسه ۱۰۳۲ کیلوگرم، شن ریز ۲۵۳ کیلوگرم، شن درشت ۱۷۵ کیلوگرم، پودر سنگ ۱۵۰ کیلوگرم، آب ۱۸۰ کیلوگرم می باشد و مقدار سیمان و سایر افزودنی ها که بر اساس طرح ها متغیر بود در جدول ۵ ارائه شده است.



شکل ۳: دانه بندی سنگدانه های پژوهش

نانوسیلیس مورد استفاده از ایساتیس یزد، میکرو سیلیس مورد استفاده نیز از کلینیک بتن ایران (متعلق به شرکت فروآلیاژ ایران) و زانتان گام پژوهش از شرکت اکسیر بارزش هر کیلوگرم ۷۵۰/۰۰۰ ریال تهیه شده است. لازم به ذکر است جهت استفاده زانتان گام ابتدا پودر با مقداری از آب اختلاط مخلوط و سپس به طرح بتن اضافه گردید. ترکیب فیزیکی و شیمیایی مربوط به میکرو سیلیس و نانو سیلیس در جداول ۲، ۳ و ۴ ارائه شده است:

جدول ۲: ترکیب شیمیایی میکرو سیلیس

<i>pH</i>	<i>LOI</i>	<i>P</i>	<i>CaO</i>	<i>S</i>	<i>MgO</i>	<i>K2O</i>	<i>Na2O</i>	<i>C</i>	<i>Cl</i>	<i>Fe2O3</i>	<i>Al2O3</i>	<i>SiO2</i>
۸-۹/۵	۱/۵-۲/۵	۰/۰۴-۰/۰۶	۰/۵-۱	۰/۰۴-۰/۰۸	۰/۶-۱/۲	۰/۴-۰/۸	۰/۳-۰/۸	۰/۸-۲	۰/۰۴-۰/۰۷	۱/۲-۱/۸	۰/۶-۱/۲	۹۵-۹۰

جدول ۳: ترکیب فیزیکی میکرو سیلیس

چگالی ویژه kg/m^3	چگالی ویژه	ساختار	اندازه ذرات	رنگ	سطح ویژه m^2/g
۳۵۰-۳۱۰	۲/۲	آمورف	کوچکتر از $\mu\text{m}1$	خاکستری روشن	۳۰-۱۵

جدول ۴: ترکیب شیمیایی و فیزیکی نانو سیلیس

<i>SiO2</i>	فرمول شیمیایی
آمورف فوق ریز بودری	فرم
سفید	رنگ
بی بو	بو
۶۰ گرم / مول	وزن مولکولی
۲/۲	وزن مخصوص (water = ۱)
kg/m^3 ۱۱۰-۹۰	چگالی ظاهری
۶/۵-۷/۵	مقدار PH
>۱۵	سطح ویژه (m^2/g)
۱۰۰-۸۰ Nm	اندازه ذرات

۲-۲ برنامه ساخت

طرح‌های بتن خودتراکم با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ در نظر گرفته شده است. طرح اختلاط مبتنی بر طرح اختلاط ملی ایران و خواص رئولوژی طبق ضوابط [22] EFNARC انجام شده است. مقدار زانتان گام به میزان ۰/۲ درصد وزن سیمان، میکرو سیلیس ۵، ۷ و ۱۰ درصد وزن سیمان و نانوسیلیس به میزان ۲، ۳ و ۴ درصد وزن سیمان تعیین شده است. باهدف سنجش عملکرد افزودنی‌ها این مواد به صورت تک، دوتایی و سه‌تایی اضافه شده و به‌طور نسبی در هر یک از آزمایش‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. در کدگذاری طرح‌ها به این صورت عمل شده است که SCC معرف بتن خود تراکم است. Z معرف استفاده از زانتان گام، SF معرف میکرو سیلیس و Na معرف نانو سیلیس است. عدد بعدی بیانگر مقدار مصرف افزودنی برحسب درصد وزن سیمان است. به‌عنوان مثال $Z(0.2)+SF(5)$ معرف بتن خودتراکم با ۰/۲ درصد وزن سیمان زانتان گام و ۵ درصد وزن سیمان جایگزینی میکرو سیلیس است.

۲-۳ برنامه آزمایش‌ها

آزمایش‌ها شامل دو بخش مشخصات مکانیکی و دوامی بود. نتایج ارائه شده میانگین ۲ نمونه در هر سن از هر طرح می باشد. در بخش اول، مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز متأثر از تغییر پارامترهای نوع بتن، مقدار سیمان و شرایط عمل‌آوری ارزیابی شده و در بخش دوم آزمایش‌های مقاومت ویژه الکتریکی، ضریب مهاجرت و عمق نفوذ یون کلر و مطابق با آیین‌نامه مربوطه انجام شد.

۲-۴ مشخصات رئولوژی بتن تازه خودتراکم

آزمایش‌های رئولوژی بتن خودتراکم نیز مطابق شکل ۴ انجام شده است که نتایج و مقادیر در جدول ۶ درج شده است.

جدول ۵: مقادیر سیمان و مواد افزودنی مصرفی در هر مترمکعب بتن برحسب کیلوگرم

کد طرح	سیمان	زانتانگام	میکرو سیلیس	نانو سیلیس	کد طرح	سیمان	زانتانگام	میکرو سیلیس	نانو سیلیس
SCC - 7 days	۴۰۰	۰	۰	۰	Z (0.2)+SF(10)+Na(4)	۳۴۳/۲	۰/۸	۴۰	۱۶
SCC	۴۰۰	۰	۰	۰	Z(0.2)+Na 2	۳۹۱/۲	۰/۸	۰	۸
Z (0.2)	۳۹۹/۲	۰/۸	۰	۰	Z(0.2)+Na 3	۳۸۷/۲	۰/۸	۰	۱۲
SF (5)	۳۸۰	۰	۲۰	۰	Z(0.2)+Na 4	۳۸۳/۳	۰/۸	۰	۱۶
SF (7)	۳۷۲	۰	۲۸	۰	Z (0.2)+SF(5)+Na(2)	۳۷۱/۲	۰/۸	۲۰	۸
SF (10)	۳۶۰	۰	۴۰	۰	Z (0.2)+SF(5)+Na(3)	۳۶۷/۲	۰/۸	۲۰	۱۲
Na (2)	۳۹۲	۰	۰	۸	Z (0.2)+SF(5)+Na(4)	۳۶۳/۲	۰/۸	۲۰	۱۶
Na (3)	۳۸۸	۰	۰	۱۲	Z (0.2)+SF(7)+Na(2)	۳۶۳/۲	۰/۸	۲۸	۸
Na (4)	۳۸۴	۰	۰	۱۶	Z (0.2)+SF(7)+Na(3)	۳۵۹/۲	۰/۸	۲۸	۱۲
Z (0.2)+SF(5)	۳۷۹/۲	۰/۸	۲۰	۰	Z (0.2)+SF(7)+Na(4)	۳۵۵/۲	۰/۸	۲۸	۱۶
Z (0.2)+SF(7)	۳۷۱/۲	۰/۸	۲۸	۰	Na2 +SF10	۳۵۲	۰	۴۰	۸
Z (0.2)+SF(10)	۳۵۹/۲	۰/۸	۴۰	۰	SF7+Na2	۳۶۴	۰	۲۸	۸
Z (0.2)+SF(10)+Na(2)	۳۵۱/۲	۰/۸	۴۰	۸	SF5+Na3	۳۶۸	۰	۲۰	۱۲
Z (0.2)+SF(10)+Na(2)	۳۴۷/۲	۰/۸	۴۰	۱۲					



