

## Experimental investigation on mechanical and water transport properties of cement composites containing graphene oxide

Mahna Safarkhani<sup>1</sup>, Mahmood Naderi<sup>\*2</sup>

1- Ph.D. Student in Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, International Imam Khomeini University, Qazvin, Iran

2- Professor, Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, International Imam Khomeini University, Qazvin, Iran

### ABSTRACT

Recent investigations show that graphene oxide nanoparticles (GO) are promising nano-sized additives to enhance the mechanical property of cementitious materials. GO are the product of chemical exfoliation of graphite and contain a range of reactive oxygen functional groups that enable it as a suitable candidate for reaction in cementitious materials through physical functionalization. In this paper, the experimental program is performed to study the mechanical and water transport properties of GO-reinforced cement composites. Experimental results show, adding GO improved the tensile, flexural, and compressive strengths of mortar with the increase in flexural and tensile strength more than that of compressive strength. Especially, the tensile and flexural strength, when the content of GO was 0.05% bwoc, the cement mortar exhibited remarkable increase by 70% and 22% respectively, comparing with those without GO. Particularly, the compressive strength of concrete incorporating 0.1% by weight of cement GO increased by 25% and 50% than those of concrete without GO after curing for 28 days and 90 days respectively. The strengths enhancement can be attributed to the promotion of hydration and the finer pore structure of cement paste incorporating GO. There are thresholds for all mechanical strengths of cement mortar incorporating GO where the GO content exceeds the threshold, the decrease in strength is observed which can be attributed to the deformation of the hydration crystals by the change in the dosage of GO in the matrix. Penetration test results indicate that the incorporation of a very low fraction of GO can effectively hinder the ingress of water molecules. It can be concluded that adding GO improve the transport properties of concrete which subsequently improves its durability.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 14 July 2020

**Revise Date:** 17 August 2020

**Accept Date:** 04 October 2020

### Keywords:

Graphene oxide  
Nano particles  
Mechanical properties  
Concrete  
Mortar  
Penetration

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.239533.2191>

\*Corresponding author: Mahmood Naderi

Email address: Profmahmoodnaderi@eng.ikiu.ac.ir

## مطالعه آزمایشگاهی تأثیر نانو ذرات گرافن اکساید بر روی رفتار مکانیکی کامپوزیت- های سیمانی و مشخصه‌های انتقال آب در بتن

مهنا صفرخانی<sup>۱</sup>، محمود نادری<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۲-استاد، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

### چکیده

در این مطالعه، یک برنامه آزمایشگاهی به منظور بررسی تأثیر گرافن اکساید (GO) بر روی رفتار مکانیکی ماتریس‌های سیمانی و همچنین نفوذپذیری بتن تدوین شده است. نانو ذرات گرافن به دلیل مساحت سطح بالا و دانسیته پایین در کمترین مقدار می‌توانند تأثیر چشمگیری در خواص بتن داشته باشند. این نانو صفحات ساختار صفحه‌ای دارند که هیدروفوب است و آب به دلیل تمایل نداشتن به سطح گرافن در آن جاری نمی‌شود. با عاملدار کردن این نانوذره می‌توان خواص آبگریزی را به خواص آبدوستی تبدیل کرد. در این پژوهش نمونه‌های ملات سیمان ۲۸ روزه با درصدهای متفاوت گرافن اکساید (از ۰٪ تا ۰/۲٪ وزنی سیمان (bwoc)) تحت آزمایش‌های کشش، فشار و خمش، نمونه‌های خمیره سیمان ۲۸ روزه با درصدهای گرافن اکساید bwoc (۰-۰/۵)٪ تحت آزمایش‌های کشش و فشار، نمونه‌های بتن ۲۸ و ۹۰ روزه با درصدهای گرافن اکساید bwoc (۰-۰/۲)٪ تحت آزمایش فشار و نمونه‌های ۲۸ روزه بتن با درصدهای گرافن اکساید bwoc (۰-۰/۲)٪ تحت آزمایش نفوذپذیری با استفاده از دستگاه "محفظه استوانه‌ای" قرار گرفتند. مطالعات نشان می‌دهد که گرافن اکساید باعث بهبود رفتار کششی، خمشی و فشاری ملات سیمان می‌شود به طوری که افزایش در مقاومت‌های خمشی و کششی بیش تر از مقاومت فشاری است. در نمونه‌های ملات مسلح با bwoc ۰/۵٪ گرافن اکساید افزایش در مقاومت کششی ۷۰٪ و در مقاومت خمشی ۲۲٪ مشاهده شد. نمونه‌های خمیره سیمان با bwoc ۰/۳٪ گرافن اکساید هم افزایش ۴۳٪ در مقاومت فشاری و ۵۲٪ در مقاومت کششی را نشان دادند. همچنین اندازه‌گیری مقاومت فشاری بتن نشان داد با افزودن bwoc ۰/۱٪ گرافن اکساید به بتن، مقاومت فشاری ۲۸ روزه تا ۲۵٪ و ۹۰ روزه تا ۵۰٪ افزایش می‌یابد. نتایج آزمایش نفوذپذیری نشان می‌دهد که افزودن گرافن اکساید به بتن می‌تواند به طور مؤثری از نفوذ بیشتر آب به داخل بتن جلوگیری کرده و باعث بهبود دوام بتن شود.

کلمات کلیدی: گرافن اکساید، بتن، نانوذرات، مقاومت فشاری، نفوذپذیری، محفظه استوانه‌ای.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.239533.2191">https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.239533.2191</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2020.239533.2191	۱۴۰۰/۰۹/۳۰	۱۳۹۹/۰۷/۱۳	۱۳۹۹/۰۷/۱۳	۱۳۹۹/۰۵/۲۷	۱۳۹۹/۰۴/۲۴
محمود نادری					*نویسنده مسئول:	
Profm Mahmoodnaderi@eng.ikiu.ac.ir					پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

امروزه بتن به صورت گسترده‌ای در مهندسی عمران به کار گرفته می‌شود. یکی از ضعف‌های بتن پایین بودن مقاومت کششی و ظرفیت کرنشی آن است. امروزه با مسلح کردن کامپوزیت‌های سیمانی با موادی از قبیل آرماتورهای فولادی [۱]، فیبرهای فولادی<sup>۱</sup> [۲]، فیبرهای کربنی<sup>۲</sup> [۳]، فیبرهای پلیمری<sup>۳</sup> [۴-۷] و همچنین فیبرهای معدنی<sup>۴</sup> [۸، ۹] می‌توان مقاومت و ظرفیت کرنشی بتن را بالا برد. این متریکال باعث بهبود مقاومت شده ولی همچنان رفتار ترد و ترک‌های حاصله در ساختار وجود دارد. مطالعات مربوط به بتن مسلح به فیبر (FRC)<sup>۵</sup> از اوایل دهه‌ی ۶۰ میلادی شروع شده‌است. امروزه FRC برای کاربردهای خاص نظیر سازه‌های مقاوم در برابر زلزله و عرشه‌های پل [۱۰] استفاده می‌شود. FRCها باعث افزایش سختی و مقاومت کششی شده و منجر به کاهش ترک‌های بزرگ نیز می‌شوند. در چند سال اخیر، فناوری نوظهور نانو امیدهای بسیاری برای بهبود خواص مختلف در جهان پدید آورده‌است. این فناوری خواص مواد با اندازه دانه‌های در ابعاد ۱۰۰ نانومتر و چگونگی بکارگیری آن را مورد بحث قرار می‌دهد. از آنجایی که بسیاری از خواص بتن به عنوان یک ماده متخلخل از ساختارش در ابعاد نانو نشأت می‌گیرد، امیدهایی برای استفاده از نانو فناوری در بهبود خواص بتن وجود دارد و تحقیقاتی در این زمینه در کشورهای مختلف جهان در حال انجام است. همزمان با پیشرفت این تکنولوژی، نانو فیبرهایی با عملکرد فوق‌العاده، نظیر نانولوله‌های کربنی و ذرات گرافن اکساید تولید شده‌است که می‌توانند باعث بهبود عملکرد مواد بر پایه سیمانی در مقیاس نانو شوند.

