

ارزیابی مقاومت بتن‌های حاوی دوده سیلیسی، پودر شیشه و سرباره فولاد در برابر حمله سولفات منیزیم

مهدی بامری^۱، سروش رشیدی^۲، محمد مقصودی^{۳*}، میترا منوچهری^۴

- ۱- کارشناس ارشد عمران، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج
۲- کارشناس ارشد عمران، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان
۳* - استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه جیرفت
۴- کارشناس ارشد عمران، مدیر کنترل کیفیت بتن شرکت مهندسی تردد راهنما کرمان

Maghsoudi_Mohammad@ujiroft.ac.ir

تاریخ پذیرش ۱۴۰۱/۰۳/۲۵

تاریخ دریافت ۱۴۰۱/۰۲/۱۰

چکیده

امروزه بتن به عنوان ماده‌ای پرکاربرد در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده‌های فراوان در صناعی از قبیل پل سازی، سد سازی، محوطه سازی، سازه‌های ساختمانی، ایجاد بندرها، اسکله‌ها و سازه‌های خاص موجب گردیده این ماده ارزشمند، کانون توجه بسیاری از محققین قرار گیرد. بسته به نوع کاربرد و محل استفاده از بتن، این ماده دارای محدودیت‌ها و مشکلاتی می‌باشد. یکی از عوامل ایجاد خسارت‌های جبران ناپذیر به چرخه صنعت و اقتصاد کشورها، خرابی‌های بتن در طولانی مدت است. بتن‌های با دوام و پایایی زیاد، علاوه بر افزایش عمر مفید سازه، موجب کاهش خسارت‌های جبران ناپذیر به محیط زیست می‌گردند. از عوامل موثر بر میزان عمر سرویس دهی سازه‌های بتنی، شرایط محیطی و کیفیت بتن می‌باشد. حمله سولفات‌ها به بتن یکی از مهمترین عوامل تاثیرگذار در کاهش عمر سازه و دوام بتن است. در مطالعه حاضر آزمایش‌های تغییر وزن و تغییر مقاومت فشاری پس از قرارگیری در محلول سولفات منیزیم برای شش طرح مخلوط بتن حاوی دوده سیلیسی، پودر شیشه و سرباره فولاد ارزیابی شد. علاوه بر آن بمنظور ارزیابی نفوذپذیری بتن، آزمایش‌های عمق نفوذ آب تحت فشار و جذب آب حجمی انجام شد. نتایج بیانگر عملکرد مناسب، پودر شیشه و سرباره فولاد در برابر حمله سولفات منیزیم و کاهش عمق نفوذ آب می‌باشد. میزان تغییرات وزن و مقاومت فشاری بتن در برابر حمله سولفات منیزیم به خواص مواد مکمل سیمانی، میزان جایگزینی آن‌ها و تخلخل بتن بستگی دارد.

واژگان کلیدی: دوام بتن، حمله سولفات منیزیم، نفوذپذیری، مقاومت فشاری

۱- مقدمه

در صنعت سیمان و بتن از مواد متنوعی استفاده می‌شود که چندین سال است در ادبیات این حوزه راه پیدا کرده‌اند و تحت عنوان مواد مکمل سیمانی^۱ شناخته می‌شوند که بیشتر آنها محصولات جانبی احتراق سوخت‌های فسیلی بوده و عبارتند از: دوده سیلیسی، خاکستر بادی، سرباره کوره بلند در صنعت فولاد و خاکستر حاصل از احتراق پوسته برنج [1-5]. مواد دیگری هم به عنوان مواد مکمل سیمانی به کار می‌روند که عبارتند از: متاکائولن، خاکستر آتشفشانی، پودر سنگ آهک و همچنین به تازگی شیشه‌های ضایعاتی نیز مورد توجه قرار گرفتند که پژوهشگران متعددی روی این ماده در حال تحقیق هستند [6-10]. استفاده از مواد مکمل سیمانی یکی از فاکتورهای برجسته و تاثیرگذار بر توسعه مواد مبتنی بر سیمان است. از طرفی استفاده از مواد مکمل سیمانی باعث می‌شود ویژگی‌های بتن تازه و سخت شده بهبود یابد. یکی از این ویژگی‌ها موضوع دوام بتن است که یکی از مهمترین مسائل بتن است و استفاده از مواد مکمل سیمانی در بتن، علاوه بر کاهش آلودگی زیست محیطی می‌تواند پارامترهای دوام بتن را نیز بهبود بخشد. استفاده از این نوع مواد به دلیل مصرف مواد زائد و استراتژی توسعه پایدار، ضروری است زیرا موجب کاهش مصرف سیمان پرتلند می‌شود. صنعت سیمان به دلیل فرآیند کلسینه شدن سنگ آهک و احتراق سوخت‌های فسیلی که در چرخه تولید سیمان استفاده می‌شوند به تنهایی مسبب انتشار پنج درصد گاز دی اکسید کربن (CO_2) در جهان است [11]. استفاده از مواد مکمل سیمانی عملی‌ترین و اقتصادی‌ترین روش برای کاهش مصرف سیمان و به دنبال آن کاهش انتشار گاز دی‌اکسید کربن است که می‌توان از آن‌ها در طرح مخلوط بتن استفاده نمود [12]. نفوذپذیری خمیر سیمان یک عامل مهم موثر بر دوام بتن در محیط‌های خورنده است که توسط ساختار منافذ و فاز ترکیب بندی تعیین می‌شود. کربناسیون، حمله سولفات‌ها، حمله اسیدها و نفوذ کلریدها از متداول‌ترین انواع خوردگی شیمیایی سازه‌های بتن آرمه است و همچنین تخریب بتن ممکن است از طریق تشکیل گسترده محصولات خوردگی، در نتیجه واکنش

اجزای بتن با مواد خارجی و همچنین به دلیل از بین رفتن محصولات هیدراتاسیون رخ دهد [13-16]. هیدروکسید کلسیم محصول اصلی هیدراتاسیون سیمان پرتلند است و از نظر دوام شیمیایی، فاز ضعیفی دارد که علت اصلی آن حل شدن بالای آن در آب است. خوردگی کلرید ممکن است منجر به تشکیل کلرید کلسیم هیدراته و یا باعث تبلور گسترده نمک فریدل^۲ ($C_3A \cdot CaC_2 \cdot 10H_2O$) در حضور آلومینات شود [17-21]. همچنین یون‌های کلرید ممکن است با میلگردهای فولادی واکنش دهند و این پدیده نیز اثر مخربی دارد. توانایی ادغام یون‌های کلرید در محصولات خوردگی به نوع کاتیون همراه با یون‌های Cl^- و کاهش در محدوده $Na^+ > K^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$ بستگی دارد [4, 22]. خوردگی سولفات‌ها، یکی از خطرناک‌ترین خوردگی‌هاست، و به وضعیتی گفته می‌شود که بتن در معرض اثر خورنده یون‌های سولفات قرار دارد. انواع مختلفی از محصولات خورنده بسته به کاتیون همراه Na^+ یا Mg^{2+} تشکیل می‌شود. رایج‌ترین محصولات خوردگی گچ و اترینگایت هستند همچنین با قرارگیری بتن در معرض محلول سولفات منیزیم ($MgSO_4$)، هیدروکسید منیزیم (بروسیت) تشکیل می‌شود. بنابراین پیشرفت خوردگی در مواجهه با سولفات منیزیم ($MgSO_4$) به عنوان یک ماده اولیه خورنده، سریعتر است [24]. [23] گزارش‌هایی مبنی بر اثر کاهندگی کلسیم از ژل کلسیم سلیکات هیدراته (C-S-H) توسط سولفات سدیم (Na_2SO_4) وجود دارد. این روند پس از تخلیه کلسیم از هیدروکسید کلسیم $Ca(OH)_2$ آغاز می‌شود. مهتا در سال ۱۹۹۹ مشاهده کرد که در ملات‌ها، میزان مقاومت در برابر حمله سولفات‌ها به محتوا و اشکال فازهای آلومینات در کلینکر سیمان بستگی دارد [24]. خوردگی شیمیایی مواد سیمانی ممکن است با استفاده از روش‌های مختلف کاهش یابد برای معرفی مواد مکمل سیمانی فعال در مخلوط‌های بتن، گزینه‌های متعددی وجود دارد. کامپوزیت‌های پایه سیمانی حاوی پوزولان‌های بسیار واکنش پذیر، مانند دوده سیلیسی یا متاکائولن، به طور کلی در برابر خوردگی شیمیایی مقاومت بیشتری دارند.

