

بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت‌های پایه سیمان تقویت‌شده با سرامیک و پلیمر در معرض حمله سولفات‌ها

نوع مقاله: علمی پژوهشی

رضا رضوانی‌زاده^۱، شهاب کاظمی^{۲*}، رضوان لک^۱

^۱ دانشگاه بوعلی سینا

^۲ استادیار، دانشگاه بوعلی سینا

* Shahab.Kazemi@basu.ac.ir

چکیده:

در این پژوهش کامپوزیت زمینه سیمان تقویت‌شده با ماسه توسط آب و پلیمر پلی‌یورتان تولید شد. به منظور بررسی تاثیر مخرب محیط‌های خورنده، نمونه‌های تولید شده در مقادیر مختلفی از آب، پلیمر پلی‌یورتان و ماسه در الکترولیت‌های سود سوزآور ۱۰ درصد و سولفوریک اسید ۱۰ درصد به مدت ۷۰ روز غوطه‌ور شدند. در ادامه به منظور مشخصه‌یابی نمونه‌ها پس از غوطه‌وری، نمونه‌ها توسط ارزیابی‌های مکانیکی و فیزیکی شامل آزمون چگالی‌سنجی و آزمون فشار مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج آزمون چگالی‌سنجی نشان داد که چگالی نمونه‌های غوطه‌ور شده در سولفوریک اسید در حدود ۱۰ الی ۲۰ درصد از نمونه‌های غوطه‌ور شده در سود سوزآور کمتر می‌باشد. نتایج آزمون فشار نشان داد که به صورت کلی استحکام نمونه‌های تولید شده آب نسبت به نمونه‌های تولید شده با پلیمر پلی‌یورتان بیش‌تر می‌باشد. از طرفی مشخص شد در صورت استفاده از ماسه و تولید نمونه‌های بتنی کامپوزیتی، استحکام نمونه‌ها افزایش ۷۵ درصدی از خود نشان می‌دهند. نتایج آزمون استحکام فشاری نشان داد که استحکام نمونه‌های غوطه‌ور شده در الکترولیت سولفوریک اسید به صورت کلی در حدود ۲۰ الی ۳۰ درصد ضعیف‌تر از استحکام نمونه‌های غوطه‌ور شده در الکترولیت سود سوزآور هستند.

اطلاعات مقاله:

دریافت: ۲ شهریور ۱۴۰۲

پذیرش: ۱۰ آذر ۱۴۰۲

صفحه ۳۷ تا صفحه ۵۲

در دسترس در نشانی:

www.ijcse.ir

زبان نشریه: فارسی

شاپا چاپی: ۲۳۵۲-۲۳۲۲

شاپا الکترونیکی:

۳۰۰۳-۲۷۸۳

کلیدواژه:

کامپوزیت‌های بتنی، استحکام

فشاری، چگالی، سولفوریک

اسید، سود سوزآور.

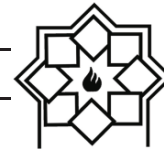
20.1001.1.23222352.1402.0.0.2.3

:DOR

۱- مقدمه

کامپوزیت‌های سیمانی به ویژه ملات و بتن نسبتاً ارزان هستند، اما خیلی ماندگار و بادوام نیستند. ترمیم یا تعویض این کامپوزیت‌ها در زمان استفاده از ساختمان از نظر فنی دشوار و معمولاً پرهزینه است [۱]. یکی از دلایل اصلی دوام

بتن پلیمر- سیمانی نوعی کامپوزیت پایه سیمانی است که در آن از پلیمر به عنوان جایگزین بخشی از سیمان استفاده می‌شود و به عنوان یک عامل پیوندی عمل می‌کند.



است. استفاده شوند. یکی از مواد مورد توجه پلی‌اورتان^۳ (PU) هستند که معمولاً به عنوان نوعی رزین مصنوعی استفاده می‌شود که با واکنش ایزوسیانات‌ها و ترکیبات هیدروژنی فعال با پلیمریزاسیون مرحله به مرحله ایجاد می‌شود. کامپوزیت‌های سیمان- پلی‌اورتان که با مخلوط کردن پلی‌اورتان و مواد سیمانی ساخته می‌شوند، استحکام بالا، شکل‌پذیری خوب و نم‌گیری بالایی دارند. مواد پلی‌اورتانی خواص پیوندی خوبی با مواد بتنی دارند و می‌توانند برای بهبود دوام ساختارهای بتنی استفاده شوند. ظاهراً تحقیقات موجود عمدتاً بر خواص مکانیکی این کامپوزیت‌ها تمرکز دارند [۶]. وو^۳ و همکاران [۷] سیستم ترمیم‌کننده‌ی پلی‌اورتان دو جزئی را برای کاربرد در بتن مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آزمون‌های مکانیکی حاکی از این بودند که درجه‌ی بازیابی استحکام با مساحت چسبندگی عامل ترمیم‌کننده در ترک متناسب است [۷]. مارکز^۴ و همکاران [۸] در سال ۲۰۲۱ کامپوزیت‌های سیمانی حاوی پلی‌اورتان و پلی‌وینیل کلرید بازیافتی را آماده کردند. در صنعت ساختمان‌سازی، پسماندهای بالا چالشی برای بازیافت و امکان تولید مواد جدید به بار می‌آورند. همچنین حمله‌ی سولفاتی خارجی به مواد سیمانی مشکل کلیدی دوام آن‌ها و سوژه‌ی تحقیقاتی چند دهه‌ی گذشته بوده است. ابهام و جدل بر سه نوع این حمله و مکانیزم‌های آن باعث شده که چندین محقق این موضوع را چندین بار مورد بررسی مجدد قرار دهند. [۹]. نمک‌های سولفاتی محلول می‌توانند وارد واکنش شیمیایی با مواد سیمانی شوند و منجر به انبساط، ترک

ناکافی بتن یا مثلاً تخریب ناشی از فاکتورهای شیمیایی، فیزیکی یا بیولوژیکی است. ارزیابی میزان دوام و ماندگاری با آزمون‌ها و مشاهده‌ی ماده در معرض محیط خورنده به مدت طولانی امکان‌پذیر است. پلیمرها اصلاح‌کننده‌های پرکاربردی برای بتن‌های معمولی محسوب می‌شوند. با افزودن پلیمرها به بتن سیمانی با مخلوط ملات کامپوزیت‌های پلیمر/سیمانی^۱ (PCCs) ایجاد می‌شوند. مواد PCC همراه با بتن‌ها و ملات‌های رزینی و بتن‌های اشباع شده با پلیمر به گروه کامپوزیت‌های پلیمری ساختمانی تعلق دارند. کامپوزیت‌های پلیمر- سیمانی مزایای اساسی نسبت به ملات و بتن معمولی از خود نشان می‌دهند. مانند استحکام کششی و خمشی بهتر، چسبندگی به زیر لایه‌های مختلف و سختی [۲]. در سال ۲۰۱۶، رحمان و همکاران [۴] پایداری عالی ملات‌های اصلاح‌شده با اپوکسی را در محیط‌های خورنده گزارش دادند. نتایج تجربی نشان می‌دهند که ملات مبتنی بر اپوکسی می‌تواند به عنوان یک ماده‌ی مطمئن برای نمای خارجی زیرساخت‌ها استفاده شود [۴]. در سال ۲۰۲۱، البغدادی [۵] مقاومت به سولفات بتن حاوی اگرگیت بازیافتی اصلاح شده با پلیمر وینیل الکل (PVA) را بررسی کرد. نتایج استحکام فشاری نشان دادند که مخلوط‌های اشباع شده با PVA استحکام بالاتری نسبت به مخلوط مرجع دارند. از نظر دوام، مخلوط بتن حاوی ۳۲٪ اگرگیت بازیافتی بهترین نتیجه را نشان داد [۵]. به علاوه سیستم‌های سیمانی حاوی پلیمر می‌توانند به عنوان مواد ترمیم‌کننده در جایی که پیوند خوبی بین بتن یا فولاد نیاز

³ Wu

⁴ Marques

¹ Polymer-cement composites

² Polyurethane



استفاده شده است. ماسه مورد استفاده از معدن سلماس همدان خریداری شد.

