

Study of mechanical properties and microstructure of cement paste containing graphene based on surfactant

Kianoosh Samimi ^{1*}, Mahyar Pakan ^{2*}

1- Assistance Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

2-Ph.D. Student, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ABSTRACT

Recently, the excellent performance of graphene-based materials has attracted civil engineering researchers in its application in cementitious mixtures. However, the application of graphene is hindered by its high cost and the agglomeration phenomenon in cementitious mixtures. In this regard, it is necessary to choose a dispersing agent with the ability to effectively separate graphene layers as well as improve mechanical properties and impermeability of cementitious mixtures. In this study, the effect of surfactant as a graphene separating agent from graphite on the mechanical properties and microstructure of cement paste containing water-dispersed graphene was investigated. The microstructure of the produced graphene reveals that the process of manufacturing graphene by peeling the surfactant leads to fragmentation and rupture of graphite. After 7 days of curing, the compressive strength of cement paste containing a mixture of 5 g / l graphite and 0.56 g / l surfactant increased by 28.66% compared to the control mixture. The crystallography and thermogravimetric results showed that graphene accelerates the formation of CH and C-S-H due to its nucleating effect in the cement matrix. Furthermore, the incorporation of graphene and surfactant into cement paste reduced the voids by 18.6%. This study shows that graphene dispersed in water produced by 0.56 g / l surfactant has the potential to be used as a novel additive in cement-based mixtures.

ARTICLE INFO

Receive Date: 14 March 2022

Revise Date: 13 May 2022

Accept Date: 18 May 2022

Keywords:

Microstructure;

Surfactant;

Graphene;

Graphite;

Compressive Resistance

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.333259.2751>

*Corresponding author: Kianoosh Samimi.

Email address: k_samimi@sbu.ac.ir

بررسی خواص مکانیکی و ریزساختار خمیر سیمان حاوی گرافن بر پایه سورفکتانت کیانوش صمیمی^{۱*}، مهیار پاکان^۲

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

چکیده

اخیراً عملکرد عالی مواد مبتنی بر گرافن توجه محققان مهندسی عمران را به استفاده از آن در مخلوط‌های سیمانی جلب کرده است. با این حال، استفاده از گرافن به دلیل هزینه بالای آن و پدیده انباشتگی در ترکیبات سیمانی با موانعی روبرو است. در این راستا، انتخاب یک عامل پخش کننده با قابلیت جداسازی مؤثر لایه‌های گرافن و همچنین بهبود خواص مکانیکی و نفوذناپذیری ترکیبات سیمانی ضروری است. در این مطالعه، تأثیر سورفکتانت به عنوان عامل جدا کننده گرافن از گرافیت بر خواص مکانیکی و ریزساختار خمیر سیمان حاوی محلول گرافن تولید شده مورد بررسی قرار گرفت. بررسی ریزساختار گرافن تولید شده نشان می‌دهد که تولید گرافن از طریق لایه برداری سورفکتانت منجر به تکه‌تکه شدن و پاره شدن دانه‌های گرافیت می‌گردد. پس از ۷ روز نگهداری مقاومت فشاری خمیر سیمان حاوی گرافن تولید شده بر مبنای اختلاط ۵ گرم در لیتر گرافیت و ۰/۵۶ گرم در لیتر سورفکتانت به میزان ۲۸/۶۶٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته است. نتایج کریستوگرافی و ترموگراویمتری نشان داد که گرافن به دلیل اثر هسته‌زایی در ماتریس سیمانی باعث تسریع در روند تولید CH و $C-S-H$ می‌گردد. همچنین ترکیب گرافن و سورفکتانت در خمیر سیمان منجر به کاهش ۱۸/۶٪ حرارت گردید. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که گرافن پراکنده در آب تولید شده توسط ۰/۵۶ گرم در لیتر سورفکتانت این پتانسیل را دارد که به عنوان یک افزودنی نوین در مخلوط‌های مبتنی بر سیمان استفاده گردد.

کلمات کلیدی: ریزساختار؛ سورفکتانت؛ گرافن؛ گرافیت؛ مقاومت فشاری.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.333259.2751	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.333259.2751	۱۴۰۱/۱۲/۲۹	۱۴۰۱/۰۲/۲۸	۱۴۰۱/۰۲/۲۸	۱۴۰۱/۰۲/۲۳	۱۴۰۰/۱۲/۲۳
کیانوش صمیمی k_samimi@sbu.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

بتن دومین ماده پرمصرف بر روی زمین است که به طور گسترده از آن در مصالح ساختمانی استفاده می‌گردد [۳-۱]. با این وجود یکی از چالش‌های عمده مصرف بتن افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از تولید سیمان می‌باشد. صنعت سیمان عامل تولید ۱۰٪ کربن در جهان هست که به طور کلی منجر به انتشار ۶٪ گازهای گلخانه‌ای می‌گردد [۴-۶]. اخیراً کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای یکی از موضوعات مهم در صنعت سیمان برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار سازمان ملل به شمار می‌آید. لذا این رویکرد پژوهشگران و مهندسان را تشویق می‌کند تا به دنبال ترکیبات جدید و غیرممتعارف مطابق با توافقنامه آب و هوایی پاریس در سال ۲۰۲۰ باشند که عملکرد آن می‌تواند تکامل فناوری بتن را تسریع بخشد و در کاهش مصرف سیمان نقش بسزایی داشته باشد. بدین منظور، استفاده از مواد افزودنی در بتن می‌تواند علاوه بر ارائه طیف وسیعی از ظرفیت‌های عملکردی، مصرف سیمان را در بتن کاهش دهد. در دو دهه اخیر محققان اثر افزودنی‌های مختلفی اعم از پومیس، متاکائولن، زئولیت [۶-۸]، نانو کربن [۹]، دوده سیلیس [۱۰]، گرافن [۱۱-۱۳] و ... را مطالعه نمودند. در این میان گرافن ماده‌ای منحصربه‌فرد با افزایش خواصی همچون مقاومت مکانیکی، کششی، خمشی و الکتریکی، در فناوری بتن بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۱۴].

گرافن یک لایه اتمی منفرد از گرافیت معدنی رایج است. به عبارت دیگر، گرافیت مجموعه‌ای از لایه‌های گرافن است که توسط نیروهای ضعیف واندروالسی به یکدیگر متصل شده‌اند. گرافن و مشتقات آن همچون اکسید گرافن (GO)، نانو پلاکت‌های اکسید گرافن (GONPs)، نانو پلاکت‌های گرافن (GNPs)، نانو صفحات گرافن (GNS) و اکسید گرافن احیا شده (rGO) می‌توانند به‌عنوان یک افزودنی در مخلوط‌های سیمانی جهت افزایش استحکام و پایداری سازه‌ها در صنعت ساخت‌وساز استفاده شوند. مخلوط‌های حاوی گرافن به دلیل کاهش تخلخل ناشی از استفاده گرافن، عملکرد مکانیکی و دوامی بسیار خوبی را نشان می‌دهند. در این راستا گونگ^۱ و همکاران [۱۱] گزارش دادند که اختلاط ۰/۰۳ درصد وزنی صفحات گرافن اکسید (GO) در خمیر سیمان می‌تواند مقاومت فشاری و کششی ملات سیمانی را بیش از ۴۰ درصد به دلیل کاهش ساختار منفذی خمیر سیمان افزایش دهد. لی^۲ و همکاران [۱۲] بررسی کردند که افزودنی‌های GO می‌تواند بر مقاومت مکانیکی، جذب موئینگی آب و درجه هیدراتاسیون خمیر سیمان تأثیر بگذارد. با توجه به نتایج آن‌ها، افزودن ۰/۰۴ درصد GO باعث افزایش ۶۷ درصدی مقاومت کششی نسبت به نمونه شاهد می‌شود. پان^۳ و همکاران [۱۳] نشان دادند که اختلاط ۰/۰۵ درصد GO در خمیر سیمان می‌تواند مقاومت فشاری و خمشی ملات سیمان را به ترتیب ۱۵-۳۳ درصد و ۴۱-۵۹ درصد افزایش دهد. آن‌ها دریافتند که افزودن GO باعث افزایش سطح مخصوص مخلوط سیمان می‌شود که این امر منجر به بهبود تشکیل سیلیکات کلسیم هیدراته در ماتریس سیمانی می‌گردد. وانگ^۴ و همکاران [۱۵] دریافتند که اختلاط GO باعث افزایش هیدراتاسیون، کاهش حجم منافذ، تسریع در شکل‌گیری کریستال و هم‌تراز نمودن آن‌ها و همچنین افزایش سختی در خمیر سیمان می‌گردد. بر اساس نتایج آن‌ها پس از ۲۸ روز، مقاومت فشاری و خمشی خمیر سیمان سخت شده به ترتیب ۹۰/۵ و ۴۰/۴ درصد افزایش یافت. دوو^۵ و همکاران [۱۶] نشان دادند که افزودن ۲/۵ درصد نانوپلاکت گرافن (GNP) نسبت به وزن سیمان در ملات می‌تواند منجر به کاهش ۶۴ درصدی عمق نفوذ آب شود. آن‌ها دریافتند که GNP به دلیل ایجاد پیچ خوردگی بیشتر در ماتریس سیمانی، باعث کاهش نفوذپذیری ملات سیمان در برابر نفوذ آب می‌گردد. مواد گرافنی علیرغم مزایای گوناگون، هزینه تولید بسیار بالایی دارند. همچنین به دلیل ماهیت آبگریز و انرژی سطحی بالا به سبب فعل و انفعالات قوی واندروالسی، پتانسیل بالایی برای انباشته شدن در محیط‌های آبی دارند [۱۷]. رایج‌ترین استراتژی برای جلوگیری از انباشتگی گرافن استفاده از سورفکتانت‌ها در مخلوط‌های سیمانی است [۱۸].

نوآوری این تحقیق تولید گرافن ارزان قیمت با ترکیب گرافیت و سورفکتانت در مقایسه با سایر گرافن‌های رایج موجود در بازار است. علاوه بر این، اثر سورفکتانت بر روی خمیر سیمان حاوی گرافن جهت اصلاح ساختار ماتریس سیمان و تسریع هیدراتاسیون بررسی

¹ Gong et al.

