

Utilization of Concrete Microstructural Investigation Techniques to Assess the Durability of Power Transmission Line Foundations in Golestan Province, Iran

Sina Asadollahi¹, Mehdi Dehestani^{2*}

1- Postdoctoral Fellow, Structural and Earthquake Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

2- Professor of Civil Engineering, Structural and Earthquake Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

ABSTRACT

The significance of concrete durability assessment becomes evident when the lack of understanding of its long-term behavior in civil engineering projects can lead to extensive structural failures, increased maintenance costs, and a reduction in the overall service life of infrastructure. In this context, the evaluation of durability conditions in transmission line foundations—key components of power distribution networks—is of paramount importance, particularly in harsh environmental conditions. This study focuses on the assessment of the concrete durability in existing transmission line foundations in Golestan Province, Iran. A comprehensive approach was adopted that combined field investigations with detailed microstructural analyses. The methodologies employed included visual inspection, carbonation depth measurement, X-ray fluorescence (XRF) spectroscopy, X-ray diffraction (XRD) analysis, and scanning electron microscopy coupled with energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM/EDX). The results indicated the presence of three distinct microstructural zones in the deteriorated concrete. Zone 1 was characterized by gypsum and calcite phases; Zone 2 contained silica gel, alumina gel, and sulfate salts; and Zone 3 consisted of hydration products and ettringite. Furthermore, the co-existence of destructive mechanisms—including calcium ion leaching, carbonation, and sulfate attack—was identified as the main contributor to the degradation of the concrete. These findings reveal the widespread durability deficiencies of the concrete used in the foundations of the transmission lines under investigation.

ARTICLE INFO

Receive Date: 11 May 2025

Revise Date: 15 September 2025

Accept Date: 11 November 2025

Keywords:

Transmission Lines
Foundation
Concrete Microstructure
X-ray fluorescence (XRF)
spectroscopy
X-ray diffraction (XRD)
analysis
(SEM/EDX) Technique

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.517125.3699

*Corresponding author: Mehdi Dehestani
Email address: dehestani@nit.ac.ir

استفاده از روش های مطالعه ریزساختار بتن جهت ارزیابی دوام فونداسیون خطوط انتقال نیرو در استان گلستان

سینا اسدالهی شاه بابلی^۱ و مهدی دهستانی^{۲*}

۱- پژوهش گر پسا دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

چکیده

اهمیت بررسی دوام بتن زمانی آشکار می گردد که عدم شناخت رفتار بلندمدت این ماده در پروژه های عمرانی می تواند منجر به خرابی های گسترده سازه ای، افزایش هزینه های نگهداری و کاهش عمر بهره برداری شود. یکی از اجزای مهم زیرساختی که بررسی دوام آن از اهمیت ویژه ای برخوردار است، فونداسیون خطوط انتقال نیروی برق می باشد که به عنوان شریان حیاتی در تأمین انرژی عمل می کنند. در این راستا، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی شرایط دوامی فونداسیون های خطوط انتقال نیرو در استان گلستان، اقدام به انجام مطالعات میدانی و تحلیل های ریزساختاری کرده است. بررسی های میدانی شامل بازرسی بصری و تعیین عمق کرناتنه شدن و آزمایش های آزمایشگاهی شامل آنالیزهای پیشرفته مانند طیف نگاری فلورسانس پرتوی ایکس (XRF)، پراش پرتوی ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی همراه با طیفسنجی پراکندگی انرژی پرتوی ایکس (SEM/EDX) بوده است. نتایج حاکی از آن است که بتن آسیب دیده دارای سه ناحیه متمایز ریزساختاری است: ناحیه اول شامل فازهای گچ و کلسیت، ناحیه دوم حاوی ژل های سیلیسی و آلومینایی و نمک های سولفاتی، و ناحیه سوم شامل محصولات هیدراسیون و اترینگایت می باشد. همچنین، وقوع همزمان پدیده هایی نظیر آبستگي یون کلسیم، کرناتنه شدن و حمله سولفاتی به عنوان عوامل اصلی تخریب این سازه ها شناسایی شده اند. این نتایج ضعف دوامی گسترده بتن مورد استفاده در فونداسیون خطوط انتقال مورد بررسی را نشان می دهد.

کلمات کلیدی: خطوط انتقال نیرو، فونداسیون، ریزساختار بتن، آنالیز (XRF)، آنالیز (XRD)، تکنیک (SEM/EDX)

doi:	سابقه مقاله:				شناسه دیجیتال:
	دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	
10.22065/jsce.2025.517125.3699	۱۴۰۴/۰۲/۲۱	۱۴۰۴/۰۶/۲۴	۱۴۰۴/۰۸/۲۰	۱۴۰۴/۰۸/۲۰	۱۴۰۵/۰۳/۳۱
10.22065/jsce.2025.517125.3699	مهدی دهستانی dehestani@nit.ac.ir				
*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:					

۱- مقدمه

نگهداری از بتن در شرایط محیطی مهاجم، یکی ازغدغه‌های اصلی در بسیاری از پروژه‌های عمرانی می‌باشد. عدم توجه به این موضوع می‌تواند سبب وقوع خرابی‌های گسترده و کاهش شدید عمر بهره‌برداری سازه‌های بتنی گردد. خرابی بتن یک پدیده پیچیده است که در آن عوامل مهاجم فیزیکی و شیمیایی می‌تواند به‌طور همزمان بر بتن تأثیرگذار باشد. اهمیت این موضوع به اندازه‌ای است که طی دهه‌های گذشته پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه بررسی علل خرابی سازه‌های بتنی نظیر سدها [۱-۳]، تأسیسات فاضلاب و کانال‌های آب [۴-۸]، تونل‌ها [۹-۱۳]، فونداسیون و اعضای سازه‌ای [۱۴-۲۲]، سازه‌های دریایی [۲۳] و غیره انجام یافته است که در ادامه به اختصار شرح می‌گردد.

