

اثر نانو تیوب کربنی و ابروژل سیلیس بر مقاومت فشاری، دوام و انتقال حرارت بتن

شهرام موسوی *

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد میانه، دانشگاه آزاد اسلامی، میانه، ایران.

فرهود قره داغی

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد میانه، دانشگاه آزاد اسلامی، میانه، ایران.

چکیده

ایروژل به عنوان یک ماده نانو در بهبود خاصیت عایقی بتن تأثیر زیادی دارند اما امکان کاهش مقاومت بتن را نیز در پی دارند. در این مطالعه، برای مقابله با ویژگی نامطلوب ابروژل سلیکا در بتن از نانوتیوب کربنی استفاده شد. برای این منظور آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت ویژه الکتریکی، نفوذ یون کلرید و ضریب انتقال حرارت بتن انجام شد. در این تحقیق ۱۶ طرح اختلاط در نظر گرفته شد و جمعا ۱۹۲ نمونه بتنی ساخته شد. میزان مصرف ابروژل سیلیس به مقدار ۰، ۴، ۶، ۸ درصد حجمی بتنی و میزان مصرف نانوتیوب کربنی به میزان ۰، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۵ درصد وزنی سیمان در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که ترکیبی از دو ماده نانوتیوب کربنی و ابروژل سلیکا علاوه بر بهبود شرایط مقاومت و دوام بتن باعث کاهش ضریب انتقال حرارت در بتن می‌گردد. به طوریکه بهترین حالت برای طرح اختلاط بتن، استفاده از ۰/۳ درصد نانوتیوب کربنی و ۴ درصد ابروژل سلیکا مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: نانو تیوب کربنی، ابروژل سلیکا، بتن، مقاومت فشاری، انتقال حرارت.

* نویسنده مسئول: sh.mousavi@m-iau.ac.ir

۱- مقدمه

آنها در مقایسه با سایر الیاف میکرو فواید مشخص بیشتری داشته باشد [۷]. یاکولو و همکاران (۲۰۰۶) نشان دادند که با افزودن نانو تیوب کربن به مقدار ۰/۰۵ درصد وزنی سیمان می‌توان به بهبود در مقاومت و انتقال حرارت بتن دست یافت [۸]. لوی و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی عملکرد مقاومت فشاری نانو تیوب کربن در فوم بتن پرداختند و نشان دادند که نفوذپذیری و وزن مخصوص کاهش یافته و لایه عایق حرارتی ایجاد می‌گردد [۹]. میشلی و همکاران (۲۰۱۷) نتیجه گرفتند که استفاده از نانو تیوب کربنی در صفحات بتنی خصوصاً الکترومغناطیسی آنها را بهبود می‌بخشد [۱۰]. کاریکو و همکاران (۲۰۱۸) پایداری بتن‌های مسلح به نانو تیوب کربن چند لایه‌ای را بررسی و مقادیر بهینه مقاومت و پایداری را تعیین کردند [۱۱].

در این تحقیق، مطالعه آزمایشگاهی به منظور تولید بتن‌های با مقاومت فشاری، دوام و انتقال حرارت مناسب انجام شده است. برای این منظور از تاثیر هر دو ماده ابروزل سلیکا و نانو تیوب کربن با درصدهای مختلف به عنوان یک افزودنی مرکب در بتن استفاده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مصالح و طرح‌های اختلاط

برای تعیین میزان مقاومت فشاری و انتقال حرارت از نمونه‌های بتنی با ترکیب سیمان، آب، سنگدانه، ابروزل سلیکا و نانو تیوب کربن استفاده شد. نانو تیوب کربنی استفاده شده در این تحقیق چند دیواره، طول ۳۰ میکرون، قطر ۱۰ نانومتر، درجه خلوص ۹۵ درصد، دانسیته حقیقی ۲/۱ گرم بر سانتی مترمکعب و با سطح تماس ویژه ۲۰۰ m²/g می‌باشد. نانو لوله‌های کربنی مورد استفاده در این تحقیق از نوع عاملدار شده صنعتی با عامل هیدروکسیل (-OH) به مقدار ۳/۷ درصد وزنی نانو تیوب کربنی می‌باشد. به منظور اختلاط بهتر، محلول آبی حاوی نانو لوله کربنی عاملدار به مدت یک ساعت تحت شرایط اولتراسونیک قرار گرفت. در این تحقیق از سیمان پرتلند با عیار ۳۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب استفاده شد. نسبت آب به سیمان ۰/۴۸۵ و مشخصات سنگدانه‌های مصرفی مطابق استاندارد ASTM C136 [۱۲]، ASTM C33 [۱۳] و ASTM C778 [۱۴] در نظر گرفته شد. بزرگترین اندازه سنگدانه مصرفی ۱۲/۵ میلیمتر اندازه‌گیری شد.

