

Investigating the production of Graphene Solution in order to Increase the Mechanical Strength of Cement Mixtures

Kianoosh Samimi*

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

k_samimi@sbu.ac.ir

Mahyar Pakan

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

Research paper

ABSTRACT

Using different additives in order to increase the durability and mechanical resistance of concrete is one of the new approaches in concrete technology. In recent years, graphene has attracted attention due to its unique properties. However, the phenomenon of graphene accumulation in cement mixtures and high production costs have challenged its application in the concrete industry. For this purpose, it is necessary to use a graphene dispersing agent in the cement structure. This research used surfactants to spread graphene sheets in cement structures. This method has resulted in producing a cheap solution compared to typical methods, which can be used as an additive. The results of this research showed that the surfactant solution can increase mechanical properties at early ages. Detailed microstructure examination by FESEM analysis showed that the compounds containing 0.56 g/l of surfactant have a denser structure than the control sample, and also the compressive strength of the cement paste increased by 28.66% compared to the control sample at the age of 7 days. TGA and XRD analyzes show that graphene played an effective role in nucleation and produced CH and C-S-H in the cement structure. This solution can be used as a new additive in many construction projects.

Keywords: Microstructure; Surfactant; Graphene; Graphite; Compressive Strength.

*Corresponding Author: Kianoosh Samimi

samimi, K., Pakan, M. Investigation and production of Graphene Solution in order to Increase the Mechanical Strength of Cement Mixtures. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 2023; 8(1): 33-54.

<http://doi.org/10.30478/jcsm.2023.369056.1300>

2538-5828/ © 2023 The Authors. Published by Iranian Concrete Society

This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

بررسی و تولید محلول گرافنی به منظور افزایش مقاومت مکانیکی مخلوط‌های سیمانی

کیانوش صمیمی

استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
k_samimi@sbu.ac.ir

(نویسنده مسئول)

مهیار پاکان

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

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

استفاده از افزودنی‌های مختلف به منظور افزایش دوام و مقاومت مکانیکی بتن از رویکردهای نوین در تکنولوژی بتن است. گرافن به دلیل خواص منحصر به فرد آن مورد توجه بوده است. با این حال پدیده انباشتگی گرافن در مخلوط‌های سیمانی و هزینه تولید بالا کاربرد آن را در صنعت ساخت بتن با چالش مواجه کرده است. برای این منظور، استفاده از یک عامل پخش کننده گرافن در ساختار سیمان ضروری است. در این تحقیق، از سورفکتانت به منظور پخش صفحات گرافن در ساختار سیمانی استفاده شد. این روش موجب تولید محلول ارزان به نسبت روش‌های متداول شده است که می‌تواند به عنوان افزودنی مورد استفاده قرار بگیرد. نتایج حاصل این تحقیقات نشان داد که محلول سورفکتانت می‌تواند خواص مکانیکی را در سنین اولیه افزایش دهد. با بررسی دقیق ریزساختار به وسیله آنالیز FESEM مشاهده شد که ترکیبات حاوی ۰/۵۶ گرم در لیتر سورفکتانت ساختار متراکم‌تری نسبت نمونه شاهد دارند و همچنین مقاومت فشاری خمیر سیمانی نیز به میزان ۲۸/۶۶٪ نسبت به نمونه شاهد در سن ۷ روز افزایش داشته است. آنالیزهای TGA و XRD نشان می‌دهد که گرافن نقش مؤثر در هسته‌زایی داشته است و موجب تولید محصولات CH و H-S-C در ساختار سیمان شده است. این محلول می‌تواند به عنوان ماده افزودنی نوین در پروژه‌های عمرانی مورد استفاده قرار گیرد.

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

سالانه تولید و ساخت بتن بخش اعظمی از هزینه عمرانی کشورها را به خود اختصاص می‌دهد. تولید سیمان و استخراج سنگدانه از معادن، فشار مضاعفی بر روی محیط‌زیست زمین می‌گذارد. فرآیند تولید سیمان باعث تولید گاز CO₂ می‌گردد که سهم آن در انتشار گازهای گلخانه‌ای و متعاقباً گرمایش زمین ۸ درصد است [۱]. لذا بر مبنای توافق آب‌وهوایی پاریس در سال ۲۰۲۰ محققین به دنبال استفاده از مصالح نوینی هستند که با مصرف کم آن‌ها در سازه‌های بتنی بتوان مقاومت و دوام بالایی را به دست آورد. در سال‌های اخیر، علاقه فزاینده‌ای به استفاده از نانو مواد برای بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌های سیمانی وجود داشته است. اثر افزودنی‌های مختلفی اعم از متاکائولن [۱]، ژئولیت [۲]، نانو کربن [۳]، دوده سلیس [۴]، گرافن [۵-۸] و ... را مطالعه نمودند. در این میان گرافن ماده‌ای منحصر به فرد با افزایش خواصی همچون مقاومت فشاری، کششی، خمشی، در فناوری بتن بسیار مورد توجه قرار گرفته است. گرافن یک لایه اتمی منفرد از گرافیت معدنی رایج است. به عبارت دیگر، گرافیت مجموعه‌ای از لایه‌های گرافن است که توسط نیروهای ضعیف و اندروالسی به یکدیگر متصل شده‌اند. گرافن و مشتقات آن همچون اکسید گرافن (GO)، نانو پلاکت‌های اکسید گرافن (GONPs) و نانو پلاکت‌های گرافن (GNPs) می‌توانند به‌عنوان یک افزودنی در مخلوط‌های سیمانی جهت افزایش استحکام و پایداری سازه‌ها در صنعت ساخت و ساز 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 [۶] گزارش دادند که مخلوط 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 [۵] بررسی کردند که افزودنی‌های GO می‌تواند بر مقاومت مکانیکی، جذب موئینگی آب و درجه هیدراته شدن 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. وانگ^۳ و همکاران [۷] دریافتند که مخلوط GO باعث افزایش هیدراته شدن، کاهش حجم منافذ، تسریع در شکل‌گیری بلور و رشد یکسان آن‌ها و همچنین افزایش مقاومت در سیمان می‌گردد. بر اساس نتایج آن‌ها پس از ۲۸ روز، مقاومت فشاری و خمشی خمیر سیمان سخت شده به ترتیب ۴۰/۴ و ۹۰/۵ درصد افزایش یافت. دوو^۴ و همکاران [۸] 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 پیچ‌خوردگی 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 آبریز و انرژی سطحی بالا به سبب فعل و انفعالات قوی و اندروالسی، پتانسیل بالایی برای انباشته شدن در محیط‌های آبی دارند. رایج‌ترین استراتژی برای جلوگیری از انباشتگی گرافن استفاده از سورفکتانت‌ها در مخلوط‌های سیمانی است [۹]. 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 هیدراته شدن بررسی شده است. 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. علاوه بر این، اثر

