

افزودن سرباره و پودر سنگ آهک به بتن جهت افزایش

دوام آن در محیط سولفاتی*

داود مستوفی نژاد، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
حامد حسین نظری منفرد، کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران

E-mail: dmostofi@cc.iut.ac.ir

چکیده

دوام بتن‌های در مجاورت یون سولفات نظیر ابنیه موجود در مسیر راه‌ها و از جمله پایه‌های پل، از مسائلی است که همواره نگرانی ویژه‌ای به دنبال داشته است. در این تحقیق دوام بتن‌های حاوی سرباره و پودر سنگ آهک، در محیط‌های سولفات منیزیم ۵ درصد، سولفات سدیم ۵ درصد و آب خالص مورد بررسی قرار گرفت همچنین تأثیر عامل نوع یون سولفات در نسبت‌های مختلف آب، پودر سنگ آهک و سرباره به مواد سیمانی، به همراه پارامتر زمان، در کاهش وزن و کاهش مقاومت فشاری بررسی شد. به این منظور ۲۷ طرح اختلاط، شامل بتن‌های حاوی ۰، ۱۵ و ۳۰ درصد پودر سنگ آهک جایگزین سیمان در ۳ حالت بدون سرباره، ۱۰ درصد سرباره جایگزین سیمان و ۲۰ درصد سرباره جایگزین سیمان در نظر گرفته شد. برای ساخت این بتن‌ها از سه نسبت آب به سیمان ۳/۰، ۴/۰ و ۵/۰ استفاده شد. نتایج این تحقیق که با انجام آزمایش بر روی نمونه $70 \times 70 \times 70$ میلیمتری در ۲ زمان ۷۰ و ۱۴۰ روزه انجام شد، نشان داد که استفاده از ترکیب ۱۰٪ سرباره و ۱۵٪ پودر سنگ آهک جایگزین سیمان، ضمن اقتصادی کردن طرح مخلوط، سبب افزایش دوام بتن‌ها می‌شود. چنین ترکیبی از مواد سیمانی، برای ساخت بتن‌های در مجاورت یون سولفات و از جمله ابنیه مسیر راه و پایه‌های پل توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بتن، دوام، سرباره، پودر سنگ آهک، سولفات منیزیم، سولفات سدیم، پایه

۱. مقدمه

عمل با افزایش غلظت یون سولفات انجام می‌شود. پژوهشگرانی چون بونن و کوهن [۱] اعتقاد دارند با افزایش غلظت یون سولفات، روند خوردگی افزایش نمی‌یابد؛ ولی عده‌ای دیگر مانند سانتانام و همکاران [۲] معتقد بر افزایش روند خوردگی در اثر افزایش غلظت یون سولفات هستند.

تاکنون تحقیقات زیادی در مورد تأثیر مواد افزودنی و پوزولانی مختلف در فرایند تخریب ناشی از خوردگی سولفات‌ها انجام شده است. در این میان افزودنی‌هایی مانند دوده سیلیس و

از آنجا که یکی از مشکلات اساسی سازه‌های بتن‌آرمه، خوردگی شیمیایی ناشی از یون‌های سولفات موجود در خاک و آب مجاورت اعضاء بتنی است، سعی می‌شود دوام بتن‌های در مجاورت محیط‌های خورنده با استفاده از مواد افزودنی، بهبود یابد. با توجه به این که غلظت یون سولفات در خاک و یا آب کم است و خوردگی ناشی از آن نیاز به زمان زیادی دارد، جهت بررسی اثر یون سولفات بر بتن در مدت زمانی بسیار کوتاه‌تر در محیط آزمایشگاه، باید از آزمایش‌های تسریع شده استفاده کرد که این

در طرح‌های اختلاط، از مواد فوق روان کننده تا اندازه‌ای استفاده شده که اسلامپ در حد ۸۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر باشد. در ساخت نمونه‌ها از پودر سرباره و پودر سنگ آهک با نرمی در حدود سیمان تیپ I (بلین m^2/kg ۲۲۰) استفاده شد.

در جدول (۱) مقدار مصالح استفاده شده در طرح‌های اختلاط نشان داده شده است. در این جدول متغیرهای SL ، C ، W/CM ، LP ، FA و SP_{liquid} به ترتیب بیانگر نسبت آب به مواد سیمان، وزن سیمان، سرباره، پودر سنگ آهک، وزن درشت دانه، ریزدانه و فوق روان کننده مایع هستند. همچنین نماد $W_{modified}$ بیانگر مقدار آب اضافه شده به مخلوط و با منظور کردن حالت تقریباً خشک دانه‌هاست. در جدول (۱) همچنین مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن با f_c نشان داده شده و به ازای هر طرح اختلاط بیان شده است.

۳. آزمایش‌ها

به منظور بررسی اثرات یون سولفات بر بتن به صورت تشدید شده در آزمایشگاه و در زمان کوتاه، از محلول سولفات منیزیم با غلظت ۵٪ و نیز محلول سولفات سدیم ۵٪ استفاده شد. جهت بررسی فرایند تخریب نمونه‌ها، میزان کاهش مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌های مستغرق در آب پس از ۱۴۰ روز و همچنین تغییر وزن نمونه‌ها در دو زمان ۷۰ و ۱۴۰ روز پس از عمل آوری مورد بررسی قرار گرفت.