سایان و گریمستاد [۱] تعدادی مغزه بتنی از ساختمان نیروگاه برق آبی سد در استرالیا تهیه نمودند. آن‌ها با استفاده از تکنیک (SEM/EDX) حضور ژل سیلیسی در میان سنگدانه‌های بتن را مشاهده کردند. نتیجه مطالعه آن‌ها وقوع واکنش قلیایی - سیلیسی با درجه متوسط را نشان داد. فرناندس و همکاران [۲] بتن قلوه‌کن شده در گالری سدی در پرتغال را با استفاده از روش نیمه تحلیلی آنالیز طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتوی ایکس مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها توانستند ترکیب ژل سیلیسی حاصل از واکنش قلیایی - سنگدانه را شامل عنصرهای سیلیسیم، سدیم و پتاسیم را تعیین کنند. فرناندس و همکاران [۳] ارزیابی‌های سنگ‌نگاری، آنالیز عنصری و آزمون‌های مکانیکی را بر نمونه‌های مغزه بتنی از بدنه سد را انجام دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد با وجود کانی‌های سیلیسی به‌صورت میکروکریستال، علت اصلی وقوع واکنش‌های انبساطی در بتن حمله سولفاتی بوده است. گرنگ و همکاران [۴] خوردگی بتن در منهل‌های فاضلاب را با استفاده از طیف وسیعی از انواع روش‌های آنالیز شیمیایی مورد بررسی قرار دادند. عدم وجود تهویه در منهل سبب افزایش فعالیت باکتری‌های بی‌هوازی و در نتیجه آن تولید اسید سولفوریک با pH بین ۰/۷ تا ۳/۱ گردیده است. با توجه به استفاده از سیمان عاری از آلومینات تری کلسیم، واکنش‌های مخرب سبب تجزیه سنگدانه‌های غیرسیلیسی و تولید گچ شده بود. کیو و همکاران [۵] ریزساختار بتن در معرض فاضلاب حاصل از معدن کاری را مورد بررسی قرار دادند. آنالیزهای شیمیایی نشان داد که فاضلاب حاصل از معدن کاری دارای انواع مختلفی از یون‌های مهاجم سولفات، کلرید، کلسیم، منیزیم و سدیم می‌باشد که واکنش مخرب آن‌ها سبب تخریب خمیر سیمان و افزایش نفوذپذیری بتن شده است. در ایران نیز بهراملو [۶] و عنبرسوز و همکاران [۷] به ترتیب اثر یون‌های مهاجم موجود در آب را بر کانال‌های بتنی انتقال آب در دشت همدان و سد و شبکه آبیاری و شمشگیر گلستان مورد ارزیابی قرار دادند. کیم و لی [۸] بتن آسیب‌دیده در سازه‌های تصفیه‌خانه را با استفاده از آنالیزهای (XRD) و (SEM/EDX) مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند عامل اصلی تخریب وجود اسید سولفوریک می‌باشد که بر اساس شدت غلظت آن میزان خوردگی بر بخش‌های مختلف سازه متفاوت بوده است.

ما و همکاران [۹] خرابی تونلی در چین را با استفاده از طیف‌شناسی رامان^۲ و آنالیز عنصری (EDX) مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که بتن آسیب‌دیده شامل کلسیت، گچ و تمازیت می‌باشد. لانگ و همکاران [۱۰] تونل راه‌آهن آسیب‌دیده با عمر بهره‌برداری ۴۰ سال را مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها توصیه کردند که مهمترین راه برای افزایش عمر تونل‌ها ضد آب کردن آن‌ها در مواجهه با منابع آب زیرزمینی می‌باشد. ما و همکاران [۱۱] خوردگی بتن در تونل راه‌آهن را با استفاده از آنالیز (SEM/EDX) مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها گزارش دادند که ورود آب حاوی سولفات به بخش مجاور خاک و تبخیر آن از سطح مجاور هوا در تونل آسیب ناشی از حمله سولفاتی را تشدید کرده بود. لیو و همکاران [۱۲] بتن سازه تونل را در یکی از خطوط راه‌آهن چین با استفاده از آنالیزهای تعیین غلظت یون‌های مهاجم، تعیین عمق کربناته شدن و تصویر برداری میکروسکوپی الکترونی روبشی مورد بررسی قرار دادند. نتایج گزارش آن‌ها نشان داد که واکنش‌های مخرب گسترده‌ای شامل تبلور نمک سولفات سدیم، کربناته شدن، حمله سولفاتی به‌طور همزمان به وقوع پیوست که آثار آن به ترتیب شامل پوسته‌شدن سطح بتن، تشکیل کربنات کلسیم و اترینگایت بوده است.

لی و همکاران [۱۳] دلایل خرابی تونل با طول عمر ۲۰ سال را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مشاهده نمودند که گرچه غلظت یون سولفات در منبع آب زیرزمینی کم می‌باشد، اما تخریب قابل ملاحظه‌ای در بتن جداره تونل رخ داده است. با مطالعه ریزساختار بتن آن‌ها دریافتند که نفوذ جریان آب به درون قطعات بتنی پیش‌ساخته، سبب کاهش شدید نسبت کلسیم به سیلیسیم در محصولات هیدراسیون

² Raman Spectroscopy

شده است. در ادامه، با افزایش نفوذپذیری بتن، ورود یون‌های منیزیم سبب وقوع خرابی گسترده گردیده است. خرابی دیوار ساختمان تاریخی از جنس سنگ مرمریت توسط سرکار و همکاران [۱۴] مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که ورود دی‌اکسید گوگرد موجود در هوا به درون بندهای سیمانی میان سنگ‌ها سبب تولید سولفات کلسیم گردید و در نتیجه تبلور مکرر این نمک در طول سال، بند سیمانی دیوار تخریب گردید. بارتولومی [۱۵] با مطالعه خرابی فونداسیون‌های شمعی در سرار جهان، یون‌های سولفات، کلرید و محیط اسیدی را به‌عنوان عامل اصلی وقوع خرابی معرفی کرد. دل‌مونه و روسی [۱۶] گزارش دادند که آلودگی‌های سولفاتی موجود در مه بیش از باران است، به‌طوری می‌تواند منجر به تولید شوره‌زدگی گچ بر نمای ساختمان‌ها گردد.

دتوایر و همکاران [۱۷] وضعیت دوامی سنگ‌فرش و کانال‌های بتنی جمع‌آوری آب‌سطحی را در شهرکی با خاک حاوی سولفات ۲/۲ درصد مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با استفاده از مشاهدات میکروسکوپی با نور مرئی و تابش الکترون دریافتند با توجه به سن ۸ ساله سازه‌ها، حمله سولفاتی در آن‌ها رخ نداده است. فونداسیون منازل مسکونی در جنوب کالیفرنیا توسط سهو و همکاران [۱۸] با استفاده از تکنیک (SEM/EDX) مورد بررسی قرار دادند. نتایج مشاهدات آن‌ها وقوع همه سولفاتی و تشکیل هم‌زمان اترینگایت و تمازیت را تأیید کرد. یوشیدا و همکاران [۱۹] میزان آسیب‌دیدگی فونداسیون منازل مسکونی در خاک حاوی سیلفات سدیم با غلظت ۰/۴ درصد را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها گزارش کردند که وقوع هم‌زمان حمله سولفاتی و تبلور نمک سولفاتی سبب تخریب بتن شده است. شرر و همکاران [۲۰] واکنش‌های شیمیایی در بتن مورد استفاده در دیواره چاه نفت را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که عمده واکنش‌های مخرب بتن شامل دولومیت‌زدایی از سنگدانه‌ها و تشکیل فاز بروسیت می‌باشد.

