



بررسی تاثیر نانوذرات تیتانیوم با ساختار فیبری (DFNT) توسط روش های میکروسکوپی و طیف سنجی (IR) و تاثیر آن بر ساختار دوام بتن

حسین جوان^۱، امین هنربخش^{۱*}، سید مجتبی موحدی فر^۱، مهدی نوبهاری^۱، راحله ژبانی^۲

^۱گروه مهندسی عمران، واحد نیشابور، دانشگاه آزاد اسلامی، نیشابور، ایران

^۲گروه شیمی، واحد نیشابور، دانشگاه آزاد اسلامی، نیشابور، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۴۰۴/۰۲/۰۳، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۴۰۴/۰۴/۱۱، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۴۰۴/۰۴/۲۰

چکیده

در این مقاله، تاثیر نانوذرات تیتانیوم با ساختار فیبری (DFNT) بر دوام بتن سبک بررسی گردید. نانوذرات فیبری تیتانیوم به روش سنتزی تهیه شدند و سپس نمونه های بتنی در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی ساخته و مورد آزمایش های مکانیکی و دوام قرار گرفتند. نتایج آزمون دوام، بیانگر کاهش ۱۷ درصدی جذب آب سطحی و کاهش ۲۲ درصدی تخلخل کل در بتن های اصلاح شده با DFNT (در نسبت ۰/۳ درصد) نسبت به بتن معمولی بود. همچنین بهبود ۱۵ درصدی مقاومت در برابر چرخه های ذوب-یخبندان مشاهده شد، که این امر پایداری بتن در شرایط محیطی مخرب را افزایش می دهد. در نهایت، افزوده شدن بیش از ۰/۳ درصد نانوذره عملکرد بهتری ارائه نکرد و به علت پدیده کلوخه شدن، روند کاهش دوام مشاهده شد. به طور کلی، نتایج کمی و کیفی این تحقیق نشان می دهد استفاده از نانوذرات تیتانیوم فیبری تا سطح ۰/۳ درصد وزنی سیمان می تواند راهکاری موثر و اقتصادی برای افزایش دوام و کاهش نفوذپذیری بتن باشد.

واژه های کلیدی: نانوذره تیتانیوم (DFNT)، دوام بتن، جذب آب، تخلخل، ذوب و یخبندان

۱. مقدمه

بتن، ماده ای است که از مواد چسبنده و سیمانی تشکیل شده و در ساخت و ساز استفاده می شود. بهره گیری از نانو ذرات در ساخت بتن، می تواند روند تولید را تسهیل و خواص نهایی بتن را بهبود بخشد، بدون اینکه مشکلات جدیدی ایجاد کند. تحقیقات نشان می دهد که افزودن ذرات نانو باعث افزایش مقاومت های مکانیکی و کیفیت بتن می شود [۱-۲]. از دیدگاه فنی، استفاده از بتن در شرایط حرارت بالا، مقاومت در برابر آتش، کاهش میزان انرژی و اجزای الکتریکی و گرمایی در سازه ها اهمیت دارد، اما در این

*عهده دار مکاتبات: امین هنربخش

نشانی: گروه مهندسی عمران، واحد نیشابور، دانشگاه آزاد اسلامی، نیشابور، ایران

پست الکترونیک: E-mail: amin_honarbakshsh@iau.ac.ir

تلفن: ۰۵۱۴۲۶۲۱۹۰۱

شرایط، خواص مکانیکی و دوام بتن کاهش می‌یابد [۳-۵]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که خواص بتن پس از آتش‌سوزی، شامل ضعف در مقاومت، تغییر ساختار و شیمی منشأ ترک خوردگی است که به دلیل واکنش‌های شیمیایی و تغییر در ساختار فیزیکی بتن است [۶]. افزودن مواد نانو می‌تواند به کاهش این مشکلات کمک کند و خواص فیزیکی و شیمیایی بتن را در معرض حرارت بالا حفظ نماید [۷].