با توجه به گستردگی بتن در ساخت سازه‌های مختلف و مشکلاتی از قبیل وزن بالای سازه، اتلاف انرژی و عمر کوتاه در برابر شرایط محیطی، بهبود مشخصات فیزیکی و مکانیکی بتن از اهمیت زیادی برخوردار است. برای سبک‌سازی و همچنین انبوه‌سازی در صنعت ساختمان، بالا بودن مشخصه عایقی ضروری به نظر می‌رسد. یکی از روش‌های مقابله با این مشکل افزودن ابروزل سلیس به مخلوط بتن می‌باشد. از مزیت‌های افزودن ابروزل سلیس به بتن می‌توان به خاصیت بالای عایقی و همچنین کاهش وزن سازه‌های بتنی اشاره کرد. اما با افزودن این ماده در مقیاس زیاد به مخلوط بتن، منجر به کاهش چشمگیر مقاومت در بتن می‌شود.

ژئو و همکاران (۲۰۱۴) به منظور کاهش میزان انتقال حرارت از ابروزل سلیس در مقیاس صفر تا ۶۰٪ حجم کل بتن معمولی استفاده کردند. نتایج نشان داد که مقدار انتقال حرارت از ۱/۸ به ۰/۳ وات بر متردرجه کلون کاهش یافته است. همچنین به دلیل دانسیته پایین این ماده، دانسیته کل بتن نیز از ۲۴۰۰ به ۷۵۰ کیلوگرم در مترمکعب کاهش یافت. اما اشکالی که در این ماده موجود است کاهش چشمگیر مقاومت فشاری بتن می‌باشد، که در تحقیق فوق به طور متوسط از ۷۵ به ۱۰ مگاپاسکال تنزل پیدا کرد [۱]. تحقیقات مشابهی در خصوص کاربرد ابروزل سلیکا توسط جولینو و همکاران (۲۰۱۶) [۲]، سرینا و همکاران (۲۰۱۵) [۳]، فیکر و همکاران (۲۰۱۵) [۴] و خانمحمدزاده و همکاران (۲۰۱۲) [۵] انجام شد و نتایج مشابهی در خصوص کاهش انتقال حرارت و مقاومت فشاری بتن حاصل گردید. در تحقیق دیگری، میزان ابروزل سلیس در مقیاس کوچک حجمی از صفر تا ۲۰ میلی‌لیتر در کل بتن استفاده شد. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن در میزان ۱۰ میلی‌لیتر ابروزل سلیکا دارای بیشترین مقدار و در میزان ۲۰ میلی‌لیتر ابروزل سلیکا دارای کمترین مقدار انتقال حرارت و بیشترین مقدار تخلخل و تراوایی بوده است [۶].

با افزایش روز افزون فناوری نانو در زمینه‌های مختلف از جمله صنعت ساختمان، نانو مواد جدیدی پا به عرصه ظهور گذاشته‌اند که از جمله‌ی آنها می‌توان به دی اکسید زیرکونیم (ZrO₂)، اکسید آهن (Fe₂O₃)، پودر اکسید روی (ZnO₂) و نانو تیوب کربن (CNT) اشاره کرد. سیستم‌های سیمان و بتن پتانسیل خوبی برای افزودن نانو لوله‌های کربنی دارند و انتظار می‌رود استفاده از

جدول ۱- مشخصات سنگدانه مصرفی

نام سنگدانه	ماسه	شن نخودی	شن بادامی
درصد جذب آب (%)	2.69	1.46	1.05
وزن مخصوص (kg/m ³)	2670	2674	2674

به منظور پخش شدن بهتر نانو تیوب کربنی در آب از دستگاه اولتراسونیک استفاده شد. برای ساخت نمونه‌ها، بتن‌ها در سه مرحله وارد قالبها شده و به منظور تراکم بتن از میز ویبره استفاده گردید. در ادامه بتن‌ها به مدت ۲۴ ساعت در داخل قالب و در این مدت با حوله نم‌دار پوشیده شد. سپس نمونه‌ها از قالب خارج و برای عمل آوری در داخل حوض آب با دمای کنترل شده ۲۲ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند.

۲-۲- آزمایش مقاومت فشاری بتن

در این تحقیق آزمایش تعیین مقاومت فشاری نمونه‌ها مطابق استاندارد EN 12390-3 انجام شد. برای این منظور ۳ نمونه از هر طرح اختلاط در سنین ۷ و ۲۸ روزه تحت بارگذاری قرار گرفته و میانگین آن‌ها به عنوان مقاومت فشاری طرح مورد نظر در نظر گرفته شد.