در شکل‌های ۱، ۲ و ۳ تأثیر نوع یون سولفات در کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های واقع در محیط‌های سولفات سدیم ۵٪ و سولفات منیزیم ۵٪، نسبت به نمونه‌های قرارگرفته در آب خالص، پس از ۱۴۰ روز نشان داده شده است. در جدول (۲) میزان تغییر وزن نمونه‌های قرارگرفته در محیط‌های مذکور در زمان‌های ۷۰ و ۱۴۰ روز ارایه شده است.

۴. نتایج آزمایش‌ها

با توجه به شکل‌های ۱، ۲ و ۳ مشاهده می‌شود که در هر دو محیط سولفات منیزیم و سولفات سدیم، با افزایش نسبت آب به مواد سیمانی، تعداد کاهش مقاومت فشاری طرح‌های اختلاط افزایش می‌یابد. این امر به علت افزایش نفوذپذیری و در نتیجه نفوذ بیشتر یون‌های سولفات به این بتن‌هاست.

سرباره بیشتر مورد توجه پژوهشگران بوده است؛ در حالی که افزودن پودر سنگ آهک کمتر مورد توجه قرار گرفته است. هکال و همکاران در سال ۲۰۰۲ به بررسی دوام خمیرهای سیمانی حاوی سرباره و پودر سنگ آهک در محلول $MgSO_4$ با غلظت ۱۰٪ پرداختند و به این نتیجه رسیدند که در محلول سولفات منیزیم، خمیر سیمان حاوی ۴۰٪ سرباره، دارای دوام بیشتری نسبت به خمیر سیمان پرتلند از خود نشان می‌دهد. همچنین اضافه کردن پودر سنگ آهک به میزان تنها ۵٪، در این محیط باعث افزایش دوام بتن می‌شود [۳].

مستوفی نژاد و رئیس به بررسی دوام بتن حاوی پودر سنگ آهک در محیط سولفات پرداختند و به این نتیجه رسیدند که بهترین دوام مربوط به بتن حاوی ۱۵٪ پودر سنگ آهک است [۴]. بانگ و همکاران در سال ۱۹۹۹ به بررسی کاهش وزن و مقاومت فشاری نمونه‌های واقع در محیط‌های سولفات سدیم با غلظت ۱۰٪ و سولفات منیزیم با غلظت ۱۰٪ پرداختند. نتایج آنها نشان می‌داد که هر دو محیط سولفات منیزیم و سدیم، باعث کاهش مقاومت نمونه‌ها می‌شوند، اما نمونه‌های قرار گرفته در سولفات منیزیم کاهش مقاومت بیشتری دارند. همچنین تغییر وزن نمونه‌های قرار گرفته در آب خالص و سولفات سدیم، پس از ۹۰ روز ناچیز بود؛ اما نمونه‌های واقع در سولفات منیزیم دارای تغییر وزن مشهود بودند [۵].

از آنجا که تحقیقات پیشین، به صورت مشخص ترکیب مناسبی از مواد ارزان قیمت سرباره و پودر سنگ آهک برای بتن با دوام در مقابل یون سولفات را پیشنهاد نکرده‌اند، مطالعه حاضر با هدف تعیین ترکیب مناسبی از سرباره و پودر سنگ آهک برای افزایش دوام بتن در مقابل یون سولفات انجام شده است.

۲. ساخت نمونه‌ها

برای ساخت نمونه‌های بتنی از سه نسبت آب به سیمان ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ استفاده شد. از آنجا که بتن‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۴ و کمتر، جزء بتن‌های با مقاومت زیاد به شمار می‌روند و از طرفی آیین نامه خاصی برای طرح اختلاط بتن با مقاومت زیاد وجود ندارد، در ساخت نمونه‌ها از توصیه‌های ACI 363R [۶] و ACI 211.4R-93 [۷] و همچنین روش‌های ارایه شده توسط اکامورا [۸] و مستوفی نژاد و نزهتی [۹] استفاده شد.

