فصل اول
کلیات

۱-۱ مقدمه

امروزه بتن به عنوان یکی از پر مصرف‌ترین و با دوام‌ترین مصالح ساختمانی شناخته شده است. مقرون به صرفه بودن، وجود منابع فراوان مواد متشکل، سازگاری با محیط و مقاومت مطلوب از دلایل مصرف روزافزون این ماده می‌باشد. اما در برخی موارد بتن در معرض اسید قرار می‌گیرد که از آن جمله می‌توان به لوله‌های فاضلاب شهری خصوصاً فاضلاب‌های صنعتی، بتن کف ساختمان‌های پرورش طیور، کف ساختمان‌های صنعتی و غیره اشاره نمود. دوام بتن در محیط‌های اسیدی، خصوصاً اسید سولفوریک، به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرد. علیرغم کسب تجربه‌های ناموفق در استفاده از بتن‌های معمولی در موارد مذکور و خرابی‌های متعدد به وجود آمده که دوام بتن را تحت تأثیر قرار می‌دهد، هنوز تحقیقات وسیعی در این امر صورت نگرفته است. بر این اساس، تحقیق مذکور در دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه یاسوج تعریف شده تا ضمن بهبود ناحیه انتقال بتن که توسط میکرو سیلیس و نانوسیلیس صورت خواهد گرفت، دوام بتن‌های حاوی این مواد در برابر تهاجم اسیدسولفوریک بررسی گردد. در این تحقیق با بکارگیری شش طرح اختلاط مختلف حاوی نانوسیلیس، میکرو سیلیس و فیلر، بصورت جداگانه و ترکیبی، نمونه‌های بتنی جهت انجام آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری، کاهش وزن نمونه بتنی در اسید، کاهش وزن نمونه ملاتی در اسید و درصد جذب آب ساخته شده‌اند. همچنین جهت دستیابی به بتن‌هایی با مقاومت بالا سعی می‌گردد با استفاده از دانه‌بندی بهینه سنگدانه‌ها و طرح اختلاط مناسب، عیار سیمان مصرفی به حداقل تقلیل یابد.

۱-۲ کلیات شامل اهمیت موضوع، اهداف و فرضیه‌های تحقیق

استفاده از بتن با مقاومت بالا خصوصاً با مقدار سیمان حداقل، در کلیه پروژه‌های مرتبط شامل: پل‌ها، سدها، برج‌ها و ساختمان‌های بلندمرتبه، سیلوها و غیره کاربرد دارد. همچنین استفاده از طرح اختلاط

مورد قبول، می‌تواند در سازه‌هایی که در معرض تهاجم مواد اسیدی خصوصاً اسید سولفوریک قرار دارند، مانند؛ لوله‌های فاضلاب شهری و صنعتی، کف ساختمان‌های پرورش طیور و صنعتی، کاربرد داشته باشد. دوام بتن در محیط‌های اسیدی خصوصاً اسیدسولفوریک به شدت تحت تأثیر قرار می-گیرد. هر چند سازه‌های بتنی در محیط‌های خورنده برای عمر مفید ۵۰ تا ۱۰۰ سال با کمترین هزینه تعمیر و نگهداری محاسبه و طراحی می‌شوند ولی هزینه‌های بسیار زیادی جهت مرمت و نگهداری سازه‌های بتنی در محیط‌های اسیدی در سرتاسر دنیا تاکنون صرف شده است که از آن جمله می‌توان به هزینه‌های زیاد لوله‌های فاضلاب بتنی در دنیا اشاره نمود.

در خصوص بتن‌های معمولی و دوام آنها در محیط‌های اسیدی تحقیقات بسیاری صورت گرفته است، ولی تحقیقات انجام شده در سایر کشورها، اولاً در برخی موارد ضد و نقیض می‌باشد، مانند عملکرد میکرو سیلیس در برابر تهاجم اسید سولفوریک، ثانیاً تحقیقات آنها بر اساس مصالح و مواد داخلی موجود در آن کشورها مانند خاکستر بادی و یا سرباره کوره‌های آهن‌گدازی می‌باشد. گرچه در میان تحقیقات صورت گرفته، روشهای مناسبی از جمله استفاده از ملات‌های خاص، پوشش‌های با عملکرد بالا، روکش‌های مسلح به الیاف شیشه (Fiber Glass Reinforced Lining) و غیره جهت محیط‌های اسیدی ارائه شده است، ولی استفاده از آنها نسبتاً گران می‌باشد. پس نیاز به بررسی بیشتر بتن و خصوصیات میکروسیلیس و نانو سیلیس خصوصاً در حمله اسید به بتن، بشدت احساس می‌شود. لذا در تحقیق حاضر، سعی شده تا اثر میکرو سیلیس و نانو سیلیس به همراه پودر کوارتز (فیلر) مورد بررسی و آزمایش قرار گیرد.

هدف از انجام این تحقیق، ساخت بتن‌هایی با مقاومت فشاری فوق‌العاده بالا با استفاده از حداقل سیمان و دستیابی به بتنی با مقاومت بالا در برابر اسید سولفوریک (یکی از خورنده‌ترین اسیدهای موجود در فاضلاب) می‌باشد. نحوه انتخاب پارامترهای تحت بررسی به تفصیل در فصل‌های بعدی ارائه شده است که این پارامترها به نحوی انتخاب شده‌اند تا طرح اختلاط‌های مورد بررسی، از نظر میزان سیمان مصرفی نیز بهینه گردند. همچنین انتظار می‌رود استفاده از نانوسیلیس و میکروسیلیس که موجب بهبود ناحیه انتقال سنگدانه‌ها می‌گردند، باعث بهبود خصوصیات مکانیکی و دوام بتن‌های تحت بررسی، شده و مقادیر بهینه آنها نیز استخراج گردد. فرضیه‌های این تحقیق به شرح ذیل می‌باشند:

۱. استفاده از نانوسیلیس، عملکرد بتن‌ها را در برابر تهاجم اسیدسولفوریک، بهبود خواهد بخشید.
۲. استفاده توأم میکروسیلیس و نانوسیلیس، عملکرد بتن‌ها را در برابر تهاجم اسیدسولفوریک، بهبود خواهد بخشید.
۳. مقادیر بهینه‌ای برای ترکیب میکروسیلیس و نانوسیلیس وجود دارد که می‌توان آنها را بدست آورد.
۴. استفاده از میزان (عیار) پائین مواد سیمانی جهت دستیابی به بتن مقاومت بالا، امکان‌پذیر می‌باشد.

۱-۳ روش تحقیق

با توجه به اینکه هدف از این تحقیق بررسی دوام بتن‌های با مقاومت بالا در محیط‌های اسیدی مخصوصاً اسید سولفوریک می‌باشد از روش تحقیق تجربی برای بررسی دوام این بتن‌ها استفاده شده

است. از پارامترهای تأثیرگذار می‌توان به نوع مواد سیمانی، مصالح و سنگدانه‌ها، نوع و میزان پوزولان، نسبت آب به مواد سیمانی و میزان pH اشاره نمود. با توجه به اینکه عملکرد میکرو سیلیس در تحقیقات صورت گرفته ضد و نقیض گزارش شده و همچنین به علت عدم وجود گزارش‌های کافی در خصوص عملکرد نانو سیلیس در محیط‌های اسید سولفوریک، از میکرو سیلیس و نانو سیلیس جهت این امر استفاده شده است. علاوه بر آن، با توجه به اینکه در تحقیقات صورت گرفته، تأثیر میزان سیمان جهت دستیابی به مقاومت بالا در برابر اسید، بررسی شده است، لذا در تحقیق حاضر، میزان بهینه سیمان بدست آمده از نتایج مقاومت فشاری، در بررسی مقاومت نمونه‌ها در برابر اسید، استفاده شده است. طرح اختلاط بتن‌های مورد استفاده، بر اساس ایجاد حداکثر دانسیته خشک مخلوط و یا حداقل تخلخل در سنگدانه‌ها و مواد سیمانی استوار می‌باشد. استفاده از دانه‌بندی ایده‌آل در سنگدانه‌ها و استفاده از پودر کوارتز به عنوان میکروفیلر در مواد سیمانی جهت بهبود دانه‌بندی مواد سیمانی از جمله نکات مهم طرح اختلاط مذکور می‌باشد. آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی و ملاتی، درصد جذب آب نمونه‌های بتنی، جهت مشخص نمودن خصوصیات مکانیکی مخلوط‌ها در نظر گرفته شده و جهت تعیین مقاومت نمونه‌ها در برابر تهاجم اسیدسولفوریک معیار تغییر وزن در نظر گرفته شده است. نسبت آب به مواد سیمانی و درجه اسیدی یا pH اسید در این تحقیق ثابت در نظر گرفته شده‌اند.