2. Friedel's salt

1. Supplementary cementitious materials

[25, 26]. ورود پوزولان به کامپوزیت‌های سیمان باعث می‌شود مقدار هیدروکسید کلسیم کاهش یابد. هیدروکسید کلسیم که بیشتر به صورت پرتلندیت یافت می‌شود، بیشترین حساسیت به فرآیند خوردگی را در بین محصولات هیدراتا سیون سیمان دارد. بسیاری از پژوهشگران اثر مثبت مواد پوزولانی بر دوام بتن را بیشتر یادآور شده‌اند زیرا این مواد باعث بهبود مقاومت در برابر خوردگی کلرید و سولفات‌ها می‌شوند. [27, 17, 16, 9]

اضافه کردن دوده سیلیسی تا ۲۰ درصد بر کاهش انبساط و تغییرات جرمی ملات‌های عمل آوری شده در محلول سولفات سدیم (Na_2SO_4) تأثیر گذار است [26].

آل آخرس در سال ۲۰۰۶ تأثیر جایگزینی نسبت‌های ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ متاکائولین به جای سیمان را در برابر حمله سولفات‌ها بررسی کرد و نمونه‌ها را ۱۸ ماه در محلول سولفات سدیم ۵٪ غوطه‌ور نمود و نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها این نتیجه را تایید کرد که جایگزینی متاکائولین با سیمان باعث افزایش مقاومت بتن در برابر حمله سولفات می‌شود [15].

مریدا و خارجی در سال ۲۰۱۵ بتن‌های حاوی پوزولان‌های طبیعی الجزایر با منشا آتشفشانی را در برابر حمله سولفات‌ها بررسی کردند. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد، که جایگزینی بخشی از سیمان با پوزولان‌های طبیعی، ویژگی‌های مکانیکی و دوام بتن را بهبود می‌بخشد. این موضوع با توجه به سرعت پالس اولتراسونیک و مقاومت در برابر سولفات‌ها تایید شد [22].

صمیمی و همکاران در سال ۲۰۱۷ با توجه به داده‌های به دست آمده از آزمایش‌ها، به این نتیجه رسیدند که هر دو پوزولان پومیس و زئولیت اثر قابل‌توجهی بر افزایش مقاومت بتن خودمترکم با مقاومت بالا (HSSCC^1) در برابر نفوذ کلرید در هر دو شرایط غوطه‌وری و جزر و مد دارند. با این حال، مخلوط زئولیت مقاومت بهتری از خود نشان داد. همچنین این تحقیق نشان داد که جایگزینی سیمان پرتلند با ۱۵ درصد

پومیس یا ۱۰ درصد زئولیت در بتن (HSSCC) از همه لحاظ مقرون به صرفه است [28].

الهی و همکاران در سال ۲۰۲۱ تأثیر افزودن درصدهای مختلف خاکستر بادی، سرباره، دوده سیلیسی و متاکائولین به بتن در مواجهه با محیط سولفات را بررسی نمودند و دریافتند که افزایش میزان دوز همه مواد مکمل سیمانی به جز دوده سیلیسی و خاکستر بادی کلاس C باعث بهبود عملکرد بتن در برابر محیط سولفات می‌شود. بطور کلی، خاکستر بادی، سرباره، دوده سیلیسی و متاکائولین می‌توانند در کاهش حمله سولفات موثر باشند، اما عملکرد آنها به میزان جایگزینی و ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی آنها بستگی دارد [29].

در این مقاله به بررسی آزمایشگاهی تأثیر درصدهای مختلف دوده سیلیسی، پودر شیشه ضایعاتی و سرباره فولاد بر عملکرد بتن در برابر محیط خورنده سولفات منیزیم و همچنین ارزیابی مقاومت فشاری، عمق نفوذ آب تحت فشار و جذب آب حجمی پرداخته شده است.

۲- مصالح و روش‌ها

۲-۱- مصالح

۲-۱-۱- سیمان و مواد مکمل سیمانی

در این تحقیق برای ساخت بتن، از سیمان پرتلند تیپ ۲ شرکت سیمان ممتازان کرمان و سه نوع ماده پوزولانی شامل دوده سیلیسی $^2(\text{SF})$ ، پودر شیشه ضایعاتی $^3(\text{WGP})$ و پودر سرباره کوره بلند $^4(\text{GGBFS})$ استفاده شده است. دوده سیلیسی مورد استفاده در این تحقیق از شرکت فروسیلیس ایران واقع در شهر سمنان است، همچنین پودر شیشه ضایعاتی از شرکت دانه‌های شیشه‌ای بازتاب راه واقع در شهر سروستان تهیه شد و نیز سرباره کوره بلند از شرکت ذوب آهن اصفهان تهیه شد، که ویژگی‌های شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی آنها در جدول (۱) قابل مشاهده است.