در دهه‌های گذشته توجه زیادی به نانو ذرات گرافن اکساید با ضخامت یک اتم و ساختار دو بعدی بدلیل مساحت سطح بالا و مقاومت زیاد آن شده‌است [۱۱]. گرافن از مجموعه اتم‌های کربن سازمان‌یافته در شبکه‌های شش ضلعی با هیبریداسیون  $sp^2$  تشکیل شده- است [۱۲]. آزمایش‌های صورت پذیرفته گرافن را با مدول یانگ ۱ تراپاسکال به عنوان قوی‌ترین ماده معرفی می‌نماید [۱۳]. گرافن دارای ضرایب انتقال حرارت و الکتریسیته بالایی در راستای درون صفحه می‌باشد. این ویژگی سبب شده‌است این نانوذره به عنوان رسانای الکتریکی برای محیط‌های با حرارت بالا مناسب باشد [۱۴-۱۷]. یکی از دلایل مهم عدم استفاده گرافن در کامپوزیت‌های سیمانی، آبرگریز بودن گرافن بوده که باعث توزیع نامناسب گرافن در ساختار می‌گردد. خواص آبرگریزی گرافن به واسطه پروسه عاملدار کردن شیمیایی و یا پوشش فیزیکی این نانوذره می‌تواند به خواص آبدوستی تبدیل شود. عاملدار نمودن شیمیایی سطح و کناره گرافن از طریق برقراری پیوند کووالانسی بین اتم‌های کربن و گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار توسط فرایند سنتز ایجاد می‌شود. قرارگیری گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار مانند هیدروکسیل، اپوکسی و کربوکسیل بر روی صفحه‌ی گرافن، به شدت تمایل آبدوستی در گرافن ایجاد می‌نماید، اما این پیوندهای برقرار شده به دلیل شکستن ساختار اتمی گرافن باعث کاهش خواص مکانیکی در این نانوذره می‌شوند [۱۸].

نتایج اخیر نشان می‌دهد افزودن گرافن اکساید به سیمان می‌تواند در خواص مکانیکی و جلوگیری از انتشار ترک نقش مؤثری ایفا نماید. به عنوان مثال، حبیب نژاد و همکاران با هدف بررسی اثر تقویت‌کنندگی گرافن اکساید در خمیر سیمان، با افزودن گرافن اکساید به مقدار ۰/۰۵ درصد وزنی سیمان توانستند مقاومت فشاری را تا ۳۳ درصد و مقاومت خمشی را تا ۵۹ درصد افزایش دهند [۱۹]. هورزاروک<sup>۶</sup> و همکاران با افزودن گرافن اکساید به مقدار ۰/۰۳ درصد وزنی سیمان توانستند مدول یانگ سیمان را به طور چشم‌گیری افزایش دهند [۲۰]. لو<sup>۷</sup> و همکاران مقاومت فشاری سیمان را با افزودن گرافن اکساید به مقدار ۰/۰۲۵ درصد وزنی سیمان به میزان ۲۱ درصد افزایش دادند [۲۱]. لو<sup>۸</sup> و همکاران [۲۲] نشان دادند که افزودن گرافن اکساید به ملات سیمان به میزان ۰/۰۳٪، وزنی سیمان به ترتیب، باعث افزایش مقاومت فشاری و کششی تا ۳۴/۳٪ و ۵۲/۴٪ می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد که گرافن اکسایدها بر روی فرایند هیدراتاسیون سیمان و ساختار

<sup>1</sup> Steel fibers

<sup>2</sup> Carbon fibers

<sup>3</sup> Polymer fibers

<sup>4</sup> Mineral fibers

<sup>5</sup> Fiber Reinforced Concrete

<sup>6</sup> Horszczaruk

<sup>7</sup> Lu

<sup>8</sup> Lv

حفرات در ماتریس تأثیرگذارند [۱۹-۲۰]. بررسی‌های انجام گرفته بر روی تأثیر گرافن اکساید در مشخصه‌های انتقال کامپوزیت‌های سیمانی حاکی از آنست که مقاومت الکتریکی در سن ۲۴ ساعته‌ی نمونه‌ها، افزایش یافته [۲۷] و نفوذ کلرایدها در سن ۲۸ روز، در نمونه‌ها کاهش پیدا کرده‌است [۲۸].

در بخش اول این پژوهش تأثیر گرافن اکساید بر روی مشخصات مکانیکی ماتریس‌های سیمانی بررسی خواهد شد. از آنجا که دوام سازه‌های بتنی به‌طور قابل ملاحظه‌ای به نفوذپذیری آن‌ها بستگی دارد، در ادامه نفوذپذیری بتن نیز مورد آزمایش و بررسی قرار خواهد گرفت. روش تحقیق مبتنی بر روش‌های آزمایشگاهی است. به این منظور نمونه‌های ۲۸ روزه ملات سیمان با درصدهای متفاوت گرافن-اکساید (از ۰٪ تا ۰/۲٪ وزنی سیمان (bwoc)) تحت آزمایش‌های کشش، فشار و خمش، نمونه‌های خمیره سیمان ۲۸ روزه با درصدهای گرافن اکساید bwoc (۰-۰/۰۵)٪ تحت آزمایش‌های کشش و فشار، نمونه‌های بتن ۲۸ و ۹۰ روزه با درصدهای گرافن اکساید bwoc (۰/۲-۰)٪ تحت آزمایش فشار و نمونه‌های ۲۸ روزه بتن با درصدهای گرافن اکساید bwoc (۰-۰/۲)٪ تحت آزمایش نفوذپذیری با استفاده از دستگاه "محفظه استوانه‌ای" قرار می‌گیرند.

## ۲- مصالح، روش ساخت و تجهیزات آزمایشگاهی

### ۲-۱- مصالح

طرح اختلاط بتن با هدف مقاومت ۳۲ مگاپاسکال تعیین شد. در این مطالعه، سیمان پرتلند نوع II کارخانه آبیگ قزوین که مشخصات شیمیایی آن در جدول ۱ آورده شده‌است و آب شرب شهر قزوین برای تهیه‌ی ماتریس سیمانی استفاده شد. PH آب مصرفی ۷/۵، سختی کل ۲۴۱ میلی‌گرم بر لیتر، مقدار کلرید ۲۱/۶ میلی‌گرم بر لیتر و مقدار سولفات ۸۴/۷۵ میلی‌گرم بر لیتر اندازه‌گیری شد که در محدوده‌ی مجاز ذکر شده در استاندارد BS EN 1008:2002 قرار داشتند [۲۳]. منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ها با حداکثر قطر ۱۹ میلیمتر در شکل ۱ نشان داده شده‌است. از سنگدانه‌های خشک برای ساخت نمونه‌ها استفاده گردید. جهت خشک کردن سنگدانه‌ها، آنها را در کنار سیستم گرمایشی محیط آزمایشگاه پهن کرده و جرم آنها در فواصل زمانی ۲۴ ساعت اندازه‌گیری شد و این پروسه تا زمانی که تفاوت بین دو جرم اندازه‌گیری شده مشاهده نشود ادامه داشت. مشخصات فیزیکی سنگدانه‌های مصرفی در جدول ۲ آورده شده‌است.

به منظور رسیدن به مقاومت مطلوب، نسبت آب به سیمان ۰/۵ منظور شد. مشخصات گرافن اکساید مورد استفاده در جدول ۳ قابل مشاهده‌است. برای پراکنش بهتر گرافن اکساید نیز از فوق‌روان‌کننده بر پایه‌ی پلی کربوکسیلات اصلاح‌شده محصول کارخانه پارسیکا استفاده شد.

جدول ۱: ترکیب شیمیایی سیمان پرتلند تیپ II استفاده شده برای ساخت نمونه‌ها

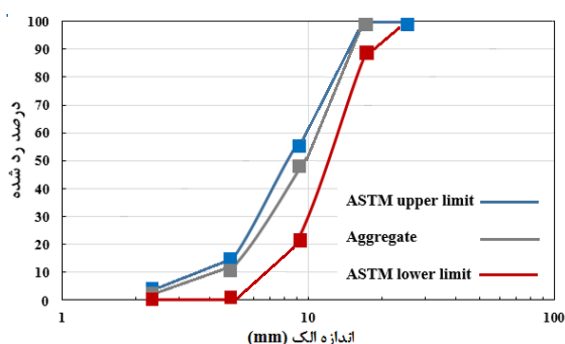
نوع ترکیب	درصد وزنی
۲۰/۷۹	SiO <sub>2</sub>
۴/۷۶	Al <sub>3</sub> O <sub>3</sub>
۳/۸۶	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۶۲/۲۸	CaO
۳/۲۲	MgO
۰/۳۷	Na <sub>2</sub> O
۰/۶۸	K <sub>2</sub> O
۱/۸۹	SO <sub>3</sub>