در این تحقیق با بکارگیری شش طرح اختلاط مختلف که نانو سیلیس، میکرو سیلیس و فیلر بصورت جداگانه و ترکیبی در آنها شرکت داشتند، نمونه‌هایی بتنی بدین شرح تهیه شدند که: برای هر طرح اختلاط، نمونه‌هایی برای آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری، کاهش وزن نمونه بتنی در اسید، کاهش وزن نمونه ملاتی در اسید و درصد جذب آب ساخته شدند. نمونه‌ها پس از ساخت، عمل‌آوری شده و پس از عمل‌آوری، آزمایش‌های مذکور بر روی آنها انجام شد و نتایج حاصله، مورد بررسی قرار گرفت.

در متن پایان‌نامه پیش رو، در ادامه به این موضوعات و مباحث اصلی پرداخته خواهد شد: فصل دوم این پایان‌نامه به مروری بر تحقیقات و پژوهش‌های انجام شده اختصاص دارد که شامل بخشی از تحقیقات و آزمایش‌های مهم در زمینه ارائه روش‌های دانه‌بندی بهینه مصالح و سنگدانه‌ها، استفاده از میکرو سیلیس و نانو سیلیس به منظور بالا بردن مقاومت فشاری و همچنین مقاومت در برابر اسید می‌باشد. در فصل سوم به مصالح بکار رفته در این تحقیق، شامل نوع و مشخصات سنگدانه‌ها و دانه-بندی آنها تشریح خواهد شد. در فصل چهارم به بررسی طرح اختلاط‌های بکار رفته در تحقیق حاضر، چگونگی ساخت نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها پرداخته شده است. نتایج آزمایش‌ها و بحث و بررسی نتایج نیز در فصل پنجم ارائه شده است و در پایان، نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها جهت انجام تحقیقات آینده ذکر شده است.

فصل دوم
مروری بر تحقیقات انجام شده

۲-۱ مقدمه

بتن به عنوان ماده‌ای است که از دو فاز مختلف یعنی سیمان هیدراته‌شده (فاز ملات) و دانه‌های سنگی (فاز سنگدانه) تشکیل شده است. فصل مشترک بین این دو فاز که به ناحیه انتقال بتن موسوم است به قدری دارای اهمیت است که برخی از متخصصین این فاز را به عنوان فاز سوم بتن معرفی کرده‌اند. این ناحیه یکی از مهمترین پارامترها برای ارائه طرح اختلاط بتن‌های با دوام می‌باشد. البته با توجه به اینکه نفوذ در داخل خمیر سیمان صورت می‌پذیرد و علاوه بر این، در خمیر سیمان انواع منافذ به اندازه‌های ۱ نانومتر تا ۱ میلی‌متر وجود دارد، هر چقدر ارتباط بین این منافذ با یکدیگر بیشتر باشد، نفوذپذیری افزایش یافته و عوامل مهاجم به راحتی وارد بتن می‌شوند. پس بایستی دانه‌بندی مصالح سیمانی به نحوی انجام گیرد که مقدار تخلخل در داخل خمیر سیمان کاهش یابد. به عبارتی دیگر، اگر بتوان نفوذپذیری فاز ملات را به طریقی کاهش داد در حقیقت عمر بتن در برابر عوامل مهاجم افزایش یافته است[۱].

با توجه به اینکه سنگدانه‌ها در حدود ۶۰ تا ۹۰ درصد حجم بتن را تشکیل می‌دهند انتخاب مناسب نوع سنگدانه‌ها و دانه‌بندی آنها نیز بر روی خواص اصلی بتن از قبیل مقاومت، نفوذپذیری، دوام، کارآیی و ارزش تمام شده بتن سخت شده تأثیرگذار خواهد بود. همچنین در صورتی که سنگدانه‌ها به نحوی دانه‌بندی شوند که دانسیته بتن حداکثر گردد، می‌توان میزان خمیر مصرفی در بتن را کاهش داد. با کاهش خمیر سیمان مصرفی، انقباض و خزش نیز کاهش خواهند یافت. در تحقیقی که توسط لینج[1] و همکاران در سال ۱۹۹۷م. صورت گرفت، نشان داده شده است که برای دست یافتن به بتنی متراکم باید دانسیته خشک مخلوط به حداکثر برسد[۲]. همچنین با توجه به تحقیقات صورت گرفته (که در بخش ۲-۴ مورد بررسی قرار خواهند گرفت)، استفاده از میکرو سیلیس و سایر پوزولان‌ها می‌تواند ضعف‌های ناحیه انتقال را کاهش داده و با کاهش نفوذپذیری، دوام بتن را بالا برد. لذا نفوذپذیری بتن یا ملات از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد.

---

[1] *Lange*

در این فصل، ابتدا به پروسه تولید اسید سولفوریک در فاضلاب و تهاجم اسید سولفوریک به بتن و سازه‌های بتنی پرداخته شده و در ادامه، تحقیقات صورت گرفته در مورد تهاجم اسید سولفوریک به بتن تشریح خواهد شد. البته با توجه به موضوع پایان‌نامه، سابقه تحقیقات صورت گرفته در خصوص تأثیر میکرو سیلیس و نانو سیلیس نیز مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲-۲ بتن و تهاجم اسید سولفوریک

۲-۲-۱ مقدمه

بتن به عنوان یکی از مصالح ساختمانی، کاربردهای فراوانی دارد که از آن جمله می‌توان به ساختمان-های بتنی، پل‌های بتنی، سازه‌های دریایی، سیلوها، لوله‌های فاضلاب بتنی، کف‌های بتنی و غیره اشاره کرد. تا اوایل قرن نوزدهم، محاسبه و طراحی سازه‌های بتنی بر اساس مقاومت فشاری بتن صورت می-گرفت. در دهه پنجم قرن نوزدهم نتیجه تحقیقات حاکی از این بود که با افزایش سیمان، مقاومت، افزایش یافته و دوام بتن نیز افزایش می‌یابد. در ادامه، نتایج حاکی از این بود که نسبت آب به سیمان تأثیر زیادی در مقاومت بتن دارد و این در صورتی است که نتایج ضد و نقیضی در خصوص دوام بتن بدست می‌آمد. نتایج نشان می‌داد که همواره با افزایش مقاومت، دوام بتن افزایش نمی‌یابد و در برخی موارد دوام بتن کاهش نیز می‌یافت. در دهه ۱۹۸۰م. مفهوم طراحی بر اساس دوام بتن ارائه گردید و پس از آن طرح اختلاط‌های بتن، بر اساس محیطی که بتن در آن قرار می‌گرفت طراحی می‌گردید[۳].

۲-۲-۲ انواع اسیدها و ویژگی‌های آنها

اسیدها به دو دسته آلی و اسیدهای معدنی (غیر آلی) تقسیم‌بندی می‌شوند. درجه اسیدی یک محلول با مقدار pH آن ارزیابی می‌شود.

اسیدهای غیر آلی یا معدنی تولیدات صنعتی هستند که عمدتاً از حل شدن گازها در آب به دست می‌آیند. میزان تأثیر اسیدهای معدنی بر بتن، تا حد زیادی به غلظت و میزان انحلال‌پذیری نمک‌های کلسیم آنها بستگی دارد. اسیدهای معدنی غلیظ علاوه بر حمله به بلورهای هیدروکسید کلسیم ممکن است به ساختار ژل سیمان نیز آسیب برسانند[۴]. از این میان اسید سولفوریک شدت تخریبی بیشتری دارد. دلیل این امر، مکانیزم انتقال یون H^+ می‌باشد که تقریباً پنج برابر از نفوذ سایر یون‌ها سریعتر می‌باشد[۵].

اسیدهای آلی، منشاء طبیعی دارند و آنها را می‌توان به دو گروه تقسیم کرد. گروه اول دربرگیرنده اسیدهای حل شونده در آب با جرم مولکولی نسبتاً کم هستند که از آن جمله می‌توان به اسید لاکتیک، بوتیریک، استیک، سیتریک و مالیک اشاره کرد. گروه دوم شامل اسیدهایی با جرم مولکولی زیاد مانند اسید اولئیک، استئاریک و پالمتیک می‌شود که در آب حل نمی‌شوند.