3. Waste glass powder
4. Ground granulated blast furnace slag

1. High strength self-compacting concrete
2. Silica fume

جدول ۱. خواص شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی سیمان، دوده سیلیسی، سرباره کوره بلند و پودر شیشه ضایعاتی

Properties	Cement (%)	SF (%)	GGBFS (%)	WGP (%)
Silicon Dioxide (SiO ₂)	21.13	Min 85.00	36.50	71.00
Aluminium Oxide (Al ₂ O ₃)	4.55	Max 1.00	11.00	3.23
Ferrous Oxide (Fe ₂ O ₃)	3.63	Max 2.00	0.70	0.19
Calcium Oxide (CaO)	63.72	Max 1.50	38.50	9.20
Magnesium Oxide (MgO)	1.27	Max 1.50	9.20	1.49
Sulphur Trioxide (SO ₃)	2.58	-	0.30	-
Insoluble Residue (IR)	0.49	-	0.40	100.00
Sodium Oxide (Na ₂ O)	0.16	-	0.55	13.80
Potassium Oxide (K ₂ O)	0.59	-	0.60	0.29
Loss On Ignition (LOI)	1.67	Max 3.50	0.50	0.67
Tricalcium Silicate (C ₃ S)	55.71	-	-	-
Dicalcium Silicate (C ₂ S)	18.61	-	-	-
Tricalcium Aluminate (C ₃ A)	5.92	-	-	-
Tetracalcium Aluminoferrite (C ₄ AF)	11.01	-	-	-
Physical properties				
Specification Surface (cm ² /gr)	3110	150,000-200,0000	4000	2900
Soundness	Autoclave Expansion (%)	0.11	-	-
	Le Chatelier Expansion (mm)	1.00	-	-
Setting Time (min)	Initial-135	-	-	-
	Final-185	-	-	-
Mechanical properties				
Mortar Compressive Strength (MPa)				
	3 days	27.6	-	-
	7 days	36.3	-	-
	28 days	47.3	-	-
Mortar Flexural Strength (MPa)				
	3 days	4.9	-	-
	7 days	6.4	-	-
	28 days	7.4	-	-

Table 1. Chemical, physical and mechanical properties of Cement, SF, GGBFS and WGP

(SiO₂)، ۳/۲٪ آلومینیوم اکسید (Al₂O₃) و ۰/۱۹٪ آهن اکسید (Fe₂O₃) است که در صورت عدم توجه به محتوای قلیایی، می‌توان شیشه را با توجه به لزوم شیمیایی موجود در ASTM C618، ماده پوزولانی - سیمانی دانست [32]. از روش دانه‌بندی لیزری برای توزیع اندازه ذرات سیمان و سایر مواد مکمل سیمانی استفاده شده است که نتایج بدست آمده در شکل (۱) قابل مشاهده است.

دوده سیلیسی مورد استفاده در مخلوط‌های بتن با رنگ خاکستری روشن که بر اساس استاندارد ASTM C1240 حاوی حداقل ۸۵ درصد سیلیسیم اکسید (SiO₂) است [30]. همچنین اندیس پوزولانی پودر سرباره کوره بلند مطابق استاندارد ASTM C989 استخراج شد و بر اساس نتایج، اندیس پوزولانی پودر سرباره کوره بلند استفاده شده در مخلوط‌های بتن مابین ۸۰ تا ۱۰۰ قرار گرفته است [31]. پودر شیشه ضایعاتی مورد استفاده در این مطالعه دارای مقدار ۷۱٪ سیلیسیم اکسید

شکل ۱. توزیع اندازه ذرات سیمان، دوده سیلیسی، سرباره کوره بلند و پودر شیشه ضایعاتی

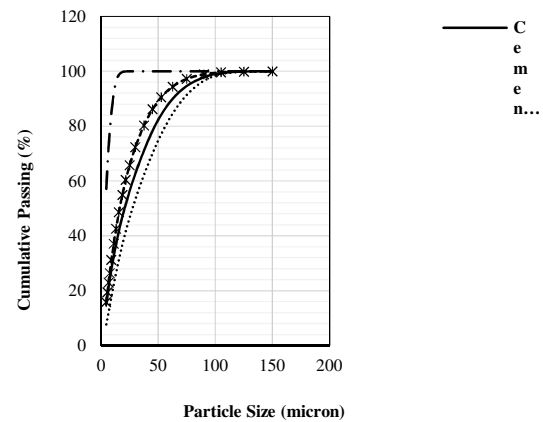


Fig. 1. The particle size distribution of Cement, SF, GGBFS and WGP

۲-۱-۲- سنگدانه

شکل ۲: منحنی توزیع دانه بندی سنگدانه ها

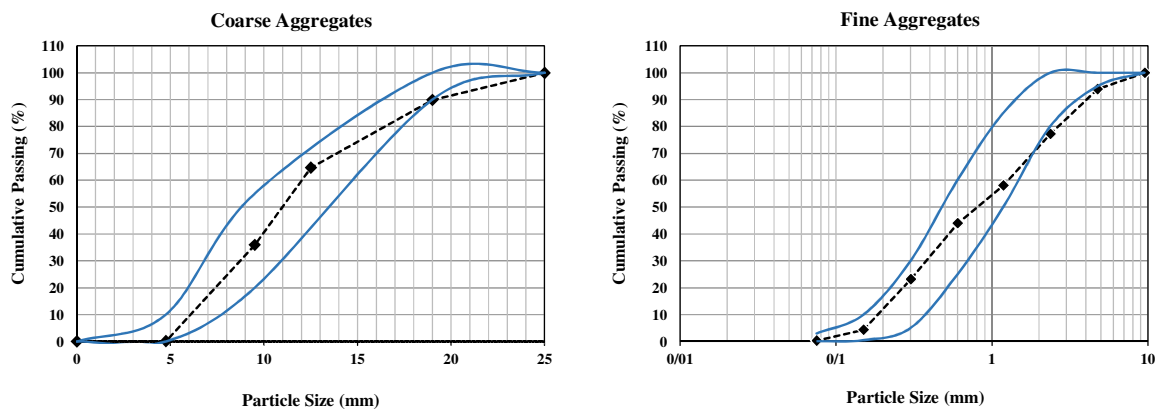


Fig. 2. Particle size distribution curves of aggregates

نسبت آب به مواد سیمانی در تمامی طرح ها ثابت و برابر ۰/۳۶ و نیز میزان مواد سیمانی در تمامی طرح ها ۴۰۰ کیلوگرم در متر مکعب در نظر گرفته شد. با توجه به متغیر بودن چگالی مواد مکمل سیمانی طرح مخلوط ها با توجه به چگالی مواد جایگزین سیمان اصلاح شد. جدول (۲) طرح های مخلوط بتن را نشان می دهد.

۳-۱-۲- فوق روان کننده

برای دستیابی به کارایی مورد نظر در محدوده اسلامپ ۱۵۰-۱۲۰ میلی متر، به همه مخلوط های بتن، فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات مطابق با استاندارد ASTM C494 اضافه شد که وزن مخصوص آن ۱/۱ و pH برابر ۶/۲ است [36].

۲-۲- طرح های مخلوط

در این مطالعه آزمایشگاهی، ۶ طرح مخلوط با مقادیر مختلف مواد و مصالح معرفی شده در بخش قبل در نظر گرفته شد.

جدول ۲. طرح‌های مخلوط بتن

Mix	Mix Code	W/B	Unit content: kg/m ³						
			Water	Cement	SF	WGP	GGBFS	Fine Aggregates	Coarse Aggregates
Control	Ctrl	0.36	144	400	-	-	-	930	907
SF (5%)	SF5	0.36	144	380	20	-	-	925.2	902.1
WGP (15%)	WGP15	0.36	144	340	-	60	-	923.8	900.6
GGBFS (15%)	GGBFS15	0.36	144	340	-	-	60	933.2	910.3
SF (5%) + WGP (10%)	SF5+WGP10	0.36	144	340	20	40	-	921.1	897.9
SF (5%) + GGBFS (10%)	SF5+GGBFS10	0.36	144	340	20	-	40	927.4	904

SF: Silica fume, GGBFS: Ground granulated blast furnace slag, WGP: Waste glass powder

Table 2. Proportions of the concrete mixes

منظور بررسی تغییرات مقاومت فشاری و وزن، در سنین آزمایش مقاومت فشاری و میزان تغییر وزن نمونه‌های قرار گرفته در محلول سولفات منیزیم اندازه‌گیری شد و با نمونه قرار گرفته در آب مقایسه شد.

