

# بررسی و مقایسه‌ی مشخصات مخلوط‌های پایه‌ی سیمانی اصلاح شده با مواد پلیمری مختلف

Original Article

هادی چهاری سفید دشتی (کارشناس ارشد)

سیدحسام مدنی\* (دانشیار)

علی سعیدی کیا (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و نقشه‌برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان، ایران

در پژوهش حاضر، میزان تأثیر استفاده از سه نوع پلیمر: استایرن بوتادین رابر، اتیلن وینیل استات و استایرن اکریلیک در درصد‌های جایگزینی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی سیمان در مشخصات ملات پایه‌ی سیمانی ارزیابی شده است. برای مقایسه‌ی تأثیر مواد پلیمری در ملات‌های مورد مطالعه، مشخصات مکانیکی (مقاومت فشاری تک‌محوره و چقرمگی خمشی) و مشخصات مربوط به دوام و نفوذپذیری (میزان نفوذ مویینه و جذب حجمی، مقاومت در برابر اسید سولفوریک و ضریب مهاجرت تسریع شده‌ی یون کلراید) بررسی شده است. نمونه‌های مورد مطالعه تحت دو دوره‌ی عمل‌آوری مرطوب در سنین اولیه (۷ روز ابتدایی) و عمل‌آوری خشک در سنین بالا (روز هشتم تا زمان انجام آزمون) قرار گرفتند. نتایج حاکی از ارتقاء برخی از مشخصات مکانیکی و همچنین بهبود قابل توجه خواص دوام و کاهش نفوذپذیری ملات‌های پایه‌ی سیمانی بوده است.

واژگان کلیدی: خواص مکانیکی، مشخصات دوام، استایرن بوتادین رابر، اتیلن وینیل استات، استایرن اکریلیک.

## ۱. مقدمه

مخلوط‌های سیمانی، نقاط ضعف و محدودیت‌هایی دارند که در کاربردهای خاص صنعتی، کف‌سازی‌ها، مخازن، رویه‌ها، شرایط خاص دمایی و اقلیمی، محیط‌های خورنده و طراحی عضوهای سازه‌ی برای بارگذاری‌های خاص مشهود هستند و بدون کاربرد مواد و روش‌های اصلاحی امکان ساخت و بهره‌گیری از آنها میسر نخواهد بود، از این رو همواره پژوهشگران به اصلاح و بهبود ساختار مخلوط‌های پایه‌ی سیمانی توجه داشته‌اند.

از جمله اصلاحات مخلوط‌های پایه‌ی سیمانی، می‌توان به افزودن مواد پلیمری در ساخت بتن و ملات اشاره کرد، که در اصلاح ساختار مخلوط‌های پایه‌ی سیمانی با افزودن مواد پلیمری، دو پارامتر درصد مصرف مواد پلیمری و همچنین نوع پلیمر مصرفی، اهمیت فراوانی دارد؛ بنابراین تعیین درصد بهینه‌ی کاربرد مواد پلیمری در ساخت ملات‌های پایه‌ی سیمانی به دلیل تأثیر زیاد در خواص دوام و خواص مکانیکی مخلوط‌های پایه‌ی سیمانی، اهمیت قابل توجهی دارد.<sup>[۱]</sup>

پلیمرها به سبب ایجاد حباب هوا در ساختار می‌توانند سبب افزایش تخلخل ساختاری و افزایش مقاومت بتن در برابر یخ‌زدان شوند،<sup>[۲]</sup> همچنین پلیمرها می‌توانند جمع‌شدگی مخلوط‌های سخت شده‌ی بتنی را تحت تأثیر قرار دهند. کاربرد

\* نویسنده مسئول

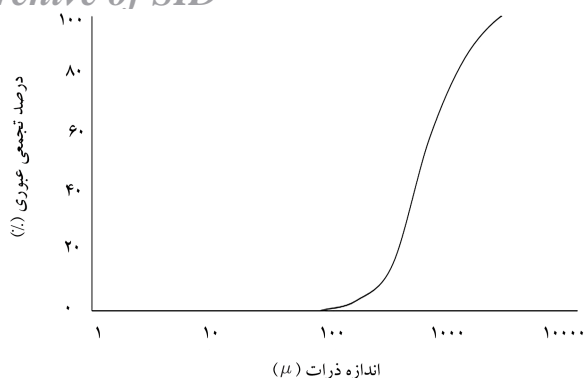
تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۵/۶، اصلاحیه ۱۳۹۸/۷/۱۴، پذیرش ۱۳۹۸/۷/۲۱

DOI:10.24200/J30.2019.53636.2565

hadi\_cheh@yahoo.com  
h.madani@kgut.ac.ir  
saidikia1993@yahoo.com

پلیمر در مصالح پایه‌ی سیمانی می‌تواند سبب افزایش میزان چسبندگی بین ذرات و اجزای سیمان شود و همچنین مقاومت سطح اتصال به سطوح زیرین را بهبود دهد.<sup>[۳-۶]</sup> که این امر کاربردهای تعمیراتی را برای مصالح پایه‌ی سیمانی رونق می‌بخشد. یکی از عوامل مؤثر در مخلوط‌های پایه‌ی سیمانی اصلاح شده با مواد پلیمری، نحوه‌ی عمل‌آوری و نگهداری آنهاست، به طوری که در مخلوط‌های اخیر، عمل‌آوری مرطوب نقش مؤثری در هیدراسیون ذرات سیمان و افزایش خواص مکانیکی دارد و این در حالی است که مخلوط‌های اصلاح شده‌ی پلیمری نیاز به محیط خشک جهت تشکیل فیلم‌های پلیمر دارند تا بتوانند خواص مکانیکی نظیر مقاومت خمشی را افزایش دهند.<sup>[۳]</sup> با توجه به این‌که رسیدن به بهترین مشخصات برای مخلوط‌های اصلاح شده‌ی پلیمری نیازمند تکمیل فرایند هیدراسیون در سنین اولیه و تشکیل فیلم‌های پلیمری بر روی سطوح محصولات و ذرات و پیوستگی فیلم‌های تشکیل شده در سنین بالاتر است، عمل‌آوری ترکیبی (مرطوب و خشک) را می‌توان به عنوان روش بهینه استفاده کرد، زیرا مواد پلیمری با تشکیل فیلم پلیمرها سبب مسدود کردن منافذ ساختار بتن می‌شوند و برخی خواص مکانیکی و دوام از جمله میزان جذب آب را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

فیترا و همکاران (۲۰۱۳)،<sup>[۷]</sup> در مطالعه‌ی پیرامون واکنش قلیایی سیلیسی سنگ‌دانه در مخلوط‌های پایه‌ی سیمانی حاوی پلیمر (پایه آبی)، از سیمان پرتلند و پلیمرهای استایرن بوتادین رابر و استایرن اکریلیک استفاده کردند و کاهش مقاومت



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی مورد استفاده در طرح مخلوط‌ها.

بوتادین را بر استفاده شده است، که مشخصات فیزیکی آنها در جدول ۲ ارائه شده است. در شرکت‌های تولیدکننده در ترکیب لاتکس‌های پلیمری از مقداری سورفکتانت برای پخش بهتر ترکیب‌های پلیمری استفاده می‌شود.

### ۴.۲. آب و روان‌ساز

آب مصرفی در ساخت مخلوط‌های مورد بررسی آب شرب و فوق روان‌کننده‌ی مصرفی نیز به صورت مایع و بر پایه‌ی پلی‌کربوکسیلات اثر بوده است.

### ۳. آماده‌سازی و روش آزمون نمونه‌ها

ابتدا مصالح خشک، شامل سیمان و سنگ‌دانه‌ها در میکسر با یکدیگر مخلوط شدند و سپس ماده‌ی پلیمری و آب طرح اختلاط نیز به صورت مجزا با یکدیگر ترکیب و به مصالح خشک در حال اختلاط افزوده شدند. پس از مخلوط کردن مصالح مصرفی در یک زمان ثابت و رسیدن به مخلوط همگن با روانی مطلوب، ملات تازه درون قالب‌ها ریخته شد و قالب‌گیری صورت گرفت و در نهایت توسط میز لرزان متراکم شدند. این تذکر لازم است که تعیین میزان روانی مخلوط‌های پایه‌ی سیمانی اصلاح شده‌ی پلیمری در پژوهش حاضر با استفاده از میز سیلان مطابق با استاندارد ASTM C۲۳۰ انجام و سیلان مخلوط‌ها در محدوده‌ی ۱۹۰ تا ۲۱۰ میلی‌متری تنظیم شده است. این مقدار سیلان امکان تولید ملات‌ها با تراکم‌پذیری مناسب را میسر ساخته است. پس از تراکم، سطح آزمون‌ها صاف شد و به منظور حفظ رطوبت، به مدت ۲۴ ساعت و تا زمان باز کردن قالب‌ها تحت یک پوشش مرطوب نگهداری شدند. آزمون‌های خارج شده از قالب به مدت ۷ روز تحت شرایط مرطوب (غوطه‌وری در آب) عمل‌آوری شدند و پس از آن، آزمون‌ها از آب خارج و تا زمان انجام آزمون‌ها در سنن بالاتر در دمای ۲۴ درجه‌ی سانتی‌گراد در محیط با رطوبت نسبی حدود ۱۵٪ نگهداری و عمل‌آوری شدند.

در مطالعه‌ی آزمایشگاهی حاضر برای هر کدام از مشخصات و در هر سنی، ۳ آزمون آزمایش شدند و نتایج ارائه شده در پژوهش حاضر، حاصل میانگین نتایج سه آزمون تحت آزمون است.

آزمون مقاومت فشاری آزمون‌ها و همچنین افت مقاومت آنها در برابر حملات اسیدی مطابق با استاندارد ASTM C۱۰۹<sup>[۱۳]</sup>، بر روی آزمون‌های مکعبی با ابعاد ۵۰ × ۵۰ × ۵۰ میلی‌متر و سرعت بارگذاری ۵۳ کیلوگرم بر ثانیه انجام شده است. به منظور انجام آزمون مقاومت خمشی و تعیین چقرمگی نیز از آزمون مقاومت خمشی مطابق با استاندارد EN-۱۹۶<sup>[۱۴]</sup> استفاده شده است. آزمون‌های مناسب

فشاری و افزایش مقاومت خمشی را نتیجه گرفتند؛ همچنین در نمونه‌های اصلاح شده با پلیمر، ریزش‌های ناشی از واکنش کلیایی سیلیسی بسیار کمتر از نمونه‌های فاقد پلیمر بوده است.

