مهندسی عمران شریف (تابستان ۱۳۹۷)
دوره‌ی ۲ - ۳۴، شماره‌ی ۲/۱، ص. ۳۱-۳۹

Original Article

تأثیر کربنات کلسیم با پوشش نانوکربن در خصوصیات مکانیکی و دوام بتن

حمیدرضا احسانی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین
ایوب دهقانی* (استادیار)
دانشکده‌ی مهندسی، گروه عمران، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر
محمد صالح لباف زاده (استادیار)
انستیتو آب و انرژی، دانشگاه صنعتی شریف

استفاده از سیمان با وجود آثار مخرب زیست‌محیطی فرایند تولید آن، به دلیل نیاز روزافزون صنعت به بتن، در حال افزایش است. یکی از راهکارهای کاهش مصرف سیمان، جایگزین کردن آن با مواد در دسترس و دوستدار محیط زیست است. در فاز اول پژوهش حاضر، اثر جایگزینی کربنات کلسیم با پوشش نانوکربن در مقاومت فشاری اولیه و در فاز دوم پس از انتخاب درصد مناسب جایگزینی، تأثیر جایگزینی کربنات کلسیم با پوشش نانوکربن در مقاومت فشاری اولیه و نهایی، مقاومت کششی و خمشی، جذب آب کل و مقاومت ویژه‌ی الکتریکی بتن بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقاومت فشاری اولیه و نهایی بتن با وجود کاهش سیمان، در اثر استفاده از ذرات مذکور تقریباً ثابت مانده است. وضعیت پارامترهای دوام بتن نظیر جذب آب کلی و مقاومت ویژه‌ی الکتریکی بتن نیز مطلوب است. با توجه به توجیه اقتصادی و زیست‌محیطی کاهش مصرف سیمان، به طور کلی نتایج پژوهش حاضر جایگزین کردن ۳-۷ درصد سیمان را با کربنات کلسیم با پوشش نانوکربن توصیه می‌کند.

واژگان کلیدی: کربنات کلسیم، پوشش نانوکربن، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت الکتریکی، جذب آب بتن.

ce.hamidreza@gmail.com
a.dehghani@pgu.ac.ir
labaf@sharif.edu

۱. مقدمه

استفاده از بتن در ساخت و سازها رو به افزایش است، به طوری که در سال ۲۰۱۳ نزدیک به ۳۰/۶ بیلیون تن بتن در سراسر جهان تولید شده و از نظر مقدار، میزان مذکور هم‌رده‌ی آب مصرفی در سراسر جهان است. با توجه به تولید بسیار زیاد دی‌اکسیدکربن در روند تولید سیمان مصرفی در بتن که حدود ۴/۵ تا ۸ درصد کل دی‌اکسیدکربن تولیدی است، دقت به جنبه‌های زیست‌محیطی تولید و ساخت بتن حائز اهمیت است.[۱]

از طرفی سیمان گران‌ترین جزء تشکیل‌دهنده‌ی بتن است. بنابراین در صورتی که بتوان مصرف سیمان را در ساخت بتن کاهش داد، از لحاظ اقتصادی نیز مؤثر خواهد بود. مطالعات بسیاری بر روی مواد معدنی و صنعتی، نظیر: سیلیس، خاکستر بادی، زئولیت، کربنات کلسیم و غیره به منظور رسیدن به هدف مذکور انجام شده است. همچنین با کمک فنّاوری نانو، بسیاری از خواص مواد، مانند واکنش‌پذیری بهبود یافته است. در این میان، پژوهش‌های انجام‌شده بر روی تأثیر نانوکربنات کلسیم محدود است. نتایج مطالعه‌یی بر روی جایگزینی ۱٪ نانوکربنات کلسیم به جای سیمان، کاهش اسلامپ و بهبود نسبی مقاومت فشاری اولیه و نهایی را نسبت به نمونه‌ی شاهد نشان می‌دهد.[۲] در پژوهش دیگری (۲۰۱۲)، در اثر افزودن ۰/۵-۲ درصد نانوکربنات کلسیم به بتن پُرمقاومت در شرایط عمل‌آوری سرد، مقاومت فشاری اولیه بهبود یافته است. اما به دلیل اثری که روان‌کننده در توزیع بهتر ذرات دارد، اسلامپ بتن با افزایش درصد جایگزینی، افزایش داشته است.[۳] برخی پژوهشگران نیز به منظور مشاهده‌ی اثرات نانوکربنات کلسیم، ۱ الی ۳ درصد از مواد مذکور را به خمیر سیمان اضافه کردند که افزودن ۱/۵٪ از نانوذرات مذکور، بهینه‌ترین مقاومت فشاری و خمشی ۲۸ روزه را به‌دست داده است.[۴]

همچنین نتایج مطالعه‌ی دیگری (۲۰۱۱)، نشان داده است که افزودن ۱ و ۲ درصد نانوکربنات کلسیم به بتن با رده‌ی مقاومتی C۳۰، افزایش ۵-۲۰ درصدی مقاومت فشاری اولیه را در پی داشته است، در حالی که در مقاومت فشاری ۲۸ روزه بی‌تأثیر بوده است. در این گزارش، تأثیرگذاری مواد مذکور در مقاومت در سنین اولیه و نهایی بتن C۵۰ خنثی گزارش شده است. همچنین نمونه‌های

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۱۱/۱۹، اصلاحیه ۱۳۹۵/۷/۷، پذیرش ۱۳۹۵/۷/۱۷.
DOI:10.24200/J30.2018.1352

ساخته‌شده برای آزمون مقاومت خمشی، رفتاری مشابه داشته‌اند.[۵] اثر افزودن نانوکربنات کلسیم در ترکیب با میکروذرات این مواد در مقاومت فشاری بتن در دو شرایط دمایی ۱۰ و ۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد موضوع مطالعه‌ی آزمایشگاهی دیگری بوده است که در آن بهبود مقاومت فشاری بتن گزارش شده است.[۶] در گزارشی که در سال ۲۰۱۲ در زمینه‌ی تأثیر نانوکربنات کلسیم در خمیر سیمان ارائه شده است، بر روی اثر هسته‌زایی این مواد در ترکیب با مواد پوزولانی دیگر و همچنین کاهش مقاومت بتن در درازمدت به دلیل جایگزینی ۱۰ درصدی مواد مذکور به جای سیمان تأکید شده است.[۷] برخی پژوهشگران نیز بهبود مقاومت فشاری ۱، ۳ و ۷ روزه‌ی بتن‌های حاوی ۳۰٪ خاکستر بادی را در اثر افزودن ۵٪ نانوکربنات کلسیم گزارش کرده‌اند، ولی این بهبود نتوانسته است کاهش مقاومت ناشی از جایگزین کردن خاکستر بادی را کاملاً جبران کند.[۸] همچنین در پژوهشی در دانشگاه فردوسی مشهد (۲۰۱۱)، کاهش ۱۵ درصدی مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی بتن در اثر جایگزینی ۱۵٪ کربنات کلسیم رسوبی به جای سیمان گزارش شده است.[۹]