لیمن و لوزر [۲۱] پوشش بتنی داخل چاه در خاک حاوی سولفات را مورد بررسی قرار دادند. در بخش‌هایی از دیواره که بتن در آن کیفیت کمی داشت پوسته‌شدگی شدید مشاهده شد. همچنین، در اثر نفوذ منابع آب زیر زمینی به درون پوشش بتنی، تراوش کلسیم و حمله سولفاتی رخ داده بود. پیاستا [۲۲] دوام دال‌ها و ستون‌های بتنی پارکینگ ماشین را از نظر دوامی مورد ارزیابی قرار داد. آن‌ها حضور دی‌اکسید کربن را به‌عنوان عامل مهاجم و تنها محصول واکنش مخرب را کربنات کلسیم اعلام کردند. راگاب و همکاران [۲۳] بتن آسیب‌دیده در سازه موج‌شکن در ناحیه پاشش قطرات آب دریا را مورد بررسی قرار دادند. با استفاده از آنالیزهای شیمیایی آن‌ها دریافتند که وجود سولفات منیزیم موجود در آب دریا سبب تجزیه محصولات هیدراسیون و تشکیل هیدرات سیلیکات منیزیم شده است.

۱-۱- اهمیت انجام تحقیق

با مطالعه ادبیات پیشین می‌توان دریافت که بررسی ریزساختار بتن یکی از روش‌های مناسب برای ارزیابی سلامت این مصالح در بسیاری از سازه‌های بتنی در سراسر جهان می‌باشد. همچنین، لازم به ذکر است که مطالعه ریزساختار بتن در سازه‌های زیربنایی ایران هنوز به موضوع پژوهشی متداولی تبدیل نشده است. از این‌رو، پژوهش حاضر سلامت بتن در یکی از شریان‌های اساسی کشور یعنی خطوط انتقال نیروی برق در استان گلستان را بر اساس مطالعه ریزساختار مورد ارزیابی قرار داده است. پس از بیان ادبیات موضوع، در بخش دوم به مشخصات اقلیمی و جغرافیایی منطقه و معرفی روش‌های انجام نمونه‌برداری و آنالیز فونداسیون خطوط انتقال مورد نظر پرداخته می‌شود. در قسمت سوم نتایج ارزیابی بصری، تعیین عمق کربناته شدن، آنالیز طیف‌نگاری فلورسانس پرتوی ایکس (XRF)، آنالیز طیف‌نگاری پراش پرتوی ایکس (XRD) و آنالیز طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتوی ایکس همراه با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM/EDX) ارائه می‌شود. در بخش چهارم، نتایج آنالیز و مکانیزم‌های احتمالی خرابی بتن فونداسیون مورد بحث قرار می‌گیرد. در نهایت بخش پنجم به مهم‌ترین نتایج حاصل از پژوهش حاضر می‌پردازد.

۲- توصیف سایت محل تحقیق و روش‌شناسی

۲-۱- مشخصات کلی سازه و شرایط محیطی

۲-۱-۱- مشخصات جغرافیایی

می‌یابد و اختلاف شدیدی بین دمای شب و روز و دمای سردترین و گرم‌ترین ماه‌های سال به وجود می‌آید که مشخصه اصلی آن، تابستان‌های گرم و خشک طولانی و زمستان‌های نسبتاً سرد و بارانی است. به علت پیشروی توده هوای سرد سیری، تعداد روزهای یخبندان آن نیز بیشتر است، ولی ریزش برف به ندرت اتفاق می‌افتد. بر اساس آمار ایستگاه آق‌قلا، بیشترین بارندگی بین ماه‌های آذر و بهمن و کم‌ترین آن در ماه‌های خرداد، تیر و مرداد می‌باشد. اطلاعات هواشناسی منطقه مورد مطالعه در جدول‌های (۱) تا (۴) ارائه شده است.

جدول (۱): متوسط بارندگی طی ۵ سال (۱۳۸۹-۱۳۹۴).

ایستگاه	ارتفاع ایستگاه (متر)	متوسط باران ۵ ساله (میلیمتر)	حداکثر میزان بارندگی (میلیمتر)
اینچه‌برون	۷	۱۱/۴	۴۶

جدول (۲): میزان شاخص دمایی ($^{\circ}\text{C}$) طی ۵ سال (۱۳۸۹-۱۳۹۴).

ایستگاه	متوسط دما	حداکثر مطلق	متوسط حداکثر سالانه	حداقل مطلق	متوسط حداقل سالانه
اینچه‌برون	۱۹/۴	۴۵/۸	۳۳/۷	-۱۱/۲	۷/۵

جدول (۳): متوسط تعداد روزهای یخبندان طی ۵ سال (۱۳۸۹-۱۳۹۴).

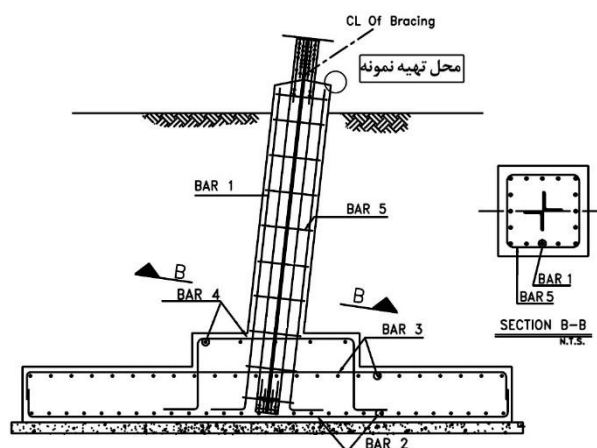
ایستگاه	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر
اینچه‌برون	۱۴/۲	۱۱/۶	۱/۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳/۸

جدول (۴): مشخصه فراسنج اقلیمی متوسط بیشینه باد (m/s) طی ۵ سال (۱۳۸۹-۱۳۹۴).

ایستگاه	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر
اینچه‌برون	۱۳/۴	۷/۸	۱۴/۸	۲۲/۵	۱۸/۳	۱۵/۷	۱۳/۲	۱۰/۱	۹/۹	۱۶/۷	۸/۸	۱۳/۵

۲-۱-۲- مشخصات سازه

مطابق با شکل (۱) فونداسیون خطوط انتقال نیروی ۲۳۰ کیلو ولت فجر گنبد- مینودشت، ۲۳۰ کیلو ولت فجر گنبد- ترکمنستان و ۶۳ کیلو ولت فجر گنبد- داشلی‌برون مورد بررسی قرار گرفت. فونداسیون‌های مورد استفاده از نوع بالشتک بتنی ساده و ستون روی آن تشکیل شده است. تصویر کلی این نوع فونداسیون در شکل (۳) نشان داده شده است. ابعاد و عمق این فونداسیون براساس سطح لازم برای تحمل نیروهای فشاری، کششی و جانبی در طول هر خط برای تیپ‌های مختلف دکل متفاوت می‌باشد.



