

بررسی عملکرد بتن توانمند حاوی پوزولان در برابر حمله سولفوریک اسید

علی اکبر رضانیانپور^{۱*}، آرش ذوالفقارنسب^۱، فرناز بهمن زاده^۱، امیرمحمد رضانیانپور^۲

^۱ دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

^۲ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۳ اسفند ۱۳۹۴

بازنگری: ۹ خرداد ۱۳۹۵

پذیرش: ۱۰ خرداد ۱۳۹۵

ارائه آنلاین: ۱۶ شهریور ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

بتن توانمند
حمله سولفوریک اسید
دوام بتن
نفوذپذیری بتن
مواد جایگزین سیمان

چکیده: بتن به عنوان پرمصرفترین مصالح ساختمانی، ماهیتی قلیایی و آسیب پذیر در برابر حمله مواد شیمیایی اسیدی دارد. از این رو بررسی عوامل تأثیر گذار بر حمله انواع اسیدها به بتن های با شرایط ساختاری متفاوت، از اهمیت به سزایی برخوردار است. لذا در این تحقیق بتن هایی با دو نسبت آب به مواد سیمانی برابر با ۰/۳۲ (تحت عنوان بتن های توانمند) و ۰/۴ (تحت عنوان بتن های معمولی) توسط سیمان پرتلند و با جایگزینی سرباره کوره آهن گدازی و پوزولان طبیعی تهیه شده و عملکرد این بتن ها در محیط حاوی سولفوریک اسید با pH برابر با ۱ مقایسه شده است. در این راستا آزمایش های مقاومت فشاری، اندازه گیری سرعت امواج التراسونیک، مقاومت الکتریکی سطحی و جذب آب موئینه جهت ارزیابی کیفیت بتن از لحاظ مشخصات مکانیکی و نفوذپذیری و آزمایش های کاهش وزن، افت مقاومت فشاری، تغییر طول نمونه های ملات و تغییر سرعت امواج اولتراسونیک به منظور بررسی عملکرد نمونه های بتنی در برابر حمله سولفوریک اسید در نظر گرفته شده اند. نتایج کلی حاکی از بهبود عملکرد بتن های حاوی مواد جایگزین سیمان با افزایش مقدار جایگزینی این مواد به جای سیمان می باشد. هم چنین، بتن های توانمند علی رغم نفوذپذیری کمتر، در برابر حمله سولفوریک اسید آسیب پذیرتر از بتن های معمولی هستند. ضمناً روش اندازه گیری تغییرات سرعت امواج التراسونیک جهت ارزیابی خرابی ناشی از حمله سولفوریک اسید نیز همراه با خطای زیاد بوده و استفاده از این آزمایش برای بررسی شدت خوردگی نمونه های بتنی توصیه نمی شود.

۱- مقدمه

در میانه دهه ۶۰ میلادی بتن به عنوان ماده ای اقتصادی و ایمن جهت ساخت سازه های کم ارتفاع شناخته می شد و مقاومت فشاری ۱۵ تا ۲۰ MPa برای سازندگان مناسب به نظر می رسید. استفاده های محدود بتن در بلندمرتبه سازی مانند استفاده در پی ها، سقف ها و حفاظت مقاطع فولادی در برابر حریق تصور اینکه روزی بتن جایگزین فولاد در بلندمرتبه سازی گردد را غیرممکن ساخته بود. همکاری طراحان و نوآوری سازندگان بتن، سبب پدید آمدن اولین نسل از "بتن های پرمقاومت" در دهه ۷۰ میلادی گردید. لازم به ذکر است با توجه به شرایط زمانی، ساخت بتنی با مقاومت فشاری ۳۰ MPa چالشی بزرگ به کار می رفت. در آن زمان با بکارگیری بتن های با مقاومت بالاتر از حد معمول در ساختمان ها بلندمرتبه، اصطلاح "بتن پرمقاومت" جهت معرفی این نوع بتن به کار گرفته شد. با توجه به استانداردهای امروز پیشرفت های حاصل در آن زمان تنها در راستای بهبود بتن معمولی به شمار رفته و تکنولوژی به کار رفته همان تکنولوژی ساخت بتن معمولی بود. در واقع با انتخاب مناسب مصالح و کنترل کیفیت مراحل

ساخت و اجرا، مقاومت فشاری بتن افزایش یافته بود و استفاده از مواد افزودنی کاهنده آب در راستای کاهش میزان نسبت آب به مواد سیمانی نبوده و فقط نقش روان کنندگی و افزایش کارایی از این مواد انتظار می رفت [۱]. با پیشرفت در کیفیت ساخت مواد افزودنی کاهنده آب و ابداع نسل های جدید این مواد تحت عنوان مواد فوق روان کننده^۲ یا کاهنده آب قوی^۳ استفاده از این مواد با رویکرد نوینی صورت گرفت. بکارگیری فوق روان کننده ها به عنوان عاملی جهت کاهش نسبت آب به سیمان می تواند موجب افزایش مقاومت فشاری بتن در کنار افزایش مدول الاستیسیته، افزایش مقاومت خمشی، کاهش نفوذپذیری و بهبود دوام بتن گردد. در نتیجه عبارت بتن پرمقاومت بیانگر تمامی پیشرفت ها در خصوص این بتن نوین نبوده و عبارت "بتن توانمند"^۴ مورد استقبال بیشتری قرار گرفت. لازم به ذکر است مفهوم توانمندی به دلیل دامنه تعریفی فراوان، همواره زمینه مناقشه بین محققین قرار گرفته است [۱].

با گسترش استفاده از بتن توانمند، بسته به زمان اجرای کار و محل پروژه مربوطه، تعریف های متعددی از بتن توانمند توسط سازمان ها و موسسات

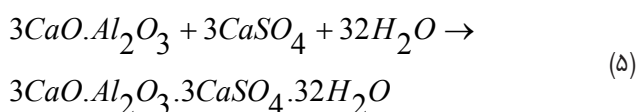
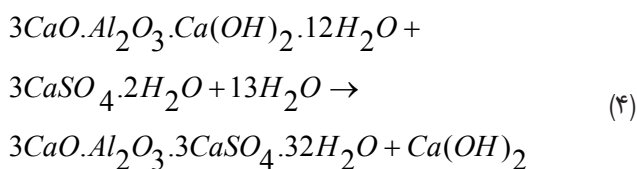
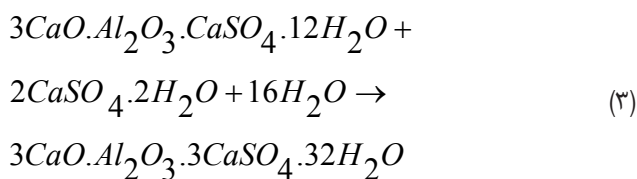
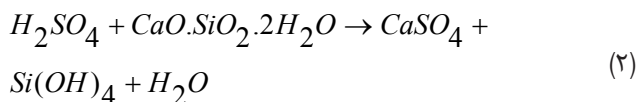
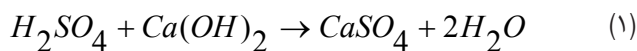
2 Superplasticizers
3 High-range water reducers
4 High Performance Concrete (HPC)

*نویسنده عهده دار مکاتبات: aaramce@aut.ac.ir

1 High Strength Concrete

به دلیل تفاوت ماهیت آنیون موجود در سولفوریک اسید (یون سولفات) مکانیزم خرابی بر اثر حمله این نوع اسید با سایر اسیدها متفاوت است. از سوی دیگر سازه‌های بتنی مهمی نظیر لوله‌های فاضلاب، تاسیسات تصفیه آب و فاضلاب، تاسیسات واحدهای تولید سولفوریک اسید در پتروشیمی‌ها و غیره با خوردگی ناشی از حمله سولفوریک اسید مواجه‌اند. در نتیجه بررسی جداگانه خرابی ناشی از واکنش سولفوریک اسید با اجزای بتن و عواقب آن امری اجتناب ناپذیر در راستای دستیابی به سازه‌های پایدار و با دوام مناسب می‌باشد.

واکنش سولفوریک اسید با اجزای خمیر سیمان هیدراته شده در روابط ۱ و ۲ آورده شده است. در ادامه این واکنش‌ها، نمک حاصل از واکنش اسید با هیدروکسید کلسیم، سولفات کلسیم (ژپس یا گچ)، با کلسیم آلومینوسولفات‌های هیدراته یا اجزای آلومیناتی هیدراته نشده (C_3A) موجود در خمیر سخت‌شده وارد واکنش شده و اترینگایت تولید می‌کند (واکنش‌های مذکور در روابط ۳ تا ۵ این واکنش‌ها تحت عنوان حمله سولفاتی مورد بررسی قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است واکنش‌های تولید اترینگایت با افزایش حجم همراه بوده و بر اثر تنش داخلی ناشی از این افزایش حجم، در بتن ریزترک و یا حتی ترک‌های بزرگی پدید آمده و خرابی ناشی از حمله سولفوریک اسید تشدید می‌گردد ([۷ و ۹]).



بیان شد. تعریف بتن توانمند کاملاً نسبی بوده و تعریف دقیقی به اجماع محققین نرسیده است. در هر صورت شاید بتوان وجه مشترک تمامی این تعریف‌ها را عبارت "بتن دارای نسبت آب به سیمان کم" دانست که بر اساس آن بتن‌های دارای نسبت آب به سیمان برابر ۰/۴ یا کمتر با خواص مهندسی شاخص در رده بتن‌های توانمند قرار می‌گیرند. هم‌چنین مقاومت فشاری زیاد و دوام مطلوب در شرایط محیطی مشخص را می‌توان از مشخصه‌های اصلی این نوع بتن دانست [۱-۵].

در بتن توانمند خمیر سیمان سخت شده، سنگدانه‌ها و ناحیه انتقالی بین خمیر سیمان و سنگدانه در حالت بهینه و تا حدنهایی عملکرد خود مورد استفاده قرار می‌گیرند. در نتیجه توجه دقیق به تمامی مراحل ساخت بتن اعم از انتخاب مصالح، تعیین نسبت‌های اختلاط، ساخت بتن و اجرای آن در محل امری اجتناب ناپذیر به‌شمار می‌رود.

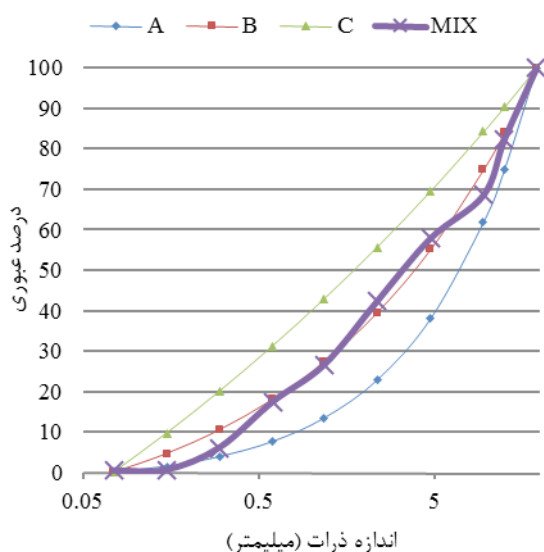
بتن به عنوان پر مصرف‌ترین مصالح ساختمانی بشر، ماده‌ای زوال ناپذیر نبوده و در مقیاس ژئولوژیکی از زمان ناپایدار به‌شمار می‌رود. لذا در هر بتنی طی زمان ترکیبات کلسیم، سیلیسیم، آهن و آلومینیوم به کار رفته در ساختار آن به ترکیبات پایداری نظیر سنگ آهک، رس و ماسه سیلیسی تجزیه می‌شوند. از این رو مهندسان با بهره‌گیری از بتن‌های بادوام برآنند که عمر مفید سازه‌ها را افزایش داده و هزینه‌های ترمیم و تعمیر را در چرخه حیات سازه به حداقل برسانند [۶]. استفاده روزافزون بتن توانمند در ساخت سازه‌ها و تاسیسات زیربنایی، نیاز به بررسی دوام این ماده ساختمانی در محیط‌های آسیب‌رسان را جهت نیل به اهداف فوق امری اجتناب ناپذیر ساخته و تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه انجام گرفته‌است. در این راستا بررسی عملکرد بتن در محیط‌های اسیدی، با توجه به محیط قلیایی بتن، جهت شناخت عوامل بهبود و یا ضعف دوام بتن در این محیط‌های آسیب رسان الزامی است.

