

## Preparation of Superabsorbent Microparticles for Production of Concrete Using Ultrasound: A Performance Study

Mojdeh Ashkani<sup>1</sup>, Hossein Bouhendi<sup>1\*</sup>, Mohammad Reza Rostami<sup>2</sup>, Kourosh Kabiri<sup>1</sup>,  
Majid Ghiass<sup>3</sup>

1. Department of Adhesive and Resin, Faculty of Petrochemical, 2. Department of Polymerization Engineering, Faculty of Engineering, 3. Department of Process Modeling and Control, Faculty of Engineering; Iran Polymer and Petrochemical Institute, P.O. Box 14975-112, Tehran, Iran

Received: 11 January 2023, accepted: 6 July 2023

### ABSTRACT

**Hypothesis:** Superabsorbent polymers are modifiers that have broad applications. One of their applications is in concrete production industry. The use of these materials for supplying water to cement materials and their curing process has attracted the attention of researchers. Using SAPs in concrete is a valuable tool for areas where conventional curing is very difficult, such as extreme weather conditions that can lead to excessive evaporation and freezing. It also saves water.

**Methods:** Modified carbopol was prepared using poly(ethylene glycol) methyl ether methacrylate as a monomer with a molecular weight of 300 g/mol in amounts of 1, 2 and 3 g and with azobisisobutyronitrile (AIBN) as the initiator by ultrasound method. The properties of the prepared microgel and its effect on the properties of cement paste are investigated. The prepared microgel has been studied using FTIR analysis, scanning electron microscopy, particle size determination and swelling properties. In addition, the effect of prepared microgel on different properties of cement paste, such as rheology, compressive and flexural strength and hydration, is investigated.

**Findings:** The results of FTIR and microscopic images showed that the monomer was modified. According to the swelling results, it was observed that carbopol has no absorption and it is dissolved. After modification, the swelling and absorption properties are obtained. The swelling capacity in water and saline solution has increased first and then decreased with increasing monomer concentration. The resultant cement pastes show that the compressive strength of samples is decreased in the presence of modified carbopol. In addition, the strength of the cement paste prepared with commercial superabsorbent (polyacrylic acid sodium salt) has increased with the same water:cement ratio. The flexural strength is reduced in all samples compared to the reference. According to the results, the modified carbopol has increased the viscosity of the cement pastes. According to the XRD results, hydration and curing of samples with superabsorbent have completed within 28 days compared to the control cement. Therefore, it can be concluded that superabsorbents generally cause a delay in hydration, and besides the hydration of the superabsorbent-cement specimens is decreased by reducing the monomer.

#### Keywords:

carbopol,  
poly(ethylene glycol) methyl  
ether methacrylate,  
superabsorbent,  
ultrasound,  
cement

(\*To whom correspondence should be addressed.

E-mail: H.Bouhendi@ippi.ac.ir

#### Please cite this article using:

Ashkani M., Bouhendi H., Rostami M.R., Kabiri K., Ghiass M., Preparation of Superabsorbent Microparticles for Production of Concrete Using Ultrasound: A Performance Study, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **36**, 61-72, 2023.

# تهیه میکروذرات ابرجاذب برای ساخت بتن با فراصوت‌دهی و بررسی عملکرد آن

مژده اشکانی<sup>۱</sup>، حسین بوهندی<sup>۱\*</sup>، محمدرضا رستمی<sup>۲</sup>، کوروش کبیری<sup>۱</sup>، مجید غیاث<sup>۳</sup>

تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، صندوق پستی ۱۱۲-۱۴۹۷۵:

۱- پژوهشکده پتروشیمی، گروه چسب و رزین، ۲- پژوهشکده مهندسی، گروه پلیمری‌اسیون،

۳- پژوهشکده مهندسی، گروه مدل‌سازی و کنترل فرایند

دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۱، پذیرش: ۱۴۰۲/۴/۱۵

## چکیده

**فرضیه:** پلیمرهای ابرجاذب مواد اصلاح‌کننده با کاربردهای گسترده هستند. یکی از کاربردهای این مواد در صنعت تولید بتن است. استفاده از این مواد برای آبدهی به مواد سیمانی و پخت آن‌ها بیش از یک دهه است که مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. استفاده از ابرجاذب‌ها در بتن روش ارزشمندی بوده، برای مناطقی که عمل‌آوری معمولی بسیار دشوار است، مانند شرایط آب‌وهوایی ناپایدار که می‌تواند به تبخیر بیش از حد و یخ‌زدگی منجر شود. همچنین، باعث صرفه‌جویی در مصرف آب نیز می‌شود.

**روش‌ها:** میکروژل کربوپل (پلی‌آکرلیک اسید شبکه‌ای) اصلاح‌شده با مونومر پلی‌اتیلن گلیکول) متیل اتر متاکریلات با وزن مولکولی ۳۰۰ g/mol در مقادیر مختلف (۱، ۲ و ۳ g) به کمک آغازگر آزوبیس‌ایزوبوتیرونیتریل با فراصوت‌دهی تهیه شد و خواص میکروژل تهیه‌شده و نیز اثر آن بر خواص سیمان بررسی شد. میکروژل تهیه‌شده با آزمون‌های طیف‌سنجی زیرقرمز تبدیل فوریه (FTIR)، میکروسکوپی الکترونی پویشی، تعیین اندازه ذره و خواص تورمی بررسی شد. همچنین اثر میکروژل تهیه‌شده بر خواص متفاوت سیمان مانند رئولوژی، استحکام فشاری و خمشی و آبدهی ارزیابی شد.

**یافته‌ها:** نتایج FTIR و تصاویر میکروسکوپی نشان داد، اصلاح مونومرها انجام شده است. با توجه به نتایج تورمی مشاهده شد، کربوپل در آب و آب نمک هیچ جذبی ندارد و حل می‌شود و پس از اصلاح نیز خاصیت تورمی و جذب حاصل شده است. ظرفیت تورم در آب و آب نمک با افزایش غلظت مونومر پلی‌اتری ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت. نتایج نمونه‌های سیمان نشان داد، استحکام فشاری نمونه سیمان در مجاورت کربوپل اصلاح‌شده با مونومر پلی‌اتری کاهش یافت. همچنین با مقایسه استحکام نمونه‌های تهیه‌شده و نمونه تجاری مشخص شد، نمک سدیم پلی‌آکرلیک اسید با نسبت آب به سیمان یکسان موجب افزایش استحکام فشاری نمونه شاهد شده است. استحکام خمشی نیز در تمام نمونه‌ها نسبت به نمونه مرجع کاهش یافت. با توجه به نتایج گران‌روی، میکروژل کربوپل با مونومر پلی‌اتری گران‌روی نمونه‌های سیمان را افزایش داد. با توجه به نتایج XRD آبدهی و پخت نمونه‌های دارای ابرجاذب نسبت به سیمان شاهد تا ۲۸ روز ادامه داشت. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، ابرجاذب‌ها در کل موجب تأخیر در آبدهی می‌شوند.

\* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

H.Bouhendi@ippi.ac.ir

## واژه‌های کلیدی

کربوپل،  
پلی‌اتیلن گلیکول) متیل اتر  
متاکریلات،  
ابرجاذب،  
فراصوت،  
سیمان

## مقدمه

پلیمرهای ابرجاذب انواع خاصی از هیدروژل‌ها و موادی آب‌دوست با ساختار شبکه‌ای هستند و قابلیت جذب و نگهداری مقدار بسیار زیادی آب یا محلول‌های آبی را به‌طور فیزیکی در ساختار خود دارند. ظرفیت جذب آب هیدروژل‌های معمولی اغلب از ۱۰۰٪ (۱ g/g) فراتر نمی‌رود، اما پلیمرهای ابرجاذب می‌توانند تا ۱۰۰۰ g/g آب خالص را جذب کنند. بیشترین کاربرد صنعتی پلیمرهای ابرجاذب در تولید پوشک بچه و سایر محصولات بهداشتی است که حدود ۹۴٪ بازار این مواد را به خود اختصاص داده است و دومین کاربرد عمده صنعتی پلیمرهای ابرجاذب در اصلاح خاک و باغبانی است [۱-۳].