اسید لاکتیک و اسید بوتیریک تأثیر بسیار مخربی روی خمیر سخت شده سیمان دارند[۶]. این اسیدها در شیر ترشیده و یا کره فاسد شده یافت می‌شوند و می‌توانند مقدار درجه اسیدی (pH) پساب‌های کارخانه‌های لبنیاتی و پنیرسازی را تا حدود ۴/۰ کاهش دهند[۶]. درجه اسیدی (pH) محلول ۵ درصدی اسید استیک حدود ۳/۵ می‌باشد که سریعاً به بتن حاوی سیمان پرتلند حمله می‌کند.

در کل می‌توان گفت که اسیدهای آلی بایستی به تنهایی مورد بررسی قرار گیرند. بیشتر اسیدهای مهاجم همانند هیدرو کلریدریک، نیتریک و اسید سولفوریک، نمک کلسیم تولید می‌کنند که قابل حل شدن می‌باشد و کمتر اسیدهای مهاجم همانند اسید فسفریک نمک کلسیمی تولید می‌کنند که به راحتی قابل حل شدن نمی‌باشند. این مقادیر نمک کم حل شونده، بعنوان مانع در مسیرهای ریز خمیر سیمان، عمل می‌کنند تا پروسه تهاجم کاهش یابد. یک حالت مخرب تهاجم، تهاجم اسید سولفوریک به بتن می‌باشد که سولفات کلسیم تولید شده به حمله اسید سولفوریک کمک می‌کند. در صورتی که کل هیدروکسید کلسیم به مصرف رسیده باشد احتمال تجزیه هیدرات سیلیکات کلسیم وجود دارد که عمر مفید سازه‌های بتنی را به شدت کاهش می‌دهد. تهاجم اسید سولفوریک به بتن، در بخش بعد، بیشتر مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲-۲-۳ پروسه تولید اسید سولفوریک در فاضلاب و تهاجم آن به بتن

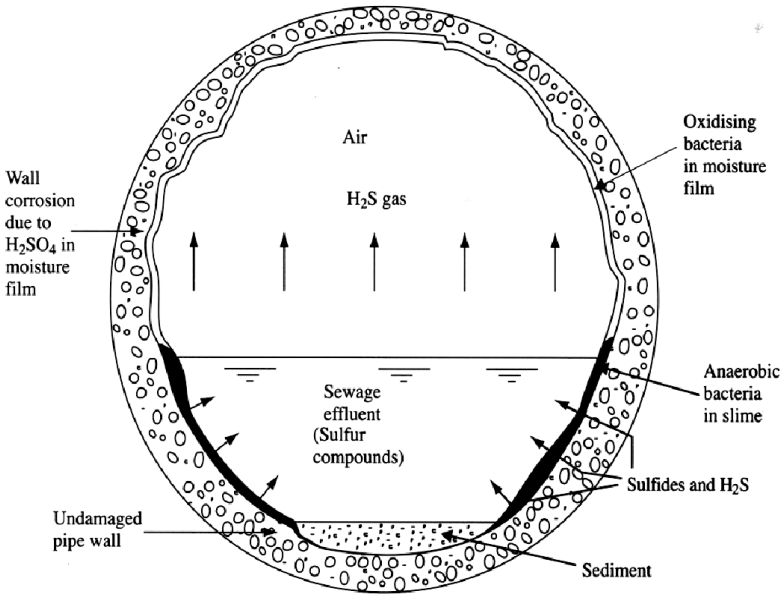
پروسه تولید اسیدسولفوریک در فاضلاب‌ها و تأثیر آن بر لوله‌های بتنی فاضلاب را می‌توان به طور خلاصه، با توجه به شکل ۲-۱، چنین توصیف کرد که، ابتدا سولفید هیدروژن در فاضلاب در نتیجه فعل و انفعالات شیمیایی بین هیدروژن و سولفور حل شده (بوسیله باکتری‌های کاهنده سولفات) احیاء می‌شود. سپس سولفید هیدروژن محلول، بعنوان نتیجه شرایط آشفته فاضلاب در فضای لوله بتنی فاضلاب، تبدیل به فاز گازی می‌شود. گاز سولفید هیدروژن، با اکسیژن واکنش می‌دهد تا سولفور اولیه (اصلی) را تشکیل دهد، که بصورت موقتی بر روی دیواره سازهء لوله فاضلاب قرار می‌گیرد. در نهایت نیز باکتری تیوباسیلوس، که سولفور را با اکسیژن به صورت هوازی ترکیب می‌کند و باعث اکسید شدن سولفور می‌شود (که معمولاً در تاج لوله‌های بتنی فاضلاب موجودند) و نهایتاً سولفور را بصورت بیولوژیکی تبدیل به اسید سولفوریک می‌نماید[۷].

مطابق گزارش‌های منتشر شده، هنگام تهاجم اسید سولفوریک به بتن، واکنش‌های ذیل، رخ می‌دهد[۶]:

$$H_2SO_4 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaSO_4 + 2\,H_2O$$

$$3\,CaSO_4 + 3\,CaOAl_2O_3 \,.\, 6\,H_2O + n\,H_2O \rightarrow 3\,CaOAl_2O_3 \,.\, 3\,CaSO_4 \,.\, 31\,H_2O$$

$$CaSiO_2 \,.\, 2\,H_2O + H_2SO_4 \rightarrow CaSO_4 + Si(OH)_4 + H_2O$$



شکل ۲-۱ : نحوه تولید اسیدسولفوریک در لوله بتنی فاضلاب و تخریب لوله[۷]

با توجه به واکنش‌های مذکور، در رابطه دوم، مشاهده می‌شود که سولفوآلومینات (اترینگایت) تشکیل می‌شود، که بلوری شدن آن، منجر به انبساط و تخریب بتن می‌شود. در شکل ۲-۲ تأثیر اسید سولفوریک بر نمونه‌های بتنی و تخریب سطح آنها مشاهده می‌شود.

شکل۲-۲ : تأثیر اسید سولفوریک بر نمونه‌های بتن و خوردگی سطح آنها [۵]

درحالت کلی می‌توان مکانیزم را در دو فاز مطرح نمود[۵]، فاز اول تشکیل نمک کلسیم و فاز دوم تهاجم اسید به ژل سیمان. البته فاز دوم زمانی صورت می‌گیرد که تمام هیدروکسید کلسیم در فاز اول

مصرف شده باشد. اگر نمک کلسیم محلول باشد، در فاز ملات جابجا شده و فاز ملات سست خواهد شد. در مرحله اول، اسیدسولفوریک بصورت شیمیایی با محصولات هیدراتاسیون مانند هیدروکسید کلسیم[1] واکنش نشان داده و سنگ گچ[2] تشکیل می‌گردد. در مرحله دوم، سنگ گچ با آلومینات‌های تری‌کلسیم هیدراته شده[3] واکنش نشان داده و اترینگایت[4] را تشکیل می‌دهد، که هر دوی سنگ گچ و اترینگایت، پایداری سازه‌ای خیلی کمی در مقایسه با سایر محصولات دارند. همچنین گچ و اترینگایت نسبت به محصولات قبلی انبساط حجم نشان داده و باعث ظهور ترک‌هایی در دیواره لوله می‌شوند که منجر به کاهش ظرفیت سازه‌ای لوله می‌گردد.

همچنین درجه اسیدی یا pH اسید سولفوریک، نقش بسیار مهمی در مکانیزم و شدت خرابی بتن ایفا می‌کند[۷].

در اینجا لازم است ذکر گردد که سایر ترکیبات سیمان نیز در تهاجم اسید سولفوریک نقش دارند. از جمله می‌توان به میزان C_3A اشاره کرد. چنانکه گفته شد، C_3A با سولفات کلسیم واکنش نشان داده و اترینگایت تشکیل می‌شود که انبساط ناشی از تشکیل اترینگایت سبب ایجاد ترک در بتن شده و فرآیند تخریب را تسریع می‌بخشد. همچنین می‌توان به میزان C_3S و C_2S که در تشکیل هیدروکسید کلسیم مؤثرند اشاره نمود. سایر ترکیبات سیمان از جمله قلیایی‌ها و کربنات‌ها نیز نقش بسزایی در این خصوص ایفا می‌نمایند[۵].

