

## افزایش دوام بتن در مقابل خوردگی اسیدی با استفاده از سنگدانه آهکی

سید محسن ساداتیان

۱-دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعت آب و برق

عبدالله رشیدی

استادیار و عضو هیأت علمی دانشگاه صنعت آب و برق

[a\\_rashidi@pwut.ac.ir](mailto:a_rashidi@pwut.ac.ir)

فرشاد وزین رام

استادیار و عضو هیأت علمی دانشگاه صنعت آب و برق

Piet N.L. Lens

Professor of UNESCO-IHE Institute for Water Education, Westvest 7, 2611 AX Delft the Netherlands

### چکیده

در این تحقیق اثر جایگزینی سنگدانه‌های معمول بتن با سنگدانه‌های آهکی بر دوام بتن در مقابل خوردگی اسیدی بررسی گردیده است. بدین منظور، نمونه‌های استوانه‌ای بتنی ساخته شده و در محلول اسید سولفوریک ۱ درصد قرار داده شدند. تغییرات وزن، ابعاد و مقاومت نمونه‌ها در فواصل مختلف زمانی سنجیده شد، و نتایج حاصل به همراه مشاهدات صورت پذیرفته بر روی نمونه‌ها و محلول خورنده مبنای قضاوت قرار گرفت. براساس آزمایش‌های صورت پذیرفته در طی ۱۴۵ روز مشاهده گردید که نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه آهکی مقاومت بیشتری نسبت به محیط خورنده اسیدی دارند. با استفاده از شاخص‌های کاهش وزن، ابعاد و مقاومت، نمونه‌های آهکی بالغ بر ۵۰٪ بهبود دوام نسبت به شرایط خورنده اسیدی را نشان داده‌اند. لذا با توجه به دسترسی ارزان و سهل به سنگدانه‌های آهکی در جای‌جای کشور ایران، بررسی بیشتر درمورد استفاده از این سنگدانه‌ها برای بالا بردن دوام بتن معقول به نظر می‌رسد.

واژه‌های کلیدی: خوردگی، بتن، سنگدانه آهکی، سنگدانه سیلیسی، دوام

## ۱- مقدمه

بتن به عنوان یک مصالح نسبتاً ارزان قیمت که در محل قابل تهیه است، یکی از اساسی ترین مصالح مورد استفاده در ساخت سازه های عمرانی می باشد. اما دوام آن در برابر شرایط خورنده و

علی الخصوص خوردگی اسیدی باعث محدودیت استفاده از آن در برخی پروژه ها گردیده است. بتن های به کار رفته در تولید لوله ها و تأسیسات انتقال و تصفیه آب و فاضلاب، دمداری ها و کشتارگاه ها، به صورت مستمر تحت خوردگی ناشی از اسید های حاصل از فعالیت های بیولوژیکی قرار دارند. همچنین بتن های موجود در مناطق صنعتی و شهری تحت ریزش باران ها اسیدی دچار حمله های اسیدی می گردند. در دهه های اخیر هزینه های ناشی از خرابی های به وجود آمده از این خوردگی ها متخصصین را به فکر افزایش دوام بتن در برابر خوردگی و کاهش هزینه های ناشی از آن انداخت. بر اساس برآوردهای صورت گرفته هزینه های خوردگی در کشورهای مختلف به طور متوسط بین ۱ تا ۵ درصد درآمد ناخالص ملی را شامل می شود. (اشتهدار دیها، ۱۳۸۲).

در لوله های و حوضچه هایی شبکه آب و فاضلاب، دمداری ها و کشتارگاه ها که شرایط رشد میکروبی وجود دارد، فعالیت های بیولوژیکی منجر به تولید مواد خورنده و به ویژه اسیدسولفوریک می گردد (N. De Belie, 2004). همچنین آلودگی هوا در مناطق پرتراکم صنعتی و شهری باعث می گردد تا در هنگام بارندگی، از ترکیب آلاینده های موجود در هوا و آب، باران اسیدی حاصل گردد. اسید حاصل از فرآیندهای مذکور، به علت خاصیت قلیایی بتن به سرعت با آن وارد واکنش شده و آنرا دچار خوردگی می کند. واکنش اسیدسولفوریک و هیدروکسید کلسیم در ابتدا منجر به تولید گچ می شود. در ادامه گچ تولید شده با هیدرات آلومینات (C3A) واکنش داده و اترنگیت تشکیل می دهد. گچ و اترنگیت افزایش حجم ۲،۲ و ۷ برابر نسبت به مواد ایجادکننده خود دارند (J. Monteny, 2000). این افزایش حجم باعث بروز فشارهای داخلی می شود که در نهایت ایجاد ترک و از هم پاشیدگی بتن خورده شده را به همراه دارد. علاوه بر ایجاد این فشار داخلی، خود مواد حاصل از فرآیند خوردگی نسبت به مواد سازنده شان از مقاومت کمتری برخوردار بوده، لذا با پیشرفت روند خوردگی رفته رفته از مقاومت بتن کاسته شده. به

