

مروری بر روش‌های آزمایشگاهی و تحلیلی در خصوص بررسی رفتار بتن تحت حملات سولفاته و اسیدی

مقاله علمی - پژوهشی

مصطفی آدرسی*، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران
حامد مرادی باصری، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m.adresi@sru.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۱۰ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۵

صفحه ۳۴۴-۳۲۹

چکیده

در این تحقیق ابتدا به بررسی عوامل اسیدی و سولفاته موثر بر فرآیند خوردگی بتن پرداخته شده است. سازه‌های بتنی زیادی در معرض این نوع خوردگی هستند. پس با توجه به اهمیت موضوع چهار آزمایش غوطه‌وری، سولفات ثابت، pH ثابت و آزمایش تسریع شده جهت شبیه‌سازی محیط اسیدی و خوردنده معرفی شده‌اند که هر کدام به نوبه خود استانداردها و شرایط محیطی خاصی دارد و در نهایت روش‌های پراش اشعه ایکس، رزونانس مغناطیسی هسته‌ای، استفاده از محلول فنل فنالتین و استفاده از میکروسکوپ الکترونی روشی جهت تجزیه و تحلیل فیزیکی، مکانیکی و ریز ساختاری نمونه‌های مورد آزمایش شرح داده شده است. در همه آزمایش‌های یاد شده استفاده از محلول اسیدی یا سولفات اجتناب‌ناپذیر است کنترل میزان pH محلول مورد استفاده و مقایسه آن با محدوده مجاز آزمایش به صورت مداوم از اهمیت ویژه برخوردار است و باعث می‌شود نتایج آزمایش قابل اعتنا تر باشد.

واژه‌های کلیدی: حملات اسیدی، حملات سولفاته، ریز ساختار، روش‌های آزمایشگاهی

۱- مقدمه

بتن ماده‌ای پر کاربرد در ساخت و سازه‌های مختلف است که هر کدام از این سازه‌ها کارایی‌های خاصی دارند. تخریب و فرسایش بتن نیز مانند سایر مواد اجتناب‌ناپذیر است، این زوال و تخریب بر اساس محل اجرای بتن و عوامل محیطی ممکن است علل شیمیایی یا فیزیکی داشته باشد (Adresi & Pakhirehzan, 2023). یکی از عوامل تخریب بتن مجاورت بتن با مواد اسیدی و سولفاته است که نوعی عامل شیمیایی می‌باشد و منجر به خوردگی در بتن می‌شود (Adresi, Sabagh & sharifi, 2023; Adresi & Rashti Mohammad, 2023). سالیان اخیر پژوهش‌های زیادی در این زمینه انجام شده است.

شیکه‌های فاضلاب، سازه‌های دریایی، پایه پل‌ها، شبکه‌های آب باران (Aguiar & Baptista, n.d.)، سیستم خنک کننده کارخانه‌ها (Zherebyateva, Lebedeva, & Karavako, 1991)، سازه‌های زیر زمینی و سازه‌های صنعتی از جمله سازه‌هایی هستند که در معرض حملات سولفاته و اسیدی قرار دارند. به منظور بررسی تخریب بتن تحت حملات سولفاته و اسیدی آزمایش‌های مختلفی جهت شبیه‌سازی محیط حمله و تجزیه و تحلیل نمونه‌های مورد آزمایش انجام می‌شود. در طی سالیان اخیر پژوهش‌های زیادی در این زمینه انجام شده است.

۲- پیشینه تحقیق

سازه‌های بتنی که در مجاورت مواد اسیدی و سولفاته‌ی خورنده قرار دارند به دلیل سختی شرایط جهت نظارت و نگهداری با خطر آسیب و تخریب و در پی آن خسارت‌های مالی و جانی مواجه هستند. هزینه تعمیر این چنین سازه‌ها زیاد بوده و اغلب کاری دشوار است (Grenng et al., 2015; Monteny, De Belie, Vincke, Verstraete, & Taerwe, 2001; O'Connell, McNally, & Richardson, 2010; L. Zhang et al., 2008). به عنوان مثال خرابی لوله‌های انتقال فاضلاب پیچیده و غیر قابل اجتناب است و نگه داری و ترمیم و حتی تعویض آنها بسیار زمان‌بر دشوار و پرهزینه است (Girardi, Vaona, & Di Maggio, 2010). بنابراین لزوم توجه با بحث خوردگی اهمیت دوچندان پیدا می‌کند. با آزمایش‌های موجود بر روی نمونه‌های بتنی می‌توان خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های خورده شده را بررسی و با نمونه اولیه مقایسه نمود و با استفاده از راهکار مناسب جهت جلوگیری از تخریب اقدام نمود. تغییر ترکیبات بتن یکی از موثرترین و در دسترس‌ترین راه‌های موجود برای محافظت از سازه بتنی در برابر خوردگی است (Girardi et al., 2010; Torres, De Souza, et al., 2019; G. Zhang et al., 2021).

۳- انواع عوامل اسیدی و سولفاته موثر بر خوردگی

بتن و سیمان

بتن در انواع متفاوت مصنوعات مانند لوله‌های بتنی، پی‌ها، ستون‌ها و تیرها مورد استفاده قرار می‌گیرد که همه موارد یاد شده به صورت‌های مختلفی در معرض عوامل تخریب کننده خارجی هستند؛ برای مثال ستون‌های مورد استفاده در اسکله‌ها، مورد حمله‌های سولفات آب دریا هستند که باعث خوردگی در آنها شده و مقاومت آنها را به تدریج کاهش می‌دهد تا زمانی که ستون‌ها دیگر توان مقاومت در برابر بارهای حداکثر طراحی را نداشته باشند، که خطر این امر حتی اگر باعث خسارت مستقیم مالی و جانی به دلیل سانحه نشوند هزینه‌های اقتصادی قابل توجهی برای مرمت آنها را به بار می‌آورند (Girardi et al., 2010). در این راستا روسازی بتنی با توجه به اینکه روی زمین

آنا لوسیا تورس و همکاران با غوطه ور کردن نمونه‌های بتن ساخته شده در اسید سولفوریک با غلظت‌های مختلف شرایط خوردگی را شبیه‌سازی کرده و سپس به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌های خورده شده را مورد بررسی قرار دادند (Torres, De Souza, Da Silva, & De Andrade Silva, 2019). ژنگ و همکاران نیز آزمایش غوطه‌وری بتن در محلول اسید سولفوریک با سه نوع pH مختلف را انجام دادند، تغییرات ترکیبات فازی این نمونه‌ها به کمک الگوی پراش اشعه ایکس مورد بررسی قرار گرفت و سپس با استفاده از رزونانس مغناطیسی هسته‌ای اثر حملات اسیدی بر ژل‌های موجود در بتن را ارزیابی کردند و در نهایت با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی تغییرات منافذ موجود در نمونه بررسی شد (G. Zhang et al., 2021). غوطه‌وری در اسید سولفوریک آزمایش سریعی است که به وفور انجام شده است (Belie, Monteny, & Taerwe, 2002; Di, Villar, & Belie, n.d.; Raju & Dayaratnam, 1984; Rossen & Scrivener, 2017). روش‌های دیگری از جمله روش سولفات ثابت و روش pH ثابت نیز در بررسی خوردگی شیمیایی بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش pH ثابت در موسسه ویلهام دیکرهوف توسعه یافت که در طول آزمایش pH محلول اسید سولفوریک با تقریب مناسبی ثابت نگه داشته شد و در نهایت بررسی آسیب نمونه‌های مورد آزمایش توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد (Di et al., n.d.). روش سولفات ثابت توسط شورای عالی تحقیقات اسپانیا (CSIC) استاندارد شد (Di et al., n.d.). در این آزمایش نمونه به کمک میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفتند. روش دیگری که به کمک آن آزمایش حملات سولفاته و اسیدی بررسی می‌شوند آزمایش موسوم به تست برای تخریب سریع، که در دانشگاه گنت انجام شد، توسعه این روش و تجهیزات آن توسط دی بلی و همکاران انجام شد (Gruyaert, Heede, Maes, & Belie, 2012). در این آزمایش از چرخه‌های مرطوب و خشک کردن متناوب استفاده می‌کند زیرا نفوذ اسید توسط فرایند جذب، سریع‌تر از فرایند انتشار است (Di et al., n.d.). در این آزمایش کاهش قطر نمونه‌ها فاکتور مهمی جهت تعیین اثر اسید بر بتن می‌باشد.

کنند و راه ورود مواد خورنده به محیط بتن سالم را باز کنند (Girardi et al., 2010).

خوردگی بتن با جایجایی یون‌های چند ظرفیتی از بتن به سمت محلول اسیدی و جایگزینی آن‌ها با الکترون‌های آزاد محیط اسیدی صورت می‌گیرد که در ابتدا با فرآیند مویبندی به درون بتن نفوذ کرده و سپس رسوب‌های جدیدی از یون‌های چند ظرفیتی تشکیل می‌شود. این رسوب‌های سولفاتی (عموماً گچی) به دلیل شرایط مناسب محیطی فرایند تبلور را آغاز می‌کنند که باعث انبساط آن‌ها شده و ریز ترک را باز تر و راه را برای ادامه مسیر نفوذ مویبندی یون‌ها آماده تر می‌کند. این فرآیند تا زمانی که غلظت یون‌های دو طرف به تعادل نرسند ادامه می‌یابد (Metcalf & Eddy, 2013).