۲-۳- آزمایش دوام بتن

در این تحقیق به منظور ارزیابی دوام بتن از آزمایش‌های مقاومت ویژه بتن، نفوذپذیری یون کلرید و منافذ قابل نفوذ (permeable porosity) استفاده شد.

۲-۳-۱- آزمایش مقاومت ویژه بتن

مقاومت الکتریکی بتن یکی از خواص ذاتی آن می‌باشد که به میزان رطوبت بتن و ترکیبات آن بستگی دارد [۱۵]. از مقاومت الکتریکی بتن می‌توان اطلاعات در خصوص پایداری بتن بدست آورد. بتن تحت اثر میدان الکتریکی همانند یک خازن به همراه مقاومت عمل می‌کند. با تغییر فرکانس جریان الکتریکی می‌توان به مقاومت حقیقی بتن دست یافت. در این تحقیق برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بتن از روش دو نقطه‌ای با استفاده از دو الکترود نصب شده بر سطح بتن و برقراری اتصال و تماس الکتریکی استفاده گردید. به منظور ایجاد رسانایی بهتر از ژل سولفات مس استفاده شد و بر اساس عبور جریان متناوب بین دو الکترود سنجش پتانسیل الکتریکی صورت پذیرفت. دستگاه مقاومت الکتریکی استفاده شده بر اساس فرکانس ۲ کیلوهرتز و ظرفیت نهایی ۱ مگا اهم تنظیم گردید. در ادامه، مقدار مقاومت ویژه بتن از طریق رابطه ۱ بدست آورده شد. خطر خوردگی بر اساس مقاومت الکتریکی در جدول ۳ نشان داده شده است.

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad (1)$$

که ρ مقاومت ویژه، R مقاومت حقیقی، A سطح مقطع نمونه و L فاصله بین الکترودها یا ارتفاع نمونه است

در این تحقیق ۱۶ طرح اختلاط در نظر گرفته شد و جمعا ۱۹۲ نمونه بتنی ساخته شد که شامل ۹۶ نمونه مکعبی و ۹۶ عدد نمونه استوانه‌ای بود. نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۵ سانتی‌متر و نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵ سانتی‌متر تهیه شدند. کلیه نمونه‌ها در شرایط یکسان و در داخل آب شرب شهری در دمای ۲۲ درجه عمل آوری شدند. از نمونه‌های مکعبی برای آزمایش مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه و آزمایش تعیین ضریب انتقال حرارت ۲۸ روزه و از نمونه‌های استوانه‌ای برای اندازه‌گیری نفوذ یون کلرید و مقاومت ویژه ۲۸ روزه استفاده شد. میزان مصرف ابروزل سیلیس به مقدار ۰، ۴، ۶، ۸ درصد حجمی بتنی و میزان مصرف نانو تیوب کربنی به میزان ۰، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۵ درصد وزنی سیمان در نظر گرفته شد. از هر طرح اختلاط ۳ نمونه مکعبی و ۳ نمونه استوانه‌ای برای تعیین مقاومت فشاری، ضریب انتقال حرارت، نفوذ یون کلرید و مقاومت ویژه تهیه شد. طرح اختلاط مورد مطالعه در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- طرح‌های اختلاط

عنوان طرح	ابروزل سیلیس		ماسه Kg/m ³	شن Kg/m ³
	نانو تیوب کربنی %	%		
N	0	0	1200	675
CNT2	0.2	0	1200	675
CNT3	0.3	0	1200	675
CNT5	0.5	0	1200	675
AG4	0	4	1135	635
AG6	0	6	1103	616
AG8	0	8	1069	599
M24	0.2	4	1135	635
M34	0.3	4	1135	635
M54	0.5	4	1135	635
M26	0.2	6	1103	616
M36	0.3	6	1103	616
M56	0.5	6	1103	616
M28	0.2	8	1069	599
M38	0.3	8	1069	599
M58	0.5	8	1069	599

±۱۰٪ پس از ۲۸ روز عمل آوری خشک شده و سپس جرم نمونه‌ها با گامهای زمانی ۲۴ ساعت تا زمانی که کاهش جرم در این گامها بیش از ۱٪ نشود، تکرار می‌گردد. سپس جرم نمونه اشباع با سطح خشک (W_s)، جرم نمونه خشک شده در اون (W_d) و جرم نمونه اشباع مستغرق در آب (W_b) اندازه‌گیری می‌گردد. میزان منافذ قابل نفوذ بتن از رابطه ۲ مشخص می‌شود [۶].