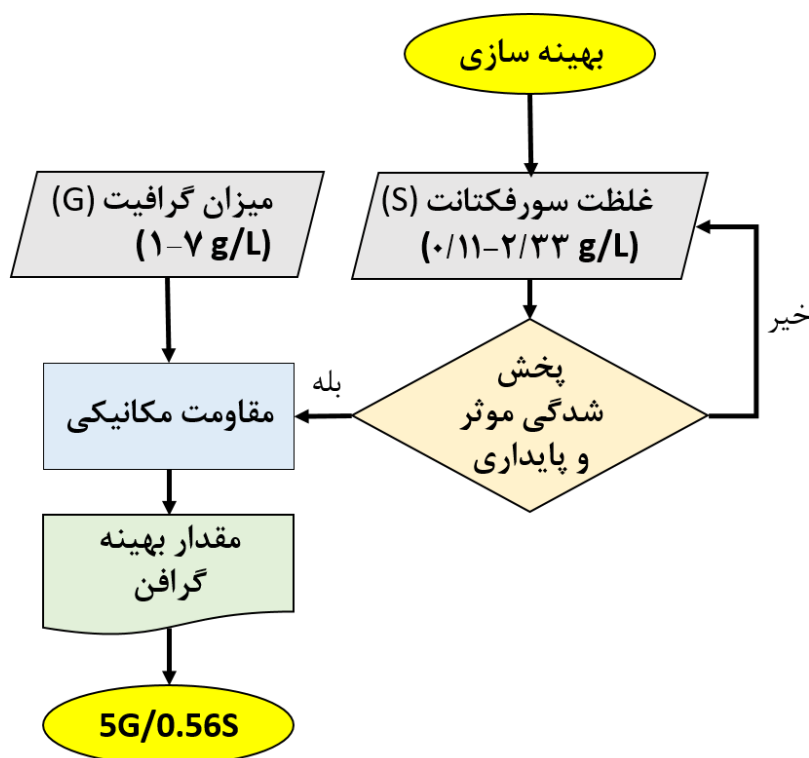
² Li et al.

³ Pan et al.

⁴ Wang et al.

⁵ Du et al.

شده است. این تحقیق به یافتن مقدار بهینه گرافیت و سورفکتانت در تولید گرافن و اثر سن نگهداری بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مخلوط‌های سیمانی حاوی گرافن می‌پردازد (شکل ۱). تاکنون، هیچ گزارشی در مورد تولید گرافن با این رویکرد و تأثیر آن بر ساختار ماتریس سیمانی وجود نداشته است. در این تحقیق مقاومت فشاری خمیرهای سیمانی مختلف حاوی گرافن بر پایه سورفکتانت مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی^۶ (FESEM)، میکروسکوپ الکترونی عبوری^۷ (TEM) بر روی محلول گرافن تهیه شده جهت شناسایی ساختار و بررسی اثر پخش شدن گرافیت توسط سورفکتانت انجام شده است. علاوه بر این، اثر گرافن بر ریزساختار خمیر سیمان در سنین ۳ و ۲۸ روز با آنالیزهای FESEM و ترموگراویمتری^۸ (TGA)، پراش اشعه ایکس^۹ (XRD) انجام شد تا فرآیند هیدراتاسیون نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد. طیف‌سنجی پراش انرژی پرتوایکس^{۱۰} (EXD) به صورت نقشه عناصر برای نمونه بهینه مورد بررسی قرار گرفت. این نتایج به همراه داده‌های مقاومت فشاری برای نشان دادن اثر محلول گرافن تهیه شده بر روی خمیر سیمان مورد بحث قرار گرفت.



شکل ۱: فلوچارت بهینه سازی مقدار سورفکتانت و گرافن در ساخت نمونه‌های خمیر سیمانی.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح

در این مطالعه از سورفکتانت به‌عنوان یک عامل پخش‌کننده برای جداسازی و توزیع لایه‌های گرافیت استفاده شده است. سورفکتانت سدیم دودسیل بنزن سولفونات (S) محصول Acros Organics و پودر گرافیت ($<50\ \mu\text{m}$ اندازه ذرات) شرکت Merck استفاده

⁶ Field emission scanning electron microscopy (FESEM).

⁷ Transmission electron microscopy (TEM).

⁸ Thermo-gravimetric analysis (TGA).

⁹ X-ray diffraction (XRD).

¹⁰ Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX).

گردید. سیمان پرتلند نوع II با نرمی بلین $290 \text{ m}^2/\text{kg}$ و وزن مخصوص $3/15 \text{ g/cm}^3$ طبق استاندارد ASTM-C150 از کارخانه سیمان تهران تهیه شد. آنالیز شیمیایی ترکیبات سیمان در جدول ۱ ارائه شده است. آب آشامیدنی در سنتز محلول گرافن استفاده شد.

جدول ۱: آنالیز شیمیایی ترکیبات سیمان.

Chemical analysis (% by mass)	Cement (type II)
Loss on ignition	1.33
SiO ₂	21.78
Al ₂ O ₃	5.0
Fe ₂ O ₃	4.0
CaO	63.04
MgO	2
SO ₃	2.3
Insoluble residue	0.60
Alkalis (Na ₂ O%+0.658K ₂ O %)	1
Na ₂ O+K ₂ O	-
Free Cao	1.4
Humidity	-
C ₃ S	45.5
C ₂ S	28.0
C ₃ A	6.5
C ₄ AF	12.2
specific surface area (m ² /kg)	290
specific gravity	3.15

۲-۲- آماده سازی نمونه‌ها

۲-۲-۱- تهیه محلول گرافن

در این مطالعه محلول گرافن از مخلوط کردن گرافیت، سورفکتانت به عنوان عامل پخش کننده و آب در یک مخلوط کن الکتریکی با روش لایه برداری فاز مایع تهیه گردید. بدین منظور ابتدا مقدار معینی گرافیت و سورفکتانت به آب آشامیدنی در مخلوط کن برقی اضافه شد و مخلوط کن به مدت ۱ ساعت با سرعت ۱۶۰۰۰ دور در دقیقه روشن بود تا گرافن به طور یکنواخت در آب پراکنده شود. سپس مخلوط کن خاموش گردیده تا مخلوط حاصل پس از ۳۰ دقیقه به دمای معمولی برسد و ذرات بزرگ در آن ته نشین شود. متعاقباً محلول نهایی در ساخت خمیر سیمان استفاده گردید.

محلول گرافن تهیه شده با استفاده از فیلتراسیون خلأ از طریق غشای سلولزی فیلتر گردید و سپس چندین بار با الکل و آب جهت آنالیز شسته شد. بدین منظور در ابتدا، یک لیتر از محلول گرافن تهیه شده توسط یک غشای سلولزی ۰/۲۵ میکرومتر فیلتر شد. سپس پودر باقیمانده روی سطح غشاء خارج شده و در آون با دمای ۵۰ درجه سانتی گراد قرار داده شد تا پس از آن جهت ارزیابی ریزساختار گرافن تولید شده مورد استفاده قرار گیرد (شکل ۲).



شکل ۲: تصویر از گرافن رسوب شده از محلول 5G/0.56S.

۲-۲-۲- روند اختلاط خمیر سیمان

در این مطالعه تمامی مخلوط‌های خمیر سیمان در یک مخلوط‌کن ۶ لیتری تولید شدند. مراتب اختلاط در مخلوط‌کن بدین صورت بود که در ابتدا کلیه مقادیر سیمان و محلول گرافن را در مخلوط‌کن ریخته و سپس به مدت سه دقیقه با سرعت کم مخلوط شدند. در مرحله بعد، مخلوط به مدت یک دقیقه دیگر با سرعت بالا مخلوط شد. برای کاهش تبخیر محلول اختلاط، مخلوط‌کن با یک پوشش پلاستیکی پوشانده شد.

۲-۳- آماده‌سازی و نگهداری نمونه‌ها

در این مطالعه، نمونه‌های خمیرسیمان مکعبی $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ بر اساس استانداردهای (ASTM C31 (2021) و ASTM C511 (2019) تهیه شدند. پس از ریختن نمونه‌ها در درون قالب، روی نمونه‌ها را با دو لایه از ورقه‌های پلاستیکی پوشانده و در یک محفظه با دمای کنترل شده در دمای 22 ± 2 درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شدند. همه نمونه‌ها را بعد از ۲۴ ساعت از قالب جدا نموده و در حوضچه نگهداری درون محلول آب آهک اشباع شده به‌منظور جلوگیری از آب شستگی، تا سن موردنظر آزمایش نگه داشته شدند.

۲-۴- طرح اختلاط

ده طرح مخلوط با نسبت ثابت آب به مواد سیمانی (W/C_m) برابر با $0/4$ با استفاده از سیمان نوع II در این پژوهش در نظر گرفته شده است. مخلوط بر پایه سیمان پرتلند (C) و آب (W) به‌عنوان طرح شاهد (CP) در نظر گرفته شد. همچنین یک طرح مخلوط بر مبنای محلول سورفکتانت (S) بدون گرافیت (G) به‌منظور بررسی اثر گرافن انتخاب شد. برای تعیین نسبت بهینه گرافیت به سورفکتانت در خمیر سیمان، هشت طرح مخلوط حاوی گرافن تولید شده بر پایه سورفکتانت در نظر گرفته شد. نسبت‌های انتخابی گرافیت به سورفکتانت در جدول ۲ آورده شده است. در فرآیند انتخاب نسبت اختلاط، نسبت گرافیت به سورفکتانت (G/S) بیش از ۱ با تولید کف بالا همراه بود (شکل ۳). ولی با این حال، در نسبت‌های کمتر از $0/33$ ، محلول ناپایدار بود و ذرات گرافیت ته‌نشین شدند. در نتیجه، نسبت‌هایی که در جدول ۲ با رنگ سبز برجسته شده‌اند به‌عنوان نسبت‌های انتخابی جهت تهیه محلول‌های گرافنی مختلف انتخاب شدند. جدول شماره ۳ طرح اختلاط کلیه مخلوط‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۳: تولید کف بالا در فرآیند تهیه محلول گرافن برای نسبت $G/S > 1$.

جدول ۲: انتخاب نسبت گرافیت به سورفکتانت در طراحی اختلاط.

Graphite/Surfactant ratio	Graphite concentration (g/L)			
	1	3	5	7
	Surfactant concentration (g/L)			
3	0.33	1	1.66	2.33
5	0.2	0.6	1	1.4
7	0.14	0.43	0.71	1
9	0.11	0.33	0.56	0.78

جدول ۳: طرح اختلاط نمونه‌های خمیر سیمان.

Name	Cement (g)	Water (g)	Graphite (mg)	Surfactant (mg)	W/C _m
CP	420	168	-	-	0.4
0.56S	420	168	-	94.08	0.4
1G/0.33S	420	168	168	55.44	0.4
3G/0.33S	420	168	504	55.44	0.4
3G/0.43S	420	168	504	72.24	0.4
3G/0.6S	420	168	504	100.8	0.4
5G/0.45S	420	168	840	75.6	0.4
5G/0.56S	420	168	840	94.08	0.4
5G/0.71S	420	168	840	119.28	0.4
7G/0.78S	420	168	1176	131.04	0.4

۳- روش آزمایش

۳-۱- مقاومت فشاری

نمونه‌های مکعبی با ابعاد $50 \times 50 \times 50$ mm³ جهت تعیین مقاومت فشاری کلیه طرح مخلوط‌ها مورد استفاده قرار گرفت. این آزمایش در سنین مختلف ۱، ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز طبق استاندارد ASTM C109 / C109M با سرعت بارگذاری 1000 (N/S) صورت پذیرفت. مقاومت فشاری هر مخلوط بر روی سه نمونه ارزیابی شد و مقدار میانگین به عنوان نتیجه گزارش گردید.