شکل ۳. نمونه‌های قرار گرفته در محلول سولفات منیزیم



Fig. 3. Samples placed in magnesium sulfate solution

۳-۴-۲- آزمایش جذب آب حجمی

میزان جذب آب مطابق استاندارد BS 1881-122، و در سنین ۷، ۲۸، ۵۶، ۹۰ و ۱۲۰ روزه روی نمونه‌های مکعبی به ابعاد (۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰) میلی‌متر انجام شد. در آزمایش جذب آب، نمونه‌های تهیه شده تا زمان آزمایش در حوضچه آب با دمای (۲۰±۲) عمل‌آوری شدند و در سنین آزمایش به مدت ۷۲ ساعت در گرم‌خانه با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. سپس نمونه‌ها وزن شده و به مدت ۳۰ دقیقه و پس از آن ۲۴ ساعت در آب مغروق شدند تا با توزین مجدد آنها مطابق شکل ۴، میزان جذب آب نیم ساعته و ۲۴ ساعته بدست آید [39].

۳-۲- شیوه ساخت و شرایط عمل‌آوری طرح‌های مخلوط بتن

ترتیب اختلاط مصالح بدین صورت بود که ابتدا شن به همراه نیمی از ماسه به مدت ۱ دقیقه به صورت خشک مخلوط شد و پس از آن مقدار باقی مانده ماسه، سیمان، مواد جایگزین سیمان و دو سوم آب اختلاط به مخلوط اضافه شد و به مدت ۳ دقیقه اختلاط صورت گرفت، در نهایت آب باقی مانده به همراه فوق‌روان‌کننده اضافه شد و مواد و مصالح به مدت ۸ دقیقه به صورت کامل ترکیب شدند. نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت از قالب‌ها خارج و طبق استاندارد BS EN 12390-2 تا سنین مورد نظر آزمایش‌ها در آب با دمای (۲۰±۲) نگهداری شدند [37].

۴-۲- روش‌های آزمایش

۴-۲-۱- مقاومت فشاری

آزمایش تعیین مقاومت فشاری بر اساس استاندارد BS EN 12390-3 و در سنین ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه روی نمونه‌های مکعبی ساخته شده با ابعاد (۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰) میلی‌متر انجام گرفت [38].

۴-۲-۲- تغییرات مقاومت فشاری و وزن نمونه‌های بتنی

قرار گرفته در محلول سولفات منیزیم

به منظور انجام این آزمایش نمونه‌های بتنی مکعبی با ابعاد (۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰) میلی‌متر ساخته شدند. نمونه‌ها ابتدا به مدت ۲۸ روز در آب عمل‌آوری شدند سپس مطابق شکل (۳) به ظرف حاوی محلول سولفات منیزیم ۱/۵ درصد انتقال داده شدند. pH محلول در طول مدت آزمایش توسط اضافه کردن اسید سولفوریک در محدوده ۵ تا ۷ ثابت نگه داشته شد. به

شکل ۴. توزین نمونه‌ها برای بررسی میزان جذب آب حجمی



Fig. 4. Weighing the samples to evaluate the amount of water absorption

و دراز مدت باعث افزایش مقاومت فشاری شده است و همچنین وجود ۵ درصد دوده سیلیسی در نمونه‌های حاوی ۱۰ درصد پودر شیشه (SF5+WGP10) و ۱۰ درصد پودر سرباره کوره بلند (SF5+GGBFS10) در سنین ۲۸ روز و پس از آن منجر به افزایش مقاومت فشاری شده است، پس این موضوع بیانگر آن است که حضور دوده سیلیسی به دلیل فعالیت پوزولانی زیاد در کنار پودر شیشه یا پودر سرباره کوره بلند سبب بهبود مقاومت فشاری می‌شود. در نمونه‌های حاوی ۱۵ درصد پودر شیشه (WGP15) و ۱۵ درصد پودر سرباره کوره بلند (GGBFS15) شاهد کاهش مقاومت فشاری در تمامی سنین نسبت به نمونه کنترل (Ctrl) هستیم که این میزان کاهش مقاومت پس از سن ۷ روز کمتر از ۱۰ درصد است.

۲- نتایج تغییرات مقاومت فشاری و وزن نمونه‌های

بتنی قرار گرفته در محلول سولفات منیزیم

۳-۱- تغییرات مقاومت فشاری

سولفات منیزیم بیشتر در آب‌های زیرزمینی، آب دریا و در بعضی پساب‌های صنعتی یافت می‌شود. محلول‌های منیزیم به سهولت با هیدروکسید کلسیم موجود در خمیر سیمان پرتلند واکنش انجام داده و نمک‌های کلسیم قابل حل تشکیل می‌دهند. محلول سولفات منیزیم ($MgSO_4$) از همه مهاجم‌تر است، زیرا یون سولفات می‌تواند برای هیدرات‌های آلومین دار موجود در خمیر سیمان پرتلند زیان آور باشد. شکل مشخصه حمله یون منیزیم به خمیر سیمان به این صورت است که حمله، در نهایت، به کلسیم سیلیکات هیدراته $^1(C-S-H)$ ، که ماده متشکله اصلی سیمان است، توسعه پیدا می‌کند. به نظر می‌رسد که $C-S-H$ خمیر سیمان پرتلند در تماس‌های طولانی با محلول‌های منیزیم، به تدریج یون‌های کلسیم خود را که با یون‌های منیزیم جایگزین می‌شود، از دست می‌دهد. محصول نهایی این واکنش، منیزیم سیلیکات هیدراته $^2(M-S-H)$ است که تشکیل آن سبب کاهش خواص سیمانی می‌شود. به دلیل وجود هیدروکسید کلسیم در خمیر سیمان پرتلند هیدراته، وقتی خمیر سیمان با یون‌های سولفات تماس پیدا می‌کند، هر دو هیدرات حاوی

۲-۴- عمق نفوذ آب تحت فشار

در این آزمایش بر اساس استاندارد BS EN 12390-8، میزان عمق نفوذ آب روی نمونه‌های تحت فشار ۵۰۰ کیلوپاسکال و بمدت ۷۲ ساعت اندازه گیری شد. مطابق شکل (۵) پس از ۷۲ ساعت قرارگیری تحت فشار آب، آزمونه‌ها به صورت قطری توسط جک بتن شکن، شکسته شدند تا حداکثر عمق نفوذ بدست آید [40].

