

تأثیر توأم نانوسیلیس و میکروسیلیس بر دوام بتن‌های با مقاومت بالا در برابر تهاجم اسید سولفوریک

حمید رحمانی^{۱*}، محسن جوکار^۲، محمد پروین نیا^۳

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج

hrahmani@yu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۱/۰۹

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۳/۰۸

چکیده- بتن به دلیل فراوانی مصالح، سازگاری با محیط زیست، مقاومت فشاری و دوام بالا و ارزان بودن یکی از پرکاربردترین مصالح ساختمانی است که در برخی موارد عمر مفید آن در محیط‌های خورنده مانند تهاجم اسیدها به شدت کاهش می‌یابد. در این پژوهش، دوام بتن‌های حاوی میکروسیلیس، نانوسیلیس و پودر کوارتز در برابر تهاجم اسید سولفوریک مورد بررسی قرار گرفته است. با به کارگیری چهار طرح اختلاط مختلف حاوی نانوسیلیس، میکروسیلیس و پودر کوارتز به عنوان فیلر سیمان، نمونه‌های بتنی ساخته شده و برای دستیابی به مقادیر بهینه مورد آزمایش‌های مختلف قرار گرفتند. نتایج حاکی از ارتباط مستقیم بین درصد جذب آب ۹۰ روزه و دوام نمونه‌ها در برابر تهاجم اسید سولفوریک است. استفاده از میکروسیلیس و نانوسیلیس دوام نمونه‌ها را در برابر تهاجم اسید سولفوریک بهبود می‌بخشد. اما ترکیب ۸ درصد میکروسیلیس، ۲ درصد نانوسیلیس و ۲۵ درصد فیلر سیمان دارای بهترین مقاومت در برابر تهاجم اسید سولفوریک است.

واژگان کلیدی: تهاجم اسید سولفوریک، میکروسیلیس، نانوسیلیس، بتن با مقاومت بالا.

۱- مقدمه

امروزه بتن یکی از پرمصرف‌ترین و بادوام‌ترین مصالح ساختمانی است. با توجه به اینکه سنگدانه‌ها، درصد زیادی از حجم بتن را تشکیل می‌دهند، انتخاب مناسب نوع سنگدانه و دانه‌بندی آن، روی خواص اصلی بتن از قبیل: مقاومت، نفوذپذیری، دوام و کارایی تأثیرگذار خواهد بود. برای دستیابی به بتنی با تراکم بالا و نفوذپذیری کم، باید عوامل مختلف از جمله: دانه‌بندی سنگدانه‌ها، میزان سیمان و دیگر افزودنی‌ها بررسی شده و مقدار بهینه هر کدام

مشخص شود.

اگرچه سازه‌های بتنی به شکل طبیعی برای کمینه یک دوره ۵۰ ساله طراحی و ساخته می‌شوند، اما در بعضی موارد، به سبب تهاجم اسید سولفوریک، تنها پس از چند سال، این سازه‌ها با خرابی مواجه می‌شوند. با افزایش نرخ خوردگی، تعمیر و در برخی موارد، جایگزینی کامل سازه‌های آسیب‌دیده که بسیار پر هزینه بوده و مشکلات اجتماعی بسیاری را ایجاد می‌کند، ضروری است. تخریب قابل توجه بتن در محیط‌های خورنده مانند سازه‌های مربوط

به سیستم جمع آوری فاضلاب، در سراسر دنیا از جمله استرالیا [۱]، ژاپن [۲]، کشورهای حاشیه خلیج فارس [۳]، آلمان [۴]، آفریقای جنوبی [۵] و آمریکا [۶] گزارش شده است که خرابی این سیستم‌های فاضلابی باعث ایجاد مشکلات حادی از قبیل کاهش توانایی انتقال در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب، آلودگی زمین و آب‌های زیرزمینی، نشست و یا فرورفتن زمین می‌شود.

پژوهش‌هایی روی خوردگی بتن در برابر اسید سولفوریک، از وقتی که Parker وجود باکتری مسبب در پروسه خوردگی را در سال ۱۹۴۵ کشف کرد، شروع شد [۷]. پس از انجام پژوهش‌های زیاد، سازوکار خوردگی بتن به شرح زیر بیان شد. تخریب بتن به وسیله اسید سولفوریک، شامل دو مرحله است [۸] که در مرحله اول، اسید سولفوریک با محصولات هیدراتاسیون مانند هیدروکسید کلسیم و سیلیکات کلسیم هیدراته شده واکنش می‌دهد و سنگ گچ ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) تولید می‌کند. در مرحله دوم، سنگ گچ با تری کلسیم آلومینات (C_3A) واکنش نشان داده و اترینگایت ($\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$) 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. هر چند تشکیل سنگ گچ با افزایش حجمی ۱/۲ تا ۲/۲ همراه است [۹-۱۱]، برخی از نویسندگان بیان کرده‌اند که این واکنش، تنها یک نقش فرعی را در پروسه خوردگی ایجاد می‌کند [۱۰]. واکنش بین سنگ گچ و هیدرات آلومینات کلسیم (C_3A) با تشکیل اترینگایت، خیلی خطرناکتر است. حجم معدنی اترینگایت، چندین برابر بیشتر از حجم ترکیبات اولیه است. برخی از پژوهشگران، افزایش حجم با ضریب ۲ را گزارش داده‌اند

[۹ و ۱۱]، در حالی که برخی دیگر حتی ضریب ۷ را نیز بیان کرده‌اند [۱۰]. بنابراین تشکیل اترینگایت، عامل اصلی انبساط بوده که به افزایش فشار داخلی و خرابی ماتریس بتن منجر می‌شود. همچنین زمانی که بتن به وسیله اسید سولفوریک، مورد تهاجم قرار می‌گیرد، گچ در لایه تخریب شده رسوب کرده و توانایی اسید در ورود به بتن را کاهش می‌دهد [۱۲-۱۳].

پژوهش‌های فراوانی در خصوص استفاده از مواد جایگزین سیمان و بررسی پارامترهای موثر در تهاجم اسید سولفوریک صورت گرفته است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. در پژوهشی که به وسیله Monteny و همکارانش در سال ۲۰۰۰ میلادی [۱۴] صورت گرفت آزمایش‌های شیمیایی، میکروبیولوژیکی و درجا برای خوردگی بتن در محیط‌های اسیدی صورت گرفت. نتایج، نشان داد که اضافه کردن میکروسلیس دوام در برابر اسید سولفوریک را افزایش می‌دهد. پژوهش‌های متعدد دیگری نیز انجام شد که تأثیر مثبت میکروسلیس را تأیید کردند [۱۵-۱۷] اما پژوهش‌های دیگری نیز نشان داد که میکروسلیس، باعث بهبود قابل توجه مقاومت بتن در برابر خوردگی نمی‌شود [۱۸-۱۹]. در پژوهش دیگری که به وسیله Hewayde و همکارانش صورت گرفت، تأثیر پارامترهای طرح اختلاط، مانند نسبت آب به سیمان، میزان سیمان، تأثیر میزان درجه اسیدی (pH) و غیره بر مقاومت بتن در برابر اسید سولفوریک، مورد بررسی قرار گرفت [۸]. بر اساس نتایج آزمایش‌های آن‌ها، با افزایش میزان سیمان، میزان خوردگی افزایش می‌یافت. رحمانی و رمضانپور [۲۰ و ۲۱] آزمایش‌هایی را به منظور تقویت مقاومت بتن در برابر تهاجم اسید سولفوریک انجام دادند. آن‌ها در پژوهش خود از پودر بسیار ریز کوارتز، میکروسلیس (با ۸ درصد جایگزینی) و پوزولان‌های طبیعی مانند پومیس و