۳-۲- آنالیز ریزساختار

۳-۲-۱- آنالیز FESEM-EDX

مورفولوژی نمونه‌ها پس از ایجاد پوشش طلا بروی نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) با استفاده از FEI ESEM Quanta 200 تعیین شد. طیف‌سنجی اشعه ایکس (EDX-MAP) برای آنالیز عنصری بر روی نمونه بهینه انجام شد.

۳-۲-۲- آنالیز TEM

از میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) Philips EM 208S در ولتاژ ۱۰۰ کیلوولت به منظور عکس برداری از پودر گرافن استفاده شد. برای این منظور پودر گرافن به مدت ۱۰ دقیقه در اتانول تحت امواج فراصوت قرار گرفتند و در نهایت چند قطره از آن در مش مسی پوشش داده شده با کربن ریخته شد. در نهایت نمونه‌های مورد نظر پس از مدتی خشک شده و جهت ارزیابی مورد استفاده قرار گرفتند.

۳-۲-۳- آنالیز TGA

در این تحقیق، آنالیز ترموگراویمتری (TGA) با استفاده از BAHAR, STA 504 برای محاسبه درجه هیدراتاسیون مخلوط‌های CP, 0.56S, 5G/0.56S انجام شد. در طول آزمایش، نمونه‌های پودری (حدود ۱۰ میلی گرم) در یک بوته آلومینا قرار داده شد و دما از ۵۰

درجه سانتی‌گراد به ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد با سرعت ۱۰ درجه سانتی‌گراد در دقیقه افزایش یافت. برای حفاظت از فعل و انفعالات شیمیایی بالقوه بین نمونه‌ها و هوا، از اتمسفر آرگون با دبی ۱۰۰ میلی لیتر در دقیقه استفاده شد.

۳-۲-۴- آنالیز XRD

آنالیز کریستوگرافی (XRD) بر روی نمونه‌های مختلف خمیر سیمان پودر شده با تابش Cu K ($\lambda = 1.5406$) تحت شرایط ۴۰ کیلوولت و ۳۰ میلی آمپر از دستگاه کریستوگرافی فیلیپس Xpert استفاده شد. در هر مرحله اسکن از ۱۰ تا ۸۰ درجه با گام ۰/۰۲ درجه (2θ) و سرعت اسکن ۲ ثانیه صورت گرفت.

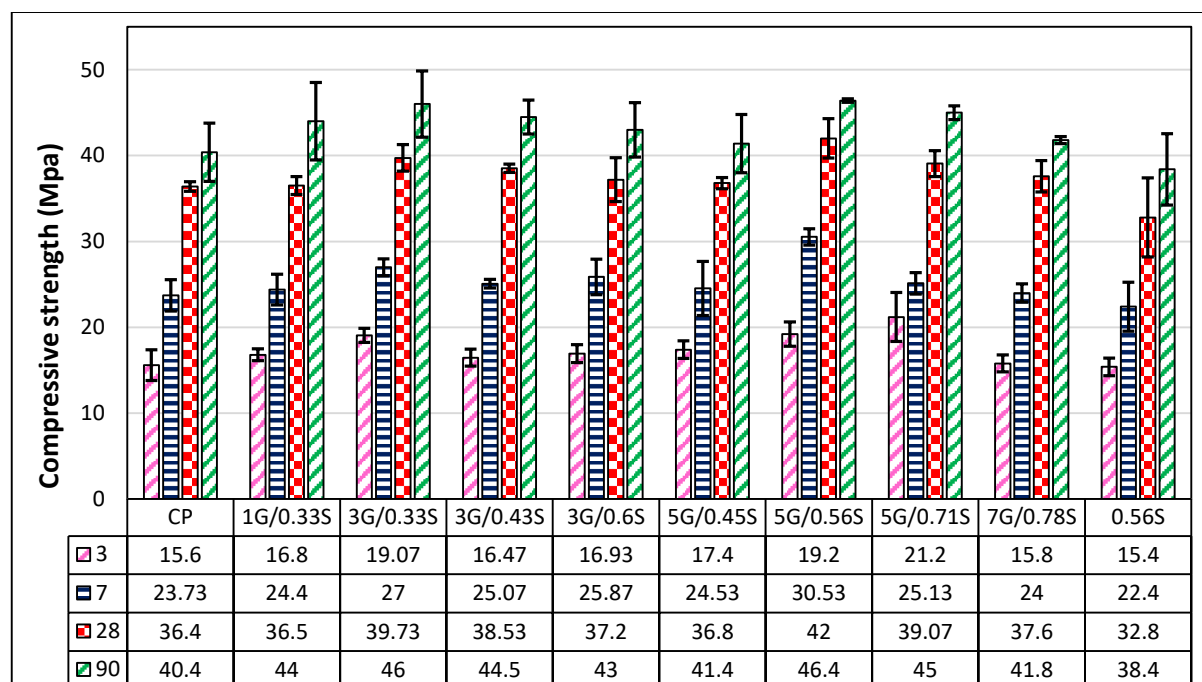
۳-۳- جذب آب حجمی

آزمایش جذب آب حجمی بر اساس استاندارد ASTM C642 بر روی نمونه استوانه‌ای ($\Phi 100 \times H50$ میلی متر) در سنین ۷ و ۲۸ روز انجام شد. جذب آب حجمی را می‌توان با توزین جرم خشک، جرم در آب و جرم در هوا (در حالی که سطح آن خیس است) اندازه گیری کرد. از این پارامترها برای محاسبه حجم فضای متخلخل (حفره) در خمیر سخت شده استفاده شد.

۴- بحث و نتایج

۴-۱- مقاومت فشاری

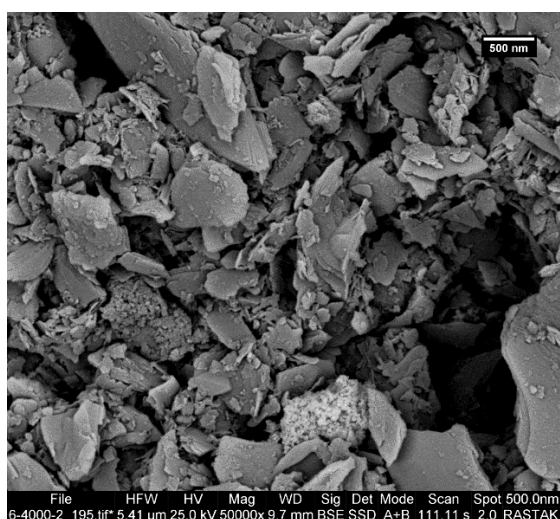
در شکل ۴ نتایج تغییرات مقاومت فشاری مخلوط‌های خمیر سیمان حاوی گرافن تولید شده بر پایه سورفکتانت به همراه نمونه حاوی سورفکتانت بدون گرافن و نمونه شاهد نسبت به سن نگهداری ارائه شده است. بر اساس این نتایج، مخلوط‌های 5G/0.56S و 0.56S به ترتیب بیشترین و کمترین مقاومت را از سنین ۳ تا ۹۰ روز نشان داده‌اند. نقش آبدوستی سورفکتانت مورد استفاده در این مطالعه عامل اصلی مقاومت فشاری پائین در مخلوط 0.56S است. زیرا با جذب آب مورد نیاز برای هیدراتاسیون سیمان، سرعت فرآیندهای هیدراتاسیون را کاهش می‌دهد. در نتیجه، محصولات هیدراتاسیون مانند پرتلندیت و ژل سیلیکات کلسیم با سرعت کمتری تولید شده‌اند و بنابراین رشد مقاومت فشاری در مخلوط 0.56S کم می‌باشد. این اثر به‌خوبی در بخش نتایج آنالیز ترموگراویمتری به اثبات رسیده است. از سوی دیگر، سورفکتانت به‌عنوان یک عامل پخش کننده خوب در نمونه‌های حاوی گرافیت عمل می‌کند. این اثر در نتایج مقاومت فشاری برای مخلوط‌های متعدد حاوی گرافن بر مبنای سورفکتانت به‌خوبی مشاهده شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۴، مقاومت فشاری مخلوط 5G/0.56S به ترتیب ۲۳/۰۸٪، ۲۸/۶۶٪، ۱۵/۳۸٪ و ۱۴/۸۵٪ بیشتر از نمونه شاهد در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز است. علاوه بر این، مخلوط‌های حاوی ۳ گرم در لیتر گرافیت با مقادیر مختلف سورفکتانت، بهبود مقاومت فشاری را در مقایسه با نمونه شاهد در تمام سنین نگهداری نشان دادند. مخلوط 3G/0.33S روند رو به رشد خوبی را در مقاومت فشاری خمیر سیمان در میان سایر مخلوط‌های حاوی ۳ گرم در لیتر گرافیت نشان داد. برعکس، مقدار مقاومت فشاری مخلوط‌های 1G/0.33S، 5G/0.45S و 7G/0.78S نسبت به مقدار متناظر در نمونه شاهد در سنین مختلف تقریباً یکسان است. بر اساس نتایج ذکر شده در بالا، می‌توان نتیجه گرفت که اختلاط ۵ گرم در لیتر گرافیت و ۰/۵۶ گرم در لیتر سورفکتانت در خمیر سیمان (مخلوط 5G/0.56S) بیشترین مقدار مقاومت فشاری در مقایسه با سایر مخلوط‌ها نشان می‌دهد. علت این افزایش مقاومت به پراکندگی لایه‌های گرافن توسط سورفکتانت ارتباط دارد که در نهایت صفحات گرافن به‌خوبی بر روی حفره‌ها پخش شده و یک ریزساختار متراکم در ماتریس سیمانی ایجاد می‌گردد. از طرفی مقیاس نانو و میکروگرافن می‌تواند هیدراتاسیون سیمان را تسریع نماید و تراکم ریزساختارها را افزایش دهد [۱۶]. علاوه بر این، مورفولوژی لایه‌ای گرافن این پتانسیل را دارد که منافذ متصل به هم را مسدود کند و از این رو شبکه‌های منفذی بهبود یابد [۱۶، ۱۹]. با توجه به نتایج ارائه شده توسط دو، صفحات گرافن سطح بزرگ‌تری را برای هسته‌سازی محصولات هیدراتاسیون فراهم می‌کنند و متعاقباً ساختار منافذ را اصلاح می‌نمایند [۱۶]. در این مطالعه، عملکرد مثبت گرافن تولید شده در افزایش مقاومت فشاری با نتایج گزارش شده در پیشینه تحقیق مطابقت دارد [۱۶، ۱۹، ۲۰].