کربوپل، پلیمر آکریلیک اسید شبکه‌ای شده شناخته شده است که ذرات بسیار ریز و سفید با وزن مولکولی بسیار زیاد و قابلیت تورم در آب را دارد. متوسط ابعاد ذرات این پلیمر حدود ۷-۲  $\mu\text{m}$  تخمین زده می‌شود. اندازه‌گیری وزن مولکولی این مواد ناممکن است، اما به‌طور نظری بین ۷۰۰۰۰ تا ۳ بیلیون تخمین زده می‌شود. افزون بر وزن مولکولی پلیمر خطی، وزن مولکولی بین دو شبکه‌ساز متوالی ( $M_c$ ) به‌کمک خواص رئولوژیکی (اندازه‌گیری مدول کشسانی) و نسبت تورم تعادلی در کربوپل‌ها محاسبه می‌شود.  $M_c$  برای هر کربوپل متفاوت و بین ۱۰۰۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰۰ متغیر است. IR، NMR، UV برای تعیین گروه‌های عاملی کربوپل به‌کار گرفته می‌شوند [۴، ۵].

بیش از یک دهه است که کاربرد ابرجاذب‌ها برای آبدهی به مواد سیمانی و عمل‌آوری آن‌ها مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است و با در نظر گرفتن حجم زیاد تولید جهانی سیمان، در صورت محقق شدن استفاده صنعتی آن‌ها در تولید بتن و ملات آماده، یکی از کاربردهای عمده این مواد را تشکیل خواهد داد [۶-۱۱]. پلیمرهای ابرجاذب (هیدروژل‌ها) ساختاری شبکه‌ای از زنجیرهای پلیمری پیوندخورده به یکدیگرند که قابلیت جذب و نگهداری آب را دارند و می‌توانند طی زمان به تدریج آب حبس شده را آزاد کنند [۱۲].

عمل‌آوری درونی به معنی فراهم آوردن بخشی از آب لازم برای فرایند آبدار شدن سیمان به صورت آب ذخیره شده درون مواد جاذب و نگه‌دارنده آب در مخلوط سیمانی است. با استفاده از عمل‌آوری درونی، حین آبدار شدن بتن، رطوبت نسبی درون مخلوط همواره زیاد می‌ماند و از خشک شدن و جمع‌شدگی خودبه‌خود جلوگیری می‌شود. برای اینکه بتوان از ماده‌ای برای عمل‌آوری درونی استفاده کرد، باید مقدار جذب آب آن زیاد باشد، آب جذب شده را به‌آسانی در اختیار بگذارد و نیز با سامانه سیمانی سازگار باشد. برخی مواد آب را به‌طور فیزیکی جذب می‌کنند. مواد دیگری نیز برای عمل‌آوری درونی استفاده شده‌اند که آب را جذب نمی‌کنند، بلکه به‌طور فیزیکی

نگه می‌دارند و وجه مشترک همه آن‌ها وجود حجم شایان توجهی حفره‌های مرتبط به هم در داخل ساختار آن‌هاست [۱۶-۱۳]. جذب آب در ابرجاذب‌ها به‌طور شیمیایی انجام می‌شود.

پژوهش‌های Hansen و Jensen [۱۷] انجام شده در بیش از یک دهه گذشته، پایه نظری استفاده از پلیمرهای ابرجاذب برای عمل‌آوری درونی قرار گرفته است. این پژوهشگران عنوان کردند، به دلیل ظرفیت جذب آب زیاد این پلیمرها، می‌توان ذرات متورم شده آن‌ها را تقریباً به‌طور کامل به‌عنوان آب در نظر گرفت که شباهت مفهومی با حباب‌های هوای حبس شده در بتن دارد. استفاده از پلیمرهای ابرجاذب این برتری را نسبت به سبک‌دانه‌ها (دانه‌هایی با اندازه درشت که جایگزین شن و ماسه می‌شوند و چگالی آن‌ها نسبت به شن و ماسه بسیار کمتر است) دارد که از اضافه کردن مقدار زیادی مواد با استحکام مکانیکی ضعیف به بتن جلوگیری می‌شود. همچنین، ذرات ابرجاذب را می‌توان به حالت خشک به مخلوط اضافه کرد تا بخشی از آب اختلاط را جذب کنند، در حالی که این کار با سبک‌دانه امکان‌پذیر نیست.

رستمی و همکاران [۱۸] اثر ابرجاذب‌ها بر ریزساختار و خواص مکانیکی ملات‌های تقویت شده با الیاف (fiber reinforced mortars, FRM) دارای خاکستر بادی (fly ash) را بررسی کردند. نتایج حاکی از آن بود که پلیمرهای ابرجاذب به‌طور مؤثری انقباض کلی و حساسیت به ترک خوردگی ملات‌های تقویت شده با الیاف را کاهش می‌دهند. فرزانیان و همکاران [۱۹] اثر پلیمرهای ابرجاذب با اندازه‌ها و رفتارهای جذبی متفاوت را بر استحکام مکانیکی و آبدهی مواد سیمانی بررسی کردند. نتایج نشان داد، برای ابرجاذب‌ها و طرح‌های مخلوط مصرفی در این مطالعه، ترکیب ابرجاذب‌ها به‌طور کلی استحکام را به‌ویژه در خمیرهای سیمانی با چگالی زیاد درشت حفره‌ها کاهش می‌دهد. مشاهده شد، اثر ابرجاذب‌ها بر استحکام فشاری و مقاومت الکتریکی خمیرهای سیمان در نسبت‌های آب به سیمان ۰/۳۵ و ۰/۴ نسبت به ۰/۵ محسوس‌تر بود. Wang و همکاران [۲۰] پلیمرهای ابرجاذب جدید سازگار با محیط‌زیست و کم‌هزینه پلی (ایتاکونیک اسید)- پلی (سدیم آلایل سولفونات) (PIA/PSAS) را بر اساس مونومرهای ایتاکونیک اسید (IA) و سدیم آلایل سولفونات (SAS) تهیه کردند. نتایج کاهش جمع‌شدگی را نشان داد و مشخص شد، ذرات ابرجاذب به‌عنوان مخازن مینیاوری عمل می‌کنند که با تأمین آب طی آبدهی به پخت بتن در داخل منجر می‌شود. Dang و همکاران [۲۱] پلیمر ابرجاذب با حجم‌های مختلف را برای مطالعه اثر ابرجاذب بر استحکام فشاری، خمشی، انقباض، ترک خوردگی و مقاومت الکتریکی بتن بررسی کردند. نتایج حاکی از کاهش استحکام فشاری و خمشی اولیه

گلیکول) متیل‌اترمتاکریلات در مقادیر متفاوت (۱، ۲ و ۳ g به ترتیب با نام‌های  $A_1$ ،  $A_2$  و  $A_3$ ) و آغازگر آزوبیس‌ایزوبوتیرونیتریل (AIBN) اصلاح شد. بدین ترتیب که ابتدا ۵ g کربوپل در ۲۰ mL هگزان پخش شد. سپس، مونومر در حدود ۱ g تا ۲ g هگزان حل شد. همچنین، ۰/۱ g آغازگر در ۲/۵ mL اتیل استات حل شد. سپس، محلول مونومر و آغازگر تهیه‌شده به کربوپل اضافه شد و برای یکنواخت شدن روی همزن مغناطیسی قرار داده شد تا مخلوط شوند. سپس، مخلوط به مدت ۱۰ min (دو مرتبه و هر مرتبه به مدت ۵ min) درون دستگاه فراصوت Probe Sonicator با توان ۴۰ W قرار داده شد تا واکنش پلیمر شدن یا اصلاح انجام شود. پس از این مرحله، رسوب صاف شد و برای خروج مونومر و اولیگومرهای اضافه با استون شست‌وشو داده شد و جداسازی با دستگاه مرکزگریز با سرعت ۶۰۰۰ rpm به مدت ۳۰ min انجام شد. در نهایت، پودر حاصل به مدت ۲ h در دمای  $50^{\circ}\text{C}$  تا  $60^{\circ}\text{C}$  درون آون قرار گرفت تا خشک شده و برای اختلاط با سیمان استفاده شود [۲۲].