فوکایاتا و همکاران (۲۰۱۸)<sup>[۸]</sup> نیز در بررسی کارپذیری، مقاومت و دوام مخلوط‌های پایه‌ی سیمانی حاوی هر دو مواد الیاف پلاستیکی و پلیمر (پایه‌ی آبی) استایرن بوتادین را بر به صورت هم‌زمان، دریافتند که بهبود مقاومت در برابر ترک‌خوردگی، افزایش مقاومت خمشی و کاهش میزان نفوذ آب و مواد شیمیایی درون مخلوط سخت شده است. برخی دیگر<sup>[۹]</sup> نیز به نتایجی مشابه با نتایج اخیر دست یافتند.

دوژان و همکاران<sup>[۱۰]</sup> در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی در بررسی تأثیر کوپلیمر استایرن بوتادین را بر در بتن‌های با مقاومت بالا دریافتند که آثار کاهش مقاومت فشاری نیز همانند مطالعات دیگر بوده است.

مواد پلیمری با تشکیل فیلم پلیمرها، سبب مسدود ساختن منافذ ساختار بتن می‌شوند و برخی خواص مکانیکی و دوام از جمله میزان جذب آب را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

برخی پژوهشگران<sup>[۱۱] و [۱۲]</sup> نیز نفوذپذیری را در مخلوط‌های اصلاح شده‌ی پلیمری بررسی کردند و دریافتند که افزودن پلیمر می‌تواند سبب کاهش میزان نفوذپذیری مخلوط‌ها شود.

بهبود مشخصات مواد پایه‌ی سیمانی، از جمله خصوصیات مکانیکی و دوام همواره سرلوحه‌ی مطالعات در این زمینه بوده است. از جمله موادی که در این راستا استفاده شده‌اند، مواد پلیمری هستند. لیکن این مواد دسته‌بندی‌های مختلف دارند و هر گروه آثار متمایزی را در خواص مواد پایه‌ی سیمانی می‌گذارند. به این منظور، در پژوهش حاضر به مقایسه‌ی تأثیر پلیمرهای استایرن بوتادین را بر، استایرن اکریلیک و اتیلین وینیل استات بر خواص کامپوزیت‌های سیمانی پرداخته شده است، تا با هدف توسعه‌ی بیش‌تر خوانندگان محترم، امکان استفاده از این مواد در کاربردهای خاص فراهم شود.

## ۲. مواد و مصالح

### ۱.۲. سیمان

در مطالعه‌ی آزمایشگاهی حاضر از سیمان پرتلند تیپ II استفاده شده است و مشخصات شیمیایی آن، که با استفاده از آنالیز XRF مشخص شده است، در جدول ۱ مشاهده می‌شود:

### ۲.۲. سنگ‌دانه

ماسه‌ی مصرفی در پژوهش حاضر از جنس سیلیس و شامل سه دانه‌بندی مختلف بوده است، که نسبت ترکیب ماسه با سایز درشت (۰/۶ - ۲/۳۶ میلی‌متر) و متوسط (۰/۱۵ - ۰/۱۸ میلی‌متر) هر کدام به میزان ۴۰٪ و ماسه‌ی پودری (۰/۰۵ - ۰/۴ میلی‌متر) به میزان ۲۰٪ بوده است. چگالی و رطوبت اشباع با سطح خشک ترکیبی ماسه‌های مصرفی به ترتیب برابر ۲۵۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۰/۹٪ بوده است. منحنی دانه‌بندی ترکیبی ماسه‌های مصرفی در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

### ۳.۲. پلیمر

در پژوهش حاضر از دو نوع ماده‌ی پلیمری ترموپلاستیک شامل لاتکس استایرن اکریلیک و پودر پخش‌شونده‌ی اتیلین وینیل استات و یک لاتکس الاستومر استایرن

جدول ۱. آنالیز شیمیایی سیمان مصرفی.

CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
٪۶۰٫۸۰	٪۱۹٫۵۰	٪۳٫۳	٪۴٫۵	٪۲٫۸۳	٪۱٫۳۶	٪۰٫۶	٪۰٫۶

جدول ۲. مشخصات فیزیکی پلیمرهای مورد بررسی.

pH	چگالی	ظاهر	درصد جامد	اندازه ذرات	نام
۸-۹	g/cm <sup>3</sup> ۱/۰۱	مایع سفید رنگ	۵۰ ± ۱٪	۱۵۰ μm	استایرن بوتادین رابر
-	g/cm <sup>3</sup> ۱/۰۴	پودر سفید رنگ	۹۹ ± ۱٪	۹۰ μm	اتیلن وینیل استات
۵-۶	g/cm <sup>3</sup> ۱/۰۴	مایع سفید رنگ	۵۰ ± ۱٪	۱۷۰ μm	استایرن آکریلیک

آزمون‌های مورد بررسی در مطالعه‌ی حاضر در دو دسته‌ی آزمون‌های مقاومتی و دوام قرار می‌گیرند و با انجام آنها، این امکان میسر می‌شود که میزان تأثیر مواد پلیمری مورد استفاده در خواص اشاره شده بررسی و تا حد امکان مکانیزم‌های اثر بخشی مواد مذکور شناخته شود. در نتیجه می‌توان از مواد پلیمری مذکور به میزان بهیسه برای اهداف خاص استفاده کرد.

#### ۴. طرح مخلوط

طرح اختلاط‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر بر حسب حجم واحد است. میزان پلیمر مورد استفاده در پژوهش حاضر برابر ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزن سیمان در نظر گرفته شده است، همچنین نسبت آب به سیمانی که برای ساخت مخلوط‌های پایه‌ی سیمانی اصلاح شده با مواد پلیمری و فاقد پلیمر در نظر گرفته شده است، ۰٫۳۳۵ بوده است؛ که به منظور ثابت نگه داشتن نسبت آب به سیمان، مقدار آب موجود در لاتکس و روان‌ساز مصرفی از میزان آب مصرفی طرح مخلوط کاسته شده و بخش جامد مواد پلیمری و فوق روان‌ساز مورد استفاده، به عنوان جایگزینی از وزن ماسه‌ی مصرفی محسوب شده‌اند. شایان ذکر است جایگزینی بخشی از سنگ‌دانه با مواد افزودنی غیرسیمانی، امری رایج در مطالعات تکنولوژی بتن است.

در مطالعه‌ی حاضر نیز پلیمر به عنوان جایگزین سنگ‌دانه استفاده شده است. ذکر این نکته ضروری است که جایگزینی بخشی از سیمان با پلیمر، سبب کاهش مقدار سیمان می‌شود و با توجه به نقش مهم سیمان در کسب خواص بتن، به دلیل ایجاد تعامل اثر بین عامل تغییر مقدار سیمان و درصد استفاده از مواد پلیمری، بررسی اثر پلیمرها قدری دشوار می‌شود. از سوی دیگر، نداشتن خاصیت سیمانی در مواد پلیمری امکان جایگزینی آنها به عنوان بخشی از مواد سیمانی را با اشکال مواجه می‌سازد. همچنین شایان ذکر است که وزن پلیمر مصرفی که در جدول ۳ مشهود است، وزن جامد پلیمر مصرفی است. جدول ۳، طرح مخلوط بر اساس حجم واحد مصالح ساخت مخلوط اصلاح شده‌ی پلیمری را نشان می‌دهد.

#### ۵. نتایج و بحث

##### ۱.۵. مقاومت فشاری

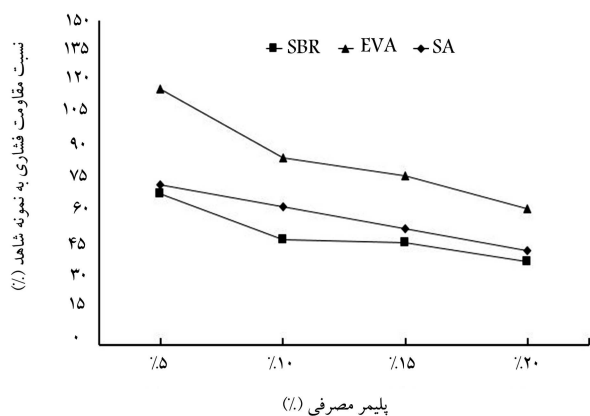
در شکل‌های ۲ الی ۵ نسبت مقاومت فشاری مخلوط‌های اصلاح شده به مقاومت طرح شاهد در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه نشان داده شده است. شکل ۲، مقاومت فشاری آزمونه‌های اصلاح شده‌ی پلیمری را نسبت به نمونه‌ی

برای آزمون ذکر شده مطابق با استاندارد EN-۱۹۶ به شکل منشوری با ابعاد ۴۰ × ۴۰ × ۱۶۰ میلی‌متر بودند و روند انجام این آزمون به صورتی بود که آزمونه‌های منشوری تحت آزمون دقیقاً مانند یک تیر خمشی با تکیه‌گاه مفصلی عمل می‌کردند، که تحت بارگذاری متمرکز تک‌نقطه‌ی در وسط دهانه بین دو تکیه‌گاه قرار داشتند. همچنین شایان ذکر است که سرعت بارگذاری بر روی آزمونه‌ها برابر با ۱٫۲۷ میلی‌متر بر دقیقه بوده است، همچنین این تذکر لازم است که در پژوهش حاضر برای انجام آزمون سنجش مقاومت خمشی، از یک جک ۳۰ تنی پیشرفته ساخت شرکت اینسترون استفاده شده است. این جک توانایی رسم نمودارهای بار- تغییر مکان را دارد و با محاسبه‌ی سطح زیر نمودارها با روش استاندارد EN-۱۹۶ در نوشتار می‌توان میزان چقرمگی در حالت کشسان را محاسبه کرد. در مورد بتن‌های خاص همچون بتن الیافی، رفتارهای پس از نقطه‌ی ترک‌خوردگی بتن قابل بررسی است، لیکن در مطالعه‌ی حاضر رفتار پس از ترک‌خوردگی وجود ندارد و بلافاصله نمونه مقاومت خود را از دست می‌دهد. مقادیر چقرمگی بیشتر نمونه‌ها می‌تواند نشان‌گر میزان جذب بیشتر انرژی قبل ترک‌خوردگی، که خود معلول تحمل بار و یا تغییر شکل پذیری بیشتر قبل از نقطه‌ی ترک‌خوردگی است، باشد.

