

بررسی تأثیر افزودنی هیدروکسید سدیم در خصوصیات مقاومتی و دوام بتن خودمترکم با سنگدانه‌های سولفاتی در محیط سولفاته

حامد ابطی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

علیرضا حاجانی بوشهریان* (استادیار)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شبواز

مهندسی عمران شریف، پاییز ۱۴۰۰ (دوره ۲ - شماره ۳/۲، ص. ۱۳-۳، پژوهشی)

مصالح سنگی بتن می‌تواند شامل شن و ماسه‌ی سالم و ناسالم باشد. در پژوهش حاضر، اثر سنگدانه‌های غیرسالم مستعد واکنش انبساطی به همراه محیط مخرب شبیه‌سازی شده در نمونه‌های فشاری، کششی و خمشی بتن خودمترکم و نیز مقاومت و دوام نمونه‌ها در سن‌های مختلف بررسی شده است. مصالح ناسالم از معادن شن و ماسه‌ی در حال بهره‌برداری تهیه شده است، که میزان ناخالصی بالاتری از مقدار مجاز ۴/۰٪ مطابق با مبحث نهم مقررات ملی ایران است. به منظور پیش‌گیری از آثار مخرب محیط سولفاتی در بتن، از هیدروکسید سدیم با سه درصد متفاوت (۲٪، ۵٪، ۲٪ و ۳٪) وزنی آب استفاده شده است. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که سنگدانه‌ی سولفاتی در محیط سولفاتی باعث کاهش مقاومت مکانیکی و دوام بتن خودمترکم می‌شود. از طرفی دیگر، افزودن هیدروکسید سدیم به سنگدانه‌ی سولفاته در نمونه‌ی ۲۸ روزه بتن خودمترکم واقع در محیط سولفاتی باعث افزایش مقاومت کششی تا ۸۴/۱۵، کاهش نفوذپذیری و همچنین جذب آب بتن به ترتیب تا ۲۱/۸۷ و ۱۶/۶۷ درصد شده است.

واژگان کلیدی: خصوصیات مقاومتی و دوام بتن، خودمترکم، هیدروکسید سدیم، محیط سولفاته، مقاومت فشاری.

۱. مقدمه

رشد چشمگیر ساختمان‌های بتنی موجب شده است تا بتن به عنوان یکی از پرکاربردترین مصالح در صنعت ساختمان شناخته شود. بتن جزء اساسی زیرساخت‌های مدرن است، به همین دلیل، مقاومت، بهره‌دهی و در بسیاری از شرایط محیطی، استحکام و دوام آن در طول عمر مشخص سازه، نقش مهمی را ایفا می‌کند و همچنین پی بردن به دوام بتن در شرایط مختلف نیاز به طی شدن زمان قابل توجهی دارد، به همین منظور در پروژه‌های تحقیقاتی، زمان اهمیت پیدا می‌کند. نفوذپذیری بتن، یکی از پارامترهای اساسی در میزان خسارت‌پذیری بتن در برابر عوامل خارجی، مانند: کلریدها و سولفات‌هاست. دوام ناکافی با از هم پاشیدن بتن نمایان می‌شود که می‌تواند به صورت فیزیکی، شیمیایی و یا مکانیکی در خود بتن رخ دهد. عوامل شیمیایی، شامل: واکنش‌های قلیایی - سیلیسی و قلیایی - کربناتی و همچنین حمله‌ی شیمیایی یون‌های مهاجم، مانند: سولفات‌ها، کلریدها و یا دی‌اکسید کربن هستند و خسارت مکانیکی در اثر ضربه، خلاءزایی و یا فرسایش رخ می‌دهد. به‌طور کلی می‌توان گفت که واکنش‌ها در سطح

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۴/۲۱، اصلاحیه ۱۳۹۹/۱۱/۱۱، پذیرش ۱۳۹۹/۱۲/۱۷.

DOI:10.24200/J30.2021.55938.2811

خارجی بتن که دائماً مرطوب است و یا قسمت‌هایی که در معرض سیکل‌های تر و خشک شدن قرار دارند، انجام می‌شود. مطالعات متعددی در سال‌های اخیر بر روی بتن با سنگ‌دانه‌های ناسالم و در محیط‌های مخرب انجام شده است.^[۸-۱] مطالعات مختلفی نیز در گذشته بر روی رفتار بتن‌های خودمترکم انجام شده است.^[۱۶-۹]

چن^۱ و همکاران (۲۰۱۶)، در بررسی مقاومت بتن در برابر حملات ترکیبی سولفاته و کاریده تحت سیکل‌های تر و خشک‌سازی، به بررسی تغییرات جرم نمونه‌ها، مدول کشسان دینامیکی و میزان عمق نفوذ کلرید در محلول‌های مختلف بر روی نمونه‌ها پرداختند و دریافتند که نمونه‌های معمولی قرار گرفته در معرض ترکیب‌های سولفاتی و کلریدی، زوال بیشتری نسبت به نمونه‌هایی که در آن‌ها از خاکستر بادی استفاده شده است، تحت سیکل‌های خشک و تر سازی هستند.^[۷]

وانگ^۲ و همکاران (۲۰۱۷)، هم در بررسی آزمایشگاهی خصوصیات مکانیکی و دوام بتن تقویت شده با الیاف بازالتی تحت فرسایش سدیم سولفاتی، نمونه‌های بتنی را به مدت ۹۰ روز در محیط معمولی و محیط سولفاته قرار دادند و تغییرات نرخ جذب آب نمونه‌ها و انجام آزمون بارگذاری فشاری بر روی نمونه‌ها را بررسی کردند و دریافتند که تحت فرسایش سدیم سولفاتی، فیبرهای بازالتی به‌طور مؤثری

جدول ۱. آنالیز شیمیایی سیمان تیپ II فیروزآباد.

CaO	MgO	SO _۳	Fe _۲ O _۳	L.O.I
٪۶۴/۸۱	٪۱/۴۵	٪۱/۹۹	٪۳/۳۹	٪۱/۰۲
	SiO _۲	Al _۲ O _۳	Na _۲ O	K _۲ O
	٪۲۰/۷۱	٪۵/۷۰	٪۰/۱۴	٪۰/۷۹

جدول ۲. مشخصات مصالح سنگی.

آنالیز شیمیایی پودر سنگ				نوع سنگ	وزن مخصوص خشک (kg/m ^۳)	چگالی SSD (kg/m ^۳)	بیشینه‌ی بعد سنگدانه (mm)
MgO	K _۲ O	SO _۳	Fe _۲ O _۳				
٪۰/۸۰	٪۱/۰۹	٪۱/۲۴	٪۰/۵۰	ماسه معدنی	۱۵۸۰	۱۶۳۰	۴/۷۵
L.O.I	SiO _۲	Al _۲ O _۳	CaO	شن نخودی	۱۶۸۰	۱۶۴۰	۱۲/۵
٪۴۲	٪۲/۸۰	٪۰/۳۵	٪۵۱/۲۲				

جدول ۳. مشخصات فنی هیدروکسید سدیم و فوق روان‌کننده‌ی مصرفی.

فوق روان‌کننده مصرفی		سدیم هیدروکسید مصرفی	
حالت فیزیکی (رنگ)	مایع تقریباً قهوه‌ای رنگ	NaOH	فرمول مولکولی
میزان حلالی	حلال خوب در آب	جامد، سفیدرنگ (پولک سفید) و بی‌بو	شکل ظاهری
جرم مخصوص gr/cm ^۳	۰/۲±	۱٪ ± ۹۸٪	میزان خلوص
مقدار pH	۰/۵±	gr/cm ^۳ ۲/۱۳	چگالی
زمان ماندگاری	یک سال	۳۱۸ درجه سانتی‌گراد	Vv
مقدار مصرف مجاز	۱ الی ۷ درصد وزن سیمان	(۶۰۴ درجه فارنهایت، ۵۹۱ کلوین)	دمای جوش
		F°، ۲۵۳°K ۱۶۶۱، C° ۱۳۸۸	انحلال‌پذیری در آب
		۱۱۱۰ g.dm ^{-۲} @۲۰°C	جرم مولی
		g.mol ^{-۱} ۳۹/۹۹۷۱	

تأثیر حضور سنگ‌دانه‌های سولفاتی در بتن خودمتراکم و اضافه کردن افزودنی هیدروکسید سدیم به آن در خواص مکانیکی و دوام بتن خودمتراکم ساخته شده در محیط‌های سولفاتی و معمولی بررسی شده است. در پژوهش حاضر، از بتن خودمتراکم تهیه شده از سنگ‌دانه‌ی معمولی، یک بار با افزودنی هیدروکسید سدیم و یک بار بدون آن به‌عنوان نمونه‌ی شاهد استفاده شده است. در مرحله‌ی بعد، نمونه‌های بتن خودمتراکم با سنگ‌دانه‌ی سولفاتی با افزودنی هیدروکسید سدیم و بدون آن ساخته شده‌اند. آزمایش‌های مقاومت مکانیکی و دوام برای حالت‌های ذکر شده انجام شده و در نهایت با استفاده از نتایج به‌دست آمده به تحلیل، بررسی و مقایسه‌ی عملکرد دوام و خواص مکانیکی در حالت‌های مختلف پرداخته شده است.

