

# تأثیر یون‌های کلراید در میزان تهاجم یون‌های سولفات در بتن‌های متراکم حاوی نانوذرات رس

یاسر ایمانی اسبق (دانشجوی کارشناسی ارشد)

حمید رحمانی\* (استادیار)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه زنجان

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۶ (۲۱-۱۳)  
دوری ۲-۳۳، شماره ۱/۲، ص. ۱۳-۲۱

تهاجم سولفات‌ها به بتن یکی از عوامل مؤثر در کاهش عمر مفید سازه‌های بتنی است. در پژوهش حاضر، نسبت آب به سیمان و میزان سیمان مصرفی به ترتیب برابر ۴۲٪ و ۳۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب بوده و نانورس مونت موریلونیت به میزان ۲/۵، ۳/۰، و ۴/۰ درصد وزنی جایگزین سیمان مصرفی شده است. پس از ساخت نمونه‌های مکعبی و ۲۸ روز عمل‌آوری مرطوب، نمونه‌ها در محلول‌های سولفات سدیم و محلول ترکیبی سولفات سدیم و کلراید قرار گرفته و تغییرات وزن و مقاومت فشاری آنها در طول مدت قرارگیری در محلول‌ها بررسی شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که استفاده از نانوذرات رس، علی‌رغم کاهش قابل توجه مقاومت فشاری بتن، باعث افزایش دوام بتن در برابر تهاجم عوامل مخرب می‌شود. یون‌های کلراید باعث کاهش میزان تهاجم یون‌های سولفات در بتن‌های متراکم می‌شوند. همچنین در بین طرح اختلاط‌های حاوی نانوذرات رس، دوام طرح اختلاط حاوی ۳/۰٪ نانورس در محلول‌ها بیشتر از سایر طرح اختلاط‌هاست.

yasser\_imani1988@yahoo.com  
hrahmani@znu.ac.ir

واژگان کلیدی: بتن متراکم، نانوذرات رس، تهاجم سولفات‌ها، تهاجم کلراید.

## ۱. مقدمه

مقاومت فشاری بتن به دلیل ارتباط مستقیم آن با ساختار خمیر هیدراته‌شده سیمان، یک تصویر کلی از کیفیت بتن را به دست می‌دهد. علاوه بر این، مقاومت فشاری بتن تقریباً همیشه یک عامل ضروری در طراحی سازه است و به منظور ارزیابی دیگر مشخصات بتن در نظر گرفته می‌شود.<sup>[۱]</sup> براساس مشاهدات و مطالعات صورت گرفته، دوام بتن‌های با مقاومت فشاری یکسان، همواره یکسان نیست؛ و به عبارت دیگر، مقاومت فشاری نمی‌تواند معیار مناسبی برای دوام بتن باشد،<sup>[۲]</sup> که در پژوهش حاضر نیز نانورس مونت موریلونیت همین مسئله را اثبات کرده است.

انتخاب مناسب نوع سنگ‌دانه و دانه‌بندی آن باعث افزایش مقاومت فشاری و کاهش نفوذپذیری می‌شود. جهت دست‌یابی به بتنی با تراکم بالا و نفوذپذیری پایین، در سال ۱۹۰۷<sup>[۳]</sup> دانه‌بندی مصالح بتن به گونه‌ی اصلاح شده است که ضمن حفظ کارایی ملات و یا بتن، دوام آن در برابر عوامل شیمیایی مهاجم افزایش یافته است. همچنین در مطالعه‌ی دیگری در سال ۱۹۹۷،<sup>[۴]</sup> نشان داده شده است که برای دست‌یابی به بتنی متراکم باید چگالی خشک بتن به مقدار بیشینه برسد. در سال ۱۹۸۸ نیز به پهنه‌یابی طرح اختلاط بتن پرداخته شده و این نتیجه به دست آمده است که با استفاده از منحنی دانه‌بندی مطلوب سنگ‌دانه می‌توان از میزان

\* نویسنده مسئول

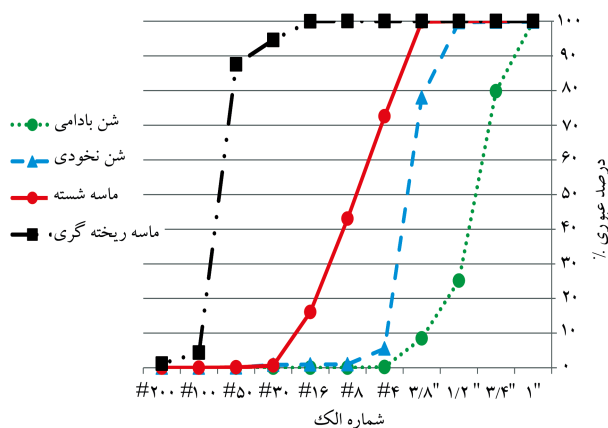
تاریخ: دریافت ۱۹/۸/۱۳۹۳، اصلاحیه ۲۹/۷/۱۳۹۴، پذیرش ۲۷/۸/۱۳۹۴.

خمیر یا سیمان مصرفی کاست.<sup>[۵]</sup> همچنین در فاز خمیر سیمان نیز باید نفوذپذیری کاهش پیدا کند و توزیع حفره‌ها به نحوی اصلاح شود که دوام بتن یا خمیر در برابر عوامل مهاجم افزایش یابد. در این خصوص در پژوهشی در سال ۲۰۰۷ نشان داده شده است که با به‌کارگیری ذرات ریزدانه، می‌توان مقدار سیمان مصرفی طرح اختلاط را کاهش داد و با کاهش نفوذپذیری، دوام بتن در برابر عوامل مهاجم مانند تهاجم سولفات‌ها افزایش می‌یابد.<sup>[۶]</sup>

بتن‌های ساخته‌شده از سیمان پرتلند، هنگامی که در معرض محیط مخرب حاوی یون‌های سولفات قرار می‌گیرند، مدت زمان زیادی پایدار نیستند. پژوهشگران دلیل اصلی این خرابی‌ها را انبساط سیمان هیدراته‌شده می‌دانند. برای اولین بار در سال ۱۹۰۸ مطالعاتی در خصوص مقاومت بتن در برابر حمله سولفات‌ها انجام شده،<sup>[۷]</sup> و بعد از آن مطالعات بسیار زیادی بر روی تهاجم سولفات‌ها به بتن انجام شده است، که نتایج برخی از آن‌ها بدین شرح است:

۱. خرابی ناشی از سولفات منیزیم به مراتب بیشتر از سولفات سدیم است و با محدودکردن  $C_2S$ ،  $C_3A$  و نسبت آب به سیمان، مقاومت بتن در برابر حملات سولفاتی بهبود می‌یابد.<sup>[۸]</sup>

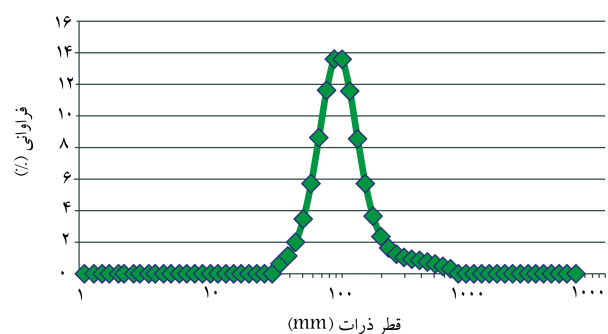
۲. زمانی که بتن در معرض حمله‌ی سولفاتی قرار می‌گیرد، مقاومت کششی بتن در مقایسه با مقاومت فشاری آن به علت ایجاد ریزترک‌ها سریع‌تر از بین می‌رود،



شکل ۱. منحنی دانه بندی سنگ دانه های مورد استفاده.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی مصالح سنگی مورد استفاده.

نام سنگ دانه	شن بادمی	شن نخودی	ماسه ی شسته	ماسه ی ریخته گری
وزن مخصوص ( $kg/m^3$ )	۲۶۷۰	۲۶۷۰	۲۶۲۰	۲۵۴۰
درصد رطوبت موجود	۰٫۱۲	۰٫۲۹	۲٫۵۹	—
درصد جذب آب	۰٫۸۶	۱٫۲۶	۰٫۷۳	۴



شکل ۲. توزیع ذرات نانورس مصرفی.

