

خواص مکانیکی و دوام بتن‌های کم‌کربن حاوی سرباره آهن و پودر سنگ آهک

Properties of low-carbon concretes containing GGBFS and micronized limestone powder

رامین ناصرالاسلامی^۱

کارشناس تحقیق و توسعه شرکت نانو بتن امین

مجید بصیرنیا

مدیرعامل شرکت نانو بتن امین

مهدی نعمتی چاری

عضو هیئت علمی بخش فن آوری بتن مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

مسعود سعادت خوش

مدیر کنترل کیفیت شرکت نانو بتن امین

¹ Ramin.Naseroleslami1@gmail.com

چکیده

استفاده از سیمان‌های سه‌جزئی می‌تواند علاوه بر کاهش اثرات منفی تولید سیمان بر محیط‌زیست، به بهبود مشخصات مکانیکی و دوام بتن نیز منجر شود. براین اساس، این پژوهش به بررسی بتن‌های حاوی سرباره آهن و پودر سنگ‌آهک در دو نسبت آب به سیمان مختلف می‌پردازد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که جایگزینی ۳۰٪ جرم سیمان با سرباره آهن و ۵٪ از جرم سیمان باقی‌مانده با پودر سنگ‌آهک میکرونیزه، می‌تواند بدون کاهش مقاومت فشاری باعث صرفه‌جویی ۳۵٪ در مصرف سیمان شود؛ هرچند با افزایش مقدار جایگزینی سیمان با پودر سنگ‌آهک تا ۱۰٪، کاهش جزئی در مقاومت فشاری بتن مشاهده می‌شود. بررسی پارامترهای دوام نیز نشان می‌دهد که جایگزینی ۳۰٪ از جرم سیمان با سرباره آهن و ۱۰٪ از جرم باقی‌مانده سیمان با پودر سنگ‌آهک میکرونیزه، اثر منفی بر پارامترهای مقاومت الکتریکی، ضریب مهاجرت تسریع شده یون‌های کلرید و جذب آب بتن ندارد.

کلمات کلیدی: سرباره آهن، پودر سنگ‌آهک، بتن کم‌کربن، مواد جایگزین سیمان، دوام

Abstract

The use of ternary blended cements can not only reduce the negative environmental impacts of cement production but also can improve the mechanical and durability properties of concrete. Accordingly, this study investigates concretes incorporating ground granulated blast furnace slag (GGBFS) and limestone powder at two different water-to-cement ratios. The results indicate that replacing 30% of cement by weight with GGBFS and 5% of the remaining cement with micronized limestone powder can reduce cement consumption by up to 35% without significant reduction in compressive strength. However, increasing limestone powder content to 10% leads to a slight decrease in compressive strength. Durability assessments also show that replacing 30% of cement with GGBFS and 10% of the remaining cement with limestone powder does not adversely affect the electrical resistivity, rapid chloride migration coefficient, or water absorption of the concrete.

Keywords: ground granulated blast furnace slag, supplementary cementitious materials, low carbon concretes, micronized lime stone powder, concrete durability.

Keywords: durability, ground granulated blast furnace slag, limestone powder, low-carbon concrete, supplementary cementitious materials.

۱- مقدمه

صنعت سیمان به عنوان یکی از آلاینده ترین و انرژی برترین صنایع همواره به راهکارهایی به منظور کاهش آلودگی و کاهش مصرف انرژی نیاز دارد (۱). یکی از رایج ترین راهکارها جهت کاهش اثر تخریبی صنعت سیمان بر محیط زیست، استفاده از مواد جایگزین سیمان به جای بخشی از کلینکر سیمان و تولید سیمان های آمیخته است (۲). از این مواد در کارخانه های بتن نیز می توان به عنوان بخشی از سیمان مصرفی استفاده نمود تا مصرف سیمان کاهش یابد و در نتیجه از میزان ایجاد آلاینده های زیست محیطی و مصرف انرژی کاسته شود (۳-۵). یکی از پرمصرف ترین این مواد، سرباره آهن است که قابلیت جایگزینی با ۲۰٪ الی ۳۰٪ وزن سیمان بدون ایجاد کاهش قابل توجه در مقاومت فشاری را دارد (۶). همچنین در تحقیقات گذشته، اثرات مطلوبی از سرباره آهن بر مشخصات مکانیکی و دوام بتن نیز مشاهده شده است (۷-۹). از این رو اثرات سودمند سرباره آهن در زمان درگیری کشور با بحران انرژی، لزوم بررسی راهکارهای اجرایی برای کاهش بیش از پیش مصرف سیمان را برجسته تر می کند. یکی از این راهکارها استفاده از سرباره آهن در درصدهای جایگزینی بالاتر از ۳۰٪ است. هرچند نتایج پژوهش ها نشان می دهد که استفاده از سرباره آهن، به ویژه سرباره آهن موجود در ایران، در درصدهای جایگزینی بالاتر از ۲۵٪ الی ۳۰٪ باعث کاهش مقاومت فشاری می شود (۶) که برای جبران این ضعف باید نسبت آب به سیمان بتن را کاهش داد و از مواد افزودنی روان کننده استفاده نمود. طبیعی است که این اقدام باعث افزایش هزینه تولید شده و توجیه اقتصادی این راهکار را تا حدودی با چالش مواجه می کند.

^۲. این موضوع در نمونه های آزمایشی مقدماتی این پژوهش نیز تحقیق شده است.

یکی دیگر از راهکارهای ارائه شده برای کاهش بیش‌ازپیش مصرف سیمان، استفاده از بتن ژئوپلیمری با استفاده از سرباره آهن است (۱۰). گرچه استفاده از سیمان‌های ژئوپلیمری آلاینده‌گی بسیار کم دارد؛ اما هزینه زیاد ماده فعال‌ساز، نیاز به رعایت مسائل ایمنی در هنگام کار با فعال‌سازها، ایجاد شوره در سطح بتن و واکنش قلیایی سنگ‌دانه‌ها از معایب این بتن‌هاست که توجیه فنی و اقتصادی تولید این بتن‌ها را تا حدودی با چالش‌های اساسی روبرو می‌نماید (۱۱-۱۲).