در سال ۲۰۱۳، لی و همکارانش بررسی کردند که نانوذرات TiO_2 در بتن باعث کاهش نفوذپذیری کلرید شده و مقاومت میانی در برابر تهاجم کلرید ایجاد می‌کند. بنابراین، بتن حاوی نانوذرات TiO_2 گزینه مناسبی برای حفاظت سازه‌های دریایی در مقابل خوردگی است [۸]. در سال ۲۰۱۷، اولین تحقیق درباره استفاده از آب مغناطیسی (mw) برای بهبود خواص مکانیکی و ساختاری بتن همراه با نانوالومینا انجام شد. نتایج نشان داد که جایگزینی آب مغناطیسی به جای آب شیرین طبیعی موجب بهبود قابل توجه ویژگی‌های بتن شد [۹]. اسماعیلی مطالعه‌ای انجام داد که تاثیر نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم روی مقاومت فشاری و نفوذپذیری آب در بتن را بررسی کرد. در این مطالعه، از طرح اختلاط با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۵ و عیار سیمان ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب استفاده شد. افزودن نانو ذرات با درصد‌های مختلف باعث ساخت مخلوط‌های جدیدی شد. نتایج نشان داد که افزودن نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم تا یک درصد بهینه، مقاومت فشاری بتن را به طور قابل توجهی افزایش و نفوذپذیری آب را کاهش می‌دهد. اما افزودن نانو ذرات بیش از درصد بهینه، باعث کاهش مقاومت فشاری نسبت به مخلوط دارای درصد بهینه می‌شود [۱۰]. گیوی و همکارانش اثر ترکیب نانو سیلیس و الیاف بر خواص مکانیکی و دوام بتن را بررسی کردند. نتایج نشان داد که جایگزینی ۴٪ سیمان با نانو سیلیس و افزودن ۰/۳٪ الیاف فولادی، مقاومت خمشی را ۷۶٪ افزایش داد. نانو سیلیس با اثر پوزولانی و پرکنندگی، بهبود چسبندگی و کاهش کریستال‌های Ca(OH)_2 ، در تقویت بتن نقش داشت. روند مشابهی در بهبود مقاومت فشاری و خمشی بتن با ترکیب نانو سیلیس مشاهده شده است [۱۱]. تاپکو و همکارانش پیدا کردند که ملات سیمان به دلیل تبخیر آب از ساختار نانویی CSH، خواص اتصال خود را از دست می‌دهد [۱۲]. آریوز مشاهده کرد که بتن در دماهای ۴۰۰ درجه سلسیوس تغییر سطحی قابل توجهی ندارد. در دماهای بالاتر، بتن شروع به ترک خوردن می‌کند و در دماهای ۱۲۰۰ درجه، کاملاً تجزیه شده و خواص اتصال خود را از دست می‌دهد [۱۳]. براساس تحقیقات محققین، نوع و خواص سنگدانه‌ها در اثر دما بر بتن تأثیرگذار است. گارسیا و همکاران، بتن خودتراکم را با درصد‌های مختلف نانوسیلیس اصلاح کردند و تأثیر آن بر خواص بتن تازه و دوام بتن سخت شده را بررسی نمودند [۱۴ و ۱۵]. نتایج نشان داد که نانوسیلیس می‌تواند خواص مکانیکی و دوام بتن را بهبود بخشد [۱۶]. در مطالعه دیگری، هانگجیان دو و همکارانش عملکرد دوام بتن با نانوسیلیس را آزمایش کردند. آنها از درصد‌های ۰/۳٪ و ۰/۶٪ نانوسیلیس در نمونه‌های بتنی استفاده کردند. نقش پرکنندگی و واکنش پوزولانی نانوسیلیس، به‌ویژه در منطقه گذار سطحی، باعث کاهش تخلخل و نفوذپذیری و در نتیجه افزایش دوام در نمونه‌ها شد [۱۷]. نفوذپذیری بتن یکی از خواص مهم آن در رابطه با دوام است که امکان عبور آب یا سیالات دیگر و حمل مواد مضر به داخل بتن را فراهم می‌سازد. تأثیر نانوسیلیس و میکروسیلیس بر تخلخل و نفوذپذیری

بتن خودتراکم سخت شده در سنین پایین با آزمایش‌هایی مانند تبخیر آب، فشار مویینگی، درجه حرارت و سرعت پالس فراصوتی بررسی شده است. نتایج نشان داد که افزودن سیلیس، ساختار بتن را اصلاح کرده و تخلخل و نفوذپذیری آن در سنین ۷ و ۲۸ روز کاهش یافته است [۱۸]. داهیش و همکاران در سال ۲۰۲۳ تأثیر ترکیب پوزولان طبیعی و دوده سیلیس در ملات‌های پایه سیمانی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که می‌توان تا ۴۰ درصد وزن سیمان را با پوزولان جایگزین کرد [۱۹].

DFNT ماده‌ای با پتانسیل بالا برای استفاده در بتن سبک است، اما تا کنون مطالعه‌ای که تأثیر افزودن آن بر خواص بتن سبک را بررسی کند، صورت نگرفته است. بنابراین، هدف این پژوهش بررسی سیستماتیک تأثیر درصدهای مختلف وزنی DFNT بر خواص دوام بتن سبک است.