دانه‌بندی ایده‌آل مصالح، بتن متراکم ساخته شد. سپس با به‌کارگیری چهار طرح اختلاط حاوی نانوسیلیس، میکروسیلیس و پودر کوارتز نمونه‌های بتنی ساخته و پس از عمل‌آوری، تعدادی از آن‌ها مورد آزمایش‌های مقاومت فشاری و درصد جذب آب قرار گرفتند. همچنین نمونه‌ها پس از قرارگیری در محلول اسید سولفوریک، در سنین مختلف مورد آزمایش‌های تعیین تغییرات وزن و مقاومت فشاری قرار گرفتند.

۲- جزئیات آزمایش‌ها

۲-۱- مشخصات مصالح مورد استفاده

سه نوع سنگ‌دانه موجود در کارخانجات سنگ‌شکن شهر یاسوج (شن بادمی، شن نخودی و ماسه شسته) در ساخت نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. با توجه به نبودن وجود ذرات ریز در ماسه شسته، از فیلر ماسه‌ای با بیشینه ابعاد ۱۸۰ میکرون برای ایجاد دانه‌بندی ایده‌آل استفاده شد. به منظور دستیابی به دانه‌بندی متراکم در خصوص مواد سیمانی، از پودر بسیار ریز کوارتز به عنوان فیلر با اندازه ذرات بین ۰ تا ۴۰ میکرون نیز در کنار سیمان استفاده شد که این پودر، در پژوهش رحمانی و همکاران، به شیوه‌ای دیگر مورد استفاده قرار گرفته است [۲۱]. مشخصات فیزیکی سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است.

سیمان پرتلند مورد استفاده در این پژوهش سیمان تیپ دو بود که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۲ ارائه شده است. میکروسیلیس استفاده شده در این پژوهش دارای ساختار آمورف و ذرات کروی شکل با ابعاد بیشینه یک میکرون است. ترکیب شیمیایی و سایر مشخصات میکروسیلیس مورد استفاده در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین مشخصات نانو سیلیس مورد استفاده در این پژوهش نیز در

تراس (با ۲۰ درصد جایگزینی) استفاده کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که پودر ریزدانه کوارتز می‌تواند تمرکز اسید را در نزدیکی سطح بتن، کم کرده و نرخ خوردگی را کاهش دهد. همچنین به کارگیری میکروسیلیس، دوام بتن‌ها را در برابر تهاجم اسید سولفوریک را افزایش داد. در خصوص تأثیر نانو سیلیس در برابر تهاجم اسید سولفوریک پژوهش‌های زیادی انجام نشده است و تنها پژوهش روی تأثیر نانو سیلیس بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بتن‌ها متمرکز شده است که در ادامه به ارائه چکیده نتایج این پژوهش‌ها اکتفا می‌شود.

پژوهش‌ها در زمینه تأثیر نانوسیلیس بر بتن نشان داد که ذرات نانوسیلیس دارای واکنش پوزولانی مؤثرتری نسبت به میکروسیلیس است. بنابراین اندازه و مقدار کریستال‌های هیدروکسید کلسیم به شکل چشم‌گیری کاهش پیدا می‌کند و مقاومت اولیه خمیر سیمان سخت شده، افزایش می‌یابد. همچنین اضافه کردن نانوسیلیس باعث افزایش گرمادهی در مراحل گیرش و سخت‌شدن سیمان می‌شود [۲۳-۲۲]. می‌توان انتظار داشت که نانوسیلیس، نه تنها به عنوان فیلر می‌تواند ریزساختارهای ملات سیمان را بهبود ببخشد بلکه می‌تواند به عنوان ارتقاءدهنده واکنش پوزولانی نیز عمل کند.

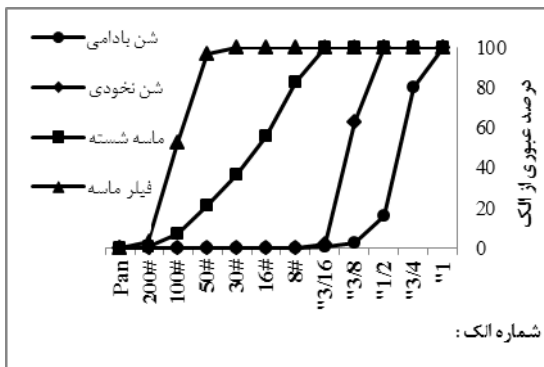
هر چند در خصوص بتن‌های معمولی و دوام آن‌ها در محیط‌های اسیدی پژوهش‌های بسیار زیادی صورت گرفته است، ولی پژوهش‌های انجام شده در سایر کشورها، اولاً در برخی موارد ضد و نقیض است، مانند تأثیر میکروسیلیس در برابر تهاجم اسید سولفوریک، ثانیاً پژوهش‌های آن‌ها بر اساس مصالح موجود در آن کشورها مانند خاکستر بادی و یا سرباره کوره‌های آهن‌گدازی است. پس نیاز به بررسی بیشتر عملکرد بتن در تهاجم اسید احساس می‌شود که در این پژوهش، ابتدا با استفاده از

جدول ۳ ارائه شده است.

ماسه شسته و فیلر ماسه انجام شد که منحنی دانه‌بندی این سنگدانه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. برای دستیابی به درصد ترکیب بهینه اختلاط چهار نوع سنگدانه موجود، از منحنی دانه‌بندی ایده‌آل اصلاح شده Fuller با ضریب توزیع $n=0.5$ استفاده شد. بر اساس دانه‌بندی سنگدانه‌ها، بیشینه و کمینه بعد سنگدانه‌ها به ترتیب برابر با ۲۵/۴ و ۰/۰۴ میلی‌متر است.

جدول ۱: مشخصات فیزیکی سنگدانه‌های مصرفی

نام سنگدانه	شن بادمی	شن نخودی	ماسه شسته	فیلر ماسه	پودر کوارتز
وزن مخصوص (kg/m^3)	۲۶۷۵	۲۶۷۴	۲۶۷۰	۲۵۷۱	۲۷۲۱
درصد جذب آب (%)	۱/۰۵۴	۱/۴۶	۲/۶۹	۴	-



شکل ۱: نمودارهای دانه‌بندی سنگدانه‌های مصرفی

به منظور دستیابی به ترکیب بهینه چهار نوع سنگدانه موجود، درصد اختلاط مختلفی برای هر نوع سنگدانه، در نظر گرفته شده و منحنی به دست آمده از ترکیب سنگدانه‌ها، با منحنی ایده‌آل فولر مقایسه شد. چگونگی دستیابی به منحنی دانه‌بندی ایده‌آل در مرجع [۲۵] ارائه شده است. در پایان درصد اختلاط بهینه به شرح ذیل انتخاب شد.

$$U = 34.1\%, V = 25.8\%, W = 38.4\%, X = 1.7\%$$

U، V، W و X به ترتیب، درصد اختلاط در نظر گرفته شده برای شن بادمی، شن نخودی، ماسه شسته و فیلر ماسه است.