#### تهیه خمیر سیمان دارای ابرجاذب

۳۰ g سیمان و ۰/۱۵ g هیدروژل در حالت خشک مخلوط شدند. سپس، ۱۰ g آب مقطر به مخلوط اضافه شد. مخلوط حاصل به مدت ۵ min هم‌زده شد تا اختلاط به‌طور کامل انجام شود. پس از آن روی نمونه پوشانده شد و در دمای معمولی قرار گرفت. کد نمونه‌های سیمان به صورت C-X نام‌گذاری شده که X نشان‌دهنده نوع میکروژل است.

#### آزمون‌های انجام شده بر میکروژل

شکل ظاهری میکروژل‌های تولیدشده به‌حالت پودر سفیدرنگ و بدون هیچ‌گونه کلوخگی بود. اندازه ذرات این میکروژل‌ها با دستگاه پراکندگی نور دینامیکی (dynamic light scattering, DLS) Brookhaven مدل NanoBrook Omni به‌دست آمد. محدوده اندازه ذرات بین ۲۳۰۰ nm تا ۶۷۰۰ nm بود.

#### طیف‌سنجی FTIR

از طیف‌سنج FTIR مدل EQUINOX 55 ساخت آلمان برای تهیه

بتن، کاهش انقباض بتن و افزایش مقاومت بتن در برابر ترک است. مشخص شد، هر چقدر زمان پخت طولانی‌تر باشد، اثر ابرجاذب بر رطوبت داخلی بتن آشکارتر خواهد بود که به‌طور موثر افزایش مقاومت الکتریکی بتن را به تأخیر می‌اندازد.

در این مطالعه، اثر کربوپل اصلاح‌شده با مقادیر مختلف مونومر پلی‌(اتیلن گلیکول) متیل‌اتر متاکریلات با روش فراصوت‌دهی بر خواص خمیر سیمان بررسی شد. مونومر پلی‌(اتیلن گلیکول) متیل‌اتر متاکریلات مونومری است که در ابرروان‌کننده‌های بتن بر پایه آکرلیک بسیار استفاده شده است و باعث خاصیت روان‌کنندگی بتن می‌شود. آزمون‌های مختلفی از جمله FTIR، میکروسکوپ الکترونی پویشی، تعیین اندازه ذرات و خواص تورم روی ریزذرات و آزمون‌های رئولوژی، استحکام فشاری و خمشی و آبدهی روی خمیر سیمان دارای ریزذرات انجام و نتایج بررسی شده است.

## تجربی

### مواد

پودر کربوپل (پلی‌آکرلیک اسید شبکه‌ای‌شده) از شرکت Lubrizol تهیه شد. از هگزان و اتیل استات (Merck) به‌عنوان حلال، پلی‌(اتیلن گلیکول) متیل‌اتر متاکریلات (PEGMEMA، وزن مولکولی ۳۰۰ g/mol) به‌عنوان مونومر و آزوبیس‌ایزوبوتیرونیتریل (AIBN) به‌عنوان آغازگر استفاده شد. سیمان پرتلند نوع ۲ از خوزستان-فارس بدون هیچ‌گونه خالص‌سازی تهیه شد. خواص و ترکیبات شیمیایی سیمان در جدول ۱ آمده است. اندازه ذرات، تراکم و مقدار سطح ذرات سیمان به ترتیب  $13.5 \mu\text{m}$ ،  $3.14 \text{ g/cm}^3$  و  $3350 \text{ cm}^2/\text{g}$  بود. از ابرجاذب تجاری نمک سدیم پلی‌(آکرلیک اسید) نیز برای مقایسه با میکروژل‌های سنتزی استفاده شد.

### دستگاه‌ها و روش‌ها

تهیه میکروژل کربوپل اصلاح‌شده با مونومر به کمک فراصوت‌دهی برای تولید میکروژل، پودر کربوپل با مخلوط مونومر پلی‌(اتیلن

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی سیمان پرتلند نوع ۲ (درصد وزنی).

Table 1. Chemical composition of Portland cement type 2 (weight percentage).

| SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | Free CaO | L.O.I | SO <sub>3</sub> | I.R. |
|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----|------------------|-------------------|----------|-------|-----------------|------|
| 21.1             | 4.9                            | 5.2                            | 61.0 | 2.7 | 0.8              | 0.4               | 0.5      | 0.8   | 1.9             | 0.5  |

L.O.I, Loss on ignition; I.R. Insoluble residue.

ابرجاذب به مقدار ۰/۰۵٪ وزنی سیمان) آزمون استحکام فشاری با دستگاه Instratest ساخت آلمان و آزمون استحکام خمشی با دستگاه پنج تن خمشی ساخت شرکت آزمون طی ۲۸ روز (ASTM C150-07) طبق استاندارد ISO 679 انجام شد.

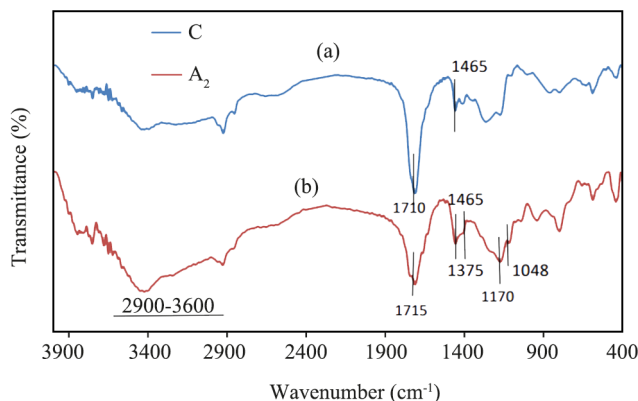
## نتایج و بحث

### طیف‌سنجی FTIR

شکل ۱ طیف FTIR نمونه‌های کربوپل اصلاح‌نشده و اصلاح‌شده با مونومر پلی‌اتری ( $A_2$ ) را نشان می‌دهد. در طیف کربوپل اصلاح‌نشده پیک در ناحیه  $1710 \text{ cm}^{-1}$  به گروه کربونیل اسیدی، پیک در ناحیه  $1465 \text{ cm}^{-1}$  به گروه‌های متیلن، پیک در ناحیه  $2900$  تا  $2925 \text{ cm}^{-1}$  به پیوند C-H مربوط است. در طیف کربوپل اصلاح‌شده با مونومر پلی‌اتری پیک در ناحیه  $1715 \text{ cm}^{-1}$  به گروه کربونیل و پیک در  $1048 \text{ cm}^{-1}$  به کشش پیوندهای  $\text{CH}_2\text{-O-CH}_2$  مربوط است. پیک در ناحیه  $1465 \text{ cm}^{-1}$  و  $1375 \text{ cm}^{-1}$  به ترتیب به گروه‌های متیل و متیلن، پیک در ناحیه  $2900$  تا  $2925 \text{ cm}^{-1}$  به گروه OH اسیدی و پیک در ناحیه  $927 \text{ cm}^{-1}$  به پیوند C-H مربوط است. نتایج حاکی از انجام موفق اصلاح در کربوپل است. طرح‌واره ۱ واکنش بین کربوپل با مونومر پلی‌اتری را نشان می‌دهد [۲۳].

### میکروسکوپی الکترونی پوشی

شکل ۲ تصاویر SEM کربوپل اصلاح‌نشده و کربوپل اصلاح‌شده



شکل ۱- طیف FTIR (a) نمونه‌های کربوپل اصلاح‌نشده (C) و (b) کربوپل اصلاح‌شده با مونومر ( $A_2$ )

Fig. 1. FTIR spectrum of (a) unmodified carbopol samples (C) and (b) modified carbopol with monomer ( $A_2$ ).

طیف FTIR قرص‌های دارای نمونه با ماتریس KBr استفاده شد. آزمون در محدوده عدد موجی  $4000-400 \text{ cm}^{-1}$  انجام شد.

### محاسبه مقدار تورم

برای محاسبه مقدار تورم ابرجاذب‌ها به  $0/1 \text{ g}$  از هیدروژل  $100 \text{ g}$  آب مقطر اضافه شد و به مدت  $30 \text{ min}$  زمان داده شد تا هیدروژل به تورم نهایی در دمای معمولی برسد. ظرفیت تورم از معادله (۱) به دست آمد:

$$\text{Swelling} = \frac{W_s - W_d}{W_d} \quad (1)$$

در این معادله،  $W_s$  و  $W_d$  به ترتیب وزن ژل متورم و ژل خشک اولیه است.