در بتن با درجه هیدراسیون بالا، هیدرات‌های کلسیم با انحلال پذیری کم، در محیط قلیایی بتن حالتی پایدار دارند. pH محلول حفره‌ای بتن در حالت معمول، با توجه به غلظت یون‌های K^+ ، Na^+ و OH^- ، مقداری بین ۱۲/۵ تا ۱۳/۵ دارد. در این حالت ترکیبات ناشی از هیدراسیون سیمان، با محلول حفره‌ای در تعادل شیمیایی قرار داشته و هرگونه تغییری در راستای برهم زدن این تعادل منجر به ناپایداری این ترکیبات می‌گردد. لذا بصورت تئوری pH کمتر از ۱۲/۵ موجب عدم پایداری ترکیبات ناشی از هیدراسیون می‌شود. با توجه به این موضوع، اکثر آب‌های موجود در طبیعت و فاضلاب‌های صنعتی و شهری عواملی آسیب‌رسان به بتن به‌شمار می‌روند. البته نرخ وقوع خرابی به pH و نفوذپذیری بتن بسیار وابسته است بطوریکه در یک بتن با نفوذپذیری کم و pH بالای ۶، سرعت وقوع خرابی ناچیز می‌باشد [۷ و ۸]. از طرفی با کاهش غلظت یون Ca^{2+} در محلول حفره‌ای، تعادل شیمیایی بین محلول و خمیر سخت شده به سمت تجزیه ترکیبات هیدراسیون تمایل پیدا کرده و در درجه اول هیدروکسید کلسیم و پس از آن ژل C-S-H شروع به تجزیه می‌کند [۹].

جدول ۱: مشخصات مصالح سنگی

Table 1. Aggregates properties

مشخصات	شن	ماسه
درصد جذب آب	۲/۳۹	۲/۸۹
چگالی در حالت SSD (kg/m^3)	۲۵۵۰	۲۵۶۰
حداکثر اندازه سنگدانه (mm)	۱۲/۵	۴/۷۵
شکستگی مصالح	شکسته	رودخانه‌ای
نسبت وزنی مورد استفاده	٪۴۰	٪۶۰



شکل ۱: نمودار دانه بندی مصالح سنگی

Fig. 1. Aggregates grading diagram

همچنین از سیمان پرتلند نوع ۴۲۵-۱ به همراه سرباره کوره آهن گدازی و پوزولان طبیعی به عنوان مواد جایگزین سیمان در ساخت طرح‌های اختلاط بهره گرفته شده است. آنالیز شیمیایی، مشخصات فیزیکی مواد سیمانی و نیز میزان فعالیت پوزولانی مواد جایگزین سیمان بر اساس استانداردهای ASTM C989 [۲۶] و ASTM C618 [۲۷] به ترتیب در جداول ۲، ۳ و ۴ آورده شده اند. شکل ۲ توزیع اندازه ذرات مواد سیمانی و شکل ۳ آنالیز XRD را نمایش می‌دهد. براساس این آزمایش مقدار ماده شیشه‌ای در سرباره کوره آهن گدازی و پوزولان طبیعی به ترتیب برابر ۹۷ و ۹۲ درصد می‌باشد.

همچنین ماده افزودنی فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات اثر اصلاح شده مطابق مشخصات افزودنی نوع G استاندارد ASTM C494 [۲۸] در ساخت بتن‌ها مورد استفاده قرار گرفته شده است.

با توجه به شدت خرابی‌های احتمالی در سازه‌های مورد تهاجم سولفوریک اسید، بررسی‌های گسترده در راستای بهبود دوام بتن در محیط‌های آسیب رسان حاوی این عامل اسیدی انجام پذیرفته است. در این رابطه، به دلیل آسیب پذیری مواد ناشی از هیدراتاسیون سیمان نظیر کریستال‌های آهک و ژل C-S-H در برابر حمله سولفوریک اسید، استفاده هرچه کمتر از مواد سیمانی توسط محققین توصیه شده است [۱۰-۱۴]. از سوی دیگر، با توجه به ماهیت واکنش‌های پوزولانی، استفاده از مواد جایگزین سیمان موجب کاهش میزان آهک و نیز بهبود نفوذپذیری بتن می‌گردد [۱۵ و ۱۶]. از این رو طبق نتایج بدست آمده در پژوهش‌های صورت گرفته، استفاده از مواد جایگزین سیمان نظیر پوزولان‌های طبیعی و سرباره کوره آهن گدازی سبب بهبود دوام بتن در محیط‌های حاوی سولفوریک اسید می‌شود [۱۰ و ۲۰-۱۷]. در این میان برخی محققین اثر استفاده از مواد جایگزین سیمان را بر دوام بتن منفی ارزیابی کرده‌اند [۹ و ۲۰]. مشخصات فیزیکی، ترکیبات شیمیایی تشکیل دهنده، ریزی و فعالیت پوزولانی مواد جایگزین سیمان در کنار شرایط آزمایش‌های انجام شده می‌توانند عوامل تاثیر گذار بر وقوع چنین تضادی در نتایج تحقیقات به شمار روند.

علاوه بر ملاحظات شرح داده شده، استفاده از مواد پلیمری [۲۱ و ۲۲]. و نیز بهره بردن از سنگدانه‌های مقاوم در برابر حمله اسیدی نظیر سنگدانه‌های سیلیسی به جای سنگدانه‌های آهکی [۱۰ و ۲۳]. راهکارهای مناسبی برای افزایش مقاومت بتن در برابر حمله اسیدی به شمار می‌روند. لازم به ذکر است، اثر خنثی کنندگی سنگدانه‌های آهکی در برخی موارد علت اصلی مشاهده نتایج مثبت استفاده از این مصالح در مقایسه با مصالح سنگی سیلیسی گزارش شده است [۱۰ و ۲۴].

با توجه به مطالب فوق، پیش‌بینی دوام بتن‌های توانمند در برابر حمله سولفوریک اسید و مقایسه عملکرد آن‌ها با بتن معمولی در این محیط آسیب رسان با دشواری همراه خواهد بود؛ نفوذپذیری کمتر این نوع بتن و نیز عیار مواد سیمانی بالاتر در بتن توانمند نسبت به بتن معمولی در کنار بهره بردن از مواد جایگزین سیمان، همگی سبب غیرقابل پیش‌بینی شدن دوام بتن‌های توانمند در برابر حمله سولفوریک اسید می‌شوند.

در این تحقیق با بررسی اثر سرباره کوره آهن گدازی و پوزولان طبیعی بر دوام نمونه‌های بتن و ملات تهیه شده در دو رده بتن توانمند و بتن معمولی، عملکرد بتن‌های توانمند در برابر حمله سولفوریک اسید مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مواد و مصالح مورد استفاده

در این تحقیق سنگدانه‌های با مشخصات مندرج در جدول ۱ استفاده شده‌اند. لازم به ذکر است حداکثر اندازه مصالح سنگی ۱۲/۵ mm می‌باشد. دانه بندی ترکیب نهایی مصالح سنگی به همراه حدود پیشنهادی طرح مخلوط ملی بتن ایران در شکل ۱ مشاهده می‌شود [۲۵].

جدول ۲: آنالیز شیمیایی مواد سیمانی

Table 2. Chemical analysis of cementing materials

درصد وزنی اجزاء											ماده سیمانی
L.O.I	MnO	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	
۰/۹۴	-	-	۰/۳	۰/۵۳	۱/۳۵	۱/۸۹	۳/۷۲	۵/۸۹	۲۱/۵۵	۶۳/۷۸	سیمان
۰/۰۲	۰/۹۹	۱/۲۳	۰/۷	۰/۶۱	۸/۵۲	۰/۹۷	۱/۰۱	۱۱/۵۶	۳۷/۲۱	۳۶/۷۵	سرباره کوره آهن گدازی
۴/۲۹	۰/۰۵	۰/۴۸	۲/۹	۲/۴۹	۱/۵۲	۰/۱۸	۳/۸۲	۱۱/۲	۶۸/۳	۴/۴	پوزولان طبیعی

جدول ۳: مشخصات فیزیکی مواد سیمانی

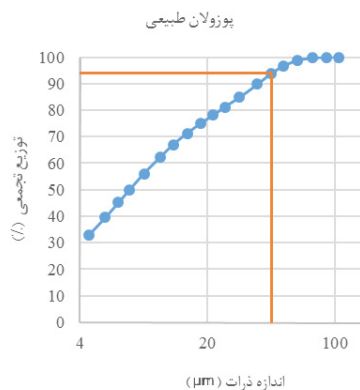
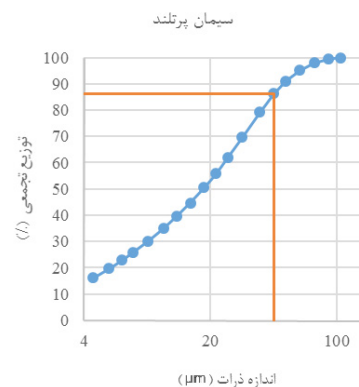
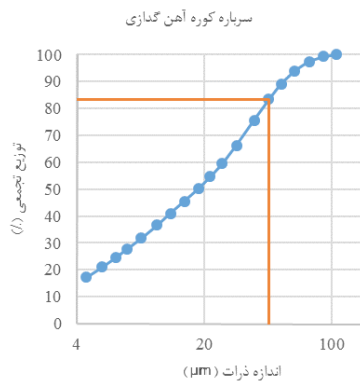
Table 3. Physical properties of cementing materials

ماده سیمانی	چگالی (kg/m ³)	ریزی بلین (cm ² /g)	عبوری از الک ۴۵ میکرومتر (%)
سیمان	۳۰۲۰	۳۰۳۵	۸۶/۲۸
سرباره کوره آهن گدازی	۲۷۹۰	۳۳۸۳	۸۳/۳۹
پوزولان طبیعی	۲۴۲۰	۵۳۴۹	۹۳/۸۹

جدول ۴: فعالیت پوزولانی مواد جایگزین سیمان

Table 4. Pozzolanic activity of supplementary cementing materials

ماده جایگزین سیمان	درصد جایگزینی	فعالیت پوزولانی ۷ روزه (%)	فعالیت پوزولانی ۲۸ روزه (%)
سرباره کوره آهن گدازی	۵۰	۵۹	۷۷
پوزولان طبیعی	۲۰	۷۶/۵	۸۲



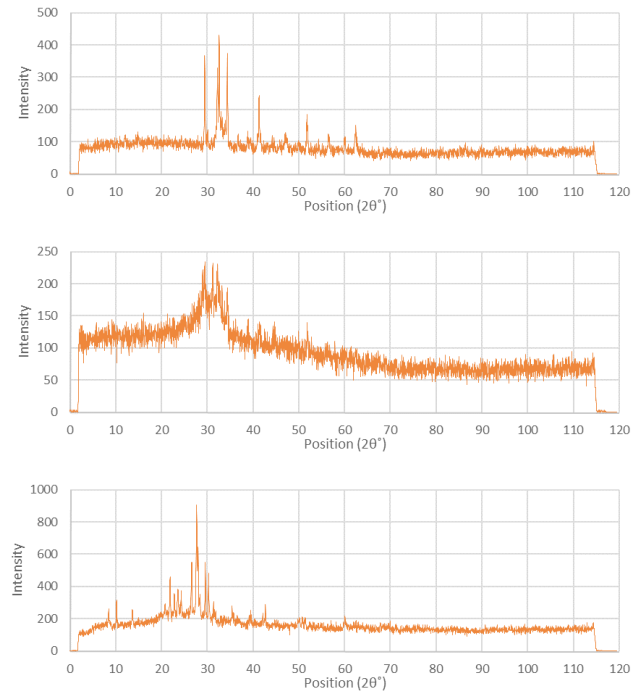
شکل ۲: نمودار توزیع اندازه ذرات مصالح سیمانی

Fig. 2. Particle size distribution of cementing materials

۳- نسبت‌های اختلاط، شیوه ساخت و شرایط عمل آوری طرح‌های بتن

با استفاده از مواد و مصالح معرفی شده در بخش قبل، نسبت‌های اختلاط مندرج در جدول ۵ جهت بررسی اثر مواد جایگزین سیمان و عیار سیمان مصرفی بر دوام نمونه‌های بتنی در محیط اسیدی ساخته شدند. لازم به ذکر است طرح‌هایی که با حرف H نشان داده می‌شوند در رده بتن‌های توانمند و طرح‌های نشان داده شده با حرف O در رده بتن‌های عادی می‌باشند.

