



ارزیابی مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن مسلح به گرافن اکساید با به به کارگیری نتایج حاصل از روش "محفظه استوانه ای"

مهنا صفرخانی، محمود نادری*

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۲۳
بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۱۶
پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۶
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۱۱/۰۸

کلمات کلیدی:

گرافن اکساید
نفوذپذیری
فشار هیدرواستاتیکی
جهت بتن ریزی
ناهمسانگردی

خلاصه: نفوذپذیری را می‌توان از مؤثرترین عوامل کنترل کننده مقاومت و دوام بتن دانست. نفوذپذیری آب در مواد سیمانی تحت تأثیر عوامل داخلی شامل نوع شبکه‌بندی متخلخل مواد سیمانی و عوامل خارجی از جمله فشار اعمالی است. در پژوهش حاضر تأثیر گرافن اکساید بر میزان جذب آب اولیه و ثانویه ملات سیمان، اثر اعمال فشار هیدرواستاتیکی بر نفوذپذیری بتن مسلح به گرافن اکساید (GO) در دو جهت بتن ریزی و عمود بر آن با به کارگیری روش "محفظه استوانه‌ای" و همچنین تأثیر این نانو ذرات بر مقاومت فشاری و ناهمسانگردی مقاومت نمونه‌های بتنی بررسی شده است. یکی از دلایل مهم عدم استفاده از گرافن در کامپوزیت‌های سیمانی، آبریز بودن آن بوده که باعث توزیع نامناسب گرافن در ساختار می‌گردد. خواص آبریزی گرافن به واسطه پروسه عامل دار کردن شیمیایی و یا پوشش فیزیکی می‌تواند به خواص آب‌دوستی تبدیل شود. نتایج نشان می‌دهد که افزودن مقدار کمی گرافن اکساید می‌تواند باعث کاهش در جذب آب موئینه ملات سیمان و همچنین کاهش در میزان نفوذپذیری بتن در دو جهت بتن ریزی و عمود بر آن شود. در واقع با افزودن این نانو ذرات می‌توان مشخصه‌های انتقال آب در بتن و متعاقب آن دوام بتن را بهبود بخشید. همچنین نتایج مقاومت فشاری بتن حاکی از آن است که استفاده از این ذرات در مخلوط بتن می‌تواند باعث افزایش در مقاومت فشاری و کاهش ناهمسانگردی در مقاومت نسبت به نمونه کنترل شود. این موضوع را می‌توان به دلیل جهت‌گیری تصادفی ورق‌های گرافن اکساید در حجم بتن دانست.

مختلف جهان در حال انجام است. مطالعات نشان داده است که نانو ذرات SiO_2 و TiO_2 می‌توانند باعث بهبود ساختار خمیر سخت شده‌ی سیمان شوند [۳]. هی^۱ و همکاران نشان دادند که وجود نانو ذراتی بر پایه‌ی کربن در مخلوط سیمانی می‌تواند باعث افزایش مقاومت نفوذ در مقابل کلراید و یون‌ها شود [۴].

همزمان با پیشرفت تکنولوژی نانو، نانو فیبرهایی با عملکرد فوق‌العاده، نظیر نانو لوله‌های کربنی و ذرات گرافن اکساید (GO)^۲ تولید شده است که می‌توانند باعث بهبود عملکرد مواد بر پایه‌ی سیمانی شوند. به عنوان مثال نانو لوله‌های کربنی به عنوان افزودنی کامپوزیت‌های سیمانی، علاوه بر بهبود مشخصه‌های مکانیکی خمیر سخت شده‌ی سیمان از طریق کنترل ترک‌ها در مقیاس نانو [۵-۷]، می‌توانند باعث بهبود ساختار بتن در مقیاس میکرو و مشخصه‌های انتقال نیز شوند [۸]. در دهه‌های گذشته مطالعاتی نیز بر روی نانو ذرات گرافن اکساید انجام گرفته است [۹]. از خصوصیات

۱- مقدمه

در طراحی سازه‌های بتنی علاوه بر مقاومت کافی، دوام نیز می‌بایست مدنظر طراحان قرار گیرد. به عبارت دیگر یک سازه‌ی بتنی باید بتواند تحت شرایط محیطی و در طول عمر مفید خود، سرویس دهی کند. نفوذپذیری را می‌توان از مهم‌ترین پارامترها در کنترل مقاومت و دوام بتن دانست [۲ و ۱]. از مکانیزم‌های مختلف نفوذپذیری می‌توان به نفوذ آب در بتن در اثر جذب سطحی یا مکش موئینه و نفوذپذیری تحت فشار بیرونی اشاره کرد. در چند سال اخیر، فناوری نوظهور نانو امیدهای بسیاری برای بهبود خواص مختلف در جهان پدید آورده است. این فناوری، خواص مواد با اندازه‌ی دانه‌هایی در ابعاد ۱۰۰ نانومتر و چگونگی به کارگیری آن‌ها را مورد بحث قرار می‌دهد. از آنجایی که بسیاری از خواص بتن به عنوان یک ماده‌ی 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

1 He
2 Graphene Oxide

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: profmahmoodnaderi@eng.ikiu.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



این ذرات می‌توان به سطح ویژه‌ی زیاد و مقاومت بالای آن‌ها اشاره کرد. گرافن ساختاری دو بعدی داشته و از مجموعه اتم‌های کربن سازمان یافته در شبکه‌های شش ضلعی با هیبریداسیون sp^2 تشکیل شده است [۱۰]. مطالعات نشان می‌دهد که نانو ذرات گرافن اکساید می‌توانند باعث افزایش مقاومت‌های مکانیکی و چگال‌تر شدن ساختار شوند [۱۵-۱۱]. همچنین این نانو ذرات فرآیند هیدراسیون سیمان را بهبود بخشیده و بر روی ساختار حفرات در خمیر سخت شده‌ی سیمان تأثیرگذارند [۱۸-۱۶ و ۱۱].

از آزمایش‌های مربوط به دوام بتن می‌توان به آزمون‌های نفوذپذیری، جذب آب، مقاومت در برابر نفوذ کلرایدها، مقاومت در برابر سیکل‌های ذوب و یخ و ... اشاره کرد. محمد^۱ و همکاران نشان دادند که افزودن گرافن اکساید منجر به کاهش اندازه‌ی حفرات خمیر سخت شده‌ی سیمان شده و متعاقب آن مقاومت در برابر نفوذ کلرایدها افزایش می‌یابد [۱۳]. در مطالعه‌ای که به منظور بررسی رفتار ملات سیمان مسلح به گرافن و گرافن اکساید در شرایط حاد محیطی انجام گرفت، نشان داده شد که افزودن این نانو ذرات به مخلوط سیمانی می‌تواند باعث بهبود مشخصه‌های دوام از جمله مقاومت در برابر سرما و سیکل‌های ذوب و یخ شود [۱۹]. در مطالعه دیگری نشان داده شد که افزودن گرافن، مقاومت ملات سیمان در برابر نفوذ کلرایدها را بین ۷۰-۳۰٪ نسبت به نمونه‌ی کنترل افزایش داده که این مقادیر بیشتر از مقادیر متناظر در کامپوزیت‌های سیمانی حاوی ذرات کروی با اندازه نانو مانند TiO_2 و SiO_2 می‌باشند [۲۰]. در مطالعه‌ای که به بررسی تأثیر گرافن اکساید در مشخصه‌های انتقال کامپوزیت‌های سیمانی پرداخته شده، نشان داده شد که مقاومت الکتریکی در سن ۲۴ ساعته‌ی نمونه‌ها افزایش یافته [۲۱] و نفوذ کلرایدها در سن ۲۸ روز کاهش پیدا کرده است [۱۳]. کیانگ^۲ و همکاران نشان دادند که استفاده از نانو صفحات گرافن در ملات سیمان به عنوان پرکننده‌ی رسانایی، از نظر مقاومت الکتریکی در شرایط خشک شدگی طبیعی و خشک شدگی کوره، عملکرد بهتری در مقایسه با گرافن اکساید دارند. همچنین نشان داده شد که ملات دارای ۶/۴٪ گرافن دارای مقاومت الکتریکی پایدار بوده و میزان گرافن کمتر (۳/۲٪) یا بالاتر (۱۲/۸٪) منجر به مقاومت الکتریکی یا پیژومقاومتی ناپایدار می‌شود [۲۲].

مطالعات نشان می‌دهد که تأثیر گرافن و گرافن اکساید بر مقاومت کامپوزیت‌های سیمانی تحت تأثیر کارایی است. انتخاب نسبت‌های کم آب به سیمان که منجر به کارایی ضعیف بتن می‌شود، ممکن است مانع پراکندگی یکنواخت ذرات نانو گرافن در خمیر سیمان شود؛ بنابراین، ساختار

1 Mohammed
2 Qiong

بتن در مقیاس میکرو به درستی تقویت نمی‌شود. در حالی که در نسبت‌های بالای آب به سیمان نیز به دلیل متخلخل بودن میکرو ساختار بتن ناشی از میزان بالای آب، عملکرد این نانو ذرات مختل می‌شود [۲۲]. مطالعات نشان داده است که افزودن گرافن اکساید به سیمان می‌تواند در خواص مکانیکی و جلوگیری از انتشار ترک نقش مؤثری ایفا نماید. نتایج بررسی‌های دوی^۳ و همکاران بر روی بتن مسلح به گرافن اکساید حاکی از افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های مسلح نسبت به نمونه کنترل بوده است [۲۳]. در مطالعه‌ای لین^۴ و همکاران نشان دادند که گرافن اکساید همانند کاتالیزور عمل کرده و باعث تسریع در فرآیند هیدراسیون سیمان می‌شود [۲۴]. هورزاروک^۵ و همکاران با افزودن گرافن اکساید به مقدار ۰/۰۳٪ وزنی سیمان توانستند مدول ینگ سیمان را به طور چشم‌گیری افزایش دهند [۱۶]. لو^۶ و همکاران نشان دادند که افزودن گرافن اکساید به ملات سیمان به میزان ۰/۰۳٪ وزنی سیمان، باعث افزایش مقاومت فشاری و کششی به ترتیب تا ۳۴/۳٪ و ۵۲/۴٪ می‌شود [۱۷].

نفوذپذیری آب در مواد سیمانی تحت تأثیر عوامل داخلی و خارجی است؛ عوامل داخلی شامل نوع شبکه‌بندی متخلخل مواد سیمانی مانند تخلخل، پیچ و خم و انحناء، توزیع سنگدانه‌ها و میکروتورک‌ها بوده و از عوامل خارجی می‌توان به فشار اعمالی اشاره کرد. تاکنون مطالعاتی بر روی جذب آب کامپوزیت‌های سیمانی مسلح به گرافن اکساید (آزمون نفوذپذیری تحت فشار صفر) و همچنین مقاومت آن‌ها در برابر نفوذ کلرایدها انجام گرفته است. از آنجا که دوام سازه‌های بتنی به طور قابل ملاحظه‌ای به نفوذپذیری آن‌ها بستگی داشته و با توجه به کمبود مطالعات در این زمینه بر روی بتن مسلح به گرافن اکساید، در این پژوهش تأثیر گرافن اکساید بر روی جذب آب و نفوذپذیری بتن تحت فشارهای هیدرواستاتیکی متفاوت مورد بررسی قرار می‌گیرد. روند کار به این صورت است که نمونه‌های ملات سیمان و بتن با درصدهای متفاوت گرافن اکساید، تحت آزمایش جذب آب و نفوذپذیری تحت فشارهای هیدرواستاتیکی متفاوت و در دو جهت بتن‌ریزی و عمود بر آن قرار گرفته و ارزیابی می‌شوند. آزمون‌های نفوذپذیری با استفاده از دستگاه "محفظه استوانه‌ای" انجام گرفته‌اند [۲۵]. از مزایای این دستگاه می‌توان به هزینه‌ی ناچیز انجام آزمایش، دقت بالا و امکان انجام آزمایش در محل نام برد. همچنین به منظور بررسی رفتار مکانیکی بتن مسلح به گرافن اکساید و همچنین ناهمسانگردی در مقاومت، آزمون مقاومت

3 Devi
4 Lin
5 Horszczaruk
6 Lv

جدول ۱. ترکیب شیمیایی سیمان پرتلند تیپ II آبیک قزوین

Table 1. Chemical composition of OPC (%).

SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	نوع ترکیب
۱/۸۹	۰/۶۸	۳/۷	۳/۲۲	۶۲/۲۸	۳/۸۶	۴/۷۶	۲۰/۷۹	درصد وزنی

جدول ۲. مشخصات گرافن اکساید محصول شرکت نانوشل

Table 2. The properties of GO.

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

بر اساس استاندارد ASTM C136-06 [۲۶] صورت گرفت که در شکل ۱ مشاهده می‌شود. از سنگدانه‌های خشک با درصد جذب آب ۱/۵۴ و ۱/۷۵ به ترتیب برای شن و ماسه در ساخت نمونه‌ها استفاده گردید.

برخی رویکردهای فیزیکی و شیمیایی نظیر حمام اولتراسونیک و اصلاح سطح می‌توانند در پراکنش بهتر گرافن اکساید‌ها در آب مؤثر باشند [۱۷ و ۱۶]. در این مقاله، روش ترکیبی استفاده از حمام اولتراسونیک و فوق روان کننده‌ها مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۲ دستگاه حمام اولتراسونیک را نشان می‌دهد. پروسه‌ی آماده‌سازی و اختلاط نمونه‌ها مطابق با آیین‌نامه‌ی ASTM C311/C31M [۲۷] و به شرح زیر انجام پذیرفت:

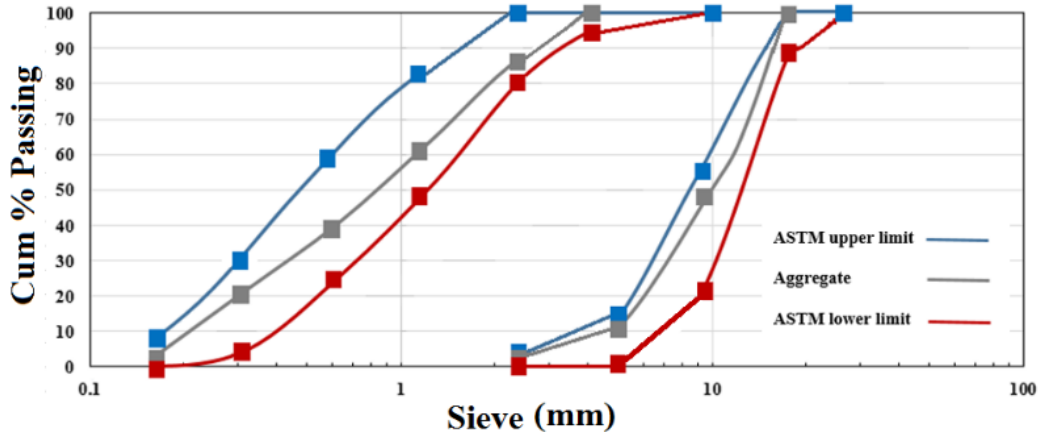
در مخلوط‌های دارای گرافن اکساید، این ذرات به مدت یک ساعت در دستگاه اولتراسونیک حمامی با آب طرح اختلاط پراکنش شدند. در ادامه مقدار بسیار کمی فوق روان کننده به محلول اضافه و به مدت ۲ دقیقه هم خورد. سپس سنگدانه‌ها درون مخلوط‌کن ریخته شده و کاملاً با یکدیگر مخلوط شدند. در ادامه آب لازم برای رسیدن به حالت SSD^۱ به مخلوط اضافه گردید. در همین زمان سیمان و سپس محلول نانو گرافن اکساید در حین اختلاط از درجه‌ی مخلوط‌کن به مخلوط اضافه شد. بلافاصله بعد از اختلاط، آزمون اسلامپ بر روی نمونه‌ها انجام شد. سپس قالب‌گیری و عملیات ماله‌کشی انجام گرفته و نمونه‌ها با گونی مرطوب پوشش داده شدند. در این مطالعه از قالب‌های مکعبی با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر مکعب استفاده شد. جزئیات طرح اختلاط نمونه‌های بتنی در جدول‌های ۳ و ۴ آورده شده است.

فشاری در دو جهت بتن‌ریزی و عمود بر آن بر روی نمونه‌های مکعبی با درصدهای متفاوتی از این نانو ذرات انجام گرفته است.

۲- روش تحقیق

سیمان مورد استفاده در این پژوهش سیمان پرتلند نوع II می‌باشد که خصوصیات شیمیایی آن در جدول ۱ آورده شده است. آب شرب شهر قزوین نیز به عنوان آب طرح اختلاط استفاده شده است. نسبت آب به سیمان برای تمامی نمونه‌ها ثابت و برابر ۰/۵ در نظر گرفته شده و مقادیر گرافن اکساید برای نمونه‌ها از ۰/۲-۰٪ وزنی سیمان متغیر است. همچنین به منظور پراکنش بهتر گرافن اکساید در محلول آبی، از فوق روان کننده بر پایه‌ی پلی کربوکسیل اصلاح شده به میزان ۰/۵٪ وزنی سیمان استفاده شده است. افزودن گرافن اکساید به مخلوط بتن باعث کاهش کارایی می‌شود. از آنجایی که کاهش کارایی مانع پراکندگی یکنواخت ذرات گرافن اکساید در حجم بتن شده و ساختار بتن در مقیاس میکرو به درستی تقویت نمی‌شود، طرح اختلاط‌های این مطالعه با هدف دستیابی به کارایی مطلوب و نزدیک به نمونه‌ی کنترل، تعیین شدند. با توجه به طرح اختلاط‌های مختلفی که مورد آزمایش قرار گرفت، با افزودن گرافن اکساید تا میزان ۰/۲٪ وزنی سیمان همراه با فوق روان کننده به میزان ۰/۵٪ وزنی سیمان، کاهش چشم‌گیری در کارایی بتن و همچنین جدا شدگی و آب انداختگی در نمونه‌ها که نتایج آزمایش‌ها را تحت تأثیر قرار بدهد، مشاهده نشد. مشخصه‌های اصلی گرافن اکساید را می‌توان در جدول ۲ مشاهده کرد. دانه‌بندی سنگدانه‌ها

1 Saturated Surface Dry (SSD)



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ها

Fig. 1. Granulation curve of aggregates.



(ب) دستگاه حمام اولتراسونیک
(b) Ultrasonic treatment



(الف) نمونه‌های پودر گرافن اکساید توزین شده
(a) GO powder

شکل ۲. آماده‌سازی گرافن اکساید

Fig. 2. Preparation of GO.

جدول ۳. طرح اختلاط نمونه‌های بتن برای آزمون نفوذپذیری

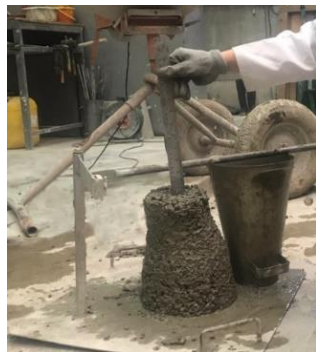
Table 3. Mix proportion of concrete samples for permeability test.

GO (درصد وزنی سیمان %)	شن (kg/m ^۳)	ماسه (kg/m ^۳)	سیمان (kg/m ^۳)	Mix No.
۰	۹۰۰	۱۱۰۰	۴۵۵	C0
۰/۰۲۵	۹۰۰	۱۱۰۰	۴۵۵	CGO-0.025
۰/۰۵	۹۰۰	۱۱۰۰	۴۵۵	CGO-0.05
۰/۱	۹۰۰	۱۱۰۰	۴۵۵	CGO-0.1
۰/۲	۹۰۰	۱۱۰۰	۴۵۵	CGO-0.2

جدول ۴. طرح اختلاط نمونه‌های بتن برای آزمون مقاومت فشاری

Table 4. Mix proportion of concrete samples for compressive strength test.

GO (درصد وزنی سیمان %)	شن (kg/m ^۳)	ماسه (kg/m ^۳)	سیمان (kg/m ^۳)	Mix No.
۰	۹۰۰	۱۱۰۰	۴۵۵	C0
۰/۰۳	۹۰۰	۱۱۰۰	۴۵۵	CGO-0.03
۰/۰۵	۹۰۰	۱۱۰۰	۴۵۵	CGO-0.05
۰/۱	۹۰۰	۱۱۰۰	۴۵۵	CGO-0.1
۰/۲	۹۰۰	۱۱۰۰	۴۵۵	CGO-0.2



(ج) اندازه‌گیری اسلامپ
(c) measuring slump



(ب) برداشتن مخروط
(b) removing the cone



(الف) دستگاه آزمون اسلامپ
(a) Slump test device

شکل ۳. آزمون اسلامپ

Fig. 3. Slump test.

۳-۲- آزمون جذب آب موئینه

همان‌طور که بیان شد، نفوذ و جذب دو نوع مکانیزم انتقال در مواد سیمانی هستند. نفوذ را می‌توان به صورت حرکت آب در مواد به دلیل وجود گرادیان فشار در حالت اشباع تعریف کرد. در حالی که جذب به پروسه بالا رفتن آب به وسیله مکش موئینه تحت شرایط نیمه اشباع گفته می‌شود. در این آزمون مطابق با EN480-5 [۲۹] نمونه‌های منشوری ملات با نسبت ماسه به سیمان ۳ و با ابعاد ۴۰ × ۴۰ × ۱۶۰ میلی‌متر مکعب در داخل اوان در دمای ۵۰ °C خشک شده تا اختلاف وزن نمونه بیشتر از ۰/۱٪ نباشد. سپس، نمونه‌ها در داخل ظرف آب به نحوی که ۳ میلی‌متر از کف آن‌ها در

۳- تجهیزات آزمایشگاهی

۳-۱- آزمون اسلامپ

به منظور اندازه‌گیری روانی مخلوط‌ها، آزمون اسلامپ مطابق با استاندارد ASTM انجام گرفت [۲۸]. شکل ۳ دستگاه آزمون اسلامپ را نشان می‌دهد. این دستگاه شامل یک مخروط ناقص با قطر کوچک ۱۰۰ میلی‌متر، قطر بزرگ ۲۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر می‌باشد. بعد از اختلاط مصالح، بتن تازه در سه لایه داخل مخروط ریخته و هر لایه با ۲۵ ضربه متراکم شد. سپس مخروط به آرامی برداشته شده و مقدار اسلامپ اندازه‌گیری شد.



(ب) صفحه فلزی چسبانده شده روی نمونه مکعبی
(b) Metal plate glued on the cubic sample



(الف) اجزای مختلف دستگاه
(a) Different components of the device

شکل ۴. مشخصات دستگاه "محفظه استوانه‌ای"

Fig. 4. Specifications of the "cylindrical chamber" device.