شکل (۳): نمای کلی فونداسیون دکل‌های مورد مطالعه.

۲-۲- آزمون‌های صحرائی و آزمایشگاهی

۲-۲-۱- ارزیابی بصری و نمونه برداری

پس از آن که خطوط انتقال نیروی برق مشخص شد، بازدید میدانی و ارزیابی بصری مطابق با گزارش انجمن بتن آمریکا ACI 201.1R [۲۶] صورت پذیرفت. اولین گام در پایش سلامت هر سازه، ارزیابی بصری می‌باشد. این روش سریع و مقرون بصره با مشاهده انواع آثار خرابی در بتن نظیر ترک خوردگی، آب‌شستگی، پوسته شدن، زنگ‌زدگی، سایش، نشست و غیره اطلاعات کیفی اولیه مفیدی در مورد وضعیت سازه و علل احتمالی خرابی آن ارائه می‌دهد. با توجه به وسعت منطقه مورد بازدید، هدف استفاده از این آیین‌نامه دسته‌بندی انواع خرابی‌های قابل مشاهده در فونداسیون خطوط انتقال نیرو می‌باشد. با دسته‌بندی انواع خرابی بر اساس شکل ظاهری آن‌ها، نمونه‌برداری از برج‌های منتخب مطابق با شکل (۱) انجام گرفت. این نمونه‌ها از بخش فوقانی فونداسیون روی سطح زمین مطابق با ناحیه مشخص شده در شکل (۳) گرفته شد. با توجه به حساسیت در بهره‌برداری این سازه‌ها و این که در عملیات مغزه‌گیری خطر برخورد الماس مته با نبشی ریشه وجود داشت، تکه‌هایی از بتن با استفاده از چکش تا حدکثر عمق ۸ سانتی‌متر جدا گردید. همچنین، نمونه‌برداری از خاک در مجاورت فونداسیون جهت بررسی غلظت یون‌های مهاجم انجام گردید.

۲-۲-۲- تعیین عمق کربناته شدن

کربناته شدن بتن واکنشی بین گازهای اسیدی هوا، رطوبت و خمیر قلیایی سیمان است. این پدیده درجه قلیائیت خمیر سیمان را کاهش می‌دهد و میلگردهای مدفون در بتن را مستعد خوردگی می‌کند. آزمایش تعیین عمق کربناته شدن به صورت صحرائی مطابق با استاندارد BS EN 14630 [۲۷] انجام شد که در آن بعد از ایجاد شیار مناسب بر فونداسیون، محلول شناساگر فنول فتالین بر سطح تازه بتن پاشیده شد. سپس، عمق بتن کربناته برابر با فاصله اولین ناحیه با رنگ قرمز - بنفش تا سطح بتن اندازه‌گیری شد که روش انجام آزمایش در فونداسیون‌های مورد بررسی در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۴): فرآیند آزمون تعیین عمق کربناته شدن بتن.

۲-۲-۳- آنالیز طیف‌نگاری فلورسانس پرتوی ایکس (XRF)

جهت بررسی ترکیبات شیمیایی بتن آسیب‌دیده از آنالیز طیف‌نگاری فلورسانس پرتوی ایکس (XRF) استفاده شد. این روش توانایی انجام آنالیز عنصری به صورت کیفی و نیمه‌کمی نمونه‌های معدنی را دارا است. با تابش پرتوی ایکس و انتقال الکترونی میان لایه‌های مختلف اتم، طیف مشخصه پرتوی ایکس منتشر می‌شود. طول موج‌های طیف نشر شده مبنای تجزیه کیفی عناصر و شدت پرتوها، متناسب با فراوانی آن‌ها در نمونه است [۲۸]. جهت تهیه نمونه‌های مناسب، ابتدا تا جای ممکن خمیر سیمان از سنگدانه‌ها جدا شد. عمق خمیر سیمان دریافت شده صفر تا حداکثر ۸ سانتی‌متر از سطح بتن بوده است. سپس، عملیات خردایش و همگن‌سازی نمونه خمیر صورت گرفت و در نهایت، نمونه‌های مورد بررسی از پودر خمیر سیمان رد شده از الک ۴۰۰ تهیه گردید. در این مطالعه جهت ایجاد پرتوی ایکس اولیه از دستگاه (XRF) ساخت شرکت فیلیپس با ولتاژ ۳۰ kV و شدت جریان ۱۰۰ mA استفاده گردید.

۲-۲-۴- آنالیز طیف‌نگاری پراش پرتوی ایکس (XRD)

جهت تعیین مشخصات کریستال‌های موجود در بتن آسیب‌دیده از آنالیز طیف‌نگاری پراش پرتوی ایکس (XRD) استفاده شد. در این آنالیز با تابش پرتوی ایکس به نمونه پودری در زوایای 5° تا 80° و گام 0.02° درجه بر ثانیه و تحلیل الگوی بازتابش آن با استفاده از نرم‌افزار XPert HighScore، برخی از ویژگی‌های کریستالی شامل: نوع فاز، اندازه و شکل دانه کریستال، فاصله بین لایه‌های کریستال، جهت‌گیری و موقعیت بلور، درصد کریستالیت نمونه، ترکیب اتم‌های کریستال و ساختار آن مورد بررسی قرار گرفت. روش آماده‌سازی نمونه مشابه با موارد پیش‌تر بیان شده برای آنالیز (XRF) در بخش (۲-۲-۳) می‌باشد. آنالیز (XRD) در این مطالعه با دستگاه ساخت شرکت فیلیپس با ولتاژ 40 kV و شدت جریان 40 mA انجام شد.

۵-۲-۲- آنالیز طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتوی ایکس همراه با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM/EDX)

برای ریخت‌شناسی و تشخیص فازهای تشکیل‌دهنده بتن از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) ساخت شرکت تسکان همراه با میکروآنالیز پراکندگی انرژی پرتوی ایکس (EDX) ساخت شرکت موکستک استفاده شد. تکنیک (SEM/EDX) یک روش تحلیلی برای آنالیز عنصری و بررسی خصوصیات شیمیایی نمونه می‌باشد. نمونه‌ها از بتن آسیب‌دیده با ابعاد $5 \times 5 \times 2\text{ mm}$ تهیه و سطح آن پیش از قرارگیری در محفظه خلاء با کربن پوشانده شد. تصاویر میکروسکوپی با ولتاژ شتاب دهنده 15 kV و زاویه برخاست 35° مبتنی بر الکترون برگشتی ثبت شدند. آشکارساز پرتوی ایکس مورد استفاده از نوع سیلیکونی رانشی با پنجره پلیمری فوق‌نازک بوده است.