## ۲- تحقیقات پیشین

تحقیقات متعددی جهت مقاوم نمودن بخش ضعیف بتن، یعنی خمیر قلیایی سیمان، در مقابل عوامل خورنده صورت پذیرفته است. در ابتدا توصیه به استفاده از سیمان های ضد سولفات و حتی استفاده از گوگرد به عنوان ماده چسباننده سنگدانه شده است. همچنین در تحقیقات متعددی سعی شده تا با استفاده از مواد افزودنی سیمانی (SCM) دوام خمیر سیمان نسبت به خوردگی افزایش یابد. مطالعات صورت پذیرفته در رابطه با استفاده از پودر سیلیس (J. Monteny, et al., 2003) و خاکستر بادی (T. Kazuyuk, K. Mitsunor, 1994) و همچنین مطالعات صورت گرفته بر روی سایر مواد مانند ترکیبات پلیمری (Willy Verstraete, 2002) و (J. Monteny, 2001) همگی در جهت تغییر ماهیت خمیر سیمان و بهبود دوام آن صورت پذیرفته اند که در مواردی نتایج مثبت و در برخی موارد نتایجی متناقض حاصل گردیده است. بسیاری از راه های ارائه شده برای افزایش دوام سیمان مؤثر بوده اند. اما عواملی از قبیل دسترسی، قیمت تمام شده، تجهیزات و تکنولوژی مورد نیاز برای اجرا و همانند آن باعث گردیده است تا استفاده از این روش ها محدود گردد.

به دلیل مقاومت سنگدانه های سیلیسی بتن در مقابل ترکیبات خورنده، محققان تا کنون تنها سعی بر مقاوم سازی خمیر سیمانی بتن داشته اند. اما با مطالعه دقیق تر روند خوردگی بتن مشاهده گردید که، ناهمگونی جنس سنگدانه های سیلیسی و خمیر قلیایی سیمان در طی روند خوردگی باعث پدید آمدن ریز ترک هایی بین این مصالح و افت مقاومت بتن می گردد (Chang, et al., 2005). از طرفی در بتن های ساخته شده با سنگدانه سیلیسی ماده خورنده تنها به خمیر سیمانی که در حدود ۳۰٪ حجم بتن را تشکیل می دهد حمله می کند. با از بین رفتن خمیر سیمانی، سنگدانه های بتن به راحتی کنده شده و هیچ گونه مقاومتی نمی کنند. در کنار این مطالب، تئوری هایی وجود دارد که در آنها به ارتباط مستقیم طول عمر بتن در برابر خوردگی

در این تحقیق منطبق با استاندارد ASTM-C267(2001) بوده است. بر اساس این استاندارد نمونه‌های استوانه‌ای بتنی با نسبت ارتفاع به قطر ۲:۱ تهیه شد که پس از قرارگیری در محیط خورنده در بازه‌های زمانی مختلف مورد سنجش قرار گرفتند. سنجش‌ها شامل اندازه‌گیری وزن، ابعاد، مقاومت، بررسی رنگ و شفافیت و مشخصات محلول و بررسی وضعیت ظاهری نمونه‌ها بوده است. به منظور سنجش تغییرات ابعاد و وزن، آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۳/۶ و ارتفاع ۷/۲ سانتی‌متر صورت گرفته است. همچنین برای بررسی تأثیر خوردگی بر مقاومت فشاری، از نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر استفاده شده است. در هر آزمایش از دو نوع نمونه ساخته شده با سنگدانه آهکی و سنگدانه سیلیسی استفاده شده است. طرح اختلاط، شرایط قالب‌ریزی و عمل‌آوری و در نهایت روند آزمایش و سنجش و ثبت داده‌ها برای نمونه‌های سیلیسی و آهکی کامل یکسان بوده است.

برای قالب‌ریزی نمونه‌های کوچک از قالب‌های دست‌سازی از جنس P.V.C و برای نمونه‌های بزرگ از قالب‌های آماده فلزی به کار استفاده شد. سنگدانه آهکی مورد استفاده در آزمایش‌ها، از سنگ‌های شکسته کوهی معدن اسب چران بالا واقع در ۵ کیلومتری شهر دماوند و سنگدانه‌های سیلیسی نیز سنگدانه‌های معمول مورد استفاده در بتن شرق تهران بوده است. مطابق نتایج حاصل از آزمایش استاندارد J-612-TEX مشخص گردید که میزان مواد غیر قابل حل در اسید برای ریزدانه‌های آهکی و سیلیسی به ترتیب برابر ۵ و ۷۹٫۶ درصد بوده است.