فرایند خوردگی بتن در محیط اسیدی با نفوذ یون SO_4^{2-} به داخل ریز منافذ شروع می‌شود، با ورود یون سولفات، یون OH^- تولید شده توسط تفکیک Ca(OH)_2 به تدریج خارج می‌شود (Irassar, Bonavetti, & González, 2003). SO_4^{2-} با Ca(OH)_2 و AFm واکنش داده و به ترتیب اترینگایت و گچ را در محصولات هیدراتاسیون تشکیل می‌دهند (Irassar et al., 2003). سپس گچ با هیدرات آلومینات کلسیم واکنش داده و اترینگایت را تشکیل می‌دهد و با مشارکت SO_4^{2-} به متبلور شدن ادامه می‌دهد (Pang, Cuello Jimenez, & Singh, 2020). در این میان تشکیل گچ با تشکیل کرنات کلسیم در اثر کرنات‌ه شدن همراه است. به طور مهمی، سطوح انتشار SO_4^{2-} و Ca^{2+} با کاهش pH افزایش می‌یابد، در حالی که افزایش غلظت SO_4^{2-} باعث می‌شود محصول خوردگی اصلی از اترینگایت به گچ دی هیدرات تبدیل شود (Liu, Chen, Yu, Chen, & Zheng, 2020). علاوه بر این، زل $\text{C} - (\text{A}) - \text{S} - \text{H}$ در خمیر سیمان نیز به دلیل غلظت بالای سولفات توسط SO_4^{2-} خورده و دکلسیفیکاسیون (کلسیم زدایی) می‌شود و در منافذ زل گچ تشکیل می‌شود. افزایش غلظت یون کلسیم به واکنش دکلسیفیکاسیون ساختار زل $\text{C} - (\text{A}) - \text{S} - \text{H}$ با جذب SO_4^{2-} به Ca^{2+} نسبت داده می‌شود (Bérodier, Muller, & Scrivener, 2020). پس از مصرف AFm، Ca^{2+} به واکنش با SO_4^{2-} ادامه می‌دهد تا گچ تشکیل شود و Ca(OH)_2 مصرف شود (Irassar et al.,

و در مواجهه مستقیم با خاک قرار دارد بسیار در معرض حملات سولفاتی قرار می‌گیرد. این حملات در مواقعی که روسازی‌های بتنی به خوبی متراکم نشده باشند و دارای منافذ زیادی باشند و یا از نوع متخلخل باشند که عملاً سولفات بیشتر بتواند به بتن نفوذ کند می‌تواند جدی تر باشد (Adresi, Yamani, Karimaei, Tabarestani, M. & Rooholamini, 2023).

خوردگی به معنای از میان رفتن ماده مورد نظر به دلیل شرایط محیطی از طریق واکنش‌های شیمیایی و یا الکتروشیمیایی است؛ هر چند برداشت از نوشتار فوق از میان رفتن اجزای متفاوت بتن مانند سنگ‌دانه‌ها پس از تماس با انواع متفاوت موارد خورنده مانند اسیدها می‌باشد، اما باید توجه داشت که موارد شیمیایی تنها عامل تخریب بتن نیستند؛ عملکرد جلبک‌ها که با رشد بر سطح بتن و مرطوب نگه داشتن آن شرایط را برای ایجاد ریز ترک‌ها و پر شدن آن‌ها با مواد خورنده فراهم می‌کنند، عملکرد برخی جانداران ریز مانند برخی از انواع باکتری‌های بی‌هوازی که مواد اسیدی ترشح می‌کنند و برخی از انواع قارچ‌ها که در ترک‌های بتن رشد کرده و منبسط شدن آن را تسریع می‌کنند را نباید نادیده گرفت (Beddoe & Dorner, 2005). برای مثال می‌توان گفت بیشترین حجم از خوردگی بتن را در سطح داخلی لوله‌های فاضلاب داریم؛ فرآیندهای منجر به خوردگی در لوله‌های بتنی فاضلاب بسیار پیچیده است. سولفید هیدروژن تولید شده توسط فاضلاب بی‌هوازی به جریان فاضلاب رها می‌شود و روی دیواره لوله بالای فاضلاب متراکم می‌شود. میکروارگانیسم‌هایی مانند تیوباسیلوس تیواکسیدانسانس که روی این سطح رشد می‌کنند به صورت هوازی سولفید هیدروژن را به اسید سولفوریک تبدیل می‌کنند که با بتن واکنش می‌دهد (O'Connell et al., 2010). در بیشتر موارد، pH روی سطح لوله بسیار پایین است (Vipulanandan & Liu, 2002).

خوردگی سیمان در حین تماس با مواد شیمیایی با pH بین ۴ تا ۶/۵ مورد توجه قرار گرفته است اما بتن به دلیل نیروهای سایشی و همچنین تغییرات دمایی نیز آسیب می‌بیند که می‌توانند شروع کننده سازوکارهای خوردگی باشند به این صورت که در پیوند دهنده‌های بتن، ریز ترک‌هایی به اندازه‌های میکرونی ایجاد

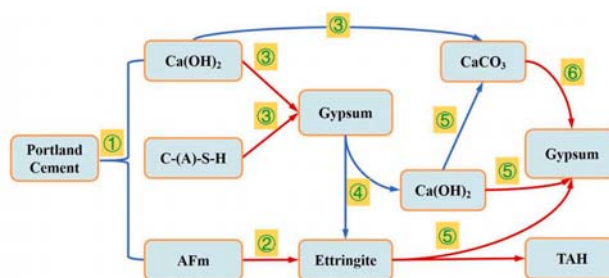
برای مدت مشخصی غوطه‌ور می‌کنند. استانداردها و شرایط انجام این آزمایش در استاندارد ASTM C1898-20 به صورت کامل شرح داده شده است. از مواد مختلفی نظیر سولفوریک اسید (Torres, Souza, Silva, & de Andrade Silva, 2019; G. Zhang et al., 2021) یا سدیم سولفات (Girardi et al., 2010) به عنوان محلول خورنده استفاده می‌شود. در حین فرایند غوطه‌وری پس از دوره‌های چند روزه نمونه‌ها مورد بازبینی قرار می‌گیرند و تغییرات وزن و تغییرات ظاهری آنها ثبت می‌شود. با توجه به اینکه ممکن است محلول‌ها توسط یک سری واکنش‌ها خنثی شوند بهتر است هر ۷ روز یکبار محلول‌ها تعویض شوند (ASTM C1898 20, 2020). این میزان از خنثی شدن توسط اندازه‌گیری pH محلول‌های استفاده شده با اندازه‌گیری، ارزیابی می‌شود (Torres, Souza, et al., 2019). در دسته‌ای دیگر از آزمایش‌های غوطه‌وری غلظت محلول ثابت اما pH محلول متفاوت است این نوع آزمایش‌ها اثر pH محیط بر روند تغییر خواص فیزیکی و مکانیکی بتن را به خوبی آشکار می‌کند. (G. Zhang et al., 2021). شرایط دمایی محیط آزمایش نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است در صورتی که تاثیر دما جز اهداف آزمایش نباشد بهترین دما برای این آزمایش براساس استانداردهای اعلام شده دمای ۲۱ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد است (ASTM C1898 20, 2020).

در رابطه با تاثیر دما بر روند خوردگی بتن در آزمایش غوطه‌وری پژوهش‌هایی صورت گرفته است اما برای نمونه‌های مشابه در دمایی خاص نباید تغییرات دمایی وجود داشته باشد (Mahmoodian & Alani, 2017). پس از انجام آزمایش غوطه‌وری آزمایش‌های مانند مقاومت کششی و مقاومت فشاری بر روی نمونه انجام می‌شود تا تاثیر مواد خورنده بر خواص مکانیکی بتن مشخص شود. شکل ۲ نشان دهنده تاثیر اسید سولفوریک نمونه‌های غوطه‌ور در محلول با غلظت‌های ۰/۵٪، ۱٪ و ۳٪ برای مدت ۸۴ روز است (Torres, Souza, et al., 2019).

۴-۲- روش سولفات ثابت

روش سولفات ثابت به بتن غوطه‌ور در محلول اسیدی با pH اولیه ۲ اطلاق می‌شود (Di et al., n.d.). در این روش پس از ساخت نمونه‌ها، بر طبق استاندارد EN 12390-11 آن‌ها را در

(2003). علاوه بر این، مواد معدنی تری کلسیم سیلیکات، هیدروکسید کلسیم و آلومینات با افزایش سن خوردگی به طور کامل به سایر محصولات آهکی تبدیل می‌شوند، از جمله گچ، اترینگایت، هیدرات آلومینات سوم (TAH) و غیره علاوه بر این، وجود گچ در منافذ باعث افزایش فوق‌العاده اترینگایت می‌شود (Yang, Zhan, Wang, Zhang, & Duan, 2020). مطالعات بسیاری از محققان نشان داده است که کربنات کلسیم، اترینگایت و هیدروکسید کلسیم زمانی که مقدار pH کمتر از ۱۰ باشد در حالت ناپایدار قرار دارند (Gong & White, 2018). فرآیند خوردگی در شکل ۱ برای سیمان پرتلند تحت حمله سولفات در مقادیر pH پایین نشان داده شده است، جایی که فرآیندهای مشخص شده با فلش‌های قرمز در شکل ۱ واکنش‌هایی هستند که یون‌های سولفات را شامل می‌شوند. اعداد مشخص شده در بالای فلش‌ها نشان دهنده ترتیبی است که در آن واکنش‌ها در طول فرآیند خوردگی رخ می‌دهند و هر واکنش باید قبل از ادامه آن بر اساس واکنش قبلی باشد. بنابراین، ترکیب محصولات خوردگی بین دوره‌های مختلف خوردگی سولفات متفاوت است و توسعه فرآیند خوردگی لزوماً تحت تأثیر مقدار pH است.