بر اساس استاندارد ASTM C109 نسبت آب به سیمان ۰/۴۸۵ وزنی در نظر گرفته شد. سیمان به اندازه یک واحد وزنی، ماسه به اندازه سه واحد وزنی و آب نصف واحد وزنی در نظر گرفته شد. برای نمونه‌های کامپوزیتی تقویت شده با پلی‌یورتان، آب حذف شده و پلیمر پلی‌یورتان جایگزین شد. با توجه به استاندارد ASTM C109 قالب‌هایی با ابعاد $5 \times 5 \times 5$ سانتی‌متر با استفاده از چوب تولید شدند. پس از خروج نمونه‌ها از قالب، نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز در آب به حالت غوطه‌وری نگهداری شدند.

مشخصات نمونه‌ها: نمونه‌های تولید شده در این پژوهش به شرح زیر دسته‌بندی شدند:

۱. نمونه بتنی تشکیل شده از ماسه، سیمان و آب (SCW)
۲. نمونه کامپوزیت سیمانی تشکیل شده از ماسه، سیمان، پلیمر (SCP)

۳. نمونه سیمانی تشکیل شده از سیمان، آب (CW)

۴. نمونه پلیمری تشکیل شده از سیمان، پلیمر (CP)

در نهایت ۳۶ نمونه با ترکیبات مختلف در این پژوهش تولید شدند. با توجه به مسیر پژوهش این نمونه‌های پس از تولید باید در دو محلول مهاجم غوطه‌ور شوند تا مشخصه‌یابی صورت بگیرد.

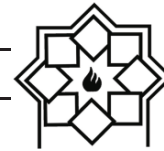
به منظور بررسی خواص مکانیکی و فیزیکی نمونه‌ها پس از غوطه‌وری در محلول خورنده، از تمام ۳۶ نمونه دو سری تولید شدند. به عبارتی ۷۲ نمونه تولید شدند. ۳۶ نمونه در الکترولیت ۱۰٪ NaOH و ۳۶ نمونه در الکترولیت ۱۰٪ H_2SO_4 به مدت

خوردنی، ورقه‌ورقه شدن و/یا نرم شدن و تجزیه‌ی آن‌ها شوند. شکل کلاسیک حمله‌ی سولفاتی شامل سولفات‌های قلیایی مانند سدیم سولفات (Na_2SO_4) است که با پورتلندایست (CH)، مونوسولفات و C_3A واکنش می‌دهد تا گچ ($C\bar{S}H$) و اترینگایت ($C_6A\bar{S}_3H_{32}$) را تشکیل دهد که می‌تواند منجر به انبساط، ترک‌خوردگی و تضعیف بتن شود. با این حال مکانیزم دقیق انبساط و نقش گچ و اترینگایت در فرآیند تخریب هنوز مورد بحث است [۱۰]. با وجود خواص عالی کامپوزیت‌های سیمانی-پلی‌یورتان، هنوز مطالعه‌ی قابل توجهی بر روی واکنش این کامپوزیت‌ها در برابر حملات سولفات انجام نشده است. در صورتی که مقاومت ماده به حمله‌ی سولفاتی معیار اصلی در اندازه‌گیری‌های میزان ضدآب بودن ماده است. چون حمله‌ی سولفات رایج‌ترین فرآیند مخرب در ماتریکس سیمانی است. این فرآیند با تشکیل ترکیباتی با آب تبلور بالا و تشکیل سیستم اترینگایت-تائومازیت^۱ همراه است [۱۱]. به همین دلیل در این پژوهش بر بررسی خواص مکانیکی و فیزیکی کامپوزیت‌های سیمانی-پلی‌یورتانی در معرض حمله‌ی سولفات‌ها پرداخته شده است.

۲- روش تحقیق

سیمان مورد استفاده از کارخانه سیمان هگمتان همدان تهیه شد. به منظور ساخت کامپوزیت سرامیکی در این پژوهش از پلیمر پلی‌یورتان دوجزیی استفاده شد. این ماده تولید کشور ایران و شرکت شیمی بتن راحیل بود. چگالی پلیمر مورد استفاده از $1/1 - 1/5$ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود. برای ساخت کامپوزیت سرامیکی از ماسه به عنوان ماده پرکننده

¹ Taumasite



پژوهش از ارزیابی خواص مکانیکی و خواص فیزیکی استفاده شده است.

چگالی: چگالی نمونه‌های مورد بررسی پس از غوطه‌وری در محیط خورنده به مدت ۷۰ روز انجام شده است. به منظور محاسبه چگالی خام نمونه‌ها از رابطه ۱ استفاده می‌شود:

$$B = \frac{D}{M - S}$$

که در این رابطه D وزن خشک نمونه، M وزن نمونه در حالت اشباع و S وزن نمونه در حالت غوطه‌وری می‌باشد.

۷۰ روز غوطه‌ور شدند. نمونه‌های غوطه‌ور شده در ۱۰٪ NaOH با پیشوند N و نمونه‌های غوطه‌ور شده در الکترولیت ۱۰٪ H₂SO₄ با پیشوند H در Tag No. شناسایی می‌شوند. جداول ۱ تا ۴ مشخصات نمونه‌ها و نام‌گذاری آن‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به جداول فوق مشاهده می‌شود که ۳۶ نمونه با ترکیبات مختلف در این پژوهش تولید شدند. با توجه به مسیر پژوهش این نمونه‌های پس از تولید باید در دو محلول مهاجم غوطه‌ور شوند تا مشخصه‌یابی صورت بگیرد.

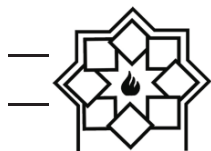
به منظور مشخصه‌یابی نمونه‌های مورد بررسی در این

جدول ۱- مقادیر مواد مورد استفاده در تولید نمونه‌های SCW (ماسه، سیمان و آب)

Tag No.	Water (mL)	Cement (gr)	Sand (gr)
SCW -۱	۴۹/۹۸	۹۶/۸	۲۹۰/۶۲
SCW -۲	۳۸/۷۵	۹۶/۸	۲۹۰/۶۲
SCW -۳	۵۸/۱۲	۹۶/۸	۲۹۰/۶۲
SCW -۴	۲۷/۶۸	۹۶/۸	۲۹۰/۶۲
SCW -۵	۳۱/۰۰	۹۶/۸	۲۹۰/۶۲
SCW -۶	۲۹/۰۶	۹۶/۸	۲۹۰/۶۲
SCW -۷	۵۳/۲۸	۹۶/۸	۲۹۰/۶۲
SCW -۸	۶۷/۸۱	۹۶/۸	۲۹۰/۶۲
SCW -۹	۸۲/۳۴	۹۶/۸	۲۹۰/۶۲

جدول ۲- مقادیر مواد مورد استفاده در تولید نمونه‌های SCP (ماسه، سیمان و پلیمر)

Tag No.	Polymer (mL)	Cement (gr)	Sand (gr)
SCP -۱	۴۹/۹۸	۹۶/۸	۲۹۰/۶۲
SCP -۲	۳۸/۷۵	۹۶/۸	۲۹۰/۶۲
SCP -۳	۵۸/۱۲	۹۶/۸	۲۹۰/۶۲
SCP -۴	۲۷/۶۸	۹۶/۸	۲۹۰/۶۲
SCP -۵	۳۱/۰۰	۹۶/۸	۲۹۰/۶۲
SCP -۶	۲۹/۰۶	۹۶/۸	۲۹۰/۶۲
SCP -۷	۵۳/۲۸	۹۶/۸	۲۹۰/۶۲
SCP -۸	۶۷/۸۱	۹۶/۸	۲۹۰/۶۲
SCP -۹	۸۲/۳۴	۹۶/۸	۲۹۰/۶۲



جدول ۳- مقادیر مواد مورد استفاده در تولید نمونه‌های CW (سیمان و آب)