جدول ۲: مشخصات فیزیکی سنگدانه‌ها

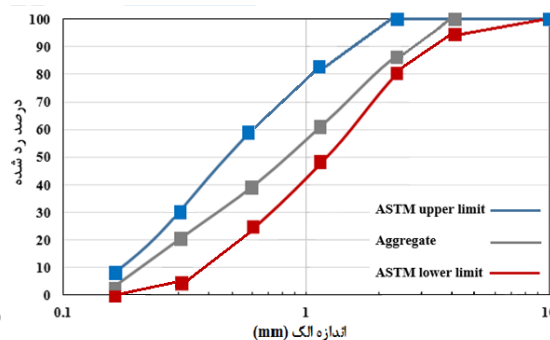
سنگدانه	درصد جذب آب	چگالی ( $\text{g/cm}^3$ )	مدول نرمی	حداکثر قطر سنگدانه (mm)
شن	۱/۵۴	۲/۵۹	۲/۹۵	۱۹
ماسه	۱/۷۵	۲/۵۵		

جدول ۳: مشخصات گرافن اکساید

۱/۶	ضخامت (nm)
٪ ۹۹/۹	درصد خلوص
پودر تیره رنگ	شکل ظاهری



(ب)



(الف)

شکل ۱: منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ها: (الف) ریزدانه؛ (ب) درشت‌دانه

## ۲-۲- آماده‌سازی و عمل‌آوری نمونه‌ها

مطالعات نشان داده‌است که برخی رویکردهای فیزیکی و شیمیایی نظیر حمام اولتراسونیک و اصلاح سطح می‌توانند در پراکنش بهتر این نانوذرات در آب مؤثر باشند [۲۴، ۲۵]. در این مقاله، روش ترکیبی استفاده از حمام اولتراسونیک و فوق‌روان‌کننده‌ها مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۲ دستگاه حمام اولتراسونیک را نشان می‌دهد. پروسه‌ی آماده‌سازی و اختلاط نمونه‌ها مطابق با آیین‌نامه‌ی ASTM [۲۶] و به شرح زیر انجام پذیرفت:

در مخلوط‌های دارای نانو گرافن اکساید قبل از اختلاط این مواد با سنگدانه و سیمان در دستگاه اولتراسونیک حمامی، به مدت یک ساعت با آب طرح اختلاط پراکنش شد و مقدار بسیار کمی فوق‌روان‌کننده که با باردار کردن ذرات به پخش بهتر آن‌ها کمک می‌کند به مدت ۲ دقیقه هم خورده و لجن به دست آمد.

ابتدا سنگدانه‌ها درون مخلوط‌کن ریخته شده و کاملاً با یکدیگر مخلوط شدند. سپس آب لازم برای رسیدن به حالت SSD به مخلوط اضافه گردید. در همین زمان لجن نانو گرافن اکساید آماده شده، سپس سیمان اضافه شده و لجن نیز در حین اختلاط از دریچه مخلوط‌کن به مخلوط اضافه شد. پس از اختلاط کامل، قالب‌گیری و عملیات ماله‌کشی انجام گرفته و قالب‌ها با گونی مرطوب پوشش داده شدند. پس از ۲۴ ساعت نگهداری در دمای آزمایشگاه قالب‌ها باز شده و نمونه‌ها به منظور عمل‌آوری در حمام کلسیم‌هیدروکسید قرار داده شدند.



شکل ۲: حمام اولتراسونیک

برای بررسی تأثیر گرافن اکساید بر روی مشخصات مکانیکی خمیره ی سیمان، ملات سیمان و بتن آزمایش مقاومت فشاری برای هر سه ماتریس سیمانی، آزمایش مقاومت کششی برای نمونه های خمیره و ملات سیمان و آزمایش خمش سه محوری برای نمونه های ملات سیمان انجام گرفت. ابعاد نمونه ها برای آزمایش فشار و خمش ملات سیمان به ترتیب مکعب با ابعاد  $50 \times 50 \times 50$  mm و مکعب مستطیل با ابعاد  $40 \times 40 \times 160$  mm بود. همچنین از قالب های مکعبی با طول ضلع  $150$  mm و قالب پاپیونی شکل با سطح مقطع مربعی و با ابعاد  $25 \times 25$  mm به ترتیب برای آزمایش های فشاری و نفوذپذیری بتن و کششی خمیره و ملات سیمان استفاده شد. جزئیات طرح اختلاط خمیره و ملات سیمان و همچنین بتن در جداول ۴-۶ آورده شده است. خاطر نشان می شود که مقادیر گرافن اکساید و فوق روان کننده براساس درصد وزنی سیمان بیان شده اند.

جدول ۴: طرح اختلاط نمونه های خمیره سیمان

Mix No.	سیمان (Kg)	GO (% bwoc)	آب (Kg)	فوق روان کننده (% bwoc)	نسبت w/c
P0	۱	۰	۰/۵	۰/۵	۰/۵
PGO-0.03	۱	۰/۰۳	۰/۵	۰/۵	۰/۵
PGO-0.05	۱	۰/۰۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵

جدول ۵: طرح اختلاط نمونه های ملات سیمان

Mix No.	سیمان (Kg)	ماسه (Kg)	GO (% bwoc)	آب (Kg)	فوق روان کننده (% bwoc)	نسبت w/c
M0	۱	۳	۰	۰/۵	۰/۵	۰/۵
MGO-0.03	۱	۳	۰/۰۳	۰/۵	۰/۵	۰/۵
MGO-0.05	۱	۳	۰/۰۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵
MGO-0.08	۱	۳	۰/۰۸	۰/۵	۰/۵	۰/۵
MGO-0.1	۱	۳	۰/۱	۰/۵	۰/۵	۰/۵
MGO-0.2	۱	۳	۰/۲	۰/۵	۰/۵	۰/۵

جدول ۶: طرح اختلاط نمونه های بتن

نسبت w/c	(% فوق‌روان‌کننده bwoc)	GO (% bwoc)	شن (Kg/m <sup>3</sup> )	ماسه (Kg/m <sup>3</sup> )	سیمان (Kg/m <sup>3</sup> )	Mix No.
۰/۵	۰/۵	۰	۹۰۰	۱۱۰۰	۴۵۵	C0
۰/۵	۰/۵	۰/۰۳	۹۰۰	۱۱۰۰	۴۵۵	CGO-0.03
۰/۵	۰/۵	۰/۰۵	۹۰۰	۱۱۰۰	۴۵۵	CGO-0.05
۰/۵	۰/۵	۰/۱	۹۰۰	۱۱۰۰	۴۵۵	CGO-0.1
۰/۵	۰/۵	۰/۲	۹۰۰	۱۱۰۰	۴۵۵	CGO-0.2

## ۲-۳- تجهیزات آزمایشگاهی

### ۲-۳-۱- اندازه‌گیری مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی

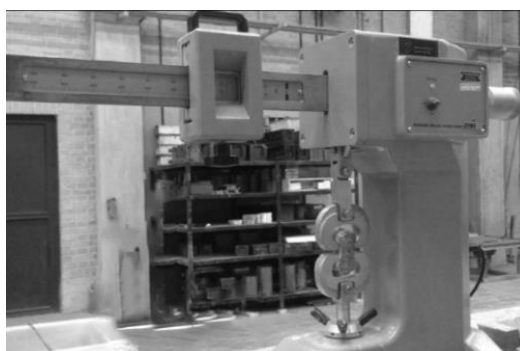
شکل ۳ دستگاه‌های مورد استفاده برای آزمایشات فشار، کشش و خمش را نشان می‌دهد. به منظور کاهش خطا در هر آزمایش حداقل سه نمونه آزمایش شد. همچنین نتایج نمونه‌هایی که استحکام آن‌ها بیش از ۱۵ درصد از میانگین مقاومت متغیر بودند، رد شدند. ضمناً از میانگین انجام سه آزمایش، مقاومت‌های بتن تعیین شد.



(ب)



(الف)



(د)



(ج)



(ه)

شکل ۳: (الف) نمونه‌های پاپیونی ملات سیمان؛ (ب) نمونه‌های مکعبی بتن؛ (ج) دستگاه تست کشش؛ (د) دستگاه تست خمش؛ (ه) دستگاه تست فشار

## ۲-۳-۲- اندازه‌گیری نفوذپذیری به روش دستگاه محفظه استوانه‌ای

اندازه‌گیری نفوذپذیری با روش‌های مرسوم نیاز به صرف زمان زیاد و تجهیزات گوناگون و با حجم بالاست. در این پژوهش بررسی نفوذپذیری با استفاده از دستگاه محفظه استوانه‌ای که روشی نوین برای اندازه‌گیری نفوذپذیری می‌باشد، انجام شده است. این روش که توسط نادری ابداع شد، روشی دقیق با کاربردی گسترده در تعیین میزان نفوذپذیری بتن و سایر مصالح ساختمان چه در محیط آزمایشگاه و چه در محل پروژه است [۳۱]. این دستگاه به نام دستگاه "Cylindrical chamber" در دنیا شناخته شده است. این دستگاه قابلیت آزمایش بر روی اتصالات بتنی و ژئوممبران‌ها با امکان انجام آزمایش قبل و بعد از نصب آن‌ها در صنعت راه‌سازی را دارد. شکل ۴ دستگاه محفظه استوانه‌ای را نشان می‌دهد.

