

تأثیر اسید سولفوریک بر بتن زیست سازگار حاوی سرباره ذغال سنگ و نانوسیلیس

سمیه بختیاری*

استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان

رضا سنجری میجان

دانشجوی سابق کارشناسی گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان

چکیده

بتن یکی از پرمصرف ترین مواد در دنیا به شمار می رود، از این رو بهبود خواص مکانیکی و همچنین زیست سازگاری آن مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. امروزه استفاده از پوزولان‌های طبیعی به‌عنوان راه حلی در جهت رسیدن به این اهداف مطرح شده است. در این تحقیق تأثیر مقادیر متفاوت پوزولان سرباره ذغال سنگ و همچنین ترکیب درصد‌های مختلف نانو سیلیس بر خواص بتن در محیط سولفاته مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور برای هر طرح اختلاط، شش نمونه مکعبی $5 \times 5 \times 5$ cm ساخته شد و پس از ۲۸ روز عمل آوری در آب، مقاومت فشاری نیمی از نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت و سایر نمونه‌ها ۱۴ روز دیگر در اسید سولفوریک ۳۰٪ عمل آوری شدند. نتایج نشان داد استفاده از پوزولان در حدود ۱۵ درصد وزنی سیمان در بتن، موجب افزایش مقاومت فشاری بتن نسبت به نمونه‌های بدون پوزولان گردید. همچنین به کارگیری پوزولان در بتن، منجر به کاهش جذب آب توسط نمونه‌ها شد که این امر می‌تواند منجر به بهبود پارامترهای دوام در بتن شود. استفاده از نانو سیلیس به مقدار زیادی مقاومت فشاری بتن را در اکثر نمونه‌های حاوی نانو-سیلیس نسبت به نمونه‌های بدون نانو سیلیس افزایش داد و این افزایش متناسب با مقدار نانو سیلیس به کار رفته بود. علی‌رغم تأثیر مثبت پوزولان و نانوسیلیس بر خواص بتن، این ترکیبات نتوانستند تأثیر مثبتی بر مقاومت فشاری بتن در معرض اسید سولفوریک داشته باشند و نمونه‌هایی که حاوی سیمان بودند مقاومت فشاری بیشتری نسبت به نمونه‌هایی که درصدی از سیمان آن‌ها به‌وسیله پوزولان جایگزین شده بود نشان دادند.

واژه‌های کلیدی: بتن، پوزولان سرباره ذغال سنگ، نانو سیلیس، اسید سولفوریک.

۱- مقدمه

پوزولان موجب بهبود خواص بتن پلاستیک از قبیل کاهش نفوذ پذیری، کاهش مدول الاستیسیته و افزایش دوام در برابر عوامل مخرب ضمن حفظ مقاومت فشاری می‌گردد [۵]. مستوفی نژاد و نظری منفرد ثابت کردند که افزودن پوزولان به بتن موجب افزایش دوام آن در محیط‌های سولفاتی می‌شود [۶]. رمضانپور و همکاران پی بردند به کار بردن پوزولان‌ها در بتن موجب بهبود خواص مکانیکی و افزایش دوام و عمر مفید بتن می‌شود [۷].

از آنجایی که به‌طور معمول به کارگیری پوزولان‌ها موجب کاهش مقاومت فشاری بتن می‌شود، به منظور کاهش این اثر منفی، از نانو سیلیس در بتن استفاده می‌شود. استفاده از ذرات نانو سیلیس می‌تواند تراکم ذرات در بتن را افزایش دهد که این امر به افزایش چگالی نانو ساختارهای تشکیل دهنده بتن و در نتیجه بهبود ویژگی‌های مکانیکی آن می‌انجامد. مهرآوران و سهرابی در تحقیقاتشان دریافتند که، به کارگیری نانو سیلیس موجب افزایش مقاومت بتن پوزولانی می‌شود [۸]. جعفرزاده و همکاران نیز توانایی نانو سیلیس را در جبران کاهش مقاومت ناشی از کاربرد پوزولان‌ها در بتن را تایید کردند [۹]. خانزادی و همکاران به این نتیجه رسیدند نانو سیلیس علاوه بر نقش پرکنندگی در میکرو-ساختارهای بتن، مانند یک فعال‌کننده در واکنش‌های پوزولانی عمل می‌کند [۱۰]. سیواسای و همکاران ثابت کردند استفاده از نانو سیلیس موجب افزایش مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی بتن می‌شود [۱۱]. ماهسواران و همکاران دریافتند به کار گرفتن نانو-سیلیس در بتن موجب بهبود خواص مکانیکی و بهبود دوام نمونه‌ها می‌شود [۱۲]. یانگ در تحقیقاتش به این نتیجه رسید که نانو-سیلیس باعث افزایش مقاومت کششی و حد انقباض بتن می‌شود [۱۳]. البته نانو سیلیس به دلیل دارا بودن سطح مخصوص بسیار زیاد میزان آب مورد استفاده در بتن را افزایش می‌دهد [۱۴] که برای جلوگیری از افزایش نسبت آب به سیمان در طرح اختلاط، از فوق روان کننده استفاده می‌گردد.