ساخت بتن توسط پن میکسر با حجم اختلاط ۶۰ لیتر انجام شد. ترتیب اختلاط مصالح بدین صورت است که ابتدا مصالح درشت‌دانه به همراه نیمی از ماسه به مدت ۱ دقیقه بصورت خشک مخلوط شده و پس از آن مقدار باقی مانده ماسه، سیمان، مواد جایگزین سیمان و دوسوم آب اختلاط به مخلوط سنگدانه‌ها اضافه شده و به مدت ۲ دقیقه اختلاط صورت می‌گیرد. نهایتاً آب باقی مانده به همراه فوق روان کننده اضافه شده و مواد و مصالح به مدت ۶ دقیقه بصورت کامل ترکیب شدند. پس از اطمینان از نتایج مناسب بتن تازه (اسلامپ رده S3)، نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰ cm و ارتفاع ۲۰ cm و نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۰ cm از بتن ساخته شده تهیه شدند. همچنین جهت بدست آوردن بخش ملات مخلوط، بتن تازه از الک نمره ۴ عبور داده شد و در نمونه‌های منشوری ملات به ابعاد ۲۸/۵x۲۸/۵x۲۸/۵ cm قرار گرفت. پس از تهیه نمونه‌ها، بعد از ۲۴ ساعت عمل‌آوری در محیط مرطوب از قالب‌ها خارج و تا سن مورد نظر آزمایش‌ها در محلول آب و آهک نگهداری شدند.



شکل ۳: نتایج XRD مصالح سیمانی

Fig. 3. XRD analysis of cementing materials

جدول ۵: مشخصات طرح‌های اختلاط

Table 5. Mixture designs

اسلامپ (mm)	فوق روان کننده (% مواد سیمانی)	پوزولان طبیعی (kg/m ³)	سرباره (kg/m ³)	سیمان (kg/m ³)	نسبت آب به مواد سیمانی (W/B)	نام طرح
۱۳۰	۰/۶۲	-	-	۴۵۰	۰/۳۲	HPC
۱۱۰	۰/۵۰	-	۹۰	۳۶۰	۰/۳۲	HS20
۱۴۰	۰/۴۴	-	۱۳۵	۳۱۵	۰/۳۲	HS30
۱۳۰	۰/۳۷	-	۱۸۰	۲۷۰	۰/۳۲	HS40
۱۲۰	۰/۵۵	۹۰	-	۳۶۰	۰/۳۲	HN20
۱۴۰	۰/۶۰	۱۱۲/۵	-	۳۳۷/۵	۰/۳۲	HN25
۱۰۰	۰/۵	-	-	۳۶۰	۰/۴	OPC
۱۵۰	۰/۵۱	-	۷۲	۲۸۸	۰/۴	OS20
۱۱۰	۰/۵۳	-	۱۰۸	۲۵۲	۰/۴	OS30
۱۱۵	۰/۵	-	۱۴۴	۲۱۶	۰/۴	OS40
۱۲۰	۰/۶	۷۲	-	۲۸۸	۰/۴	ON20
۱۲۵	۰/۶۲	۹۰	-	۲۷۰	۰/۴	ON25

۴-۲- آزمایش‌های ارزیابی عملکرد بتن در محیط سولفوریک اسید
 آزمایش‌های کاهش وزن نمونه‌های مکعبی ۱۰ cm بصورت هفتگی، کاهش مقاومت فشاری پس از ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روز قرارگیری نمونه‌های مکعبی ۱۰ cm در اسید و اندازه‌گیری تغییرات سرعت امواج التراسونیک در هر ۱۴ روز جهت بررسی عملکرد بتن‌ها در محیط اسیدی در دستور کار قرار گرفتند.

همچنین جهت افزایش دقت اندازه‌گیری امواج التراسونیک در محیط اسیدی، از نمونه‌های استوانه‌ای که سطح جانبی آنها اپوکسی‌زده شده بود، استفاده گردید. در نتیجه خوردگی به سطوح بالا و پایین استوانه محدود شده و دو وجه موازی مذکور برای اندازه‌گیری سرعت عبور امواج التراسونیک به کار گرفته می‌شد. جهت عدم کاهش شدت خوردگی به دلیل احاطه شدن نمونه‌ها توسط مواد حاصل از واکنش سولفوریک اسید با بتن، نمونه‌های آزمایش‌های کاهش وزن، تغییرات سرعت امواج التراسونیک و کاهش مقاومت فشاری به ترتیب در بازه‌های ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه شسته شده و مواد حاصل از واکنش اسید با بتن از سطح نمونه‌ها زدوده می‌شد.

به دلیل عدم پایداری حجمی ترکیبات تشکیل شده بر اثر حمله سولفوریک اسید و شباهت این پدیده با خرابی‌های سولفاتی، آزمایش اندازه‌گیری تغییر طول نمونه‌های ملات طبق روش استاندارد ASTM C1012 [۳۲] در برنامه تحقیقاتی این پژوهش گنجانده شد. در این راستا نمونه‌های ملات ساخته شده پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در محلول آب‌آهک، در معرض حمله سولفوریک اسید قرار گرفته و تغییر طول آن‌ها بصورت هفتگی به مدت ۹۰ روز اندازه‌گیری شدند.

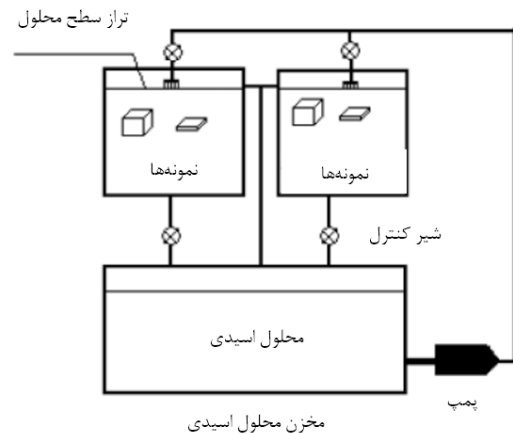
۵- تجزیه و تحلیل نتایج

نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتن توانمند شکل ۵ و بتن معمولی شکل ۶ در ادامه آورده شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌گردد، مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن‌های با نسبت آب به مواد سیمانی برابر با ۰/۳۲ تماماً بالای ۵۰ MPa بوده و در رده بتن‌های پرمقاومت دسته‌بندی می‌گردند و با افزایش نسبت آب به مواد سیمانی، مقاومت نمونه‌های بتنی کاهش پیدا می‌کند.

نتایج فوق بیانگر مقاومت فشاری بیشتر نمونه‌های حاوی ۲۰ درصد سرباره از زمان‌های اولیه (۲۸ روز) نسبت به طرح شاهد بوده و با افزایش میزان سهم سرباره در مقدار کل مواد سیمانی، زمان رسیدن به حد مقاومت فشاری طرح شاهد افزایش می‌یابد. افزایش مقاومت فشاری به میزان ۱۶ و ۹ درصد پس از ۱۸۰ روز عمل‌آوری در آب‌آهک، بیانگر اثر مثبت جایگزینی ۲۰ درصدی سرباره کوره آهن‌گدازی به جای سیمان پرتلند در طرح‌های اختلاط بتن‌های توانمند و معمولی است.

همچنین لازم به ذکر است مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی پوزولان طبیعی در اکثر مواقع کمتر از طرح‌های شاهد بوده و تنها در سن ۱۸۰ روز طرح HN25 دارای مقاومت بیشتر از طرح شاهد می‌باشد. این تفاوت رفتار

نمونه‌ها جهت بررسی عملکرد در محیط سولفوریک اسید پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در محلول آب و آهک وارد دستگاه نگهداری سولفوریک اسید با pH=۱ شدند (شکل ۴). این دستگاه با گرداندن محلول سولفوریک اسید بین ظروف حاوی نمونه و مخزن اصلی اسید همگنی محلول اسیدی اطراف نمونه‌ها را تضمین می‌کند. ضمناً به دلیل واکنش اسید با نمونه‌های بتنی از قدرت اسید به مرور زمان کاسته شده که جهت جلوگیری از این امر بصورت هفتگی pH محلول کنترل و تنظیم می‌شد.



شکل ۴: طرح شماتیک دستگاه نگهداری اسید

Fig. 4. Acid pumping apparatus

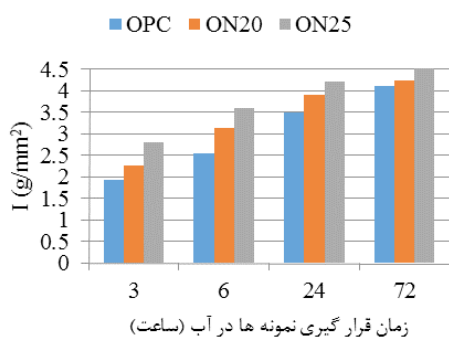
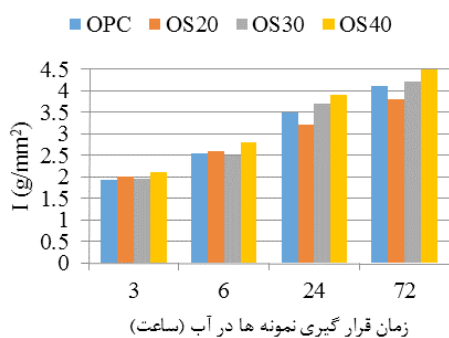
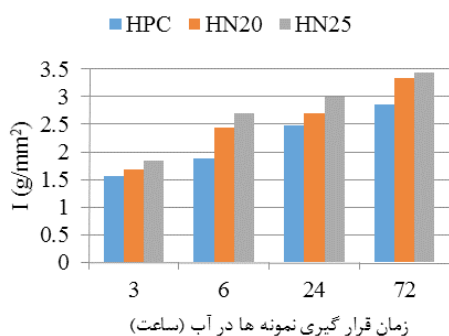
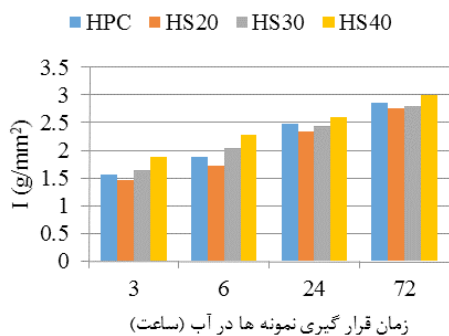
۴- آزمایش‌ها

آزمایش‌های انجام گرفته در این مقاله در دو دسته آزمایش‌های ارزیابی کیفیت بتن و آزمایش‌های ارزیابی عملکرد بتن در محیط سولفوریک اسید دسته‌بندی شده‌اند.

۴-۱- آزمایش‌های ارزیابی کیفیت بتن

آزمایش‌های مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی ۱۰ cm در سنین ۳، ۷، ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روز، جذب آب موئینه طبق استاندارد EN ۴۸۰-۲۹ [۲۹] بر روی نمونه‌های مکعبی ۱۰ cm در سنین ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روز و مقاومت الکتریکی سطحی [۳۰] به همراه اندازه‌گیری سرعت امواج التراسونیک [۳۱] در سنین ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روز بر روی نمونه‌های استوانه‌ای ۲۰ cm جهت ارزیابی مشخصات مکانیکی، کیفیت و نفوذپذیری بتن انجام گرفتند.