افزودن سرباره و پودر سنگ آهک به بتن جهت افزایش دوام آن در محیط سولفاتی

جدول ۱. مصالح مورد استفاده در طرح‌های اختلاط (kg/m^3) و مقاومت فشاری ۲۸ روزه

f'_c (MPa)	SP _{liquid}	W _{modified}	FA	CA	LP	SL	C	W/CM	طرح اختلاط
۷۷/۸	۱۵/۰۰	۱۵۷/۷	۶۱۲/۸	۱۱۰/۶۷	.	.	۵۳۰	۰/۳	H ₁
۷۷/۱	۱۱/۹۳	۱۵۹/۳	۶۰۰/۵	۱۱۰/۷/۴	۷۹/۵	.	۴۵۰/۵	۰/۳	H ₂
۷۶/۴	۱۰/۶۰	۱۵۹/۶	۵۸۷/۷	۱۱۰/۷/۶	۱۵۹/۰	.	۳۷۱	۰/۳	H ₃
۷۶/۸	۱۴/۵۸	۱۵۷/۷	۶۰۵/۹	۱۱۰/۶۷	.	۵۳	۴۷۷	۰/۳	H ₄
۷۲/۹	۱۰/۸۷	۱۵۹/۲	۵۹۴/۶	۱۱۰/۷/۴	۷۹/۵	۵۳	۳۹۷/۵	۰/۳	H ₅
۷۱/۳	۱۰/۳۴	۱۵۹/۶	۵۸۲/۸	۱۱۰/۷/۶	۱۵۹	۵۳	۳۱۸	۰/۳	H ₆
۷۶/۲	۱۳/۲۵	۱۵۷/۷	۵۹۸/۸	۱۱۰/۶۷	.	۱۰۶	۴۲۴	۰/۳	H ₇
۷۲/۸	۱۰/۴۷	۱۵۹/۲	۵۸۸/۵	۱۱۰/۷/۴	۷۹/۵	۱۰۶	۳۴۴/۵	۰/۳	H ₈
۶۹/۸	۹/۵۴	۱۵۹/۶	۵۷۷/۸	۱۱۰/۷/۶	۱۵۹	۱۰۶	۲۶۵	۰/۳	H ₉
۷۰/۶	۱۰/۳۰	۱۶۲/۰	۷۱۷/۷	۱۱۰/۶/۶	.	.	۴۰۰	۰/۴	H ₁₀
۶۸/۰	۸/۸۰	۱۶۲/۶	۷۰۸/۲	۱۱۰/۶/۹	۶۰/۰	.	۳۴۰	۰/۴	H ₁₁
۶۴/۲	۷/۸۰	۱۶۳/۱	۶۹۸/۶	۱۱۰/۷/۲	۱۲۰/۰	.	۲۸۰	۰/۴	H ₁₂
۶۴/۷	۱۰/۰۰	۱۶۲/۰	۷۱۲/۵	۱۱۰/۶/۶	.	۴۰	۳۶۰	۰/۴	H ₁₃
۶۳/۶	۸/۳۰	۱۶۲/۵	۷۰۳/۷	۱۱۰/۶/۹	۶۰	۴۰	۳۰۰	۰/۴	H ₁₄
۵۷/۳	۷/۵۰	۱۶۳/۱	۶۹۵/۰	۱۱۰/۷/۲	۱۲۰	۴۰	۲۴۰	۰/۴	H ₁₅
۶۳/۷	۹/۸۰	۱۶۲/۰	۷۰۷/۱	۱۱۰/۶/۶	.	۸۰	۳۲۰	۰/۴	H ₁₆
۶۱/۶	۸/۵۰	۱۶۲/۵	۶۹۹/۲	۱۱۰/۶/۹	۶۰	۸۰	۲۶۰	۰/۴	H ₁₇
۵۷/۹	۷/۲۰	۱۶۳/۱	۶۹۱/۲	۱۱۰/۷/۲	۱۲۰	۸۰	۲۰۰	۰/۴	H ₁₈
۵۶/۸	۸/۹۶	۱۶۰/۳	۷۸۲/۹	۱۱۰/۷/۲	.	.	۳۲۰	۰/۵	H ₁₉
۵۳/۵	۸/۰۰	۱۶۳/۵	۷۷۵/۰	۱۱۰/۷/۰	۴۸/۰	.	۲۷۲	۰/۵	H ₂₀
۴۸/۶	۷/۲۰	۱۶۴/۲	۷۶۷/۵	۱۱۰/۷/۵	۹۶/۰	.	۲۲۴	۰/۵	H ₂₁
۵۵/۷	۸/۸۰	۱۶۲/۳	۷۷۹/۷	۱۱۰/۸/۲	.	۳۲	۲۸۸	۰/۵	H ₂₂
۴۹/۵	۷/۶۰	۱۶۳/۵	۷۷۱/۵	۱۱۰/۷/۱	۴۸	۳۲	۲۴۰	۰/۵	H ₂₃
۴۶/۸	۷/۲۰	۱۶۳/۷	۷۶۴/۴	۱۱۰/۷/۳	۹۶	۳۲	۱۹۲	۰/۵	H ₂₄
۵۱/۶	۷/۲۰	۱۶۳/۵	۷۷۴/۴	۱۱۰/۷/۲	.	۶۴	۲۵۶	۰/۵	H ₂₅
۴۷/۷	۶/۸۰	۱۶۳/۷	۷۶۷/۹	۱۱۰/۷/۳	۴۸	۶۴	۲۰۸	۰/۵	H ₂₆
۴۰/۱	۶/۲۵	۱۶۴/۴	۷۶۱/۷	۱۱۰/۷/۶	۹۶	۶۴	۱۶۰	۰/۵	H ₂₇