استفاده از سیمان‌های سه‌جزئی می‌تواند رویکرد دیگری برای کاهش مصرف سیمان باشد (۱۳). در این زمینه تحقیقات زیادی در خصوص تولید سیمان‌های سه‌جزئی حاوی سرباره انجام شده است. برخی محققین از پوزولان‌های طبیعی مانند تراس و پومیس در کنار سرباره برای تولید سیمان سه‌جزئی استفاده کرده‌اند؛ اما محدودیت در تولید این مواد، دسترسی محدود به این پوزولان‌ها، افت شدید کارایی و نیاز به فوق‌روان‌کننده بیشتر، استفاده از سیمان سه‌جزئی با این ترکیب را با چالش مواجه کرده است؛ چالش دیگر آن است که هم سرباره آهن و هم پوزولان‌های طبیعی (مانند تراس و پومیس) اثر کاهشی بر مقاومت فشاری در سنین اولیه دارند و هم‌افزایی اثر کاهشی آن‌ها بر مقاومت اولیه بتن می‌تواند منجر به چالش‌های اجرایی مانند افزایش زمان قالب‌برداری در پروژه‌های عمرانی شود (۱۴). شاید بتوان گفت که کاربردی‌ترین ماده جایگزین سیمان موجود در کشور که محدودیت تولید نداشته و می‌تواند در تولید سیمان‌های سه‌جزئی در کنار سرباره موردتوجه قرار گیرد، دوده سیلیس باشد که آن هم به دلیل قیمت بالا، محدودیت در استفاده به روش پودری و احتمال افزایش جمع‌شدگی خمیری با چالش‌های خاص خود مواجه است (۱۵-۱۸). اما پودر سنگ‌آهک میکرونیزه می‌تواند به‌عنوان یک افزودنی پودری غیرفعال ارزان‌قیمت به‌عنوان جزء سوم در کنار سرباره مورد استفاده قرار گیرد تا بتوان مصرف سیمان را هر چه بیشتر کاهش داد. علاوه بر کاهش مصرف سیمان، پودر سنگ‌آهک میکرونیزه می‌تواند با تأمین ریزدانه مناسب در بتن، تا حدودی ضعف دانه‌بندی در ماسه‌های مصرفی در کشور را جبران کند و با تأمین ریزدانه کافی در مصالح سنگی به بهبود خواص بتن تازه و رئولوژی آن کمک کند (۱۹-۲۱).

براین اساس، در این پژوهش استفاده از سیمان سه جزئی حاوی سرباره آهن و پودر سنگ آهک میکرونیزه مورد بررسی قرار خواهد گرفت. بدین منظور دو نمونه بتن کنترل در دو نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۵ و ۰/۴ و در عیار ثابت ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب ساخته شده است. سپس ۳۰٪ جرم سیمان با سرباره آهن جایگزین شده و در طرح‌های بعد ۲/۵٪ الی ۱۰٪ جرم سیمان باقی‌مانده با پودر سنگ آهک میکرونیزه، به‌عنوان ماده دوم، جایگزین شده و مشخصات مکانیکی شامل مقاومت فشاری در سنین مختلف و مشخصه‌های دوام شامل مقاومت الکتریکی، مهاجرت تسریع شده یون‌های کلرید و جذب آب مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که درصد جایگزینی ۳۰٪ به آن دلیل انتخاب شده است که اغلب پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهند که جایگزینی سیمان با سرباره آهن تا ۳۰٪ باعث کاهش محسوس مقاومت فشاری نمی‌شود (۶). همچنین پژوهش‌هایی که به بررسی اثر پودر سنگ آهک بر ویژگی‌های بتن پرداخته‌اند نیز نشان می‌دهند که جایگزینی سیمان با پودر سنگ آهک در درصدهای بالاتر از ۱۰٪ باعث کاهش مقاومت می‌شود (۲۱)؛ لذا سرباره آهن در ۳۰٪ جایگزینی و پودر سنگ آهک تا ۱۰٪ جایگزینی با سیمان مورد بررسی قرار گرفته‌اند تا پارامترهای مکانیکی و دوامی در کنار مصرف سیمان هم‌زمان بهینه شوند.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱. مصالح

برای پیشبرد این پژوهش، از سیمان نوع ۲ دلیجان و سرباره خط ۳ ذوب‌آهن اصفهان با رده ۱۰۰ (بر اساس استاندارد ASTM C989) استفاده شده است^۳ که آنالیز شیمیایی و مشخصات فیزیکی آن‌ها در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است. مصالح سنگی با دانه بندی استاندارد مطابق استاندارد ASTM C33 مورد استفاده قرار گرفته است که ویژگی‌های فیزیکی آن‌ها در جدول ۳ آمده است^۴. آب شرب و افزودنی کاهنده قوی آب بر پایه پلی کربوکسیلات نیز به‌منظور تنظیم کارایی بتن‌های ساخته شده مورد استفاده قرار

^۳ نسبت مقاومت فشاری ملات سرباره‌ای به ملات سیمانی در سن ۲۸ روز طبق استاندارد ASTM C989 برابر با ۱/۰۲ بوده است.

^۴ مصالح سنگی از منطقه ونارچ قم برداشت و در شرکت نانوبتن امین فرآوری شده‌اند.

گرفته است. پودر سنگ آهک مصرفی با وزن مخصوص ۲/۴۰ تولید شرکت پودر سازان آزادی بوده که ۱۰۰٪ جرم آن از الک ۴۵ میکرون رد می شود.

جدول ۱- آنالیز شیمیایی سیمان و سرپاره (درصد وزنی)

ماده	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	LOI	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
سیمان	۲۱/۰	۶۳/۳	۳/۲	۴/۸	۲/۴	۱/۸	۰/۳	۰/۷	۲/۲	۵۴/۸	۱۸/۶	۷/۳	۱۰/۰
سرپاره	۳۹/۰	۳۲/۳	۷/۳	۶/۶	۲/۰	۷/۴	۶/۰	۱/۴	۰/۰۴	-	-	-	-

جدول ۲. مشخصات فیزیکی سیمان و مواد جایگزین سیمان

ویژگی	سیمان	پودر سنگ آهک میکرونیزه	سرپاره
سطح ویژه (m ² /kg)	۳۱۵	۵۷۰	۵۳۰
وزن مخصوص	۳/۱۴	۲/۴۰	۲/۹۰
نوع	نوع ۲ دلیجان	-	رده ۱۰۰ ذوب آهن اصفهان

جدول ۳. مشخصات فیزیکی مصالح سنگی

ویژگی	ماسه	شن
جذب آب (%)	۲/۴۰	۰/۹۰
وزن مخصوص (اشباع با سطح خشک)	۲/۶۳	۲/۶۸
شکل ظاهری	ترکیب شکسته و گردگوشه گردگوشه	

۲-۲. طرح‌های مخلوط

به منظور بررسی سیمان‌های سه جزئی حاوی سرباره و پودر سنگ آهک، ۱۲ طرح مخلوط که جزئیاتشان در جدول ۴ ارائه شده، ساخته شده است. این ۱۲ طرح در دو نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴ و ۰/۵ (در عیار ثابت مواد سیمانی به مقدار ثابت ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب) قابل دسته‌بندی هستند. هر دسته شامل یک بتن سیمانی (بتن کنترل)، یک بتن سیمانی سرباره‌ای (در درصد جایگزینی ۳۰٪) بوده و چهار بتن دیگر حاوی سیمان سه جزئی با ترکیب سیمان، سرباره آهن و پودر سنگ میکرونیزه هستند. تمام بتن‌ها برای حصول اسلامپ 10 ± 2 طراحی شده‌اند. هرچند باید اضافه نمود که بتن‌های ساخته شده در نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۵۰ بدون نیاز به افزودنی فوق‌روان‌کننده در این بازه جای می‌گرفتند، اما بتن‌های ساخته شده در نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۰ با افزودن مقدار مورد نیاز از افزودنی فوق‌روان‌کننده به میزان ۰/۳٪ جرم مواد سیمانی به این کارایی رسیده‌اند. نسبت شن و ماسه به کل مصالح سنگی نیز به ترتیب ۰/۴۰٪ و ۰/۶۰٪ بوده است.

