نشریه عمران و پروژه
Civil & Project Journal(CPJ)

بررسی تاثیر استفاده از رنگ پلی اورتان بروی خواص مکانیکی و دوام بتن خودتراکم حاوی متاکائولن و میکروسیلیس

هانا سادات قربانی سا[1]، محمدرضا اسدی[2*]

۱.دانشجوی کارشناسی ، مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

[2]-کارشناس عمران،مدیر عامل شرکت طرح گسترش وارنا،ایران*

پست الکترونیکی:

Asadi5671@gmail.com

تاریخ دریافت مقاله:۱۴۰۰/۱۰/۰۴، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۰۱

چکیده

اهمیت کاربرد بتن به عنوان اصلی ترین ماده در ساخت سازهها امری بدیهی به نظر می رسد. به علت هزینه بالای تعمیرات، مساله دوام در آنها از اهمیت ویژهای برخوردار است. در این بین نفوذپذیری مهمترین عامل در کاهش دوام سازهها است به گونهای که مقاومت در برابر نفوذپذیری بتن اولین فاکتور در تعیین عمر سرویس یک سازه به حساب میآید. از دیر باز محققین و مهندسان عمران و متالوژی به دنبال افزودنی هایی بودهاند تا به کمک آنها خواص مکانیکی بتن را بهبود بخشند و در این زمینه موفقیتهای بسیاری نیز به دست آوردهاند. علاوه بر افزودنیهایی همچون نانو میتوان تاثیر مواد بیرونی همچون رنگ پلی اورتان را بر روی دوام بتن بررسی نمود. جایگزین کردن بخشی از سیمان با مواد پر کننده ایده مشابه بسیاری از تحقیقات اخیر بوده است. گزارشهای متعدد حاکی از استفاده از این مواد جهت بهبود خواص مکانیکی بتن است. در این میان بیشتر توجهات به استفاده از و میکروسیلیس معطوف بوده است.

در این تحقیق هدف بررسی اثر رنگ پلی اورتان در بتن خودتراکم حاوی متاکائولن و میکروسیلیس بر دوام بتن مصرفی در سازهها میباشد.

کلمات کلیدی: ***متاکائولن ، میکروسیلیس ، بتن خود متراکم، دوام***

۱- مقدمه

با پیشرفت تکنولوژی، با افزودن مواد پودری به بتن و همچنین نانو و کاربرد آن در علوم مختلف، محققین درصدد استفاده از این ذرات در بتن برآمدند. افزودن متاکائولن و میکروسیلیس به بتن موجب بهبود خواص مکانیکی بتن میشود، حال اگر با ترکیب نانو مواد

می‌توان اندک معایب آن را برطرف نمود. از این بین نانو سیلیس و نانو مس بیش از سایر نانو ذرات مورد اقبال محققین قرار گرفت. نانو سیلیس با توجه به خلوص بالای Sio_2 تأثیر قابل توجه‌ای بر خواص مکانیکی بتن از جمله نفوذپذیری آن دارد. نفوذپذیری به‌عنوان مهمترین عامل در خرابی سازه‌ها مطرح است و کشورهای مختلف همواره متحمل خسارت‌های فراوان به جهت تعمیر و نگهداری از سازه‌ها در مقابل این عامل مخرب می‌شوند. استفاده از بتن خودمتراکم پیدایش فوق روان‌کننده‌ها در صنعت بتن روند روبه رشدی داشته است؛ اما هنوز تکنولوژی ساخت و استفاده از آن به حد تکامل نرسیده است و نیاز به تحقیق بر روی آن به شدت احساس می‌شود. استقاده از نانو مس می‌تواند جهت بهبود خواص فیزیکی و خصوصیات دوام بتن مورد استفاده قرار گیرد.

پایایی و دوام بتن از جمله مسائلی هستند که در گذشته کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. طراحان و سازندگان سازه‌ها عموماً مقاومت فشاری را تنها معیار تأثیرگذار بر مقاومت و کیفیت سازه می‌دانستند. این در صورتی است که شرایط محیطی بتن می‌تواند عامل مؤثری بر کیفیت سازه باشد و عمر مفید سازه را تحت الشعاع قرار دهد. بتن تحت شرایط محیطی مخرب می‌تواند به‌سرعت و در مدتی کمتر از زمانی که به‌عنوان عمر مفید برای آن درنظر گرفته شده است آسیب دیده و مقاومت خود را از دست بدهد. خرابی‌های زودرس سازه به‌علت شرایط محیطی مخرب گویای اهمیت دوام بتن بوده و در دهه‌های اخیر ذهن طراحان و سازندگان بسیاری را به خود مشغول کرده است .این مسأله در سازه‌هایی همچون سدها، نیروگاه‌ها، پل‌ها و تونل‌ها که عمر بهره‌برداری از آن‌ها بسیار زیاد است از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این در صورتی است که هزینه‌ی تعمیر و نگهداری آن‌ها در بسیاری از موارد از هزینه اولیه ساخت بالاتر است. هرچند به‌تنهایی با مقاومت فشاری بالا معمولاً مقاومت بیشتری در برابر حملات فیزیکی و شیمیایی محیط مخرب از خود نشان می‌دهند، اما عوامل دیگری چون نفوذپذیری و تراکم ساختاری داخلی بتن و چیدمان حفره‌های موجود در بتن نیز می‌تواند تأثیر بهسزایی در پایایی بتن داشته باشد.

کاهش عمر خدمت دهی و دوام، عوامل محیطی و درونی مختلفی می‌تواند داشته باشد. از این‌رو شناخت خواص بتن، تکنولوژی و کاربرد صحیح آن برای تأمین عمر خدمت‌دهی پیش‌بینی و طراحی شده برای آن به‌عنوان مصالح سازهای با دوام در سازه‌ها ضروری به‌نظر می‌رسد. لازم به‌ذکر است که عمر خدمت‌دهی همان عمر مفید اجزای سازهای است که طی آن سازه‌ی موردنظر خواص اصلی خود را برای برآوردن نیازهای تعیین شده بر حسب شرایط استفاده حفظ نماید. در سال ۲۰۰۷، جو و همکارانش به بررسی تأثر ذرات نانوسیلیس بر مشخصات ملات سیمان و مقایسه‌ی آن با تاثیر میکرو سیلیس پرداختند .آن‌ها در آزمایشات خود از ۴ درصد مختلف نانوسیلیس و ۳ درصد میکرو سیلیس جایگزین سیمان استفاده کردند. همچنین برای اختلاط بهتر مواد و جلوگیری از آگلومره شدن ذرات نانو در نمونه‌های حاوی نانوسیلیس ابتدا آب و نانوسیلیس با سرعت بالا (۱۲۰ دور بر دقیقه) با یکدیگر مخلوط شدند، سپس به‌تدریج سیمان به آن اضافه شده و به مدت ۳۰ ثانیه مواد با سرعت متوسط ۸۰ دور بر دقیقه مخلوط شدند. پس از آن سنگدانه‌ها به مخلوط کردن اضافه شدند. پس از اختلاط

سنگدانه‌ها، فوق روانکننده پلی کربوکسیلات برای تامین اسلامپ مورد نیاز و جلوگیری از جداشدگی اضافه شد. بر روی نمونه‌ها آزمایش مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه انجام گرفته و نتایج زیر بدست آمد:

در هر دو حالت استفاده از میکرو سیلیس و نانوسیلیس، مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌ها از مقاومت فشاری نمونه‌ی شاهد (نمونه‌ی فاقد میکرو سیلیس و نانوسیلیس) بیشتر است. نانوسیلیس نسبت به میکروسیلیس در افزایش مقاومت فشاری، بسیار موثرتر عمل می‌کند. علت مورد اخیر این است که هرچه سطح مواد پوزولانی بیشتر باشد، واکنش پوزولانی بیشتری انجام می‌شود و مقاومت بالاتری حاصل می‌شود. ازاین‌رو میتوان نتیجه گرفت که نانوسیلیس نسبت به میکرو سیلیس به دلیل داشتن سطح بیشتر در واحد حجم، عمل کرد بهتری در افزایش مقاومت ملات دارد .علاوه بر این، نانوسیلیس خاصیت ریز پرکنندگی بیشتری نسبت به میکروسلیس دارد و این مورد سبب ایجاد ساختاری متراکمتر در ملات می‌شود[۷].