¹ Gong et al.

² Li et al.

³ Wang et al.

⁴ Du et al.

گرافن بر ریزساختار خمیر سیمان در سنین ۳ و ۲۸ روز آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی^۵ (FESEM)، حرارتی^۶ (TGA)، پراش اشعه ایکس^۷ (XRD) انجام شد تا فرآیند هیدراته شدن نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد. این نتایج به همراه داده‌های مقاومت فشاری برای نشان دادن اثر محلول گرافن تهیه شده بر روی خمیر سیمان مورد بحث قرار گرفت.

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 ریز گرافیت ($>50\mu\text{m}$ اندازه ذرات) شرکت Merck استفاده گردید. سیمان پرتلند نوع II با نرمی بلین 290 kg/m^3 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 و فیزیکی پودر سیمان

| سیمان تیپ ۲ | آنالیز فیزیکی و شیمیایی (% برحسب جرم) |
|-------------|------------------------------------------------------|
| 33/1 | افت حرارتی |
| 78/21 | SiO ₂ |
| 0/5 | Al ₂ O ₃ |
| 0/4 | Fe ₂ O ₃ |
| 04/63 | CaO |
| 2 | MgO |
| 3/2 | SO ₃ |
| 6/0 | باقی مانده نامحلول |
| 1 | قلیائیت (% Na ₂ O%+0.658K ₂ O) |
| - | Na ₂ O+K ₂ O |
| 4/1 | Free Cao |
| - | رطوبت |
| 5/45 | C ₃ S |
| 0/28 | C ₂ S |
| 5/6 | C ₃ A |
| 2/12 | C ₄ AF |
| 290 | مساحت سطح ویژه (m ² /kg) |

⁵ Field emission scanning electron microscopy (FESEM).

⁶ Thermo-gravimetric analysis (TGA).

⁷ X-ray diffraction (XRD).

۲-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها

۲-۲-۱- تهیه محلول گرافن

در این مطالعه محلول گرافن از مخلوط کردن گرافیت، سورفکتانت به‌عنوان عامل پخش‌کننده و آب در یک مخلوط‌کن الکتریکی با روش لایه‌برداری فاز مایع تهیه گردید. بدین منظور ابتدا مقدار معینی گرافیت و سورفکتانت به آب آشامیدنی در مخلوط‌کن برقی اضافه شد و مخلوط‌کن به مدت ۱ ساعت با سرعت ۱۶۰۰۰ دور در دقیقه روشن بود تا گرافن به‌طور یکنواخت در آب پراکنده شود. سپس مخلوط حاصل پس از ۳۰ دقیقه به دمای محیطی رسیده و ذرات بزرگ در آن ته‌نشین می‌گردد. متعاقباً محلول نهایی در ساخت خمیر سیمان استفاده گردید.

۲-۲-۲- روند مخلوط خمیر سیمان

در این مطالعه تمامی مخلوط‌های خمیر سیمان در یک مخلوط‌کن ۶ لیتری تولید شدند. مراحل انجام فرآیند 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 مخلوط، مخلوط‌کن با یک پوشش پلاستیکی پوشانده شد.

۲-۳- آماده‌سازی و نگهداری نمونه‌ها

در این مطالعه، نمونه‌های خمیر سیمان مکعبی $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ بر اساس استانداردهای ASTM C31 (۲۰۲۱) و ASTM C511 (۲۰۱۹) تهیه شدند. پس از ریختن نمونه‌ها در درون قالب، روی نمونه‌ها را با دو لایه از ورقه‌های پلاستیکی پوشانده و 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 مخلوط

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 مخلوط، نسبت گرافیت به سورفکتانت (G/S) بیش از ۱ با تولید کف بالا همراه بود (شکل ۱). 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 مخلوط‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱- تولید کف بالا در فرآیند تهیه محلول گرافن برای نسبت $G/S > 1$

جدول ۲: انتخاب نسبت گرافیت به سورفکتانت در طراحی مخلوط

| غلظت گرافیت (g/L) | | | | نسبت گرافیت / سورفکتانت (G/S) |
|----------------------|------|------|------|-------------------------------|
| ۱ | ۳ | ۵ | ۷ | |
| غلظت سورفکتانت (g/L) | | | | |
| ۰/۳۳ | ۱ | ۱/۶۶ | ۲/۳۳ | ۳ |
| ۰/۲ | ۰/۶ | ۱ | ۱/۴ | ۵ |
| ۰/۱۴ | ۰/۴۳ | ۰/۷۱ | ۱ | ۷ |
| ۰/۱۱ | ۰/۳۳ | ۰/۵۶ | ۰/۷۸ | ۹ |