### میکروسکوپی الکترونی پوشی

از میکروسکوپ الکترونی پوشی (SEM) مدل S 360 ساخت شرکت Cambridge مجهز به آشکارساز EDX مدل INCA ساخت Ofordinst انگلستان برای بررسی رفتار نمونه‌ها استفاده شد. نمونه‌ها پیش از انجام آزمون با لایه نازکی از آلیاژ پالادیم-طلا پوشش می‌یابند تا رسانا شوند.

### آزمون‌های انجام‌شده روی خمیر سیمان دارای میکروژل

#### رئومتری

برای تعیین عملکرد و کارایی سیمان، اندازه‌گیری رئولوژیکی روی نمونه‌ها با فرمول‌بندی توضیح داده‌شده در بخش تجربی (پس از هم‌زدن نمونه‌ها به مدت  $5 \text{ min}$ ) انجام شد. اندازه‌گیری‌های رئولوژیکی با رئومتر نوسانی مدل Paar-Physica MCR 300، ساخت آلمان در دمای محیط انجام شد. قطر صفحه‌های موازی  $25 \text{ mm}$  و فاصله بین آن‌ها  $2 \text{ mm}$  انتخاب شد. آزمون در محدوده بسامد  $0/1 \text{ Hz}$  تا  $100 \text{ Hz}$  و کرنش ثابت  $0/2\%$  انجام شد.

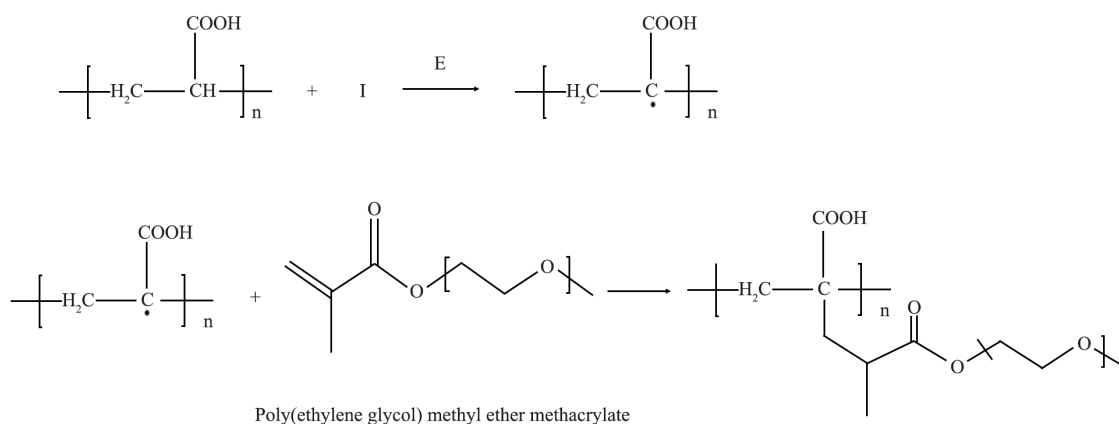
#### پراش پرتو X (XRD)

برای کنترل سینتیک محصولات آب‌پوشی‌شده پراش‌سنجی پرتو X نمونه‌های پودری با دستگاه Siemens و آند مس و لوله FK 60-04 در دمای  $25^\circ\text{C}$  و محدوده حرکتی  $2\theta$  برابر با  $10^\circ$  تا  $80^\circ$  انجام شد. نمونه‌ها به مدت  $1$  و  $28$  روز بررسی شدند.

#### استحکام فشاری و خمشی

پس از اختلاط و آماده‌سازی ملات سیمان (مخلوط آب و سیمان و سنگ‌دانه (ریزدانه) با اندازه ذرات طبق استاندارد DIN 196-1 و نیز





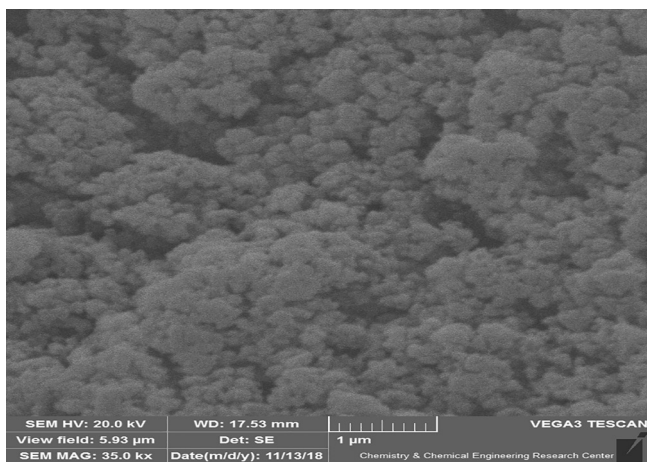
طرح‌واره ۱- واکنش بین کربوپیل (پلی‌آکریلیک اسید شبکه‌ای) با مونومر پلی‌(اتیلن گلیکول) متیل اتر متاکریلات.

Scheme 1. Reaction between carbopol (crosslinked polyacrylic acid) and poly(ethylene glycol) methyl ether methacrylate monomer.

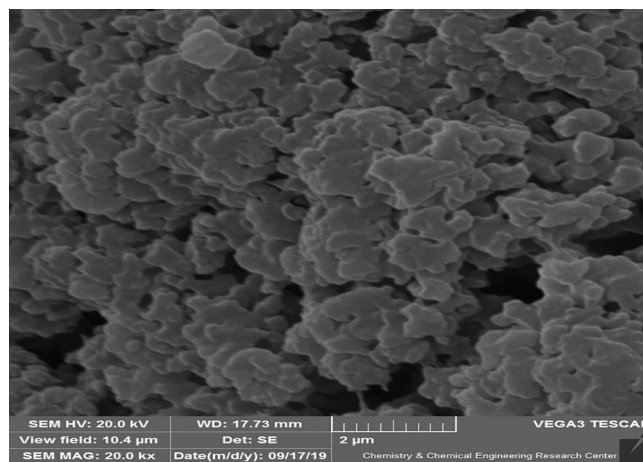
### جذب و تورم

مقدار تورم نمونه‌های کربوپیل اصلاح‌شده با مونومر پلی‌(اتیلن گلیکول) متیل اتر متاکریلات (PEGMEMMA) با غلظت‌های متفاوت مونومر در آب مقطر و محلول آب نمک ۰/۹٪ در جدول ۲ آمده است. نمونه کربوپیل اصلاح‌نشده هیچ جذب‌ی ندارد و پس از اصلاح با مونومر خواص جذب‌ی نشان می‌دهد. با افزایش غلظت مونومر مقدار جذب ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته است. با قرارگیری پلیمر جاذب در مجاورت حلال، برهم‌کنش‌هایی بین شبکه پلیمر و حلال ایجاد می‌شود. برهم‌کنش یونی (آپوشی) و پیوند هیدروژنی دو نوع

با مونومر را نشان می‌دهد. تصاویر نشان می‌دهد، ذرات نمونه اصلاح‌شده در مقایسه با کربوپیل خالص بیشتر لایه‌ای و پولکی است. این موضوع حاکی از پیوندزنی زنجیرهای پلیمری نه تنها در سطح بلکه در عمق نمونه است. میکروژل‌های تولیدشده رفتار سطحی تقریباً هماهنگ دارند که نشان‌دهنده واکنش اصلاح سطح و ایجاد اتصال بین کربوپیل و مونومر است، به‌گونه‌ای که در تصویر مربوط به نمونه کربوپیل اصلاح‌شده، مونومر پلی‌اتری به‌طور یکنواخت روی سطح پلیمر را پوشش داده و حفره‌ها و فضاهای خالی موجود میان لایه‌های پلیمر را به‌طور یک‌دست پوشانده است [۲۴، ۲۵].