با توجه به اینکه ناحیه انتقال در نفوذپذیری بتن تأثیر قابل ملاحظه‌ای دارد ضروری است در این خصوص نیز مواردی ذکر گردد. متأسفانه به علت مشکلات انجام آزمایش‌ها، اطلاعات در این خصوص نسبتاً کم است. به هر حال بر اساس توصیف عنوان شده توسط مازو[5]، مفاهیم مشخصات ساختاری این ناحیه را می‌توان بدست آورد. ابتدا لایه نازکی از آب اطراف سنگدانه‌های درشت تشکیل می‌شود و همین امر سبب می‌شود در این ناحیه ساختار متخلخل‌تری ایجاد گردد. به همین علت مقاومت ناحیه انتقال در سنین اولیه کمتر از توده ملات می‌باشد ولی این امر می‌تواند پس از بالا رفتن سن و تشکیل ژل در ناحیه انتقال برطرف گردد. وجود ترکهای ریز در این ناحیه که ناشی از اندازه و دانه‌بندی سنگدانه، مقدار سیمان، نسبت آب به سیمان، درجه تراکم بتن تازه، شرایط عمل‌آوری و رطوبت نسبی محیط و سایر موارد می‌باشد، می‌تواند مقاومت ناحیه انتقال را تحت تأثیر قرار دهد. تحت شرایط یکسان استفاده از سنگدانه درشت باعث ضخیم‌تر شدن لایه آب می‌گردد و همین عامل سبب ایجاد ریز ترکهایی در ناحیه انتقال قبل از بارگذاری خواهد شد[۸]. البته ناگفته نماند که به غیر از عوامل فوق‌الذکر، عوامل تأثیرگذار فراوانی در نفوذپذیری بتن مؤثر هستند که از آن جمله می‌توان به تخلخل سنگدانه، درجه تراکم، اندرکنش شیمیایی خمیر و سنگدانه، آب انداختگی، رطوبت و ابعاد نمونه اشاره نمود.

کمیته ACI-201 ، حملات شیمیایی را به شش قسمت اصلی تقسیم‌بندی نموده که یکی از این قسمت‌ها، دوام بتن در محیط‌های اسیدی می‌باشد. در این میان اسید سولفوریک یکی از مخرب‌ترین

---

[1] $Ca(OH)_2$
[2] $CaSo_4 . 2H_2O$
[3] C_3A
[4] $C_6AS_3H_{32}$
[5] *Maso*

نوع اسیدها بوده که طبق گزارش‌های منتشره، تهاجم این اسید تنها به سیستم جمع‌آوری فاضلاب، سالانه میلیاردها دلار خسارت به بار آورده است[۷].

۲-۳ تحقیقات انجمن بتن امریکا[1]

انجمن بتن امریکا نیز تحقیقات وسیعی درباره دوام بتن در محیط سولفاتی انجام داده که نهایتاً موارد ذیل را توصیه کرده است[۹] :

الف) تهاجم قابل چشم پوشی :
زمانی که مقدار سولفات در آب، کمتر از ۱۵۰ ppm (mg / lit)، و در خاک، کمتر از ۰/۱ درصد باشد، هیچ محدودیتی در بکار بردن انواع سیمان و نسبت آب به سیمان (البته تا میزان حداکثر مجاز) وجود ندارد.

ب) تهاجم آرام (ملایم) :
زمانی که مقدار سولفات در آب، بین ۱۵۰ تا ۱۵۰۰ ppm (mg / lit)، یا در خاک، بین ۰/۱ تا ۰/۲ درصد باشد، سیمان پرتلند تیپ ASTM II یا پرتلند پوزولانی و یا سیمان پرتلند حاوی سرباره باید استفاده گردد، همچنین نسبت آب به سیمان برای بتن معمولی، باید کمتر از ۰/۵ در نظر گرفته شود.

ج) تهاجم شدید :
وقتی که مقدار سولفات در آب، بین ۱۵۰۰ تا ۱۰۰۰۰ ppm (mg / lit) یا در خاک، بین ۰/۲ درصد و ۲ درصد باشد، سیمان پرتلند تیپ ASTM V با نسبت آب به سیمان، کمتر از ۰/۴۵ باید بکار گرفته شود.

د) تهاجم خیلی شدید :
وقتی که مقدار سولفات در آب، بیش از ۱۰۰۰۰ ppm (mg / lit) یا در خاک، بیش از ۲ درصد باشد، بایستی سیمان تیپ ASTM V به همراه یک افزودنی پوزولانی، مورد استفاده قرار گرفته و نسبت آب به سیمان نیز باید به ۰/۴۵ محدود گردد.

قابل ذکر است که به دلیل تفاوت در مکانیزم خرابی توسط اسید سولفوریک، توصیه‌های مذکور جهت پایداری بتن در برابر تهاجم اسید سولفوریک، کافی نمی‌باشد.

---
[1] *A.C.I.*

۲-۴ سابقه انجام پژوهش

در بیست سال گذشته، بکار بردن مواد جایگزین سیمان، به علل مختلف از جمله: اقتصادی بودن، تکنولوژی تولید و مزایای زیست محیطی، افزایش یافته است. با توجه به اینکه، بکاربردن مواد جایگزین سیمان، مانند میکروسیلیس، خاکستربادی[۱] و پوزولان‌های طبیعی، دوام بتن را در اغلب محیط‌های خورنده، افزایش داده است، این مواد در محیط‌های اسید سولفوریک نیز مورد استفاده قرارگرفته و مطالعات زیادی در این خصوص صورت گرفته است. علی‌رغم تحقیقات متعدد صورت گرفته در زمینه تأثیر اسید سولفوریک بر روی بتن، عملکرد میکرو سیلیس و نیز تأثیر نسبت آب به سیمان و میزان مواد سیمانی، در افزایش دوام نمونه‌ها در برابر اسید سولفوریک، ضد و نقیض گزارش شده است[۶].

با توجه به اینکه عمده بتن‌هایی که در محیط‌های اسیدی قرار می‌گرفتند بر اساس مقاومت بتن طراحی شده بودند گزارش‌های منتشره در خصوص خرابی بتن‌های معمولی در محیط‌های اسیدی، خصوصاً محیط میکروبیولوژیکی خیلی زیاد بوده و در دنیا هزینه‌های بسیار زیادی جهت تعمیر و نگهداری چنین بتن‌هایی صرف شده است[۱۰].

تحقیقات بر روی تهاجم میکروبیولوژیکی و خوردگی در برابر اسید سولفوریک، از سال ۱۹۴۵م. وقتی که پارکر[۲] وجود باکتری مسبب در پروسه خوردگی را کشف کرد، شروع گردید[۱۱]. پس از اینکه پارکر پروسه خوردگی در سطح بتن را با معرفی باکتری‌های تیوباسیلوس[۳] ارائه کرد، بسیاری از گزارش‌های دیگر در خصوص شناخت کامل پروسه خوردگی منتشر شد، که از آن جمله می‌توان به گزارش‌های پامی‌روری[۴] و پارخرست[۵] در سال ۱۹۷۷م.، سند[۶] و باک[۷] در سال ۱۹۸۴م.، موری[۸] و همکاران در سال ۱۹۹۲م. و نیلسن[۹] و همکاران در سال ۱۹۸۸م. اشاره نمود. در نهایت نتایج آزمایش-های آنها بدین شرح بود که[۱۲]:

۱. نوع سنگدانه، در آزمایش‌های شیمیایی و میکروبیولوژیکی، بر میزان خوردگی در برابر اسید سولفوریک، تأثیر بسزایی دارد.

۲. سنگدانه‌های آهکی، عملکرد مناسبی در برابر تهاجم اسیدسولفوریک دارند.

۳. تأثیر نوع سیمان، قابل توجه نمی‌باشد.

محققانی نظیر ابوزید[۱۰] و خدر[۱۱] در سال ۱۹۹۴م. آزمایش‌های بسیاری بر روی تأثیر میکرو سیلیس بر بتن انجام دادند و نهایتاً بهترین درصد جایگزینی میکرو سیلیس برای مقاومت ۲۸ روزه را بین ۱۰ تا ۲۰ درصد پیشنهاد کردند[۱۳].

---

[1] *fly ash*
[2] *Parker*
[3] *Thiobacillus*
[4] *Pomerory*
[5] *Parkhurst*
[6] *Sand*
[7] *Bock*
[8] *Mori*
[9] *Nielsen*
[10] *Abou-zeid*
[11] *Khedr*

اولوکان[1] نیز در سال ۱۹۹۴م. با انجام آزمایش‌هایی بر روی تأثیر میزان جایگزینی میکرو سیلیس به این نتیجه رسید که درصد بهینه جایگزینی سیمان با میکرو سیلیس، تابعی از مقدار آب اختلاط است[۱۴].