در مطالعه‌ی دیگری (۲۰۱۴) نیز ۱٪ نانوکربنات کلسیم، جایگزین سیمان شده و بهبود خصوصیات دوام بتن، نظیر: درصد جذب آب مویینه، نفوذ یون کلراید و کاهش حجم حفره‌های قابل نفوذ بتن گزارش شده است.[۱۰] مطالعات انجام‌شده بر روی مخلوط‌های آسفالتی نیز تأثیرات مثبت استفاده از مواد ذکرشده را به اثبات رسانده است.[۱۱-۱۴]

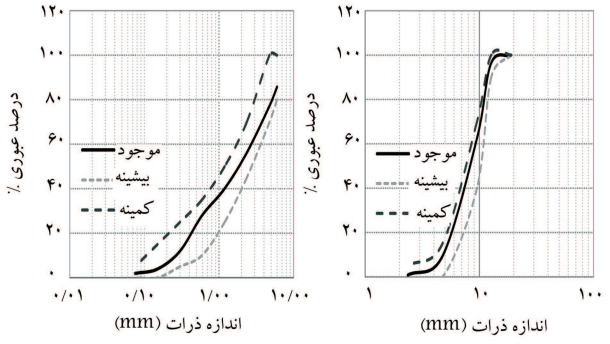
بیشتر مطالعات انجام‌شده به علت متفاوت بودن ترکیبات شیمیایی و درصد خلوص و اندازه‌ی ذرات و یا استفاده‌ی هم‌زمان از نانوکربنات کلسیم با مواد دیگر، نظیر متاکائولن و خاکستر بادی، تصویر روشنی از اثر ماده‌ی مذکور بر روی خواص مکانیکی بتن در اختیار نمی‌گذارند. از طرفی در مورد خصوصیات دوام بتن نظیر مقاومت الکتریکی و جذب آب بتن کمتر بحث شده است. بنابراین در پژوهش حاضر، از ذرات کربنات کلسیم که سطح این ذرات با نانوکربن پوشش داده شده‌اند، استفاده شده و اثر جایگزینی این مواد به جای سیمان مصرفی در مخلوط‌های بتنی ارزیابی شده است. اندازه‌ی ذرات مواد مورد استفاده برای پوشش‌دار کردن کربنات کلسیم میکرونیزه در حد نانو است. پوشش نانویی موجود بر روی ذرات کربنات کلسیم، یکی از وجوه تمایز پژوهش حاضر است. این پوشش با توجه به قطبی کردن ذرات و همچنین ایجاد چسبندگی و پیوند قوی‌تر میان نانوذرات با ماتریس سیمانی می‌تواند عملکرد بتن را بهبود بخشد.

از مزایای مهم استفاده از نانوکربنات کلسیم می‌توان به دسترسی ارزان، سریع و راحت برای تأمین مواد اولیه اشاره کرد. چرا که معادن سنگ آهک فراوان است و پراکندگی خوبی در سراسر کشور دارند. علاوه بر این می‌توان از پساب صنایع نیز به‌عنوان مواد اولیه برای تولید کربنات کلسیم استفاده کرد که به طور حتم بر روی قیمت تمام‌شده، اثر قابل ملاحظه‌یی خواهد داشت. کربنات کلسیم استفاده‌شده در پژوهش حاضر از پساب صنعتی تولیده شده است. یکی از پارامترهای تأثیرگذار در قیمت کربنات کلسیم فرایند تبدیل این مواد به نانو است. مواد مصرفی در پژوهش حاضر به دلیل اندازه‌ی ذره‌ی بالاتر از ۱۰۰ نانومتر، قیمت تمام‌شده‌ی کمتری دارند. از طرفی پوشش نانویی موجود بر روی آن، عملکرد ذرات را بهبود می‌بخشد. بنابراین هدف از انجام پژوهش حاضر پاسخ به این پرسش است که استفاده از کربنات کلسیم پوشش‌دار بر روی خصوصیات مکانیکی و دوام بتن چه تأثیری دارد و آیا می‌توان مواد مذکور را بدون اینکه اثر سویی در عملکرد بتن داشته باشند، جایگزین سیمان کرد و به تبع آن مصرف سیمان و قیمت تمام‌شده‌ی بتن را کاهش داد و از هزینه‌های ناشی از تخریب محیط زیست کاست.

۲. برنامه آزمایشگاهی

۱.۲. مصالح مصرفی

سنگ‌دانه‌ی مصرفی در پژوهش حاضر از شرکت متوساک تهیه شده است. بیشینه‌ی اندازه‌ی شن با توجه به ابعاد قالب، ۱۲ میلی‌متر انتخاب شده است. درصد جذب آب شن و ماسه به ترتیب ۲ و ۱/۵ و درصد رطوبت آن‌ها ۲ و ۲/۳۷ بوده است. همچنین شن و ماسه به ترتیب وزن مخصوصی معادل ۲۵۷۰ و ۲۵۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب داشتند. منحنی دانه‌بندی شن و ماسه مصرفی در شکل ۱ آمده است. در تمامی طرح‌های مورداستفاده در پژوهش حاضر از سیمان پرتلند تیپ II شرکت آبیک استفاده شده است. جرم حجمی سیمان برای طرح اختلاط ۳۱۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظرگرفته شده است. مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی در جدول ۱ ارائه شده است. برای کارایی بهتر بتن تازه از فوق روان‌کننده بر پایه‌ی پلی‌کربوکسیلات با نام تجاری RB-PC۲۵۰ استفاده شده است. فوق روان‌کننده‌ی مذکور، فاقد کلر بود و وزن مخصوص ۱۱۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب داشت. آنالیز شیمیایی کربنات کلسیم مصرفی نیز در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی.

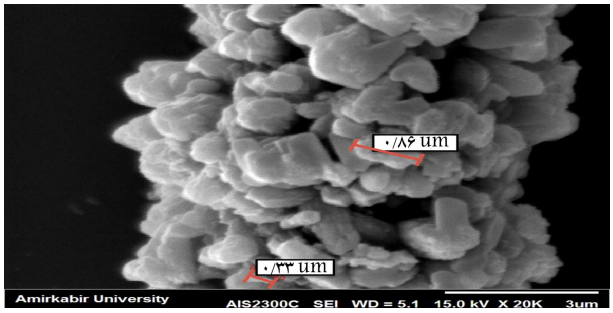
جدول ۱. ترکیبات شیمیایی سیمان.

ترکیبات شیمیایی		
عناصر	درصد موجود (٪)	استاندارد (٪)
CaO	۶۲/۲۸	-
C_3S	۵۲/۶۷	-
SiO_2	۲۰/۷۹	> ۲۰
C_2S	۱۹/۸۹	-
C_4AF	۱۱/۷۴	-
C_3A	۶/۰۹	< ۸
Al_2O_3	۴/۷۶	< ۶
Fe_2O_3	۳/۸۶	< ۶
MgO	۳/۲۲	< ۵
SO_3	۱/۸۹	< ۳
LOI	۱/۸۸	< ۳
$CaO.f$	۰/۸۲	-
K_2O	۰/۶۸	-
I.R	۰/۵۱	< ۰/۷۵
Na_2O	۰/۳۷	-
CL	-	-

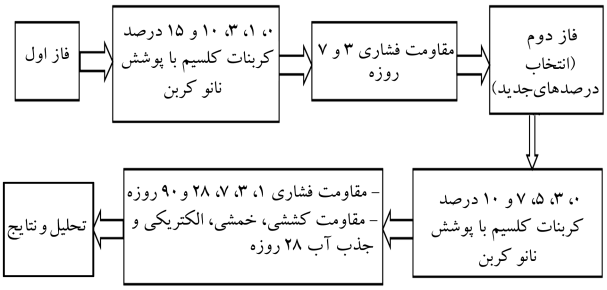
جدول ۲. آنالیز شیمیایی کربنات کلسیم با پوشش نانوکربن.