۲. مواد و روش‌ها

مواد شیمیایی با خلوص بالا از شرکت‌های Fluka و Merck تهیه شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (FESEM) در دستگاه سطح- $S\phi 160$ ساخت شرکت HITACHI ثبت گردید. طیف FTIR با دستگاه Bruker VERTEX انجام شد. داده‌های پراش اشعه ایکس با دستگاه Advanced 8D ساخت Bruker و تشعشع Cuka ثبت شدند. حجم و قطر منافذ نانوذرات با جذب N_2 در دمای $196^\circ C$ و با استفاده از دستگاه ASAP Micromeritics تعیین شد. همچنین، تجزیه و تحلیل اندازه منافذ در ابزارهای مختلف انجام گرفت. برای عملیات هم زدن، از همزن مغناطیسی هیتراستیرر ساخت کمپانی IKA انگلیس استفاده شد. آون آزمایشگاهی مدل UF119 ساخت شرکت Memmert آلمان، ترازو الکترونیکی مدل K0012، و سانتریفیوژ مدل MF 48 CENTRIC ساخت شرکت Domel نیز مورد استفاده قرار گرفتند.

۳. مراحل سنتز نانو ذرات

۳-۱. روش عمومی برای سنتز نانو ذرات DFNT

$1/6$ میلی‌لیتر تترا بوتیل تیتانات به 27 میلی‌لیتر سیکلو هگزان و 7 میلی‌لیتر 1 -پنتانول افزوده شد. سپس، مخلوطی شامل $4/3$ گرم برومید ستیل پیریدینیوم (CPB) و $0/9$ گرم اوره که در 40 میلی‌لیتر آب حل شده بود، اضافه و به مدت 45 دقیقه هم زده شد. پس از آن، مخلوط حاصل به یک راکتور منتقل و به مدت $2/6$ ساعت در دمای 75 درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد. در نهایت، ماده حاصل (DFNT) تحت کلسیناسیون در حضور هوا و در دمای 670 درجه سانتی‌گراد به مدت $3/5$ ساعت قرار گرفت [۱۹].

۳-۲. نحوه ساخت نمونه‌ها

در فرآیند ساخت بتن سبک فومی، ابتدا سیمان پرتلند، ماسه با دانه‌بندی استاندارد و مقدار مشخص آب مخلوط می‌شوند تا دوغاب یکنواختی تشکیل شود. در صورت استفاده از افزودنی‌هایی مانند نانو کلاستر مگنتیت، آن‌ها نیز در همین مرحله به مخلوط افزوده و به خوبی پخش می‌شوند. عامل کف‌زا بر پایه پروتئین که با آب ترکیب شده است، سپس با دستگاه فوم‌ساز به کف پایدار با حباب‌های ریز تبدیل می‌شود. این کف به تدریج به مخلوط اصلی اضافه و به آرامی هم زده می‌شود تا حباب‌های هوا به طور

یکنواخت توزیع شوند و ساختار سلولی مورد نظر ایجاد شود. مخلوط نهایی در قالب‌های مخصوص ریخته و سطح آن تسطیح می‌شود. نمونه‌ها ابتدا ۲۴ ساعت در دمای محیط باقی می‌مانند، سپس از قالب خارج شده و تا زمان موردنظر، مانند ۱۰ یا ۳۰ روز، در شرایط مرطوب یا اتاق‌های اشباع، عمل‌آوری نهایی صورت می‌گیرد تا خواص نهایی بتن سبک فومی تثبیت شود.

۳-۳. ساخت نمونه های بتنی

در این تحقیق، هفت نوع مخلوط بتن سبک تهیه شد. وزن هدف برای FC، برابر ۱۰۰۰ کیلوگرم در مترمکعب تعیین گردید. همچنین، هفت جزء درصد وزنی مختلف از DFNT به مخلوط‌ها اضافه شد (۰/۰، ۰/۱۰، ۰/۲۰، ۰/۲۵، ۰/۳۰، ۰/۳۵ و ۰/۴۰ درصد). نسبت ماسه به سیمان و آب به سیمان در آزمایش به ترتیب ۱:۱/۴ و ۰/۴۰ بودند که در جدول ۱ ذکر شده است.

جدول ۱- طرح اختلاط

کفزا kg/l	ماسه		DFNT		آب		سیمان Kg/m ³	ش.ع. ش.ع.
	S/C	Kg/m ³	%	Kg/m ³	Kg/m ³	W/C		
۱/۰۷	۱/۴	۵۰۰	۰٪	-	۱۴۳	۰/۴	۳۵۷	۱
۱/۰۷	۱/۴	۵۰۰	۰٪/۱۰	۰/۳۶	۱۴۳	۰/۴	۳۵۷	۲
۱/۰۷	۱/۴	۵۰۰	۰٪/۲۰	۰/۷۱	۱۴۳	۰/۴	۳۵۷	۳
۱/۰۷	۱/۴	۵۰۰	۰٪/۲۵	۰/۸۹	۱۴۳	۰/۴	۳۵۷	۴
۱/۰۷	۱/۴	۵۰۰	۰٪/۳۰	۱/۰۷	۱۴۳	۰/۴	۳۵۷	۵
۱/۰۷	۱/۴	۵۰۰	۰٪/۳۵	۱/۲۵	۱۴۳	۰/۴	۳۵۷	۶
۱/۰۷	۱/۴	۵۰۰	۰٪/۴۰	۱/۴۳	۱۴۳	۰/۴	۳۵۷	۷