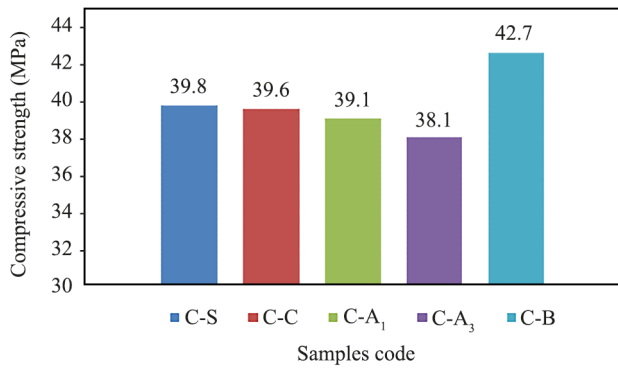
(a)



(b)

شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ الکترونی (a) نمونه کربوپیل اصلاح‌نشده با بزرگ‌نمایی ۳۵۰۰۰ و (b) کربوپیل اصلاح‌شده با مونومر پلی‌اتری با بزرگ‌نمایی ۲۰۰۰۰.

Fig. 2. Electron microscope images of (a) unmodified carbopol sample with a magnification of 35000 and (b) modified carbopol with monomer with a magnification of 20000.



شکل ۳- استحکام فشاری نمونه‌های سیمان شاهد (C-S)، سیمان با ابرجاذب پلی‌آکریلیک اسید شبکه‌ای (کربوپل) (C-C)، سیمان با کربوپل اصلاح‌شده با مقادیر ۱ و ۳ g مونومر (C-A<sub>1</sub> و C-A<sub>3</sub>) و سیمان در مجاورت ابرجاذب تجاری (C-B) طی ۲۸ روز (مقدار ابرجاذب ۰/۰۵٪ وزنی سیمان است).

Fig. 3. Compressive strength of control cement sample (C-S), cement with crosslinked polyacrylic acid superabsorbent (carbopol) (C-C), cement with modified carbopol with 1 and 3 grams of monomer (C-A<sub>1</sub> and C-A<sub>3</sub>) and cement in the presence of commercial superabsorbent (C-B) during 28 days (the amount of superabsorbent is 0.05% by weight of cement).

خمشی بتن اثر دارد. ابرجاذب‌ها با توجه به عاملیت‌ها و اندازه آن‌ها در شرایط تورم درون محیط سیمان بر خواص مکانیکی بتن اثر می‌گذارند. در سامانه‌های سیمانی دارای ابرجاذب انتظار می‌رود، استحکام تحت تأثیر دو فرایند رقابتی قرار گیرد. یکی شامل افزایش قدرت تراکم ساختارهای با خلل‌و فرج مویرگی و دیگری شامل شکل‌گیری حفره‌های ناشی از خشک‌شدن ذرات ابرجاذب طی فرایند

متداول از این برهم‌کنش‌ها هستند. PEGMEMA درشت‌مر غیر یونی و بدون هر گروه یون‌شونده است. از این‌رو، مهم‌ترین و اساسی‌ترین عامل در جذب و تورم ژل‌های دارای این درشت‌مر، برهم‌کنش‌های حلال-پلیمر مانند پیوندهای هیدروژنی است. درشت‌مر PEGMEMA به دلیل قابلیت تشکیل پیوند هیدروژنی با آب باعث مشاهده مقادیر جذب شایان توجه نمونه‌های تهیه‌شده در آب مقطر و آب نمک شده است. با افزایش غلظت درشت‌مر به دلیل افزایش گروه‌های غیر یونی جذب کاهش می‌یابد [۲۲،۲۶].

### استحکام فشاری و خمشی

شکل ۳ استحکام فشاری نمونه‌های سیمان شاهد، سیمان دارای کربوپل و سیمان دارای کربوپل اصلاح‌شده با مقادیر ۱ و ۳ g از مونومر پلی‌اتری و سیمان در ابرجاذب تجاری را طی ۲۸ روز نشان می‌دهد. استحکام فشاری نمونه مرجع با افزودن میکروژل کربوپل کاهش و با افزودن ابرجاذب تجاری افزایش یافته است. استحکام فشاری نمونه سیمان در مجاورت کربوپل اصلاح‌شده با مونومر پلی‌اتری نسبت به نمونه مرجع و نمونه با کربوپل اصلاح‌نشده کاهش یافته است. با افزایش مقدار مونومر نیز استحکام روند کاهشی داشته است.

استحکام خمشی سیمان شاهد و سیمان با نمونه‌های ابرجاذب پس از ۲۸ روز در شکل ۴ نشان داده شده است. بر اساس نتایج، استحکام خمشی در تمام نمونه‌ها نسبت به نمونه مرجع کاهش یافته است. همان‌طور که گفته شد، مقدار استحکام خمشی در نمونه سیمان دارای ابرجاذب تجاری نسبت به سیمان دارای کربوپل بیشتر بوده است که با اصلاح کربوپل با مونومر پلی‌اتری استحکام افزایش یافته، اما نسبت به نمونه مرجع و نمونه سیمان با نمونه تجاری کمتر بوده است. نوع و مقدار ابرجاذب استفاده‌شده روی نتایج استحکام فشاری و

جدول ۲- تورم نمونه‌های کربوپل اصلاح‌شده با مونومر پلی‌(اتیلن گلیکول) (اتیلن گلیکول) متیل اتر متاکریلات مونومر با غلظت‌های متفاوت مونومر در آب مقطر و محلول آب نمک ۰/۹٪.

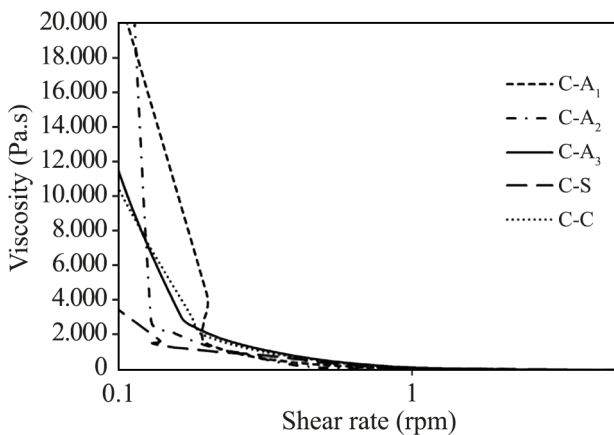
Table 2. Swelling of modified carbopol samples with poly(ethylene glycol) methyl ether methacrylate monomer with different concentrations of monomer in distilled water and 0.9% saline solution.

| Sample code    | Polymer structure            | Amount of monomer (g) | Absorption in water (g/g) | Absorption in saline solution (g/g) |
|----------------|------------------------------|-----------------------|---------------------------|-------------------------------------|
| C              | Carbopol                     | 0                     | –                         | –                                   |
| A <sub>1</sub> | Modified carbopol            | 1                     | 58.88                     | 22.7                                |
| A <sub>2</sub> | Modified carbopol            | 2                     | 62.09                     | 24.71                               |
| A <sub>3</sub> | Modified carbopol            | 3                     | 50.95                     | 13.68                               |
| B              | Polyacrylic acid sodium salt | 0                     | 194.9                     | 27.94                               |

برای نمونه سیمان دارای کربوپل اصلاح‌نشده حاصل شد. نمونه‌های سیمان دارای کربوپل پس از اصلاح با مونومر پلی‌اتری، گرانروی بیشتری دارند و با افزایش مقدار مونومر پلی‌اتری گرانروی خمیر سیمان روند کاهشی داشته است، به طوری که نمونه سیمان دارای کربوپل اصلاح‌شده با ۱ g مونومر پلی‌اتری، بیشترین گرانروی را دارد. افزایش غلظت PEGMEMA به دلیل اثر ممانعت فضایی به کاهش گرانروی منجر می‌شود [۲۸]. مطابق شکل ۶ اثر ابرجاذب‌ها بر نمودار تنش برشی-سرعت برش بررسی شده است. بر اساس نتایج با افزایش سرعت برش، تنش برشی افزایش یافته است. همه نمونه‌های خمیرهای سیمان رفتار پلاستیک Bingham نشان دادند.