$$\text{Permeable porosity} = \frac{W_s - W_d}{W_s - W_b} \quad (2)$$

۲-۴- آزمایش انتقال حرارت

صرفه جویی در مصرف انرژی یکی از مسائل مهم در صنعت ساختمان است. عایق کاری حرارتی مناسب، از راهکارهای جلوگیری از اتلاف انرژی می‌باشد. امروزه استفاده از بتن‌های عایق، یکی از روش‌های موثر در کاهش اتلاف انرژی و افزایش ایمنی حرارتی ساختمانها است. ضریب هدایت گرمایی (ضریب انتقال حرارتی)، یکی از پارامترهای مهم در انتخاب این نوع بتن‌ها برای عایق‌سازی است. در این تحقیق، آزمایش تعیین ضریب انتقال حرارت برای نمونه‌های استوانه‌ای پس از ۲۸ روز عمل آوری با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت مجهز به سنسور (شکل ۱) اندازه‌گیری شد. ضریب انتقال حرارت برای هر اختلاط، متوسط ۵ بار اندازه‌گیری با فواصل زمانی یک دقیقه لحاظ گردید.



شکل ۱- دستگاه اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت

جدول ۳- معیارهای خطر خوردگی

مقاومت ویژه الکتریکی	آهنک خوردگی
<5	خیلج، زیاد
5-10	زیاد
10-20	متوسط تا کم
>20	ناچیز

۲-۳-۲- آزمایش نفوذپذیری یون کلرید

یکی از عوامل اصلی خرابی زود رس در سازه‌های بتن مسلح، خوردگی میلگردها میباشد و مهمترین عامل در افزایش سرعت این تخریب نفوذپذیری بتن به شمار می‌رود [۱۷]. از سوی دیگر، روش‌های مختلفی برای ارزیابی نفوذپذیری بتن وجود دارد. مقاومت الکتریکی بتن شاخصی مناسب برای ارزیابی نفوذپذیری بتن و مقاومت آن در مقابل نفوذ یون کلراید می‌باشد. این روش کاملاً غیرمخرب است و سادگی، سرعت و اقتصادی بودن آن بر کاربرد این روش می‌افزاید. روش‌های مختلفی برای ارزیابی نفوذ یون کلراید به بتن وجود دارد. در روش‌هایی که فقط بر پایه‌ی انتشار می‌باشند، محدودیت‌هایی وجود دارد. از جمله این محدودیت‌ها، زمان طولانی مورد نیاز برای رسیدن انتشار یون‌های کلراید به حالت پایدار می‌باشد. بنابراین، این روش‌ها برای ارزیابی مقاومت بتن در مقابل نفوذ یون کلراید، عملی نمی‌باشند.

برای تعیین سریع مقدار نفوذ یون کلرید از استاندارد ASTM C1202 استفاده گردید. در این روش دو سمت یک نمونه استوانه‌ای بتنی کاملاً اشباع شده به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۵۰ میلی‌متر در محلول‌های کلرید سدیم و سود سوزآور با غلظت معین قرار می‌گیرد و جریان الکتریکی با اختلاف پتانسیل ۶۰ ولت برقرار می‌شود و شدت جریان عبوری از بتن اشباع به دست می‌آید و طی ۶ ساعت، مقدار جریان عبوری از بتن برحسب کولمب محاسبه می‌گردد که نشانه مقاومت بتن در برابر این جریان است. هرچه این جریان عبوری بیشتر باشد نشانه نفوذپذیری بیشتر بتن به ویژه در برابر یون کلرید است [۱۸].

۲-۳-۳- آزمایش منافذ قابل نفوذ

منافذ قابل نفوذ بر خواص بارگذاری و دوام بتن تاثیر دارد و در ارتباط با بسیاری از فرآیندهای مخرب بتن است (صفی‌الدین و هیرن، ۲۰۰۵). در این روش، نمونه‌ها در گرمخانه در دمای

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اثر نانو تیوب کربنی و ابروزل سیلیس بر مقاومت فشاری

نتایج آزمایش ۷ و ۲۸ روزه مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۵×۱۵×۱۵ در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- نتایج آزمایش مقاومت فشاری بتن

طرح اختلاط	مقاومت فشاری	
	۷ روزه	۲۸ روزه
N	27	43
CNT2	31	50
CNT3	35	55
CNT5	30	49
AG4	28	41
AG6	28	43
AG8	30	46
M24	32	47
M34	34	52
M54	32	50
M26	31	52
M36	36	58
M56	30	51
M28	32	52
M38	29	48
M58	30	49