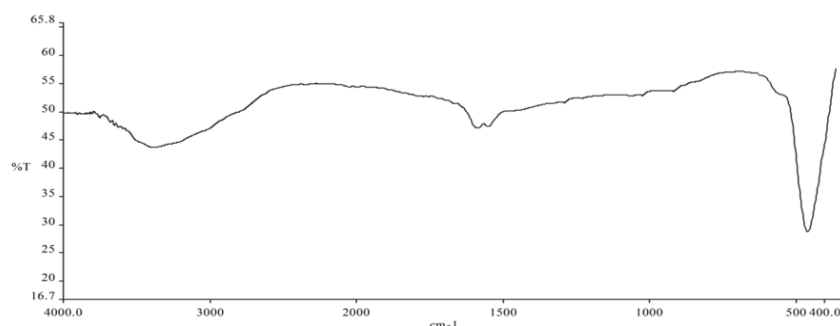
۴. ارزیابی کیفیت بتن از نظر دوام و معیارهای آن

ارزیابی دوام از طریق انجام آزمایش هایی بر روی بتن سخت شده صورت گرفت که عبارتند از: آزمون جذب آب ، آزمون سرعت پالس التراسونیک (UPV)، محیط اسیدی، حرارت بالا، آزمایش یخبندان - ذوب و آزمون جمع شدگی در اثر خشک شدن را می توان نام برد.

۵. نتایج و بحث

۵-۱. طیف مادون قرمز (FT-IR)

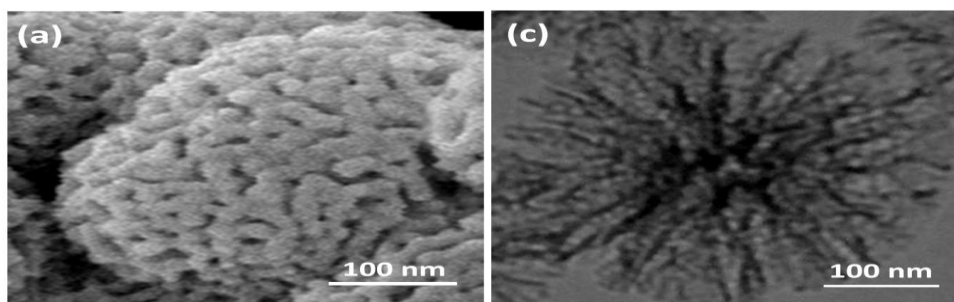
شکل ۱ طیف FTIR نانوذرات DFNT را نمایش می دهد. تحلیل طیف FTIR این نانوذرات، وجود مد خمشی Ti-O در 487 cm^{-1} و ارتعاش کششی تغییر شکل یافته Ti-OH در 1598 cm^{-1} را تأیید می کند. همچنین، در طیف FTIR وجود ارتعاشات کششی نامتقارن و متقارن گروه های هیدروکسیل در 3389 cm^{-1} مشاهده شد.



شکل ۱- طیف FT-IR از نانوذرات DFNT

۵-۲. بررسی تشکیل نانو ذرات به وسیله (SEM و TEM)

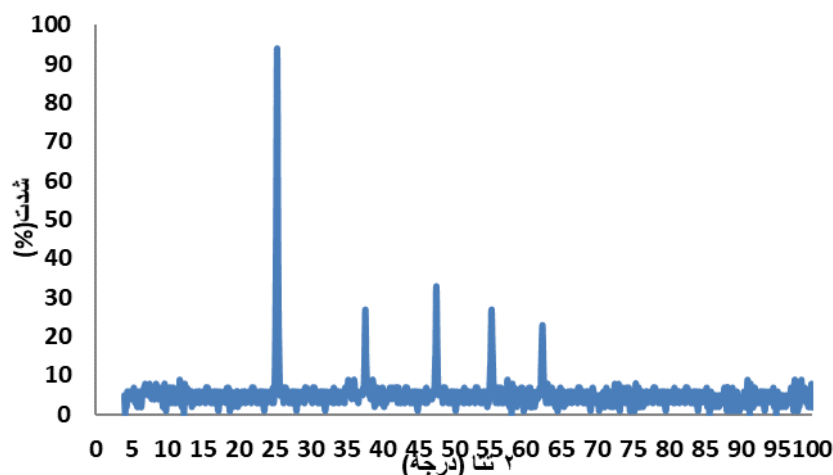
شکل ۲ تصاویر نانوذرات DFNT را با تکنیک های FESEM و TEM نشان می دهد. نمونه DFNT دارای ساختاری تیغه ای متمایل است و شامل توده های پایدار و رشته های شاخه ای می باشد. ضخامت این رشته ها بین ۳۵ تا ۴۵ نانومتر متغیر بوده و به صورت سه بعدی پخش شده اند، که ساختار تیغه ای شکل را ایجاد می کند. وجود این رشته ها امکان دسترسی و راه یابی به سطح خارجی را فراهم می کند.