نرخ افزایش تخلخل در نمونه‌ها را کاهش می‌دهند و افزایش میزان استفاده از فیبرهای بازالتی، تأثیر منفی در دوام بتن دارد.^[۵]

در سال ۲۰۱۷ نیز تنیج^۳ و همکاران، رفتار بتن خودمتراکم ساخته شده از سنگ مرمر و ضایعات کاشی در معرض حمله‌ی سولفاتی، نمونه‌های بتن خودمتراکم ساخته شده با ضایعات سنگ مرمر، کاشی‌های مرمری و کاشی‌های ماسه‌ی قرار گرفته در معرض حمله‌ی سولفاتی را به فرم‌های مختلف بررسی کردند و به منظور ارزیابی رفتار نمونه‌ها در مقابل حالت‌های مختلف حملات سولفاتی، تغییرات جرم نمونه‌ها و مدول کشسان دینامیکی نمونه‌ها با استفاده از آزمون اولتراسونیک را بررسی کردند و دریافتند که بتن‌های خودمتراکم ساخته شده با استفاده از ضایعات، خصوصاً ساخته شده با استفاده از ضایعات سنگ مرمر، مقاومت مناسبی در برابر حملات سولفاتی دارند.^[۱۳]

۲. روش‌های آزمایشگاهی

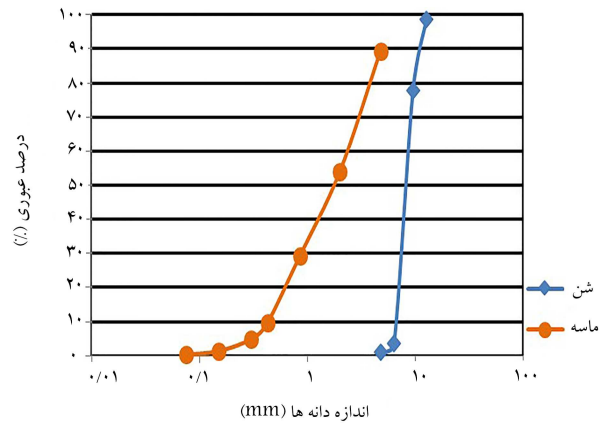
۲.۱. مواد و طرح‌های اختلاط

خصوصیات مواد و مصالح مصرفی در آزمایش‌ها، از جمله: سیمان، سنگ‌دانه‌ها، فوق روان‌کننده، پودر سنگ آهکی و هیدروکسید سدیم به ترتیب در جدول‌های ۱ الی ۴ ارائه شده است. در شکل ۱، نمودارهای دانه‌بندی شن و ماسه‌ی مصرفی در نمونه‌های بتنی مشاهده می‌شود.

همچنین لیو و همکاران (۲۰۲۰) در بررسی تأثیر حمله‌های فیزیکی و شیمیایی سولفاتی در کاهش عملکرد بتن تحت شرایط مختلف، به مطالعه‌ی تأثیر نوع فرسایش، مدت زمان فرسایش و اثر محلول سولفاتی در مقاومت فشاری پرداختند و دریافتند که نوع فرسایش، مدت زمان فرسایش و غلظت محلول سولفاتی نقش مهمی در عملکرد بتن خواهند داشت و بین مقاومت فشاری و محلول سولفاتی، تابع پیرسون وجود دارد. همچنین بلوره‌های نمکی بر روی بتن سولفات سدیم، گچ سدیم، گچ دی‌هیدرات و ... قرار دارند.^[۳] با توجه به مرور مطالعات پیشین و تمرکز انجام شده بر موضوعات مشابه،

جدول ۴. جدول دانه بندی پودر سنگ.

شماره الک	۴	۱۰	۳۰	۵۰	۱۰۰	۲۰۰
درصد عبوری	۱۰۰	۹۴/۵	۸۱/۳	۶۵/۵	۴۲/۹	۲۲/۱



شکل ۱. نمودار دانه بندی شن و ماسه.

جدول ۵. معرفی و نام گذاری طرح های اختلاط به صورت کلی.

عنوان	شرح مربوطه
A	نمونه شاهد (با سنگدانه معمولی)
A _s	طرح اختلاط با سنگدانه سولفاته
AH _۱	نمونه با سنگدانه معمولی با ۲٪ هیدروکسید سدیم
AH _۲	نمونه با سنگدانه معمولی با ۵/۲٪ هیدروکسید سدیم
AH _۳	نمونه با سنگدانه معمولی با ۳٪ هیدروکسید سدیم
A _s H _۱	نمونه با سنگدانه سولفاته با ۲٪ هیدروکسید سدیم
A _s H _۲	نمونه با سنگدانه سولفاته با ۵/۲٪ هیدروکسید سدیم
A _s H _۳	نمونه با سنگدانه سولفاته با ۳٪ هیدروکسید سدیم

۳. ارائه ی نتایج

۱.۳. خواص رئولوژی

میزان خواص رئولوژی بتن خودمترکام (اسلامپ و آزمون های قالب L، قالب U و قیف V) با سنگدانه ی معمولی، سنگدانه ی سولفاته، سنگدانه ی معمولی با پوشش (۲/۵٪، ۲/۳٪، ۲/۵٪) هیدروکسید سدیم و سنگدانه ی سولفاته با پوشش (۲/۵٪، ۲/۳٪) هیدروکسید سدیم مطابق با جدول ۷ است.

با توجه به با جدول ۷ در نمونه ی شاهد (A)، بتن بیشترین قابلیت پُرکنندگی (پخش شدن در تمام فضاهای قالب) را دارد و بتن خودمترکام، روانی (کیفیت) قابل قبولی دارد. با افزودن هیدروکسید سدیم به نمونه های شامل سنگدانه ی معمولی، قابلیت پُرکنندگی بتن کاهش می یابد و بتن تازه ی خودمترکام، یکپارچگی کمتری دارد.

۲.۳. نتایج مقاومت فشاری نمونه ها در محیط های معمولی و سولفاتی

نتایج مقاومت فشاری بتن خودمترکام با سنگدانه ی معمولی، سنگدانه ی سولفاته، سنگدانه ی معمولی با افزودنی هیدروکسید سدیم با سه درصد متفاوت (۲/۵٪، ۲/۳٪) و همچنین سنگدانه ی سولفاته با افزودنی هیدروکسید سدیم با سه درصد متفاوت (۲/۵٪، ۲/۳٪) در محیط معمولی و سولفاتی در بازه ی زمانی ۹۰، ۶۰ و ۲۸ روزه در شکل های ۲ و ۳ مشاهده می شود.

۲.۲. معرفی انواع نمونه ها و طرح های اختلاط

در جدول ۵، مشخصه ی استفاده شده برای هر کدام از آزمایش ها ارائه شده است. میزان طرح اختلاط با سنگدانه ی معمولی، سنگدانه ی سولفاته، سنگدانه ی معمولی با افزودنی هیدروکسید سدیم با سه درصد متفاوت (۲/۵٪، ۲/۳٪ و ۲/۵٪) و همچنین سنگدانه ی سولفاته با افزودنی هیدروکسید سدیم با سه درصد متفاوت (۲/۵٪، ۲/۳٪) در جدول ۶ ارائه شده است. هیدروکسید سدیم به عنوان یک ماده ی افزودنی و جهت مهار کردن آثار مخرب در محیط سولفاتی، کاهش جذب آب، کاهش تخلخل و افزایش مقاومت به بتن اضافه شده است. منظور از درصدهای مورد نظر، همچنان که در چکیده و متن نوشتار حاضر اشاره شده است، درصد وزنی نسبت به وزن آب مصرفی در بتن است. نحوه ی افزودن هیدروکسید سدیم به سنگدانه ها به این گونه است که ابتدا هیدروکسید سدیم با توجه به درصد وزنی آب مخلوط و سپس سنگدانه به محلول آب و هیدروکسید اضافه می شود.

۳.۲. روش انجام آزمایش ها

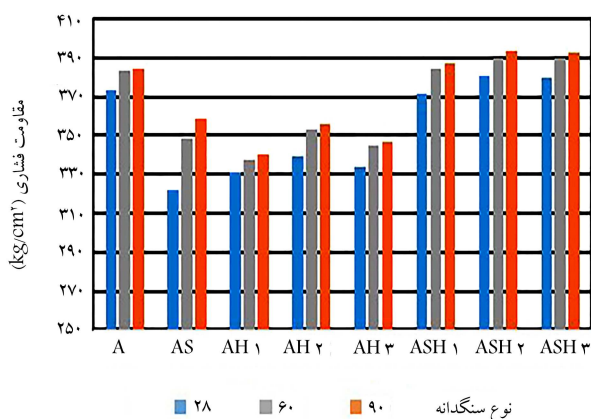
به منظور بررسی تأثیر انواع سنگدانه ها و شرایط محیطی در نمونه های بتن، آزمایش های مختلف مقاومت مکانیکی و دوام، نظیر: مقاومت فشاری (ASTM C ۳۹) [۱۷]، مقاومت کششی (ASTM C ۴۹۶) [۱۸]، مقاومت خمشی (ASTM C ۲۹۹۳) [۱۹]،

جدول ۶. طرح اختلاط نمونه‌ها در ۱ مترمکعب بتن.