شکل ۴: آزمایش‌های بتن خودتراکم تازه برای تأمین کارایی مطابق با محدوده EFNARC

نکته قابل توجه آنکه تأثیر مثبت افزودنی زانتان گام بر بهبود مشخصات رئولوژی بتن خودتراکم در آزمایش‌ها کاملاً مشهود است.

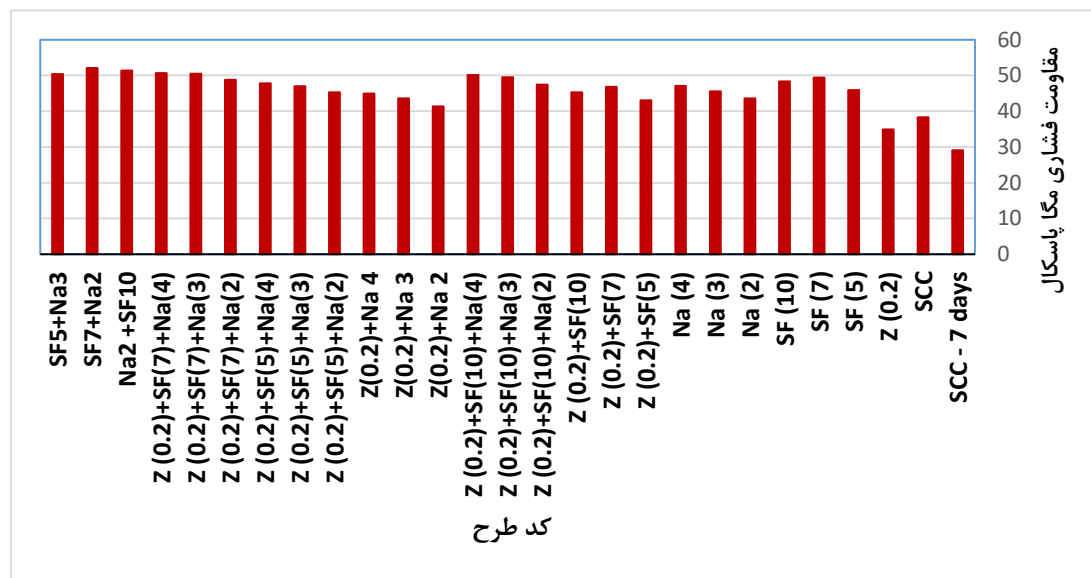
جدول ۶: نتایج آزمایش‌های کارایی بتن خودتراکم

کد طرح	جریان اسلامپ (cm)	T50 (Sec)	L Box $\frac{H1}{H2}$	V funnel T 5 (Sec)
SCC	۷۶	۴	۰/۸۶	۹/۲
Z (0.2)	۷۷	۳/۹	۰/۹۵	۸/۱
SF (5)	۷۵	۴/۱	۰/۸۷	۸/۸
SF (7)	۷۳	۴/۳	۰/۸۹	۹/۴
SF (10)	۷۱	۴/۵	۰/۹	۹/۶
Na (2)	۶۸	۴/۷	۰/۸۴	۱۰/۷
Na (3)	۶۷	۴/۶	۰/۸۴	۱۰/۹
Na (4)	۶۵	۴/۸	۰/۸۲	۱۱/۱
Z (0.2)+SF(5)	۷۲	۴/۴	۰/۸۹	۸
Z (0.2)+SF(7)	۷۲	۴/۳	۰/۹۱	۷/۹
Z (0.2)+SF(10)	۷۰	۴/۶	۰/۹۱	۸/۲
Z (0.2)+SF(10)+Na(2)	۷۱	۴/۶	۰/۸۸	۸/۸
Z (0.2)+SF(10)+Na(3)	۷۰	۴/۵	۰/۸۶	۹/۲
Z (0.2)+SF(10)+Na(4)	۶۸	۴/۷	۰/۸۲	۱۰/۱
Z(0.2)+Na 2	۷۰	۴/۶	۰/۸۶	۹
Z(0.2)+Na 3	۶۹	۴/۱	۰/۸۸	۹/۵
Z(0.2)+Na 4	۶۷	۴/۳	۰/۸۹	۱۰/۹
Z (0.2)+SF(5)+Na(2)	۶۹	۴/۲	۰/۸۵	۸/۶
Z (0.2)+SF(5)+Na(3)	۶۹	۴/۳	۰/۸۳	۸/۹
Z (0.2)+SF(5)+Na(4)	۶۶	۴/۷	۰/۸۲	۹/۹
Z (0.2)+SF(7)+Na(2)	۷۵	۴	۰/۸۸	۸/۵
Z (0.2)+SF(7)+Na(3)	۷۳	۴/۲	۰/۸۵	۸/۷
Z (0.2)+SF(7)+Na(4)	۶۸	۴	۰/۸۴	۹
Na2 +SF10	۷۳	۴/۴	۰/۸۶	۱۰/۱
SF7+Na2	۷۰	۴/۷	۰/۸۶	۱۰/۶
SF5+Na3	۶۸	۴/۲	۰/۸۲	۱۱

۳- مشخصات مکانیکی

۳-۱- مقاومت فشاری

نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح‌های مختلف در شکل ۵ نمایش داده شده است.