Tag No.	Water (mL)	Cement (gr)
CW -۱	۴۰	۳۸۷/۵
CW -۲	۵۰	۳۸۷/۵
CW -۳	۶۰	۳۸۷/۵
CW -۴	۷۰	۳۸۷/۵
CW -۵	۸۰	۳۸۷/۵
CW -۶	۹۰	۳۸۷/۵
CW -۷	۱۰۰	۳۸۷/۵
CW -۸	۱۱۰	۳۸۷/۵
CW -۹	۱۸۷	۳۸۷/۵

جدول ۴- مقادیر مواد مورد استفاده در تولید نمونه‌های CP (سیمان و پلیمر)

Tag No.	Polymer (mL)	Cement (gr)
CP -۱	۴۰	۳۸۷/۵
CP -۲	۵۰	۳۸۷/۵
CP -۳	۶۰	۳۸۷/۵
CP -۴	۷۰	۳۸۷/۵
CP -۵	۸۰	۳۸۷/۵
CP -۶	۹۰	۳۸۷/۵
CP -۷	۱۰۰	۳۸۷/۵
CP -۸	۱۱۰	۳۸۷/۵
CP -۹	۱۸۷	۳۸۷/۵

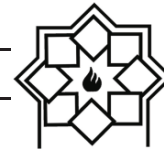
به منظور بررسی خواص مکانیکی نمونه‌های مورد بررسی در این پژوهش از آزمون فشار استفاده شد. در این بررسی نمونه‌هایی با ابعاد $5 \times 5 \times 5$ سانتی‌متر مکعب با استفاده از دستگاه فشار تک‌محوره تحت فشار قرار گرفتند. مدل دستگاه مورد استفاده Costom - 40 Ton بود.

۳- یافته‌ها و بحث

۳-۱- چگالی سنجی

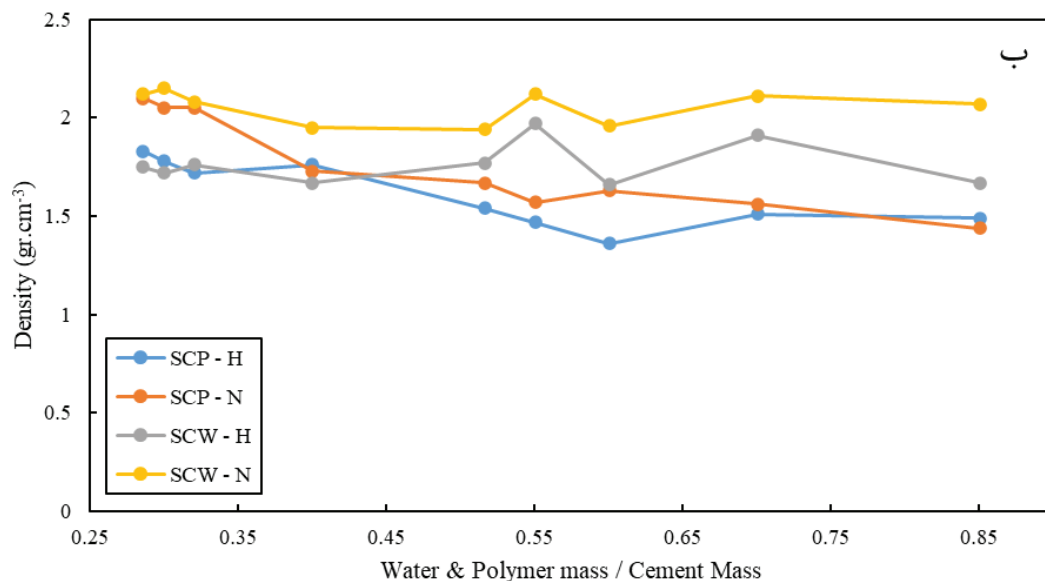
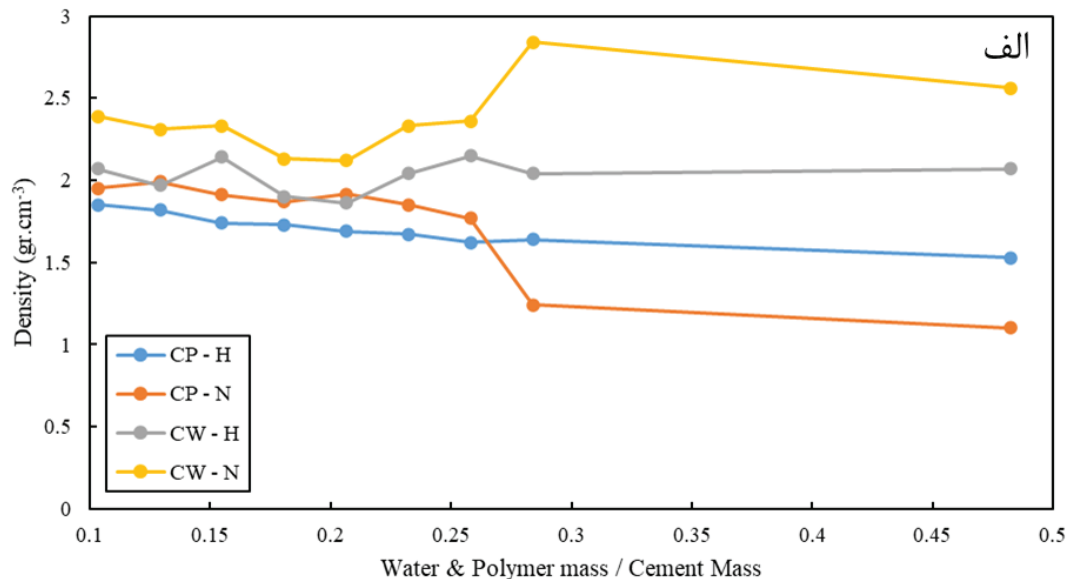
با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۱ الف مشاهده می‌شود که نمونه‌های تولید شده با آب نسبت به نمونه‌های تولید شده

یا پلی‌یورتان دارای چگالی بیش‌تری هستند. دلیل کاهش چگالی نمونه‌ها در اثر حضور پلی‌یورتان در ساختار بتن شروع واکنش ایزوسیانات با سیمان می‌باشد. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۱ ب مشاهده می‌شود در این نمونه‌ها نیز در صورت استفاده از پلیمر پلی‌یورتان چگالی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های تولید شده با آب کم‌تر می‌باشد. دلیل این پدیده نیز شروع واکنش ایزوسیانات با سیمان است. در این واکنش تمام زنجیره‌های پلیمری شکسته و اتصالات یورتانی تشکیل می‌شوند. این واکنش، یک واکنش گرمازا بوده و باعث تبخیر عامل‌های الکلی می‌گردد. این پدیده باعث حباب‌های



گرفته مشخص شده است که افزودن شیرابه‌های پلیمر در بتن به صورت کلی هیدراسیون سیمان را به تاخیر می‌اندازد. استفاده از پلیمر پلی‌یورتان در کامپوزیت‌های سیمانی باعث کاهش چگالی و افزایش مقادیر تخلخل می‌گردد.