شکل ۵. عمق نفوذ آب تحت فشار

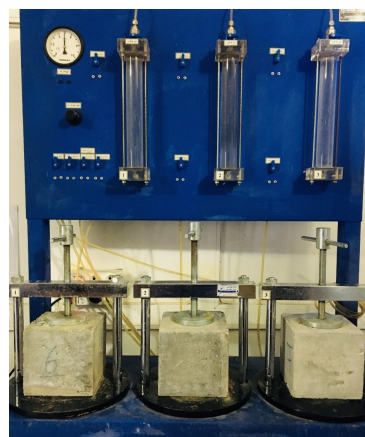


Fig. 5. Depth of penetration of water under pressure

۳- نتایج و تفسیر آزمایشات

۳-۱- نتایج مقاومت فشاری

در شکل (۶)، نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها قابل مشاهده است. مطابق آن، وجود ۵ درصد دوده سیلیسی (SF5) در کوتاه مدت

شکل ۶: نتایج مقاومت فشاری مخلوط‌های بتن

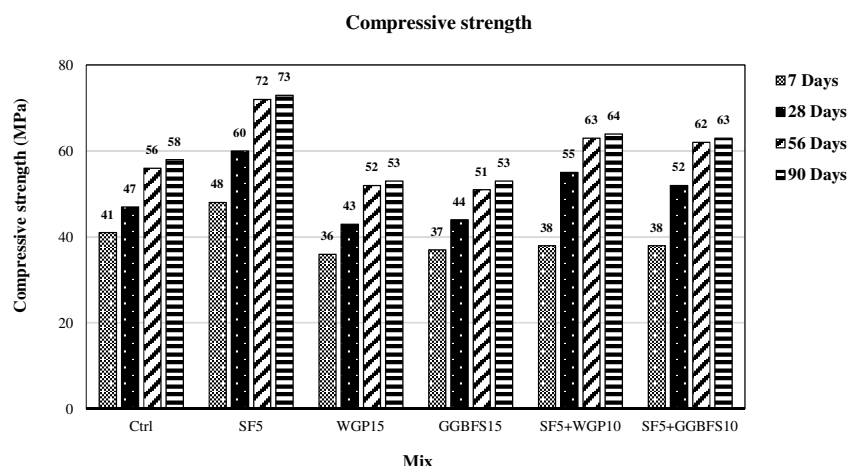
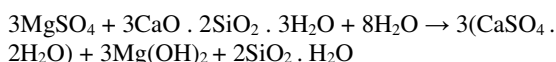


Fig. 6. Compressive strength results of concrete mixes

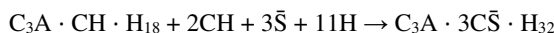


در حمله سولفات منیزیم و تبدیل هیدروکسید کلسیم به گچ با تشکیل همزمان هیدروکسید منیزیم همراه است که نامحلول است و قلیایی بودن سیستم را کاهش می‌دهد. در صورت عدم وجود یون‌های هیدروکسیل در محلول، پایداری C-S-H در سیستم کاهش یافته و توسط محلول سولفات نیز مورد حمله قرار می‌گیرد (رابطه ۴).

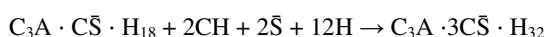
در شکل (۷ الف)، درصد تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی قرار گرفته در معرض سولفات منیزیم نسبت به نمونه‌های بتنی عمل آوری شده در آب مشاهده می‌شود. نتایج تمام مخلوط‌ها کاهش مقاومت فشاری تا ۲۸ روز غوطه‌وری در محلول‌های سولفات منیزیم را نشان می‌دهد که بیشترین میزان کاهش مقاومت فشاری مربوط به مخلوط (WGP15) با ۱۱/۵ درصد است. در سن ۵۶ روز شاهد افزایش مقاومت فشاری در مخلوط‌های (WGP15) و (GGBFS15) بودیم که این میزان به ترتیب برابر ۳/۷ و ۱/۸ درصد است. این افزایش مقاومت فشاری را می‌توان به تشکیل بلورهای گچ و اترینگایت در فضاهای خالی بتن نسبت داد که باعث کاهش تخلخل و

آلومین به شکل پرو سولفات^۱ (یعنی اترینگایت، $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CS} \cdot \text{H}_{32}$) تبدیل می‌شوند که توسط روابط (۱ و ۲) نشان داده شده است [41].

رابطه (۱):

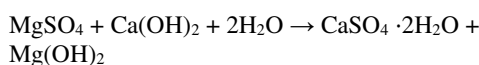


رابطه (۲):



گچ حاصل از واکنش‌های تبادل کاتیون^۲ نیز قادر به منبسط شدن است. با این وجود مشاهده شده است که آسیب‌دیدگی خمیر سیمان پرتلند سخت شده بر اثر تشکیل گچ، فرایندی را طی می‌کند که ابتدا منجر به کاهش pH سیستم و همچنین از بین رفتن سختی و مقاومت بتن می‌شود و ادامه این فرآیند، انبساط و ترک‌خوردگی و در نهایت تبدیل بتن به یک خمیر نرم و جسم غیرچسبنده است که توسط روابط (۳ و ۴) نشان داده شده است.

رابطه (۳):



رابطه (۴):

شکل ۷ ب. درصد تغییرات وزن پس از قرار گرفتن در معرض سولفات منیزیم

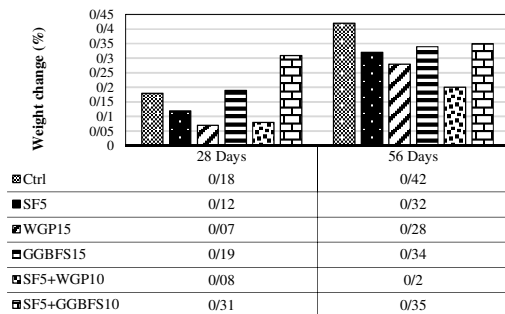


Fig. 7 b. Percentage of weight changes of concrete after exposure to magnesium sulfate

۳-۳- جذب آب

در شکل (۸)، نتایج جذب آب ۳۰ دقیقه و ۲۴ ساعته مخلوط‌های بتن مشاهده می‌شود. به وضوح قابل مشاهده است که تمامی نمونه‌های حاوی دوده سیلیسی جذب آب کمتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارند، به دلیل ذرات بسیار ریز دوده سیلیسی تمام حفره‌های میکروسکوپی خمیر سیمان پر شده و منجر به کاهش نفوذپذیری شده است. از طرفی استفاده از ۱۵ درصد پودر شیشه ضایعاتی (WGP15) و یا ۱۵ درصد سرباره کوره بلند (GGBFS15) بجای سیمان به دلیل خاصیت پوزولانی و پرکنندگی، سبب کاهش تخلخل خمیر سیمان شده و در نتیجه جذب آب کمتری نسبت به نمونه کنترل را نشان می‌دهد.