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (a) و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با گسیل میدانی (b) از DFNT.

۳-۵. آنالیز پراش اشعه ایکس XRD

الگوهای پراش (دیفرکتوگرام) نانوذرات DFNT در شکل ۳ مشاهده می‌شود. این نانوذرات چندین قله متمایز در ساختار بلوری خود دارند. طیف پراش اشعه ایکس (XRD) نشان می‌دهد که قله‌ها در زوایای 2θ برابر با 25.3° ، 37.6° ، 47.8° ، 54.2° و 62.4° قرار دارند که مربوط به قله‌های شاخص دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) در فاز بلوری آنتاز است. این اطلاعات بر اساس پرونده JCPDS شماره ۷۳-۱۷۶۴ تأیید شده است.



شکل ۳ تحلیل پراش اشعه ایکس انجام شده بر روی DFNT.

۴-۵. انقباض ناشی از خشک شدن

آزمون‌های تراکم خشک در روزهای ۱۰، ۳۰ و ۶۰ انجام گرفت. در مورد همه مخلوط‌های FC، دانسیته خشک نهایی و دانسیته خشک موردنظر در بازه مجاز از $50 \text{ kg/m}^3 \pm$ قرار داشتند. و دانسیته خشک نهایی تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های بتن سبک (FC) دارد و به همین دلیل، پارامتر کلیدی در تعیین دوام نهایی و کارایی مکانیکی این نوع بتن محسوب می‌شود.

۵-۵. سرعت عبور امواج فراصوتی

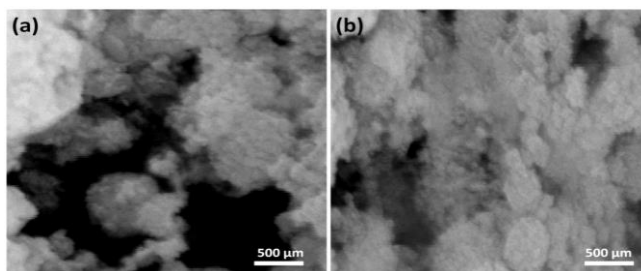
آزمون سرعت پالس فراصوت (UPV) برای ارزیابی کیفیت و استحکام بتن سبک (FC) انجام شد. مقدار بالای UPV نشان‌دهنده کیفیت و مقاومت بیشتر بتن است، در حالی که مقادیر پایین‌تر نشان‌دهنده وجود ترک‌ها و حفره‌های هوا است. نتایج نشان می‌دهد افزودن نانوذرات ریز باعث کاهش فضاها و خلای و جلوگیری از ترک‌های میکروسکوپی می‌شود [۲۰].

وقتی نسبت جرمی DFNT از 0.3% درصد فراتر می‌رود، تخلخل افزایش می‌یابد. این افزایش ناشی از تجمع DFNT و کاهش توانایی آن در پر کردن حفره‌های خمیر سیمانی است. همچنین، ترک‌های ریز در ماتریس FC در نزدیکی مرز حضور DFNT به وجود می‌آیند که باعث تسهیل عبور مایعات می‌شود. پیشرفت عمل موئینگی و حرکت ذرات آب در مرز DFNT-FC نیز باعث افزایش پراکندگی و تغییر نرخ انتقال در نسبت‌های جرمی مشابه می‌گردد، که این تغییرات به دلیل پراکندگی ذرات ذاتی است.

۵-۶. توانایی جذب آب

در این بررسی، پتانسیل جذب رطوبت نمونه‌های FC در بازه‌های زمانی ۱۰، ۳۰ و ۶۰ روز ارزیابی شد و نشان داد که افزودن DFNT باعث افزایش قابل توجه در ظرفیت جذب رطوبت FC می‌شود. در مراحل اولیه، جذب رطوبت بیشتر به حفرات بزرگ وابسته است و در مراحل بعدی، حفرات کوچک‌تر نقش مهم‌تری دارند.