در سال ۱۹۹۷م. ژیان‌یونگ[2] و پی[3] با انجام آزمایش‌هایی بر روی تأثیر سرباره و میکرو سیلیس بر روی خصوصیات مکانیکی بتن پر مقاومت به این نتیجه رسیدند که خصوصیات مکانیکی بتن پرمقاومت، در صورت استفاده از سیمان در بتن به همراه سرباره و میکرو سیلیس، تا حد وسیعی (در سنین بالا) بهبود می‌یابد. در تحقیق مذکور، میزان بهینه برای خاکستر بادی و سرباره، حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد جایگزینی پیشنهاد شد[۱۵].

در تحقیق دیگری که توسط جی‌مونتنی[4] و همکارانش در سال ۲۰۰۰م.[۵] صورت گرفت آزمایش‌های شیمیایی، میکروبیولوژیکی و درجا برای خوردگی بتن در محیط‌های اسیدی صورت گرفت. نتایج حاکی از این بود که:

۱- اضافه نمودن میکروسیلیس دوام در برابر اسید سولفوریک را افزایش می‌دهد ولی در خوردگی میکروبیولوژیکی، ممکن است این افزایش دوام وجود نداشته باشد.

۲- استفاده از پلیمر، دوام در برابر اسید و خوردگی میکروبیولوژیکی را بالا می‌برد که این مسئله نیاز به تحقیقات بیشتری دارد.

۳- خوردگی میکروبیولوژیکی بیشتر از خوردگی بتن در برابر اسید می‌باشد.

در تحقیقی که توسط دی‌ام‌روی[5] و همکاران در سال ۲۰۰۱م. صورت گرفت[۱۶]، تأثیر میکرو سیلیس و خاکستر بادی بر روی مقاومت بتن در محیط‌های شیمیایی بررسی شد. در این تحقیق نسبت آب به سیمان و میزان جایگزینی مواد مذکور به عنوان متغیر در نظر گرفته شد. نتایج حاکی از این بود که:

۱- با افزایش درصد جایگزینی، میزان مقاومت فشاری، کاهش می‌یابد.

۲- با افزایش نسبت آب به سیمان، مقاومت فشاری، کاهش می‌یابد.

۳- بکار بردن میکروسیلیس و خاکستربادی، مقاومت در برابر حملات شیمیایی را افزایش می‌دهد.

۴- میزان تهاجم در غلظت‌های بالا، بیشتر است.

هیلمیر[6] در تحقیقی که در سال ۲۰۰۱م. انجام داد[۱۷]، طرح اختلاطی را ارائه داد، که در مقابل تهاجم اسیدها پایدار می‌ماند. وی با استفاده از میکرو سیلیس و خاکستر بادی در طرح اختلاط (خاکستر بادی، نیاز به آب کمتری در مقایسه با سیمان دارد)، مقدار آب مصرفی را کاهش دادند. نمونه‌های ساخته شده با طرح اختلاط مذکور و بتن معمولی، در آب حاوی اسید سولفوریک قرار داده شده و بمنظور جلوگیری از تمرکز رسوبات نمک‌ها و ایجاد لایه محافظ، آب حاوی اسید سولفوریک و نمونه‌ها هر هفته تعویض و تمیز می‌شدند. pH مخلوط برابر ۲/۵ ثابت نگهداشته شده بود. با اندازه

---

[1] *Oluokun*
[2] *Jianyong*
[3] *Pei*
[4] *Monteny J.*
[5] *D.M.Roy*
[6] *Hillemeier*

گرفتن کاهش وزن نمونه‌ها در زمان‌های متفاوت، اثر اسید بر روی نمونه‌ها بررسی شد. البته با استفاده از میکروسکوپ الکترونی تفاوت بین نمونه‌ها نیز بررسی شد. نتایج حاکی از این بودند که بتن ساخته شده با طرح اختلاط ارائه شده، دوام بیشتری را در مقایسه با بتن معمولی، در برابر تهاجم اسیدها، از خود نشان می‌دهد.

نتیجه تحقیقی که توسط ام‌ال‌برن[1] در سال ۲۰۰۱م. صورت گرفته است[۱۸]، نشان می‌دهد که جایگزین کردن ۵ تا ۱۰ درصد میکروسیلیس به جای سیمان، دوام بتن را در محیط‌های اسیدی، افزایش می‌دهد.

در تحقیقی که توسط تی‌یاماناکا[2] و همکاران در سال ۲۰۰۲م. بر روی سیستم فاضلاب انجام شد[۱۹]، باکتری‌های فاضلاب شناسایی شده و pH سطحی بتن قرار گرفته در معرض سولفید هیدروژن، با غلظت بیشتر از ۶۰۰ ppm اندازه‌گیری گردید. پس از یک ماه، pH بتن به کمتر از ۲/۰ رسید و این بدان معنی است که قدرت باکتری اکسیدکننده سولفور در لایه سطحی بتن فوق‌العاده زیاد است. همچنین آنها نشان دادند که pH قسمت داخلی بتن، کمتر از pH سطحی، می‌باشد و شاید دلیل این مسأله، نفوذ اسید سولفوریک تولیدی به داخل بتن باشد.

در تحقیق دیگری که توسط جی‌هیل[3] و همکاران در سال ۲۰۰۳م. صورت گرفته است[۲۰]، مکانیزم تهاجم سولفات‌ها و اسیدها بصورت ترکیبی، بررسی شده و نتایجی به شرح ذیل بدست آمده است:

۱- تهاجم، ابتدا در لبه‌ها و گوشه‌ها صورت می‌گیرد.

۲- تهاجم اسیدها در سطح نمونه بتنی، زیاد بوده و بیشتر از تهاجم سولفات‌ها می‌باشد.

۳- به علت حمله اسید، از کربنات‌کلسیم، کاسته شده و به میزان گچ، افزوده می‌شود.

در تحقیقی که توسط اچ‌ساری‌سیمن[4] و همکارانش در سال ۲۰۰۳م. صورت گرفته است[۲۱]، کاربرد سیمان‌های پرآلومین و همچنین خاکستر بادی و میکروسیلیس در افزایش دوام ملات در معرض اسید سولفوریک با غلظت ۲ درصد بررسی شده است. آنها ۵ طرح اختلاط با مواد سیمانی مختلف، به شرح ذیل در نظر گرفتند و نمونه‌های ملاتی با ابعاد ۵ سانتی‌متر ساخته و تأثیر تهاجم اسیدسولفوریک بر نمونه‌ها را مورد بررسی قرار دادند. طرح اختلاط‌های مورد استفاده در تحقیق اچ-ساری‌سیمن و همکارانش[۲۱] عبارت بودند از:

۱- سیمان SC

۲- سیمان CC

۳- سیمان تیپ یک با ۸ درصد جایگزینی میکرو سیلیس

۴- سیمان تیپ یک با ۲۰ درصد جایگزینی خاکستر بادی

۵- سیمان تیپ یک

---

[1] *M.L.Berndt*
[2] *T.Yamanaka*
[3] *J.Hill*
[4] *H.Saricimen*

سیمان‌های SC و CC ، سیمان‌های پرآلومین هستند. نسبت ماسه به مواد سیمانی برابر با ۲ و نسبت آب به مواد سیمانی برابر با ۴۵ درصد در نظر گرفته شد. درجه اسیدی محلول (pH) نیز با اضافه کردن اسید و آب، بصورت هفتگی ثابت نگه داشته شد.

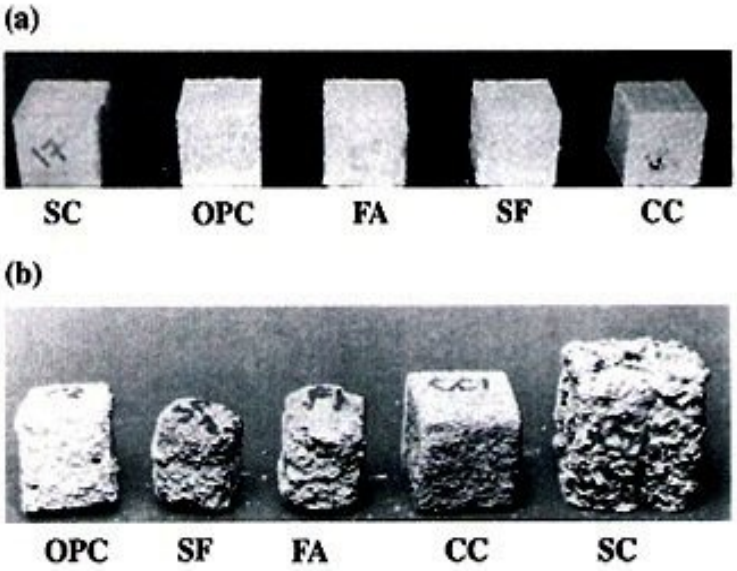
در جدول شماره ۲-۱، ترکیبات شیمیایی مواد سیمانی مورد استفاده در تحقیق اچساری‌سیمن و همکارانش[۲۱] نشان داده شده است. چنانکه دیده می‌شود در سیمان SC و CC ، آلومینات بیشتری (در حدود ۴۰ تا ۵۳ درصد) موجود است.