سنگ‌دانه‌های مورد استفاده، بر اساس استاندارد ASTM-C33-02 دانه‌بندی شده و درشت‌دانه‌های مصرفی برای نمونه‌های کوچک در دسته ۸۹ و برای نمونه‌های بزرگ در دسته ۶۷ استاندارد قرار گرفته‌اند. طرح اختلاط طراحی شده برای تمامی نمونه‌ها براساس بر روش ACI و با توجه به طرح اختلاط کارخانه‌های لوله‌سازی طراحی گردید. در جدول شماره ۱ طرح اختلاط نمونه‌های سیلیسی و آهکی کوچک و بزرگ ارائه شده است.

سیمان مورد استفاده، سیمان پرتلند تیپ پنج بوده که از جمله سیمان‌های ضد سولفات و مورد استفاده برای ساخت لوله‌ها و

اسیدی و میزان قلیائیت بتن اشاره شده است. بر اساس این نظریه‌ها با بالا رفتن میزان قلیائیت بتن (بر اساس  $\text{CaCO}_3$ )، میزان ماده برای خنثی‌سازی مواد خورنده اسیدی و در نتیجه طول عمر بتن افزایش می‌یابد (Tchobanoglous, 1981). در همین رابطه برای بالا بردن قلیائیت بتن استفاده از سنگدانه‌های قلیایی پیشنهاد شده است. مطابق این تئوری استفاده از سنگدانه‌های قلیایی می‌تواند دوام بتن در برابر خوردگی را افزایش دهد اما از جهت دیگر امکان آسیب‌پذیر شدن بتن نیز وجود دارد.

با توجه به موارد مذکور، در سال‌های اخیر تحقیقاتی با استفاده از سنگدانه‌های قلیایی و به ویژه آهکی جهت بالا بردن دوام بتن صورت پذیرفته است. به طور مثال در نمونه‌ای از این تحقیقات (Chang, et al., 2005) با جایگزینی سنگدانه‌های سیلیسی توسط سنگدانه‌های آهکی نتایج حاصل گردیده که نشان می‌دهد، استفاده از سنگدانه آهکی در بتن می‌تواند همخوانی رفتار سنگدانه و سیمان در مقابل عامل خورنده را ایجاد کند. این امر باعث جلوگیری از ایجاد ناپوستگی بین خمیر سیمان-سنگدانه و افت مقاومت ناشی از گسترش ریزترک‌ها گردد. همچنین تحقیقات مرتبطی در دانشگاه Ghent بلژیک صورت پذیرفته است (Belie et al., 2004) که در طی آن نتیجه گرفته شد، استفاده از سنگدانه آهکی دوام بتن در مقابل عوامل خورنده اسیدی را تا حدودی افزایش می‌دهد. علت این امر ایجاد ریز محیطی خنثی در نزدیکی سطح بتن ساخته شده با سنگ آهک می‌باشد که روند خوردگی را کاهش می‌دهد.

با توجه به سهولت تغییر نوع سنگدانه در روند تولید بتن و با توجه به ارزانی و در دسترس بودن مصالح آهکی در جای‌جای کشور ما و در بسیاری از نقاط دنیا، انجام تحقیقاتی در زمینه بالابردن دوام بتن با استفاده از این نوع سنگدانه، از جدایی‌های فراوانی برخوردار است. لذا در این بررسی علمی سعی بر مقایسه دوام بتن‌های تولید شده با سنگدانه‌های سیلیسی معمول و بتن‌های تولید شده با سنگدانه‌های آهکی شده است.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

در این تحقیق آزمایش‌ها با بهره‌گیری از روش شتابدار شیمیایی صورت پذیرفته است و محیط خورنده با محلول اسیدسولفوریک ۱درصد شبیه‌سازی شده است. روش کلی آزمایش‌های انجام شده

جدول ۱- طرح اختلاط نمونه‌های بزرگ و کوچک سیلیسی و آهنی

عنوان	واحد	نمونه‌های کوچک	نمونه‌های بزرگ
نسبت آب به سیمان	-	۰,۵	۰,۴۵
آب	لیتر در مترمکعب	۲۳۰	۲۰۰
سیمان	کیلوگرم در مترمکعب	۴۶۰	۴۵۰
ماسه	کیلوگرم در مترمکعب	۱۱۶۰	۱۰۴۰
شن	کیلوگرم در مترمکعب	۸۳۰	۶۷۰

دقیقه بر روی وجه جانبی‌شان قرار می‌گیرند تا سطح آنها کاملاً خشک شده و پس از آن اندازه‌گیری صورت می‌پذیرد. در واقع این عمل شستشو و خشک نمودن مشابه فرآیند شستشو و کنده شدن مواد حاصل از خوردگی در اثر عوامل طبیعی مانند جریان فاضلاب و آب در لوله و کانال‌ها یا شستشو مواد ناشی از فرسایش‌های فیزیکی حاصل از بارندگی و عواملی اینچنینی می‌باشد.