ماده	CaO	$L.O.I\ CO_2 + H_2O$	coated	SiO_2	MgO	Fe_2O_3	SO_3	AL_2O_3
درصد	۵۰٫۹	۴۰٫۰۴	۴٫۶۳	۱٫۲۹	۰٫۹۲	۰٫۷۶	۰٫۶۷	۰٫۳۳
ماده	K_2O	P_2O_5	Na_2O	CL	TiO_2	SrO	BaO	$La-Lu$
درصد	۰٫۱۴	۰٫۰۹۶	۰٫۰۵۵	۰٫۰۵	۰٫۰۵	۰٫۰۲۹	۰٫۰۲۳	۰٫۰۲۳

شکل ۲. کربنات کلسیم با پوشش کربن.



شکل ۳. اندازه‌ی ذرات کربنات کلسیم با پوشش کربن.



شکل ۴. فرایند انجام آزمایش‌ها.

شکل ۵. نحوه‌ی نگهداری نمونه‌ها در حوضچه‌ی عمل‌آوری.

برای پوشش کربن نیز از دوده‌ی حاصل از سوختن مواد استفاده شده است. لذا کربنات کلسیم با پوشش کربن رنگ تیره‌یی دارد که در شکل ۲ نشان داده شده است. مواد موردنظر همراه با شیرآهک به‌صورت محلول در راکتور ترکیب می‌شوند و به علت قطبی‌بودن به ذرات کربنات کلسیم می‌چسبند. شکل ۳، اندازه‌ی ذرات کربنات کلسیم با پوشش کربنی را نشان می‌دهد.

۲.۲. روند انجام آزمایش و طرح اختلاط

جهت انجام آزمایش‌ها، ۲ فاز در نظر گرفته شده است. در فاز مقدماتی با توجه به نامشخص بودن اثر کربنات کلسیم با پوشش کربن در درصدهای جایگزینی مختلف، درصدهای ۰، ۱، ۳، ۱۰ و ۱۵ از آن‌ها، جایگزین وزنی سیمان شده‌اند و آزمایش مقاومت فشاری ۳ و ۷ روزه و اسلامپ بتن انجام شده است. علت پراکندگی بازه‌ی در نظر گرفته‌شده، دست‌یابی به محدوده‌ی مصرف مؤثر استفاده از مواد مذکور است. در فاز نهایی پژوهش، اثر جایگزینی مقادیر ۰، ۱، ۳، ۵، ۷ و ۱۰ درصد کربنات کلسیم با پوشش نانوکربنی بر روی اسلامپ، مقاومت فشاری ۱، ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه، مقاومت کششی و خمشی ۲۸ روزه، مقاومت الکتریکی و جذب آب کلی ۲۸ روزه‌ی بتن بررسی شده است. شکل ۴، فرایند انجام آزمایش‌ها را نمایش می‌دهد. در نام‌گذاری نمونه‌ها، اولین حرف بعد از حروف NC نشان‌دهنده‌ی نوع پوشش کربنات کلسیم است. اگر فقط NC بیاید، معرف طرح شاهد و اگر بعد از آن حرف C بیاید، نشان‌گر استفاده از کربنات کلسیم با پوشش کربنی است. اولین عدد پس از حروف ذکرشده، درصد جایگزینی کربنات کلسیم را نشان می‌دهد. طرح‌های اختلاط برای فاز اولیه و نهایی در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است.

۳.۲. ساخت و عمل‌آوری

برای ساخت مخلوط، ابتدا شن و ماسه به‌صورت خشک با یکدیگر مخلوط می‌شوند. سپس با اضافه کردن مقداری از آب اختلاط، مصالح به حالت اشباع با سطح خشک می‌رسند. این مرحله تقریباً ۱ دقیقه و در حالی که میکسر می‌چرخد، به طول می‌انجامد. سپس به‌صورت تدریجی سیمان همراه با کربنات کلسیم و باقیمانده‌ی آب، طی ۳ تا ۴ مرحله اضافه می‌شود. زمان در نظر گرفته‌شده برای این مرحله ۳ دقیقه است. سپس فوق روان‌کننده‌ی مخلوط‌شده با آب در مدت ۲-۳ دقیقه به‌صورت تدریجی اضافه می‌شود. در مرحله‌ی بعد، اختلاط به مدت ۴-۵ دقیقه بعد از پایان اضافه کردن فوق روان‌کننده ادامه می‌یابد. بنابراین کل فرایند اختلاط ۱۰-۱۲ دقیقه به طول می‌انجامد. عمل‌آوری از همان ساعات اولیه پس از ۲۴ ساعت نمونه‌ها از قالب خارج و در حوضچه‌ی عمل‌آوری مطابق شکل ۵ تا زمان انجام آزمایش قرار داده شده است.

جدول ۳. مشخصات طرح اختلاط فاز اولیه.

نام طرح	سیمان (kg/m^3)	شن (kg/m^3)	ماسه (kg/m^3)	آب (kg/m^3)	فوق روان‌کننده (kg/m^3)	نانوذره (kg/m^3)
نسبت اختلاط	۱	۲٫۳۵	۲	۰٫۴	۰٫۵	جایگزین سیمان
NC۰	۳۹۹٫۳	۹۳۸٫۶	۷۹۸٫۸	۱۵۹٫۸	۲	۰
NCC۱	۳۹۵٫۴	۹۳۸٫۶	۷۹۸٫۸	۱۵۹٫۸	۲	۳٫۹
NCC۳	۳۸۷٫۴	۹۳۸٫۶	۷۹۸٫۸	۱۵۹٫۸	۲	۱۱٫۹
NCC۱۰	۳۵۹٫۴	۹۳۸٫۶	۷۹۸٫۸	۱۵۹٫۸	۲	۳۹٫۹
NCC۱۵	۳۹۹٫۴	۹۳۸٫۶	۷۹۸٫۸	۱۵۹٫۸	۲	۵۹٫۹

جدول ۴. مشخصات طرح اختلاط فاز نهایی.

