

مقایسه تاثیر نانو کربنات کلسیم و نانو سیلیس بر خواص بتن خودتراکم

رضا فرخ زاد^{۱*}، حسین دیواندری^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران
 ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

چکیده

با گسترش روز افزون استفاده از بتن، تکنولوژی های نوین در عرصه ساخت این ماده ساختمانی وارد شده است. بتن خود تراکم (SCC) یکی از انواع بتن هایی است که امروزه بشدت در صنعت ساختمان مورد استفاده قرار می گیرد. توانمند سازی بتن خود تراکم از حیث خواص مکانیکی و دوامی و در نتیجه افزایش عمر مفید بتن و کارایی سازه های بتنی، با استفاده از مواد مکمل مانند پوزولان ها و نانومواد امکان پذیر است. نانومواد از قبیل نانوسیلیس، نانوکربنات کلسیم و مواد مشابه با توجه به ساختار آن می توانند در ساخت بتن خود تراکم، مفید و ارزشمند باشند. هدف اصلی در این مقاله، بررسی اثر نانوکربنات کلسیم و نانو سیلیس بر مشخصات مکانیکی و دوامی بتن های خود تراکم می باشد. به این منظور بتن های مختلف با طرح اختلاط های حاوی صفر، یک، دو و سه درصد نانو کربنات کلسیم و نانو سیلیس ساخته شد. نمونه های مورد استفاده به صورت مکعبی ۱۵*۱۵*۱۵ و استوانه ای بسته به نوع آزمایش ساخته و در سن های ۷ و ۲۸ روزه مورد آزمایش قرار گرفتند. در تمام طرح اختلاط ها آزمایش های مربوط به رئولوژی بتن تازه شامل روانی بتن، جریان اسلامپ، قیف V، جعبه L شکل، آزمایش J رینگ و جعبه U انجام شده است. سپس آزمایش های مرتبط با مقاومت مکانیکی شامل مقاومت فشاری، و مقاومت کششی انجام گردید. در پایان جهت بررسی دوام از آزمایش های نفوذپذیری، سیکل ذوب و یخبندان، مقاومت الکتریکی و تعیین سرعت پالس در بتن استفاده گردید. در پایان خواص ریزساختاری بتن حاوی نانوکربنات تحت آزمایش های XRD و SEM قرار گرفت. در تمامی نمونه ها، استفاده از نانو کربنات کلسیم موجب افزایش خواص مقاومتی و دوامی بتن خودتراکم می گردد.

کلمات کلیدی: بتن خودتراکم (SCC)، نانو سیلیس، نانو کربنات کلسیم، خواص مکانیکی، خواص رئولوژیکی

*نویسنده مسئول: رضا فرخ زاد

پست الکترونیکی: R.Farokhzad@qiau.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۰۰۰۰/۰۰/۰۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۰۰۰۰/۰۰/۰۰

۱- مقدمه

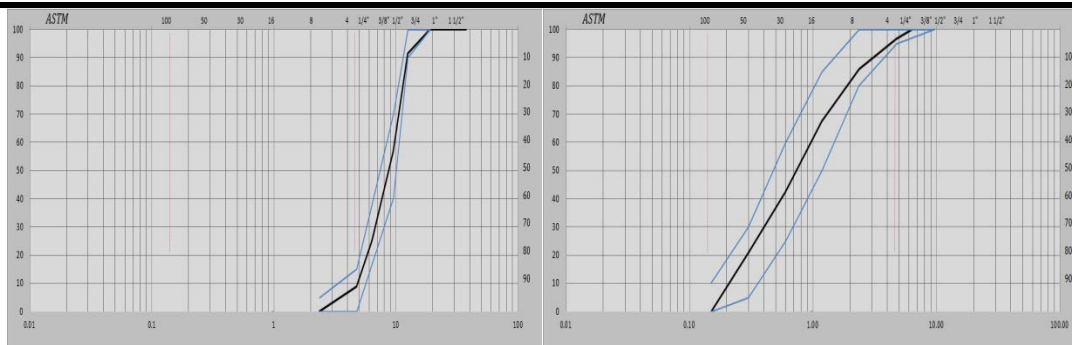
بتن خود تراکم با داشتن کارایی و روانی بالا در حین اجرا، خطر جدایی سنگدانه ها و خمیر سیمان را نداشته و در عین حال از مقاومت زیاد و دوام بالایی برخوردار است. کربنات کلسیم اصلی ترین ماده تشکیل دهنده سنگ آهک می باشد که به وفور در کانی های سطح زمین یافت می شود، از طرفی این ماده قابلیت استخراج از ضایعات صنایع را دارا می باشد. از نظر پایداری بهترین شکل کربنات کلسیم، کلسیت می باشد. تفاوت این ۳ نوع کربنات کلسیم (آراگونیت، واتریت و کلسیت) در آرایش و شکل قرارگیری عناصر تشکیل دهنده کربنات کلسیم می باشد (۱). بتن خودتراکم دارای اسلامپ بیش از ۶۰۰ میلی متر بوده و مقاومت ۲۸ روزه آن در در بیشتر مواقع بین ۲۵ تا ۵۰ مگاپاسکال می باشد. در بتن خودتراکم، امکان بتن ریزی در مقاطع ظریف پر میلگرد می باشد. از حیث اقتصادی حذف کارگر جهت تراکم بتن یکی از مزیت هایی است که این بتن نسبت به بتن های معمول داراست. (۲، ۳) بتن خود تراکم نخستین بار در ژاپن توسط H.Okamura ابداع شد و در سال ۱۹۸۸ این نوع بتن در کارگاه ساخته شد و نتایج قابل قبولی را از نظر خواص فیزیکی و مکانیکی بتن ارائه داد (۳، ۴). در سال ۲۰۰۰ اوکازا و همکاران مقاله در زمینه بتن خودتراکم و آزمایش های مربوط به این بتن را منتشر کردند (۵). دستورالعمل هایی مانند (EFNARC) در اروپا (۶-۸) از سال ۱۹۹۴ برای بتن خود تراکم تهیه شده است. در سال ۲۰۱۸ Mojdeh و همکاران (۹) در بررسی تاثیر مواد نانو کربنات و پوزولان ها بر روی ملات بتن خودتراکم مطالعاتی انجام دادند. آن ها دریافتند با تغییر در میزان دوز مصرفی نانو کربنات و نانو روی در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه تحت تاثیر قرار گرفته و میزان دوز ۳ تا ۵ درصد بهترین نتایج مقاومت فشاری حاصل می گردد. در سال ۲۰۱۲ Lui و همکاران (۱۰) بر روی تاثیر نانو کربنات کلسیم بازیافتی بر روی سیمان و فرآورده های آن مطالعاتی انجام دادند. آنها دریافتند این ماده باعث افزایش مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روزه شده و در زمان گیرش تاثیر مستقیم دارد. در سال های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۵ (۱۱، ۱۲) محققان نتایج مشابهی برای اثر بخشی نانو کربنات کلسیم (Nano-CaCO₃) و مواد مشابه بدست آوردند. آن ها مطالعات خود را بر بتن های پرمقاومت و با توانمندی بالا انجام دادند. Meng و همکاران (۱۳) در سال ۲۰۱۷ بر روی تاثیر نانو کربنات کلسیم حاوی خاکستر بادی (Fly-ash) مطالعات گسترده ای انجام داده و تاثیر مثبت این ماده را در خواص مکانیکی بتن مشاهده نمودند. محققان دیگر (۱۴-۱۷) تاثیر ماده نانو کربنات کلسیم در بتن و ملات سیمانی را مورد بررسی قرار داده و تمامی آن ها از تاثیر قابل توجه این نانو در مواد پایه سیمانی صحبت نمودند.