آنها نمونه‌ها را پس از ساخت و عمل‌آوری بمدت ۷۳ و ۱۵۰ روز در محلول اسید قرار داده و در زمان مورد نظر، قبل از آزمایش، با آب شسته و در هوا خشک کرده بودند. پس از بررسی‌های ظاهری، نمونه‌ها توزین شده و مقاومت فشاری، میزان سولفات و قلیائیت آنها، اندازه‌گیری شده بود. علاوه برآن، آزمایش‌های درجا نیز انجام شده و تأثیر سیمان‌های SC و CC در بهبود وضعیت بتن‌های موجود بررسی شده بود.

جدول۲-۱ : ترکیبات شیمیایی مواد سیمانی مورد استفاده در مرجع [۲۱]

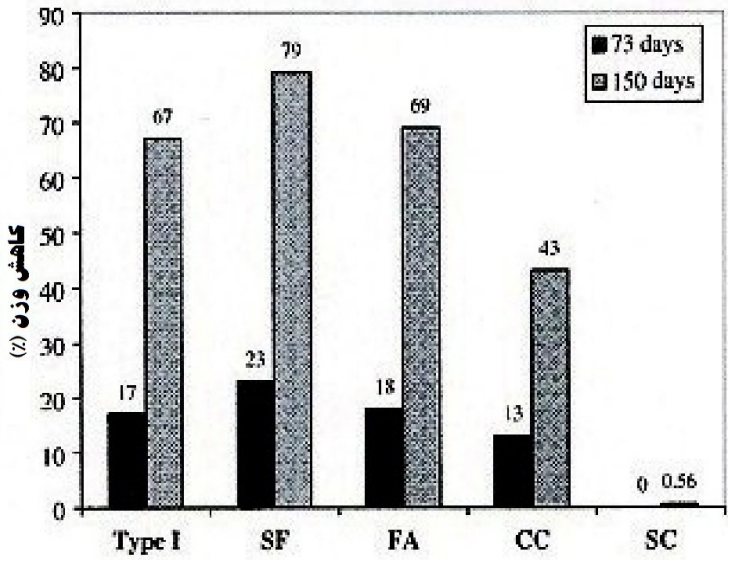
درصد وزنی ترکیبات	سیمان تیپ I	خاکستر بادی	میکرو سیلیس	سیمان CC	سیمان SC
SiO_2	20.96	65.7	90.7	4-5.5	4-9
Al_2O_3	5.25	23.1	1.4	50.5-53	40-44
Fe_2O_3	3.56	3.48	2.2	1-3	6-16
CaO	63.67	1.15	0	37-39	35-39
MgO	1.35	0.66	-	< 1.5	< 1.5
SO_3	2.58	-	0.57	< 0.1	< 0.3
L.O.I.	1.67	1.01	2.6	-	-
K_2O	-	1.56	1.06	< 0.5	0.4
Na_2O	-	0.48	0.0	-	-
H_2O	-	-	0.4	-	-
C	-	-	1.09	-	-
TiO_2	-	0.94	-	0.4	< 4
MnO	-	0.05	-	-	-
P_2O_5	-	0.08	-	-	-
C_3S	49.99	-	-	-	-
C_2S	22.01	-	-	-	-
C_3A	7.89	-	-	-	-
C_4AF	10.41	-	-	-	-

وضعیت ظاهری نمونه‌ها پس از ۷۳ و ۱۵۰ روز قرارگیری در محلول اسیدسولفوریک، به ترتیب، در قسمت a و b شکل۲-۳ ، نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در شکل ۲-۳ ، SC و CC ، نشان‌دهنده سیمان‌های پرآلومین، OPC ، سیمان پرتلند معمولی، همچنین FA ، نمونه حاوی خاکستر بادی و SF ، نمونه حاوی میکرو سیلیس می‌باشند.

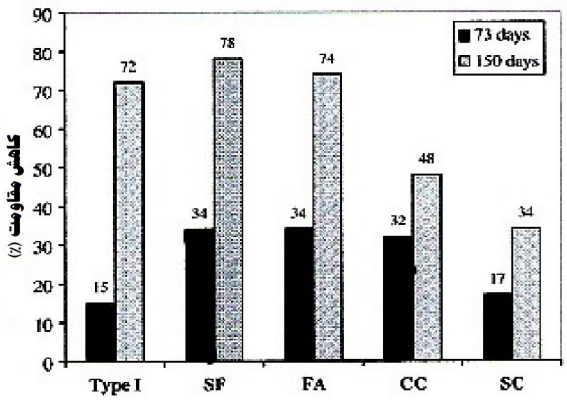


شکل۲-۳ : ظاهر نمونه‌ها پس از ۷۳ و ۱۵۰ روز قرارگیری در محلول اسید سولفوریک[۲۱]

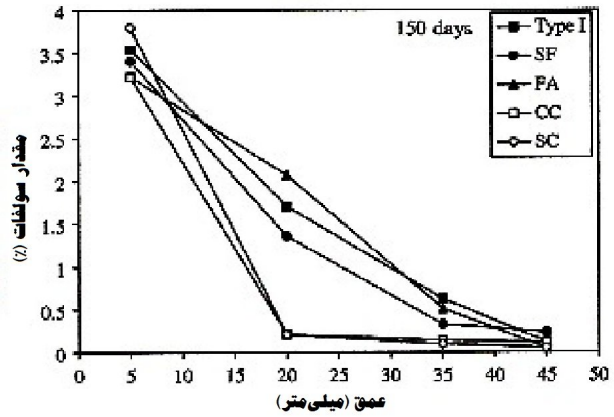
با توجه به شکل ظاهری نمونه‌ها و خوردگی سطح آنها، واضح است که نمونه‌های حاوی میکروسیلیس، بدترین عملکرد و نمونه‌های حاوی SC بهترین عملکرد را داشته‌اند. در شکل‌های ۲-۴ تا ۲-۷ میزان کاهش وزن، کاهش مقاومت، میزان سولفات و میزان pH در مخلوط‌های متفاوت نشان داده شده است.



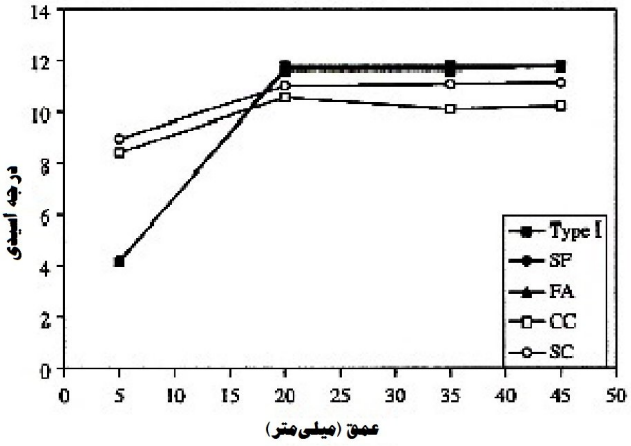
شکل۲-۴ : میزان کاهش وزن پس از ۷۳ و ۱۵۰ روز قرارگیری در محلول اسید سولفوریک[۲۱]



شکل۲-۵ : میزان افت مقاومت پس از ۷۳ و ۱۵۰ روز قرارگیری در محلول اسید سولفوریک[۲۱]

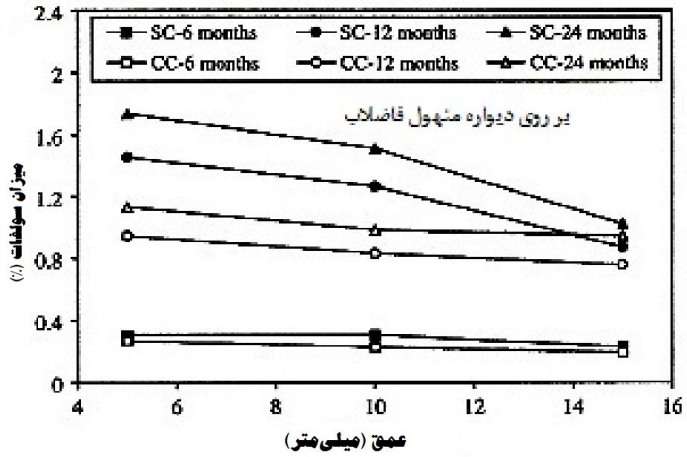


شکل۲-۶ : میزان سولفات پس از ۱۵۰ روز قرارگیری در محلول اسید سولفوریک[۲۱]

