

## تأثیر استفاده از چسباننده‌های قلیافعال بر دوام بتن سبک سازه‌ای در برابر محیط‌های آسیب‌رسان

آرش شاهانی<sup>۱\*</sup>، جمال احمدی<sup>۲</sup>، بهزاد سعیدی رضوی<sup>۳</sup>

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۲۶

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۲۷

### چکیده

استفاده از مصالح سنگی سبک و چسباننده‌های قلیافعال جایگزین شن و سیمان در تولید بتن سبب جلوگیری از انتشار بیشتر گازهای گلخانه‌ای، صرفه جویی در انرژی و کاهش بارهای مرده سازه می‌گردد. در این پژوهش از درشت دانه متخلخل از جنس سنگ لاوا جهت کاهش چگالی بتن و نیز از سرباره و خاکستر بادی قلیافعال، به عنوان مصالح جایگزین سیمان پرتلند استفاده شده است. فعال‌سازی قلیایی پوزولان‌ها توسط محلول‌های سدیم هیدروکسید ۱۴ مولار و سدیم سیلیکات با نسبت جرمی ۱ به ۲ انجام گرفته است. تهاجم یون‌های کلراید، سولفات و ترکیب سولفات و کلراید، در برنامه آزمایشگاهی در نظر گرفته شده‌اند. بتن، با سرباره قلیافعال و نسبت‌های مختلف سرباره و خاکستر بادی جهت فعال‌سازی قلیایی و سیمان پرتلند هیدراته نیز جهت معیار مقایسه انتخاب شده‌اند. با توجه به آزمایش‌های صورت گرفته، بتن با سیمان پرتلند در برابر تهاجم ترکیبی با نزدیک ۱۰٪ کاهش در مقاومت فشاری سریع‌ترین زوال را داشته، بیشترین مقاومت فشاری را بتن قلیافعال سرباره‌ای به میزان ۵۵ MPa داشته و با افزایش جایگزینی خاکستر بادی، مشخصات مکانیکی کوتاه مدت ضعیف‌تر شده اما با کاهش افت جذب آب به طور متوسط به مقدار حدوداً ۱۲٪ دوام طولانی مدت و محافظت از آرماتور مدفون در بتن افزایش می‌یابد.

**کلید واژه‌ها:** بتن قلیافعال، دوام، بتن سبک، محیط مهاجم، خوردگی آرماتور.

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد عمران سازه، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. Mail: arash.shahani@znu.ac.ir

۲. دانشیار، عضو هیأت علمی دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

۳. استادیار پژوهشی، عضو هیأت علمی پژوهشگاه استاندارد، کرج، ایران.

\*.مسئول مکاتبات.

## ۱. مقدمه

مطالعه بهفرنیا و رستمی (بهفرنیا و رستمی، ۲۰۱۸) نشان داد افزایش نسبت محلول قلیایی به سرباره تا مقدار ۰/۵، سبب افزایش مقاومت فشاری بتن قلیافعال سرباره‌ای می‌گردد. چندین مطالعه نشان داده‌اند که استفاده از سرباره فعال‌سازی شده به وسیله محلول‌های سدیم هیدروکسید (NaOH) و سدیم سیلیکات ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )، به مراتب جذب آب و نفوذپذیری را در مقایسه با بتن OPC افزایش می‌دهد (Glukhovskiy, 1994; Shi and Fernández-Jiménez, 2006; Pacheco-Torgal et al., 2014; Yang et al., 2015).

همچنین پژوهش‌هایی بر روی ملات‌های قلیافعال متشکل از سرباره و خاکستر بادی نیز صورت گرفته که نشان دهنده رفتار مقاوم‌تر آن‌ها در مقایسه با بتن OPC در برابر تهاجم‌های سولفاتی می‌باشند (Ismail et al., 2013; Wang et al., 2015; Valencia et al., 2016; Albitar et al., 2017). با افزایش مولاریته سدیم هیدروکسید و افزایش نسبت جرمی سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید ( $\frac{\text{Na}_2\text{SiO}_3}{\text{NaOH}}$ ) تا مقدار ۲، مشخصات مکانیکی بتن قلیافعال سرباره-خاکستر بادی، افزایش می‌یابد (Duxson et al., 2007). در نتایج پژوهش واردهونو و همکاران (Wardhono et al., 2015) نشان داده شده است که در بتن قلیافعال ساخته شده با ترکیب سرباره و خاکستر بادی، با نزدیک شدن نسبت ترکیب Blast Furnace Slag (BFS) و Fly Ash (FA) مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. نتایج پژوهش ساریدیمیر و چلیکتن (Saridemir and Çelikten, 2020) نشان داد که استفاده از نسبت‌های برابر سرباره و خاکستر بادی، ضمن فعال‌سازی توسط سدیم سیلیکات ( $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Na}_2\text{O}} = 2/3$ ) و سدیم هیدروکسید (۶ مولار)، دوام بتن را نسبت به بتن سبک OPC در برابر عوامل حرارتی و شیمیایی بالاخص سولفات‌ها افزایش می‌دهد. جو و همکاران (Jo et al., 2007) نیز در مطالعه خود بر روی بتن‌های قلیافعال سبک بر پایه خاکستر بادی، از مقاومت فشاری و دوام مناسب در برابر سیکل‌های یخ زدگی و خشک شدگی در مقدار ۰/۶٪ حباب هوا در بتن گزارش نمود. حمله سولفات یک مسئله حیاتی در مورد عملکرد ملات و بتن است که منجر به انبساط و کاهش مقاومت بیش از حد می‌شود

بتن یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین مصالح ساختمانی می‌باشد که به دلیل شکل‌پذیری مناسب، ارزان بودن و در دسترس بودن مصالح و مواد اولیه، مقاومت در برابر آتش و سهولت تولید در صنعت ساخت و ساز مورد استقبال زیادی قرار گرفته است (Rashad, 2014). سیمان به عنوان یکی از اجزای تشکیل دهنده بتن، حدود ۷ تا ۱۵ درصد از حجم بتن را تشکیل می‌دهد و نقش چسباننده سنگدانه‌های بتن را به عهده دارد (Mehta and Monteiro, 2014). تولید سیمان با مصرف مقدار زیادی انرژی همراه است (دمای مورد نیاز کوره برای پخت  $1450-1550^\circ\text{C}$  می‌باشد) علاوه بر این عواقب زیست محیطی دیگری را نیز به همراه دارد (Taylor, 1990). متغیر بودن دوام بتن OPC در برابر تهاجم محیطی نیز بستر مناسب جهت مطالعه و استفاده از چسباننده‌های جایگزین سیمان پرتلند معمولی را فراهم کرده است. محدوده وسیعی از مواد خام طبیعی، محصولات صنعتی و آلومینوسیلیکات‌های بازیافت شده می‌توانند به عنوان اجزای چسباننده‌های قلیایی مورد استفاده قرار گیرند. از جمله چسباننده‌های قلیایی می‌توان به متاکائولین، پوزولان‌ها، سرباره کوره بلند، سرباره فسفر، خاکستر بادی و ترکیبی از دو یا مقدار بیشتری از این مواد اشاره کرد. از جمله مزایای بتن قلیافعال در مقایسه با بتن با سیمان پرتلند معمولی، سرعت مناسب درکسب مقاومت، مقاومت فشاری بالا، مقاومت مناسب در برابر حملات شیمیایی و مقاومت در برابر چرخه‌های یخ و ذوب می‌باشد (Yang et al., 2015). از طرف دیگر، خوردگی سازه‌های بتن آرمه و زوال بتن توسط یون‌هایی مانند کلراید و سولفات یکی از مهم‌ترین آسیب‌های موجود در صنعت ساخت و ساز بوده و هست. قرارگیری بتن در معرض یون‌های کلراید و سولفات سبب تضعیف ژل سیمان و خوردگی آرماتور خواهد شد. نفوذ یون‌های کلراید در بتن و از بین رفتن لایه اکسیدی فعال در اطراف آرماتورها عامل شروع خوردگی آرماتور در سازه‌های بتنی اجرا شده در نواحی ساحلی می‌باشد (Habert, 2013).

(and Narasimhan, 2016). همچنین دوام در برابر کلراید بهتری در بتن قلیافعال تحت تهاجم یون کلراید مشاهده شده است (Fernández-Jiménez et al., 2007). افزایش مقاومت در قرارگیری در معرض یون کلراید، به ساختار منافذ بتن (Zhu et al., 2014) و ترکیبات ژل (Ismail et al., 2013) نسبت داده شده است. مقاومت بیشتر بتن AAS در مقایسه با بتن OPC به عدم وجود هیدروکسید کلسیم در AAS نسبت داده شده است (Shi et al., 2003). این مشاهده، با ضریب انتشار کلر کمتر مشاهده شده در AAS مرتبط است (Ismail et al., 2013). با توجه به پژوهش های صورت گرفته در این زمینه و وجود برخی خلأهای تحقیقاتی، بررسی و مقایسه مشخصات مکانیکی و دوام بتن های سبک OPC و Alkali Activated Slag (AAS) در برابر تهاجم محلول سدیم کلراید، منیزیم سولفات و ترکیب، همچنین سنجش شدت خوردگی آرماتور مدفون در بتن ها، در دستور کار برنامه پژوهشی قرار گرفت.