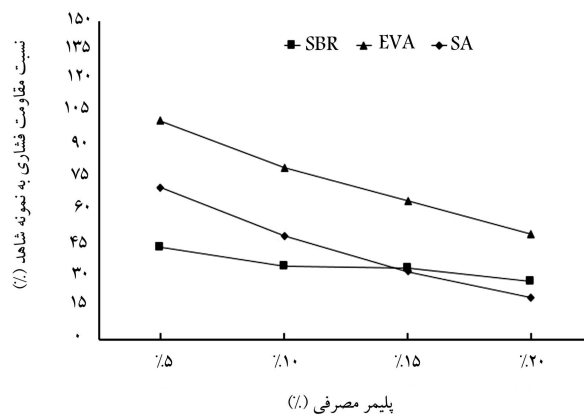
در پژوهش حاضر، ضریب مهاجرت سریع شده‌ی یون کلراید مطابق استاندارد NT Build-۴۹۲<sup>[۱۵]</sup> بر روی آزمونه‌های استوانه‌ی با ضخامت ۵۰ میلی‌متر انجام شده است. همچنین میزان جذب مویسه و حجمی آب در پژوهش حاضر به ترتیب مطابق با استانداردهای ASTM C15۸۵<sup>[۱۶]</sup> و ASTM C6۴۲<sup>[۱۷]</sup> بر روی آزمونه‌های استوانه‌ی برش داده شده با ضخامت نسبی ۵۰ میلی‌متر و قطر ۱۰۰ میلی‌متر انجام پذیرفته است.

در آزمون مقاومت در برابر اسید، آزمونه‌ها تا سن ۲۸ روز، شرایط عمل‌آوری شرح داده شده در پژوهش حاضر را طی کردند و در سن ۲۸ روز، آزمونه‌های مذکور (که در محیط خشک بودند) به مدت ۲۴ ساعت در حوضچه‌های آب نگهداری شدند (به علت ممانعت از نفوذ مستقیم محلول اسیدسولفوریک در ساختار آزمونه‌ها پس از قرارگیری در محیط اسیدی، با توجه به شرایط عمل‌آوری (ترکیبی) آزمونه‌ها) و پس از آن درون حوضچه‌های حاوی ۵٪ حجمی اسیدسولفوریک تحت آزمون قرار گرفتند. این آزمونه‌ها به مدت ۲۸ روز درون محلول اسیدسولفوریک قرار داشتند و در بازه‌های زمانی ۷ روزه توزین شدند و مجدداً درون محلول اسید نگهداری شدند. شایان ذکر است که به صورت روزانه pH محلول، اندازه‌گیری و در صورت تغییر در مقدار pH، این محلول با محلولی جدید تعویض شده است، تا شرایط آزمون یکسان و پایدار باشد. در پایان ۲۸ روزه که آزمونه‌ها در محیط اسیدی قرار داشتند (سن ۵۶ روز)، آزمون مقاومت فشاری نیز بر روی آنها انجام شده است، که نتایج آن نیز ارائه شده است.

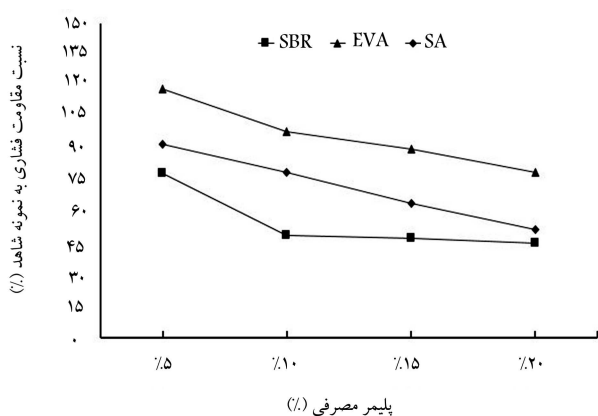
پلیمر	روان ساز	Kg/m <sup>3</sup>	ماده‌ی ترکیبی	سیمان	آب آزاد	W/C (%)	کد طرح اختلاط
۰	۳,۲۴	۱۳۸۲	۶۷۵	۲۲۶	۳۳,۵	N-Plain	
۳۳,۷۵	۳,۲۴	۱۳۰۰	۶۷۵	۲۲۶	۳۳,۵	SBR-۵	
۶۷,۵	۳,۲۴	۱۲۱۸	۶۷۵	۲۲۶	۳۳,۵	SBR-۱۰	
۱۰۱,۲۵	۰	۱۱۳۴	۶۷۵	۲۲۶	۳۳,۵	SBR-۱۵	
۱۳۵,۰۰	۰	۱۰۵۹	۶۷۵	۲۲۶	۳۳,۵	SBR-۲۰	
۳۳,۷۵	۳,۲۴	۱۳۰۰	۶۷۵	۲۲۶	۳۳,۵	SA-۵	
۶۷,۵	۳,۲۴	۱۲۱۸	۶۷۵	۲۲۶	۳۳,۵	SA-۱۰	
۱۰۱,۲۵	۰,۶۴۸	۱۱۳۴	۶۷۵	۲۲۶	۳۳,۵	SA-۱۵	
۱۳۵,۰۰	۰	۱۰۵۹	۶۷۵	۲۲۶	۳۳,۵	SA-۲۰	
۳۳,۷۵	۳,۲۴	۱۳۰۰	۶۷۵	۲۲۶	۳۳,۵	EVA-۵	
۶۷,۵	۳,۲۴	۱۲۱۸	۶۷۵	۲۲۶	۳۳,۵	EVA-۱۰	
۱۰۱,۲۵	۳,۲۴	۱۱۳۴	۶۷۵	۲۲۶	۳۳,۵	EVA-۱۵	
۱۳۵,۰۰	۰	۱۰۵۹	۶۷۵	۲۲۶	۳۳,۵	EVA-۲۰	



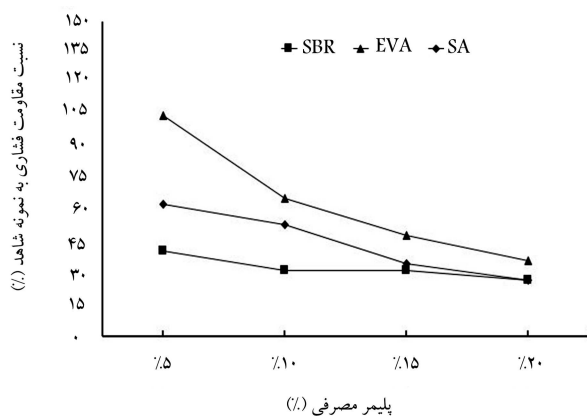
شکل ۴. مقاومت فشاری نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه.



شکل ۲. مقاومت فشاری در سن ۳ روزه.



شکل ۵. مقاومت فشاری نمونه در سن ۹۰ روزه.



شکل ۳. مقاومت فشاری نمونه‌ها در سن ۷ روزه.

یکسان، نمونه‌های حاوی اتیلن وینیل استات، مقاومت بیشتری از سایر نمونه‌ها داشته‌اند. مشابه سن ۳ روزه، نمونه‌ی حاوی ۵٪ پلیمر اتیلن وینیل استات بیشترین مقاومت را کسب کرده و مقادیر مقاومت سایر نمونه‌های اصلاح شده کمتر از نمونه‌ی شاهد بوده است. در کلیه‌ی نسبت‌های پلیمر به سیمان، نمونه‌های استارین بوتادین رابر، کمترین مقادیر مقاومتی را داشتند. عمل‌آوری نمونه‌های حاوی مواد پلیمری در شرایط غرقاب باعث جلوگیری از رسیدن فضای آبی به حالت فوق اشباع و کاهش میزان ته‌نشینی ذرات پلیمری می‌شود و به تبع آن امکان تشکیل فیلم‌های پلیمری کاهش می‌یابد. بنابراین به طور کلی می‌توان بیان کرد که عموماً بسته به نوع و میزان پلیمر مصرفی نمونه‌های حاوی ۳ نوع ماده‌ی پلیمری مورد نظر در ۷ روز اول و شرایط محیطی مرطوب، به دلیل بالا بردن لزجت آب محیط و کاهش امکان واکنش هیدراسیون و همچنین عدم ایجاد مقدار قابل ملاحظه‌ی فیلم‌های پلیمری موجب کاهش سرعت و مقدار کسب مقاومت فشاری مخلوط‌های پایه‌ی سیمانی می‌شوند و این تأثیر با افزایش نسبت پلیمر به سیمان شدت می‌یابد.

مطابق نتایج ۳ و ۷ روزه مشاهده شد که عملکرد مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی اتیلن وینیل استات در شرایط عمل‌آوری مرطوب بهتر از سایر نمونه‌هاست، به طوری که در نسبت ۵٪ پلیمر به سیمان موجب بهبود ۵٪ مقاومت نسبت به نمونه‌ی شاهد شده است، که ناشی از عملکرد سورفکتنت‌ها و همچنین متناسب بودن میزان جذب آب ذرات پلیمر و درجه‌ی لزجت ایجاد شده در فضای آبی است.

مطابق با نتایج مقاومت فشاری سن ۲۸ روزه که در شکل ۴ مشهود است، مقاومت مخلوط حاوی ۵٪ اتیلن وینیل استات به میزان ۲۰٪ بیشتر از نمونه‌ی شاهد با ۶۸ مگاپاسکال مقاومت فشاری است و مقاومت سایر نمونه‌های اصلاح شده کمتر از نمونه‌ی شاهد بوده است. در نمونه‌های حاوی هر سه نوع پلیمر، افزایش نسبت پلیمر به سیمان، موجب کاهش مقاومت فشاری شده است؛ لیکن اختلاف بین مقادیر مقاومتی مخلوط‌های حاوی نسبت‌های مختلف پلیمر سیمان به میزان قابل ملاحظه‌ی کاهش یافته است. در کلیه‌ی نسبت‌های پلیمر به سیمان، نمونه‌های حاوی اتیلن وینیل استات مقاومت بیشتری از سایر نمونه‌ها نشان داده‌اند.