یکی از عواملی که موجب کاهش عمر سازه‌های بتنی می‌شود، حمله‌های سولفاتی است. معمولی ترین و متداول ترین راهکار برای مقابله با این حملات، استفاده از سیمان‌های تپ ۲ و ۵ به جای سیمان تپ ۱ می‌باشد [۱۵]. راهکار دیگر، استفاده از موادی مانند خاکستر بادی، میکروسیلیس

بتن ماده‌ای متشکل از سیمان، آب و سنگدانه است که به عنوان یکی از پر مصرف‌ترین مواد در جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. فرآیند تهیه سیمان با تولید آلاینده‌های گازی و گرمایی همراه است که حجم بالای تولید این آلاینده‌ها می‌تواند موجب به خطر افتادن محیط زیست و زندگی بشر شود. این آلاینده‌ها در نتیجه واکنش-های شیمیایی بین مواد استفاده شده و احتراق سوخت‌های مورد استفاده در صنعت سیمان تولید می‌شوند. سوخت‌های مورد استفاده در صنعت سیمان عبارتند از: گاز طبیعی، گازوییل، مازوت، زغال سنگ و کک که در ایران به علت دارا بودن ذخایر عظیم نفت و گاز مصرف زغال سنگ و کک ناچیز می‌باشد [۱]. راهکارهای کاهش تولید آلاینده‌ها در صنعت سیمان عبارتند از:

۱. افزایش بازدهی فرآیند تولید سیمان

۲. کاهش مقدار تولید سیمان

یکی از روش‌های مرسوم به‌منظور رسیدن به راهکار دوم، استفاده از پوزولان‌ها در بتن است. استفاده از این مواد هم از نظر زیست محیطی و هم از نظر اقتصادی بسیار مفید است. امروزه به مسئله زیست سازگاری بتن همچون دیگر خواص بتن اهمیت داده شده است. پوزولان‌ها در بهبود خواص مکانیکی بتن هم می‌توانند موثر واقع شوند [۲].

طبق استاندارد ASTM-C618، پوزولان به‌عنوان ماده‌ای سیلیسی یا سیلیسی آلومیناتی است که به خودی خود ارزش چسبندگی ندارد، اما به شکل ذرات بسیار ریز و در مجاورت رطوبت با درجه حرارت‌های معمولی با هیدروکسید کلسیم واکنش شیمیایی نشان داده و ترکیباتی را به‌وجود می‌آورد که خاصیت سیمانی و چسبندگی دارند [۳].

از نقطه نظر تاثیر استفاده از پوزولان‌ها بر خواص مکانیکی بتن، نشان داده شده است، استفاده از مواد پوزولانی موجب افزایش زمان گیرش، افزایش کارایی و چسبندگی، کاهش آب انداختگی و جداشدگی در بتن تازه و کاهش نفوذپذیری، کاهش تخلخل، افزایش مقاومت فشاری بلند مدت و افزایش مقاومت بتن در برابر حملات شیمیایی می‌شود. همچنین این مواد باعث کاهش خوردگی آرماتورهای فولادی در بتن‌هایی که در معرض حملات شیمیایی قرار دارند، می‌شوند [۴]. افشین و همکاران نشان دادند

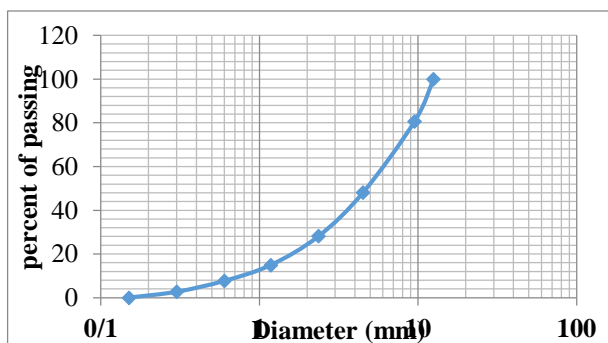
خواص بتن، درصدهای متفاوتی از آن ها به صورت طرح های شانزده گانه مورد استفاده قرار گرفت. در هر طرح، سه نمونه مکعبی در قالب های ۵*۵*۵cm ساخته شد (شکل ۲). طرح اختلاط مربوط به نمونه شاهد در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۱- نتایج حاصل از XRF نمونه پوزولان سرباره ذغال سنگ

ترکیب شیمیایی	درصد
SiO ₂	۴۱/۱۱
Al ₂ O ₃	۱۹/۷
Fe ₂ O ₃	۱۶/۵
Na ₂ O	۰/۴۱۱
K ₂ O	۴/۵
MgO	۱/۰۵
SO ₃	۱/۷۲
P ₂ O ₅	۰/۰۹۶
CaO	۰/۹۸۱
TiO ₂	۰/۷۷۴

جدول ۲- برخی مشخصات نانو سیلیس

درصد خلوص	سطح ویژه (m ² /g)	اندازه ذرات (nm)	چگالی (Kg/m ³)
۹۸≤	۱۹۳	۲۰-۳۰	۲۰۰



شکل ۱- منحنی دانه بندی سنگدانه ها

جدول ۳- برخی مشخصات سیمان پرتلند تیپ دو کارخانه سیمان کرمان

CaO	SO ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
۶۳	۲/۳	۲	۴	۵	۲۱/۷۴

و پوزولانهای طبیعی، به عنوان جایگزین سیمان می باشد [۱۶]. رمضانیانپور و همکاران نشان دادند استفاده از پوزولانهای طبیعی در کاهش اثرات مخرب حملات سولفات ها موثر است [۱۷].

سیاد و همکاران به این نتیجه رسیدند استفاده از پوزولان طبیعی الجزایری موجب افزایش مقاومت بتن خودتراکم در برابر حملات هیدروکلریک اسید و سولفوریک اسید شد [۱۸].