در ابتدای آزمایش یک صفحه فلزی زیر سری به کمک چسب اپوکسی سطح بتن چسبانده شده و چسب اضافی از روی سطح نمونه برداشته می‌شود. در ادامه، قسمت فوقانی که شامل محفظه‌ی فشار به همراه گیج اندازه‌گیری فشار و میکرومتر است، بر روی صفحه‌ی زیرسری محکم می‌شود. سپس درون محفظه کاملاً با آب پر می‌شود. به منظور خروج هوای احتمالی موجود در محفظه یک شیر تخلیه‌ی هوا در دستگاه تعبیه شده است. با چرخاندن دسته‌ی تنظیم فشار، فشار به مقدار دلخواه مورد نظر تنظیم می‌گردد. با گذشت زمان از شروع آزمایش، بدلیل وجود اصطکاک داخلی با منافذ بتن، از جت آب از مقدار فشار اعمالی کاسته می‌شود. فشار دستگاه را می‌توان به کمک چرخاندن مجدد دسته‌ی تنظیم فشار ثابت نگه داشت. با چرخاندن دسته‌ی تنظیم فشار، پیستون فشار به سمت پایین حرکت می‌کند. حرکت به سمت پایین پیستون توسط میکرومتر قابل قرائت است. در فواصل زمانی دلخواه از شروع آزمایش عدد میکرومتر قرائت می‌شود. با داشتن قرائت میکرومتر و سطح اعمال فشار (سطح داخلی صفحه زیرسری)، حجم آب نفوذ کرده به بتن توسط رابطه (۱) محاسبه می‌شود.





(ب)



(الف)

شکل ۴: (الف) مشخصات دستگاه "محفظه استوانه‌ای"؛ (ب) انجام آزمایش نفوذپذیری

$$V = A \times h$$

(۱)

که در آن  $V$  ( $m^3$ ) حجم آب نفوذ کرده به نمونه،  $h$  (m) قرائت میکرومتر و  $A$  ( $m^2$ ) سطح مقطع اعمال فشار است. پس از انجام آزمایش بلافاصله نمونه توسط جک فشاری به دو قسمت تقسیم شد تا سطح تر شده مشخص شود. شکل ۵ نحوه دونیم کردن نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۵: دونیم کردن نمونه

این آزمایش قابلیت انجام روی سطوح افقی (دال‌ها و عرشه‌ی پل) و عمودی (ستون‌ها) را دارد. از دیگر مزایای این روش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۳۲]:

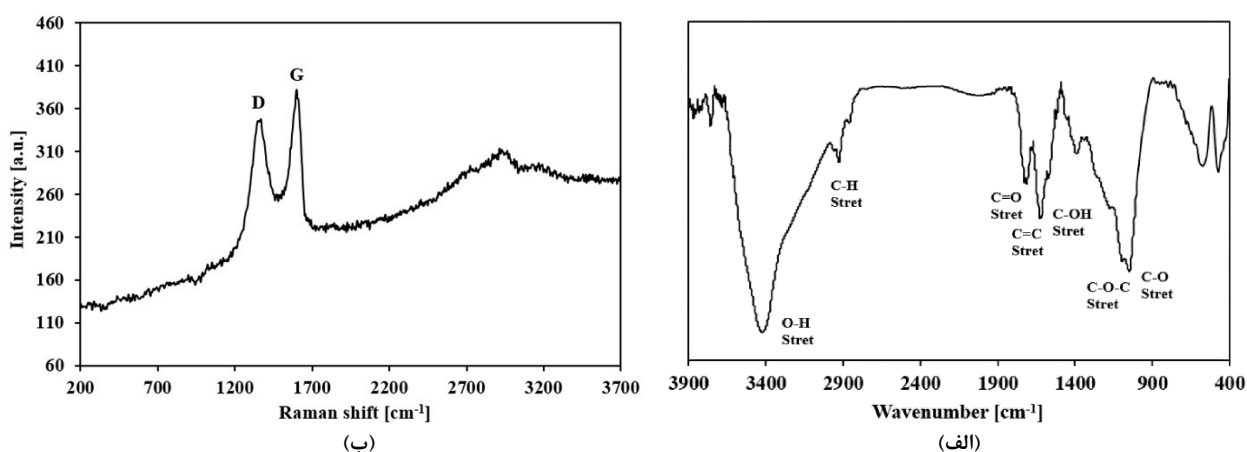
- دستگاه آزمایش بسیار ساده است.
- میزان نفوذپذیری را به صورت کمی ارائه می کند.
- دستگاه در عین سادگی دارای دقت بالایی است.
- سرعت انجام آزمایش بالا، هزینه انجام آن ناچیز و قابلیت تکرار آن زیاد است.
- قابلیت حمل آن به سخت ترین مکان ها میسر است.
- استفاده از این روش نیاز به مهارت و برنامه ریزی خاصی برای تکنسین آزمایش ندارد.
- محدودیت ابعادی برای نمونه مورد آزمایش وجود ندارد.
- قابلیت استفاده برای سایر مصالح مانند سنگ، ملات، سفال، آجر فشاری و ... را دارد.
- قابلیت ارزیابی نفوذپذیری سازه در محل را دارد.

### ۳- بررسی نتایج آزمایشگاهی

#### ۳-۱- مشخصات گرافن اکساید

آنالیز فوریه (FT-IR)<sup>۹</sup> بر روی نمونه های گرافن اکساید به منظور ارزیابی گروه های عاملی انجام گرفت. شکل ۶-الف طیف FT-IR مربوط به گرافن اکساید خالص را نشان می دهد. ارتعاشات کششی در  $1047\text{ cm}^{-1}$ ،  $1387\text{ cm}^{-1}$ ،  $1625\text{ cm}^{-1}$ ،  $1722\text{ cm}^{-1}$  به ترتیب به گروه های عاملی C-O، اپوکسی C-O-C، آلکولی C-O-H، کربن های آروماتیک C=C، C=O از گروه کربوکسیلیت اسید مربوط می باشد. همچنین پیک پهن متعلق به گروه های OH و آب جذب شده روی سطح در ناحیه  $3422\text{ cm}^{-1}$  قابل مشاهده است. ارتعاشات در نواحی  $2926\text{ cm}^{-1}$  و  $2978\text{ cm}^{-1}$  به ترتیب به ارتعاشات کششی متقارن و نامتقارن C-H مربوط است.

تغییرات در درجه بی نظمی ساختار کریستالی مواد کربنی با استفاده از آنالیز رامان<sup>۱۰</sup> بررسی شد. مطابق شکل ۶-ب، طیف رامان گرافن اکساید دو پیک اصلی را در  $1273\text{ cm}^{-1}$  (باند D) و  $1585\text{ cm}^{-1}$  (باند G) نشان می دهد که به ترتیب به بی نظمی های موجود در ساختار کربنی مربوط می باشد. نسبت شدت باند D به شدت باند G سطح اختلال گرافن را بیان می کند که این نسبت شدت برای نمونه سنتزی حدود ۰/۹۳ به دست آمده است.