۲-۳- میزان سیمان بهینه

با توجه به اینکه دستیابی به بتنی با مقاومت فوق‌العاده بالا، با کاهش کمینه سیمان مصرفی، یکی از اهداف پژوهش

با توجه به اینکه در پژوهش‌های انجام شده به وسیله رحمانی [۲۱] و Hillemeier [۲۴]، با نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۴۲، نتایج بهتری گزارش شده بود، در این پژوهش نیز، نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۴۲ فرض شد. برای شبیه‌سازی محیط اسیدی، از اسید سولفوریک صنعتی با درجه خلوص ۹۸٪ استفاده شد که با رقیق‌سازی به وسیله آب درجه اسیدی (pH) برابر با یک، ایجاد شد. به منظور ثابت نگه‌داشتن میزان اسلامپ مخلوط از فوق‌روان‌کننده‌ای بر پایه پلی‌کربسیلات، استفاده شد. این فوق‌روان‌کننده به صورت مایع با وزن مخصوص، حدود ۱/۱۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود.

جدول ۲: مشخصات و ترکیب شیمیایی (درصد وزنی عناصر) سیمان یاسوج و میکرو سیلیس

مشخصات	وزن مخصوص (kg/m^3)	سطح مخصوص (m^2/kg)	ترکیب شیمیایی (%)							
			K ₂ O	C	SO ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
سیمان مقدار	۳۱۰۰	۲۹۹	-	-	۱/۸۷	۶۴/۳۴	۲/۲۴	۳/۷۶	۹/۸۲	۲۱/۸۸
میکروسیلیس مقدار	۲۲۵۰	۲۲۰۰۰	۰/۶۲	۰/۷۴	-	۰/۳	۰/۳	۱/۳۵	۰/۳	۹۳/۸۸

جدول ۳: مشخصات نانو سیلیس مصرفی

مشخصات	دانسیتته (gr/cm^3)	درجه اسیدی (pH)	ویسکوزیته (CPS)	درصد ذرات جامد (%)
مقدار	۱/۴	۹/۵	< ۱۵	۵۰

۲-۲- دانه‌بندی مصالح مصرفی

آزمایش الک طبق استاندارد روی شن بادمی، شن نخودی،

۲-۴- میزان بهینه پودر کوارتز

با توجه به اینکه منحنی دانه‌بندی سیمان بدون ذرات ریز است [۲۱ و ۲۶]، برای اصلاح دانه‌بندی سیمان، از پودر کوارتز فوق‌العاده ریز استفاده شده است. چگونگی به دست آوردن میزان فیلر بهینه در پژوهش [۲۵] به وسیله‌ی مولفین ارائه شده است که میزان بهینه فیلر سیمان یا پودر کوارتز مصرفی، ۲۵ درصد وزنی سیمان به دست آمده است.

۲-۶- طرح‌های اختلاط مورد استفاده

در این پژوهش با به کارگیری چهار طرح اختلاط مختلف که نانوسیلیس، میکروسیلیس و فیلر به صورت جداگانه و ترکیبی در آنها شرکت داشتند، نمونه‌های بتنی برای انجام آزمایش‌های مورد نظر، ساخته شد. طرح اختلاط‌های مورد استفاده در این پژوهش به این شرح است:

۱- مخلوط سیمان و فیلر:

$$C1 = C. + F.$$

۲- مخلوط سیمان، فیلر و میکروسیلیس:

$$C2 = C. + F. + 10\% (S. F.)$$

۳- مخلوط سیمان، فیلر، میکروسیلیس و نانو سیلیس:

$$C3 = C. + F. + 8\% (S. F.) + 2\% (N. S.)$$

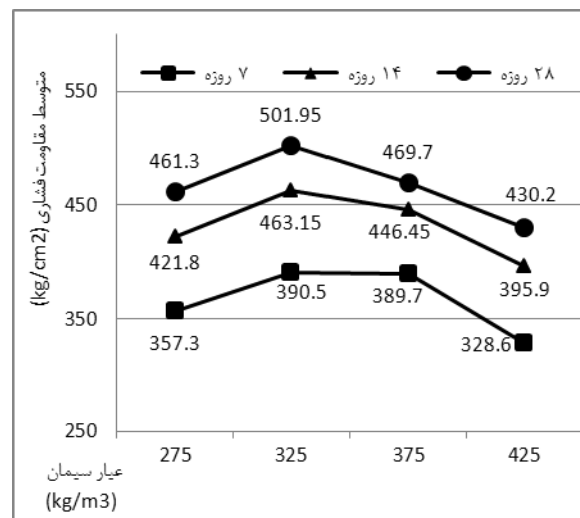
۴- مخلوط سیمان، فیلر، میکروسیلیس و نانو سیلیس:

$$C4 = C. + F. + 9\% (S. F.) + 1\% (N. S.)$$

در طرح اختلاط‌های یاد شده، C، F، SF و NS به ترتیب بیانگر سیمان، فیلر، میکروسیلیس و نانوسیلیس است.

در تمام طرح اختلاط‌ها، میزان مواد سیمانی و نسبت آب به مواد سیمانی، به ترتیب برابر با ۳۲۵ کیلوگرم در متر مکعب و ۰/۴۲ در نظر گرفته شد. میزان فیلر مطابق بخش قبل نیز ۲۵ درصد وزن سیمان انتخاب شد. همچنین به علت ایفای نقش پرکنندگی میکروسیلیس و نانوسیلیس، از حجم فیلر مصرفی، یعنی پودر کوارتز، به میزان مصرف آنها در طرح اختلاط کاسته شد.

است، با استفاده از منحنی دانه‌بندی ایجاد شده به وسیله‌ی سنگدانه‌ها، نمونه‌های بتنی مکعبی به ابعاد ۱۵ سانتی‌متر با میزان سیمان‌های ۲۷۵، ۳۲۵، ۳۷۵ و ۴۲۵ کیلوگرم در مترمکعب ساخته شد. نسبت آب به سیمان در نمونه‌ها برابر با ۰/۴۲ ثابت فرض شده و اسلامپ نمونه‌ها با استفاده از فوق‌روان‌کننده، بین ۱۰ تا ۱۲ سانتی‌متر، ثابت نگه‌داشته شد. پس از عمل‌آوری نمونه‌ها، در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه، مقاومت فشاری آنها مطابق با استاندارد BS 1881 اندازه‌گیری و ثبت شد. نتایج در شکل ۲ نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود با افزایش میزان سیمان، ابتدا مقاومت فشاری افزایش و سپس کاهش می‌یابد. دلیل افزایش مقاومت فشاری، افزایش پیوستگی بین سنگدانه‌ها و خمیر سیمان به علت افزایش سیمان است. اما افزایش بیش از حد مقدار سیمان تأثیری در افزایش پیوستگی سنگدانه‌ها و خمیر نداشته و به علت کاهش حجم سنگدانه‌ها در بتن، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. با توجه به این نتایج، مقدار بهینه سیمان برابر ۳۲۵ کیلوگرم در مترمکعب، انتخاب و بعنوان میزان سیمان مصرفی در کلیه طرح‌های اختلاط، مورد استفاده قرار گرفت.



