

## بررسی تأثیر نانوسیلیس بر مقاومت فشاری بتن حاوی الیاف شیشه‌ای در برابر سیکل‌های انجماد و ذوب

یعقوب محمدی<sup>۱\*</sup> و میراسلام نوری‌سادات<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد زلزله، گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی

### چکیده

یکی از دلایل اصلی تخریب بتن در نواحی سردسیر ایران به خصوص در مناطق غربی و شمال غربی، سیکل‌های انجماد و ذوب می‌باشد. بدین منظور در تحقیق حاضر برای بالا بردن مقاومت فشاری بتن، چهار درصد مختلف نانوسیلیس جایگزین سیمان (۰، ۱، ۲، ۳ درصد) و چهار درصد مختلف الیاف شیشه‌ای (GFRC)، (۰، ۲/۲، ۴/۴، ۶/۶ درصد) جایگزین سیمان در دو حالت نمونه‌های شاهد و سیکل‌دار مورد بررسی قرار گرفت. در مجموع ۲۸۸ نمونه تهیه گردید که ۱۴۴ عدد از این نمونه‌ها تحت آزمایش انجماد و ذوب بر اساس استاندارد ASTM C666 B بعد از ۴۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ سیکل قرار گرفتند. ۱۴۴ نمونه دیگر به عنوان نمونه شاهد در سنین ۲۸، ۵۶ و ۷۴ روزه (هم‌زمان با اتمام سیکل‌های ۴۵، ۱۰۰ و ۱۵۰) استفاده شدند. در بررسی اثر اختلاط نانوسیلیس با الیاف (GFRC) بالاترین مقاومت فشاری به ازای ۱ درصد نانوسیلیس و ۶/۶ درصد (GFRC) حاصل شد.

**واژگان کلیدی:** نانوسیلیس، الیاف شیشه‌ای (GFRC)، سیکل‌های انجماد و ذوب، مقاومت فشاری.

### ۱- مقدمه

یکی از چالش‌هایی که امروزه در رشته مصالح ساختمانی به وجود آمده است، تهیه بتن با عملکرد بالا (HPC) می‌باشد. خواص، رفتار و عملکرد بتن بستگی به نانو ساختار ماده زمینه بتن و سیمانی دارد که چسبندگی، پیوستگی و یکپارچگی را به وجود می‌آورد. امروزه از نانو ذرات مختلف در بهبود خواص بتن استفاده شده است که از جمله می‌توان به نانو ذرات  $ZrO_2$  و  $Al_2O_3$  [۴]،  $TiO_2$  و  $ZnO$  [۵]،  $Fe_2O_3$  و  $SiO_2$  [۶]،  $CuO$  [۷] اشاره کرد.

در صنعت بتن، سیلیس یکی از معروف‌ترین موادی است که نقش مهمی در چسبندگی و پراکنندگی بتن با عملکرد بالا (HPC) ایفا می‌کند.

محصولات نانوسیلیس متشکل از ذراتی هستند که گلوله‌ای شکل بوده و با قطر کمتر از ۱۰۰ nm صورت ذرات خشک پودر یا به صورت معلق در مایع محلول قابل انتشار می‌باشند، نانوسیلیس معلق کاربردهای چندمنظوره مانند خاصیت ضد سایش، ضد لغزش، ضد حریق، ضد انعکاس سطوح، از خود نشان می‌دهد. آزمایشات نشان داده‌اند که واکنش مواد نانوسیلیس با هیدرواکسید کلسیم در مقایسه با میکروسیلیس سریع‌تر انجام می‌گیرد [۸]؛ و نه تنها می‌تواند به عنوان پرکننده خوبی برای خلل و فرج باشد [۹]، بلکه می‌تواند فعال کننده واکنش

یکی از دلایل اصلی تخریب بتن در نواحی سردسیر ایران، به خصوص در مناطق غربی و شمال غربی، سیکل‌های یخ زدن و آب شدن می‌باشد. مقاومت بتن در برابر سیکل‌های انجماد و ذوب به تنش‌های بالای درون بتن وابسته است؛ به ویژه در زمانی که آب داخل سنگ‌دانه‌ها منجمد گشته و باعث تغییر حجم بتن در آب و هوای سرد می‌شود. این تغییر حجم سبب ایجاد ترک خوردگی‌های ریز در بتن می‌شود که نهایتاً منجر به کاهش مقاومت و تضعیف ساختار بتن می‌شود [۱].

میزان تخلخل و توزیع منفذهای با ابعاد مختلف، در خمیر سیمان، نقش مهمی در تعیین خواص مکانیکی بتن دارد. این تخلخل که وابسته به نسبت آب به سیمان است، به دلیل وجود حفره‌هایی است که قطر آن‌ها در حدود ۰/۵ نانومتر تا ۱۰ میکرومتر می‌باشد و باعث کاهش مقاومت فشاری بتن می‌شوند [۲]. حفره‌های با ابعاد بزرگ‌تر می‌توانند به راحتی با اتصال به هم مسیر نفوذ مواد شیمیایی را فراهم آورده و دوام و پایداری بتن را کاهش دهند. به همین دلیل مقاومت و نفوذ ناپذیری بتن، شدیداً وابسته به اندازه و توزیع حفره‌ها می‌باشد. بنابراین باید مواد کمکی همراه با سیمان جهت کاهش تخلخل و افزایش مقاومت، در تهیه بتن استفاده گردد [۳].

## ۲-۱- تهیه و عمل آوری نمونه‌ها

در این تحقیق جهت ساخت نمونه‌های بتنی بتنی از روش طرح اختلاط آیین‌نامه ACI 211 با در نظر گرفتن حداکثر اندازه اسمی سنگ-دانه ۱۲/۵ میلی‌متر و اسلالمپ ۶۰ میلی‌متر استفاده شده است [۱۳]. دانه‌بندی شن و ماسه طبق جدول (۲) و (۳) در محدوده استاندارد ASTM C33-84 قرار دارد. آزمایش‌ها با به کارگیری یک نوع سیمان و یک نوع درشت‌دانه و یک نوع ریزدانه و چهار درصد مختلف نانوسیلیس (۰، ۱، ۲، ۳ درصد) و چهار درصد مختلف الیاف شیشه (۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ درصد) جایگزین سیمان، در سه سیکل انجماد و ذوب (۴۵ سیکل هم-زمان با ۲۸ روزه بتن، ۱۰۰ سیکل و ۱۵۰ سیکل) و با سه بار تکرار برای هر آزمایش انجام گرفت. نهایتاً ۱۶ نوع طرح اختلاط و برای هر طرح اختلاط ۱۸ نمونه ساخته شد. جدول (۴) نسبت‌های وزنی طرح اختلاط بتن را نشان می‌دهد. در نام‌گذاری نمونه‌ها از حرف N برای نانو و از حرف G برای الیاف شیشه استفاده گردید. به خاطر حضور نانوسیلیس و برای افزایش اسلالمپ از فوق روان کننده ۲ درصد نسبت وزنی سیمان استفاده گردید. در طرح اختلاط طبق آزمایش ASTM C231 درصد هوای عمدی ۳/۵ درصد به ازای ۰/۴۵ درصد از مواد حباب‌ساز نسبت به سیمان برای یک متر مکعب در نظر گرفته شد [۱۴]. بتن پس از قالب‌گیری تا ۲۴ ساعت زیر گونی‌های مرطوب قرار می‌گرفت و نمونه‌ها تا ۲ ساعت قبل از آزمایش درون حوضچه‌های آب به صورت مستغرق نگهداری می‌شدند که این مسئله طبق توصیه استاندارد ASTM C192 انجام گردید [۱۵]. الیاف شیشه‌ای به شدت تمایل دارند که در بتن تازه به یکدیگر چسبیده و گلوله شوند که به این پدیده گلوله شدن<sup>۲</sup> الیاف می‌گویند. برای برطرف کردن آن در موقع اضافه نمودن الیاف از الک استفاده شد تا الیاف به صورت یکنواخت و مجزا از هم در تمام بتن پخش شوند.