جدول ۴. ترکیب مواد سیمانی بتن‌های ساخته شده

ردیف	نام طرح	آب به سیمان	عیار کل مواد	سیمان	سرباره	پودر سنگ آهک
			سیمانی		آهن	
1	کنترل	0/5	400	400	0	0
2	30-0-(0/5)				120	0
3	30-2/5-(0/5)				120	10
4	30-5-(0/5)				12	20
5	30-7/5-(0/5)				120	30
6	30-10%-(0/5)				120	40
7	کنترل	0/4	400	400	0	0
8	30-0-(0/4)				120	0
9	30-2/5-(0.4)				120	10
10	30-5-(0.4)				120	20
11	30-7/5-(0.4)				120	30
12	30-10-(0.4)				120	40

مقادیر به ازای کیلوگرم بر مترمکعب در جدول درج شده‌اند.

۲-۳. آزمایش‌های انجام‌شده

به‌منظور بررسی اثر درصدهای مختلف سرباره آهن، بتن‌های معرفی شده در جدول ۵ بر اساس استاندارد ملی ۱۶۰۸-۲ ساخته و عمل‌آوری شده‌اند و سپس آن دسته از مشخصات مکانیکی و دوام بتن که کاربردی‌تر بوده و مبحث نهم نیز به آن‌ها پرداخته است، مورد بررسی قرار گرفته است. شرح آزمایش‌های انجام شده برای بررسی این مؤلفه‌های کاربردی در جدول ۵ آمده است.

جدول ۵. آزمایش‌های انجام شده بر روی بتن‌های ساخته شده

آزمایش	سن	تعداد آزمون	شکل آزمون	ابعاد آزمون (cm)	استاندارد
اسلامپ	بتن تازه	-	-	-	INSO 3202-2
مقاومت فشاری	۳، ۷، ۱۴، ۲۸، ۹۰	۲	مکعبی	۱۰×۱۰×۱۰	INSO 1608-3
مقاومت الکتریکی	۱۴، ۲۸، ۹۰	۱	استوانه‌ای	۲۰×۱۰	AASHTO T358
مهاجرت تسریع شده یون‌های کلرید	28	۳	استوانه‌ای	۱۰×۵	INSO 21479
جذب آب نیم‌ساعته	28	۳	استوانه‌ای	۱۰×۵	BS-EN 1881-122

۳-۱. کارایی

انجام [BA3] [رامین^۴] آزمون اسلامپ و میزان نیاز به فوق روان کننده (جدول ۶) نشان می‌دهد که در هر دو نسبت آب به مواد سیمانی 0/4 و

بتن کنترل با بتن سرباره‌ای و کارایی بتن‌های سرباره‌ای - پودرسنگی در یک محدوده با تغییرات جزئی بوده است. این نتیجه را می‌توان

این‌گونه تفسیر کرد که ذرات سرباره آهن نسبت به سیمان، سطح کروی‌تر و صیقلی‌تری دارند (۶). در نتیجه می‌توانند آب

به‌دام‌افتاده در سطح ذرات خود را کاهش دهند. اما سطح ویژه بالاتر ذرات سرباره نسبت به ذرات سیمان می‌تواند باعث افزایش آب

جذب شده در سطح خود شود. به عبارت دیگر می‌توان این‌گونه بیان نمود که این دو سازوکار که یکی باعث افزایش و دیگری باعث

کاهش آب جذب شده در سطح ذرات سرباره می‌شوند، اثر هم دیگر را خنثی کرده و نهایتاً سرباره آهن استفاده شده با نرمی

$530 \text{ m}^2/\text{kg}$ تأثیر قابل توجهی بر [BA5] [رامین^۶] روانی بتن نداشته است. درباره اثر هم‌زمان سرباره آهن و پودرسنگ می‌توان این‌گونه

که گرچه ذرات پودرسنگ آهک ممکن است به دلیل نرمی بالاتر آب بیشتری را در سطح ذرات خود به دام بیندازند؛ اما به دلیل

ریزی (نرمی) ذرات توانسته‌اند فضاهای خالی موجود در مخلوط بتن را پر کنند و در اثر ایجاد اثر یاتاقانی^۵ باعث بهبود روانی شوند.

[BA7] [رامین^۸] در نتیجه این دو سازوکار متضاد، پودرسنگ آهک در محدوده مصرفی تحقیق حاضر نیز تغییری در روانی بتن‌ها ایجاد

(۱۹). شاید این‌گونه ارزیابی شود که بتن ساخته شده به دلیل ساخته شدن در عیار ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و دارا بودن سرباره

آهن فاقد فضای خالی قابل توجه می‌باشد. اما توجه به این نکته ضروری است که ماسه مصرفی برای ساخت این بتن‌ها علی‌رغم

⁵ Ball Bearing Effect

داشتن منشا طبیعی دارای ذرات شکسته می باشد و پودرسنگ میکرونیزه مصرفی به دلیل ریزدانه‌گی بالا می تواند به پرکردن فضای خالی شکل گرفته در بتن ذرات ماسه کمک کرده و روانی بتن را بهبود دهد.

جدول ۶. آزمایش های انجام شده بر روی بتن های ساخته شده

ردیف	نام طرح	فوق روان کننده	اسلامپ (سانتی متر)
(درصد وزنی سیمان)			
1	کنترل	-	11.5
2	30-0-(0/5)	-	11.0
3	30-2/5-(0/5)	-	10.0
4	30-5-(0/5)	-	11.5
5	30-7/5-(0/5)	-	10.0
6	30-10%-(0/5)	-	10.5
7	کنترل	0/3	10.5
8	30-0-(0/4)	0/3	9.5
9	30-2/5-(0.4)	0/3	11.0
10	30-5-(0.4)	0/3	11.5
11	30-7/5-(0.4)	0/3	9.5
12	30-10-(0.4)	0/3	9.0

بررسی مقاومت فشاری بتن‌های حاوی سیمان‌های دو و سه‌جزئی در شکل ۱ نشان می‌دهد که روند مشاهده شده در اثر استفاده از سیمان‌های دو و سه‌جزئی در هر دو نسبت آب به مواد سیمانی بررسی‌شده، تقریباً از الگوی یکسانی پیروی می‌کند. برای توضیح اثر پودر سنگ بر مقاومت فشاری بتن باید به دو اثر هسته‌زایی^۶ و رقیق‌شدگی^۷ در اثر استفاده از پودر سنگ توجه نمود. اثر هسته‌زایی به بیان عمومی به شکل گرفتن اولین فاز جامد به هنگام آگیری سیمان گفته می‌شود. زمانی که ذرات بسیار ریز (و دارای سطح ویژه بالای پودر سنگ) در مخلوط بتن وجود دارند، محصولات آگیری سیمان مانند ژل کلسیم سیلیکات هیدراته شده، اترینگایت و آهک می‌توانند بر روی سطح ذرات ریز پودر سنگ شکل بگیرند. درحالی‌که در غیاب ذرات بسیار ریز پودر سنگ این محصولات به‌صورت کاتوره‌ای در مخلوط شکل می‌گیرند. اثر هسته‌زایی پودر سنگ می‌تواند باعث تولید مؤثرتر محصولات هیدراسیون، شکل‌گیری خمیر سیمان مترکم‌تر و تخلخل کمتر در ناحیه انتقال سنگ‌دانه و خمیر سیمان شود که نتیجه آن اثر مثبت بر مقاومت فشاری است. اما در مقابل اثر هسته‌زایی، پدیده رقیق‌شدگی است. پدیده رقیق‌شدگی به معنی کاهش مقدار سیمانی است که می‌تواند در فرایند کسب مقاومت شرکت کند و جایگزینی آن با ماده‌ای خنثی مانند پودر سنگ است که مستقیماً باعث تولید محصولات هیدراسیون نمی‌شود. بدیهی است که این پدیده اثر منفی بر مقاومت فشاری دارد (۲۲).