۳- نتایج

۱-۳- نتایج ارزیابی بصری

خرابی‌های مشاهده شده در فونداسیون‌های خطوط انتقال نیرو بر اساس گزارش انجمن بتن آمریکا [ACI 201.1R] [۶] به شرح زیر بیان می‌گردد.

(الف) ترک خوردگی: مطابق با شکل (۵-الف)، ترک‌های منقطع و پراکنده با عرض حداکثر $1/5\text{ mm}$ به‌خصوص در گوشه‌های فونداسیون قابل مشاهده می‌باشد. در این حالت شدت ترک خوردگی را می‌توان متوسط ارزیابی کرد.

(ب) پوسته‌شدگی: مطابق با شکل (۵-ب)، پوسته‌شدگی گسترده در تمام سطوح فونداسیون قابل مشاهده می‌باشد، به طوری که ملات سطحی تا عمق حداکثر 25 mm از میان رفته است و درشت‌دانه‌های متصل به آن نمایان شده‌اند. در این حالت شدت پوسته‌شدگی را می‌توان زیاد ارزیابی کرد.

(ج) شوره‌زدگی: مطابق با شکل (۵-ج)، رسوب سفید رنگ روی سطح بتن در اثر ته‌نشینی نمک نامحلول و در مجاورت ذرات درشت‌دانه نمایان می‌باشد. همچنین، شکل هندسی این ذرات نشان می‌دهد که از مصالح رودخانه‌ای برای احداث فونداسیون‌ها استفاده شده است.

(د) رنگ‌پریدگی: مطابق با شکل (۵-د)، تغییر رنگ ظاهری بتن از خاکستری به قهوه‌ای روشن واضح می‌باشد. تغییر رنگ اولیه بتن می‌تواند منشاء فیزیکی یا شیمیایی داشته باشد.



(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل (۵): نشانه‌های ظاهری خرابی بتن در هنگام بازرسی بصری، (الف) ترک خوردگی، (ب) پوسته‌شدگی، (ج) شوره‌زدگی و (د) رنگ‌پریدگی.

۲-۳- نتایج آزمون تعیین عمق کربناته شدن

آزمون تعیین عمق کربناته شدن به صورت صحرائی برای فونداسیون‌های مختلف انجام شد که نتایج آن در جدول (۵) ارائه شده است. عمق کربناته شدن بین ۲۰ mm تا ۷۰ mm اندازه‌گیری شده است که مقادیر آن با توجه به گذشت زمان بین ۱۰ تا ۲۰ سال بسیار زیاد می‌باشد. نتایج این آزمایش می‌تواند به صورت تقریبی عمق خرابی بتن را نشان دهد. لازم به ذکر است که فونداسیون شماره ۵۵ از خط انتقال فجر گنبد- ترکمنستان و شماره ۲۷ از فجر گنبد- داشلی‌برون دارای پوشش قیری فرسوده بودند. علاوه بر این، عمق کربناته شدن برای دوره بهره‌برداری ۵۰ ساله بین ۳۳ mm تا بیش از ۱۴۱ mm تخمین زده شد.

جدول (۵): عمق کربناته شدن.

ردیف	نام خط	شماره فونداسیون	سال احداث	عمق کربناته شدن (mm)	نرخ کربناته شدن (mm/year ^{0.5})	عمق کربناته شدن در ۵۰ سال (mm)
۱	فجر گنبد- مینودشت	۲۳	۱۳۹۰	۷۰	>۲۰	>۱۴۱
۲	فجر گنبد- ترکمنستان	۲۳	۱۳۷۸	۷۰	۱۶/۵	۱۱۷
۳		۵۵		۲۰	۴/۷	۳۳
۴	فجر گنبد- داشلی‌برون	۲۷	۱۳۸۹	۲۰	۷/۶	۵۴

جهت تخمین عمق کربناته شدن بتن در طول عمر مفید فونداسیون، از رابطه معروف شماره (۱) استفاده شده است [۲۹].

$$x = a\sqrt{t} \quad (1)$$

در این رابطه x عمق نفوذ کربناته شده بتن، t زمان و a نرخ کربناته شدن است که به شرایط محیطی و مشخصات بتن وابسته است. برای محاسبه عمق کربناته شدن طی ۵۰ سال، ابتدا با توجه به سال احداث فونداسیون و عمق کربناته شدن فعلی پارامتر a محاسبه گردید و سپس با استفاده از رابطه (۱) عمق کربناته شدن طی عمر بهره‌برداری تخمین زده شد.

۳-۳- نتایج آنالیز شیمیایی خاک و طیف‌نگاری فلورسانس پرتوی ایکس (XRF)

نتایج آنالیز شیمیایی خاک مجاور فونداسیون‌ها در جدول (۶) ارائه شده است. پارامترهای مورد بررسی مقدار pH، یون سولفات و کلرید مواردی هستند که تعیین کننده میزان خوردگی محیط می‌باشند. می‌توان مشاهده کرد که مقدار pH در طول مسیر هر سه خط تقریباً ثابت و بین ۷ تا ۸ می‌باشد که در محدوده خنثی با مقدار کمی خاصیت قلیایی طبقه‌بندی می‌شود و آسیبی به بتن وارد نخواهد کرد.

جدول (۶): نتایج آنالیز شیمیایی خاک مجاور فونداسیون.

ردیف	نام خط	شماره فونداسیون	pH	SO ₄ ²⁻ (%)	Cl ⁻ (%)
۱	فجر گنبد- مینودشت	۲۳	۷/۹	۰/۰۱۸	۰/۰۹۲
۲	فجر گنبد- ترکمنستان	۲۳	۸/۲	۰/۰۳۶	۰/۱۷۵
۳		۵۵	۷/۶	۰/۱۵۴	۰/۹۱۰
۴	فجر گنبد- داشلی برون	۲۷	۶/۹	۰/۱۱۳	۰/۶۴۰

مقدار یون‌های سولفات و کلرید موجود در خاک به ترتیب در بازه ۰/۰۲ تا ۰/۱۵ و ۰/۰۹ تا ۰/۹۱ درصد قرار دارد، به طوری که حداکثر مقدار آن در فونداسیون‌های مجاور مراتع شور و حداقل آن در دشت میان گنبد کاووس و مینودشت رخ می‌دهد. با توجه به مقدار سولفات موجود در خاک و بر اساس آیین‌نامه ACI 318 [۳۰]، شرایط خوردگی فونداسیون خطوط انتقال در دسته‌های ناچیز (S0) و ملایم (S1) قرار می‌گیرد. لازم به توضیح است که آیین‌نامه بتن ایران [۲۹] نیز کران‌های یکسانی را جهت دسته‌بندی شرایط محیطی بر اساس غلظت یون سولفات پیشنهاد داده است. هنوز آیین‌نامه‌ای برای دسته‌بندی میزان خوردگی ناشی از یون کلرید موجود در خاک ارائه نشده است. با این وجود بر اساس نتایج پژوهش مصلح‌الدین و همکاران [۳۱] می‌توان شرایط محیطی را در دسته ناچیز تا ملایم در نظر گرفت.