در این مقاله سعی شده است با استفاده از دو نانو ماده سیلیسی و کربناتی به بررسی خواص بتن سخت شده از دو حیث دوام و مقاومت مکانیکی پرداخته شود. در همین راستا انجام آزمایش ها در دو دسته مقاومتی و دوامی تقسیم بندی گردید. در دسته آزمایش های مقاومتی شامل مقاومت فشاری و مقاومت کششی تقسیم بندی گردید. آزمایش های دوامی شامل آزمایش های نفوذپذیری، سیکل ذوب و یخبندان، مقاومت الکتریکی و تعیین سرعت پالس در بتن می گردد. در این راستا نمونه گیری ها در سنین مختلف ۷ و ۲۸ مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه به بررسی نتایج بدست آمده پرداخته می شود.

۲- معرفی مواد و روش ها

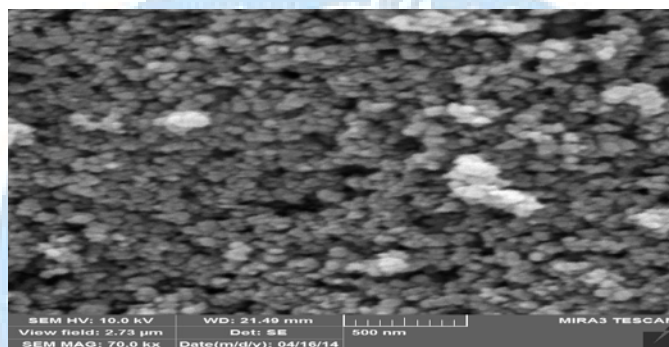
۲-۱- معرفی مصالح

در این مقاله از سیمان تیپ ۲ جهت ساخت نمونه ها استفاده شده است. ماسه مصرفی با وزن مخصوص ۲۶۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب در محدوده بین ۰/۷۵ تا ۴/۷۵ میلیمتر تهیه شده است. محدوده دانه بندی شن و ماسه بر اساس آئین نامه ASTM C33 (۱۸) در شکل شماره ۱ و ۲ آورده شده است. شن مصرفی با وزن مخصوص ۲۵۹۰ کیلوگرم بر مترمکعب بوده که در محدوده بین ۴/۷۵ تا ۱۲ میلیمتر می باشد. مواد افزودنی از نوع فوق روان کننده بر پایه کربکسیلات استفاده شده است.



شکل ۱: نمودار دانه بندی ماسه با حدود استاندارد ASTM C33 (۱۸) شکل ۲: نمودار دانه بندی شن با حدود استاندارد ASTM C33 (۱۸)

بیش از ۴٪ پوسته زمین از کربنات کلسیم (CaCO₃) تشکیل شده و این ماده را می توان در سراسر کره زمین یافت. کربنات کلسیم را می توان از ضایعات صنایع و یا به صورت مصنوعی تولید نمود. جهت اطمینان از ابعاد نانوکربنات کلسیم آزمایش SEM انجام شده و در شکل شماره ۳ قابل مشاهده می باشد. با توجه به شکل ۳ و مقیاس خطی روی آن، می توان محدوده ابعاد نانو کربنات کلسیم را در حدود ۲۰ الی ۶۰ نانومتر تخمین زد که دلیلی بر نانو بودن مواد مصرفی می باشد.



شکل ۳: تصویر SEM از ذرات نانو کربنات کلسیم

۲-۲- طرح اختلاط

در تمامی طرح های اختلاط ارائه شده، نسبت سنگدانه ها و نسبت آب به سیمان حفظ شده و تنها میزان مواد نانو کربنات کلسیم، نانو سیلیس و فوق روان کننده مصرفی تغییر کرده است. در جدول شماره ۱ طرح های اختلاط مورد استفاده مشخص شده است.

جدول ۱: طرح اختلاط نهایی مورد استفاده در آزمایشگاه

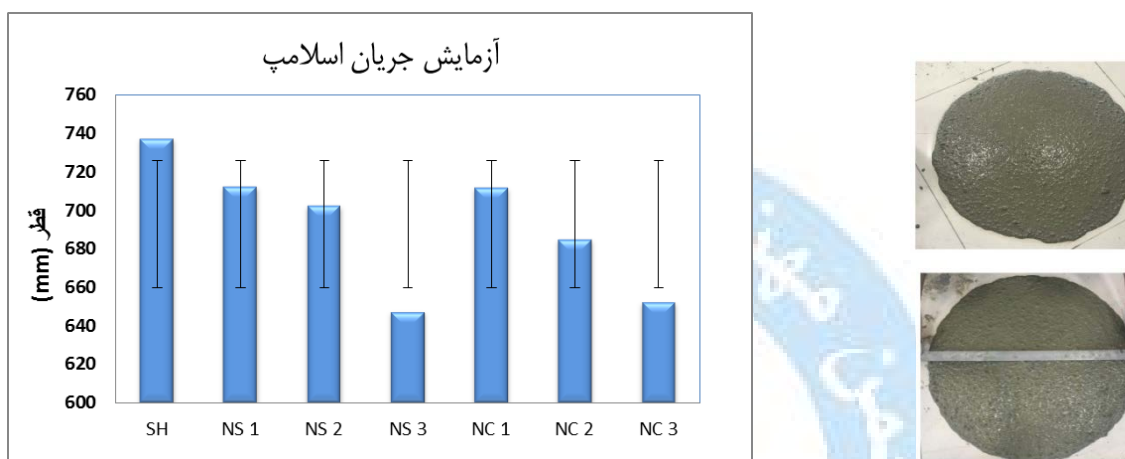
طرح اختلاط	نسبت آب به سیمان	آب Kg/m ³	سیمان Kg/m ³	ماسه Kg/m ³	شن Kg/m ³	پودر سنگ Kg/m ³	فوق روان کننده (%)	نانو کربنات کلسیم Kg/m ³	نانو سیلیس Kg/m ³
SH	0.4	180	450	1011.36	688	20.64	0.7	0	0
NC 1	0.4	180	445.5	1011.36	688	20.64	0.8	4.5	0
NC 2	0.4	180	436.5	1011.36	688	20.64	1	9	0
NC 3	0.4	180	423	1011.36	688	20.64	1.1	13.5	0
NS 1	0.4	180	445.5	1011.36	688	20.64	0.9	0	4.5
NS 2	0.4	180	436.5	1011.36	688	20.64	1	0	9
NS 3	0.4	180	423	1011.36	688	20.64	1.2	0	13.5

۳- آزمایش های بتن خودتراکم

در این قسمت به تعریف و ارائه نتایج آزمایش های مختلفی که بر روی بتن خودتراکم پرداخته شده است. این آزمایش ها به دو دسته خواص بتن تازه و خواص مکانیکی تقسیم بندی می شوند. نتایج آزمایش های بتن تازه بر اساس استاندارد EFNARC (6)، می باشد.

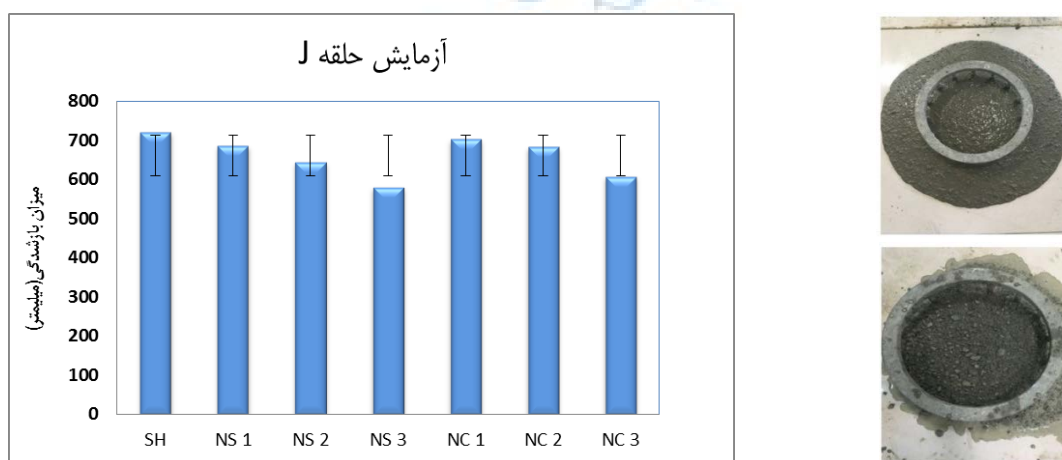
۳-۱- آزمایش بتن تازه خود تراکم

اولین آزمایش مورد بررسی جریان اسلامپ بوده که یکی از آزمایش های رایج برای سنجش خصوصیات بتن خودتراکم و به منظور تعیین توانایی تغییر شکل بتن تحت اثر وزن خود بدون وجود هیچ قیدی بجز اصطکاک صفحه جریان می باشد. مقدار مجاز آن بین ۶۵ الی ۸۰ سانتیمتر می باشد. نمونه ای از نحوه انجام این آزمایش در شکل شماره ۴ آورده شده است.