شکل ۱. نمودار شماتیک فرآیند خوردگی سیمان پرتلند تحت حمله سولفات در مقادیر pH پایین (G. Zhang et al., 2021)

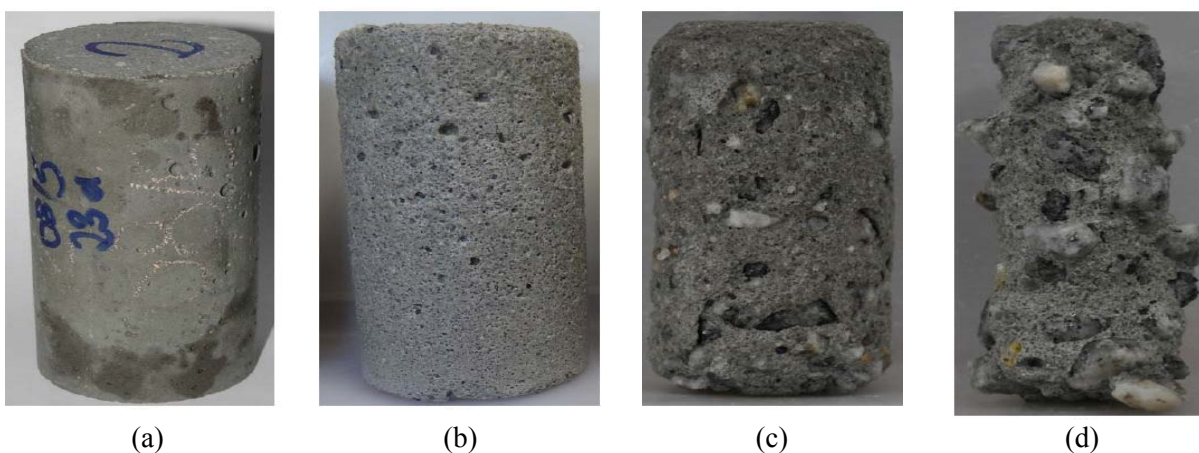
۴-۱- روش غوط وری

۴-۱-۱- روش غوط وری

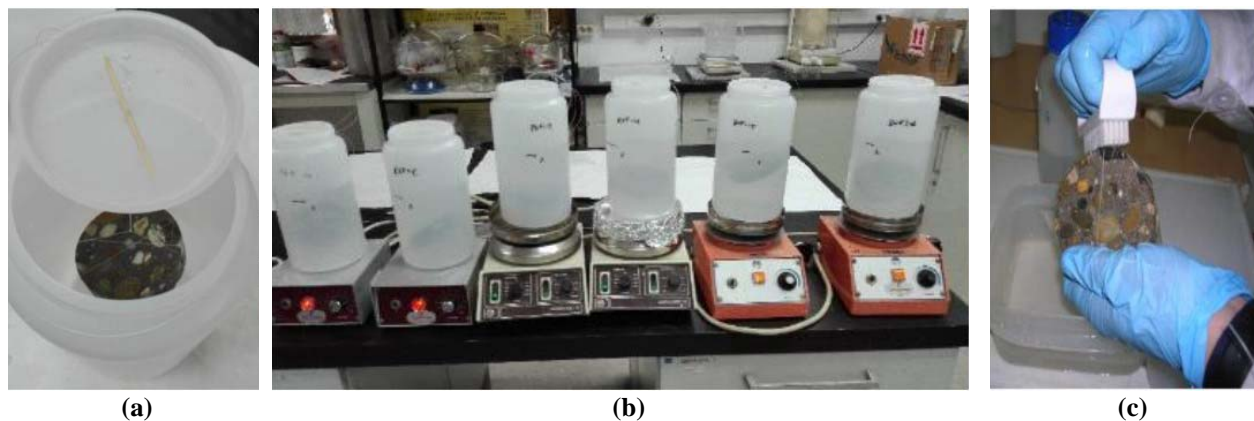
یکی از روش‌های پرکاربرد و در دسترس روش غوطه‌وری نمونه‌ها در محلول اسیدی یا سولفاتی است. در این روش نمونه‌های بتن را در محلول‌های مورد نظر با غلظت‌های مختلف

توسط کنترل دستی pH انجام می‌شود در صورت نیاز، محلول باید تعویض گردد. در مدت زمان غوطه‌وری باید نمونه‌ها هفته‌ای یکبار مورد بررسی قرار گیرند و روند تخریب نمونه‌ها ثبت گردد، می‌توان مواد برجای مانده از خوردگی را توسط برس و آب دیونیزه شده زدود (Di et al., n.d.). در شکل ۳ نحوه غوطه‌وری، تنظیم pH و تمیز کردن نمونه‌ها نمایش داده شده است.

حالت خلأ با آب اشباع و سپس نمونه‌ها را در یک ظرف خلأ قرار می‌دهند. ضمناً فشار محیطی در این ظرف کاهش محسوسی دارد. بعد از گذشت ۳ ساعت ظرف‌ها توسط آب مقطر پر می‌شوند تا نمونه‌ها کاملاً غوطه‌ور شوند، نمونه‌ها حدود ۱۶ تا ۲۰ ساعت در این شرایط نگه‌داری می‌شوند. پس از آن نمونه‌ها را در اسید سولفوریک غوطه‌ور می‌کنند و هر روز به مدت ۳۰ دقیقه نمونه‌ها هم‌زده می‌شوند. مقدار pH محلول در طول فرایند غوطه‌وری باید در محدوده تعیین شده باشد که این مهم



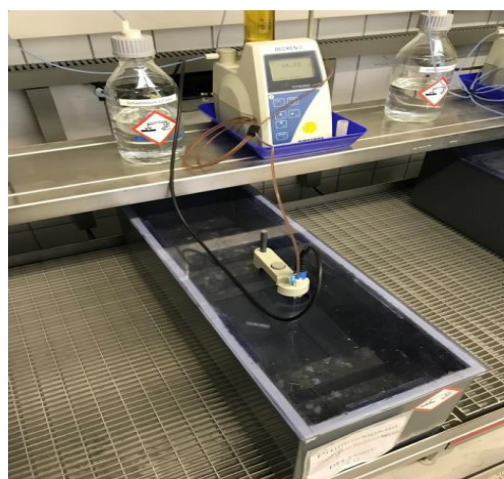
شکل ۲. نمونه‌های استوانه‌ای پس از ۸۴ روز غوطه‌وری: (a) مرجع بدون غوطه‌وری. (b) غوطه‌وری با محلول ۰.۵ درصد، (c) غوطه‌وری با محلول ۱ درصد، (d) غوطه‌وری با محلول ۳ درصد (Torres, De Souza, et al., 2019)



شکل ۳. (a) نمونه غوطه‌ور در اسید به روش سولفات ثابت، (b) هم‌زدن روزانه، (c) تمیز کردن نمونه توسط برس و آب دیونیزه (Di et al., n.d.).

۴-۳- روش pH ثابت

در این روش pH محلول اسیدی با تقریب مناسبی در طول فرایند آزمایش ثابت نگه داشته می‌شود. همانطور که شکل ۴ نشان داده شده است، در آزمایش انجام شده در موسسه Wilhelm Dyckerhoff از محلول اسید سولفوریک با محدوده pH بین ۱,۸ تا ۲,۲ استفاده شد. ابتدا نمونه‌ها در آب غوطه ور می‌شوند پس از آن اسید مورد نظر به آب پمپ می‌شود تا محلول حاصل به pH مد نظر آزمایش برسد و محلول آزمایش تا پنج هفته بصورت هفته‌ای یکبار تعویض گردد (Di et al., n.d.). نمونه‌ها باید هر هفته یکبار مورد بررسی و توزین قرار گیرند البته سطح نمونه‌ها قبل از وزن کردن می‌بایست به خوبی توسط مسواک دستی تمیز و سپس به کمک کاغذ جاذب خشک شود (Fattuhi & Hughes, 1988). بدین صورت روند تخریب بتن ثبت و میزان خرابی با نمونه اولیه مقایسه می‌گردد. اگر نسبت بین حجم مایع و سطح نمونه در طول مدت زمان غوطه‌وری عددی ثابت باشد، هندسه نمونه هیچ تأثیر بر نتایج آزمایش مربوط نخواهد داشت (Breit, 2004).