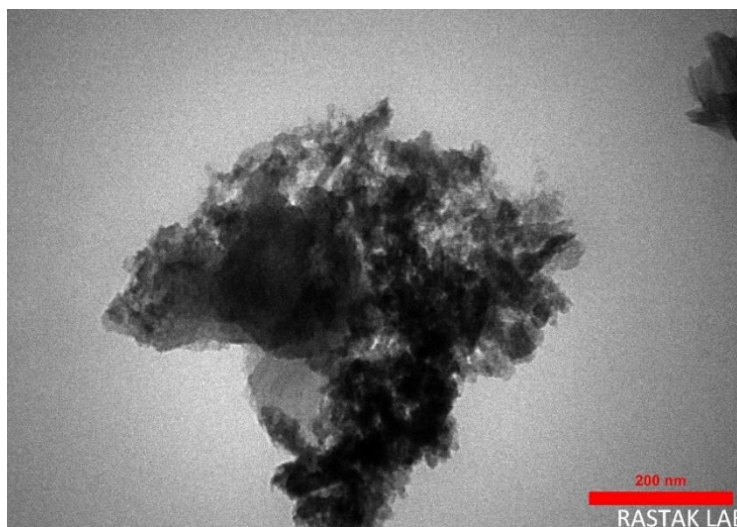
شکل ۴: مقاومت فشاری مخلوط‌ها بر اساس سن نگهداری.

۴-۲- ریزساختار محلول گرافن تهیه شده بر پایه سورفکتانت

با توجه به نتایج مقاومت فشاری، مخلوط 5G/0.56S نسبت به سایر مخلوط‌ها عملکرد بهتری را از خود نشان داد، بنابراین در این تحقیق مشخصات گرافن پراکنده در محلول آن به کمک طیف‌سنجی FESEM و TEM مورد مطالعه قرار گرفت. تصاویر FESEM از نمونه 5G/0.56S در شکل ۵-الف نشان داده شده است. همچنین به منظور ارزیابی پایداری محلول گرافن تهیه شده بر پایه سورفکتانت، مقدار گرافن در لیتر محاسبه شد. بر این اساس، میزان گرافن برای محلول 5G/0.56S برابر ۰/۶ گرم در لیتر به دست آمد. بر اساس تصاویر نشان داده شده در شکل ۵-الف، صفحات چند لایه‌ای گرافن در تصاویر به وضوح دیده می‌شوند. همچنین مشاهده می‌شود که نمونه 5G/0.56S از تعداد زیادی تکه‌های نامنظم در ابعاد کوچک و بزرگ تشکیل شده است. بر مبنای این تصاویر می‌توان استنباط نمود که تولید گرافن از طریق لایه‌برداری سورفکتانت منجر به تکه‌تکه شدن دانه‌های گرافیت می‌گردد. همچنین شکل ۵-ب تصاویر مربوط به TEM را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ذرات نانو گرافن به دلیل انرژی سطحی بالا به یکدیگر چسبیده‌اند، همچنین صفحات گرافن نیز در این عکس مشاهده می‌شود. نقاط شفاف نشان‌دهنده ضخامت کمتر از ۱۰ نانومتر است و نقاط تیره نشان‌دهنده چسبندگی و روی هم افتادن نانو ذرات گرافن است.



(الف)



(ب)

شکل ۵: آنالیز ساختار گرافن محلول 5G/0.56S (الف) تصویر FESEM (ب) تصویر TEM.

۴-۳- ریزساختار خمیر سیمان

۴-۳-۱- آنالیز XRD

الگوهای XRD مخلوط‌های مختلف خمیر سیمان در سنین ۳ و ۲۸ روز به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شده‌اند. با توجه به این نتایج، پیک‌های اصلی XRD مشاهده شده برای همه مخلوط‌ها عبارت‌اند از پورتلندیت (CH)، سیلیکات تری کلسیم (C_3S)، سیلیکات دی کلسیم (C_2S)، آلومینات تری کلسیم (C_3A). همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، پیک‌های مربوط به فاز C_3S در نمونه حاوی گرافن (مخلوط 5G/0.56S) در مقایسه با مخلوط‌های CP و 0.56S در سن ۳ روز به دلیل مصرف C_3S و تبدیل آن به CH به‌عنوان محصول هیدراتاسیون کاهش یافته است. علیرغم تولید بالای CH در مخلوط حاوی سورفکتانت و بدون گرافیت (مخلوط 0.56S) در مقایسه با نمونه شاهد، مقاومت فشاری کمتری نسبت به سایر مخلوط‌ها از خود نشان می‌دهد. این مشاهده می‌تواند به دلیل تجمع آب موجود در اطراف سورفکتانت به علت ماهیت آبدوستی سورفکتانت باشد که در نهایت منجر به جذب آب موجود در ماتریس سیمانی مربوطه می‌گردد. بنابراین، فرآیند هیدراتاسیون به صورت جزئی انجام شده و ذرات غیرهیدراته در ماتریس سیمان باقی مانده است. این وضعیت منجر به یک اثر مخرب بر یکپارچگی مکانیکی ساختار خمیر سیمان می‌گردد. لازم به ذکر است CH می‌تواند تا حدودی مقاومت بتن را افزایش دهد ولی عامل اصلی افزایش مقاومت در خمیر سیمان می‌باشد که به دلیل داشتن ساختار آمورف در نمودار قابل مشاهده نیست. همچنین برحسب نتایج ارائه شده در شکل ۶، افزودنی گرافن در مخلوط 5G/0.56S باعث افزایش شدت پیک‌های CH در مقایسه با مخلوط 0.56S می‌گردد که نشان دهنده اثر مثبت گرافن در تسریع فرآیند هیدراتاسیون و تولید ساختار CH و CSH است.

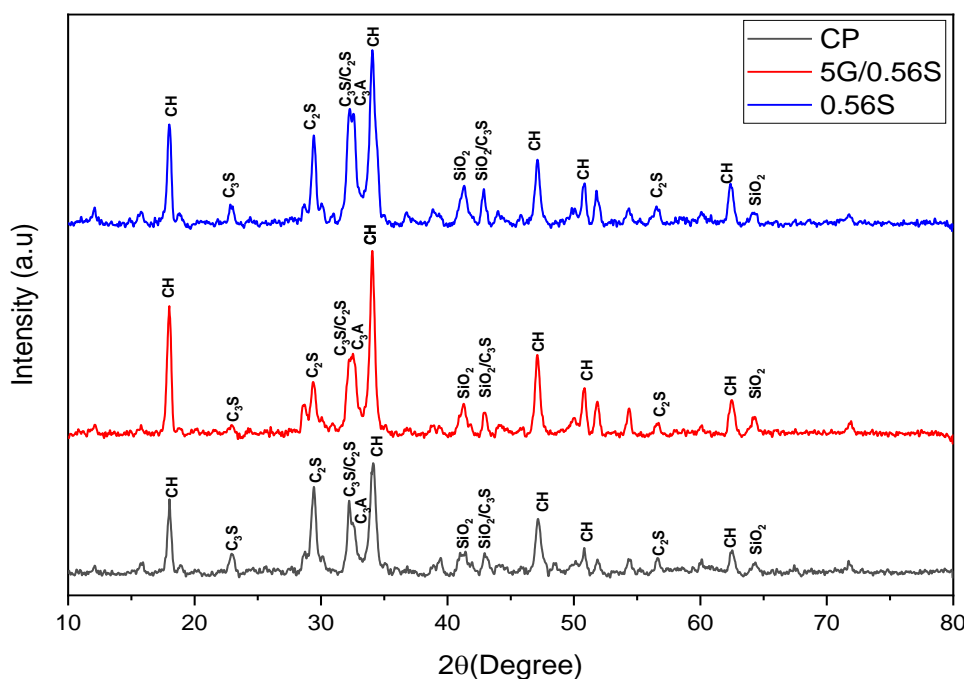
نتایج XRD ارائه شده در شکل ۷، نشان می‌دهد که فرآیند هیدراتاسیون در سن ۲۸ روز برای همه مخلوط‌ها نسبت به سن ۳ روزه تقریباً کامل شده است. با این حال شدت پیک‌های مرتبط با ساختار CH در نمونه حاوی سورفکتانت کمتر است، دلیل اصلی این موضوع خاصیت آبدوستی سورفکتانت است که موجب کاهش سرعت فرآیند هیدراتاسیون در مقایسه با سایر مخلوط‌ها شده است. همچنین، در مورد مخلوط 5G/0.56S، شدت پیک CH به نسبت نمونه شاهد کاهش داشته است، دلیل این موضوع مصرف CH و تبدیل آن به CSH می‌باشد که در طی ۲۸ روز نگهداری در آب رخ داده است.

انرژی سطحی بالای گرافن از یک طرف می‌تواند رشد تولید ژل CSH را تسریع بخشد و از طرف دیگر ترکیب آن با عامل پخش کننده‌ای همچون سورفکتانت در مخلوط 5G/0.56S باعث بهبود تراکم در ساختار خمیر سیمان گردد. همچنین این بهبود مقاومت در

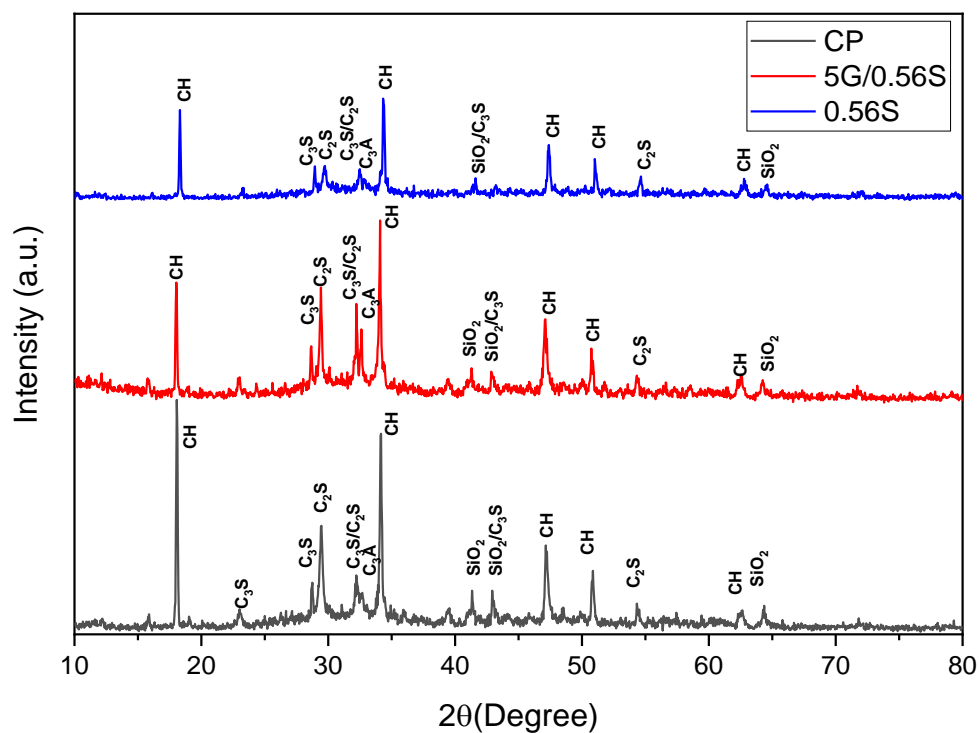
سنین اولیه (۳ و ۲۸ روزه) را می توان به اثر هسته زایی گرافن نسبت داد. در این راستا شاخص جهت گیری (R) که بیانگر رشد کریستال CH است کمک بسیار خوبی در مشخص نمودن رفتار هیدراتاسیون خمیرهای سیمان مورد مطالعه می نماید. این شاخص بر اساس رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$R = 1.35 \times I(001) / I(101) \quad \text{معادله ۱}$$