با توجه به این‌که در سن ۲۸ روزه نمونه‌ها، یک دوره‌ی عمل‌آوری ۲۱ روزه‌ی خشک را گذرانده‌اند، می‌توان بخشی از بهبود روند کسب مقاومت نمونه‌های اصلاح شده نسبت به نمونه‌ی شاهد را به شرایط عمل‌آوری خشک نمونه‌ها نسبت داد، به این صورت که با قرار گرفتن نمونه‌ها در شرایط خشک، آب موجود در مخلوط در اثر تبخیر سطحی و یا شرکت در واکنش هیدراسیون کاهش می‌یابد و با رسیدن به حالت فوق اشباع مقداری از ذرات پلیمر بر روی سطح ذرات سیمان و سنگ‌دانه‌ها و یا محصولات هیدراته شده رسوب می‌کنند و از پیوستن این ذرات به یکدیگر فیلم‌های پلیمری تشکیل می‌شوند. ادامه‌ی این فرایند تا تکمیل واکنش هیدراسیون سیمان و همچنین تشکیل غشاهای پلیمری به صورت رشد مشخصات مقاومتی با شدت فراتر از نمونه‌های شاهد در شرایط عمل‌آوری خشک قابل مشاهده است. [۱۸ و ۱۹] بدیهی است که هر دو فرایند هیدراسیون سیمان و تشکیل فیلم پلیمری مستقیماً برای رسیدن به مقاومت بهینه‌ی نمونه‌ها تأثیرگذار خواهند بود.

نتایج مقاومت فشاری سن ۹۰ روزه نشان می‌دهد که مشابه سنین پیشین در دو نوع پلیمر استارین اکریلیک و اتیلن وینیل استات، نمونه‌های حاوی بیشینه‌ی میزان پلیمر (۲۰٪)، مقاومت فشاری کمتری داشته‌اند و در مخلوط‌های حاوی استارین بوتادین رابر، نیز این روند با شدت بسیار کمتری مشاهده می‌شود.

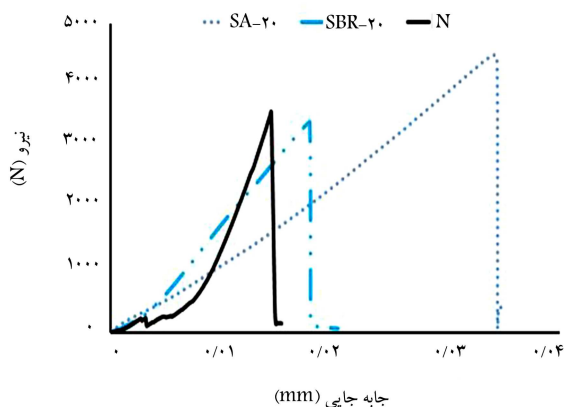
در نسبت‌های مختلف، نمونه‌های حاوی اتیلن وینیل استات، مقاومت فشاری بیشتری از نمونه‌های حاوی استارین بوتادین رابر و استارین اکریلیک کسب کرده‌اند. بیشترین مقاومت برای نمونه‌ی حاوی ۵٪ اتیلن وینیل استات به دست آمد که به

شاهد با ۴۸ مگاپاسکال مقاومت فشاری در سن ۳ روزه نشان می‌دهد. مطابق شکل ۲ می‌توان دریافت که در سن ۳ روزه، افزایش نسبت پلیمر به سیمان موجب کاهش مقاومت فشاری مخلوط‌های اصلاح شده در هر سه نوع پلیمر می‌شود. در نمونه‌های حاوی استارین بوتادین رابر، شیب کاهش مقاومت در اثر افزایش میزان پلیمر تا حد زیادی ملایم‌تر بوده است، همچنین در نسبت‌های پلیمر به سیمان یکسان می‌توان مشاهده کرد که نمونه‌های حاوی اتیلن وینیل استات نسبت به سایر نمونه‌ها مقاومت بیشتری داشته‌اند. بزرگ‌ترین مقدار مقاومت به دست آمده برای نمونه‌ی حاوی ۵٪ اتیلن وینیل استات بوده است، که مقاومت آن به میزان اندکی (۴/۶٪) بیشتر از مقاومت نمونه‌ی شاهد بوده و سایر مخلوط‌ها نیز مقدار مقاومت کمتری نسبت به نمونه‌ی شاهد داشته‌اند.

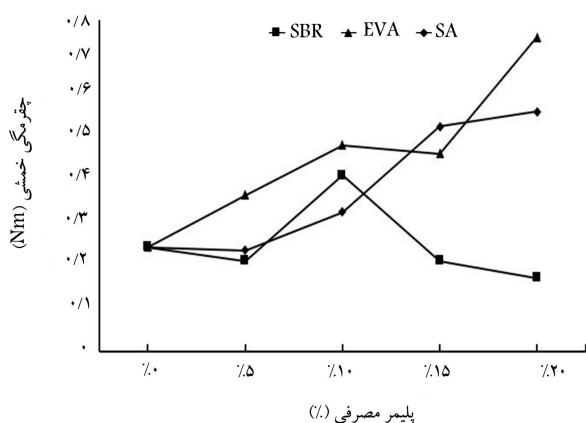
در مخلوط‌های اصلاح شده با مواد پلیمری، بلافاصله پس از اختلاط، ذرات پلیمر در فضای آبی موجود در مخلوط پراکنده می‌شوند و مقداری از آب را به خود جذب می‌کنند، این موضوع موجب بالا رفتن لزجت فضای آبی می‌شود. همچنین در اثر کاهش آب آزاد در محیط، که عامل واکنش شیمیایی ذرات سیمان است، زمینه‌ی واکنش هیدراسیون کاهش می‌یابد. با مصرف مقداری از آب در واکنش با ذرات سیمان، آب آزاد موجود در مخلوط کاهش می‌یابد و ذرات پلیمر پراکنده در آب به همدیگر نزدیک می‌شوند، تا جایی که فضای آبی به حالت فوق اشباع می‌رسد و مقداری از ذرات پلیمر بر روی سطوح ذرات واکنش نمی‌دهند و سیمان و یا خمیر سیمان ته‌نشین می‌شوند و به یکدیگر می‌پیوندند، که این موضوع نیز به دلیل پوشیده شدن تعدادی از سطوح فعال ذرات سیمان، درجه‌ی هیدراسیون مخلوط را کاهش می‌دهد. [۱۸ و ۱۹] با کاهش میزان اشباعیت فضای آبی، مجدداً مقداری از آب آزاد شده وارد واکنش هیدراسیون می‌شوند و این روند تا تکمیل فرایند هیدراسیون و پس از آن تکمیل پلیمریزاسیون ادامه می‌یابد. بنابراین در نمونه‌های حاوی مواد پلیمری، سرعت واکنش هیدراسیون سیمان کاهش یافته است، که شدت این کاهش وابسته به نوع و میزان پلیمر مصرفی است. [۵]

با توجه به توالی فرایندهای کسب مقاومت در مخلوط‌های سیمانی اصلاح شده با مواد پلیمری، بخش عمده‌ی مقاومت کسب شده در سنین اولیه مربوط به فرایند هیدراسیون سیمان است. در نمونه‌های شاهد، حجم محصولات هیدراسیون در سنین اولیه و شرایط مرطوب نسبت به نمونه‌های حاوی پلیمر بیشتر بوده است، که باعث افزایش مقاومت بیشتری در سنین اولیه شده است. نتایج در مورد مخلوط حاوی ۵٪ اتیلن وینیل استات نیز نشان می‌دهند که آب باقیمانده از میزان جذب شده توسط پلیمرهای موجود در محیط برای انجام فرایند هیدراسیون کافی بوده و همچنین مقدار سورفکتنت موجود در ترکیب پلیمر تا حدی موجب کاهش کلوخه‌شدگی و افزایش میزان تماس ذرات سیمان و آب شده است و این موضوع تا حدودی مقاومت را افزایش داده است به عبارتی دیگر، در ترکیب لاتکس‌های پلیمری از سورفکتنت‌ها برای جلوگیری از انعقاد ذرات و بهبود پخش آنها استفاده می‌شود، لذا پس از اختلاط با اجزاء مخلوط، پایه‌ی سیمانی ترکیب‌های مذکور تا حدی سبب بهبود روانی و جلوگیری از کلوخه شدن ذرات نیز می‌شوند. البته این خاصیت موجب حباب‌زایی در مخلوط هم می‌شود و در درصدهای بالای پلیمر، بخشی از افت مقاومت را سبب می‌شود. در نسبت‌های بالاتر پلیمر به سیمان، افزایش میزان سورفکتنت محیط موجب حباب‌سازی و افزایش تخلخل نمونه می‌شود، که این امر خود کاهش مقاومت را نیز در پی خواهد داشت. [۵]

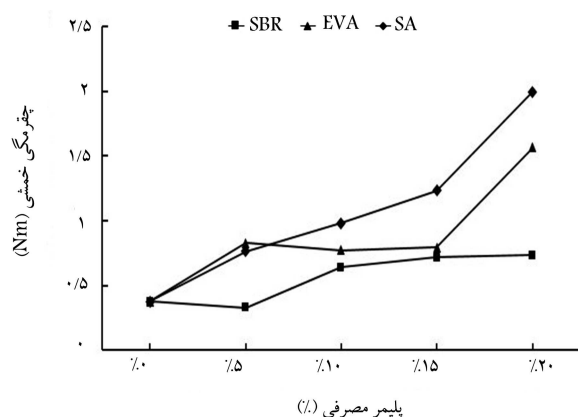
با توجه به نتایج مقاومت فشاری آزمونه‌ی شاهد با میزان مقاومت ۶۳ مگاپاسکال در سن ۷ روزه شکل ۳، مشاهده می‌شود که در هر ۳ نوع پلیمر نیز افزایش نسبت پلیمر به سیمان موجب کاهش مقاومت مخلوط‌ها بوده است. همچنین در نسبت‌های



شکل ۶. نمودار نیرو - جابه‌جایی آزمونه‌ها در سن ۹۰ روزه.