۳-۳- اندازه‌گیری نفوذپذیری به روش دستگاه "محفظه استوانه‌ای"
اندازه‌گیری نفوذپذیری با روش‌های مرسوم، نیازمند صرف زمان زیاد و استفاده از تجهیزات گوناگون می‌باشد. 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 [۲۵]. این دستگاه به نام دستگاه "Cylindrical chamber" در دنیا شناخته شده است. شکل ۴ دستگاه محفظه استوانه‌ای را نشان می‌دهد. روند کار به این صورت است که پس از زدودن سطح نمونه از آلودگی توسط برس سیمی، صفحه زیرسری توسط چسب اپوکسی بر روی سطح نمونه چسبانده می‌شود. بسته به نوع چسب و مدت زمان عمل‌آوری، مدت زمان سخت شدن متفاوت است. پس از سخت شدن چسب، دستگاه آزمایش بر روی صفحه‌ی زیرسری سوار می‌شود و با چرخاندن دسته تنظیم فشار و پائین آمدن پیستون دستگاه، فشار اعمالی روی مقدار مورد نظر تنظیم می‌گردد. با گذشت زمان به دلیل وجود اصطکاک داخلی و خاصیت گرانیروی مایع از مقدار فشار اعمالی کاسته شده که با چرخاندن مجدد دسته تنظیم فشار می‌توان مقدار فشار اعمالی را در طول آزمایش روی یک مقدار ثابت تنظیم کرد. مقدار نفوذ آب به بتن را می‌توان از طریق میکرومتر تعبیه شده بر روی دستگاه، در زمان‌های مختلف قرائت کرد. مقدار حجم آب نفوذ کرده در نمونه در هر لحظه از طریق حاصل ضرب مقدار قرائت شده از میکرومتر در مساحت سطح مقطعی که فشار به آن وارد شده است، محاسبه می‌شود. همچنین با استفاده از حجم آب نفوذ

داخل آب بوده و آب از قسمت پایین نمونه امکان نفوذ داشته باشد، قرار می‌گیرند. به منظور جلوگیری از تبخیر سطحی در طول آزمایش و کاهش خطا، نمونه‌ها با استفاده از پوشش پلاستیک پوشانده شدند. وزن نمونه‌ها در زمان‌های ۰/۵، ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۲ ساعت و روز اول تا هشتم بعد از شروع آزمون اندازه‌گیری می‌شود. با تعیین تغییر وزن نمونه‌ها مطابق با رابطه‌ی زیر جذب موئینه قابل محاسبه است:

$$C = \frac{M_j - M_0}{1600} \quad (1)$$

به طوری که M_j جرم نمونه بعد از جذب موئینه (gr)، M_0 جرم اولیه نمونه بعد از عمل‌آوری هفت روزه (gr) و C جذب موئینه می‌باشد. از دیگر نتایجی که از آزمایش جذب موئینه می‌توان به دست آورد، ضریب جذب موئینه است. به طور کلی منحنی تغییرات وزن نمونه در مقابل زمان یک منحنی غیرخطی است. با این حال در صورتی که تغییرات وزن نمونه در مقابل جذر زمان رسم شود، می‌توان یک خط را بین نقاط مربوطه برازش داد. جذب آب موئینه به عنوان تابعی از زمان را می‌توان مطابق با رابطه (۲) بیان کرد:

$$C = S\sqrt{t} \quad (2)$$

به طوری که S ، ضریب جذب موئینه است.



(ج) آزمایش مقاومت فشاری

(c) Compressive strength test



(ب) آزمایش نفوذپذیری

(b) Penetration test setup



(الف) آزمایش جذب آب موئینه

(a) Capillary absorption test

شکل ۵. آزمایش‌های انجام شده

Fig. 5. Tests.

۴- بررسی نتایج آزمایشگاهی

۴-۱- مشخصات گرافن اکساید

به منظور بررسی گروه‌های عاملی بر روی صفحات گرافن اکساید آنالیز فوریه (FT-IR) انجام گرفت، شکل ۶-الف. نتایج، وجود گروه‌های عاملی اکسیژن-کربن را در نانو صفحه‌ی گرافن اکساید تأیید کرد. پیک‌های 1047 cm^{-1} ، 1387 cm^{-1} ، 1625 cm^{-1} ، 1722 cm^{-1} به ترتیب به گروه‌های عاملی C-O، اپوکسی C-O-C، آلکولی C-O-H، کربن‌های آروماتیک $\text{C}=\text{C}$ ، $\text{C}=\text{O}$ از گروه کربوکسیلیت اسید مربوط می‌باشد. همچنین پیک پهن متعلق به گروه‌های OH و آب جذب شده روی سطح در ناحیه 3422 cm^{-1} قابل مشاهده است. وجود این گروه‌های عاملی اکسیژن خاصیت آب‌دوستی به گرافن اکساید داده و باعث پراکنش بهتر در محلول آبی طرح اختلاط می‌شود.

شکل ۶-ب طیف رامان گرافن اکساید را نشان می‌دهد. مطابق شکل، طیف رامان گرافن اکساید دو پیک اصلی را در 1273 cm^{-1} (باند D) و 1585 cm^{-1} (باند G) نشان می‌دهد که به ترتیب به حالت‌های دایاموند^۱ و گرافیت^۲ مربوط می‌باشد. نسبت شدت باند D به شدت باند G سطح اختلال گرافن را بیان می‌کند که این نسبت شدت برای نمونه‌ی سنتزی حدود 0.93 به دست آمده است.

کرده در نمونه و مدت زمان سپری شده از شروع آزمایش، نرخ نفوذ آب در نمونه قابل محاسبه است. با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی موجود برای اندازه‌گیری نفوذپذیری نمونه‌های بتنی مانند روش ذکر شده در استاندارد بریتانیا و بدون تعبیه‌ی تجهیزات جانبی اضافی، نمی‌توان پارامترهای مذکور را محاسبه کرد که این موضوع از مزیت‌های روش "محفظه استوانه‌ای" است.

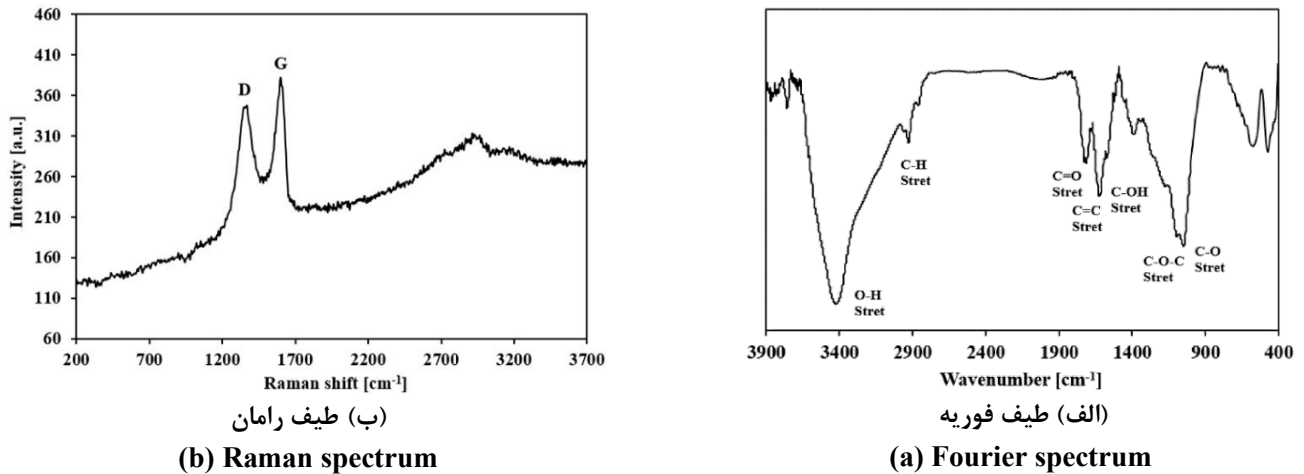
این آزمایش قابلیت انجام روی سطوح افقی (دال‌ها و عرشه‌ی پل) و عمودی (ستون‌ها) را دارد. از دیگر مزایای این روش می‌توان به سادگی دستگاه، دقت بالای نتایج، سرعت انجام آزمایش بالا و قابلیت ارزیابی نفوذپذیری سازه در محل اشاره کرد [۳۰].

۳-۴- اندازه‌گیری مقاومت فشاری

تعیین مقاومت فشاری هر یک از نمونه‌های بتن بر اساس استاندارد ASTM [۳۱] انجام شد. روند آزمایش به این صورت است که بعد از تمیز کردن سطوح نمونه‌ها و صفحه‌ی زیرین دستگاه با برس سیمی، نمونه به طور مرکزی در صفحه‌ی اصلی و زیر جک دستگاه، قرار داده می‌شود. بار به تدریج و بدون شوک توسط جک به نمونه اعمال می‌شود. حداکثر بار ثبت شده و منحنی تنش-کرنش توسط دستگاه قابل محاسبه است. به منظور کاهش خطا در هر آزمایش، حداقل سه نمونه آزمایش شده و با میانگین‌گیری از نتایج آزمون‌ها، مقاومت فشاری بتن تعیین شد. همچنین نتایج نمونه‌هایی که استحکام آن‌ها بیش از ۱۵ درصد از میانگین مقاومت متغیر بودند، رد شدند. در شکل ۵، آزمایش‌های شرح داده شده نشان داده شده است.

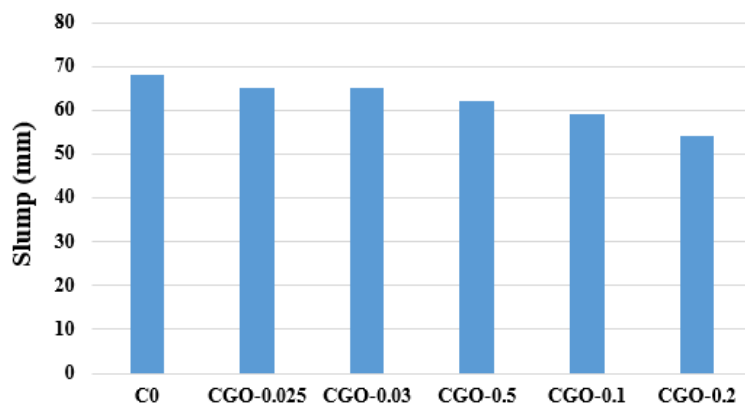
1 Fourier Transform Infrared

2 Diamod



شکل ۶. نتایج آنالیز گرافن اکساید

Fig. 6. Graphene oxide analysis results.



شکل ۷. نتایج آزمون اسلامپ

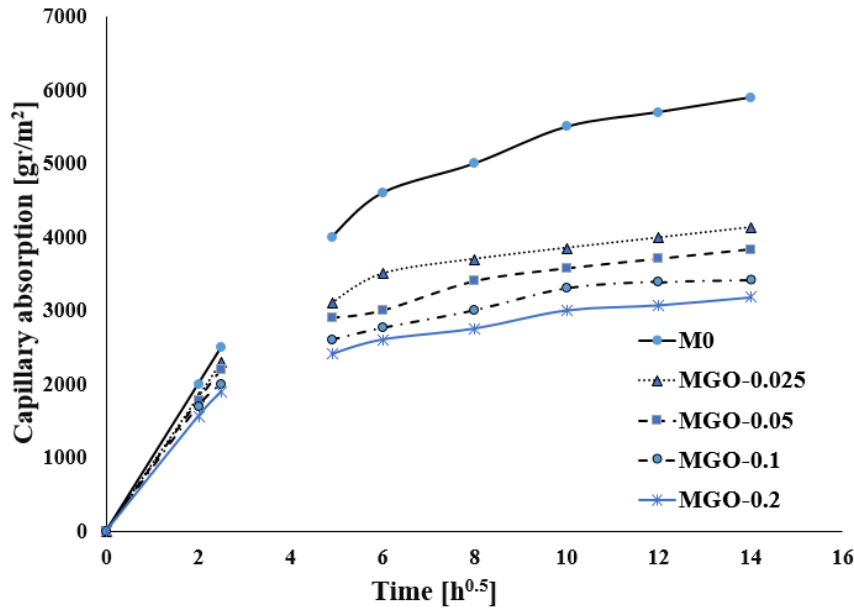
Fig. 7. Slump test results.