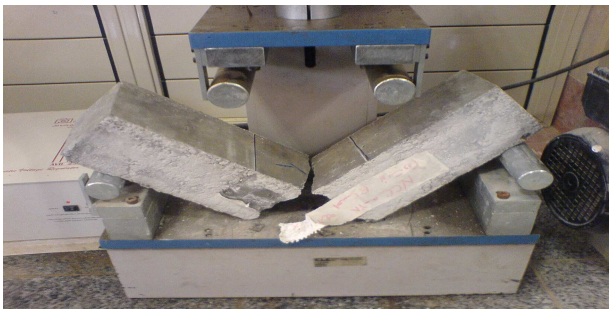
نام طرح	سیمان (kg/m^3)	شن (kg/m^3)	ماسه (kg/m^3)	آب (kg/m^3)	فوق روان‌کننده (kg/m^3)	نانوکربنی (kg/m^3)
نسبت اختلاط	۱	۲٫۳۵	۲	۰٫۴	۰٫۵۵	جایگزین سیمان
NC۰	۳۹۹٫۳	۹۳۸٫۶	۷۹۸٫۸	۱۵۹٫۸	۲٫۲	۰
NCC۳	۳۸۷٫۴	۹۳۸٫۶	۷۹۸٫۸	۱۵۹٫۸	۲٫۲	۱۱٫۹
NCC۵	۳۷۹٫۴	۹۳۸٫۶	۷۹۸٫۸	۱۵۹٫۸	۲٫۲	۲۰
NCC۷	۳۷۱٫۴	۹۳۸٫۶	۷۹۸٫۸	۱۵۹٫۸	۲٫۲	۲۷٫۹
NCC۱۰	۳۵۹٫۴	۹۳۸٫۶	۷۹۸٫۸	۱۵۹٫۸	۲٫۲	۳۹٫۹

۴.۲. آزمایش‌ها

در آزمایش مقاومت فشاری مطابق با استاندارد ASTM C۳۹،[۱۵] از نمونه‌های مکعبی ۱۰ سانتی‌متری استفاده شده است. همچنین سرعت بارگذاری دستگاه ۳۰۰ Kgf/s تنظیم شده است. آزمون مقاومت کششی، خمشی و جذب آب کلی بتن به ترتیب مطابق با استانداردهای ASTM C۴۹۶،[۱۶] ASTM C۷۸[۱۷] و ASTM C۶۴۲،[۱۸] انجام شده است. آزمایش مقاومت الکتریکی بتن، شاخصی از عملکرد بتن در برابر خوردگی میلگرد ارائه می‌کند. آزمایش مذکور مطابق با دستورالعمل توصیه‌شده در مدارک فنی و همچنین توسط کارخانه‌ی سازنده دستگاه صورت پذیرفته است. برای انجام آزمایش از ۲ لایه‌ی خمیر سیمان با نسبت آب به سیمان ثابت در ۲ وجه بالایی و پایینی نمونه‌های مکعبی استفاده شده است. پس از قرائت پارامتر Z، مقاومت الکتریکی به‌دست آمده بر حسب اهم در متر از رابطه‌ی ۱ استفاده می‌شود:

$$R = (Z * A)/H \qquad (۱)$$

که در آن، A و H سطح مقطع و ارتفاع نمونه است. برای انجام هر یک از آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی و خمشی، تعداد ۳ نمونه ساخته و سپس میانگین نتایج گزارش شده است. همچنین برای آزمایش مقاومت الکتریکی از نمونه‌های ساخته‌شده برای آزمون مقاومت فشاری استفاده شده است. شکل‌های ۶ و ۷، به ترتیب روش انجام آزمایش‌های مقاومت خمشی و مقاومت الکتریکی را نشان می‌دهند.



شکل ۶. آزمایش مقاومت خمشی.

شکل ۷. روش انجام آزمایش مقاومت الکتریکی بتن.

۳. نتایج

در بخش حاضر، نتایج آزمایش‌های انجام‌گرفته بر روی بتن تازه و سخت‌شده در ۲ فاز مقدماتی و نهایی ارائه و بحث شده است. هدف از انجام فاز مقدماتی پاسخ به این پرسش است که کربنات کلسیم با پوشش نانوکربن در درصدهای جایگزینی کم و زیاد می‌تواند عملکرد قابل قبولی داشته باشد. در فاز نهایی با انتخاب محدوده‌ی مصرف مطلوب که نتیجه‌ی فاز مقدماتی بوده است، آزمایش‌های جامع‌تری بر روی بتن سخت‌شده انجام شده است تا بتوان درصد بهینه‌ی مواد مذکور را بررسی کرد. در ادامه، این دو فاز به تفکیک مطرح شده است.

۱.۳. فاز اولیه

۱.۱.۳. اسلامپ

شکل ۸، نتایج آزمون اسلامپ مخلوط‌های بتنی ساخته‌شده را در درصدهای مختلف جایگزینی سیمان نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که افزودن این ذرات به مخلوط، موجب کاهش روانی و اسلامپ بتن شده و میزان این کاهش با افزایش درصد جایگزینی بیشتر شده است. این پدیده را می‌توان به افزایش جذب سطحی ذرات مخلوط به دلیل سطح ویژه بالای ذرات ریز کربنات کلسیم نسبت داد. البته این کاهش اسلامپ، در برخی موارد زیاد محسوس نیست و خللی در مراحل بتن‌ریزی، نظیر: حمل، ریختن و متراکم کردن بتن ایجاد نمی‌کند.

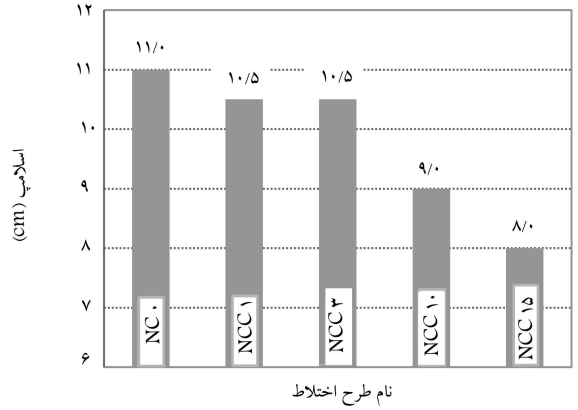
در ۱۰٪ جایگزینی کربنات کلسیم با پوشش نانوکربن، مقدار کاهش اسلامپ نسبت به نمونه‌ی شاهد ۱۸٫۲٪ است. در حالی که با افزایش درصد جایگزینی سیمان به ۱۵٪، حدوداً ۲۷٪ کاهش اسلامپ نسبت به نمونه‌ی شاهد مشاهده می‌شود. نتایج مطالعات پیشین نیز یافته‌های مذکور را تأیید می‌کنند.[۵و۲]

۲.۱.۳. مقاومت فشاری

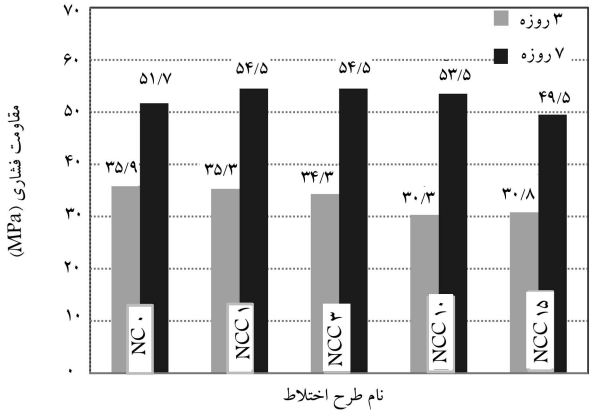
تأثیر جایگزین کردن سیمان با ذرات کربنات کلسیم با پوشش نانوکربن در مقاومت فشاری ۳ و ۷ روزه‌ی بتن سخت‌شده در شکل های ۹ و ۱۰ ارائه شده است.