شکل ۵: مقادیر مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز

مقادیر استاندارد با افزایش مواد افزودنی موجب افزایش مقاومت فشاری گردید. ترکیب زانتان گام و میکرو و نانو سیلیس خواص مکانیکی را افزایش داد زیرا توسعه ژل C-S-H در بتن با افزودنی در مقایسه با بتن شاهد بهتر صورت گرفته است. همان طور که در شکل ۵ مشاهده می شود مقادیر مقاومت فشاری در طرح های ترکیبی دوتایی و سه تایی دارای مقادیر مثبت بوده و نسبت به طرح شاهد تا ۳۶ درصد نتیجه افزایشی بوده است. اگرچه در طرح تکی با زانتان گام مقداری کاهش مشاهده می شود اما از آنجایی که زانتان گام منجر به بهبود خواص رئولوژی گردیده ترکیب آن با میکرو و نانو سیلیس دارای تأثیر افزایشی بوده که استفاده از آن توجیه خواهد داشت. هنگامی که از نانو سیلیس برای جایگزینی بخشی از سیمان استفاده می شود، فعالیت بالای نانو سیلیس به ترویج واکنش هیدراتاسیون بتن کمک می کند و زمان گیرش را کوتاه می کند. نانوسیلیس به دلیل اندازه ذرات کوچک آن دارای سطح ویژه بزرگی است. در فرآیند اختلاط بتن، تعداد زیادی پیوند غیراشباع، نانو را برای جذب بیشتر مولکول های آب تقویت می کند که منجر به کاهش اسلامپ بتن می شود. از یک طرف، نانو سیلیس درجه هیدراتاسیون بتن را ارتقا می دهد و باعث می شود که بتن ژل C-S-H بیشتری تولید کند و منافذ بتن را پر کند. از سوی دیگر، نانو سیلیس غیرفعال نقش پرکننده ای دارد. نانو سیلیس می تواند حجم منافذ را کاهش داده و از این دو جنبه بتن را فشرده تر کند. بنابراین، بتن اصلاح شده با نانو سیلیس دوام بسیار خوبی از خود نشان داده و نانو سیلیس فعالیت پوزولان بیشتری دارد. در مراحل اولیه، اثر بهبود مقاومت اولیه بتن حاوی نانو سیلیس به دلیل واکنش پوزولانی کافی بیشتر آشکار است. همچنین میکرو سیلیس در طول هیدراتاسیون سیمان با آهک واکنش می دهد و باعث تشکیل هیدرات های سیلیکات کلسیم C-S-H می شود. این مرحله اجزای مختلف را به هم پیوند می دهد و امکان ایجاد یک بتن متراکم و فشرده را فراهم می کند.

جدول ۷: آزمون t برای مقاومت فشاری (مگا پاسکال)

Test Value = ۳۸/۳				
مقدار آزمون t	درجه آزادی	سطح معنی داری	میانگین اختلافها	فاصله اطمینان
۱۰/۳۴	۲۵	۰/۰۰۰	۸/۲۰	(۶.۹)

نتایج آزمون t حاکی از آن است که مقاومت فشاری برای نمونه ها با مقدار شاهد (SCC) تفاوت معنی دار دارد ($\text{sig} < 0.05$).

۴- مشخصات دوامی

خوردگی آرماتورها یکی از نگرانی‌های اصلی در طول عمر سازه است. امروزه در سازه‌های بتنی مسلح، خوردگی فولاد تقویت‌کننده منجر به کاهش مقاومت و قابلیت سرویس‌دهی سازه می‌شود، از این‌رو، نفوذ یون کلرید در SCC به‌عنوان نگرانی اصلی برای خوردگی آرماتور در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق علاوه بر مشخصات بتن تازه و مقاومت فشاری، آزمایش‌های RCMT و مقاومت ویژه الکتریکی انجام گرفته است. هدف از برنامه‌ریزی انجام آزمایش‌های دوامی تعیین روند و امکان‌سنجی ارزیابی تخمین عمر مفید بر اساس آزمایش‌ها و همبستگی نتایج هست.

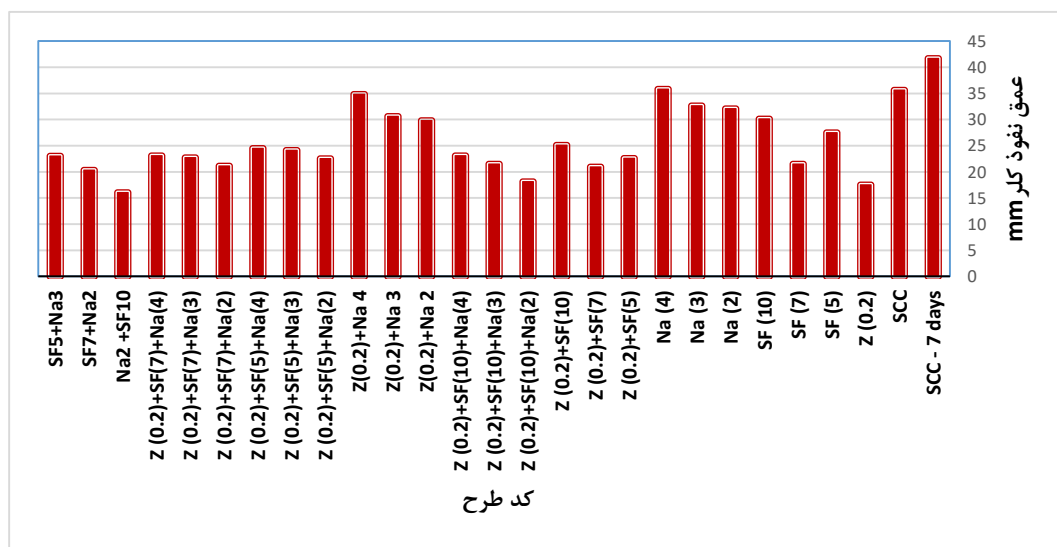
۴-۱- تحلیل عمق نفوذ یون کلر

عمق نفوذ یون کلر با آزمایش RCMT مطابق شکل ۶ برای تعیین میزان و نرخ نفوذ یون کلر در طرح‌های مختلف انجام شده است.



شکل ۶: آزمایش‌های RCMT

این مقدار در طرح‌های مختلف اندازه‌گیری شده و در شکل ۷ نمایش داده شده است.



شکل ۷. نتایج آزمایش عمق نفوذ یون کلر بر حسب میلی‌متر

بیشترین و کمترین عمق نفوذ در سن ۲۸ روزه ترتیب مربوط به طرح‌های SCC و SF10+Na2 بود که افزودن ۲ درصد نانو سیلیس همراه با ۱۰ درصد میکرو سیلیس بیشترین تأثیر مثبت بر کاهش عمق نفوذ را داشته است. همچنین طرح حاوی زانتان گام به‌تنهایی نیز اثر بسیار مثبتی حدود ۵۰ درصد بر کاهش عمق نفوذ داشته که گویای تأثیر مثبت زانتان گام بر دوام داشته است.