شکل ۴: نتایج آزمایش جریان اسلامپ برای تمامی نمونه ها

جریان اسلامپ در تمامی نمونه ها مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج آن در شکل شماره ۴ قابل مشاهده است. افزودن نانومواد باعث کاهش جریان مواد شده که این نتیجه از قبل مورد انتظار بود ولیکن میزان کاهش جریان در نمونه های حاوی نانوسیلیس مشهودتر می باشد که علت آن را می توان در جذب آب بالای نانوسیلیس دانست. آزمایش حلقه جی طبق استاندارد ASTM C1621 (۱۹) به نوعی شبیه سازی عبور بتن از بین موانع بخصوص آرماتورهای متراکم موجود در قالب می باشد. از این آزمایش می توان برای تعیین ویژگی قابلیت عبور بتن تازه که خود متاثر از دو پارامتر اساسی تنش تسلیم و لزجت خمیری مورد استفاده می باشد. نمونه ای از نحوه انجام آزمایش در شکل شماره ۵ آمده است.

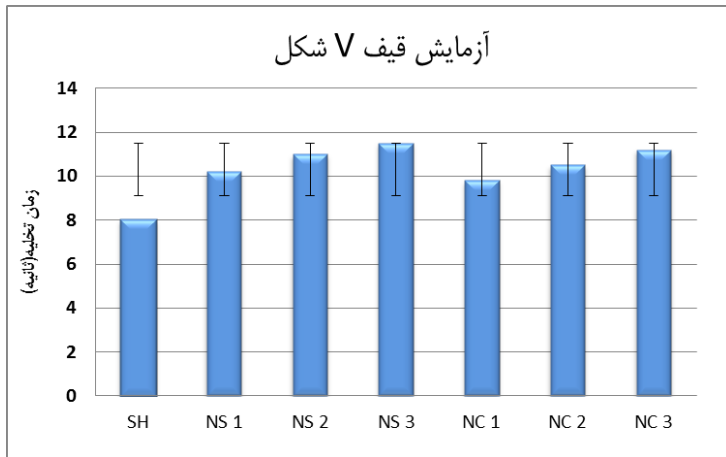


شکل ۵-ب: نتایج آزمایش حلقه J برای انواع طرح اختلاط های مورد استفاده

شکل ۵-الف: نحوه انجام آزمایش حلقه J

شکل ۵: آزمایش حلقه J طرح اختلاط نادرست و طرح اختلاط صحیح

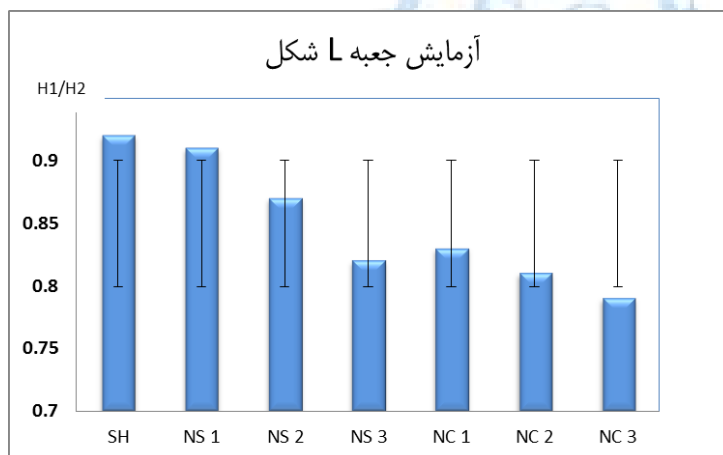
میزان قابلیت عبور در این آزمایش مطابق شکل شماره ۵ در بتن های حاوی نانومواد کاهش یافته است ولیکن میزان کاهش در نانوسیلیس قابل توجه بوده و علت آن جذب آب بالای نانوسیلیس می باشد. مدت زمان خروج بتن از یک قیف V شکل استاندارد اندازه گیری شده و به عنوان معیار قابلیت پرکنندگی و لزجت خمیری بتن مورد استفاده قرار می گیرد (۶). نمونه ای از نحوه انجام آن در شکل شماره ۶-الف قابل مشاهده می باشد.



شکل ۶-الف: نحوه انجام آزمایش قیف V شکل ۶-ب: نتایج آزمایش قیف V برای انواع طرح اختلاط های مورد استفاده
شکل ۶: بررسی آزمایش قیف V برای انواع طرح اختلاط های مورد استفاده

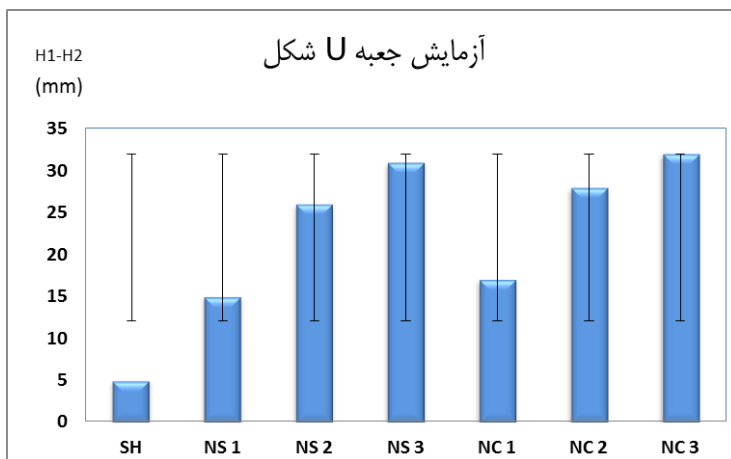
میزان مدت خروج بر اساس استاندارد EFNARC (۶) مدت زمان خروج در بازه ۲ الی ۸ ثانیه محدود می گردد. علاوه بر مدت زمان خروج بتن که در این آزمایش اندازه گیری می شود نحوه خروج بتن از قیف و یکنواختی بتن خارج شده نیز مهم می باشد. با توجه به نتایج شکل ۶-ب می توان یافت میزان جریان پذیری با افزودن نانومواد افزایش می یابد ولی میزان افزایش اصلی مربوط به نانوسیلیس می باشد. فعل و انفعالات نانوسیلیس در مقایسه با نانوکربنات بیشتر بوده و این امر موجب می گردد جریان پذیری در بتن کاهش یابد.

آزمایش جعبه L یکی از انواع آزمایش های بتن خود تراکم تازه می باشد. این آزمایش بیانگر قابلیت پرکنندگی و قابلیت عبور بتن خودتراکم می باشد. همچنین می توان با وجود یا عدم وجود جداشدگی بتن را به صورت چشمی مشاهده نمود. با توجه به استاندارد EFNARC (۶) حدود پذیرش آن بر اساس تقسیم نسبت دو ارتفاع طرفین بین ۰.۸ الی ۱ می باشد. در شکل شماره ۷ نمونه ای از انجام آزمایش L آورده شده است.