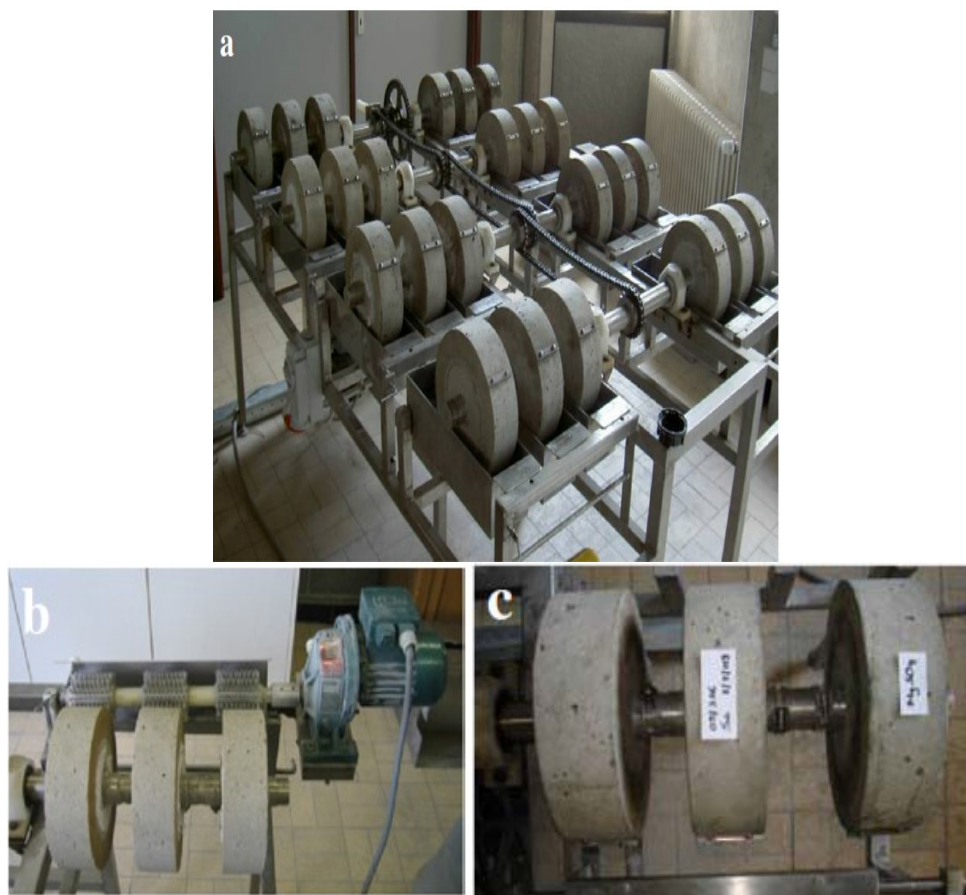
شکل ۴. کنترل خودکار pH محلول مورد آزمایش در روش pH ثابت

(Di et al., n.d.)

۴-۴- روش تسریع شده TAP

میزان نفوذ اسید در فرایند جذب بیشتر از فرایند غوطه‌وری است، به همین علت در روش تسریع شده یا TAP با استفاده از یک چرخ استفاده می‌شود تا نمونه‌ها را به صورت متناوب در معرض اسید قرار دهند و سپس خشک کنند (Di et al., n.d.). این حالت در لوله‌های فاضلاب به وقوع می‌پیوندد چون سطح فاضلاب در طول زمان دچار نوسان می‌شود.

در این آزمایش نمونه‌های استوانه‌ای شکل توسط یک محور چرخان به حرکت در می‌آیند، در آزمایش انجام شده توسط ویلار و همکاران (۲۰۲۰) قطر نمونه‌ها ۲۳۰ میلی‌متر و ارتفاع آن ۷۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. نحوه قالب‌گیری نمونه‌ها در این آزمایش کمی متفاوت است به این صورت که از وسط نمونه‌های بتنی تازه ساخته شده یک میله فلزی عبور داده می‌شود تا بتوان نمونه‌ها را بر روی دستگاه جهت چرخیدن نصب کرد (Di et al., n.d.). کمترین سرعت حرکت ۱,۰۴ دور در ساعت و بیشترین سرعت محور ۲۴,۴۱ دور در ساعت است (Belie et al., 2002; Gruyaert et al., 2012). فاصله محور و ظرف اسید باید طوری تنظیم شود که $\frac{1}{3}$ از قطر مقطع نمونه در تماس با اسید باشد که در شکل ۵ نمایش داده شده است، سرعت چرخیدن نمونه‌ها باید ۱,۰۴ دور در ساعت باشد (Belie et al., 2002). میزان pH محلول اسیدی در آزمایش TAP هر روز بررسی و در هفته یکبار تعویض می‌گردد. در این آزمایش اثر خوردگی با کاهش شعاع نمونه‌ها کاملاً مشهود است که توسط حس گر لیزری اندازه‌گیری می‌شود، نمونه‌ها باید قبل از اندازه‌گیری شعاع به کمک برس یا مسواک به خوبی تمیز شوند برای این کار می‌توان حداکثر سرعت چرخش را انتخاب نمود (Di et al., n.d.). روش TAP آزمایشی کارآمد جهت تعیین میزان عمق خوردگی بتن توسط اسید است.



شکل ۵. (a) نحوه قرار گیری نمونه‌ها بر روی ظرف حاوی محلول اسیدی در روش تسریع شده، (b) برس زدن نمونه‌ها، (c) اندازه گیری میزان کاهش شعاع توسط حسگر لیزری (Gruyaert et al., 2012).

۳۰ میلی آمپر کار می‌کند، ثبت و با استفاده از ۲۰ زاویه در محدوده درجه ۵ تا ۴۵ درجه با اندازه گام ۰/۰۲ درجه و سرعت اسکن ۵ درجه در دقیقه اجرا می‌شود (Rossen & Scrivener, 2017). جهت انجام این آزمایش می‌بایست نمونه‌ها به اندازه ۸۰ میکرومتر پودر شوند. برای مثال الگوی XRD در شکل شماره ۶ برای نمونه‌های سیمان پرتلند در معرض محلول Na_2SO_4 در مقادیر مختلف pH، با تفاوت‌های قابل توجهی در محتوای فاز محصولات خوردگی در مقادیر مختلف pH و سن خوردگی که توسط N.Cristelo و همکارانش ارائه شده، نشان داده شده است. در سن خوردگی ۲۸ روزه، اترینگایت، گچ، هیدروکسید کلسیم و سیلیکات تری کلسیم واکنش نداده در خمیر هیدراته وجود داشت. علاوه بر این، تمام سیلیکات تری کلسیم باقیمانده هیدراته شده و پیک پراش هیدروکسید کلسیم تقریباً به طور کامل در سن خوردگی ۱۸۰

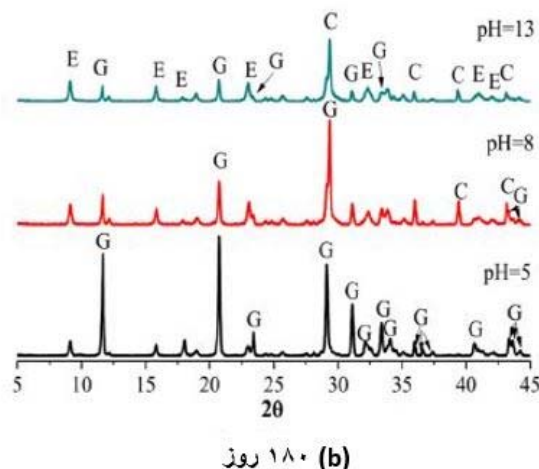
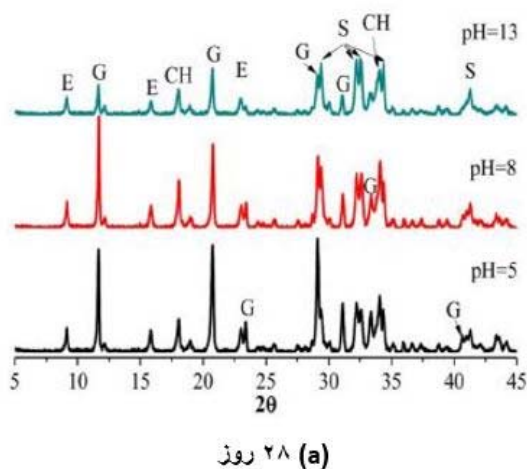
۵- روش‌های بررسی ریز ساختارها و منافذ بتن به منظور تحلیل اثر حملات سولفاته و اسیدی

۵-۱- روش XRD

این روش برای توصیف ترکیب فاز، میکرومورفولوژی و ویژگی‌های منافذ محصولات خوردگی سیمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. اصول طراحی دستگاه XRD بر پایه تابش پرتو X به نمونه در زوایای مختلف و تحلیل الگوی پراش یا بازتابش آن می‌باشد. از جمله مواردی که می‌توان در آنالیز با دستگاه XRD تعیین کرد، تشخیص فاز کریستال، اندازه و شکل دانه، فاصله بین لایه‌ها، تعیین جهت گیری و موقعیت و ساختار آن است. الگوی پراش اشعه X برای هر ماده، یکتا و منحصر به فرد می‌باشد. پراش اشعه ایکس (XRD) روی پراش سنج پیشرفته Bruker D8 با تابش $Cu\alpha_1$ ($\lambda = 0.154nm$) که در ۳۰ کیلو ولت و

این به دلیل این واقعیت است که اترینگایت عمدتاً به عنوان یک محصول خوردگی متوسط ناپایدار در طول فرآیند خوردگی سولفات عمل می‌کند که به طور مداوم به گچ و هیدرات آلومینات سوم (TAH) تبدیل می‌شود (Cristelo et al., 2016). بنابراین محتوای آن کم و توسط مقادیر pH محدود می‌شود.