هوا و تخلخل در ساختار نمونه‌های تولید شده با پلی‌یورتان می‌شود. بنابراین در صورت استفاده از پلیمر پلی‌یورتان به دلیل تشکیل حباب، چگالی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های تولید شده با آب کاهش پیدا می‌کند. بر اساس مطالعات صورت



شکل ۱- تغییرات چگالی نمونه‌ها که به مدت ۷۰ روز در الکترولیت‌های ۱۰٪ NaOH و ۱۰٪ H_2SO_4 غوطه‌ور بودند: (الف) سری CP و CW، (ب) سری SCP و SCW

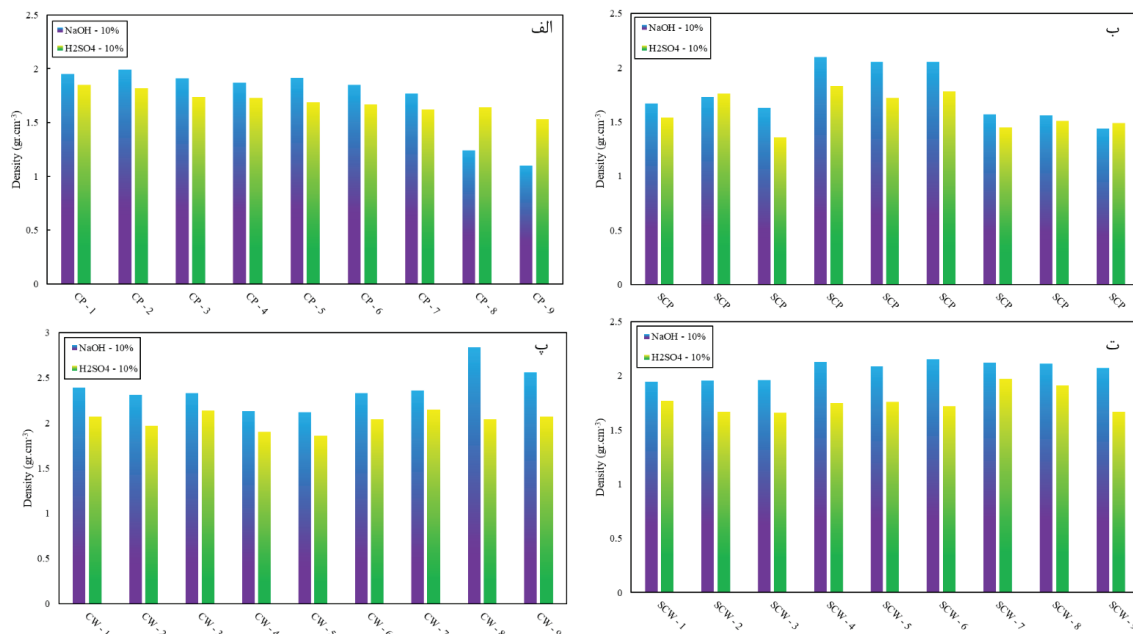


نشان می‌دهد. این نمونه‌ها با استفاده از سیمان و پلیمر پلی‌یورتان تشکیل شده‌اند. با توجه به نتایج ارائه شده در این شکل مشاهده می‌شود که چگالی نمونه‌های غوطه‌ور شده در الکترولیت سولفوریک اسید نسبت به نمونه‌های غوطه‌ور شده در سود سوزآور کاهش یافته است. سولفوریک اسید با Ca(OH)_2 واکنش داده و این امر منجر به تولید محصولاتی با چگالی کمتر می‌شوند که نتیجه این فرایند کاهش چگالی نمونه‌ها می‌باشد. در ادامه مشاهده می‌شود که در نمونه‌های شامل ماسه در این سری از نمونه‌ها اختلاف چگالی به دلیل غوطه‌وری در الکترولیت‌های مختلف ناچیز می‌باشد. به عبارتی حضور ماسه تاثیری در کاهش اختلاف چگالی نمونه‌ها در این سری نداشته است. این در حالی بود که حضور ماسه در نمونه‌های تولید شده با پلیمر پلی‌یورتان منجر به کاهش اختلاف چگالی در نمونه‌ها (SCP-7 تا SCP-9) شده بود.

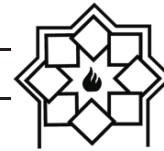
به عبارتی نمونه‌های تولید شده با پلیمر پلی‌یورتان ساختار حفره‌ای درشت‌تری در مقایسه با نمونه‌های اصلاح نشده مشابه را دارد. این پدیده ممکن است به دلیل اثر تاخیری پلیمر در هیدراسیون سیمان مربوط باشد. کاهش چگالی نمونه‌های تولید شده با پلیمر پلی‌یورتان نسبت به نمونه‌های تولید شده با آب می‌تواند به چگالی پایین پلیمر پلی‌یورتان در مقایسه با آب مربوط باشد.

به صورت کلی بتن‌های تولید شده با پلیمر پلی‌یورتان دارای وزن ویژه‌ی بالا می‌باشند و نمونه‌های تولید شده توسط این افزودنی دارای خواص حرارتی و صوتی بهتری می‌باشند. به عبارتی این نمونه‌ها به دلیل دارا بودن تخلخل بیش‌تر نرخ انتقال حرارت و انتقال صوت کم‌تری نسبت به نمونه‌های بالک دارند [۱۲].

شکل ۲ تغییرات چگالی نمونه‌های سری CP و CW و SCP SCW در اثر غوطه‌وری در الکترولیت‌های خورنده را



شکل ۲- چگالی نمونه‌ها که به مدت ۷۰ روز در الکترولیت‌های ۱۰٪ H_2SO_4 غوطه‌ور بودند: (الف) سری CP، (ب) سری SCP، (پ) سری CW، (ت) سری SCW



با توجه به این موضوع افزایش تخلخل در ساختار بتن به دلیل استفاده از پلیمر پلی‌یورتان می‌تواند منجر به تضعیف خواص مکانیکی نمونه‌ها (مانند سختی و استحکام فشاری) شود. این در حالی است که حضور تخلخل‌ها می‌تواند منجر به بهبود خواص حرارتی و صوتی بتن شود. بنابراین بسته به شرایط سرویس‌دهی نمونه‌ها می‌توان میزان تخلخل نمونه‌ها را کنترل کرد.

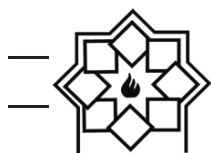
۳-۲- استحکام فشاری

شکل ۳ تغییرات استحکام فشاری نمونه‌های مختلف بر حسب مقادیر پلی‌یورتان و آب را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که استحکام نهایی نمونه‌های تولید شده با آب به صورت کلی بیش‌تر از استحکام نهایی نمونه‌های تولید شده با پلیمر می‌باشد. این در حالی است که در صورت استفاده از ۷۵ تا ۸۰ میلی‌لیتر آب یا پلیمر، استحکام نمونه‌های تولید شده با پلیمر بیش‌تر از نمونه‌های تولید شده با آب می‌باشد. به عبارتی عملکرد پلیمر پلی‌یورتان در مقادیر ذکر شده بهتر از آب می‌باشد. اما با افزایش بیش‌تر مایع (پلیمر یا آب) استحکام نمونه‌های تولید شده با آب افزایش پیدا می‌کند. در نهایت مشاهده می‌شود که با افزایش بیش‌تر مایعات (هم پلیمر و هم آب)، استحکام نهایی نمونه‌ها یک شیب نزولی را طی می‌کند. به عبارتی در تولید نمونه‌های فاقد ذرات تقویت‌کننده (ماسه)، افزایش مقادیر پلیمر و یا آب استحکام نهایی نمونه‌ها به صورت کلی افت پیدا می‌کند. استفاده بیش از حد از آب و یا پلیمر منجر به ایجاد جدایش و شکاف در ساختار بتن می‌گردد به همین دلیل است که در صورت استفاده بیش از حد از آب و پلیمر در این نمونه‌ها مقادیر استحکام فشاری نمونه‌ها کاهش پیدا کرده است.

با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۳ مشاهده می‌شود که استحکام نهایی نمونه‌های تولید شده با آب دارای افت و خیزهای بسیاری می‌باشد. این موضوع می‌تواند به انجام واکنش میان آب و سیمان و تولید محصولات واکنش مختلف در مقادیر مختلف آب مربوط باشد. به عبارتی ممکن است با تغییر در مقدار آب، محصولات واکنش تولید شده حاصل از واکنش آب و سیمان، متغیر باشند.