شکل ۶: (الف) طیف فوریه؛ (ب) طیف رامان گرافن اکساید

<sup>9</sup> Fourier Transform-Infrared Spectroscopy

<sup>10</sup> Raman Analysis

## ۳-۲- مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی

نتایج تست مکانیکی خمیره و ملات سیمان با و بدون گرافن اکساید به‌طور خلاصه در جدول ۷ آورده شده است. مطالعات انجام‌گرفته بر روی تأثیر گرافن اکساید در کامپوزیت‌های سیمانی نشان می‌دهد که این نانوذرات باعث تسریع در فرایند هیدراتاسیون سیمان شده و همچنین منجر به بهبود مقاومت مکانیکی این کامپوزیت‌ها می‌شوند. همان‌طور که انتظار می‌رفت نتایج حاکی از افزایش مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی ملات سیمان مسلح به گرافن اکساید می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۷-الف نیز مشاهده می‌شود، افزودن bwoc (۰/۰۵-۰/۰۳)٪ گرافن اکساید باعث افزایش (۶۰-۷۰)٪ مقاومت کششی و افزایش (۱۲-۲۲)٪ مقاومت خمشی می‌شود. با توجه به نمودار با افزایش بیشتر در میزان گرافن اکساید از مقاومت‌های خمشی و کششی به تدریج کاسته می‌شود. در واقع میزان بهینه‌ی گرافن اکساید مصرفی در طرح اختلاط مورد استفاده در این پژوهش به منظور بهبود هرچه بیشتر مشخصات مکانیکی ملات سیمان، حدود bwoc ۰/۰۵٪ می‌باشد. نتایج مقاومت فشاری ملات‌های سیمان هم در نمونه‌های با میزان گرافن اکساید تا bwoc ۰/۰۸٪ افزایش ۱۷٪ را نشان می‌دهند. چندین دلیل احتمالی برای افزایش مقاومت‌ها وجود دارد که از جمله آنها می‌توان به قفل و بست مکانیکی بهبودیافته توسط مورفولوژی چروکیده، اندرکنش بیشتر بین ترک‌ها و ورق‌های گرافن-اکساید به دلیل هندسه دوبعدی و سطح تماس بالای ورق‌ها، ارتقاء فرایند هیدراتاسیون و تشکیل نیروهای بین مولکولی قوی به دلیل واکنش شیمیایی بین گروه‌های کربوکسیلیک و محصولات هیدراتاسیون اشاره کرد [۱۹].

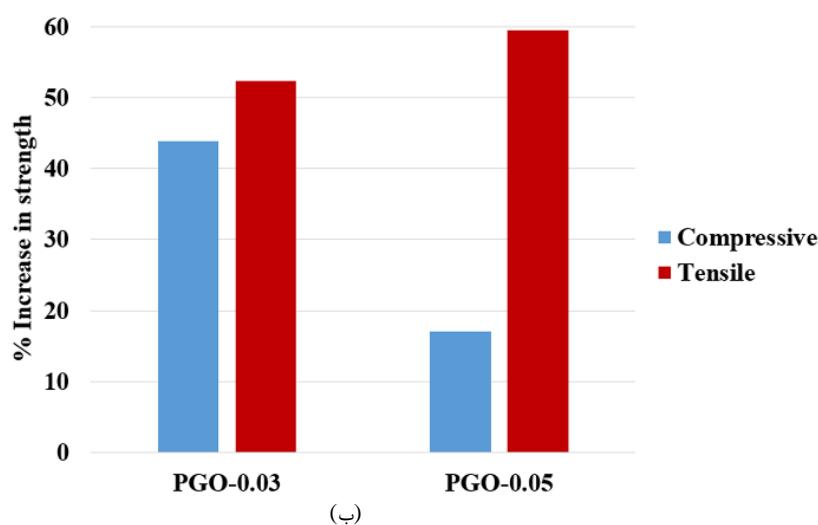
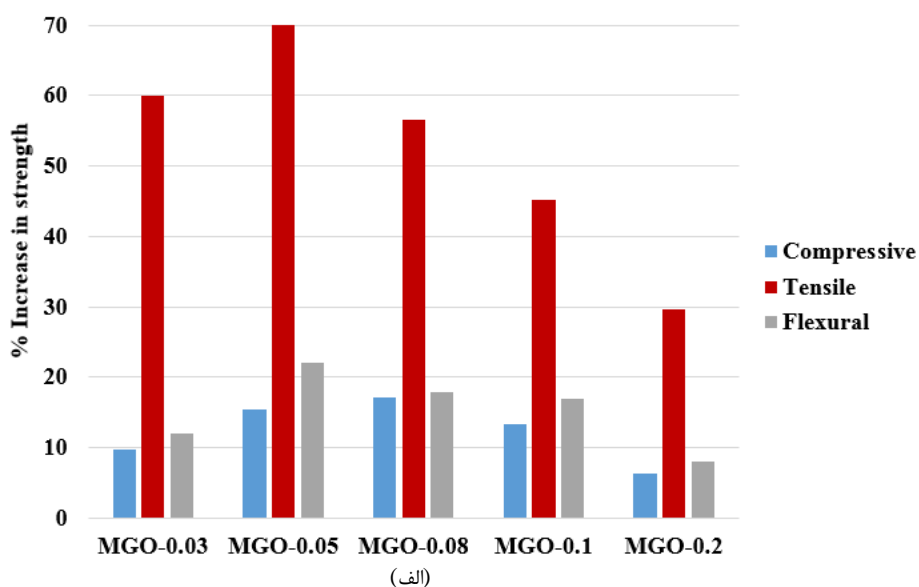
همان‌طور که در شکل ۷-ب مشاهده می‌شود، در نمونه‌های خمیره سیمان مسلح به گرافن اکساید افزایش ۴۳٪ در مقاومت فشاری برای نمونه bwoc ۰/۰۳٪ و افزایش ۵۹٪ در مقاومت کششی برای نمونه ۰/۰۵٪ اتفاق افتاده است. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، محدوده بهینه‌ای از میزان گرافن اکساید مصرفی در بهبود مقاومت‌های مکانیکی ملات سیمان وجود دارد، به‌طوری‌که با گذر از این حدود، مقاومت‌ها کاهش می‌یابند. این موضوع می‌تواند بدلیل تغییر شکل کریستال‌های حاصل از فرایند هیدراتاسیون سیمان با تغییر در میزان گرافن اکساید در ماتریس سیمانی باشد [۲۲]. مطالعات شگوا<sup>۱۱</sup> و همکاران [۲۲] بروی عکس‌های SEM<sup>۱۲</sup> گرفته شده از کامپوزیت‌های سیمانی با درصد‌های مختلف گرافن اکساید نشان می‌دهد که میزان استفاده از این نانو ذرات در شکل کریستال‌های تشکیل‌یافته در مقیاس میکرو تاثیرگذار است. به طوری که با شکل‌گیری کریستال‌های گل مانند سختی افزایش می‌یابد، در حالی که کریستال‌های پلی-هدرون شکل منجر به افزایش در مقاومت فشاری می‌شوند. درواقع با تغییر در میزان گرافن اکساید و تغییر شکل کریستال‌ها تغییر در مقاومت‌ها دستخوش تغییر می‌شود.

<sup>11</sup> Shenghua Lv

<sup>12</sup> Scanning Electron Microscope

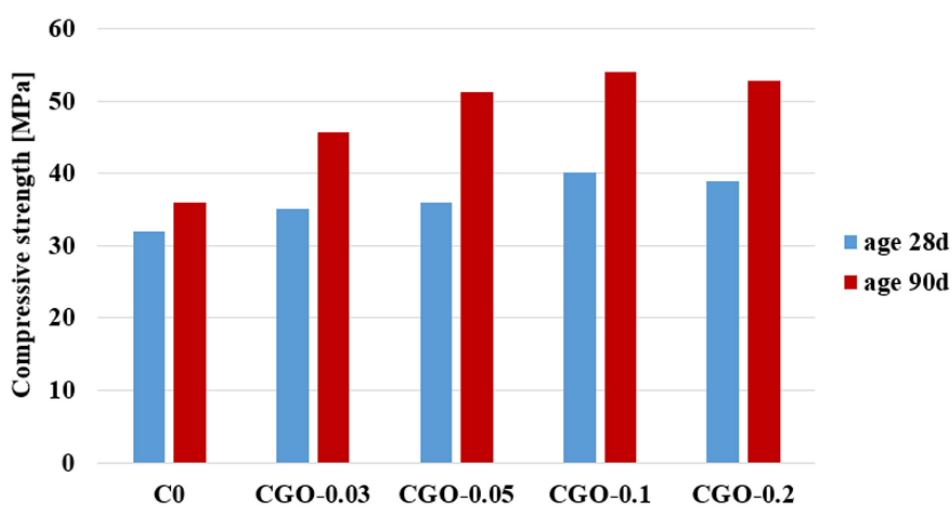
جدول ۷: نتایج آزمایشات مکانیکی کامپوزیت‌های سیمانی مسلح به گرافن اکساید در سن ۲۸ روز

No.	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	مقاومت خمشی (KN)
P0	۴۱	۴/۲	-
PGO-0.03	۵۹	۶/۴	-
PGO-0.05	۴۸	۶/۷	-
M0	۴۶/۲	۲/۷	۲/۵
MGO-0.03	۵۰/۷	۴/۳۲	۲/۸
MGO-0.05	۵۳/۳۵	۴/۵۹	۳/۰۵
MGO-0.08	۵۴/۱	۴/۲۳	۲/۹۵
MGO-0.1	۵۲/۴	۳/۹۲	۲/۹۲۵
MGO-0.2	۴۹/۱	۳/۵	۲/۸