روزه ناپدید شده است (Cristelo, Tavares, Lucas, Miranda, & Oliveira, 2016). بر اساس نتایج آن‌ها، مقدار قله مشخصه در ۱۱,۵ درجه مربوط به فرم طبیعی گچ است، در حالی که همپوشانی قله مشخصه در ۲۹ درجه مربوط به فرم طبیعی و گچ مصنوعی است. علاوه بر این، شدت پیک‌های پراش اترینگایت با کاهش مقادیر pH کمتر، متفاوت است.



شکل ۶. الگوهای XRD روی خمیر سیمان پرتلند در معرض محلول‌های سولفات (G. Zhang et al., 2021)

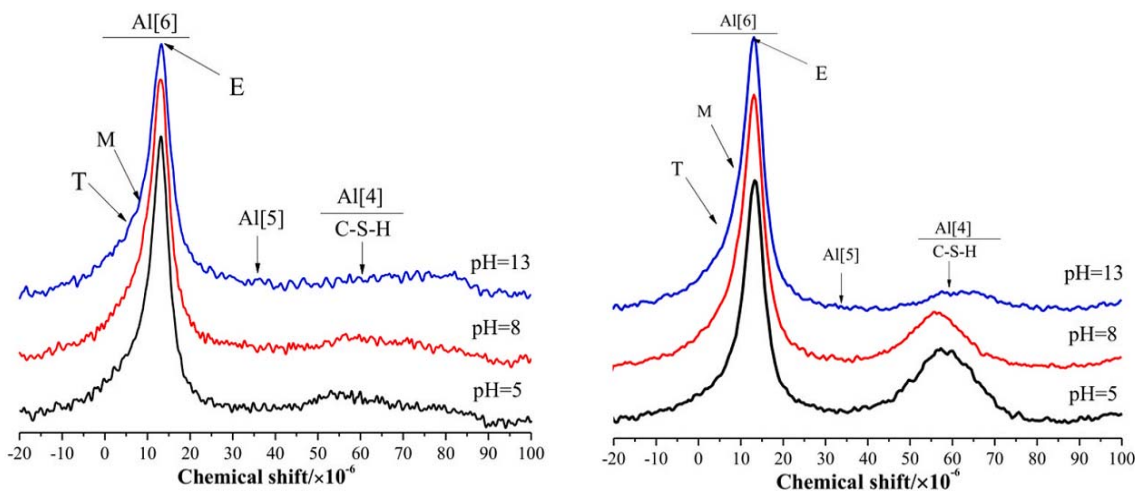
دو سطح انرژی برای هسته‌ها ایجاد می‌کند بدین صورت که هسته‌هایی که در جهت میدان خارجی باشند دارای سطح انرژی پایین و هسته‌هایی که در خلاف جهت میدان خارجی باشند دارای سطح انرژی بالاتری هستند. حال اگر هسته‌ای که در سطح پایین انرژی قرار دارد تحت تاثیر یک انرژی خارجی قرار گیرد، جذب انرژی کرده و از سطح پایین به سطح بالای انرژی برانگیخته می‌شود این حالت از تغییر سطح انرژی هسته با نام رزونانس مغناطیس هسته‌ای شناخته می‌شود. برانگیختگی زمانی رخ می‌دهد که فرکانس انرژی اعمال شده با فرکانس حرکت چرخشی هسته به دور محور برابر باشد. هر هسته‌ای که برانگیخته شود یک پیک در طیف مغناطیسی ماده ایجاد می‌کند به بیان دیگر به اندازه تعداد هسته‌های برانگیخته شده، در طیف پیک وجود خواهد داشت. هسته‌ها به دلیل تفاوت در چگالی و محیط به انرژی‌های متفاوتی جهت برانگیختگی نیاز دارند، بنابراین، ممکن است یک طیف مغناطیسی دارای چند پیک باشد. نکته قابل توجه این است

۲-۵- روش رزونانس مغناطیس هسته‌ای

کاربرد رزونانس مغناطیس هسته‌ای به این صورت است که به کمک یک طیف خاص با پیک‌های مختلف بتوان ساختار یک ماده را تشخیص داد. در هسته اتم پروتون‌ها در حال چرخش هستند که این چرخش ایجاد یک میدان مغناطیسی می‌کند به عبارت دیگر هسته به یک آهنربای کوچک تبدیل می‌شود، حال اگر یک میدان مغناطیسی خارجی بر هسته اعمال شود هسته از محور قائم متمایل شده و علاوه بر چرخش به دور محور خود به دور یک محور فرضی قائم نیز دوران می‌کند (همانند حرکت زمین به دور خود و خورشید) اعمال این میدان خارجی باعث می‌شود هسته‌های نامنظم ماده شروع به چرخش کرده و در راستای میدان خارجی جهت‌گیری کنند. این جهت‌گیری برای تعدادی از هسته‌ها در جهت میدان و برای بقیه هسته‌ها خلاف جهت میدان خارجی اعمال شده می‌باشد. این دو جهت‌گیری،

دو عنصر Si و Al ساختار نمونه‌های بتنی تحت حملات اسیدی را بررسی کردند. در شکل ۷ طیف رزونانس مغناطیسی هسته‌ای Al قابل مشاهده است.

که هسته‌هایی می‌توانند در رزونانس مغناطیسی هسته‌ای فعال باشند که عدد جرمی یا اتمی آن‌ها فرد باشد به همین دلیل ژنگ و همکاران در سال ۲۰۲۱ به کمک رزونانس مغناطیسی هسته‌ای



(a) 28 days

(b) 180 days

شکل ۷. طیف رزونانس مغناطیسی هسته‌ای ^{27}Al از سیمان تحت حمله به سولفات در مقادیر مختلف pH در سن خوردگی ۱۸۰ روز (G. Zhang et al., 2021)

Al در لایه میانی ساختار ژل $C - (A) - S - H$ ناپدید می‌شود. در سن خوردگی ۱۸۰ روزه، پیک رزونانس تعیین شده برای Al ناپدید شد، که به این معنی است که Al^{3+} کاملاً از فضای بین لایه‌های $C - (A) - S - H$ فرار کرده است. با این حال، مقدار Al در ژل $C - (A) - S - H$ با کاهش مقدار pH افزایش می‌یابد. این نشان می‌دهد که Al در دوره اولیه وارد AFm و TAH می‌شود به Al تبدیل می‌شود و در دوره بعدی دوباره وارد ساختار ژل $C - (A) - S - H$ می‌شود.

۳-۵- محلول فنل فتالین

این روش توسط آدام نوبل با هدف تعیین عمق لایه خوردگی بر روی سطح بتن سخت شده با استفاده از نشانگر مبتنی بر فنل فتالین ارائه شد. محلول نشانگر بر اساس توصیه‌های (Sharpe, Alexander, & Bailey, 2011) از مخلوط ۱٪ پودر فنل فتالین با اتانول ۷۰٪ تولید می‌شود (Sharpe et al., 2011).

بر اساس نتایج نشان داده شده در شکل ۷، طیف رزونانس مغناطیسی هسته‌ای ^{27}Al خمیر سیمان را تحت حمله سولفات در مقادیر مختلف pH نشان می‌دهد. پیک‌های تشدید با جابجایی‌های شیمیایی 4.0×10^{-6} ، 9.0×10^{-6} ، 13.0×10^{-6} به ترتیب به پیک‌های اترینگیت (E)، AFm (M) و TAH (T) نسبت داده می‌شوند. یک نوع فاز آلومینات با هماهنگی هشت وجهی آمورف است که به شکل $O_xAl(OH)_{6-X}^{(3+X)-}$ ارائه می‌شود. تغییر شیمیایی در پیک 35×10^{-6} به در لایه میانی ژل $C - (A) - SH$ نسبت داده می‌شود و پیک در 67×10^{-6} به ساختار $C - (A) - SH$ مربوط می‌شود.

با کاهش pH، محتوای Al در ژل $C - (A) - S - H$ کاهش می‌یابد و پیک‌های تشدید آن در سن خوردگی ۲۸ روزه نسبت به میدان خارجی کم تغییر می‌کند. این به این دلیل است که کاهش مقدار pH محلول سولفات منجر به کلسیم‌زدایی شدیدتر ژل $C - (A) - SH$ می‌شود. با طولانی شدن سن خوردگی،

به روش SEM مشخص کردند. علاوه بر بررسی کاربرد خوردگی، در کاربردهای دیگری نیز می‌توان از تصاویر SEM برای تحلیل منافذ (M. Adresi, Hassani, Javadian, & Mostafa, 2016; Tulliani, 2016)، مطالعه شکست و رشد ترک (Mostafa Adresi, 2017; Rooholamini, Sedghi, Ghobadipour, & Adresi, 2019)، مواد نانو و خواص آن در بتن (M. Adresi, Hassani, Tulliani, Lacidogna, & Antonaci, 2017; Mostafa Adresi, Hassani, Mohammad reza Soleimani, & Varjani, 2016; Mostafa Adresi & Yekrangnia, 2021; Mardani, Lavassani, Adresi, & Rashidi, 2022) و ... استفاده نمود.