خانزادی و خزائنی (۱۳۸۹) به بررسی مکانیزم‌های تاثیر نانوسیلیس در بهبود خواص مکانیکی و ریزساختار بتن پرداختند. آن‌ها در مطالعات خود مقاومت فشاری و ریزساختار بتن حاوی ۱/۵٪ نانوسیلیس، بتن حاوی ۷/۵٪ میکرو سیلیس، بتن حاوی ۶٪ میکرو سیلیس به همراه ۱/۵٪ نانوسیلیس را با نمونه شاهد مقایسه کردند. نسبت آب به سیمان در تمامی طرحها ۰/۴۵و میزان اسلامپ ۸۰ میلیمتر در نظر گرفته شد. نتایج آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌ها نشان داد که با اضافه شدن درصد کمی نانوسیلیس به بتن، مقامت فشاری نمونه‌ها به مقدار تقریبی ۳۰٪ نسبت به بتن شاهد افزایش یافته است. در میان طرح‌های اختلاط مورد بررسی در این تحقیق، بیشترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه مربوط به طرح حاوی هر دو ماده میکرو سیلیس و نانوسیلیس بود که نسبت به مقاومت فشاری نمونه‌ی مرجع ۶۸٪ افزایش مقاومت نشان داد[۱].

در این تحقیق هدف بررسی اثر رنگ پلی اورتان در بتن خودتراکم حاوی متاکائولن و میکروسیلیس بر دوام بتن مصرفی در سازه‌ها می‌باشد. از این رو، آزمایش‌های تاثیر گذار بر دوام بتن به کار رفته در یک سازه نظیر نفوذ یون کلر ، نفوذپذیری و جذب آب روی نمونه‌های ساخته شده از بتن خود متراکم انجام گرفت. بتن خود متراکم علاوه بر بتن معمولی به دلیل امتیازهای ویژه و کاربرد فراوان در سازه به خصوص در ساخت سرریزها و پوشش تونل‌ها مد نظر قرار گرفته است. نتایج این تحقیق زمینه را برای مقایسه تاثیر کاربرد انواع نانو مواد بر مشخصات بتن خود متراکم فراهم می‌نماید. ضمناً تاثیر پارامترهای مطرح شده بر مقاومت فشاری و کششی نمونه‌هایی بتن بررسی و درصد بهینه کاربرد نانو ذرات متاکائولن و میکروسیلیس در طرح اختلاط بتن خود متراکم جهت کاربرد پیشنهاد می‌گردد.

۲-روش‌کار

در این پروژه برای تولید بتن از فوق روان کننده بهره گرفته شده است و نسبت آب به مواد سیمانی در همه‌ی طرح‌ها ثابت و برابر ۰/۴ در نظر گرفته شده است. ساخت بتن در میکسر با ظرفیت ۰/۱ متر مکعب انجام شد(در این تحقیق از آب شرب شهرستان رشت جهت ساخت بتن استفاده گردید که با توجه به مصرف آشامیدنی آن برای ساخت بتن بدون مشکل است).

برای این کار ابتدا مصالح مورد نیاز توزیع گردیده و سپس وارد مرحله ساخت شده‌اند. برای ساخت ابتدا شن و ماسه وارد میکسر شد و پس از یک ربع مخلوط شدن، نصف آب اختلاط به مخلوط اضافه گردید و بعد از چند دقیقه مصالح سیمانی (اعم از سیمان و میکرو سیلیس، متاکائولن، نانو سیلیس و نانو مس بسته به طرح مورد نظر) به مخلوط اضافه شده و سپس فوق روان کننده که با مابقی آب اختلاط مخلوط شده وارد مخلوط بتن گردید. پس از رسیدن بتن به حالت مناسب، ابتدا آزمایشات بتن تازه به عمل می‌آید و پس از تایید آن، مخلوط در قالب‌های مورد نظر ریخته شد و بعد از ۲۴ ساعت نمونه‌ها از قالب بیرون آورده شده و در دمای اتاق به مدت مورد نظر در حوضچه‌های آب نگهداری شده تا در روز مورد نظر آزمایش از حوض‌ها خارج شوند. برای هر طرح ۳ نمونه مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متری برای آزمایش فشار و ۳ نمونه مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متری برای آزمایش جذب آب با رنگ پلی اورتان پوشیده که به مدت ۴۸در فضای بیرون خشک شده و سپس در آب قرار می‌دهیم و ۶ نمونه مکعبی ۱۵×۱۵×۱۵ نفوذپذیری که ۳ نمونه با رنگ پوشیده شده و ۳ نمونه به صورت معمول می‌باشد. در ۷ و ۲۸ و ۹۰ روزگی و ۳ نمونه استوانه ای۳۰×۱۵ سانتی‌متر برای آزمایش کششی ۲۸ روزه ساخته شد. در هر روز نمونه‌های موردنظر برای انجام آزمایش از حوضچه‌ها خارج شده و پس از خشک شدن سطح آن‌ها در فضای باز، برای انجام آزمایش استفاده شدند. در تمامی طرح‌ها نمونه‌های مکعبی به منظور اندازه‌گیری چگالی پس از خشک شدن در فضای باز توزین شدند.

در این مطالعه از آزمایش مقاومت فشاری بر اساس استاندارد ASTM C39-86 استفاده شد[۵]. آزمایش‌های مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۰۰ میلی متر انجام شده است. در آزمایش مقاومت فشاری، مکعب‌ها به نحوی در دستگاه فشاری قرار داده شدند که دو سطح مقابلی که در موقع بتن ریزی مجاور قالب بودند، در تماس با رکاب‌های فوقانی و تحتانی دستگاه باشند. تنش فشاری مکعبی حاصل نیز با تقسیم این نیرو بر سطح مقطع نمونه به دست می‌آید:

بتن خودتراکم درون قالب های مکعبی با ضلع ۱۰۰ میلیمتر ریخته شد و با یک پارچه مرطوب و یک ورقه پلاستیکی پوشانده می‌شود و در یک محل خشک با دمای ۲۵ درجه سانتیگراد نگهداری شده است. نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج و تا زمان آزمایش در مخزن آبی با دمای ۲۰ درجه سانتی گراد نگهداری شدند. برای حالت خشک نیز نمونه‌ها تا زمان آزمایش در محیط خشک آزمایشگاه با دمای ۲۵ درجه سانتی گراد نگهداری شدند. نمونه ها در سنین ۷ ، ۲۸ و ۹۰ روز آزمایش شدند و میانگین نتایج ۳ نمونه به عنوان نتیجه نهایی در تحلیل ها استفاده شد.برای اندازه‌گیری امواج آلتراسونیک از فرمول زیر استفاده شد:

$$V = \frac{L}{T}$$

در این رابطه؛ (T)زمان انتقال موج، (L)بعد نمونه و (V) سرعت امواج فراصوتی است. پس از انجام آزمایش امواج فراصوتی، طبق استاندارد BS EN 12390-3:2009 آزمایش مقاومت فشاری با سرعت بارگزاری ۰/۴ مگاپاسکال بر ثانیه نیز بر روی همین نمونه‌ها به وسیله‌ی دستگاه جک هیدرولیکی انجام شد.