جدول ۳- طرح مخلوط نمونه‌های خمیر سیمان

| W/ C _m | سورفکتانت (mg) | گرافیت (mg) | آب (g) | عیار سیمان (g) | نام طرح |
|----------------------|-------------------|----------------|-----------|-------------------|----------|
| ۰/۴ | - | - | ۱۶۸ | ۴۲۰ | CP |
| ۰/۴ | ۹۴/۰۸ | - | ۱۶۸ | ۴۲۰ | 0.56S |
| ۰/۴ | ۵۵/۴۴ | ۱۶۸ | ۱۶۸ | ۴۲۰ | 1G/0.33S |
| ۰/۴ | ۵۵/۴۴ | ۵۰۴ | ۱۶۸ | ۴۲۰ | 3G/0.33S |
| ۰/۴ | ۷۲/۲۴ | ۵۰۴ | ۱۶۸ | ۴۲۰ | 3G/0.43S |
| ۰/۴ | ۱۰۰/۱۸ | ۵۰۴ | ۱۶۸ | ۴۲۰ | 3G/0.6S |
| ۰/۴ | ۷۵/۶ | ۸۴۰ | ۱۶۸ | ۴۲۰ | 5G/0.45S |
| ۰/۴ | ۹۴/۰۸ | ۸۴۰ | ۱۶۸ | ۴۲۰ | 5G/0.56S |
| ۰/۴ | ۱۱۹/۲۸ | ۸۴۰ | ۱۶۸ | ۴۲۰ | 5G/0.71S |

| | | | | | |
|-----|--------|------|-----|-----|----------|
| ۰/۴ | ۱۳۱/۰۴ | ۱۱۷۶ | ۱۶۸ | ۴۲۰ | 7G/0.78S |
|-----|--------|------|-----|-----|----------|

۳- روش آزمایش

۳-۱- مقاومت فشاری

آزمونه‌های مکعبی با ابعاد $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ 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 C109M / ASTM C109 با سرعت بارگذاری (N/S) ۱۰۰۰ صورت پذیرفت. مقاومت فشاری هر مخلوط بر روی سه نمونه ارزیابی شد و مقدار میانگین به‌عنوان نتیجه گزارش گردید.

۳-۲- آنالیز ریزساختار

۳-۲-۱- آنالیز FESEM-EDX

مورفولوژی نمونه‌ها پس از رسوب طلا توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) با استفاده از FEI ESEM Quanta ۲۰۰ تعیین شد. طیف‌سنجی اشعه ایکس (EDX) برای مشاهدات میکرو آنالیز عنصری بر روی نمونه بهینه پس از ایجاد پوشش طلا بروی نمونه‌ها انجام شد.

۳-۲-۲- آنالیز TGA

در این تحقیق، آنالیز ترموگراویمتری (TGA) در محیط آرگون با استفاده از STA ۵۰۴ BAHAR، برای محاسبه درجه هیدراته شدن مخلوط‌های CP، ۰.۵۶S، ۰.۵۶S/۵G انجام شد. در طول آزمایش، نمونه‌های پودری (حدود ۱۰ میلی‌گرم) 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 میلی‌لیتر در دقیقه استفاده شد.

۳-۲-۳- آنالیز XRD

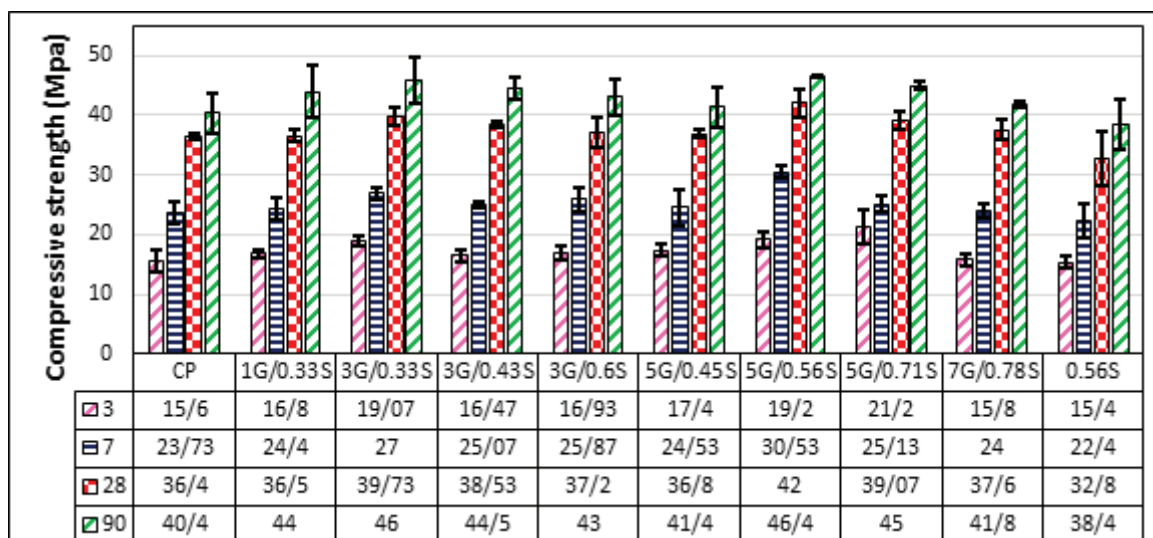
آنالیز کریستوگرافی (XRD) بر روی نمونه‌های مختلف خمیر سیمان پودر شده با تابش Cu K ($\lambda = 1.5406$) تحت شرایط ۴۰ کیلوولت و ۳۰ میلی‌آمپر از دستگاه کریستوگرافی فیلیپس Xpert استفاده شد. در هر مرحله اسکن از ۱۰ تا ۸۰ درجه با گام 0.02 درجه (2θ) و سرعت اسکن ۲ ثانیه صورت گرفت.