شکل ۷-الف: نحوه انجام آزمایش جعبه L شکل ۷-ب: نتایج آزمایش جعبه L برای انواع طرح اختلاط های مورد استفاده
شکل ۷: آزمایش جعبه L شکل با طرح اختلاط صحیح

آزمایش جعبه U برای اندازه گیری قابلیت پر کردن و قابلیت عبور بتن خودتراکم استفاده می شود. این دستگاه شامل مجرای است که توسط یک تیغه جداکننده و یک دریچه متحرک در وسط به دو قسمت تقسیم شده است. میلگردهایی با قطر اسمی ۱۳ میلیمتر در قسمت دریچه با فاصله مرکز به مرکز ۵۰ میلیمتر نصب شده اند. این آزمایش برای سنجش توانایی عبور بتن طراحی شده و میزان اختلاف ارتفاع بتن در دو مجرا باید کمتر از ۳۰ میلیمتر باشد. (۶)

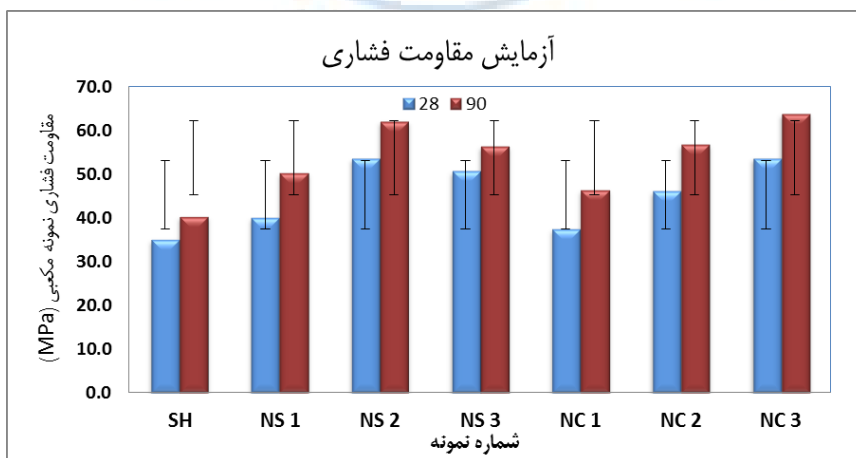


شکل ۸: نتایج آزمایش جعبه U شکل با طرح اختلاط صحیح

در شکل شماره ۸ نتایج آزمایش جعبه U قابل مشاهده می باشد. افزودن نانو سیلیس در مخلوط بتنی موجب افزایش تفاضل نمونه ها شده و به عبارتی قابلیت عبور را به شدت تحت تاثیر قرار می دهد ولی تاثیر دو نوع نانو در این آزمایش تاثیر مشابهی داشته است.

۲-۳- آزمایش های بررسی خواص مکانیکی

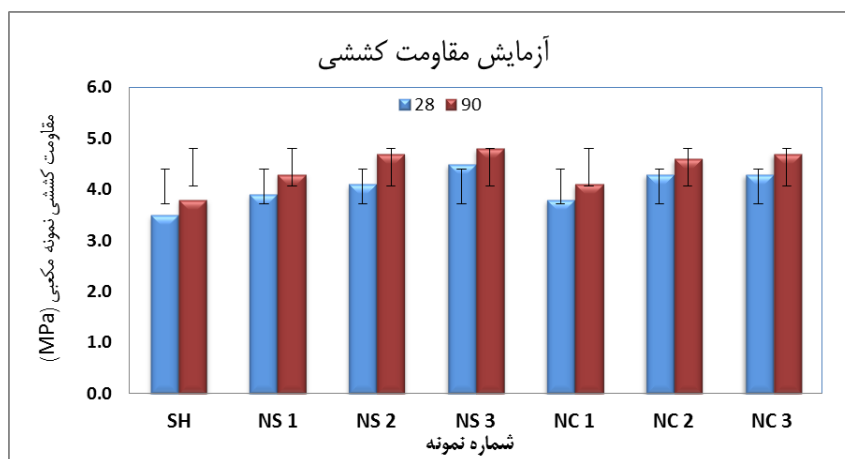
در این قسمت به بررسی آزمایشات مکانیکی بر روی بتن سخت شده شامل مقاومت فشاری و کششی پرداخته می شود. آزمایش مقاومت فشاری یکی از آزمایش های مورد نیاز می باشد که نحوه تعیین مقاومت فشاری طبق استاندارد BS EN12390 می باشد. نتایج مقاومت فشاری در شکل شماره ۹ آمده است. در این آزمایش از ۳ نمونه مکعبی ۱۰*۱۰*۱۰ سانتیمتری برای هر طرح اختلاط در یک سن استفاده شده است.



شکل ۹: نتایج آزمایش مقاومت فشاری در دو سن ۲۸ و ۹۰ روزه

با توجه به نمودار شماره ۹، افزایش میزان نانو کربنات کلسیم و نانو سیلیس نسبت به نمونه شاهد باعث افزایش مقاومت فشاری بتن خودتراکم شده است. بهترین نتیجه برای بتن خودتراکم حاوی نانو سیلیس دو درصد مشاهده شده و افزایش مقاومت فشاری در بتن

حاوی نانوکربنات کلسیم سه درصد مشاهده گردید. افزایش مقاومت در سن ۹۰ روز مشهودتر می باشد که به دلیل خاصیت پوزولانی مواد نانو کربنات کلسیم و نانو سیلیس موجود در این نمونه ها می باشد. به عبارت دیگر نانوسیلیس به دلیل تقویت حلقه های C-S-H و پیوندهای ریز ساختاری بتن موجب ارتقاء خواص مکانیکی بتن می شود که این موارد در شکل شماره ۹ به صورت کامل مشهود می باشد. به نظر می رسد نانوکربنات کلسیم به عنصر مقاومتی $Ca(OH)_2$ تاثیر گذاشته و موجب تقویت پیوند واکنش ها می شود. آزمایش کشش برزیلی (اندازه گیری مقاومت کششی بتن به روش دو نیمه شدن) جهت تعیین مقاومت کششی بتن، بر اساس استاندارد ASTM C496 انجام گردید.

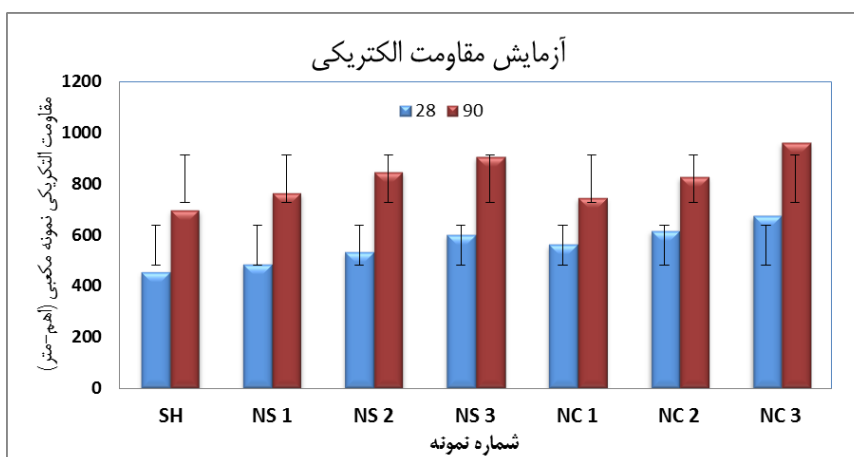


شکل ۱۰: نتایج آزمایش مقاومت کششی در دو سن ۲۸ و ۹۰ روزه

شکل شماره ۱۰ نتایج آزمایش کششی بتن در دو سن ۲۸ و ۹۰ روزه قابل مشاهده می باشد. افزودن نانوسیلیس و نانوکربنات کلسیم به نمونه های بتنی تغییر چندانی در مقاومت کششی ایجاد نکرده است. اگرچه افزایش نانومواد باعث تغییر مقاومت کششی در بتن شده است ولی مقدار آن قابل توجه نمی باشد. مقدار افزایش مقاومت کششی در نمونه ای نانوسیلیس و نانوکربنات کلسیم به ترتیب در اثر تقویت پیوندهای C-S-H و $Ca(OH)_2$ می باشد.