شکل ۱ نشان می‌دهد که در هر دو نسبت آب به سیمان با جایگزینی ۳۰٪ از وزن سیمان با سرباره آهن، مقاومت فشاری ۷ روزه به‌شدت کاهش‌یافته که دلیل آن را می‌توان به پدیده رقیق‌شدگی ناشی از جایگزینی ۳۰٪ از وزن سیمان با سرباره آهن مرتبط دانست. اما پس از آن با جایگزینی ۲/۵٪ الی ۱۰٪ از جرم سیمان باقی‌مانده با پودر سنگ میکرونیزه، مقاومت فشاری ۷ روزه تغییر محسوسی نسبت به بتن سرباره‌ای نداشته است. در توجیه این پدیده می‌توان به اثر مثبت اثر هسته‌زایی پودر سنگ میکرونیزه اشاره

⁶ Nucleation effect

⁷ Dillution effect

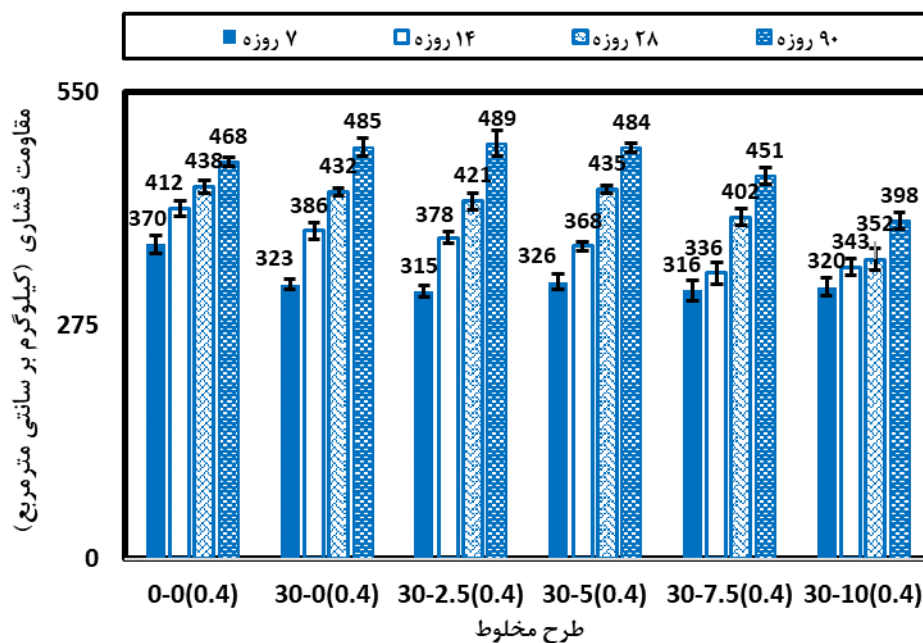
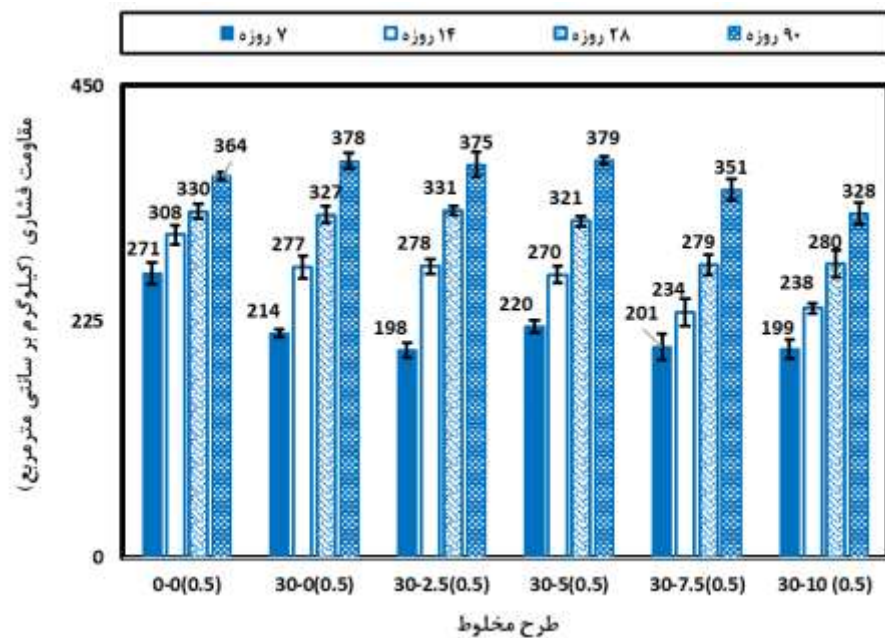
کرد که از کاهش مقاومت در درصد‌های بالاتر پودر سنگ میکرونیزه جلوگیری کرده است. اثر مثبت پودر سنگ‌آهک بر مقاومت فشاری در سنین پایین در تحقیقات پیشین نیز مشاهده شده است (۲۳).

در سن ۱۴ روز می‌توان مشاهده نمود که در هر دو نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۵ و ۰/۴ بتن‌های سرباره‌ای نسبت به نمونه بتن کنترل، کاهش مقاومتی در حدود ۱۰٪ داشته‌اند که این کاهش مقاومت را می‌توان به عدم تکمیل آبگیری سرباره در این سن نسبت داد. در سن ۱۴ روز، بتن‌های حاوی سرباره و پودر سنگ‌آهک (تا ۵٪ جایگزینی) کاهش مقاومتی نسبت به بتن سرباره‌ای نداشته‌اند؛ اما در هر دو نسبت آب به سیمان بررسی شده، بتن‌های حاوی درصد‌های بالاتر پودر سنگ (۷/۵٪ و ۱۰٪) شاهد کاهش مقاومت حدود ۱۵ درصد نسبت به بتن سرباره‌ای بوده‌اند. می‌توان این‌گونه استدلال نمود که تا درصد جایگزینی ۵٪ اثر مثبت پدیده هسته‌زایی اثر منفی پدیده رقیق‌شدگی را جبران کرده و جایگزینی سیمان با پودر سنگ میکرونیزه تا ۵٪ باعث کاهش مقاومت نشده است. لکن در درصد‌های بالاتر جایگزینی سیمان با پودر سنگ، اثر منفی پدیده رقیق‌شدگی بر اثر مثبت پدیده هسته‌زایی غالب بوده است که نتیجه آن کاهش مقاومت فشاری در درصد‌های جایگزینی ۷/۵٪ و ۱۰٪ از وزن سیمان با پودر سنگ میکرونیزه بوده است.