## ۲. مواد و روش ها

### ۲-۱ مصالح مصرفی

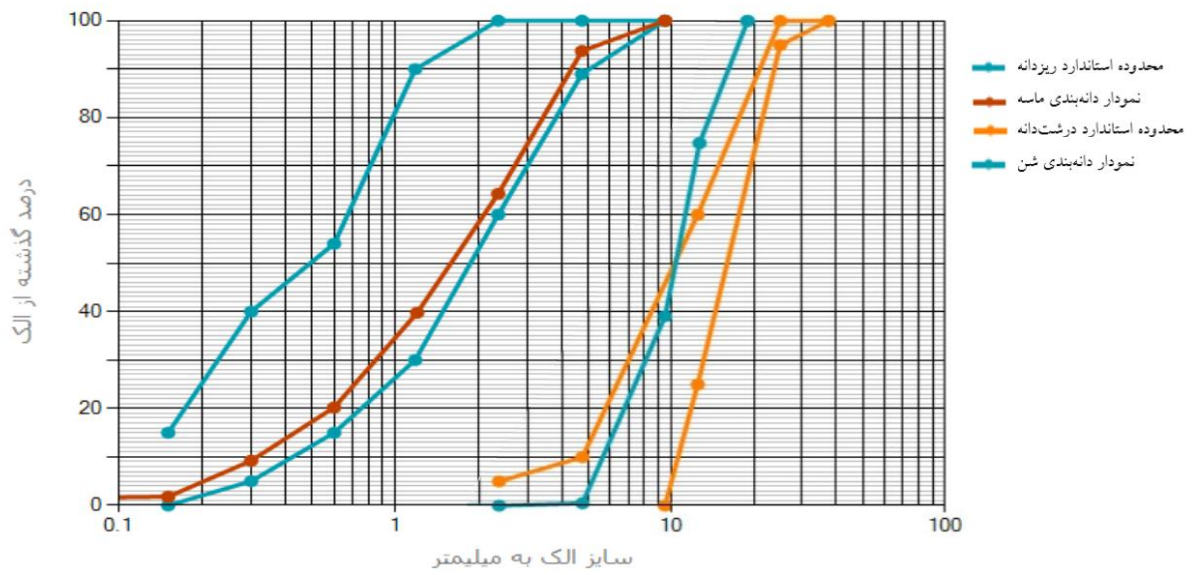
به منظور کاهش چگالی بتن از دامنه چگالی بتن معمولی (۲۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب) در این پژوهش از درشت دانه متخلخل از جنس سنگ لاوا در محدوده اندازه ۴/۷۵ تا ۱۹/۵ میلیمتر (D50) شن در محدوده ۱۰ میلیمتر می باشد) استفاده شده است که از معدن پوکه معدنی شهرستان قروه واقع در استان کردستان تهیه گردید و دانه بندی آن در شکل ۱ نشان داده شده است. از ماسه طبیعی شسته شده با قطر بیشینه ۴/۷۵ میلیمتر (D50) ماسه در محدوده ۱/۷ میلیمتر می باشد) و مدول نرمی ۳/۷ در تولید بتن استفاده شد که از ماسه شویی بنیاد بتن واقع در شهرستان زنجان تهیه گردید و دانه بندی ماسه مصرفی نیز در شکل ۱ نشان داده شده است. بررسی آزمایشگاهی سنگدانه ها صورت گرفت و مشخصات فیزیکی به دست آمده از سنگدانه ها در جداول ۱ و ۲ به نمایش درآمده است. خاکستر بادی محصول فرعی سوخت ذغال سنگ است که شامل سیلیس، آلومین و اکسیدهای آهن و کلسیم است. خاکستر بادی در

(Atahan and Dikme, 2011). به خوبی نشان داده شده است که ملات و بتن با ترکیب پوزولان ها مقاومت در برابر حمله سولفات را در مقایسه با ملات Ordinary Portland Cement (OPC) و بتن حاوی  $C_3A$  بهبود می بخشد (Bondar, 2009). باخارف (Bakharev, 2005)، بیشترین نرخ تجزیه شدن ساختار بتن را در محلول  $Na_2SO_4$  مشاهده کرد که مهاجرت قلیاها به محلول را مهمترین عامل گزارش نموده است. از سوی دیگر، مهاجرت قلیاها به محلول و همچنین انتشار  $Mg^{2+}$  و  $Ca^{2+}$  روی سطوح در تهاجم محلول  $MgSO_4$  مشاهده شد. این پدیده به ویژه برای نمونه های فعال شده توسط  $Na_2SiO_3$  و مخلوط  $NaOH$  و  $KOH$  واضح تر بوده است. کمترین تغییر مقاومت، برای نمونه هایی که در محلول ترکیبی غوطه ور شده بودند ( $Na_2SO_4+MgSO_4$ ) اتفاق افتاده بود. از سوی دیگر، مقاومت بیشتری در برابر حمله سولفات برای بتن فعال شده با خاکستر بادی کم کلسیم توسط رانگان (Rangan, 2008) گزارش شده است. کیم و همکاران (Kim et al., 2014) گزارش نمودند که قرارگیری نمونه های بتن قلیافعال به مدت ۲۸ روز در معرض سولفات، سبب افزایش ۲/۵ درصدی وزن نمونه ها می شود که علت آن پودر سفیدی است که در درون و روی سطوح نمونه ها تشکیل می شود. علی رغم برخی مباحث در خصوص مقاومت چسباننده های قلیافعال در برابر تهاجم سولفات، می توان نتیجه گرفت که چسباننده های قلیافعال می توانند به طور قابل توجهی در برابر تهاجم سولفات از خود مقاومت نشان دهند. مانگات و همکاران (Mangat et al., 2021) در مطالعه خود عنوان داشتند که اختلاف پتانسیل الکتریکی آرماتور مدفون در بتن قلیافعال در معرض تهاجم کلراید، اعداد کوچکتری را در مقایسه با بتن OPC ارائه می نماید. شیخ (Shaikh, 2014) نیز نتایج مشابهی ارائه نمود. کریونکو و همکاران (Krivenko et al., 2021) پا را فراتر گذاشته و در یکی از آخرین مطالعات خود بر خوردگی آرماتور، از آب دریا (سولفات و کلراید) به عنوان فعالساز در تولید بتن قلیافعال بهره برده و مقایسه های ریز ساختاری را نیز در دستور کار خود داشته است. مطالعات نشان داد که بتن AAS ضریب انتشار کلراید کمتری نسبت به بتن OPC دارد (Mithun

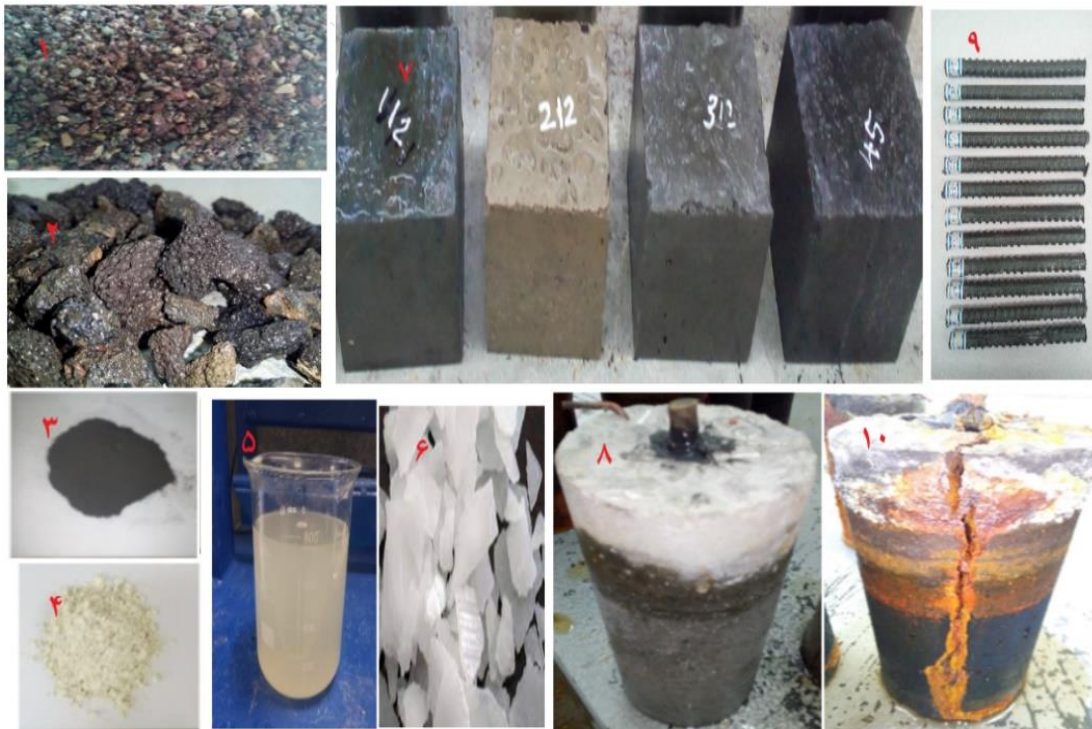
این پژوهش خاکستر بادی کلاس F مطابق با استاندارد ASTM C618 (ASTM Committee C-09, 2013) از شرکت فرافزون شیمی اصفهان تهیه گردید و مشخصات شیمیایی محصول در جدول ۳ نمایش داده شده است. سیمان مصرفی در این پروژه تحقیقاتی، از نوع سیمان پرتلند تیپ دو تهیه شده از کارخانه سیمان کردستان می باشد و مشخصات فنی محصول در جدول ۳ نشان داده شده است. از سدیم هیدروکسید جامد پرک از گرید صنعتی شرکت شاهین با خلوص بالای ۹۸ درصد و سدیم سیلیکات پاکسیل ۲۵ به صورت محلول آماده با نسبت  $\frac{SiO_2}{Na_2O}$  برابر ۲/۵ از شرکت صنایع شیمیایی باوند تهیه گردید که اطلاعات محصول نیز در جدول ۴ نمایش داده شده است. در این پژوهش از ابر روان کننده BA115 شرکت بهسازان بر پایه پلی کربوکسیلات اتر جهت تأمین اسلامپ ۷/۵ الی ۱۰ سانتی متر، تنها در ساخت بتن با سیمان پرتلند استفاده شده است. همچنین از آرماتور نوع AIII-ST37 آجدار با قطر ۱۰ میلیمتر به طول  $155 \pm 5$  میلیمتر، تهیه شده از محل بازار آهن شهرک صنعتی شهرستان زنجان و مفتول مسی به قطر ۳ میلیمتر، تهیه شده از بازار محلی مس شهرستان زنجان، در تولید نمونه های بتنی جهت سنجش خوردگی آرماتور استفاده شده است. در شکل ۲ برخی مصالح مصرفی و نمونه های قبل از تهاجم و بعد از خوردگی آرماتور به نمایش گذاشته شده اند که عبارت اند از: ۱- ماسه شسته شده، ۲- درشت دانه متخلخل، ۳- خاکستر بادی، ۴- سرباره، ۵- محلول سود ۱۴ مولار، ۶- سود پرک (سدیم هیدروکسید)، ۷- نمونه بتنی مکعبی از چپ به راست طرح های اختلاط اول تا چهارم، ۸- نمونه بتنی استوانه ای  $10 \times 20$  سانتی متری آرماتوردار، ۹- بخشی از آرماتورهای مصرفی و ۱۰- ترک خوردگی بتن در پایان آزمایش خوردگی تسریع یافته.