در طرح‌های حاوی میکرو سیلیس به‌تنهایی، بیشترین کاهش عمق نفوذ مربوط به آزمون حاوی ۷ درصد میکرو سیلیس بوده که منجر به کاهش ۴۰ درصد عمق نفوذ نسبت به بتن شاهد گردیده و عمق نفوذ بتن حاوی ۲ درصد نانو سیلیس به‌تنهایی نیز نسبت به بتن شاهد (SCC) حاکی از کاهش ۱۰ درصد عمق نفوذ بود، افزودن بیش از ۲ درصد نانو هم به لحاظ هزینه افزودنی و هم میزان تأثیر توصیه نمی‌شود.

نتایج حاصل از بررسی حالت ترکیبی دوگانه (ترکیب دو افزودنی) بدین شرح است که در ترکیب زانتان گام و میکرو سیلیس ۵، ۷ و ۱۰ درصد، عمق نفوذ نسبت به بتن شاهد به ترتیب، ۳۷، ۴۱ و ۲۹ درصد کاهش یافته و همین موضوع (کاهش عمق نفوذ) در طرح‌های حاوی زانتان گام و نانو سیلیس با درصدهای ۲، ۳ و ۴ به ترتیب ۱۶، ۱۴ و ۲ درصد بود. و در طرح‌های سه‌گانه (ترکیب سه افزودنی) در جمع‌بندی ارزیابی عمق نفوذ می‌توان بیان نمود که بیشترین کاهش در طرح حاوی زانتان گام به همراه ۲ درصد نانو، ۱۰ درصد میکرو سیلیس و به میزان ۴۹ درصد رخ داده که عددی قابل توجه و مناسب تلقی می‌شود. زانتان گام، میکرو و نانوسیلیس مقاومت را در بتن خودتراکم در برابر نفوذ یون کلرید افزایش دادند. به دلیل متراکم شدن بتن، انتشار کلر محدود شد و مقاومت در برابر نفوذ یون کلرید افزایش یافت و تصاویر SEM از اضافه شدن زانتان گام، میکرو و نانوسیلیس به بتن، ریزساختار دانه‌بندی شده خوبی را با مقدار زیادی هیدرات سیلیکات کلسیم نشان داد.

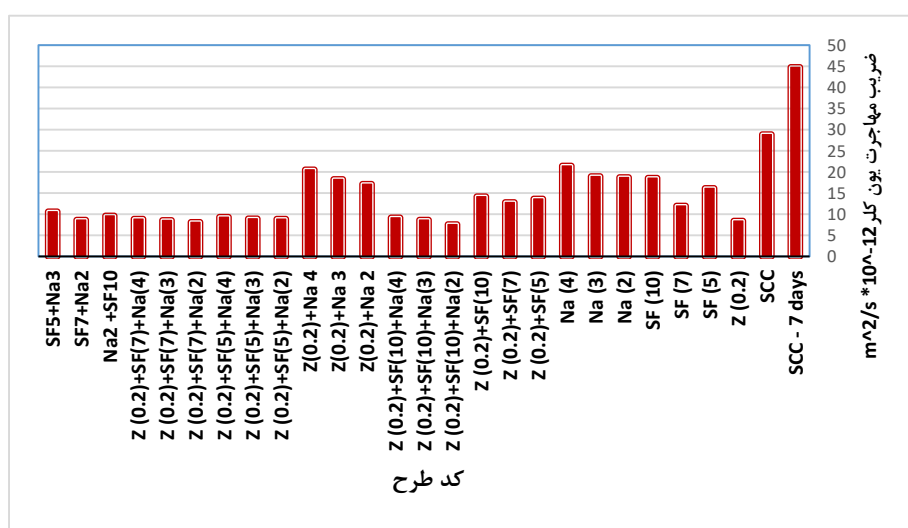
جدول ۸: آزمون t برای عمق نفوذ کلر (mm)

Test Value = ۳۵/۶				
مقدار آزمون t	درجه آزادی	سطح معنی‌داری	میانگین اختلاف‌ها	فاصله اطمینان
-۹/۲۶۴	۲۵	۰,۰۰۰	-۱۰/۳۵	(-۸, -۱۳)

نتایج آزمون t حاکی از آن است که عمق نفوذ کلر برای نمونه‌ها با مقدار شاهد (SCC) تفاوت معنی‌دار دارد ($\text{sig} < 0.05$). همچنین در بتن شاهد (SCC) با افزایش سن بتن از هفت به ۲۸ روز ۱۵ درصد کاهش عمق نفوذ رخ داده است.

۴-۲- تحلیل ضریب مهاجرت یون کلر

ضریب مهاجرت یون کلر در تخمین عمر مفید به‌صورت ورودی در رابطه وارد می‌شود و دارای اهمیت زیادی در تعیین پارامتر خروجی است. این مقدار در طرح‌های مختلف اندازه‌گیری شده و در شکل ۸ نمایش داده شده است.



شکل ۸: مقادیر ضریب مهاجرت یون کلر

بیشترین و کمترین ضریب مهاجرت به ترتیب مربوط به طرح‌های SCC و $Z(0.2)+SF(7)+Na(2)$ بوده و تأثیر زانتان گام به تنهایی نیز نتایج بسیار خوبی در کاهش ضریب مهاجرت داشت.

تمامی طرح‌های حاوی صرفاً میکرو سیلیس کاهش ضریب مهاجرت را نشان می‌دهند که بیشترین میزان کاهش مربوط به طرح حاوی ۷ درصد میکرو سیلیس با کاهش ۵۹ درصد در ضریب مهاجرت می‌باشد. در خصوص طرح‌های حاوی صرفاً نانو سیلیس نیز تماماً کاهش را نشان می‌دهند که بیشترین میزان کاهش مربوط به طرح حاوی ۲ درصد نانو با کاهش ۳۵ درصدی می‌باشد، نکته قابل توجه عدم افزایش تأثیر مثبت در استفاده بیش از ۲ درصد نانو است که حد بهینه استفاده از آن را ۲ درصد مشخص می‌کند.

افزودنی‌ها تماماً تأثیر کاهشی بر ضریب مهاجرت داشته و در بررسی حالت ترکیبی اثرهای دوگانه (ترکیب دو افزودنی) حاوی زانتان گام و درصدهای میکرو سیلیس ۵، ۷ و ۱۰ درصد به ترتیب ۵۳، ۵۶ و ۵۱ درصد کاهش یافته و همین موضوع در طرح‌های حاوی ۲، ۳ و ۴ درصد نانو سیلیس و زانتان گام به ترتیب ۴۱، ۳۷ و ۲۹ درصد بوده است. در طرح‌های حاوی سه افزودنی بیشترین کاهش مربوط به طرح $Z(0.2)+SF(7)+Na(2)$ و به میزان ۷۲ درصد می‌باشد و به‌عنوان طرح بهینه توصیه می‌شود.