و سپس سدیم سولفات به داخل آن ریخته و به خوبی در آن حل شده است، اما نمک طعام به آسانی در آب حل شده است. پس از تولید محلول ها، برای جلوگیری از تبخیر، روی محلول ها نیز با پلاستیک پوشانده شده است. نسبت حجم محلول به حجم نمونه ها در مدت زمان آزمایش ثابت و برابر با ۵ در نظر گرفته شده و نمونه ها به مدت ۶ ماه در محلول کلراید و محلول ترکیبی قرار داشته اند. نمک طعام از شرکت نیک دردانه ی هوگان واقع در کیلومتر ۱۵ شیراز - سپیدان با درصد خلوص ۹۹٫۲ و به رنگ سفید تهیه شده است. سدیم سولفات مصرفی نیز به رنگ سفید، صنعتی و خشک و با خلوص ۹۹٪ از کارخانه ی باستان شیمی واقع در شهر تبریز تهیه شده است.

نانورس مورد استفاده در پژوهش حاضر از کانی مونت موریلونیت با خلوص کمینه ی ۹۵٪ و از شرکت گیلان زاک واقع در شهر تهران تهیه شده است. شکل ظاهری آن به صورت پودری و به رنگ سفید شیری است. همچنین چگالی ظاهری و سطح مخصوص آن به ترتیب ۰٫۴۵ گرم بر سانتی متر مکعب و ۷۶۰ مترمربع بر گرم بوده است. در شکل ۲، نمودار توزیع قطر ذرات نانورس مصرفی در پژوهش حاضر، که با استفاده از آزمایش آنالیز اندازه ی ذرات اندازه گیری شده، نشان داده شده است. با توجه به شکل ۲ می توان گفت که فراوانی قطر ذرات نانورس مصرفی در

که این پدیده ناشی از حساسیت بالای مقاومت کششی در مقایسه با مقاومت فشاری نسبت به ترک خوردگی است و نیز استفاده از نسبت آب به سیمان پایین، اثرات خیلی بیشتری نسبت به استفاده از سیمان ضد سولفات در برابر حمله ی سولفاتی روی بتن دارد.<sup>[۹]</sup>

با این حال پژوهش های بسیار اندکی در مورد تأثیر یون های کلراید در میزان تهاجم سولفات ها بر بتن انجام شده است، که در ادامه به برخی از آنها اشاره شده است. در سال ۱۹۹۵، نقش یون های کلراید روی کاهش مقاومت نمونه های ملاتی ساخته شده با سیمان معمولی و سیمان های حاوی خاکستر بادی، دوده ی سیلیسی و سرباره ی کوره ی آهن گدازی بررسی و نتایج آزمایشگاهی نشان داده است که در حضور یون های کلراید، آسیب ناشی از یون های سولفات در بتن کاهش می یابد. همچنین خاکستر بادی در مقایسه با سایر مواد افزودنی و همچنین نسبت به سیمان های معمولی، در به تأخیر انداختن حمله ی سولفاتی مؤثرتر است.<sup>[۱۰]</sup> در سال ۲۰۰۷، نیز اندرکنش تهاجم یون کلراید و سولفات در بتن های با خاکستر بادی و بدون خاکستر بادی بررسی شده<sup>[۱۱]</sup> و نتایج آزمایشگاهی نشان داده است که میزان آسیب نمونه های بتنی توسط یون های سولفات در حضور یون های کلراید کاهش می یابد. البته پژوهش های محدودی نیز در مورد تأثیر سولفات در میزان تهاجم کلراید صورت گرفته است.<sup>[۱۲]</sup> با توجه به اینکه سطح ذرات کانی رس مونت موریلونیت، بارهای الکتریکی منفی دارد،<sup>[۱۳]</sup> این امر می تواند در دفع یون های سولفات و کلراید به علت هم نام بودن بارهای الکتریکی مؤثر باشد. همچنین سطح مخصوص ماده ی مذکور در صورت استفاده از نانوذرات نیز افزایش چشمگیری می یابد و در نتیجه عملکرد مؤثرتری مشاهده خواهد شد. علاوه بر موارد مذکور، دسترسی آسان و هزینه ی تولید اندک آن از دیگر عواملی است که باعث شده است در پژوهش حاضر از ماده ی ذکر شده استفاده شود. گفتنی است مطالعات بسیار محدودی در مورد تأثیر نانوذرات رس، حتی در مورد خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بتن انجام شده است.

## ۲. مصالح مصرفی

در این پژوهش از سیمان پرتلند تیپ یک (۴۲۵-۱) کارخانه ی سیمان یاسوج و از نوع سنگ دانه ی موجود در کارخانه ی یاسوران واقع در شهر یاسوج برای ساخت بتن استفاده شده است. سنگ دانه ها شامل ۲ نوع شن (بادامی و نخودی) و ۱ نوع ماسه (ماسه ی شسته) بوده است. بیشینه ی قطر سنگ دانه ها ۲۵ میلی متر بوده و منحنی دانه بندی سنگ دانه ها در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به منحنی دانه بندی ماسه ی شسته می توان گفت که ماسه ی شسته، فاقد دانه های ریزتر از ۶۰۰ میکرون (الک نمره ی ۳) بوده و همین موضوع باعث شده است که جهت بهبود دانه بندی ماسه و ساخت بتن متراکم از ماسه ی ریخته گری که حاوی ۹۵٪ دانه های ریزتر از ۶۰۰ میکرون است، استفاده شود. همچنین مشخصات فیزیکی مصالح سنگی از جمله: وزن مخصوص، درصد رطوبت موجود، و درصد جذب آب طبق استانداردهای ASTM C۱۲۸ و ASTM C۵۶۶ تعیین و در جدول ۱ ارائه شده است.

بر اساس پژوهشی در سال ۱۹۹۱، برای مشابه سازی محیط سولفاتی از آب و ۴٫۵٪ سولفات سدیم، معادل ۳٪ سولفات استفاده شده است. همچنین برای مشابه سازی تهاجم همزمان سولفات سدیم و کلراید، از آب و ۴٫۵٪ سدیم سولفات و ۵٪ نمک طعام (معادل ۳٪ کلر) استفاده شده است.<sup>[۱۴]</sup> برای محلول کردن سولفات در آب، ابتدا بخشی از آب در داخل آون در دمای ۶۰ درجه ی سانتی گراد گرم شده

فوق روان‌کننده‌ی مصرفی نسبت به طرح اختلاط شاهد کاهش یافته است. این امر را احتمالاً می‌توان به جذب شدن ذرات نانورس توسط سیمان و یا سنگ‌دانه‌ها نسبت داد، که پس از جذب نانوذرات رس که بار منفی دارند،<sup>[۱۳]</sup> ذرات سیمان همدیگر را دفع می‌کنند و در نتیجه کارایی افزایش می‌یابد. یعنی نانوذرات رس، عملکردی شبیه به روان‌کننده‌ها خواهد داشت.