شکل ۹ نشان می‌دهد که جایگزین کردن سیمان با کربنات کلسیم با پوشش کربن تا ۳٪، مقاومت فشاری ۳ روزه را به میزان بیشینه‌ی ۴٫۵٪ کاهش می‌دهد. با افزایش درصد جایگزینی، مقاومت فشاری ۳ روزه‌ی بتن، کاهش بیشتری را تجربه می‌کند؛ به طوری که در مقدار ۱۰٪ جایگزینی، مقاومت فشاری ۳ روزه، کاهش ۱۵٫۶٪ را نسبت به نمونه‌ی شاهد نشان می‌دهد. اما با گذشت سن بتن، روند کاهشی مذکور متوقف می‌شود، به طوری که مقاومت فشاری ۷ روزه برای نمونه‌های تا ۳٪ جایگزینی نانوکربنات کلسیم، افزایش ۵٪ را نسبت به مقاومت فشاری ۷ روزه‌ی نمونه‌ی شاهد نشان می‌دهد. حتی با افزایش درصد جایگزینی تا ۱۰٪، همچنان مقاومت فشاری ۷ روزه، افزایش ۳٫۵٪ را نشان می‌دهد. اگر حجم زیادی از سیمان جایگزین شود، مقاومت فشاری ۷ روزه نیز نسبت به نمونه‌ی شاهد کاهش می‌یابد. به طوری که با ۱۵٪ جایگزین کردن سیمان، مقاومت فشاری ۷ روزه، ۴٫۲٪ کاهش می‌یابد.

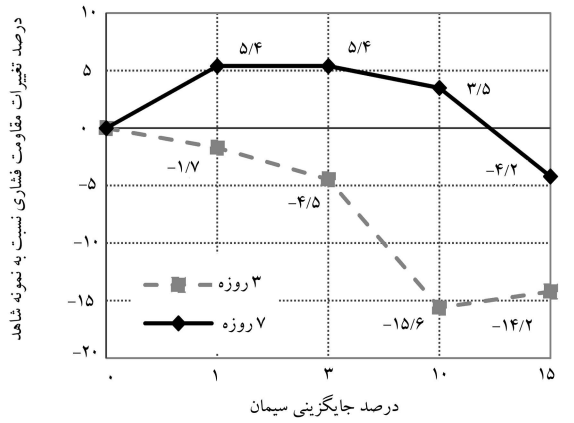
برای درک بهتر از چگونگی تأثیر کربنات کلسیم بر روی مقاومت فشاری بتن، شکل ۱۰ بر مبنای درصد تغییرات مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌ی شاهد ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که تأثیر جایگزینی سیمان با کربنات کلسیم با پوشش نانوکربن تقریباً برای همه‌ی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌ی شاهد به‌صورت کاهش مقاومت فشاری ۳ روزه است. اما مقاومت فشاری ۷ روزه تا ۱۰٪ جایگزینی، نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش یافته است. با کمک گرفتن از شکل ۱۰ و مقایسه‌ی مقاومت



شکل ۸. نتایج اسلامپ بتن در فاز مقدماتی.



شکل ۹. نمودار نتایج مقاومت فشاری ۳ و ۷ روزه‌ی بتن‌های با درصدهای مختلف کربنات کلسیم با پوشش نانوکربن.



شکل ۱۰. نمودار تغییرات مقاومت فشاری بتن‌های حاوی ذرات کربنات کلسیم با پوشش نانوکربن نسبت به نمونه‌ی شاهد.

فشاری نمونه‌های ۳ و ۷ روزه برای یک طرح اختلاط مشخص، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش دوره‌ی عمل‌آوری و پیشرفت هیدراتاسیون سیمان از ۳ به ۷ روز، مقاومت فشاری افزایش یافته است. این افزایش مقاومت برای نمونه‌ی شاهد ۴۴٪ و برای ۱۰٪ جایگزینی کربنات کلسیم با پوشش نانوکربنی، حدود ۷۶٪ است. دو طرح NCC۱ و NCC۳ نیز به ترتیب ۵۴ و ۵۸ درصد افزایش مقاومت فشاری از

۳ به ۷ روز را نشان می‌دهند. با افزایش درصد جایگزینی از ۱۰ به ۱۵ درصد، این افزایش مقاومت فشاری کاهش ۱۵٪ دارد. لذا می‌توان نتیجه گرفت افزودن ذرات کربنات کلسیم با پوشش نانوکربن به جای مواد سیمانی، موجب تسریع فرایند هیدراتاسیون سیمان می‌شود. توصیف این نتایج نیازمند انجام آزمایش‌های دیگری مانند SEM و XRD است که در حال انجام است و در جای دیگری نتایج آن بحث خواهد شد. نتایج به‌دست آمده را سایر پژوهشگران نیز تأیید کرده‌اند.[۴] با توجه به شکل‌های ۸ الی ۱۰ نتیجه گرفته شده است که برای فاز نهایی پژوهش باید درصد جایگزینی سیمان کمتر از ۱۰٪ باشد. چرا که در درصدهای بالاتر، مقاومت فشاری اولیه‌ی بتن روند کاهشی دارد. علت این مسئله را می‌توان به نیروی واندروالسی زیاد بین نانوذرات و کلوخه شدن آن‌ها و در نتیجه عملکرد نامناسب آن‌ها مرتبط دانست.[۷] البته این مسئله احتیاج به بررسی دقیق‌تری دارد و نمی‌توان با قطعیت آن را بیان کرد. با توجه به نتایج به‌دست آمده در فاز اول تصمیم گرفته شد که در فاز نهایی پژوهش از نانوکربنات کلسیم با پوشش نانوکربن با درصدهای جایگزینی ۰، ۱، ۳، ۵، ۷ و ۱۰ استفاده شود.

۲.۳. نتایج فاز نهایی

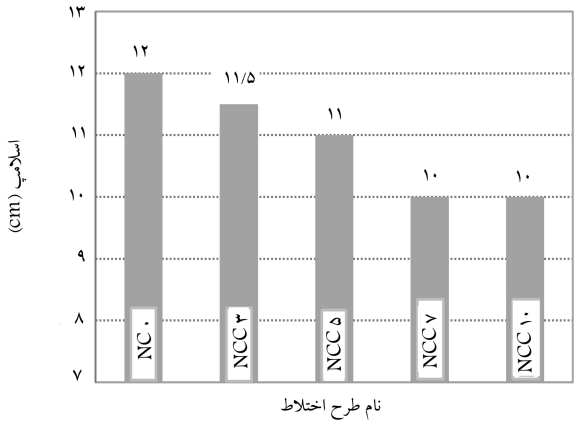
۱.۲.۳. اسلامپ

شکل ۱۱، نتایج اسلامپ بتن را برای جایگزینی کربنات کلسیم با پوشش نانوکربن در درصدهای مشخص‌شده برای فاز نهایی پژوهش نشان می‌دهد. با توجه به کاهش کم کارایی در فاز قبل، مقدار روان‌کننده در نمونه‌های مختلف ثابت نگه داشته شده است. مشابه نتایج به‌دست‌آمده در فاز قبل، روند کاهش کارایی بتن با افزایش درصد جایگزینی نانوذرات مشاهده می‌شود.