برای انجام این روش از یک میکروسکوپ الکترونی روبشی معمولاً مدل LN JSM-6510، با ولتاژ ۲۰ کیلوولت استفاده می‌شود. برای تهیه عکس قسمت مورد نظر، بخشی از نمونه بتنی را جدا کرده و روی پایه فلزی با چسب نقره (یک چسب هادی) ثابت می‌شود. برای وضوح بیشتر تصویر و جلوگیری از جذب الکترون‌های تابیده شده از طرف دستگاه به نمونه، لازم است نمونه با پوشش هادی مانند اسپری نقره، طلا یا کربن پوشش داده شود. بعد از قراردادن نمونه در دستگاه، برای جلوگیری از برخورد الکترون‌های تابیده شده به هوا و بازتابش آن‌ها، هوای اطراف نمونه تخلیه می‌شود. اگر نمونه بخار شود عمل تخلیه بدرستی انجام نمی‌شود، همچنین اگر پوشش‌دهی یا چسب نمونه به پایه ضعیف باشد می‌تواند بخشی از نمونه کنده شود و به دستگاه آسیب رساند. بعد از تابش الکترون‌ها به سطح نمونه و بازتابش آن‌ها با توجه به شکل سطوح و پستی و بلندی و کیفیت بلورها و غیرو، الکترون‌های برگشتی از روی نمونه بر روی حسگرهای دستگاه ثبت می‌شوند و از پردازش آن‌ها تصویر میکروسکوپی یک نمونه ساخته می‌شود.

شکل ۹ مورفولوژی گچ و اترینگایت را در خمیر سیمان نشان می‌دهد که توسط SEM در مواجهه با محلول‌های Na_2SO_4 در مقادیر مختلف pH به مدت ۲۸ و ۱۸۰ روز بدست می‌آید. محصولات اصلی حمله سولفات زیر ۲۸ روز Aft سوزنی مانند (اترینگایت) و گچ ستونی است. با کاهش مقدار pH محلول خورنده، محصولات خوردگی عمدتاً از Aft به گچ تغییر می‌کنند که با تجزیه و تحلیل XRD مطابقت دارد. پس از ۱۸۰ روز حمله

این محلول در تماس با سطوح با pH پایین تغییر رنگ می‌دهد؛ برای مقادیر pH بیشتر از ۹/۵، محلول صورتی است. با این حال، برای مقادیر pH کمتر از ۹/۵، محلول شفاف می‌شود (Neville, 2011). بلافاصله پس از انجام آزمایش‌های مکانیکی، نمونه‌ها با محلول فنل فتالین اسپری می‌شوند تا تغییرات pH در نواحی نزدیک سطوح در معرض دید مشاهده شود. بنابراین، مشاهده ضخامت بتن تحت تأثیر محلول‌های اسید سولفوریک امکان‌پذیر می‌شود. در شکل شماره ۸ محدوده‌ای که با نفوذ یون سولفات به بتن اسیدی شده و با خوردگی روبرو است توسط محلول فنل فتالین نمایانگر شده است.



شکل ۸ نمونه های بتنی پس از اسپری کردن فنل فتالین (Torres, De Souza, et al., 2019)

۵-۴- میکروسکوپ الکترونی روبشی

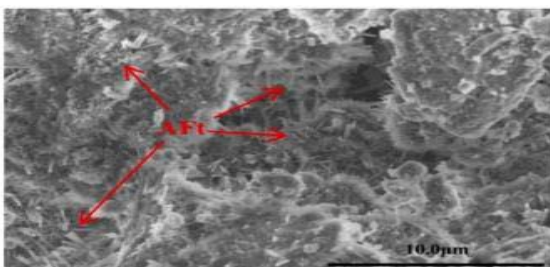
استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی یکی از روش‌های بررسی ریزساختارها و منافذ بتن در اثر حملات سولفات و اسیدی می‌باشد که همانند روش XRD درک سیستماتیک‌تری از ترکیب فاز و مورفولوژی میکروسکوپی محصولات خوردگی تحت حمله سولفات در مقیاس میکروسکوپی ارائه می‌کند (Li & Zhang, 2019; Wang, Cao, Cui, Si, & Wang, 2020). همچنین با توجه به آزمایشات R.Cao و G.Li ترکیب این روش با رزونانس مغناطیس هسته‌ای درک سیستماتیک‌تری از ترکیب فاز و مورفولوژی میکروسکوپی محصولات خوردگی تحت حمله سولفات در مقیاس میکروسکوپی ارائه می‌کند. آنالوسیا تورس و همکاران میزان خوردگی نمونه‌های بتنی مورد آزمایش خود را به کمک تصاویر برداشت شده

گچ تولید می کند. گچ می تواند دائماً به سطح $C - (A) - H$ بچسبد، بنابراین مورفولوژی آن دارای یک فرآیند تغییر "سوزن - لخته - صفحه مانند" است (Ledesma et al., 2018) در همین حال، SO_4^{2-} می تواند با AFm واکنش داده و اترینگایت را تشکیل دهد. نه تنها $Ca(OH)_2$ می تواند به تشکیل گچ ادامه دهد و روی سطح $C - (A) - S - H$ رسوب کند، بلکه اترینگایت تازه تشکیل شده نیز می تواند گچ و TAH را با مشارکت SO_4^{2-} تشکیل دهد (Ding, Yang, Hou, & Zhang, 2018). با رشد سن خوردگی، مقدار گچ ته نشین شده در سطح ساختار ژل به تدریج افزایش می یابد. در نتیجه، ساختار $C - (A) - S - H$ اساساً با کریستال های گچ "صفحه ای" در دوره های بعدی خوردگی، با رسوب گچ در منافذ و بر روی محصولات هیدراسیون، منافذ پر شده و عملاً راه نفوذ بیشتر یون سولفات کوچکتر می شود.

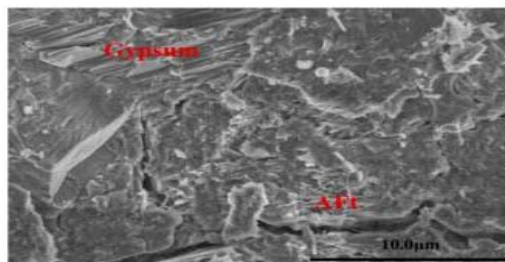
سولفات، محصول اصلی خوردگی گچ است که مورفولوژی آن از "ستون مانند" به "صفحه مانند" تغییر می کند و می توان نتیجه گرفت که تشکیل گچ با کاهش pH افزایش می یابد. علاوه بر این، کاهش مقدار pH محلول خورنده باعث افزایش اندازه کریستال گچ می شود. در محلول خورنده با pH پنج، عرض گچ ستونی بیشتر از ۵ میکرومتر است.

تغییرات مورفولوژیکی در ترکیب فازی محصولات خوردگی در طول فرآیند هیدراتاسیون در مقادیر pH پایین در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

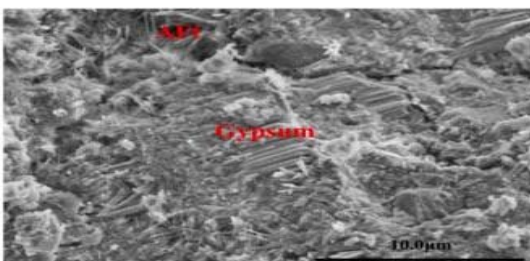
اول از همه، هیدراسیون سیمان محصولاتی چون $C - (A) - S - H$ ، AFm، $Ca(OH)_2$ را تشکیل می دهد که می تواند به طور مداوم جذب و رسوب دهد (Chen, Qiao, Hou, Wang, & Li, 2020) و اندازه منافذ خورده شده را تا حد معینی پر کند (M. Zhang & Jivkov, 2016). با ورود SO_4^{2-} در محیط خوردگی، $Ca(OH)_2$ تجزیه می شود و Ca^{2+} و OH^- تشکیل می دهد و OH^- شسته می شود، SO_4^{2-} به ترتیب با $C - (A) - S - H$ و $Ca(OH)_2$ واکنش داده و