### ۳.۳. نحوه‌ی ساخت نمونه‌ها

نحوه‌ی ساخت نمونه‌های کنترل با نمونه‌های حاوی نانوذرات رس به دلیل اهمیت بالایی بخش یکنواخت نانوذرات در بتن متفاوت بوده است. در ساخت طرح اختلاط شاهد پس از ریختن کلیه‌ی مصالح و فوق روان‌کننده به بتن تازه، عمل اختلاط به مدت ۳ دقیقه ادامه یافته است. اما در طرح اختلاط‌های حاوی نانوذرات رس، ابتدا نانوذرات رس با ۲٪ وزنی فوق روان‌کننده و مقدار کمی از آب طرح اختلاط به مدت ۲ دقیقه با دورکند ۱ دقیقه با دور تند مخلوط شده است. سپس بخش عمده‌ی از آب طرح اختلاط به مخلوطکن اضافه شده و به خوبی با نانوذرات رس به مدت ۲ دقیقه با دورکند مخلوط شده است، بعد از اضافه‌کردن کل سیمان به مخلوطکن، مجدداً عمل اختلاط به مدت ۲ دقیقه با دورکند برای پخش یکنواخت نانوذرات رس در خمیر سیمان صورت گرفته است. سپس مخلوط حاصل در ظرفی نگهداری و پس از ریختن سنگ‌دانه‌ها در مخلوطکن، بلافاصله مخلوط نانورس با خمیر سیمان به مخلوطکن اضافه شده است. سپس با آب باقی‌مانده از طرح اختلاط، ظرف حاوی نانوذرات رس و خمیر سیمان به خوبی شسته و به داخل سنگ‌دانه اضافه شده است. بعد از مخلوط کردن سنگ‌دانه‌ها و خمیر، فوق روان‌کننده به مخلوط اضافه شده و عمل اختلاط تا همگن شدن مخلوط ادامه یافته است. در نهایت، پس از ساخت مخلوط‌ها، نمونه‌های مربوط مطابق استاندارد ISIRI ۵۸۱ قالب‌گیری و پس از ۲۴ ساعت عمل‌آوری مرطوب، نمونه‌ها در آب قرار داده شده و در سنین موردنظر مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

### ۴.۳. آزمایش‌های در نظر گرفته شده

در پژوهش حاضر برای بررسی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بتن متراکم با و بدون نانوذرات رس آزمایش‌های مقاومت فشاری، میزان جذب آب، و تعیین درجه‌ی هیدراتاسیون انجام شده است. همچنین برای بررسی دوام بتن در برابر تهاجم سولفات سدیم، آزمایش تعیین کاهش وزن و مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی انجام شده است، که در ادامه، به خلاصه‌ی آزمایش‌های موردنظر اشاره شده است.

### ۱.۴.۳. تعیین مقاومت فشاری

پس از ساخت و عمل‌آوری نمونه‌های مکعبی  $10 \times 10 \times 10$  سانتی‌متر، آزمایش مقاومت فشاری جهت بررسی تأثیر نانوذرات رس در مقاومت بتن در سنین ۷، ۲۸، ۹۰، و ۱۸۰ روزه طبق استاندارد BS ۱۸۸۱ انجام شده است.<sup>[۱۷]</sup>

جدول ۲. جزئیات طرح اختلاط بتن‌های موردنظر.

شماره‌ی طرح اختلاط	میزان سیمان ( $kg/m^3$ )	میزان سنگ‌دانه‌ها ( $kg/m^3$ )	درصد نانوذرات رس ( $kg/m^3$ )	فوق روان‌کننده (درصد)	اسلامپ (cm)
$T_1$	۳۲۵	۲۰۲۱	۰	۰٫۸	۹
$T_2$	۳۲۴٫۳۵	۲۰۲۱	۰٫۲ (۰٫۶۵)	۰٫۳	۹
$T_3$	۳۲۴٫۰۲۵	۲۰۲۱	۰٫۳ (۰٫۹۷۵)	۰٫۳	۹
$T_4$	۳۲۳٫۷	۲۰۲۱	۰٫۴ (۱٫۳)	۰٫۳	۹٫۵

۱۰۰ نانومتر بیشترین مقدار را داشته و میانگین قطر ذرات  $90/2$  نانومتر بوده است. برای پخش یکنواخت ذرات نانورس در داخل خمیر و همچنین به منظور دست‌یابی به اسلامپ موردنظر از فوق روان‌کننده‌ی Pema بر پایه‌ی پلی‌کربسیلات استفاده شده است. این محصول به صورت مایع با وزن مخصوص حدود  $1/15$  گرم بر سانتی‌مترمکعب و به رنگ قهوه‌ی روشن بوده است. درصد ذرات جامد معلق در آن حدود ۳۲ تا ۳۴ درصد و درجه‌ی اسیدی (pH) آن نیز بین ۶ تا ۸ بوده است.

## ۳. مطالعات آزمایشگاهی

### ۱.۳. منحنی دانه‌بندی بهینه‌ی سنگ‌دانه‌ها

جهت یافتن درصد‌های اختلاط بهینه‌ی ۴ نوع سنگ‌دانه‌ی موجود به نحوی عمل شده است که منحنی دانه‌بندی حاصل از ترکیب آنها، تا جای ممکن به منحنی دانه‌بندی ایده‌آل نزدیک باشد. در پژوهش حاضر با توجه به مطالعات صورت‌گرفته، منحنی دانه‌بندی ایده‌آل فولر اصلاح شده مطابق رابطه‌ی ۱ استفاده شده است:<sup>[۱۵]</sup>

$$Y_{ti} = 100 \times \left( \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \right)^n \quad (1)$$

که در آن،  $Y_{ti}$  درصد عبوری ایده‌آل از الک  $i$ ام و  $X_i$ ،  $X_{\min}$  و  $X_{\max}$  به ترتیب سایز الک  $i$ ام، کوچک‌ترین و بزرگ‌ترین بعد سنگ‌دانه است. بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین بعد سنگ‌دانه‌ها مطابق شکل ۱ به ترتیب برابر با  $25/4$  و  $75/0$  میلی‌متر در نظر گرفته شده است. مقدار  $n$  (ضریب توزیع منحنی فولر) بنا بر مطالعات صورت‌گرفته در سال‌های قبل توسط پژوهشگران مختلف،<sup>[۱۶]</sup> برابر  $0/5$  در نظر گرفته شده است. برای یافتن بهترین ترکیب سنگ‌دانه‌ها درصد‌های مختلفی به عنوان درصد اختلاط سنگ‌دانه‌ها در نظر گرفته شده و نزدیک‌ترین منحنی حاصل‌شده به منحنی ایده‌آل انتخاب شده است. فرایند بهینه‌یابی درصد‌های طرح اختلاط نیز در پژوهشی در سال ۲۰۰۸<sup>[۱۵]</sup> ذکر شده است. در پایان پس از بهینه‌یابی درصد‌های اختلاط شن بادامی، شن نخودی، ماسه‌ی شسته، و ماسه‌ی ریخته‌گری به ترتیب برابر با  $4/2$ ،  $5/0$ ،  $4/0$ ، و  $1/3$  به عنوان بهترین ترکیب شناخته شده است.

### ۲.۳. طرح اختلاط‌ها

در پژوهش حاضر، ۴ طرح اختلاط حاوی صفر درصد نانورس به عنوان طرح اختلاط شاهد و  $0/2$ ،  $0/3$ ،  $0/4$  نانوذرات رس در نظر گرفته شده است. در تمام طرح اختلاط‌ها، میزان سیمان مصرفی و نسبت آب به سیمان ثابت و به ترتیب برابر  $325$  کیلوگرم بر مترمکعب و  $0/42$  انتخاب شده است. اسلامپ بتن‌ها نیز با استفاده از فوق روان‌کننده‌ی مصرفی، بین ۹ تا ۱۰ سانتی‌متر ثابت نگه داشته شده است. جزئیات ۴ طرح اختلاط مذکور در جدول ۲ ارائه شده است. لازم به توضیح است که استفاده از نانوذرات رس باعث افزایش کارایی شده است، که در نتیجه‌ی آن، مقدار

### ۲.۴.۳. تعیین درصد جذب آب

این آزمایش در ۲ سن ۲۸ و ۹۰ روزه بر روی نمونه‌های مکعبی  $10 \times 10 \times 10$  سانتی‌متر انجام شده است. در آزمایش ذکر شده، نمونه‌ها پس از عمل‌آوری از آب بیرون آورده شده و در دمای  $5 \pm 55^\circ\text{C}$  تا رسیدن به وزن ثابت خشک شده‌اند. سپس نمونه‌ها به مدت ۲۴ و ۵٪ ساعت در آب قرار گرفته و پس از رسیدن به حالت سطح خشک، وزن نمونه‌ها مجدداً اندازه‌گیری و ثبت شده است. در نهایت، درصد جذب آب از رابطه‌ی ۲ محاسبه شده است:

$$W.A = 100 \times \frac{(W_2 - W_1)}{W_1} \quad (2)$$

که در آن،  $W_1$  وزن کاملاً خشک نمونه،  $W_2$  وزن نمونه پس از قرارگیری نمونه در آب و  $W.A$  درصد جذب آب است.