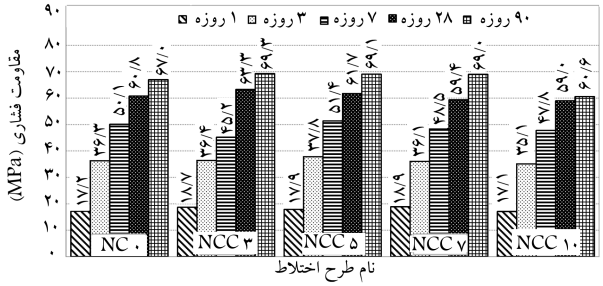
۲.۲.۳. مقاومت فشاری

شکل ۱۲، نتایج مقاومت‌های فشاری ۱، ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه‌ی بتن‌ها با درصدهای مختلف جایگزینی کربنات کلسیم با پوشش نانوکربنی به جای سیمان را نشان می‌دهد. به‌طور کلی می‌توان گفت با جایگزینی مواد مذکور، مقاومت فشاری بتن ثابت نگه داشته شده است که با توجه به توجیه اقتصادی و زیست‌محیطی ناشی از کاهش مصرف سیمان قابل توجیه است. البته با افزایش درصد جایگزینی، مقاومت فشاری بتن کاهش اندکی را نشان می‌دهد که علت آن را می‌توان به ۲ عامل مربوط دانست: ۱. با کاهش میزان سیمان مقدار محصولات هیدراتاسیون تولیدشده که خاصیت چسبندگی دارند، کاهش می‌یابد. ۲. با کاهش مصرف سیمان، نسبت آب به سیمان مؤثر اندکی افزایش پیدا کرده و در نتیجه مقاومت فشاری کمی کاهش یافته است. از طرفی نانوذرات از طریق دو مکانیزم می‌توانند نقیصه‌ی ذکرشده را جبران کنند. در مکانیزم اول، ذرات نانوکربنات کلسیم به‌عنوان هسته عمل می‌کنند و ژل کلسیم سیلیکات هیدراته (C-S-H) تولیدی ناشی از کلسیم هیدروکسید در طی فرایند هیدراتاسیون بر روی این ذرات قرار می‌گیرد و پیوند مستحکمی بین آنها برقرار می‌شود، که پوشش موجود بر روی نانوذرات از این طریق می‌تواند تأثیرگذار باشد. به عبارت دیگر، در فرایند تشکیل ژل کلسیم سیلیکات هیدراته، ابتدا پیوندهای قوی سیلیس (SiO_2) تشکیل می‌شود و سایر مولکول‌ها (C و H) در اطراف شبکه‌ی SiO_2 با آن پیوند قطبی تشکیل می‌دهند و امکان نفوذ به داخل شبکه را پیدا نمی‌کنند. اما ذرات کربنات کلسیم با پوشش نانوکربن می‌توانند میان لایه‌های SiO_2 قرار گیرند و بنابراین حجم پیوند ژل را افزایش دهند و سبب افزایش مقاومت شوند. در مکانیزم دوم، ذرات به‌صورت فیلر عمل می‌کنند و حفره‌های موجود در بتن را پر می‌کنند و با متراکم‌تر کردن مخلوط بتنی، موجب بهبود خصوصیات مکانیکی بتن می‌شوند. بنابراین به نظر می‌رسد ثابت بودن تقریبی مقاومت فشاری بتن مربوط به این ۲ مکانیزم است. در برخی از مخلوط‌ها، مکانیزم‌های مذکور نتوانسته‌اند کاهش مقاومت ناشی از کمتر شدن سیمان و به تبع آن تولید محصولات هیدراتاسیون کمتر را جبران کنند.

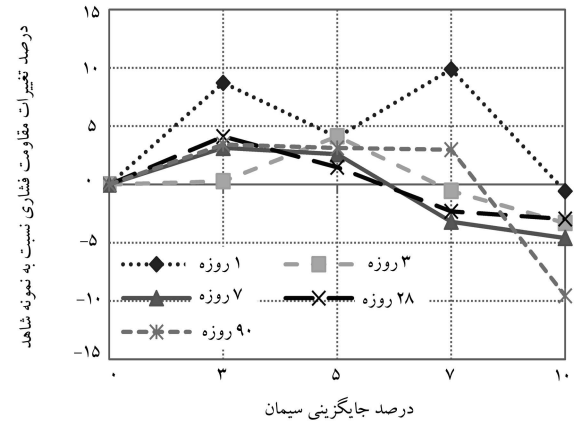
همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود تغییرات مقاومت فشاری ناچیز است. با وجود این، محدوده‌ی تغییرات در سنین اولیه بیشتر است در حالی که در مقاومت‌های فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه، تغییرات مذکور تقریباً ثابت هستند. این موضوع نشان‌دهنده‌ی تأثیرگذاری بیشتر ذرات کربنات کلسیم با پوشش نانوکربن در مقاومت فشاری اولیه است. برخی پژوهشگران نیز این مسئله را گزارش کرده‌اند.[۹]



شکل ۱۱. نمودار تغییرات اسلامپ بتن در فاز نهایی پژوهش.



شکل ۱۲. نمودار مقاومت فشاری بتن در فاز نهایی پژوهش.



شکل ۱۳. نمودار تغییرات مقاومت فشاری فاز نهایی پژوهش.

همچنین با دقت در نمودار شکل ۱۳، این نکته آشکار می‌شود که در مقاومت فشاری ۱ روزه، جایگزینی ۵٪ کربنات کلسیم با پوشش نانوکربن تقریباً ۵٪ مقاومت فشاری را نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش داده است که با مقایسه‌ی نتایج، غیرمنطقی به نظر می‌رسد و می‌تواند مربوط به خطاهای آزمایشگاهی باشد. اگرچه اعداد به‌دست آمده در شکل ۱۳ نسبت به شکل ۱۰ تفاوت اندکی دارند، اما مسئله‌ی مهم آن است که روند تأثیرگذاری مواد در هر دو نمودار مشابه است.

۳.۲.۳. مقاومت خمشی

نتایج آزمایش مقاومت خمشی ۲۸ روزه‌ی نمونه‌های بتنی در شکل ۱۴ نشان شده است. مشابه با مقاومت فشاری، روند کاهشی نتایج مشاهده می‌شود. به طوری که کمترین مقاومت خمشی مربوط به جایگزینی ۵٪ نانوکربنات کلسیم با پوشش نانوکربن با مقدار ۶٫۵ مگاپاسکال است که نسبت به طرح شاهد حدوداً ۱۶٪ کاهش داشته است. این روند کاهشی مقاومت خمشی نسبت به نمونه‌ی شاهد با افزایش درصد جایگزینی سیمان، توسط سایر پژوهشگران نیز مورد تأکید قرارگرفته است.