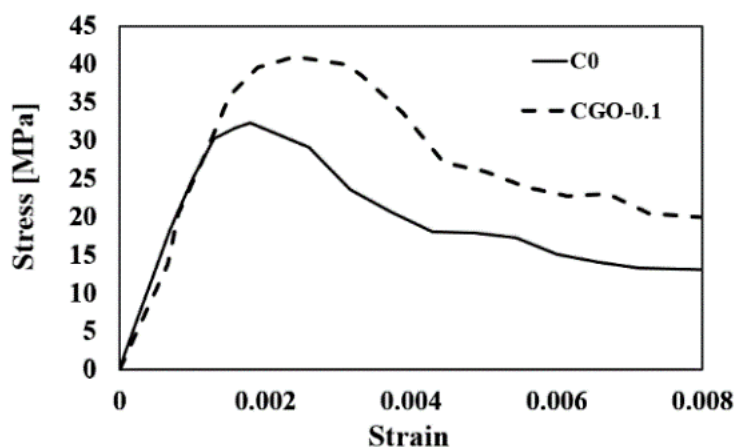


شکل ۷: افزایش مقاومت‌های مکانیکی نانو کامپوزیت‌های سیمانی مسلح به گرافن اکساید در سن ۲۸ روز: (الف) نمونه‌های ملات سیمان؛ (ب) نمونه‌های خمیره سیمان

شکل ۸ مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی را نشان می‌دهد. مطابق با نتایج آزمایش، افزودن مقادیر کمی از گرافن اکساید به میزان  $0.1/0$  bwoc باعث افزایش مقاومت فشاری تا  $25\%$  در نمونه‌های ۲۸ روزه و  $50\%$  در نمونه‌های ۹۰ روزه در مقایسه با نمونه‌های کنترل می‌شود. افزایش در مقاومت فشاری می‌تواند به دلیل بهبود فرایند هیدراتاسیون سیمان و ساختار چگال‌تر با حفرات ریزتر در ساختار خمیره بتن مسلح با گرافن اکساید باشد. خاصیت پل‌زدن گرافن اکساید به دلیل سطح تماس بالای آن و پیوندهای کوالانسی قوی در سطح تماس ماتریس سیمانی و این نانوذرات، می‌تواند دلیل دیگر تقویت ساختار بتن باشد [۳۳]. نمودار تنش-کرنش تحت بارگذاری فشاری برای بتن و بتن مسلح با گرافن اکساید در شکل ۹ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، وجود گرافن اکساید باعث افزایش سطح زیر نمودار در ناحیه‌ی قبل از پیک به دلیل افزایش در کرنش متناظر می‌شود. قبل از رسیدن به تنش ماکزیمم، تحت بار ترک‌های ریز در ابعاد نانو شروع به رشد و انتشار می‌کنند و به تدریج ترک‌های پیوسته و در ابعاد میکرو را تشکیل می‌دهند. افزایش ظرفیت کرنش در نمونه‌های مسلح با گرافن اکساید می‌تواند بدلیل تأخیر در تشکیل این میکروترک‌ها باشد [۳۴، ۱۹].



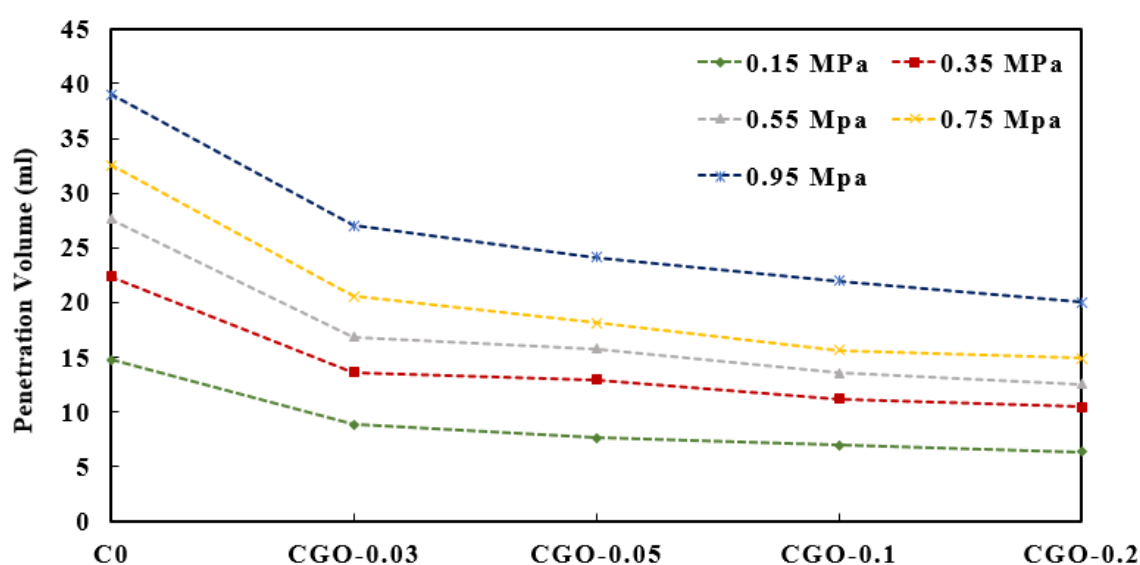
شکل ۸: مقاومت فشاری بتن در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه



شکل ۹: نمودار تنش-کرنش تحت بارگذاری فشاری بتن معمولی و بتن مسلح با گرافن اکساید در سن ۲۸ روز

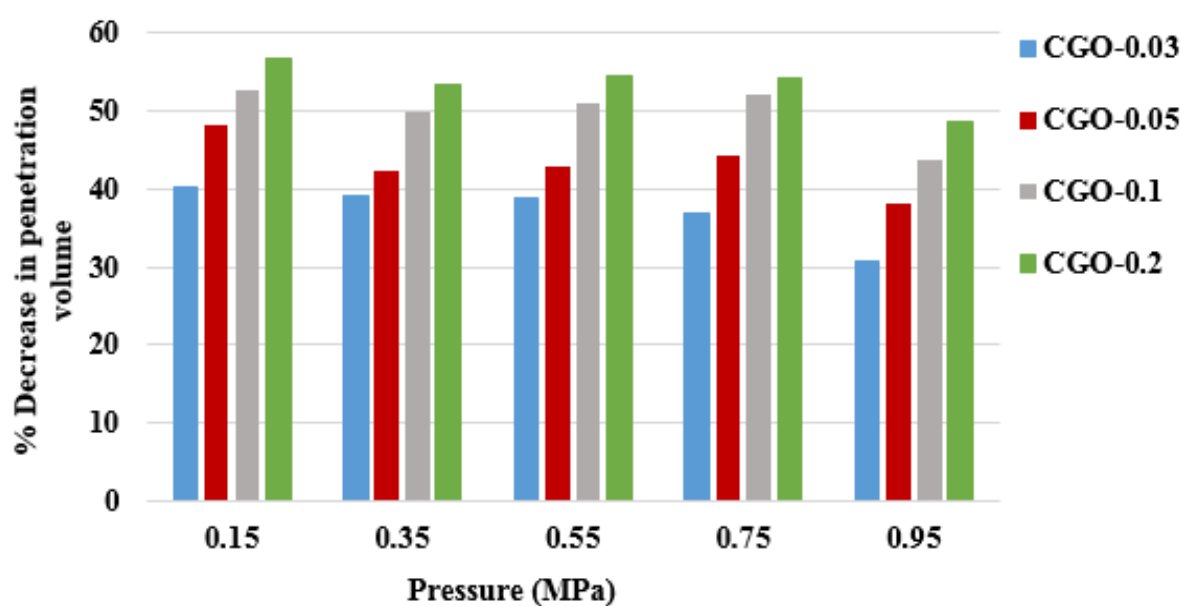
## ۳-۳- نفوذپذیری

کاهش در دوام بتن وابستگی زیادی به میزان نفوذ آب دارد [۲۹]. دوام را می‌توان به سهولت حرکت آب یا گاز در داخل بتن که به مشخصه‌های انتقال شناخته می‌شوند، نسبت داد [۳۰]. در این بخش نتایج آزمایش نفوذپذیری بوسیله دستگاه محفظه استوانه‌ای ارائه می‌شود. آزمون نفوذپذیری به مدت ۵ ساعت بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. شکل ۱۰ حجم نفوذ آب انباشته شده در نمونه‌ها را تحت فشارهای هیدرواستاتیک مختلف نشان می‌دهد. مطابق نتایج بدست آمده، مشاهده می‌شود که از میزان حجم آب تجمعی نفوذی در نمونه‌های حاوی گرافن اکساید نسبت به نمونه‌های کنترل کاسته شده است. در واقع این نانوذرات باعث تقویت ساختار بتن در مقیاس میکرو شده که منجر به بهبود مشخصه‌های انتقال ماتریس می‌شود [۱۹]. نتایج نشان می‌دهد با افزایش در میزان گرافن اکساید از میزان حجم نفوذ آب نیز کاسته می‌شود.