عنوان	ماسه (kg)	شن (kg)	سیمان (kg)	آب (kg)	پودرسنگ (kg)	روان‌ساز (kg)	هیدروکسید سدیم (kg)
A	۱۲۰۰	۸۵۰	۱۶۰	۴۸۰	۳۵۰	۳/۲۳۵	-
A _s	۱۲۰۰	۸۵۰	۱۶۰	۴۸۰	۳۵۰	۳/۲۳۵	-
AH _۱	۱۲۰۰	۸۵۰	۱۶۰	۴۸۰	۳۵۰	۳/۲۳۵	۲
AH _۲	۱۲۰۰	۸۵۰	۱۶۰	۴۸۰	۳۵۰	۳/۲۳۵	۲/۵
AH _۳	۱۲۰۰	۸۵۰	۱۶۰	۴۸۰	۳۵۰	۳/۲۳۵	۳
h	۱۲۰۰	۸۵۰	۱۶۰	۴۸۰	۳۵۰	۳/۲۳۵	۲
A _s H _۲	۱۲۰۰	۸۵۰	۱۶۰	۴۸۰	۳۵۰	۳/۲۳۵	۲/۵
A _s H _۳	۱۲۰۰	۸۵۰	۱۶۰	۴۸۰	۳۵۰	۳/۲۳۵	۳

جدول ۷. نتایج خواص رئولوژی.

ردیف	عنوان	SLUMP (mm)	L BOX (mm)	U BOX (mm)	V BOX (s)
۱	A	۷۹۶	۰/۹۸	۰/۶۷	۶/۲۰
۲	A _s	۷۶۰	۰/۹۶	۴/۳۵	۷/۸۰
۳	AH _۱	۷۳۵	۰/۹۵	۶/۷۷	۸/۱۰
۴	AH _۲	۷۲۴	۰/۹۳	۸/۲۱	۸/۹۰
۵	AH _۳	۷۱۴	۰/۹۲	۱۱/۰۲	۹/۳۰
۶	A _s H _۱	۶۸۲	۰/۹۰	۱۳/۶۳	۱۰/۷۰
۷	A _s H _۲	۶۷۰	۰/۸۸	۱۶/۴۷	۱۱/۳۰
۸	A _s H _۳	۶۵۷	۰/۸۲	۱۸/۹۲	۱۱/۸۰



شکل ۳. نمودار مقاومت فشاری در محیط سولفاتی.

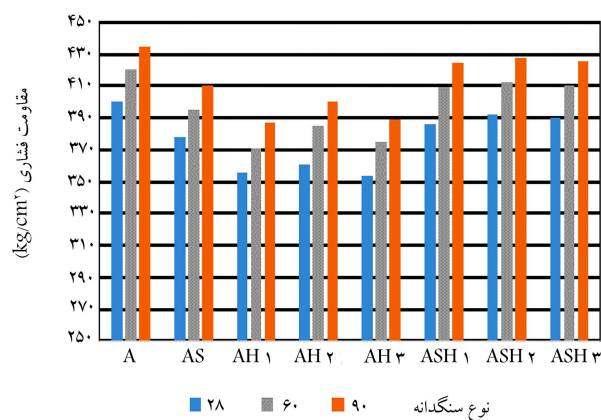
خودمتراکم با افزایش سن است. در محیط سولفاتی اثر هیدروکسیدسدیم بیشتر و مؤثرتر نمایان می‌شود. لذا در محیط سولفاتی بیشترین مقاومت فشاری را نمونه‌های حاوی هیدروکسیدسدیم، که سنگدانه‌ی سولفاته داشته‌اند، کسب کرده‌اند. مقاومت فشاری نمونه‌های مذکور از نمونه‌ی شاهد نیز بیشتر شده است.

۳.۳. نتایج مقاومت کششی نمونه‌ها در محیط‌های معمولی و سولفاتی

نتایج مقاومت کششی بتن خودمتراکم با سنگدانه‌ی معمولی، سنگدانه‌ی سولفاته، سنگدانه‌ی معمولی با افزودنی هیدروکسیدسدیم با ۳ درصد متفاوت (۲٪، ۵٪، ۲٪) و همچنین سنگدانه‌ی سولفاته با افزودنی هیدروکسیدسدیم با ۳ درصد متفاوت (۲٪، ۵٪، ۲٪) در محیط معمولی و سولفاتی و در بازه‌ی زمانی ۲۸ و ۶۰، ۹۰ روزه در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود.

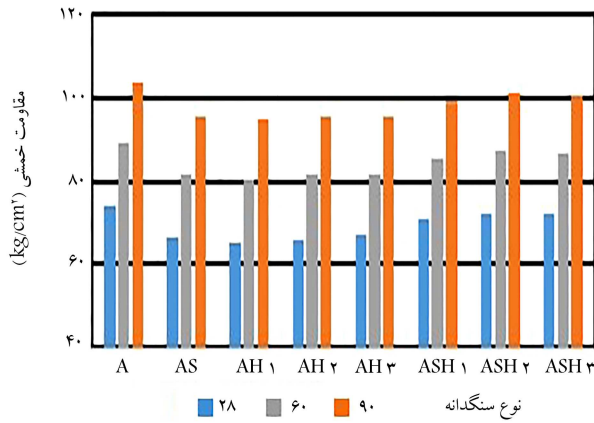
نتایج نشان می‌دهد که مقاومت کششی نمونه‌ی شاهد در محیط معمولی بهتر و بیشتر از سایر نمونه‌های بررسی شده است. هیدروکسیدسدیم در نمونه‌های حاوی سنگدانه‌ی سولفاته، آثار مثبتی داشته است که البته آثار مذکور به نسبت نمونه‌ی شاهد چشمگیر نیست. همچنین در سنگدانه‌ی سولفاته (As)، افت مقاومت کششی نسبت به سایر نمونه‌ها بیشتر بوده است.

از طرفی دیگر، در محیط سولفاتی، بیشترین مقاومت کششی را نمونه‌ی ASH_۲ کسب کرده است، که به نسبت نمونه‌ی شاهد در محیط سولفاتی، با افزایش مقاومت همراه بوده است. سنگدانه‌ی سولفاته (As)، در محیط سولفاتی، کمترین مقادیر مقاومت کششی را نسبت به محیط معمولی داشته است. همچنین با توجه به داده‌های

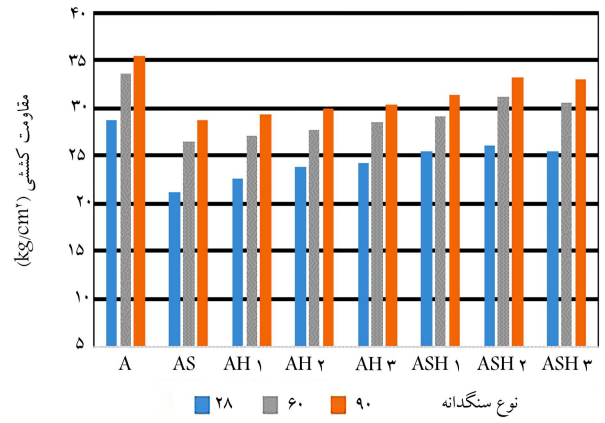


شکل ۴. نمودار مقاومت فشاری در محیط معمولی.

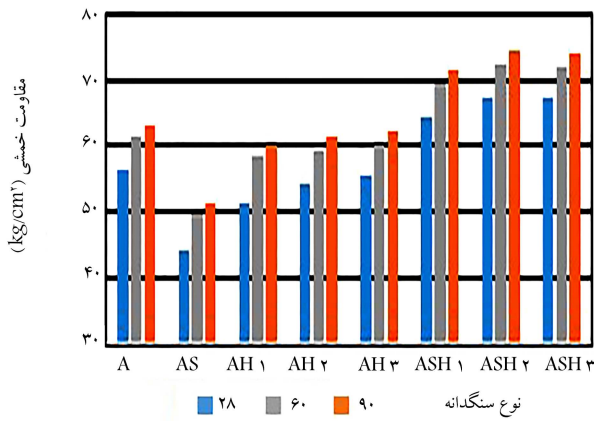
بر مبنای نتایج در محیط معمولی، بتن نرمال بیشترین مقاومت فشاری را در مجموع کسب کرده است. با اضافه کردن هیدروکسیدسدیم به نمونه‌ها، در نمونه‌ی که سنگدانه‌ی معمولی داشته و با کاهش مقاومت مواجه بوده است، مشخص شده است که هیدروکسیدسدیم در صورت وجود داشتن سنگدانه‌های سولفاته، نتایج مؤثرتری از خود نشان می‌دهد. در پژوهش حاضر، بتن با هیدروکسیدسدیم با سنگدانه‌های سولفاته مقاومت فشاری بیشتری نسبت به بتن با هیدروکسیدسدیم با سنگدانه‌ی معمولی کسب کرده است. همچنین در هر ۲ محیط معمولی و سولفاتی، با افزایش سن بتن از ۲۸ روزه به ۶۰ و ۹۰ روزه، هیدراتاسیون بهتری انجام شده و سیمان با آب بیشتر واکنش داده است که خود یکی از مهم‌ترین علل افزایش مقاومت فشاری بتن



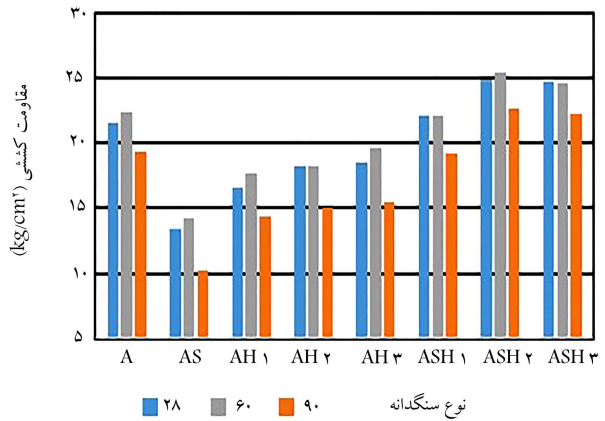
شکل ۶. نمودار مقاومت خمشی در محیط معمولی.