با توجه به مصرف روز افزون سیمان و اجتناب ناپذیر بودن این امر و همچنین با توجه به خطرات ناشی از تولید سیمان و آلودگی هوا، نیاز به تولید فرآورده های جدیدی از سیمان است که ضمن حفظ خصوصیات مکانیکی بتن، زیست سازگار بوده و تاثیر کمتری بر آلودگی محیط زیست داشته باشند. بنابراین هدف از این مطالعه، بررسی اثر استفاده از مواد زیست سازگار در ترکیب بتن بدون کاهش خصوصیات مکانیکی آن بود. همچنین تاثیر ترکیبات پوزولانی بر خصوصیات بتن در معرض اسید سولفوریک نیز مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- مواد مورد استفاده

پوزولان

پوزولان سرباره ذغال سنگ از معادن ذغال سنگ شهرستان زرن در استان کرمان تهیه شد. ترکیب شیمیایی حاصل از آزمایش XRF این پوزولان در جدول ۱ نشان داده شده است.

نانو سیلیس

نانوسیلیس مورد استفاده در این تحقیق ساخت شرکت فناوری های نوین فدک اصفهان می باشد، که مشخصات آن در جدول ۲ نشان داده شده است.

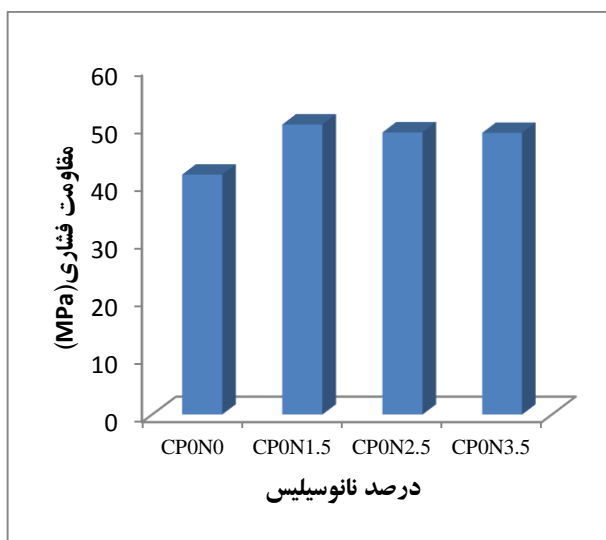
سیمان و سنگدانه

سیمان مورد استفاده، سیمان پرتلند تیپ ۲ کارخانه سیمان کرمان (برخی از خصوصیات آن در جدول ۳ نشان داده شده است) و سنگدانه های مصرفی از نوع رودخانه ای شسته هستند. منحنی دانه بندی سنگدانه ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲-۲- طرح اختلاط

در این تحقیق به منظور بررسی دقیق اثر پوزولان و نانو سیلیس بر

نمونه‌ها و نمونه شاهد بیشتر بود. با توجه به این که در همه طرح اختلاط‌های به کار گرفته شده در این مطالعه فقط درصد نانوسیلیس و ذغال سنگ متفاوت بود و سایر خصوصیات مانند نسبت آب به سیمان، مقدار فوق روان کننده و سنگدانه‌ها ثابت در نظر گرفته شد، کاهش مقاومت نمونه‌های دارای مقادیر بیشتر نانوسیلیس نسبت به نمونه دارای ۱/۵ درصد نانوسیلیس، می‌تواند ناشی از عدم وجود آب کافی جهت ایجاد چسبندگی بین ذرات باشد که این کمبود آب ناشی از افزایش سطح جانبی ذرات و جذب بیشتر آب در شرایط مقدار ثابت آب می‌باشد. البته تفاوت معنی‌داری در مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی مقادیر متفاوت نانو سیلیس نسبت به یکدیگر مشاهده نشد، اما تفاوت این نمونه‌ها از نظر مقاومت فشاری نسبت به نمونه فاقد نانو سیلیس بسیار زیاد بود. جعفر زاده و همکاران (۱۳۸۹) نیز نشان دادند استفاده از نانو سیلیس می‌تواند مقاومت فشاری بتن را افزایش دهد [۹]. شیخ و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند افزایش مقدار نانوسیلیس تا ۲ درصد موجب افزایش مقاومت فشاری و مقادیر بیشتر از آن موجب کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌شود. [۱۹]



شکل ۳- تاثیر مقادیر متفاوت نانو سیلیس بر مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن

۳-۲- تاثیر پوزولان سرباره ذغال سنگ بر مقاومت فشاری بتن

تاثیر سرباره ذغال سنگ بر مقاومت فشاری بتن در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود استفاده از پوزولان



شکل ۲- نمونه مکعبی بتن شاهد

جدول ۴- جزئیات طرح اختلاط نمونه شاهد

w/c	سیمان (Kg/m ³)	فوق روان کننده (%)	سنگدانه (Kg/m ³)	مدول نرمی سنگدانه‌ها
۰/۴۵	۴۰۰	۱	۱۷۲۵	۴/۴۲

نامگذاری نمونه‌های مورد آزمایش بدین صورت بود: C: سیمان معمولی، P: پوزولان، N: نانو سیلیس و زیروند های P و N نشان- دهنده درصد جایگزینی این مواد به جای سیمان بر حسب درصد وزنی سیمان. نمونه های ساخته شده حدود ۲۴ ساعت در قالب نگهداری، سپس به درون مخزن آب منتقل شدند و پس از پایان ۲۸ روز عمل آوری، به منظور تعیین مقاومت فشاری از قالب ها خارج شدند. به منظور بررسی تاثیر پوزولان و نانوسیلیس بر مقاومت فشاری بتن در معرض اسید سولفوریک، نمونه‌ها پس از پایان ۲۸ روز عمل آوری به محلول ۳۰ درصد اسید سولفوریک انتقال داده شدند و پس از ۲ هفته قرارگیری در محلول، خارج و مقاومت فشاری آن‌ها اندازه گیری شد. مقاومت فشاری نمونه‌ها با دستگاه مدل ML 802-4 B 14، ساخت شرکت TEMCO اندازه گیری شد. اعداد بدست آمده از دستگاه به مگاپاسکال تبدیل شدند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تاثیر نانو سیلیس بر مقاومت فشاری بتن