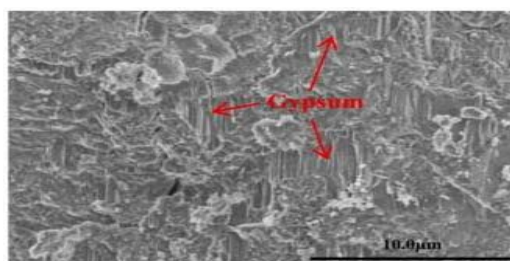
(a) ۲۸ روز، pH=13



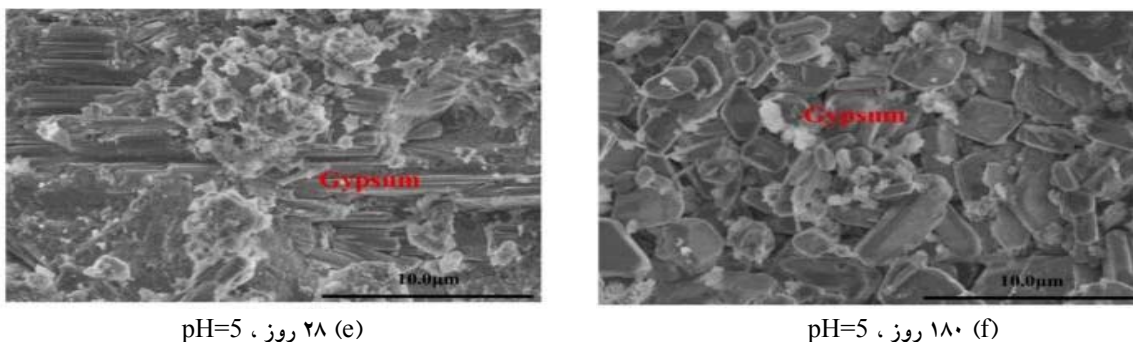
(b) ۱۸۰ روز، pH=13



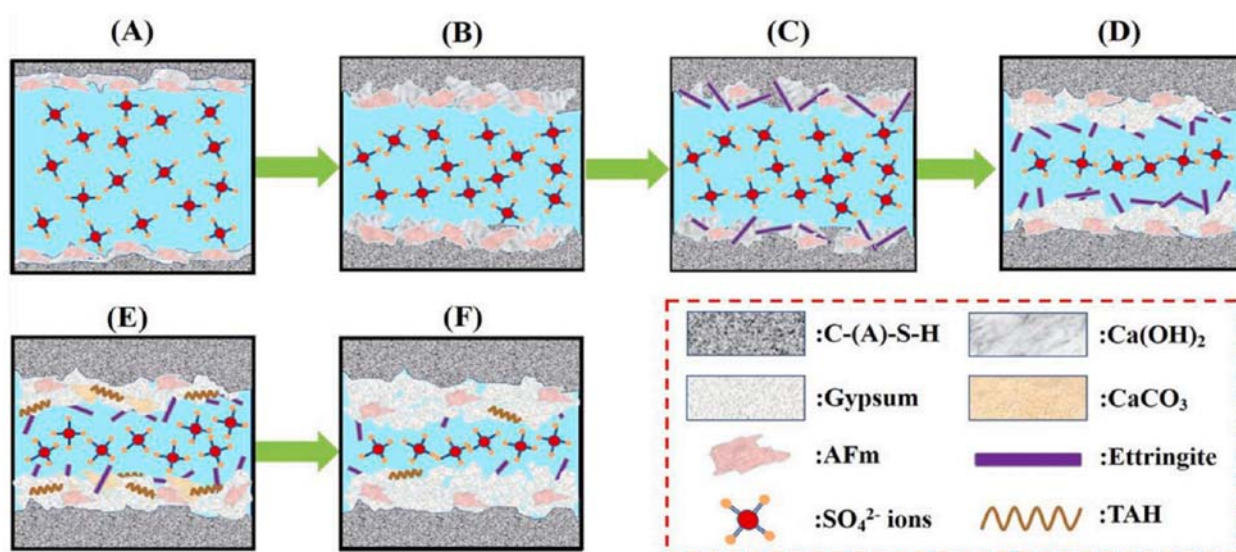
(c) ۲۸ روز، pH=8



(d) ۱۸۰ روز، pH=8



شکل ۹. مورفولوژی گچ و اترینگیت در خمیر سیمان پرتلند در معرض حمله سولفات در مقادیر مختلف pH (G. Zhang et al., 2021)



شکل ۱۰. تغییرات مورفولوژیکی در ترکیب فازی محصولات خوردگی در هنگام حمله سولفات در مقادیر pH پایین (G. Zhang et al., 2021)

۶- نتیجه گیری

در این مقاله سعی شد تا مرور جامعی بر روش‌های شبیه‌سازی محیط اسیدی و همین‌طور روش‌های تجزیه و تحلیل نمونه‌های حاصل از آزمایش‌ها کنترل‌شده شرح داده شود. از نتایج این آزمایش‌ها جهت بررسی تاثیر اسید بر خواص فیزیکی و مکانیکی بتن استفاده می‌شود.

در همه آزمایش‌ها کنترل میزان pH و تعویض اسید مورد آزمایش از نکات مهم جهت انجام صحیح آزمایش و دریافت جواب معتبر بود. شرایط دمایی محیط نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که نیاز به کنترل دائمی در طول فرآیند آزمایش دارد. نکته دیگر که در این دست آزمایش‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد بازبینی نمونه‌ها در دوره‌های مشخصی است. در این بازبینی‌ها ابتدا باید نمونه به خوبی به کمک مسواک یا برس تمیز

۷- مراجع

شود تا مواد خورده شده از سطح آن زدوده شود، سپس نمونه‌ها توزین شود. ثبت عکس قبل و بعد از تمیز کردن نمونه‌ها نیز می‌تواند بیانگر روند تخریب نمونه‌ها باشد. در مجموع با مقایسه آزمایش‌های شبیه‌سازی محیط اسیدی یاد شده، آزمایش غوطه‌وری از هزینه کمتری نسبت به سایر آزمایش‌ها برخوردار است و این روش جهت انجام آزمایش، تجهیزات ساده‌تری نیاز دارد.

بررسی ریزساختاری بتن تحت حملات سولفات و اسیدی از ابزارهای اصلی تحلیل مورفولوژیکی است. جهت تعیین میزان عمق خوردگی از محلول فنل فتالین استفاده می‌شود. ویژگی‌های تغییرات در شیمی مواد را میتوان با ابزارهای XRD و رزونانس مغناطیسی هسته‌ای بررسی کرد. در این بین جهت بررسی‌های

-Adresi, Mostafa. (2017). *Concrete pavement prediction life model based on electrical response of concrete - CNTs sensors under fatigue loading*. Politecnico di Torino.

doi.org/10.6092/polito/porto/2687875

-Adresi, Mostafa, Hassani, A., Mohammad reza Soleimani, & Varjani, A. yazdian. (2016). Investigation of carbon nanotube and energy levels effects on Self-sensing Concrete Sensor Performance in Dynamic Loading Pattern (In Persian). *Transportation Infrastructures Engineering Journal*, 2(3), 17–34.

doi.org/10.22075/JTIE.2016.509

-Adresi, Mostafa, & Yekrangnia, M. (2021). Properties and mechanisms of the self-sensing piezoelectric concrete sensor for structural health monitoring (In Persian). *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(9).

doi.org/10.22065/JSCE.2020.232648.2150

-Aguiar, J. E. D. E., & Baptista, M. B. (n.d.). Concrete structures erosions of urbans stormwater channels Erosões nas estruturas de concreto das galerias de aguas pluviais urbanas, (31).

-Andersen, M. D., Jakobsen, H. J., & Skibsted, J. (2004). Characterization of white Portland cement hydration and the C-S-H structure in the presence of sodium aluminate by ²⁷Al and ²⁹Si MAS NMR spectroscopy. *Cement and Concrete Research*, 34(5), 857–868.

doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.10.009

-Andersen, M. D., Jakobsen, H. J., & Skibsted, J. (2006). A new aluminium-hydrate species in hydrated Portland cements characterized by ²⁷Al and ²⁹Si MAS NMR spectroscopy. *Cement and Concrete Research*, 36(1), 3–17.

doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.04.010

-ASTM C1898 20. (2020). Standard Test Methods for Determining the Chemical Resistance of Concrete Products to Acid Attack. *ASTM International*, (Stage II), 9–10.

doi.org/10.1520/D1898-20.1

-Beddoe, R. E., & Dorner, H. W. (2005). Modelling acid attack on concrete: Part I. The essential mechanisms. *Cement and Concrete Research*, 35(12), 2333–2339.

doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.04.002

-Belie, N. De, Monteny, J., & Taerwe, L. (2002). Apparatus for accelerated degradation testing of concrete specimens, 35(August), 427–433.

دقیق‌تر شکل مواد در ساختارهای بلوری/آمورف می‌توان از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده می‌شود.

۸- سیاست‌گذاری

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی طبق ابلاغ گزنت با شماره ۳۵۶۷ مورخ ۱۴۰۱/۰۳/۰۷ و گزنت با شماره ۴۹۳۵ مورخ ۱۴۰۲/۰۳/۰۶ انجام گردیده است.

۹- مراجع

-Adresi, M., Pakhirehzan, F., (2023). Evaluating the performance of Self-Sensing concrete sensors under temperature and moisture variations- a review. *Construction and Building Materials*, 404 (2023) 132923.

doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.13

-Adresi, M., Sabagh, B., & Sharifi, S. (2023). A review study on the novel methods in pavement damage detection based on piezo-resistance capability in self-sensing concrete. *Road*, 31(115), 115–128.

doi.org/10.22034/road.2022.360617.2087

-Adresi, M., & Rashti mohammad, N. (2023). Methods for Improving Concrete Resistance against Sulfate Attacks - A Review Study. *Road*, 31(116), 261–272.

doi.org/10.22034/road.2023.352650.2071

-Adresi, M., Yamani, A., Karimaei Tabarestani, M. & Rooholamini H. (2023). A comprehensive review on pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 407, 1 December 2023, 133308.

doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133308

-Adresi, M., Hassani, A., Javadian, S., & Tulliani, J.-M. (2016). Determining the Surfactant Consistent with Concrete in order to Achieve the Maximum Possible Dispersion of Multiwalled Carbon Nanotubes in Keeping the Plain Concrete Properties. *Journal of Nanotechnology*, 2016.

doi.org/10.1155/2016/2864028

-Adresi, M., Hassani, A., Tulliani, J.-M., Lacidogna, G., & Antonaci, P. (2017). A study of the main factors affecting the performance of self-sensing concrete. *Advances in Cement Research*, 29(5).