شکل ۴. نمودار مقاومت کششی در محیط معمولی.



شکل ۷. نمودار مقاومت خمشی در محیط سولفاتی.



شکل ۵. نمودار مقاومت کششی در محیط سولفاتی.

نمونه‌ی AS در محیط سولفاتی، کمترین مقادیر مقاومت خمشی را در بین مقادیر ۲ محیط دیگر داشته است، که نشان از ناسازگاری سنگدانه‌ی سولفاته بدون افزودنی هیدروکسیدسدیم با محیط سولفاتی است.

به دست آمده، مقدار مقاومت نمونه‌ها با توجه به افزایش سن بتن رو به کاهش است، که بیانگر ضعف مقاومت کششی نمونه‌ها در سنین بالا در محیط سولفاتی است.

۴.۳. نتایج مقاومت خمشی نمونه‌ها در محیط‌های معمولی و سولفاتی

نتایج مقاومت خمشی بتن خودمتراکم با سنگدانه‌ی معمولی، سنگدانه‌ی سولفاته، سنگدانه‌ی معمولی با افزودنی هیدروکسیدسدیم با ۳ درصد متفاوت (۲٪، ۲/۵٪ و ۳٪) و همچنین سنگدانه‌ی سولفاته با افزودنی هیدروکسیدسدیم با ۳ درصد (۲٪، ۲/۵٪ و ۳٪) در محیط‌های معمولی و سولفاتی و در بازه‌ی زمانی ۹۰، ۶۰ و ۲۸ روزه در شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود.

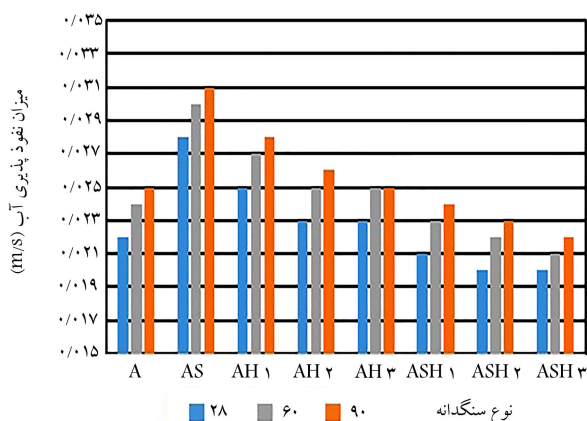
بر مبنای نتایج به دست آمده مشخص شده است که در محیط معمولی با اضافه کردن هیدروکسیدسدیم به نمونه‌ی شاهد (مخصوصاً در نمونه‌ی (AH₁))، نمونه‌ی مذکور با کاهش مقاومت خمشی به نسبت نمونه‌ی شاهد روبه‌رو شده است، در صورتی که مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی سنگدانه‌ی سولفاته با افزودنی هیدروکسیدسدیم و به خصوص نمونه‌ی ASH₂، افزایش قابل ملاحظه‌ی داشته است که بیانگر نتایج مؤثر و مثبت استفاده از هیدروکسیدسدیم در صورت وجود سنگدانه‌های سولفاته است.

در محیط سولفاتی، کاهش نسبتاً چشمگیر مقاومت خمشی رخ می‌دهد و اثر هیدروکسیدسدیم بیشتر نمایان می‌شود؛ لذا در محیط سولفاتی، بیشترین مقاومت خمشی را مجموعه‌ی نمونه‌های حاوی سنگدانه‌ی سولفاته با هیدروکسیدسدیم کسب کرده‌اند و مقاومت خمشی آن‌ها از نمونه‌ی شاهد نیز بیشتر شده است. همچنین

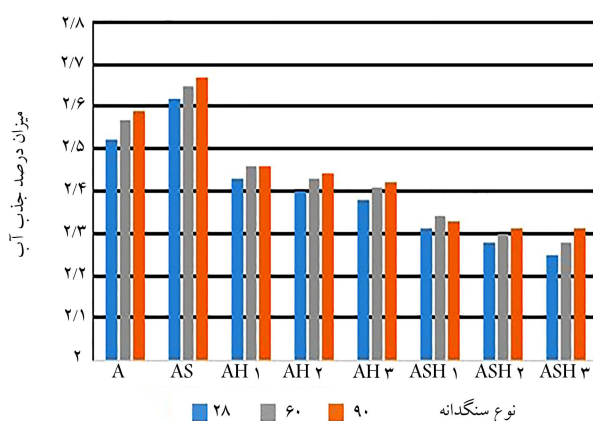
۵.۳. نتایج جذب آب نمونه‌ها در محیط‌های معمولی و سولفاتی

نتایج جذب آب در بتن خودمتراکم با سنگدانه‌ی معمولی، سنگدانه‌ی سولفاته، سنگدانه‌ی معمولی با افزودنی هیدروکسیدسدیم با ۳ درصد متفاوت (۲٪، ۲/۵٪ و ۳٪) و همچنین سنگدانه‌ی سولفاته با افزودنی هیدروکسیدسدیم با ۳ درصد متفاوت (۲٪، ۲/۵٪ و ۳٪) در محیط‌های معمولی و سولفاتی و در بازه‌ی زمانی ۹۰، ۶۰ و ۲۸ روزه در شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌شود.

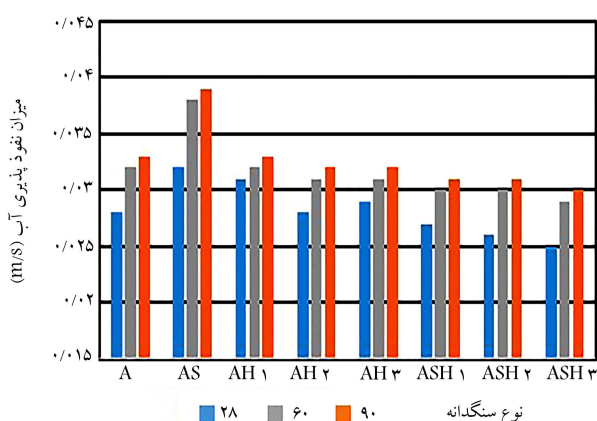
با توجه به نتایج به دست آمده، در محیط معمولی به نسبت محیط سولفاتی میزان جذب آب کمتری اتفاق افتاده است و با اضافه کردن هیدروکسیدسدیم به نمونه‌ی شاهد، می‌توان آثار مثبت افزودنی اخیر را در کاهش میزان جذب آب بتن مشاهده کرد. کمترین میزان جذب آب در نمونه‌های حاوی سنگدانه‌ی سولفاته با افزودنی هیدروکسیدسدیم و مخصوصاً در نمونه‌ی ASH₂ اتفاق افتاده است که بیانگر نتایج مؤثر استفاده از هیدروکسیدسدیم در صورت وجود سنگدانه‌های سولفاته است که منجر به بهترین حالت و کاهش میزان جذب آب و افزایش دوام بتن می‌شود. در این محیط با افزایش سن نمونه در ۹۰ روز، میزان جذب آب مطابق انتظار بیشتر شده است. ذکر این نکته حائز اهمیت است که بتن خودمتراکم به دلیل وجود پودر سنگ، نسبت به انواع دیگر بتن، جذب آب بیشتری دارد، زیرا پودر سنگ، از نوع



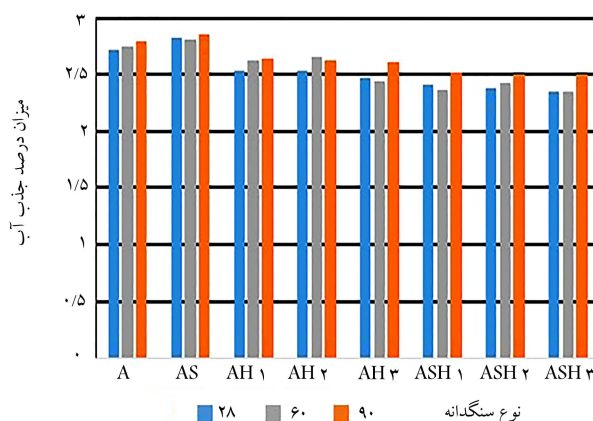
شکل ۱۰. نمودار میزان نفوذپذیری آب در محیط معمولی.



شکل ۸. نمودار میزان جذب آب در محیط معمولی.



شکل ۱۱. نمودار میزان نفوذپذیری آب در محیط سولفاتی.



شکل ۹. نمودار میزان جذب آب در محیط سولفاتی.