گرافن اکساید و ذرات سیمان و پدیده‌ی آگلومراسیون^۱ محصور می‌شوند. به همین دلیل با افزایش در میزان گرافن اکساید اسلامپ بتن کاهش می‌یابد. مقدار اسلامپ در نمونه‌ی کنترل ۶۸ میلی‌متر و در نمونه‌ی حاوی ۰/۲٪ وزنی سیمان گرافن اکساید، ۵۴ میلی‌متر به دست آمد. در طرح اختلاط در نظر گرفته شده در این مطالعه با افزودن فوق روان کننده سعی شده است اسلامپ نمونه‌های مسلح به گرافن اکساید کاهش چشم‌گیری نداشته باشند. زیرا کاهش روانی باعث عدم پراکنش گرافن اکساید در تمام حجم بتن شده و عملکرد آن را مختل می‌سازد.

۴-۲- روانی

آزمون اسلامپ به منظور اندازه‌گیری روانی نمونه‌های بتن انجام شد. نتایج آزمون در شکل ۷ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار اسلامپ با افزایش در میزان گرافن اکساید کاهش می‌یابد. نتایج مطالعات نیز حاکی از کاهش روانی و افزایش ویسکوزیته با افزایش در میزان گرافن اکساید است [۳۲]. سطح ویژه بالای گرافن اکساید و همچنین گروه‌های عاملی آب‌دوست آن منجر به جذب آب بتن به سطح این نانو صفحات شده و مولکول‌های آب به دلیل اندرکنش الکترواستاتیکی بین

1 Agglomeration



شکل ۸. جذب آب موئینه در نمونه‌های منشوری

Fig. 8. Capillary water absorption in prismatic samples.

منظور محاسبه‌ی ضریب جذب آب اولیه و ثانویه‌ی نمونه‌ها، رگرسیون خطی بر روی نتایج انجام شد (جدول ۵). ملاحظه می‌شود که ضریب همبستگی R^2 تمام نمونه‌های بتنی بیشتر از ۰/۹ بوده که بیانگر دقت بالای توابع رگرسیون می‌باشد. کاهش در جذب آب موئینه را می‌توان به بهبود ساختار منافذ موئینه و موانع تشکیل شده توسط ذرات گرافن اکساید که منجر به شکل‌گیری مسیرهای پریپیچ و خم‌تری جهت حرکت آب می‌شود، نسبت داد [۳۴].

۴-۴-۴ مشخصه‌های نفوذپذیری

به منظور بررسی تأثیر نانو ذرات گرافن اکساید بر روی نفوذپذیری بتن تحت فشارهای هیدرواستاتیکی مختلف، آزمون نفوذپذیری بر روی نمونه‌های بتنی انجام شد. نتایج حجم نفوذ آب برحسب میلی‌لیتر برای نمونه‌های کنترل و بتن مسلح به ۰/۱٪ وزنی سیمان گرافن اکساید تحت فشارهای هیدرواستاتیکی مختلف، در شکل ۹ آورده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، افزودن مقادیر کمی از گرافن اکساید می‌تواند منجر به کاهش حجم نفوذ آب در بتن در مقایسه با نمونه‌های کنترل شود. به طوری که در پایان ۳۰۰ دقیقه و در فشار ۰/۹۵ مگاپاسکال حجم نفوذ آب در

۴-۳-۳ مشخصه‌های جذب آب و نفوذپذیری

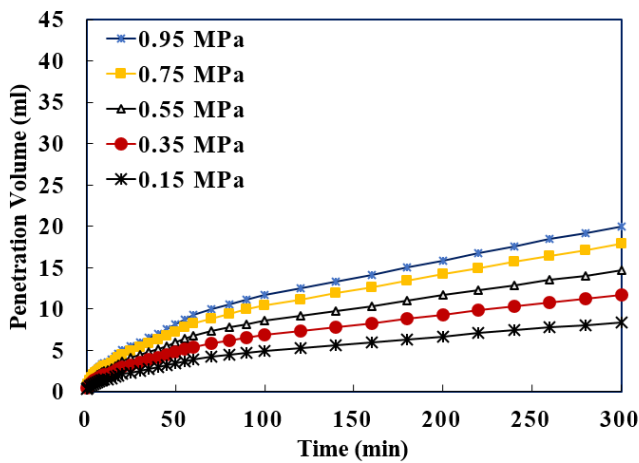
۴-۳-۱-۱ جذب آب موئینه

فرآیند جذب آب موئینه شامل دو مرحله‌ی اصلی اولیه و ثانویه است. در واقع جذب آب اولیه بیانگر میزان سرعت پر شدن منافذ بزرگ از آب بوده و جذب آب ثانویه نشان دهنده‌ی سرعت پر شدن آب در فضاهای خالی هوا است [۳۳]. در شکل ۸ منحنی جذب موئینه هر یک از نمونه‌ها برحسب زمان نشان داده شده است. نمونه‌ی کنترل با "M₀" و نمونه‌های حاوی گرافن اکساید به صورت "(درصد وزنی سیمان)-MGO" نام‌گذاری شده‌اند. ضرایب جذب آب اولیه و ثانویه به ترتیب برابر با شیب منحنی در ۶ ساعت اول از زمان شروع آزمایش و از روز اول تا هشتم تعریف شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزودن گرافن اکساید منجر به کاهش جذب آب اولیه و ثانویه در نمونه‌ها شده است. به طوری که مقدار جذب آب اولیه در نمونه‌های حاوی گرافن اکساید به میزان ۰/۲۵٪ و ۰/۲٪ وزنی سیمان، به ترتیب ۰/۸٪ و ۰/۲۴٪ کاهش داشته است. نتایج میزان جذب آب ثانویه نیز حاکی از کاهش ۴۵-۵۹٪ در نمونه‌های حاوی گرافن اکساید در مقایسه با نمونه‌ی کنترل است. در واقع می‌توان گفت تأثیر نانو ذرات گرافن اکساید در کاهش جذب آب ثانویه‌ی نمونه‌ها در مقایسه با جذب آب اولیه‌ی آن‌ها، بیشتر بوده است. به

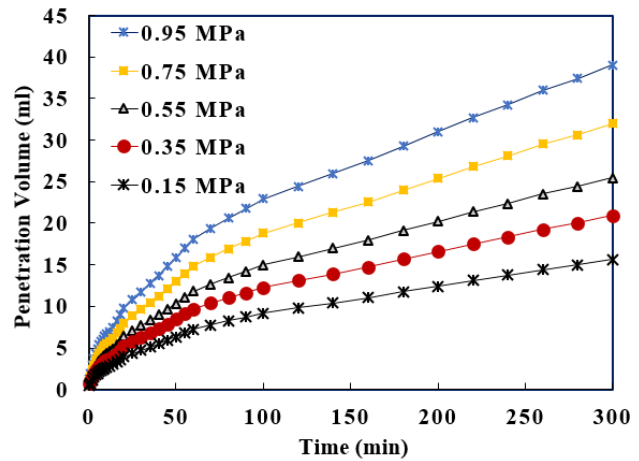
جدول ۵. ضریب جذب موئینه اولیه و ثانویه

Table 5. Primary and secondary capillary absorption coefficient.

$S_{\text{ثانویه}}$ [gr/h ^{۰.۵} . m ^۲]	R^2	رگرسیون > ۲۴h	$S_{\text{اولیه}}$ [gr/h ^{۰.۵} . m ^۲]	R^2	رگرسیون < ۶h	
۱۹۹/۳۵	۰/۹۳	$y=۱۹۹/۳۵x+۳۲۹۲/۶$	۱۰۰۰	۱	$y=۱۰۰۰x$	M0
۱۰۰/۸	۰/۹۱	$y=۱۰۰/۸x+۳۷۸۹$	۹۱۷/۴	۰/۹۹	$y=۹۱۷/۴x-۲/۴$	MGO-0.025
۱۰۵/۶	۰/۹۵	$y=۱۰۵/۶x+۲۴۳۶/۳$	۸۸۲/۹	۰/۹۹	$y=۸۸۲/۹x+۴/۵$	MGO-0.05
۹۴/۲	۰/۹۲	$y=۹۴/۲x+۲۲۱۴/۶$	۸۱۴/۳	۰/۹۸	$y=۸۱۴/۳x+۱۱/۹$	MGO-0.1
۸۲/۸	۰/۹۵	$y=۸۲/۸x+۲۰۸۱$	۷۶۶/۲۹	۰/۹۹	$y=۷۶۶/۲۹x+۵/۲$	MGO-0.2



(ب) نمونه حاوی ۰/۱٪ وزنی سیمان گرافن اکساید



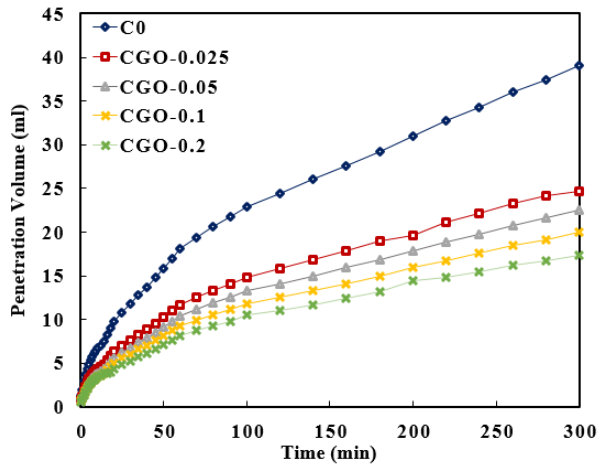
(الف) نمونه کنترل

شکل ۹. نمودار حجم آب نفوذی تحت فشار هیدرواستاتیک مختلف

Fig. 9. Diagram of penetrated water volume under different hydrostatic pressure.

به منظور بررسی تأثیر میزان گرافن اکساید بر روی نفوذپذیری بتن، نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف از این نانو ذرات تحت آزمایش نفوذ قرار گرفتند. شکل ۱۰ نمودار حجم نفوذ آب در نمونه‌های حاوی مقادیر مختلفی از گرافن اکساید تحت فشار هیدرواستاتیکی ثابت ۰/۳۵ و ۰/۹۵ مگاپاسکال را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود روند تغییرات حجم نفوذ آب با زمان برای نمونه‌ی کنترل و نمونه‌های حاوی گرافن اکساید، تقریباً یکسان هستند. برای مخلوط کنترل، فرآیند انتقال آب را می‌توان به دو مرحله تقسیم کرد. در ۷۰ دقیقه‌ی اول، حجم نفوذ آب به صورت خطی

نمونه‌ی کنترل ۳۹ میلی‌لیتر و در نمونه‌ی تقویت شده با ۰/۱٪ وزنی سیمان گرافن اکساید، ۲۰ میلی‌لیتر به دست آمد. این کاهش می‌تواند به دلیل ارتقاء فرآیند هیدراسیون و در نهایت تشکیل بتنی با ساختاری چگال‌تر و حفراتی ریزتر باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش فشار هیدرواستاتیکی از ۰/۱۵ تا ۰/۹۵ مگاپاسکال، آب بیشتری به نمونه‌ها نفوذ کرده و می‌توان بیان کرد که تأثیر اعمال فشار خارجی در مکانیسم‌های پیچیده‌ی انتقال برجسته‌تر می‌باشد. مشاهدات نشان می‌دهد که فشار خارجی می‌تواند نفوذ آب را تسریع کند، در حالی که حضور گرافن اکساید از میزان نفوذ می‌کاهد.