شکل ۳ تاثیر استفاده از درصد‌های متفاوت نانو سیلیس را بر مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن نشان می‌دهد. جایگزینی سیمان با نانو سیلیس منجر به افزایش مقاومت فشاری بتن گردید و این افزایش در نمونه‌ای که حاوی ۱/۵ درصد نانو سیلیس بود نسبت به دیگر

فشاری را نسبت به نمونه‌های بدون پوزولان کاهش داد، اما با این وجود، مقاومت بسیار خوبی را نشان داده است (حدود 34 Mpa)، که با توجه به سایر جنبه‌ها از جمله صرفه اقتصادی ناشی از کاهش مصرف سیمان و کاهش آلودگی محیط زیست ناشی از کاهش تولید سیمان، قابل اغماض است.

مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی $3/5\%$ نانو سیلیس بدون پوزولان و یا حاوی 10% درصد پوزولان (به ترتیب $\text{CP}_{10}\text{N}_{3.5}$ و $\text{CP}_0\text{N}_{3.5}$) بیشتر از نمونه شاهد بود، اما نمونه‌های $3/5\%$ درصد نانو سیلیس همراه با 15% و 25% پوزولان، نسبت به نمونه شاهد، مقاومت فشاری کمتری نشان دادند (جدول ۵). بیشترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه $3/5\%$ درصد نانو سیلیس و 10% درصد پوزولان بود. جعفر نژاد و سهرابی (۱۳۸۹) نشان دادند به دلیل فعالیت پوزولانی زیاد نانو سیلیس، می‌توان از آن در بتن‌های حاوی پوزولان تفتان برای جبران کاهش مقاومت ناشی از پوزولان تفتان استفاده نمود [۹].

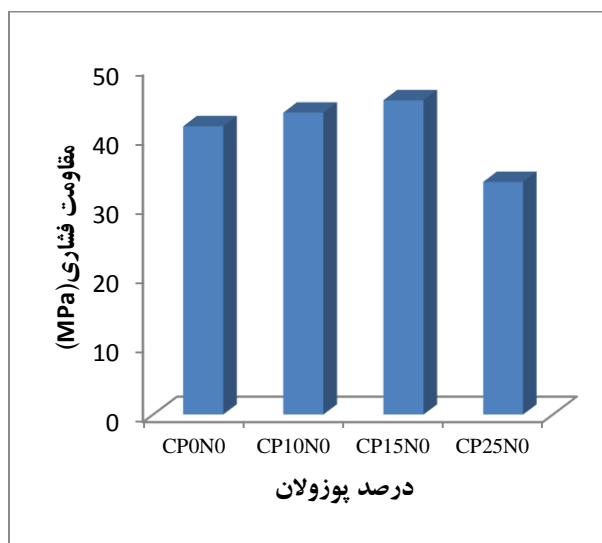
۳-۴- تأثیر افزودن پوزولان سرباره‌ای و نانو سیلیس بر جذب آب نمونه‌ها

در نمونه‌های دارای پوزولان، در بین نمونه‌های بدون نانو سیلیس و نمونه‌های دارای 25% درصد پوزولان، کمترین جذب آب مربوط به نمونه‌های دارای 15% درصد پوزولان بود. در نمونه‌های با $1/5\%$ درصد و $3/5\%$ درصد نانو سیلیس، کمترین جذب آب را نمونه‌های با 10% درصد پوزولان داشتند. در بین نمونه‌های بدون پوزولان کمترین جذب آب مربوط به نمونه‌های با $3/5\%$ درصد نانو سیلیس بود (جدول ۶). خانزادی و همکاران به این نتیجه رسیدند که افزودن نانو سیلیس موجب کاهش جذب آب بتن می‌شود [۱۰]. همچنین رضانیانپور و همکاران دریافتند که افزودن پوزولان به بتن موجب بهبود پارامتر دوام در بتن می‌شود [۷].

۳-۵- تأثیر افزودن پوزولان سرباره ذغال سنگ بر مقاومت فشاری نمونه‌های عمل آوری شده در اسید سولفوریک 30%

مقاومت فشاری تمامی نمونه‌هایی که در معرض اسید سولفوریک بودند کاهش پیدا کرد. در نمونه‌های حاوی پوزولان، با افزایش درصد پوزولان، مقاومت فشاری ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت (شکل ۵). البته مقاومت فشاری نمونه با 15% درصد پوزولان بیشتر

در مقادیر 10% و 15% درصد جایگزین سیمان توانست مقاومت فشاری بتن را افزایش دهد، ولی با افزایش بیشتر پوزولان یعنی 25% درصد جایگزینی، مقاومت فشاری بتن کاهش یافت. افت مقاومت فشاری بتن در نتیجه استفاده از پوزولان به جای سیمان در مطالعات برخی از محققین نیز ذکر شده است. مستوفی نژاد و همکاران نشان دادند با افزایش مقدار سرباره نسبت به مواد سیمانی، افت مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار افزایش مقاومت فشاری مربوط به نمونه‌ای است که در آن 15% درصد سیمان با پوزولان جایگزین شده است [۵].



شکل ۴- تأثیر مقادیر متفاوت پوزولان بر مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن

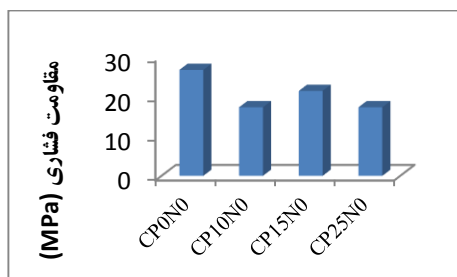
۳-۳- تأثیر افزودن همزمان پوزولان سرباره‌ای و نانو سیلیس بر مقاومت فشاری بتن

مقاومت فشاری نمونه‌های با $1/5\%$ نانو سیلیس و مقادیر متفاوت پوزولان، با افزایش مقدار پوزولان، کاهش یافت به نحوی که در نمونه‌های دارای 25% پوزولان به مقداری کمتر از مقاومت فشاری نمونه شاهد رسید.