### پراش پرتو X (XRD)

شکل ۷ الگوهای XRD خمیرهای سیمان برای نمونه پودر سیمان، سیمان شاهد و سیمان دارای کربوپل اصلاح‌شده با مونومر پلی‌اتری را در غلظت‌های متفاوت طی ۱ و ۲۸ روز نشان می‌دهد. سیمان پرتلند از دی‌کلسیم و تری‌کلسیم سیلیکات ( $C_3S$  و  $C_2S$ ) تشکیل شده است.  $C_3S$  و  $C_2S$  طی دوره آبدهی به  $Ca(OH)_2$  و  $C-S-H$  ژل تبدیل می‌شوند. وجود یا نبود این مواد ( $C_3S$ ،  $C_2S$ ،  $Ca(OH)_2$  و  $C-S-H$ ) با الگوی XRD بررسی شد. مطابق شکل پیک‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب به  $C_3S$ ،  $C_2S$ ،  $Ca(OH)_2$  و  $C-S-H$  ژل مربوط است. سیمان

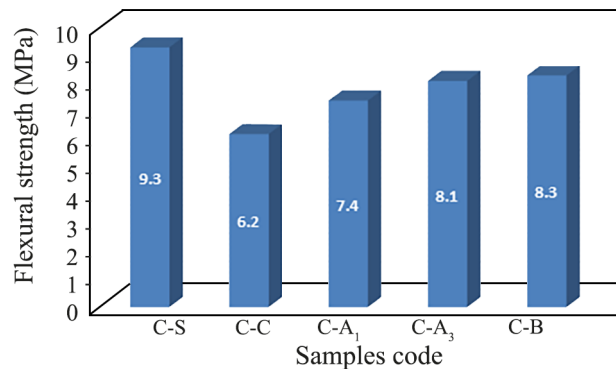


شکل ۵- تغییرات گرانروی با سرعت برش برای نمونه‌های سیمان شاهد (C-S)، سیمان با کربوپل اصلاح‌نشده (C-C)، سیمان با کربوپل اصلاح‌شده با مقادیر ۱، ۲ و ۳ g از مونومر ( $C-A_1$ ،  $C-A_2$  و  $C-A_3$ ).  
Fig. 5. Viscosity with shear rate graph for samples of control cement (C-S), cement with unmodified carbopol (C-C), cement with modified carbopol with amounts of 1, 2 and 3 grams of monomer ( $C-A_1$ ،  $C-A_2$  and  $C-A_3$ ).

واجذب است. اثر ترکیبی این دو فرایند با عوامل مختلفی از جمله سینتیک جذب-واجذب ابرجاذب، توزیع اندازه و طراحی مخلوط خمیر سیمان تعیین می‌شود [۱۹،۲۷]. با افزودن کربوپل اصلاح‌شده به دلیل وجود شاخه‌های پلی‌(اتیلن گلیکول) و کاهش برهم‌کنش ذرات میکروژل با ذرات سیمان، استحکام فشاری کاهش می‌یابد. از مقایسه اثر کربوپل و هیدروژل تجاری بر استحکام فشاری بتن می‌توان گفت، هیدروژل تجاری به دلیل عاملیت‌های سطحی (گروه آمید و سدیم کربوکسیلات) و رفتار تورمی در محیط سیمان، برهم‌کنش‌های بهتری با ذرات سیمان دارد که موجب افزایش فشردگی و استحکام فشاری بتن می‌شود.

### رنولوژی

شکل ۵ گرانروی نمونه‌های خمیر سیمان دارای ابرجاذب را نشان می‌دهد. با افزایش تنش برشی گرانروی نمونه‌ها کاهش می‌یابد که این روند در همه نمونه‌ها دیده می‌شود. با توجه به نمودار، گرانروی نمونه‌ها به ترتیب  $C-A_1 > C-A_2 > C-A_3 > C-C > C-S$  افزایش یافته است. مطابق شکل، ابرجاذب باعث افزایش گرانروی خمیر سیمان شده است. کمترین مقدار گرانروی در بین نمونه‌های دارای ابرجاذب،



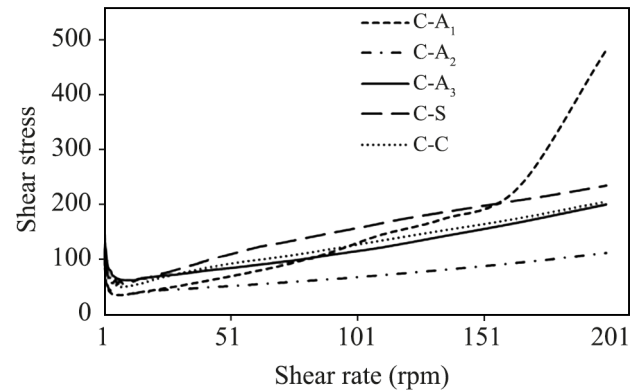
شکل ۴- استحکام خمشی نمونه‌های سیمان شاهد (C-S)، سیمان با ابرجاذب پلی‌آکرلیک اسید شبکه‌ای (کربوپل) (C-C)، سیمان با کربوپل اصلاح‌شده با مقادیر ۱ و ۳ g از مونومر ( $C-A_1$  و  $C-A_3$ ) و سیمان در مجاورت ابرجاذب تجاری (C-B) طی ۲۸ روز (مقدار ابرجاذب ۰/۰۵٪ وزنی سیمان است).

Fig. 4. Flexural strength of control cement sample (C-S), cement with crosslinked polyacrylic acid superabsorbent (carbopol) (C-C), cement with modified carbopol with 1 and 3 grams of monomer ( $C-A_1$  and  $C-A_3$ ) and cement in the presence of commercial superabsorbent (C-B) during 28 days (the amount of superabsorbent is 0.05% by weight of cement).

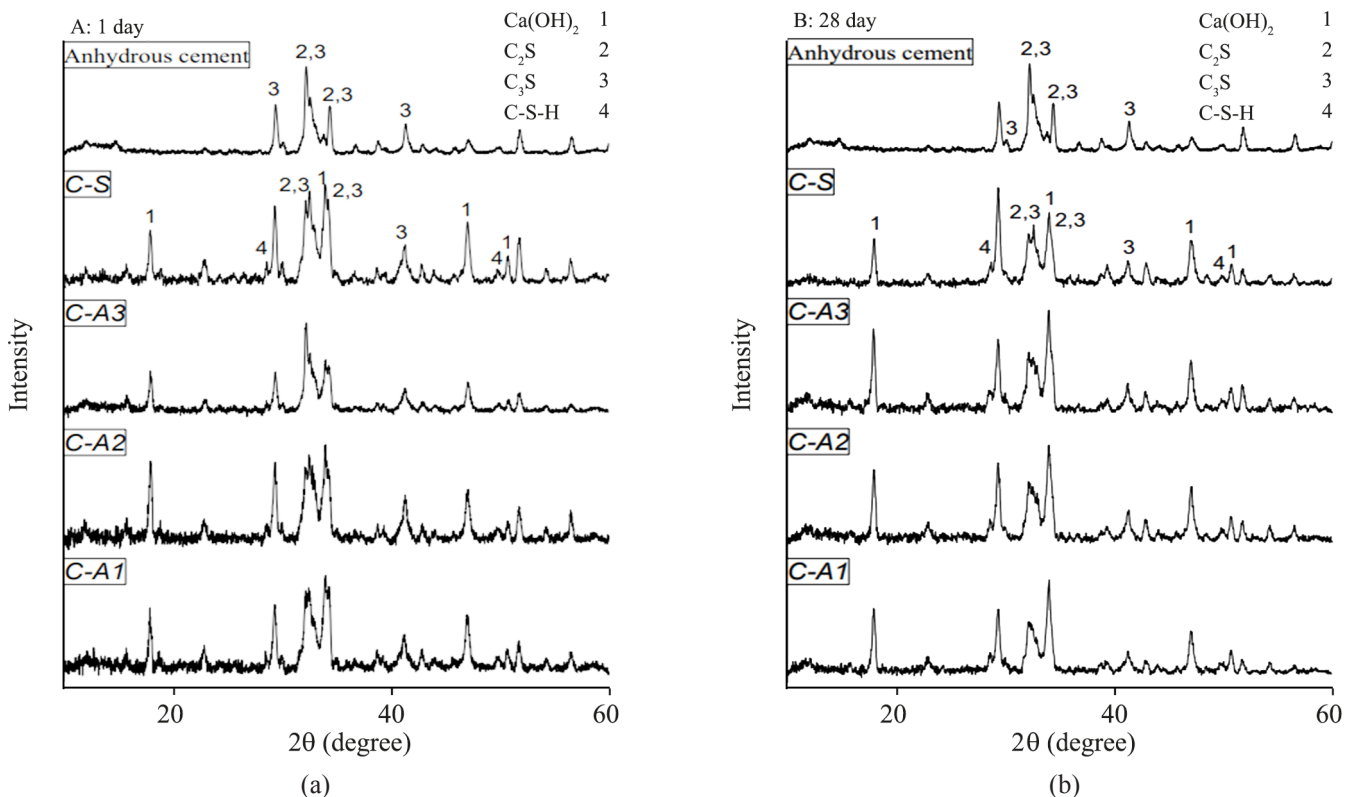


بدون آب C-S-H ژل و پرتلندیت (portlandite) به ترتیب پیک‌های ۴ و ۱ را ندارد و در اثر پخت سیمان این پیک‌ها ظاهر می‌شوند، بدین معنی است که  $C_2S$  و  $C_3S$  به C-S-H ژل و پرتلندیت تبدیل می‌شوند. با افزایش زمان آبدهی (۱ تا ۲۸ روز) ارتفاع پیک‌های ۲ و ۳ کم شده و ارتفاع پیک‌های ۱ و ۴ افزایش یافته است [۲۳، ۲۹].