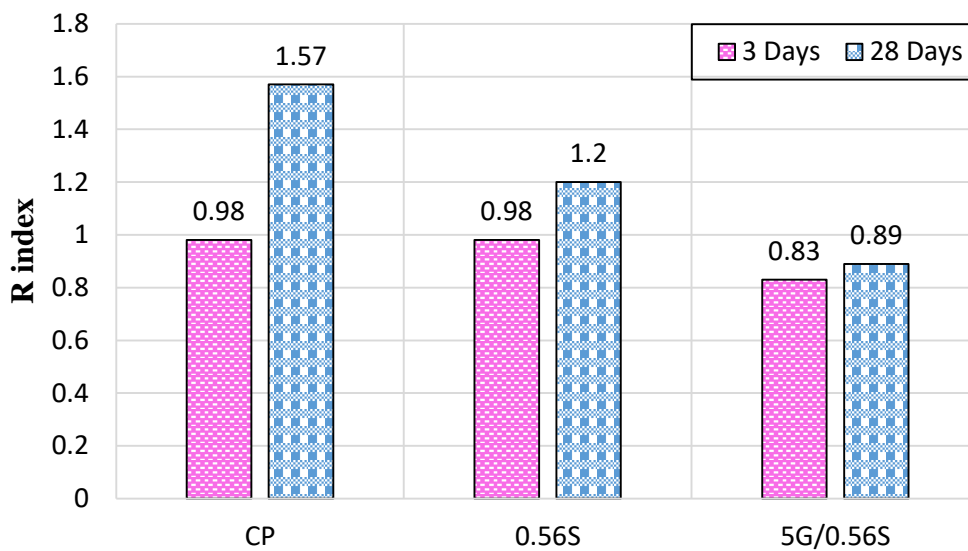
در معادله بالا $I(001)$ و $I(101)$ مربوط به اوج شدت CH به ترتیب در $18/1$ درجه و $34/2$ درجه می باشد. به طور کلی، مقدار کم شاخص R نشان دهنده تراکم بالای خمیر سیمان ناشی از مصرف پورتلاندیت و تبدیل آن به ژل سیلیکات کلسیم می باشد. نتایج شاخص جهت گیری نشان داده شده در شکل ۸ بر اساس الگوهای XRD در سنین ۳ و ۲۸ روز محاسبه گردیده اند. مخلوط 5G/0.56S کمترین شاخص جهت گیری را در مقایسه با سایر مخلوطها نشان می دهد، به این معنی که ۵ گرم در لیتر گرافیت و ۰/۵۶ گرم در لیتر سورفکتانت می تواند مقاومت فشاری خمیر سیمان را در سنین پایین افزایش دهد. البته از سوی دیگر، عملکرد سورفکتانت در پراکندگی ذرات گرافن در ماتریس سیمانی باعث تشکیل کریستال های متراکم CH و افزایش مقاومت فشاری در مخلوط 5G/0.56S گردیده است. شایان ذکر است که ساختار CSH در کلیه نمونه ها که در تصاویر SEM ارائه شده است که به دلیل فاز آمورف بودن آنها در الگوهای XRD قابل مشاهده نیست. این نتیجه نشان می دهد که گرافن تولید محصولات هیدراتاسیون سیمان را تسریع می کند و از طرفی با کاهش میزان ذرات غیرهیدراته سیمان، مقاومت مخلوط را در سنین اولیه بهبود می بخشد.



شکل ۶: الگوی آنالیز XRD طرح اختلاط های مختلف سیمانی شامل نمونه های CP، 0.56S و 5G/0.56S در سن ۳ روز.



شکل ۷: الگوی آنالیز XRD طرح اختلاط‌های مختلف سیمانی شامل نمونه‌های CP، 0.56S و 5G/0.56S در سن ۲۸ روز.



شکل ۸: میزان شاخص R برای نمونه‌های طرح اختلاط در سنین ۳ و ۲۸ روز.

۴-۳-۲- آنالیز ترموگراویمتری

شکل‌های ۹ و ۱۰ مشتق آنالیز ترموگراویمتری از خمیرهای سیمان مختلف را به ترتیب در سنین ۳ و ۲۸ روز نشان می‌دهند. در این مطالعه، محدوده تغییر دما برای آنالیز ترموگراویمتری در محدوده ۵۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. به‌طور کلی، مقدار حداکثر تغییر جرمی در ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به دلیل تجزیه اترینگایت و ژل CSH است. از طرفی مقدار شدت تغییر جرمی در حدود ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد به دلیل تجزیه سولفات کلسیم دی‌هیدراته می‌باشد. همچنین، تجزیه CH (پورتلاندیت) منجر به مقدار اوج تغییر جرمی در محدوده ۴۰۰-۵۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌گردد. علاوه بر این، تجزیه CaCO_3 بین ۶۵۰ تا ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد. تغییر جرم زیر ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد در مخلوط‌های مختلف خمیر سیمان عمدتاً به دلیل از دست دادن جرم ناشی از تبخیر آب در دماهای پایین است که به دو آب مختلف طبقه‌بندی می‌شوند: آب قابل تبخیر (کمتر از ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد) و آب غیرقابل تبخیر (بیشتر از ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد). عمده تغییر جرم در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد و بالاتر از آن مربوط به افت جرمی ناشی از انتشار $^{14}\text{CO}_2$ می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، مقدار حداکثر تغییر جرمی در حدود ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد برای مخلوط‌های CP و 0.56S کمتر از مخلوط 5G/0.56S است، که نشان می‌دهد تشکیل CH به‌طور کامل در این مخلوط‌ها رخ نمی‌دهد. از سوی دیگر نتایج نشان می‌دهد که شدت اوج‌های تغییر جرمی در حدود ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد (تجزیه CSH) در مخلوط 5G/0.56S به‌مراتب نسبت به مقدار متناظر در سایر مخلوط‌ها بیشتر می‌باشد که نشان‌دهنده وجود مقدار بالای ساختار CSH در این مخلوط است. علاوه بر این، ساختار CaCO_3 نیز در مخلوط 5G/0.56S مشاهده می‌گردد. از آنجایی که CaCO_3 حجم مولی بیشتری نسبت به Ca(OH)_2 دارد، وجود کربنات کلسیم در این مخلوط می‌تواند در مقاومت فشاری بالای آن مؤثر باشد. این نتایج با نتایج مقاومت فشاری ناشی از تشکیل محصولات هیدراتاسیون در سنین اولیه مطابقت دارد. در این تحقیق نتایج آنالیز ترموگراویمتری در سن ۳ روز برای مخلوط‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که سه پیک تجزیه مربوط به CSH، Ca(OH)_2 و CaCO_3 در مقدار مقاومت فشاری مؤثر هستند. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۹، اثر پراکندگی سورفکتانت و گرافیت در ماتریس سیمانی مخلوط 5G/0.56S منجر به افزایش فرآیند هیدراتاسیون در سنین اولیه می‌گردد. با افزایش سن نگهداری نمونه‌ها، فرآیند هیدراتاسیون در نمونه‌ها تکمیل می‌گردد که این موضوع به‌وضوح در شکل ۱۰ قابل مشاهده است. محصولات هیدراتاسیون همچون CSH و CH در مخلوط‌های CP و 0.56S پس از ۲۸ روز نگهداری ظاهر می‌شوند. ولی، شدت اوج آن‌ها در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد کمتر از مقدار مربوطه در مخلوط 5G/0.56S است. این امر نشان دهنده مقدار کم فرآیند هیدراتاسیون در دو مخلوط CP و 0.56S نسبت به مخلوط 5G/0.56S می‌باشد. لذا همواره مقدار CH درجه هیدراتاسیون سیمان را توصیف می‌کند. به‌طور کلی در آنالیز ترموگراویمتری افت وزنی در محدوده دمایی بین ۴۰۰-۵۰۰ درجه سانتی‌گراد مربوط به تجزیه CH بر مبنای واکنش‌های زیر می‌باشد:



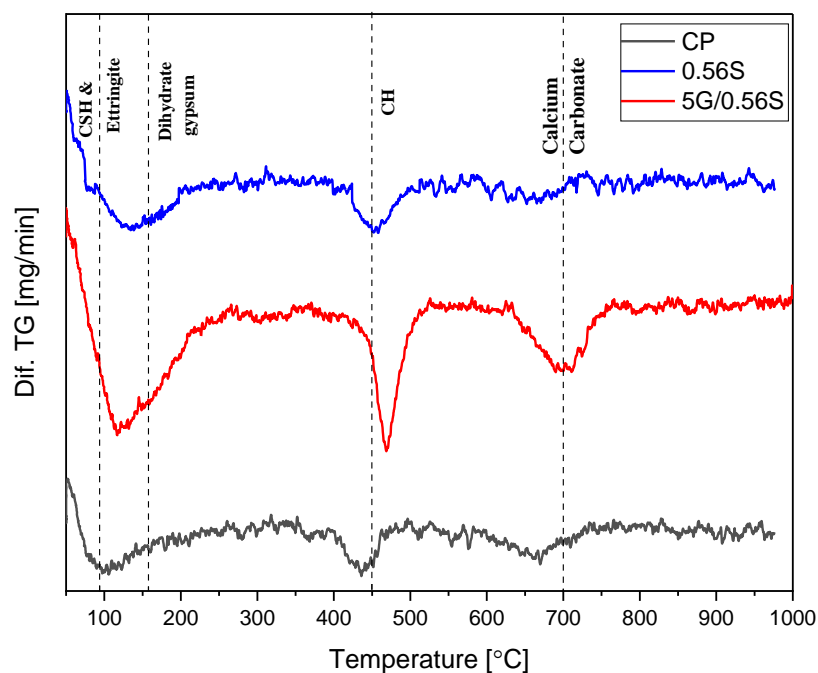
$$F_{\text{Ca(OH)}_2} = \frac{M_{\text{Ca(OH)}_2}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} \times M \quad \text{معادله ۳}$$