شکل ۸ (الف). نتایج آزمایش جذب آب ۳۰ دقیقه

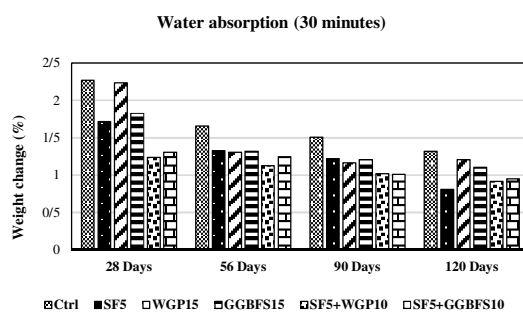


Fig. 8 (a). Water absorption test results 30 minutes

متراکم‌تر شدن بتن در کوتاه مدت می‌شود. در این مقطع زمانی به صراحت نمی‌توان افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی را ناشی از دوام مطلوب آن در مقابل حمله یون‌های سولفات منیزیم دانست، اما کم شدن مقاومت فشاری در این مقطع زمانی را می‌توان به اثر مخرب سولفات منیزیم بر بتن نسبت داد. همچنین در این سن تمامی مخلوط‌های حاوی دوده سیلیسی بیشترین میزان کاهش را به خود اختصاص دادند که بالاترین میزان کاهش مقاومت فشاری مربوط به مخلوط (SF5+GGBFS10) با ۹/۵ درصد است.

شکل ۷ (الف): درصد تغییرات مقاومت فشاری پس از قرار گرفتن در معرض سولفات منیزیم

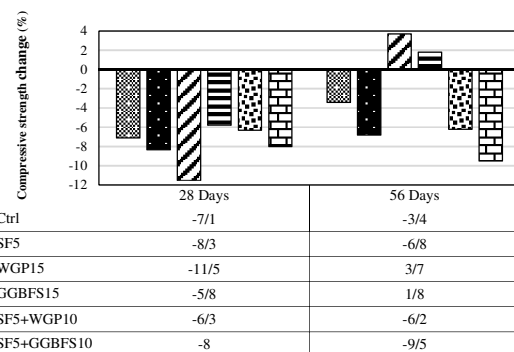


Fig. 7 (a). Percentage of compressive strength changes of concrete after exposure to magnesium sulfate

۳-۲-۲- تغییرات وزن

مطابق شکل (۷ ب)، می‌توان درصد تغییرات وزن نمونه‌های بتنی قرار گرفته در محلول سولفات منیزیم را مشاهده نمود. افزایش وزن نمونه‌های بتنی در این بازه‌های زمانی نشانگر آن است که فضاهای خالی بتن با بلورهای گچ و اترینگایت پر شده است. مشاهده می‌شود که نمونه کنترل (Ctrl) در سن ۵۶ روز، با ۰/۴۲ درصد افزایش، بیشترین افزایش وزن را در بین نمونه‌ها کسب نموده است و نمونه‌های دارای مواد پوزولانی افزایش وزن کمتری داشته‌اند. افزایش وزن کمتر نمونه‌های پوزولانی بیانگر کمتر بودن پتانسیل تولید گچ و اترینگایت در آنها است. بتن‌های دارای مواد پوزولانی به دلیل نفوذپذیری کمتر و نیز کمتر بودن مقدار (C_3A) و $(Ca(OH)_2)$ به دلیل جایگزینی مقداری از سیمان با پوزولان و واکنش‌های ثانویه پوزولانی پتانسیل کمتری در تولید گچ و اترینگایت دارند.

شکل ۸ ب. نتایج آزمایش جذب آب ۲۴ ساعته

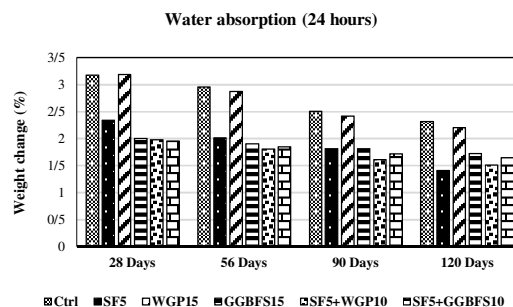


Fig. 8 (b): Water absorption test results 24 hours

۳-۴- عمق نفوذ آب تحت فشار

نتایج عمق نفوذ آب در شکل (۹)، ارائه شده است. به طور کلی استفاده از مواد مکمل سیمانی سبب کاهش نفوذپذیری و بهبود

شکل ۹. نتایج آزمایش عمق نفوذ آب تحت فشار

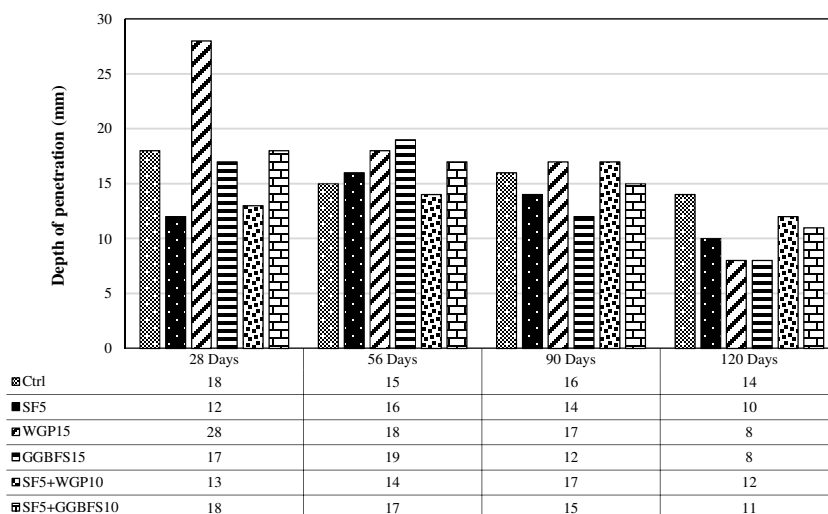


Fig. 9. Depth of penetration of water under pressure test results

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، از دوده سیلیسی، سرباره کوره بلند و پودر شیشه ضایعاتی به عنوان مواد جایگزین سیمان استفاده شد و آزمایش‌های مقاومت فشاری، قرارگیری بتن در برابر محلول سولفات منیزیم، عمق نفوذ آب تحت فشار و جذب آب حجمی بر روی ۶ طرح مخلوط انجام شد که نتایج این پژوهش را می‌توان به اختصار، به ترتیب زیر بیان نمود:

۱- وجود ۵ درصد دوده سیلیسی در کوتاه مدت و دراز مدت باعث افزایش مقاومت فشاری شد، همچنین حضور دوده سیلیسی به دلیل فعالیت پوزولانی زیاد در کنار پودر شیشه یا پودر سرباره کوره بلند سبب بهبود مقاومت فشاری نسبت به نمونه کنترل شد. کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۱۵ درصد پودر شیشه (WGP15) و ۱۵ درصد سرباره کوره بلند (GGBFS15) نسبت به نمونه کنترل در بازه ۸ تا ۱۳ درصد می‌باشد و از آنجایی که میزان کاهش مقاومت فشاری ناچیز است می‌توان با در نظر

و علمی مراکز تحقیقاتی و آزمایشگاهی می‌تواند موانع بزرگی را از پیش روی پژوهشگران بردارد. از همین رو، مراتب سپاس و قدردانی خود را نسبت به شرکت تعاونی بتن سازان کرمان، شرکت مهندسی تردد راهنما استان کرمان و اداره کل آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان کرمان اعلام می‌داریم که با تجهیزات و دانش فنی خود به تحقق این پژوهش یاری رساندند.

۶- اعلام تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ نوع تعارض منافی وجود ندارد.