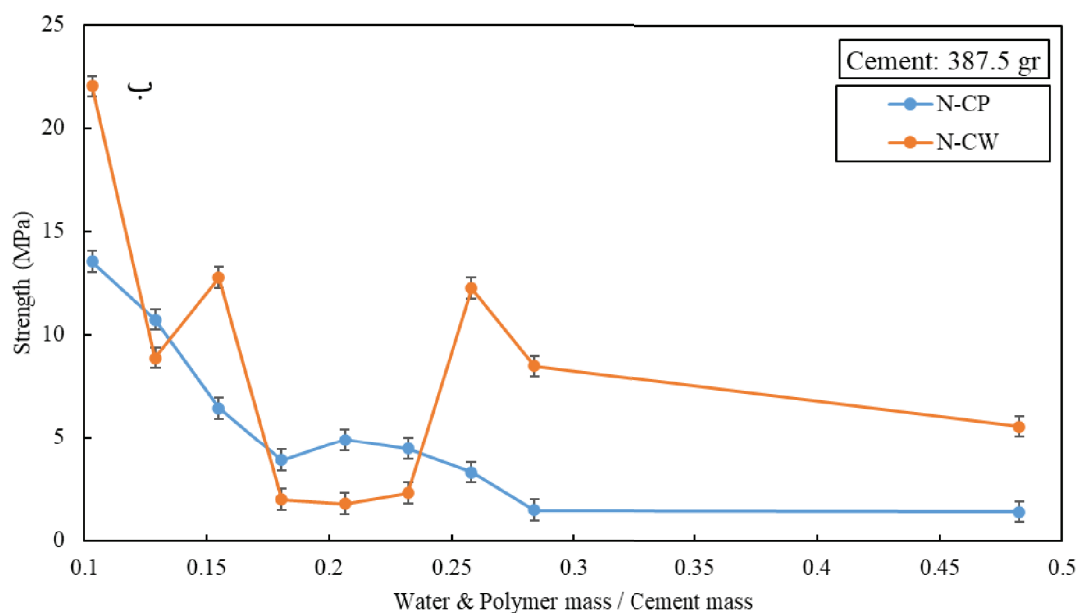
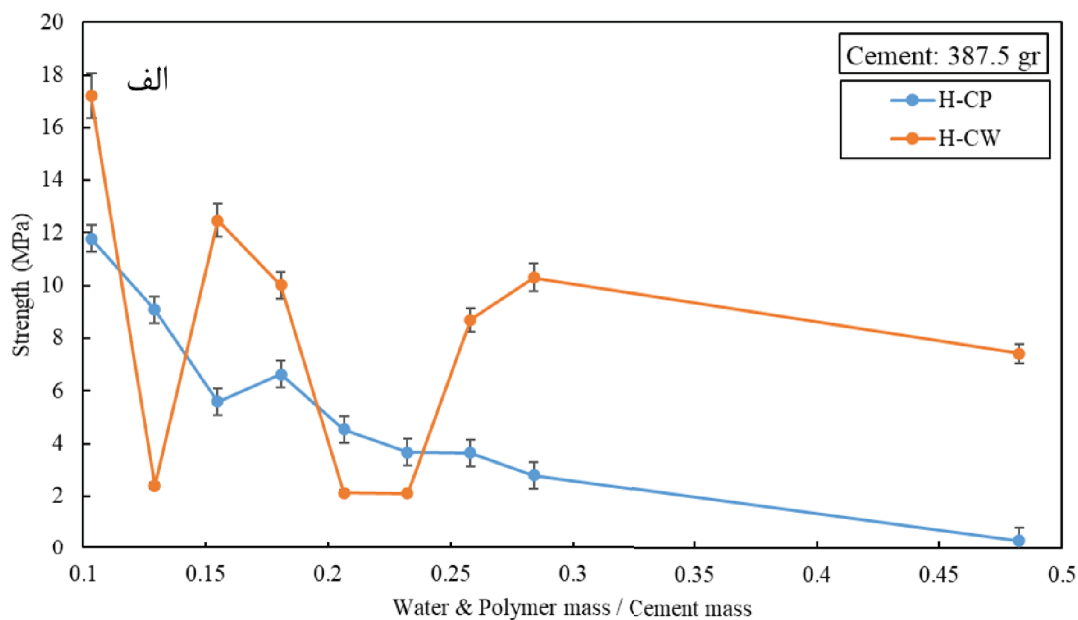
دلیل استحکام بالاتر نمونه‌های تولید شده با آب نسبت به نمونه‌های تولید شده با پلیمر، وجود یک مرحله انجام واکنش‌های شیمیایی میان آب و بتن می‌باشد که منجر به بهبود پیوند و استحکام مکانیکی بتن می‌گردد. در این فرایند عناصر موجود در ساختار سیمان در مرحله اول اکسید شده و در مرحله دوم کربنیزه می‌شوند. پس از کربونیزاسیون تمام عناصر گروه عاملی کربن ایجاد شده و منجر به ایجاد ترکیب آلایت (C_3S)، عامل $Ca(OH)_2$ می‌شوند. تمام این واکنش‌ها گرمازا بوده و منجر به افزایش دمای سیستم می‌شوند. این فرایند منجر به افزایش استحکام فشاری نمونه می‌شود.

یکی دیگر از دلایل تضعیف استحکام نمونه‌های تولید شده با پلیمر نسبت به نمونه‌های تولید شده با آب، بحث وجود تخلخل داخل ساختار نمونه‌های تولید شده با پلیمر می‌باشد. با توجه به موارد ارائه شده در قسمت‌های قبلی مشاهده شد که در اثر حضور پلی‌یورتان در ساختار سیمان، ایزوسیانات با سیمان شروع به واکنش می‌کند. در این واکنش تمام زنجیره‌های پلیمری پلی‌یورتان شکسته شده و اتصالات یورتانی شکل می‌گیرند. این فرایند، یک واکنش گرمازا بوده و منجر به تبخیر عامل‌های الکلی موجود در سیستم می‌شود. این پدیده باعث ایجاد حباب‌های هوا و تخلخل‌های بسیاری



به کاهش استحکام فشاری نمونه‌ها می‌گردد. حضور حفرات در بتن منجر به دام افتادن هوا درون ساختار نمونه‌ها شده و باعث کاهش استحکام نمونه‌ها شده است.

در ساختار بتن‌های تولید شده با پلی‌یورتان می‌شود. با توجه به این شرایط می‌توان گفت که استفاده از پلی‌یورتان به عنوان جایگزین آب به دلیل افزایش حباب داخل ساختار بتن، منجر