جذب آب نمونه‌های مورد آزمایش بر طبق استاندارد ASTM C140-01 انجام گرفت. در حالی که تا رسیدن به سن مورد نظر برای گرفتن آزمایش جذب آب، نمونه‌ها داخل حوضچه آب در دمای اتاق قرار داشتند. بدین ترتیب در هر بار آزمایش جذب آب، میانگین سه نمونه مکعبی به عنوان جذب آب آن طرح معرفی گردید. در سن ۲۸ و ۹۰روزگی نمونه‌ها را از آب خارج کرده و به مدت ۱ دقیقه آن را روی یک الک سیمی قرار داده سپس توسط پارچه آب روی سطح نمونه را خشک می‌کنیم. سپس نمونه را به مدت ۲۴ ساعت در گرم‌کن قرار می‌دهیم. پس از گذشت ۲۴ ساعت و در آوردن نمونه از گرم‌کن به توزین آن می‌پردازیم. تا زمانی که اختلاف بین دو قرائت که ناشی از افت وزن به دلیل قرار گیری در حرارت ۱۰۵ درجه سانتی گراد است، بزرگ‌تر از ۰/۲٪ نباشد. آنگاه این عدد به عنوان وزن نمونه‌ی خشک (W_d) ثبت می‌گردد. حال نمونه را به مدت ۳۰ دقیقه در آب قرار داده و پس از بیرون آوردن به مدت ۱ دقیقه آن را روی یک الک سیمی قرار داده سپس توسط پارچه آب روی سطح نمونه را خشک کرده و آن را وزن می‌کنیم و این عدد به عنوان وزن اشباع با سطح خشک نمونه (W_s) ثبت می‌شود. همین عمل را پس از ۲۴ ساعت که در آب قرار داده شده وزن کرده و پس از آن W_s را محاسبه می‌کنیم. این عمل باید آنقدر تکرار شود تا اختلاف بین دو قرائت ناچیز باشد. طبق تجربه محقق زمان مورد نیاز برای آن که اختلاف بین دو قرائت ناچیز باشد، ۳ روز پس از رسیدن سن مورد نظر (۲۸ روزگی) می‌باشد.

$$\text{جذب آب\%} = \left(\frac{w_s - w_d}{w_d}\right) \times 100$$

آزمایش نفوذپذیری بتن سخت شده مطابق استاندارد BSEN 12390-8 :2009 انجام می شود. در این آزمایش نمونه بتن سخت شده در ابعاد ۱۵ سانتی در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه در مدت ۲±۷۲ ساعت به وسیله پمپ تحت فشار آب به نمونه بتنی تزریق می‌کند.

نفوذپذیری بتن معمولا از طریق محاسبه مقدار آب تحت فشار که برای جریان یافتن به درون یک نمونه بتنی داخل می‌شود، در یک فاصله زمانی مشخص تعیین میشود .با اندازه گیری عمق نفوذ آب پس از شکستن نمونه ها میتوان به معیاری برای نفوذپذیری بتن دست یافت .در تعیین مقدار نفوذ آب در نمونه‌ها سعی شد تا عدد معرفی شده، میانگینی از مقادیر مختلف نفوذ آب در طول ۱۵سانتیمتری بعد نمونه باشد. در این آزمایش نمونه‌ها ابتدا به مدت ۲۸ و ۹۰ روز در محیط حوضچه عمل آوری شده و نمونه‌های دارای رنگ بعد از ۲۴ ساعت اولیه خشک شدن در قالب با رنگ پلی اورتان پوشیده شده و به مدت ۶ روز بیرون حوضچه نگهداری شده تا به مرحله خشک نهایی برسد، بعد از آن در محیط حوضچه نگهداری شده و سپس به آزمایش نفوذپذیری پرداخته می‌شود.گام‌های زیر برای محاسبه میزان نفوذپذیری باید طی شود:

گرادیان فشار در طول نمونه از محاسبه می‌شود.

$$\Delta P = P_d - P_a$$

P: فشار محرک برحسب Pa

P: فشار اتمسفر برحسب Pa که فشار اتمسفر استاندارد برابر 325/101 Pa است.

نرخ جریان سیال خروجی در حالت جریان پایدار از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Q\left(\frac{ml}{s}\right) = \Delta v/\Delta t$$

Δv : میزان حجم جمع‌آوری شده از سیال خروجی برحسب mL

Δt : زمان جمع‌آوری سیال خروجی برحسب s

نفوذپذیر طبیعی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$k = \frac{Q \times u_w \times l}{A \times \Delta P} \times 10^{-6}$$

K: نفوذپذیری طبیعی برحسب m^2

Q: نرخ جریان خروجی در حالت جریان پایدار برحسب mL/s

u_w : ویسکوزیته آب برحسب Pa.s

L: طول نمونه برحسب m

A: سطح مقطع نمونه در جهت عمود بر حرکت سیال برحسب m^2

ΔP : گرادیان فشار برحسب Pa

مرسوم‌ترین واحد برای گزارش میزان نفوذپذیری، دارسی می‌باشد که از رابطه زیر بین دارسی و m^2 برقرار است.

$$1Darcy = 9/869233 \times 10^{-13} m^2$$

رابطه زیر بین ضریب نفوذپذیری طبیعی نمونه و ضریب نفوذپذیری ذاتی نمونه:

$$K = k \times \frac{Y}{u}$$

K: ضریب نفوذپذیری ذاتی برحسب m/s

k: ضریب نفوذپذیری طبیعی برحسب m^2

Y : وزن مخصوص سیال نفوذکننده N/m^3

u : ویسکوزیته دینامیکی سیال کننده Pa.s

مسأله دیگری در مورد آزمایش‌های نفوذپذیری وجود دارد که عمدتاً در مورد بتن‌های با کیفیت خوب مطرح است و آن این است که هیچگونه جریانی در این نوع بتن وجود ندارد. آب تا عمق معینی به داخل بتن نفوذ می‌کند. در این زمینه فرمولی توسط Valenta توسعه یافته که عمق نفوذ را به ضریب نفوذپذیری معادل k (برحسب متر بر ثانیه) با آنچه که در قانون دارسی به کاربرده شد، به‌صورت زیر تبدیل می‌نماید:

$$K = e^2/2ht$$

که در آن (e) عمق نفوذ در بتن بر حسب متر، (h) ارتفاع آب برحسب متر، (t)زمان قرار گرفتن تحت فشار برحسب ثانیه و (V)بخشی از حجم بتن اشغال شده به‌وسیله منافذ می‌باشد. مقدار (V) معرف منافذ جدا از هم مانند حباب‌های هوا می‌باشد که فقط تحت فشار با آب پر

می‌شوند و می‌توانند از افزایش در جرم بتن در خلال آزمایش محاسبه گردند، با توجه به اینکه فقط منافذ بخشی از نمونه که آب به آن‌ها نفوذ می‌کند، باید درنظر گرفته شوند، نوعاً V بین ۰/۰۲ و ۰/۰۶ قرار دارد. ارتفاع آب همراه با فشار، که معمولاً در دامنه بین ۰/۱ و ۰/۷ است، اعمال می‌شود.