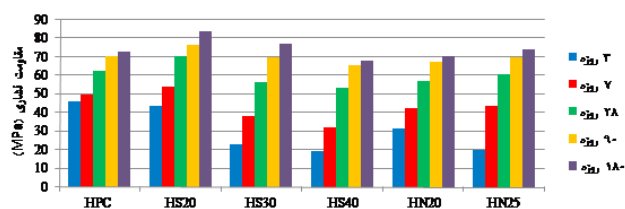
لازم به ذکر است جهت جلوگیری از گسترش ریزترک‌ها و ایجاد خطا در آزمایش جذب آب موئینه، فرآیند خشک کردن نمونه‌ها در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۱۴ روز انجام شد. نتایج این آزمایش بصورت میزان آب جذب شده در واحد سطح تماس نمونه با آب ($I \text{ g/mm}^2$) پس از ۳، ۶، ۲۴ و ۷۲ ساعت قرارگیری در معرض آب، ارائه شده است.



شکل ۷: نتایج جذب آب موئینه در سن ۲۸ روز

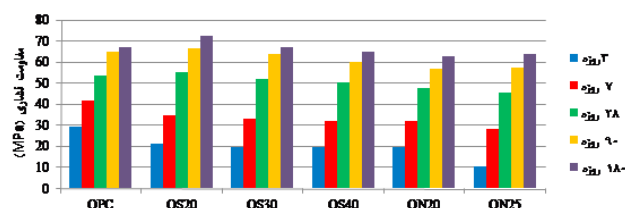
Fig. 7. Capillary water absorption at the age of 28 days

در مورد سرباره و پوزولان طبیعی به میزان فعالیت این مواد مرتبط بوده و با توجه به نرخ افزایش مقاومت فشاری، انتظار افزایش بیشتر مقاومت فشاری طرح‌های حاوی پوزولان طبیعی نسبت به سایر طرح‌ها می‌رود.



شکل ۵: نتایج مقاومت فشاری بتن‌های توانمند

Fig. 5. Compressive strength results of high performance concrete mixes

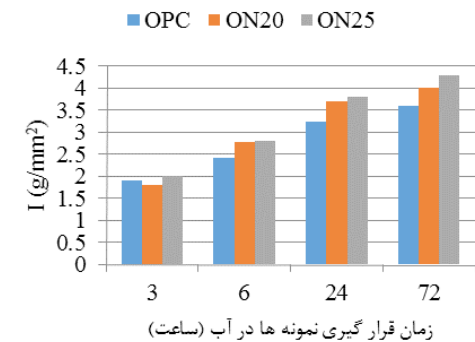
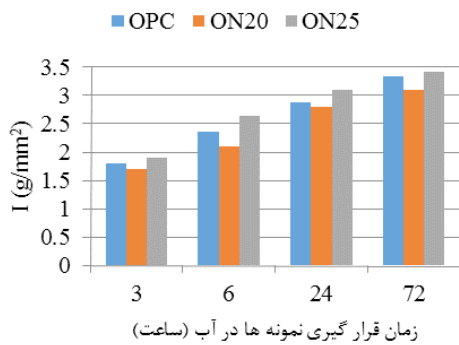
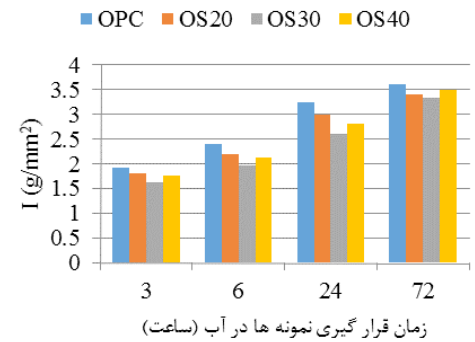
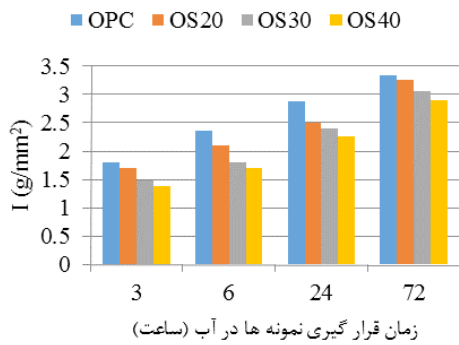
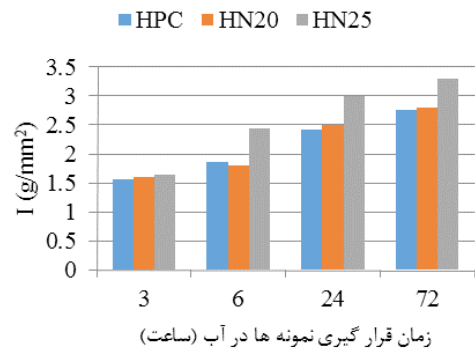
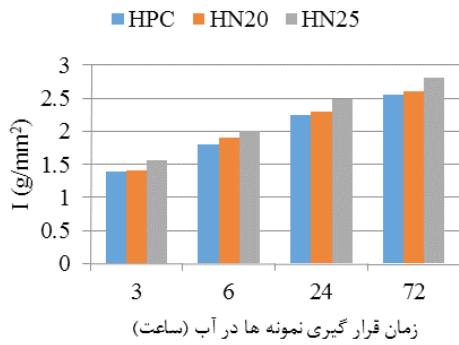
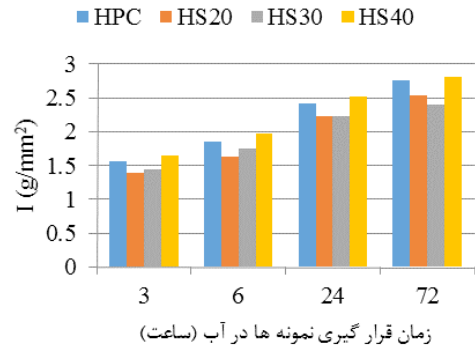
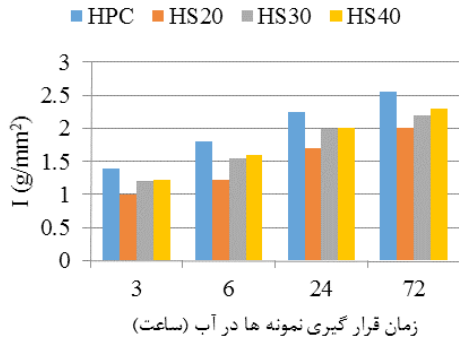


شکل ۶: نتایج مقاومت فشاری بتن‌های معمولی

Fig. 6. Compressive strength results of ordinary concrete mixes

شکل‌های ۷ تا ۹ نتایج آزمایش جذب آب موئینه را نمایش می‌دهند. بر اساس میزان آب جذب شده در این آزمایش می‌توان نفوذپذیری بتن‌های توانمند را کمتر از بتن‌های معمولی دانست. برای نمونه در مقایسه طرح HPC و OPC پس از ۱۸۰ روز عمل‌آوری، اختلاف ۲۹ درصدی بیانگر بهبود عملکرد می‌باشد. این امر به علت حجم و پیوستگی بیشتر فضاهای موئینه در بتن‌های با نسبت آب به مواد سیمانی بالاتر بوده که در نهایت موجب افزایش نفوذپذیری بتن می‌شود. نتایج مربوط به بتن‌های ساخته شده با هر دو نسبت آب به مواد سیمانی، بیانگر عملکرد مثبت جایگزینی سرباره به جای سیمان تا حد ۳۰ درصد از سن ۲۸ روزه به بعد و جایگزینی تا ۴۰ درصد از سن ۹۰ روز به بعد می‌باشد. برای مثال جایگزینی ۴۰٪ سرباره پس از ۱۸۰ روز عمل‌آوری سبب کاهش میزان جذب آب در بتن‌های توانمند به میزان ۱۰ درصد و در بتن‌های معمولی به میزان ۱۴ درصد شده‌است. لذا می‌توان نفوذپذیری بتن‌های حاوی سرباره را بطور کلی کمتر از بتن شاهد دانست.

در صورت استفاده از پوزولان طبیعی، تا سن ۲۸ روز جذب آب موئینه بتن بیشتر از طرح شاهد خواهد بود و تنها در سن ۹۰ روز بتن‌های حاوی ۲۰ درصد پوزولان طبیعی دارای جذب آب موئینه کمتر و یا در حد طرح شاهد می‌باشند. در سن ۱۸۰ روز نیز جذب آب موئینه طرح‌های حاوی ۲۰ و ۲۵ درصد پوزولان طبیعی به ترتیب حدود ۵ درصد کمتر و در حدود طرح شاهد می‌باشند.

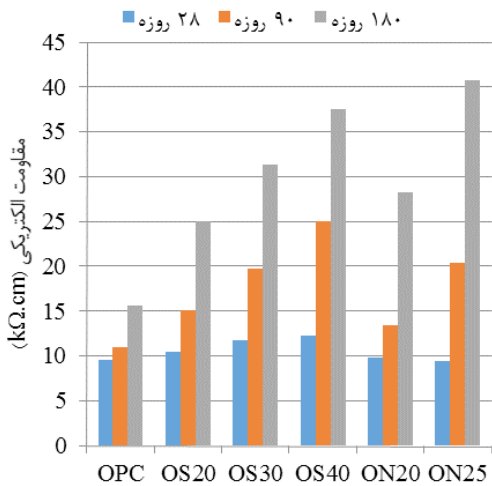


شکل ۹: نتایج جذب آب موئینه در سن ۱۸۰ روز

شکل ۸: نتایج جذب آب موئینه در سن ۹۰ روز

Fig. 9. Capillary water absorption at the age of 180 days

Fig. 8. Capillary water absorption at the age of 90 days



شکل ۱۱: نتایج مقاومت الکتریکی سطحی بتن های معمولی

Fig. 11. Electrical resistivity of ordinary concrete mixes

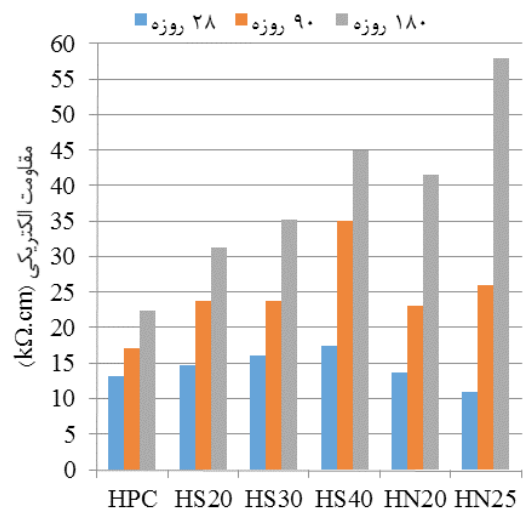
آزمایش اندازه گیری سرعت امواج التراسونیک در بازه های ۷ یا ۱۴ روزه بر روی نمونه های عمل آوری شده در محلول آب آهک شکل ۱۲ و نمونه های قرار گرفته در محلول اسیدی شکل ۱۳ انجام شده است. بر این اساس رابطه هایی بین مقاومت فشاری و سرعت امواج التراسونیک در کنار تغییرات نسبی سرعت امواج در نمونه های خورده شده (V_A) نسبت به سرعت امواج در نمونه های سالم (V_L) در شکل های ۱۴ و ۱۵ ارائه شده است ($(V_A - V_L)/V_L$). با توجه به نتایج این آزمایش، سرعت امواج التراسونیک در بتن های توانمند بیشتر از سرعت این امواج در بتن های معمولی است که این امر نشان دهنده تخلخل کمتر بتن های توانمند است. این مشاهده به دلیل کمتر بودن نسبت آب به مواد سیمانی در بتن های توانمند، مطابق انتظار است. همچنین با بررسی رابطه سرعت امواج التراسونیک با مقاومت فشاری نمونه های عمل آوری شده در محلول آب آهک و توجه به مقدار ضریب همبستگی مناسب این روابط، می توان استفاده از روش التراسونیک به عنوان یک روش غیرمخرب جهت پیش بینی مقاومت فشاری بتن ها را توصیه نمود. هرچند با توجه به ضریب همبستگی کم و نامناسب روابط ارائه شده بین مقاومت فشاری و سرعت امواج التراسونیک در نمونه های خورده شده توسط اسید نمی توان استفاده از روش التراسونیک در راستای پیش بینی مقاومت فشاری نمونه های خورده شده توسط سولفوریک اسید را پیشنهاد نمود.