انواع C و F وجود دارد. واکنش خاکستر بادی با هیدرواکسید کلسیم  $Ca(OH)_2$  حاصل از هیدراتاسیون سیمان پرتلند و تولید C-S-H موجب پر شدن منافذ بتن شده و همچنین باعث افزایش دوام بتن در مقابل محیط های مهاجم می گردد. نفوذپذیری کمتر، عملکرد مناسب در برابر پدیده کربناتاسیون، مقاومت در برابر سولفات ها و کلریدها و نیز کنترل واکنش قلیایی سنگدانه ها از مزایای استفاده از این ماده است. سرباره کوره های آهن گدازی که به وسیله جریان آب با فشار زیاد سرد می شوند به صورت سرباره دانه ای تبدیل می شوند و حالت شیشه ای پیدا می کنند که از نظر شیمیایی در ترکیب با اجزای سیمان به صورت فعال در می آیند. واکنش آب با سرباره دانه ای که نرمی آن به اندازه ذرات سیمان باشد، بسیار ضعیف است و به سختی می توان آن را به عنوان یک اتصال دهنده هیدرولیکی مستقل در نظر گرفت، ولی با افزودن فعال کننده ای مثل هیدروکسید سدیم میل ترکیبی سرباره با آب زیاد می شود. در این حالت واکنش های ترکیبی همانند سیمان پرتلند می باشد و تنها تفاوتش این است که واکنش با سرعت کمتری صورت می پذیرد. لازم به ذکر است خاکستر بادی و سرباره به کار رفته در بتن های قلیا فعال و ژئوپلیمر، همراه با سیمان پرتلند نبوده و واکنش زایی آن ها در حضور محلول قلیایی نظیر سدیم هیدروکسید و سدیم متاسیلیکات ماده چسباننده اصلی برای کنار هم قرار دادن سنگدانه ها را ایجاد می کند.

سرباره مورد استفاده در این پژوهش از کوره بلند آهن گدازی کارخانه ذوب آهن اصفهان تهیه شد و دارای وزن مخصوص  $2750$  کیلوگرم بر مترمکعب و سطح مخصوص آن  $2200$  سانتی متر مربع بر گرم از نوع پودری است که خصوصیات شیمیایی آن در جدول ۳ نشان داده شده است. ماده پوزولانی جامد آلومینوسیلیکاتی مورد استفاده در تولید بتن قلیا فعال در



شکل ۱. نمودار دانه بندی شن و ماسه.



شکل ۲. مصالح مصرفی و نمونه های قبل از تهاجم و بعد از خوردگی آرماتور.

جدول ۳. مشخصات سیمان، خاکستر بادی و سرباره.

Composition	Slag	Fly ash	OPC
%CaO	35.5	0.7	64
%SiO <sub>2</sub>	34.6	87.86	21.5
%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.3	6.76	4.69
%MgO	11.5	1.16	1.54
%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.73	0.99	4.32
%MnO	0.92		
%TiO <sub>2</sub>	3.4		
%SO <sub>3</sub>	1.09		
%Na <sub>2</sub> O			0.17
%K <sub>2</sub> O			0.56
L.O.I		4.17	0.9
Blaine (cm <sup>2</sup> /gr)	2200		3250
Specific gravity (kg/m <sup>3</sup> )	2750		

جدول ۱. مشخصات ماسه طبیعی.

2.51	Specific weight
5.87	Natural moisture %
3.84	SSD moisture %
4.75	D <sub>MAX</sub> (mm)
3.7	Fineness modulus

جدول ۲. مشخصات شن متخلخل.

6.09	Natural moisture %
8.59	SSD moisture %
847	Bulk density-OD (kg/m <sup>3</sup> )
899	Bulk density-SSD (kg/m <sup>3</sup> )
1880	density (kg/m <sup>3</sup> )
19.5	D <sub>MAX</sub> (mm)

جدول ۴. مشخصات محلول فعال ساز سدیم سیلیکات پاکسیل ۲۵.

$\frac{SiO_2}{Na_2O}$	Na <sub>2</sub> O (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Water (%)	Density (gr/cm <sup>3</sup> )	Viscosity (cPs)	Appearance
2.5 ± 0.05	13-13.89	32.59-34.64	52	1.543-1.576	600-1500	Opaque

## ۲-۲ طرح اختلاط

طرح اختلاط‌های این پژوهش بر اساس آیین نامه ACI 211.2-98 (Prester et al., 1998) تدوین گردیده است. پس از چندین آزمون و خطا، طرح اختلاطی که فرضیات اولیه پژوهش مانند کسب مقاومت سازه‌ای و کارایی مناسب (اسلامپ ۷/۵ تا ۱۰ سانتی‌متر) را تأمین نمود انتخاب شد. عیار سیمان پرتلند در طرح معیار، ۶۰۰ کیلوگرم در مترمکعب و نسبت آب به سیمان با توجه به محدودیت آیین‌نامه‌های ACI 211.2-98 و ACI 211.1-91 (Dixon et al., 1991) در خصوص بتن‌های در معرض تهاجم شدید برابر ۰/۳۵ انتخاب شد. با محاسبه مقادیر درشت‌دانه و ریزدانه این مقادیر برای هر ۴ طرح اختلاط ثابت در نظر گرفته و تنها با تغییر نوع ماده چسباننده، نوع بتن‌ها تغییر می‌نمایند. نظر به انتخاب عیار ۶۰۰

کیلوگرم در مترمکعب سیمان پرتلند، مقدار کل ماده چسباننده شرکت کننده در تولید بتن‌های قلیافعال نیز همین مقدار در نظر گرفته شده است. با این تفاوت که در سیمان پرتلند هیدراته تنها ماده خشک، سیمان پرتلند است ولی در سرباره و خاکستر بادی قلیافعال، ماده خشک شرکت کننده در تولید ماده چسباننده، شامل ماده شبه سیمانی (سرباره و خاکستر بادی) بعلاوه‌ی مقدار ماده خشک موجود در محلول‌های فعال ساز می‌باشد. نتایج به دست آمده از مطالعه بهفرنیا و همکاران (بهفرنیا و همکاران، ۲۰۱۸)، نسبت‌های ۰/۴۵ و ۰/۵ محلول قلیایی به سرباره را به عنوان مقادیر بهینه در تولید بتن قلیافعال سرباره‌ای معرفی نمود. بر این اساس در این پژوهش نسبت محلول‌های قلیایی به مواد پوزولانی معادل ۰/۴۵ انتخاب شده است و نسبت جرمی محلول سدیم سیلیکات به محلول سدیم هیدروکسید معادل ۲

نشانگر بتن قلیافعال سرباره ای و S3F1 نشانگر بتن قلیافعال با نسبت مواد پوزولانی ۳:۱ می باشد. این نسبت ها با توجه به نتایج مطالعه ساریدمیر و کلیکتن (Saridemir and Çelikten, 2020) انتخاب شده است.