از دو استاندارد شبیه به هم AASHTO T 277 و همچنین ASTMC 1202 جهت انجام آزمایش RCPT استفاده می‌شود. نمونه بتنی استوان‌های اشباع، با ارتفاع ۵۱ میلیمتر (۲ اینچ) و قطر ۱۰۱ میلیمتر (۴ اینچ) سطوح آن توسط اپوکسی (به عنوان عایق) محافظت شده است، بین دو منبع که یکی با محلول ۳٪ نمک طعام[1] و دیگری با محلول ۰/۳ نرمال سود سوزآور[2] پر شده، قرار می‌گیرد. جهت تسریع در فرآیند خوردگی نمونه‌ها، نمونه‌ها در معرض اختلاف پتانسیل ۶۰ ولت قرار می‌گیرد. در هر ۳۰ دقیقه و به مدت ۶ ساعت و به عبارتی دیگر برای ۱۲ بار جریان عبوری از نمونه اندازه‌گیری می‌شود.

۳-تجزیه و تحلیل

۳-۱-طرح اختلاط‌ها

تمامی مقادیر وزنی به کیلوگرم می‌باشد. نسبت آب به سیمان در تمامی طرح‌ها ثابت در نظر گرفته شده است. درصدهای یاد شده نسبت وزنی ماده مذکور به سیمان شاهد می‌باشد. نانو سیلیس و نانو مس به صورت وزنی جایگزین سیمان شده و درصد مذکور نسبت وزنی نانو سیلیس و نانو مس به سیمان شاهد می‌باشد.

جدول۱؛ طرح اختلاط‌ها

شماره طرح	نام طرح	سیمان	میکروسیلیس و متاکائولن	نانو سیلیس ٪	نانو مس ٪	شن	ماسه	فوق روان کننده	آب
۱	Ctrl	۴۰۵	۴۵	-	-	۹۱۰	۹۷۰	۰/۸	۱۸۰
۲	SNS1	۴۰۰	۴۵	۱	-	۹۱۰	۹۷۰	۱/۱	۱۸۰
۳	SNS2	۳۹۶	۴۵	۲	-	۹۱۰	۹۷۰	۱/۵	۱۸۰
۴	SNS3	۳۹۱	۴۵	۳	-	۹۱۰	۹۷۰	۱/۷	۱۸۰
۵	SCNC1	۴۰۰	۴۵	-	۱	۹۱۰	۹۷۰	۱	۱۸۰
۶	SCNC2	۳۹۶	۴۵	-	۲	۹۱۰	۹۷۰	۱/۲	۱۸۰
۷	SCNC3	۳۹۱	۴۵	-	۳	۹۱۰	۹۷۰	۱/۴	۱۸۰

خواص تازه بتن خود تراکم حاوی میکروسیلیس، نانوسیلیس و نانومس توسط آزمایش‌های فوق‌الذکر، مطالعه شده و در جدول(۲) بطور خلاصه ارائه گردیده است. همانطور که مشاهده می‌شود جریان اسلامپ برای مخلوط‌های حاوی درصدهای مختلف نانوسیلیس mm

[1] NaCl
[2] NaOH

۷۲۰-۶۹۵ و برای مخلوط‌های حاوی نانومس mm ۷۱۵-۶۸۰ بوده است، که این نتیجه در راستای مطالعات انجام شده می‌باشد که دلالت بر کاهش جریان اسلامپ در حضور میکروسیلیس دارد[۷].

مخلوط‌های حاوی میکروسیلیس می‌توانند ناپایداری را توسط افزایش چسبندگی کنترل کنند اما باعث کاهش سیالیت مخلوط نیز می‌گردند.

جدول ۲؛ نتایج آزمایشات حالت تازه برای بتن‌های خودتراکم

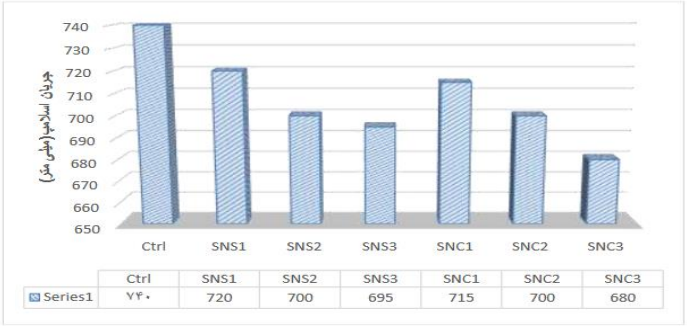
MIX CODE	جریان اسلامپ (mm)	T_{50} (Sec)	قیف V (Sec)	نسبت انسداد	VSI
Ctrl	740	2/44	9/58	0/92	1
SNS1	720	2/64	10/16	0/89	1
SNS2	700	2/88	1072	0/8	1
SNS3	695	3/07	13/4	0/7	0
SNC1	715	3	9/84	0/91	0
SNC2	700	3/46	11/68	0/84	1
SNC3	680	4/41	15/4	0/68	0

شاخص پایداری چشمی[3] در آزمایش جریان اسلامپ به عنوان ساده‌ترین روش شناخت پایداری استفاده می‌شود. بر اساس این شاخص خود تراکمی بتن به چهار گروه بین۰ (پایداری بالا) تا ۳ (ناپایداری زیاد) دسته‌بندی می‌شود. همانطور که در جدول(۲) مشاهده می‌شود، تمامی طرح‌های ساخته شده‌ی بتن خود تراکم حاوی میکروسیلیس، نانوسیلیس و نانومس دارای شاخص پایداری چشمی ۰ و۱ هستند. همانطور که در جدول(۲) مشاهده می‌شود، تمامی طرح‌های ساخته شده‌ی بتن خود تراکم حاوی میکروسیلیس، نانوسیلیس و نانومس دارای شاخص پایداری چشمی ۰ و۱ هستند.

۳-۲-نتایج آزمایش جریان اسلامپ

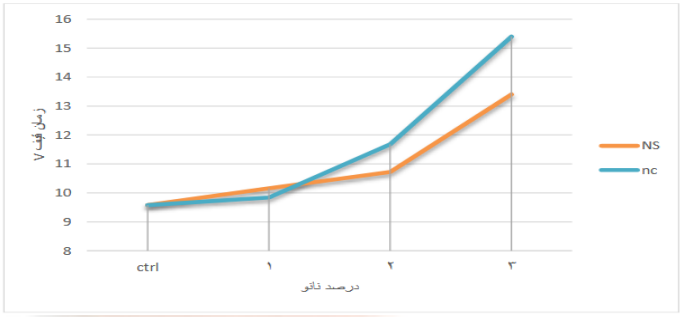
همانطور که در نمودار(۱) مشخص است جریان اسلامپ نسبت به طرح مرجع با افزایش نانو به جای سیمان کاهش می‌یابد و البته این کاهش جریان اسلامپ در نانومس بیشتر از نانوسیلیس می‌باشد. در کل با گذشت زمان مخلوط شدن، افت جریان اسلامپ اتفاق میافتد که از جمله دلایل آن می‌توان به جذب آب آزاد مخلوط بتن توسط واکنش‌های هیدراتاسیون، توسط سطح محصولات هیدراته سیمان و نیز توسط تبخیر اشاره داشت.