همان‌طور که در معادله مشاهده می‌شود، $F_{\text{Ca(OH)}_2}$ درصد وزنی مربوط به تجزیه ساختار Ca(OH)_2 است که از نسبت کسر جرم مولی کلسیم هیدروکسید و جرم مولی آب به دست می‌آید؛ همچنین M میزان تغییرات وزنی (g) از تغییرات دما از ۴۰۰ به ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

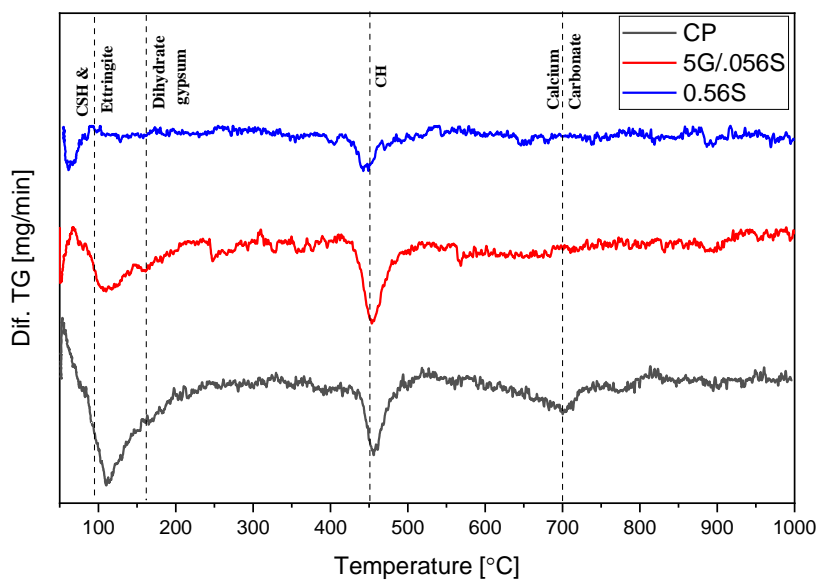
شکل ۱۱ کسر جرمی CH برای مخلوط‌های مورد مطالعه در سنین ۳ و ۲۸ روز را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، درصد کسر جرمی با افزایش سن نگهداری به دلیل تکمیل فرآیند هیدراتاسیون از C_2S و C_3S به CH و CSH در ماتریس سیمانی افزایش یافته است. مطابق شکل ۱۱، کمیت جرمی CH در مخلوط 5G/0.56S در سنین ۳ و ۲۸ روز بیشتر از مقدار متناظر در

¹¹ Decarburization

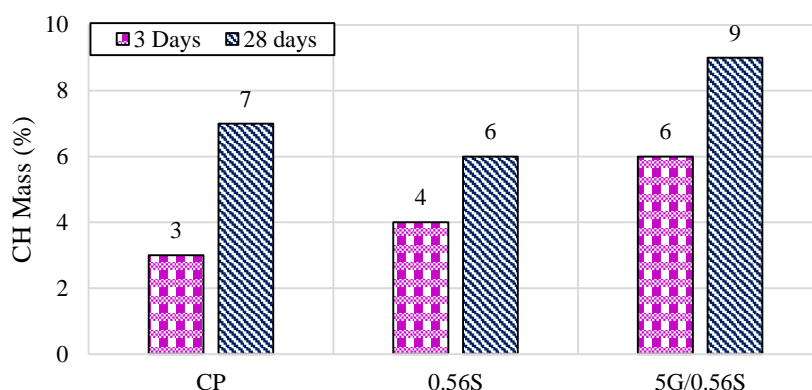
نمونه شاهد و مخلوط 0.56S می باشد. این نتیجه نشان می دهد که گرافن می تواند فرآیند هیدراتاسیون (افزایش تولید محصولات CH و CSH) را بهبود بخشد و مقاومت مکانیکی را در سنین پایین افزایش دهد.



شکل ۹: آنالیز ترموگراویمتری طرح های اختلاط مورد مطالعه در بازه ۵۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد در سن ۳ روز.



شکل ۱۰: آنالیز ترموگراویمتری طرح های اختلاط مورد مطالعه در بازه ۵۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد در سن ۲۸ روز.

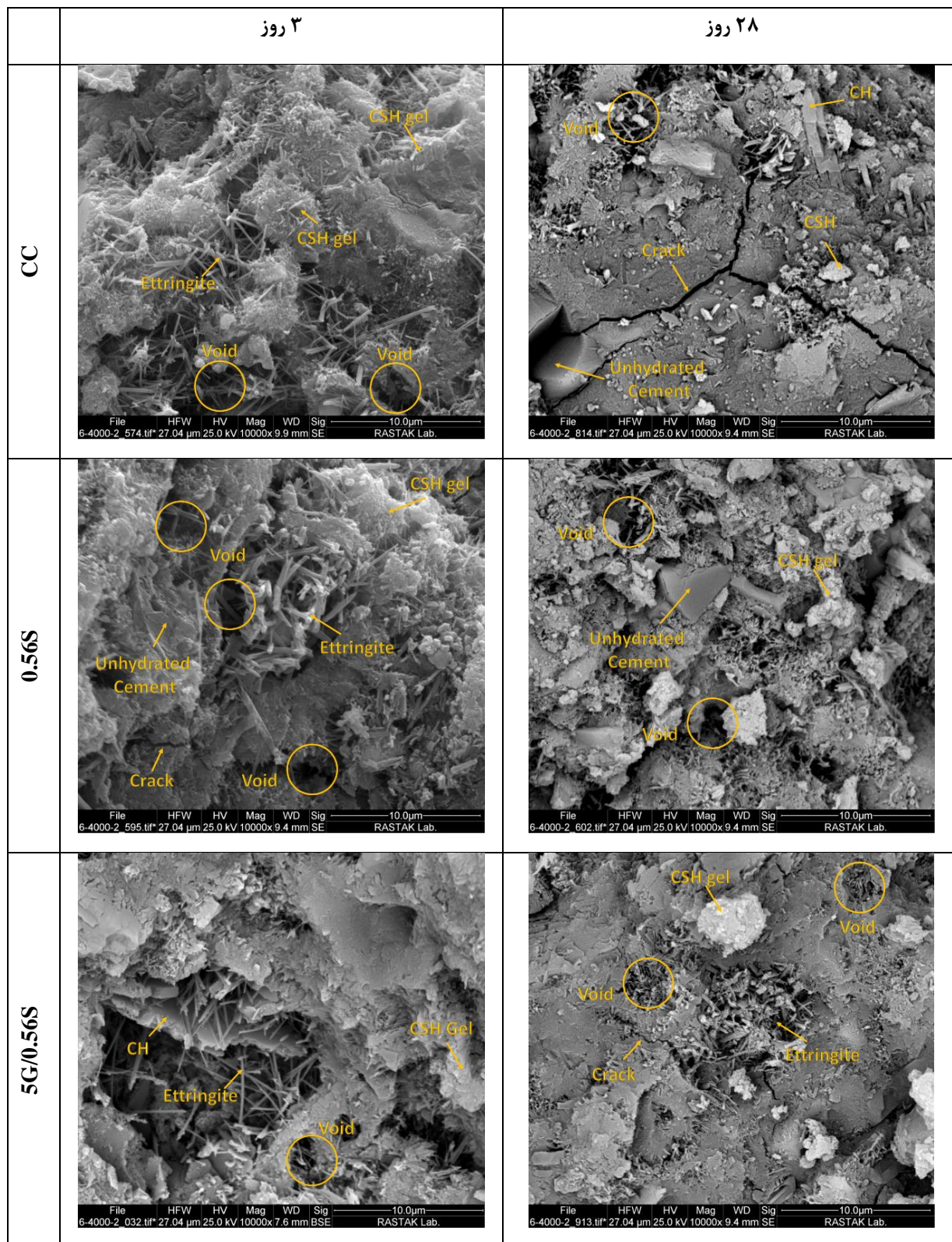


شکل ۱۱: میزان کاهش ساختار CH در طرح اختلاط‌های مورد مطالعه در سنین ۳ و ۲۸ روز.