جدول ۲- دانه‌بندی شن مصرفی

نمره الک	$\left(\frac{3}{8}\right)$ "	$\left(\frac{1}{2}\right)$ "	۴
درصد وزنی عبوری شن	۶۱/۴	۱۰۰	۱/۵

جدول ۳- دانه‌بندی ماسه مصرفی

نمره الک	۴	۸	۱۸	۳۰	۵۰	۱۰۰
درصد وزنی عبوری ماسه	۰	۸۹	۱/۲	۷۲/۶	۲۹/۳	۱۴/۹
	۱۰					۳/۱

پوزولانی نیز باشد [۱۰]. مواد افزودنی ذرات نانوسیلیس مورد استفاده می‌توانند ضمن بالاتر بردن کارایی بتن این فواصل را در حد بسیار کوچک پر کرده، با کریستال‌های هیدرات کلسیم که در ناحیه بین دانه‌های<sup>۱</sup> قرار دارند واکنش داده و ژل C-H-S تولید کنند و کمک زیادی به دوام بتن نمایند [۱۱]. در این تحقیق، تأثیر پارامترهای اصلی یعنی درصدهای مختلف جایگزینی نانوسیلیس با سیمان و همین طور الیاف شیشه‌ای با سیمان و تعداد سیکل‌های انجماد و ذوب بر مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی مورد ارزیابی قرار گرفت.

## ۲- مواد و روش‌ها

در تهیه نمونه‌ها از سنگ-دانه‌های طبیعی معدن جبال آستارا استفاده شده است. سنگ-دانه‌های درشت با حداکثر اندازه ۱۲/۵ میلی‌متر و سنگ-دانه‌های ریز با حداکثر اندازه ۴/۷۵ میلی‌متر که هر دو از نوع طبیعی شکسته می‌باشند. سنگ-دانه‌های ریز و درشت با دانه‌بندی ASTM C33-84 هم‌خوانی کامل دارد. سیمان مصرفی از نوع پرتلند پوزولانی کارخانه سیمان اردبیل با وزن مخصوص  $3130 \text{ kg/m}^3$  می‌باشد. الیاف شیشه‌ای مورد استفاده الیاف ۱۲ میلی‌متری و به قطر ۰/۰۲ میکرون تولید شرکت فابیر (فن آوران بتن ایران) با نام تجاری C12 استفاده شد. تحلیل شیمیایی نانوسیلیس پودری طبق اظهارات شرکت سازنده به قرار جدول (۱) می‌باشد. اضافه نمودن الیاف شیشه به شدت بر کاهش کارایی بتن تأثیر می‌گذارد [۱۲]. بنابر این از فوق روان‌کننده بتن مایع بر پایه نفتالین سولفونات استفاده شده است که با نام تجاری Fabcrete-100 بر اساس آیین‌نامه STM C494-81 در رده Types-A&F قرار دارد. وزن مخصوص فوق روان‌کننده ۱/۱۸ کیلوگرم بر لیتر و به رنگ مایع قهوه‌ای تیره مورد استفاده قرار گرفته است. افزودنی حباب‌ساز محصول شرکت فابیر با نام تجاری FabAir-SP10 مطابق با استاندارد ASTM C260-81 بوده و با وزن مخصوص ۱/۰۶ کیلوگرم بر لیتر و به رنگ قهوه‌ای روشن مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۱- تحلیل شیمیایی نانوسیلیس پودری

ویژگی‌های شیمیایی	Fe	Na	Ca	Ti	SiO <sub>2</sub>
درصد تشکیل دهنده	<0.2 ppm	<63 ppm	<0.6 ppm	<100 ppm	>99

نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت و ۲۰ دقیقه به حالت انجماد در دستگاه و ۴۰ دقیقه در داخل حوضچه آب قرار گرفتند. برای حفظ یکنواختی دمای آب از یک المنت برقی همراه با پمپ آب در داخل مخزن عمل‌آوری نمونه‌ها به کار گرفته شد. با توجه به این که انجام سیکل‌های ذوب و انجماد به وسیله نیروی انسانی صورت می‌گرفت و همچنین به دلیل محدودیت زمان کاری آزمایشگاه، در هر شبانه روز تنها انجام سه سیکل ذوب و انجماد امکان‌پذیر بود. لذا در ساعات غیر اداری بنا به توصیه استاندارد ASTM C666 نمونه‌ها در حالت انجماد قرار گرفتند. شکل‌های (۱) و (۲) هر دو حالت قرارگیری نمونه‌ها در حوضچه آب و دستگاه انجماد و ذوب را نشان می‌دهد.

نمونه‌های بتنی در دو سری I و II ساخته شدند. نمونه‌های سری I برای انجام آزمایش انجماد و ذوب، و نمونه‌های سری II به عنوان نمونه‌های شاهد مورد مطالعه قرار گرفتند. نمونه‌های سری I قبل از انجام آزمایش انجماد و ذوب به مدت ۱۴ روز در حوضچه آب به صورت مستغرق نگهداری شدند. همچنین آزمایش سیکل ذوب و انجماد طبق ASTM C666 B بر روی نمونه‌ها انجام گرفت [۱۶].

بر اساس دستورالعمل استاندارد مذکور مدت زمان دوره ذوب نباید کمتر از ۲۰٪ مدت زمان هر سیکل در نظر گرفته شود و حداکثر ۸۰٪ مدت زمان سیکل در انجماد قرار گیرد. در این تحقیق، هر سیکل انجماد و ذوب ۳ ساعت به طول انجامید که