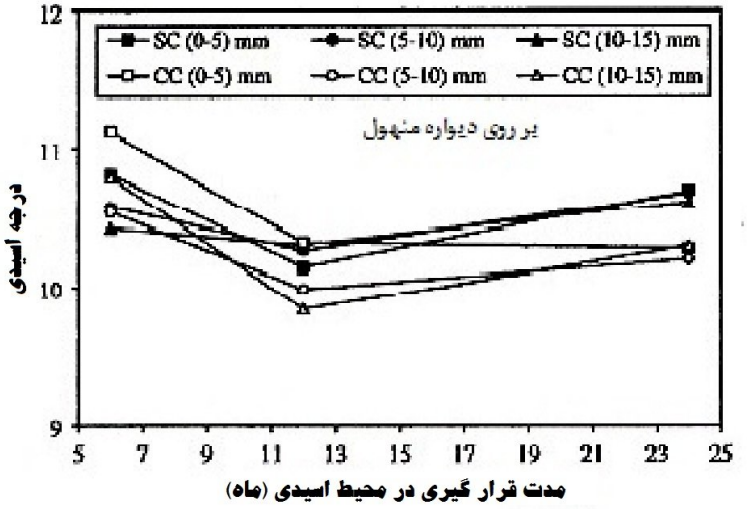


شکل۲-۷ : میزان pH پس از ۱۵۰ روز قرارگیری در محلول اسید سولفوریک[۲۱]

چنان‌که دیده می‌شود، عملکرد مناسب سیمان‌های پرآلومین نسبت به سایر مخلوط‌ها و همچنین عملکرد نامناسب میکرو سیلیس در محیط‌های اسیدی می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. نتایج حاصله از آزمایش‌های درجا نیز در شکل‌های۲-۸ و ۲-۹ نشان داده شده است.



شکل۲-۸ : میزان سولفات در طول ۲۴ ماه قرارگیری در محیط واقعی اسیدی[۲۱]



شکل۲-۹ : میزان pH در طول ۲۴ ماه قرار گیری در محیط واقعی اسیدی[۲۱]

در آزمایش‌های درجا، درجه اسیدی (pH) بتن، در دیواره منهول[1] در مدت ۲۴ ماه اندازه‌گیری شده بود که میزان pH در بدترین حالت عدد ۱/۰ گزارش شده بود. لازم به ذکر است که آنها میزان

[1] *Manhole*

pH در عمق‌های مختلف را نیز بررسی کرده و نتایج را ارائه کرده‌اند. ایشان پس از شرح مکانیزم خوردگی، استفاده از سیمانهای ضدسولفات یا تیپ (IV) را نیز بعلت مقادیر بالای C_3S و C_2S ، مناسب ندانسته و بکار بردن آن‌را توصیه ننموده‌اند. همچنین تأثیر کاتیون نیز در میزان تهاجم، به عنوان عامل مهم شناخته شده و عملکرد نامناسب میکرو سیلیس را در این تحقیق به عملکرد نامناسب میکرو سیلیس در محلول سولفات منیزیم نسبت داده‌اند و علت آنرا کاهش هیدروکسید کلسیم و تهاجم اسید به ژل دانسته‌اند[۲۱].

در تحقیق دیگری که توسط ای‌هیواید[1] و همکارانش در سال‌های اخیر صورت گرفته است، تأثیر پارامترهای طرح اختلاط، مانند نسبت آب به سیمان، میزان سیمان، تأثیر میزان درجه اسیدی (pH) و تر و خشک کردن، بر مقاومت بتن در برابر اسید سولفوریک، مورد بررسی قرار گرفته است[۷]. هفده طرح اختلاط که جزئیات آنها در جدول ۲-۲ ارائه شده است، با استفاده از سیمان تیپ یک، ساخته شده و تأثیر پارامترهای مذکور بررسی شده است[۷].

جدول ۲-۲ : طرح اختلاط‌های مورد استفاده در مرجع[۷]

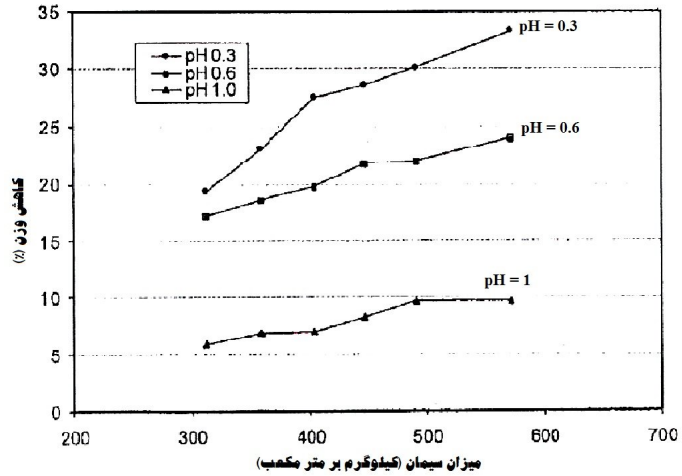
نام طرح اختلاط	شماره طرح‌ها	سیمان (Kg/m^3)	شن (Kg/m^3)	ماسه (Kg/m^3)	آب (Kg/m^3)	نسبت آب به سیمان
شاهد	M1	430	870	870	151	0.35
تأثیر میزان سیمان	M2	310	905	905	110	0.35
	M3	360	890	890	125	0.35
	M4	405	880	880	141	0.35
	M5	445	865	865	155	0.35
	M6	490	855	855	170	0.35
	M7	570	830	830	200	0.35
تأثیر میزان آب به سیمان	M8	450	910	910	110	0.25
	M9	440	890	890	130	0.30
	M10	430	870	870	150	0.35
	M11	420	850	850	170	0.40
	M12	405	815	815	200	0.50
تأثیر میزان سنگدانه	M13	460	745	925	160	0.35
	M14	445	825	900	155	0.35
	M15	425	900	850	150	0.35
	M16	410	950	830	145	0.35
	M17	395	1010	800	140	0.35

[1] *E.Hewayde*

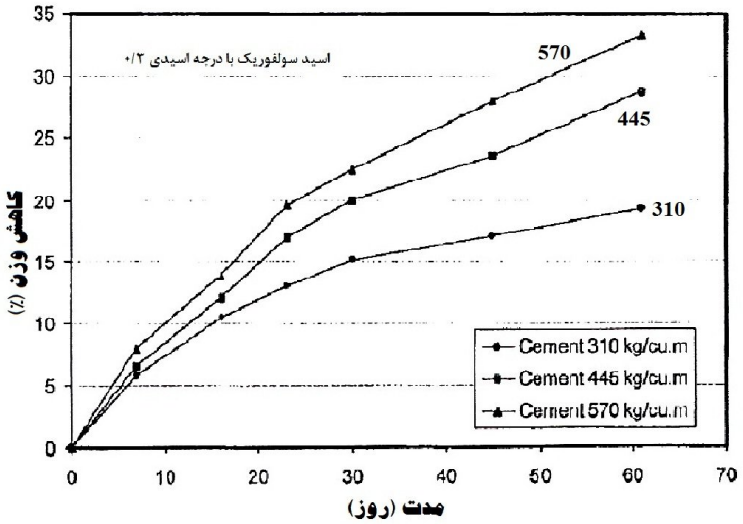
ای‌هیواید و همکارانش در تحقیق خود[۷]، چهارده نمونه استوانه‌ای به ابعاد ۱۵۰ × ۷۵ میلیمتر، برای کلیه مخلوط‌ها و چهل و دو نمونه استوانه‌ای به ابعاد ۲۰۰ × ۱۰۰ میلی‌متر، ۱۵۰ × ۷۵ میلی‌متر و ۱۰۰ × ۵۰ میلی‌متر برای مخلوط شاهد مطابق استاندارد ASTM ساخته و بمدت ۲۸ روز در اتاق رطوبت عمل‌آوری کرده‌اند. آنها هفت محفظه از جنس PVC با ابعاد ۴۰ × ۷۰ × ۷۰ سانتیمتر، با حجم ۱۹۶ لیتر در نظر گرفتند و دو سوم آن را با اسید سولفوریک با غلظت‌های متفاوت، معادل با درجه اسیدی (pH) برابر با ۰/۳ ، ۰/۶ ، ۱/۰ ، ۱/۵ ، ۲/۰ و ۲/۵ که از مخلوط نمودن آب و اسید سولفوریک ایجاد شده بود، پر کردند. محلول‌ها توسط یک پمپ با دبی ۰/۳ لیتر بر دقیقه در گردش بودند تا از راکد ماندن محلول جلوگیری به عمل آید.