با توجه به نتایج ۷ روزه مقاومت فشاری با درصدهای مختلف و ترکیبی از نانو تیوب کربنی و ابروزل سیلیس که در جدول ۴ ارائه شده است، مشاهده می‌گردد که مقادیر مقاومت فشاری تمام طرح اختلاطها نسبت به مقاومت نمونه شاهد افزایش یافته است. این موضوع می‌تواند به این صورت تفسیر شود که ذرات نانو تیوب و ابروزل سیلیس با پر کردن فضاهای خالی باعث تقویت خمیرسیمان شده است. و از بین نمونه‌ها بیشترین مقاومت مربوط به نمونه M56 که حاوی ۰/۵ درصد وزنی نانو تیوب کربنی و ۶ درصد حجمی ابروزل سیلیس است. نتایج ۲۸ روزه مقاومت فشاری نیز روندی شبیه نتایج ۷ روزه دارد و در نمونه‌های ۲۸ روزه نیز نمونه M36 بیشترین مقاومت را نشان می‌دهد که نسبت به بتن شاهد از ۳۵ درصد مقاومت بیشتری برخوردار است. در ترکیب نانو تیوب و ابروزل سیلیس، بیشترین درصد افزایش مقاومت ۷ روزه نسبت به ۲۸ روزه در مواقعی است که مقدار درصد ابروزل افزایش یافته است که می‌تواند ناشی از کاهش آب انداختن و

خروج آب از بتن به دلیل وجود ابروزل سیلیس و در پی آن حفظ حالت خمیری بتن و تاخیر در سخت شدن آن باشد. بر اساس جدول ۴ در حالت کاربرد بدون ترکیب مواد فوق، می‌توان گفت که تاثیر نانو تیوب کربنی بر مقاومت فشاری از ابروزل سیلیس بیشتر است و با ترکیب این دو ماده مقاومت فشاری بهبود می‌یابد.

۳-۲- نتایج آزمایش‌های دوام بتن

در این تحقیق به منظوری بررسی دوام بتن از نتایج آزمایش‌های مقاومت ویژه الکتریکی، نفوذپذیری یون کلرید و منافذ قابل نفوذ استفاده شده است. نتایج آزمایش تعیین مقاومت ویژه الکتریکی بتن نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۰ و ارتفاع ۵ سانتی‌متر و با عمل آوری ۲۸ روزه در جدول ۵ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از این آزمایش با ترکیب‌های متفاوت از نانو تیوب کربنی و ابروزل سیلیس مشاهده می‌گردد که مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی در تمام طرح اختلاطها نسبت به مقاومت ویژه الکتریکی نمونه شاهد، تغییراتی دارد. از بین نمونه‌ها، بیشترین میزان مقاومت ویژه الکتریکی مربوط به نمونه M24 که حاوی ۰/۲ درصد وزنی نانو تیوب کربنی و ۴ درصد حجمی ابروزل سیلیس می‌باشد. بر اساس معیار خوردگی بر اساس مقاومت ویژه و جدول ۵، اضافه نمودن هر کدام از مواد نانو تیوب کربنی و ابروزل سیلیس تا یک مقدار مشخص اثر بهتری در افزایش دوام بتن نسبت به حالت عادی دارد ولی ترکیب توام این دو ماده اثر بهتری دارد.

آزمایش نفوذپذیری یون کلرید به عنوان یکی از معیارهای دوام بتن بر روی نمونه‌های استوانه‌ای ۲۸ روزه با قطر ۱۰ و ارتفاع ۵ سانتی‌متر انجام و نتایج در جدول ۵ گزارش شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از این آزمایش با ترکیب‌های مختلف و درصدهای مختلف از نانو تیوب کربنی و ابروزل سیلیس، مشاهده می‌گردد که مقادیر نفوذپذیری یون کلرید در تمام طرح اختلاطها نسبت به نفوذپذیری نمونه شاهد، متفاوت است. از بین نمونه‌ها کمترین میزان نفوذپذیری یون کلرید مربوط به نمونه M34 که حاوی ۰/۳ درصد وزنی نانو تیوب کربنی و ۴ درصد حجمی ابروزل سیلیس می‌باشد. بر اساس جدول ۵، افزایش نانو تیوب کربنی تاثیر مناسبی در کاهش نفوذ یون کلرید دارد و با افزایش مقدار نانو تیوب نفوذپذیری یون کلرید نیز کاهش می‌یابد که می‌تواند ناشی ساختار بسیار ریز ذرات نانو باشد. همچنین با افزایش بیش از ۰/۰۶ درصد ابروزل سیلیس نفوذپذیری یون کلرید افزایش می‌یابد. اما در ترکیب این دو ماده بایستی دقت نمود.