در مورد اندازه‌گیری‌های ابعاد، ۲ عدد برای ارتفاع استوانه بتن و ۴ عدد برای قطر استوانه قرائت شده است. ارتفاع و اقطار در دو جهت عمود بر هم و در دو سر نمونه‌ها اندازه‌گیری شده‌اند. میانگین این اعداد به صورت قطر و ارتفاع متوسط استوانه گزارش شده است. جهت اندازه‌گیری وزن نمونه‌ها نیز از ترازوی دیجیتال با دقت  $0,0001$  گرم استفاده شده است. اندازه‌گیری وزن و ابعاد نمونه‌های کوچک در بازه‌های زمانی ۳، ۷، ۱۷، ۲۴، ۳۱، ۳۸، ۵۶، ۶۹، ۸۳، ۹۸، ۱۱۰، ۱۲۴ و ۱۴۵ روز پس از قراردادن در اسید صورت پذیرفته است.

برای آزمایش سنجش مقاومت فشاری نمونه‌ها که در آن از نمونه‌های بزرگ استفاده شده، در ابتدا و پس از ۴۲ روز عمل‌آوری بتن در آب، یک جفت از هر نوع نمونه بارگذاری گردیده‌اند. مقاومت ثبت شده به عنوان مقاومت اولیه نمونه‌ها در نظر گرفته شد. علت بارگذاری اولیه پس از ۴۲ روز دیرگیر بودن سیمان نوع پنج می‌باشد. پس از آن و در انتهای دوره آزمایش نمونه‌هایی که به مدت ۶۸ روز، پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، در معرض اسید قرار گرفته بودند مورد بارگذاری قرار گرفتند. همزمان با این نمونه‌ها نمونه‌هایی که در طول این مدت در آب نگهداری شده بودند نیز بارگذاری گردیدند. مقاومت تمام نمونه‌های به صورت حداکثر بار تحمل شده توسط نمونه قبل از

همچنین سازه‌های در معرض خوردگی می‌باشد. بازه مناسب اندازه‌سنگدانه‌ها و همچنین میزان نسبت آب به سیمان برای نمونه‌ها بر اساس بتن‌های معمول ساخت لوله و همچنین یک سری آزمایش اولیه جهت شناسایی زوایای ساخت و قالب‌ریزی و عمل‌آوری بتن، انتخاب گردیده‌اند. در این سری آزمایش‌های اولیه نحوه قالب‌ریزی، نگهداری و سنجش نمونه‌ها بهینه گردید؛ به صورتی که در تست‌های اصلی کمترین عوامل خطا در نتایج وارد گردید.

بتن نمونه‌های بزرگ توسط دستگاه خلاطه آزمایشگاهی آماده شده است اما در مورد نمونه‌های کوچک مواد تشکیل دهنده به صورت دستی با هم مخلوط شده و پس از قالب‌ریزی مرحله‌ای و لرزاندن، تمامی نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در قالب و در رطوبت نسبی ۹۸٪ نگهداری شدند. پس از باز نمودن قالب‌ها، نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز به صورت غوطه‌ور در آب، در دمای  $23 \pm 5$  درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری گردیدند تا به مقاومت اولیه برسند.

پس از گذشت زمان عمل‌آوری نمونه‌ها از آب خارج شده و پس از اندازه‌گیری اولیه از هر نوع نمونه ۶ استوانه در محلول اسیدسولفوریک ۱٪ و در دمای  $23 \pm 5$  درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. همزمان با نمونه‌های قرار گرفته در محلول اسیدی از هر نوع نمونه دو استوانه نیز به عنوان شاهد در آب قرار داده شده و به صورت همزمان و مشابه با نمونه‌های اصلی سنجیده شدند تا تأثیر خوردگی از تغییرات ناشی از گذشت زمان تفکیک گردد. نتایج نمونه‌های در اسید و نمونه‌های در آب به ترتیب به صورت میانگین‌گیری نتایج ۶ و ۲ نمونه استوانه‌ای ارائه گردیده است. مطابق استاندارد ASTM-C267-01 برای اندازه‌گیری وزن و ابعاد نمونه‌ها، آنها را ۳ مرتبه با آب شیر شسته و با دستمالی خشک می‌کنیم. پس از آن نمونه‌ها به مدت ۳۰