### ۳-۲ روش ساخت نمونه ها، عمل آوری و برنامه انجام آزمایش ها

ابتدا اجزا مخلوط ها با هم ترکیب شد. در حین اختلاط اطمینان حاصل شد که ترکیب اجزا یکدست شده و مخلوط همگن و هموژنی را ارائه نموده است. سپس نمونه برداری طبق برنامه آزمایشگاهی انجام شد. قالب های پر شده تحت محافظت پلاستیک به مدت ۲۴ ساعت در شرایط عادی آزمایشگاه در دمای  $20 \pm 4$  درجه سانتی گراد نگهداری شد. سپس قالب ها باز شده و نمونه ها پس از توزین به حوضچه عمل آوری با آب به دمای  $20 \pm 2$  درجه سانتی گراد منتقل گردیده و تا سن ۷ روز در آب نگهداری شدند. بتن ها در سن ۷ روزه که بتن های قلیافعال بخش قابل توجهی از مقاومت خود را کسب نموده اند از حوضچه عمل آوری خارج گردیده و پس از توزین و اجرای آزمایش های ۷ روزه، نمونه های هر طرح به سه دسته برابر تقسیم شده و به سه حوضچه تهاجم درون محلول به دمای  $20 \pm 2$  منتقل گردید و تا سن ۹۰ روز تحت تهاجم ماندند.

جدول ۶. مشخصات محیط های مهاجم (٪ محلول).

SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	MgSO <sub>4</sub>	NaCl	Invasion environment
+				
-	6.06	-	10	Sodium chloride (aq)
7.98	-	10	-	Magnesium sulfate (aq)
7.98	6.06	10	10	Combined environment

سپس پس از ۲۱ و ۸۳ روز غوطه وری در محلول ها، آزمایش های مربوطه بر روی نمونه ها صورت گرفت. عمق آرماتور مدفون در نمونه های بتنی استوانه ای بطور میانگین  $15 \pm 0.5$  سانتی متر بوده و در برنامه آزمایشگاهی، اختلاف سطح آزاد سیال مهاجم و انتهای مدفون

می باشد. با توجه به سطح خشن درشت دانه ها مقدار آب کل نیز با اندکی تغییر جهت تأمین اسلامپ مورد نظر ۲۱۰ کیلوگرم در مترمکعب انتخاب شده است. با این حال در بتن با سیمان پرتلند معمولی این مقدار نیز اسلامپ را تأمین ننموده است. بدین ترتیب در طرح اختلاط کنترل (C) با سیمان پرتلند، مقدار ۰/۰۵٪ جرم سیمان، فوق روان کننده افزوده شده است. مجموع مقادیر محلول های فعال ساز برابر ۰/۴۵ مقدار ماده شبه سیمانی می باشد. این مقادیر با توجه به نتایج پژوهش ریو و همکاران (Ryu et al., 2013) انتخاب گردید.

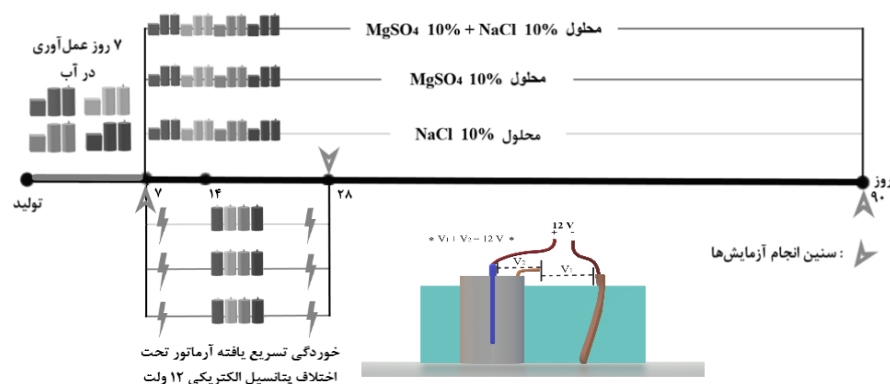
جدول ۵ جزئیات طرح اختلاط های مورد بررسی این پژوهش را نمایش می دهد. نماد هر طرح اختلاط با یک عبارت حاوی ترکیبی از اعداد و حروف لاتین نمایش داده شده است. به این ترتیب که تک حروف لاتین نمایانگر نوع سیمان یا پوزولان و جدول ۵. جزئیات طرح های اختلاط پژوهش.

Mix	1	2	3	4
Symbol	C	S	S3F1	S1F1
(water Binder)	0.35	0.35	0.35	0.35
(Alkali solution Pozzolan)	-	0.45	0.45	0.45
Coarse Aggregate (kg/m <sup>3</sup> )	581	581	581	581
Fine Aggregate (kg/m <sup>3</sup> )	710	710	710	710
Portland cement (kg/m <sup>3</sup> )	600	-	-	-
Slag (kg/m <sup>3</sup> )	-	496	372	248
Fly ash (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	124	248
Sodium hydroxide 14M (kg/m <sup>3</sup> )	-	74.4	74.4	74.4
Sodium silicate (kg/m <sup>3</sup> )	-	148.8	148.8	148.8
Total water (kg/m <sup>3</sup> )	210	210	210	210
Added water (kg/m <sup>3</sup> )	210	90.88	90.88	90.88

یک عدد نمایانگر نسبت مواد تشکیل دهنده ماده چسباننده است. در عبارات ترکیبی نیز همین قاعده رعایت شده است. عبارات C و S و F به ترتیب نمایانگر سیمان پرتلند، سرباره و خاکستر بادی می باشند. بدین شکل به عنوان مثال عبارت S

آرما تور، از سه محیط مهاجم مخرب با غظت‌های زیاد استفاده شده است. حجم محلول مخرب بیش از ۷ برابر حجم بتن تحت تهاجم محیط در نظر گرفته شده و هر ۳۰ روز محلول‌ها تعویض شدند. جهت جلوگیری از تبخیر سطحی نیز سطح حوضچه‌های تهاجم با پلاستیک پوشانیده شد. جدول ۶ مشخصات محیط‌های مهاجم را نمایش می‌دهد.

آرما تور، حداقل ۱۰ سانتی متر در نظر گرفته شد. به همین جهت از سن ۷ روز در حوضچه‌های کوچک‌تر جداگانه، نمونه‌های استوانه‌ای دارای آرما تور و مفتول مسی تا ارتفاع  $1 \pm 17$  سانتی متر درون محلول قرار گرفته و با اتصال به مبدل برق مستقیم، تحت آزمایش خوردگی تسریع یافته آرما تور قرار داده شدند. شکل ۳ نمودار شماتیک از نحوه انجام و برنامه زمانی مطالعات آزمایشگاهی را نمایش می‌نماید. آزمایش‌های مورد نظر، زمان بندی، تعداد و ابعاد نمونه‌ها در جدول ۷ معرفی شده است. در این پژوهش جهت بررسی و مقایسه مشخصات مکانیکی، خصوصیات دوام بتن‌ها و توانایی مقابله پوشش بتن از خوردگی



شکل ۳. خط زمانی طرح پژوهش و شماتیک آزمایش خوردگی تسریع یافته آرما تور.

جدول ۷. آزمایش‌های برنامه پژوهش برای هر طرح اختلاط.

Total samples	Sample per test	Invasion env.	Tests ages (d)	Sample dimensions (cm)	Tests
21	3	3	7-28-90	10×10×10 Cube	Compressive strength
21	3			20×10 Cylinder	Tensile strength
14	2			10×10×10 Cube	Water absorption
6	2		7 to 28	20×10 Cylinder	Accelerated corrosion

سنگدانه‌ها بر اساس استاندارد ASTM C128-88 (ASTM C128, 2015) انجام شد. آزمایش‌های مقدماتی بر روی بتن تازه از قبیل آزمایش اسلامپ بر اساس روش ذکر شده در استاندارد ASTM C143 (ASTM C143, 2012) صورت گرفت و چگالی نمونه‌ها نیز به وسیله اندازه‌گیری جرم نمونه‌های مکعبی  $10 \times 10 \times 10$  سانتی متری انجام شد. همچنین بررسی مقاومت

#### ۲-۴ روش انجام آزمایش‌ها

جرم واحد حجم کوبیده شن که به چگالی توده‌ای نیز شناخته می‌شود بر اساس استاندارد ASTM C29 (ASTM C29, 2017)، اندازه‌گیری گردید. آزمایش چگالی نسبی سنگدانه‌ها در حالت اشباع با سطح خشک (SSD) و درصد جذب آب



گردید. اتصال قطب مثبت به آرماتورها به گونه ای بوده است که اختلاف پتانسیل ایجاد شده بر سر آرماتورها، یکسان و برابر ۱۲ ولت باشد. پس از ۲۱ روز، با پایان آزمایش، نمونه ها از جریان الکتریکی جدا شده، شکسته شده و آرماتور مدفون درون آن ها خارج، تمیز و توزین گردیده و درصد خوردگی آن نسبت به جرم اولیه محاسبه گردید. محلول های سدیم کلراید، منیزیم سولفات و ترکیب هر دو آن ها در این آزمایش هر ۷ روز تعویض گردیده و حجم محلول ها نیز بیش از ۴ برابر حجم بتن تحت تهاجم آن ها بوده است. دمای سیال های مهاجم در طول برنامه زمانی پژوهش  $20 \pm 2$  درجه سانتی گراد و ثابت بوده به همین جهت می توان از تأثیر اختلاف دما یا نوسان سطح انرژی کل سیستم بر سرعت واکنش های بتن در تهاجم محیطی صرف نظر نمود. جهت جلوگیری از تبخیر سطحی و تغییر غلظت ناشی از آن در سیال مهاجم، سطح حوضچه های تهاجم به وسیله پلاستیک پوشانده شد.