جدول ۴- نسبت‌های وزنی طرح اختلاط

شماره مخلوط	نام‌گذاری طرح	w/c	آب Kg/m <sup>3</sup>	نانوسیلیس Kg/m <sup>3</sup>	الیاف شیشه Kg/m <sup>3</sup>	سیمان Kg/m <sup>3</sup>	ماسه Kg/m <sup>3</sup>	شن Kg/m <sup>3</sup>	حباب‌ساز Kg/m <sup>3</sup>	فوق روان‌کننده Kg/m <sup>3</sup>
۱	N <sub>0</sub> G <sub>0</sub>	۰/۳۷	۱۸۴	۰	۰	۴۷۲	۷۴۵	۱۰۱۹	۲/۱۲	۹/۴۴
۲	N <sub>1</sub> G <sub>0</sub>					۴۶۷				
۳	N <sub>2</sub> G <sub>0</sub>					۴۶۳				
۴	N <sub>3</sub> G <sub>0</sub>					۴۵۸				
۵	N <sub>0</sub> G <sub>0.2</sub>	۰/۳۷	۱۸۴	۰	۰/۹۴۴	۴۷۱	۷۴۵	۱۰۱۹	۲/۱۲	۹/۴۴
۶	N <sub>1</sub> G <sub>0.2</sub>					۴۶۶				
۷	N <sub>2</sub> G <sub>0.2</sub>					۴۶۲				
۸	N <sub>3</sub> G <sub>0.2</sub>					۴۵۷				
۹	N <sub>0</sub> G <sub>0.4</sub>	۰/۳۷	۱۸۴	۰	۱/۸۸۸	۴۷۰	۷۴۵	۱۰۱۹	۲/۱۲	۹/۴۴
۱۰	N <sub>1</sub> G <sub>0.4</sub>					۴۶۵				
۱۱	N <sub>2</sub> G <sub>0.4</sub>					۴۶۱				
۱۲	N <sub>3</sub> G <sub>0.4</sub>					۴۵۶				
۱۳	N <sub>0</sub> G <sub>0.6</sub>	۰/۳۷	۱۸۴	۰	۲/۸۳۲	۴۶۹	۷۴۵	۱۰۱۹	۲/۱۲	۹/۴۴
۱۴	N <sub>1</sub> G <sub>0.6</sub>					۴۶۴				
۱۵	N <sub>2</sub> G <sub>0.6</sub>					۴۶۰				
۱۶	N <sub>3</sub> G <sub>0.6</sub>					۴۵۵				



شکل ۲- نحوه قرارگیری نمونه‌ها در دستگاه انجماد و ذوب



شکل ۱- نحوه قرارگیری نمونه‌ها در حوضچه آب

۲-۲- برنامه آزمایش‌ها

در این تحقیق آزمایش مقاومت فشاری بتن سخت شده بر روی نمونه‌های مکعبی ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر، با دستگاه الکتروهیدرولیکی با ظرفیت ۲۰۰۰ KN و با سرعت ۲/۵ KN/S مطابق با ACI C330 انجام گرفت.

۳- نتایج و بحث

در تحقیق حاضر از میزان افت مقاومت فشاری به عنوان شاخصی جهت نشان دادن اثر پارامترهایی نظیر درصد نانوسیلیس جایگزین سیمان، الیاف شیشه‌ای جایگزین سیمان و تعداد سیکل‌های انجماد و ذوب بر دوام بتن در برابر یخ زدن و آب شدن متوالی استفاده گردید. جدول (۵) نتایج آزمایش مقاومت فشاری بتن (حاصل از میانگین سه آزمایش) بعد از ۴۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ سیکل انجماد و ذوب را نشان می‌دهد.

جدول ۵- مقاومت فشاری نمونه‌های بتن در معرض سیکل‌های انجماد و ذوب

$f'_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f'_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f'_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	نام‌گذاری طرح	شماره نمونه	روزه
۴۶۵/۰	۴۲۱/۰	۴۰۶/۰	G <sub>0</sub> N <sub>0</sub>	۱	۷۴ روزه
۴۹۷/۰	۵۸۱/۳	۵۰۶/۷	G <sub>0</sub> N <sub>1</sub>	۲	A
۳۸۱/۷	۴۹۳/۰	۳۸۹/۰	G <sub>0</sub> N <sub>2</sub>	۳	
۳۷۱/۰	۳۸۶/۰	۳۶۷/۰	G <sub>0</sub> N <sub>3</sub>	۴	
۵۷۰/۳	۵۵۸/۰	۵۱۵/۰	G <sub>0.2</sub> N <sub>0</sub>	۵	
۵۹۲/۰	۵۶۶/۰	۵۲۶/۰	G <sub>0.2</sub> N <sub>1</sub>	۶	
۴۸۱/۳	۴۸۳/۰	۵۱۹/۷	G <sub>0.2</sub> N <sub>2</sub>	۷	
۳۱۲/۷	۳۸۷/۰	۳۹۱/۷	G <sub>0.2</sub> N <sub>3</sub>	۸	
۵۶۰/۷	۵۰۵/۷	۴۴۹/۰	G <sub>0.4</sub> N <sub>0</sub>	۹	C
۵۶۸/۰	۵۵۲/۳	۴۸۴/۷	G <sub>0.4</sub> N <sub>1</sub>	۱۰	
۴۴۶/۳	۴۷۱/۳	۴۰۲/۳	G <sub>0.4</sub> N <sub>2</sub>	۱۱	
۲۸۸/۳	۳۸۷/۰	۳۴۷/۰	G <sub>0.4</sub> N <sub>3</sub>	۱۲	
۵۶۶/۷	۵۶۴/۰	۴۵۸/۳	G <sub>0.6</sub> N <sub>0</sub>	۱۳	D
۵۹۸/۳	۵۷۸/۰	۵۳۹/۰	G <sub>0.6</sub> N <sub>1</sub>	۱۴	
۴۸۴/۷	۴۸۹/۰	۴۶۱/۷	G <sub>0.6</sub> N <sub>2</sub>	۱۵	
۱۶۹/۷	۲۱۳/۷	۱۹۴/۰	G <sub>0.6</sub> N <sub>3</sub>	۱۶	

جدول ۶- مقاومت فشاری نمونه‌های بتن شاهد

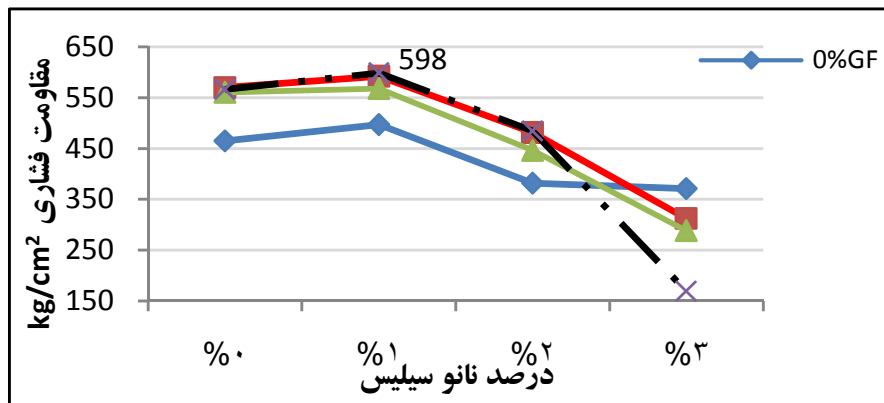
$f'_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f'_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f'_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	نام‌گذاری طرح	شماره نمونه	روزه
۷۴ روزه	۵۶ روزه	۲۸ روزه			
۷۴ روزه	۵۶ روزه	۲۸ روزه	G <sub>0</sub> N <sub>0</sub>	۱	A
۵۸۴/۰	۵۴۳/۰	۴۴۲/۰	G <sub>0</sub> N <sub>1</sub>	۲	
۶۵۷/۰	۶۳۸/۰	۴۶۴/۳	G <sub>0</sub> N <sub>2</sub>	۳	
۶۰۴/۰	۵۸۰/۰	۴۵۶/۷	G <sub>0</sub> N <sub>3</sub>	۴	
۴۹۷/۰	۴۵۴/۳	۳۹۲/۳	G <sub>0.2</sub> N <sub>0</sub>	۵	B
۶۵۷/۰	۶۴۱/۷	۵۱۷/۳	G <sub>0.2</sub> N <sub>1</sub>	۶	
۷۰۹/۳	۶۸۵/۳	۵۷۵/۷	G <sub>0.2</sub> N <sub>2</sub>	۷	
۶۱۵/۰	۵۹۷/۷	۵۷۸/۷	G <sub>0.2</sub> N <sub>3</sub>	۸	
۵۷۹/۰	۴۷۰/۷	۴۱۱/۰	G <sub>0.4</sub> N <sub>0</sub>	۹	C
۶۵۷/۰	۶۲۳/۰	۵۱۶/۳	G <sub>0.4</sub> N <sub>1</sub>	۱۰	
۶۸۴/۰	۶۷۲/۷	۶۰۱/۷	G <sub>0.4</sub> N <sub>2</sub>	۱۱	
۵۶۶/۰	۵۳۲/۳	۴۹۳/۳	G <sub>0.4</sub> N <sub>3</sub>	۱۲	
۵۰۹/۷	۴۸۳/۷	۴۲۷/۰	G <sub>0.6</sub> N <sub>0</sub>	۱۳	D
۶۸۲/۳	۶۷۱/۳	۵۲۸/۰	G <sub>0.6</sub> N <sub>1</sub>	۱۴	
۷۱۸/۳	۶۹۳/۰	۵۷۶/۳	G <sub>0.6</sub> N <sub>2</sub>	۱۵	
۵۹۲/۰	۵۳۲/۳	۴۹۷/۳	G <sub>0.6</sub> N <sub>3</sub>	۱۶	