۴- بحث و نتایج

۴-۱- مقاومت فشاری

در شکل ۲ 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 ۰.۵۶S/۵G و ۰.۵۶S 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 ۰.۵۶S است. زیرا با جذب آب مورد نیاز برای هیدراته شدن سیمان، سرعت فرآیندهای هیدراته شدن را کاهش می‌دهد. این موضوع می‌تواند به دلیل جذب آب (خاصیت آبدوستی سورفکتانت) در دسترس در فرآیند هیدراتاسیون باشد و همچنین با توجه به داشتن خاصیت کف‌زایی، سورفکتانت می‌تواند منجر به اختلال در فرآیند هیدراتاسیون شود [۱۰-۱۲]. در نتیجه، محصولات هیدراته شدن مانند پرتلندیت و ژل سیلیکات کلسیم با سرعت کمتری تولید شده‌اند و بنابراین

رشد مقاومت فشاری در مخلوط ۰,۵۶S کم است. این اثر به خوبی در بخش نتایج آنالیز حرارتی به اثبات رسیده است. از سوی دیگر، سورفکتانت به عنوان یک عامل پخش کننده خوب در نمونه های حاوی گرافیت عمل می کند. این اثر در نتایج مقاومت فشاری برای مخلوط های متعدد حاوی گرافن بر مبنای سورفکتانت به خوبی مشاهده شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۲، مقاومت فشاری مخلوط ۰,۵۶S/۵G به ترتیب ۰,۲۳/۰۸٪، ۰,۲۸/۶۶٪، ۰,۱۵/۳۸٪ و ۰,۱۴/۸۵٪ بیشتر از نمونه شاهد در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز است. علاوه بر این، مخلوط های 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 ۰,۳۳S/۳G در بیشترین مقاومت فشاری را در میان سایر مخلوط های حاوی ۳ گرم در لیتر گرافیت نشان داد. برعکس، مقدار مقاومت فشاری مخلوط های ۰,۳۳S/۱G، ۰,۴۵S/۵G و ۰,۷۸S/۷G نسبت به مقدار متناظر در نمونه شاهد در سنین مختلف تقریباً یکسان است. بر اساس نتایج ذکر شده در بالا، می توان نتیجه گرفت که مخلوط ۵ گرم در لیتر گرافیت و ۰/۵۶ گرم در لیتر سورفکتانت در خمیر سیمان (مخلوط ۰,۵۶S/۵G) بیشترین مقدار مقاومت فشاری در مقایسه با سایر مخلوط ها نشان می دهد. علت این افزایش مقاومت به پراکندگی لایه های گرافن توسط سورفکتانت ارتباط دارد که در نهایت صفحات گرافن به خوبی بر روی حفره ها پخش شده و یک ریزساختار متراکم در ماتریس سیمانی ایجاد می گردد. علاوه بر این، مورفولوژی لایه های گرافن این پتانسیل را دارد که منافذ متصل به هم را مسدود کند و از این رو شبکه های منفذی بهبود یابد [۸، ۱۳].



۴-۳- ریزساختار خمیر سیمان

۴-۳-۱- آنالیز XRD

الگوهای XRD مخلوط های مختلف خمیر سیمان در سنین ۳ و ۲۸ روز به ترتیب در شکل های ۳ و ۴ ارائه شده اند. با توجه به این نتایج، پیک های اصلی XRD مشاهده شده برای همه مخلوط ها عبارتند از پورتلندیت (CH)، سیلیکات تری کلسیم (C_۳S)، سیلیکات دی کلسیم (C_۲S)، آلومینات تری کلسیم (C_۳A) و کلسیم کربنات (CaCO_۳). همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده

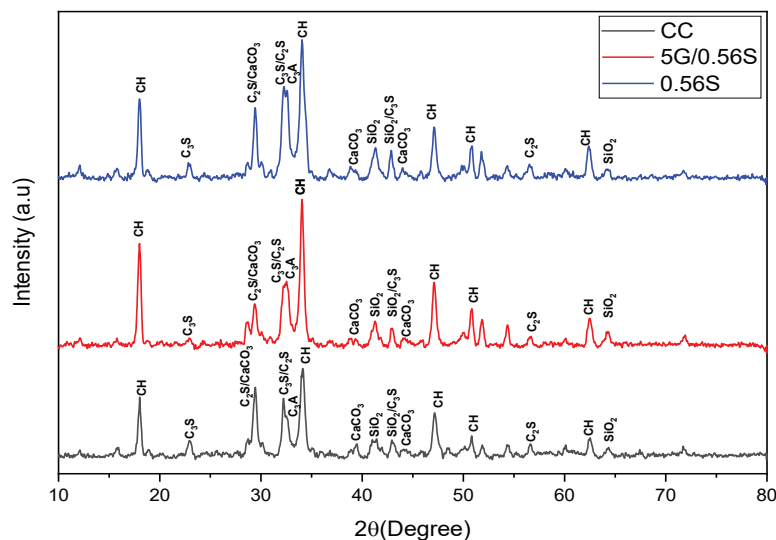
است، پیک‌های مربوط به فاز C_3S در نمونه حاوی گرافن (مخلوط $5G/0.56S$) در مقایسه با مخلوط‌های CP و $0.56S$ در سن ۳ روز به دلیل مصرف C_3S و تبدیل آن به CH به‌عنوان محصول هیدراته شدن شدت آن کاهش یافته است. علیرغم شدت بالای CH در مخلوط حاوی سورفکتانت و بدون گرافیت (مخلوط $0.56S$) در مقایسه با نمونه شاهد، 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 [۱۰-۱۲]. بنابراین، فرآیند هیدراته شدن به‌صورت جزئی انجام شده و ذرات غیرهیدراته در ماتریس سیمان باقی‌مانده 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 CSH عامل اصلی افزایش مقاومت در خمیر سیمان است که به دلیل داشتن ساختار آمورف در نمودار قابل مشاهده نیست. همچنین برحسب نتایج ارائه شده در شکل ۳، 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 هیدراته شدن و ایجاد ساختار CH است.