نتایج مربوطه به تغییرات نسبی سرعت امواج التراسونیک بیانگر افت سرعت این پالس ها با پیشرفت خوردگی ناشی از حمله سولفوریک اسید به بتن می باشند. همچنین در اکثر مواقع میزان افت سرعت امواج در بتن های حاوی مواد جایگزین سیمان کمتر از بتن شاهد بوده ولی این روند در تمامی حالات مشاهده نمی گردد.

مقاومت الکتریکی سطحی نمونه های بتن توانمند شکل ۱۰ و بتن معمولی شکل ۱۱ بیانگر افزایش مقاومت الکتریکی بر اثر کاهش نسبت آب به مواد سیمانی می باشد. از سوی دیگر، افزایش مقاومت الکتریکی سطحی نمونه های حاوی سرباره و پوزولان طبیعی پس از ۲۸ و ۹۰ روز عمل آوری در محلول آب آهک مشاهده شده است. پس از ۱۸۰ روز عمل آوری، مقاومت الکتریکی طرح های حاوی ۴۰ درصد سرباره و ۲۵ درصد پوزولان طبیعی به ترتیب در بتن های توانمند و معمولی در حدود ۱۲۰ و ۱۶۰ درصد افزایش یافته است.

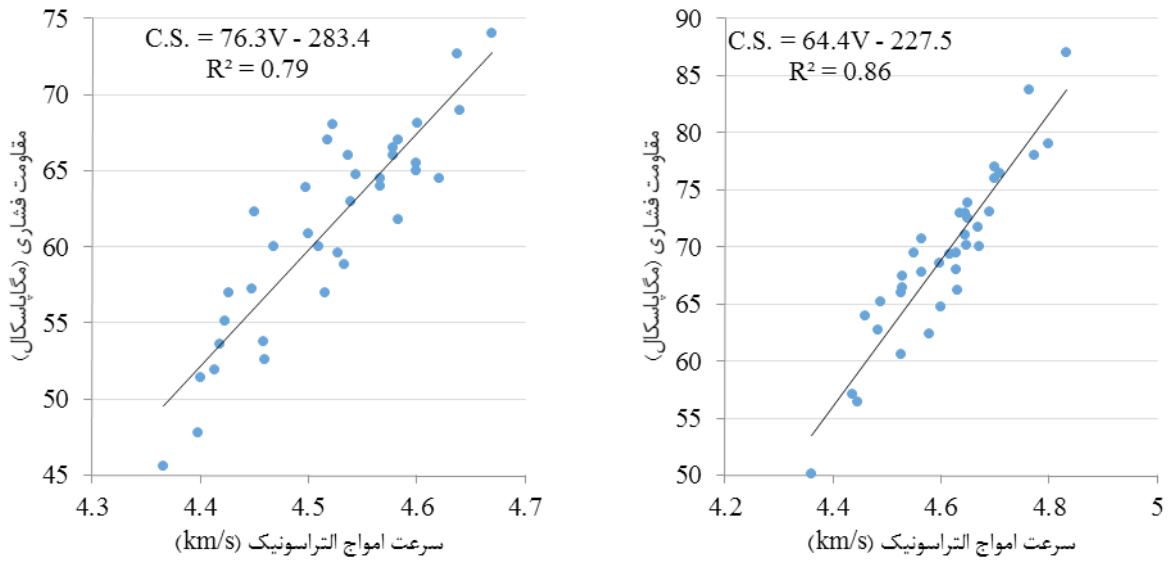
از آنجایی که رسانایی الکتریکی بتن بر اثر سهولت ارتباط محلول حفره ای در ساختار بتن افزایش می یابد، می توان افزایش مقاومت الکتریکی بتن را نشانی از کاهش نفوذپذیری آن دانست. مواد جایگزین سیمان بر اثر واکنش های پوزولانی و تولید ژل ثانویه، ضمن پر کردن ریزساختار بتن (اصلاح اندازه و توزیع حفرات)، ارتباط بین این فضاها را نیز قطع نموده و سبب افزایش مقاومت الکتریکی بتن می شوند [۱۶].

تفاوت موجود در نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی سطحی با نتایج جذب آب موئینه در رابطه با بتن های حاوی پوزولان طبیعی را می توان ناشی از فعالیت کم پوزولانی این ماده دانست. در این مورد به نظر می رسد پوزولان طبیعی ابتدا سبب قطع ارتباط فضاهای موئینه شده و پس از مدتی با پر کردن این حفرات، نفوذپذیری بتن را کاهش داده است. این دلیل، بهبود به مراتب سریعتر مقاومت الکتریکی در مقایسه با جذب آب موئینه را توجیه می نماید. در نتیجه آزمایش مقاومت الکتریکی سطحی می تواند نشان دهنده تغییرات دقیق نفوذپذیری بر اثر استفاده از مواد جایگزین سیمان نبوده و با خطا همراه باشد. از این رو در این تحقیق معیار نفوذپذیری بتن ها بر اساس نتایج آزمایش جذب آب موئینه ارزیابی می گردد.

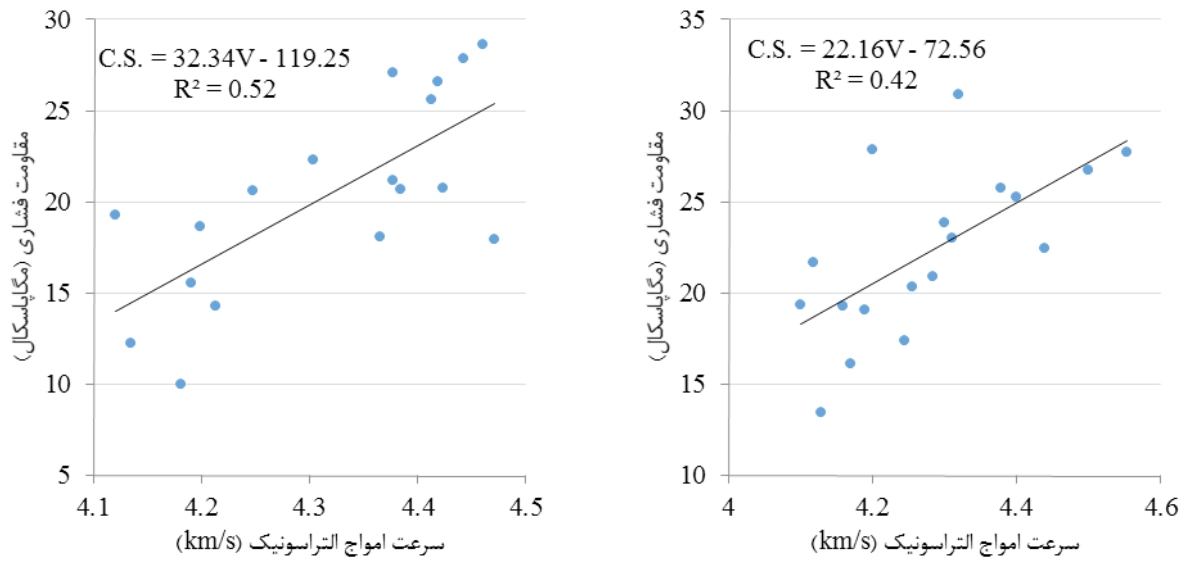


شکل ۱۰: نتایج مقاومت الکتریکی سطحی بتن های توانمند

Fig. 10. Electrical resistivity of high performance concrete mixes

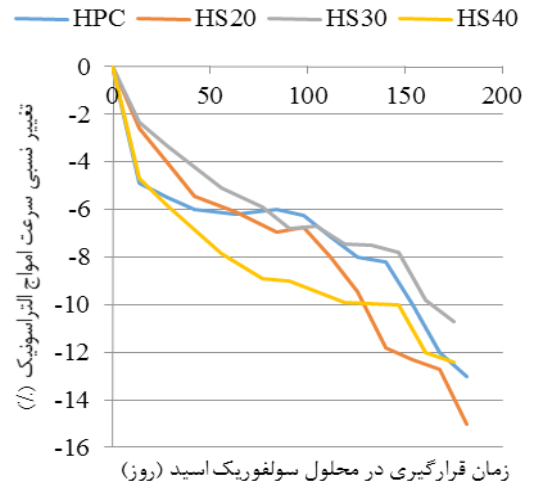
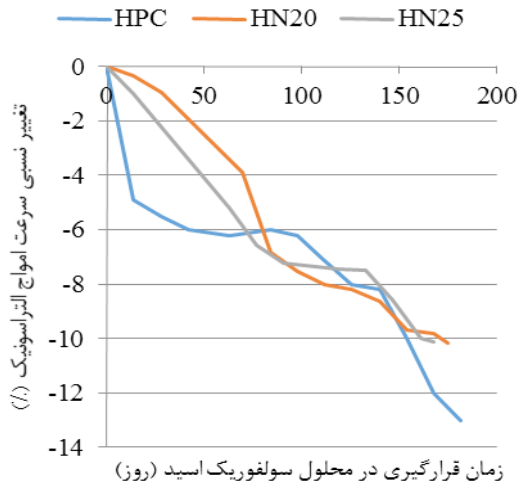


شکل ۱۲: رابطه سرعت امواج التراسونیک و مقاومت فشاری بتن های توانمند (چپ) و معمولی (راست) عمل آوری شده در آب آهک
 Fig. 12. Relation between ultrasonic pulse velocity and compressive strength of limewater cured specimens of high performance concrete (left) and ordinary concrete (right) mixes



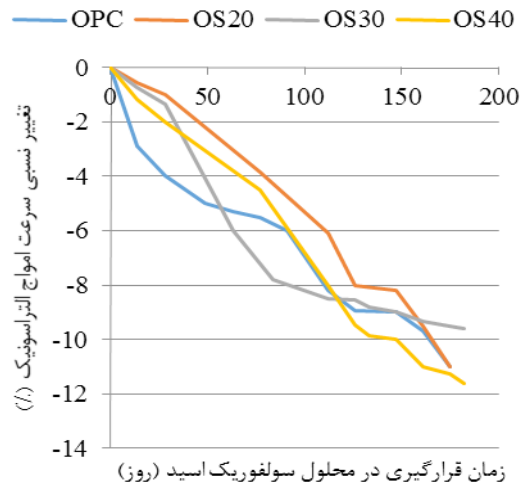
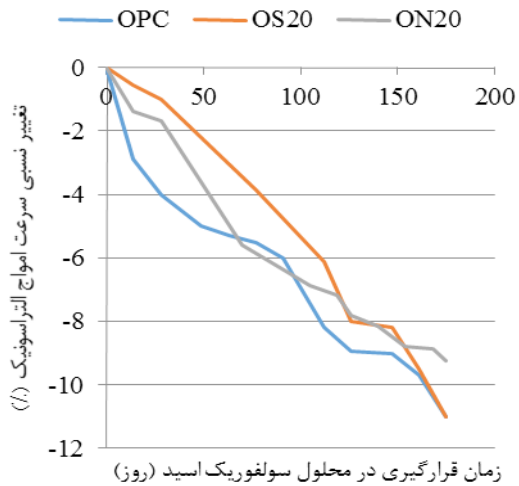
شکل ۱۳: رابطه سرعت امواج التراسونیک و مقاومت فشاری بتن های توانمند (چپ) و معمولی (راست) قرار گرفته در محلول سولفوریک اسید

Fig. 13. Relation between ultrasonic pulse velocity and compressive strength of sulfuric acid cured specimens of high performance concrete (left) and ordinary concrete (right) mixes