(ب) تحت فشار هیدرواستاتیک ثابت ۰/۹۵ مگاپاسکال

(b) under constant hydrostatic pressure of 0.95 MPa



(الف) تحت فشار هیدرواستاتیک ثابت ۰/۳۵ مگاپاسکال

(a) Under constant hydrostatic pressure of 0.35 MPa

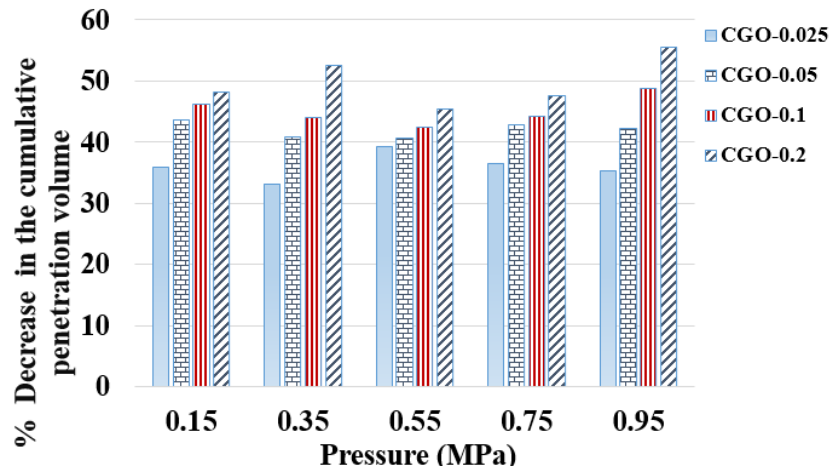
شکل ۱۰. نمودار حجم آب نفوذی برای نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف گرافن اکساید

Fig. 10. Graph of penetrated water for samples containing different amounts of graphene oxide.

نمودار نرخ جریان در نمونه‌های کنترل و نمونه‌های مسلح به گرافن اکساید در شکل ۱۲ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در ابتدای آزمایش آب با سرعت بیشتری در نمونه‌ها نفوذ کرده و با گذشت زمان از شروع آزمایش، به دلیل پر شدن بیشتر منافذ از آب، از سرعت نفوذ کم می‌شود (در این اشکال محور زمان به صورت لگاریتمی در آمده است). همچنین مشاهده می‌شود که نرخ جریان در نمونه‌های مسلح به گرافن اکساید کمتر از نمونه‌های کنترل می‌باشد. به عنوان نمونه در ابتدای آزمایش نرخ جریان نمونه‌ی کنترل در فشار ۰/۹۵ مگاپاسکال برابر با ۲/۵ میلی‌لیتر بر دقیقه بوده و در نمونه‌ی حاوی ۰/۱٪ وزنی سیمان گرافن اکساید، برابر با ۱/۳ میلی‌لیتر بر دقیقه محاسبه شد. این کاهش در نرخ جریان می‌تواند به دلیل بهبود فرآیند هیدراسیون و تشکیل بتنی با ساختار چگال‌تر و حفرات ریزتر باشد.

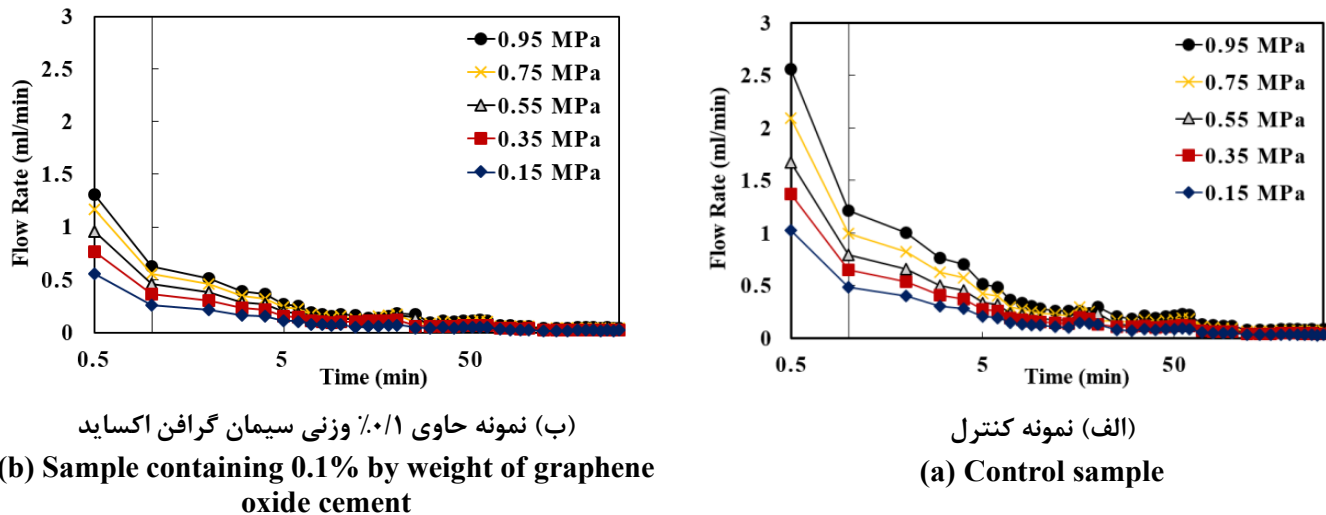
در ادامه تأثیر نانو ذرات گرافن اکساید بر میزان نفوذپذیری نمونه‌های بتنی در جهت عمود بر بتن‌ریزی مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۱۳ نسبت حجم نفوذ در جهت بتن‌ریزی به مقادیر متناظر در جهت عمود بر آن را نشان می‌دهد. مطابق شکل، حجم نفوذ در جهت بتن‌ریزی کمتر از حجم نفوذ در جهت عمود بر آن می‌باشد. از دلایل کم بودن نفوذپذیری در جهت بتن‌ریزی نسبت به جهت عمود بر آن، می‌توان به اثر وزن نمونه‌ها و همچنین عملیات متراکم کردن بتن در جهت بتن‌ریزی اشاره کرد. در واقع وزن و تراکم باعث قطع ارتباط برخی منافذ در جهت بتن‌ریزی شده و در نتیجه‌ی آن، نفوذپذیری

با زمان افزایش می‌یابد. سپس، سرعت نفوذ آب آرام شده و به تدریج از مرحله‌ی خطی خارج می‌شود و رابطه‌ی خطی دیگری با شیب کمتر را دنبال می‌کند. رویکرد انتقال آب در نمونه‌های حاوی گرافن اکساید با نمونه‌های کنترل یکسان بوده و تنها شیب نمودار در هر دو مرحله از شیب گراف نمونه‌های کنترل کمتر است. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، با افزایش در میزان گرافن اکساید، حجم کلی آب نفوذ کرده در بتن در پایان ۳۰۰ دقیقه کاهش یافته است. به طوری که در پایان آزمون و در فشار ثابت ۰/۳۵ مگاپاسکال حجم آب نفوذ کرده در نمونه‌ی کنترل (C۰) ۲۱ میلی‌لیتر، در نمونه‌ی حاوی ۰/۰۲۵٪ وزنی سیمان گرافن اکساید ۱۴ میلی‌لیتر، در نمونه‌ی حاوی ۰/۰۵٪ وزنی سیمان گرافن اکساید ۱۲/۵ میلی‌لیتر، در نمونه‌ی حاوی ۰/۱٪ وزنی سیمان گرافن اکساید ۱۱ میلی‌لیتر و در نمونه‌ی حاوی ۰/۲٪ وزنی سیمان گرافن اکساید ۹ میلی‌لیتر به دست آمد. از دلایل این کاهش می‌توان به تأثیر گرافن اکساید در خاصیت پراکندگی حفرات در سطح نانو ساختار بتن و متعاقب آن عدم اجازه‌ی نفوذ بیشتر مولکول‌های آب به ساختار اشاره کرد. شکل ۱۱ میزان درصد کاهش حجم نفوذ آب در نمونه‌های مسلح به گرافن اکساید نسبت به نمونه‌های کنترل را نشان می‌دهد. مطابق شکل، میزان درصد کاهش در حجم نفوذ آب تحت فشار هیدرواستاتیکی ۰/۳۵ مگاپاسکال در نمونه‌های با ۰/۰۲۵٪ و ۰/۲٪ وزنی سیمان گرافن اکساید به ترتیب ۳۳٪ و ۵۲٪ بوده و تحت فشار هیدرواستاتیکی ۰/۹۵ مگاپاسکال ۳۵٪ و ۵۵٪ می‌باشد.



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

Fig. 11. The amount of reduction in the volume of penetrated water in concrete samples reinforced with graphene oxide compared to the control samples.

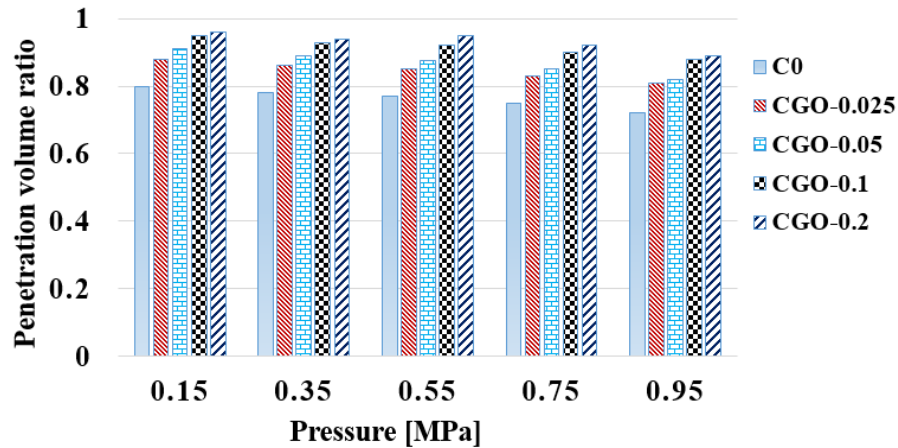


شکل ۱۲. نمودار نرخ جریان

Fig. 12. Flow rate diagram.

واقع می‌توان گفت به دلیل کاهش تخلخل در نمونه‌های تقویت شده، ارتباط منافذ نیز کمتر شده و عملیات تراکم و همچنین وزن نمونه‌ها تأثیر کمتری در قطع ارتباط برخی از این منافذ در جهت بتن‌ریزی داشته است. در نتیجه نسبت حجم آب نفوذی در جهت بتن‌ریزی به جهت عمود بر آن در مقایسه با نمونه‌های کنترل افزایش داشته است. این افزایش در نسبت و یا به عبارتی کاهش اختلاف میزان حجم نفوذ آب در دو جهت در نمونه‌های مسلح به گرافن اکساید برای تمامی فشارهای هیدرواستاتیک مشاهده می‌شود.