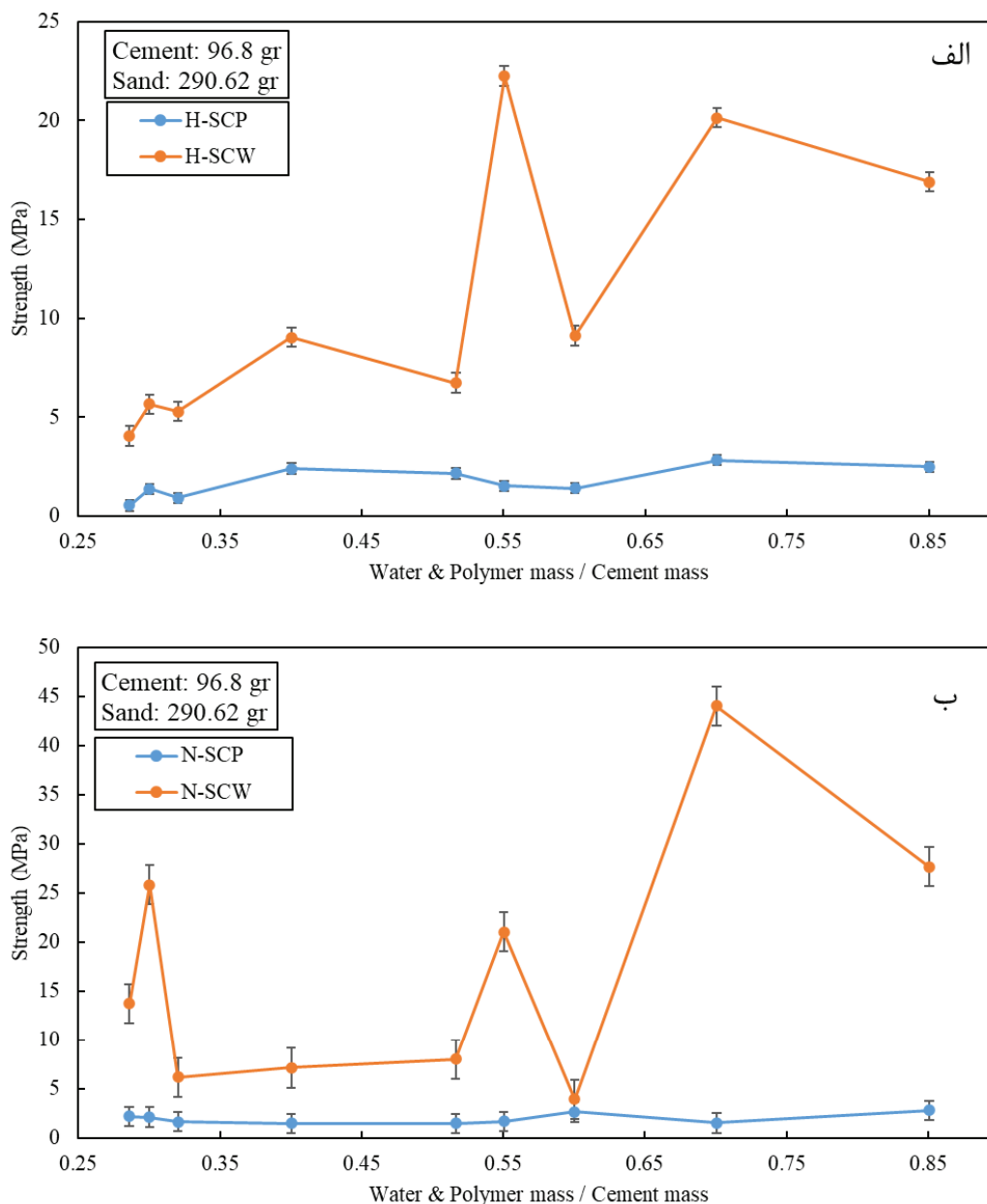


شکل ۳- تغییرات استحکام نمونه‌ها بر حسب تغییرات مقادیر آب و پلی‌یورتان برای نمونه‌های فاقد ذرات ماسه الف) نمونه‌های غوطه‌ور شده در سولفوریک اسید ۱۰ درصد ب) نمونه‌های غوطه‌ور شده در سود سوزآور ۱۰ درصد



در این نمونه‌ها در تمام مقادیر پلیمر و آب استحکام نهایی نمونه‌های تولید شده با آب بیش‌تر از نمونه‌های تولید شده با پلیمر می‌باشد.

شکل ۴ تغییرات استحکام فشاری نمونه‌های تولید شده با ماسه برحسب تغییرات مقادیر پلیمر و آب را نشان می‌دهد. باتوجه به نتایج ارائه شده در این شکل مشاهده می‌شود که



شکل ۴- تغییرات استحکام نمونه‌ها بر حسب تغییرات مقادیر آب و پلی‌یورتان برای نمونه‌های شامل ذرات ماسه (الف) نمونه‌های غوطه‌ور شده در سولفوریک اسید ۱۰ درصد (ب) نمونه‌های غوطه‌ور شده در سود سوزآور ۱۰ درصد



دلیل بهبود استحکام فشاری نمونه‌های تولید شده با آب در قسمت فوق تشریح شده است. با توجه به نتایج ارائه شده مشاهده می‌شود که در این نمونه‌ها با افزایش مقادیر آب استحکام فشاری نمونه‌ها افزایش پیدا کرده و در ادامه با افزایش بیش‌تر آب استحکام فشاری کاهش پیدا می‌کند.

ذرات ماسه در ساختار بتن می‌توانند توسط چهار مکانیزم منجر به بهبود خواص مکانیکی بتن‌ها شوند [۱۳]. اولین مکانیزم مورد استفاده جهت تحلیل افزایش استحکام فشاری بتن‌های کامپوزیتی ناشی از افزودن ذرات تقویت‌کننده (ماسه) مکانیزم اوروان^۱ می‌باشد. نظریه اوروان در این زمینه به این شرح می‌باشد که در حضور ذرات تقویت‌کننده (ماسه)، موانعی در برابر حرکت نابه‌جائی‌ها ایجاد می‌شود که این خود منجر به قفل شدن نابه‌جائی‌ها و در نتیجه افزایش استحکام بتن می‌شود [۱۳، ۱۴]. طبق این نظریه حضور یکنواخت ذرات ماسه در زمینه سیمان منجر به قفل شدن نابه‌جائی‌ها و در نتیجه باعث افزایش استحکام فشاری بتن شده است.

مکانیزم دومی که در خصوص افزایش استحکام کامپوزیت‌ها بحث می‌کند در ارتباط با اندازه دانه می‌باشد. طبق رابطه هال-پچ^۲ با افزایش اندازه دانه استحکام ماده کاهش پیدا می‌کند. در کامپوزیت‌ها با حضور ذرات تقویت‌کننده و پراکندگی یکنواخت آن‌ها، ریزساختار ریزدانه‌تر شده و در نتیجه سختی و استحکام نمونه بر اساس رابطه هال-پچ افزایش پیدا می‌کند. دلیل کاهش اندازه کریستالیت در حضور ذرات ماسه، این است که برخی از ذرات خود به عنوان عامل جوانه‌زا عمل کرده و محل شکل‌گیری

کریستالیت‌های بتن می‌شوند. در نتیجه محل‌های بسیاری برای جوانه‌زنی ایجاد می‌شوند که منجر به کاهش اندازه دانه و بهبود استحکام مکانیکی بتن می‌شود [۱۵].

مکانیزم سوم مربوط به عدم انطباق ضریب انبساط حرارتی زمینه سیمان و ذرات ماسه می‌باشد. ضریب انبساط حرارتی زمینه و تقویت‌کننده بایکدیگر برابر نبوده و لذا در صورت تغییر دما، تغییر حجم ذرات و زمینه با یکدیگر برابر نخواهد شد. این موضوع منجر به افزایش بی‌نظمی و نابجائی در سیستم شده و در نهایت باعث افزایش استحکام و سختی بتن می‌شود [۱۵، ۱۶].

مکانیزم چهارم مربوط به کرنش ناهمسان^۳ در فصل مشترک ماسه (الاستیک) و سیمان (پلاستیک) می‌باشد. این مورد نیز یکی دیگر از دلایل افزایش استحکام بتن‌های کامپوزیتی می‌باشد [۱۷].

با توجه به موارد فوق مشخص است که حضور ذرات ماسه در ساختار بتن‌های کامپوزیتی تقویت شده با ذرات ماسه منجر به بهبود خواص مکانیکی بتن‌های تولید شده نسبت به حالت فاقد ذرات ماسه شده است.

شکل ۵ تغییرات استحکام نمونه‌ها با تغییر در محیط غوطه‌وری برای نمونه‌های سری CP و CW (نمونه‌های فاقد ذرات تقویت‌کننده) را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج ارائه شده مشاهده می‌شود که در نمونه‌های سری CP، استحکام نمونه‌های غوطه‌ور شده در سود سوزآور بیش‌تر از استحکام نمونه‌های غوطه‌ور شده در سولفوریک اسید می‌باشد. این موضوع برای نمونه‌های تولید شده با آب