شکل ۱۴: تغییرات نسبی سرعت امواج التراسونیک در نمونه‌های بتن توانمند قرار گرفته در محلول سولفوریک اسید

Fig. 14. Ultrasonic pulse velocity changes in sulfuric acid cured high performance concrete mixes

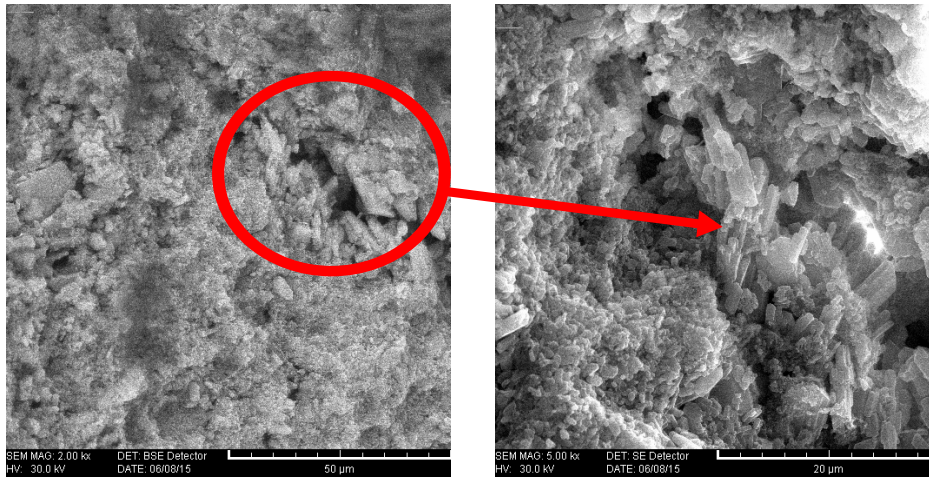


شکل ۱۵: تغییرات نسبی سرعت امواج التراسونیک در نمونه‌های بتن معمولی قرار گرفته در محلول سولفوریک اسید

Fig. 15. Ultrasonic pulse velocity changes in sulfuric acid cured ordinary concrete mixes

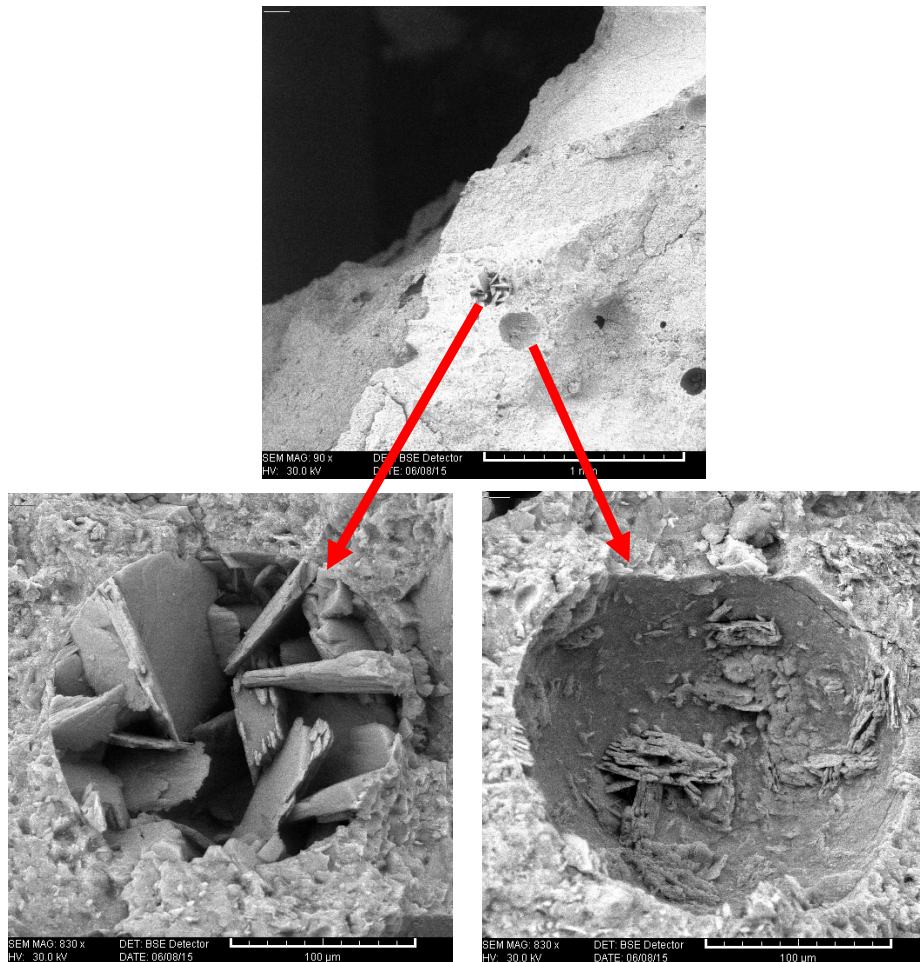
خمیر سیمان نظیر گچ، این حفرات با مواد حجیم غیرمقاوم پر شده و تخلخل سیستم کاهش می‌یابد. این کاهش تخلخل بصورت غیرواقعی نشان‌دهنده میزان خوردگی کمتری خواهد بود. مورد سوم به عنوان یک نظریه توسط عکس‌های میکروسکوپ الکترونی گرفته شده از نمونه‌های ملات که به مدت ۹۰ روز در محلول سولفوریک اسید قرار داشته شکل‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۸ تایید می‌شود. در نهایت می‌وان گفت که پیش‌بینی میزان خرابی ناشی از حمله سولفوریک اسید توسط روش التراسونیک با خطای زیاد همراه می‌باشد.

علل مختلفی در بروز خطای زیاد در اندازه‌گیری سرعت امواج التراسونیک در نمونه‌های خورده شده توسط سولفوریک اسید موثرند. اولاً آزمایش تعیین سرعت امواج التراسونیک به عنوان یک روش غیرمخرب در تعیین تخلخل و مقاومت فشاری بتن همواره با خطای قابل توجهی همراه است. ثانیاً وجود لایه خورده‌شده که با تخلخل زیاد همراه است و ایجاد تفاوت در پایداری و ضخامت این لایه با استفاده از مواد جایگزین سیمان موجب کاهش غیرواقعی سرعت امواج می‌گردد. ثالثاً به دلیل پرشدن حفرات و تخلخل‌های اولیه بتن با مواد حاصل از واکنش سولفوریک اسید با



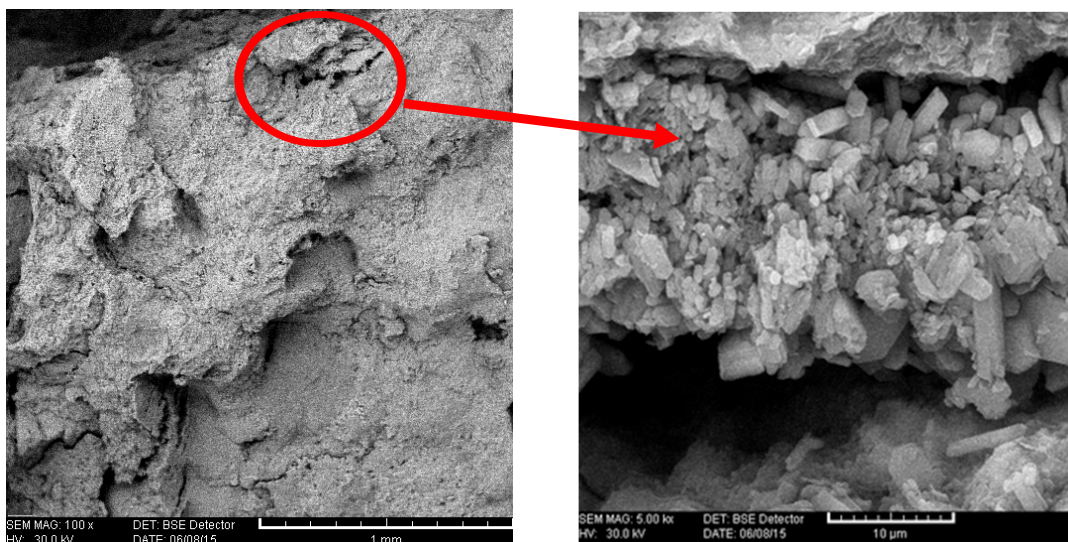
شکل ۱۶: پرشدن ریزترک توسط کریستال‌ها در ملات HPC پس از ۹۰ روز قرارگیری در محلول سولفوریک اسید

Fig. 16. Filling of the pores in HPC mixture after 90 days of immersion in sulfuric acid solution



شکل ۱۷: پرشدن حفرات توسط کریستال‌ها در ملات OS20 پس از ۹۰ روز قرارگیری در محلول سولفوریک اسید

Fig. 17. Filling of the pores in OS20 mixture after 90 days of immersion in sulfuric acid solution



شکل ۱۸: پرشدن ریزترک توسط کریستال‌ها در ملات ON20 پس از ۹۰ روز قرارگیری در محلول سولفوریک اسید

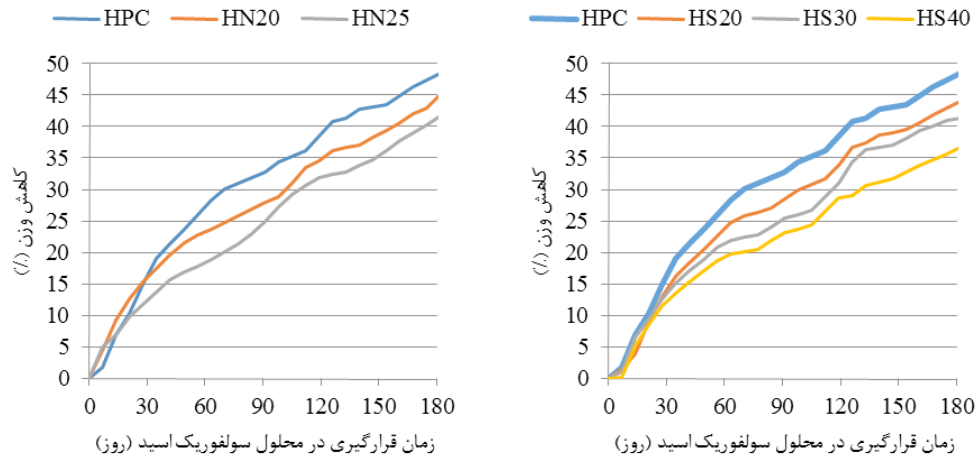
Fig. 18. Filling of the pores in ON20 mixture after 90 days of immersion in sulfuric acid solution

جایگزینی بیشتر پوزولان طبیعی و سرباره به جای سیمان پرتلند موجب افزایش مقاومت بتن در برابر حمله سولفوریک اسید می‌گردد. مقایسه اثر پوزولان طبیعی و سرباره در جایگزینی برابر ۲۰ درصد نشان‌دهنده عملکرد تقریباً یکسان این دو ماده جایگزین سیمان در بهبود مقاومت بتن در برابر حمله سولفوریک اسید می‌باشد.

در این میان لزوم توجه به دو نکته در راستای بررسی تاثیر نسبت آب به مواد سیمانی بر شدت خوردگی ناشی از حمله سولفوریک اسید الزامی است. اولاً با توجه به جدول ۵، کاهش نسبت آب به مواد سیمانی با افزایش میزان مواد سیمانی و در نتیجه افزایش حجم خمیر همراه می‌باشد که این تغییر به تنهایی سبب افزایش آسیب‌پذیری نمونه‌ها در برابر حمله اسید می‌گردد. ثانیاً از طرفی انتظار می‌رود با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی نفوذپذیری بتن کاهش یافته و مقاومت آن در برابر حمله سولفوریک اسید افزایش یابد. در این مورد نتایج آزمایش‌های جذب آب موئینه و مقاومت الکتریکی سطحی بیانگر نفوذپذیری کمتر بتن‌های با نسبت آب به مواد سیمانی برابر ۰/۳۲ در مقایسه با بتن‌های با نسبت آب به مواد سیمانی برابر با ۰/۴ می‌باشند. در نتیجه این دو پدیده بصورت متضاد بر دوام بتن در برابر حمله سولفوریک اسید تاثیر می‌گذارند. حال با توجه به نتایج بدست آمده در این آزمایش، تاثیر منفی افزایش مقدار مواد سیمانی بر خوردگی ناشی از حمله سولفوریک اسید بر اثر مثبت کاهش نفوذپذیری غالب است. در نتیجه بتن‌های دارای نسبت آب به مواد سیمانی کمتر علی‌رغم نفوذپذیری کمتر، آسیب‌پذیری بیشتری در برابر حمله سولفوریک اسید دارند.