۳-۳- آزمایش های خواص دوامی

در این قسمت به بررسی انواع آزمایش های دوامی شامل آزمایش مقاومت الکتریکی، نفوذپذیری، تعیین سرعت فراصوتی در بتن پرداخته می شود. آزمایش مقاومت الکتریکی جهت سنجش میزان مقاومت نمونه در برابر خوردگی است. خوردگی یک پدیده الکترو شیمیایی است.



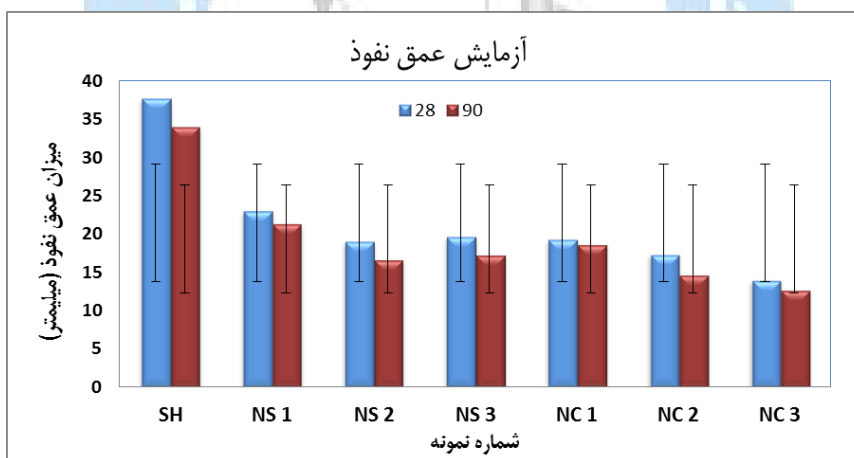
شکل ۱۱: نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی در دو سن ۲۸ و ۹۰ روزه

شکل شماره ۱۱ نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی در دو سن ۲۸ و ۹۰ روزه را نشان می دهد. با توجه خواص ریز ساختاری نانوسیلیس و نانوکربنات کلسیم و پر نمودن فضاهای خالی در نمونه بتن جریان برق افزایش یافته و این موضوع نشان می دهد، بتن در مقابل حملات کلرایدی و در نتیجه خوردگی میلگرد دوام بیشتری خواهد داشت. یکی از عوامل تاثیرگذار در پایداری بتن، میزان نفوذپذیری آن است که به صورت سیکل ذوب و یخبندان، زنگ زدگی میلگردها یا امراض دیگر در بتن بروز می نماید. برای اندازه گیری میزان عمق نفوذپذیری در بتن از دستگاه نفوذ پذیری آب در بتن مطابق شکل شماره ۱۲ و بر اساس استاندارد DIN 1048 استفاده گردید.



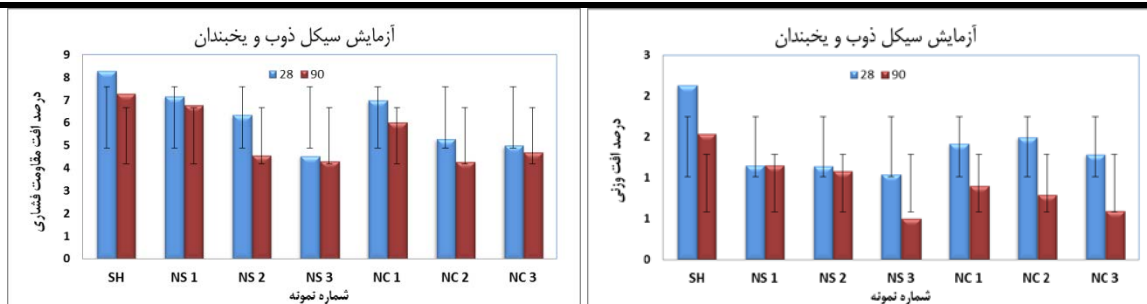
شکل ۱۲: نحوه انجام آزمایش عمق نفوذ بر اساس استاندارد DIN 1048

در شکل شماره ۱۳ میزان عمق نفوذ بر اساس میلیمتر برای انواع طرح اختلاط ارائه شده است. همانطور که انتظار می رود با وجود نانومواد در داخل ریزساختار بتن، میزان نفوذپذیری به شدت کاهش می یابد، علت آن در خاصیت پرکنندگی و ایجاد واکنش های ریزساختاری است. نکته جالب توجه در این تحقیق تاثیر بسیار زیاد نانوکربنات کلسیم در کاهش میزان عمق نفوذ می باشد. نانوکربنات کلسیم حاوی مقادیر زیادی آهک نشکفته CaO می باشد که در صورت افزودن آب به عنصر $Ca(OH)_2$ تبدیل می شود که این ماده همان آهک شکفته است و این فرآیند با افزایش حجم زیادی همراه خواهد بود که موجب کاهش میزان نفوذپذیری در بتن می گردد.



شکل ۱۳: نتایج آزمایش عمق نفوذ در دو سن ۲۸ و ۹۰ روزه

یکی از آزمایش های پرکاربرد در تعیین میزان دوام بتن آزمایش سیکل ذوب و یخبندان مطابق با استاندارد ASTM C666 است. این آزمایش رابطه مستقیمی با میزان عمق نفوذ بتن دارد. دما در این آزمایش بین منفی ۱۷٫۸ درجه سانتی گراد تا مثبت ۴ درجه سانتیگراد تغییر می نماید.

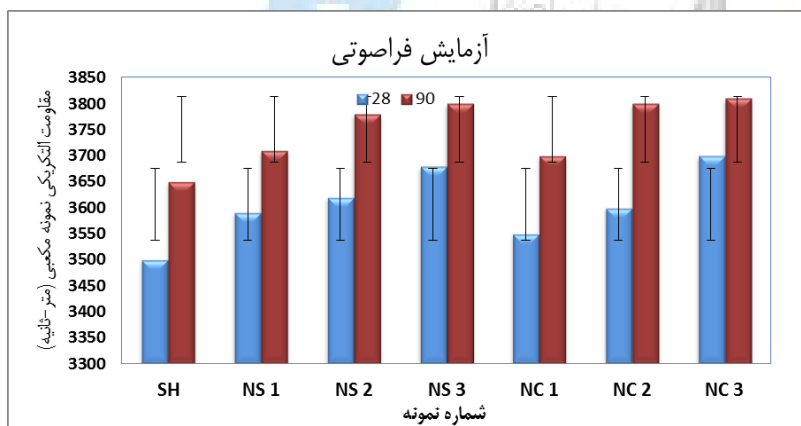


الف- درصد افت وزنی در آزمایش

ب- درصد افت مقاومت فشاری در آزمایش

شکل ۱۴: نتایج آزمایش سیکل ذوب و یخبندان در دو سن ۲۸ و ۹۰ روزه

در شکل شماره ۱۴ الف و ب نتایج آزمایش سیکل ذوب و یخبندان آمده است. در شکل شماره ۱۴ الف میزان درصد افت وزنی نمونه ها در آزمایش ذکر شده است. میزان افت وزنی در نمونه شاهد بسیار زیاد بوده که علت را می توان در نفوذپذیری بالای نمونه ها یافت. با افزودن نانومواد به نمونه ها با کاهش میزان نفوذ پذیری، میزان افت وزنی در سیکل ذوب و یخبندان نیز کاهش می یابد. در سن ۹۰ روزه میزان افت وزنی به صورت محسوسی کاهش می یابد که علت آن در تکمیل پیوندها و کم شدن میزان نفوذ پذیری می باشد. میزان افت وزنی در نمونه های حاوی نانومواد در بیشترین مقدار آن تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند. جهت تعیین سرعت موج فراصوتی در بتن از دستگاه Pundit lab ساخت کشور سوئیس استفاده شد. بر اساس تحقیقات انجام گرفته مطابق مراجع استاندارد (۲۰) و (۲۱، ۲۲) جهت بررسی و ارزیابی خواص بتن از فرکانس در حدود ۴۰ الی ۸۰ کیلو هرتز استفاده می شود و با توجه به این موضوع در این تحقیق از سرعت ۵۴ کیلو هرتز استفاده شد. در شکل شماره ۱۵ نمایی از انجام آزمایش فراصوتی قابل مشاهده می باشد.