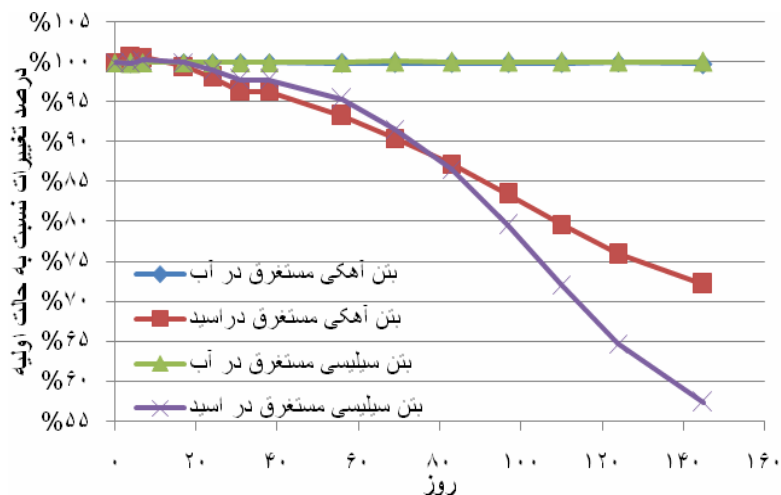
### ۳- ارائه نتایج، بحث و بررسی

جهت بررسی روند تغییرات عوامل سنجیده شده سنجش اولیه پارامتر مذکور برای هر نمونه قبل از قرار گیری در محیط خورنده و پس از عمل آوری، ۱۰۰ در صد فرض شده و سنجش‌های بعدی همان نمونه در طول آزمایش به صورت درصدی از سنجش اولیه در نظر گرفته شدند. بدین ترتیب امکان رسم نمودار درصد تغییرات پارامترهایی مانند وزن و ابعاد در طول زمان برای نمونه‌های مختلف میسر گردید. در نهایت نتایج حاصل از نمونه‌های یکسان، میانگین گیری شد و ملاک مقایسه حالت‌های مختلف قرار گرفت. نمودار شماره ۱ روند تغییرات وزن را در نمونه‌های کوچک نمایش می‌دهد. بر اساس داده‌های حاصل از این نمودار نرخ از دست رفتن وزن

فروپاشی تقسیم بر مساحت نمونه ثبت گردید و در نهایت مقاومت متوسط نمونه‌های همسان گزارش گردیده است. تصویر شماره ۱ روند تغییرات ظاهر نمونه‌های کوچک آهکی و سیلیسی را در دوره‌های مختلف اندازه‌گیری نشان می‌دهد. در طول دوره آزمایش شرایط ظاهری نمونه‌ها و محلول خورنده به صورت مرتب ثبت و بررسی می‌گردید. نتایج حاصل از این برداشت‌ها به همراه سایر مشخصات اندازه‌گیری شده مبنای تفسیر نتایج واقع شدند. همچنین در طول آزمایش برای ثابت نگاه داشتن میزان خوردگی محیط محلول خورنده تعویض می‌شد. به طور متوسط عملیات تجدید محلول خورنده هر ۱۴ روز یک بار صورت می‌پذیرفت. در هر بار تعیض محلول اسیدی pH قدیمی و جدید ثبت می‌گردید.



تصویر ۱- نمونه‌های سیلیسی (ردیف پایین) و آهکی (ردیف بالا) در روز ۸۲ آزمایش



نمودار ۱ - تغییرات وزن نمونه‌های آهکی و سیلیسی مستغرق در اسید و در آب

بودند، ولی در مورد ظروف نمونه‌های سیلیسی مواد ته‌نشین شده عمدتاً سنگدانه‌های ریز و درشت بودند که در اثر خورده شدن چسب سیمان دورشان، از جسم بتن جدا شده بودند. در نمودارهای شماره ۲، درصد تغییرات قطر و ارتفاع نمونه‌های استوانه‌ای نمایش داده شدند. روند کلی تغییرات مشاهده شده با تغییرات وزن نمونه‌ها مطابقت دارد.