### ۳.۴.۳. تعیین درجه‌ی هیدراتاسیون

چنانچه در بخش نتایج ارائه شده است، مقاومت فشاری بتن به علت استفاده از نانوذرات رس به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. لذا درجه‌ی هیدراتاسیون خمیرهای سیمان حاوی نانوذرات رس در سنین ۷ و ۲۸ روزه برای یافتن دلیل کاهش مقاومت فشاری تعیین شده است. جهت ساخت خمیر مطابق طرح اختلاط‌های بتن از نسبت آب به سیمان ۰٫۴۲ و درصد‌های وزنی ۰٫۲، ۰٫۳، ۰٫۴ و ۰٫۴ نانوذرات رس جایگزین سیمان استفاده شده است. جهت جلوگیری از تبخیر و خارج شدن آب مخلوط، نمونه‌ها بلافاصله بعد از قالب‌گیری در ظرف سر بسته قرار گرفته و سپس نمونه‌ها در سن مشخص خرد شده و از هر طرح اختلاط، ۲ نمونه به ابعاد ۵ تا ۱۰ میلی‌متر برای آزمایش انتخاب شده‌اند. جهت توقف واکنش هیدراتاسیون در سن موردنظر، نمونه‌ها در استون قرار گرفته‌اند. جهت تعیین درجه‌ی هیدراتاسیون، نمونه‌ها در دمای ۱۴۵ درجه‌ی سانتی‌گراد در کوره حرارت داده شده‌اند، تا آب آزاد موجود در آن‌ها خارج شود و سپس وزن نمونه‌ها اندازه‌گیری شده و مجدداً تا دمای ۹۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد در کوره به مدت ۱ ساعت قرار گرفته‌اند، تا آب ترکیب شیمیایی از آن‌ها خارج شود و دوباره وزن‌شان اندازه‌گیری شده است. پس از اندازه‌گیری وزن نمونه‌ها، در نهایت درجه‌ی هیدراتاسیون آن‌ها از رابطه‌ی ۳ محاسبه شده است: [۱۸]

$$\alpha = 100 \times \frac{W_n(t)}{W_n(\infty) \times M_c} \quad (3)$$

که در آن،  $W_n(t)$  کاهش وزن نمونه از دمای ۱۴۵ تا دمای ۹۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد،  $M_c$  وزن سیمان مورد استفاده در نمونه، و  $W_n(\infty)$  نسبت آب به سیمان لازم جهت هیدراتاسیون کامل سیمان است، که طبق گزارش‌های منتشر شده برابر ۰٫۲۵ فرض شده است. [۱۸]

### ۴.۴.۳. کاهش وزن نمونه‌های در محلول سولفات سدیم و محلول ترکیبی

#### سولفات سدیم و کلراید

این آزمایش به منظور بررسی تأثیر یون سولفات سدیم و یون کلراید در نمونه‌های مکعبی انجام شده است. تعدادی از نمونه‌ها پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، از آب خارج شده و پس از ثبت وزن آنها به عنوان وزن اولیه ( $W_1$ )، در حالت اشباع با سطح خشک در محلول سولفات سدیم و محلول ترکیبی یون‌های سولفات سدیم و کلراید قرار گرفته‌اند. پس از قرارگیری نمونه‌ها در محلول‌ها، نمونه‌ها در هفته‌های اول، دوم، چهارم، ششم، هشتم، دهم، دوازدهم، شانزدهم، بیستم و بیست و چهارم از محلول‌ها خارج شده و پس از شستن و تمیز کردن سطح آن‌ها، در حالت اشباع با سطح خشک توزین و دوباره به داخل محلول‌ها بازگردانده شده‌اند. در نهایت، تغییرات نسبی وزن نمونه‌ها برای هر سن قرارگیری در محلول‌های موردنظر نسبت به وزن اولیه، از طریق

رابطه‌ی ۴ محاسبه شده است:

$$\text{درصد تغییر نسبی وزن نمونه} = 100 \times \frac{(W_2 - W_1)}{W_1} \quad (4)$$

علامت منفی، نمایانگر کاهش وزن نمونه‌هاست.

### ۵.۴.۳. تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها در محلول سولفات سدیم و محلول

#### ترکیبی سولفات سدیم و کلراید

برای تعیین تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در ماه‌های اول، دوم، چهارم، و ششم قرارگیری در محلول سولفات سدیم و محلول ترکیبی سولفات سدیم و کلراید، طبق زمان‌بندی آزمایش‌ها و پس از انجام آزمایش کاهش وزن بر روی نمونه‌ها، ۲ نمونه از هر طرح اختلاط جهت تعیین مقاومت فشاری انتخاب شده‌اند. این روند تا آخرین برنامه‌ی زمان‌بندی آزمایش‌ها ادامه پیدا کرده و در نهایت، در ماه ششم ۲ نمونه‌ی باقی‌مانده نیز از هر طرح اختلاط بعد از انجام آزمایش کاهش وزن تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفته و نتایج آنها نیز ثبت شده است. لازم به توضیح است که نسبت حجم محلول‌ها به حجم نمونه‌ها در طول ۶ ماه ثابت نگه داشته شده است. لذا با کاهش نمونه‌های مکعبی برای انجام آزمایش مقاومت فشاری از میزان حجم محلول‌ها نیز کاسته شده است. به منظور بررسی تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی قرار گرفته در محلول موردنظر، از رابطه‌ی ۵ استفاده شده است:

$$\text{درصد مقاومت فشاری نسبی} = 100 \times \frac{F_2}{F_1} \quad (5)$$

که در آن،  $F_1$  و  $F_2$  به ترتیب، مقاومت فشاری پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در آب و مقاومت فشاری در سن موردنظر پس از قرارگیری در محلول‌های موردنظر است. لازم به توضیح است که سطح نمونه‌ها هنگام آزمایش مقاومت فشاری صاف بوده و بنابراین نیازی به کلاهی‌گذاری نمونه‌ها نبوده است.

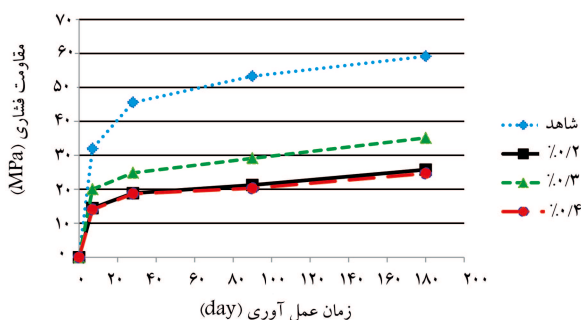
## ۴. بحث و بررسی نتایج

### ۱.۴. خصوصیات مکانیکی

#### ۱.۱.۴. مقاومت فشاری

تغییرات میانگین مقاومت فشاری نمونه‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به اینکه مقاومت فشاری طرح اختلاط‌های حاوی نانوذرات رس کاهش قابل توجهی داشته‌اند، لذا جهت دلیل کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها، درجه‌ی هیدراتاسیون خمیرها در سنین مورد نظر تعیین شده است، که نتایج حاصل در جدول ۳ ارائه شده است.

با توجه به جدول ۳ می‌توان گفت که تقریباً نیمی از دانه‌های سیمان در ۷ روز اول هیدراته می‌شوند، اما در ۲۱ روز بعدی فقط در حدود ۱۰٪ به درجه‌ی



شکل ۳. تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها با افزایش زمان عمل‌آوری.

در بین نمونه‌های حاوی نانوذرات رس به خود اختصاص داده است. در حالت کلی پس از ۹۰ روز عمل‌آوری، طرح اختلاط حاوی ۰/۳٪ نانورس ( $T_3$ ) نسبت به سایر طرح اختلاط‌های حاوی نانوذرات رس عملکرد مطلوب‌تری داشته است. چنانچه قبلاً نیز ذکر شده است، طرح اختلاط  $T_2$  به دلیل داشتن بهترین تراکم، نفوذپذیری کمتری نیز از خود نشان داده است. همچنین طرح اختلاط شاهد در بین همه‌ی طرح اختلاط‌ها، کمترین جذب آب را در ۰/۵ و ۲۴ ساعت از خود نشان داده است.