جایگزینی زانتان گام، میکرو و نانو سیلیس به‌عنوان مخلوط سیمانی سه‌تایی عملکرد بهتری در تحقیقات دوام نشان داد. بتن‌های حاوی مواد افزودنی جذب کمتری نسبت به سایر مخلوط‌ها نشان دادند و ورود کلرید نیز در مقایسه با سایر مخلوط‌ها بسیار کمتر بود. این به دلیل درجه بالایی از چگالی ذرات در سطح ریزساختاری است زیرا زانتان گام، میکرو و نانو سیلیس فضاهای خالی را پر کردند و در نتیجه بتن را غیرقابل نفوذ ساختند.

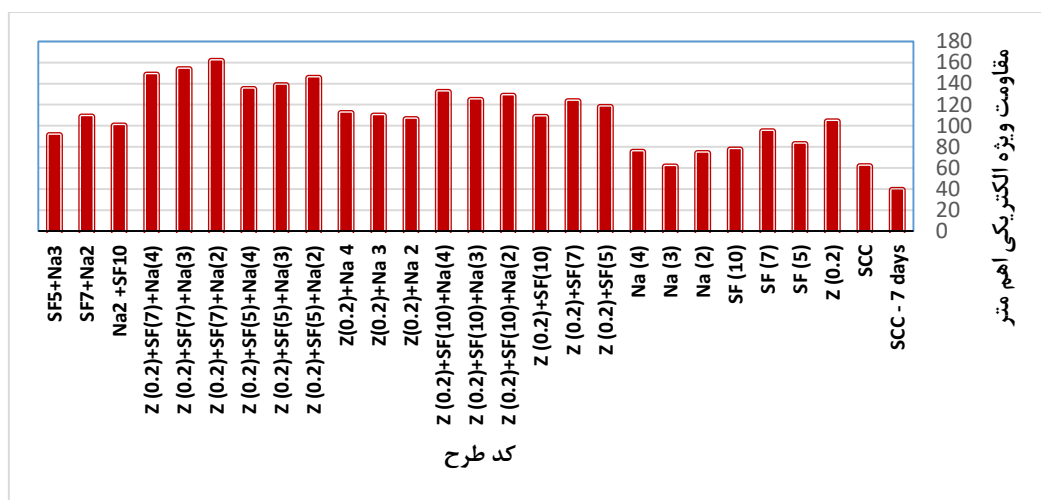
جدول ۹: آزمون t برای ضریب مهاجرت یون کلر $10^{-12} (m^2/s)$

Test Value = ۲۸,۸۱				
مقدار آزمون t	درجه آزادی	سطح معنی داری	میانگین اختلاف‌ها	فاصله اطمینان
-۱۴/۳۴۶	۲۵	۰/۰۰۰	-۱۵/۵۲	(-۱۳-۱۷)

نتایج آزمون t حاکی از آن است که ضریب مهاجرت یون کلر برای نمونه‌ها با مقدار شاهد (SCC) تفاوت معنی دار دارد ($sig < 0.05$). نکته قابل توجه کاهش مقادیر ضریب مهاجرت در سن ۲۸ روز نسبت به ۷ روز است و حاکی از آن است که با افزایش سن آزمون‌ها کاهش ۳۶ درصدی ضریب مهاجرت رخ داده است.

۳-۴- تحلیل مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی

توانایی بتن در برابر انتقال یون‌هایی که به محیط بتن وارد می‌شوند و از طریق ریزساختارهای موجود در آن جابجا می‌شوند تا حد زیادی به مقاومت الکتریکی بتن بستگی دارد، در این تحقیق مقادیر به حد قابل قبولی افزایش یافته و در طرح‌های حاوی زانتان گام، مقادیر قابل توجهی دارد. نتایج آزمایش در شکل ۹ نمایش داده شده است.



شکل ۹: مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی

بیشترین و کمترین میزان مقاومت ویژه الکتریکی به ترتیب مربوط به طرح‌های SCC و $Z(0.2)+SF(7)+Na(2)$ بوده و تأثیر زانتان گام به‌تنهایی نیز نتیجه بسیار خوبی داشت و در حد ۶۹ درصد افزایش را نشان می‌دهد. تمامی طرح‌های حاوی صرفاً میکرو سیلیس افزایش مقاومت ویژه الکتریکی نسبت به بتن شاهد را نشان می‌دهند که بیشترین میزان افزایش مربوط به طرح حاوی ۷ درصد میکرو سیلیس با افزایش ۵۴ درصد است. در خصوص طرح‌های حاوی صرفاً نانو سیلیس نیز تماماً افزایش را نشان می‌دهند که بیشترین میزان مربوط به طرح حاوی ۴ درصد نانو با افزایش ۲۲ درصدی بود، نکته قابل توجه این است که در طرح حاوی ۲ درصد نانو که در خصوص آزمایش‌ها قبلی، دارای مقدار بهینه ماده افزودنی نانو بود نیز میزان افزایش مقاومت ویژه الکتریکی ۲۰ درصد بود.

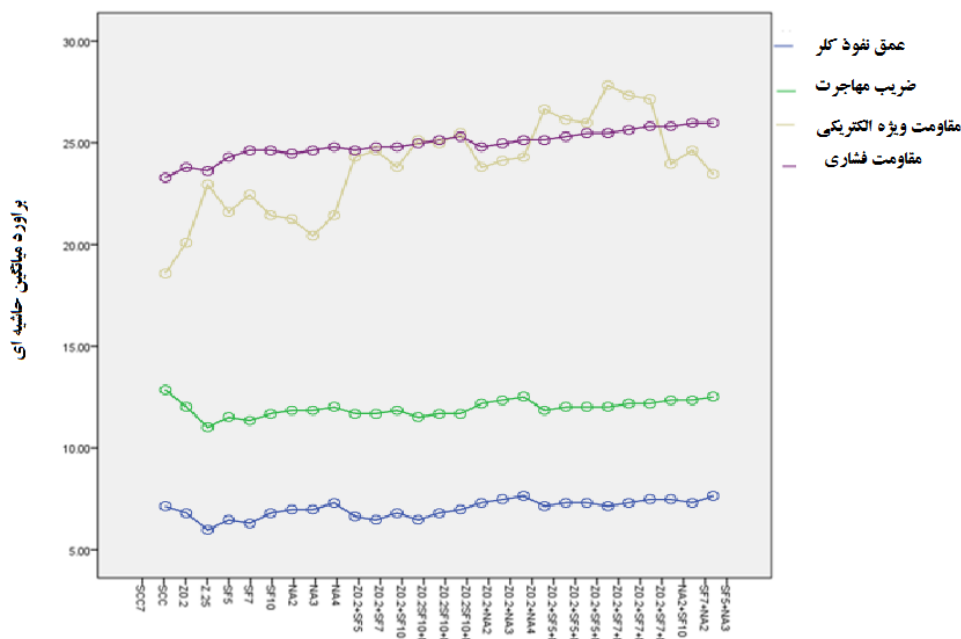
طرح‌های ترکیبی دارای مقاومت الکتریکی بیشتری نسبت به طرح شاهد می‌باشند که احتمالاً به دلیل تخلخل کمتر و ریزساختاری متراکم‌تر می‌باشد. تست مقاومت الکتریکی یک آزمایش غیر مخرب است که به ما امکان می‌دهد بهترین مخلوط‌ها را برای پاسخ عملکردی بهتر انتخاب کنیم. از تحقیقات تجربی ما، مشخص شد که مخلوط‌هایی با مقاومت الکتریکی بالا، بهترین رفتار دوام را تحت قرار گرفتن در معرض یک محیط تهاجمی کلرایدی نشان می‌دهند.