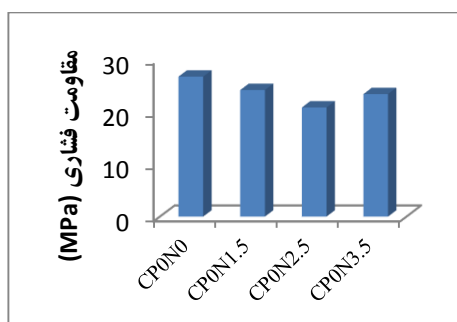
در نمونه‌های دارای $2/5\%$ نانو سیلیس نیز نمونه بدون پوزولان دارای بیشترین مقاومت فشاری بود. در نمونه‌های با $2/5\%$ نانو سیلیس که حاوی پوزولان هم بودند، با افزایش میزان پوزولان، مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش یافت، به طوری که مقاومت فشاری نمونه‌های دارای 15% و 25% پوزولان کمتر از شاهد بود. گرچه افزایش میزان استفاده از پوزولان تا حدود 25% درصد وزنی سیمان، مقاومت

جدول ۶- تاثیر افزودن همزمان سرباره و نانو سیلیس بر جذب آب

نمونه	جذب آب (g)	درصد افزایش یا کاهش جذب آب نسبت به نمونه شاهد
CP ₀ N ₀	۹/۶	-
CP ₁₀ N ₀	۸/۹	-۷/۳
CP ₁₅ N ₀	۸/۴	-۱۲/۵
CP ₂₅ N ₀	۸/۶	-۱۰/۴
CP ₀ N _{1.5}	۸/۹	-۷/۳
CP ₁₀ N _{1.5}	۷/۹	-۱۷/۹
CP ₁₅ N _{1.5}	۸	-۱۶/۷
CP ₂₅ N _{1.5}	۸/۷	-۹/۴
CP ₀ N _{2.5}	۸/۶	-۱۰/۴
CP ₁₀ N _{2.5}	۸/۳	-۱۳/۵
CP ₁₅ N _{2.5}	۸/۲	-۱۴/۶
CP ₂₅ N _{2.5}	۸/۴	-۱۲/۵
CP ₀ N _{3.5}	۷/۶	-۲۰/۸
CP ₁₀ N _{3.5}	۷/۴	-۲۲/۹
CP ₁₅ N _{3.5}	۸/۱	-۱۵/۶
CP ₂₅ N _{3.5}	۸/۱	-۱۵/۶



شکل ۵- تاثیر افزودن پوزولان سرباره ذغال سنگ بر مقاومت فشاری نمونه های عمل آوری شده در اسید سولفوریک ۳۰٪



شکل ۶- تاثیر افزودن نانو سیلیس بر مقاومت فشاری نمونه های عمل آوری شده در اسید سولفوریک ۴۰٪

از مقاومت فشاری قابل قبول برای سازه های بتنی (۲۰ Mpa) است. بنابراین با جایگزین کردن مقدار مناسبی از پوزولان به جای سیمان (که در اینجا این مقدار ۱۵ درصد به دست آمد) هم می توان به مقاومت مطلوبی دست پیدا کرد و هم اثرات زیست محیطی مضر مصرف سیمان را کاهش داد.

۳-۶- تاثیر افزودن نانو سیلیس بر مقاومت فشاری نمونه های عمل آوری شده در اسید سولفوریک ۳۰٪

تغییرات مقاومت فشاری نمونه های حاوی ۱/۵ و ۳/۵ درصد نانو سیلیس نسبت به نمونه شاهد کم بود (شکل ۶). مقاومت فشاری نمونه هایی که حاوی درصد های مختلفی از نانو سیلیس بودند نیز در حد قابل قبول بود و این نمونه ها نیز مانند نمونه شاهد توانستند در برابر حملات اسیدی مقاومت نشان دهند.

جدول ۵- تاثیر همزمان افزودن سرباره و نانو سیلیس بر مقاومت فشاری

نمونه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (Mpa)	درصد افزایش یا کاهش مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد
CP ₀ N ₀	۴۱/۶	-
CP ₁₀ N ₀	۴۳/۶	+۴/۸
CP ₁₅ N ₀	۴۵/۳	+۸/۹
CP ₂₅ N ₀	۳۳/۶	-۱۹/۲
CP ₀ N _{1.5}	۵۰/۲	+۲۰/۷
CP ₁₀ N _{1.5}	۴۶	+۱۰/۶
CP ₁₅ N _{1.5}	۴۲/۴	+۱/۹
CP ₂₅ N _{1.5}	۲۹/۶	-۲۸/۸
CP ₀ N _{2.5}	۴۸/۹	+۱۷/۵
CP ₁₀ N _{2.5}	۴۴/۷	+۷/۵
CP ₁₅ N _{2.5}	۴۱/۲	-۱
CP ₂₅ N _{2.5}	۳۱	-۲۵/۵
CP ₀ N _{3.5}	۴۸/۸	+۱۷/۳
CP ₁₀ N _{3.5}	۵۲/۵	+۲۶/۲
CP ₁₅ N _{3.5}	۳۸/۲	-۸/۱۷
CP ₂₅ N _{3.5}	۳۱/۵	-۲۴/۳

آلومینات (C_3A) واکنش نشان داده و اترینگایت ($C_6AS_3H_{32}$) را تشکیل می‌دهد.