شکل (۲) تغییرات مقاومت فشاری نسبت به میزان سیمان

جدول ۴: مصالح مورد نیاز طرح اختلاط‌های تحت بررسی (kg/m^3)

شماره طرح	نسبت آب به مواد سیمانی	سیمان	پودر کوارتز	میکرو سیلیس	نانو سیلیس	شن بادیامی	شن نخودی	ماسه شسته	فیلر ماسه	درصد روان کننده برای دستیابی به اسلامپ ۱۰-۱۲ سانتی متر
C1	۰/۴۲	۳۲۵	۸۱/۲۵	-	-	۶۶۴	۵۰۲	۷۴۶	۳۲	۰/۶
C2	۰/۴۲	۲۹۲/۵	۴۱/۹۵	۳۲/۵	-	۶۷۳	۵۰۹	۷۵۷	۳۲	۰/۷۵
C3	۰/۴۲	۲۹۲/۵	۳۷/۱۸	۲۶	۶/۵	۶۸۴	۵۱۷	۷۶۹	۳۲	۰/۹
C4	۰/۴۲	۲۹۲/۵	۳۹/۵۷	۲۹/۳	۳/۳	۶۷۳	۵۰۹	۷۵۷	۳۲	۰/۸۴

سولفوریک، روی نمونه‌های بتنی انجام شد. در ادامه شرح مختصری از چگونگی انجام آزمایش‌ها ارائه شده است.

الف- آزمایش تعیین مقاومت فشاری: پس از ساخت و عمل‌آوری به مدت ۷ و ۲۸ روز، دو نمونه برای هر طرح اختلاط، از آب خارج شده و بر اساس استاندارد BS1881 تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفته و نتایج ثبت شدند.

ب- آزمایش تعیین درصد جذب آب نمونه‌ها: پس از ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها در آب، دو عدد از نمونه‌ها در سنین ۲۸ و ۹۰ روز در آن با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد تا ثابت شدن وزن، خشک شدند. سپس نمونه‌ها، از آن خارج شده و وزن آن‌ها اندازه‌گیری شد (W_1). برای تعیین درصد جذب آب نمونه‌ها، نمونه‌ها در آب قرار گرفته و پس از ۰/۵ و ۲۴ ساعت، نمونه‌ها، از آب خارج شده و وزن آن‌ها در حالت اشباع با سطح خشک، ثبت شد (W_2). در پایان درصد جذب آب نمونه‌ها مطابق رابطه ۱ محاسبه شد:

$$\text{Water Absorption (\%)} = 100 * (W_2 - W_1) / W_1 \quad (1)$$

ج- آزمایش تعیین تغییرات وزن و مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در محلول اسید سولفوریک: به منظور بررسی تأثیر اسید سولفوریک روی نمونه‌ها، تغییرات وزن و تغییرات مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های بتنی اندازه‌گیری شد. برای این امر نمونه‌ها پس از ۲۸ روز عمل-

لازم به ذکر است که میزان جایگزینی ۱۰ درصد میکروسیلیس و ۲ درصد نانوسیلیس، بر اساس نتایج آزمایش‌های پژوهشگران در سال‌های اخیر [۱۵، ۲۳ و ۲۷] انتخاب شده است. برای پخش یکنواخت فیلر و میکروسیلیس در مخلوط، ابتدا فیلر و میکروسیلیس با مقداری از آب طرح اختلاط مخلوط شد تا لجن تهیه شود. لجن تهیه شده پس از اضافه کردن سیمان به مخلوط بتنی اضافه شده و عمل اختلاط ادامه یافت. همچنین با توجه به اینکه نانوسیلیس تهیه شده به صوت لجن بود، پس از کاهش آب نانوسیلیس از آب طرح اختلاط، ابتدا لجن مذکور به طور مناسبی مخلوط شده و سپس، پس از اضافه کردن لجن میکروسیلیس و اختلاط آن، لجن نانوسیلیس به مخلوط بتنی اضافه شده و عمل اختلاط ادامه یافت. جزئیات طرح اختلاط‌های یاد شده، در جدول شماره ۴ نشان داده شده است.

۲-۲- شرح آزمایش‌ها

پس از مخلوط نمودن بتن، طرح اختلاط‌ها در قالب‌های مکعبی به ابعاد ۱۵ سانتی‌متر، ریخته و متراکم شدند. پس از ۲۴ ساعت عمل‌آوری، قالب‌ها باز شده و نمونه‌ها برای عمل‌آوری در حوضچه آب قرار گرفتند. در این پژوهش، آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری و درصد جذب آب، همچنین تغییرات وزن و مقاومت فشاری در محیط اسید

عمل آوری و درصد افزایش مقاومت نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد (C1) در جدول ۵ نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود، میزان مقاومت فشاری ۲۸ روزه کلیه طرح‌های اختلاط، از ۵۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بیشتر است. این در حالی است که تنها ۳۲۵ کیلوگرم مواد سیمانی در کلیه طرح اختلاط‌ها، استفاده شده است. طرح شماره دو، بیشترین مقاومت فشاری را از خود نشان داده است. پس از طرح شماره دو، طرح اختلاط‌های شماره سه و چهار، مقاومت فشاری بالایی از خود نشان داده‌اند. این نتایج می‌تواند ناشی از فعالیت پوزولانی بالای میکروسیلیس و نانوسیلیس باشد. قابل ذکر است که استفاده از نانو سیلیس در کنار میکرو سیلیس، مقاومت فشاری نمونه‌ها را کاهش داده است. دلیل این امر را می‌توان به کلوخه شدن ذرات نانوسیلیس نسبت داد. برخی از پژوهشگران گزارش نموده‌اند که ذرات ریز مانند نانوسیلیس تمایل زیادی برای جذب سطحی ذرات یونی در محیط‌های آبدار و تشکیل کلوخه نشان می‌دهند که این پدیده‌ها روی ویژگی‌های خمیر تازه و بتن سخت‌شده نهایی تأثیر می‌گذارند [۲۸-۳۲].