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳-۱/ اسلامپ و چگالی بتن

نتایج آزمایش های ابتدایی بر روی بتن تازه و سخت شده در جدول ۸ به نمایش درآمده است. همانگونه که قابل مشاهده است، بتن قلیافعال سرباره ای (AAS) با عیار چسباننده برابر با بتن OPC کارایی کمتری داشته و با افزایش جایگزینی خاکستر بادی در بتن قلیافعال سرباره ای، کارایی و اسلامپ بتن افزایش یافته است.

#### جدول ۸. نتایج اسلامپ طرح های اختلاط.

Mix	Symbol	Slump (cm)	Dry concrete density (kg/m <sup>3</sup> )
1	C	8.8-9.5	1925-2038
2	S	7.2-7.9	1933-2034
3	S3F1	8.3-9.8	1778-2001
4	S1F1	9.2-10	1808-1936

فشاری بتن ها بر اساس استاندارد BS 1881 (1993) (BS 1881) و مقاومت کششی نیز به روش جداشدگی استوانه مطابق با استاندارد ASTM C496 (2004) (ASTM C496) انجام شده اند. آزمایش جذب آب نمونه های بتنی بر اساس اندازه گیری جرم خشک و جرم اشباع با سطح خشک نمونه ها، از رابطه ی (۱) محاسبه شده است.

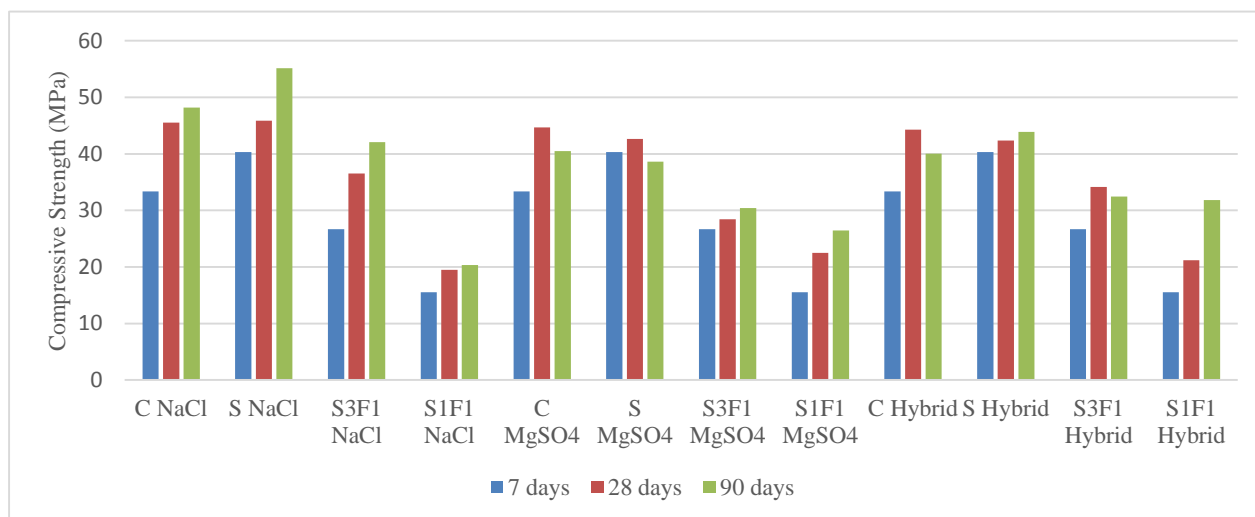
$$(1) \quad \text{درصد جذب آب} = \frac{B-A}{A} \times 100$$

در رابطه ی (۱)، B نشان دهنده جرم نمونه در حالت اشباع با سطح خشک و A نشان دهنده جرم خشک نمونه می باشد. جرم خشک نمونه پس از خشک کردن نمونه ها در گرمخانه با درجه حرارت  $5 \pm 110$  درجه سانتی گراد به مدت ۲۴ ساعت اندازه گیری شده و جرم اشباع با سطح خشک پس از ۲۴ ساعت غرقاب شدن نمونه ها و خشک شدن سطح آن ها پس از خروج از آب، اندازه گیری شده است. در بررسی شدت خوردگی آرماتور مدفون در بتن، از آزمایش خوردگی تسریع یافته آرماتور استفاده شده است. شماتیک انجام این آزمایش در شکل ۳ نشان داده شده است. به این ترتیب که نمونه های استوانه ای دارای آرماتور و مفتول مسی پس از ۷ روز عمل آوری در آب درون ظروف حاوی محلول مهاجم تا ارتفاع  $1 \pm 17$  سانتی متر قرار گرفتند. درون هر محفظه یک ورق مسی به ضخامت ۲ میلی متر و ابعاد حدودی  $20 \times 10$  سانتی متر تا عمق مشابه نمونه ها درون محلول قرار گرفت. به کمک سیم برق روکش دار قطب مثبت مبدل برق AC-DC را به سر بیرونی آرماتورهای مدفون در بتن ها متصل کرده و قطب منفی به ورق مسی متصل

### ۳-۲ مقاومت فشاری

کاهش ۴ درصدی در S و افزایش ۱۴ درصدی در S3F1 می‌گردد. بیشترین تغییرات با میزان ۷۰ درصد افزایش مقاومت فشاری به طرح اختلاط S1F1 و بیشترین مقاومت فشاری پس از تهاجم سولفات نیز به طرح اختلاط C با ۴۰/۴۸ مگاپاسکال تعلق دارد. آغاز افت مقاومت فشاری بتن در طرح اختلاط C و تهاجم سولفات در سن ۹۰ روز قابل مشاهده بوده و در مقایسه با سن ۲۸ روزه خود، ۹/۳ درصد از مقاومت فشاری خود را از دست داده است. علت آن نیز احتمالاً تحلیل فازهای چسباننده بتن OPC و تشکیل مواد ثانویه نظیر اترینگایت و گچ می‌باشد. مایثون و ناراسیمهان (Mithun and Narasimhan, 2016) نتایج مشابهی در خصوص تغییرات اندک مقاومت فشاری بتن AAS در تهاجم سولفات و افزایش نرخ تغییر مقاومت فشاری با افزایش حضور خاکستر بادی در بتن AAS ارائه نموده‌اند.

همانگونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود در طول ۸۳ روز تهاجم یون کلراید، کسب مقاومت و فرآیندهای هیدراتاسیون و پلیمریزاسیون ادامه داشته تا جایی که در مقایسه مقاومت فشاری ۷ روزه و ۹۰ روزه، طرح اختلاط C با ۸۱/۵ درصد افزایش مقاومت فشاری، S با ۳۶٪ افزایش، S3F1 با ۵۷٪ افزایش و S1F1 نیز با ۳۱٪ افزایش نسبت به مقاومت فشاری ۷ روزه، افزایش مقاومت از خود نشان دادند. در این میان بیشترین نرخ افزایش مقاومت فشاری ۷ روزه تا ۹۰ روزه بتن‌های قلیافعال مربوط به طرح S3F1 با ۵۷٪ افزایش و بیشترین مقاومت فشاری بهره برداری در پایان ۹۰ روز مربوط به طرح S با بیش از ۵۵ مگاپاسکال می‌باشند. تهاجم سولفات تا سن ۹۰ روز سبب افزایش نسبی ۲۱ درصدی مقاومت فشاری در طرح اختلاط C،



شکل ۴. تغییرات مقاومت فشاری در محیط‌های آسیب رسان.

### ۳-۳ مقاومت کششی

نموده اما هیدراتاسیون سیمان در بتن OPC تا سن ۹۰ روز ادامه داشته است. بیشترین مقاومت کششی نهایی در میان بتن‌های قلیافعال با ۳/۴۵ مگاپاسکال در طرح اختلاط S دیده شد که تنها ۸۰٪ از مقدار مقاومت کششی C را در سن مشابه ارائه نمود. به این ترتیب مقاومت کششی نهایی در ۹۰ روز، با جایگزینی خاکستر بادی به جای سرباره در بتن قلیافعال، در S3F1 و S1F1 نسبت به S به ترتیب ۹٪ و ۲۷٪ کاهش یافت.

از شکل ۵ قابل مشاهده است که در تهاجم یون کلراید به بتن، در ۷ روز نخست مقاومت کششی در تمام طرح‌های اختلاط افزایش یافت که به علت تداوم فرآیندهای هیدراتاسیون و پلیمریزاسیون می‌باشد. این روند افزایشی بر خلاف طرح اختلاط S در سایر طرح‌ها تا سن ۲۸ روز ادامه پیدا می‌کند. بتن‌های قلیافعال تا سن ۹۰ روز مقاومت کششی خود را حفظ

روز نیز در این طرح اختلاط ناشی از افزایش اصطکاک داخلی حاصل از تشکیل کریستال های درگیر و فشرده باشد. با مقایسه نرخ کسب مقاومت S در سه محیط مورد مطالعه، می توان نتیجه گرفت که حضور یون کلراید در کنار منیزیم سولفات، سبب تشدید اثرات مخرب بر بتن قلیافعال سرباره ای (S) گردیده و باعث کاهش نرخ کسب مقاومت نسبت به تهاجم منفرد شده است.