نتایج به‌دست‌آمده در سن ۲۸ روز نیز تا حد زیادی مشابه نتایج سن ۱۴ روز است، با این تفاوت که در سن ۲۸ روز به دلیل آنکه عمده سرباره آهن مصرفی وارد فرایند هیدراسیون شده است، بتن‌های سرباره‌ای کاهش مقاومتی نسبت به نمونه‌های بتن کنترل در هر دو نسبت آب به مواد سیمانی بررسی شده از خود نشان نداده‌اند. همچنین در هر دو نسبت آب به مواد سیمانی بررسی شده، بتن‌های حاوی سرباره و پودر سنگ‌آهک (تا ۵٪) کاهش مقاومتی نسبت به بتن سرباره‌ای (و به تبع آن نسبت به بتن کنترل) نداشته‌اند؛ اما در بتن‌های حاوی درصد‌های بالاتر پودر سنگ‌آهک (۷/۵٪ و ۱۰٪)، بالا بودن درصد جایگزینی سیمان با یک ماده غیرفعال، باعث ایجاد حدود ۱۵٪ کاهش مقاومت نسبت به بتن کنترل شده است که همان توجیه ارائه شده برای روندهای مشاهده شده در سن ۱۴ روز، در سن ۲۸ روز نیز قابل‌ارائه است.

در سن ۹۰ روز اما مقاومت بتن‌های سرباره‌ای در هر دو نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴ و ۰/۵ از مقاومت نمونه‌های بتن کنترل بیشتر بوده که دلیل آن را می‌توان به ادامه فرایند هیدراسیون سیمان و سرباره در بلندمدت مرتبط دانست. به تبع بالاتر بودن مقاومت بتن‌های سرباره‌ای از بتن‌های سیمانی در هر دو نسبت آب به سیمان بررسی شده، مقاومت بتن‌های حاوی سرباره و پودر سنگ (تا ۰/۵) نیز از بتن‌های کنترل بالاتر بوده است. تنها تفاوت سن ۹۰ روز با سنین پایین‌تر آن است که در هر دو نسبت آب به مواد سیمانی بررسی شده کاهش مقاومت بتن حاوی ۰/۷/۵ پودر سنگ نسبت به بتن کنترل بسیار جزئی بوده است، حال آنکه این بتن در سنین ۱۴ و ۲۸ روز کاهش مقاومتی حدود ۱۵ و ۲۵ درصد نسبت به بتن‌های حاوی فقط سیمان داشته‌اند. این مشاهده را می‌توان این گونه توجیه کرد که پیشرفت هیدراسیون سیمان و سرباره آهن باعث شده است تا درصدی از پودر سنگ که باعث کاهش مقاومت نسبت به بتن کنترل نمی‌شود، افزایش یابد.

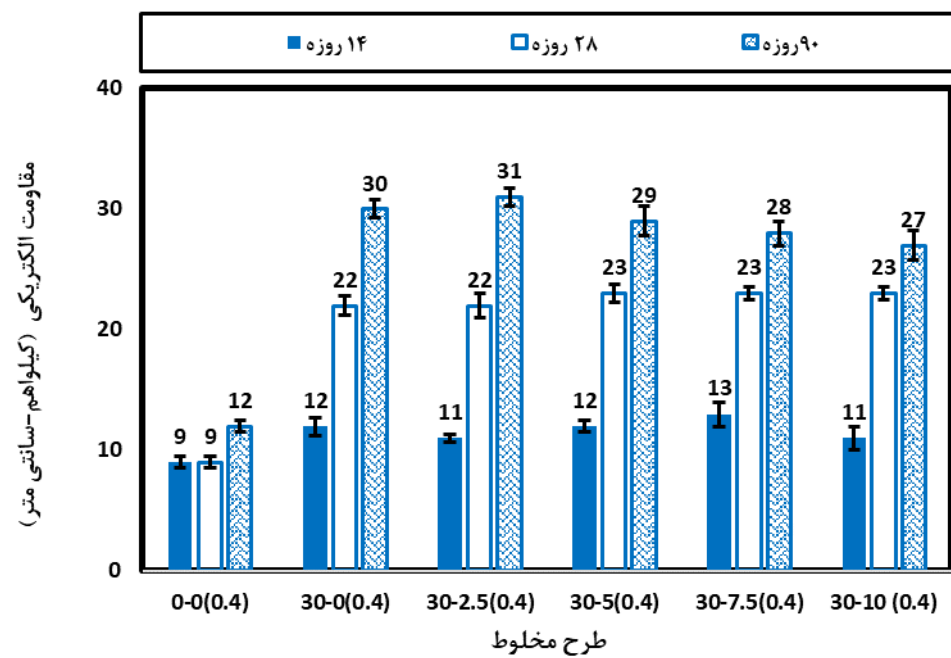
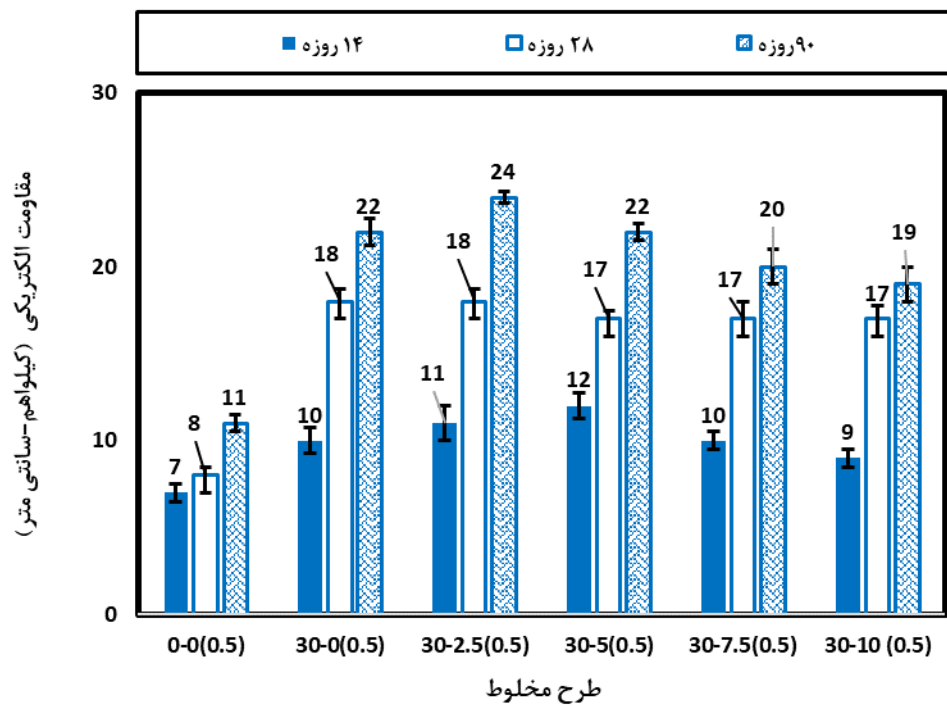
به عنوان نتیجه کلیدی می‌توان بحث مقاومت فشاری و کارایی را بدین شکل جمع‌بندی نمود که می‌توان ۳۵٪ از وزن کل مواد سیمانی با ترکیب ۳۰٪ سرباره آهن و ۵٪ پودر سنگ‌آهک بدون مشاهده کاهش کارایی و کاهش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز جایگزین نمود.