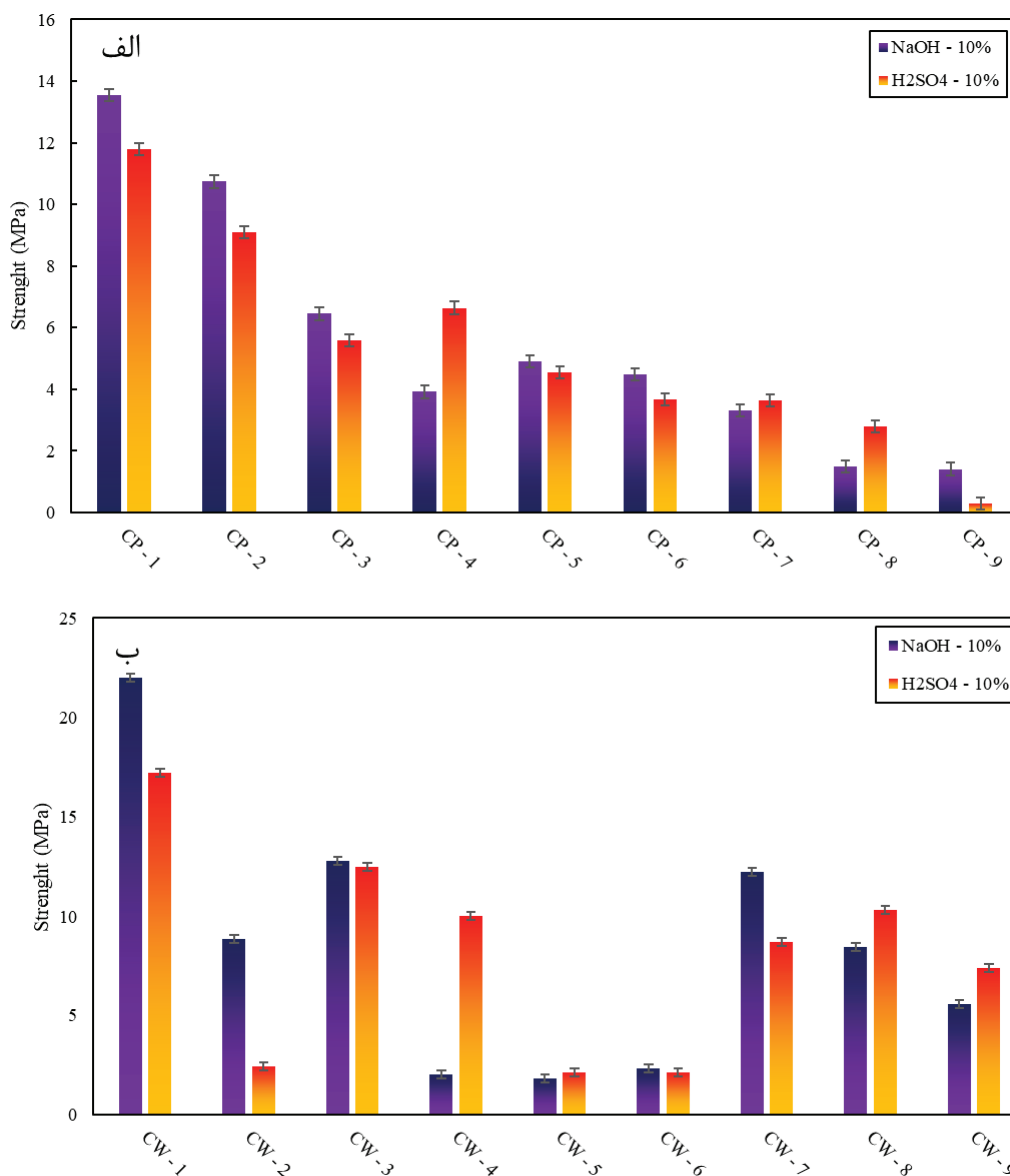
³ -Strain Misfit

¹ -Orowan Mechanism

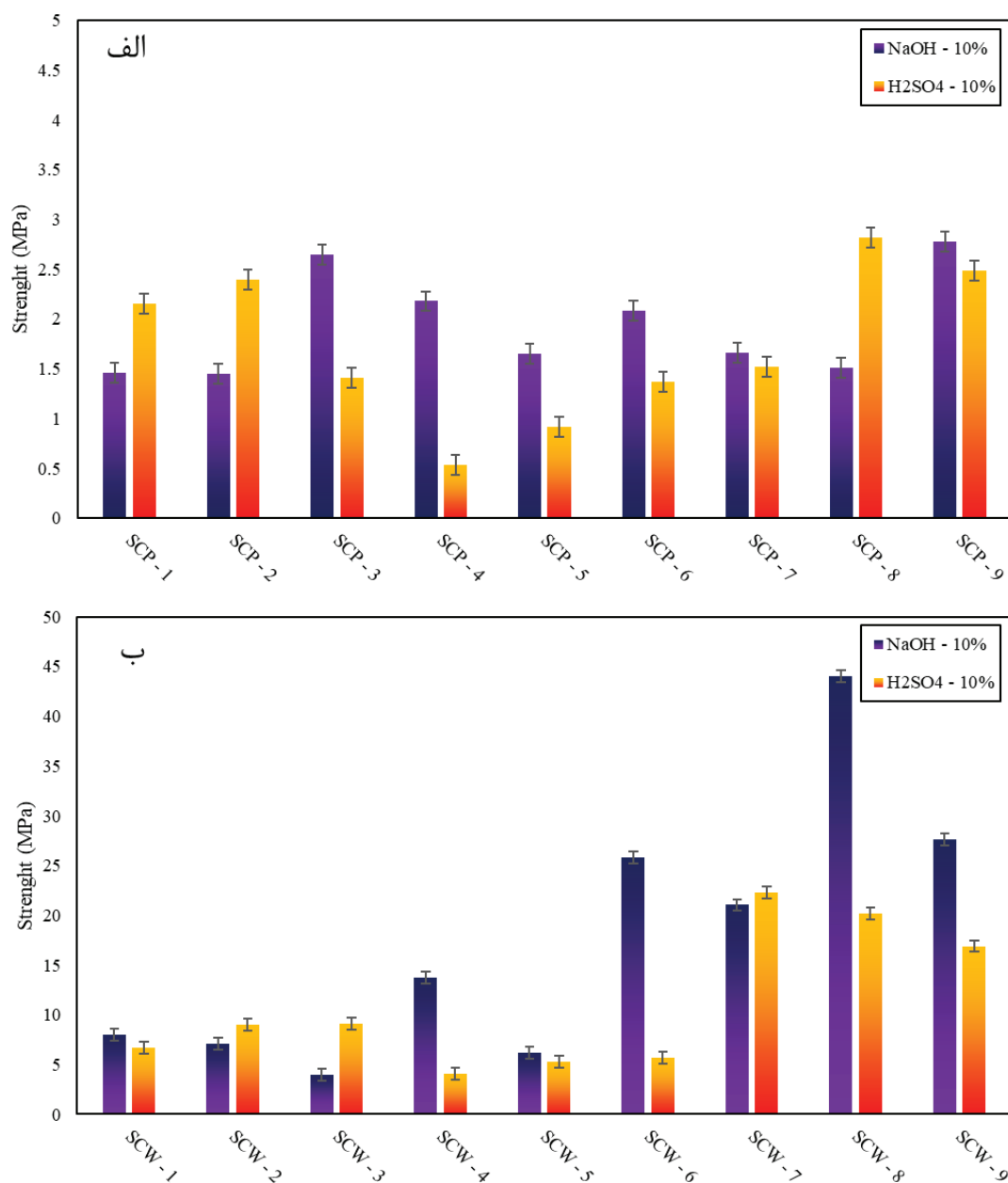
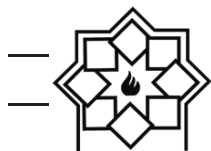
² -Hall-Petch



نیز صادق می‌باشد. شکل ۶ تغییرات استحکام نمونه‌های غوطه‌ور شده در سولفوریک اسید و سود سوزآور برای نمونه‌های سری SCP و SCW را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج ارائه شده در این تصاویر نیز مشاهده می‌شود که نمونه‌های غوطه‌ور شده در سولفوریک اسید دارای استحکام فشاری کم‌تری نسبت به نمونه‌های غوطه‌ور شده در سود سوزآور هستند.



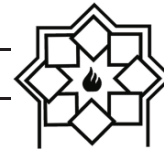
شکل ۵- تغییرات استحکام نمونه‌های غوطه‌ور شده در الکترولیت‌های خورنده مختلف (الف) برای نمونه‌های CP (ب) برای نمونه‌های CW



شکل ۶- تغییرات استحکام نمونه‌های غوطه‌ور شده در الکترولیت‌های خورنده مختلف (الف) برای نمونه‌های SCP (ب) برای نمونه‌های SCW

سوزآور به انجام واکنش میان بتن و سولفوریک اسید مربوط می‌باشد که در این نمونه‌ها تشکیل برخی محصولات به صورت متخلخل و تشکیل ترکیبات گچی منجر به کاهش استحکام

این موضوع در نمونه‌های SCW کاملاً مشهود می‌باشد. دلیل تخریب بیش‌تر خواص مکانیکی نمونه‌های غوطه‌ور شده در سولفوریک اسید نسبت به نمونه‌های غوطه‌ور شده در سود



نهایی نمونه‌ها می‌شوند

۴- نتیجه‌گیری

(۱) نتایج آزمون چگالی‌سنجی نشان داد که چگالی نمونه‌های تولید شده با آب نسبت به نمونه‌های تولید شده با پلیمر در حدود ۳۰ الی ۴۰ درصد بیش‌تر می‌باشد. چگالی نمونه‌های غوطه‌ور شده در سولفوریک اسید در حدود ۱۰ الی ۲۰ درصد از نمونه‌های غوطه‌ور شده در سود سوزآور کم‌تر می‌باشد.