۷- مراجع

- [1] Tkaczewska, E. Effect of size fraction and glass structure of siliceous fly ashes on fly ash cement hydration, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Volume 20, Issue 1, Pages 315-321, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.03.032>.
- [2] Gołek, Ł. Glass powder and high-calcium fly ash based binders – Long term examinations, *Journal of Cleaner Production*, Volume 220, Pages 493-506, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.095>.
- [3] Dabrowski, M. and Glinicki, M. A. Influence of aggregate type on the durability of concrete made of blended cements with calcerous fly ash, Editor(s): A.M. Brandt, J. Olek, M.A. Glinicki, C.K.Y. Leung, *Brittle Matrix Composites 10*, Woodhead Publishing, Pages 305-313, 2012, <https://doi.org/10.1533/9780857099891.305>.
- [4] Li, G., Zhang, A., Song, Zh., Liu, Sh., Zhang, J., Ground granulated blast furnace slag effect on the durability of ternary cementitious system exposed to combined attack of chloride and sulfate, *Construction and Building Materials*, Volume 158, Pages 640-648, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.062>.
- [5] Ghorab, H.Y., Rizk, M., Meawad, A.S., El Sayed M., Reporting the performance of the rice straw ash as cement replacement material, *Cem. Wapno Bet.* 23, 107–114, 2018.
- [6] Camiletti, J., Soliman, A.M., Nehdi, M.L. Effects of nano- and micro-limestone addition on early-age properties of ultra-high-performance concrete. *Mater Struct* 46, 881–898 (2013). <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9940-0>.
- [7] Siddique, R., Jameel, A., Singh, M., Barnat-Hunek, D., Kunal, Ait-Mokhtar, A., Belarbi, R., Rajor, A., Effect of bacteria on strength, permeation characteristics and micro-structure of

گرفتن مقوله توسعه پایدار و کاهش آلودگی‌های زیست محیطی، استفاده از این پوزولان‌ها را توجیه پذیر دانست.

۲- نمونه‌های بتنی قرار گرفته در معرض سولفات منیزیم در کوتاه مدت افزایش مقاومت فشاری را کسب نمودند، در این مقطع زمانی به صراحت نمی‌توان افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی را ناشی از دوام مطلوب آن در مقابل حمله یون‌های سولفات منیزیم دانست. اما کم شدن مقاومت فشاری در این مقطع زمانی را می‌توان به اثر مخرب سولفات منیزیم بر بتن نسبت داد. همچنین افزایش وزن نمونه‌های بتنی در این بازه‌های زمانی نشانگر آن است که فضاهای خالی بتن با بلورهای گچ و اترینگایت پر شده است. افزایش وزن کمتر نمونه‌های پوزولانی نسبت به نمونه کنترل بیانگر کمتر بودن پتانسیل تولید گچ و اترینگایت در آنها است.

۳- جذب آب ۳۰ دقیقه و ۲۴ ساعته تمامی نمونه‌های حاوی دوده سیلیسی کمتر از سایر نمونه‌ها بود زیرا ذرات بسیار ریز دوده سیلیسی حفره‌های میکروسکوپی خمیر سیمان را پر کرده و منجر به کاهش نفوذپذیری بتن شده است. از طرفی استفاده از ۱۵ درصد پودر شیشه ضایعاتی (WGP15) و یا ۱۵ درصد سرباره کوره بلند (GGBFS15) بجای سیمان به دلیل خاصیت پوزولانی و پرکنندگی، سبب کاهش تخلخل خمیر سیمان شد و در نتیجه این امر باعث کاهش جذب آب نسبت به نمونه کنترل شد.

۴- به طور کلی استفاده از دوده سیلیسی، پودر شیشه ضایعاتی و سرباره کوره بلند باعث کاهش نفوذ آب شد، پر شدن فضاهای خالی به دلیل تشکیل ژل کلسیم سیلیکات هیدراته (C-S-H) حاصل از فعالیت پوزولانی می‌تواند مهمترین دلیل این پدیده باشد. عملکرد نمونه‌های حاوی ۱۵ درصد پودر شیشه (WGP15) و ۱۵ درصد سرباره کوره بلند (GGBFS15) در کاهش نفوذپذیری نسبت به سایر نمونه‌های بتنی بهتر بوده است.

۵- تشکر و قدردانی

پژوهش‌های کاربردی معمولاً در طراحی و فرآیند اجرا با چالش‌هایی مواجه می‌شوند. در چنین شرایطی، ظرفیت‌های فنی

- Res. 28, 1713–1723, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00162-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00162-8).
- [19] Suryavanshi, A.K., Scantlebury, J.D., Lyon, S.B., Mechanism of Friedel's salt formation in cements rich in tri-calcium aluminate. *Cem. Concr. Res.* 26, 717–727, 1996. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(96\)85009-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(96)85009-5).
- [20] Paul, G., Boccaleri, E., Buzzi, L., Canonico, F., Gastaldi, D., Friedel's salt formation in sulfoaluminate cements: A combined XRD and ^{27}Al MAS NMR study, *Cem. Concr. Res.* 67, 93–102, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.08.004>.
- [21] Bube, C., Metz, V., Bohnert, E., Garbev, K., Schild, D., Kienzler, B., Long-term cement corrosion in chloride-rich solutions relevant to radioactive waste disposal in rock salt –Leaching experiments and thermodynamic simulations, *Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C.* 64, 87–94, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2012.11.001>.
- [22] Merida, A., Kharchi, F., Pozzolan Concrete Durability on Sulphate Attack, *Procedia Engineering*, Volume 114, Pages 832–837, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.035>.
- [23] Gollop, R.S., Taylor, H.F.W., Microstructural and microanalytical studies of sulfate attack. II. Sulfate-resisting portland cement: Ferrite composition and hydration, chemistry in: *Blue Circ. Ind. PLC Tech. Centre*, 305 London Road Greenhithe, Kent, DA9 9JQ, UK: pp. 1347–1358, 1994. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)90120-1](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)90120-1).
- [24] Mehta, P.K., Sulfate attack in marine environment, *Am. Ceram. Soc. INC, Mater. Sci. Concr. Sulfate Attack Mech.* 295–299, 1999.
- [25] Ghrici, M., Kenai, S., Said-Mansour, M., Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements, *Cem. Concr. Compos.* 29, 542–549, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.04.009>.
- [26] Torii, K., Mitsunori, K., Effects of fly ash and silica fume on the resistance of mortar to sulfuric acid and sulfate attack, *Cem. Concr. Res.* 24, 361–370, 1994. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)90063-9](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)90063-9).
- [27] Roy, D.M., Arjunan, P., Silsbee, M.R., Effect of silica fume, metakaolin, and low-calcium fly ash on chemical resistance of concrete, *Cement and Concrete Research*, Volume 31, Issue 12, Pages 1809–1813, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00548-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00548-8).
- silica fume concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 142, Pages 92–100, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.057>.
- [8] Horszczaruk, E., Role of nanosilica in the formation of the properties of cement composites, state of the art, *Cem. Wapno Bet.* 23, 487–495, 2018.
- [9] Ding, J.T., Li, Z., Effects of metakaolin and silica fume on properties of concrete, *ACI materials journal*, v. 99, (4), JUL–AUG, p. 393–398, 2002. <http://hdl.handle.net/1783.1/23320>.
- [10] Golek, Ł., Kapeluszna, E., Rzepa, Investigations of the glass activity in municipal and special incinerating plants waste, *Cem. Wapno Bet.* 22, 79–91, 2017.
- [11] Andrew, R.M., Global CO_2 emissions from cement production, *Earth Syst. Sci. Data.* 10, 195–217. 2018. <https://doi.org/10.5194/essd-10-195-2018>.
- [12] Giergiczny, Z., The hydraulic activity of high calcium fly Ash, *J. Therm. Anal. Calorim.* 83, 227–232, 2006. <https://doi.org/10.1007/s10973-005-6970-7>.
- [13] Neville, A., Ajdukiewicz, A., Degler, A., Neville, A. M., *Właściwości betonu*; wyd. 4 w 2000 r. z jęz. ang. tł. Andrzej Ajdukiewicz, Andrzej Degler, Janusz Kasperkiewicz ; red. nauk. i uzup. tł. wyd. 5, Andrzej Ajdukiewicz, 2012.
- [14] Markiv, T., Sobol, K., Franus, M., Franus, W., Mechanical and durability properties of concretes incorporating natural zeolite, *Arch. Civ. Mech. Eng.* 16, 554–562, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2016.03.013>.
- [15] Al-Akhras, N.M., Durability of metakaolin concrete to sulfate attack, *Cem. Concr. Res.* 36, 1727–1734, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.03.026>.
- [16] Wongkeo, W., Thongsanitgarn, P., Ngamjarurojana, A., Chaipanich, A., Compressive strength and chloride resistance of self-compacting concrete containing high level fly ash and silica fume, *Mater. Des.* 64, 261–269. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.042>.
- [17] Baquerizo, L.G., Matschei, T., Scrivener, K.L., Saeidpour, M., Wadsö, L., Hydration states of Afm cement phases, *Cem. Concr. Res.* 73, 143–157, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.02.011>.
- [18] Birnin-Yauri, U.A., Glasser, F.P., Friedel's salt, $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6(\text{Cl}, \text{OH}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: Its solid solutions and their role in chloride binding, *Cem. Concr.*