در برابر ۱۵۰ سیکل ذوب وانجماد از خود نشان داده است. همچنین شکل (۵) نشان می‌دهد که در بتن شاهد به کارگیری یک درصد نانوسیلیس و ۰/۶ درصد الیاف شیشه‌ای جایگزین سیمان بیشترین مقاومت فشاری را در بین ۱۶ نوع طرح اختلاط به خود اختصاص داده است. با توجه به اشکال (۶) و (۷)، در نمونه‌های حاوی ۱ درصد نانوسیلیس افزایش قابل توجه در درصد تغییرات مقاومت فشاری نسبت به نمونه مرجع (بدون نانو و بدون الیاف)، و به ازای سه درصد نانوسیلیس کاهش بسیار زیاد در درصد تغییرات مقاومت فشاری ملاحظه می‌شود [۱۷، ۱۸] و بر حسب تغییر در میزان الیاف، نمونه‌های شاهد حاوی الیاف و بدون نانوسیلیس مقدار افزایش مقاومت فشاری چشمگیر است. در اکثر حالت‌ها مواقعی که مقدار الیاف رو به افزایش نهاده است، مقدار مقاومت با شدت خوبی افزایش یافته است؛ به خصوص زمانی که مقدار نانوسیلیس یک درصد و الیاف شیشه‌ای ۰/۶ درصد است.

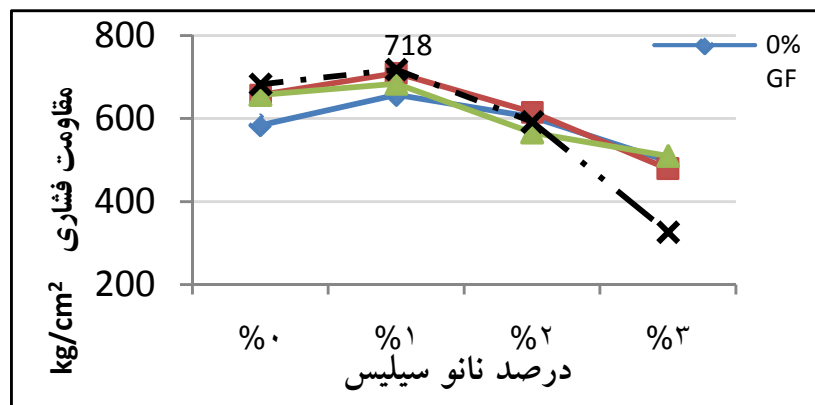
جدول (۶) نیز نتایج آزمایش مقاومت فشاری بتن شاهد در سنین ۲۸، ۵۶ و ۷۴ روز (هم‌زمان با اتمام سیکل‌های انجماد و ذوب ۴۵، ۱۰۰، ۱۵۰) حاصل از میانگین سه آزمایش را نشان می‌دهد.

### ۳-۱- تأثیر نانوسیلیس و الیاف جایگزین سیمان بر مقاومت فشاری بتن در معرض سیکل‌های انجماد و ذوب

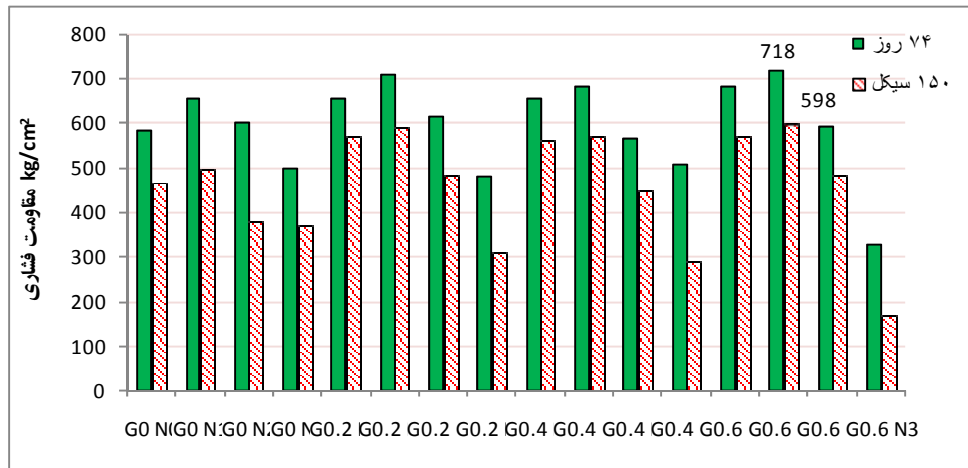
با تنظیم شکل (۳)، اثر درصد نانوسیلیس و الیاف شیشه‌ای جایگزین سیمان بر مقاومت فشاری بتن در حین یخبندان مورد بررسی قرار گرفت. همچنین جهت مقایسه اثر نانوسیلیس و الیاف شیشه‌ای بر مقاومت فشاری بتن هنگامی که بتن تحت سیکل‌های یخبندان نباشد (بتن شاهد)، شکل (۵) نمونه شاهد ۷۴ روز (هم‌زمان با اتمام ۱۵۰ سیکل) مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به شکل (۴)، در بین ۱۶ نمونه طرح اختلاط، نمونه حاوی یک درصد نانوسیلیس به همراه ۰/۶ درصد الیاف شیشه‌ای جایگزین سیمان، بیشترین رشد را در مقاومت فشاری نهایی بتن



شکل ۳- مقاومت فشاری بتن با درصدهای مختلف نانوسیلیس و الیاف شیشه‌ای بعد از ۱۵۰ سیکل