[3] VSI



نمودار۱؛ آزمایش جریان اسلامپ در درصدهای متفاوت نانو

نتایج آزمایش قیفV:



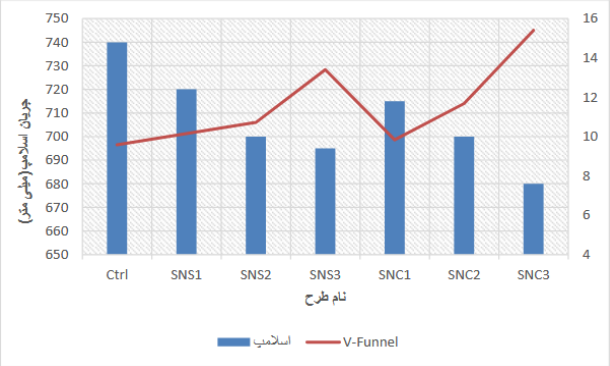
نمودار ۲؛ تاثیر میزان استفاده از نانوسیلیس و نانو مس بر زمان قیفV

نمودار(۲) نشان می‌دهد که با حضور نانو افزایش زمان عبوری از قیف Vشکل نسبت به حالت کنترل افزایش می‌یابد. این می‌تواند به علت افزایش سطح مخصوص مواد نانو بتن باشد. نانوسیلیس دارای خلوص ۹۸ درصد، میانگین اندازه ذرات ۷۰-۶۰ نانومتر، سطح مخصوص ۱۶۰ مترمربع برگرم و چگالی واقعی ۲/۴ گرم بر سانتی متر مکعب است. نانومس دارای خلوص ۹۹/۹ درصد، میانگین اندازه ذرات ۲۰ نانومتر، سطح مخصوص ۱۳۸ متر مربع بر گرم و چگالی واقعی ۹/۸ گرم بر سانتی متر مکعب می‌باشد.

۳-۳-بررسی همزمان نتایج جریان اسلامپ و قیف V

در نمودار(۳) به بررسی همزمان نتایج جریان اسلامپ و زمان عبوری از قیف Vشکل حاوی نانوسیلیس و نانومس میپردازد . همانطور که در این نمودار مشاهده می گردد، با توجه به آنکه مقدار جریان اسلامپ مخلوط SNS2 و SNC2 یکسان است اما زمان قیف SNC2 بیشتر می‌باشد. که این مطلب که جریان اسلامپ به تنهایی برای مشخص کردن ویژگی‌های حالت تازه بتن خود ترکم کافی نمی‌باشد را مورد تایید قرار می‌دهد.

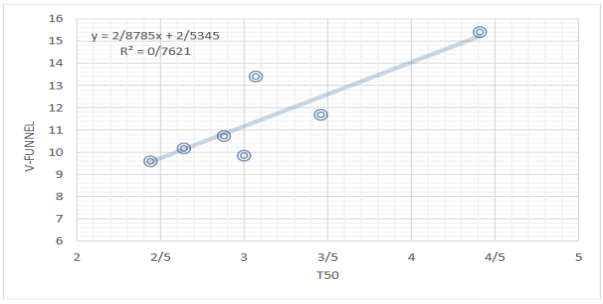
زمان قیف V تمامی مخلوطها بین ۱۵-۹ ثانیه قرار دارد. بر اساس EFNARC زمان قیف V بالاتر از ۲۵ ثانیه توصیه نمی‌گردد.



نمودار ۳؛ بررسی همزمان نتایج جریان اسلامپ و قیف Vدر مخلوط های با درصدهای مختلف نانو

۳-۴-ارتباط بین زمان قیف V و T50

در نمودار(۴) ارتباط بین زمان قیف Vشکل و T_{50} برای مخلوط‌های حاوی نانوسیلیس و نانومس نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، افزایش درصد نانو باعث افزایش زمان عبور قیفV شده است. با افزودن نانوسیلیس به علت افزایش سطح مخصوص مخلوط قابلیت تراکمی افزایش یافته و سبب افزایش زمان عبور از قیف V می‌گردد. ارتباط مناسب و البته معنادار بین زمان قیف Vو T_{50} در سری‌های ساخته شده با نانوسیلیس و نانومس در نمودار(۴) قابل ملاحظه است .همانطور که از رابطه ارائه شده مشخص است، این ارتباطو معناداری آن توسط ضریب همبستگی بالای ۰/۷۵ بیان شده است.

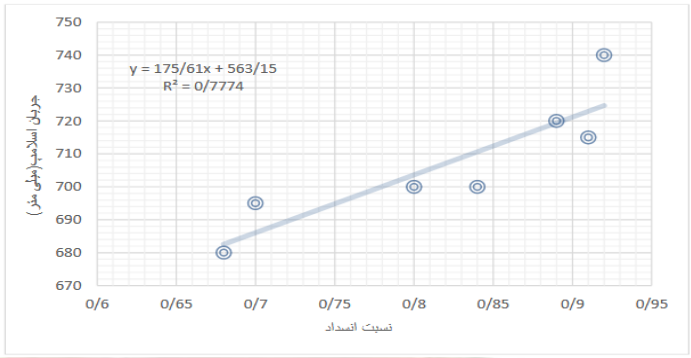


نمودار ۴؛ ارتباط بین زمان قیف V و T50 در مخلوط‌های با درصدهای مختلف نانو

۳-۵-بررسی ارتباط بین نسبت انسداد و جریان اسلامپ

در نمودار(۵) به بررسی ارتباط بین جریان اسلامپ و نسبت انسداد برای نمونه‌های حاوی نانوسیلیس و نانومس پرداخته شده است. همانطور که در این نمودار مشاهده می‌شود بین جریان اسلامپ و نسبت انسداد رابطه بسیار خوبی وجود دارد که با نشان دادن ضریب همبستگی ۰/۷۷ می‌توان آن را قابل قبول دانست. براساس این تحقیق ظرفیت کششی بالاتر از ۸۰٪ برای کاربردهای سازهای SCCمناسب است در حالی که جریان‌پذیری بالایی و پایداری داشته و هیچ نشانی از انسداد در آن دیده نمی‌شود.