شکل ۱. مقاومت فشاری بتن‌های ساخته شده در سنین مختلف

۳-۳. مقاومت الکتریکی و ضریب مهاجرت تسریع شده یون‌های کلرید

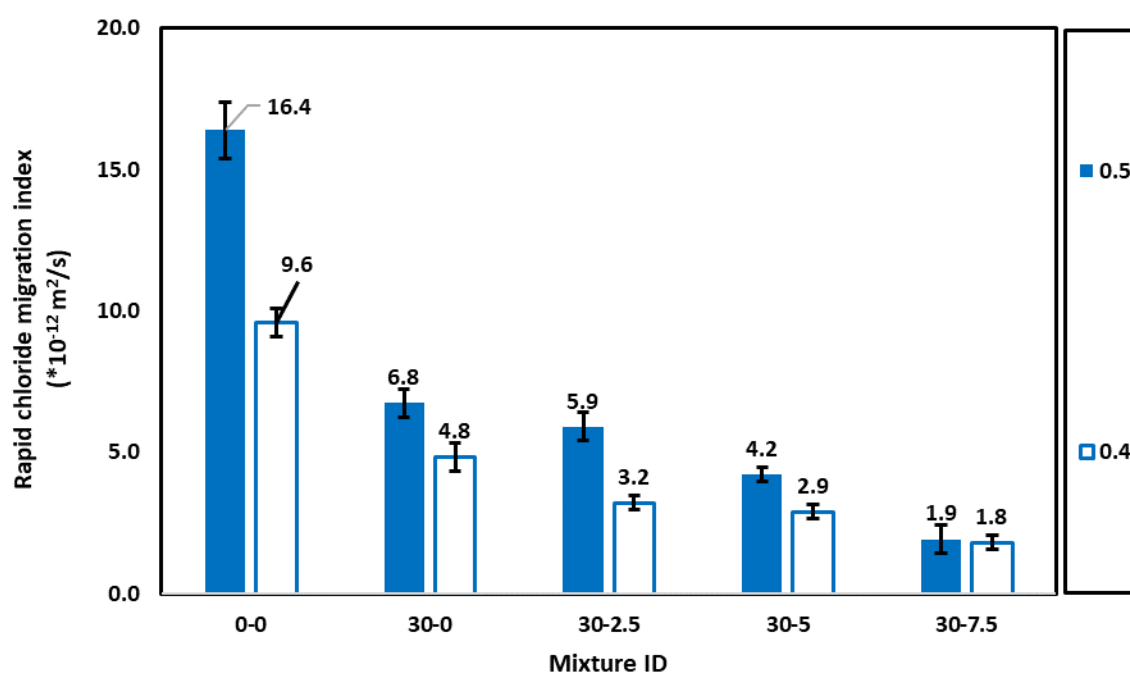
بررسی مقاومت الکتریکی بتن‌های ساخته شده در شکل ۲ نشان می‌دهد که هر سه سن و در هر دو نسبت آب به مواد سیمانی مورد بررسی، مقاومت الکتریکی بتن‌های سرباره‌ای از بتن‌های سیمانی به مراتب بالاتر بوده است که دلیل این مشاهده را می‌تواند به قابلیت سرباره در مصرف آهک، تولید ژل کلسیم سیلیکات هیدراته شده و بهبود ریزساختار بتن مرتبط دانست (۶)، لکن جایگزینی سیمان با پودر سنگ آهک (تا ۵٪) باعث تغییر محسوس در مقاومت الکتریکی نشده؛ اما جایگزینی سیمان با درصد‌های بالاتر پودر سنگ (۷/۵٪ و ۱۰٪) باعث کاهش جزئی در مقاومت الکتریکی شده است. اثر پودر سنگ آهک بر مقاومت الکتریکی را می‌توان این‌گونه توجیه نمود که مقاومت الکتریکی به دو عامل عمده ساختار منافذ موئینه و چگالی یون‌ها در مایع منفذی بستگی دارد. زمانی که وزن کمی از سیمان (تا ۵٪) با پودر سنگ جایگزین می‌شود، مقدار اندک پودر سنگ قابلیت ایجاد تغییر چشمگیر در چگالی یون‌های مایع منفذی و یا ریزساختار بتن را نداشته و به همین دلیل مقاومت الکتریکی تغییر معناداری نکرده است. اما بخش مقاومت فشاری نشان داد که جایگزینی سیمان با پودر سنگ در درصد‌های بالاتر (۷/۵٪ و ۱۰٪) در سنین ۱۴ و ۲۸ روز باعث کاهش مقاومت فشاری شده که این کاهش مقاومت فشاری را می‌توان به ضعف در ساختار منافذ موئینه و افزایش ارتباط آن‌ها با هم تعبیر کرد که این ضعف خود را در کاهش مقاومت الکتریکی بتن‌های حاوی ۷/۵٪ و ۱۰٪ پودر سنگ نشان داده است.



s

شکل ۲. مقاومت الکتریکی بتن‌های ساخته در سنین مختلف

ضریب مهاجرت تسریع شده یون‌های کلرید به داخل بتن و مقاومت الکتریکی هر دو به پارامترهای مشابهی (چگالی یون‌های مایع منفذی و ساختار منافذ موئینه بتن) بستگی دارند. نتایج این بخش نیز نشان می‌دهد که اثر پودر سنگ‌آهک و سرباره بر ضریب مهاجرت تسریع شده یون‌های کلرید دقیقاً مشابه روند مشاهده شده در بخش مقاومت الکتریکی است؛ لذا می‌توان گفت که تفاسیر ارائه شده در بخش مقاومت الکتریکی در این بخش نیز صادق است. ضریب مهاجرت تسریع شده یون‌های کلرید برای بتن‌های ساخته شده در شکل ۳ نمایش داده شده است.