- International, West Conshohocken, PA, USA, <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?C33C33M-18>.
- [36] ASTM (2019) C494/C494M-19: Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?C494C494M-19>.
- [37] BSI (2019) EN 12390-2:2019. Testing hardened concrete. Making and curing specimens for strength tests. BSI, London, UK.
- [38] BSI (2019) EN 12390-3:2019. Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens. BSI, London, UK.
- [39] BSI (2011) BS 1881-122:2011. Testing concrete. Method for determination of water absorption. BSI, London, UK.
- [40] BSI (2019) EN 12390-8:2019. Testing hardened concrete. Depth of penetration of water under pressure. BSI, London, UK.
- [41] Mehta PK and Monteiro PJM (2013) Concrete: Microstructure, Properties, and Materials, Page 44, McGraw-Hill Education, ISBN 9780071797870.
- [28] Samimi, K., Kamali-Bernard, S., Maghsoudi, A. A., Maghsoudi, M., Siad, H., Influence of pumice and zeolite on compressive strength, transport properties and resistance to chloride penetration of high strength self-compacting concretes, Construction and Building Materials, Volume 151, Pages 292-311, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.071>.
- [29] Elahi, M.M.A., Shearer, Ch.R., Rashid Reza, A.N., Saha, A.K., Newaz Khan, M.N., Hossain, M.M., Sarker, P.K., Improving the sulfate attack resistance of concrete by using supplementary cementitious materials (SCMs): A review, Construction and Building Materials, Volume 281, 122628, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122628>.
- [30] ASTM (2020) C1240-20: Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures, ASTM International .West Conshohocken PA . USA <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?C1240-20>.
- [31] ASTM (2018) C989/C989M-18a: Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars ASTM International .West Conshohocken PA .USA . <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?C989C989M-18a>.
- [32] ASTM (2019) C618-19: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?C618-19>.
- [33] ASTM (2015) C127-15: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?C127-15>.
- [34] ASTM (2015) C128-15: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?C128-15>.
- [35] ASTM (2018) C33/C33M-18: Standard Specification for Concrete Aggregates, ASTM

Evaluation of the resistance of concrete containing silica fume, glass powder and steel slag against magnesium sulfate attack

Mahdi Bameri¹, Soroush Rashidi², Mohammad Maghsoudi^{3*}, Mitra Manouchehri⁴

1- Master of Civil Engineering, Dept. of Civil Engineering, Islamic Azad University Karaj Branch, Tehran, Iran.

2- Master of Civil Engineering, Dept. of Civil Engineering, Islamic Azad University Kerman Branch, Kerman, Iran.

*3- Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, University of Jiroft, Jiroft, Iran.

4- Master of Civil Engineering, Quality Control Manager, Taradod Rahnama Company, Kerman, Iran.

*Maghsoudi_Mohammad@ujiroft.ac.ir

Abstract

Nowadays, concrete is used as a widely used material in different industries. Depending on the usage of concrete, different properties can be expected from it. Plentiful usage of concrete in other industries such as bridge construction, landscaping, construction, harbors, docks, and special structures has made this valuable material the center of attention of many researchers. Depending on the type and place of using concrete, this material has limitations and problems. Destruction of concrete in the long term is one of the factors causing damage to the industrial cycle and economy of countries. The high durability and reliability of concrete reduce damage to the environment and increase the service life of structures. Important factors are the useful life of concrete structures, environmental conditions, and concrete quality. The attack of sulfates on concrete is one of the critical factors in reducing the life of the structure and the durability of concrete. Sodium, magnesium, and calcium sulfates are salts usually found in soils and groundwater and react with different phases of hydrated cement paste, such as hydrated alumina, hydrated monosulfate, and calcium hydroxide, to produce needle-shaped crystals of ettringite and calcium sulfate (gypsum). The volume of these crystals is greater than the volume of cement hydration products, so they cause internal stress and cracking in hardened concrete. Magnesium sulfate is more damaging than other sulfates because it destroys calcium silicate hydrate (C-S-H). In the attack of magnesium sulfate and the conversion of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ to gypsum, it is accompanied by the simultaneous formation of $\text{Mg}(\text{OH})_2$ (brucite), which is insoluble and reduces the alkalinity of the system. In the absence of hydroxyl ions in the pore solution, the stability of C-S-H in the system is reduced and attacked by the sulfate solution. The ultimate product of this substitution reaction is the magnesium silicate hydrate, the formation of which is associated with the loss of the cementitious characteristic. Permeability and porosity are the most critical factors in increasing the resistance of concrete against sulfate attack. This study evaluated weight and compressive strength changes after placing in magnesium sulfate solution for six designs of concrete mixes containing silica fume, glass powder, and steel slag. In addition, the depth of water penetration under pressure and water absorption tests were performed to evaluate the permeability of concrete. The results showed the proper performance of glass powder and steel slag against magnesium sulfate attack and reduced the depth of water penetration. Changes in the weight and compressive strength of concrete against magnesium sulfate attack depend on the properties of supplementary cementitious materials, their replacement amount, and concrete porosity.

Keywords: Durability of Concrete, Magnesium Sulfate Attack, Permeability, Compressive Strength.