شکل ۱۰: حجم آب نفوذی در نمونه‌ها با درصد‌های مختلف گرافن اکساید و فشارهای هیدرواستاتیک متفاوت

شکل ۱۱ میزان این کاهش را تحت فشارهای استاتیکی مختلف و درصد‌های گرافن اکساید متفاوت نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۱، کاهش در میزان نفوذ آب در نمونه‌های با ۰/۰۳٪ و ۰/۲٪ به ترتیب ۴۰٪ و ۵۶٪ تحت فشار هیدرواستاتیک ۰/۱۵ مگاپاسکال و ۳۱٪ و ۴۸/۷٪ تحت فشار هیدرواستاتیک ۰/۹۵ مگاپاسکال می‌باشد. همانطور که بیان شد این کاهش می‌تواند بدلیل بهبود ساختار و کاهش در میزان حفرات و در نهایت تشکیل بتنی با ساختار چگالتر در نمونه‌های بتن مسلح به گرافن اکساید باشد [۱۹، ۳۴]. شکل ۱۲ عمق آب نفوذ کرده در نمونه‌های C0 و CGO-0.1 تحت فشار ۰/۹۵ MPa را بلافاصله بعد از تست نفوذ نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود عمق آب نفوذی در نمونه حاوی گرافن اکساید نسبت به نمونه کنترل کاهش یافته است.



شکل ۱۱: میزان کاهش در حجم آب نفوذی در نمونه‌های بتنی مسلح به گرافن اکساید نسبت به نمونه‌های کنترل



(ب)



(الف)

شکل ۱۲: سطح آب نفوذی تحت فشار هیدرواستاتیک ۰/۹۵ MPa در نمونه‌های: (الف) C0; (ب) CGO-0.1

### ۳-۴- مشخصات ساختار نمونه های بتن در مقیاس میکرو

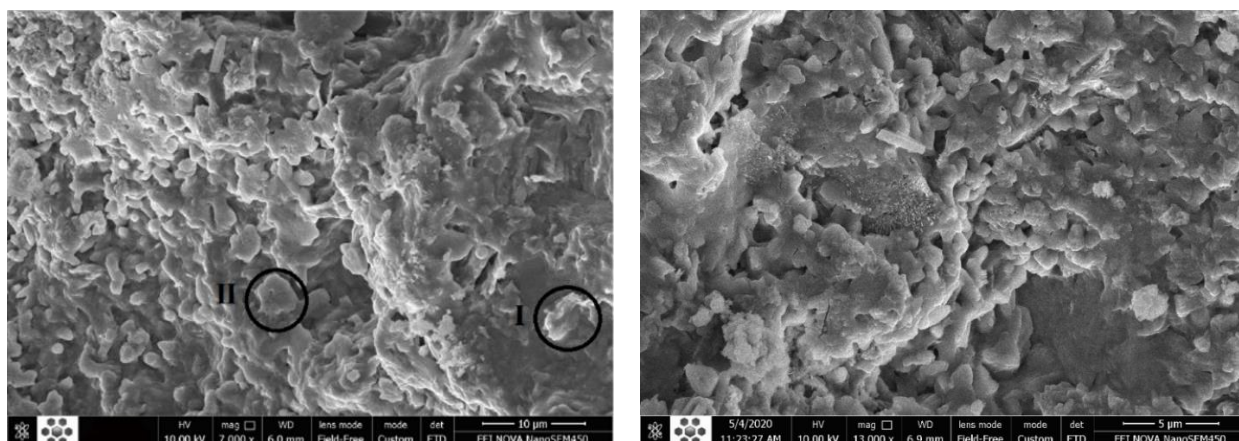
در شکل ۱۳، عکس SEM<sup>۱۳</sup> از نمونه‌های بتن معمولی و بتن مسلح به bwoc ۰/۰۱٪ گرافن اکساید را نشان می‌دهد. براساس خاصیت مورفولوژی گرافن اکساید، مطابق شکل ۱۱-ب، ناحیه‌ی (I) که توسط اسکن SEM شناسایی شده است می‌تواند حاوی این نانوذرات باشد. در ادامه آنالیز المان با استفاده از تکنیک طیف‌سنجی پراکندگی انرژی در این ناحیه و همچنین در ناحیه‌ی (II) که احتمال می‌رفت

<sup>13</sup> Scanning Electron Microscope

فقد گرافن اکساید باشد، انجام شد. نتایج بدست آمده به شرح جدول ۸ است. براساس مقادیر کربن، نانوذره‌ی گرافن اکساید در ناحیه ی (I) شناسایی شد.

جدول ۸: آنالیز المان نمونه بتن مسلح به گرافن اکساید

Region (II)	Region (I)	Element
٪۹/۲۳	٪۶۳/۴۲	C
٪۵۵/۰۶	٪۳۱/۲۶	O
٪۱/۳	٪۰/۷۴	Mg
٪۳	٪۱/۵۱	Si
٪۱/۰۲	٪۰/۵۷	Al
٪۰/۱	٪۰/۱۷	S
٪۲۹/۷۹	٪۲/۰۹	Ca
٪۰/۱۵	٪۰/۲۴	Fe



(ب)

(الف)

شکل ۱۳: عکس‌های SEM از: (الف) نمونه‌ی بتن معمولی؛ (ب) بتن مسلح به گرافن اکساید bwoc ٪۰/۱

#### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق آزمایش‌های متعددی به منظور ارزیابی تأثیر نانوذره‌ی گرافن اکساید بر روی مشخصات مکانیکی کامپوزیت‌های سیمانی و نفوذپذیری بتن پرداخته شد. آزمایشات انجام شده در این تحقیق شامل آزمایش مقاومت فشاری، مقاومت کششی، آزمایش مقاومت خمشی و آزمایش نفوذپذیری می‌باشد. در این قسمت به خلاصه‌ای از نتایج بدست آمده اشاره شده است:

- نتایج نشان می‌دهد که افزودن گرافن اکساید باعث افزایش در مقاومت‌های کششی، خمشی و فشاری ملات سیمان می‌شود. به طوری که افزایش در مقاومت خمشی و کششی بیشتر از افزایش مقاومت فشاری است. در نمونه‌های ملات سیمان مجهز به bwoc ٪۰/۰۵، افزایش در مقاومت‌های کششی و خمشی به ترتیب برابر با ۷۰٪ و ۲۲٪ در مقایسه با نمونه‌های کنترل می‌باشد. از دلایل افزایش مقاومت‌ها می‌توان به قفل و بست مکانیکی بهبودیافته توسط مورفولوژی چروکیده، اندرکنش بیشتر بین ترک‌ها و ورق‌های گرافن اکساید به دلیل هندسه دوبعدی و سطح تماس بالای ورق‌ها، ارتقاء فرایند هیدراتاسیون و تشکیل نیروهای بین مولکولی قوی به دلیل واکنش شیمیایی بین گروه‌های کربوکسیلیک و محصولات هیدراتاسیون اشاره کرد.
- در نمونه‌های خمیره سیمان مسلح به گرافن اکساید افزایش ۴۳٪ در مقاومت فشاری برای نمونه bwoc ٪۰/۰۳ و افزایش ۵۹٪ در مقاومت کششی برای نمونه ٪۰/۰۵ مشاهده شد.



۳- افزایش در مقاومت‌های فشاری بتن مسلح به ۰/۱٪ وزنی سیمان گرافن اکساید در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه در مقایسه با نمونه‌های کنترل به ترتیب ۲۵٪ و ۵۰٪ می‌باشد. این افزایش در مقاومت فشاری می‌تواند به دلیل بهبود فرایند هیدراتاسیون سیمان و ساختار چگال‌تر با حفرات ریزتر در ساختار بتن مسلح با گرافن اکساید باشد. خاصیت پل‌زدن گرافن اکساید به دلیل سطح تماس بالای آن و پیوندهای کوالانسی قوی در سطح تماس ماتریس سیمانی و این نانوذرات، می‌تواند دلیل دیگر تقویت ساختار بتن باشد.