تصویر میکروسکوپ SEM نمونه کنترل FC نشان‌دهنده حفرات بزرگ و متصل است. افزودن DFNT به FC یکنواختی دوغاب ملات را بهبود می‌بخشد و در نتیجه چگالی نمونه FC افزایش می‌یابد. اضافه کردن DFNT در بتن الیافی (FC) باعث توسعه ریزساختار یکنواخت‌تر و فشرده‌تر، کاهش ظرفیت جذب آب، و افزایش تشکیل محصولات هیدراسیون شده است. همچنین، با افزایش مقدار DFNT بیش از ۳۰٪، نفوذپذیری FC افزایش می‌یابد که احتمالاً ناشی از تجمع DFNT و کاهش قدرت آن‌ها در پر کردن فضاهای خالی است (شکل ۴a و ۴b).



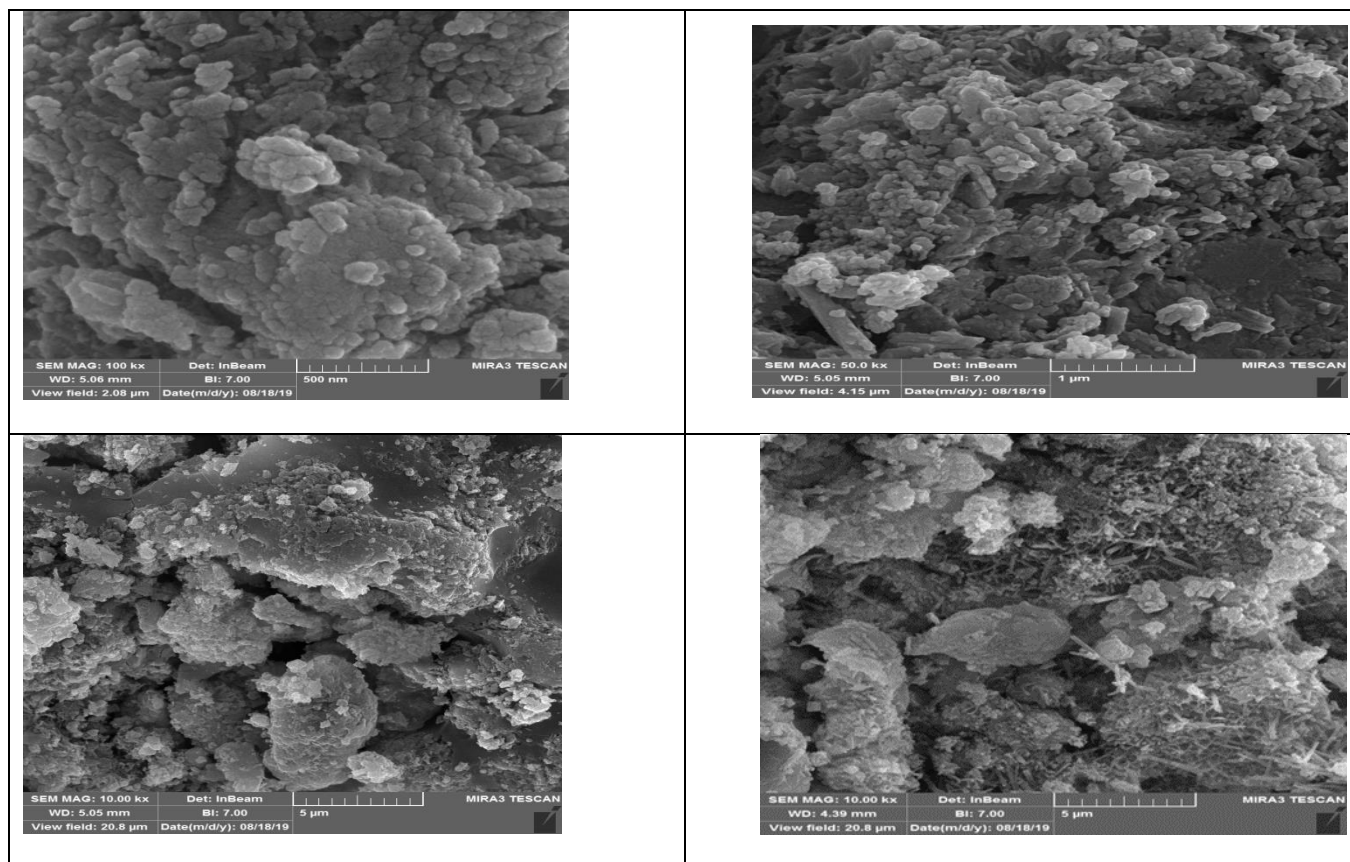
شکل ۴. میکروگراف SEM از نمونه شاهد (a) FC و FC با ۳۰٪ DFNT (b).

۵-۷. آزمایش یخبندان - ذوب

پس از افزودن نانوذرات مگنتیت تا مقدار بهینه موجب افزایش دوام و پایداری بتن سبک فومی در برابر سیکل‌های یخبندان و ذوب می‌شود و این نقش مهمی در حفظ مقاومت فشاری آن در این شرایط دارد.