#### ۲.۴. بررسی دوام طرح اختلاط‌ها در برابر تهاجم سولفات سدیم و

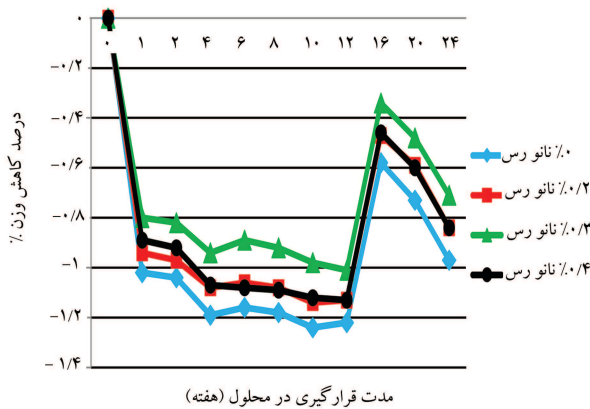
##### تهاجم همزمان سولفات سدیم و کلراید

##### ۱.۲.۴. کاهش وزن نمونه‌های بتنی در محلول سولفات سدیم

میانگین درصد تغییرات نسبی وزن نمونه‌های قرار داده‌شده در سولفات سدیم نسبت به وزن اولیه‌ی آنها پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در آب در شکل ۵ ارائه شده است، که علامت منفی در آن، نشان‌دهنده‌ی کاهش وزن نمونه‌های بتنی است.

در شکل ۵ مشاهده می‌شود که کاهش وزن نمونه‌های بتنی از همان هفته‌ی اول شروع شده است. تشکیل گچ و اترینگایت در بتن و شسته‌شدن آنها، دلیل کاهش وزن نمونه‌هاست. همچنین به علت وجود خمیر بیشتر در سطح نمونه‌ها، نرخ خوردگی در هفته‌ی اول بسیار بیشتر از هفته‌های بعدی است، به نحوی که در هفته‌های دوم تا دوازدهم، کاهش وزن به علت وقوع خوردگی در عمق بتن اندک است. همچنین وقوع ریزترک‌ها در عمق بتن در هفته‌ی ۱۲ قرارگیری و نفوذ محلول به ریزترک‌ها باعث افزایش قابل توجه وزن در همه‌ی طرح اختلاط‌ها شده است، ولی از هفته‌ی ۱۶ به بعد، مجدداً همه‌ی طرح اختلاط‌ها به علت ادامه‌ی فرایند خوردگی کاهش وزن داشته‌اند. در شکل ۶، نیز میانگین کلی کاهش وزن نمونه‌های بتنی قرارگرفته در محلول سولفات سدیم نشان داده شده است. با توجه به شکل ۶ می‌توان دریافت که کاهش وزن طرح اختلاط شاهد در محلول سولفات سدیم بیشتر از طرح اختلاط‌های حاوی نانوذرات رس است، که این امر می‌تواند به دلیل نفوذ کمتر یون‌های سولفات سدیم باشد. به عبارت دیگر، نانوذرات رس به علت تورم ذرات به عنوان یک سد در مقابل یون‌های سولفات سدیم عمل کرده‌اند.

از طرفی در بین طرح اختلاط‌های حاوی نانوذرات رس، طرح اختلاط  $T_3$  با ۰/۳٪ نانورس بهترین عملکرد را در بین سایر طرح اختلاط‌ها داشته و به عنوان طرح اختلاط بهینه در بین این طرح اختلاط‌ها بوده است. چنانچه قبلاً نیز ذکر شده است، نانوذرات رس در طرح اختلاط با ۰/۳٪، به طور مناسب خلل و فرج بتن را پر کرده است. در نتیجه، یون‌های مخرب کمتری در طرح اختلاط  $T_3$  نفوذ کرده‌اند. همچنین



شکل ۵. تغییرات نسبی وزن نمونه‌های بتنی در محلول سولفات سدیم.

هیدراتاسیون افزوده می‌شود، که این امر می‌تواند تأکیدی بر اهمیت عمل‌آوری در سنین اولیه باشد. از طرفی درجه‌ی هیدراتاسیون طرح اختلاط شاهد در سنین ۷ و ۲۸ روزه کمتر از طرح اختلاط‌های حاوی نانوذرات رس است. چنانچه در بخش ۲.۳ نیز ذکر شده است، به علت داشتن بارهای منفی در سطح نانوذرات رس و به علت ایجاد نیروهای دافعه، کارایی مخلوط افزایش یافته و لذا بخش یکنواخت ذرات سیمان در خمیر رخ داده است؛ که در نتیجه‌ی آن، در مخلوط‌های حاوی نانوذرات رس، درجه‌ی هیدراتاسیون نمونه‌های حاوی نانوذرات رس نیز افزایش یافته است. بنابراین می‌توان گفت که دلیل کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی نانوذرات رس، چسبیدن ذرات نانورس به سطح سنگ‌دانه‌ها و عدم اتصال مناسب سنگ‌دانه‌ها به خمیر سیمان است. به عبارت دیگر، نانوذرات رس با داشتن سطح جانبی بالا، باعث تضعیف ناحیه‌ی انتقال و در نتیجه، باعث کاهش چشمگیری در مقاومت فشاری شده‌اند.

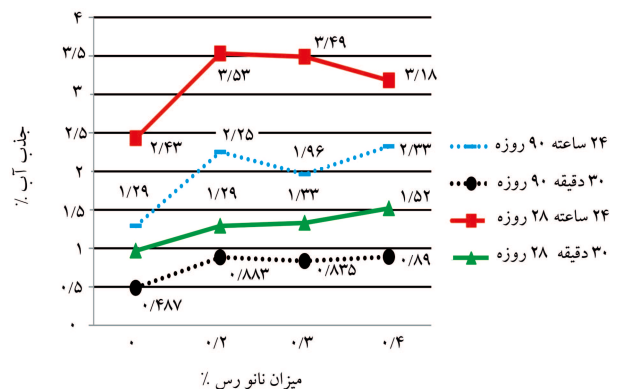
همچنین چنانچه مشاهده می‌شود، طرح اختلاط حاوی ۰/۳٪ نانوذرات رس ( $T_2$ ) بیشترین مقاومت فشاری را در بین طرح اختلاط‌های حاوی نانورس به خود اختصاص داده است، که تراکم بالای خمیر سیمان دلیل این امر است.

#### ۲.۱.۴. درصد جذب آب

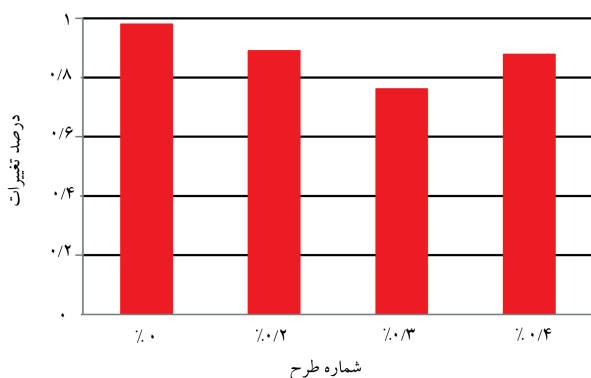
متوسط نتایج مربوط به درصد جذب آب، ۰/۵ و ۲۴ ساعت‌هی نمونه‌ها پس از ۲۸ و ۹۰ روز عمل‌آوری در آب در شکل ۴ ارائه شده است. با توجه به شکل مذکور کاملاً مشخص است که افزودن نانورس باعث افزایش جذب آب نمونه‌ها می‌شود. می‌توان گفت نانوذرات رس به دلیل باریک بودن و صفحه‌یی بودن، قابلیت جذب آب بالایی دارند. همچنین با توجه به شکل مذکور واضح است که پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، جذب آب ۰/۵ ساعت‌ه روند نزولی را در پیش گرفته است؛ به نحوی که طرح اختلاط  $T_2$  که در ۰/۵ ساعت، بالاترین جذب آب را داشته است، در ۲۴ ساعت کمترین جذب آب را

جدول ۳. نتایج آزمایش درجه‌ی هیدراتاسیون خمیر سیمان.