سنگ گچ و اترینگایت در مقایسه با محصولات اولیه حجم زیادی را اشغال کرده که در نتیجه باعث انبساط شده و ترک‌هایی را در بتن ایجاد می‌کنند که به کاهش ظرفیت عضو منجر می‌شود. تصاویر میکروسکوپ الکترونی دو نمونه بتن شاهد و بتن حاوی ۱/۵ درصد نانوسیلیس که مقاومتی تقریباً مشابه با مقاومت نمونه شاهد داشته است در شکل ۷ نشان داده شده است. این تصاویر شاهی بر تشکیل بلورهای سولفات کلسیم (گچ) به صورت کریستال‌های تخته‌ای و ایجاد ترک‌هایی در ساختار بتن هستند. با توجه به این تصاویر در این نمونه‌های بتنی اترینگایت که نسبت به گچ اثرات تخریبی بیشتری دارد تشکیل نشده است

جدول ۷ - تأثیر همزمان افزودن سرباره و نانو سیلیس بر مقاومت فشاری نمونه های عمل آوری شده در اسید سولفوریک.

نمونه	مقاومت فشاری (Mpa)	درصد افزایش یا کاهش مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد
CP ₀ N ₀	۲۶/۷	-
CP ₁₀ N ₀	۱۷/۳	-35/3
CP ₁₅ N ₀	۲۱/۴	-19/9
CP ₂₅ N ₀	۱۷/۳	-35/3
CP ₀ N _{1.5}	۲۴/۱	-9/6
CP ₁₀ N _{1.5}	۲۱/۶	-19/1
CP ₁₅ N _{1.5}	۱۵/۹	-40/4
CP ₂₅ N _{1.5}	۱۲/۶	-52/9
CP ₀ N _{2.5}	۲۰/۸	-22/1
CP ₁₀ N _{2.5}	۱۹/۶	-26/5
CP ₁₅ N _{2.5}	۱۲/۲	-54/4
CP ₂₅ N _{2.5}	۸/۸	-66/9
CP ₀ N _{3.5}	۲۳/۳	-12/5
CP ₁₀ N _{3.5}	۲۶/۵	-0/7
CP ₁₅ N _{3.5}	۱۸/۸	-29/4
CP ₂₅ N _{3.5}	۱۴/۳	-46/3

۳-۷- تأثیر افزودن همزمان پوزولان سرباره ذغال سنگ و نانو سیلیس بر مقاومت فشاری نمونه های عمل آوری شده در اسید سولفوریک ۳۰٪

جدول ۷ نشان‌دهنده تأثیر همزمان جایگزینی پوزولان سرباره و نانوسیلیس به جای سیمان است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که در بین نمونه های دارای پوزولان یکسان، با افزایش درصد نانو سیلیس، مقاومت فشاری تقریباً افزایش نشان داده است، به گونه ای که بیشترین مقاومت مربوط به نمونه های دارای بیشترین مقدار نانو سیلیس می‌باشد. در بین نمونه‌های دارای نانو سیلیس، با افزایش درصد پوزولان، مقاومت فشاری کاهش یافت. بین نمونه‌های حاوی نانوسیلیس، به جز نمونه حاوی ۳/۵ درصد نانوسیلیس، نمونه‌هایی که بدون پوزولان سرباره بودند بیشترین مقاومت را نشان دادند. نمونه دارای ۳/۵ درصد نانوسیلیس با درصد پوزولان ۱۰ درصد در بین نمونه‌های با ۳/۵ درصد نانوسیلیس بیشترین مقاومت را داشت.

۳-۸- تأثیر افزودن پوزولان سرباره ذغال سنگ و نانو سیلیس بر کاهش جرم نمونه های عمل آوری شده در اسید سولفوریک ۴۰٪

نتایج نشان داد در بین نمونه‌های بدون نانو سیلیس و همچنین نمونه های دارای ۱/۵٪ نانو سیلیس، با افزایش درصد پوزولان مصرفی، اثر خوردگی اسید بیشتر می‌شود. در نمونه‌های بدون پوزولان نیز، با بیشتر شدن میزان نانو سیلیس استفاده شده، کاهش جرم افزایش می‌یابد. کاهش جرم نمونه‌های بدون پوزولان دارای ۲/۵ و ۳/۵ درصد نانو سیلیس نسبت به نمونه شاهد بیشتر بود.

۳-۹- تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه‌های در معرض سولفات

تخریب بتن به وسیله اسید سولفوریک، شامل دو مرحله است که در مرحله اول، اسید سولفوریک با محصولات هیدراتاسیون مانند هیدروکسید کلسیم و سیلیکات کلسیم هیدراته شده واکنش می‌دهد و سنگ گچ ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) تولید می‌کند. در مرحله دوم، سنگ گچ با تری کلسیم

جدول ۸- تاثیر افزودن همزمان سربراره و نانو سیلیس بر کاهش جرم نمونه‌ها

کاهش جرم (g)	نمونه	کاهش جرم (g)	نمونه	کاهش جرم (g)	نمونه
۳۳/۲	CP ₀ N _{2.5}	۹	۳۲/۱	CP ₀ N ₀	۱
۴۲/۱	CP ₁₀ N _{2.5}	۱۰	۳۷/۹	CP ₁₀ N ₀	۲
۵۱/۵	CP ₁₅ N _{2.5}	۱۱	۴۰/۴	CP ₁₅ N ₀	۳
۶۸/۲	CP ₂₅ N _{2.5}	۱۲	۵۳/۴	CP ₂₅ N ₀	۴
۳۸/۲	CP ₀ N _{3.5}	۱۳	۳۰/۶	CP ₀ N _{1.5}	۵
۴۵/۷	CP ₁₀ N _{3.5}	۱۴	۳۸/۵	CP ₁₀ N _{1.5}	۶
۴۸	CP ₁₅ N _{3.5}	۱۵	۴۳/۸	CP ₁₅ N _{1.5}	۷
۵۴/۳	CP ₂₅ N _{3.5}	۱۶	۶۵/۸	CP ₂₅ N _{1.5}	۸

۴- نتیجه گیری

۱- درصد بهینه استفاده از سربراره ذغال سنگ حدود ۱۵ درصد بود.
 ۲- استفاده از سربراره ذغال سنگ تا میزان ۱۵ درصد وزنی سیمان موجب افزایش مقاومت فشاری بتن شد.