این افزایش مقاومت به علت واکنش شدید پوزولانی نانوسیلیس بوده و به علت سطح ویژه بسیار بالای نانوذرات، وقتی مقدارشان از حد معینی (مقدار بهینه) بیشتر شود می‌تواند با یک واکنش فیزیکی به هم چسبیده، کلوخه‌های ناپایدار را ایجاد کند لذا در این بررسی آزمایشگاهی مقدار بهینه نانوسیلیس را می‌توان ۲ درصد تخمین زد. مقدار بهینه میکرو سیلیس در مواردی که دوام و مقاومت فشاری بتن مورد نظر باشد تا ۷ درصد وزن مواد سیمانی پیشنهاد می‌گردد، این پیشنهاد صرفه‌جویی اقتصادی در مصرف مواد پوزولانی و سیمان را نیز به دنبال خواهد داشت.

جدول ۱۰: آزمون t برای مقاومت ویژه الکتریکی (اهم‌متر)

Test Value = ۷۲/۳۰				
مقدار آزمون t	درجه آزادی	سطح معنی داری	میانگین اختلاف‌ها	فاصله اطمینان
۸/۸۷۲	۲۵	۰.۰۰۰	۵۷/۵۵	(۴۴.۷۱)

نتایج آزمون t حاکی از آن است که مقاومت ویژه الکتریکی (اهمتر) کلر برای نمونه‌ها با مقدار شاهد (SCC) تفاوت معنی‌دار دارد ($sig < 0.05$). همچنین مقاومت ویژه الکتریکی در سن ۲۸ روز نسبت به ۷ روز، ۵۸ درصد است. طرح اندازه‌گیری مکرر^۱ در شکل ۱۰ به وضوح نشان می‌دهد که اندازه پارامترهای مورد مطالعه در آزمون‌های مورد بررسی با یکدیگر متفاوت است و نشانه‌ای از اثرات غیرخطی در عمق نفوذ کلر، ضریب مهاجرت و مقاومت ویژه الکتریکی را نشان می‌دهد زیرا تفاوت‌های جزئی بین آزمون‌ها وجود دارد.



شکل ۱۰: تغییرات پارامترهای آزمایش‌ها

نتایج آزمون همبستگی پیرسون بین ضریب یون مهاجرت و سایر پارامترها با استفاده از خروجی نرم‌افزار SPSS نیز در جدول ۱۱ ارائه شده است:

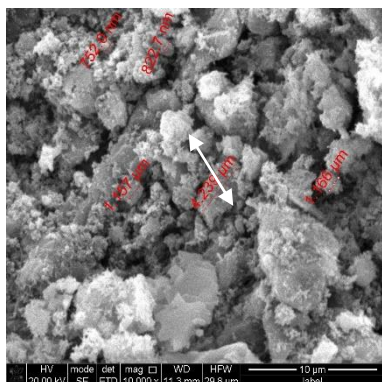
جدول ۱۱: نتایج آزمون همبستگی بین ضریب یون مهاجرت و سایر پارامترها

همبستگی	عمق نفوذ کلر (mm)	مقاومت ویژه الکتریکی	مقاومت فشاری
همبستگی پیرسون	۰/۹۰۱**	-۰/۷۵**	-۰/۴۸۶*
ضریب مهاجرت یون کلر	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰
حجم نمونه	۲۷	۲۷	۲۷
** همبستگی در سطح ۰,۰۱ معنی‌دار است			
* همبستگی در سطح ۰,۰۵ معنی‌دار است			

¹ Repeated measure

۵- تحلیل ریزساختاری

به منظور مقایسه ریزساختاری طرح‌ها و بررسی علل احتمالی وقوع تغییرات مشخصات مکانیکی و دوامی با اضافه شدن افزودنی‌ها، تصاویر میکروسکوپ الکترونیک روبشی^۲ در مرکز تصاویر الکترونیک مه‌مکس تهران انجام شده است. تصاویر ریزساختاری نشان می‌دهد تراکم بتن در سن ۷ روزه نسبت به طرح شاهد کمتر و در سن ۲۸ روز نسبت به آن دارای ساختار متراکم‌تری می‌باشد، شکل‌گیری بلورهای سوزنی اترینگایت در شکل ۱۱ حاکی از شروع واکنش مواد افزودنی بوده و تأثیر مثبت بر افزایش تراکم ریزساختاری در سن ۷ و ۲۸ روز در بتن‌های حاوی افزودنی مطابق شکل ۱۲ و ۱۳ می‌باشد.