جدول ۲. درصد تغییر وزن نمونه‌ها پس از ۷۰ و ۱۴۰ روز نسبت به روز اول

طرح اختلاط	محیط آب خالص		سولفات سدیم ۰/۵٪		سولفات منیزیم ۰/۵٪	
	روز ۷۰	روز ۱۴۰	روز ۷۰	روز ۱۴۰	روز ۷۰	روز ۱۴۰
H ₁	۰/۳۴	۱/۳۹	۰/۳۴	۱/۹۳	۰/۵۵	۱۴۰ روز
H ₂	۰/۴۲	۱/۹۴	۰/۳۹	۲/۰۳	۰/۶۵	۱۴۰ روز
H ₃	۰/۵۰	۲/۰۳	۰/۵۱	۲/۲۳	۰/۷۴	۱۴۰ روز
H ₄	۰/۳۰	۱/۱۸	۰/۳۴	۱/۹۳	۰/۵۱	۱۴۰ روز
H ₅	۰/۳۶	۱/۶۶	۰/۳۶	۲/۰۲	۰/۶۱	۱۴۰ روز
H ₆	۰/۴۷	۲/۰۰	۰/۴۸	۲/۱۷	۰/۶۵	۱۴۰ روز
H ₇	۰/۶۳	۱/۷۹	۰/۵۸	۲/۱۳	۰/۶۴	۱۴۰ روز
H ₈	۰/۸۰	۲/۵۲	۰/۶۹	۲/۲۳	۰/۶۸	۱۴۰ روز
H ₉	۰/۹۹	۲/۸۹	۰/۷۶	۲/۵۳	۰/۸۳	۱۴۰ روز
H ₁₀	۰/۴۹	۱/۹۸	۰/۷۰	۲/۳۶	۰/۹۵	۱۴۰ روز
H ₁₁	۰/۵۲	۲/۳۸	۰/۷۵	۲/۴۲	۰/۹۷	۱۴۰ روز
H ₁₂	۰/۵۸	۲/۵۳	۰/۸۴	۲/۶۶	۱/۰۹	۱۴۰ روز
H ₁₃	۰/۴۳	۱/۶۹	۰/۶۸	۲/۲۷	۰/۸۵	۱۴۰ روز
H ₁₄	۰/۴۵	۱/۹۵	۰/۷۰	۲/۴۱	۰/۹۴	۱۴۰ روز
H ₁₅	۰/۵۲	۲/۰۸	۰/۷۷	۲/۷۴	۱/۰۸	۱۴۰ روز
H ₁₆	۰/۷۵	۲/۷۴	۰/۷۲	۲/۴۰	۱/۰۰	۱۴۰ روز
H ₁₇	۰/۸۶	۲/۹۱	۰/۸۳	۲/۶۲	۱/۱۶	۱۴۰ روز
H ₁₈	۱/۰۲	۳/۳۲	۰/۹۹	۲/۷۱	۱/۲۲	۱۴۰ روز
H ₁₉	۰/۵۳	۲/۴۶	۱/۵۵	۲/۹۳	۱/۱۰	۱۴۰ روز
H ₂₀	۰/۷۳	۲/۵۰	۱/۶۰	۳/۰۳	۱/۳۳	۱۴۰ روز
H ₂₁	۰/۹۶	۲/۷۷	۱/۶۵	۳/۱۷	۱/۵۱	۱۴۰ روز
H ₂₂	۰/۴۵	۲/۲۵	۱/۴۶	۲/۸۸	۰/۹۳	۱۴۰ روز
H ₂₃	۰/۶۲	۲/۲۶	۱/۴۷	۳/۰۰	۱/۱۸	۱۴۰ روز
H ₂₄	۰/۸۳	۲/۵۱	۱/۵۷	۳/۱۰	۱/۳۷	۱۴۰ روز
H ₂₅	۰/۸۵	۳/۲۱	۱/۷۴	۲/۹۲	۱/۳۱	۱۴۰ روز
H ₂₆	۰/۹۵	۳/۵۳	۱/۸۹	۳/۱۳	۱/۳۵	۱۴۰ روز
H ₂₇	۱/۰۴	۳/۵۸	۲/۰۷	۳/۳۱	۱/۵۶	۱۴۰ روز

اما در سیمان‌هایی که دارای پودر سنگ آهک‌اند، به دلیل تشکیل مونوسولفات به میزان کمتر، در محیط سولفاتی اترینگایت کمتری تولید شده و در نتیجه سیمان در برابر حمله سولفات‌ها مقاوم‌تر می‌شود. همچنین در صورت استفاده توأم از پودر سنگ آهک و سرباره و با فرض ثابت بودن مقدار پودر سنگ آهک، بیشترین درصد کاهش مقاومت به ترتیب متعلق به بتن بدون سرباره، بتن حاوی ۲۰٪ سرباره و بتن حاوی ۱۰٪ سرباره است.