نسبت به محیط سولفاتی کمتر است. کمترین میزان نفوذپذیری در نمونه‌های حاوی سنگدانه‌ی سولفاته با افزودنی هیدروکسید سلنیم اتفاق افتاده است، که بیانگر آثار مثبت استفاده از هیدروکسید سلنیم در صورت وجود سنگدانه‌های سولفاته است. در محیط سولفاتی، سرعت نفوذ آب به نسبت محیط معمولی به‌طور قابل ملاحظه‌ی بیشتر است، به‌طوری‌که در نمونه‌ی AS به تنهایی بیشترین سرعت نفوذ آب مشاهده می‌شود، که بیشترین مقدار از نظر افزایش سرعت نفوذپذیری در بین تمامی نمونه‌هاست، و نشان از ناسازگاری سنگ‌دانه‌ی سولفاته بدون افزودنی هیدروکسید سلنیم در محیط سولفاتی است. همچنین کمترین سرعت نفوذ در محیط مذکور را نمونه‌ی $A_{S_2}H_3$ دارد.

۷.۳. نتایج نفوذ یون کلر نمونه‌ها در محیط‌های معمولی و سولفاتی

نتایج نفوذ یون کلر در بتن خودمتراکم با سنگدانه‌ی معمولی، سنگ‌دانه‌ی سولفاته، سنگ‌دانه‌ی معمولی با افزودنی هیدروکسید سلنیم با ۳ درصد متفاوت (۲٪، ۲/۵٪) و ۳٪) و همچنین سنگدانه‌ی سولفاته با افزودنی هیدروکسید سلنیم با ۳ درصد متفاوت (۲٪، ۲/۵٪، ۳٪) در محیط‌های معمولی و سولفاتی و در بازه‌ی زمانی ۹۰، ۶۰ و ۲۸ روزه در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌شود.

طبق نتایج به‌دست آمده، در محیط معمولی در صورت افزودن هیدروکسید سلنیم به نمونه‌های بتنی با سنگ‌دانه‌ی سولفاته، تغییرات مثبت نسبتاً چشم‌گیری مشاهده می‌شود و هر چقدر درصد هیدروکسید سلنیم افزایش یابد، مقدار نفوذ یون کلر کاهش می‌یابد. کمترین مقدار نفوذ یون کلر به درون مجموعه‌ی بتن‌های حاوی

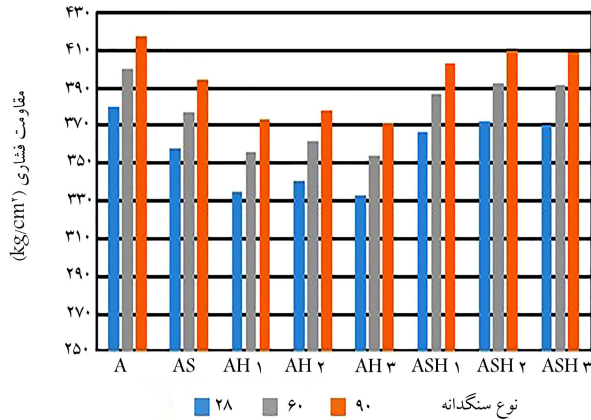
ریزدانه به حساب می‌آید و ریزدانه‌ها آب را بیشتر جذب می‌کنند که در نهایت منجر به کاهش دوام بتن می‌شود.

محیط سولفاتی با افزایش قابل ملاحظه‌ی میزان جذب آب در نمونه‌ها روبه‌رو شده است، به‌طوری‌که در مجموع، در نمونه‌ی $A_{S_2}H_3$ کمترین میزان جذب آب و در نمونه‌ی حاوی سنگدانه‌ی سولفاته بدون افزودنی هیدروکسید سلنیم (AS)، بیشترین میزان جذب آب مشاهده می‌شود که بدترین حالت از نظر بیشترین میزان جذب آب در بین تمامی نمونه‌هاست که نشان از ضعف سنگدانه‌ی سولفاته بدون افزودنی هیدروکسید سلنیم در محیط سولفاتی است. همچنین داده‌ها بیانگر این مطلب هستند که در محیط سولفاتی مانند محیط معمولی با افزایش سن بتن در ۹۰ روزه، میزان جذب آب نیز بیشتر شده است.

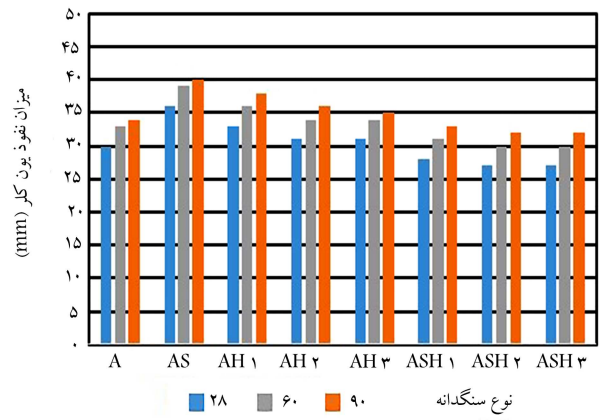
۶.۳. نتایج نفوذپذیری نمونه‌ها در محیط‌های معمولی و سولفاتی

نتایج نفوذپذیری آب در بتن خودمتراکم با سنگ‌دانه‌ی معمولی، سنگ‌دانه‌ی سولفاته، سنگدانه‌ی معمولی با افزودنی هیدروکسید سلنیم با ۳ درصد متفاوت (۲٪، ۲/۵٪ و ۳٪) و همچنین سنگدانه‌ی سولفاته با افزودنی هیدروکسید سلنیم با ۳ درصد متفاوت (۲٪، ۲/۵٪، ۳٪) در محیط‌های معمولی و سولفاتی و در بازه‌ی زمانی ۹۰، ۶۰ و ۲۸ روزه مطابق شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌شود.

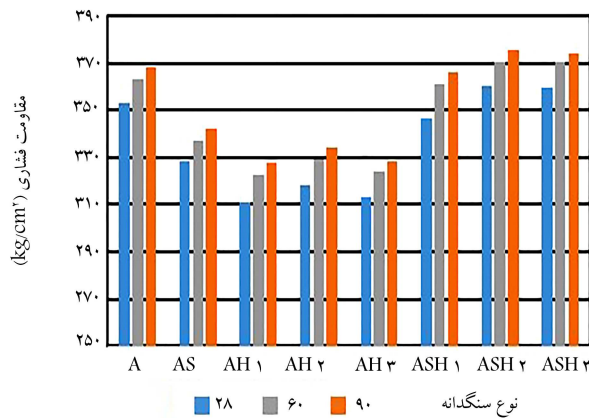
بر مبنای نتایج، در محیط معمولی با افزایش درصد هیدروکسید سلنیم در نمونه‌ها، سرعت نفوذ آب در بتن کاهش می‌یابد و سرعت نفوذپذیری آب در محیط معمولی



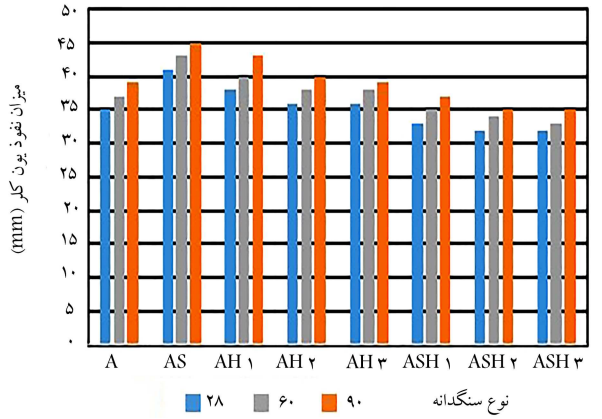
شکل ۱۴. نمودار آزمون ذوب و یخبندان در محیط معمولی.



شکل ۱۲. نمودار میزان نفوذ یون کلر در محیط معمولی.



شکل ۱۵. نمودار آزمون ذوب و یخبندان در محیط سولفاتی.



شکل ۱۳. نمودار میزان نفوذ یون کلر در محیط سولفاتی.

این موضوع علاوه بر محیط معمولی به وضوح در محیط سولفاته نیز مشاهده می شود. با این وجود، در محیط معمولی نمونه‌ی شاهد بیشترین مقاومت را در بین تمامی نمونه‌ها در ۲ محیط کسب کرده است.

۴. عکس‌های SEM

در شکل‌های (الف الی و) ۱۶، به ترتیب تصاویر SEM مربوط به سنگدانه‌های معمولی و سولفاته، در حالت خالص و با مقادیر ۲ و ۳ درصد پوشش هیدروکسیدسیدیم مشاهده می‌شوند. همچنین در شکل‌های (الف و ب) ۱۷ نیز به ترتیب عکس‌های میکروسکوپی بتن خودمترکم در محیط سولفاتی و با ۲ و ۳ درصد پوشش هیدروکسیدسیدیم مشاهده می‌شود.