نتایج XRD ارائه‌شده در شکل ۴، نشان می‌دهد که فرآیند هیدراته شدن در سن ۲۸ روز برای همه مخلوط‌ها نسبت به سن ۳ روزه تقریباً کامل شده است. باین‌حال 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 هیدراته شدن در مقایسه با سایر مخلوط‌ها شده است. همچنین، در مورد مخلوط $0.56S/5G$ ، شدت پیک CH به نسبت نمونه شاهد کاهش داشته است، دلیل این موضوع مصرف CH و تبدیل آن به CSH است که در طی ۲۸ روز نگهداری در آب رخ داده است.

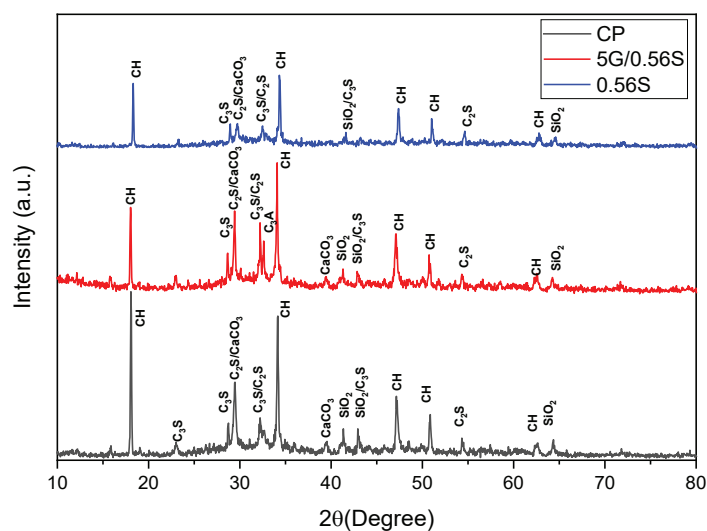
انرژی سطحی بالای گرافن از یک‌طرف می‌تواند رشد تولید ژل CSH را تسریع بخشد و از طرف دیگر ترکیب آن با عامل پخش‌کننده‌ای همچون سورفکتانت در مخلوط $0.56S/5G$ باعث بهبود تراکم در ساختار خمیر سیمان گردد. همچنین این بهبود مقاومت در سنین اولیه (۳ و ۲۸ روزه) را می‌توان به اثر هسته‌زایی گرافن نسبت داد. در این راستا شاخص جهت‌گیری (R) که بیانگر رشد کریستال CH است کمک بسیار خوبی در مشخص نمودن رفتار هیدراته شدن خمیرهای سیمان مورد مطالعه می‌نماید. این شاخص بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۱۴]:

$$R = 1.35 \times I(0\ 0\ 1) / I(1\ 0\ 1) \quad \text{معادله ۱}$$

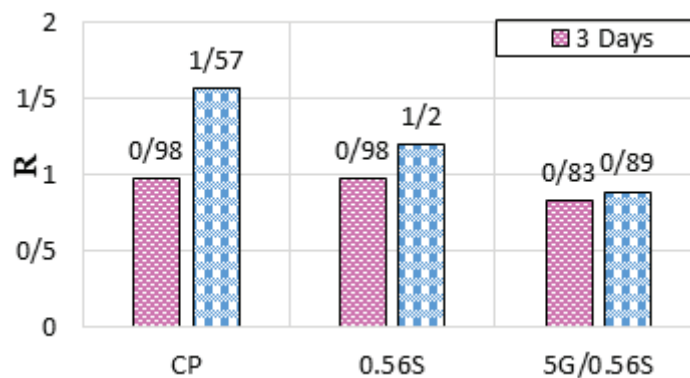
در معادله بالا $I(0\ 0\ 1)$ و $I(1\ 0\ 1)$ مربوط به میزان شدت CH به ترتیب در $1/1$ درجه و $2/2$ درجه است. به‌طورکلی، مقدار کم شاخص R نشان‌دهنده تراکم بالای خمیر سیمان ناشی از مصرف پورتلاندیت و تبدیل آن به ژل سیلیکات کلسیم است. نتایج شاخص جهت‌گیری نشان داده شده در شکل ۵ بر اساس الگوهای XRD در سنین ۳ و ۲۸ روز محاسبه گردیده‌اند. مخلوط $0.56S/5G$ کمترین شاخص جهت‌گیری را در مقایسه با سایر مخلوط‌ها نشان می‌دهد، به این معنی که ۵ گرم در لیتر گرافیت و ۵۶ گرم در لیتر سورفکتانت می‌تواند 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 کریستال‌های متراکم CH و افزایش مقاومت فشاری در مخلوط $5G/0.56S$ گردیده است. شایان ذکر است که ساختار CSH در کلیه نمونه‌ها که در تصاویر SEM ارائه شده است که به دلیل فاز آمورف بودن آن‌ها در الگوهای XRD قابل مشاهده نیست. این نتیجه نشان می‌دهد که گرافن تولید محصولات هیدراته شدن سیمان را تسریع می‌کند و از طرفی با کاهش میزان ذرات غیرهیدراته سیمان، مقاومت مخلوط را در سنین اولیه بهبود می‌بخشد.