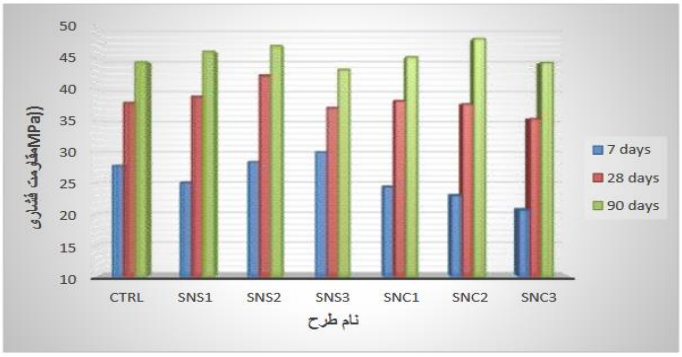
استفاده توامان آزمایش جعبه L و جریان اسلامپ تغییر شکل‌پذیری SCC را در نواحی محدود به خوبی ارزیابی می‌کند. بدین ترتیب در نمودار(۵) به بررسی همزمان جعبه L و جریان اسلامپ در بتن‌های خود تراکم حاوی نانوسیلیس و نانومس پرداخته شده است و ارتباط فی ما بین توسط روابط خطی ارائه گردیده است.



نمودار۵؛ بررسی ارتباط بین نسبت انسداد و جریان اسلامپ در مخلوط های حاوی ذرات نانو

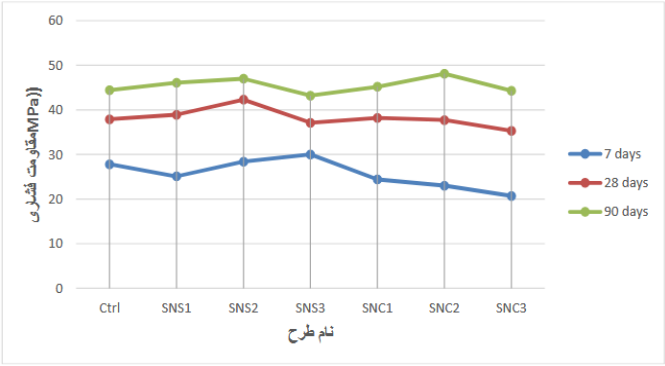
۳-۶-بررسی تغییرات مقاومت فشاری در درصدهای متفاوت جایگزینی نانو

در اختلاط‌های این مطالعه نسبت آب به سیمان و مقدار مصالح چسباننده در تمامی مخلوط‌ها یکسان می‌باشد. لذا تاثیر این عوامل در تمامی بتن‌ها یکسان بوده و عامل متغییر در این مطالعه میزان جایگزینی نانوسیلیس و نانومس در سیمان است. مقدار ترکیبی میکروسیلیس و متاکائولن در سیمان به میزان ۱۰٪ نیز ثابت در نظر گرفته شده تا خصوصیات بتن در تاثیر این ۲ ماده افزودنی نیز ثابت فرض شود. نتایج مقاومت فشاری طرح‌های حاوی ۱، ۲ و ۳درصد جانشینی نانو به جای سیمان در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه در نمودار(۶) نشان داده شده است. با توجه به این نمودار ملاحظه می‌گردد که درصدهای مختلف جانشینی نانوسیلیس به جای سیمان، باعث افزایش مقاومت فشاری می‌شود. جانشینی ۲٪ نانو مس، بیشترین افزایش مقاومت فشاری را در بین طرح‌های حاوی درصدهای مختلف نانوسیلیس از خود نشان داده است. برای مثال نسبت افزایش مقاومت طرح حاوی ۲٪ جانشینی نانوسیلیس به طرح شاهد در سن ۲۸ روز در حدود ۱۲٪ می‌باشد و همچنین با افزودن۱٪ نانوسیلیس به طرح شاهد افزایش مقاومت فشاری به مقدار ۷٪ در سن ۲۸ روزه می‌باشیم. با افزودن نانو مس به نمونه به میزان ۲٪ شاهد بیشترین افزایش مقاومت در نمونه را می‌باشیم. با افزایش مقدار نانو مس به نمونه‌های به میزان ۳٪ کاهش مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد در سن ۲۸ روزه می‌باشیم.



نمودار ۶؛ تغییرات مقاومت فشاری در درصدهای متفاوت جایگزینی نانوسیلیس و نانومس

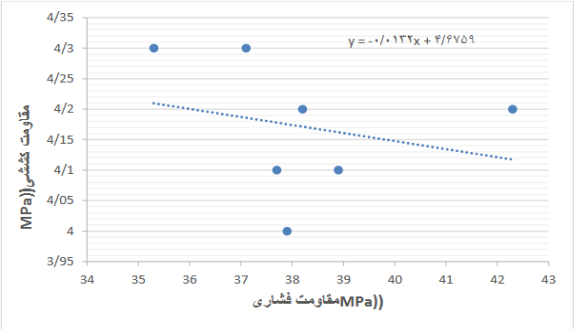
همانطور که در نمودار(۷) مشاهده می‌شود. با افزایش میزان استفاده از نانو مس در یک سن ۷ روزه، مقاومت فشاری بتن نسبت به نمونه کنترل کاهش می‌یابد .و این کاهش در جایگزینی ۳٪ نانو بسیار مشهود می‌باشد. ناپایداری دینامیکی می‌تواند به دلیل ورود هر گونه انرژی ارتعاشی به سیستم در طی انتقال مواد یا جایگزینی آنها ایجاد شود[۲]. به عبارت دیگر پایداری استاتیکی، توانایی بتن در مقاومت در برابر آب انداختگی، جدا شدگی و ته نشین شدن است که میتواند متاثر از وزن و زمان باشد[۵].



نمودار ۷؛ بررسی تغییرات مقاومت فشاری در سنین مختلف نمونه‌های نانو

۳-۷-بررسی رابطه بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی

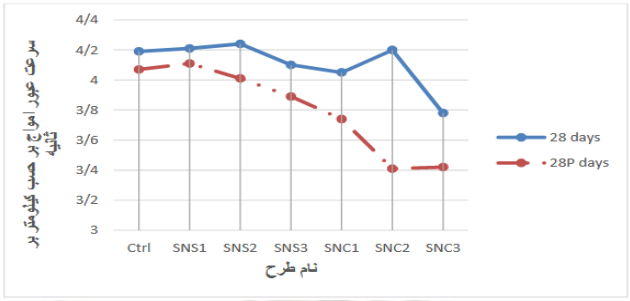
برای مقاومت‌های بین ۳۷-۴۴MPa یک ارتباط خطی بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی شکافت، در سری‌های بتن خود تراکم حاوی نانوسیلیس و نانومس با جایگزینی بین ۱-۳٪ به جای سیمان، بدست آمده است که طبق آن مقاومت کششی شکافتنی بصورت خطی، با افزایش مقاومت فشاری مکعبی، کاهش می‌یابد.



نمودار۸؛ بررسی رابطه مقاومت فشاری و مقاومت کششی در نمونه های حاوی نانو

۳-۸-سرعت امواج فراصوتی:

همانطور که از نمودار (۹) مشاهده می‌شود مقایسه بین نمونه‌های بدون رنگ پلی اورتان و پوشیده شده با رنگ پلی اورتان برداشت می‌شود، استفاده از رنگ پلی اورتان موجب کاهش سرعت عبور امواج نسبت به سایر نمونه‌های بتن خودتراکم شده است که بیشترین اختلاف نسبت به نمونه بدون رنگ مربوط به نمونه SNC2 می‌باشد.