۴.۲.۳. مقاومت کششی

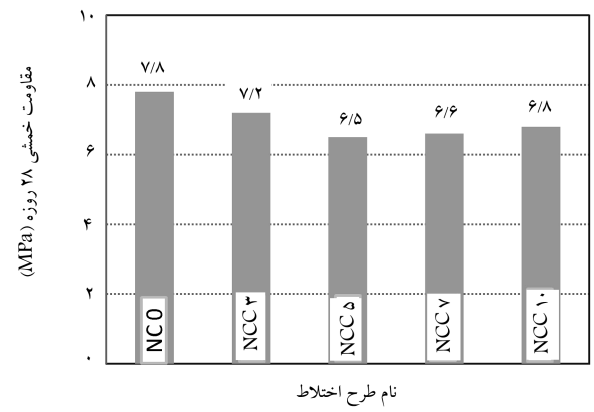
نتایج مقاومت کششی بتن در سن ۲۸ روزه بر حسب مگاپاسکال در شکل ۱۵ گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهد که تا جایگزینی، مقاومت کششی روند ثابت و تقریباً یکسانی داشته است، اما در درصدهای بالاتر جایگزینی سیمان با ذرات کربنات کلسیم با پوشش نانوکربن، مقاومت کششی افزایش ناچیزی داشته است. این روند مشابه با روندی است که در مقاومت خمشی ملاحظه شده است. ارتباط به‌دست‌آمده میان نتایج آزمون مقاومت خمشی و کششی توسط سایر پژوهشگران نیز مورد تأکید قرارگرفته است.[۱۹]

۵.۲.۳. جذب آب کلی بتن

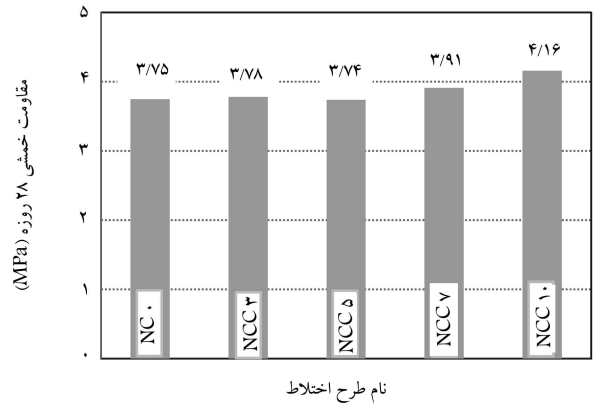
به طور کلی هر چه مقدار جذب آب یک طرح اختلاط بالاتر باشد، نشان از فضای خالی و حفره‌های بیشتر موجود در آن است. این مسئله ارتباط تنگاتنگی با خصوصیات دوام بتن دارد.[۲۰] در شکل ۱۶، نتایج مربوط به جذب آب کلی نمونه‌های بتنی ۲۸ روزه ارائه شده است که ابتدا تا ۵٪ جایگزینی مواد سیمانی روندی صعودی دارد و سپس به‌صورت نزولی کاهش می‌یابد. کاهش جذب آب در نمونه‌های با درصدهای بالای کربنات کلسیم نسبت به نمونه‌ی شاهد را می‌توان به افزایش عملکرد فیلری ذرات کربنات کلسیم با پوشش نانوکربن نسبت داد. به عبارت دیگر، در صورتی که حجم زیادی از ذرات مذکور در مخلوط استفاده شود، بخش قابل توجهی از آن‌ها واکنش نمی‌دهند و با توجه به اندازه‌ی کوچک آن‌ها (کوچک‌تر از ذرات سیمان) به راحتی حفره‌های موجود در مخلوط را پر می‌کنند و نقش فیلری آنها برجسته‌تر می‌شود.

۶.۲.۳. مقاومت ویژه‌ی الکتریکی بتن

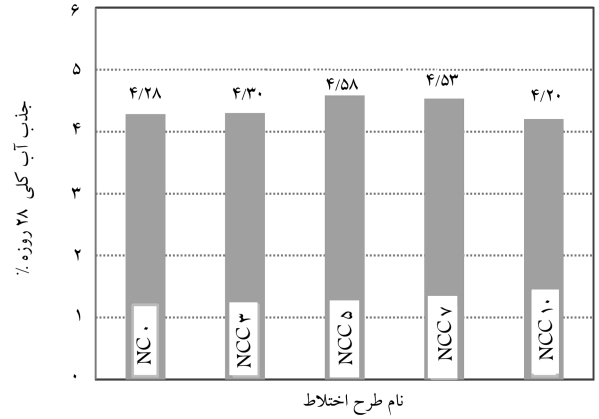
هر چه مقدار مقاومت ویژه‌ی الکتریکی یک نمونه‌ی بتنی بالاتر باشد، نشان‌دهنده‌ی آن است که جریان الکتریکی دیرتر و سخت‌تر از بین لایه‌های آن عبور می‌کند. با توجه به اینکه عوامل خورنده‌ی میلگرد نظیر یون کلر باید از بین لایه‌های بتن عبور کنند تا بتوانند بتن را تخریب کنند، بنابراین هر چقدر بتن متراکم‌تر باشد، این عمل دیرتر اتفاق می‌افتد. به عبارت دیگر، نتایج این آزمون نشانه‌یی از دوام بتن است. نتایج مقاومت ویژه‌ی الکتریکی نمونه‌های بتنی ۲۸ و ۹۰ روزه در شکل ۱۷ به تفصیل بیان شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که افزودن کربنات کلسیم با پوشش نانوکربن به جای سیمان، با توجه به تغییرات ناچیز آن نسبت به



شکل ۱۴. نتایج مقاومت خمشی ۲۸ روزه‌ی بتن حاوی درصدهایی از کربنات کلسیم با پوشش نانوکربن.

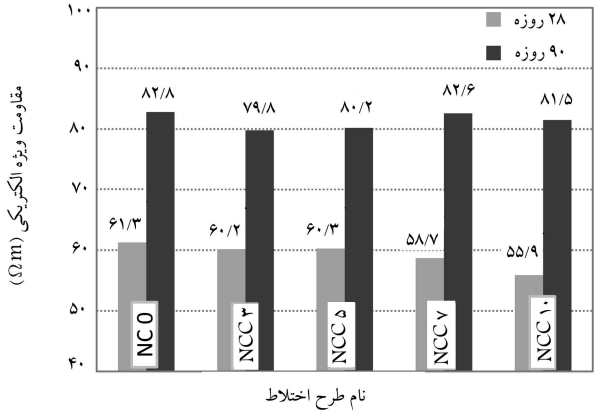


شکل ۱۵. نمودار نتایج مقاومت کششی ۲۸ روزه‌ی بتن‌های حاوی درصدهایی از کربنات کلسیم با پوشش نانوکربن.



شکل ۱۶. نتایج جذب آب کلی ۲۸ روزه‌ی بتن حاوی درصدهایی از کربنات کلسیم با پوشش نانوکربن.

طرح شاهد، تأثیر قابل ملاحظه‌یی در مقاومت الکتریکی بتن نخواهد داشت. از طرفی نتایج به‌دست آمده به خوبی با نتایج مطرح‌شده در بخش مقاومت فشاری هم‌خوانی دارد. به عبارت دیگر، نتایج مقاومت فشاری و الکتریکی بتن با افزایش درصد جایگزینی ذرات تقریباً ثابت باقی مانده است. تغییرات مقادیر مقاومت



شکل ۱۷. نتایج مقاومت ویژه‌ی الکتریکی ۲۸ و ۹۰ روزه‌ی بتن حاوی درصدهایی از کربنات کلسیم با پوشش نانوکربن.

الکتریکی ویژه در نمونه‌های ۹۰ روزه در درصدهای جایگزینی مختلف تقریباً ثابت است که نشان از تکمیل فرایند هیدراتاسیون نسبت به نمونه‌های ۲۸ روزه دارد.