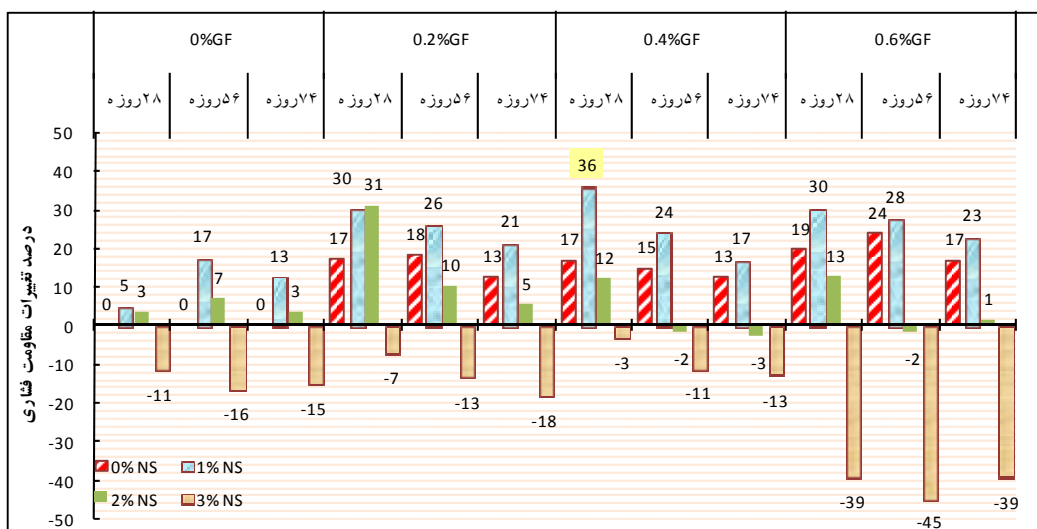
شکل ۴- مقاومت فشاری بتن نمونه شاهد با درصدهای مختلف نانوسیلیس و الیاف شیشه‌ای بعد از ۷۴ روز



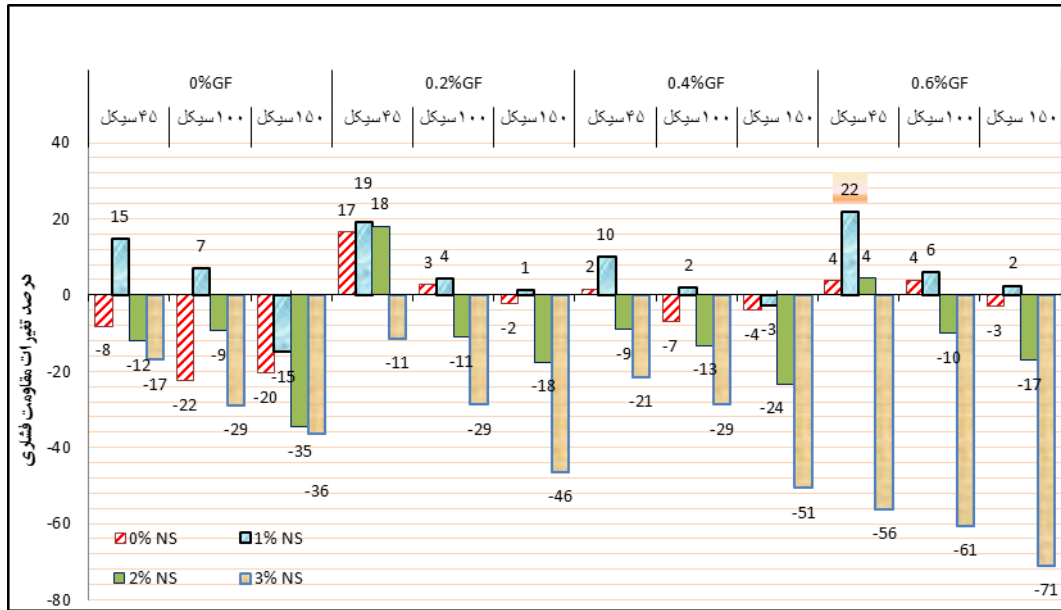
شکل ۵- مقایسه افت مقاومت فشاری نمونه ی ۱۵۰سیکل همزمان با نمونه شاهد ۷۴ روزه برای ۱۶ طرح اختلاط

که نانوسیلیس کم است، این عیب را فوق روان کننده اصلاح می کند. ولی وقتی مقدار نانوسیلیس بیشتر می شود، این نقیصه فقط با افزودن فوق روان کننده اصلاح نخواهد شد و باید از روش های دیگر مثل افزودن آب به مخلوط بتن استفاده کرد. نتیجه دیگری که از شکل های (۶) و (۷) می توان گرفت تأثیر زیاد نانوسیلیس در کوتاه مدت می باشد. به طوری که مقاومت فشاری نمونه یک درصد نانو با ۰/۴ درصد الیاف شیشه ای در ۲۸ روز، ۳۶ درصد بیشتر از نمونه معمولی می باشد. این حالت در ۵۶ روز، ۲۴ درصد و در ۷۴ روز، ۱۷ درصد ملاحظه می شود. همچنین با توجه به شکل (۴)، بتن ساخته شده با یک درصد نانو به همراه ۰/۶ درصد الیاف شیشه ای در ۷۴ روز با مقاومت فشاری ۷۱۸ (کیلوگرم بر سانتی متر مربع) بیشترین مقاومت فشاری را ایجاد نموده است.

علت اصلی این امر، خاصیت پوزولانی نانوسیلیس بوده که با پر کردن فاصله موجود بین دانه های معدنی در حد بسیار کوچک، با کریستال های هیدرات کلسیم که در ناحیه بین دانه ای قرار دارند، واکنش داده و ژل C-H-S تولید می کند. همچنین پخش مناسب الیاف شیشه ای نیز می تواند یکی از علل مؤثر باشد. با توجه به روند آزمایش مقاومت فشاری و نتایج آن انتظار می رود با افزایش الیاف شیشه ای به مقدار بیش از ۰/۶ درصد باز هم مقاومت فشاری افزایش یابد. ولی در نسبت های بالاتر از ۱ درصد نانوسیلیس، سرعت افزایش مقاومت فشاری کمتر شده است. علت این امر به فعالیت پوزولانی نانوسیلیس مربوط می شود. هر چقدر مقدار نانوسیلیس بیشتر می شود، مقداری از نانوسیلیس همانند سیمان رفتار کرده و مخلوط نیازمند آب بیشتری خواهد بود که باید به نحوی این عیب در مخلوط رفع شود. در مواردی



شکل ۶- درصد تغییرات مقاومت فشاری نمونه های شاهد به ازای دردهای مختلف نانوسیلیس و الیاف شیشه ای



شکل ۷- درصد تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های سیکل‌دار به ازای درصدهای مختلف نانوسیلیس و الیاف شیشه‌ای

### ۳-۲- تأثیر تعداد سیکل‌های ذوب و انجماد بر مقاومت فشاری بتن در معرض یخبندان

جدول (۷) افت متوسط مقاومت فشاری بتن را بعد از ۴۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ سیکل ذوب و انجماد ارائه می‌دهد. جهت بررسی رشد مقاومت فشاری بتن شاهد (که تحت اثر یخبندان قرار نمی‌گیرد)، در اثر گذشت زمان، جدول (۸) ارائه شده است. آنچه از این دو جدول استنباط می‌شود، این است که عمل ذوب و انجماد نه تنها مانع از رشد مقاومت فشاری بتن در طول زمان می‌گردد، بلکه سبب افت مقاومت فشاری بتن نیز می‌شود. همچنین با افزایش نانوسیلیس پودری از ۱ درصد به سه درصد، تأثیر تعداد سیکل‌های انجماد و ذوب متوالی در افت مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. با توجه به جدول (۷) کمترین افت مقاومت فشاری در برابر تعداد سیکل انجماد و ذوب متوالی، به وضعیتی مربوط می‌شود که در آن یک درصد نانوسیلیس حاوی ۰/۴ درصد الیاف شیشه‌ای جایگزین سیمان می‌شود.  $f_c'$  معرف مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌باشد.

### جدول ۷- تأثیر تعداد سیکل‌های ذوب و انجماد متوالی بر مقاومت فشاری نمونه‌ها

$f_c'_{150}$	$f_c'_{100}$	$f_c'_{45}$	نام‌گذاری طرح	تعداد سیکل ذوب و انجماد	گروه
۱/۱۵	۱/۱۰	۱/۰۴	$G_0 N_0$	۱	A
۰/۹۸	۰/۸۵	۱/۱۵	$G_0 N_1$	۲	
۰/۹۸	۰/۷۷	۱/۲۷	$G_0 N_2$	۳	
۱/۰۱	۰/۹۶	۱/۰۵	$G_0 N_3$	۴	
۱/۱۱	۱/۰۲	۱/۰۸	$G_{0.2} N_0$	۵	B
۱/۱۳	۱/۰۵	۱/۰۸	$G_{0.2} N_1$	۶	
۰/۹۳	۱/۰۰	۰/۹۳	$G_{0.2} N_2$	۷	
۰/۸۰	۰/۸۱	۰/۹۹	$G_{0.2} N_3$	۸	
۱/۱۷	۱/۱۱	۱/۱۳	$G_{0.4} N_0$	۹	C
۱/۲۵	۱/۰۳	۱/۱۴	$G_{0.4} N_1$	۱۰	
۱/۱۱	۰/۹۵	۱/۱۷	$G_{0.4} N_2$	۱۱	
۰/۸۳	۰/۷۵	۱/۱۲	$G_{0.4} N_3$	۱۲	
۱/۲۴	۱/۰۰	۱/۲۳	$G_{0.6} N_0$	۱۳	D
۱/۱۱	۱/۰۴	۱/۰۷	$G_{0.6} N_1$	۱۴	
۱/۰۵	۰/۹۹	۱/۰۶	$G_{0.6} N_2$	۱۵	
۰/۸۷	۰/۷۹	۱/۱۰	$G_{0.6} N_3$	۱۶	

جدول ۸- رشد مقاومت فشاری نمونه شاهد در طول زمان

$f_c'$	$f_c'$	$f_c'$	نام‌گذاری طرح	روز	گروه
$f_c'_{74}$	$f_c'_{74}$	$f_c'_{56}$			
$f_c'_{28}$	$f_c'_{56}$	$f_c'_{28}$			
۱/۳۲	۱/۰۸	۱/۲۳	G <sub>0</sub> N <sub>0</sub>	۱	A
۱/۴۱	۱/۰۳	۱/۳۷	G <sub>0</sub> N <sub>1</sub>	۲	
۱/۳۲	۱/۰۴	۱/۲۷	G <sub>0</sub> N <sub>2</sub>	۳	
۱/۲۷	۱/۰۹	۱/۱۶	G <sub>0</sub> N <sub>3</sub>	۴	
۱/۲۷	۱/۰۲	۱/۲۴	G <sub>0.2</sub> N <sub>0</sub>	۵	B
۱/۲۳	۱/۰۴	۱/۱۹	G <sub>0.2</sub> N <sub>1</sub>	۶	
۱/۰۶	۱/۰۳	۱/۰۳	G <sub>0.2</sub> N <sub>2</sub>	۷	
۱/۱۷	۱/۰۲	۱/۱۵	G <sub>0.2</sub> N <sub>3</sub>	۸	
۱/۲۷	۱/۰۵	۱/۲۱	G <sub>0.4</sub> N <sub>0</sub>	۹	C
۱/۱۴	۱/۰۲	۱/۱۲	G <sub>0.4</sub> N <sub>1</sub>	۱۰	
۱/۱۵	۱/۰۶	۱/۰۸	G <sub>0.4</sub> N <sub>2</sub>	۱۱	
۱/۱۹	۱/۰۵	۱/۱۳	G <sub>0.4</sub> N <sub>3</sub>	۱۲	
۱/۲۹	۱/۰۲	۱/۲۷	G <sub>0.6</sub> N <sub>0</sub>	۱۳	D
۱/۲۵	۱/۰۴	۱/۲۰	G <sub>0.6</sub> N <sub>1</sub>	۱۴	
۱/۱۹	۱/۱۱	۱/۰۷	G <sub>0.6</sub> N <sub>2</sub>	۱۵	
۱/۲۰	۱/۰۹	۱/۱۰	G <sub>0.6</sub> N <sub>3</sub>	۱۶	

اختلاط ۳ درصد نانوسیلیس با ۰/۴ درصد الیاف شیشه‌ای رخ داده است که برابر ۳۹-، ۴۵- و ۳۹- درصد در مقاومت ۲۸، ۵۶ و ۷۴ روزه می‌باشد. همچنین برای نمونه سیکل‌دار بیشترین کاهش در مقاومت فشاری در طرح اختلاط ۳ درصد نانوسیلیس با ۰/۶ درصد الیاف شیشه‌ای با ۵۶-، ۶۱- و ۷۱- درصد برای ۴۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ سیکل برای نمونه‌های در معرض سیکل‌های ذوب و انجماد می‌باشد.

۵- به طور کلی با افزایش درصد نانوسیلیس پودری از ۱ درصد به ۳ درصد، در نمونه‌های شاهد و در نمونه‌های سیکل‌دار کاهش مقاومت با شیب تند ملاحظه می‌شود. بنابر این توصیه می‌شود از مصرف بیش از ۱ درصد نانوسیلیس پودری در بتن پرهیز گردد.

#### ۵- مراجع

- [1] Manso, M. J., Gonzalez, J. J., Polanco, A. J., "Electric-Arc Furnace Slag in Concrete" Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 2004, 639-645.
- [2] Mindess, S., Young, J. F., Darwin, D., "Concrete", 2nd Edition, Pearson Education, New Jersey, US, 2003.
- [3] Aitcin, P. C., "Cements of Yesterday and Today, Concrete of Tomorrow", Cement and Concrete Research, 2000, 30, 1349-1359.
- [4] Bhuvaneshwari, B., Sasmal, S., Baskaran, T., Nagesh R. I., "Role of Nano Oxides for Improving Cementitious Building Materials", Journal of Civil Engineering and Science, 2012, 1, 52-58.
- [5] Behfarnia, K., Keivan, A., "The Effects of TiO<sub>2</sub> and ZnO Nano Particles on Physical and Mechanical Properties of Normal Concrete", Asian Journal of Civil Engineering (BHRC), 2013, 14, 517-53.
- [6] Li, H., Xiao, H. G., Ou, J. P., "A Study on Mechanical and Pressure-Sensitive Properties of Cement Mortar with Nanophase Materials", Cement and Concrete Research, 2004, 34, 435-438.
- [7] Nazari, A., Riahi, S., "Effects of CuO Nanoparticles on Compressive Strength of Self-Compacting Concrete", Indian Academy of Sciences, 2011, 36, 371-391.
- [8] Quing, Y., Zenen, Z., Deyu, K., Rongshen, C., "Influence of Nano-SiO<sub>2</sub> Addition on Properties of Hardened Cement Paste as Compared with Silica Fume", Construction and Building Materials, 2007, 21, 539-545.
- [9] Li, H. Xiao, H., Yuan, J., Ou, J., "Microstructure of Cement Mortar with Nano-