ای‌هیواید و همکارانش درجه اسیدی (pH) محلول را بصورت روزانه با استفاده از pH سنج دیجیتال با دقت ۰/۰۵ کنترل کردند. برای درجه اسیدی برابر ۰/۳و ۰/۶ ، مدت زمان آزمایش برابر با ۸ هفته و برای سایر محلول‌ها مدت زمان ۱۳ هفته یا سه ماه در نظر گرفته شده بود. نمونه‌های بتنی در محلول‌های مورد نظر قرار گرفته و پس از یک، دو، سه، چهار، شش، هشت و سیزده هفته، نمونه‌ها از محلول، خارج شده و با دقت با آب شسته شده و سپس در دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد تا ثابت شدن جرم، نگهداری شده بودند. پس از خنک شدن نمونه‌ها در اتاق، بوسیله ترازویی با دقت یک‌صدم گرم، آنها را توزین کرده و مجدداً در محلول قرار داده بودند. لازم به ذکر است که پروسه تر و خشک کردن می‌تواند خرابی بتن را با ایجاد ریزترکها تشدید نماید.

همچنین تأثیر اسید سولفوریک بر سطح بتن با میکروسکوپ نوری نیز بررسی شده است. نتایج، نشان دادند که نمونه‌های قرار گرفته در محلول‌های با درجه اسیدی (pH) بزرگتر از ۱/۵ ، در طول ۱۳ هفته کاهش وزنی از خود نشان ندادند. کاهش وزن نمونه‌های قرار گرفته در محلول‌های با درجه اسیدی (pH) کمتر از ۱/۰ نیز در شکل۲-۱۰ پس از ۸ هفته نشان داده شده است. همچنین جزئیات پیشرفت خوردگی برای محلول با درجه اسیدی (pH) برابر با ۰/۳ نیز در شکل۲-۱۱ نشان داده شده است.

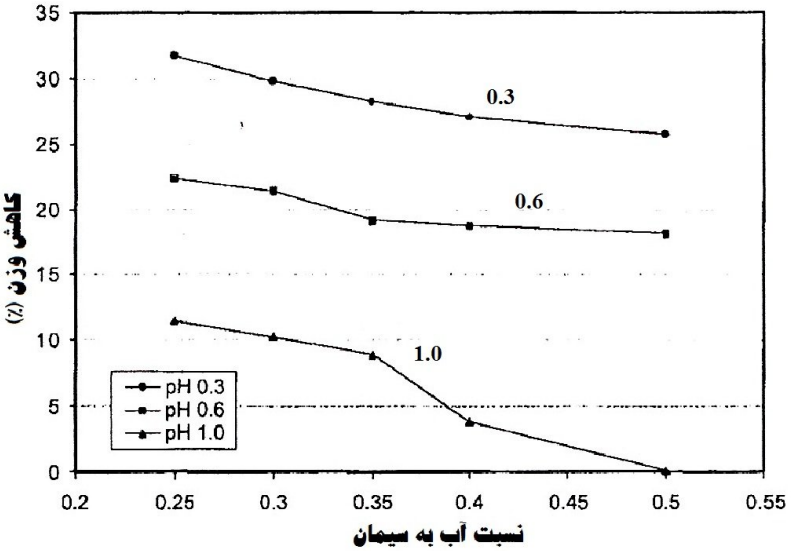


شکل۲-۱۰ : میزان کاهش وزن مخلوط‌ها پس از هشت هفته قرارگیری در محلول[۷]

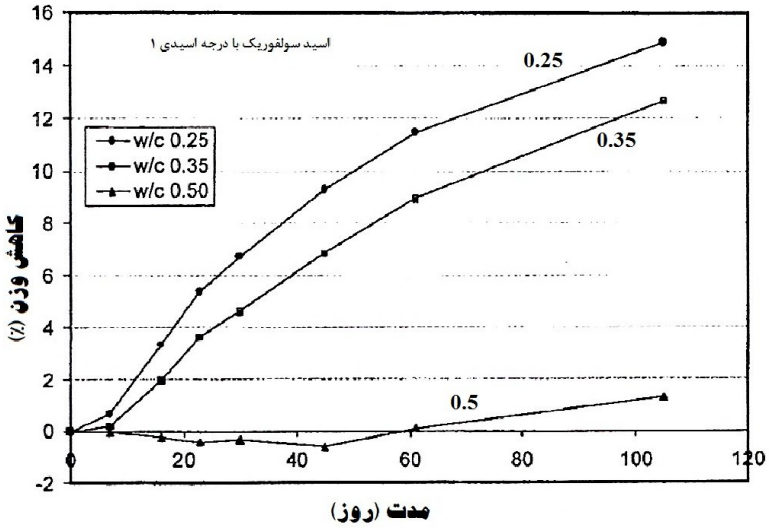


شکل۲-۱۱ : تغییرات کاهش وزن نمونه‌ها برای میزان مواد سیمانی متفاوت[۷]

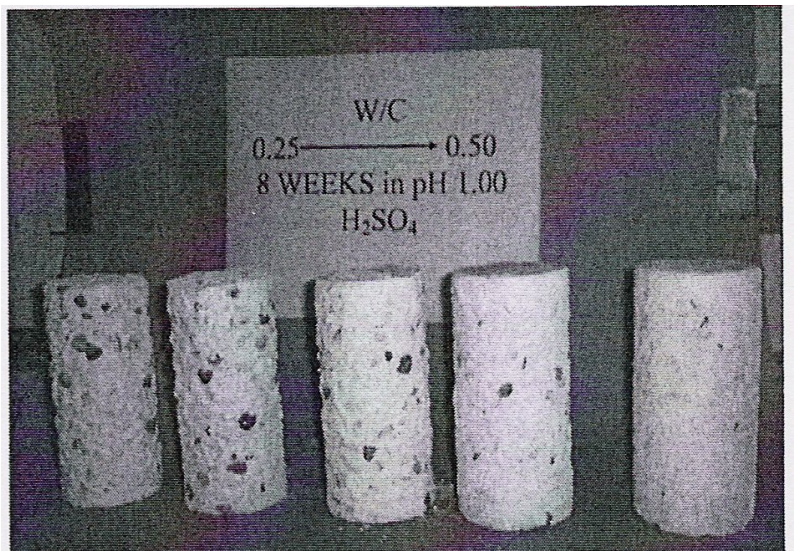
چنانچه واضح است، با افزایش میزان سیمان، میزان خوردگی افزایش می‌یابد. ای‌هیواید و همکارانش[۷] دلیل این رفتار سیمان در درجه اسیدی (pH) کمتر از ۱/۵ را به واکنش سریع اسید با خمیر سیمان مربوط دانستند. علاوه بر این در شکل‌های۲-۱۲ و ۲-۱۳ ، تأثیر نسبت آب به سیمان در کاهش وزن نمونه‌ها نشان داده شده است. همچنین شکل۲-۱۴ وضعیت ظاهری نمونه‌ها را پس از ۸ هفته قرار گیری در محلول‌ها نشان می‌دهد.



شکل۲-۱۲ : میزان کاهش وزن مخلوط‌ها پس از هشت هفته قرارگیری در محلول[۷]



شکل۲-۱۳ : تغییرات کاهش وزن نمونه‌ها برای نسبت آب به سیمان‌های متفاوت[۷]



شکل۲-۱۴ : ظاهر نمونه‌ها پس از ۸ هفته قرارگیری در محلول با نسبتهای آب به سیمان متفاوت[۷]

چنانچه واضح است با بالا رفتن نسبت آب به سیمان، مقاومت ظاهری در برابر اسید، افزایش می-یابد و دلیل این مسئله، وجود حفرات زیاد بتن، در نسبت آب به سیمان‌های بالا می‌باشد که محصولات خوردگی ناشی از واکنش اسید با خمیر سیمان، در این حفرات قرار گرفته و افزایش جرم را سبب می-شود[۷].

همچنین در شکل۲-۱۵ تأثیر میزان سنگدانه در میزان خرابی نشان داده شده است.