اثرات حرارت بر ظاهر بتن: پس از قرارگیری در دماهای بالا، نمونه‌های بتن سبک تغییر رنگ می‌دهند و ترک‌ها و آسیب‌های سطحی ظاهر می‌شود؛ اما نمونه‌های حاوی نانوذرات در مقایسه، کمتر دچار تغییر رنگ و ترک شده و ظاهر یکنواخت‌تری پس از شوک حرارتی دارند. به طور کلی، افزودن نانوذرات به میزان بهینه باعث افزایش مقاومت حرارتی و کاهش آسیب‌های ساختاری و ظاهری بتن در دماهای بالا، به ویژه نانوذرات DFNT، در دمای ۶۰۰ درجه می‌شود.

ریخت شناسی آزمونه‌ها در معرض حرارت: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از آزمایش‌های ۳۰ روزه نشان می‌دهند که نانوذرات در معرض حرارت‌های مختلف تشکیل می‌شوند. بر اساس این تصاویر، ساختارهای نانو مربوط به محصول اصلی هیدراتاسیون سیمان و عامل کاهش نفوذپذیری است. در دماهای بالا، در حدود ۶۰۰ درجه سلسیوس، فرآیند تبدیل کربنات کلسیم (CaCO_3) به اکسید کلسیم (CaO) و دی‌اکسید کربن (CO_2) صورت می‌گیرد که باعث تجزیه نانو ساختارهای C-S-H و گسترش ترک‌ها و آسیب دیدگی ساختار بتن می‌شود. در نتیجه، ویژگی‌های مکانیکی و دوام بتن به شدت کاهش می‌یابد (شکل ۵).



شکل ۵. تصاویر SEM از نمونه بتنی (الف) بتن در دمای محیط (ب) بتن تحت دمای ۲۰۰°C (ج) بتن تحت دمای ۴۰۰°C (د) بتن تحت دمای ۶۰۰°C

۶. نتیجه گیری

در این تحقیق با هدف تولید نانوتیتانیوم فیبری شاخه‌ای جدید (DFNT) و ارزیابی تأثیر افزودن آن بر دوام و خواص مکانیکی بتن سبک فومی انجام شده است. ویژگی‌های دوام مورد ارزیابی قرار گرفتند. بر اساس تحلیل‌های انجام شده، نتایج زیر حاصل شد:

افزایش نسبت جرم DFNT در بتن، باعث بهبود روانی FC می‌شود، زیرا این نانوذره‌ها به پخش یکنواخت آب کمک می‌کنند و در نتیجه، دوام بتن را افزایش می‌دهند. همچنین مقادیر UPV در نمونه‌های مختلف نزدیک بود که نشان‌دهنده عدم وجود منافذ هوای بزرگ است. در طول ۳۰ روز، افزایش قابل توجه ۲۱ درصدی UPV نشان‌دهنده اثربخشی DFNT در کاهش حفرات و جلوگیری از ریزترک‌ها است و نمونه مورد بررسی بهترین نتایج را در کاهش تخلخل و ظرفیت جذب آب نشان داد، به طوری که تخلخل و جذب آب در روز ۳۰ نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۲۶ و ۲۱ درصد کاهش یافته است، که احتمالاً به دلیل اثر پرکنندگی نانوذرات است. همچنین جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن FC با حضور DFNT با افزایش سن نمونه‌ها افزایش یافت و در نهایت آزمایش‌های EDX، XRD، و FT-IR نشان می‌دهد که نانوذرات موجب کاهش مصرف Ca(OH)_2 و افزایش تولید ژل C-S-H شده، که باعث بهبود ریزساختار و خواص بتن می‌شود.