شکل ۳- الگوی آنالیز XRD طرح مخلوط‌های مختلف سیمانی شامل نمونه‌های 5G/0.56S و CP⁰ 0.56S در سن ۳ روز



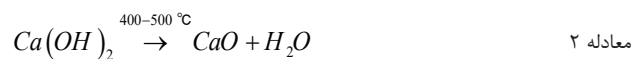
شکل ۴- الگوی آنالیز XRD طرح مخلوط‌های مختلف سیمانی شامل نمونه‌های 5G/0.56S و CP⁰ 0.56S در سن ۲۸ روز



شکل ۵- میزان شاخص R برای نمونه‌های طرح مخلوط در سن ۳ و ۲۸ روز

۴-۳-۲- آنالیز حرارتی

شکل‌های ۶ و ۷ مشتق آنالیز حرارتی در واحد زمان را از خمیرهای سیمان مختلف را به ترتیب در سنین ۳ و ۲۸ روز نشان می‌دهند. در این مطالعه، محدوده تغییر دما برای آنالیز حرارتی در محدوده ۱۰۵ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. به‌طور کلی، مقدار حداکثر تغییر جرم در محدود ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد به دلیل تجزیه سولفات کلسیم دی‌هیدراته است. 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 CO_2 است [۱۵]. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، مقدار حداکثر تغییر جرمی در حدود ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد برای مخلوط‌های CP و ۵۶S، کمتر از مخلوط ۵۶S/۵G است، که نشان می‌دهد تشکیل CH به‌طور کامل در این مخلوط‌ها رخ نمی‌دهد. علاوه بر این، ساختار CaCO_3 نیز در مخلوط ۵۶S/۵G مشاهده می‌گردد. وجود این پیک را می‌توان به وجود گرافن در ساختار خمیر سیمانی نسبت داد [۱۶]. در این تحقیق نتایج آنالیز حرارتی در سن ۳ روز برای مخلوط‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که دو پیک تجزیه مربوط به Ca(OH)_2 و CaCO_3 در مقدار مقاومت فشاری مؤثر هستند. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۶، اثر پراکندگی سورفکتانت و گرافیت در ماتریس سیمانی مخلوط ۵۶S/۵G، منجر به افزایش فرآیند هیدراته شدن در سنین اولیه می‌گردد. با افزایش سن نگهداری نمونه‌ها، فرآیند هیدراته شدن در نمونه‌ها تکمیل می‌گردد که این موضوع به‌وضوح در شکل ۷ قابل مشاهده است. محصولات CH در مخلوط‌های CP و ۵۶S، پس از ۲۸ روز نگهداری ظاهر می‌شوند. ولی، شدت اوج آن‌ها در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد کمتر از مقدار مربوطه در مخلوط 5G/0.56S است. این امر نشان دهنده مقدار کم فرآیند هیدراته شدن در دو مخلوط CP و ۵۶S، نسبت به مخلوط 5G/0.56S است. لذا همواره مقدار CH درجه هیدراته شدن سیمان را توصیف می‌کند. به‌طور کلی در آنالیز حرارتی افت وزنی در محدوده دمایی بین ۴۰۰-۵۰۰ درجه سانتی‌گراد مربوط به تجزیه CH بر مبنای واکنش‌های زیر است [۱۵]:

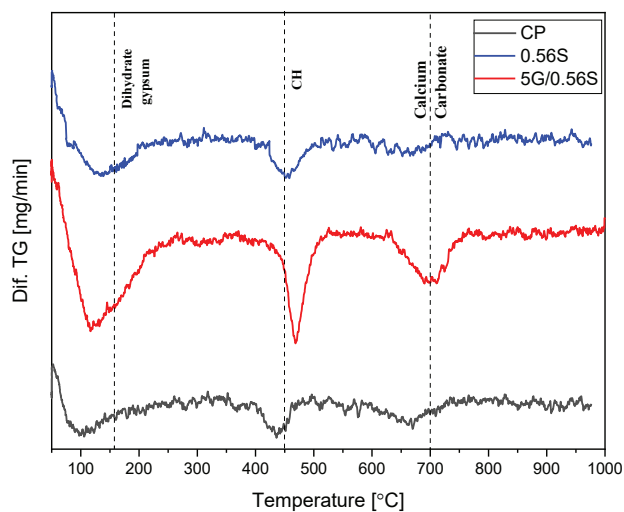


$$F_{\text{Ca(OH)}_2} = \frac{M_{\text{Ca(OH)}_2}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} \times M \quad \text{معادله ۳}$$

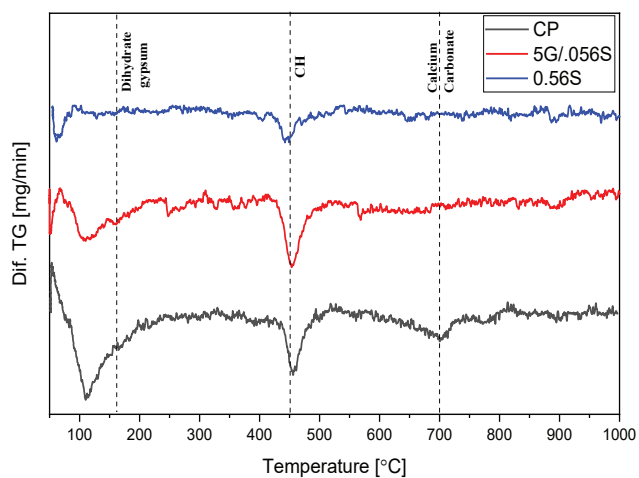
همان‌طور که در معادله مشاهده می‌شود، $F_{\text{Ca(OH)}_2}$ درصد وزنی مربوط به تجزیه ساختار Ca(OH)_2 است که از نسبت کسر جرم مولی کلسیم هیدروکسید و جرم مولی آب به دست می‌آید؛ همچنین M میزان تغییرات وزنی (g) از تغییرات دما از ۴۰۰ به ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد است.

شکل ۸ 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 هیدراته شدن از C_pS و C_sS به CH و CSH در ماتریس سیمانی افزایش یافته است. مطابق شکل ۸، کمیت جرمی CH در مخلوط 5G/0.56S در سنین ۳ و ۲۸ روز بیشتر از مقدار متناظر در نمونه شاهد و مخلوط ۵۶S است. این نتیجه نشان می‌دهد که گرافن می‌تواند فرآیند هیدراته شدن (افزایش تولید محصولات CH و CSH) را بهبود بخشد و مقاومت مکانیکی را در سنین پایین افزایش دهد.