#### ۴- نتیجه‌گیری

از بررسی‌های انجام شده در این مطالعه، نتایج زیر قابل استنتاج هستند:

۱- مهم‌ترین مشکل کار کردن با بتن مسلح به الیاف شیشه‌ای، پایین آمدن کارایی بتن است که برای فائق آمدن بر آن باید از فوق روان‌کننده با کیفیت مناسب استفاده نمود و همچنین برای پخش مناسب و یکنواخت الیاف و ضمناً برای جلوگیری و به حداقل رساندن پدیده گلوله‌ای شدن الیاف تدابیر مناسب اتخاذ کرد.

۲- مقاومت فشاری بتن با نانوسیلیس پودری و الیاف شیشه‌ای از افزایش قابل ملاحظه‌ای نسبت به بتن معمولی برخوردار بوده و همچنین سرعت افزایش در ۲۸ روز اول بیشتر است.

۳- بیشترین افزایش در مقاومت فشاری در طرح اختلاط ۱ درصد نانو ۰/۶ درصد الیاف شیشه‌ای رخ داده است که برابر ۳۰، ۲۸ و ۲۳ درصد در مقاومت فشاری ۲۸، ۵۶ و ۷۴ روزه برای نمونه‌های شاهد و ۲۲، ۶ و ۲ درصد در مقاومت فشاری ۴۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ سیکل برای نمونه‌های در معرض سیکل‌های ذوب و انجماد می‌باشد.

۴- بیشترین کاهش در مقاومت فشاری نمونه شاهد در طرح



- Particles", Composites: Part B, 2004, 35, 185-189.
- [10] Jo, B. W., Kim, C. H., Tae, G., Park, J. B., "Characteristics of Cement Mortar with Nano-SiO<sub>2</sub> Particles", Construction and Building Materials, 2007, 2, 1351-1355.
- [11] Ji, T., "Preliminary Study and the Water Permeability and Micro Structure of Concrete Incorporating Nano-SiO<sub>2</sub>", Cement and Concrete Research, 2005, 35, 1943-1947.
- [12] Madej, J., "Properties of GFRC Mortars with Different Pozzolanic Additives," the 4<sup>th</sup> RILEM International Symposium, Sheffield, UK, 1992, pp 114-125.
- [13] ACI Committee 211, "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal Heavy Weight and Mass Concrete", ACI 211.1-91, ACI Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute, US, 2000.
- [14] American Society for Testing and Materials, "Air Content of Freshly Mixed Concrete by Pressure Method", ASTM C231-9, ASTM Standard for Concrete and Mineral Aggregate, V. 04.02, Standard Designation, C231-97, US, 1997.
- [15] American Society for Testing and Materials, "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory", ASTM C192-95, ASTM Standard for Concrete and Mineral Aggregate, V. 04.02, Standard Designation, US, 1997.
- [16] ASTM C666, "Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing", ASTM Standard for Concrete and Mineral Aggregate, US, 2003.
- [۱۷] شریبانی چیانه، م.، "بررسی تأثیر نانوسیلیس بر خواص مکانیکی بتن غلتکی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، ۱۳۹۱.
- [۱۸] عبادی، ر.، "بررسی تأثیر نانوسیلیس بر خواص مقاومتی بتن سبک حاوی سبکدانه‌های لیکا و الیاف پروپیلن"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، ۱۳۹۱.

**EXTENDED ABSTRACT**

## **Investigation of Nano-silica Effect on Compressive Strength of Concrete Containing Glass Fiber Subjected to Freeze and Thaw Cycles**

Yaghoub Mohammadi\*, Mirisлам Nouri Sadat

*Department of Civil Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil 5619911367, Iran*

**Received:** 29 July 2013; **Accepted:** 13 March 2015

---

**Keywords:**

Compressive strength, Nano-silica, Freeze and thaw cycles, Glass fiber

---

### **1. Introduction**

One of the major destruction of concrete in cold region is due to freeze and thaw cycles. Resistance to freeze and thaw cycles depends on high stress in concrete particularly when water in the pores of aggregates freezes. This leads to a volume change and resulting in more cracks in concrete and loss of durability. Nano-silica in the mix not only activates pozzolanic reaction but also acts as filler which in turn improves micro-structure of concrete paste. Use of glass fiber can help to bridge the gap initiated due to frost action [1]. In this study the effect of different replacement percentages of nano-silica with cement and fiber glass, and the number of freeze and thaw cycles on concrete strength was evaluated.

### **2. Materials and Method**

In preparing samples, coarse and fine aggregates with a maximum size of 12.5 mm 4.75 mm respectively were used in accordance to ASTM C-33-84 [2]. Pozzolanic cement and glass fiber with diameter of 0.02 micron and 12 mm in length were introduced into mixer. For workability purpose, a super plasticizer was applied to fresh concrete.

#### *2.1. Preparing & curing*

Design of mixes was based on ACI 211 [3] with different percentages of nano-silica 0, 1, 2 and 3 and fibers 0, 0.2, 0.4 and 0.6 percent by cement weight. The samples were tested for three cycles of 45, 100 and 150. A total of 17 mix designs with 18 test specimens for each mix were casted for experiment.

#### *2.2. Experimental program*

Compressive strength tests were done on 100 mm cube loaded at a rate of 2.5 kN/s in conformance with ASTM C330.

### **3. Results and discussion**

Loss of compressive strength was used as done an index for the evaluation of nano-silica and glass fibers replacing cement in addition to number of freeze and thaw cycles. Compressive strength of concrete (average of 3 specimen) for 45, 100 and 150 freeze and thaw cycles are presented in Table 1. Compressive strength of control specimens at 28, 56 and 74 days (simultaneous to 45,100, 150 freeze and thaw) are listed in Table 2.

---

\* Corresponding Author

*E-mail addresses:* yaghoubm@uma.ac.ir (Yaghoub Mohammadi), Mins.civil@gmail.com (Mirisлам Nouri Sadat).