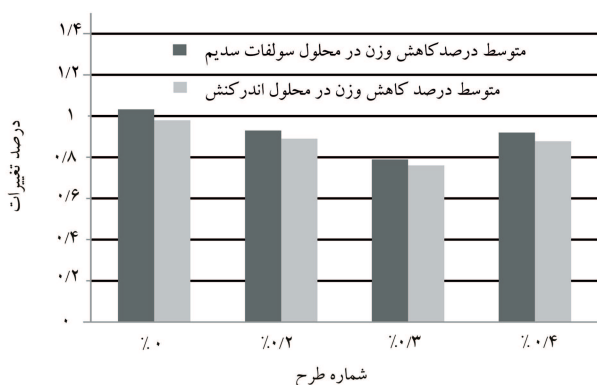
شماره‌ی طرح اختلاط	نانوذرات رس (درصد)		درجه‌ی هیدراتاسیون (درصد)
	روزه ۲۸	روزه ۷	
$T_1$	۵۳/۶	۴۵/۵	۰
$T_2$	۵۹/۲	۴۷/۴	۰/۲
$T_3$	۵۹/۸	۴۹/۲	۰/۳
$T_4$	۵۹/۹	۵۱/۵	۰/۴



شکل ۴. درصد جذب آب ۰/۵ و ۲۴ ساعت‌هی نمونه‌ها پس از ۲۸ و ۹۰ روز عمل‌آوری.



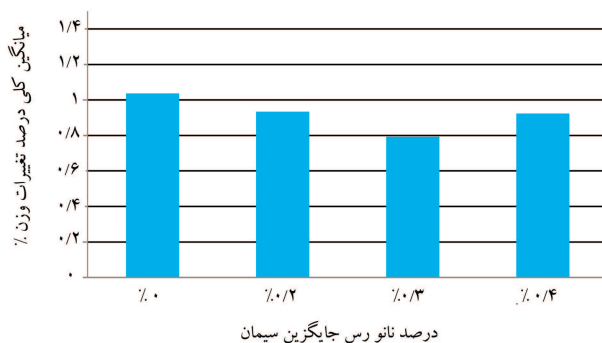
شکل ۸. میانگین درصد کاهش وزن نمونه‌های بتنی در محلول ترکیبی سولفات سدیم و کلراید.



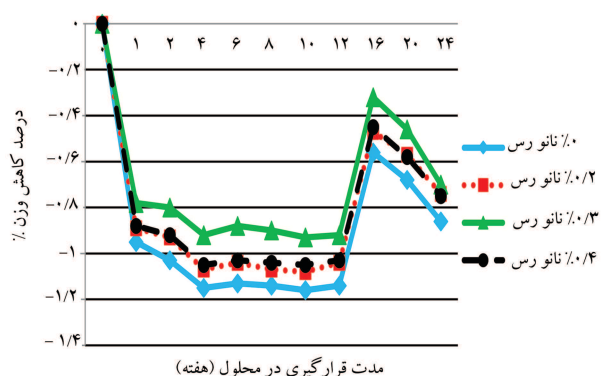
شکل ۹. مقایسه‌ی میانگین کلی درصد کاهش وزن نمونه‌های بتنی در محلول سولفات سدیم و محلول ترکیبی سولفات سدیم و کلراید.

اختلاف معنی‌دار بین طرح اختلاط شاهد و طرح اختلاط حاوی ۰٫۳٪ نانوذرات رس وجود دارد. در شکل ۹ نیز مقایسه‌ی بین میانگین کلی کاهش وزن نمونه‌ها در محلول سولفات سدیم و محلول ترکیبی سولفات سدیم و کلراید ارائه شده است.

با توجه به شکل ۹ می‌توان گفت که در حالت کلی نمونه‌های قرارگرفته در محلول ترکیبی، وضعیت مطلوب‌تری هر چند اندک نسبت به نمونه‌های قرارگرفته در محلول سولفات سدیم دارند، به این دلیل که در حالت نفوذ همزمان یون‌های سولفات سدیم و کلراید، یون‌های کلراید به عنوان بازدارنده در مقابل یون‌های سولفات سدیم عمل می‌کنند و مانع نفوذ سولفات سدیم به داخل بتن می‌شوند و در نتیجه کاهش وزن کمتری در نمونه‌های قرارگرفته در محلول ترکیبی نسبت به محلول سولفات سدیم مشاهده می‌شود. به عبارت دیگر، می‌توان گفت که یون‌های کلراید باعث کاهش میزان ته‌اجم یون‌های سولفات می‌شوند. همچنین با توجه به وجود اختلاف اندک بین این دو محیط می‌توان اثر یون‌های کلراید در میزان ته‌اجم یون‌های سولفات را نادیده گرفت. همچنین نانوذرات رس به دلیل داشتن بارهای منفی در سطح خود، باعث دفع یون‌های  $SO_4^{2-}$  و  $Cl^-$  و در نتیجه باعث بهبود وضعیت دوام بتن در برابر عوامل مخرب می‌شوند. در سال ۱۹۴۸، دفع آنیون‌ها توسط سطوح با بار منفی موجود در خاک‌های رس مطرح شده،<sup>[۱۹]</sup> و در سال ۱۹۶۲ دفع یون‌های کلر توسط مونت‌موریلونیت تأیید شده است.<sup>[۲۰]</sup> به‌طورکلی می‌توان گفت که طرح اختلاط‌های حاوی نانوذرات رس نسبت به طرح اختلاط شاهد عملکرد مناسب‌تری داشته‌اند. در پژوهش حاضر نیز نانورس مونت‌موریلونیت با داشتن بارهای منفی قادر به دفع یون‌های منفی ( $Cl^-$ ) و ( $SO_4^{2-}$ ) بوده و در نتیجه باعث افزایش دوام بتن شده



شکل ۶. میانگین درصد کاهش وزن نمونه‌ها در محلول سولفات سدیم.



شکل ۷. تغییرات نسبی وزن نمونه‌های بتنی در محلول ترکیبی.

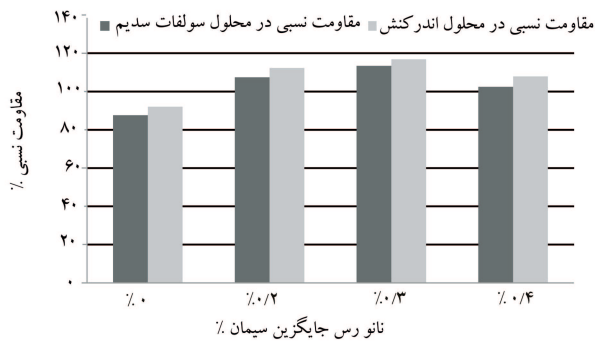
آنالیزهای آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS بر روی ۴ طرح اختلاط موجود نشان داده است که اختلاف معنی‌دار بین طرح اختلاط شاهد و طرح اختلاط حاوی ۰٫۳٪ نانوذرات رس وجود دارد که می‌توان گفت استفاده از ۰٫۳٪ نانورس، علی‌رغم کاهش مقاومت فشاری، مقاومت بتن در برابر ته‌اجم سولفات سدیم را به‌طور معنی‌داری افزایش می‌دهد.