نمودار ۹؛ مقایسه سرعت عبور امواج اولترا سونیک در نمونه های با و بدون رنگ پلی اورتان در سن ۲۸ روزه

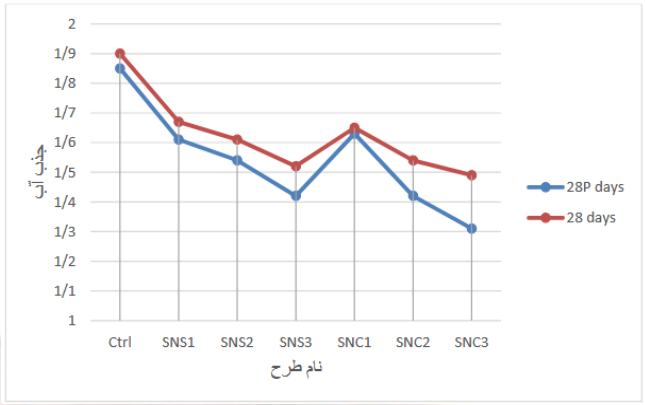
۳-۹-بررسی رابطه بین مقاومت فشاری و سرعت امواج اولتراسونیک

بیشترین ضریب همبستگی در بین دو نمونه های با و بدون رنگ، مربوط به بدون رنگ می‌باشد .یعنی بیشترین رشد مقاومت فشاری در برابر افزایش سرعت امواج اولتراسونیک در این طرح مشاهده می‌شود.

جذب آب:

افزودن نانوسیلیس به بتن باعث کاهش میزان جذب آب تا 3درصد جایگزینی با سیمان شده است. البته نانوسیلیس بیش‌ترین تأثیر خود رادرکاهش جذب آب در ۲٪، در سن ۹۰ روزه گذاشته است. میزان جذب آب برای بتن خودتراکم حاوی نانو سیلیس برای ۱٪ جایگزینی به اندازه ۱۲٪ و برای ۳٪ جایگزینی ۲۰٪ نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته است. جذب آب نمونه‌های بتن خودتراکم به صورت

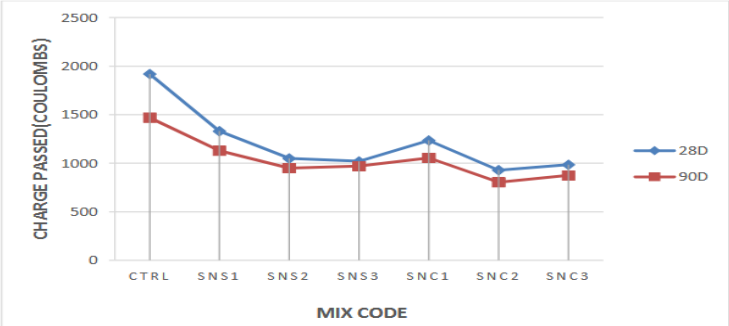
SNS3< SNS2< SNS1< Ctrl کاهش یافته است. همانطور که در نمودار(۱۰) مشاهده می شود در سن ۲۸ روزه نمونه‌های پوشیده شده با رنگ پلی اورتان دارای جذب آب کمتری نسبت به نمونه مشابه دارد و این در نمونه SNC3 به بیشترین اختلاف خود می‌رسد.



نمودار۱۰؛ روند تغییرات جذب آب در ۲۸ روزه بتن خودتراکم با و بدون رنگ پلی اورتان

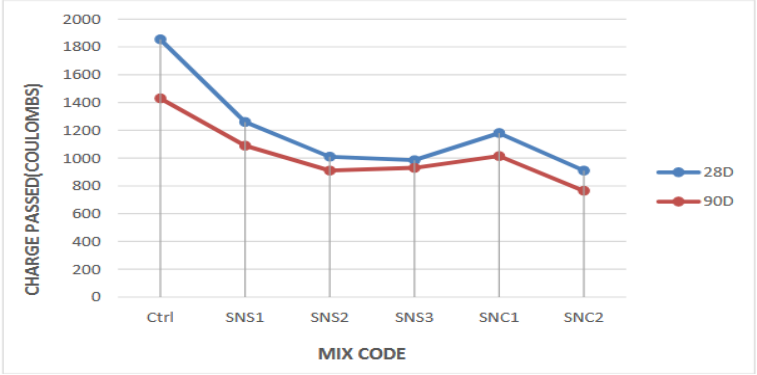
۳-۹-آزمایش نفوذ یون کلر تسریع شده(RCPT)

با توجه به نمودار (۱۱) مشاهده می‌شود در نمونه های بتن خودتراکم میکروسیلیس و متاکائولن با افزودن نانوسیلیس و نانو مس نفوذپذیری نمونه‌ها نسبت به نمونه کنترل کاهش مییابد و این کاهش با افزایش مقدار نانوسیلیس در نمونه برقرار خواهد بود.



نمودار ۱۱؛ مقایسه ۲۸ و ۹۰ روزه نتایج آزمایش نفوذ یون کلر تسریع شده (RCPT) بدون رنگ

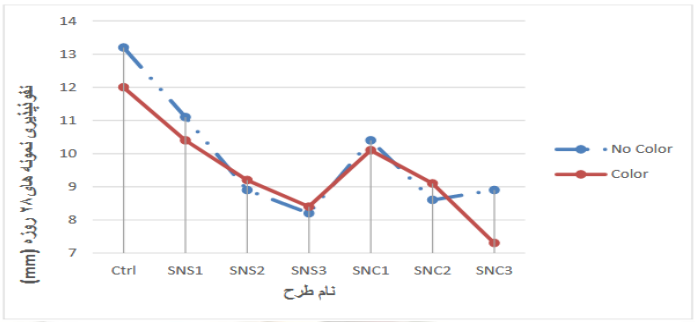
با توجه به نمودار(۱۲) شاهد کاهش نفوذپذیری طرح بتن خود تراکم می‌باشیم. که این قاعده در تمامی طرح‌ها به وضوح دیده می‌شود. همچنین در طرح‌های حاوی نانو سیلیس نسبت نفوذپذیری کمتری نسبت به نمونه‌های حاوی نانو سیلیس دارند.



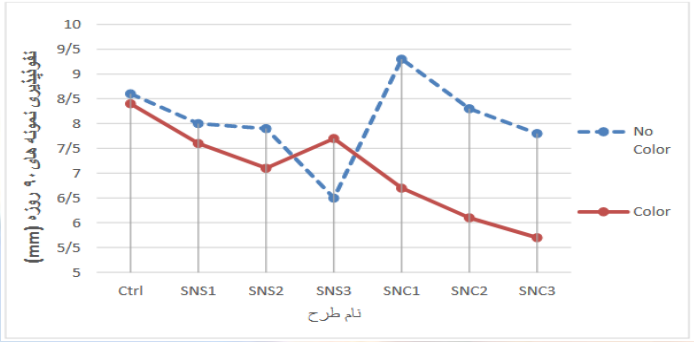
نمودار ۱۲؛ مقایسه ۲۸ و ۹۰ روزه نتایج آزمایش نفوذ یون کلر تسریع شده (RCPT) با رنگ

۳-۱۰-آزمایش نفوذپذیری

همانطور که در نمودار(۱۳) و (۱۴) مشاهده می‌شود، نفوذپذیری نمونه‌های بتن خودتراکم حاوی رنگ پلی اورتان در سن ۹۰ روزه در بیشتر طرح‌ها، کمتر از نمونه‌های بدون رنگ می‌باشد. این اختلاف در طرح حاوی ۳٪ نانومس به بیشترین مقدار خود می‌رسد.