در این جهت کمتر از جهت عمود بر آن به دست آمده است. با توجه به شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که نسبت حجم نفوذ آب در جهت بتن‌ریزی به جهت عمود بر آن در نمونه‌های تقویت شده با گرافن اکساید بیشتر از مقادیر متناظر در نمونه‌های کنترل می‌باشد. به بیانی دیگر با افزودن گرافن اکساید از میزان اختلاف نفوذپذیری در دو جهت کم شده است. این نسبت برای نمونه‌ی کنترل و نمونه‌ی حاوی ۰/۱٪ وزنی سیمان گرافن اکساید تحت فشار هیدرواستاتیک ۰/۱۵ MPa، به ترتیب برابر با ۰/۸ و ۰/۹۴ بوده و تحت فشار هیدرواستاتیکی ۰/۹۵ MPa به ترتیب برابر با ۰/۷۲ و ۰/۸۹ می‌باشد. در



شکل ۱۳. نسبت حجم آب نفوذی در جهت بتن‌ریزی به جهت عمود بر آن

Fig. 13. The ratio of the volume of penetrated water in the direction of concreting to the direction perpendicular to it

جدول ۶. نتایج آزمون مقاومت فشاری

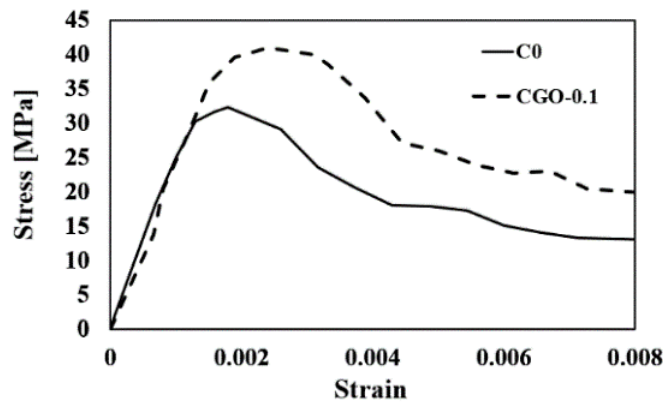
Table 6. Compressive strength test results.

افزایش در مقاومت فشاری ۹۰ روزه (%)	f_c ۹۰ روزه (MPa)	افزایش در مقاومت فشاری ۲۸ روزه (%)	f_c ۲۸ روزه (MPa)	Mix No.
-	۳۶	-	۳۲	C0
۲۷	۴۵/۷۲	۹/۷	۳۵/۱	CGO-0.03
۴۲/۲	۵۱/۲	۱۲/۲	۳۵/۹	CGO-0.05
۵۰	۵۴	۲۵/۶	۴۰/۲	CGO-0.1
۴۶/۶	۵۲/۸	۲۱/۶	۳۸/۹	CGO-0.2

۴-۵- ارزیابی مقاومت فشاری

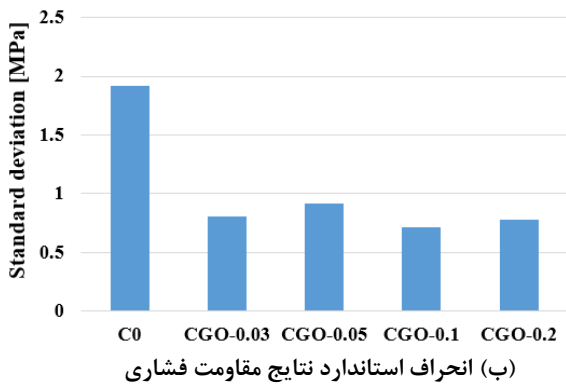
۲۵٪ در نمونه‌های ۲۸ روزه در مقایسه با نمونه‌های کنترل می‌شود. نتایج مقاومت فشاری ۹۰ روزه نمونه‌ها نیز حاکی از افزایش مقاومت فشاری تا ۵۰٪ در مقایسه با نمونه‌های کنترل است. همان‌طور که از نتایج پیداست افزایش در مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی گرافن اکساید در سن ۹۰ روز بیشتر از سن ۲۸ روزه‌ی آن‌ها می‌باشد. در مطالعه‌ای که توسط دوی^۱ بر روی مقاومت فشاری بتن مسلح به ۰/۰۸٪ وزنی سیمان گرافن اکساید و با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ انجام گرفته است، نیز افزایش مقاومت در سن ۹۰ روزه حدود ۲۷٪ بیشتر از سن ۲۸ روزه است [۲۳]. افزایش در مقاومت فشاری را می‌توان به دلیل تأثیر گرافن اکساید در بهبود فرآیند هیدراسیون سیمان که منجر به تشکیل بتنی با ساختار چگال‌تر و حفرات

به منظور ارزیابی تأثیر نانو ذرات گرافن اکساید بر روی مقاومت فشاری بتن و همچنین ناهمسانگردی در مقاومت، نمونه‌ها در دو جهت بتن‌ریزی و عمود بر آن تحت آزمون مقاومت فشاری قرار گرفتند. از آنجایی که مقاومت فشاری کامپوزیت‌های سیمانی به سن نمونه‌ها و یا به عبارتی به درجه‌ی هیدراسیون آن‌ها بستگی داشته، آزمون مقاومت فشاری روی نمونه‌ها در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه انجام گرفت. نتایج آزمون مقاومت فشاری در جهت بتن‌ریزی در جدول ۶ خلاصه شده است. نتایج حاکی از افزایش قابل توجه در مقاومت فشاری در نمونه‌های تقویت شده با ورق‌های گرافن اکساید نسبت به نمونه‌ی کنترل می‌باشد. مطابق با نتایج آزمایش، افزودن گرافن اکساید به بتن باعث افزایش مقاومت فشاری تا

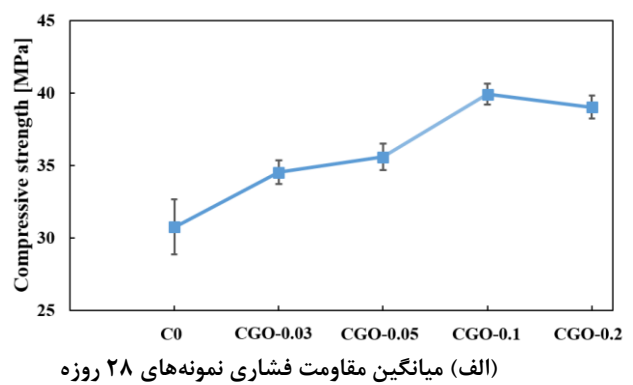


شکل ۱۴. نمودار تنش-کرنش تحت بارگذاری فشاری نمونه‌های بتن معمولی و بتن مسلح به گرافن اکساید در سن ۲۸ روز

Fig. 14. Stress-strain diagram under compressive loading of normal concrete samples and concrete reinforced with graphene oxide at the age of 28 days.



(b) Standard deviation of compressive strength



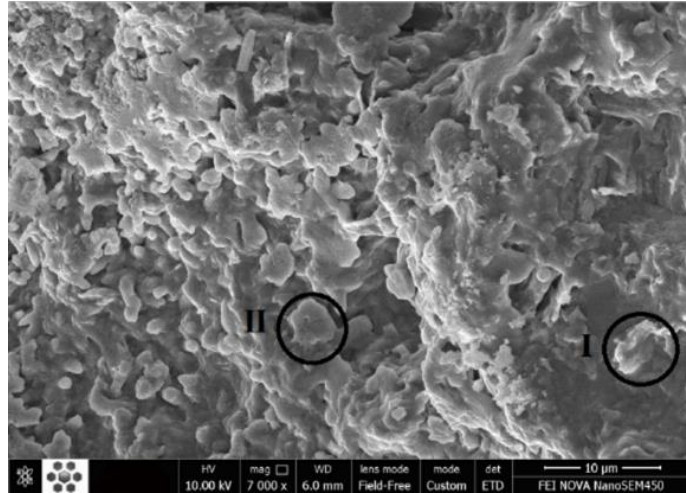
(a) Average compressive strength of 28-day samples

شکل ۱۵. مقاومت فشاری در جهت عمود بر بتن ریزی

Fig. 15. Strength results

میزان گرافن اکساید در خمیر سخت شده سیمان باشد [۱۷]. در واقع مطالعات شگوا^۲ و همکاران بروی عکس‌های SEM گرفته شده از کامپوزیت‌های سیمانی با درصدهای مختلف گرافن اکساید، نشان می‌دهد که میزان استفاده از این نانو ذرات در شکل کریستال‌های تشکیل یافته در مقیاس میکرو تأثیرگذار است. به طوری که با تغییر در میزان گرافن اکساید و متعاقب آن تغییر شکل کریستال‌ها، مقاومت‌ها دستخوش تغییر می‌شوند [۱۷]. لازم به ذکر است درصد وزنی گرافن اکسایدی که با گذر از آن مقاومت فشاری افزایش چندانی نداشته و یا حتی کاهش می‌یابد، در سنین عمل‌آوری مختلف و با تغییر در طرح اختلاط نمونه‌ها می‌تواند متفاوت باشد. به عنوان مثال در

ریزتر در بتن شده و همچنین خاصیت پل زدن این نانو ذرات به دلیل سطح تماس بالای آن‌ها و پیوندهای کوالانسی قوی در سطح تماس خمیر سخت شده و صفحات گرافن اکساید دانست [۲۳]. با بررسی بیشتر نتایج مشاهده می‌شود که در نمونه‌ی بتن با گرافن اکساید ۰/۲٪ مقاومت فشاری حدود ۳-۴٪ نسبت به نمونه حاوی ۰/۱٪ کاهش داشته است. با توجه به درصدهای پایین گرافن اکساید مصرفی و روانی مطلوب نمونه‌ها و همچنین نتایج عکس‌های SEM که حاکی از عدم تجمع نانو ذرات گرافن اکساید و پراکنش مطلوب آن‌ها در حجم بتن است، کاهش مقاومت می‌تواند به دلیل تغییر شکل کریستال‌های حاصل از فرآیند هیدراسیون سیمان با تغییر در



شکل ۱۶. عکس‌های SEM از بتن مسلح به گرافن اکساید ۰/۱٪ وزنی سیمان

Fig. 16. SEM pictures of concrete reinforced with graphene oxide 0.1% by weight of cement.

کاهش ناهمسانگردی مقاومت در نمونه‌های حاوی گرافن اکساید را می‌توان به دلیل جهت‌گیری تصادفی ورق‌های گرافن اکساید در بتن دانست.

۴-۶- مشخصات ساختار نمونه‌های بتن در مقیاس میکرو

مشخصات ساختار میکرو بتن توسط آنالیز SEM^۱ بررسی شد. تصویر SEM از سطح شکسته شده نمونه بتنی مسلح به ۰/۱٪ وزنی سیمان گرافن اکساید، در شکل ۱۶ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که به دلیل هندسه مسطح و پوشش سیمان بر روی نانو صفحات، شناسایی ورق‌های گرافن اکساید توسط آنالیز SEM بسیار چالش برانگیز است. با توجه به شکل ۱۶ و نتایج آنالیز المان در نواحی مختلف نمونه، پراکنش گرافن اکساید در حجم بتن به خوبی انجام گرفته و هیچ نشانی از تجمع و آگلومراسیون مشاهده نشد.