شکل ۷. مقادیر چقرمگی خمشی در سن ۷ روزه.



شکل ۸. مقادیر چقرمگی خمشی در سن ۹۰ روزه.

این صورت که افزودن استایرن اکریلیک موجب کاهش بیشتری در سرعت و میزان واکنش هیدراسیون شده و همچنین مقاومت و میزان چسبندگی داخلی ناشی از فیلم‌های پلیمری کمتر از اتیلن وینیل استات بوده است، لیکن پتانسیل تغییر طول پذیری در مواد مذکور بیشتر است و غشاهای تشکیل شده موجب چقرمگی بیشتری در مخلوط‌های حاوی پلیمر شده‌اند، که این موضوع با کاهش شیب نمودار خیز - نیرو که در شکل ۶ نشان داده شده است، مشهود است.

مطابق نتایج به دست آمده از چقرمگی‌های سن ۹۰ روزه مشاهده می‌شود که میزان چقرمگی نمونه‌های حاوی پلیمر بیشتر از نمونه‌ی شاهد است و در نسبت‌های

میزان ۲۰٪ فراتر از نمونه‌ی شاهد، که مقاومت فشاری برابر با ۷۰ مگاپاسکال داشت، بوده و به ترتیب ۲۵ و ۴۰ درصد فراتر از نمونه‌ی حاوی میزان مشابه استایرن اکریلیک و استایرن بوتادین رابر بوده است.

مطابق نتایج، سرعت افزایش مقاومت نمونه‌های حاوی پلیمر در بازه‌ی زمانی عمل‌آوری خشک به میزان قابل توجهی فراتر از نمونه‌های شاهد است. با ادامه‌ی روند عمل‌آوری خشک، تشکیل فیلم‌های پلیمری کامل شده و واکنش هیدراسیون با جذب تدریجی آب منفذی حاوی ذرات پلیمر معلق ادامه یافته است و این موضوع تا حدی موجب جبران فرایند هیدراسیون ناقص در سنین اولیه شده است. با توجه به نتایج و مقادیر به دست آمده در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روزه می‌توان بیان کرد که استفاده از پلیمرهای مورد نظر عموماً موجب کاهش سرعت رشد مقاومت فشاری مخلوط‌ها و با قرار گرفتن در شرایط عمل‌آوری خشک و گذشت زمان که موجب تشکیل فیلم‌های پلیمری پس از تکمیل فرایند هیدراسیون می‌شود، بخش قابل ملاحظه‌ی از این اختلاف، مقدار مقاومت در نمونه‌های اصلاح شده‌ی پلیمری جبران می‌شود. به طور کلی مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی اتیلن وینیل استات بین ۲۵ تا ۳۰ درصد بیش از نمونه‌های حاوی استایرن اکریلیک در درصد‌های مشابه است.

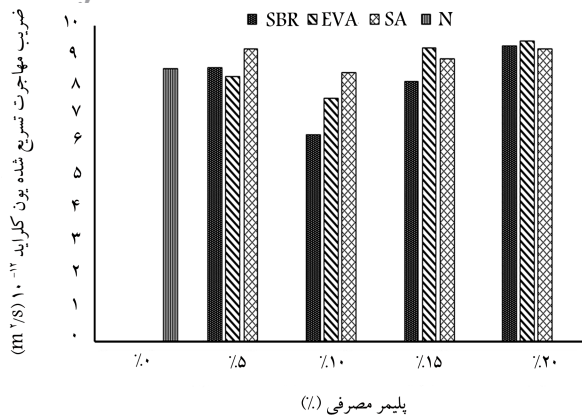
## ۲.۵. چقرمگی خمشی

در شکل ۶، نمونه‌هایی از نمودارهای نیرو جابه‌جایی آزمونه‌های ۹۰ روزه‌ی شاهد و همچنین حاوی ۲۰٪ پلیمرهای استایرن بوتادین رابر و استایرن اکریلیک ارائه شده است. نتایج چقرمگی خمشی که حاصل سطح زیرین منحنی نیرو - جابه‌جایی است، در سنین ۷ و ۹۰ روزه به ترتیب مطابق شکل‌های ۷ و ۸ است.

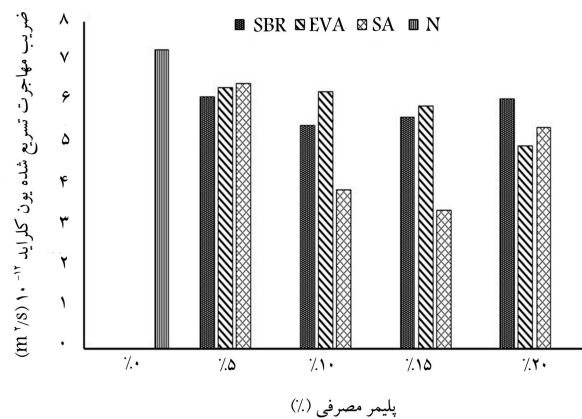
در یک نگاه کلی به نتایج چقرمگی خمشی آزمونه‌ها در سن ۷ روزه می‌توان دریافت که تمامی آزمونه‌های اصلاح شده با پلیمرهای اتیلن وینیل استات و استایرن اکریلیک، جذب انرژی و چقرمگی خمشی بیشتری نسبت به آزمونه‌های شاهد داشته‌اند. همچنین می‌توان مشاهده کرد که در هر دو نوع پلیمر اتیلن وینیل استات و استایرن اکریلیک، افزایش درصد مصرف پلیمرها سبب افزایش میزان چقرمگی خمشی آزمونه‌ها شده است.

در نسبت‌های پلیمر به سیمان یکسان، غیر از نسبت ۱۵٪، نمونه‌های حاوی اتیلن وینیل استات نسبت به نمونه‌های حاوی استایرن اکریلیک، چقرمگی خمشی بیشتری داشته‌اند. به طور کلی در کلیه‌ی نسبت‌های پلیمر به سیمان، مخلوط‌های حاوی استایرن بوتادین رابر کمترین مقدار چقرمگی خمشی را داشته‌اند و مقادیر به دست آمده نزدیک به نتایج نمونه‌ی شاهد بوده است، البته غیر از نمونه‌ی حاوی ۱۰٪ پلیمر استایرن بوتادین رابر، که حالت بهینه ایجاد کرده است. بیشینه‌ی میزان چقرمگی خمشی در سن ۷ روزه مربوط به نمونه‌ی حاوی ۲۰٪ اتیلن وینیل استات است، که ۳ برابر بزرگ‌تر از نمونه‌ی شاهد و ۱٫۳ برابر نمونه‌ی حاوی ۲۰٪ استایرن اکریلیک و ۴ برابر نمونه‌ی حاوی ۲۰٪ استایرن بوتادین رابر است.

با توجه به نتایج چقرمگی و مقاومت مخلوط‌ها مشاهده می‌شود که در سن ۷ روزه، تشکیل فیلم‌های پلیمری موجب افزایش جذب انرژی و تبعاً افزایش چقرمگی مخلوط‌های اصلاح شده می‌شود. افزایش نسبت پلیمر به سیمان در نمونه‌های اصلاح شده با اتیلن وینیل استات و استایرن اکریلیک سبب تشدید این ویژگی می‌شوند و پیوسته رشد می‌کنند و این در حالی است که نمونه‌های حاوی استایرن بوتادین رابر در این خصوص، نقطه‌ی بهینه دارند. در نسبت‌های یکسان، اختلاف بین مقادیر چقرمگی و اختلاف مقاومت نمونه‌های اصلاح شده یکسان نبود و این موضوع نشان‌دهنده‌ی اثر جذب انرژی بیشتر در نمونه‌های حاوی استایرن اکریلیک است؛ به



شکل ۹. ضریب مهاجرت تسريع شده یون کلراید در سن ۷ روزه.



شکل ۱۰. ضریب مهاجرت تسريع شده یون کلراید در سن ۲۸ روزه.

بهینه‌ی نفوذ در نسبت ۱۰٪ پلیمر به سیمان داشتند و این نسبت بیان‌گر کمینه‌ی میزان تخلخل به همراه مسدود شدگی کافی است، به صورتی که در نسبت‌های کمتر پلیمر به سیمان، مسدود شدگی منافذ کامل نمی‌شود و در نسبت‌های بیشتر، افزایش تخلخل ناشی از افزایش سورفکتانت‌ها، موجب افزایش نفوذ یون کلراید می‌شود. به طور کلی کمترین میزان نفوذ مربوط به نمونه‌ی حاوی ۱۵٪ استایرن اکریلیک است، که نشان‌دهنده‌ی بیشترین مسدود شدگی منافذ در این حالت است. با توجه به خاصیت حباب‌سازی سورفکتانت‌های موجود در ترکیبات پلیمری می‌توان افزایش نفوذ در نسبت ۲۰٪ را به افزایش بیش از حد تخلخل مخلوط نسبت داد.

#### ۴.۵. بررسی میزان جذب مویینه

آزمایش ضریب نفوذ مویینه‌ی آب در ساختار مخلوط پایه‌ی سیمانی در سن ۲۸ روزه بر روی نمونه انجام شد. مطابق نتایج حاصل که در شکل ۱۱ مشهود است، در ۶ ساعت اول، تمامی نمونه‌های حاوی مواد پلیمری، میزان نفوذ مویینه‌ی کمتری نسبت به نمونه‌ی شاهد داشته‌اند. همچنین این نتایج حاکی از آن است که افزایش نسبت پلیمر به سیمان در تمامی نمونه‌ها موجب کاهش میزان جذب مویینه‌ی آب شده است. در درصد مشابه نسبت پلیمر به سیمان، نمونه‌های حاوی استایرن اکریلیک، کمترین مقادیر جذب آب نسبت به سایر پلیمرها را داشتند و نمونه‌های حاوی استایرن بوتادین رابر در مرتبه‌ی دوم بودند، نهایتاً نمونه‌های حاوی اتیلن وینیل استات در بین نمونه‌های اصلاح شده، بیشترین جذب مویینه را داشته است. این کاهش شدید میزان جذب مویینه را می‌توان به تشکیل فیلم‌های پلیمری نسبت داد، به طوری

یکسان پلیمر به سیمان به غیر از نسبت پلیمر به سیمان ۵٪، مقدار چقرمگی به دست آمده برای نمونه‌های حاوی استایرن اکریلیک بیشتر از مقادیر نمونه‌های حاوی اتیلن وینیل استات بوده است. نمونه‌های حاوی استایرن بوتادین رابر در تمامی نسبت‌های پلیمر به سیمان کمترین مقدار چقرمگی را داشتند و تغییرات چقرمگی از نسبت پلیمر به سیمان ۱۰ تا ۲۰ درصد ناچیز است.