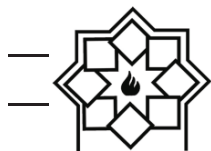
(۲) نتایج آزمون فشار نشان داد که نمونه‌های تولید شده با آب دارای رفتار شکست تردتری نسبت به نمونه‌های تولید شده با پلیمر پلی‌یورتان هستند و در صورت استفاده از ماسه و تولید نمونه‌های بتنی کامپوزیتی، استحکام نمونه‌ها افزایش ۷۵ درصدی از خود نشان می‌دهند. در نمونه‌های تولید شده با پلی‌یورتان که فاقد ذرات تقویت‌کننده ماسه هستند (نمونه‌های سری CP) با افزایش مقدار پلی‌یورتان از مقدار ۴۰ میلی‌لیتر تا ۱۸۷ میلی‌لیتر، استحکام نمونه‌ها ۹۵ درصد افت می‌کند. همچنین در نمونه‌های CW با افزایش مقدار آب از ۴۰ میلی‌لیتر تا حدود ۹۰ میلی‌لیتر استحکام ۸۰ درصد کاهش و پس از آن با افزایش مقدار آب تا حدود ۱۱۰ میلی‌لیتر استحکام بهبود پیدا می‌کند. بهبود استحکام در حدی نیست که بتواند به استحکام نمونه‌های تولید شده با ۴۰ میلی‌لیتر آب برسد.

(۳) نتایج آزمون استحکام فشاری نشان داد که نمونه‌های تولید شده با آب نسبت به نمونه‌های تولید شده با پلی‌یورتان از استحکام فشاری بالاتری برخوردار هستند. استحکام نمونه‌های کامپوزیتی تولید شده با

پلی‌یورتان مستقل از تغییرات مقدار پلی‌یورتان می‌باشد و نتایج آزمون استحکام فشاری نشان داد که استحکام نمونه‌های غوطه‌ور شده در الکترولیت سولفوریک اسید به صورت کلی در حدود ۲۰ الی ۳۰ درصد ضعیف‌تر از استحکام نمونه‌های غوطه‌ور شده در الکترولیت سود سوزآور هستند.

مراجع

- [1]. P. Łukowski and D. Dębska, "Effect of polymer addition on performance of Portland cement mortar exposed to sulphate attack," *Materials*, vol. 13, no. 1, p. 71, 2019.
- [2]. C. Venkatesh, R. Nerella, and M. S. R. Chand, "Experimental investigation of strength, durability, and microstructure of red-mud concrete," *Journal of the Korean Ceramic Society*, vol. 57, no. 2, pp. 167-174, 2020.
- [3]. G. Demircan, M. Kisa, M. Ozen, and B. Aktas, "Surface-modified alumina nanoparticles-filled aramid fiber-reinforced epoxy nanocomposites: preparation and mechanical properties," *Iranian Polymer Journal*, vol. 29, pp. 253-264, 2020.
- [4]. M. M. Rahman, M. A. Islam, and M. T. Uddin, "Excellent durability of epoxy modified mortars in corrosive environments," *Journal of polymer engineering*, vol. 36, no. 1, pp. 79-85, 2016.
- [5]. H. M. Al-Baghdadi, "Experimental study on sulfate resistance of concrete with recycled aggregate modified with polyvinyl alcohol (PVA)," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 14, p. e00527, 2021.
- [6]. Z. Lei, Z. Wenhua, C. Yuan, Z. Wanting, and Z. Yunsheng, "Research on the dynamic impact performance of polyurethane cement-based composite,"



- size and texture on Hall-Petch relationship for a magnesium alloy," *Scripta Materialia*, vol. 65, no. 11, pp. 994-997, 2011/12/01/ 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2011.08.028>.
- [16]. N. A. Belov, D. G. Eskin, and A. Aksenov, *Iron in aluminium alloys: impurity and alloying element*. CRC Press, 2014.
- [17]. C. M. Rejil, I. Dinaharan, S. J. Vijay, and N. Murugan, "Microstructure and sliding wear behavior of AA6360/(TiC+B₄C) hybrid surface composite layer synthesized by friction stir processing on aluminum substrate," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 552, pp. 336-344, 2012/08/30/ 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.05.049>.
- [7]. M. Wu, X. Hu, Z. Hu, Y. Zhao, W. Cheng, and W. Lu, "Two-component polyurethane healing system: effect of different accelerators and capsules on the healing efficiency of dynamic concrete cracks," *Construction and Building Materials*, vol. 227, p. 116700, 2019.
- [8]. D. V. Marques *et al.*, "Cemental composites with polyurethane and recycled polyvinyl chloride: The influence of industrial waste addition on flammability," *Polymer Composites*, vol. 42, no. 8, pp. 3799-3811, 2021.
- [9]. J. Skalny, J. Marchand, and I. Odler, "Sulfate attack on concrete," Taylor & Francis, 2003.
- [10]. M. Bassuoni and M. Nehdi, "Durability of self-consolidating concrete to sulfate attack under combined cyclic environments and flexural loading," *Cement and Concrete Research*, vol. 39, no. 3, pp. 206-226, 2009.
- [11]. G. Yakovlev *et al.*, "Influence of sulphate attack on properties of modified cement composites," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 18, p. 8509, 2021.
- [12]. S. A. Kaplan, "Factors affecting the relationship between rate of loading and measured compressive strength of concrete," *Magazine of Concrete Research*, vol. 32, no. 111, pp. 79-88, 1980.
- [13]. D. Lloyd, "Particle reinforced aluminium and magnesium matrix composites," *International materials reviews*, vol. 39, no. 1, pp. 1-23, 1994.
- [14]. Z. Zhang and D. L. Chen, "Contribution of Orowan strengthening effect in particulate-reinforced metal matrix nanocomposites," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 483-484, pp. 148-152, 2008/06/15/ 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.10.184>.
- [15]. W. Yuan, S. K. Panigrahi, J. Q. Su, and R. S. Mishra, "Influence of grain

Investigating the Physical and Mechanical Properties of Cement-Based Composites Reinforced with Ceramic and Polymer Exposed to Sulfate Attack

Reza Rezvanizadeh¹, Shahab Kazemi^{2*}, Rezvan Lak¹

¹ Bu-Ali Sina University

² Associate Professor, Bu-Ali Sina University

* Shahab.kazemi@basu.ac.ir

Abstract: In this research, the cement base composite reinforced with sand was produced by water and poly-polyurethane. In order to investigate the destructive effect of corrosive environments, the samples produced in different amounts of water, polyurethane polymer and sand were immersed in 10% caustic soda and 10% sulfuric acid electrolytes for 70 days. Next, in order to characterize the samples after immersion, the samples were examined by mechanical and physical evaluations including densitometry test and pressure test. The results of the densitometry test showed that the density of the samples immersed in sulfuric acid is about 10-20% lower than the samples immersed in caustic soda. The results of the pressure test showed that the strength of water produced samples is higher than the samples produced with polyurethane polymer. On the other hand, it was found that if sand is used and composite concrete samples are produced, the strength of the samples increases by 75%. The results of the compressive strength test showed that the strength of samples immersed in sulfuric acid electrolyte is generally 20-30% weaker than the strength of samples immersed in caustic soda electrolyte.

Keywords: Concrete composites, Compressive strength, Density, Sulfuric acid, Caustic soda.