پارامتر دیگری که جهت بررسی دوام نمونه‌ها استفاده شد، میزان تغییر وزن نمونه‌های بتنی است. در جدول (۲) درصد تغییر وزن تمامی بتن‌های قرار گرفته در محیط‌های سولفات سدیم ۵٪، سولفات منیزیم ۵٪ و آب خالص پس از ۷۰ و ۱۴۰ روز، آورده شده است. با دقت در جدول (۲) می‌توان مشاهده کرد که کلیه نمونه‌های قرار گرفته در تمامی محیط‌ها، در ۱۴۰ روز اول افزایش وزن یافته‌اند. این امر می‌تواند به دلیل انجام واکنش‌های هیدراتاسیون در طی این مدت باشد. برای نمونه‌های واقع در محیط‌های حاوی سولفات، بیشترین افزایش وزن متعلق به بتن‌های با ۲۰٪ سرباره، بتن‌های بدون سرباره و بتن‌های با ۱۰٪ سرباره است. جهت بررسی اثر سولفات در کاهش وزن نمونه‌ها، درصد افزایش وزن نمونه‌های قرار گرفته در آب خالص از درصد افزایش وزن نمونه‌های قرار گرفته در محیط‌های سولفات کم شد. نتایج نشان می‌داد که تمامی نمونه‌های قرار گرفته در محیط سولفات منیزیم ۵٪ در دو زمان ۷۰ و ۱۴۰ روز، نسبت به نمونه‌های مشابه قرار گرفته در آب خالص دارای کاهش وزن بودند که نشان دهنده انجام واکنش‌های خورنده است.

اما نمونه‌های قرار گرفته در محیط سولفات سدیم تا ۷۰ روز اول، نسبت به نمونه‌های مشابه قرار گرفته در آب خالص دارای افزایش وزن بوده، و پس از ۱۴۰ روز نیز کاهش وزن کمتری نسبت به نمونه‌های قرار گرفته در محیط سولفات منیزیم داشته‌اند. این امر نشان می‌دهد از نظر کاهش وزن نیز محیط سولفات منیزیم، خورنده‌تر از سولفات سدیم است. بیشترین میزان کاهش وزن برابر ۲/۱۸ درصد و متعلق به نمونه بتنی H_{26} است.

در محیط‌های حاوی یون سولفات از آنجا که بتن با ۱۰٪ سرباره کمترین تغییرات وزن را دارد، مقدار بهینه مصرف سرباره از نظر تغییر وزن ۱۰٪ است. همچنین برای کلیه نمونه‌ها با افزایش نسبت پودر سنگ آهک به سیمان، درصد افزایش وزن روندی صعودی دارد.

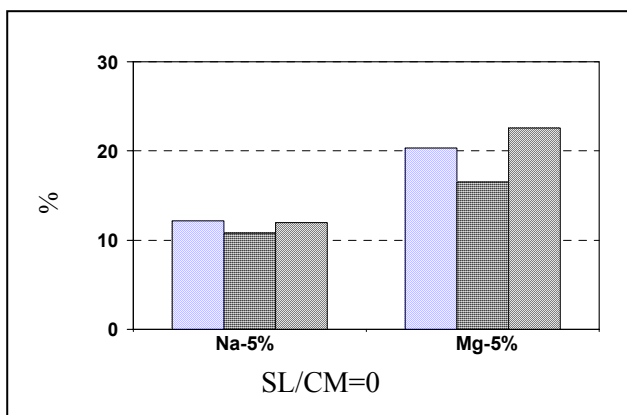
همچنین برای یک طرح اختلاط مشخص، نمونه‌های قرار گرفته در محیط سولفات منیزیم ۵٪، دارای کاهش مقاومت بیشتری نسبت به نمونه‌های قرار گرفته در محیط سولفات سدیم ۵٪ بودند. این موضوع تأیید کننده اثر مخرب‌تر سولفات منیزیم نسبت به سولفات سدیم است. این روند برای کلیه طرح‌های اختلاط صادق بود.

با دقت در شکل‌های ۱، ۲ و ۳ برای نمونه‌های قرار گرفته در سولفات سدیم ۵٪، مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت سرباره به مواد سیمانی، درصد کاهش مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. این عملکرد نامناسب سرباره در مقاومت فشاری نمونه‌های واقع در سولفات سدیم را می‌توان ناشی از کاهش مقدار سیمان و در نتیجه تولید ژل سیمان کمتر دانست. اما در نمونه‌های واقع در محیط‌های سولفات منیزیم، بیشترین درصد کاهش مقاومت فشاری به ترتیب متعلق به بتن بدون سرباره، بتن با ۲۰٪ سرباره جایگزین سیمان و بتن با ۱۰٪ سرباره جایگزین سیمان است که نشان دهنده عملکرد مناسب سرباره در نمونه‌های قرار گرفته در سولفات منیزیم است. این امر به علت واکنش سرباره با هیدروکسید کلسیم و در نتیجه کاهش مقدار آن در بتن است، زیرا سولفات منیزیم میل ترکیبی به مراتب بیشتری با هیدروکسید کلسیم موجود در بتن داشته و تولید سولفات کلسیم می‌کند که واکنش انبساطی آن منجر به تخریب بتن می‌شود.