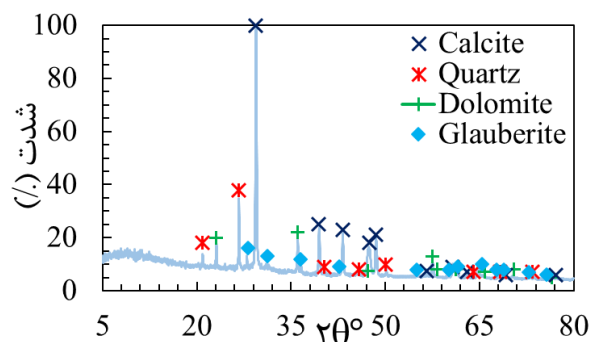
نتایج آنالیز (XRF) برای عنصرهای سیلیسیم، کلسیم، آلومینیوم، آهن، گوگرد، منیزیم، سدیم، منیزیم و پتاسیم بر حسب درصد اکسید برای پودر حاصل از بتن آسیب‌دیده در همه فونداسیون‌ها تقریباً مشابه بوده است. بنابراین در اینجا فقط نتایج یک فونداسیون از خط فجر گنبد- ترکمنستان در جدول (۷) ارائه شده است. پودرهای مورد بررسی از ناحیه‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب از بخش‌های بیرونی، میانی و درونی نمونه بتن آسیب‌دیده تهیه شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود عنصرهای سیلیسیم و کلسیم بیشترین و قلیایی‌های سیمان کمترین سهم جرمی را در نمونه‌های بتن دارند. همچنین، می‌توان مشاهده کرد که مقدار گوگرد موجود در بتن آسیب‌دیده چند برابر بیش از حد مجاز است.

جدول (۷): نتایج آنالیز (XRF).

ردیف	نام خط	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₂	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	اکسیدهای دیگر
۱	ناحیه (۱)	۲/۴۳	۸۳/۵۶	۰/۴۶	۴/۳۵	۴/۷۱	۱/۲۳	۱/۴۳	۰/۰۸	۱/۷۵
۲	ناحیه (۲)	۳۲/۹۷	۴۲/۷۶	۶/۲۹	۵/۳۴	۳/۳۴	۲/۵۵	۲/۹۹	۲/۰۲	۱/۷۴
۳	ناحیه (۳)	۲۹/۱۳	۵۳/۶۱	۴/۰۰	۵/۲۲	۱/۹۲	۲/۱۷	۱/۵۱	۰/۶۶	۱/۷۸

۳-۴- نتایج آنالیز طیف‌نگاری پراش پرتوی ایکس (XRD)

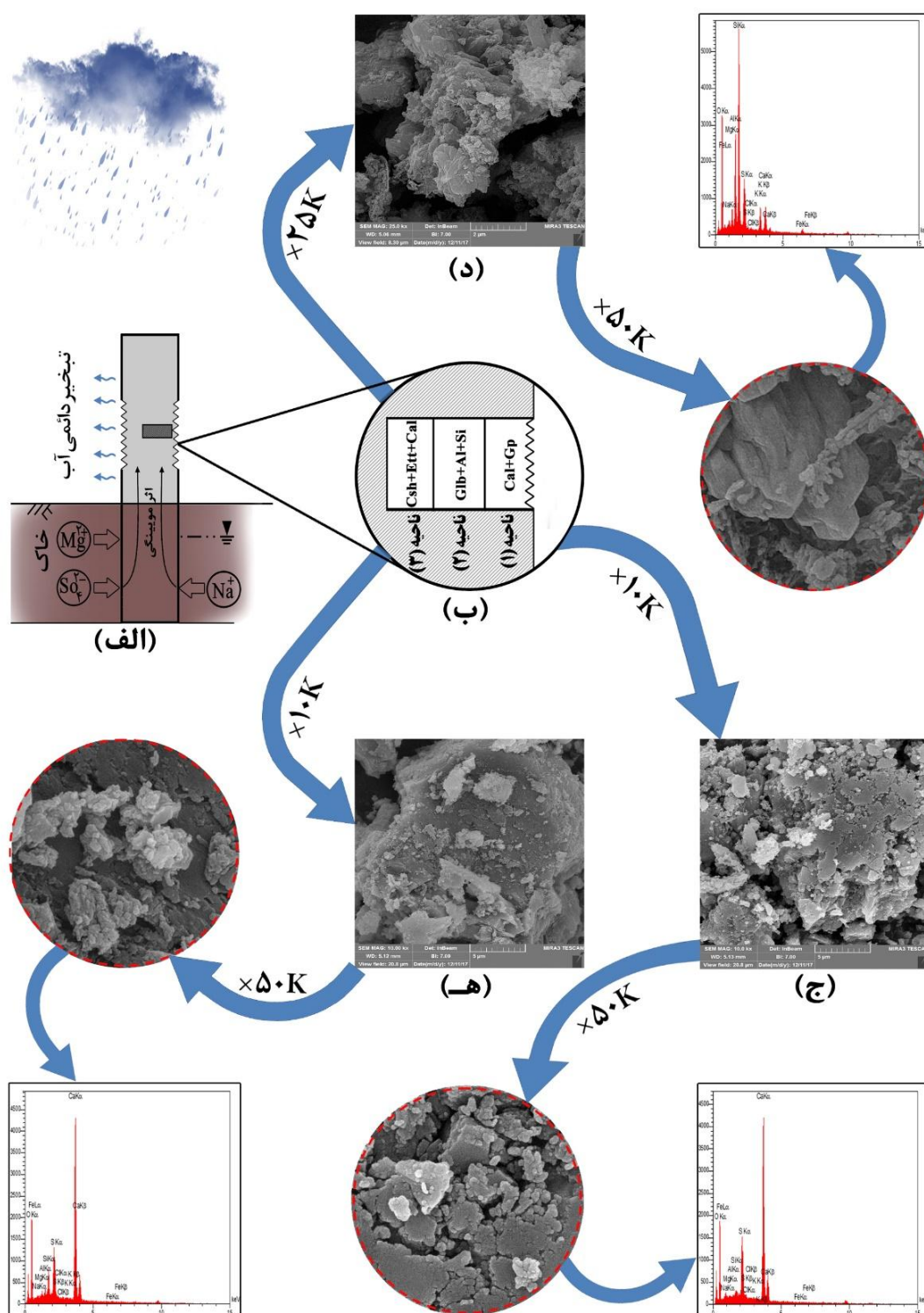
با توجه به این که فونداسیون در معرض شرایط جوی به صورت دائمی قرار داشت، در اثر واکنش‌های شیمیایی مخرب بسیاری از فازهای کریستالی به حالت آمورف تغییر فاز می‌دهند. به طوری که فازهای کریستالی مشاهده شده در نتایج آنالیز (XRD) در بخش‌های مختلف از بتن آسیب‌دیده تقریباً مشابه بوده است. بنابراین در اینجا برای جلوگیری از تکرار مطابق با شکل (۶) یکی از نتایج آنالیزهای (XRD) ارائه می‌گردد. قله‌های اصلی محصولات حاصل از واکنش‌های شیمیایی مخرب را می‌توان در بازه ۲۰° تا ۳۰° مشاهده کرد. محصولات واکنش شامل: کوارتز (۲۰/۸° و ۲۶/۶°)، دولومیت (۳۶/۰° و ۲۳/۱°)، گلابریت (۳۱/۳° و ۲۸/۱°) و کلسیت (۴/۳۹° و ۲۹/۴°) می‌باشد. با وجود فروپاشی خمیر سیمان در نمونه‌های برداشته شده، مسئله جالب توجه عدم وجود یا وجود مقدار بسیار ناچیز از اترینگایت و گچ می‌باشد. به طوری که شناسایی آن‌ها حتی در قله‌های اصلی‌شان یعنی ۹/۱° و ۲۰/۷° به ترتیب برای اترینگایت و گچ میسر نیست. همچنین، قله‌های مربوط به محصولات اصلی واکنش هیدراسیون یعنی کریستال‌های پرتلندایت و هیلبراندایت (C-S-H) نیز قابل مشاهده نمی‌باشد.