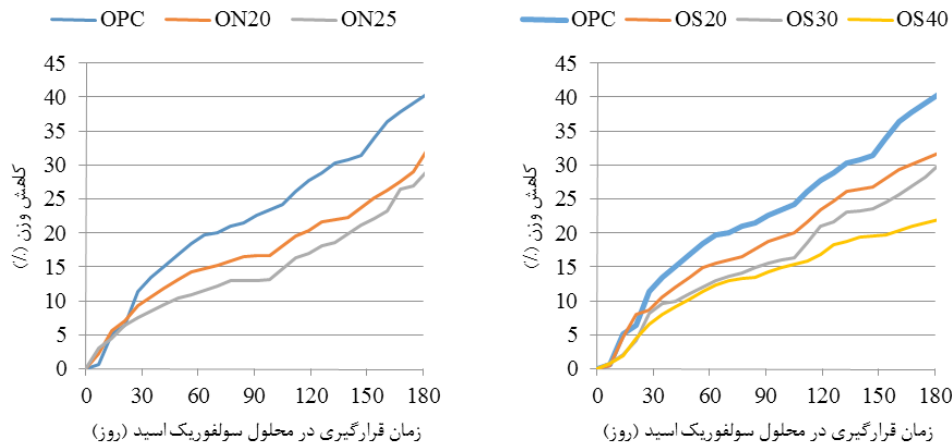
جهت انجام آزمایش‌های کاهش وزن، نمونه‌های بتن مکعبی به ابعاد ۱۰ cm پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در محلول آب‌آهک وارد محلول سولفوریک اسید با pH برابر با یک شده و وزن نمونه‌ها تا ۱۸۰ روز پس از قرارگیری در محلول اسیدی اندازه‌گیری شدند. نتایج این اندازه‌گیری‌ها بصورت نسبت کاهش وزن نمونه به وزن اولیه آن (پیش از قرارگیری در محلول اسیدی) در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ آورده شده‌اند.

با بررسی این نتایج می‌توان به این نکته دست یافت که اثر مواد جایگزین سیمان بر شدت خوردگی و کاهش وزن نمونه‌ها مثبت بوده و استفاده از این مواد عملکرد بتن را در برابر حمله سولفوریک اسید بهبود می‌بخشد. برای نمونه با جایگزینی ۴۰ درصد سرباره به جای سیمان می‌توان عملکرد بتن توانمند و معمولی را به ترتیب به میزان ۲۵ و ۴۶ درصد بهبود داد. در صورت استفاده از ۲۵ درصد پوزولان طبیعی نیز می‌توان کاهش وزن نمونه‌ها را تا ۱۴ و ۲۹ درصد برای بتن‌های توانمند و معمولی کاهش داد. این اثر مثبت را می‌توان ناشی از کاهش نفوذپذیری و نیز مصرف شدن آهک به دلیل واکنش‌های پوزولانی دانست. همچنین با مشاهده عینی پایداری لایه خورده شده در هنگام شستن نمونه‌ها، این نتیجه حاصل شد که پایداری لایه خورده شده در بتن‌های حاوی پوزولان طبیعی از بتن‌های حاوی سرباره بیشتر بوده و بصورت کلی پایداری لایه خورده شده در بتن‌های حاوی مواد جایگزین سیمان از بتن‌های شاهد بیشتر می‌باشد. لازم به ذکر است پایداری بیشتر لایه خورده شده موجب کاهش سرعت خوردگی می‌گردد. البته بیشتر بودن شدت خوردگی نمونه‌های حاوی پوزولان طبیعی در سنین اولیه تا ۲۸ روز را می‌توان ناشی از کند بودن فعالیت پوزولانی این ماده دانست.



شکل ۱۹: کاهش وزن نمونه‌های بتن توانمند در محلول سولفوریک اسید

Fig. 19. Mass loss of high performance concrete mixes in sulfuric acid solution

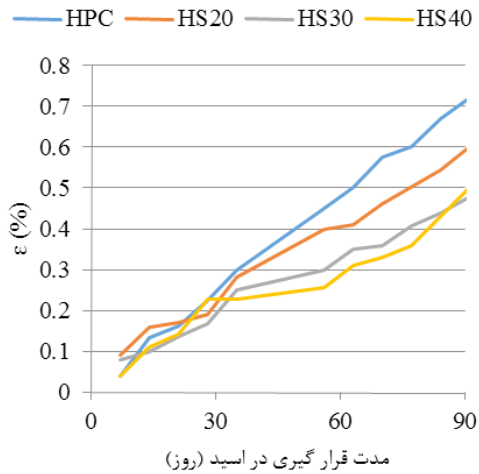


شکل ۲۰: کاهش وزن نمونه‌های بتن معمولی در محلول سولفوریک اسید

Fig. 20. Mass loss of ordinary concrete mixes in sulfuric acid solution

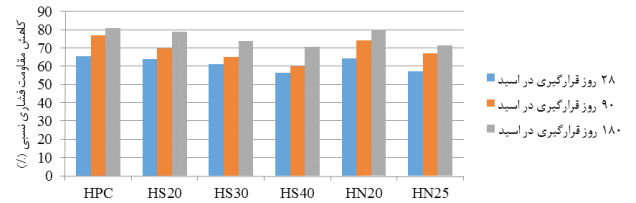
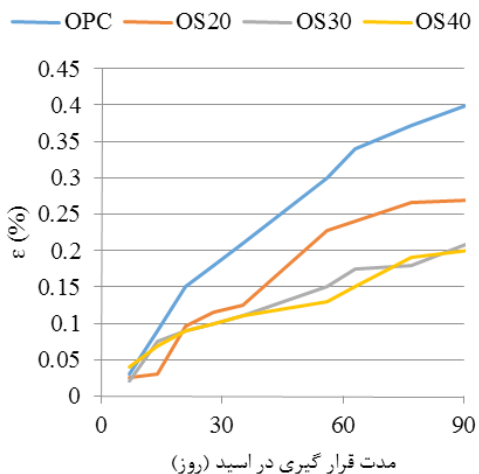
صورت استفاده از پوزولان طبیعی نیز می‌توان بهبود عملکرد را به میزان ۱۲ و ۳ درصد در بتن‌های توانمند و معمولی مشاهده کرد. همچنین بالاتر بودن افت مقاومت فشاری در ۲۸ روز در نمونه‌های حاوی پوزولان طبیعی نسبت به بتن شاهد را می‌توان همانند نتایج کاهش وزن، ناشی از کند بودن واکنش‌های پوزولانی در این نمونه‌ها دانست. ضمناً مقایسه نتایج استفاده از درصد‌های مشابه سرباره و پوزولان طبیعی به جای سیمان پرتلند بیانگر افت مقاومت فشاری کمتر نمونه‌های حاوی سرباره می‌باشد. در مقایسه بتن‌های با نسبت‌های آب به مواد سیمانی متفاوت، نتایجی مشابه آزمایش کاهش وزن بدست آمده و افت مقاومت فشاری نمونه‌های با نسبت آب به مواد سیمانی بالاتر، کمتر می‌باشد. دلیل این پدیده نیز در بخش نتایج آزمایش کاهش وزن بصورت مشروح بیان شده‌است.

جهت انجام آزمایش افت مقاومت فشاری، نمونه‌های بتنی پس از ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روز قرارگیری در محلول اسیدی تحت انجام آزمایش مقاومت فشاری قرار می‌گیرند (مقاومت فشاری برابر با S_A). ضمناً مقاومت فشاری نمونه‌هایی که تا همان زمان در محلول آب‌آهک عمل‌آوری شده‌اند نیز بصورت همزمان اندازه‌گیری شد (S_L). نتایج بصورت کاهش مقاومت فشاری نسبی $(S_L - S_A) / S_L$ در شکل ۲۱ و ۲۲ مشاهده می‌شوند. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند، روند تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها در محلول اسیدی، مشابه روند کاهش وزن آنها بوده و اثر کلی استفاده از مواد جایگزین سیمان مثبت ارزیابی می‌شود. برای نمونه با بهره‌گیری از ۴۰ درصد سرباره می‌توان کاهش مقاومت فشاری را تا حدود ۱۳ درصد در بتن‌های توانمند و ۵ درصد در بتن‌های معمولی بهبود بخشید. در



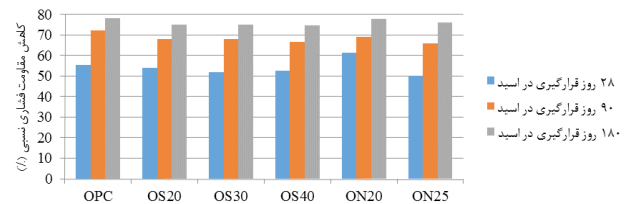
شکل ۲۳: تغییر طول نمونه‌های ملات آمده از بتن توانمند در محلول سولفوریک اسید

Fig. 23. Length changes of high performance mortar bars in sulfuric acid solution



شکل ۲۱: افت مقاومت فشاری نمونه‌های بتن توانمند در محلول سولفوریک اسید

Fig. 21. Compressive strength loss of high performance concrete mixes in sulfuric acid solution



شکل ۲۲: افت مقاومت فشاری نمونه‌های بتن معمولی در محلول سولفوریک اسید

Fig. 22. Compressive strength loss of ordinary concrete mixes in sulfuric acid solution

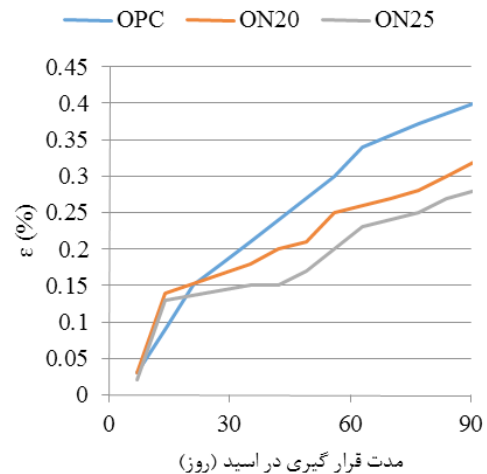
نتایج آزمایش تغییر طول نمونه‌های ملات تا ۹۰ روز قرارگیری در محلول سولفوریک اسید در شکل‌های ۲۳ و ۲۴ مشاهده می‌شوند. نتایج بدست آمده از آزمایش تغییر طول نمونه‌های ملات حاکی از کاهش تغییر طول نسبی با استفاده از مواد جایگزین سیمان است. با افزایش درصد جایگزینی سرباره و پوزولان طبیعی به جای سیمان افزایش طول نمونه‌ها کاهش یافته و بصورت کلی عملکرد سرباره و پوزولان طبیعی مشابه یکدیگر ارزیابی شده‌است. با افزودن ۴۰ درصد سرباره و یا ۲۵ درصد پوزولان طبیعی در بتن‌های توانمند و معمولی، افزایش طول نمونه‌ها در حدود ۳۰ درصد کاهش می‌یابد. تنها تفاوت موجود در این مورد به بیشتر بودن تغییر طول نمونه‌های حاوی پوزولان طبیعی در زمان‌های اولیه نسبت به بتن شاهد باز می‌گردد که ناشی از فعالیت کم پوزولان طبیعی می‌باشد.