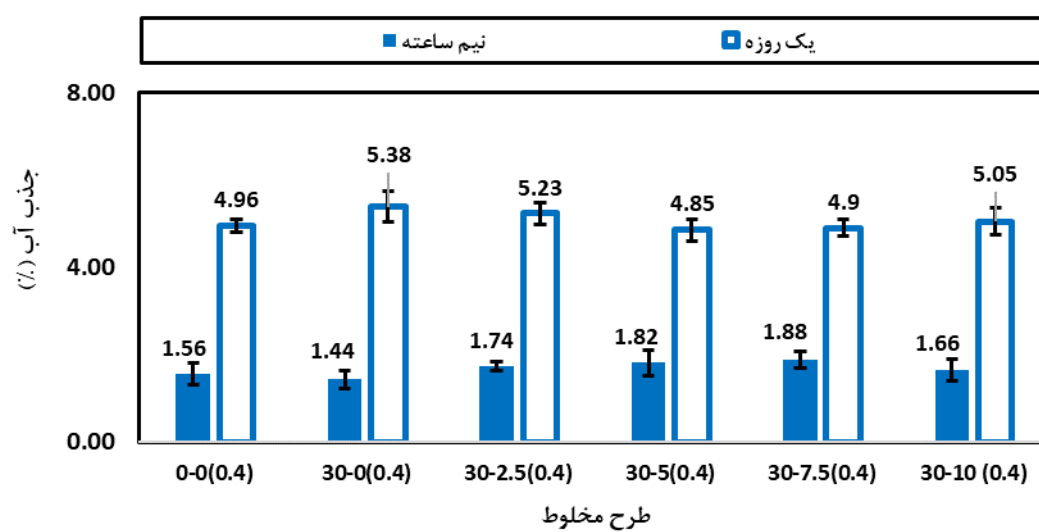
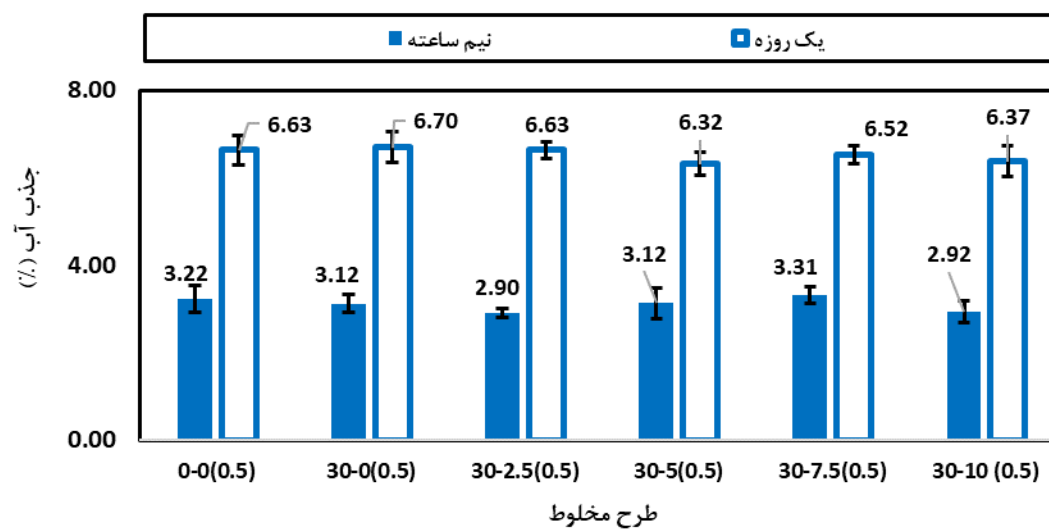


جدول ۳. ضریب مهاجرت تسریع شده یون‌های کلرید

۴-۳. جذب آب

بررسی پارامتر جذب آب در شکل ۴ نشان می‌دهد که جذب آب نیم‌ساعته و یک‌روزه بتن‌های حاوی سیمان‌های دو و سه جزئی تفاوت معناداری با جذب آب بتن‌های سیمانی در دو نسبت آب به مواد سیمانی بررسی شده ندارد. عدم تأثیرگذاری مواد جایگزین سیمان بررسی شده بر پارامتر جذب آب را می‌توان این‌گونه بررسی کرد که این پارامتر به مؤلفه‌های تعداد، طول، قطر و ارتباط منافذ موئینه بستگی دارد (24-22).

گرچه مطالعات بسیار زیادی، بهبود در ساختار منافذ موئینه بتن را در صورت جایگزینی ۳۰٪ از وزن سیمان با سرباره گزارش داده‌اند (۶) اما نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که جذب آب بتن سیمانی با بتن سرباره‌ای تفاوت قابل‌توجهی ندارد. این مشاهده را می‌توان این‌گونه توجیه نمود که بتن کنترل به دلیل دارا بودن تخلخل بیشتر، پتانسیل جذب آب بیشتری دارد؛ اما به دلیل قطر زیاد منافذ موئینه در این بتن، این منافذ مکش موئینه کمتری در لحظات اولیه فرایند جذب دارند. از طرف دیگر، بتن سرباره‌ای دارای منافذ موئینه با ارتباط کمتر و پیچاپیچی بیشتر است که می‌تواند منجر به جذب آب کمتری شود؛ اما باریکی این منافذ منجر به مکش موئینه بیشتر این منافذ در لحظات اولیه شده و می‌تواند فرایند جذب آب را تسهیل کند که نتیجه آن برابر بودن جذب آب بتن‌های سیمانی و سرباره‌ای در هر دو نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴ و ۰/۵ است. به بیان ساده‌تر، منافذ با ارتباط بیشتر و پیچاپیچی کمتر همچنین با قطر بیشتر (مکش اولیه کمتر) در نمونه بتن کنترل در مقابل منافذ با ارتباط کمتر و پیچاپیچی بیشتر از طرفی با قطر باریک‌تر (مکش بیشتر) در بتن سرباره‌ای باعث برابر شدن جذب آب اولیه این بتن‌ها شده است (۲۲). در ادامه نیز شاید بتوان این‌گونه توجیه کرد که اضافه‌شدن پودر سنگ‌آهک میکرونیزه نتوانسته ساختار منافذ را به حدی تغییر دهد که باعث تغییر در فرایند جذب آب اولیه شود.



شکل ۴. جذب آب بتن‌های ساخته شده

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق اثر استفاده از سیمان های سه جزئی با ترکیب (سیمان، سرباره آهن و پودر سنگ آهک میکرونیزه) بر مشخصات مکانیکی مانند مقاومت فشاری در سنین مختلف و مؤلفه های دوام بتن، مانند مقاومت الکتریکی، مهاجرت تسریع شده یون های کلرید و جذب آب مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، در دو نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۵ و ۰/۴، ابتدا ۳۰٪ وزن سیمان با سرباره آهن جایگزین شده و سپس ۲/۵٪، ۵٪، ۷/۵٪ و ۱۰٪ از وزن سیمان باقی مانده با پودر سنگ آهک میکرونیزه جایگزین شده است. اهم نتایج به دست آمده از این تحقیق به شرح ذیل قابل ارائه است:

- استفاده از سیمان های دوجزئی و سه جزئی با ترکیب های یاد شده، باعث تغییر قابل اندازه گیری در کارایی بتن نمی شود.
- سیمان های دوجزئی و سه جزئی در ترکیب فوق، مقاومت فشاری در سن ۷ روز را کاهش می دهند؛ اما در سن ۲۸ روز، مقاومت بتن های حاوی ۳۰٪ سرباره و ۵٪ پودر سنگ میکرونیزه با مقاومت بتن حاوی ۳۰٪ سرباره (به تنهایی) و مقاومت بتن سیمانی به صورت جزئی نوسان می کند. در سن ۷ روز، مقاومت بتن حاوی ۳۰٪ سرباره آهن و ۱۰٪ پودر سنگ آهک میکرونیزه به طور میانگین ۱۵٪ از مقاومت نمونه بتن کنترل در هر دو نسبت آب به مواد سیمانی بررسی شده، کمتر بوده است.
- باتوجه به نتایج ۲ بند فوق، می توان ۳۵٪ از جرم سیمان را با ترکیب ۳۰٪ سرباره و ۵٪ پودر سنگ آهک بدون مشاهده کاهش کارایی و کاهش مقاومت جایگزین کرد.
- استفاده از پودر سنگ آهک میکرونیزه به عنوان ماده جایگزین سوم (در بازه ۰ تا ۱۰٪) تغییر معناداری در مقاومت الکتریکی، ضریب مهاجرت تسریع شده یون های کلرید و جذب آب نیم ساعته و یک روزه نسبت به این پارامترها در بتن سرباره ای ایجاد نکرده است.