شکل (۶): نتایج آنالیز نتایج آنالیز طیف‌نگاری پراش پرتوی ایکس (XRD).

۵-۳- آنالیز طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتوی ایکس همراه با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM/EDX)

جهت مطالعه واکنش‌های مخرب صورت گرفته و بررسی محصولات هیدراسیون در نمونه‌ها، تصویربرداری (SEM) و آنالیز عنصری (EDX) مطابق با شکل (۷) انجام شد. لازم به ذکر است که مطابق با شکل (۷-الف) با توجه به حساسیت سازه، تنها نموداری از قسمت‌های تخریب شده و فروپاشیده انجام شد. بر این اساس مطابق با شکل (۷-ب)، نمونه آسیب‌دیده را می‌توان به سه ناحیه تقسیم کرد که در ادامه جزئیات آن شرح می‌گردد. با توجه به این که فونداسیون مورد بررسی به‌طور دائم در معرض شرایط جوی بوده است، یافتن فازهای به اندازه کافی بزرگ جهت انجام آنالیز (EDX) در حالت نقطه‌ای و بدون تأثیرپذیری از پرتوی ایکس حاصل از فازهای مجاور وجود نداشت. بنابراین، آنالیز عنصری در حالت صفحه‌ای در هر یک از تصاویر (SEM) با بزرگنمایی ۵۰۰۰۰ برابر انجام گرفت. نتیجه مطالعات (SEM/EDX) ناحیه (۱)، بیرونی‌ترین قسمت بتن آسیب‌دیده، حاوی خمیر سیمان بسیار سست و همراه با شوره‌زدگی در شکل (۷-ج) ارائه شده است. در این ناحیه، قله‌های با شدت زیاد ناشی از گوگرد (S) و کلسیم (Ca) به ترتیب با درصد جرمی ۱۰/۴۱ و ۳۹/۴۳ و قله‌های با شدت بسیار کم ناشی از سدیم (Na)، منیزیم (Mg)، آلومینیوم (Al) و پتاسیم (K) قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به این که نسبت اتمی کلسیم به گوگرد (Ca:S) در گچ (Gp) برابر با ۱:۱ می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که ناحیه (۱)، حاوی بیش از یک نوع فاز می‌باشد. با توجه به عدم وجود سیلیسیم (Si) و وجود مقدار بسیار ناچیز از عنصرهای دیگر، می‌توان دریافت که ناحیه (۱) شامل فازهای گچ (Gp) و کلسیت (Cal) می‌باشد.



شکل (۷): مکانیزم تخریب و محصولات واکنش‌های مخرب در بتن آسیب دیده، (الف) شرایط محیطی فونداسیون، (ب) تفکیک نواحی بتن آسیب دیده، (ج) تصویر الکترونی و نتایج میکروآنالیز عنصری در ناحیه (۱)، (د) تصویر الکترونی و نتایج میکروآنالیز عنصری در ناحیه (۲) و (ه) تصویر الکترونی و نتایج میکروآنالیز عنصری در ناحیه (۳).

وجود دو فاز متفاوت در تصویرهای (SEM) در شکل (۷-ج) نیز قابل مشاهده می‌باشد، به طوری که با توجه به تفاوت میانگین اتمی دو فاز، کلسیت به رنگ خاکستری تیره و گچ به رنگ خاکستری روشن بنظر می‌رسد. نتیجه مطالعات (SEM/EDX) ناحیه (۲)، قسمت