با مقایسه‌ی نتایج ۹۰ روزه‌ی چقرمگی خمشی نمونه‌ها نسبت به نتایج سن ۷ روزه مشاهده می‌شود که تأثیر دوره‌ی عمل‌آوری خشک در بهبود چقرمگی نمونه‌های حاوی استایرن اکریلیک بیشتر از سایر نمونه‌ها بوده است.

به طور کلی مشاهده شد که وجود استایرن اکریلیک در مخلوط سیمانی موجب بالا رفتن لزجت فضای آبی و جذب آب توسط ذرات پلیمر می‌شود و سرعت واکنش هیدراسیون را به میزان قابل ملاحظه‌ی کاهش می‌دهد و با گذشت دوره‌ی عمل‌آوری خشک و رسیدن فضای آبی به حالت فوق اشباع، ذرات پلیمر به یکدیگر نزدیک می‌شوند و پیوندهای پلیمری شکل می‌گیرد و با رسوب ذرات پلیمر روی سطح داخلی و کاهش درجه‌ی اشباعیت فضای آبی، مجدداً امکان آزاد شدن مقداری آب و شرکت در واکنش هیدراسیون فراهم می‌شود و ادامه‌ی این روند موجب تکمیل فرایند هیدراسیون و تشکیل فیلم‌های پلیمری و تبعاً افزایش مشخصات مقاومتی می‌شود. این موضوع در نمونه‌های حاوی اتیلن وینیل استات نیز با شدت خیلی کمتر مشهود است، به این صورت که این مواد در سنین اولیه و در شرایط عمل‌آوری مرطوب سازگارتر هستند و در این دوره واکنش هیدراسیون با شدت بیشتری انجام می‌گیرد. تأثیر تشکیل فیلم در هر سه نوع ماده‌ی پلیمری در سنین اولیه کاملاً مشهود است، با این تفاوت که فیلم‌های پلیمری اتیلن وینیل استات چسبندگی و مقاومت بیشتری ایجاد می‌کنند و در نوع استایرن اکریلیک جذب انرژی بیشتری مشاهده می‌شود.

#### ۳.۵. مهاجرت تسريع شده یون کلراید

شکل ۹، ضریب مهاجرت تسريع شده یون کلراید در سن ۷ روزه را برای نمونه‌های شاهد و اصلاح شده‌ی پلیمری نشان می‌دهد. مطابق نتایج به دست آمده در سن ۷ روزه برای آزمون مهاجرت تسريع شده یون کلراید، مشاهده می‌شود که وجود ترکیب‌های پلیمری در مخلوط‌های پایه‌ی سیمانی در سنین اولیه که نمونه‌ها در شرایط عمل‌آوری مرطوب نگهداری شده‌اند و امکان تشکیل فیلم‌های پلیمری پیوسته و مسدود شدن منافذ به میزان قابل ملاحظه‌ی وجود نداشته است، تغییرات چشمگیری در میزان نفوذ یون کلراید ایجاد نشده است. به طور کلی در سن ۷ روزه، میزان نفوذ یون کلراید در تمامی نمونه‌ها به یکدیگر نزدیک‌اند و کمترین نفوذ در هر سه نوع پلیمر در نسبت پلیمر به سیمان به میزان ۱۰٪ به دست آمده است، که میزانی بهینه برای مخلوط‌های اصلاح شده‌ی پلیمری در محیط‌های مرطوب محسوب می‌شود.

شکل ۱۰، نتایج حاصل از آزمون اخیر را در سن ۲۸ روزه نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده از مقدار نفوذ یون کلراید در سن ۲۸ روزه نشان می‌دهد که با گذشت دوره‌ی عمل‌آوری خشک، میزان نفوذ یون کلراید در کلیه‌ی نمونه‌های اصلاح شده نسبت به مخلوط شاهد بهبود داشته و این موضوع نشان‌دهنده‌ی تشکیل فیلم‌های پلیمری در دوره‌ی ۲۸ روزه و همچنین مسدود کردن منافذ توسط غشاهای ایجاد شده است.

در مخلوط حاوی استایرن اکریلیک در نسبت پلیمر به سیمان ۱۵٪، کمترین نفوذ ایجاد شده است، که بیان‌گر حالت بهینه در نسبت ذکر شده است.

در نمونه‌های حاوی اتیلن وینیل استات با افزایش نسبت پلیمر به سیمان، کاهش میزان نفوذ یون کلراید مشاهده می‌شود و نمونه‌های حاوی استایرن بوتادین رابر، حد

## Archive of SID

در مقایسه با مخلوط شاهد داشته است، همچنین شایان ذکر است که جذب حجمی آب در نمونه‌ی حاوی ۵٪ اتیلن وینیل استات کمتر از مخلوط شاهد و نمونه‌ی ۱۰٪ اتیلن وینیل استات است و یک نتیجه‌ی مطلوب بهینه برای میزان جذب حجمی آب تلقی می‌شود.

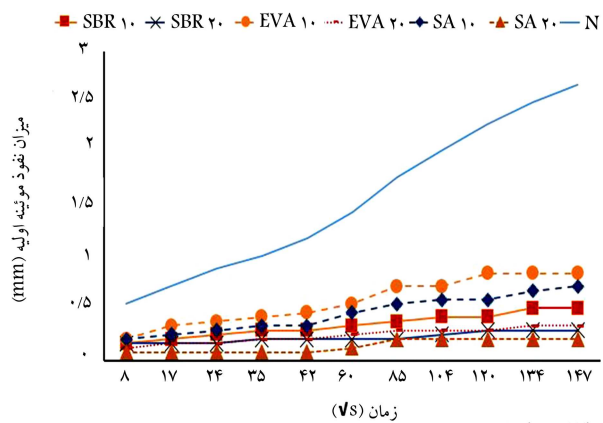
در نسبت ۱۰٪، به علت کم بودن سورفکتنت‌ها، حباب‌زایی در مخلوط کم بوده و با توجه به تشکیل فیلم‌های پلیمری به میزان خیلی کم، تراکم مخلوط موجب جذب کم آب شده است. همچنین در نسبت ۱۰٪، تأثیر سورفکتنت‌ها در افزایش تخلخل قابل مشاهده است و البته میزان تولید فیلم پلیمری به حدی نرسیده است که با ایجاد پیوستگی و مسدود ساختن تمامی منافذ، میزان نفوذ را کاهش دهد. مطابق نتایج شکل ۱۲ می‌توان دریافت که کمینه‌ی میزان جذب حجمی آب در تمامی نسبت‌های پلیمر به سیمان مربوط به مخلوط‌های حاوی استایرن اکریلیک بوده است، که با افزایش نسبت پلیمر به سیمان تا نسبت ۱۵٪ میزان جذب کاهش یافته است و پس از آن با افزایش بیش از اندازه‌ی تخلخل، افزایش مقدار جذب حجمی آب مشاهده می‌شود.

### ۶.۵. بررسی میزان مقاومت در برابر تأثیر اسیدسولفوریک

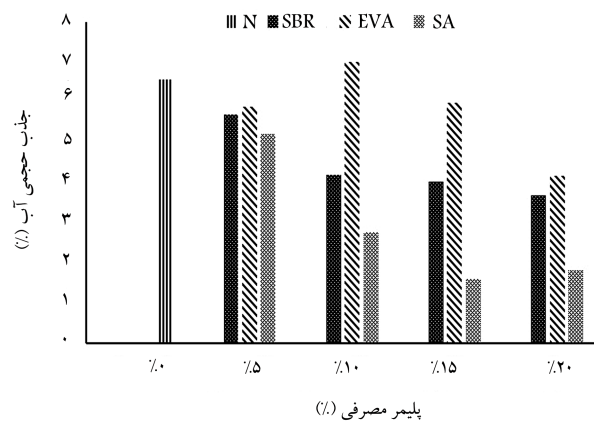
مخلوط‌های پایه‌ی سیمانی با درجه‌ی هیدراسیون بالا، هیدرات‌های کلسیم با انحلال‌پذیری کم دارند، که در محیط قلیایی مخلوط پایدار هستند. فضای حفره‌ی مخلوط‌های اشاره شده با شرایط معمول، متأثر از غلظت یون‌های  $K^+$  و  $Na^+$  و  $OH^-$ ، مقداری بین ۱۲/۵ تا ۱۳/۵ است.<sup>[۲۱]، [۲۰]</sup> در این حالت محصول‌های هیدراسیون سیمان با محلول فضای حفره‌ی در تعادل شیمیایی هستند و هرگونه تغییر که موجب از بین رفتن تعادل شیمیایی شود، منجر به ناپایداری ترکیب‌های مذکور خواهد شد. به صورت تئوری، به pH کمتر از ۱۲/۵ موجب عدم پایداری ترکیب‌های محصولات هیدراسیون می‌شود، به طوری که با کاهش غلظت یون  $Ca^{2+}$  در محلول فضای حفره‌ی، تعادل شیمیایی بین محلول و خمیر سخت شده به سمت تجزیه‌ی محصولات هیدراسیون متقابل می‌شود و در درجه‌ی اول، هیدروکسیدکلسیم و پس از آن، ژل C-S-H شروع به تجزیه می‌کند.<sup>[۲۲]</sup> از آنجا که سازه‌های مهم پایه‌ی سیمانی، که ماهیتی قلیایی و آسیب‌پذیر در برابر حمله‌ی شیمیایی مواد اسیدی دارند، از قبیل: لوله‌های فاضلاب، تأسیسات تصفیه‌ی آب و فاضلاب، واحدهای تولید اسیدسولفوریک در پتروشیمی‌ها و دیگر کاربردهای صنعتی با خوردگی ناشی از اسیدسولفوریک مواجه هستند، بررسی رفتار ناشی از واکنش اسیدسولفوریک با اجزاء بتن برای دست‌یابی به موادی با پایداری و دوام بیشتر اهمیت می‌یابد.