۷. منابع

- [1] M.I. Serag et al. (2017). Effect of nano silica on concrete bond strength modes of failure. *Int. J.* 12 (29), 2892–2899.
- [2] T. Ji. Cem. (2016). Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO₂. *Concr. Res.* 35, 1943–1947.
- [3] A.Nazari, S. Riahi. (2017). Microstructural, thermal, physical and mechanical behavior of the self compacting concrete containing SiO₂ nanoparticles. *Mater. Sci. Eng.: A* 527 (29–30), 7663–7672.
- [4] D. Shukla, P. S. Vankar. (2017). Influence of pH, high salinity and particle concentration on stability and rheological properties of aqueous suspensions of fumed silica, *Natural Dyes for Textiles*, 205–221.
- [5] S. Meghana, P. Kabra, S. Chakraborty, N. Padmavathy. (2015). Understanding the pathway of antibacterial activity of copper oxide nanoparticles. *The Royal Society of Chemistry. RSC Adv.* 5, 12293–12299 .
- [6] H. Du, S.D. Pang. (2015). Enhancement of barrier properties of cement mortar with graphene nanoplatelet. *Cement and Concrete Research*, 76, 10–19.
- [7] L. Li et al., (2017). Combined effects of micro-silica and nano-silica on durability of mortar, *Constr. Build. Mater.* 157, 337–347.
- [8] W.-Y. Kuo, J.-S. Huang, C.-H. Lin, (2006). Effects of organo-modified montmorillonite on strengths and permeability of cement mortars, *Cem. Concr. Res.* 36 (5) 886–895.
- [9] اسماعیلی، ح. حاجیان بوشهریان، ع. (۱۳۹۸). تاثیر نانو دی اکسید تیتانیوم بر روی نفوذپذیری و مقاومت فشاری بتن. تحقیقات بتن، ۱۲، ۱۱۱–۱۲۲.
- [10] A.N. Givi et al., (2010). Experimental investigation of the size effects of SiO₂ nanoparticles on the mechanical properties of binary blended concrete, *Composites Part B: Eng.* 41 (8), 673–677.
- [11] I. Topcu and A. Demir. (2002). Effect of fire and elevated temperatures on reinforced concrete structures. *Bull. Chamber Civil Eng.* 16: p. 34–36.
- [12] O. Arioz. (2007). Effects of elevated temperatures on properties of concrete. *Fire safety journal*, 42(8): p. 516–522 .
- [13] K. Sakr and E. El-Hakim. (2005). Effect of high temperature or fire on heavy weight concrete properties. *Cement and concrete research.* 35(3): 590–596 .
- [14] A. Savva, P. Manita and K. Sideris. (2005). Influence of elevated temperatures on the mechanical properties of blended cement concretes prepared with limestone and siliceous aggregates. *Cement and Concrete Composites.* 27(2), 239–248 .
- [15] Z. Quercia, P. Spiesz, G. Hüsken, H.J.H. Brouwers, O. (2014). SCC modification by use of amorphous nano-silica, *Cement and Concrete Composites*, 45, 69–81.
- [16] Du. Hongjian, Du. Suhuan, Liu. Xuemei. (2014). Durability performances of concrete with nanosilica, *Construction and Building Materials*, 73, 30, 705–712 .
- [17] J. Puentes, G. Barluenga. (2015). Effect of silica-based nano and micro additions on SCC at early age and on hardened porosity and permeability, *Construction and Building Materials*, 81, 15, 154–161 .
- [18] H. A. Dahish, M. S. Alfawzan, B. A. Tayeh, M. A. Abusogi, and M. Bakri. (2023). Effect of inclusion of natural pozzolan and silica fume in cement-based mortars on the compressive strength utilizing artificial neural networks and support vector machine,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 18, Article ID e02153.
- [19] Chen, Y., & Sadeghzadeh, S. M. (2023). Enhanced thermal energy storage characteristics of nanostructured molten salts: A review of heat storage applications. *Journal of Molecular Liquids*, 384, 122201.
- [20] Zamzani, N. M., Mydin, M. A., & Ghani, A. N. (2019). Microstructural Properties and Thermal Resistivity of Foamed Concrete Incorporating Sawdust Ash as Partial Cement Replacement. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 14, 3932–3937.

Investigating the effect of titanium nanoparticles with a fibrous structure (DFNT) by microscopic and spectroscopic methods (IR) and its effect on the durability structure of concrete

Hossein Javan¹, Amin Honarbakhsh¹, Seyed Mojtaba Movahedifar¹, Mehdi Nobahari¹
& Rahele Zhiani²

¹Department of Civil Engineering, Ne. C., Islamic Azad University, Neyshabur, Iran

²Department of Chemistry, Ne. C., Islamic Azad University, Neyshabur, Iran

Submitted: 23 April 2025, Revised: 02 July 2025, Accepted: 11 July 2025

Abstract

In this paper, the effect of fibrous titanium nanoparticles (DFNT) on the durability of lightweight concrete was investigated. Fibrous titanium nanoparticles were prepared synthetically, and then concrete samples were fabricated under controlled laboratory conditions and subjected to mechanical and durability tests. The durability test results indicated a 17% reduction in surface water absorption and a 22% reduction in total porosity in concretes modified with DFNT (at a ratio of 0/3%) compared to conventional concrete. A 15% improvement in resistance to freeze-thaw cycles was also observed, which increases the stability of concrete in destructive environmental conditions. Finally, the addition of more than 0/3% of nanoparticles did not provide better performance and a trend of decreased durability was observed due to the phenomenon of caking. Overall, the quantitative and qualitative results of this study indicate that the use of fibrous titanium nanoparticles up to 0/3% by weight of cement can be an effective and economical solution to increase durability and reduce permeability of concrete.

Keywords: Titanium nanoparticles (DFNT), concrete durability, water absorption, porosity, thawing and freezing