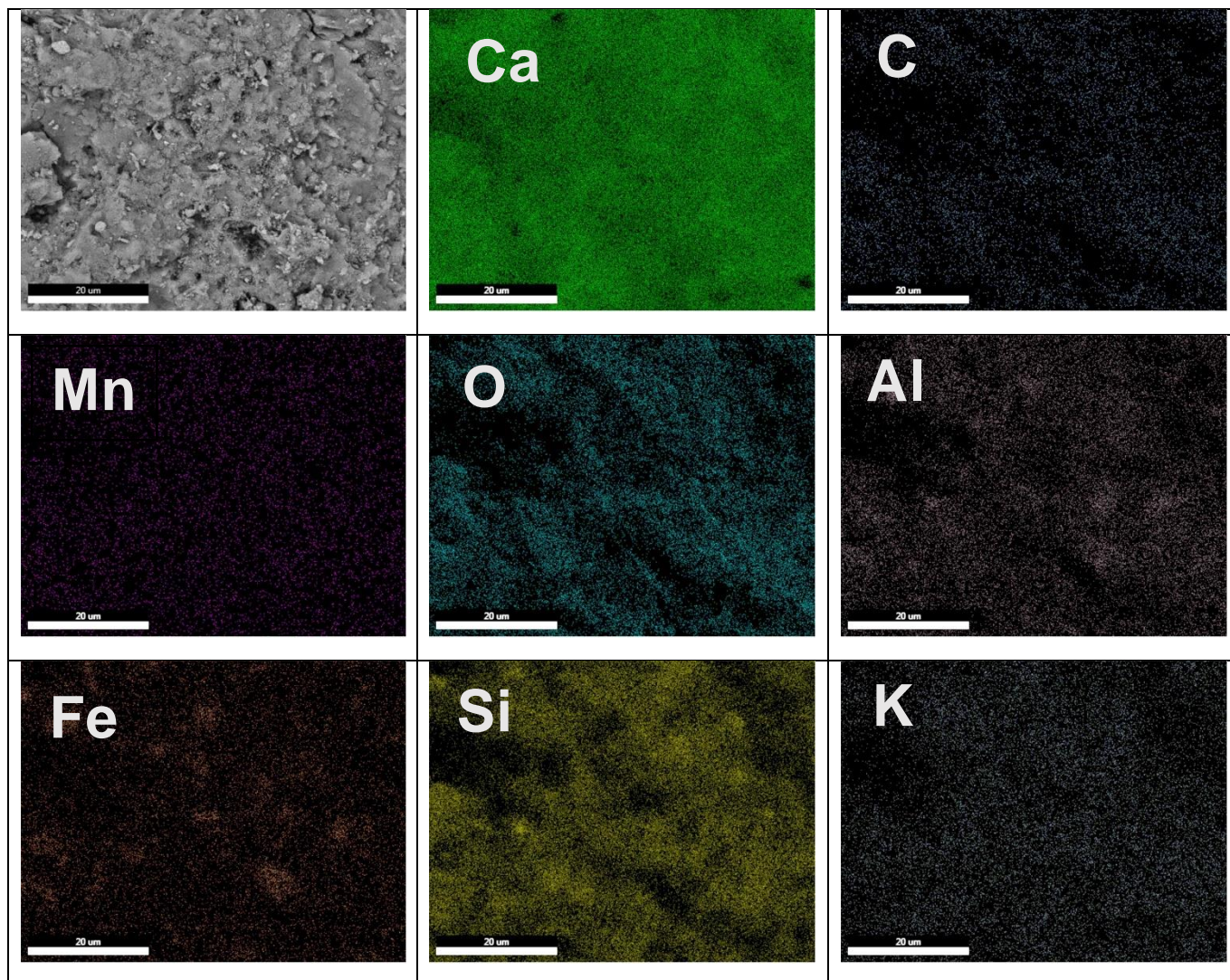
۴-۳-۳- آنالیز تصاویر FESEM

بررسی ریزساختار نمونه‌های خمیری می‌تواند بشناخت فاز هیدراتاسیون سیمان در حین عمل‌آوری کمک فراوانی بکند. شکل ۱۲ ریزساختار نمونه‌های مورد مطالعه خمیر سیمان در سنین ۳ و ۲۸ روز را نشان می‌دهد. عکس‌های SEM فازهای مختلف هیدراتاسیون CH، CSH و اترینگایت در نمونه‌های CP، 0.56S و 5G/0.56S را نشان می‌دهد. میزان گستردگی فازهای مختلف در فرآیند هیدراتاسیون به شرایط و ترکیبات موجود در سیمان بستگی دارد. در سن ۳ روز، ساختار نمونه شاهد و نمونه حاوی سورفکتانت به نسبت نمونه حاوی گرافن، دارای ساختار متخلخل‌تری می‌باشد. ایجاد ساختار متراکم در نمونه حاوی گرافن می‌تواند به دلیل هسته‌زایی توسط گرافن در ماتریس خمیری باشد که در همان ساعت اولیه ایجاد می‌گردد. این هسته‌زایی سبب شکل‌گیری ساختار CH، CSH در اطراف ذرات گرافن شده و منجر به ایجاد ساختار متراکم‌تر می‌گردد. مطالعات گذشته نیز شکل‌گیری ساختار هیدراتاسیون در اطراف گرافن دو بعدی را نیز تأیید کرده‌اند [۲۱]. دلیل شکل‌گیری این ساختار در روزهای اولیه فرآیند هیدراتاسیون وجود گروه‌های عاملی پخش‌کننده در ماتریس سیمان است [۲۲]. وجود این گروه‌های عاملی در سورفکتانت منجر به ایجاد پل‌زنی بین گرافن و فازهای سیمانی شده که این امر سبب تسریع فرآیند هیدراتاسیون می‌گردد. گرافن سبب شکل‌گیری فازهای مختلف ثانویه فرآیند هیدراتاسیون می‌گردد، این موضوع می‌تواند سبب ایجاد ژل CSH شده و منجر به کاهش فضای حفرات درون ساختاری گردد [۲۳]. با کاهش فضای خالی در داخل بتن و شکل‌گیری ساختار CSH مقاومت مکانیکی بتن افزایش می‌یابد. با افزایش سن نمونه‌ها به ۲۸ روز، فرآیند هیدراتاسیون در مخلوط‌های دیگر تقریباً تکمیل می‌گردد و محصولات هیدراتاسیون در داخل آن‌ها مشاهده می‌شود. مقایسه نمونه 5G/0.56S با سایر نمونه‌ها در سن ۲۸ روز نشان می‌دهد، سطح نمونه متراکم‌تر از سایر نمونه‌های است. در واقع پخش‌شدگی مناسب گرافن در داخل بتن سبب ایجاد هسته‌هایی به‌منظور رشد کریستال و تکمیل فرآیند هیدراتاسیون در داخل مخلوط سیمانی شده است که در نهایت منجر به افزایش تراکم CH و کاهش منافذ موئینگی در ساختار مخلوط سیمان می‌گردد.

همچنین در این تحقیق آنالیز عنصری در ساختار خمیر سیمان برای 5G/0.56S انجام پذیرفت. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، عناصر مختلف کلسیم، سیلیس، اکسیژن، آلومینیوم، کربن و... در سطح مخلوط نشان داده شده است. توزیع پراکندگی کربن در ساختار سیمان نشان‌دهنده عملکرد مناسب سورفکتانت در پخش‌کنندگی گرافن در ساختار خمیر را دارد. این امر حاکی از آن است که استفاده از سورفکتانت می‌تواند در توزیع گرافن در ساختار سیمانی مؤثر باشد.



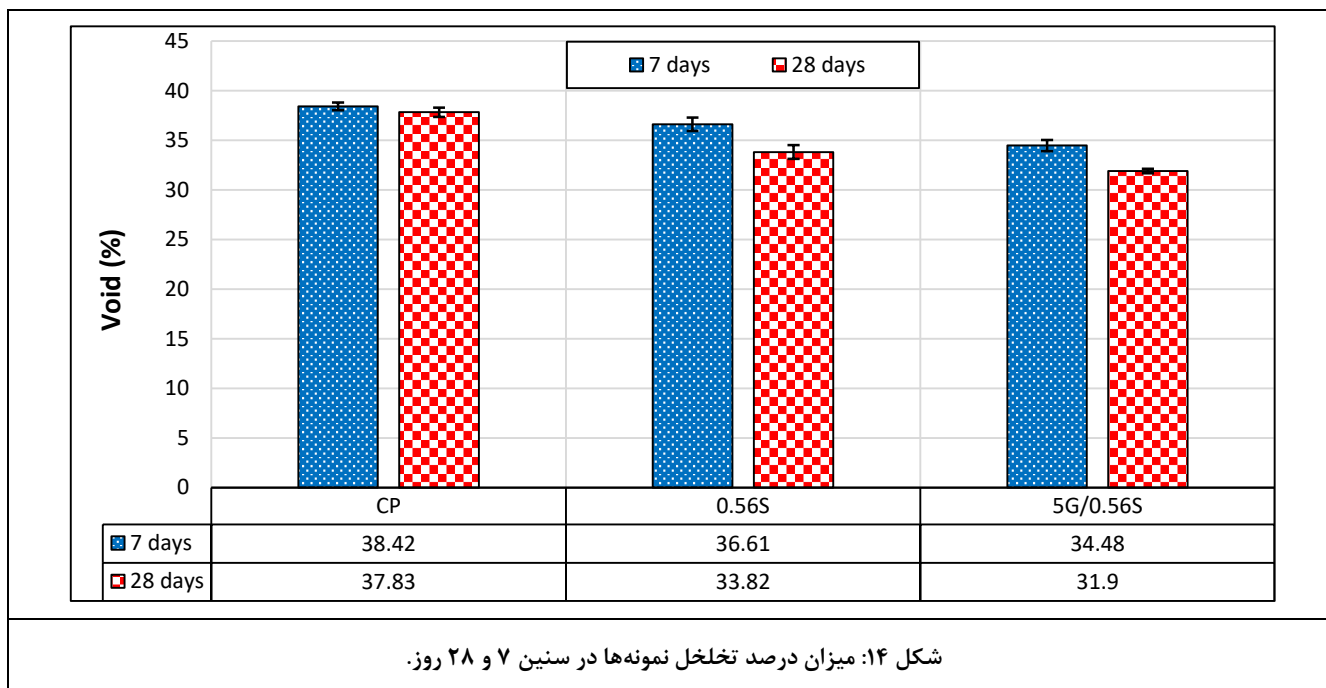
شکل ۱۲: تصاویر ریزساختار آنالیز FESEM برای طرح‌های اختلاط مورد مطالعه.



شکل ۱۳: نقشه آنالیز عنصری (EDX-MAP) نمونه 5G/0.56S به تفکیک عناصر موجود در سیمان و گرافن.

۴-۴- جذب آب حجمی

شکل ۱۴ جذب آب حجمی نمونه‌های مورد مطالعه در این طرح اختلاط را نشان می‌دهد. بر این اساس استفاده از سورفکتانت در خمیر سیمان (0.56S) میزان تخلخل در خمیر سیمان را کاهش می‌دهد. مقدار آب قابل تبخیر 0.56S در مخلوط به دلیل آب دوستی سورفکتانت کمتر از نمونه شاهد است. از طرفی مقدار آب قابل تبخیر رابطه مستقیمی با میزان تخلخل دارد [۷]. در نتیجه، منافذ قابل نفوذ در مخلوط 0.56S کمتر از خمیر کنترل خواهد بود. ترکیب گرافن و سورفکتانت با خمیر سیمان (5G/0.56S) این اثر مثبت را بهبود بخشیده است. حفره‌های قابل نفوذ در مخلوط 5G/0.56S به ترتیب ۱۱/۴۲ و ۱۸/۶ درصد کمتر از خمیر کنترل در سنین ۷ و ۲۸ روز است. بر اساس این نتایج، استفاده از سورفکتانت در خمیر سیمان تأثیر مؤثری در کاهش تخلخل نسبت دارد. با این حال، به دلیل نقش انسدادی گرافن در مقابل حفره‌ها، منافذ نفوذپذیر در نمونه حاوی سورفکتانت کاهش یافته است. این نتیجه با یافته‌های Hongjian Du و همکاران مطابقت دارد. آن‌ها همچنین کشف کردند که افزودن گرافن درجه تخلخل را کاهش می‌دهد [۲۴].