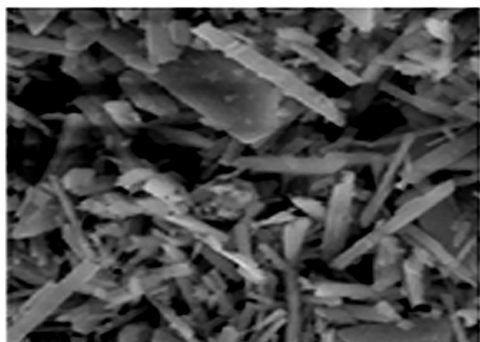
در عکس‌های SEM مربوط به سنگدانه‌ی سولفاته با افزودنی هیدروکسیدسیدیم، با افزایش مقدار افزودنی ضخامت سنگ‌دانه‌ها، که به صورت شکل‌های میله‌یی در تصویر مشاهده می‌شوند، بیشتر شده و قطر آن‌ها افزایش یافته است. در عکس‌های SEM مربوط به بتن در محیط سولفاته، با افزایش مقدار افزودنی، سطح صاف و تقریباً هموار نمونه‌ها به سطوح با پستی و بلندی تبدیل می‌شوند. بنابراین آثار محیط سولفاته و افزایش درصد افزودنی هیدروکسیدسیدیم در بتن، باعث ایجاد غشاء و یا پوسته‌ی اضافی بر روی سطوح می‌شود، که اعوجاج و ناهمواری سطوح را در پی دارد. همچنین از تصاویر ارائه شده می‌توان به تحلیل و بررسی میزان ترک‌های موجود در بتن و نحوه‌ی توزیع آن‌ها نیز پرداخت.

هیدروکسیدسیدیم مربوط به سنگدانه‌ی سولفاته بوده است. در محیط معمولی نسبت به محیط سولفاتی، میزان نفوذ یون کلر در نمونه‌ها کمتر است، که نشان از تخلخل بسیار کم و کیفیت بهتر نمونه‌هاست. در نمونه‌ی AS از محیط سولفاتی، بیشترین میزان نفوذ یون کلر نسبت به سایر نمونه‌ها در ۲ محیط و نیز ناسازگار بودن سنگدانه‌ی سولفاته بدون افزودنی هیدروکسیدسیدیم با محیط سولفاتی مشاهده می‌شود.

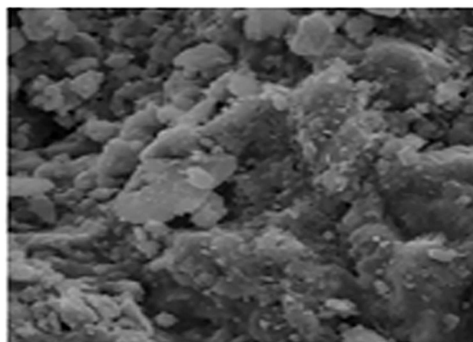
۸.۳. نتایج آزمون ذوب و یخبندان نمونه‌ها در محیط‌های معمولی و سولفاتی

نتایج آزمون ذوب و یخبندان در بتن خودمترکم با سنگ‌دانه معمولی، سنگدانه‌ی سولفاته، سنگ‌دانه‌ی معمولی با افزودنی هیدروکسیدسیدیم با ۳ درصد تفاوت (۲٪)، ۲/۵٪ و ۳٪ و همچنین سنگدانه‌ی سولفاته با افزودنی هیدروکسیدسیدیم با ۳ درصد تفاوت (۲٪، ۲/۵٪ و ۳٪) در محیط معمولی و سولفاتی و در بازه‌ی زمانی ۹۰، ۶۰ و ۲۸ روزه در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ مشاهده می‌شود.

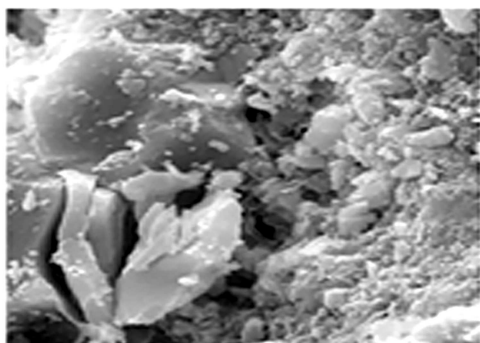
با توجه به اعداد ارائه شده، در محیط معمولی با افزودن هیدروکسیدسیدیم به نمونه‌های بتنی با سنگ‌دانه‌ی معمولی (نمونه‌های سوم تا پنجم) در مقایسه با نمونه‌ی شاهد، کاهش نسبتاً زیاد مقاومت فشاری ایجاد شده است. به نحوی که حتی مقاومت نمونه‌ها از مقاومت AS نیز کمتر شده است. در صورتی که مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی سنگدانه‌ی سولفاته با هیدروکسیدسیدیم افزایش محسوسی داشته است که بیانگر آثار مثبت هیدروکسیدسیدیم در حضور سنگدانه‌ی سولفاته است، که



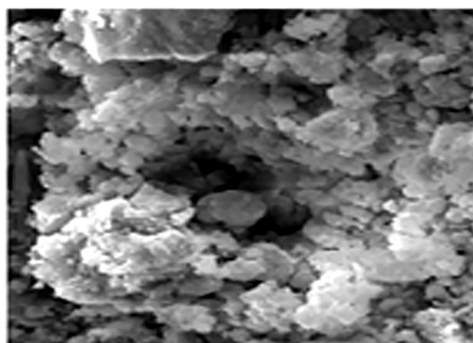
(ب) تصویر SEM سنگدانه سولفاته؛



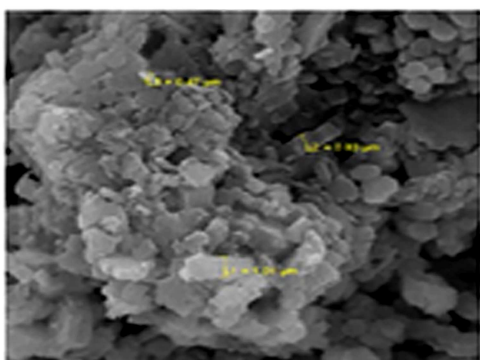
(الف) تصویر SEM سنگدانه معمولی؛



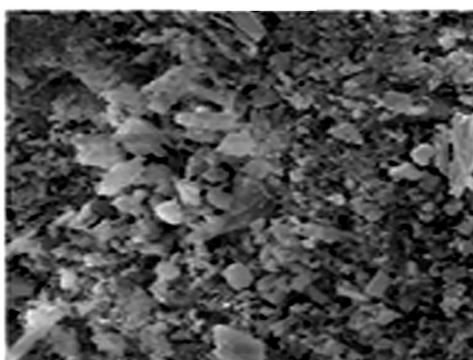
(د) تصویر SEM سنگدانه معمولی با پوشش ۳ درصد هیدروکسید سدیم؛



(ج) تصویر SEM سنگدانه معمولی با پوشش ۲ درصد هیدروکسید سدیم؛

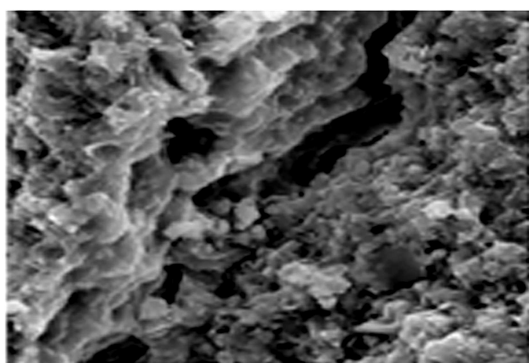


(و) تصویر SEM سنگدانه سولفاته با پوشش ۳ درصد هیدروکسید سدیم.

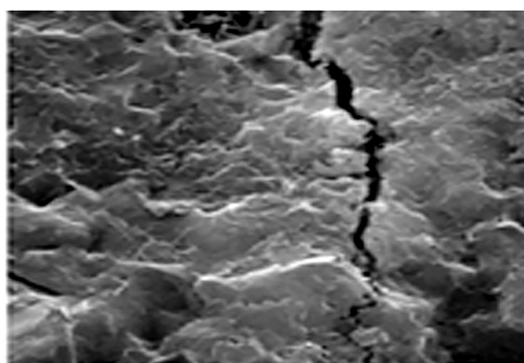


(ه) تصویر SEM سنگدانه سولفاته با پوشش ۲ درصد هیدروکسید سدیم؛

شکل ۱۶. تصویر SEM سنگ دانه ها.

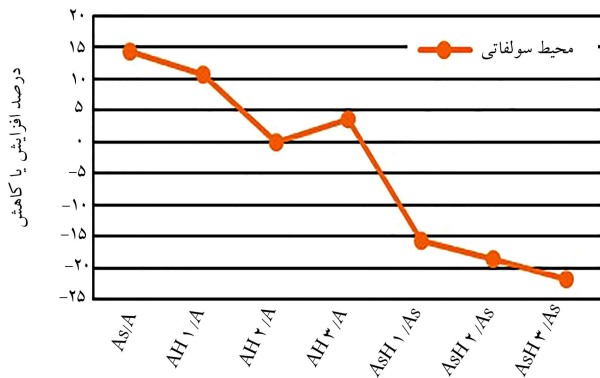


(ب) تصویر SEM بتن خود متراکم در محیط سولفاتی، ASH.