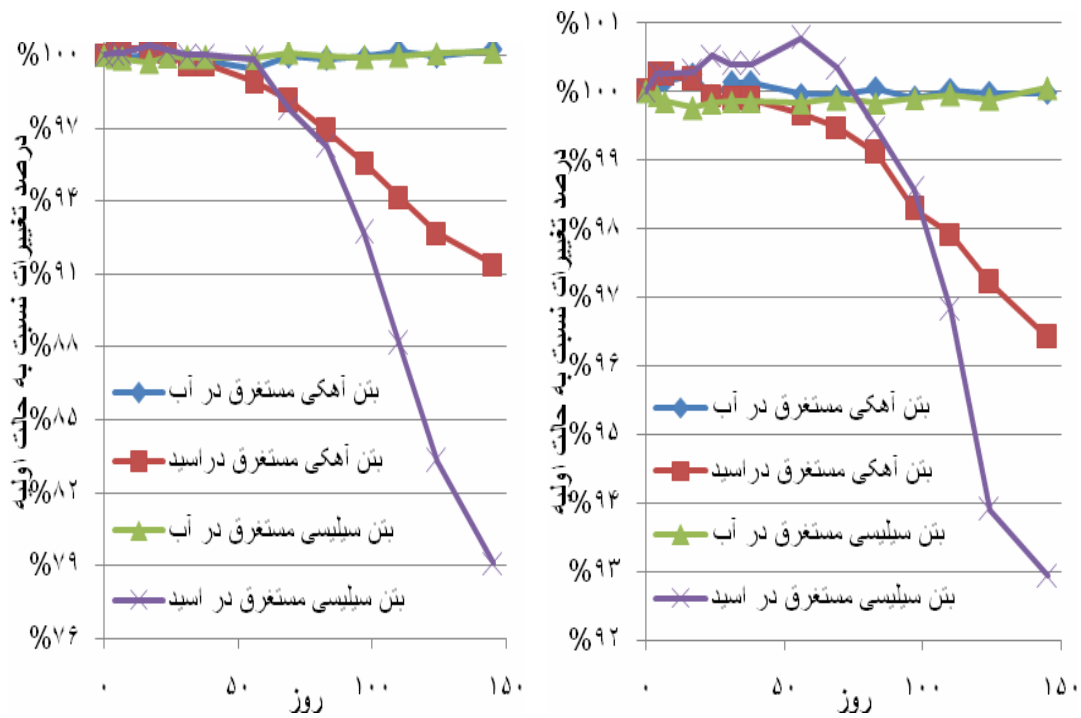
در مورد قطر می‌توان گفت که مکعب آن با حجم و وزن نمونه رابطه مستقیم دارد، لذا تا حدودی اختلاف در شدت و ضعف رفتار نمودار تغییرات قطر و تغییرات وزن در طول زمان به چشم می‌خورد. با توجه به هفته‌های اول نمودارهای تغییرات ابعاد، مشاهده می‌شود که در این دوره افزایش چند درصدی ابعاد نسبت به ابعاد اولیه وجود دارد. علت این امر همانطور که گفته شد، تشکیل مواد حجیم حاصل از خوردگی و تورم نمونه می‌باشد، اما با گذشت زمان و تکرار اندازه‌گیری‌ها و به تبع آن شستشو نمونه‌ها، این مواد سست متورم از سطح نمونه شسته شده و ابعاد نمونه رو به کوچک شدن می‌گذارد. در واقع این افزایش ابعاد، به دلیل کم مقاومت و کم چگالی بودن بخش افزوده شده به ابعاد نمونه، در نمودار تغییرات وزن و یا مقاومت فشاری تأثیر نمی‌گذارد.

نمودار شماره ۳ مقاومت فشاری نمونه‌های سیلیسی و آهکی مستغرق در آب و محلول اسیدی را برحسب مگاپاسکال نشان می‌دهد. براساس این داده‌ها، بر اثر تأثیرات خوردگی، مقاومت نمونه‌های سیلیسی ۴۲٪ و مقاومت نمونه‌های آهکی ۳۰٪ افت داشته است. این اعداد به وضوح نشان می‌دهد که تأثیر خوردگی بر کاهش مقاومت نمونه‌های سیلیسی ۱/۴ برابر نمونه‌های آهکی بوده است. یکی از علل اصلی کاهش مقاومت شدید نمونه‌های سیلیسی، ناهمگونی چسب سیمان و سنگدانه‌ها می‌باشد. با پیشرفت خوردگی و تشکیل مواد حاصل از آن ترک‌های مویی بین سنگدانه و خمیر خورده شده سیمان به وجود می‌آید که هم محل نفوذ اسید بوده و هم باعث افت شدید مقاومت می‌گردد.