۳- به کارگیری سربراره ذغال سنگ در بتن، با کاهش دادن میزان مصرف سیمان، موجب کاهش تولید سیمان و در نتیجه کاهش آلودگی‌های زیست محیطی می‌شود.

۴- استفاده از سربراره ذغال سنگ موجب کاهش جذب آب بتن شده و خاصیت دوام بتن را بهبود بخشید.

۵- از نظر اقتصادی، استفاده از سربراره ذغال سنگ در بتن بسیار باصرفه است.

۶- نانو سیلیس می‌تواند در افزایش مقاومت فشاری بتن نقش چشمگیری داشته باشد و همچنین کاهش مقاومت فشاری ناشی از جایگزینی سیمان توسط پوزولان را بهبود بخشد.

۷- استفاده از پوزولان سربراره ذغال سنگ و نانو سیلیس منجر به کاهش مقاومت فشاری بتن در محیط سولفات‌ها گردید ولی با این- حال در برخی از نمونه‌ها، مقاومت فشاری بتن در حد قابل قبول بود.

۵- مراجع

[۱] یاراحمدی؛ احمد؛ "آلاینده‌های سوختی در صنعت سیمان و نقش پوزولان در کاهش نسبت آن‌ها"؛ نشریه صنعت سیمان؛ ۱۲۷؛ ۲۲-۲۶، ۱۳۹۱.

[2] Shahmohamad, F. N., Mousazade, S., Effect of pozzolana on the environmental influence of cement industry. International Journal of Metallurgical & Materials Science and Engineering, 2015. 5: 21-20.

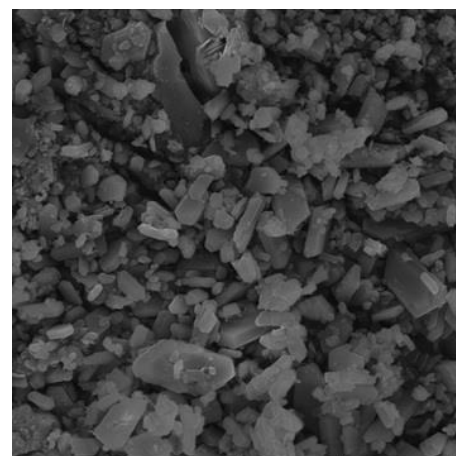
[3] ASTM C618. "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use a mineral admixture in concrete", 2003.

[4] Fajardo, G. and Valdez, P. and Pacheco, J., "Corrosion of steel rebar embedded in natural pozzolan based mortars exposed to chlorides", International Journal for Construction and Building Materials, 23, 768-774, 2009.

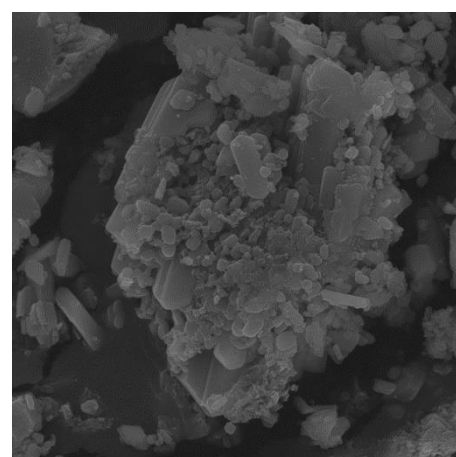
[۵] افشین؛ حسن؛ یثربی؛ سید شهاب الدین؛ صادقی دودران؛

رامین؛ "تاثیر مواد افزودنی پوزولانی بر خواص بتن پلاستیک" دومین کنگره مهندسی عمران؛ دانشگاه علم و صنعت؛ تهران.

۱۳۸۴.



(الف)



(ب)

شکل ۷- تصاویر میکروسکوپ الکترونی الف- نمونه شاهد

ب- نمونه حاوی ۱/۵ درصد نانو سیلیس

and Natural Pozzolan”, Cement and Concrete Composites, 361-802, 2000.

[۱۷] رمضانیانپور؛ علیرضا؛ پیدایش؛ منصور؛ آرامون؛ احسان؛ میرولد؛ سید سجاد؛ مهدیخانی؛ مهدی؛ اثر انواع پوزولان های طبیعی بر دوام بتن در برابر حمله سولفاتی؛ اولین کنفرانس ملی بتن؛ مرکز همایش های سازمان اسناد و کتابخانه های ملی ایران. ۱۳۸۸.

[18] Siad, H, Mesbah, H.A, Kamali Bernard, S, Khelafi, H, Mouli, M, "Influence of natural pozzolan on the behavior of self-compacting concrete under sulphuric and hydrochloric acid attacks, comparative study", The Arabian journal for science and engineering, 35, 1B, 2010.

[19] Shaikh, F.U.A., Supit, S.W.M., Sarker, P.K., A study on the effect of nano silica on compressive strength of high volume fly ash mortars and concretes, Materials and Design. 60: 433-442. 2014.