جدول ۵: نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها

شماره طرح اختلاط	متوسط تنش فشاری ۲۸ روزه (kg/cm ²)	متوسط تنش فشاری ۷ روزه (kg/cm ²)	درصد افزایش مقاومت نسبت به نمونه شاهد ۲۸ روزه
C1	۵۷۲/۴	۳۳۵/۲	-
C2	۷۵۰/۸	۴۵۴/۵	۳۱/۲
C3	۷۰۸/۴	۴۴۲/۷	۲۳/۸
C4	۶۹۴/۸	۴۰۸/۶	۲۱/۴

۳-۲- نتایج آزمایش درصد جذب آب

در جدول شماره ۶، درصد جذب آب پس از ۲۸ و ۹۰ روز

آوری و توزین در حالت اشباع با سطح خشک (W_1)، وارد محلول اسید سولفوریک شدند. میزان درجه اسیدی (pH) محلول، با استفاده از pH سنج، کنترل می‌شد و در صورت لزوم با افزودن اسید سولفوریک صنعتی، pH محلول، در محدوده‌ای بین ۰/۹۷ تا ۱/۰۵ قرار می‌گرفت. لازم به ذکر است که نسبت حجم کل محلول به حجم نمونه‌ها، برابر ۵ در نظر گرفته شد. در هفته‌های اول، دوم، سوم، چهارم، ششم، هشتم، دوازدهم، شانزدهم و بیست و چهارم قرارگیری نمونه‌ها در اسید، نمونه‌ها، با احتیاط از محلول اسید خارج شده و سطح آن‌ها به وسیله آب و برس پلاستیکی، تمیز شد. پس از رسیدن به حالت اشباع با سطح خشک، وزن نمونه‌ها، اندازه‌گیری شده (W_2) و نمونه‌ها دوباره به وان حاوی محلول اسید سولفوریک، باز گردانده شدند. تغییرات وزن نمونه‌ها و میزان افزایش یا کاهش آن‌ها نسبت به وزن اولیه، مطابق رابطه ۲، محاسبه شد. علامت مثبت نشان‌دهنده افزایش وزن و علامت منفی، نمایان‌گر کاهش وزن نمونه است.

(۲) $100 * ((W_2 - W_1) / W_1) =$ درصد تغییر نسبی وزن نمونه
به منظور تعیین تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی، پس از انجام آزمایش تغییرات وزن روی نمونه‌ها در هفته-های چهارم، هشتم و بیست و چهارم قرارگیری، دو نمونه از هر طرح اختلاط مورد آزمایش تعیین مقاومت فشاری قرار گرفت. با مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در آب با مقاومت‌های فشاری نمونه‌ها پس از قرارگیری در محلول اسید سولفوریک، تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی، مورد بررسی قرار گرفت.

۳- نتایج آزمایش‌ها و بررسی آن‌ها

۳-۱- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از ۷ و ۲۸ روز

علت تمایل زیاد ذرات نانوسیلیس برای تشکیل کلوخه باشد. اما پس از گذشت زمان این کلوخه ها از یکدیگر جدا شده و واکنش های پوزولانی ادامه می یابد [۳۱-۲۸].

۳-۳- نتایج آزمایش تغییرات وزن نمونه ها در اسید

نتایج آزمایش تغییرات وزن روی نمونه های بتنی در محلول اسید سولفوریک ثبت و متوسط درصد تغییرات نسبی وزن نمونه ها در هفته های قرارگیری در محلول اسید سولفوریک، محاسبه شد. نمودار تغییرات وزن نمونه ها نسبت به زمان قرارگیری در محلول در شکل ۳ نشان داده شده است. چنانچه در شکل ۳ مشاهده می شود در هفته های اول قرارگیری نمونه ها در محلول اسید سولفوریک، وزن آنها افزایش پیدا می کند. این موضوع می تواند به علت واکنش اسید با هیدروکسید کلسیم و تشکیل گچ باشد. اما با گذشت زمان، محلول اسید سولفوریک، لایه سطحی را در خود حل نموده و با تخریب این لایه و شسته شدن آن، وزن نمونه ها در هفته های بعد، با کاهش مواجه می شود. اما در این بین، هر چه لایه سطحی بتن، قوی تر و نفوذپذیری آن، کمتر باشد، مدت زمان بیشتری طول می کشد تا لایه سطحی بتن، خورده شده و نمونه با کاهش وزن مواجه شود. به عنوان نمونه در طرح اختلاط شماره ۱ و ۳ کاهش وزن نمونه ها به ترتیب پس از ۶ و ۱۲ هفته از قرارگیری نمونه ها در محلول، شروع شده است.

عمل آوری و درصد کاهش جذب آب نسبت به نمونه شاهد ارائه شده است. چنانچه مشاهده می شود، درصد جذب آب این بتن ها، بسیار کمتر از درصد جذب آب بتن های معمولی است. از نتایج مربوط به سن ۲۸ روز عمل آوری بر می آید که نمونه های طرح اختلاط شماره ۲، کمترین جذب آب نیم ساعته و ۲۴ ساعته را از خود نشان داده است. این موضوع می تواند به علت تأثیر مثبت پودر کوارتز به عنوان فیلر سیمان و خاصیت پوزولانی و پرکنندگی میکرو سیلیس باشد. همچنین، طرح اختلاط شماره ۳ نیز مقدار درصد جذب آب بسیار پائینی را نسبت به نمونه شاهد از خود نشان داده است.

اما نتایج سن ۹۰ روز عمل آوری، نشان می دهند که نمونه های مربوط به طرح اختلاط های ۳، ۴ و ۲ به ترتیب کمترین مقدار درصد جذب آب را به خود اختصاص داده اند. با این نتایج می توان بیان نمود که در طولانی مدت، تأثیر نانوسیلیس احتمالاً بیشتر از میکروسیلیس است. همچنین می توان دریافت که با استفاده از ترکیب ۸ درصد میکروسیلیس و ۲ درصد نانوسیلیس، نتایج بهتری حاصل به دست می آید. به عبارت دیگر، طرح اختلاط شماره ۳، ترکیبی بهینه برای میکرو سیلیس و نانو سیلیس است.

با مقایسه نتایج درصد جذب آب، پس از ۲۸ و ۹۰ روز عمل آوری، می توان کاهش قابل ملاحظه ای در مقدار درصد جذب آب نمونه های طرح اختلاط های شماره ۳ و ۴ مشاهده نمود. این موضوع در سن ۲۸ روزه، می تواند به

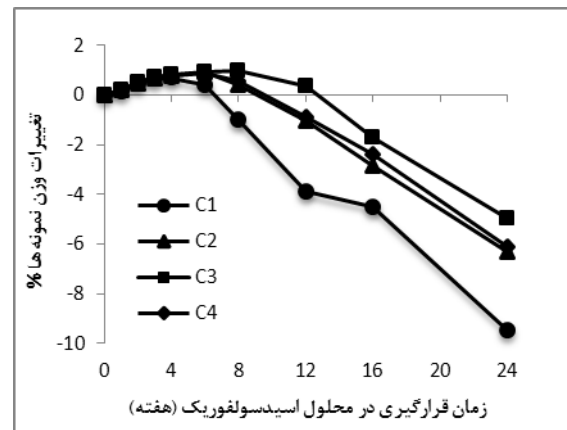
جدول ۶: متوسط درصد جذب آب نمونه ها در سن ۲۸ و ۹۰ روز