شکل ۱۵- الف: نمایی کل از نحوه انجام آزمایش

ب- نتایج آزمایش فراصوتی برای انواع طرح اختلاط

شکل ۱۵: نتایج آزمایش فراصوتی در دو سن ۲۸ و ۹۰ روزه

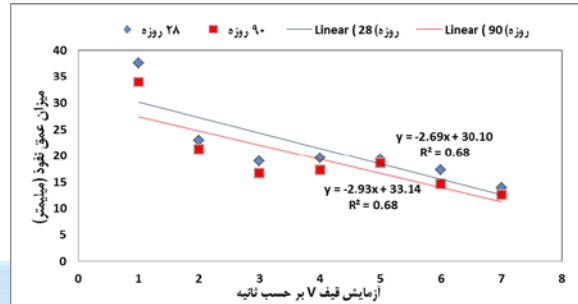
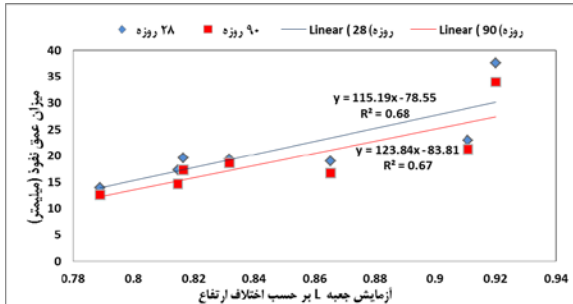
استفاده از مواد نانو به دلیل ساختار ریز آن موجب افزایش سرعت امواج در داخل بتن می گردد و این موضوع در شکل شماره ۱۵ قابل مشاهده می باشد.

۴- مقایسه و بررسی نتایج

در این بخش به بررسی اثر آزمایش های مختلف بر روی هفت طرح اختلاط پرداخته می شود و اثر هر یک را در مقایسه پارامترهای دیگر بر روی نمودار نشان داده و به تحلیل هر یک پرداخته می شود.

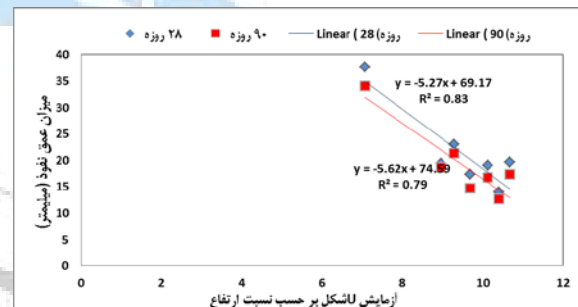
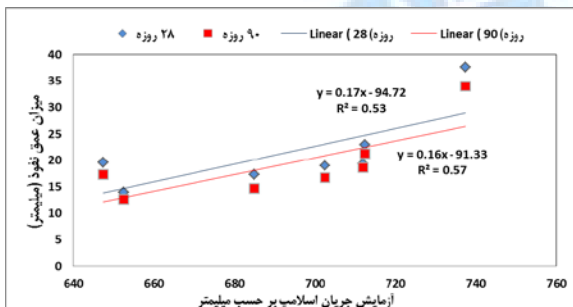
۴-۱: بررسی نتایج آزمایش های بتن تازه و میزان نفوذپذیری آن

با توجه به نمودار ۱۶-ج (جریان اسلامپ- نفوذپذیری)، کاهش قطر دایره اسلامپ، تاثیر مستقیمی بر عمق نفوذ آب دارا می باشد. نمودار شماره ۱۶-الف رابطه بین قیف ۷- نفوذپذیری را نشان می دهد. به طوری که با افزایش مدت زمان خروج بتن خودتراکم از قیف ۷ شکل، عمق نفوذ کاهش یافته است. به طور کلی در شکل شماره ۱۶، بهترین نتایج مربوط به NC 2 و NC 3 است که کمترین میزان نفوذپذیری را در بین این هفت طرح اختلاط به خود اختصاص داده اند.



ب- بررسی رابطه بین آزمایش جعبه L و میزان عمق نفوذ

الف- بررسی رابطه بین آزمایش قیف ۷ و میزان عمق نفوذ



ج- بررسی رابطه بین جریان اسلامپ و میزان عمق نفوذ

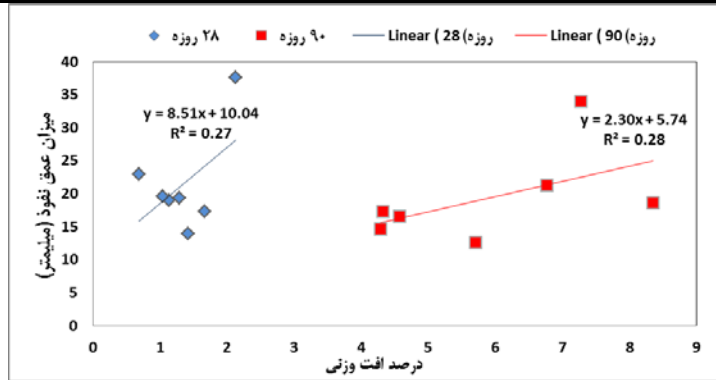
پ- بررسی رابطه بین آزمایش جعبه U و میزان عمق نفوذ

شکل شماره ۱۶: بررسی تاثیر انواع آزمایش های بتن تازه بر روی میزان نفوذپذیری بتن سخت شده

با توجه به شکل شماره ۱۶، با اضافه کردن نانوسیلیس و نانو کربنات کلسیم به بتن خودتراکم تاثیر مثبتی بر روی کاهش عمق نفوذ آب به بتن مشاهده می گردد. کاهش نفوذ به علت سطح مقطع زیاد نانوها به نسبت دیگر مواد تشکیل دهنده بتن می باشد و افزایش این سطح مقطع تاثیر مثبتی بر روی جلوگیری از نفوذ آب به بتن گذاشته است. از طرفی به دلیل سطح مخصوص زیاد نانوکربنات و نانوسیلیس، بتن خودتراکم روانی و کارپذیری خود را تا حدی از دست داده است.

۴-۲: بررسی اثر نفوذپذیری بر افت مقاومت ناشی از سیکل ذوب و یخبندان

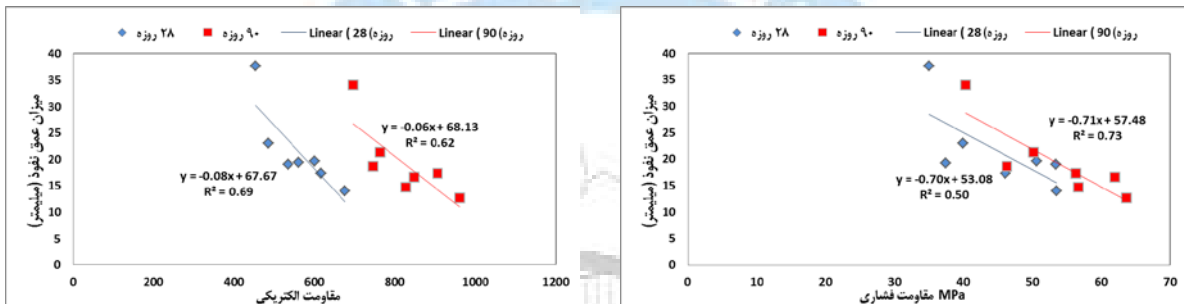
در شکل شماره ۱۷ میزان افت مقاومت ناشی از سیکل و ارتباط آن با نفوذپذیری مورد بررسی قرار گرفته است. بطور کلی کاهش عمق نفوذ بر رو افت مقاومت تاثیر مثبت داشته و بهترین نتیجه در طرح اختلاط NC 2 قابل مشاهده بوده که کمترین افت مقاومتی را داشته است.