با قرار گرفتن مخلوط سخت شده‌ی پایه‌ی سیمانی در معرض محیط حاوی اسیدسولفوریک، فرایند حمله‌ی اسیدی آغاز می‌شود و به دنبال واکنش سولفات‌ها با محصولات هیدراسیون، سولفات کلسیم و تری سولفوآلومینات کلسیم هیدراته (اترینگایت) تشکیل می‌شوند. این واکنش‌ها با افزایش حجم همراه هستند و در اثر تنش داخلی ناشی از این افزایش حجم، در مخلوط سخت می‌شوند و ریزش‌ها و یا حتی ترک‌های بزرگی پدید می‌آید و به دنبال آن خرابی ناشی از حمله‌ی اسیدسولفوریک تشدید خواهد شد.<sup>[۲۴]، [۲۳]</sup> با توجه به آسیب‌پذیری محصولات هیدراسیون سیمان، نظیر پرتلندیت و C-S-H در برابر حمله‌ی اسیدسولفوریک، استفاده‌ی کمتر از مواد سیمانی، زمینه‌ی شدت خرابی را کاهش خواهد داد.<sup>[۲۴]، [۲۳]</sup>

در بخش حاضر، به بررسی تغییرات وزنی و افت مقاومت فشاری آزمونه‌های عمل‌آوری شده در شرایط استاندارد پس از قرار گرفتن در محلول حاوی ۵٪



شکل ۱۱. نفوذ مویینه‌ی نمونه‌ها.



شکل ۱۲. جذب حجمی نمونه‌های اصلاح شده در سن ۲۸ روزه.

که فیلم‌های پلیمری مانند پرده‌های آب‌بند موجب مسدود شدن محفظه‌های مویینه می‌شوند و اجازه‌ی نفوذ آب به داخل فضای بتن را نمی‌دهند و با افزایش میزان پلیمر مصرفی با پیوستگی غشاء‌های پلیمری، خاصیت ذکر شده تشدید می‌شود. در خصوص اختلاف بین نتایج مربوط به نفوذ یون کلراید و نفوذ مویینه قابل ذکر است که در مویستگی، نیروی کشش بین سطوح داخلی جداره‌ی فضای مویینه و مولکول‌های آب قوی‌تر از نیروی پیوستگی بین مولکول‌های آب هستند و بنابراین به علت بیشتر بودن نیروی چسبندگی از نیروی پیوستگی، مولکول‌های آب در فضاهای مویینه نفوذ می‌کنند و سطح آب در این فضاها بالاتر از سطح آب محیط است، از این رو فیلم‌های پلیمری می‌توانند با مسدود ساختن فضاهای مویینه به نیروی چسبندگی غلبه کنند.<sup>[۵]</sup> لیکن در آزمون نفوذ یون کلراید، جریان الکتریکی که یون‌های کلراید را به داخل مخلوط هدایت می‌کند، بسیار قوی‌تر است و همچنین وابسته به نوع مواد پلیمری مصرفی، یون‌های کلراید می‌توانند از غشا‌های نازک پلیمری عبور کنند.

### ۵.۵. بررسی میزان جذب حجمی

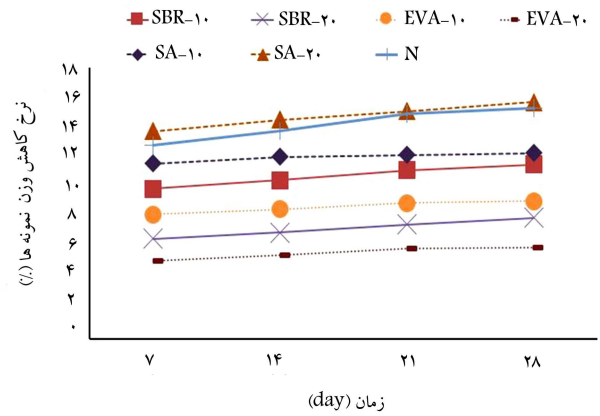
در شکل ۱۲، درصد جذب حجمی آب آزمونه‌ها در سن ۲۸ روزه مشاهده می‌شود، که مطابق آن در نمونه‌های حاوی استایرن اکریلیک، افزایش نسبت پلیمر به سیمان تا نسبت ۱۵٪، پیوسته موجب کاهش جذب نهایی و سپس افزایش جذب آب شده است، لیکن این افزایش نفوذ آب بیش از نمونه‌ی شاهد نبوده است. در نمونه‌های حاوی ۱۰ تا ۲۰ درصد اتیلن وینیل استات، میزان جذب حجمی آب به صورت پیوسته کاهش یافته است، در صورتی که نمونه‌ی حاوی ۱۰٪، میزان جذب بیشتری



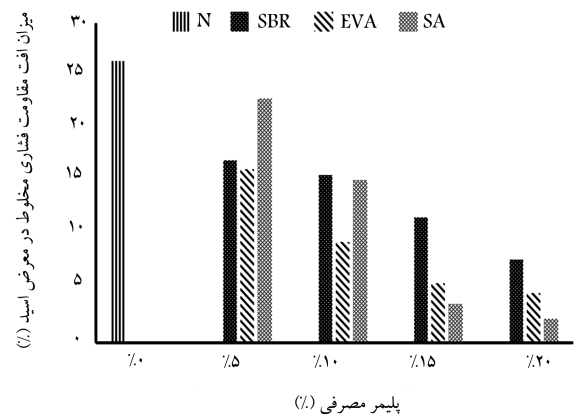
مقاومت های فشاری به دست آمده از نمونه های مذکور به مقاومت های فشاری ۲۸ روزه مشاهده می شود، که مطابق آن در نمونه های حاوی پلیمر استایرن اکریلیک و اتیلن وینیل استات، افزایش نسبت پلیمر به سیمان موجب کاهش افت مقاومت ناشی از حمله ی اسیدسولفوریک بوده است. در مخلوط های حاوی استایرن بوتادین رابر، بیشترین میزان افت مقاومت در نسبت پلیمر به سیمان ۱۰٪ مشاهده شده و پس از آن با افزایش نسبت پلیمر به سیمان، میزان افت مقاومت کاهش یافته است.

با توجه به نتایج دو آزمایش و همان طور که در آزمایش های نفوذپذیری نیز مشاهده شد، در مخلوط های حاوی اتیلن وینیل استات و استایرن بوتادین رابر با افزایش نسبت پلیمر به سیمان، نفوذپذیری کاهش یافته است و از طرفی افزایش فیلم های پلیمری موجب شده است که در سطح تماس با محلول اسیدی، محصولات هیدراسیون به میزان کمتر و محدودتری در معرض حمله ی سولفاتی قرار گیرند، از این رو تأثیر مخرب ناشی از حمله ی اسیدسولفوریک نیز کاهش یافته است.

در خصوص نمونه های حاوی استایرن اکریلیک مشاهده شده که با افزایش نسبت پلیمر به سیمان، افت وزن ناشی از اثر تخریبی اسیدسولفوریک افزایش یافته است؛ اما این افزایش میزان پلیمر، افت مقاومت فشاری نسبت به مقاومت فشاری ۲۸ روزه را کاهش داده است. همان طور که از مقایسه و بررسی نتایج آزمایش مقاومت فشاری و چقرمگی خمشی استنتاج می شود، به طور کلی افزایش نسبت پلیمر به سیمان موجب کاهش مقاومت فشاری بوده است، این موضوع از یک سو و در نظر گرفتن سهم فیلم های پلیمری در مقاومت، که میزان آن وابسته به نوع پلیمر مصرفی متغیر است؛ و از سوی دیگر، نشان دهنده ی کاهش میزان محصولات هیدراسیون علی رغم ثابت بودن میزان سیمان و آب مخلوط هستند، سبب کاهش زمینه ی تأثیر مخرب حمله ی سولفاتی با افزایش نسبت پلیمر به سیمان می شود. ملاحظه می شود که در خصوص مخلوط های حاوی استایرن اکریلیک، فیلم های پلیمری تشکیل شده، تأثیر قابل توجهی در بهبود مشخصات مقاومتی مخلوط پایه ی سیمانی داشته و افزایش نسبت پلیمر به سیمان موجب بهبود مشخصات مذکور شده است، با عنایت به نتایج به دست آمده از آزمایش های نفوذپذیری نیز مشاهده شد که ترموپلاستیک استایرن اکریلیک، تأثیر به سزایی در کاهش نفوذپذیری و مسدودکنندگی حفره ها داشته است، لیکن همان طور که در جدول ۲ ارائه شده است، pH لاتکس استایرن اکریلیک بین ۵ و ۶ است، که در محدوده ی اسیدی قرار دارد و این ویژگی موجب کاهش درجه ی قلیایی در محلول منفذی است و سرعت امکان بر هم خوردن تعادل قلیایی بین محلول حفره ها و محصولات هیدراسیون که منجر به تجزیه ی محصولات هیدراسیون خواهد شد، را افزایش می دهد. از این رو کاهش وزن ناشی از حمله ی مخرب اسیدسولفوریک با افزایش نسبت پلیمر به سیمان افزایش یافته است. لیکن مشاهده شد که به سبب مسدودشدگی منافذ توسط فیلم های پلیمری و کاهش نفوذپذیری، از انتشار حمله ی سولفاتی به عمق نمونه ها به میزان قابل توجهی ممانعت شده است. بنابراین، تجزیه ی ساختار نمونه ها در سطوح صورت گرفته است و ترکیب های افزایش حجم یافته ناشی از حمله ی سولفاتی، که جایگزین محصولات هیدراسیون شده اند، در سطوح قرار گرفته و علی رغم مقادیر زیادشان منجر به ایجاد تنش داخلی در عمق منافذ و ایجاد ترک های ساختاری که مسبب کاهش مقاومت مخلوط هستند، نشده اند؛ لذا اثر توأم ویژگی مذکور و تأمین بخش قابل توجهی از مشخصات مقاومتی توسط فیلم های پلیمری موجب می شود که با افزایش نسبت پلیمر به سیمان در مخلوط های حاوی استایرن اکریلیک برخلاف افزایش افت وزن ناشی از اثر مخرب اسیدسولفوریک، کاهش افت مقاومت نمونه ها تا نسبت ۲۰٪ مشاهده شود.