۴- نتایج آزمایشات مقاومت نشان از وجود حد آستانه در میزان مصرف گرافن اکساید می‌دهد به طوری که با افزایش میزان گرافن اکساید از این حدود از میزان افزایش مقاومت‌ها کاسته می‌شود. این موضوع می‌تواند به دلیل تغییر شکل کریستال‌های تشکیل شده در فرایند هیدراتاسیون با تغییر در میزان گرافن اکساید مصرفی باشد.

۵- نتایج آزمون نفوذپذیری نشان می‌دهد که افزودن گرافن اکساید باعث کاهش در میزان آب نفوذی در نمونه‌های مسلح نسبت به نمونه‌های کنترل می‌شود. این موضوع می‌تواند بدلیل خاصیت پراکندگی حفرات در سطح نانوذرات گرافن اکساید باشد که متعاقب آن از میزان نفوذ هرچه بیشتر مولکول‌های آب می‌کاهد. کاهش در میزان نفوذ در نمونه‌های با bwoc ۰/۰۳٪ و ۰/۲٪ گرافن اکساید به ترتیب ۴۰٪ و ۵۶٪ تحت فشار هیدرواستاتیکی ۰/۱۵ مگاپاسکال ۳۱٪ و ۴۸/۷٪ و تحت فشار هیدرواستاتیکی ۰/۹۵ مگاپاسکال نسبت به نمونه‌های کنترل می‌باشد.

## ۵- منابع و مراجع

- [۱] Yuan, Yingshu, and Yongsheng Ji. "Modeling corroded section configuration of steel bar in concrete structure." *Construction and Building Materials* 23.6 (2009): 2461-2466.
- [۲] Watanabe, Ken, Toshihide Kimura, and Junichiro Niwa. "Synergetic effect of steel fibers and shear-reinforcing bars on the shear-resistance mechanisms of RC linear members." *Construction and Building Materials* 24.12 (2010): 2369-2375.
- [۳] Hossain, Md Zakaria, and ASM Abdul Awal. "Flexural response of hybrid carbon fiber thin cement composites." *Construction and Building Materials* 25.2 (2011): 670-677.
- [۴] Ali, Majid, et al. "Mechanical and dynamic properties of coconut fibre reinforced concrete." *Construction and Building Materials* 30 (2012): 814-825.
- [۵] Reis, J. M. L. "Fracture and flexural characterization of natural fiber-reinforced polymer concrete." *Construction and building materials* 20.9 (2006): 673-678.
- [۶] Soroushian, Parviz, Atef Tlili, and Atallah Khan. "Development and characterization of hybrid polyethylene fiber reinforced cement composites." *Materials Journal* 90.2 (1993): 182-190.
- [۷] Soroushian, Parviz, Jong-Pil Won, and Maan Hassan. "Durability characteristics of CO2-cured cellulose fiber reinforced cement composites." *Construction and Building Materials* 34 (2012): 44-53.
- [۸] Su, Haoyang, and Jinyu Xu. "Dynamic compressive behavior of ceramic fiber reinforced concrete under impact load." *Construction and Building Materials* 45 (2013): 306-313.
- [۹] Morova, Nihat. "Investigation of usability of basalt fibers in hot mix asphalt concrete." *Construction and Building Materials* 47 (2013): 175-180.
- [۱۰] Zollo, Ronald F. "Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development." *Cement and concrete composites* 19.2 (1997): 107-122.
- [۱۱] Zhu, Yanwu, et al. "Graphene and graphene oxide: synthesis, properties, and applications." *Advanced materials* 22.35 (2010): 3906-3924.
- [۱۲] S. Stankovich, D. A. Dikin, G. H. B. Dommett, K. M. Kohlhaas, E. J. Zimney, E. A. Stach, R. D. Piner, S. T. Nguyen, R. S. Ruoff, Graphene-based composite materials, *Nature*, Vol. 442, No. 7100, pp. 282-286.2006.
- [۱۳] C. Androulidakis, G. Tsoukleri, N. Koutroumanis, G. Gkikas, P. Pappas, J. Parthenios, K. Papagelis, C. Galiotis, Experimentally derived axial stress-strain relations for two-dimensional materials such as monolayer graphene, *Carbon*, Vol. 81, No. 1, pp. 322-328, 2015.

- [۱۴] A. Balandin, Thermal properties of graphene and nanostructured carbon materials, *Nature materials*, Vol. 10, No. 8, pp. 569, 2011.
- [۱۵] R. Nazemnezhad, H. Shokrollahi, S. Hosseini-Hashemi, Sandwich beam model for free vibration analysis of bilayer graphene nanoribbons with interlayer shear effect, *Journal of Applied Physics*, Vol. 115, No. 17, pp. 174303, 2014.
- [۱۶] S. Sadeghzadeh, L. Liu, Resistance and rupture analysis of single and few-layer graphene nanosheets impacted by various projectiles, *Superlattices and Microstructures*, Vol. 97, No. 1, pp. 617-629, 2016.
- [۱۷] S. Sadeghzadeh, M. Khatibi, Modal identification of single layer graphene nano sheets from ambient responses using frequency domain decomposition, *European Journal of Mechanics-A/Solids*, Vol. 65, No. 1, pp. 70-78, 2017.
- [۱۸] A. Korayem, N. Tourani, M. Zakertabrizi, A. Sabziparvar, W. Duan, A review of dispersion of nanoparticles in cementitious matrices: Nanoparticle geometry perspective, *Construction and Building Materials*, Vol. 153, No. 1, pp. 346-357, 2017.
- [۱۹] Z. Pan, L. He, L. Qiu, A. H. Korayem, G. Li, J. W. Zhu, F. Collins, D. Li, W. H. Duan, M. C. Wang, Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide-cement composite, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 58, No. 1, pp. 140-147, 2015.
- [۲۰] E. Horszczaruk, E. Mijowska, R. J. Kalenczuk, M. Aleksandrak, S. Mijowska, Nanocomposite of cement/graphene oxide-Impact on hydration kinetics and Young's modulus, *Construction and Building Materials*, Vol. 78, No. 1, pp. 234-242, 2015.
- [۲۱] Z. Lu, D. Hou, L. Meng, G. Sun, C. Lu, Z. Li, Mechanism of cement paste reinforced by graphene oxide/carbon nanotubes composites with enhanced mechanical properties, *RSC Advances*, Vol. 5, No. 122, pp. 100598-100605, 2015.
- [۲۲] Lv, Shenghua, et al. "Effect of graphene oxide nanosheets on microstructure and mechanical properties of cement composites." *Construction and building materials* 49 (2013): 121-127.
- [۲۳] BS EN 1008, British standard for mixing water for concrete. Specification for sampling, testing and assessing the suitability of water, including water recovered from processes in the concrete industry, as mixing water for concrete, British Standard Institution, London (2002).
- [۲۴] Saez de Ibarra, Y., et al. "Atomic force microscopy and nanoindentation of cement pastes with nanotube dispersions." *Physica Status solidi (a)* 203.6 (2006): 1076-1081.
- [۲۵] Han, B. G., X. C. Guan, and J. P. Ou. "Application of ultrasound for preparation of carbon fiber cement-based composites." *Mater. Sci. Technol* 17.3 (2009): 368-372.
- [۲۶] ASTM C31/C31M-15ae1, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
- [۲۷] Li, Wengui, et al. "Effects of graphene oxide on early-age hydration and electrical resistivity of Portland cement paste." *Construction and Building Materials* 136 (2017): 506-514.
- [۲۸] Mohammed, A., et al. "Incorporating graphene oxide in cement composites: A study of transport properties." *Construction and Building Materials* 84 (2015): 341-347.
- [۲۹] Hou, Dongshuai, and Zongjin Li. "Molecular dynamics study of water and ions transported during the nanopore calcium silicate phase: case study of jennite." *Journal of materials in civil engineering* ۲۶/۵ (2014): 930-940.
- [۳۰] Neville, Adam M. *Properties of concrete*. 5th ed. England: Pearson Education Limited; 2011.
- [۳۱] M. Naderi, Registration of Patent in Companies and industrial property Office, "Determination of concrete, stone, mortar, brick and other construction materials permeability with cylindrical chamber method." , in, Reg, 2010.
- [۳۲] M. Naderi, A. Kaboudan, Cylindrical Chamber: A New In Situ Method for Measuring Permeability of Concrete with and without Admixtures, *Journal of Testing and Evaluation*, 48(3) (2020).
- [۳۳] Li, Xiangyu, et al. "Effects of graphene oxide agglomerates on workability, hydration, microstructure and compressive strength of cement paste." *Construction and Building Materials* 145 (2017): 402-410.
- [۳۴] Long, Wu-Jian, et al. "Dynamic mechanical properties and microstructure of graphene oxide nanosheets reinforced cement composites." *Nanomaterials* 7.12 (2017): 407.