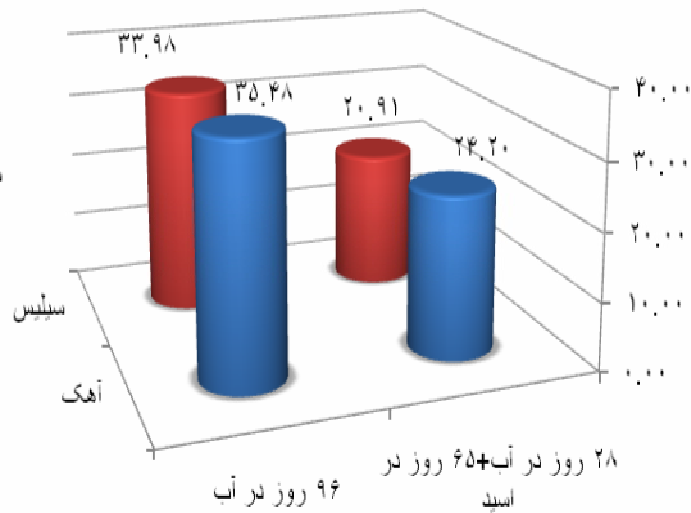
در تمامی آزمایش‌های صورت گرفته تغییرات خصایص نمونه‌های نگهداری شده در آب نسبت به نمونه‌های اولیه پس از عمل آوری ناچیز و در حدود ۰/۱ درصد بوده است. لذا تمامی نتایج حاصله و تغییرات ثبت شده در مشخصات نمونه‌ها در طول آزمایش، تنها به دلیل پیشرفت روند خوردگی بوده است.

نمونه‌های سیلیسی در فواصل زمانی ما بین هفته ۴ و ۵ و هفته‌های ۱۹ و ۲۰ به ترتیب برابر ۰/۱۸ و ۱/۰۶ درصد در روز بوده است. در صورتی که این مقدار برای نمونه آهکی ۰/۲۶ و ۰/۵۴ درصد در روز می‌باشد. ملاحظه می‌گردد که نرخ خوردگی در هفته‌های اول برای نمونه‌های آهکی و سیلیسی نزدیک هم بوده و حتی در این دوره خوردگی نمونه‌های آهکی اندکی شدیدتر از نمونه‌های سیلیسی و تقریباً ۱/۴ برابر آن بوده است. اما پس از پیشرفت خوردگی این نرخ در مورد نمونه‌های سیلیسی شدت یافته، به صورتی که نرخ خوردگی نمونه‌های سیلیسی تا ۲ برابر نمونه‌های آهکی افزایش یافته است. علت این امر بر اساس مشاهدات، تفاوت در پروسه خوردگی بتن آهکی و سیلیسی تفسیر شده است. در نمونه آهکی به علت قلیایی بودن سنگدانه و خمیر سیمان، این هر دو، به صورت همزمان خورده شده و با اسید واکنش می‌دهند. لذا محیطی یکنواخت و کوچک در اطراف نمونه ایجاد می‌شود که اسید در آن محدوده، تقریباً با جسم بتن خنثی شده و خوردگی چندانی ایجاد نمی‌کند. علاوه بر آن مواد حاصل از خوردگی که عمدتاً مواد خمیری شکل سفید رنگ متشکل از گچ بوده است به صورت فیزیکی از نفوذ اسید به داخل بتن جلوگیری به عمل می‌آوردند.

در صورتی که در مورد نمونه‌های سیلیسی، سنگدانه بی‌اثر با اسید واکنش نداده و تنها بخش کم حجم خمیر سیمان وارد واکنش خوردگی می‌گردید. این امر باعث شد تا تشکیل محیطی خنثی در حول بتن و همچنین تشکیل فرآورده‌های حجیم خمیری شکل در سطح بتن، به چشم نخورد. شاید در هفته‌های اول خوردگی سطح خورده شده یکنواخت بتن آهکی خوردگی شدیدتری را نشان می‌داد، اما با پیشرفت فرآیند خوردگی و نفوذ اسید به خمیر سیمان دور سنگدانه‌های بتن سیلیسی، این سنگدانه‌ها با کمترین نیرویی از جای خود خارج شده و کاهش وزن شدیدی در نمونه ایجاد می‌نمودند. همچنین بدین صورت جبهه‌های جدیدی برای حمله اسید فراهم می‌آمد. ناهمگونی جنس خمیر سیمان و سنگدانه سیلیسی، نفوذ اسید در بین آنها را تسریع می‌کرد. در طول آزمایش مشاهده گردید که مواد حاصل از خوردگی که از سطح نمونه‌ها جدا می‌شدند و در محلول ته‌نشین می‌شدند، در دونوع نمونه متفاوت بودند. در ظروف نگهداری نمونه‌های آهکی این مواد سفید رنگ، خمیری شکل و تقریباً بدون سنگدانه