ب

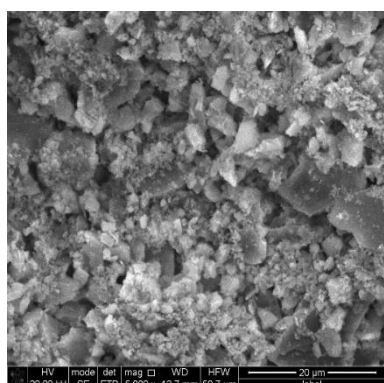


الف

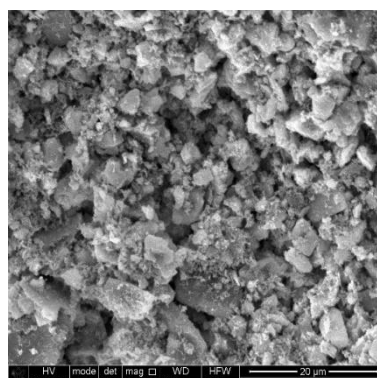
شکل ۱۱: ریزساختار آزمون‌های طرح‌های حاوی زانتان گام (الف) شکل‌گیری اترینگایت در بتن تازه (ب) ریزساختار بتن سخت شده

لازم به ذکر است که بتن خودتراکم تازه دارای مشخصات رئولوژی مناسب در محدوده EFNARC بوده است اما مشخصات مکانیکی و دوام کاملاً متأثر از ریزساختار و ترکیب مواد افزودنی می‌باشد. مطالعه SEM به دلیل تشکیل محصولات هیدراتاسیون مانند اترینگایت و هیدرات سیلیکات کلسیم، ریزساختار بهتری را نشان می‌دهد. این مواد تازه تشکیل شده، ماتریس بتن را متراکم کردند و خاصیت مکانیکی و دوام بتن را بهبود بخشیدند. اترینگایت با ترکیب شیمیایی $Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12} \cdot 26(H_2O)$ است. و در اثر واکنش کلسیم آلومینات با کلسیم سولفات ایجاد می‌شود و حجم بتن را افزایش داده که اگر قبل از گیرش کامل بتن باشد بی ضرر بوده و باعث پر شدن فضاهای خالی می‌گردد. اما اگر بعد از گیرش بتن اتفاق بیفتد اترینگایت ثانویه می‌تواند باعث بروز ترک گردد چراکه امکان تغییر شکل وجود نخواهد داشت. لذا در بتن‌های با نفوذپذیری بالا می‌تواند باعث تشدید و بروز خرابی گردد. که با افزودنی‌های نانو و میکرو سیلیس و زانتان گام در این تحقیق مطابق نتایج آزمایش‌های ابرازی میزان نفوذپذیری به مقدار قابل توجهی کاهش یافت.

² Scanning Electron Microscope

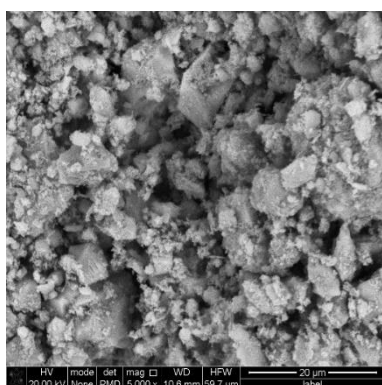


(ب)

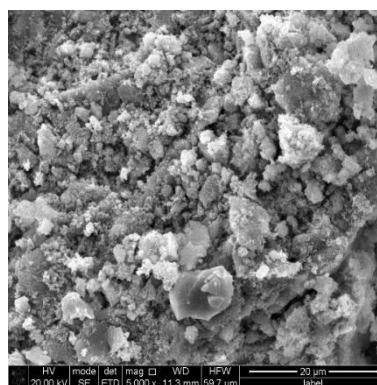


(الف)

شکل ۱۲: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (الف) بتن ۷ روزه با مواد افزودنی (ب) بتن ۷ روزه شاهد



(ب)



(الف)

شکل ۱۳: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (الف) بتن ۲۸ روزه با مواد افزودنی (ب) بتن ۲۸ روزه شاهد

در ترکیب ریزساختاری متراکم پایدار حاصل از ترکیب زانتان با میکرو و نانو سیلیس، می‌توان بهبود عملکرد مقاومتی و دوام طرح‌ها را در سن ۲۸ روز مشاهده کرد. در این تصاویر به دلیل وجود نانو ذرات سیلیس، حجم ژل C-S-H تشکیل شده نسبت به نمونه مرجع بیشتر بوده و شاهد رشد این کریستال‌ها در مکان‌های گسترده نمونه بتنی به صورت همگن است که باعث اتصال بهتر خمیر -سنگدانه می‌شود [۱۷]. تغییرات این لایه‌های فراگیر منجر به تغییراتی در عملکرد مایکروسکوپی شد. شکل‌گیری بلورهای هیدرات سیلیکات کلسیم شش‌وجهی حاکی از ترکیب پایدار بوده و تأثیر مثبت آن بر مقاومت فشاری و نفوذ نیز قابل مشاهده است. در این تصاویر افزایش حجم ژل C-S-H در ماتریس سیمانی را نشان می‌دهند که به دلیل قرارگیری نانوذرات سیلیس در منافذ خمیر سیمان بوده و باعث جلوگیری از توسعه کریستال‌های $Ca(OH)_2$ و در نتیجه کاهش حجم این کریستال‌ها و در نتیجه افزایش حجم ژل C-S-H در ماتریس سیمانی می‌گردد [۱۸].

وجود نانوذرات سیلیس در دوغاب سیمانی بعد از شروع شکل‌گیری خمیر سیمان، باعث کنترل حرکت جریان آب اضافی به سمت بالا و در لابلای خمیر سیمان گشته و از ایجاد ناهمگونی بین مصالح سیمانی که همراه با آب حرکت می‌کنند، جلوگیری می‌کند [۱۹]. بر اساس بررسی‌های انجام شده می‌توان نتیجه گرفت که بتن خود متراکم با استفاده از ذرات زانتان گام، میکرو و نانو سیلیس به عنوان جایگزینی سیمان با موفقیت انجام گرفته است. از آنجایی که افزایش درصد میکرو و نانو سیلیس باعث کاهش جریان پذیری و قابلیت عبور بتن تازه می‌شوند دوز های افزایش یافته فوق روان کننده همراه با زانتان گام، میکرو و نانوسیلیس برای حفظ کارایی مورد استفاده قرار گرفت. بدیهی است که مخلوط‌های ترکیبی تمام تست‌های ارزیابی کارایی EFNARC را برآورده کردند.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله به ارزیابی تأثیر مواد مکمل سیمانی زانتان گام، میکرو و نانو سیلیس به صورت مجزا و ترکیبی در درصد‌های مختلف استفاده بر مشخصات مختلف دوامی بتن پرداخته شده است. نتایج به دو صورت مطلق برای تعیین حداکثر اثر مثبت احتمالی متغیرها و نسبی جهت تعیین اولویت اثر عامل مختلف تأثیرگذار مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن است که:

۱- در خصوص ضریب مهاجرت یون کلر و مقاومت ویژه الکتریکی، طرح سه تایی حاوی ۰/۲ درصد زانتان گام، ۷ درصد میکرو سیلیس و ۲ درصد نانو سیلیس بهینه ترین حالت اتفاق افتاد اما در خصوص عمق نفوذ یون کلر همین طرح با ۱۰ درصد میکرو سیلیس عملکرد بهتری داشت، البته لازم به ذکر است که جایگزینی ۷ درصد میکرو سیلیس دارای عملکرد نزدیک و مناسبی بوده است، لذا طرح حاوی ۰/۲ درصد زانتان گام، ۷ درصد میکرو سیلیس و ۲ درصد نانو سیلیس به عنوان بهترین طرح سه تایی $\{Z(0.2)+SF(7)+Na(2)\}$ معرفی می گردد.