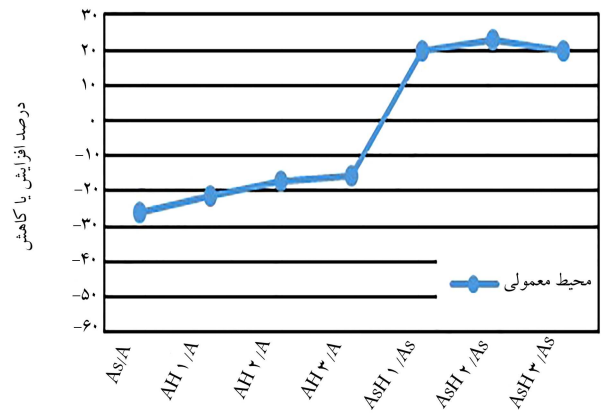


(الف) تصویر SEM بتن خود متراکم در محیط سولفاتی، ASH؛

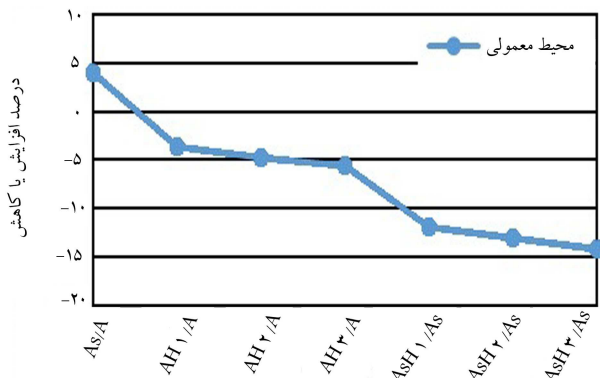
شکل ۱۷. تصویر SEM سنگ دانه ها در بتن خود متراکم.



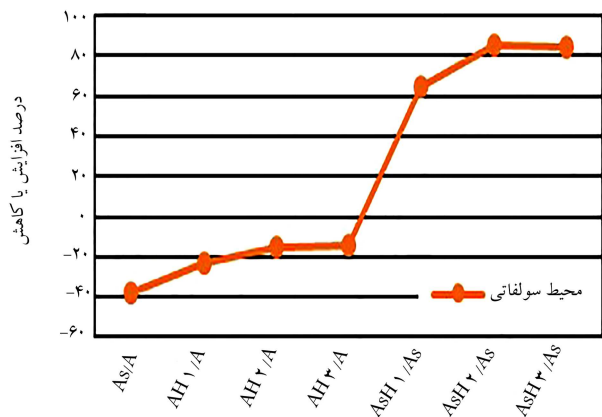
شکل ۲۱. مقایسه‌ی نتایج نفوذپذیری نمونه‌های ۲۸ روزه در محیط سولفاتی نسبت به نمونه‌ی مرجع (%).



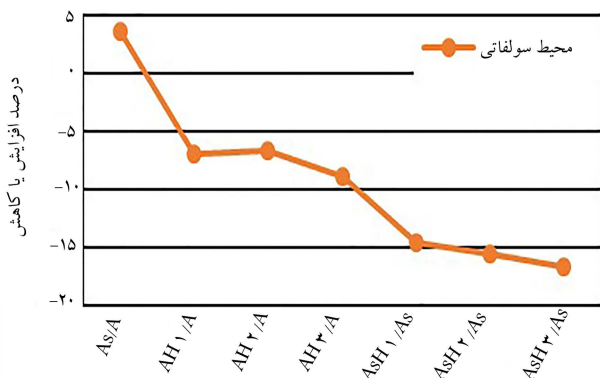
شکل ۱۸. مقایسه‌ی نتایج مقاومت کششی نمونه‌های ۲۸ روزه در محیط معمولی نسبت به نمونه‌ی مرجع (%).



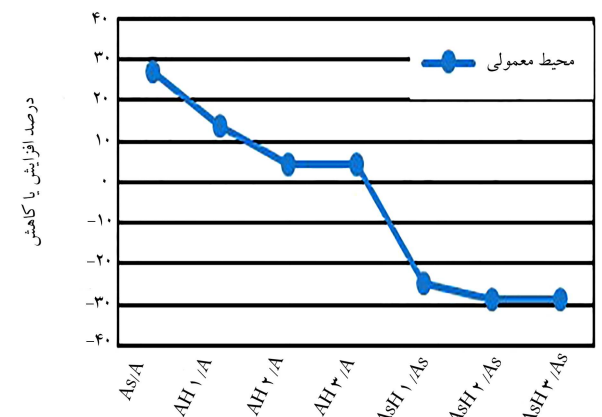
شکل ۲۲. مقایسه‌ی نتایج جذب آب نمونه‌های ۲۸ روزه در محیط معمولی نسبت به نمونه‌ی مرجع (%).



شکل ۱۹. مقایسه‌ی نتایج مقاومت کششی نمونه‌های ۲۸ روزه در محیط سولفاتی نسبت به نمونه‌ی مرجع (%).



شکل ۲۳. مقایسه‌ی نتایج جذب آب نمونه‌های ۲۸ روزه در محیط سولفاتی نسبت به نمونه‌ی مرجع (%).



شکل ۲۰. مقایسه‌ی نتایج نفوذپذیری نمونه‌های ۲۸ روزه در محیط معمولی نسبت به نمونه‌ی مرجع (%).

به این موارد اشاره کرد:

- در محیط معمولی، نمونه‌ی شاهد بیشترین مقاومت فشاری را به خصوص در سن ۹۰ روز کسب کرده است. افزودن هیدروکسیدسدیم به نمونه‌ی شاهد باعث کاهش مقاومت فشاری بتن خودتراکم شده و در بهترین حالت در سن ۲۸ روز، در نمونه‌ی حاوی سنگ‌دانه‌ی سولفات با افزودنی هیدروکسیدسدیم (نمونه‌ی AsH_2)، با ضعف (۱/۹۷۴٪) مقاومت فشاری در مقایسه با نمونه‌ی شاهد مواجه شده است. این نتیجه نشان می‌دهد که هیدروکسیدسدیم در وجود سولفات‌ها واکنش مثبت از خود نشان می‌دهد.

۵. تجزیه و تحلیل یافته‌های پژوهش

شکل‌های ۱۸ الی ۲۳ و جدول‌های ۸ الی ۱۰، مقادیر نمونه‌هایی از مقایسه‌ی نتایج خروجی آزمایش‌های مقاومت کششی، نفوذپذیری و جذب آب بتن در محیط‌های معمولی و سولفاتی است. از مقایسه‌ی نمودارها و جدول‌ها می‌توان به صورت خلاصه

جدول ۸. مقایسه‌ی درصد افزایش یا کاهش مقاومت کششی نمونه‌های ۲۸ روزه در محیط‌های معمولی و سولفاتی نسبت به نمونه‌ی مرجع (%).

$A_s H_7 / A_s$	$A_s H_7 / A_s$	$A_s H_1 / A_s$	AH_7 / A	AH_7 / A	AH_1 / A	A_s / A	
۱۹/۹۳	۲۲/۹۴	۱۹/۹۷	-۱۵/۷۴	-۱۷/۲۰	-۲۱/۱۷	-۲۶/۰۸	محیط معمولی
۸۴/۱۵	۸۴/۸۲	۶۴/۹۵	-۱۴/۱۵	-۱۵/۴۱	-۲۳/۲۹	-۳۷/۶۳	محیط سولفاتی

جدول ۹. مقایسه‌ی درصد افزایش یا کاهش نفوذپذیری نمونه‌های ۲۸ روزه در محیط‌های معمولی و سولفاتی نسبت به نمونه‌ی مرجع (%).

$A_s H_7 / A_s$	$A_s H_7 / A_s$	$A_s H_1 / A_s$	AH_7 / A	AH_7 / A	AH_1 / A	A_s / A	
-۲۸/۵۷	-۲۸/۵۷	-۲۵/۰۰	۴/۵۴	۴/۵۴	۱۳/۶۴	۲۷/۲۷	محیط معمولی
-۲۱/۸۷	-۱۸/۷۵	-۱۵/۶۳	۳/۵۷	۰/۰۰	۱۰/۷۱	۱۴/۲۹	محیط سولفاتی

جدول ۱۰. مقایسه‌ی درصد افزایش یا کاهش جذب آب نمونه‌های ۲۸ روزه در محیط‌های معمولی و سولفاتی نسبت به نمونه‌ی مرجع (%).

$A_s H_7 / A_s$	$A_s H_7 / A_s$	$A_s H_1 / A_s$	AH_7 / A	AH_7 / A	AH_1 / A	A_s / A	
-۱۴/۱۲	-۱۲/۹۸	-۱۱/۸۳	-۵/۵۶	-۴/۷۶	-۳/۵۷	۳/۹۷	محیط معمولی
-۱۶/۶۷	-۱۵/۶۰	-۱۴/۵۴	-۸/۸۲	-۶/۶۲	۶/۹۹	۳/۶۸	محیط سولفاتی

۶. نتیجه‌گیری

با توجه به مرور مطالعات پیشین و تمرکز انجام شده بر موضوعات مشابه، در مطالعه‌ی حاضر از سنگدانه‌های سولفاته در بتن خودمتراکم استفاده شده است، که با توجه به آن خواص مکانیکی و دوام بتن خودمتراکم ساخته شده در محیط‌های سولفاتی بررسی شده است. این موارد به تفکیک از نتیجه‌ی پژوهش حاضر به دست آمده است:

۱. بررسی یافته‌های پژوهش، نشان‌دهنده‌ی این مسئله است که هیدروکسیدسیدیم به تنهایی توانایی جبران افت و کاهش مقاومت مکانیکی و دوام بتن خودمتراکم را ندارد و افزودنی هیدروکسیدسیدیم در صورت وجود سنگدانه‌های سولفاته، نتایج مثبت و مؤثر از خود نشان می‌دهد.
 ۲. همچنین نتایج بررسی نشان داد بتن خودمتراکم با سنگدانه‌ی معمولی بدون افزودنی هیدروکسیدسیدیم (نمونه‌ی شاهد)، بیشترین قابلیت روانی، خاصیت پُرکنندگی بالا، قابلیت گذردهی بالا و همچنین بالاترین پایداری، یکنواختی، و کیفیت را دارد.
 ۳. با افزودن هیدروکسیدسیدیم به نمونه‌های با سنگدانه‌ی معمولی و به خصوص نمونه‌های حاوی سنگدانه‌ی سولفاته، به دلیل آنکه هیدروکسیدسیدیم با تشکیل لایه و غشایی به دور سنگدانه‌ها، مانع از اثرگذاری کامل فوق روان‌کننده در سنگدانه‌ها در بتن خودمتراکم می‌شود، خواص رئولوژی بتن کاهش یافته است.
- بنابراین در مجموع، بتن با سنگدانه‌ی معمولی بدون افزودنی هیدروکسیدسیدیم (نمونه‌ی A)، در بین تمامی نمونه‌ها بهترین خواص رئولوژی و کارایی را دارد، در صورتی که بتن خودمتراکم با سنگدانه‌ی سولفاته و افزودنی هیدروکسیدسیدیم و مخصوصاً (نمونه‌ی AsH_7)، کمترین میزان کارایی را دارد.

- در محیط سولفاتی، بتن با کاهش نسبتاً محسوس مقاومت فشاری مواجه شده است، به صورتی که مقاومت فشاری نمونه‌ی شاهد نسبت به محیط معمولی در سن ۹۰ روز، از $435/12$ به $384/36$ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع کاهش پیدا کرده ($11/666\%$) و کاهش مقاومت داشته است. همچنین در محیط سولفاتی و در همان سن، بیشترین مقاومت فشاری را نمونه‌ی AsH_7 کسب کرده است که نسبت به نمونه‌ی شاهد، ($2/407\%$) افزایش مقاومت داشته است.
- در محیط سولفاتی، مقاومت نمونه‌ی شاهد پس از گذراندن سیکل ذوب و یخبندان نسبت به نمونه‌ی شاهد در محیط معمولی در سن ۹۰ روز، ($11/770\%$) کاهش یافته و بیشترین مقاومت فشاری در محیط سولفاتی را نمونه‌ی AsH_7 کسب کرده است، که در سن ۲۸ روز نسبت به نمونه‌ی شاهد در محیط سولفاتی، ($2/240\%$) افزایش مقاومت داشته است.
- در محیط معمولی افزودن هیدروکسیدسیدیم به نمونه‌های حاوی سنگدانه‌ی سولفاته، باعث کاهش سرعت نفوذ آب در بتن خودمتراکم شده و کمترین سرعت نفوذ آب در محیط معمولی، در نمونه‌ی AsH_7 بوده است که در سن ۹۰ روز نسبت به نمونه‌ی شاهد سرعت نفوذ آب در بتن (12%) کاهش یافته است. همچنین، بیشترین سرعت نفوذ آب در بتن در نمونه‌ی As مشاهده می‌شود که در سن ۲۸ روز، نسبت به نمونه‌ی شاهد، ($27/273\%$) افزایش داشته است.
- در محیط سولفاتی، سرعت نفوذ آب در نمونه‌ها افزایش یافته است، که به‌وضوح در نتایج مشاهده می‌شود. در محیط سولفاتی، سرعت نفوذ آب در As در سن ۹۰ روز نسبت به نمونه‌ی شاهد، ($18/182\%$) افزایش داشته و بدترین حالت از نظر افزایش سرعت نفوذ آب در نمونه‌ی بتنی به حساب می‌آید. همچنین کمترین سرعت نفوذ آب در بتن واقع در محیط سولفاته متعلق به نمونه‌ی AsH_7 است که مقدار آن در سن ۹۰ روز، نسبت به ($23/77\%$) As کاهش یافته است که بیانگر تأثیر افزودنی هیدروکسیدسیدیم در کاهش نفوذپذیری است.

پانوشت‌ها

1. Chen
2. Wang
3. Tennich

منابع (References)

1. Swamy, R. and Al-Asali, M. "Engineering properties of concrete affected by alkali-silica reaction", *Materials Journal*, **85**(5), pp. 367-374 (1988).
2. Fan, S. and Hanson, J.M. "Effect of alkali silica reaction expansion and cracking on structural behavior of reinforced concrete beams", *ACI Structural Journal*, **95**(5), pp. 498-505 (1998).
3. Liu, P., Chen, Y., Wang, W. and et al. "Effect of physical and chemical sulfate attack on performance degradation of concrete under different conditions", *Chemical Physics Letters*, **745**(4) pp. 137254 (2020).
4. Chen, Y., Liu, P., Zhang, R. and et al. "Chemical kinetic analysis of the activation energy of diffusion coefficient of sulfate ion in concrete", *Chemical Physics Letters*, 137596 (2020).
5. Wang, Z., Zhao, K., Li, Z. and et al. "Experimental study on durability and mechanical properties of basalt fiber reinforced concrete under sodium sulfate erosion", *Chemical Engineering Transactions*, **62**, pp. 961-966 (2017).
6. Chiker, T., Aggoun, S., Houari, H. and et al. "Sodium sulfate and alternative combined sulfate/chloride action on ordinary and self-consolidating PLC-based concretes", *Construction and Building Materials*, **106**, pp. 342-348 (2016).
7. Chen, Y., Gao, J., Tang, L. and et al. "Resistance of concrete against combined attack of chloride and sulfate under drying-wetting cycles", *Construction and Building Materials*, **106**, pp. 650-658 (2016).
8. Ranjbar, N., Behnia, A., Alsubari, B. and et al. "Durability and mechanical properties of self-compacting concrete incorporating palm oil fuel ash", *Journal of Cleaner Production*, **112**(part 1), pp. 723-730 (2016).
9. Lin, W.-T. "Effects of sand/aggregate ratio on strength, durability, and microstructure of self-compacting concrete", *Construction and Building Materials*, **242**, pp.1-14 (2020).
10. Al-Attar, T.S. and Taha, A.A. "Performance of high-volume fly ash self compacting concrete exposed to external sulfate attack," *Sixth International Conference on the Durability of Concrete Structures*, University of Leeds, United Kingdom, pp. 502(viii)-502(xiii), (2018).
11. Kumar, S. and Rai, B. "Pulse velocity-strength and elasticity relationship of high volume fly ash induced self-compacting concrete", *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, **4**(4), pp. 216-229 (2019).
12. Sah, G., Yadav, G.S. and Jaggi, S. "Effect of using different mineral admixtures On Self-Compacting Concrete: A Review", *Our Heritage*, **67**(7), pp. 156-160 (2019).
13. Tennich, M., Ouedzou, M.B. and Kallel, A. "Behavior of self-compacting concrete made with marble and tile wastes exposed to external sulfate attack", *Construction and Building Materials*, **135**, pp. 335-342 (2017).
14. Sideris, K.K., Tassos, C., Chatzopoulos, A. and et al. "Mechanical characteristics and durability of self compacting concretes produced with ladle furnace slag", *Construction and Building Materials*, **170**, pp. 660-667 (2018).
15. Esquinas, A., Alvarez, J., Jimenez, J. and et al. "Durability of self-compacting concrete made from non-conforming fly ash from coal-fired power plants", *Construction and Building Materials*, **189**, pp. 993-1006 (2018).
16. Ristic, N., Grdic, Z., Curcic, G.T. and et al. "Properties of self-compacting concrete produced with waste materials as mineral admixture", *Revista Romana de Materiale*, **49**(4), pp. 568-580 (2019).
17. ASTM C39/C39 M-12, "Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens", American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania (2012).
18. ASTM C496, "Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens", ASTM International, West Conshohocken, PA, pp. 469-490 (2011).
19. ASTM C293, "Standard test method for flexural strength of Concrete (using simple beam with center-point loading)", American Society for Testing and Materials, 100, pp. 19428-2959 (2010).
20. ASTM C666/C 666 M-03, "Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing", *ASTM international*, West Conshohocken, PA, **04** (2015). www.astm.org.
21. ASTM C803/C803M-03, "Standard test method for penetration resistance of hardened concrete", American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, USA (2003).
22. ASTM C642-13, "Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete", West Conshohocken, PA: ASTM International (2013).
23. ASTM C1611/C 1611 M-14, "Standard test method for slump flow of self-consolidating concrete", American Society for Testing and Materials, Washington, DC (2014).
24. BS. EN, 12350-10, "Testing fresh concrete, Self-compacting concrete", L Box test, BSI (2010).
25. EFNARC, "The European guidelines for self-compacting concrete", The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems (2002).
26. BS. EN, 12350-9, "Testing fresh concrete Self-compacting concrete", V funnel test, BSI (2010).

27. AASHTO. TP64, 03, "Standard method of test for predicting chloride penetration of hydraulic cement concrete by the rapid migration procedure", American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC (2003).
28. ASTM C430, "Standard test method for fineness of hydraulic Cement by the 45-Mm (No. 325) sieve", ed: West Conshohocken, PA, ASTM International (2003).
29. ASTM C192, "Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory", ASTM International, West Conshohocken (2006).