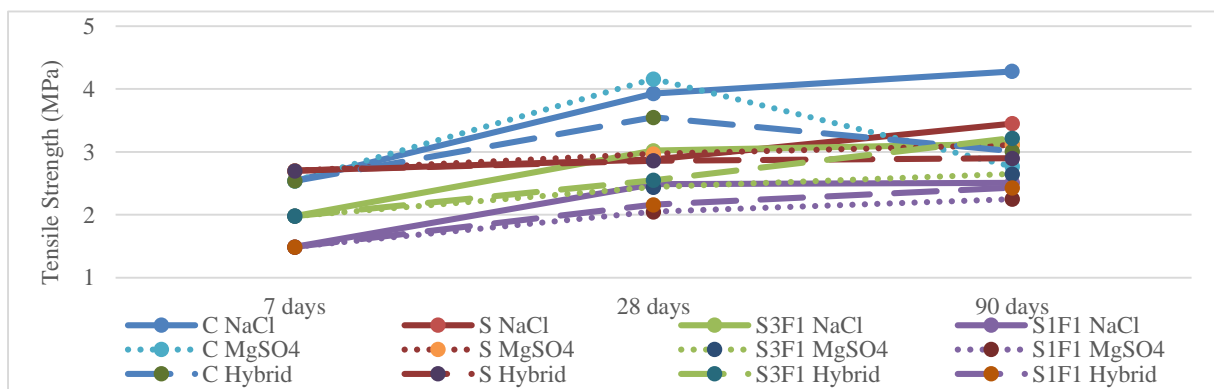
افزایش ۶۲ و ۶۳ درصدی درمقاومت کششی طرح اختلاط های S3F1 و S1F1 از سن ۷ روز تا ۹۰ روز در تهاجم ترکیبی نیز نشان می دهد که فرآیند پلیمریزاسیون و تشکیل ژئوپلیمر در حضور خاکستر بادی قلیافعال به دلیل وجود عامل فعال ساز سولفات در تهاجم محیطی همچنان ادامه داشته و ساختار مقاوم در برابر کشش بتن، همچنان سخت تر و فشرده تر می گردد. در تغییرات مقاومت کششی S3F1 و S1F1 نیز تأثیر مضاعف سولفات به عنوان فعال ساز در حضور خاکستر بادی مشاهده شده است. همچنین مشاهده می شود که حضور یون کلراید در کنار سولفات، سبب افزایش نرخ کسب مقاومت نمونه های دارای خاکستر بادی (S3F1 و S1F1) در مقایسه با تهاجم منفرد سولفات شده است. این مهم، نشان دهنده کاهش تأثیر مخرب سولفات بر بتن قلیافعال حاوی خاکستر بادی، در حضور یون کلراید می باشد.

بیشترین مقاومت کششی بهره برداری تا سن ۹۰ روز در طرح اختلاط C با مقدار ۴/۲۸ مگاپاسکال مشاهده شد.

قرارگیری نمونه های بتنی تحت تهاجم سولفات منیزیم سبب ایجاد روند پیوسته افزایشی در مقاومت کششی تمامی بتن های قلیافعال شده است اما نرخ کسب مقاومت در این محیط از تهاجم یون کلراید کمتر می باشد. به گونه ای که تا سن ۹۰ روز در این محیط هیچگونه افت مقاومت در هیچ یک از طرح های اختلاط بتن قلیافعال مشاهده نشده است. بیشترین مقدار افزایش مقاومت کششی تا ۹۰ روز در S50F50 با ۵۱٪ افزایش مشاهده شد که نشان دهنده تأثیر مضاعف نمک سولفات به عنوان فعال ساز در حضور خاکستر بادی است. کمترین افزایش مقاومت کششی با ۹٪ در بتن سرباره ای قلیافعال (S) مشاهده شد.

افزایش مقاومت کششی در طرح اختلاط C تا سن ۲۸ روز ناشی از تداوم هیدراتاسیون سیمان پرتلند بوده و افت ۱۵ درصدی این شاخص تا سن ۹۰ روز نیز احتمالاً ناشی از عواملی نظیر نرم شدگی خمیر سیمان در اثر جدایی کلسیم و جایگزینی منیزیم در ساختار ژل C-S-H و تشکیل اترینگایت تولید گچ و فشار حاصل از انبساط بوده است. همچنین با مقایسه نرخ کسب مقاومت C در سه محیط مورد مطالعه، می توان نتیجه گرفت که حضور یون کلراید در کنار منیزیم سولفات، سبب تشدید اثرات مخرب بر بتن OPC نسبت به تهاجم منفرد شده است.

در طرح اختلاط S تا سن ۲۸ روز تغییر قابل توجهی رخ نداده و محتمل است که اندک افزایش مقاومت کششی تا سن ۹۰



شکل ۵. تغییرات مقاومت کششی در محیط های آسیب رسان.

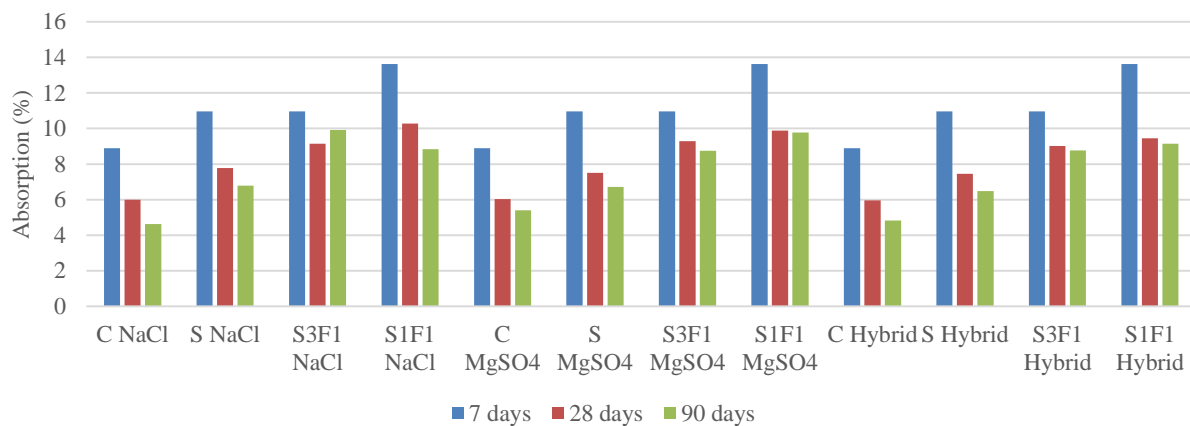
## ۳-۴ جذب آب

با توجه به شکل ۶، انتظار می‌رود که کاهش جذب آب تا سن ۲۸ روز در طرح اختلاط C در تهاجم کلراید عمدتاً به دلیل افزایش حجم حاصل از محصولات هیدراتاسیون سیمان باشد. در تهاجم کلراید طرح اختلاط S با کمترین مقدار جذب آب در میان بتن‌های قلیافعال، بهترین عملکرد را دارا است. طرح اختلاط S با کمترین مقدار جذب آب در میان بتن‌های قلیافعال، بهترین عملکرد را دارا است. مشاهده می‌شود که با حضور ۲۵٪ خاکستر بادی جایگزین سرباره، جذب آب بتن در سنین کمتر افزایش می‌یابد و با افزایش خاکستر بادی تا ۵۰٪ سرباره، شدت کاهش جذب آب افزایش یافته است. افزایش جذب آب بتن‌های قلیافعال با چسباننده ترکیبی احتمالاً ناشی از ریزترک‌های بیشتر در بتن قلیافعال و تقاضای آب ذرات خاکستر بادی بوده که باعث می‌شود در زمان ترکیب شدن، فضاهای خالی بسیاری را در میان ذرات هیدراته خود ایجاد نمایند.

در تهاجم سولفات فرآیند هیدراتاسیون در بتن با سیمان پرتلند تا سن ۲۸ روز ادامه داشته و عمده کاهش جذب آب بتن با سیمان پرتلند تا ۲۸ روز به افزایش حجم محصولات هیدراته سیمانی مربوط بوده و کاهش بیشتر تا سن ۹۰ روز را می‌توان به دلیل تشکیل محصولات ثانویه حاصل تقابل سولفات منیزیم و بتن با سیمان پرتلند نظیر اترینگایت و کلسیم سولفات می‌باشند. محتمل است که نمونه‌های طرح اختلاط S در تقابل اولیه تا سن ۱۴ روز دچار فعال‌سازی سولفاتی شده به گونه‌ای که پیوسته فازهای سخت سرباره فعال‌سازی شده و تخریب فازهای مشابه و تولید گچ در حال وقوع باشد. ضمن اینکه لایه

بروسیت تشکیل شده در سطح، از سرعت تغییرات شیمیایی می‌کاهد. S3F1 در این محیط در حالت محافظتی سولفات برای خاکستر بادی قلیافعال قرار داشته و از آنجا که نرخ اندک و ثابت در افزایش مقاومت‌های فشاری و کششی از این ماده شاهد هستیم می‌توان ادعا کرد که نرخ ثابت افزایش ناشی از این اثر محافظتی می‌باشد. در S1F1 نیز رفتاری مشابه با آهنگ شدیدتری اتفاق می‌افتد و علت آن احتمالاً حضور مقدار چشمگیری از خاکستر بادی قلیافعال بوده که با فعال‌سازی سولفاتی و گذر زمان، با گیرش‌های مجدد مونومرها و دی‌مرهای موجود، تشکیل پلیمرهای سخت‌تر و پیچیده‌تری می‌دهد.