۵- قدردانی و تشکر

نویسندگان مقاله از پرسنل آزمایشگاه و شرکت نانوبتن جهت فراهم آوردن امکانات انجام این پژوهش آزمایشگاهی کمال تشکر دارند. همچنین از حمایت و همراهی بخش فن آوری بتن مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی نیز کمال تشکر به عمل می آید.

۶- مراجع

1. Andrew, R. M. (2018). Global CO₂ emissions from cement production. *Earth System Science Data, 10*(1), 195–217.
2. Mehdi Nemati Chari, Mohammad Shekarchi, Mohammad Hosein Tadayon, Masoud Moradian, Prediction of chloride ingress into blended cement concrete: Evaluation of a combined short-term laboratory-numerical procedure, Construction and Building Materials, Volume 162, 2018, Pages 649-662,
3. Ramin Naseroleslami, Mehdi Nemati Chari. The effects of calcium stearate on mechanical and durability aspects of self-consolidating concretes incorporating silica fume/natural zeolite, Construction and Building Materials, Volume 225, 2019, Pages 384-400,
4. Ramin Naseroleslami, Javad Bakhshi, Mojtaba Haji Mahdi, Mohammad Ali Yaghoobi, Mehdi Nemati Chari, Properties of cement mortars containing phosphorous slag. Journal of Materials in Civil Engineering. Vol 35. No1.
5. Mehdi Nemati Chari, Ramin Naseroleslami, Babak Ahmadi. Properties of cement-based materials containing supplementary cementitious materials and calcium stearate. Journal of Structural Concrete (2023). Vol 24. Issue 6.
6. A. A. Ramezaniapour, S. Sedighi, M. Kazemian, and A. M. Ramezaniapour, “Effect of micro silica and slag on the durability properties of mortars against accelerated carbonation and chloride ions attack,” *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, vol. ۴, no. ۴, pp. ۴۱۱–۴۲۲, ۲۰۲۰.

7. Arash Aghaeipour, Morteza Madhkhan, Effect of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) on RCCP durability, *Construction and Building Materials*, Volume 141, 2017, Pages 533-541,
8. An Cheng, Ran Huang, Jiann-Kuo Wu, Cheng-Hsin Chen, Influence of GGBS on durability and corrosion behavior of reinforced concrete, *Materials Chemistry and Physics*, Volume 93, Issues 2–3, 2005, Pages 404-411,
9. Sungwon Sim, Jeong Hoon Rhee, Jae-Eun Oh, Gun Kim, Enhancing the durability performance of thermally damaged concrete with ground-granulated blast furnace slag and fly ash, *Construction and Building Materials*, Volume 407, 2023, 133538,
10. Jyotirmoy Mishra, Bharadwaj Nanda, Sanjaya Kumar Patro, R.S. Krishna, A comprehensive review on compressive strength and microstructure properties of GGBS-based geopolymer binder systems, *Construction and Building Materials*, Volume 417, 2024, 135242,
11. Andrés Martínez, Sabbie A. Miller, A review of drivers for implementing geopolymers in construction: Codes and constructability, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 199, 2023, 107238.
12. Zhang, F.; Xi, X.; Yang, S. Research Progress in Corrosion Mechanism of Reinforced Alkali-Activated Concrete Structures. *Corros. Mater. Degrad.* **2021**, *2*, 641-656.
13. Mehdi Mohit, Hamed Haftbaradaran, Hossein Tajmir Riahi, Investigating the ternary cement containing Portland cement, ceramic waste powder, and limestone, *Construction and Building Materials*, Volume 369, 2023,
۱۴. علیرضا باقری، حامد زنگنه و محمدجواد صانعی. توسعه بتن توانمند سه جزئی حاوی پوزولان طبیعی پومیس و دوده سیلیس برای ساخت سازه‌های بندری در شرایط محیطی خلیج فارس (۱۳۹۰). پژوهش‌نامه حمل‌ونقل، دوره ۸ شماره ۲.
15. I.S. Oslakovic, R. Roskovic and D. Bjegovic Concrete ability to resist chloride ions using ternary cement. Concrete repair, rehabilitation and retrofitting.
16. Yazici Halit, The effect of curing conditions on compressive strength of ultra high-performance concrete with high volume mineral admixtures. *Building and environment* 42 (2007). 2083-2089

۱۷. سبحانی، جعفر. پورخوشیدی، علیرضا. احمدی، بابک. چینی. مهدی. بررسی خواص مهندسی مخلوط‌های دوجزئی و

سه‌جزئی حاوی زئولیت طبیعی و دوده سیلیس. مصالح و سازه‌های بتنی، doi: 1397; 3(2): 119-133.

10.30478/jcsm.2019.82173

۱۸. میرولد، سید سجاد، شیرزادی جاوید، علی اکبر، منوچهری، صادق. بررسی دوام مخلوط‌های بتن خودتراکم دو و چندجزئی در

شرایط شبیه‌سازی دریایی (خلیج فارس). مصالح و سازه‌های بتنی، doi: 1398; 4(2): 143-158.

10.30478/jcsm.2019.206336.1134

19. Dehui Wang, Caijun Shi, Nima Farzadnia, Zhenguo Shi, Huangfei Jia, A review on effects of limestone powder on the properties of concrete, Construction and Building Materials, Volume 192, 2018, Pages 153-166,

۲۰. شروانی تبار، بهمن، همتی، محسن. بررسی تأثیر توأم پودر دیاتومیت به‌عنوان یک افزودنی پوزولانی و پودر سنگ‌آهک

به‌عنوان جایگزین بخشی از ماسه در بتن معمولی. مصالح و سازه‌های بتنی، doi: 1403; 9(2): 1-22.

10.30478/jcsm.2025.490576.1381

21. Zhao, L., He, T., Niu, M., Chang, X., Wang, L., & Wang, Y. (2024). Effect of Limestone Powder Mixing Methods on the Performance of Mass Concrete. *Materials*, 17(3), 617. <https://doi.org/10.3390/ma17030617>

22. Gyu Don Moon, Sungwoo Oh, Sang Hwa Jung, Young Cheol Choi. (2017). Effect of fineness of limestone powder and cement on the hydration and strength development of PLC concrete. *Jouranl of Construction and Building Materials*. 135 (129_136). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.189>.

23. Dehui Wang, Caijun Shi, Nima Farzadnia, Zhenguo Shi, Huangfei Jia, Zhihua Ou. (2018). A review on use of limestone powder in cement-based materials: Mechanism, hydration

and microstructures. Journal of Construction and Building Materials. 181(659- 672).
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.075>.

24. Mehdi Nemati Chari, Mohammad Shekarchi, Jafar Sobhani, Majid Nemati Chari, The effect of temperature on the moisture transfer coefficient of cement-based mortars: An experimental investigation, Construction and Building Materials, Volume 102, Part 1, 2016, Pages 306-317,
25. MN Chari, M Shekarchi, P Ghods, M Moradian. A simple practical method for determination of moisture transfer coefficient of mature concrete using a combined experimental-numerical approach (2016) .Comput. Concr 18 (3), 367-388.
26. M Nemaati Chari, M Shekarchizadeh. A simplified method for determination of the moisture transfer coefficient of concrete (2017). International Journal of Civil Engineering. Volume 15, pages 1131-1142