شماره طرح اختلاط	متوسط جذب آب نمونه ها در سن ۲۸ روز (%)			متوسط جذب آب نمونه ها در سن ۹۰ روز (%)		
	جذب آب ۰/۵ ساعته	جذب آب ۲۴ ساعته	درصد کاهش جذب آب ۲۴ ساعته نسبت به نمونه شاهد	جذب آب ۰/۵ ساعته	جذب آب ۲۴ ساعته	درصد کاهش جذب آب ۲۴ ساعته نسبت به نمونه شاهد
C1	۰/۷۰۵	۱/۰۵۸	-	۰/۹۴۲	۰/۶۵۴	-
C2	۰/۴۰۰	۰/۵۴۰	۴۹	۰/۴۹۸	۰/۳۹۰	۴۷/۱
C3	۰/۴۴۷	۰/۶۹۴	۳۴/۴	۰/۴۶۳	۰/۳۳۸	۵۰/۸
C4	۰/۶۶۱	۱/۰۱۲	۴/۳	۰/۴۸۸	۰/۳۷۵	۴۸/۲

تغییرات وزن کمتری نسبت به طرح اختلاط شاهد مواجه شدند. این مقدار برای نمونه‌های طرح اختلاط شماره ۴ و ۲، به ترتیب برابر با ۶ و ۶/۳۲ درصد است.

۳-۴- نتایج آزمایش تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در اسید

آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه‌های بتنی قرار گرفته در محلول اسید سولفوریک پس از ۴، ۸ و ۲۴ هفته قرارگیری انجام و مقاومت نسبی، نسبت به مقاومت ۲۸ روزه متناظر با طرح اختلاط تحت بررسی، محاسبه و در شکل شماره ۴ نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود در هفته چهارم قرارگیری نمونه‌ها در محلول، کلیه طرح اختلاط‌ها افزایش مقاومتی در حدود ۱ تا ۷ درصد از خود نشان داده‌اند. چنانچه قبلاً نیز گفته شد این امر به واسطه پر شدن حفره‌ها به وسیله‌ی محصولات واکنش اسید با بتن است. در هفته هشتم قرارگیری در محلول اسید، نمونه‌های طرح اختلاط شماره ۲، ۳ و ۴ همچنان افزایش مقاومتی در حدود ۱ تا ۸ درصد از خود نشان داده‌اند و این در حالی است که نمونه شاهد ۴ درصد کاهش مقاومت از خود نشان داده است. در پایان هفته بیست و چهارم قرارگیری نمونه‌ها در محلول اسید سولفوریک، نمونه‌های طرح اختلاط شماره ۱ و ۲ با کاهش مقاومت ۱۳ و ۹ درصدی مواجه شدند، اما نمونه‌های طرح اختلاط شماره ۳ و ۴ با افزایش مقاومت همراه شدند. طرح اختلاط شماره ۳ نسبت به مقاومت استاندارد خود، ۶ درصد افزایش مقاومت و طرح اختلاط شماره ۴ نیز ۱ درصد افزایش مقاومت از خود نشان داده‌اند. مهم‌ترین علت افزایش مقاومت طرح اختلاط شماره ۳ و ۴ را می‌توان به استفاده هم‌زمان از میکروسیلیس و نانوسیلیس دانست. همچنین این نتایج، ترکیب ۸ درصد میکروسیلیس و ۲ درصد نانوسیلیس را به عنوان بهترین ترکیب برای این



شکل ۳: نمودار درصد تغییرات نسبی وزن نمونه‌های بتنی در اسید سولفوریک

چنانچه در شکل ۳ دیده می‌شود، نمونه‌های مربوط به طرح‌های اختلاط شماره ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب کاهش وزن بیشتری از خود نشان داده‌اند. نمونه‌های مربوط به طرح اختلاط شماره ۳، بهترین مقاومت در برابر تهاجم اسید سولفوریک را از خود نشان داده‌اند، چرا که در پایان هفته بیست و چهارم قرارگیری نمونه‌های بتنی در محلول، حدود ۵ درصد از وزن نمونه‌های بتنی مربوط به طرح شماره ۳، کم شده است که کمترین میزان کاهش وزن در میان نمونه‌ها است. دلیل این کاهش اندک وزن نمونه‌ها در محلول اسید را می‌توان به جذب آب کم این طرح اختلاط در سن ۹۰ روز نسبت داد. همچنین ترکیب ۸ درصد میکروسیلیس و دو درصد نانو سیلیس، می‌تواند ترکیب بهینه‌ای برای این دو پوزولان باشد. عملکرد این طرح اختلاط در ۸ هفته اول قرارگیری در اسید، تفاوت محسوسی با طرح اختلاط شماره ۲ که تنها حاوی میکروسیلیس است ندارد، ولی در هفته‌های بعد در ادامه فرآیند هیدراتاسیون، نانوسیلیس وارد عمل شده و عملکرد مناسبی را از خود بروز داده است. این امر، ادعای یاد شده مبنی بر فعالیت پوزولانی دیر هنگام نانو سیلیس را تأیید می‌نماید. البته نمونه‌های مربوط به طرح اختلاط شماره ۴ و ۲ نیز با

در طرح اختلاط‌های شماره ۳ و ۴، احتمالاً با ادامه فرآیند هیدراتاسیون در کنار فعالیت پوزولانی، درصد جذب آب، کاهش یافته است. این موضوع، در آزمایش‌های تغییرات وزن و مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در محلول اسید سولفوریک نیز کاملاً مشخص است، به طوری که نمونه‌های مربوط به طرح اختلاط شماره ۳ و ۴، نسبت به نمونه‌های مربوط به طرح اختلاط شماره ۲، دوام بهتری از خود نشان داده‌اند و باعث کند شدن روند کاهش وزن و کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها در محلول اسید سولفوریک شده‌اند. چنانچه گفته شد، دلیل این امر به تمایل زیاد ذرات ریز مانند نانو سیلیس برای کلوخه شدن و یا ته‌نشین شدن در تماس با آب است [۲۸-۳۲]. این پدیده روی ویژگی نهایی خمیر سخت‌شده تأثیر می‌گذارد. بنابراین نیاز است با اضافه کردن افزودنی شیمیایی مناسب، نیروهای دفع‌کننده بین ذرات کلئیدی مجاور هم، افزایش یابد و یا اینکه با ترکیب کردن آب اضافی، ذرات جامد موجود در محلول آبدار، پراکنده شوند [۳۳].

با مقایسه نتایج آزمایش جذب آب ۹۰ روزه نمونه‌ها و تعیین تغییرات وزن نمونه‌ها در محلول اسید سولفوریک، می‌توان دریافت که نتایج این دو آزمایش، شباهت زیادی به هم دارند. برای نمونه با کاهش درصد جذب آب نمونه‌ها، میزان تغییرات وزن نمونه‌ها در محلول اسید سولفوریک نیز کاهش می‌یابد، بدین شکل که به ترتیب در طرح اختلاط‌های شماره ۲، ۴ و ۳ با کاهش درصد جذب آب، تغییرات وزن در محلول اسید سولفوریک، نیز کاهش یافته است.