مطابق شکل مقدار آبدهی طی یک روز به ترتیب  $C-A_2 > C-S > C-A_1 > C-A_3$  بود و بیشترین آبدهی در نمونه سیمان دارای کربوپل با ۲ g مونومر پلی‌اتری مشاهده شد. با توجه به نتایج، آبدهی نمونه‌های دارای هیدروژل از نمونه سیمان شاهد به دلیل داشتن بخش پلیمری کمتر است. آبدهی در نمونه‌ها طی ۲۸ روز به ترتیب  $C-A_3 > C-A_2 > C-A_1 > C-S$  بود. کمترین مقدار آبدهی در نمونه سیمان شاهد است که به دلیل نداشتن ابرجاذب زودتر از ۲۸ روز آبپوشی شده است. اما آبدهی در نمونه‌های دارای ابرجاذب به دلیل جذب آب و پخت سیمان با ابرجاذب تا ۲۸ روز ادامه داشت. بیشترین آبدهی در نمونه سیمان دارای کربوپل با ۳ g مونومر مشاهده شد و آبدهی نمونه‌های دارای ابرجاذب با کاهش مقدار مونومر کاهش یافت. می‌توان نتیجه گرفت، ابرجاذب‌ها در کل باعث



شکل ۶- نمودار تنش برشی با سرعت برش در نمونه‌های سیمان شاهد (C-S)، سیمان با کربوپل اصلاح نشده (C-C)، سیمان با کربوپل اصلاح شده با مقادیر ۱، ۲ و ۳ g از مونومر (C-A<sub>1</sub>، C-A<sub>2</sub> و C-A<sub>3</sub>).  
Fig. 6. Shear stress with shear rate graph for samples of control cement (C-S), cement with unmodified carbopol (C-C), cement with modified carbopol with amounts of 1, 2 and 3 grams of monomer (C-A<sub>1</sub>, C-A<sub>2</sub> and C-A<sub>3</sub>).



شکل ۷- الگوهای XRD برای نمونه‌های سیمان بدون آب، سیمان شاهد (C-S) و سیمان دارای کربوپل اصلاح شده با مقادیر ۱، ۲ و ۳ g مونومر (C-A<sub>1</sub>، C-A<sub>2</sub>، C-A<sub>3</sub>) طی (a) ۱ روز و (b) ۲۸ روز.

Fig. 7. XRD patterns for samples of anhydrous cement, control cement (C-S) and cement containing modified carbopol with amounts of 1, 2 and 3 grams of monomer (C-A<sub>1</sub>, C-A<sub>2</sub>, C-A<sub>3</sub>) during (a) 1 day and (b) 28 day.

در تمام نمونه‌ها نسبت به نمونه مرجع کاهش یافت و همان‌طور که گفته شد، مقدار استحکام خمشی در نمونه سیمان دارای ابرجاذب تجاری نسبت به سیمان شامل کربوپل بیشتر بوده است که با اصلاح کربوپل با مونومر پلی‌اتری استحکام افزایش یافت، اما در کل نسبت به نمونه مرجع و نمونه سیمان با ابرجاذب تجاری کمتر بوده است. گران‌روی نمونه‌های سیمان در مجاورت کربوپل اصلاح‌شده با مونومر پلی‌اتری به ترتیب  $C-S > C-C > C-A_3 > C-A_2 > C-A_1$  افزایش یافت. ابرجاذب موجب افزایش گران‌روی خمیر سیمان شد. کمترین مقدار گران‌روی در میان نمونه‌های دارای ابرجاذب، برای نمونه سیمان دارای کربوپل اصلاح‌نشده حاصل شد. نمونه‌های سیمان دارای کربوپل پس از اصلاح با مونومر پلی‌اتری دارای گران‌روی بیشتری بودند. با افزایش مقدار مونومر پلی‌اتری گران‌روی خمیر سیمان روند کاهشی داشت، به طوری که نمونه سیمان شامل کربوپل اصلاح‌شده با ۱ g مونومر پلی‌اتری بیشترین گران‌روی را نشان داد. با توجه به نتایج XRD آبدهی و پخت نمونه‌های دارای ابرجاذب نسبت به سیمان شاهد تا ۲۸ روز ادامه داشت و آبدهی نمونه‌های دارای ابرجاذب با کاهش مقدار مونومر پلی‌اتری کاهش یافت. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت، ابرجاذب‌ها باعث تأخیر در آبدهی می‌شوند، زیرا روی ذرات سیمان می‌چسبند و مانع رسانندگی گرمایی میان ذرات سیمان می‌شوند. با وجود نتایج میکروسکوپ الکترونی، تورمی، آبدهی و پخت و نیز گران‌روی مناسب نمونه‌های سنتز شده، دلیل عمده استفاده از میکروژل این بود که با کاهش خلل و فرج درون ذرات بتن، استحکام را افزایش دهد. اما مشاهده شد، اثر چندانی بر استحکام بتن نداشته است و استحکام فقط تحت تاثیر اندازه ذرات نیست.

## مراجع

- Molyneux P., *Water-Soluble Synthetic Polymers: Properties and Behavior*, CRC, Boca Raton, 1st ed., 1983.
- Zohuriaan-Mehr M.J., Pourjavadi A., Salimi H., and Kurdtabar M., Protein- and Homo Poly(amino acid)-Based Hydrogels with Super-Swelling Properties, *Polym. Adv. Technol.*, **20**, 655-671, 2009.
- Guilherme M.R., Aouada F.A., Fajardo A.R., Martins A.F., Paulino A.T., Davi M.F.T., Rubira A.F., and Muniz E.C., Superabsorbent Hydrogels Based on Polysaccharides for Application in Agriculture as Soil Conditioner and Nutrient Carrier: A Review, *Europ. Polym. J.*, **72**, 365-385, 2015.
- Gujarathi N.A., Rane B.R., and Patel J.K., pH Sensitive Polyelectrolyte Complex of O-Carboxymethyl Chitosan and Poly(acrylic acid) Cross-Linked with Calcium for Sustained Delivery of Acid Susceptible Drugs, *Int. J. Pharm.*, **436**, 418-425, 2012.
- García-González N., Kellaway I.W., Blanco-Fuente H., Anguiano-Igea S., Delgado-Charro B., Otero-Espinar F.J., and Blanco-Méndez J., Design and Evaluation of Bucco Adhesive Metoclopramide Hydrogels Composed of Poly(acrylic acid) Crosslinked with Sucrose, *Int. J. Pharm.*, **100**, 65-70, 1993.
- Almeida F.C. and Klemm A.J., Efficiency of Internal Curing by Superabsorbent Polymers (SAP) in PC-GGBS Mortars, *Cem. Concr. Compos.*, **88**, 41-51, 2018.

تأخیر در آبدهی می‌شوند، زیرا روی ذرات سیمان می‌چسبند و مانع از رسانندگی گرمایی بین ذرات سیمان می‌شوند [۳۰].