**Table 1.** Compressive strength of samples in freeze and thaw cycles

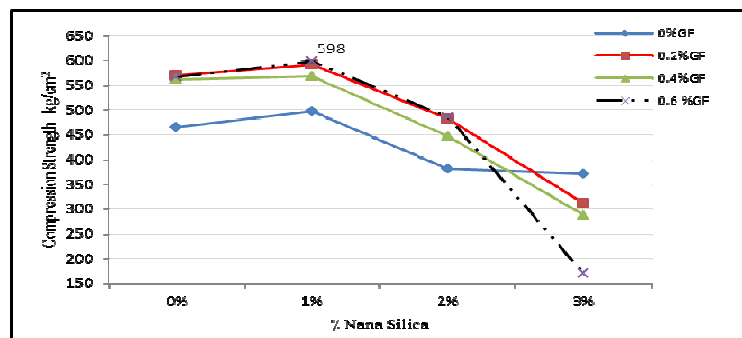
Group	Mix Number	Sample Name	$f'_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f'_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f'_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )
			45 cycles, 28 Days	100cycles, 56 Days	150 cycles, 74 Days
A	1	G <sub>0</sub> N <sub>0</sub>	406.0	421.0	465.0
	2	G <sub>0</sub> N <sub>1</sub>	506.7	581.3	497.0
	3	G <sub>0</sub> N <sub>2</sub>	389.0	493.0	381.7
	4	G <sub>0</sub> N <sub>3</sub>	367.0	386.0	371.0
	5	G <sub>0.2</sub> N <sub>0</sub>	515.0	558.0	570.3
B	6	G <sub>0.2</sub> N <sub>1</sub>	526.0	566.0	592.0
	7	G <sub>0.2</sub> N <sub>2</sub>	519.7	483.0	481.3
	8	G <sub>0.2</sub> N <sub>3</sub>	391.7	387.0	312.7
C	9	G <sub>0.4</sub> N <sub>0</sub>	449.0	505.7	560.7
	10	G <sub>0.4</sub> N <sub>1</sub>	484.7	552.3	568.0
	11	G <sub>0.4</sub> N <sub>2</sub>	402.3	471.3	446.3
	12	G <sub>0.4</sub> N <sub>3</sub>	347.0	387.0	288.3
D	13	G <sub>0.6</sub> N <sub>0</sub>	458.3	564.0	566.7
	14	G <sub>0.6</sub> N <sub>1</sub>	539.0	578.0	598.3
	15	G <sub>0.6</sub> N <sub>2</sub>	461.7	489.0	484.7
	16	G <sub>0.6</sub> N <sub>3</sub>	194.0	213.7	169.7

**Table 2.** Compressive strength of samples in different days

Group	Mix Number	Sample Name	$f'_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f'_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f'_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )
			28 Days	56 Days	74 Days
A	1	G <sub>0</sub> N <sub>0</sub>	442.0	543.0	584.0
	2	G <sub>0</sub> N <sub>1</sub>	464.3	638.0	657.0
	3	G <sub>0</sub> N <sub>2</sub>	456.7	580.0	604.0
	4	G <sub>0</sub> N <sub>3</sub>	392.3	454.3	497.0
	5	G <sub>0.2</sub> N <sub>0</sub>	517.3	641.7	657.0
B	6	G <sub>0.2</sub> N <sub>1</sub>	575.7	685.3	709.3
	7	G <sub>0.2</sub> N <sub>2</sub>	578.7	597.7	615.0
	8	G <sub>0.2</sub> N <sub>3</sub>	411.0	470.7	479.0
C	9	G <sub>0.4</sub> N <sub>0</sub>	516.3	623.0	657.0
	10	G <sub>0.4</sub> N <sub>1</sub>	601.7	672.7	684.0
	11	G <sub>0.4</sub> N <sub>2</sub>	493.3	532.3	566.0
	12	G <sub>0.4</sub> N <sub>3</sub>	427.0	483.7	509.7
D	13	G <sub>0.6</sub> N <sub>0</sub>	528.0	671.3	682.3
	14	G <sub>0.6</sub> N <sub>1</sub>	576.3	693.0	718.3
	15	G <sub>0.6</sub> N <sub>2</sub>	497.3	532.3	592.0
	16	G <sub>0.6</sub> N <sub>3</sub>	271.2	299.0	326.0

### 3.1. Effect of nano-silica and fiber

Fig. 1 contains nano-silica and fiber effects on concrete compressive strength. Control concrete specimens cured in water for 74 days (simultaneous with 150 freeze and thaw cycles) showed that 1% nano-silica with 0.6% fiber resulted in highest strength among all mixes (718kg/cm<sup>2</sup>) as well as in 150 freezes and thaw cycles (599 kg/cm<sup>2</sup>). The high strength in the mix can be attributed to pozzolance properties of nano-silica and its filling property caused by chemically produced C-S-H gel. Higher percentage pf nano-silica leads to lower strength as a result of low hydration reaction.



**Fig. 1.** Compressive strength of concrete with different percentage of nano-silica and glass fiber in 150 cycles

### 3.2. Effect of freeze and thaw

Loss of compressive strength resulting from increase in freeze and thaw cycles is tabulated in table 3. Number 69 mixes without nano-silica and 0.4% fiber has gained higher strength rate for 100 and 150 cycles as compared to 45 cycles.

**Table 3.** Compressive strength ratio of samples in different freeze and thaw cycles

Group	Mix Number	Sample Name	$f'_{c100} / f'_{c45}$	$f'_{c150} / f'_{c100}$	$f'_{c150} / f'_{c45}$
A	1	G <sub>0</sub> N <sub>0</sub>	1.04	1.10	1.15
	2	G <sub>0</sub> N <sub>1</sub>	1.15	0.85	0.98
	3	G <sub>0</sub> N <sub>2</sub>	1.27	0.77	0.98
	4	G <sub>0</sub> N <sub>3</sub>	1.05	0.96	1.01
	5	G <sub>0.2</sub> N <sub>0</sub>	1.08	1.02	1.11
B	6	G <sub>0.2</sub> N <sub>1</sub>	1.08	1.05	1.13
	7	G <sub>0.2</sub> N <sub>2</sub>	0.93	1.00	0.93
	8	G <sub>0.2</sub> N <sub>3</sub>	0.99	0.81	0.80
	9	G <sub>0.4</sub> N <sub>0</sub>	1.13	1.11	1.17
C	10	G <sub>0.4</sub> N <sub>1</sub>	1.14	1.03	1.25
	11	G <sub>0.4</sub> N <sub>2</sub>	1.17	0.95	1.11
	12	G <sub>0.4</sub> N <sub>3</sub>	1.12	0.75	0.83
	13	G <sub>0.6</sub> N <sub>0</sub>	1.23	1.00	1.24
D	14	G <sub>0.6</sub> N <sub>1</sub>	1.07	1.04	1.11
	15	G <sub>0.6</sub> N <sub>2</sub>	1.06	0.99	1.05
	16	G <sub>0.6</sub> N <sub>3</sub>	1.10	0.79	0.87

## 4. Conclusions

The most significant results can be deduced from the present study are as follows:

1. Use of fiber requires super plasticizer for both workability purposes and preventing its accumulation.
2. Highest strength was resulted for 1% nano-silica and 0.6% glass fiber.
3. The increase of nano-silica percentage from 1% to 3% results in the reduction of strength at a fast pace in both normally cured and freeze-and-thaw exposed specimens.

## 5. References

- [1] Manso, M. J., Gonzalez, J. J., Polanco, A. J., "Electric-Arc Furnace Slag in Concrete" Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 2004, 16, 639-645.
- [2] Bhuvaneshwari, B., Sasmal, S., Baskaran, T., Nagesh R. I., "Role of Nano Oxides for Improving Cementitious Building Materials", Journal of Civil Engineering and Science, 2012, 1, 52-58.
- [3] ACI Committee 211, "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal Heavy Weight and Mass Concrete", ACI 211.1-91, ACI Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute, US, 2000.