در تهاجم ترکیبی سولفات و کلراید کاهش جذب آب C تا ۲۸ روز ناشی از ادامه فرآیند هیدراتاسیون سیمان پرتلند بوده و ادامه کاهش آن تا ۹۰ روز از آنجا که با کاهش مقاومت همراه است به تشکیل محصولات حاصل از زوال بتن در این محیط و رسوب نمک‌های محلول نسبت داده می‌شود. در S نیز احتمال می‌رود که کاهش جذب آب تا سن ۹۰ روز نمایانگر پر شدن آخرین فضاهای خالی پر تنش می‌باشد. دلیل این تحلیل نیز افزایش اندک مقاومت‌ها در این سن نسبت به سن ۲۸ روز می‌باشد. مقدار جذب آب S3F1 از سن ۱۴ تا ۹۰ روز دچار تغییرات قابل توجهی نشده که با در نظر گرفتن افت مقاومت فشاری در ۹۰ روز می‌توان ادعا کرد که عمده محصولات جدید تشکیل شده حاصل از آغاز زوال بتن در این محیط می‌باشند. کاهش قابل توجه جذب آب در S1F1 تا سن ۹۰ روز در حالی که افزایش مقاومت فشاری را در بر دارد می‌توان از ایجاد ساختارهای پیچیده‌تر جدید در این بتن دانست.



شکل ۶. تغییرات جذب آب در محیط های آسیب رسان.

ساختار ژئوپلیمری تشکیل شده در خاکستر بادی قلیافعال می باشد که حضور سولفات به عنوان فعال ساز نیز به این رخداد کمک کرده است. کمترین خوردگی آرماتور در بتن با سیمان پرتلند با ۰/۳۳ درصد نشان می دهد که در تهاجم خالص سولفات، می توان انتظار داشت خوردگی آرماتور ناشی از تهاجم سولفات آرماتور در کوتاه مدت و میان مدت از عمر مفید سازه، قابل صرف نظر می باشد.

در تهاجم ترکیبی سولفات-کلراید، بیشترین خوردگی آرماتور با ۵۳/۹۵ درصد در بتن با سیمان پرتلند رخ داده است. در تهاجم ترکیبی سولفات-کلراید، بتن قلیافعال سرباره ای کمترین مقدار خوردگی آرماتور مدفون در خود را به مقدار ۱۱/۲۲ درصد با بیشترین محافظت از آرماتور در این محیط مهاجم به نمایش گذاشته است. جایگزینی ۲۵٪ خاکستر بادی با سرباره در بتن قلیافعال سرباره ای توان محافظتی بتن را کاهش و خوردگی آرماتور مدفون را تا مقدار ۱۸/۸۵ درصد افزایش داده است. افزایش جایگزینی خاکستر بادی تا ۵۰٪ به جای سرباره در بتن قلیافعال سرباره ای، میزان خوردگی آرماتور مدفون را تا مقدار ۱۱/۶۲ درصد کاهش داده که به توان محافظتی بتن قلیافعال سرباره ای بسیار نزدیک است. در نهایت بهترین عملکرد بهره برداری در محافظت از آرماتور مدفون در بتن در برابر خوردگی ناشی از تهاجم سولفات و کلراید در طرح اختلاط S مشاهده شد و پس از آن S1F1 در نزدیکترین شرایط

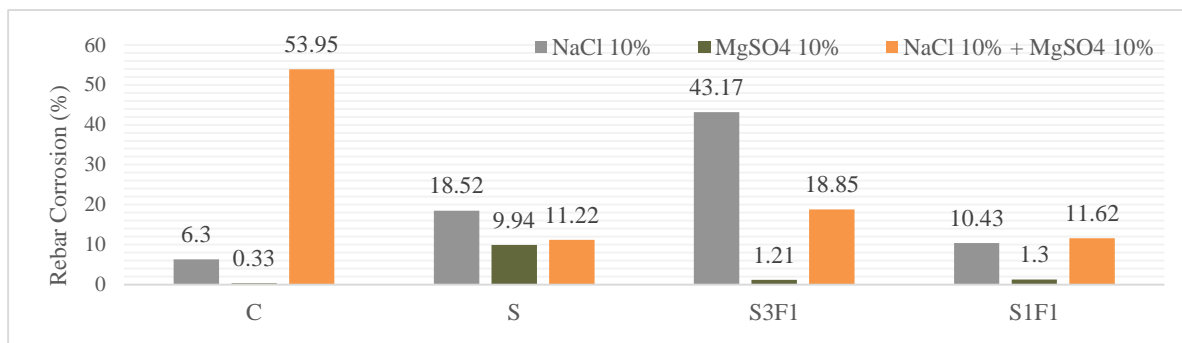
### ۵-۳ خوردگی آرماتور

همانگونه که مشاهده می شود، ایجاد اختلاف پتانسیل ۱۲ ولت در طول ۲۱ روز به آرماتور مدفون در بتن محصور با محلول سدیم کلراید ۱۰٪ در بتن با سیمان پرتلند کمترین مقدار خوردگی آرماتور را با ۶/۳ درصد موجب می گردد. پوشش بتنی از جنس بتن قلیافعال سرباره ای احتمالاً به دلیل وجود ریزترک ها و نفوذپذیری بیشتر، این مقدار را تا ۱۸/۵۲ درصد افزایش می دهد. حضور و جایگزینی ۲۵٪ خاکستر بادی در چسباننده بتن قلیافعال، منجر به افزایش شدید خوردگی آرماتور آن طرح اختلاط تا ۴۳/۱۷ درصد گردیده اما افزایش مقدار خاکستر بادی تا ۵۰٪ جایگزین سرباره، خوردگی آرماتور را تا مقدار ۱۰/۴۳ درصد کاهش داده است.

در محیط محلول منیزیم سولفات ۱۰٪، ایجاد اختلاف پتانسیل ۱۲ ولت در طول ۲۱ روز به آرماتور مدفون در نمونه های بتنی منجر به رخداد خوردگی شدید نشده و علت آن احتمالاً عدم حضور موثر یون های هادی جریان الکتریکی در این محلول می باشد. با این حال در بتن سرباره ای محتمل است که به علت وجود مقدار قابل توجهی آلومینیوم، هدایت الکتریکی صورت گرفته و ۹/۹۴ درصد، خوردگی در آرماتور مدفون اتفاق افتاده است. حضور خاکستر بادی در هر دو طرح اختلاط حاوی خاکستر بادی، خوردگی آرماتور مدفون را در بازه ی ۱/۲ الی ۱/۳ درصد نگه داشته و محافظت نسبتاً مناسبی از آرماتور به عمل می آورد و علت این رخداد احتمالاً جذب آلومینیوم در

نسبت به  $MgSO_4$  فرآیند انتقال یون و خوردگی آرماتور مدفون در نمونه‌های بتنی مستغرق در محلول  $NaCl$ ، سریعتر از محلول  $MgSO_4$  می‌باشد (Abdalkader et al., 2017).

مشابه بوده است. ضعیف‌ترین عملکرد محافظتی در C مشاهده شده است. مقادیر خوردگی آرماتورها در شکل ۷ نمایش داده شده است. با توجه به ضریب هدایت الکتریکی بالاتر  $NaCl$



شکل ۷. نتایج خوردگی تسریع یافته آرماتور در محیط‌های آسیب رسان.

#### ۴. نتیجه گیری

- استفاده از نسبت‌های ۱ به ۰ و ۱ به ۱ از سرباره و خاکستر بادی در چسباننده‌های قلیافعال بجای سیمان پرتلند در تولید بتن در معرض ترکیب سولفات و کلراید، خوردگی آرماتور مدفون در بتن را کاهش و دوام بتن را افزایش خواهد داد.
- بر اساس نتایج به دست آمده از این پژوهش، می‌توان عنوان نمود که خوردگی آرماتور مدفون در بتن، با عواملی نظیر مقاومت کششی، نفوذپذیری، مقاومت بتن در برابر عبور جریان الکتریکی از خود (مقاومت الکتریکی بتن) و نوع تهاجم محیطی ارتباط مستقیم دارد.
- استفاده از چسباننده قلیافعال به جای سیمان پرتلند، جذب آب و نفوذپذیری بتن را افزایش خواهد داد که این ویژگی ناشی از ریزترک‌های ذاتی بیشتر در بتن‌های قلیافعال است. جذب آب بیشتر از بتن OPC و ژل کلسیم آلومینوسیلیکات هیدراته (C-A-S-H) مقاوم‌تر از ژل کلسیم سیلیکات هیدراته (C-S-H) موجود در فاز چسباننده بتن OPC، از ویژگی‌های ذاتی بتن AAS به شمار می‌رود. همچنین افزایش مقدار خاکستر بادی در چسباننده‌های قلیافعال، به سبب تقاضای آب ذاتی خاکستر بادی موجب افزایش نفوذپذیری و جذب در بتن قلیافعال حاوی خاکستر بادی می‌گردد.