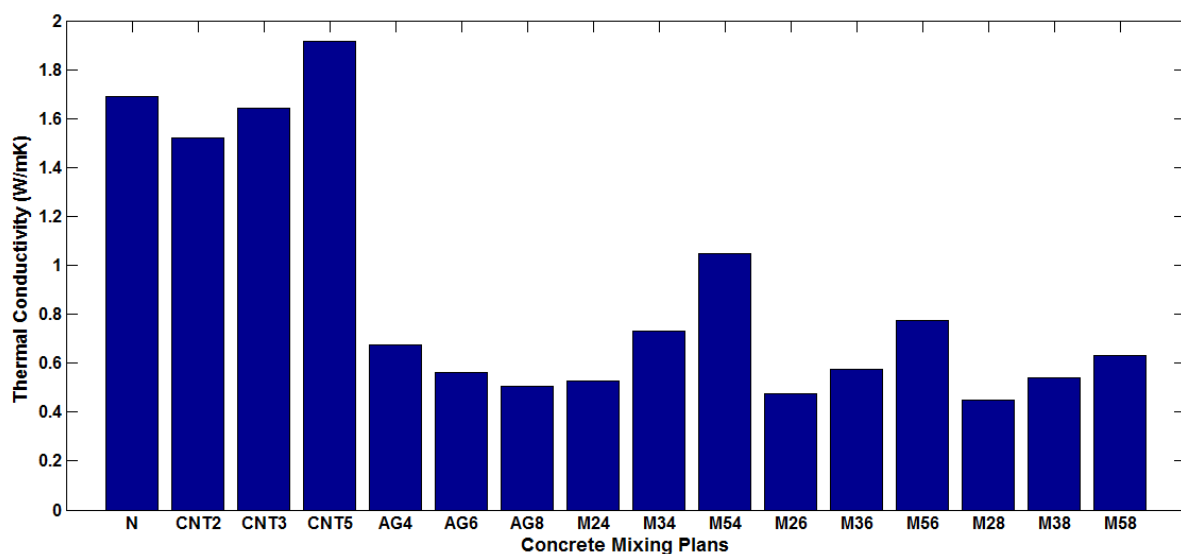
جدول ۵- نتایج آزمایش دوام بتن

طرح اختلاط	مقاومت ویژه	نفوذپذیری یون کلرید	منافذ قابل نفوذ
	$\Omega.m$	colomb	
N	50.37313	4692.91	11.93
CNT2	61.64384	3879.65	10.45
CNT3	54.43548	3639.67	9.22
CNT5	48.3871	3573.01	8.28
AG4	57.93991	3493.02	14.98
AG6	53.78486	4532.93	18.56
AG8	46.23288	6572.74	21.01
M24	79.41176	3319.70	23.42
M34	64.5933	2799.75	18.61
M54	59.73451	4426.27	7.96
M26	55.55556	5266.19	22.19
M36	54.96203	4519.59	18.44
M56	60.26786	5066.21	28.16
M28	53.72414	6932.71	33.7
M38	52.14961	7332.68	26.57
M58	54.43548	5999.46	22.76

نتایج آزمایش منافذ قابل نفوذ بتن برای نمونه‌های استوانه‌ای ۲۸ روزه با قطر ۱۰ و ارتفاع ۵ سانتی‌متر در جدول ۵ ارائه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از این آزمایش‌ها با ترکیب‌ها و درصد‌های متفاوت از نانوتیوب کربنی و ایروزل سیلیس، مشاهده می‌گردد که با افزایش میزان نانوتیوب کربنی مقدار منافذ قابل نفوذ کاهش می‌یابد که می‌تواند مربوط به پر شدن خلل و فرج بتن توسط ذرات ریز نانو باشد. اما ایروزل سلیکا بر منافذ قابل نفوذ تاثیر نامطلوب داشته و باعث افزایش آن می‌شود. کمترین میزان نفوذپذیری تخلخل مربوط به نمونه M54 که حاوی ۰/۵ درصد وزنی نانوتیوب کربنی و ۴ درصد حجمی ایروزل سیلیس است.

۳-۳- نتایج آزمایش انتقال حرارت بتن

به منظور تعیین اثر دقیق نانو تیوب کربنی و ایروزل سلیکا بر ضریب انتقال حرارت بتن برای هر آزمایش از ۳ نمونه استفاده شد. نتایج آزمایش نمونه‌های ۲۸ روزه انتقال حرارت بتن در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- مقادیر انتقال حرارت برای کلیه حالت‌های اختلاط

حرارت مربوط به استفاده از ۸ درصد ایروزل سلیکا در کلیه حالات مشاهده می‌شود. از بین اختلاط‌های انجام شده، کمترین میزان انتقال حرارت مربوط به نمونه M28 که حاوی ۰/۲ درصد وزنی نانوتیوب کربنی و ۸ درصد حجمی ایروزل سیلیس می‌باشد که مقدار آن ۰/۴۵۱ وات بر متر درجه کلونین بدست آمد که نسبت به نمونه شاهد دارای ۷۳ درصد کاهش در ضریب انتقال حرارت

شکل ۲ نشان می‌دهد که با اضافه کردن مواد نانوتیوب کربنی و ایروزل سیلیس در حالت کلی مقدار ضریب انتقال حرارت بتن نسبت به نمونه شاهد کاهش می‌یابد. ذرات نانو تیوب کربنی به تنهایی در طرح اختلاط در مقادیر بیش از ۰/۵ درصد باعث افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شود که می‌تواند ناشی از افزایش رسانایی در پیوند با خمیر سیمان باشد. بیشترین کاهش ضریب انتقال

aerogels as aggregates for cement-based thermal renders. *Cement and Concrete Composites*, 72, 309-318.