**۲.۲.۴. کاهش وزن نمونه‌های بتنی در محلول ترکیبی سولفات سدیم و کلراید**  
همانند نمونه‌های قرارگرفته در محلول سولفات سدیم، آزمایش تعیین تغییرات وزن بر روی نمونه‌های قرارگرفته در محلول ترکیبی سولفات سدیم و کلراید نیز انجام شده است. میانگین درصد تغییرات نسبی وزن نمونه‌های قرار داده شده در محلول ترکیبی سولفات سدیم و کلراید نسبت به وزن اولیه‌ی آنها در شکل ۷ ارائه شده است. چنانچه مشاهده می‌شود، کاهش وزن نمونه‌های بتنی همانند نمونه‌های قرارگرفته در محلول ترکیبی نیز از همان هفته‌ی اول شروع شده است. در نمونه‌های ذکر شده نیز تشکیل گچ و اترینگایت در بتن و شسته شدن آنها، دلیل کاهش وزن نمونه‌هاست. همچنین همانند نمونه‌های قرارگرفته در محلول سولفات سدیم، وقوع ریزترک‌ها در عمق بتن به دلیل تشکیل گچ و اترینگایت و پشدن آنها با محلول در هفته‌ی دوازدهم قرارگیری در محلول، افزایش وزن را در همه‌ی طرح اختلاط‌ها ایجاد کرده است. در شکل ۸، نیز میانگین کلی کاهش وزن نمونه‌های بتنی قرارگرفته در محلول ترکیبی سولفات سدیم و کلراید نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۸ می‌توان دریافت که کاهش وزن طرح اختلاط شاهد در محلول ترکیبی سولفات سدیم و کلراید بیشتر از طرح اختلاط‌های حاوی نانوذرات رس است، که این امر نیز به دلیل نفوذ کمتر یون‌های سولفات سدیم است. در ته‌اجم همزمان سولفات سدیم و کلراید نیز طرح اختلاط  $T_3$  با ۰٫۳٪ نانورس، بهترین عملکرد را داشته است. آنالیزهای آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS نیز نشان می‌دهد که

همانند نمونه‌های قرارگرفته در محلول سولفات سدیم، در محلول ترکیبی نیز مقاومت نسبی طرح اختلاط‌های حاوی نانوذرات رس به مراتب بیشتر از مقاومت نسبی طرح اختلاط شاهد بوده است.

با مقایسه‌ی جدول‌های ۴ و ۵ می‌توان گفت که تفاوت در محلول ترکیبی سولفات سدیم و کلراید، فقط حضور یون‌های کلراید است که باعث نفوذ کمتر یون‌های سولفات به داخل بتن شده و در نتیجه، مقاومت فشاری در طرح اختلاط شاهد پس از ۶ ماه قرارگرفتن در محلول، ۵/۳۸٪ افت مقاومت فشاری از خود نشان داده است و این در حالی است که افت مقاومت فشاری در محلول سولفات سدیم ۸/۱۵٪ بوده است. همچنین افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی نانوذرات رس در محلول ترکیبی نسبت به محلول سولفات سدیم کمی بیشتر شده است، که طرح اختلاط حاوی ۰/۳٪ نانوذرات رس پس از ۶ ماه قرارگرفتن در محلول ترکیبی با ۱۵/۵۶٪ افزایش مقاومت، بهترین عملکرد را در بین طرح اختلاط‌ها داشته است، که این میزان در محلول سولفات سدیم حدود ۱۱/۹۸٪ بوده است. همچنین در شکل ۱۰، برای مقایسه‌ی بهتر، تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های قرارگرفته در محلول‌های سولفات سدیم و محلول ترکیبی سولفات سدیم و کلراید پس از ۶ ماه قرارگرفتن در محلول‌ها نسبت به مقاومت ۲۸ روزه‌ی نظیر ارائه شده است.



شکل ۱۰. درصد تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از ۶ ماه قرارگرفتن در محلول‌ها نسبت به مقاومت ۲۸ روزه‌ی نظیر.

جدول ۴. مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی پس از قرارگرفتن در محلول سولفات سدیم (مگاپاسکال).

شماره‌ی طرح اختلاط	مقاومت فشاری ۲۸ روزه	مقاومت فشاری پس از قرارگیری در محلول سولفات سدیم						مقاومت فشاری ۱ ماهه	مقاومت فشاری ۲ ماهه
		مقاومت فشاری ۱ ماهه (%)	مقاومت فشاری ۲ ماهه (%)	مقاومت نسبی ۱ ماهه (%)	مقاومت فشاری ۴ ماهه	مقاومت نسبی ۴ ماهه (%)	مقاومت فشاری ۶ ماهه		
T <sub>1</sub>	۴۵,۵۷	۳۶,۰۲	۷۹,۰۴	۳۸,۷۳	۸۴,۹۹	۴۳,۱۴	۹۴,۶۶	۴۱,۸۶	۹۱,۸۵
T <sub>2</sub>	۱۸,۸۵	۱۸,۶۸	۹۹,۰۸	۱۹,۲۱	۱۰۱,۹	۲۲,۷۹	۱۲۰,۹	۲۰,۳۴	۱۰۷,۹
T <sub>3</sub>	۲۴,۸۶	۲۶,۸۳	۱۰۷,۹۲	۲۷,۷۴	۱۱۱,۵۸	۳۰,۴۱	۱۲۲,۳۲	۲۷,۸۴	۱۱۱,۹۸
T <sub>4</sub>	۱۸,۷۱	۱۷,۶	۹۴,۰۶	۱۸,۲۱	۹۷,۳۲	۲۱,۲۸	۱۱۳,۷۳	۱۹,۵۷	۱۰۴,۵۹

جدول ۵. مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی پس از قرارگرفتن در محلول اندرکنش سولفات سدیم و کلراید (مگاپاسکال).

شماره‌ی طرح اختلاط	مقاومت فشاری ۲۸ روزه	مقاومت فشاری پس از قرارگرفتن در محلول ترکیبی سولفات سدیم و کلراید						مقاومت فشاری ۱ ماهه	مقاومت فشاری ۲ ماهه
		مقاومت فشاری ۱ ماهه (%)	مقاومت نسبی ۱ ماهه (%)	مقاومت فشاری ۲ ماهه	مقاومت نسبی ۲ ماهه (%)	مقاومت فشاری ۴ ماهه	مقاومت نسبی ۴ ماهه (%)		
T <sub>1</sub>	۴۵,۵۷	۳۸,۹۸	۸۵,۵۳	۴۱,۵۸	۹۱,۲۴	۴۴,۲	۹۶,۹۹	۴۳,۱۲	۹۴,۶۲
T <sub>2</sub>	۱۸,۸۵	۱۹,۲۱	۱۰۱,۹	۲۰,۴۴	۱۰۸,۴۳	۲۳,۱۷	۱۲۲,۹۱	۲۱,۸۷	۱۱۶,۰۲
T <sub>3</sub>	۲۴,۸۶	۲۷,۲۴	۱۰۹,۵۷	۲۸,۲	۱۱۳,۴۳	۳۲,۰۸	۱۲۹,۰۴	۲۸,۷۳	۱۱۵,۵۶
T <sub>4</sub>	۱۸,۷۱	۱۸,۳۱	۹۷,۸۶	۱۹,۸۷	۱۰۶,۱۹	۲۲,۱۹	۱۱۸,۵۹	۲۰,۴	۱۰۹,۰۳

است، و این در صورتی است که مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی نانوذرات رس به‌طور قابل توجهی کاهش یافته است.

### ۳.۲.۴. تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی قرارگرفته در محلول سولفات سدیم

نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در محلول سولفات سدیم در مقایسه با مقاومت فشاری اولیه‌ی ۲۸ روزه و نیز نتایج مقاومت نسبی کسب‌شده‌ی نمونه‌ها نسبت به مقاومت ۲۸ روزه‌ی نظیر برای مقایسه‌ی بهتر آن‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به جدول مذکور واضح است که مقاومت نسبی طرح اختلاط‌های حاوی نانوذرات رس به مراتب بیشتر از مقاومت نسبی طرح اختلاط شاهد بوده است. همچنین تمامی نمونه‌های قرارگرفته در محلول سولفات سدیم، به دلیل انجام واکنش‌ها و تشکیل گچ و اترینگایت و پرشدن خلل و فرج تا هفته‌ی شانزدهم (۴ ماهه)، بیشترین مقاومت فشاری را از خود نشان داده‌اند، اما پس از آن به علت وقوع ریزترک‌ها مقاومت فشاری طرح اختلاط‌ها کاهش پیدا کرده است. از طرفی طرح اختلاط‌های حاوی نانوذرات رس پس از ۶ ماه قرارگرفتن در محلول سولفات سدیم، همچنان افزایش مقاومت فشاری داشته‌اند، به طوری که طرح اختلاط حاوی ۰/۳٪ نانوذرات رس با ۱۱/۹۸٪ بیشترین افزایش مقاومت فشاری را از خود نشان داده است. طرح اختلاط شاهد نیز به میزان ۸/۱۵٪ کاهش مقاومت داشته است. چنانچه قبلاً نیز ذکر شده است، ذرات نانورس از نفوذ بیشتر یون‌های سولفات سدیم به داخل بتن جلوگیری کرده و در نتیجه گچ و اترینگایت در زمان‌های طولانی‌تری تشکیل شده است و به همین دلیل نمونه‌های حاوی نانوذرات رس پس از ۶ ماه قرارگرفتن در محلول، افزایش مقاومت فشاری داشته‌اند.