در این پژوهش به مقایسه دوام و تغییرات مشخصات مکانیکی بتن سازه‌ای با حدود ۱۵٪ چگالی کمتر از بتن معمولی در برابر تهاجم‌های کلراید و سولفات پرداخته شد. مهمترین نتایج استخراج شده عبارتند از:

- در نمونه‌های مطالعه شده در این پژوهش استفاده از چسباننده قلیافعال سرباره‌ای در بتن به جای سیمان پرتلند هیدراته، سبب افزایش قابل توجه مقاومت فشاری شده است به گونه‌ای که می‌توان جهت تأمین مقاومت فشاری بهره‌برداری بیشتر از بتن با سیمان پرتلند معمولی، بالأخص در محدوده مقاومتی بالای ۴۰ مگاپاسکال، از این چسباننده در تولید بتن استفاده نمود.
- مشاهده شد که بتن قلیافعال با نسبت برابر سرباره و خاکستر بادی در ۸۳ روز تهاجم شدید، افزایش مقاومت و کاهش جذب آب را ضمن خوردگی کمتر آرماتور از خود نشان داد. لذا می‌توان عنوان نمود در صورتی که پایداری و دوام بتن در محیط‌های آسیب‌رسان شدید، بر مشخصات مکانیکی ارجحیت داشته باشد، بتن قلیافعال با نسبت‌های برابر سرباره و خاکستر بادی بسیار پردوام خواهد بود.

- با استفاده از عیار برابر چسباننده، بتن های قلیافعال، حسب مواد تشکیل دهنده خود، می توانند مشخصات مکانیکی و دوام بیشتری نسبت به بتن OPC ارائه دهند.

## منابع:

بهرنیا، ک.، کیاچهر و رستمی، ۲۰۱۸. تأثیر نسبت محلول قلیایی به سرباره بر نفوذپذیری بتن قلیافعال سرباره ای. مهندسی عمران فردوسی، (1)، pp.99-112.۳۱

- Abdalkader, A., Lynsdale, C. and Cripps, J., 2017. Corrosion behavior of steel rebar in mortars subjected to magnesium sulfate and sodium chloride mixtures at 5 and 20 C. *Construction and Building Materials*, 153, pp.358-363.
- Albitar, M., Ali, M.M., Visintin, P. and Drechsler, M., 2017. Durability evaluation of geopolymer and conventional concretes. *Construction and Building Materials*, 136, pp.374-385.
- ASTM, C.128, 2015. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. ASTM international.
- ASTM, C143/C143M, 2012. Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. USA: ASTM International.
- ASTM, C.29 / C29M, 2017. Standard Test Method for Bulk Density ('Unit Weight') and Voids in Aggregate. ASTM international.
- ASTM, C. 496/C 496M, 2004. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM Committee C-09 on Concrete and Concrete Aggregates, 2013. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. ASTM international.
- Atahan, H.N. and Dikme, D., 2011. Use of mineral admixtures for enhanced resistance against sulfate attack. *Construction and Building Materials*, 25(8), pp.3450-3457.
- BS 1881, 1983. Method for determination of compressive strength of concrete cubes. BS 1881: Part 116:1983. London: British Standards Institution.
- Bakharev, T., 2005. Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions. *Cement and concrete research*, 35(6), pp.1233-1246.
- Bondar, D., 2009. Alkali activation of Iranian natural pozzolans for producing geopolymer cement and concrete (Doctoral dissertation, University of Sheffield).
- Dixon, D.E., Prestrera, J.R., Burg, G.R., Chairman, S.A., Abdun-Nur, E.A., Barton, S.G., Bell, L.W., Blas Jr, S.J., Carrasquillo, R.L., Carrasquillo, P.M. and Carter, A.C., 1991. Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete.
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J.L., Lukey, G.C., Palomo, A. and van Deventer, J.S., 2007. Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of materials science*, 42(9), pp.2917-2933.
- Fernández-Jiménez, A., Garcia-Lodeiro, I. and Palomo, A., 2007. Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials. *Journal of Materials Science*, 42(9), pp.3055-3065.
- Glukhovskiy, V.D., 1994. Ancient, modern and future concretes. In *Proceedings of the First International Conference on Alkaline Cements and Concretes* (pp. 1-9). Kyiv, Ukraine.
- Habert, G., 2013. Environmental impact of Portland cement production. In *Eco-efficient concrete* (pp. 3-25). Woodhead Publishing.
- Humphreys, K. and Mahasenan, M., 2002. Towards a sustainable cement industry. Substudy 8: climate change.
- Ismail, I., Bernal, S.A., Provis, J.L., Hamdan, S. and van Deventer, J.S., 2013. Microstructural changes in alkali activated fly ash/slag geopolymers with sulfate exposure. *Materials and Structures*, 46(3), pp.361-373.
- Jo, B.W., Park, S.K. and Park, J.B., 2007. Properties of concrete made with alkali-activated fly ash lightweight aggregate (AFLA). *Cement and Concrete composites*, 29(2), pp.128-135.
- Kim, Y.Y., Lee, B.J., Saraswathy, V. and Kwon, S.J., 2014. Strength and durability performance of alkali-activated rice husk ash geopolymer mortar. *The Scientific World Journal*.

- Krivenko, P., Rudenko, I., Konstantynovskiy, O. and Boiko, O., 2021. Prevention of steel reinforcement corrosion in alkali-activated slag cement concrete mixed with seawater. In E3S Web of Conferences (Vol. 280). EDP Sciences.
- Lawrence, C.D., 1998. The production of low-energy cements. *Lea's chemistry of cement and concrete*, 4.
- Mangat, P.S., Ojedokun, O.O. and Lambert, P., 2021. Chloride-initiated corrosion in alkali activated reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, 115, p.103823.
- Mehta, P.K. and Monteiro, P.J., 2014. *Concrete: microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill Education.
- Mithun, B.M. and Narasimhan, M.C., 2016. Performance of alkali activated slag concrete mixes incorporating copper slag as fine aggregate. *Journal of Cleaner Production*, 112, pp.837-844.
- Pacheco-Torgal, F., Labrincha, J., Leonelli, C., Palomo, A. and Chindaprasit, P. eds., 2014. *Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes*. Elsevier.
- Prestera, J.R., Boyle, M., Crocker, D.A., Chairman, S.B., Abdun-Nur, E.A., Barton, S.G., Bell, L.W., Blas Jr, S.J., Berg, G.R., Carrasquillo, P.M. and Carrasquillo, R.L., 1998. *Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete*.
- Rangan, B.V., 2008. Fly ash-based geopolymer concrete.
- Rashad, A.M., 2014. A comprehensive overview about the influence of different admixtures and additives on the properties of alkali-activated fly ash. *Materials & Design*, 53, pp.1005-1025.
- Roy, D.M. and Idorn, G.M., 1982. Development of structure and properties of blast furnace slag cements. *J. Amer. Concr. Inst.*, 97, pp.444-457.
- Ryu, G.S., Lee, Y.B., Koh, K.T. and Chung, Y.S., 2013. The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. *Construction and building materials*, 47, pp.409-418.
- Saridemir, M. and Çelikten, S., 2020. Investigation of fire and chemical effects on the properties of alkali-activated lightweight concretes produced with basaltic pumice aggregate. *Construction and Building Materials*, 260, p.119969.
- Shaikh, F.U., 2014. Effects of alkali solutions on corrosion durability of geopolymer concrete. *Advances in concrete construction*, 2(2), p.109.
- Shi, C. and Fernández-Jiménez, A., 2006. Stabilization/solidification of hazardous and radioactive wastes with alkali-activated cements. *Journal of hazardous materials*, 137(3), pp.1656-1663.
- Shi, C., Roy, D. and Krivenko, P., 2003. *Alkali-activated cements and concretes*. CRC press.
- Taylor, H.F.W., 1990. *Cement Chemistry* Academic Press: London.
- Valencia Saavedra, W.G., Angulo, D.E. and Mejía de Gutiérrez, R., 2016. Fly ash slag geopolymer concrete: Resistance to sodium and magnesium sulfate attack. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(12), p.04016148.
- Wang, W.C., Wang, H.Y. and Lo, M.H., 2015. The fresh and engineering properties of alkali activated slag as a function of fly ash replacement and alkali concentration. *Construction and Building Materials*, 84, pp.224-229.
- Wardhono, A., Law, D.W. and Strano, A., 2015. The strength of alkali-activated slag/fly ash mortar blends at ambient temperature. *Procedia Engineering*, 125, pp.650-656.
- Yang, L.Y., Jia, Z.J., Zhang, Y.M. and Dai, J.G., 2015. Effects of nano-TiO<sub>2</sub> on strength, shrinkage and microstructure of alkali activated slag pastes. *Cement and Concrete Composites*, 57, pp.1-7.
- Zhu, H., Zhang, Z., Zhu, Y. and Tian, L., 2014. Durability of alkali-activated fly ash concrete: Chloride penetration in pastes and mortars. *Construction and Building Materials*, 65, pp.51-59.