۲- با توجه به اینکه در اکثر طرح‌ها افزایش مقدار نانو سیلیس عملکرد مناسبی لزوماً در همه آزمایش‌ها نداشته و یا اینکه تغییرات خیلی محسوس نبود لذا مقدار مصرف بهینه نانو سیلیس ۲ درصد معرفی و مصرف بیش از آن توصیه نمی شود.

۳- در خصوص ضریب مهاجرت، عمق نفوذ یون کلر و مقاومت ویژه الکتریکی، افزودن زانتان گام عملکرد مناسبی در هر سه مورد در طرح‌های تکی، دوتایی و شامل سه افزودنی به صورت هم‌زمان داشت که احتمالاً به دلیل تخلخل کمتر و ریزساختاری متراکم تر بوده است.

۴- افزودن زانتان گام باعث افزایش خواص دوامی و علی‌الخصوص رئولوژی بتن‌های خودتراکم ساخته شده گردید.

۵- در خصوص افزایش مقاومت فشاری استفاده از زانتان گام به همراه نانو سیلیس یا میکرو سیلیس و یا ترکیب هر دو توصیه می شود.

۶- مقادیر خصوصیات دوامی بتن خودتراکم از سن ۷ روزه به ۲۸ روزه تغییرات محسوسی دارد.

۷- ارتباط بین ضریب مهاجرت یون کلر و مقاومت ویژه الکتریکی و مقاومت فشاری ارتباط معنی دار و معکوس بود یعنی با افزایش ضریب مهاجرت انتظار می رود مقاومت ویژه الکتریکی و مقاومت فشاری کاهش یابد، ارتباط ضریب مهاجرت و عمق نفوذ ارتباط مستقیم و معنی دار بود یعنی با افزایش ضریب مهاجرت میزان عمق نفوذ افزایش می یابد.

۷- مراجع

- [1] Aslani, F., Guowei, Ma., Law Yim Wan, D., Muselin, G. (2018). Development of high-performance self-compacting concrete using waste recycled concrete aggregates and rubber granules. *Journal of Cleaner Production*, 182, 553-566.
- [2] Sainz-Aja, J., Thomas, C., Polanco, J., Carrascal, I. (2019). High-Frequency Fatigue Testing of Recycled Aggregate Concrete, *Applied Sciences* 10(1), 10.
- [3] El-Chabib, H. (2020). Properties of SCC with supplementary cementing materials. *Self-Compacting Concrete: Materials, Properties, and Applications*, 283-308.
- [4] L.G. Li a, J.Y. Zheng a, J. Zhu a, A.K.H. Kwan. (2018). Combined usage of micro-silica and nano-silica in concrete: SP demand, cementing efficiencies and synergistic effect, *Construction and Building Materials*, 168, 622-632.
- [5] Sharkawi, A., Abd-Elaty, M.A., Khalifa, O.H. (2018). Synergistic influence of micro-nano silica mixture on durability performance of cementitious materials, *Construction and Building Materials*, 164, 579-588.
- [6] Nandhini, K., Ponmalar, V. (2021). Effect of Blending Micro and Nano Silica on the Mechanical and durability Properties of Self-Compacting Concrete. *Silicon* 13, 687-695.
- [7] Niewiadomski, P., Hoła, J., Ćwirzeń, A. (2018). Study on properties of self-compacting concrete modified with nanoparticles. *Archives of civil and Mechanical Engineering*, 18, 877-886.

- [8] J.J. Chen, P.L. Ng, L.G. Li, A.K.H. Kwan. (2018) . Use of superfine zeolite in conjunction with silica fume—Effects on rheology and strength of cementitious paste. *Powder Technology* , 328, 75-83.
- [9] Bani Ardalan. R., Joshaghani. A., Hooton. R.D. (2017). Workability retention and compressive strength of self-compacting concrete incorporating pumice powder and silica fume. *Construction, and Building Materials*, 2017, 134, 116–122.
- [10] Siddique. R. (2011). Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties. *Resources, Conservation and Recycling, Elsevier*, 55(11), 923– 932.
- [11] Mohanraj. A., Senthilkumar. V., Nandhini. K. (2021). Effect of Micro-silica on the Fresh and Hardened Properties of Self-compacting Concrete Containing Pre-absorbed Superabsorbent Polymer. *Silicon* 13, 3569–3581.
- [12] Nadarajah. G., Pshtiwan, Sh., Paul. R. (2021). Pressure exerted on formwork by self-compacting concrete at early ages: A review. *Construction Materials*, 15.
- [13] Chaturvedi. S., Kulshrestha. S., Bhardwaj. K., Jangir. R. (2021). A Review on Properties and Applications of Xanthan Gum. *Microbial Polymers. Springer*, Singapore, 87-107.
- [14]. Abdulsalam Alhalmi^{1*}, Nafaa Alzubaidi², Marwan Altowairi³, Marwan Almoiliqy³ and Bharti Sharma., 2018. XANTHAN GUM; ITS BIOPHARMACEUTICAL APPLICATIONS: AN OVERVIEW" *WORLD JOURNAL OF PHARMACY AND PHARMACEUTICAL SCIENCES SJIF* Impact Factor 6.647. Volume 7, Issue 1
- [15]. Guo J., Skinner G.W., 1998. Harcum W.W. and Barnum P.E Pharmaceutical applications of naturally occurring water-soluble polymers; *PSTT*, 1: 254-261.
- [16] Rosalam S, England R. 2006. Review of Xanthan gum production from unmodified starches by *Xanthomonas compestris* sp. *Enzyme Microb Technol* 39(2): 197-207.
- [17] A. Sadrmomtazi, A. Balalaei, F. Fasihi, A.K. Haghy, 2004. "Investigation of Mechanical and Physical properties of Mortars containing Silica Fume and Nano-SiO₂", *3rd International Conference on Concrete and Development*, Tehran, Iran, 2009.
- [18] M.N. Haque, H. Al-Khaiat, O. Kayali, 2004. *Cement and Concrete Composites*, 26, 307.
- [19] Y.C. Ke, P. Stroeve. 2005. Polymer-layered silicate and silica nanocomposites. *Elsevier*, Amsterdam, 2005.