[۶] مستوفی نژاد؛ داوود؛ حسین نظری منفرد؛ حامد؛ افزودن سرباره و پودر سنگ آهک به بتن جهت افزایش دوام آن در محیط سولفاتی؛ پژوهشنامه حمل و نقل؛ ۲؛ ۱۴۵-۱۳۹، ۱۳۸۵.

[۷] رمضانیان پور؛ علی اکبر؛ مهدیخوانی؛ مهدی؛ پوریبک؛ پوریا؛ کیومرثی؛ محمد مهدی؛ زمانی؛ مهدی؛ "ارزیابی دوام و خصوصیات مکانیکی بتن های حاوی خاکستر پوسته برنج؛ اولین کنفرانس ملی بتن؛ ۱۳۸۸ مرکز همایش های سازمان اسناد و کتابخانه ملی ایران، ۱۳۸۸.

[۸] مهر آوران؛ محسن؛ سهرابی؛ محمدرضا؛ "بهبود خواص حاوی پوزولان تفتان با استفاده از نانو سیلیس؛ پنجمین کنگره مهندسی عمران؛ دانشگاه فردوسی مشهد؛ مشهد؛ ایران. ۱۳۸۹.

[۹] جعفرزاده؛ مهدی؛ سهرابی؛ محمدرضا؛ مروتی؛ جواد؛ "بررسی برخی خواص مکانیکی بتن حاوی پودر پوزولان بش آقاج و نانو سیلیس؛ پنجمین کنگره مهندسی عمران؛ دانشگاه فردوسی مشهد؛ مشهد؛ ایران. ۱۳۸۹.

[10] Khanzadi, Mostafa, Tadayon, Mohsen, Sepehri, Hamed, Sepehri, Mohammad, "Influence of Nano-Silica Particles on Mechanical Properties and Permeability of Concrete", Second international conference on sustainable construction materials and technologies, universita della marche, ancona, italy. 2010.

[11] Siva Sai, A, Swami, B.L.P., SaiKiran, B., Sastri, M.V., "Comparative studies on high strength concrete mixes using micro silica and nano silica", International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR), 1, 2013,

[12] Maheswaran, S., Bhuvaneshwari, B., Palani, G.S, Nagesh, R., Kalaiselvam, S, "An Overview on the Influence of Nano Silica in Concrete and a Research Initiative", Research Journal of Recent Sciences, 2, 17-24. 2013.

[13] Hongxia, Yang, "Strength and Shrinkage Property of Nano Silica Powder Concrete", 2nd International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology, 2012.

[14] Senff, L, Labrincha, J., "Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars", International Journal for Construction and Building Materials, 23, 669-67. 2009.

[15] ASTM Standard C150, "Standard specification for Portland cement", vol 04.01 ASTM Publication, United States, 1995.

[16] Irassar, F.; Gonzalez, M.; Rahhal, V.; "Sulfate resistance of type V cements with limestone filler

The effect of sulfuric acid on eco-friendly concrete containing coal slag and nano silica

S. Bakhtiari *

Assistant professor in Civil Engineering Department, Civil Engineering College, Sirjan University of Technology

R. Sanjari

BSc. , Civil Engineering Department, Civil Engineering College, Sirjan University of Technology

Abstract

Concrete is one of the most widely used materials in the world for various types of structures due to its durability. Cement is a major part of today's construction industry which demands solutions that consider both economical and ecological aspects. Cement manufacturers are continuously striving to achieve more efficient and environmentally-friendly production methods, therefore improvement of mechanical properties and eco-friendly environmental application of cement are very important. One way to achieve these goals is to use the pozzolan. Pozzolans are divided into two categories, namely the natural and the artificial. In recent years, the industry has shifted to using pozzolans because of their lower cost and accessibility. A pozzolan is a siliceous material that can be used as an inexpensive substitute for cement in mortar mixtures. Major sources of natural and manmade pozzolans include volcanic mineral deposits, fired and crushed clay, and fly ash. Natural pozzolans were used as pozzolanic cement in concrete mixtures to increase the long-term strength, the concrete durability, economic gain obtained by replacing a substantial part of the Portland cement by cheaper, pollution free and other material properties of Portland cement. Coal slag is one of the materials that is considered as a waste material which could have a promising future in construction of concrete. The objective of this paper is to examine the effect of several amounts of pozzolan-coal slag on compressive strength of concrete, and to examine the effect of nano silica on influence of coal ash on concrete compressive strength and water absorption. This paper presents the results of an experimental study on various compressive strength and water absorption tests on concrete containing coal slag and nano silica as partial replacement of cement. For this research work, the tests were conducted for various proportions of coal slag replacement with cement of 0%, 10%, 15%, and 25%, nano silica of 0%, 1.5%, 2.5% and 3.5% and combination of both of them in concrete. The obtained results were compared with those of control concrete made with ordinary Portland cement. In this research, the effect of several amounts of coal slag and nano silica on some properties of concrete were considered in the production of test samples of 5*5*5 cm. After casting the cubes, they were tested for compressive strength and water absorption. Results showed that compressive strength of samples with 10% and 15% pozzolan were increased, but compressive strength of samples with 25% pozzolan were decreased more than that of the control sample. Also, application of pozzolan resulted in less water sorption. The use of nano silica increased concrete compressive strength compared to samples without Nanosilica in most samples, and this increase was proportional to the amount of nano silica. Based on the these findings, it is concluded that Pozzolan coal slag is a suitable replacement for cement especially in presence of nano silica.

Keywords: Concrete, Coal Slag Pozzolan, Nano silica, sulfuric acid.

* Corresponding Author: bakhtiari@sirjantech.ac.ir