همچنین در نمونه‌های واقع در سولفات سدیم ۵٪ از نظر کاهش مقاومت فشاری، بیشترین کاهش مقاومت به ترتیب متعلق به بتن بدون پودر سنگ آهک، بتن حاوی ۳۰٪ پودر سنگ آهک و بتن دارای ۱۵٪ پودر سنگ آهک است. این امر نشان می‌دهد که در کلیه بتن‌های واقع در محلول سولفات سدیم، بتن‌های دارای ۱۵٪ پودر سنگ آهک بهترین دوام را دارند.

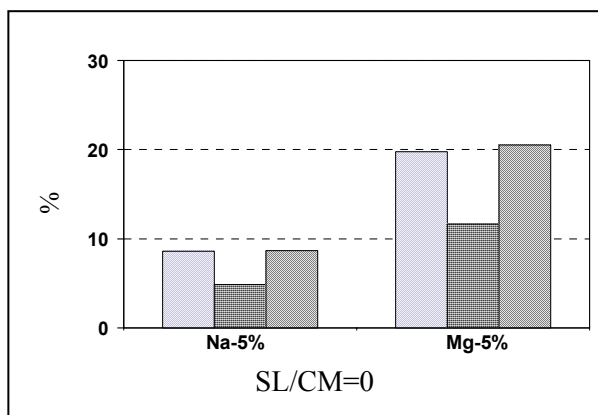
اما در نمونه‌های قرار گرفته در محیط سولفات منیزیم ۵٪، بیشترین درصد کاهش مقاومت به ترتیب متعلق به بتن حاوی ۳۰٪ پودر سنگ آهک، بتن بدون پودر سنگ آهک و بتن دارای ۱۵٪ پودر سنگ آهک است. علت این امر شرکت پودر سنگ آهک در واکنش‌های هیدراتاسیون است که باعث می‌شود به جای تشکیل مونوسولفو آلومینات هیدراته شده (مونوسولفات) که از هیدراتاسیون سیمان معمولی به وجود می‌آید، مونو کربو آلومینات (مونو کربنات) تشکیل شود. در سیمان معمولی هنگام حمله سولفات‌ها، مونوسولفات با یون سولفات واکنش می‌دهد و تولید اترینگایت می‌کند که تشکیل این ماده باعث افزایش حجم می‌شود.