شکل شماره ۱۷: نمودار مقایسه عمق نفوذپذیری با افت مقاومت ناشی از سیکل ذوب و یخبندان

۳-۴: بررسی رابطه بین مقاومت فشاری، الکتریکی و نفوذپذیری

شکل شماره ۱۸-الف رابطه بین مقاومت فشاری و نفوذپذیری را مشخص نموده است. بطورکلی با افزایش میزان نانوها به بتن خودتراکم، مقاومت الکتریکی افزایش می یابد. نمونه طرح اختلاط NC 3 کمترین میزان عمق نفوذ را نمایش می دهد.



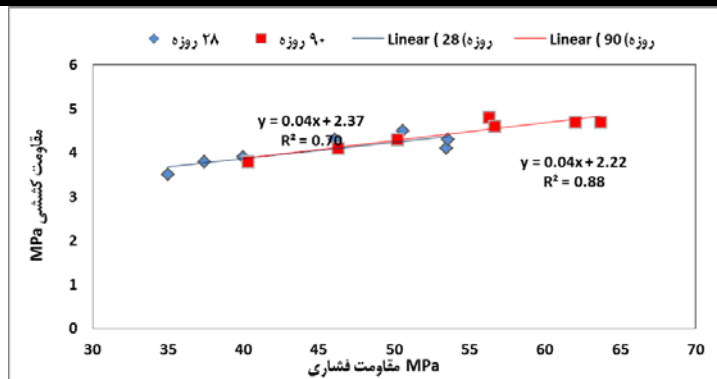
الف- بررسی رابطه بین عمق نفوذ و مقاومت فشاری

ب- بررسی رابطه بین عمق نفوذ و مقاومت الکتریکی

شکل شماره ۱۸-ب رابطه بین مقاومت الکتریکی و نفوذپذیری را مشخص نموده است. با کاهش عمق نفوذ آب به بتن، مقاومت فشاری افزایش یافته است. در واقع طرح های اختلاطی که کمترین عمق نفوذ آب به خود را اختصاص داده اند، همان طرح هایی هستند که به بیشترین مقاومت فشاری رسیده اند.

۶-۴: بررسی رابطه مقاومت کششی و مقاومت فشاری

شکل شماره ۱۹ رابطه بین مقاومت کششی و مقاومت فشاری را مشخص نموده است. با افزایش نانوسیلیس به بتن خودتراکم مقاومت فشاری افزایش یافته و بهترین نتیجه مربوط به طرح اختلاط NS 2 است که البته همین طرح بهترین مقاومت کششی را نیز به خود اختصاص داده است.

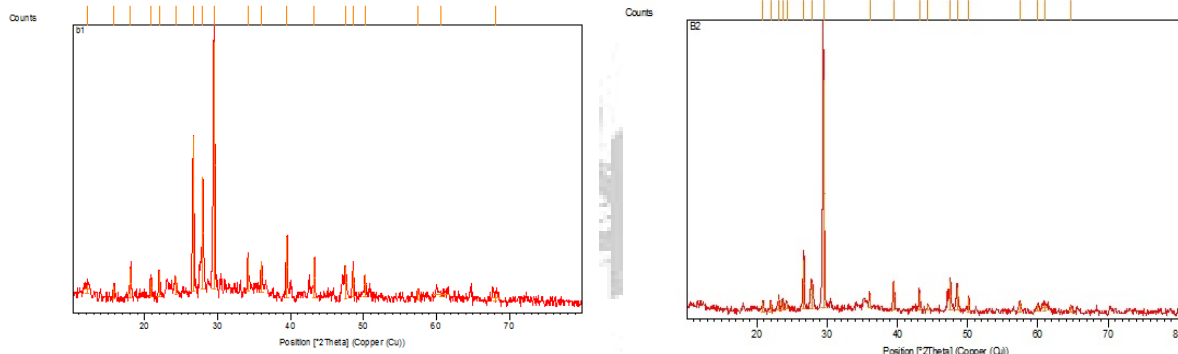


شکل شماره ۱۹: نمودار مقایسه بین مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی

با افزودن نانو کربنات کلسیم به بتن خودتراکم، مقاومت فشاری افزایش می یابد. بهترین نتیجه مربوط به طرح اختلاط NC 3 می باشد.

۵- بررسی نتایج آزمایش پراش پرتو ایکس (XRD)

نتایج آزمایش پراش پرتو ایکس با افزودن ۳٪ نانو کربنات کلسیم در شکل شماره ۲۰ قابل مشاهده است. در شکل ۲۰-ب شدت پیک ها افزایش می یابد. اندازه متوسط کریستالیت ها از روی عرض پیک ها در نصف ارتفاع پیک بدست می آید. به عبارت دیگر افزایش شدت پیک ها نشان دهنده تشکیل فازهای کوارتز بیشتر می باشد.



ب- نمونه بتن دارای ۳ درصد نانو کربنات کلسیم

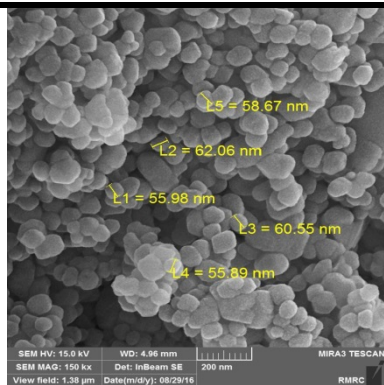
الف- نمونه شاهد بتن (فاقد نانو کربنات کلسیم)

شکل شماره ۲۰: مقایسه دو نمونه بتن فاقد نانو و حاوی ۳ درصد نانو در آزمایش XRD

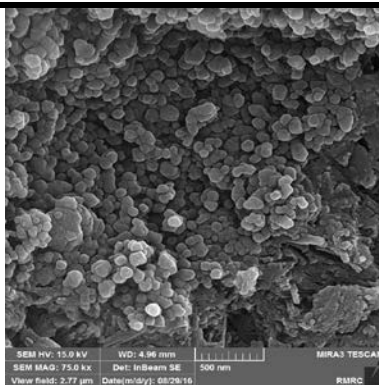
با افزایش شدت پیک ها و افزایش عرض پیک در نصف ارتفاع، همچنین در حالت ایده آل باید پیک در هر زاویه که پراش رخ می دهد به صورت خط مستقیم (بدون عرض) باشد اما با ریز شدن کریستال ها، تنش داخلی کریستال (در مقیاس اتمی) افزایش و پیک ها عریض تر می شوند که در شکل شماره ۲۰-ب قابل مشاهده می باشد.

۶- بررسی نتایج آزمایش میکروسکوپ الکترونی (SEM)

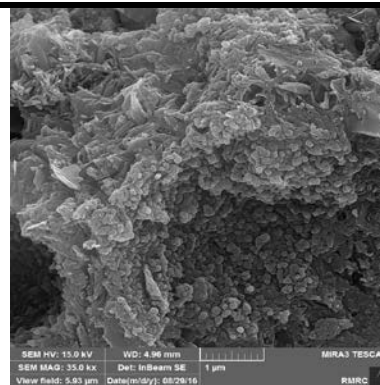
برای درک بهتر افزایش مقاومت فشاری مخلوط بتن غلتکی و برای اندازه گیری کمی پراکندگی ذرات نانو و همچنین مورفولوژی بتن از تصویر برداری میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده می گردد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان دهنده این است که ذرات نانو کربنات کلسیم به تراکم ریز ساختار بتن غلتکی کمک می کنند. همچنین این ذرات با پر کردن خلل و فرج موئین درون بتن باعث کاهش نفوذ پذیری و افزایش دوام بتن می گردد.