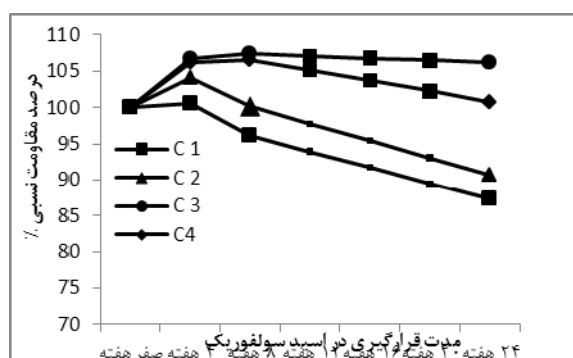
۴- نتیجه‌گیری

با بررسی نتایج آزمایش‌ها و مقایسه طرح اختلاط‌ها، نتایج زیر، قابل ذکر می‌باشند:

دو تأیید می‌نمایند. البته استفاده از ترکیب بهینه سنگدانه‌ها، به کارگیری پودر کوارتز و استفاده از کمترین میزان مواد سیمانی ممکن نیز، هر کدام به نوبه خود، در افزایش دوام این طرح اختلاط‌ها به ویژه طرح اختلاط شماره ۳ سهمی قابل توجه داشته‌اند.

۳-۶- مقایسه نتایج آزمایش‌ها

نتایج آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های بتنی، نشان می‌دهد که نمونه‌های مربوط به طرح اختلاط شماره ۲، دارای بهترین مقاومت فشاری، پس از ۲۸ روز، عمل‌آوری هستند. پس از آن، نمونه‌های مربوط به طرح اختلاط شماره ۳ و ۴، به ترتیب دارای بیشترین مقاومت فشاری، بوده‌اند. در مورد جذب آب نمونه‌ها نیز، پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در آب، نمونه‌های مربوط به طرح اختلاط شماره ۲، دارای کمترین میزان درصد جذب آب بوده و پس از آن، به ترتیب، نمونه‌های مربوط به طرح اختلاط شماره ۳، دارای جذب آب کمی بوده‌اند.



شکل ۴: منحنی تغییرات درصد مقاومت نسبی نمونه‌ها در محلول اسید سولفوریک

اما پس از ۹۰ روز عمل‌آوری، نمونه‌های مربوط به طرح اختلاط شماره ۳ و پس از آن، طرح اختلاط‌های شماره ۴ و ۲، به ترتیب، دارای کمترین میزان درصد جذب آب بوده‌اند که این موضوع، نشان‌دهنده این است که در طولانی‌مدت،

- ۱- در این پژوهش با استفاده از اصلاح دانه‌بندی سنگدانه‌ها و با ۳۲۵ کیلوگرم مواد سیمانی در بتن و با نسبت آب به مواد سیمانی برابر با ۰/۴۲، مقاومت فشاری ۷۵۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، حاصل شد که مقاومت فشاری بسیار بالایی محسوب می‌شود.
- ۲- استفاده از میکروسیلیس، بدون حضور نانوسیلیس، در سنن پایین تأثیر بیشتری روی ویژگی‌های بتن دارد.
- ۳- بهترین نتایج جذب آب نمونه‌های بتنی، مربوط به استفاده هم‌زمان از میکروسیلیس و نانوسیلیس است. استفاده از ۸ درصد میکروسیلیس و ۲ درصد نانوسیلیس، جذب آب ۲۴ ساعته نمونه‌های بتنی را در سنن ۲۸ روزه و ۹۰ روزه، به ترتیب حدود ۳۴/۴ درصد و ۵۰/۸ درصد نسبت به نمونه شاهد، کاهش می‌دهد.
- ۴- آزمایش تعیین درصد جذب آب در سنن بالاتر از ۹۰ روز می‌تواند برای تخمین دوام بتن در محیط‌های مخرب به ویژه تهاجم اسید سولفوریک به کار رود.
- ۵- استفاده توأم میکروسیلیس و نانوسیلیس، می‌تواند دوام بهتری در محیط‌های اسیدی، نسبت به استفاده جداگانه میکروسیلیس به وجود بیاورد. ترکیب بهینه پیشنهادی برای میکروسیلیس و نانوسیلیس در این پژوهش به ترتیب ۸ و ۲ درصد است.
- ۶- مراجع :**
- [1] D. K. Thistlethwayte, "The Control Of Sulphides In Sewage Systems", *Butterworths*, Sydney, 1972.
- [2] T. Mori, T. Nonaka, K. Tazaki, M. Koga, Y. Hikosaka, S. Noda, "Interactions of nutrients, Moisture And pH on Microbial Corrosion of Concrete Sewer Pipes," *Water Research* 26(1), 1992, pp. 29-37.
- [3] H. Saricimen, M. Maslehuddin, "Case Study of Deterioration of Concrete in Sewerage Environment in an Arabian Gulf Country", *Durability of Building Materials*, Vol. 5, 1987, pp. 145-154.
- [4] W. Sand, E. Bock, "Concrete corrosion in the Hamburg sewer system", *Environmental Technology Letters*, Vol. 5, 1984, pp. 517- 528.
- [5] J. L. Barnard, "Corrosion of sewers", *Council for Scientific and Industrial Research (CSIR), Research Report 250*, South Africa, 1967.
- [6] S. L. Sarkar, "Lift stations—a testing ground for concrete durability", *Concrete Durability*, SP-170-69, in: V.M. Malhotra (Ed.), 1997, pp. 1357-1378.
- [7] C. Parker, "The Corrosion Of Concrete Isolation of a Species of Bacterium Associated with the Corrosion of Concrete Exposed to Atmospheres Containing Hydrogen Sulfide." *Australian Journal of Experimental Biology and Medical Science*, Vol. 23, No. 3, 1945, pp. 14-17.
- [8] E. 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*, Vol. 19. 2007, pp 155-163.
- [9] E.K. Attiogbe, S.H. Rizkalla, "Response of concrete to sulfuric acid attack", *ACI Material Journal*, 84, Vol. 6, 1988, pp. 481- 488.
- [10] J. M. Tulliani, L. Montanaro, A. Negro, and M. Collepard, "Sulfate Attack of Concrete Building Foundations Induced by Sewage Waters", *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, 2002, pp. 843-849.
- [11] F.F.Wafa, "Accelerated sulfate attack on concrete in a hot climate", *Cement and Concrete Aggregates*, 16 (1), 1994, pp. 31-35.
- [12] V. Pavli'k, "Corrosion of hardened cement paste by acetic and nitric acids: Part I. Calculation of corrosion depth", *Cement and Concrete Research*, 24, 1994, pp. 551- 562.
- [13] V. Pavli'k, "Corrosion of hardened cement paste by acetic and nitric acids: Part II. Formation and chemical composition of the corrosion products layer", *Cement and Concrete Research*, 24, 1994, pp. 1495-1508.
- [14] J. Monteny, E. Vincke, A. Beeldens, N. D. belie, L. Taerwe, D. V. Gemert, and W. Vestraete, "Chemical, Microbiological, and in situ Test Methods for Biogenic Sulfuric Acid Corrosion of Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 4, pp. 623-634, 2000.
- [15] J. Monteny, N. D. Belie, E. Vincke, W. Verstraete, and L. Taerwe, "Chemical and Microbiological Tests to Simulate Sulfuric Acid Corrosion of Polymer-Modified Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 9, 2001, pp. 1359-1365.