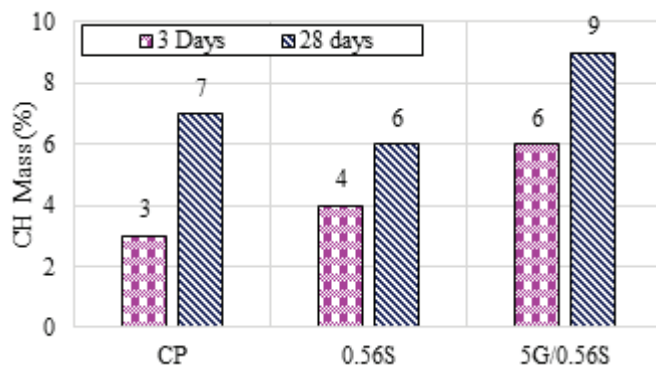
⁸ Decarburization



شکل ۶- آنالیز حرارتی طرح‌های مخلوط مورد مطالعه در بازه ۵۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد در سن ۳ روز



شکل ۷- آنالیز حرارتی طرح‌های مخلوط مورد مطالعه در بازه ۵۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد در سن ۲۸ روز



شکل ۸- میزان ساختار CH در طرح مخلوط‌های مورد مطالعه در سنین ۳ و ۲۸ روز.

بررسی ریزساختار نمونه‌های خمیری می‌تواند بشناخت فاز هیدراته شدن سیمان در حین عمل‌آوری کمک فراوانی بکند. شکل ۹ ریزساختار نمونه‌های مورد مطالعه خمیر سیمان در سنین ۳ و ۲۸ روز را نشان می‌دهد. عکس‌های SEM فازهای مختلف هیدراته شدن CSH، CH و اترینگایت در نمونه‌های CP، 0.56S و 5G/0.56S را نشان می‌دهد. میزان گستردگی فازهای مختلف در فرآیند هیدراته شدن 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 متخلخل تری است. 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 هیدراته شدن در اطراف گرافن دو بعدی را نیز تأیید کرده‌اند [۱۷]. دلیل شکل‌گیری این ساختار در روزهای اولیه فرآیند هیدراته شدن وجود گروه‌های عاملی پخش‌کننده در ماتریس سیمان است [۱۸]. وجود این گروه‌های عاملی در سورفکتانت منجر به ایجاد پل‌زنی بین گرافن و فازهای سیمانی شده که این امر سبب تسریع فرآیند هیدراته شدن می‌گردد. گرافن سبب شکل‌گیری فازهای مختلف ثانویه فرآیند هیدراته شدن می‌گردد، این موضوع می‌تواند سبب ایجاد ژل CSH شده و منجر به کاهش فضای حفرات درون ساختاری گردد [۱۹]. با کاهش فضای خالی در داخل بتن و شکل‌گیری ساختار CSH مقاومت مکانیکی بتن افزایش می‌یابد. با افزایش سن نمونه‌ها به ۲۸ روز، فرآیند هیدراته شدن در مخلوط‌های دیگر تقریباً تکمیل می‌گردد و محصولات هیدراته شدن در داخل آن‌ها مشاهده می‌شود. مقایسه نمونه 0.56S/5G با سایر نمونه‌ها در سن ۲۸ روز نشان می‌دهد، سطح نمونه متراکم‌تر از سایر نمونه‌ها است. در واقع پخش‌شدگی مناسب گرافن در داخل بتن سبب ایجاد هسته‌هایی به‌منظور رشد کریستال و تکمیل فرآیند هیدراته شدن در داخل مخلوط سیمانی شده است که در نهایت منجر به افزایش تراکم CH و کاهش منافذ موئینگی در ساختار مخلوط سیمان می‌گردد.

| | روز 3 | روز 28 |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CP | <p>File: 6-4000-2_936.tif* 27.04 μm 25.0 kV 10000x 9.1 mm BSE 10.0 μm RASTAK Lab.</p> | <p>File: 6-4000-2_950.tif* 27.04 μm 25.0 kV 10000x 9.0 mm BSE 10.0 μm RASTAK Lab.</p> |
| 0.56S | <p>File: 6-4000-2_932.tif* 27.04 μm 25.0 kV 10000x 10.6 mm BSE 10.0 μm RASTAK Lab.</p> | <p>File: 6-4000-2_921.tif* 27.04 μm 25.0 kV 10000x 10.2 mm BSE 10.0 μm RASTAK Lab.</p> |
| 5G/0.56S | <p>File: 6-4000-2_032.tif* 27.04 μm 25.0 kV 10000x 8.0 mm BSE 10.0 μm RASTAK Lab.</p> | <p>File: 6-4000-2_616.tif* 27.04 μm 25.0 kV 10000x 12.1 mm BSE 10.0 μm RASTAK Lab.</p> |

شکل ۹- تصاویر ریزساختار آنالیز FESEM برای طرح‌های مخلوط مورد مطالعه.

نتیجه گیری

این مطالعه بر روی تأثیر سورفکتانت به عنوان یک عامل جداکننده تک لایه‌های گرافن از گرافیت جهت استفاده محلول گرافنی در خمیر سیمان به منظور افزایش مقاومت با رویکرد استفاده از مصالح سبز در صنعت ساخت و ساز و همچنین صرفه‌جویی در زمان به منظور بهره‌برداری زود هنگام در روسازی‌های بتنی و ابنیه متمرکز شده است. عمده نتایج این تحقیق به شرح ذیل است:

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 آب‌دوستی سورفکتانت با جذب آب مورد نیاز برای هیدراته شدن سیمان باعث کاهش سرعت فرآیندهای هیدراته شدن می‌گردد. با این حال، مخلوط 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 لایه‌های گرافن می‌تواند منافذ به هم پیوسته را مسدود کند و در نتیجه سیستم‌های منافذ را اصلاح نماید.