ضمناً مشابه نتایج بدست آمده از آزمایش‌های کاهش وزن و مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی، نمونه‌های ملات با نسبت آب به مواد سیمانی بیشتر، عملکرد بهتری در برابر حمله سولفوریک اسید دارند. علت مشابهی با آنچه در بخش نتایج کاهش وزن نمونه‌های بتن شرح داده شده‌است را می‌توان سبب این تفاوت رفتار دانست.

مقاومت الکتریکی سطحی بتن افزایش می‌یابد. در این راستا استفاده از بیشترین مقادیر مواد جایگزین سیمان (۴۰٪ سرباره یا ۲۵٪ پوزولان طبیعی) موجب بدست آمدن بهترین نتایج می‌شود. لازم به ذکر است نتایج این آزمایش در مورد بتن‌های حاوی پوزولان طبیعی با نتایج آزمایش جذب آب مؤئینه همخوانی ندارد. این امر ممکن است به دلیل وابستگی آزمایش مقاومت الکتریکی سطحی به رسانایی آب حفره‌ای در بتن باشد که در کنار نفوذپذیری بتن عامل تاثیرگذاری در نتایج این آزمایش به شمار می‌رود. با استفاده از مواد جایگزین سیمان، با استفاده شدن کلسیم هیدروکسید محلول در آب حفره‌ای طی واکنش‌های پوزولانی، رسانایی محلول کاهش یافته و مقاومت الکتریکی افزایش می‌یابد. این امر ممکن است بدون بهبود نفوذپذیری بتن نتایج مقاومت الکتریکی بالاتری را ارائه دهد.

نتایج آزمایش‌های کاهش وزن، افت مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی و آزمایش تغییر طول نمونه‌های ملات در محلول سولفوریک اسید، حاکی از بهبود عملکرد نمونه‌های بتن و ملات با استفاده از مواد جایگزین سیمان و به کارگیری مقادیر مواد سیمانی کمتر می‌باشند. برای مثال بهبود کاهش وزن نمونه‌ها در انتهای زمان مورد بررسی در محلول سولفوریک اسید، با جایگزینی ۴۰ درصد سرباره کوره آهن‌گدازی به جای سیمان در بتن توانمند در حدود ۲۵٪ و در بتن معمولی در حدود ۴۵٪ می‌باشد. همچنین در صورت بهره بردن از ۲۵ درصد پوزولان طبیعی، نتایج کاهش وزن نمونه‌ها پس از ۱۸۰ روز قرارگیری در محلول اسیدی به میزان ۱۵٪ و ۲۹٪ بهبود می‌یابند. با جایگزینی بیشتر سرباره و پوزولان طبیعی، کاهش وزن، افت مقاومت فشاری و تغییر طول کمتری رخ داده و با مقایسه درصد مشابه جایگزینی از این دو ماده عملکرد آنها بصورت مشابه ارزیابی شده‌است.

اندازه‌گیری سرعت امواج التراسونیک در بتن‌های توانمند و معمولی نشان‌دهنده تخریل کمتر بتن‌های ساخته شده با نسبت آب به مواد سیمانی کمتر بوده و با توجه به روابط مناسب بدست آمده، استفاده از این روش جهت پیش‌بینی مقاومت فشاری نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب آهک پیشنهاد می‌گردد. اندازه‌گیری و ارتباط دادن سرعت امواج التراسونیک با مقاومت فشاری نمونه‌های خورده شده با اسید دارای دقت کم و با خطای زیاد همراه است. همچنین تغییرات سرعت امواج التراسونیک بر اثر خوردگی ناشی از حمله سولفوریک اسید به بتن بصورت نزولی بوده ولی روند مشخصی مشاهده نمی‌گردد. علل بروز خطا در بخش نتایج این آزمایش بصورت کامل ارزیابی شده‌اند. در نهایت این آزمایش جهت بررسی میزان خرابی ناشی از حمله سولفوریک اسید به بتن توصیه نمی‌گردد.



شکل ۲۴: تغییر طول نمونه‌های ملات بدست آمده از بتن معمولی در محلول سولفوریک اسید

Fig. 24. Length changes of ordinary mortar bars in sulfuric acid solution

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق اثر افزودنی‌های معدنی سرباره کوره آهن‌گدازی و پوزولان طبیعی به عنوان مواد جایگزین سیمان بر دوام نمونه‌های بتن توانمند و معمولی در محلول سولفوریک اسید با pH برابر با یک، مورد بررسی قرار گرفته‌است. نتایج زیر از این تحقیق قابل ارائه می‌باشد:

- بر اساس نتایج بدست آمده، استفاده از سرباره کوره آهن‌گدازی به جای سیمان پرتلند تا حد ۳۰٪ سبب بهبود مقاومت فشاری در سن ۱۸۰ روز گشته و جایگزینی پوزولان طبیعی به جای سیمان باعث کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی شده است.
- نتایج جذب آب مؤئینه، حاکی از نفوذپذیری بهتر بتن‌های با نسبت آب به مواد سیمانی کمتر می‌باشند. در ضمن با استفاده تا حد ۳۰ درصد سرباره به جای سیمان پرتلند می‌توان جذب آب مؤئینه را در تمامی سنین کاهش داد. همچنین استفاده از ۴۰ درصد سرباره و ۲۰ درصد پوزولان طبیعی موجب بهبود نتایج آزمایش جذب آب مؤئینه از سن ۹۰ روز به بعد می‌گردد. جایگزینی ۲۵ درصد پوزولان طبیعی به جای سیمان پرتلند نیز موجب افزایش جذب آب مؤئینه در تمامی سنین در مقایسه با بتن شاهد شده‌است. در نهایت جایگزینی ۲۰ درصد سرباره به جای سیمان بهترین نتایج را در راستای کاهش میزان جذب آب مؤئینه داشته و بر اساس نتایج بدست آمده در این تحقیق، استفاده از پوزولان طبیعی با هدف بهبود جذب آب توصیه نمی‌گردد.
- با افزایش نسبت آب به مواد سیمانی، مقاومت الکتریکی سطحی بتن کاهش یافته و با افزایش استفاده از مواد جایگزین سیمان،

- [13] I. Fattuhi, B. P. Hughes, Ordinary Portland Cement Mixes with Selected Admixtures Subjected to Sulfuric Acid Attack. *ACI Materials Journal*, 85(6) (1988) 512-518.
- [14] Sersale, G. Frigione, L. Bonavita, Acid Depositions and Concrete Attack: Main Influences. *Cement and concrete research*, 28(1) (1988) 19-24.
- [15] Ramezaniapour, A.A.; Peidaiesh, M; Concrete knowledge (materials, properties, technology), Amirkabir university of technology press, Tehran, Iran (2010).
- [16] A. Ramezaniapour, *Cement Replacement Materials: Properties, Durability, Sustainability*, Springer (2014).
- [17] G. Alexander, C. Fourie, Performance of Sewer Pipe Concrete Mixtures with Portland and Calcium Aluminate Cements Subject to Mineral and Biogenic Acid Attack. *Materials and Structures*, 44(1) (2011) 313-330.
- [18] S. Aydin, H. Yazici, H. Yigiter, B. Baradan, Sulfuric acid resistance of high-volume fly ash concrete. *Building and Environment*, 42(2), (2007) 717-721.
- [19] J. Monteny, N. De Belie, L. Taerwe, Resistance of different concrete mixtures to sulfuric acid. *Materials & Structures*, 36(4), (1994) 242-249.
- [20] Y. Senhadji, G. Escadeillas, M. Mouli, H. Khelafi, Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar. *Powder Technology*, 254, (2014) 314-323.
- [21] J. Monteny, E. Vincke, A. Beeldens, N. De Belie, L. Taerwe, D. Van Gemert, W. Verstraete, Chemical, Microbiological and In-Situ Test Methods for Biogenic Sulfuric Acid Corrosion of Concrete, *Cement and Concrete Research*, 30(4), (2000) 623-634.
- [22] E. Vincke, E. V. Wanseele, J. Monteny, A. Beeldens, N. De Belie, L. Taerwe, W. Verstraete, Influence of Polymer Addition on Biogenic Sulfuric Acid Attack of Concrete, *International Biodeterioration & Biodegradation*, 49(4), (2002) 283-292.
- [23] L. Rombe'n, Aspects of Testing Methods for Acid Attack on Concrete., CBI Forskning Research, Cement-och betong institutet, Stockholm, (1979).
- [24] Z. T. Chang, X.J. Song, R. Munn, M. Marosszeky, Using Limestone Aggregates and Different Cements for Enhancing Resistance of Concrete to Sulphuric Acid Attack., *Cement and Concrete Research*, 35(8), (2005) 1486-1494.
- [25] Road, house and urban development research center, Iranian concrete mix design, Road, house and urban development research center Press (In Persian).
- [26] ASTM C989, Standard specification for slag cement for use in concrete and mortars, ASTM international, West
- در راستای ارزیابی عملکرد نمونه‌های بتنی در برابر حمله سولفوریک اسید عوامل زیر به ترتیب اهمیت معرفی می‌گردند.
 - مقدار کل مواد سیمانی مورد استفاده.
 - میزان بهره‌گیری از مواد جایگزین سیمان و به تبع آن کاهش مقدار آهک در ساختار خمیر سیمان.
 - نفوذپذیری بتن و ملات.
- مراجع**
- [1] P.C. Aitcin, *High performance concrete*. CRC Press. (2011).
- [2] SHRP-C/FR-91-103, High performance concretes, a state of the art report. Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC, 1991.
- [3] FIP/CEB, High strength concrete, state of the art report. Bulletin d'Information No. 197 (1990).
- [4] M. Peterson, High-performance and self-compacting concrete in house building. Field tests and theoretical studies of possibilities and difficulties. Lund University, (2008).
- [5] ACI 363R-10, Guide to Quality Control and Testing of High-Strength Concrete, American Concrete Institute (ACI), (2010).
- [6] E. Shakeri, F. Bahman Zadeh, Evaluation Methods for Increasing the Durability of Concrete and Its Effect on the Economy. 8th National Congress on Civil Engineering, Babol, Iran, (2014) (In Persian).
- [7] P. Mehta, P. J. M. Monteiro, *Concrete, Microstructure Properties and Materials*. McGraw-Hill Professional (2005).
- [8] P. C. Hewlett, *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. Butterworth-Heinemann (2003).
- [9] M. Alexander, A. Bertron, N. De Belie, Performance of Cement-based Materials in Aggressive Aqueous Environments. Springer (2013).
- [10] Allahverdi, F. Skvara, Acidic Corrosion of Hydrated Cement Based Materials Part2. Kinetics of the Phenomenon and Mathematical Models. *Ceramics-Silikáty*, 44(4) (2000) 152-160.
- [11] Rahmani, A. A. Ramazaniapour, Effect of Binary Cement Replacement Materials on Sulfuric Acid Resistance of Dense Concretes. *Magazine of concrete research*, 60(2) (2008) 145-155.
- [12] Hewayde, M. Nehdi, E. Allouche, G. Nakhla, Effect of Mixture Design Parameters and Wetting-Drying Cycles on Resistance of Concrete to Sulfuric Acid Attack. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(2) (2007) 155-163.

- [30] Florida Department of Transportation (FDOT). Florida Method of Test for Concrete Resistivity as an Electrical Indicator of its Permeability, Florida Department of Transportation (2004).
- [31] ASTM C597-09, Standard test method for pulse velocity through concrete, ASTM international, West Conshohocken, PA, (2009).
- [32] ASTM C1012, Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2004).
- Conshohocken, PA, (2014).
- [27] ASTM C618-12, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete, ASTM international, West Conshohocken, PA. (2012).
- [28] ASTM C494, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete., ASTM International, West Conshohocken, PA. (2014).
- [29] EN 480-5, Admixtures for concrete, mortar and grout. Test methods. Determination of capillary absorption, European Standard (EN), (1997).

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

A. A. Ramezaniapour, A. Zolfagharnasab, F. Bahmanzadeh, A. M. Ramezaniapour, Assessment of High Performance Concrete Containing Mineral Admixtures Under Sulfuric Acid Attack, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(1) (2018) 121-138.

DOI: 10.22060/ceej.2016.696