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش، میکروژل کربوپل (پلی‌آکریلیک اسید شبکه‌ای) اصلاح‌شده با مونومر پلی‌اتیلن گلیکول (متیل اتر متاکریلات) با روش فراصوت‌دهی برای کاربرد در سیمان و بتن تهیه شد و اثر آن بر خواص متفاوت سیمان مانند رئولوژی، استحکام فشاری و خمشی و آبدهی بررسی شد. نتایج آزمون FTIR نمونه‌های کربوپل اصلاح‌نشده و اصلاح‌شده با مونومر پلی‌اتیلن گلیکول (متیل اتر متاکریلات) حاکی از انجام موفق اصلاح با مونومر بود. تصاویر میکروسکوپی الکترونی نمونه‌های کربوپل اصلاح‌شده و اصلاح‌نشده نیز تأییدی بر این نتایج بود. با توجه به نتایج تورمی مشاهده شد، کربوپل در آب و آب نمک هیچ جذبی ندارد و حل می‌شود و پس از اصلاح خاصیت تورمی و جذب حاصل شده است. ظرفیت تورم در آب و آب نمک با افزایش غلظت مونومر پلی‌اتری ابتدا افزایشی و سپس کاهشی بود. طبق آزمون استحکام فشاری و خمشی در نمونه‌های سیمان دارای کربوپل اصلاح‌شده با مونومر پلی‌اتری مشاهده شد، استحکام فشاری نمونه مرجع با افزودن ابرجاذب کربوپل کاهش و با افزودن ابرجاذب تجاری افزایش یافته است. استحکام فشاری نمونه سیمان در مجاورت کربوپل اصلاح‌شده با مونومر پلی‌اتری نسبت به نمونه مرجع و نمونه با کربوپل اصلاح‌نشده کاهش یافت. با افزایش مقدار مونومر نیز استحکام روند کاهشی داشته است. استحکام خمشی نیز

7. Schröfl C., Erk K.A., Siriawatwechakul W., Wyrzykowski M., and Snoeck D., Recent Progress in Superabsorbent Polymers for Concrete, *Cem. Concr. Res.*, **151**, 106648, 2022.
8. Mechtcherine V., Wyrzykowski M., Schröfl C., Snoeck D., Lura P., De Belie N., Mignon A., Van Vlierberghe S., Klemm A.J., Almeida F.C., and Ten'orio Filho J.R., Application of Super Absorbent Polymers (SAP) in Concrete Construction-Update of RILEM State-of-the-Art Report, *Mater. Struct.*, **54**, 1-20, 2021.
9. Sun B., Wu H., Song W., LI Z., and Yu J., Hydration, Microstructure and Autogenous Shrinkage Behaviors of Cement Mortars by Addition of Superabsorbent Polymers, *Front. Struct. Civ. Eng.*, **14**, 1274-1284, 2020.
10. Kalinowski M., Woyciechowski P., and Sokolowska J., Effect of Mechanically-Induced Fragmentation of Polyacrylic Superabsorbent Polymer (SAP) Hydrogel on the Properties of Cement Composites, *Const. Build. Mater.*, **263**, 120135, 2020.
11. Rostami Daronkola M. R. and Fallah M., Synthesis of Branched Polymers and Dispersion of Silica Nanoparticles and the Effect of Their Interaction on Hydrated Cement Morphology, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **31**, 239-250, 2018.
12. Mahdikhani M., Karimnezhad M.H., Gena'at F., and Ghasemzade H., Investigation on Using Superabsorbent Polymer Materials on Fresh and Hardened Properties of Concretes, The Fourth Annual National Conference of Iran-Tehran Concrete, 2012.
13. Weber S. and Reinhardt H.W., A New Generation of High Performance Concrete: Concrete with Outogenous Curing, *Adv. Cem. Bas. Mater.*, **6**, 59-68, 1997.
14. Ramachandran V.S., *Concrete Admixtures Handbook: Properties, Science, and Technology*, Noyes, Park Ridge, 1995.
15. Siriawatwechakul W., Siramanont J., and Vadakan W.V., Superabsorbent Polymer Structures; *International RILEM Conference on Use of Superabsorbent Polymers and Other New Additive in Concrete*, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark., 2010.
16. Almeida F.C., Rostami R., and Klemm A.J., Characterization of Polyacrylamide Based Superabsorbent Polymers for Potential Use in PC Matrices with Supplementary Cementitious Materials, *Proceedings of the MATEC Web of Conferences 199*, EDP Sciences, 02023, 2018.
17. Jensen O.M. and Hansen P.F., Water-Entrained Cement-Based Materials I. Principles and Theoretical Background, *Cem. Concr. Res.*, **31**, 647-654, 2001.
18. Rostami R., Klemm A.J., and Fernando C.R.A., Effect of Superabsorbent Polymers on Microstructure and Strength of Blended Cements Mortars Reinforced by Polymeric Fibre, *Cement*, **9**, 100041, 2022.
19. Farzarian K., Pimenta Teixeira K., Perdigão Rocha I., De Sa Carneiro L., and Ghahremaninezhad A., The Mechanical Strength, Degree of Hydration, and Electrical Resistivity of Cement Pastes Modified with Superabsorbent Polymers, *Const. Build. Mater.*, **109**, 156-165, 2016.
20. Wang L., Guan G., and Wang J., A New Superabsorbent Based on the Poly(itaconic acid)/Poly(sodium allyl sulfonate) Polymer Network for Application in Concrete as an Internal Curing Agent, *Iran. Polym. J.*, **30**, 1149-1158, 2021.
21. Dang J., Zhao J., Miao W., and Du Zh., Effect of Superabsorbent Polymer on the Shrinkage and Crack Resistance of Concrete at Early Age, *Iran. Polym. J.*, **27**, 349-358, 2018.
22. Varid V., Mohammadi M., Bouhendi H., and Kabiri K., The Absorption of Alcohol and Saline Solution by Carbopol Grafted with 2-Acrylamido-2-Methylpropane Sulfonic Acid Prepared through Ultrasonic Method, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **32**, 255-266, 2019.
23. Ashkani M., Bouhendi H., Kabiri K., and Rostami M.R., Synthesis of Poly(2-acrylamido-2-methyl propane sulfonic acid) with High Water Absorbency and Absorption under Load (AUL) as Concrete Grade Superabsorbent and Its Performance, *Const. Build. Mater.*, **206**, 540-551, 2019.
24. Snoeck D., Velasco L.F., Mignon A., Van Vlierberghe S., Dubruel P., Lodewyckx P., and De Belie N., The Effects of Superabsorbent Polymers on the Microstructure of Cementitious Materials Studied by Means of Sorption Experiments, *Cem. Concr. Res.*, **77**, 26-35, 2015.
25. Ashkani M., Kabiri K., Salimi A., and Bouhendi H., Modification of Rice Husk with Glycidyl Crosslined Microgel Latex for Preparation of Hybrid Hydrogel, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **31**, 129-141, 2018.
26. Mechtcherine V., Snoeck D., Schröfl C., De Belie N., Klemm A.J., Ichimiya K., Moon J., Wyrzykowski M., Lura P., Toropovs N., and Assmann A., Testing Superabsorbent Polymer (SAP) Sorption Properties prior to Implementation in Concrete: Results of a RILEM Round-Robin Test, *Mater. Struct.*, **51**, 28, 2018.
27. Snoeck D., Schaubroeck D., Dubruel P., and De Belie N., Effect

- of High Amounts of Superabsorbent Polymers and Additional Water on the Workability, Microstructure and Strength of Mortars with a Water-to-Cement Ratio of 0.50, *Constr. Build. Mater.*, **72**, 148-157, 2014.
28. Secrieru E., Mechtcherine V., Schroefl C., and Borin D., Rheological Characterisation and Prediction of Pumpability of Strain-Hardening Cement-Based-Composites (SHCC) with and without Addition of Superabsorbent Polymers (SAP) at Various Temperatures, *Constr. Build. Mater.*, **112**, 581-594, 2016.
29. Rostami Daronkola M.R., Synthesis and Characterization of Quaternary Polymers as Superplasticizer and Assessing Their Effectiveness on Micronized Cement Particles, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **30**, 221-233, 2017.
30. Mechtcherine V., Gorges M., Schroefl C., Assmann A., Brameshuber W., Ribeiro A.B., Cusson D., Cust'odio J., Da Silva E.F., Ichimiya K., and Igarashi S.I., Effect of Internal Curing by Using Superabsorbent polymers (SAP) on Autogenous Shrinkage and other Properties of a High-Performance Fine-Grained Concrete: Results of a RILEM Round-Robin Test, *Mater. Struct.*, **47**, 541-562, 2014.