۲. 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 هیدراته شدن در تمامی نمونه‌ها در حال تکمیل شدن است. در واقع، گرافن در شکل‌گیری ساختار CH و CSH در روزهای اولیه مؤثرتر است.

۳. نتایج آنالیز حرارتی 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 ۰.۵۶S در سنین اولیه به نسبت مخلوط ۵G/۰.۵۶S کمتر بود که این موضوع به دلیل اثر مثبت هسته‌زایی گرافن در ماتریس سیمانی است.

۴. آنالیز ریزساختاری SEM نشان داد که گرافن می‌تواند روند هیدراته شدن را تسریع بخشد و از طرفی فازهای CSH و CH در اطراف ذرات گرافن تشکیل گردند. مشاهدات میکروسکوپی، ساختار متراکم مخلوط ۵G/۰.۵۶S را نشان می‌دهد. در حالی که مخلوط‌های ۰.۵۶S و CP دارای ساختار نفوذپذیر هستند. بر مبنای این مشاهدات، گرافن پراکنده در آب تهیه شده با استفاده از سورفکتانت، میزان CSH را افزایش می‌دهد و منافذ موئینگی می‌تواند در خمیر سیمان را کاهش می‌دهد.

تشکر و 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.

منابع

- [1] Samimi, K., Farahani, M., Pakan, M. and Shirzadi Javid, A.A. (2022), *Influence of Pumice and Metakaolin on Compressive Strength and Durability of Concrete in Acidic Media and on Chloride Resistance under Immersion and Tidal Conditions. Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering, Springer. Vol. 46, pp. 1153–75.*
- [2] Samimi, K. and Shirzadi Javid, A.A. (2020), *Magnesium Sulfate (MgSO_4) 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. pp. 1–16.*

- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Feneuil, B., Pitois, O. and Roussel, N. (2017) ,Effect of surfactants on the yield stress of cement paste. *Cement and Concrete Research, Elsevier*. Vol. 100, pp. 32–9.
- [11] Sobolkina, A., Mechtcherine, V., Khavrus, V., Maier, D., Mende, M., Ritschel, M. et al. (2012) ,Dispersion of carbon nanotubes and its influence on the mechanical properties of the cement matrix. *Cement and Concrete Composites, Elsevier*. Vol. 34, pp. 1104–13.
- [12] Samimi, K., Pakan, M. and Eslami, J. (2023) ,Investigating the compressive strength and microstructural analysis of mortar containing synthesized graphene and natural pozzolan in the face of alkali-silica reactions. *Journal of Building Engineering, Elsevier*. Vol. 68, pp. 106126.
- [13] 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.
- [14] Liu, J., Fu, J., Yang, Y. and Gu, C. (2019) ,Study on dispersion, mechanical and microstructure properties of cement paste incorporating graphene sheets. *Construction and Building Materials, Elsevier*. Vol. 199, pp. 1–11.
- [15] Wang, Y.Y., Zhao, L. and Zhao, J. (2021) ,Effects of Submicron Metakaolin on Hydration and Compressive Strength of Portland Cement Slurry. *KSCE Journal of Civil Engineering, Springer*. Vol. 25, pp. 2631–9.
- [16] Yaseen, S.A., Yiseen, G.A. and Li, Z. (2019) ,Elucidation of Calcite Structure of Calcium Carbonate Formation Based on Hydrated Cement Mixed with Graphene Oxide and Reduced Graphene Oxide. *ACS Omega, ACS Publications*. Vol. 4, pp. 10160–70.
- [17] 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*.

vier. Vol. 197, pp. 108063.

[18] 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.*

[19] 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.*

Evaluation of the Effect of adding PET Polymer Waste on the Compressive Strength and Weight of Concrete in order to Make Sustainable Materials

Saeed Kazemi Fard

*Msc Student, Architecture, Art and Architecture, University of Mazandaran, Babolsar, Iran.
Saeedkazemifard2@gmail.com*

Mostafa Gholipour Gashniani *

*Assistant professor, Department of Architecture, Arts and Architecture, University of Mazandaran, Babolsar, Iran
Research paper*

Abstract

Cement-based materials that are used in construction today, require the extraction of natural sand and gravel on a very large scale, which is still increasing. On the other hand, with the ever-increasing production of plastics, especially PET polymer, which is one of the examples of its uses is in mineral water bottles, and the release of these bottles after consumption in nature, a new challenge in the field of environmental destruction has been created. In this research, with the aim of recycling PET and reducing the consumption of natural aggregates in the production of cement and concrete mortars, fine particles of PET (WPLA) were replaced with sand in different percentages, and factors such as weight and compressive strength of the manufactured composites were evaluated. The results showed that these materials have less weight than the samples without WPLA, but their compressive strength has decreased and according to the standards in this field, they are placed in the category of non-load bearing materials and in the section of non-structural parts can be used.

Keywords: Sustainable materials, Concrete materials, PET recycling.

This paper was extracted from a master thesis titled “Feasibility study of using recycled materials in the construction of temporary post-disaster housing” under supervision by the second at University of Mazandaran

***Corresponding Author:** Mostafa Gholipour Gashniani

Saeed Kazemi Fard, S., Gholipour gashniani, M. Evaluation of the Effect of adding PET Polymer Waste on the Compressive Strength and Weight of Concrete in order to Make Sustainable Materials. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 2023; 8(1): 75-55. <http://doi.org/10.30478/jcsm.2023.392823.1315>

2538-5828/ © 2023 The Authors. Published by Iranian Concrete Society

This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).