[3] Ng, S., Jelle, B. P., Sandberg, L. I. C., Gao, T., & Wallevik, Ó. H. (2015). Experimental investigations of aerogel-incorporated ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 77, 307-316.

[4] Fickler, S., Milow, B., Ratke, L., Schnellenbach-Held, M., & Welsch, T. (2015). Development of high performance aerogel concrete. *Energy Procedia*, 78, 406-411.

[5] Khanahmadzadeh, S., Khorshidi, N., Rabbani, M., & Khezri, B. (2012). Removal of phenol in aqueous solutions by silica aerogel-activated carbon nano composite. *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences*, 2(7), 281-86.

[6] Khamidi, M. F., Glover, C., Farhan, S. A., Puad, N. H. A., & Nuruddin, M. F. (2014). Effect of silica aerogel on the thermal conductivity of cement paste for the construction of concrete buildings in sustainable cities. *WIT Transactions on The Built Environment*, 137, 665-674.

[7] Keyvani, A. (2007). Huge opportunities for industry of nanofibrous concrete technology. *International Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 3(1), 3-12.

[8] Yakovlev, G., Keriené, J., Gailius, A., & Girniené, I. (2006). Cement based foam concrete reinforced by carbon nanotubes. *Materials Science [Medžiagotyra]*, 12(2), 147-151.

[9] Luo, J., Hou, D., Li, Q., Wu, C., & Zhang, C. (2017). Comprehensive performances of carbon nanotube reinforced foam concrete with tetraethyl orthosilicate impregnation. *Construction and Building Materials*, 131, 512-516.

[10] Micheli, D., Vricella, A., Pastore, R., Delfini, A., Morles, R. B., Marchetti, M., ... & Corinaldesi, V. (2017). Electromagnetic properties of carbon nanotube reinforced concrete composites for frequency selective shielding structures. *Construction and Building Materials*, 131, 267-277.

[11] Carriço, A., Bogas, J. A., Hawreen, A., & Guedes, M. (2018). Durability of multi-walled carbon nanotube reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 164, 121-133.

[12] ASTM. (2006). Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. *ASTM C136-06*.

[13] ASTM. (1979). Standard specification for concrete aggregates, Appendix XI, Methods for evaluating potential reactivity of an aggregate. American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards, Concrete and Mineral Aggregates, 14.

نسبت به حالت شاهد می‌باشد. این طرح اختلاط برای مقاومت فشاری بتن ۲۸ روزه نیز صادق است.

تحقیقات دیگری توسط بنازوک و همکاران [۱۹] و فرهان و همکاران [۲۰] صورت گرفته است که به ترتیب از پودر لاستیک بازیافتی و دوده سیلیس و خاکستر پوسته برنج برای کاهش ضریب انتقال حرارت بتن استفاده کردند. اما باعث کاهش در مقاومت فشاری و افزایش منافذ قابل نفوذ در بتن شده‌اند.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق برای افزایش مقاومت بتن در برابر انتقال حرارت از نانوتیوب کربنی و ایروزل سلیکا با کمترین کاهش در مقاومت و دوام بتن استفاده گردید. برای این منظور از نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت ویژه الکتریکی، نفوذ یون کلرید و ضریب انتقال حرارت استفاده شد. نتایج تحقیق حاکی از آن است که در مقادیر مشخص ایروزل سیلیس و نانوتیوب کربنی، بتن دارای ضریب انتقال حرارت، مقاومت فشاری و دوام مناسب است. با افزایش مقدار ایروزل سیلیس به تنهایی در ترکیب بتن، فقط مشخصه ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد و در مشخصه‌های دوام و مقاومت فشاری بتن ضعف ایجاد می‌شود. با افزایش مقدار نانوتیوب کربنی تا ۰/۵ درصد، بدون استفاده از ایروزل سیلیس، مقدار منافذ قابل نفوذ و نفوذ یون کلرید کاهش می‌یابد ولی مقاومت فشاری و مقاومت ویژه الکتریکی تا ۰/۳ درصد استفاده از نانوتیوب کربنی بهبود می‌یابد. ترکیبی از دو ماده نانوتیوب کربنی و ایروزل سلیکا علاوه بر بهبود شرایط مقاومت و دوام بتن باعث کاهش ضریب انتقال حرارت در بتن می‌گردد. به طوریکه بهترین حالت برای اختلاط استفاده از ۰/۳ درصد نانوتیوب کربنی و ۴ درصد ایروزل سلیکا مشاهده می‌شود که ضریب انتقال حرارت بتن و مقاومت فشاری بتن به ترتیب تا ۷۳ و ۲۱ درصد نسبت به بتن شاهد بهبود می‌یابد.