۵- نتیجه گیری

این مطالعه بر روی تأثیر سورفکتانت به‌عنوان یک عامل جداکننده تک لایه‌های گرافن از گرافیت جهت استفاده محلول گرافنی در خمیر سیمان به‌منظور کاهش مصرف سیمان با رویکرد استفاده از مصالح سبز در صنعت ساخت‌وساز و همچنین صرفه جویی در زمان به‌منظور بهره برداری زود هنگام در روسازی‌های بتنی و ابنیه متمرکز شده است. عمده نتایج این تحقیق به شرح ذیل می‌باشد:

۱. مخلوط 0.56S کمترین مقدار مقاومت را در سنین ۳ تا ۹۰ روز در مقایسه با مخلوط‌های دیگر از خود نشان می‌دهد. زیرا خواص آب دوستی سورفکتانت با جذب آب مورد نیاز برای هیدراتاسیون سیمان باعث کاهش سرعت فرآیندهای هیدراتاسیون می‌گردد. با این حال، اختلاط ۵ گرم در لیتر گرافیت و ۰/۵۶ گرم در لیتر سورفکتانت در خمیر سیمان (مخلوط 5G/0.56S) مقاومت فشاری را بهبود بخشید. از آنجایی که سورفکتانت لایه‌های گرافن را پراکنده می‌کند، باعث می‌شود صفحات گرافن روی حفره‌ها پخش شوند. علاوه بر این، مورفولوژی لایه‌ای گرافن می‌تواند منافذ به هم پیوسته را مسدود کند و در نتیجه منافذ را اصلاح نماید.
۲. در این مطالعه، سنتز سریع گرافن از طریق روش لایه‌برداری فاز مایع در محیط لایه بردار سورفکتانت با استفاده از یک مخلوط کن الکتریکی نشان داده شد. در این روش غلظت بهینه گرافیت و سورفکتانت تعیین گردید. ویژگی محلول گرافن تهیه‌شده نمونه 5G/0.56S از طریق تصاویر FESEM و TEM مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نمونه 5G/0.56S از تعداد زیادی تکه‌های نامنظم در ابعاد کوچک و بزرگ تشکیل شده است. همچنین بر مبنای این تصاویر می‌توان استنباط نمود که تولید گرافن از طریق لایه برداری سورفکتانت منجر به تکه‌تکه شدن دانه‌های گرافیت می‌گردد.
۳. با توجه به الگوی XRD از مخلوط‌های مختلف خمیر سیمان در سن ۳ روزه، نتایج شاخص جهت‌گیری (R) نشان داد که کریستال CH در مخلوط 5G/0.56S نسبت به دیگر نمونه‌ها متراکم‌تر است. از سوی دیگر، نتایج سن ۲۸ روزه نشان داد که فرآیند هیدراتاسیون در تمامی نمونه‌ها در حال تکمیل شدن است. در واقع، گرافن در شکل‌گیری ساختار CH و CSH در روزهای اولیه مؤثرتر است.
۴. نتایج آنالیز ترموگراویمتری در سن ۳ روز نشان داد که سه پیک تجزیه مربوط به ساختارهای CSH، $Ca(OH)_2$ و $CaCO_3$ با مقدار مقاومت فشاری ارتباط مستقیم دارند. بر اساس این نتایج، شدت فاز CSH، CH و $CaCO_3$ در مخلوط CP و 0.56S

سنین اولیه به نسبت مخلوط 5G/0.56S کمتر بود که این موضوع به دلیل اثر مثبت هسته‌زایی گرافن در ماتریس سیمانی می‌باشد.

۵. آنالیز ریزساختاری SEM نشان داد که گرافن می‌تواند روند هیدراتاسیون را تسریع بخشد و از طرفی فازهای CH و CSH اطراف ذرات گرافن تشکیل گردند. مشاهدات میکروسکوپی، ساختار متراکم مخلوط 5G/0.56S را نشان می‌دهد. در حالی که مخلوط‌های 0.56S و CP دارای ساختار نفوذپذیر هستند. بر مبنای این مشاهدات، گرافن تهیه شده با سورفکتانت، میزان CSH را افزایش می‌دهد و منافذ موئینگی می‌تواند در خمیر سیمان را کاهش می‌دهد.

قدردانی

نویسندگان مقاله تشکر ویژه‌ای از جناب آقای مهندس رحمت الله حکیمی مدیرعامل محترم شرکت مهندسان مشاور ایمن راه به منظور حمایت مالی این پروژه تحقیقاتی دارند. همچنین از آزمایشگاه مکانیک خاک استان کرمان جهت کمک در انجام بعضی از آزمایش‌ها، قدردانی می‌نمایند.

مراجع:

- [1] Samimi, K., Kamaragi, G.R.D. and Le Roy, R. (2019) , Microstructure, thermal analysis and chloride penetration of self-compacting concrete under different conditions, *Magazine of Concrete Research*, Thomas Telford Ltd. Vol. 71, pp. 126–43. <https://doi.org/10.1680/jmacr.17.00367>
- [2] Farahani, A. and Zanjirani Farahani, H. (2022) , Laboratory Study on Pozzolanic Concrete oriented to Durability Approach of RC Barriers (New Jersey), *Journal of Structural and Construction Engineering*,. <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.316266.2653>
- [3] Babaei, Y., Ghasemi, S.A.M. and Zandi, Y. (2021) , Comparative Evaluation of Effect of Fly Ash and Microsilica on the Development, Compressive Strength and Electrical Resistance of Concretes Exposed Chlorinated Waters, *Journal of Structural and Construction Engineering*,. <https://doi.org/10.22065/jsce.2021.297648.2517>
- [4] Samimi, K., Estakhr, F., Mahdikhani, M. and Moodi, F. (2018) , Influence of Metakaolin and Cements Types on Compressive Strength and Transport Properties of Self-Consolidating Concrete, *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, Vol. 12, pp. 243–9.
- [5] Ebrahimi Besheli, A., Samimi, K., Moghadas Nejad, F. and Darvishan, E. (2021) , Improving concrete pavement performance in relation to combined effects of freeze–thaw cycles and de-icing salt, *Construction and Building Materials*, Elsevier. Vol. 277, pp. 122273. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122273>
- [6] Samimi, K. and Shirzadi Javid, A.A. (2021) , Magnesium Sulfate (MgSO₄) Attack and Chloride Isothermal Effects on the Self-consolidating Concrete Containing Metakaolin and Zeolite, *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, Springer. Vol. 45, pp. 165–80. <https://doi.org/10.1007/s40996-020-00398-6>
- [7] Samimi, K., Kamali-Bernard, S., Akbar Maghsoudi, A., Maghsoudi, M. and Siad, H. (2017) , Influence of pumice and zeolite on compressive strength, transport properties and resistance to chloride penetration of high strength self-compacting concretes, *Construction and Building Materials*, Elsevier. Vol. 151, pp. 292–311. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.071>
- [8] Kianoosh Samimi, Siham Kamali-Bernard, A.A.M. (2018) , Resistance to Chloride Penetration of High Strength Self-Compacting Concretes: Pumice and Zeolite Effect, *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, Vol. 3, pp. 250–9.
- [9] Pachideh, G., Gholhaki, M., Moshtagh, A. and Felaverjani, M.K. (2019) , An Investigation on the Effect of High Temperatures on the Mechanical Properties and Microstructure of Concrete Containing Multiwalled Carbon Nanotubes, *Materials Performance and Characterization*, ASTM International. Vol. 8, pp. 503–17.
- [10] Pachideh, G., Gholhaki, M. and Moshtagh, A. (2019) , On the post-heat performance of cement mortar containing silica fume or Granulated Blast-Furnace Slag, *Journal of Building Engineering*, Elsevier. Vol. 24, pp. 100757.
- [11] Gong, K., Pan, Z., Korayem, A.H., Qiu, L., Li, D., Collins, F. et al. (2015) , Reinforcing Effects of Graphene Oxide on Portland Cement Paste, *Journal of Materials in Civil Engineering*, American Society of Civil Engineers. Vol. 27, pp. A4014010. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001125](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001125)
- [12] Li, X., Lu, Z., Chuah, S., Li, W., Liu, Y., Duan, W.H. et al. (2017) , Effects of graphene oxide aggregates on hydration degree, sorptivity, and tensile splitting strength of cement paste, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Elsevier. Vol. 100, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.05.002>

- [13] Pan, Z., He, L., Qiu, L., Korayem, A.H., Li, G., Zhu, J.W. et al. (2015) , Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide–cement composite, *Cement and Concrete Composites*, Elsevier. Vol. 58, pp. 140–7. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.02.001>
- [14] Seddighi, F., Pachideh, G. and Salimbahrami, S.B. (2021) , A study of mechanical and microstructures properties of autoclaved aerated concrete containing nano-graphene, *Journal of Building Engineering*, Elsevier. Vol. 43, pp. 103106.
- [15] Wang, Q., Wang, J., Lu, C.X., Liu, B.W., Zhang, K. and Li, C.Z. (2015) , Influence of graphene oxide additions on the microstructure and mechanical strength of cement, *Xinxing Tan Cailiao/New Carbon Materials*, Elsevier. Vol. 30, pp. 349–56. [https://doi.org/10.1016/s1872-5805\(15\)60194-9](https://doi.org/10.1016/s1872-5805(15)60194-9)
- [16] Du, H. and Pang, S.D. (2015) , Enhancement of barrier properties of cement mortar with graphene nanoplatelet, *Cement and Concrete Research*, Elsevier. Vol. 76, pp. 10–9. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.007>
- [17] Krystek, M., Ciesielski, A. and Samorì, P. (2021) , Graphene-Based Cementitious Composites: Toward Next-Generation Construction Technologies, *Advanced Functional Materials*, Wiley Online Library. Vol. 31, pp. 2101887. <https://doi.org/10.1002/adfm.202101887>
- [18] Lotya, M., King, P.J., Khan, U., De, S. and Coleman, J.N. (2010) , High-concentration, surfactant-stabilized graphene dispersions, *ACS Nano*, ACS Publications. Vol. 4, pp. 3155–62. <https://doi.org/10.1021/nn1005304>
- [19] Peyvandi, A., Soroushian, P., Balachandra, A.M. and Sobolev, K. (2013) , Enhancement of the durability characteristics of concrete nanocomposite pipes with modified graphite nanoplatelets, *Construction and Building Materials*, Elsevier. Vol. 47, pp. 111–7. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.002>
- [20] Peng, H., Ge, Y., Cai, C.S., Zhang, Y. and Liu, Z. (2019) , Mechanical properties and microstructure of graphene oxide cement-based composites, *Construction and Building Materials*, Elsevier. Vol. 194, pp. 102–9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.234>
- [21] Qureshi, T.S. and Panesar, D.K. (2020) , Nano reinforced cement paste composite with functionalized graphene and pristine graphene nanoplatelets, *Composites Part B: Engineering*, Elsevier. Vol. 197, pp. 108063. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108063>
- [22] Yang, H., Monasterio, M., Cui, H. and Han, N. (2017) , Experimental study of the effects of graphene oxide on microstructure and properties of cement paste composite, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Elsevier. Vol. 102, pp. 263–72. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.07.022>
- [23] Chen, Z., Zhou, X., Wang, X. and Guo, P. (2018) , Mechanical behavior of multilayer GO carbon-fiber cement composites, *Construction and Building Materials*, Elsevier. Vol. 159, pp. 205–12. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.094>
- [24] Du, H., Gao, H.J. and Pang, S.D. (2016) , Improvement in concrete resistance against water and chloride ingress by adding graphene nanoplatelet, *Cement and Concrete Research*, Elsevier. Vol. 83, pp. 114–23. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.02.005>