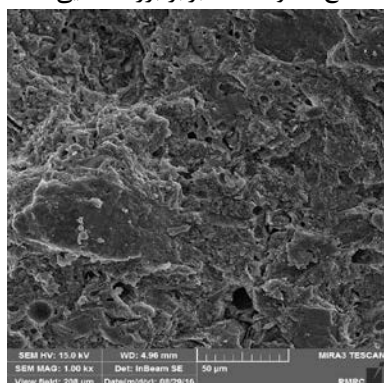
ج- نمونه ۱۵۰ برابر بزرگ نمایی



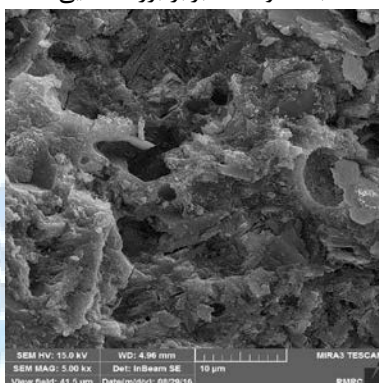
ب- نمونه ۷۵ برابر بزرگ نمایی



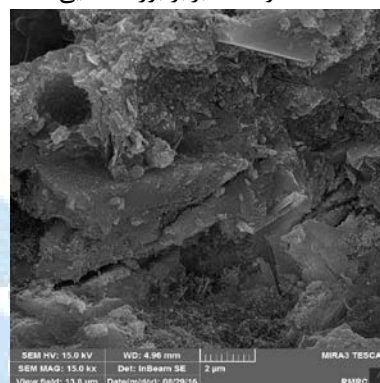
الف- نمونه ۳۵ برابر بزرگ نمایی



ی- نمونه ۱ برابر بزرگ نمایی



ذ- نمونه ۵ برابر بزرگ نمایی



د- نمونه ۱۵ برابر بزرگ نمایی

شکل شماره ۲۱: تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه های بتن حاوی ۳ درصد نانوکربنات کلسیم با بزرگ نمایی های متفاوت

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق با استفاده از دو نوع نانو (نانو کربنات کلسیم و نانو سیلیس) به بررسی خواص رئولوژیکی و مکانیکی و دوامی بتن خود تراکم پرداخته شده است. تاثیر ویژه نانو در خصوصیات مختلف بتن بسیار مطلوب ارزیابی گردید. با آزمایش های انجام گرفته بر روی هفت طرح اختلاط می توان بیان نمود، با اضافه شدن نانو کربنات کلسیم و نانو سیلیس از کارایی بتن کاسته می شود. این کاهش کارایی در تمام نتایج آزمایش های بتن خودتراکم مشاهده می گردد.

در آزمایش مقاومت فشاری، با افزایش میزان نانو کربنات کلسیم و نانو سیلیس در نمونه شاهد، افزایش مقاومت فشاری بتن ایجاد می گردد که بهترین نتیجه برای بتن خودتراکم حاوی نانو سیلیس دو درصد مشاهده گردید. برای بتن حاوی نانو کربنات کلسیم بهترین نتیجه افزایش مقاومتی برای سه درصد نانو کربنات کلسیم مشاهده گردید. با افزایش درصد نانو کربنات کلسیم و نانو سیلیس در دو سن ۲۸ روزه و ۹۰ روزه میزان مقاومت الکتریکی بتن نیز افزایش می یابد که این افزایش در سن ۹۰ روزه مشهودتر می باشد. در نهایت بیشترین افزایش مقاومت الکتریکی برای نانو کربنات سه درصد اندازه گیری شد. با اضافه کردن نانو به بتن، نفوذ پذیری به شدت کاهش یافته و بهترین نتایج برای نانو کربنات کلسیم سه درصد و نانو سیلیس دو درصد ثبت گردید. در آزمایش سیکل ذوب و یخبندان، بهترین نتیجه مربوط به نانو کربنات دو درصد و نانو سیلیس سه درصد می باشد.

- [۱]. Teir S, Eloneva S, Zevenhoven R. Production of precipitated calcium carbonate from calcium silicates and carbon dioxide. *Energy Conversion and Management*. 2005;46(18-19):2954-79.
- [۲]. Neville AM. *Properties of concrete*: Longman London; 1995.
- [۳]. Okamura H, Ouchi M. Self-compacting concrete. *Journal of advanced concrete technology*. 2003;1(1):5-15.
- [۴]. Ouchi M, Okamura H. Self-compacting high performance concrete. *Concrete international*. 1997:50-4.
- [۵]. Okamura H, Ozawa K, Ouchi M. Self-compacting concrete. *STRUCTURAL CONCRETE-LONDON-THOMAS TELFORD LIMITED-*. 2000(1):3-18.
- [۶]. EFNARC S. *Guidelines for self-compacting concrete*. EFNARC,UK (www.efnarc.org). 2005.
- [۷]. Farokhzad R, Mahdikhani M, Bagheri A, Baghdadi J. Representing a logical grading zone for self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*. 2016;115:735-45.
- [۸]. Niaraki RI, Farokhzad R. Prediction of mechanical and fresh properties of self-consolidating concrete (SCC) using multi-objective genetic algorithm (MOGA). *Journal of Structural Engineering and Geo-Techniques*. 2017;7(2).
- [۹]. Khotbehsara MM, Miyandehi BM, Naseri F, Ozbakkaloglu T, Jafari F, Mohseni E. Effect of SnO₂, ZrO₂, and CaCO₃ nanoparticles on water transport and durability properties of self-compacting mortar containing fly ash: Experimental observations and ANFIS predictions. *Construction and Building Materials*. 2018;158:823-34.
- [۱۰]. Liu X, Chen L, Liu A, Wang X. Effect of nano-CaCO₃ on properties of cement paste. *Energy Procedia*. 2012;16:991-6.
- [۱۱]. Camiletti J, Soliman AM, Nehdi ML. Effect of nano-calcium carbonate on early-age properties of ultra-high-performance concrete. *Magazine of Concrete Research*. 2013;65(5):297-307.
- [۱۲]. Li W, Huang Z, Cao F, Sun Z, Shah SP. Effects of nano-silica and nano-limestone on flowability and mechanical properties of ultra-high-performance concrete matrix. *Construction and Building Materials*. 2015;95:366-74.
- [۱۳]. Meng T, Yu Y, Wang Z. Effect of nano-CaCO₃ slurry on the mechanical properties and micro-structure of concrete with and without fly ash. *Composites Part B: Engineering*. 2017;117:124-9.
- [۱۴]. Sadeghi M, Esfandiari A. The effects of micro and nano CaCO₃ on the rheological and physico/mechanical behavior of an SBS/CaCO₃ composite. *Materials and technology*. 2012;46(6):695-703.
- [۱۵]. Wu Z, Shi C, Khayat KH, Wan S. Effects of different nanomaterials on hardening and performance of ultra-high strength concrete (UHSC). *Cement and Concrete Composites*. 2016;70:24-34.
- [۱۶]. Roychand R, De Silva S, Setunge S, Law D. A quantitative study on the effect of nano SiO₂, nano Al₂O₃ and nano CaCO₃ on the physicochemical properties of very high volume fly ash cement composite. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2017:1-16.
- [۱۷]. Jing X, Gong W, Feng Z, Zhang M, Meng X, Zheng B. Novel Comb-Like Copolymer Dispersant for Polypropylene/CaCO₃ Composites and Its Influence on Dispersion, Crystallization, Mechanical, and Thermal Properties. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. 2017:1-11.
- [۱۸]. ASTM C33. *Standard Specification for Concrete Aggregates*. 2010.
- [۱۹]. ASTM C1621. C09. 47. 2014. *Standard Test Method for Passing Ability of Self-Consolidating Concrete by J-Ring*. ASTM C1621/C1621M-14. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [۲۰]. Sturup V, Vecchio F, Caratin H. Pulse velocity as a measure of concrete compressive strength. *Special Publication*. 1984;82:201-28.
- [۲۱]. ASTM C597-16. *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. 2016.
- [۲۲]. FAROKHZAD R, YASERI S, ENTEZARIAN MH, YAVARI A. Investigating Effects of Sulfates on Compressive Strength of Different Types of Pozzolan Concrete and Measuring Penetration Rate by Ultrasound Tests at Different Ages. 2016.