۵- مراجع

[1]. Gao, T., Jelle, B. P., Gustavsen, A., & Jacobsen, S. (2014). Aerogel-incorporated concrete: An experimental study. *Construction and Building Materials*, 52, 130-136.

[2] de Fátima Júlio, M., Soares, A., Ilharco, L. M., Flores-Colen, I., & de Brito, J. (2016). Silica-based

- [14] ASTM. (2002). Standard specification for standard sand, ASTM C778.
- [15] Ramezaniapour, A. A., Pilvar, A., Mahdikhani, M., & Moodi, F. (2011). Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2472-2479.
- [16] American Society for Testing and Materials. Committee C-9 on Concrete and Concrete Aggregates. (2012). Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. ASTM International.
- [17] Ramezaniapour, A. A., Pilvar, A., Mahdikhani, M., & Moodi, F. (2011). Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2472-2479.
- [18] Safiuddin, M., & Hearn, N. (2005). Comparison of ASTM saturation techniques for measuring the permeable porosity of concrete. *Cement and Concrete Research*, 35(5), 1008-1013.
- [19] Benazzouk, A., Douzane, O., Mezreb, K., Laidoudi, B., & Quéneudec, M. (2008). Thermal conductivity of cement composites containing rubber waste particles: Experimental study and modelling. *Construction and Building Materials*, 22(4), 573-579.
- [20] Farhan, S. A., Khamidi, M. F., Murni, M. H., Nuruddin, M. F., Idrus, A., & Al Yacoub, A. M. (2012). Effect of silica fume and MIRHA on thermal conductivity of cement paste. *WIT Transactions on the Build Environment*, 124, 331-339.

Effect of Carbon Nanotube and Silica Aerogel on Compressive Strength, Durability and Thermal Conductivity of Concrete

Shahram Mousavi *

Assistant professor, Civil Engineering Department, Miyaneh Branch, Islamic Azad University, Miyaneh, Iran
Farhood Gharedaghi

MSc. Student, Civil Engineering Department, Miyaneh Branch, Islamic Azad University, Miyaneh, Iran

Abstract

Silica aerogels as a nano material have significant properties including high porosity, high specific surface area, excellent heat insulation and low dielectric constant properties, low density and the potential to become an effective building insulation material. However, the implementation of silica aerogel as building insulation is restricted due to high manufacture in cost. Furthermore, despite having a relatively high compressive strength, it is very fragile due to its low tensile strength. In this study, carbon nanotube was used in order to overcome the undesirable properties of silica aerogel in concrete. Carbon nanotubes (CNTs) have been extensively studied as a reinforcement material for cement-based composites. The growing interest in this field comes from the desire to modify the cement matrix at the scale of their main compounds, taking advantage of the outstanding properties of CNTs. On the one hand, CNTs have ultra-high strength and stiffness, with Young's modulus up to 1 TPa and exceptional tensile strength in the range of 20–100 GPa. On the other hand, they possess extremely high aspect ratios and surface area, as well as very low density. Therefore, CNTs are ideal candidates for cement nano-reinforcement, being potentially able to retain the propagation of small nano-cracks and improving some negative features of cement based materials, such as the low tensile strength and low strain capacity. In fact, CNTs have proven to enhance the fracture properties and early age strain capacity of cement pastes and mortars, reducing or preventing crack initiation. This study examined compressive strength, electrical resistivity, and penetration of chloride and thermal conductivity of concrete. To this end, 16 mix designs of concrete were considered and totally 192 samples were made. Silica aerogel was used in the amounts of 0, 4, 6, 8 percent of concrete and carbon nanotube was used in quantities of 0, 0.03, 0.05, .07 percent weight of concrete. The results showed that combination use of silica aerogel and nanotube not only improves the compressive strength and durability of concrete but also enhances the performance of thermal conductivity of concrete. Also, the optimum percent of nanotube and silica aerogel in the mix design of concrete are 5% and 4% respectively.

Keywords: silica aerogels, carbon nanotube, concrete, thermal conductivity.

* Corresponding Author: sh.mousavi@m-iau.ac.ir