۴. نتایج

در مطالعه‌ی آزمایشگاهی حاضر از ذرات کربنات کلسیم با پوشش نانوکربن استفاده شده است. در فاز اول پژوهش، به منظور شناسایی عملکرد ذرات و دست‌یابی به محدوده‌ی مصرف مواد مذکور، اسلامپ و مقاومت فشاری اولیه بررسی شده است. سپس با توجه به نتایج به‌دست آمده، در فاز نهایی پژوهش، مقاومت فشاری، خمشی، کششی، مقاومت الکتریکی بتن و درصد جذب آب کلی بررسی شده است. بر این اساس، این نتایج به‌دست آمده است:

۱. با افزایش درصد جایگزینی کربنات کلسیم، کارایی و اسلامپ بتن به‌صورت جزئی کاهش می‌یابد. در مجموع می‌توان از اثر کاهش کارایی صرف‌نظر کرد و مقدار روان‌کننده را ثابت در نظر گرفت.

۲. نتایج مقاومت فشاری ۳ و ۷ روزه در فاز مقدماتی پژوهش که شامل درصدهای جایگزینی ۰، ۱، ۳، ۱۰ و ۱۵ بود، نشان می‌دهد که جایگزینی بیش از ۱۰٪ کربنات کلسیم با پوشش نانوکربن، مقاومت فشاری بتن را کاهش می‌دهد.

۳. انجام فاز نهایی پژوهش که شامل درصدهای جایگزینی ۰، ۳، ۵، ۷ و ۱۰ بود، نشان داده است که به طور کلی تا ۷٪ جایگزینی سیمان با مواد مقاومت فشاری بتن در سنین مختلف نه فقط کاهش قابل ملاحظه‌یی را نشان نمی‌دهد، بلکه در برخی موارد افزایش ۵ تا ۱۰ درصدی نیز داشته است.

۴. مقاومت خمشی و کششی بتن ۲۸ روزه‌ی ساخته‌شده با کربنات کلسیم با پوشش نانوکربن کاهش مختصری داشته است. اما به جهت اینکه مقاومت فشاری بتن، به‌عنوان مؤلفه‌ی اصلی در طراحی سازه‌ها مطرح است، می‌توان از این موضوع صرف‌نظر کرد.

۵. خصوصیات دوام بتن نظیر مقاومت ویژه‌ی الکتریکی و جذب آب کلی بتن با جایگزینی کربنات کلسیم با پوشش نانوکربن تقریباً ثابت نگه داشته شده است.

به طور کلی با توجه به مزایای زیست‌محیطی کاهش مصرف سیمان و همچنین مزایای اقتصادی آن می‌توان جایگزینی ۳ تا ۷ درصد از کربنات کلسیم با پوشش نانوکربن را توصیه کرد، چرا که نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که مقاومت فشاری بتن در این محدوده‌ی جایگزینی، کاهش نداشته و حتی افزایش اندکی را نیز تجربه کرده است.

تقدیر و تشکر

پژوهش حاضر در مرکز تحقیقات صنعت ساختمان و بتن دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین انجام شده است. همچنین پژوهشگران از جناب آقایان مهندس علی اصغر روغنی‌زاد و مهندس مسعود رسولی برای مساعدت‌های فنی و در اختیار قرار دادن کربنات کلسیم با پساب صنعتی تولید کرده‌اند، کمال تشکر را دارند.

منابع (References)

1. Bianchi, G.Q. and Brouwers, H.J.H. “Application of nano-silica in concrete”, 8th Fib PhD Symposium in Kgs., Lyngby, Denmark, pp. 431-436 (2010).

2. Supit, S.W.M. and Shaikh, F.U.A. “Effect of nano-CaCO 3 on compressive strength development of high volume fly ash mortars and concretes”, *Journal of Advanced Concrete Technology*, **12**(6), pp. 178-186 (2014).

3. Xu, Q.L., Meng, T. and Huang, M.Z. “Effects of nano-CaCO3 on the compressive strength and microstructure of high strength concrete in different curing temperature”, *Applied Mechanics and Materials*, **121**, pp. 126-131 (2012).

4. Liu, X., Chen, L., Liu, A. and Wang, X. “Effect of nano-CaCO3 on properties of cement paste”, *Energy Procedia*, **16**, pp. 991-996 (2012).

5. Huang, M.Z., Meng, T., Qian, X.Q. and Zhang, J.J. “Influence of nano-SiO2 and nano-CaCO3 on the mechanical properties of concrete with different strength grades”, *Advanced Materials Research*, **250-253**, pp. 480-484 (2011).

6. Camiletti, J., Soliman, A.M. and Nehdi, M.L. “Effects of nano-and micro-limestone addition on early-age properties of ultra-high-performance concrete”, *Materials and Structures*, **46**(6), pp. 881-898 (2013).

7. Makar, J.M., Beaudoin, J.J., Trischuk, K., Chan, G.W. and Torres, F. “Effect of n-CaCO 3 and metakaolin on

hydrated Portland cement", *Advances in Cement Research*, **24**(4), pp. 211-219 (2012).

8. Kawashima, S., Hou, P., Corr, D.J. and Shah, S.P. "Modification of cement-based materials with nanoparticles", *Cement and Concrete Composites*, **36**, pp. 8-15 (2013).
9. Tavakoli Zadeh, M., Yaghoubi, S. and Mirnami, A.A. "Effect of precipitated calcium carbonate on properties of concrete and mortar, sand and cement", 5th National Congress of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad (2011).
10. Shaikh, F.U. and Supit, S.W. "Mechanical and durability properties of high volume fly ash (HVFA) concrete containing calcium carbonate (CaCO3) nanoparticles", *Construction and Building Materials*, **70**, pp. 309-321 (2014).
11. Hao, X.H., Zhang, A.Q. and Yang, W. "Study on the performance of nano calcium carbonate modified asphalt concrete AC-13", *Advanced Materials Research*, **450-451**, pp. 503-507 (March 2012).
12. Jahromi, S., Ahmadi, N., Vosough, Sh. and Khodaei, A. "The impact of nano-clay and precipitated calcium carbonate on properties and rheological behavior of modified bitumen", *Journal of Civil Engineering*, **23**, pp. 1-13 (2012).
13. Jahromi, S., Ahmadi, N., Vosough, Sh. and Andalibi Zadeh, B. "The impact of nano-clay and precipitated calcium carbonate on the mechanical properties of asphalt mixture", *Journal of Civil Engineering and Surveying, Tehran University*, **45**(3), pp. 335-344 (2012).
14. Kebritchi, A., Jalali-Arani, A. and Roghanizad, A.A. "Rheological behavior and properties of bitumen modified with polymeric coated precipitated calcium carbonate", *Construction and Building Materials*, **25**(6), pp. 2875-2882 (2011).
15. ASTM C39-M, "Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens", American Society for Testing and Materials, West Conshohocken (2009).
16. ASTM C496, "Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens", American Society for Testing and Materials, West Conshohocken (2004).
17. ASTM C78-09, "Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading)", American Society for Testing and Materials, West Conshohocken (2009).
18. ASTM C642-06, "Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete", American Society for Testing and Materials, West Conshohocken (2006).
19. Mehta, P.K. and Monteiro, P.J., *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, New York, McGraw-Hill, 78 p. (2006).
20. BHRC-PNS428, "National code of practice for concrete durability in the Persian Gulf and Omman Sea (proposed)", Building and Housing Research Center, Ministry of Housing and Urban Development, Tehran, Iran (2005).