### ۴.۲.۴. تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی قرارگرفته در محلول ترکیبی سولفات سدیم و کلراید

در جدول ۵، نیز نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی قرارگرفته در محلول ترکیبی سولفات سدیم و کلراید در کنار مقاومت فشاری اولیه‌ی ۲۸ روزه ارائه شده است. برای مقایسه‌ی بهتر، نتایج مقاومت نسبی کسب‌شده‌ی نمونه‌ها نسبت به مقاومت ۲۸ روزه‌ی نظیر نیز در جدول ۵ ارائه شده است. چنانچه مشاهده می‌شود،

۲. طرح اختلاط حاوی ۳/۰٪ نانوذرات رس بیشترین مقاومت فشاری و کمترین جذب آب را در بین طرح اختلاط‌های حاوی نانوذرات رس دارد.
۳. استفاده از نانوذرات رس، درجه‌ی هیدراتاسیون خمیر را به‌طور جزئی افزایش می‌دهد.
۴. کاهش مقاومت فشاری طرح اختلاط‌های حاوی نانوذرات رس، به دلیل چسبیدن نانوذرات رس به سنگ‌دانه‌ها و در نتیجه تضعیف ناحیه‌ی انتقال است.

ب) دوام بتن‌های متراکم در برابر تهاجم سولفات سدیم و تهاجم همزمان سولفات سدیم و کلراید:

۱. استفاده از نانوذرات رس باعث افزایش دوام بتن در برابر تهاجم یون‌های سولفات سدیم و تهاجم همزمان سولفات سدیم و کلراید می‌شود.
۲. دوام طرح اختلاط حاوی ۳/۰٪ نانورس در محلول‌های سولفات سدیم و محلول ترکیبی سولفات سدیم و کلراید بیشتر از سایر طرح اختلاط‌هاست.
۳. یون‌های کلراید در کنار یون‌های سولفات باعث کاهش میزان تهاجم یون‌های سولفات می‌شوند.
۴. نتایج نشان داده است که مقاومت فشاری بالای طرح اختلاط بیان‌گر دوام آن در برابر تهاجم سولفات سدیم و تهاجم همزمان سولفات سدیم و کلراید نیست.

با توجه به شکل ۱۰ می‌توان گفت که افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها در محلول ترکیبی بیشتر از مقاومت فشاری نمونه‌ها در محلول سولفات سدیم است، که این امر به دلیل حضور کلر و همچنین نقش نانوذرات رس به عنوان یک بازدارنده برای ورود عامل مهاجم به نمونه‌های مذکور بوده است. لازم به توضیح است که در طرح اختلاط کنترل نیز به دلیل عدم حضور نانوذرات رس، افت مقاومت فشاری رخ داده است، که این میزان افت مقاومت در محلول ترکیبی نیز نسبت به محلول سولفات کمتر بوده است.

## ۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، علاوه بر بررسی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بتن‌های متراکم حاوی نانوذرات رس، دوام این نوع بتن‌ها در برابر تهاجم یون‌های سولفات سدیم و تهاجم همزمان سولفات سدیم و کلراید مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده در ۲ بخش ارائه شده است:

الف) خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بتن‌های متراکم:

۱. با به‌کارگیری نانوذرات رس در بتن، مقاومت فشاری به‌طور قابل ملاحظه‌ی کاهش می‌یابد و جذب آب نیز افزایش پیدا می‌کند.

## منابع (References)

1. Mehta, P.K. and Monteiro, P.J.M., *Concrete Microstructure, Properties, and Materials*, 3rd Edition, The McGraw-Hill Companies, 684 p. (2006).
2. Tosun, K., Felekoglu, B., Baradan, B. and Altun, A. "Effects of limestone replacement ratio on the sulfate resistance of Portland limestone cement mortars exposed to extraordinary high sulfate concentrations", *Construction and Building Materials*, **23**(7), pp. 2534-2544 (2009).
3. Fuller, W.B. and Thompson, S.E. "The laws of proportioning concrete", *ASCE J. Transport*, **59**, pp. 67-143 (1907).
4. Lange, F., Morel H. and Rudert, V. "Dense packing of cement paste and resulting consequences on mortar properties", *Cement and Concrete Research*, **27**(10), pp. 1481-1488 (1997).
5. Shakhmenko, W.B. and Brish, J. "Concrete mix design and optimization", *Proceedings of the Second Int.*, PhD, Symposium in Civil Engineering, Budapest, pp. 160-167 (1988).
6. Brouwers, H.J.H. and Husken, G. "A new mix design concept for earth-moist concrete: A theoretical & experimental study", *Cement & Concrete Research*, **38**(10), pp. 1246-1259 (2007).
7. Marchand, J., Odler, I. and Skalny, J.P., *Sulfate Attack on Concrete*, Modern Concrete Technology, 232 p. (2001).
8. Boyd, A.J. and Mindess, S. "The use of tension testing to investigate the effect of W/C ratio and cement type on the resistance of concrete to sulfate attack", *Cement and Concrete Research*, **34**(3), pp. 373-377 (2004).
9. Feldman, R.F. and Beaudoin, J.J. "Effect of cement blends on chloride and sulfate ion diffusion in concrete", *II Cemento*, **88**, pp. 3-18 (1991).
10. Omar, S.B.A., Masiehuiddin, M. and Abdui, Y.A.B. "Role of chloride ions on expansion and strength reduction in plain and blended cements in sulfate environments", *Construction and Building Materials*, **9**(1), pp. 25-33 (1995).
11. Zuquan, J., Wei, S., Yunsheng, Z., Jinyang, J. and Jianzhong, I. "Interaction between sulfate and chloride solution attack of concretes with and without fly ash", *Cement and Concrete Research*, **37**(8), pp. 1223-1232 (2007).
12. Dehwah, H.A.F., Maslehuiddin, M. and Austin, S.A. "Long-term effect of sulfate ions and associated cation type on chloride-induced reinforcement corrosion in Portland cement concretes", *Cement and Concrete Composites*, **24**(1), pp. 17-25 (2002).
13. Mitchell, J.k. and Wiley. J., *Fundamentals of Soil Behavior*, John Wiley and Sons (1993).
14. Al-Tayyib, A.J. and Shamim Khan, M. "Effect of sulfate ions on the corrosion of rebars embedded in concrete", *Cement & Concrete Composites*, **13**(2), pp. 123-127 (1991).



15. 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).
16. Peronius, T. and Sweeting, J. "On the correlation of minimum porosity with particle size distribution", *Powder Technol.*, **42**(2), pp. 113-121 (1985).
17. British Standards Institution, *Testing Concrete, Method for Determination of Compressive Strength of Concrete Cubes*, BSI, London, BS 1881-116 (1983).
18. Hassan, H. "Properties of latex modified mortar and concrete", MSc Thesis, Alexandria University (2010).
19. Kenworthy, S.R. "Calculation of surface areas from measurements of negative adsorption", *Nature, International Weekly Journal of Science*, **160**(4064), pp. 408-410 (1947).
20. Edwards, D.G. and Quirk, J.P. "Repulsion of chloride by montmorillonite", *Journal of Colloid Science*, **17**(9), pp. 872-882 (1962).