- [25] M. Jokar, H. Rahmani, M. Parvinnia, "Ideal Grading of Dense Packed Concrete", *1st National Conferece in non Osmosis Concretes - Water Storage Tank*, Rasht, Iran, 2011.
- [26] Q. Niu, "Effect of Superfine Slag Powder on Cement Properties", *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, pp. 615-621, 2002.
- [27] L. Jianyong, T. Pei, "Effect of Slag and Silica Fume on Mechanical Properties of High Strength Concrete", *Cement and Concrete Research*, 27-2, 833, 1997.
- [28] R. K. Iler, "The chemistry of silica, solubility, polymerization, colloid and surface properties, and biochemistry of silica", 1979, John Wiley.
- [29] E. Pelizzetti, "Fine particles science and technology: from micro to nanoparticles", *Kluwer Academic Publishers*, 1996.
- [30] T. Sugimoto "Fine particles: synthesis, characterization, and mechanisms of growth", Volume 92, *Surfactant Science Series*, 2000.
- [31] K. Fukushi, T. Sato, "Using a surface complexation model to predict the nature and stability of nanoparticles". *Environtal Science and Technology*, 39, 2008, pp.1250-6.
- [32] Y. Qing, Z. Zenan, K. Deyu, C. Rongshen, "Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume", *Construction Building Material*, vol. 21(3), 2007, pp. 539-545.
- [33] L. Senff, A.J. Labrincha, M.V. Ferreira, D. Hotza, W. L. Repette, "Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars", *Construction and Building Materials*, 23, 2009, pp. 2487-2491.
- [16] M. L. Brendt, "Protection of Concrete in Cooling Towers from Microbiologically Influence Corrosion." *Geothermal Resources Council Transaction*, San Diego, Vol. 25, 2001, pp. 3-7.
- [17] Z.T. Chang, X. J. Song, R. Munn, and M. Marosszeky, "Using limestone aggregates and different cements for enhancing resistance of concrete to sulphuric acid attack", *Cement and Concrete Research* 35, 2005, pp. 1486- 1494.
- [18] V. Pavlí'k, S. Uncik, "The rate of corrosion of hardened cement pastes and mortars with additive of silica fume in acids", *Cement and Concrete Research*, 27, 1997, pp. 1731- 1745.
- [19] H. Dorner, "Acid resistance of high performance concrete", *38th Research colloquium*, German Committee for Reinforced Concrete, Munich, Germany, 2000, pp. 77- 86.
- [20] A. A. Ramzaniapour, H. Rahmani," Effect of Silica fume and Ultra Fine Filler on Acid Resistance of Concrete", *Iranian Corrosion/ICA International Congress*, 14-15 May; Tehran, Iran, 2007.
- [21] H. Rahmani, A. A. Ramazaniapour, "effect of Binary Cement Replacement Materials on Sulfuric Acid Resistance of Dense Concretes". *Magazine of Concrete Research*, No. 2, 2008, pp. 145-155.
- [22] W. J. Byung, H. K. Chang, H. T. Ghi, B. P. Jong, "Characteristics of cement mortar with nano-SiO₂ particles", *Construction And Building Materials*, Vol. 21, 2007, pp. 1351-1355.
- [23] K.L. Lin, W.C. Chang, D.F. Lin, H.L. Luo, M.C. Tsai, "Effects of nano-SiO₂ and different ash particle sizes on sludge ash", *Cement Mortar Journal of Environmental Management*, 88, 2008, 708-714.
- [24] B. H. A. Hillemeier, "High Performance Concrete Specialized for Acid Resistance", *First International Conference on Concrete & Development*, Tehran, Iran, 2001.

Effect of Nano-SiO₂ and Silica Fume on Durability of High Strength Concretes under Sulfuric Acid Attack

H. Rahmani^{1*}, M. Jokar², M. Parvinnia³

1- Assistant Professor, Civil Engineering Department, Yasouj University, Yasouj, Iran.

2- MSc Student, Civil Engineering Department, Yasouj University, Yasouj, Iran.

3- Assistant Professor, Civil Engineering Department, Yasouj University, Yasouj, Iran.

hrahmani@yu.ac.ir

Abstract:

Concrete is one of the most practical and durable construction materials due to economic aspects, abundance of the constituents, adaptability with the environment and its high compressive strength and durability. High strength concretes are used in the most substructure constructions such as bridges, dams, towers, silos and etc.. The selection of proper aggregates and the constituents affects on the concrete properties such as strength, permeability, and durability. Therefore, optimization of mix designs is necessary to produce high strength and low permeability concretes. Although most of the concrete structures are constructed for 50 years service life, however, some of them are sometimes damaged due to sulfuric acid attack. The rate of concrete corrosion in sulfuric acid is a process of dissolution, sedimentation and leaching depends on the chemical compounds of cement, paste reactivity, aggregates type and their grading curves and the proportion of concrete components. Moreover, wetting and drying cycles increases the acid penetration and consequently the rate of corrosion. Remarkable concrete damages have been reported in Australia, Japan, the countries around Persian Gulf, Germany, South Africa and U.S.A.. Therefore, It will be necessary to repair or replace the damaged structure after the attack and it would be very expensive and creates many social problems. Nevertheless, several reports have been published to investigate plain concretes durability in acidic environments, but first, the results are paradoxical for example, silica fume effect against sulfuric acid attack and second, their studies have been conducted on the native construction materials such as fly ash or blast furnace slag. Therefore, it seems necessary to investigate concrete durability against sulfuric acid attack by using new materials such as nano-SiO₂. In the present study, durability of concretes containing silica fume, nano-SiO₂ and ultra fine Quartz powder was investigated under sulfuric acid attack. Concrete samples of four mix designs, including Silica Fume, nano-SiO₂ and ultra fine Quartz powder as cement filler, were investigated to find optimum content of Silica Fume and nano-SiO₂. Also to obtain a high strength concretes, ideal grading curve of aggregates and cementitious materials were used which lead to decrease cement consumption. Results show that the very low porosity concretes were obtained based on water absorption test results in comparison to plain concretes. Also, the 28 days compressive strength of all mixtures were obtained more than 500 kg/cm² using no more than 325 kg/m³ cementitious material content. Moreover, the durability of concretes against sulfuric acid attack, which is increased by silica fume and nano-SiO₂, directly related to the 90 days water absorption. In addition, After 6 months of immersion in sulfuric acid solution with pH of 1.0, the mixture containing 8% silica fume, 2% nano-SiO₂ and 25% ultra fine Quartz powder showed the best performance.

Keywords: Sulfuric Acid Attack, Silica Fume, Nano-SiO₂, High Strength Concrete.