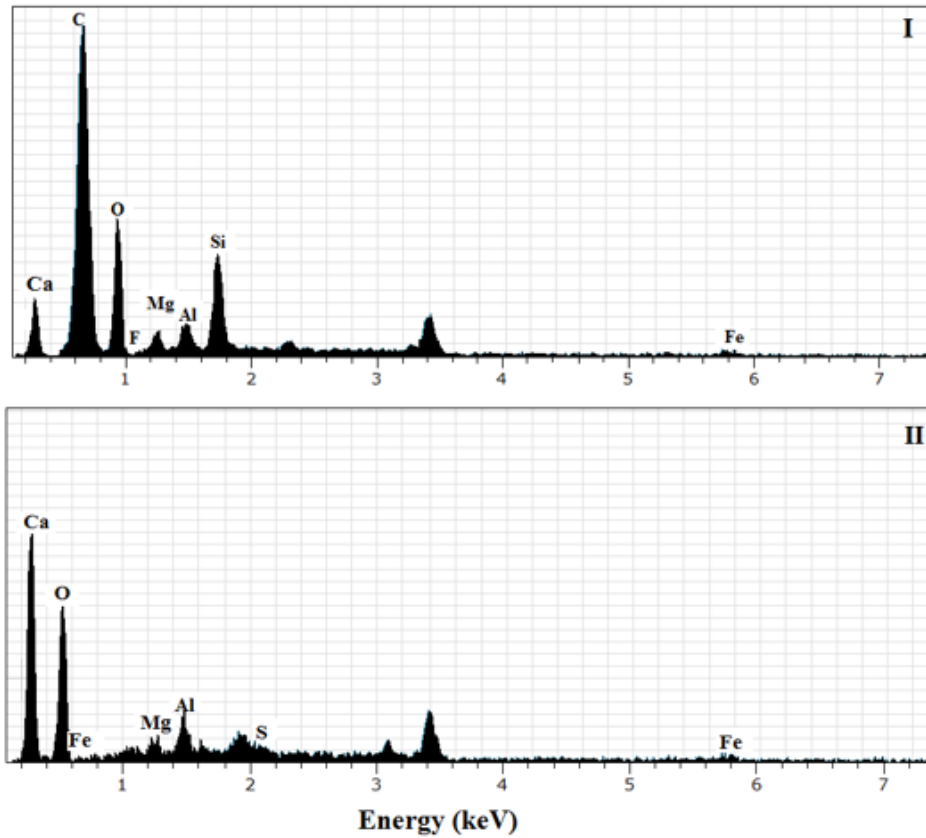
بر اساس خاصیت مورفولوژی گرافن اکساید و ساختار صفحه‌ای و تک لایه‌ی آن، ناحیه‌ی (I) می‌تواند حاوی این نانو ذرات باشد (شکل ۱۶). در ادامه با استفاده از تکنیک طیف‌سنجی پراکندگی انرژی (EDS)^۲، آنالیز المان در این ناحیه و همچنین در ناحیه‌ی (II) که احتمال می‌رفت فاقد گرافن اکساید باشد، انجام شد. در شکل ۱۷ و جدول ۷ نتایج به دست آمده آورده شده است. بر اساس مقادیر کربن، نانو ذره‌ی گرافن اکساید در ناحیه‌ی (I) شناسایی شد.

مطالعاتی که بر روی مقاومت فشاری بتن ۹۰ روزه با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ و ملات سیمان ۲۸ روزه با نسبت آب به سیمان ۰/۵ و مسلح به گرافن اکساید انجام پذیرفت، میزان گرافن اکسایدی که با گذر از آن مقاومت فشاری تغییر چندانی نکرده و یا حتی کاهش می‌یابد به ترتیب ۰/۰۴ و ۰/۰۵ درصد وزنی سیمان گزارش شده است [۳۵ و ۳۳].

نمودار تنش-کرنش تحت بارگذاری فشاری برای نمونه‌ی کنترل و نمونه‌ی مسلح به ۰/۱٪ وزنی سیمان گرافن اکساید در شکل ۱۴ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود وجود گرافن اکساید باعث افزایش در مقاومت‌های تسلیم و کرنش متناظر با آن و همچنین مقاومت شکست شده است. در واقع در نمونه‌های بتنی تحت بارگذاری و قبل از رسیدن به تنش ماکزیمم، 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 به گرافن اکساید می‌تواند به دلیل تأخیر در تشکیل این میکروتُرک‌ها باشد [۳۶].

جهت‌گیری نانو صفحات گرافن اکساید در حجم بتن می‌تواند بر رفتار کامپوزیت تأثیر بگذارد. به منظور بررسی ناهمسانگردی در مقاومت فشاری، نمونه‌های بتن ۲۸ روزه مسلح به گرافن اکساید در دو جهت بتن‌ریزی و جهت عمود بر آن مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های کنترل و مسلح به گرافن اکساید در شکل ۱۵-الف و نتایج انحراف استاندارد در شکل ۱۵-ب آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود حداکثر انحراف استاندارد مقاومت برای بتن مسلح به گرافن اکساید کمتر از بتن کنترل است. در واقع افزودن گرافن اکساید ناهمسانگردی در مقاومت را کاهش می‌دهد.

1 Scanning Electron Microscope
2 Energy Dispersive Spectrometer



شکل ۱۷. آنالیز EDS برای طیف I و II

Fig. 17. EDS analysis for spectra I and II

جدول ۷. آنالیز المان نمونه بتن مسلح به گرافن اکساید

Table 7. Elemental analysis of concrete sample reinforced with graphene oxide.

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
٪۰/۵	٪۰/۲۴	Fe

۵- نتیجه گیری

نفوذپذیری آب در مواد سیمانی تحت تأثیر عوامل داخلی و خارجی است. عوامل داخلی شامل نوع شبکه بندی متخلخل مواد سیمانی مانند تخلخل، پیچ و خم و انحنا، توزیع سنگدانه ها و میکروتکرکها بوده و از عوامل خارجی می توان به فشار اعمالی اشاره کرد. در گذشته مطالعاتی در زمینه تأثیر نانو ذرات گرافن اکساید به روی جذب آب کامپوزیت های سیمانی (آزمون نفوذپذیری تحت فشار صفر) و مقاومت آن ها در برابر نفوذ کلرایدها انجام گرفته است. نتایج حاکی از کاهش جذب آب و همچنین افزایش مقاومت در برابر نفوذ کلرایدها در نمونه های مسلح به گرافن اکساید است. میزان کاهش در جذب آب و یا افزایش مقاومت در برابر نفوذ کلرایدها با تغییر در طرح اختلاط نمونه ها و میزان گرافن اکساید مصرفی متفاوت خواهد بود. در این پژوهش نیز به دلیل اهمیت بحث دوام، نمونه ها با مقادیر مختلف گرافن اکساید تحت آزمایش جذب آب و نفوذپذیری در دو جهت بتن ریزی و عمود بر آن قرار گرفتند. همچنین آزمون مقاومت فشاری در دو جهت بتن ریزی و عمود بر آن به منظور بررسی رفتار مکانیکی بتن مسلح به گرافن اکساید و همچنین ناهمسانگردی در مقاومت، بر روی نمونه های مکعبی با درصدهای متفاوتی از این نانو ذرات انجام گرفت. نتایج به شرح زیر است:

۱- روانی مخلوطها با افزایش در میزان گرافن اکساید کاهش می یابد. به طوری که مقدار اسلامپ در نمونه ی کنترل ۶۸ میلی متر و در نمونه ی حاوی ۰/۰۲٪ وزنی سیمان گرافن اکساید، ۵۴ میلی متر به دست آمد. در واقع سطح ویژه ی بالای گرافن اکساید و همچنین گروه های عاملی آب دوست آن منجر به جذب آب بتن به سطح این نانو صفحات شده و مولکول های آب بین گرافن اکساید و ذرات سیمان محصور می شوند.

۲- نتایج جذب آب موئینه نشان داد که افزودن گرافن اکساید منجر به کاهش جذب آب اولیه و ثانویه در ملات سیمان می شود. به طوری که مقدار جذب آب اولیه در نمونه های حاوی گرافن اکساید به میزان ۰/۰۲۵٪ و ۰/۰۲٪ وزنی سیمان، به ترتیب ۰/۸٪ و ۰/۲۴٪ کاهش داشته است. نتایج میزان جذب آب ثانویه نیز حاکی از کاهش ۵۹-۴۵٪ در نمونه های حاوی گرافن اکساید در مقایسه با نمونه ی کنترل است. در واقع می توان گفت تأثیر نانو ذرات گرافن اکساید در کاهش جذب آب ثانویه ی نمونه ها در مقایسه با جذب آب اولیه ی آن ها، بیشتر بوده است. کاهش در جذب آب موئینه را می توان به بهبود ساختار منافذ موئینه و موانع تشکیل شده توسط ذرات گرافن اکساید که منجر به شکل گیری مسیرهای پرپیچ و خم تری جهت حرکت آب می شود، نسبت داد.

۳- در نمونه های تقویت شده با گرافن اکساید حجم نفوذ آب کمتر از نمونه های کنترل می باشد. به عنوان نمونه در پایان ۳۰۰ دقیقه و در فشار ۰/۹۵ مگاپاسکال، حجم نفوذ آب در نمونه ی کنترل ۳۹ میلی لیتر و در نمونه ی تقویت شده با ۰/۱٪ وزنی سیمان گرافن اکساید ۲۰ میلی لیتر به دست آمد. در مطالعه ای که بر روی جذب آب بتن ۲۸ روزه مسلح به گرافن اکساید انجام پذیرفت، نتایج حاکی از کاهش جذب آب تا ۱۸٪ در نمونه های حاوی گرافن اکساید در مقایسه با نمونه ی کنترل بود [۲۳]. این موضوع می تواند به دلیل خاصیت پراکنندگی حفرات در سطح نانو ذرات گرافن اکساید باشد که متعاقب آن از میزان نفوذ هر چه بیشتر مولکول های آب می کاهد. در واقع نانو ذرات گرافن اکساید با تأثیر در اندازه حفرات و شبکه بندی آن از طریق ارتقاء فرآیند هیدراسیون اجازه ی نفوذ بیشتر به مولکول های آب را نمی دهند. ۴- با افزایش در میزان گرافن اکساید حجم کلی آب نفوذ کرده تحت اعمال فشار هیدرواستاتیک ثابت، کاهش می یابد. به عنوان نمونه میزان کاهش در حجم نفوذ آب تحت فشار هیدرواستاتیکی ۰/۳۵ مگاپاسکال در نمونه های با ۰/۰۲۵٪ و ۰/۰۱٪ وزنی سیمان گرافن اکساید، به ترتیب ۳۳٪ و ۴۴٪ بوده و تحت فشار هیدرواستاتیکی ۰/۹۵ مگاپاسکال، ۳۵٪ و ۴۸٪ می باشد.

۵- نرخ جریان در نمونه های تقویت شده با گرافن اکساید نسبت به نمونه های کنترل کمتر است. به عنوان نمونه در ابتدای آزمایش نرخ جریان نمونه ی کنترل در فشار ۰/۹۵ مگاپاسکال برابر با ۲/۵ میلی لیتر بر دقیقه بوده و در نمونه ی حاوی ۰/۰۱٪ وزنی سیمان گرافن اکساید، برابر با ۱/۳ میلی لیتر بر دقیقه محاسبه شد. این کاهش در نرخ جریان می تواند به دلیل بهبود فرآیند هیدراسیون و تشکیل بتنی با ساختار چگال تر و حفرات ریزتر باشد.

۶- نتایج آزمون نفوذپذیری در جهت عمود بر بتن ریزی نشان داد که نسبت حجم نفوذ آب در جهت بتن ریزی به جهت عمود بر آن در نمونه های تقویت شده با گرافن اکساید، بیشتر از مقادیر متناظر در نمونه های کنترل می باشد. به بیانی دیگر با افزودن گرافن اکساید از میزان اختلاف نفوذپذیری در دو جهت کم شده است. این نسبت برای نمونه ی کنترل و نمونه ی حاوی ۰/۰۱٪ وزنی سیمان گرافن اکساید تحت فشار هیدرواستاتیکی ۰/۱۵ MPa، به ترتیب برابر با ۰/۸ و ۰/۹۴ بوده و تحت فشار هیدرواستاتیکی ۰/۹۵ MPa به ترتیب برابر با ۰/۷۲ و ۰/۸۹ می باشد. در واقع می توان گفت به دلیل کاهش تخلخل در نمونه های تقویت شده، ارتباط منافذ نیز کمتر شده و عملیات تراکم و همچنین وزن نمونه ها تأثیر کمتری در قطع ارتباط برخی از این منافذ در جهت بتن ریزی داشته است.

۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی	
C جذب موئینه، gr/m^2	
M_0 جرم اولیه نمونه، gr	
M_j جرم نمونه بعد از جذب، gr	
S ضریب جذب موئینه، $\text{m}^2/\text{h}^{1/5} \cdot \text{gr}$	
t زمان، h	

منابع

- [1] N. Banthia, A. Biparva, S. Mindess, Permeability of concrete under stress, *Cement and Concrete Research*, 35(9) (2005) 1651-1655.
- [2] Kermani, Permeability of stressed concrete: Steady-state method of measuring permeability of hardened concrete studies in relation to the change in structure of concrete under various short-term stress levels, *Building research and information*, 19(6) (1991) 360-366.
- [3] A.M. Rashad, Effects of ZnO₂, ZrO₂, Cu₂O₃, CuO, CaCO₃, SF, FA, cement and geothermal silica waste nanoparticles on properties of cementitious materials—A short guide for Civil Engineer, *Construction and Building Materials*, 48 (2013) 1120-1133.
- [4] X. He, X. Shi, Chloride permeability and microstructure of Portland cement mortars incorporating nanomaterials, *Transportation Research Record*, 2070(1) (2008) 13-21.5.
- [5] R.K. Abu Al-Rub, B.M. Tyson, A. Yazdanbakhsh, Z. Grasley, Mechanical properties of nanocomposite cement incorporating surface-treated and untreated carbon nanotubes and carbon nanofibers, *Journal of nanomechanics and micromechanics*, 2(1) (2012) 1-6.
- [6] J. Bharj, Experimental study on compressive strength of cement-CNT composite paste, *Indian Journal of Pure & Applied Physics (IJPAP)*, 52(1) (2015) 35-38.
- [7] T. Manzur, N. Yazdani, M.A.B. Emon, Effect of carbon nanotube size on compressive strengths of nanotube reinforced cementitious composites, *J. Mater*, 2014(1)

۷- افزایش در مقاومت فشاری بتن با تغییر در نسبت آب به سیمان و همچنین گرافن اکساید مصرفی متفاوت خواهد بود. نتایج آزمون مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه و با نسبت آب به سیمان ۰/۵، به ترتیب افزایش ۲۵٪ و ۵۰٪ را در نمونه‌ی بتن مسلح به ۰/۱ وزنی سیمان گرافن اکساید در مقایسه با نمونه‌های کنترل نشان دادند. در مطالعه‌ای که توسط دوی^۱ بر روی مقاومت فشاری بتن مسلح به ۰/۰۸ وزنی سیمان گرافن اکساید با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ انجام گرفته است نیز افزایش مقاومت در سن ۹۰ روزه حدود ۲۷٪ بیشتر از سن ۲۸ روزه‌ی نمونه‌ها به دست آمد [۲۳]. بهبود ساختار در سطح نانو و تأخیر در تشکیل میکروترک‌ها در حین بارگذاری در نمونه‌های مسلح به این نانو ذرات و همچنین خاصیت پل زدن گرافن اکساید به دلیل سطح تماس بالای آن و پیوندهای کوالانسی قوی در سطح تماس خمیر سخت شده، می‌تواند دلایلی بر افزایش مقاومت فشاری بتن باشد.

۸- نتایج آزمون مقاومت فشاری حاکی از کاهش مقاومت در نمونه بتن با گرافن اکساید ۰/۲٪ نسبت به نمونه حاوی ۰/۱٪ است. با توجه به درصدهای پایین گرافن اکساید مصرفی و روانی مطلوب نمونه‌ها و همچنین نتایج عکس‌های SEM که حاکی از عدم تجمع نانو ذرات گرافن اکساید و پراکنش مطلوب آن‌ها در حجم بتن است، کاهش مقاومت می‌تواند به دلیل تغییر شکل کریستال‌های حاصل از فرآیند هیدراسیون سیمان با تغییر در میزان گرافن اکساید باشد. لازم به ذکر است درصد وزنی گرافن اکسایدی که با گذر از آن افزایش اندک و یا حتی کاهش در مقاومت اتفاق می‌افتد با سن نمونه و همچنین تغییر در طرح اختلاط نمونه‌ها می‌تواند متفاوت باشد. به عنوان مثال در مطالعاتی که بر روی مقاومت فشاری بتن ۹۰ روزه با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ و ملات سیمان ۲۸ روزه با نسبت آب به سیمان ۰/۵ و مسلح به گرافن اکساید انجام پذیرفت، میزان گرافن اکسایدی که با گذر از آن مقاومت فشاری تغییر چندانی نکرده و یا حتی کاهش می‌یابد به ترتیب ۰/۰۴ و ۰/۰۵ درصد وزنی سیمان گزارش شده است [۳۵ و ۲۳].

۹- نتایج آزمون مقاومت فشاری در دو جهت بتن‌ریزی و جهت عمود بر آن نشان داد که افزودن گرافن اکساید ناهمسانگردی در مقاومت را کاهش می‌دهد. زیرا حداکثر انحراف استاندارد مقاومت برای بتن مسلح به گرافن اکساید کمتر از بتن کنترل است. تأثیر کم بر ناهمسانگردی مقاومت در نمونه‌های تقویت شده را می‌توان به دلیل جهت‌گیری تصادفی ورق‌های گرافن اکساید در حجم بتن دانست.

- Young's modulus, *Construction and Building Materials*, 78 (2015) 234-242.
- [17] S. Lv, Y. Ma, C. Qiu, T. Sun, J. Liu, Q. Zhou, Effect of graphene oxide nanosheets of microstructure and mechanical properties of cement composites, *Construction and building materials*, 49 (2013) 121-127.
- [18] 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*, 58 (2015) 140-147.
- [19] T. Tong, Z. Fan, Q. Liu, S. Wang, S. Tan, Q. Yu, Investigation of the effects of graphene and graphene oxide nanoplatelets on the micro-and macro-properties of cementitious materials, *Construction and Building Materials*, 106 (2016) 102-114.
- [20] H. Du, S. Dai Pang, Enhancement of barrier properties of cement mortar with graphene nanoplatelet, *Cement and Concrete Research*, 76 (2015) 10-19.
- [21] W. Li, X. Li, S.J. Chen, Y.M. Liu, W.H. Duan, S.P. Shah, Effects of graphene oxide on early-age hydration and electrical resistivity of Portland cement paste, *Construction and Building Materials*, 136 (2017) 506-514.
- [22] Q. Liu, Q. Xu, Q. Yu, R. Gao, T. Tong, Experimental investigation on mechanical and piezoresistive properties of cementitious materials containing graphene and graphene oxide nanoplatelets, *Construction and Building Materials*, 127 (2016) 565-576.
- [23] S. Devi, R. Khan, Effect of graphene oxide on mechanical and durability performance of concrete, *Journal of Building Engineering*, 27 (2020) 101007.
- [24] C. Lin, W. Wei, Y.H. Hu, Catalytic behavior of graphene oxide for cement hydration process, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 89 (2016) 128-133.
- [25] 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.
- (2014) 1-8.
- [8] B. Han, Z. Yang, X. Shi, X. Yu, Transport properties of carbon-nanotube/cement composites, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22(1) (2013) 184-189.
- [9] Y. Zhu, S. Murali, W. Cai, X. Li, J.W. Suk, J.R. Potts, R.S. Ruoff, Graphene and graphene oxide: synthesis, properties, and applications, *Advanced materials*, 22(35) (2010) 3906-3924.
- [10] S. Stankovich, D.A. Dikin, G.H. Dommett, K.M. Kohlhaas, E.J. Zimney, E.A. Stach, R.D. Piner, S.T. Nguyen, R.S. Ruoff, Graphene-based composite materials, *Nature*, 442(7100) (2006) 282-286.
- [11] H. Cui, X. Yan, L. Tang, F. Xing, Possible pitfall in sample preparation for SEM analysis-A discussion of the paper "Fabrication of polycarboxylate/graphene oxide nanosheet composites by copolymerization for reinforcing and toughening cement composites" by Lv et al, *Cement and Concrete Composites*, 77 (2017) 81-85.
- [12] S. Lv, Y. Ma, C. Qiu, Q. Zhou, Regulation of GO on cement hydration crystals and its toughening effect, *Magazine of Concrete Research*, 65(20) (2013) 1246-1254.
- [13] A. Mohammed, J.G. Sanjayan, W. Duan, A. Nazari, Incorporating graphene oxide in cement composites: A study of transport properties, *Construction and Building Materials*, 84 (2015) 341-347.
- [14] M. Mokhtar, S. Abo-El-Enein, M. Hassaan, M. Morsy, M. Khalil, Mechanical performance, pore structure and micro-structural characteristics of graphene oxide nano platelets reinforced cement, *Construction and Building Materials*, 138 (2017) 333-339.
- [15] L. Zhao, X. Guo, C. Ge, Q. Li, L. Guo, X. Shu, J. Liu, Mechanical behavior and toughening mechanism of polycarboxylate superplasticizer modified graphene oxide reinforced cement composites, *Composites Part B: Engineering*, 113 (2017) 308-316.
- [16] E. Horszczaruk, E. Mijowska, R.J. Kalenczuk, M. Aleksandrak, S. Mijowska, Nanocomposite of cement/graphene oxide–Impact on hydration kinetics and

- [32] S. Chuah, W. Li, S.J. Chen, J.G. Sanjayan, W.H. Duan, Investigation on dispersion of graphene oxide in cement composite using different surfactant treatments, *Construction and Building Materials*, 161 (2018) 519-527.
- [33] Z. Yang, Assessing cumulative damage in concrete and quantifying its influence on life cycle performance modeling, Purdue University, 2004.
- [34] H. Du, H.J. Gao, S. Dai Pang, Improvement in concrete resistance against water and chloride ingress by adding graphene nanoplatelet, *Cement and Concrete Research*, 83 (2016) 114-123.
- [35] L. Lu, D. Ouyang, Properties of cement mortar and ultra-high strength concrete incorporating graphene oxide nanosheets, *Nanomaterials*, 7(7) (2017) 187.
- [36] W.-J. Long, J.-J. Wei, H. Ma, F. Xing, Dynamic mechanical properties and microstructure of graphene oxide nanosheets reinforced cement composites, *Nanomaterials*, 7(12) (2017) 407.
- [26] C. ASTM, 136-06," Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates," ASTM International, West Conshohocken, PA, (2006).
- [27] C. ASTM, Standard practice for making and curing concrete test specimens in the field, in, 2012.
- [28] C. ASTM, 143/C 143M-05a", Standard Specification for Slump of Hydraulic-Cement Concrete", Annual Book of ASTM Standards, (2005).
- [29] B. EN, 480-11: 2005. 2005. Admixtures for concrete, mortar and Grout-Test Methods Part 11: Determination of air void characteristics in hardened concrete. BSI, British Standards Institution.
- [30] 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) (2019) 2225-2241.
- [31] A. ASTM, C109/C109M-02, Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars, West Conshohocken: ASTM International, (2002).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Safarkhani, M. Naderi, Evaluation of the compressive strength and permeability of graphene oxide-reinforced concrete by using the results of the cylindrical chamber method, Amirkabir J. Civil Eng., 55(2) (2023) 471-490.

DOI: 10.22060/ceej.2023.18722.6941