شکل ۱۳. نرخ کاهش وزن نمونه ها در اثر خوردگی اسیدسولفوریک.



شکل ۱۴. میزان افت مقاومت فشاری مخلوط هایی که در معرض اسید قرار داشته اند.

وزنی اسیدسولفوریک پرداخته شده است. مطابق شکل ۱۳، در نسبت های پلیمر به سیمان یکسان، کمترین درصد کاهش وزن ناشی از خوردگی در مخلوط های حاوی پلیمر اتیلن وینیل استات مشاهده می شود و در مخلوط های اخیر با افزایش نسبت پلیمر به سیمان، کاهش میزان تخریب ناشی از حمله ی سولفوریک اسید مشاهده می شود. پس از مخلوط های حاوی اتیلن وینیل استات، مخلوط های حاوی استایرن بوتادین رابر با نسبت پلیمر به سیمان یکسان از لحاظ کمترین درصد کاهش وزن، در مرتبه ی دوم قرار گرفته اند و مشابه مخلوط های اتیلن وینیل استات، افزایش نسبت پلیمر به سیمان در مخلوط های حاوی استایرن بوتادین رابر نیز کاهش خرابی را در پی داشته است. در مخلوط های حاوی استایرن اکریلیک رفتاری متفاوت از مخلوط های اخیر مشاهده می شود، به این صورت که افزودن پلیمر استایرن اکریلیک به مخلوط، در درصدهای پایین تا حدی کاهش اثر تخریبی نسبت به مخلوط شاهد را موجب شده است، البته این بهبود کمتر از بهبود ایجاد شده در مخلوط های حاوی اتیلن وینیل استات و استایرن بوتادین رابر با نسبت های پلیمر به سیمان متناظر بوده است. اما با افزایش نسبت پلیمر به سیمان، درصد کاهش وزن ناشی از خوردگی افزایش یافته است، به طوری که در نسبت پلیمر به سیمان ۲۰٪، میزان درصد کاهش وزن بیشتر از نمونه ی شاهد شده است.

برای سنجش اثر خوردگی ناشی از حمله ی اسیدی در مقاومت فشاری، نمونه های مکعبی ۵۰ × ۵۰ میلی متر پس از گذشت ۲۸ روز قرار گرفتن در محلول حاوی ۵٪ اسیدسولفوریک، تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند. در شکل ۱۴، نسبت

## ۶. نتیجه‌گیری

به طور کلی با توجه به این‌که تأثیر مواد پلیمری در مخلوط‌های سیمانی وابسته به نوع و درصد ماده‌ی پلیمری مصرفی است، مشاهده شد که با افزایش نسبت پلیمر به سیمان در هر ۳ نوع پلیمر مورد مطالعه، به سبب جذب آب محیط توسط ذرات پلیمری و افزایش تخلخل ساختاری در سنن اولیه، مقاومت فشاری کاهش یافته است. در نسبت‌های پلیمر به سیمان یکسان، مخلوط‌های حاوی اتیلن وینیل استات مقادیر مقاومت بیشتری داشته است.

با توجه به نتایج بررسی چقرمگی خمشی مشخص شد که به طور کلی افزایش میزان پلیمر به سیمان موجب بهبود خاصیت جذب انرژی و افزایش خیز، که یکی از خصوصیات مهم در اعضاء تحت خمش نظیر تیرها در نظر گرفته می‌شود، است.

در خصوص نفوذ یون کلراید تا قبل از گذشت دوره‌ی عمل‌آوری خشک، بهبود قابل توجهی مشاهده نشد و پس از آن کلیه‌ی مخلوط‌های حاوی مواد پلیمری عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌ی شاهد داشتند. نسبت‌های ۱۰ و ۱۵ درصد استاتین اکریلیک، کاهش قابل توجهی در نفوذ یون کلراید ایجاد کردند.

استفاده از مواد پلیمری در مخلوط‌های پایه‌ی سیمانی به طور کلی با کاهش نفوذپذیری بهبود مشخصات دوام را در پی داشته است، که عملکرد اخیر در نتایج آزمایش‌های جذب مویینه به خوبی مشاهده شد. مطابق نتایج به دست آمده‌ی اتیلن

## Archive of SID

وینیل استات و استاتین بوتادین را بر مقاومت در برابر خوردگی اسید را به میزان قابل توجهی بالا می‌برند.

با عنایت به نتایج آزمون‌ها از بین ۳ ماده‌ی پلیمری، در صورت اطمینان از عدم اسیدی بودن محیط می‌توان برای کاربردهایی که بیشتر مشخصات جذب انرژی و انعطاف‌پذیری مورد نظر است، پلیمر استاتین اکریلیک با درصدهای بالا (۱۵ و ۲۰ درصد) را به عنوان بهترین ترکیب اصلاحی استفاده کرد. ترکیب مذکور همچنین در خصوص مشخصات دوام و کاهش جذب و نفوذپذیری نیز در نسبت (۱۵٪) بهترین انتخاب خواهد بود و در صورت وجود احتمال اسیدی بودن محیط و یا نیاز به مقادیر مقاومتی بیشتر، ترکیب‌های اتیلن وینیل استات با نسبت بالا (۲۰٪) انتخاب مناسبی هستند، به طوری که مقاومت بیشتر فیلم‌های تشکیل شده جذب انرژی کمتر نسبت به استاتین اکریلیک را به میزان قابل توجهی جبران کرده است. این مواد بهترین عملکرد در محیط اسیدی را نشان داده و از نظر جذب نیز عملکرد قابل قبولی داشته‌اند.

انتخاب درصد بالای پلیمرهای مصرفی برای کاربردهای مذکور می‌تواند مشکل افت مقاومت را به همراه داشته باشد، لیکن با توجه به نتایج حاصل می‌توان دریافت که افت مقاومت آزمون‌ها در اثر افزودن درصد بالایی از پلیمرهای مصرفی، کاهش مقاومت را آنقدر زیاد نکرده است که از محدودی‌ی متداول جهت کاربردهای سازه‌ی خارج شود.

## منابع (References)

- Morin, V., Moevus, M., Dubois-Brugger, I. and et al. "Effect of polymer modification of the paste-aggregate interface on the mechanical properties of concretes", *Cem. Concr Res.*, **41**(5), pp. 459-466 (2011).
- Moodi, F., Kashi, A., Ramezaniapour, A.A. and et al. "Investigation on mechanical and durability properties of polymer and latex-modified concretes", *Constr. Build. Mater.*, **191**, pp.145-154 (2018).
- Ukrainczyk, N. and Rogina, A. "Styrene-butadiene latex modified calcium aluminate cement mortar", *Cem. Concr Compos.*, **41**, pp.16-23 (2013).
- Figovsky, O. and Beilin, D. "Advanced polymer concretes and compounds", *CRC Press, Taylor & Francis Gr* (2013).
- Ohama Y. "Handbook of polymer-modified concrete and mortars: properties and process technology", *William Andrew*, 246 p.1-210 (1995).
- Su, Z., Larbi, J.A. and Bijen, J. "The interface between polymer-modified cement paste and aggregates", *Cem. Concr. Res.*, **21**(6), pp. 983-990 (1991).
- Feiteira, J. and Ribeiro, M.S. "Polymer action on alkali-silica reaction in cement mortar", *Cem. Concr. Res.*, **44**, pp. 97-105 (2013).
- Bhogayata, A.C. and Arora, N.K. "Workability, strength, and durability of concrete containing recycled

plastic fibers and styrene-butadiene rubber latex", *Constr. Build. Mater.*, **180**, 382-395 (2018).

- Aggarwal, L.K., Thapliyal, P.C. and Karade, S.R. "Properties of polymer-modified mortars using epoxy and acrylic emulsions", *Constr. Build. Mater.*, **21**(2), pp. 379-383 (2007).
- Doğan, M. and Bideci, A. "Effect of styrene butadiene copolymer (SBR) admixture on high strength concrete", *Constr. Build. Mater.*, **112**, pp. 378-385 (2016).
- Huang, B., Wu, H., Shu, X. and et al. "Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete", *Constr. Build. Mater.*, **24**(5), pp. 818-823 (2010).
- Diamanti, M.V., Brenna, A., Bolzoni, F. and et al. "Effect of polymer modified cementitious coatings on water and chloride permeability in concrete", *Constr. Build. Mater.*, **49**, pp. 720-728 (2013).
- C109/C109M A., "Standard test method for compressive strength of 564 hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens)", *ASTM International West Conshohocken, Pa.* (1999).
- BS EN 196-1, "Methods of testing cement", *Determination of strength*, European Committee for standardization, p.1-26 (2016).
- NT Build 492, "Concrete mortar and cement-based repair materials chloride migration coefficient from Non-steady-state migration experiments", *NT Build.*, **492**, pp.1-10 (1999).

16. Astm C. 1585-04., "Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concretes", *ASTM Int* (2004).
17. ASTM C.642, "Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete", *Annu. B. ASTM. Stand.*, **4** , pp.1-4(2006).
18. Knapen, E. and Van Gemert, D. "Polymer film formation in cement mortars modified with water-soluble polymers", *Cem. Concr. Compos.*, **58**, pp. 23-28 (2015).
19. Odler, I. "Special inorganic cements", *CRC Press*, 416, pp.160-190 (2003).
20. Mehta, P.K. and Monteiro, P.J.M. "Concrete microstructure, properties and materials", McGraw-Hill Education, pp.522-525 (2017).
21. Hewlett, P. and Martin Liska, eds. "Lea's chemistry of cement and concrete", *Butterworth-Heinemann*, pp.713-775 (2019).
22. Alexander, M., Bertron, A. and De Belie, N. "Performance of cement-based materials in aggressive aqueous environments", *Springer, Berlin, Germany*, **56** (2013).
23. Rahmani, H. and Ramazanianpour, A.A. "Effect of binary cement replacement materials on sulfuric acid resistance of dense concretes", *Magazine of Concrete Research*, **60**(2), pp. 145-155 (2008).
24. Allahvetdi, F.Sk. "Acidic corrosion of hydrated of cement based materials", *kinetics of phenomenon and mathematical models, Ceramic silikaty*, **44**(4), pp. 152-160 (2000).