doi.org/10.1680/jadcr.15.00147

- Böttcher, M. E., Leis, A., Koraimann, G., ... Dietzel, M. (2015). Microbiologically induced concrete corrosion: A case study from a combined sewer network. *Cement and Concrete Research*, 77, 16–25.
doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.06.011
- Gruyaert, E., Heede, P. Van Den, Maes, M., & Belie, N. De. (2012). Cement and Concrete Research Investigation of the influence of blast-furnace slag on the resistance of concrete against organic acid or sulphate attack by means of accelerated degradation tests. *Cement and Concrete Research*, 42(1), 173–185.
doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.09.009
- Irassar, E. F., Bonavetti, V. L., & González, M. (2003). Microstructural study of sulfate attack on ordinary and limestone Portland cements at ambient temperature. *Cement and Concrete Research*, 33(1), 31–41.
doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00914-6
- Ledesma, E. F., Lozano-Lunar, A., Ayuso, J., Galvín, A. P., Fernández, J. M., & Jiménez, J. R. (2018). The role of pH on leaching of heavy metals and chlorides from electric arc furnace dust in cement-based mortars. *Construction and Building Materials*, 183, 365–375.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.175
- Li, G., & Zhang, L. W. (2019). Microstructure and phase transformation of graphene-cement composites under high temperature. *Composites Part B: Engineering*, 166, 86–94.
doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.127
- Liu, P., Chen, Y., Yu, Z., Chen, L., & Zheng, Y. (2020). Research on Sulfate Attack Mechanism of Cement Concrete Based on Chemical Thermodynamics. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 6916039.
doi.org/10.1155/2020/6916039
- Mahmoodian, M., & Alani, A. M. (2017). Effect of Temperature and Acidity of Sulfuric Acid on Concrete Properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(10), 04017154.
doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002002
- Mardani, M., Lavassani, S. H. H., Adresi, M., & Rashidi, A. (2022). Piezoresistivity and mechanical properties of self-sensing CNT cementitious nanocomposites: Optimizing the effects of CNT dispersion and surfactants. *Construction and Building Materials*, 349(2022).
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128127
- Bérodier, E. M. J., Muller, A. C. A., & Scrivener, K. L. (2020). Effect of sulfate on C-S-H at early age. *Cement and Concrete Research*, 138, 106248.
doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106248
- Breit, W. (2004). *Acid resistance of concrete*.
- Chen, B., Qiao, G., Hou, D., Wang, M., & Li, Z. (2020). Cement-based material modified by in-situ polymerization: From experiments to molecular dynamics investigation. *Composites Part B: Engineering*, 194, 108036.
doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108036
- Cristelo, N., Tavares, P., Lucas, E., Miranda, T., & Oliveira, D. (2016). Quantitative and qualitative assessment of the amorphous phase of a Class F fly ash dissolved during alkali activation reactions – Effect of mechanical activation, solution concentration and temperature. *Composites Part B: Engineering*, 103, 1–14.
doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.08.001
- Di, B. S., Villar, K., & Belie, N. De. (n.d.). Severe Sulfuric Acid Attack on Self-Compacting Concrete with Granulometrically Optimized.
- Ding, Q., Yang, J., Hou, D., & Zhang, G. (2018). Insight on the mechanism of sulfate attacking on the cement paste with granulated blast furnace slag: An experimental and molecular dynamics study. *Construction and Building Materials*, 169, 601–611.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.148
- Durning, T. A., & Hicks, M. C. (1991). Using microsilica to increase concrete's resistance to aggressive chemicals. *Concrete International*, 13, 42–48.
- Fattuhi, N. I., & Hughes, B. P. (1988). Ordinary Portland Cement Mixes With Selected Admixtures Subjected to Sulfuric Acid Attack. *Materials*, 85, 512–518.
- Girardi, F., Vaona, W., & Di Maggio, R. (2010). Resistance of different types of concretes to cyclic sulfuric acid and sodium sulfate attack. *Cement and Concrete Composites*, 32(8), 595–602.
doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.002
- Gong, K., & White, C. E. (2018). Nanoscale Chemical Degradation Mechanisms of Sulfate Attack in Alkali-activated Slag. *The Journal of Physical Chemistry C*, 122(11), 5992–6004.
doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b11270
- Grenng, C., Mittermayr, F., Baldermann, A.,

- Torres, A. L. T., Souza, L. M. S. de, Silva, M. I. P. da, & de Andrade Silva, F. (2019). Concrete degradation mechanisms by sulfuric acid attack. *Magazine of Concrete Research*, 71(7), 349–361.
doi.org/10.1680/jmacr.18.00194
- Vipulanandan, C., & Liu, J. (2002). Glass-fiber mat-reinforced epoxy coating for concrete in sulfuric acid environment. *Cement and Concrete Research*, 32(2), 205–210.
doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00660-3
- Wang, Y., Cao, Y., Cui, L., Si, Z., & Wang, H. (2020). Effect of external sulfate attack on the mechanical behavior of cemented paste backfill. *Construction and Building Materials*, 263, 120968.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120968
- Yang, Y., Zhan, B., Wang, J., Zhang, Y., & Duan, W. (2020). Damage evolution of cement mortar with high volume slag exposed to sulfate attack. *Construction and Building Materials*, 247, 118626.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118626
- Zhang, G., Wu, C., Hou, D., Yang, J., Sun, D., & Zhang, X. (2021). Effect of environmental pH values on phase composition and microstructure of Portland cement paste under sulfate attack. *Composites Part B: Engineering*, 216(March), 108862.
doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108862
- Zhang, L., De Schryver, P., De Gussemé, B., De Muynck, W., Boon, N., & Verstraete, W. (2008). Chemical and biological technologies for hydrogen sulfide emission control in sewer systems: A review. *Water Research*, 42(1), 1–12.
doi.org/10.1016/j.watres.2007.07.013
- Zhang, M., & Jivkov, A. P. (2016). Micromechanical modelling of deformation and fracture of hydrating cement paste using X-ray computed tomography characterisation. *Composites Part B: Engineering*, 88, 64–72.
doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.11.007
- Zherebyateva, T. V., Lebedeva, E. V., & Karavako, G. I. (1991). Microbiological corrosion of concrete structures of hydraulic facilities. *Geomicrobiology Journal*, 9(2–3), 119–127.
doi.org/10.1080/01490459109385993
- Metcalf, & Eddy. (2013). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. McGraw-Hill.
- Monteny, J., De Belie, N., Vincke, E., Verstraete, W., & Taerwe, L. (2001). Chemical and microbiological tests to simulate sulfuric acid corrosion of polymer-modified concrete. *Cement and Concrete Research*, 31(9), 1359–1365.
doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00565-8
- O’Connell, M., McNally, C., & Richardson, M. G. (2010). Biochemical attack on concrete in wastewater applications: A state of the art review. *Cement and Concrete Composites*, 32(7), 479–485.
doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.05.001
- Pang, X., Cuello Jimenez, W., & Singh, J. (2020). Measuring and modeling cement hydration kinetics at variable temperature conditions. *Construction and Building Materials*, 262, 120788.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120788
- Raju, P. S. N., & Dayaratnam, P. (1984). Durability of concrete exposed to dilute sulphuric acid. *Building and Environment*, 19(2), 75–79.
doi.org/10.1016/0360-1323(84)90032-5
- Rooholamini, H., Sedghi, R., Ghoobadipour, B., & Adresi, M. (2019). Effect of electric arc furnace steel slag on the mechanical and fracture properties of roller-compacted concrete. *Construction and Building Materials*, 211, 88–98.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.223
- Rossen, J. E., & Scrivener, K. L. (2017). Optimization of SEM-EDS to determine the C–A–S–H composition in matured cement paste samples. *Materials Characterization*, 123, 294–306.
doi.org/10.1016/j.matchar.2016.11.041
- Sharpe, W. F., Alexander, G. J., & Bailey, J. V. (2011). *Fifth edition Инвестмууу*.
- Torres, A. L. T., De Souza, L. M. S., Da Silva, M. I. P., & De Andrade Silva, F. (2019). Concrete degradation mechanisms by sulfuric acid attack. *Magazine of Concrete Research*, 71(7), 349–361.
doi.org/10.1680/jmacr.18.00194

A Review of Laboratory Test and Interpretation Methods Regarding the Investigation of Concrete Behavior under Sulfate and Acid Attacks

*Mostafa Adresi, Assistant Professor, Civil Engineering Department,
Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran.*

*Hamed Moradi, M.Sc., Grad., Civil Engineering Department,
Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran.*

Email: m.adresi@sru.ac.ir

Received: June 2023- Accepted: November 2023

ABSTRACT

In this study, an examination has been conducted on the factors of Sulfuric acid and sulfates that influence the process of concrete corrosion. Given that numerous concrete structures are subject to this form of corrosion, the most prevalent four simulated acidic and corrosive environment procedures, namely Immersion, Constant Sulfate, Constant pH, and Accelerated TAP Methods, have been reviewed. Ultimately, the techniques of X-ray diffraction, nuclear magnetic resonance, phenolphthalein solution, and scanning electron microscope have been delineated for the physical, mechanical, and microstructural analysis of the tested samples. In all of the aforementioned procedures, the utilization of an acidic or sulfate solution is unavoidable. Regulating the pH level of the solution and comparing it to the permissible range of the test standards enhances the reliability of the test results. Consequently, through the comparison of the aforementioned simulations of the acidic environment, it is apparent that the immersion test is less costly than the other tests, and this method necessitates simpler equipment for its execution.

Keywords: Acid Attacks, Sulfate Attacks, Microstructure, Laboratory Methods