LP/CM=0 LP/CM=0.15 LP/CM=0.3

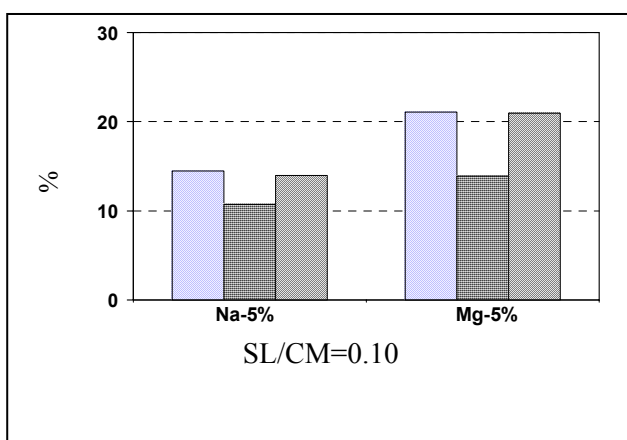


الف

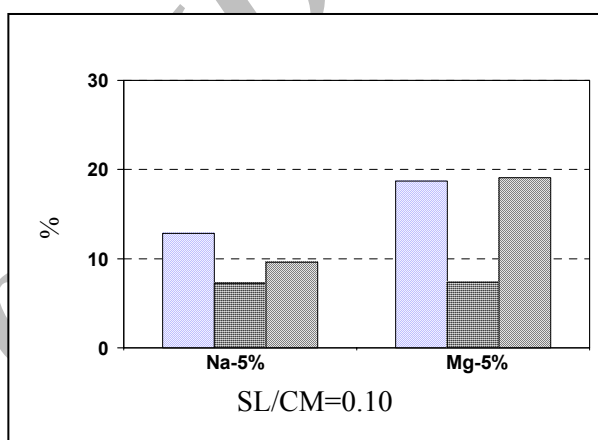
LP/CM=0 LP/CM=0.15 LP/CM=0.3



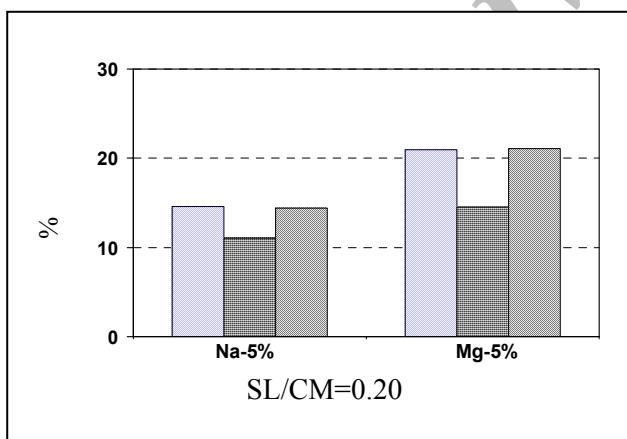
الف



ب

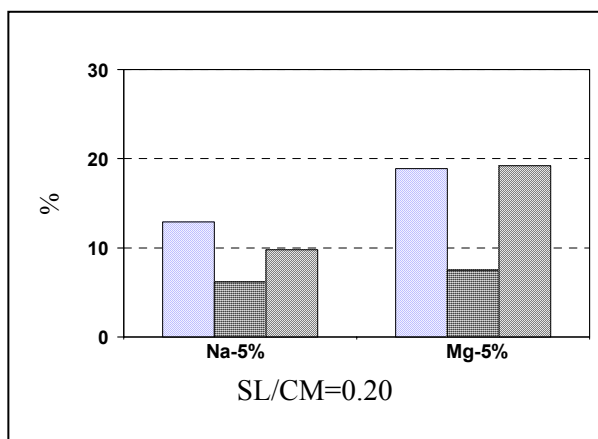


ب



ج

شکل ۲. درصد کاهش مقاومت فشاری بتن‌های با نسبت‌های مختلف LP/C و SL/C برای حالت $W/C=0.4$ قرار گرفته در محیط‌های سولفات سدیم و منیزیم بعد از ۱۴۰ روز



ج

شکل ۱. درصد کاهش مقاومت فشاری بتن‌های با نسبت‌های مختلف LP/C و SL/C برای حالت $W/C=0.3$ قرار گرفته در محیط‌های سولفات سدیم و منیزیم بعد از ۱۴۰ روز

۵. نتیجه گیری

در این تحقیق برای تعیین ترکیب مناسبی از سرباره و پودر سنگ آهک به عنوان افزودنی‌های جایگزین قسمتی از سیمان و برای ایجاد بیشترین دوام در بتن‌های واقع در محیط‌های سولفات منیزیم و سولفات سدیم، از ۲۷ نوع طرح اختلاط استفاده شد. غلظت محلول سولفات در آزمایش به میزان ۵٪ انتخاب شد. نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر ارائه می‌شوند:

۱- با افزایش نسبت آب به مواد سیمانی، مقدار کاهش مقاومت و تغییر وزن تمامی نمونه‌ها افزایش می‌یابد.
۲- از نظر کاهش مقاومت و تغییر وزن، سولفات منیزیم مخرب‌تر از سولفات سدیم است.

۳- از نظر کاهش مقاومت در محیط سولفات سدیم، اضافه کردن سرباره باعث کاهش دوام بتن می‌شود. اما در محیط سولفات منیزیم، افزایش ۱۰ درصدی سرباره سبب بهبود دوام نمونه‌ها می‌شود.

۴- از نظر کاهش مقاومت در محیط حاوی سولفات، اضافه کردن ۱۵٪ پودر سنگ آهک به بتن سبب افت کمتر مقاومت آن در محیط سولفاتی شده، و بنابراین باعث افزایش دوام نمونه‌ها می‌شود.

۵- از نظر تغییر وزن، استفاده از ۱۵٪ پودر سنگ آهک برای دستیابی به دوام بهتر بتن مناسب بود؛ اما استفاده از ۳۰٪ پودر سنگ آهک باعث کاهش دوام نمونه‌ها شد.

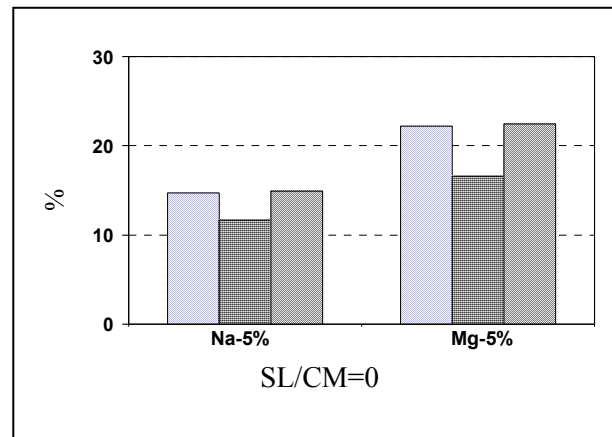
۶- از نظر تغییر وزن، استفاده از ۱۰ درصد سرباره به تخریب و کاهش وزن کمتر نمونه‌ها منجر شده و سبب بهبود دوام نمونه‌ها شد.

۷- بیشترین کاهش مقاومت فشاری (۲۲/۳ درصد) متعلق به بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۵ دارای ۲۰٪ سرباره و ۳۰٪ پودر سنگ آهک جایگزین سیمان قرار گرفته در محیط سولفات منیزیم ۵٪ پس از گذشت ۱۴۰ روز است. همچنین بیشترین کاهش وزن (۲/۲ درصد) متعلق به بتن با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۵ دارای ۲۰٪ سرباره و ۱۵٪ پودر سنگ آهک جایگزین سیمان واقع در محیط سولفات منیزیم ۵٪ پس از گذشت ۱۴۰ روز است. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که استفاده توأم از مقادیر نسبتاً زیاد سرباره و پودر سنگ آهک جانشین سیمان، از دوام بتن در محیط سولفاتی می‌کاهد.