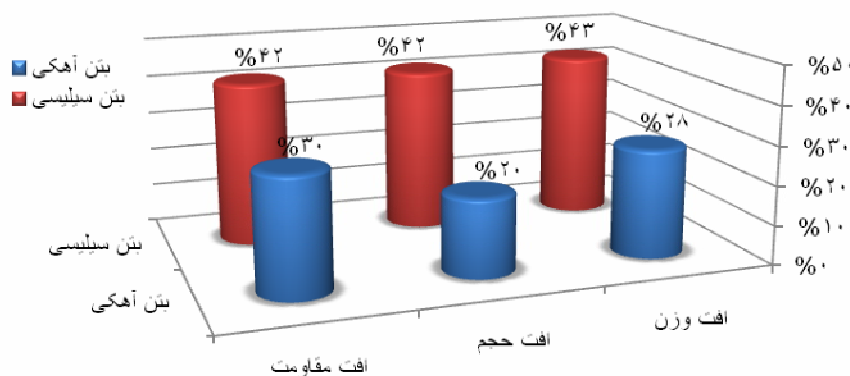
نمودار ۲- نمودار تغییرات قطر (سمت راست) و ارتفاع (سمت چپ) نمونه‌های استوانه‌ای آهکی و سیلیسی مستغرق در اسید و در آب



نمودار ۳- مقاومت فشاری نمونه‌های آهکی و سیلیسی برحسب مگاپاسکال

#### ۴- نتیجه گیری

به صورت کلی می توان گفت، استفاده از سنگدانه های آهکی به جای سنگدانه های معمول و بی اثر سیلیسی در ساخت بتن های در تماس با محیط های خورنده اسیدی، دوام آنها را افزایش داده است. از علل این امر می توان ایجاد ریز محیطی خشی در نزدیکی سطح بتن آهکی و همچنین کاهش نفوذ محلول خورنده در عمق نمونه به دلیل تشکیل مواد خمیری در سطح بتن آهکی را نام برد. در نمودار شماره ۴ تغییرات متوسط شاخص های بررسی شده در این تحقیق، برای نمونه های سیلیسی و آهکی ارائه گردیده است. بر اساس داده های این نمودار مشخص گردیده. با توجه به داده های ارائه شده بر اساس داده های این نمودار می توان نتیجه گیری نمود، دوام بتن ساخته شده با سنگدانه آهکی نسبت به شرایط خورنده بر اساس شاخص های تغییر وزن، حجم و مقاومت



نمودار ۴- نمودار درصد کاهش وزن، حجم و مقاومت فشاری نمونه های بتن سیلیسی و آهکی در اثر خوردگی

*Cement and concrete Research*, 34, 2223-2236. 2004.

[3]. Monteny J., De Belie N. and Taerwe L. "Resistance of different types of concrete mixtures to. *Materials and Structures* ", 36, 242-249, 2003.

[4]. Verstraete Willy.. " International Biodeterioration & Bio degradation ", 49, 283-292. ASTM C 33. Standard Specification for Concrete Aggregates. Philadelphia. 1-11, 2002.

[5]. J. Monteny, N. De Belie, E. Vincke, W. Verstraete, L. Taerwe. "Chemical and microbiological tests to simulate sulfuric acid." *Cement and Concrete Research*, 31, 1359-1365. 2001.

[6]. ASTM C 267. "Chemical resistance of mortars, grouts, and monolithic surfacings and polymer

#### ۵- پانویس

۱. Ettringite ( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ )

۲. Silica fume

۳. Fly ash

#### ۶- مراجع

[1]. Chang Zhen-Tian, Song Xiu-Jiang, Munn Robert, Marosszky Marton. "Using limestone aggregates and different cements for enhancing resistance." *Cement and Concrete Research*, 35, 1489-1494. 2005.

[2]. De Belie N., Monteny J., Beeldens A, Vincke E., Van Gemert D., Verstraete W. "Experimental research and prediction of the effect of chemical."



- [10]. Brown J. V., Maisel J. W., Eds Tchobanog - lous, G. Wastewater Engineering: "Collection and Pumping of Wastewater". New York., United States of America: Metcalf & Eddy, 1981.
- [۱۰]. اشتها ر دیها، ح. «کنترل خوردگی فاضلاب رو های بتنی در حال بهره برداری». هشتمین کنگره ملی خوردگی تهران: انجمن ملی خوردگی، ص. ۵-۳، ۱۳۸۲.
- concretes", Annual Book of American Society for Testing Materials. Philadelphiapp. 1-6. 2001.
- [7]. Tex-612-J. "Acid Insoluble Residue for Fine Aggregate. Texaspp". 1-7,(2000).
- [8]. Monteny J., Vincke E., Beeldens A., De Belie N., Taerwe L., Van Gemert D., Verstraete W. "Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulfuric". *Cement and Concrete Research* , 30, 623-634, 2000.
- [9]. Kazuyuk T., Mitsunor K., "Effects of fly ash and silica fume on the". *Cement and Concrete Research* , 24, 361-370, 1994.