نمودار ۱۳؛ مقایسه نفوذپذیری نمونه‌های بتن خودتراکم با و بدون رنگ پلی اورتان در سن ۲۸ روزه



نمودار ۱۴؛مقایسه نفوذپذیری نمونه های بتن خودتراکم با و بدون رنگ پلی اورتان در سن ۹۰ روزه

۴-جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

۱. براساس نتایج حاصله برای، تمام طرح‌های ساخته شده در این پروژه، جریان اسلامپ نسبت به نمونه کنترل کاهش یافته است. با استفاده از نانومس این کاهش اسلامپ بسیار بیشتر قابل مشاهده می‌باشد. همچنین با توجه به کاهش اسلامپ مقدار زمان T_{50} با افزودن نانومواد شاهد افزایش آن بودیم که با افزودن نانومس، این افزایش زمان بیشتر از طرح‌های حاوی نانو سیلیس می‌باشد.

۲. در تمام طرح‌های بتن خودتراکم ساخته شده در این تحقیق زمان قیف عبوری با افزودن نانو مواد افزایش می‌یابد که این افزایش در نمونه‌های حاوی نانو مس بسیار واضح‌تر می‌باشد. هرچند وجود میکروسیلیس و متاکائولن در تمامی نمونه‌های خود موجب افزایش زمان عبوری می‌شود و همچنین نسبت عبوری در L.Box با افزودن نانو مواد کاهش یافته و این کاهش در طرح حاوی ۳٪ نانومس به بیشترین مقدار خود می‌رسد. به طور کلی استفاده از نانو و افزایش درصد استفاده آن در بتن، موجب کاهش کارایی بتن خودتراکم می‌شود.

۳. مقاومت فشاری کلیه طرح‌های ساخته شده با افزایش سن بتن نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است. با افزایش درصد نانوسیلیس این روند افزایش حفظ شده و در ۲٪ به بیشترین مقدار افزایش می‌رسد. همچنین در طرح‌های حاوی نانومس شاهد افزایش مقاومت در ۱٪ جایگزینی هستیم. هرچند در طرح‌های جایگزینی ۳٪ نانوسیلیس و ۳٪ نانو مس در سن ۹۰ روزه کاهش مقاومت نسبت به نمونه کنترل بدست آمده است.

۴. به طور کلی مقاومت کششی طرح‌های ساخته شده با درصد حضور نانوسیلیس و افزایش آن موجب افزایش مقاومت کششی شده هرچند همین روند با شیب بیشتری در طرح‌های حاوی نانو مس دیده می‌شود و بیشترین مقاومت کششی در نمونه حاوی ۳٪ نانو مس وجود دارد.

۵. حضور نانو سیلیس به میزان ۲٪ موجب افزایش UPV در آزمایش فراصوت شده و با افزایش در نانوسیلیس به ۳٪ شاهد کاهش آن می‌باشیم. همچنین با افزودن نانومس به نمونه‌ها شاهد کاهش UPV در تمامی طرح‌ها نسبت به نمونه کنترل می‌باشیم. استفاده از رنگ پلی اورتان موجب کاهش سرعت عبور امواج در تمامی طرح‌های ساخته شده می‌باشد. و اختلاف درصد عبوری امواج در نمونه‌ای با رنگ پلی اورتان با افزایش سن بتن افزایش چشمگیری دارد.

۶. همچنین حضور نانوسیلیس و نانومس سبب کاهش جذب آب در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه می‌گردد که تأثیر مثبت نانو مس بر کاهش جذب آب از نانوسیلس در سن ۲۸ روزه بیشتر است. هر چند با افزایش سن بتن به ۹۰ روزه نانوسیلیس و نانو مس

واکنش تقریبا مساوی داشته‌اند. با افزودن رنگ پلی اورتان به نمونه‌های بتن خودتراکم کاهش جذب آب بسیار بیشتر بوده و در بعضی نمونه‌ها به ۱۰٪ نسبت به نمونه بدون رنگ کاهش داشته است.

۷. نفوذ یون کلر در نمونه‌ها حاوی نانوسیلیس و نانومس کاهش یافته و با افزایش سن نمونه‌های بتن خودتراکم روند کاهش نفوذ یون کلر مشاهده می‌شود. کاهش نفوذ یون کلر به معنای مقاومت بیشتر در برابر نفوذ در بتن می‌باشد که این مقاومت در نمونه‌های حاوی نانو مس بیشتر از نانوسیلیس مشاهده می‌شود. با افزودن رنگ پلی اورتان به نمونه شاهد کاهش نفوذ یون کلر در کلیه نمونه‌ها می‌باشیم.

۸. نتایج آزمایش نفوذپذیری نشان می‌دهد که در سن ۲۸ روزه نانو مس تا ۲٪ و نانو سیلیس تا ۳٪ ، جایگزینی بهتر بوده و با افزایش سن بتن به ۹۰ روزه نانو مس عملکرد بهتری دارد. در نمونه‌های بدون رنگ عمق نفوذپذیری بیشتر از نمونه‌های با رنگ می‌باشد. و با افزایش سن بتن، در نمونه‌های با رنگ پلی اورتان شاهد کاهش بسیار بیشتر نفوذپذیری در عمق می باشیم.

۶-پیشنهادات

۱) بررسی تأثیر حرارت‌های بالا در بتن حاوی نانوسیلیس و نانومس

۲) بررسی ترکیب نانوسیلیس و نانومس و مقایسه تاثیر استفاده همزمان آن‌ها

۳) بررسی استفاده از ضایعات ساختمانی بر روی نفوذپذیری

۴) بررسی تاثیر اپوکسی بر روی سطح بتن جهت جلوگیری از نفوذ مواد شیمیایی

۵) مقایسه تأثیر استفاده از مصالح سبک مانند لیکا و اسکوریا در بتن خود تراکم با تحقیق حاضر

۶) بررسی تأثیر نسبت‌های آب به سیمان متفاوت در بتن خودتراکم حاوی نانوسیلیس و نانومس

۷) بررسی خواص مهندسی بتن خودتراکم حاوی نانوسیلیس و نانومس با حضور الیاف شیشه

مراجع و منابع

۱. خزائنی، گ.، خانزادی، م.، بررسی مکانیزم‌های تأثیر نانوذرات سیلیس در بهبود خواص مکانیکی بتن -مطالعه ریزساختارها، مجموعه مقالات دومین کنفرانس ملی بتن، ۱۳۸۹.

2. ACI 238.1R-08. Report on measurements of workability and rheology of fresh concrete. Farmington Hills (MI): American Concrete Institute; 2008.

3. American Concrete Institute (ACI 237R - 07), “Self - Consolidating Concrete.” American Concrete Institute, Detroit, Michigan (2007).

4. British Standards Institution, BS EN 12390-3. (2009). Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens.

5. El-Chabib H, Nehdi M. Effect of mixture design parameters on segregation of self consolidating concrete. ACI Mater J 2006;103(5):374–83.

6. Li, H., Xiao, H.G. and Ou, J.P., "A study on mechanical and pressure-sensitive properties of cement mortar with nanophase materials", Cement and Concrete Research., Vol.34, No.3, pp.435-438, 2004.

7. Miao L,Incorporating ground glass in self-compacting concrete,Construction and Building Materials,No.27:919-925.

8. Standard Test Methods for Sampling and Testing Concrete Masonry Units and Related Units.