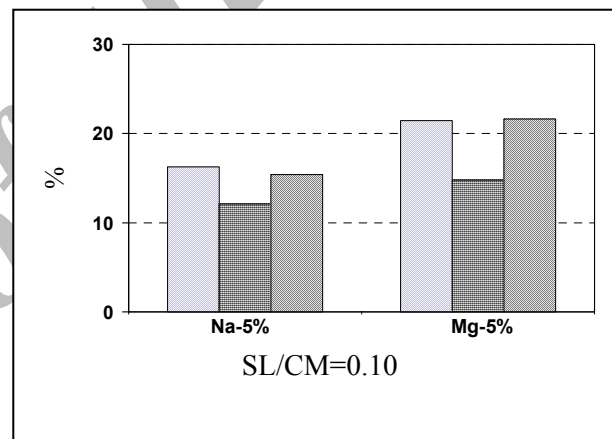
■ LP/CM=0

▨ LP/CM=0.15

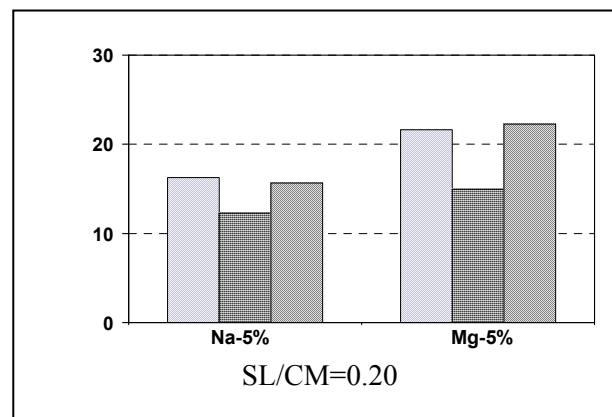
▩ LP/CM=0.3



الف



ب



ج

شکل ۳. درصد کاهش مقاومت فشاری بتن‌های با نسبت‌های مختلف LP/C و SL/C برای حالت $W/C=0.5$ قرار گرفته در محیط‌های سولفات سدیم و منیزیم بعد از ۱۴۰ روز

cement pastes under different circumstances"
Cement and Concrete Research, Vol. 32, pp.
1421-1427.

۴. مستوفی نژاد، داود و رئیس، محمد "بررسی دوام بتن حاوی پودر سنگ آهک در محیط‌های سولفاتی و کلروری" ششمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران، جلد دوم، دانشگاه صنعتی اصفهان، اردیبهشت ۱۳۸۲، ص. ۳۵۱-۳۵۸.

5. Young-Shik, P., Jin-kook, S., Jae-Hoon, L. and Young-Shik, P. (2002) "Strength deterioration of high strength concrete in sulfate environment", Cement and Concrete Research, Vol. 24, pp. 305-316.

6. ACI Committee 363 (1998) "State-of-the-art report on high-strength concrete", (ACI 363R-92), American Concrete Institute, 48 pp.

7. ACI Committee 211 (1998) "Guide for selecting proportion for high-strength concrete with Portland cement and fly ash", ACI 211.4R.93, American Concrete Institute, 13 pp.

8. Okamura, H. (1996) "Self - compacting high-performance concrete", Concrete International, November, pp. 50-54.

۹. مستوفی نژاد، داود و نزهتی، مجید، (۱۳۸۰) "ارائه روشی جهت طرح اختلاط بتن با مقاومت بالا (با نگرشی انتقادی بر روش ACI 211-4R)", اولین کنفرانس بین المللی بتن و توسعه، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران، اردیبهشت ص. ۶۶۷-۶۷۷.

۸- بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق، برای دستیابی به یک بتن با دوام در مقابل انواع یون سولفات، استفاده از نسبت‌های پایین آب به مواد سیمانی و نیز استفاده از ۱۰٪ سرباره و ۱۵٪ پودر سنگ آهک جایگزین سیمان، پیشنهاد می‌شود. بکارگیری این ترکیب در بتن‌های مجاور سولفات مانند بتن‌هایی که ابنیه و پایه‌های پل در بسیاری از نقاط کشور استفاده می‌شوند، علاوه بر افزایش دوام، از نظر اقتصادی نیز قابل توجه است. آشکار است که برای بکارگیری عملی و مطمئن از این ترکیب، لازم است تحقیقات و مشاهدات تجربی مستقل دیگری نیز انجام شوند

۶. قدردانی

از "قطب علمی علوم و فن آوری زیر دریا" که امکانات آزمایشگاهی و مالی لازم برای انجام این تحقیق را فراهم نمود، تقدیر و سپاسگزاری می‌شود.

۷. مراجع

1. Bonen, D., and Cohen, M. D. (1992) "Magnesium sulfate attack on Portland cement paste – I. Microstructure analysis", Cement and Concrete Research, Vol. 22, pp. 169-180.
2. Santhanam, M., Cohen, M. and Olek, J. (2002) "Modeling the effect of solution temperature and concentration during sulfate attack on cement mortars", Cement and Concrete Research, Vol. 32, pp. 585-592.
3. Hekal, E. E., Kishar, E. and Mostafa, H. (2002) "Magnesium sulfate attack on blended