میانی بتن آسیب دیده، در شکل (۷-د) ارائه شده است. در این ناحیه، قله‌های با شدت زیاد ناشی از آلومینیوم (Al)، سیلیسیم (Si) و گوگرد (S) به ترتیب با درصد جرمی ۱۴/۷۴، ۲۸/۳۸ و ۸/۱۱ و قله‌های با شدت کم ناشی از سدیم (Na)، منیزیم (Mg)، کلسیم (Ca) و پتاسیم (K) به ترتیب با درصد جرمی ۲/۴۶، ۳/۷۲، ۵/۲۵ و ۴/۴۷ قابل مشاهده می‌باشد. ویژگی‌های جالب توجه در این ناحیه درصد جرمی بسیار بالای آلومینیوم و سیلیسیم، نسبت جرمی بسیار کم کلسیم به سیلیسیم (Ca/Si) برابر با ۰/۱۸ و وجود حفرات و ترک‌های سراسری می‌باشد. با توجه به این که نسبت جرمی (Ca/Si) در هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) تقریباً ۱/۵ می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که در ناحیه (۲) اثری از محصولات اصلی هیدراسیون وجود ندارد. اما، قله‌های با شدت زیاد در آنالیز عنصری بیان‌گر وجود ژل سیلیسی (SiO₂.nH₂O) و ژل آلومینایی (Al₂O₃.nH₂O) در این ناحیه می‌باشد. ترکیبات حاوی این ژل‌ها معمولاً به صورت ذرات کروی شکل و کلونیدی پراکنده و بخش‌های خاکستری بسیار تیره در سراسر شکل (۷-د) قابل مشاهده می‌باشد. همچنین، در تصویر (SEM) می‌توان کریستال‌های منشوری با زوایای نامشخص را مشاهده کرد. با توجه به نتایج آنالیز عنصری می‌توان دریافت که این کریستال‌ها، نمک‌های سولفاتی نظیر گلاوبریت (Na₂Ca(SO₄)₂) و بلودیت (Na₂Mg(SO₄)₂) می‌باشد. نتیجه مطالعات (SEM/EDX) ناحیه (۳)، درونی‌ترین قسمت بتن آسیب دیده، در شکل (۷-ه) ارائه شده است. در این ناحیه، قله‌های با شدت زیاد ناشی از سیلیسیم (Si)، گوگرد (S) و کلسیم (Ca) به ترتیب با درصد جرمی ۵/۹۹، ۸/۳۶ و ۳۷/۳۱ و قله‌های با شدت کم ناشی از آلومینیوم (Al)، سدیم (Na) و منیزیم (Mg) به ترتیب با درصد جرمی ۲/۷۴، ۲/۰۱ و ۲/۳۸ قابل مشاهده می‌باشد. وجود قله‌های سیلیسیم، کلسیم، گوگرد و آلومینیوم بیان‌گر وجود فازهای هیدرات سیلیکات کلسیم و اترینگایت می‌باشد. البته با توجه به درصد جرمی کم آلومینیوم، می‌توان انتظار داشت که مقدار اترینگایت و فاز AFt کم می‌باشد. مسئله جالب توجه قله بسیار شدید، کلسیم در نتایج آنالیز (EDX) می‌باشد. در واقع اگر تمام آلومینیوم و گوگرد صرف تولید اترینگایت و تمام سیلیسیم صرف تولید هیدرات سیلیکات کلسیم گردد، مقدار کلسیم مصرفی برای تشکیل این دو فاز تقریباً ۲۲٪ جرمی نمونه مورد بررسی خواهد بود. در صورتی که درصد جرمی کلسیم در ناحیه (۳) برابر با ۳۷٪ می‌باشد. بنابراین فاز دیگری نظیر کلسیت در این ناحیه شکل گرفته است.

۴- بحث در نتایج

مطابق با روند معمول در بررسی سلامت سازه‌های بتنی، در این پژوهش فونداسیون‌های خطوط انتقال نیرو بر اساس گزارش انجمن بتن آمریکا [۶] ACI 201.1R مورد بازرسی بصری و ارزیابی کیفی قرار گرفت. مطابق با این آیین‌نامه، خرابی‌های مشاهده شده به چهار دسته شامل: ترک خوردگی، پوسته‌شدگی، شوره‌زدگی و رنگ‌پریدگی تقسیم‌بندی می‌شود. یکی از ویژگی‌های معمول در بتن آسیب دیده تحت نفوذ یون‌های سولفات، آغاز خرابی از لبه‌ها و گوشه‌ها می‌باشد. همچنین، خرابی تحت دو عامل انبساط و ترک‌های سراسری یا کاهش شدید چسبندگی خمیر سیمان رخ می‌دهد [۳۲]. بر اساس مشاهده ترک در گوشه فونداسیون در شکل (۵-الف) می‌توان انتظار نفوذ یون سولفات به عنوان یک عامل مخرب را داشت. پوسته‌شدگی همراه با شوره‌زدگی وقوع خرابی فیزیکی توسط حمله نمک‌ها و یا خرابی شیمیایی ناشی از تراوش و آبستنگی را نشان می‌دهد. نفوذ نمک به درون خمیر سیمان توسط لوله‌های مویینه و تبلور آن، می‌تواند فشاری برابر با ۱۰ MPa تا ۲۰ MPa را ایجاد کند که بسیار بیش‌تر از مقاومت کششی خمیر سیمان است و می‌تواند منجر به تخریب آن گردد [۳۳]. با توجه به سلامت سنگدانه‌ها و عمق کم خرابی در خمیر سیمان در شکل (۵-ب) و وجود شوره‌زدگی بر سطح آن در شکل (۵-ج) امکان وقوع حمله فیزیکی نمک‌ها وجود دارد. همچنین، با آنالیز شیمیایی شوره‌زدگی در مراحل بعدی می‌توان احتمال وقوع تراوش و آبستنگی در بتن را ارزیابی کرد. رنگ‌پریدگی بتن می‌تواند به دلیل تغییر pH و یا ریز ساختار خمیر سیمان باشد. به طوری که رنگ قهوه‌ای روشن بتن در شکل (۵-د) بیان‌گر کاهش pH به نزدیک ۷ می‌باشد [۳۴ و ۳۵].

در گام دوم جهت بررسی میزان کربناته شدن و احتمال خوردگی میلگرد، آزمایش تعیین عمق کربناته شدن به صورت صحرائی مطابق با استاندارد BS EN 14630 [۲۷] انجام شد. سپس، نرخ کربناته شدن و عمق آن پس از ۵۰ سال محاسبه و در جدول (۵) ارائه گردید. مطابق با انتظار فونداسیون‌های دارای روکش قیری، عمق کربناته شدن کمتری را تجربه کردند. البته حساسیت روکش قیری به رطوبت و پرتوی فرا بنفش، تجدید دوره‌ای آن را بر فونداسیون الزامی می‌کند. در این شرایط محیطی استفاده از روکش‌های اپوکسی، سیلان

و اکریلیک جهت ماندگاری بیشتر توصیه می‌گردد [۳۶]. با فرض عمر بهره‌برداری ۵۰ ساله برای این سازه بر اساس آیین‌نامه EN 1992-1-1 [۳۷]، مسئله جالب توجه عمق کربناته شدن بیش از ۷۰ cm در طول عمر فونداسیون شماره ۲۳ خطوط فجر گنبد- ترکمنستان و فجر گنبد- مینودشت می‌باشد. این در حالی است که پوشش در نظر گرفته شده برای میلگردها ۷/۵ cm بوده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که فونداسیون‌های مورد بررسی در زمان کمتر از عمر بهره‌برداری خود دچار ضعف می‌گردند. پدیده کربناته شدن با کاهش ماهیت قلیایی خمیر سیمان در حضور رطوبت و اکسیژن کافی می‌تواند سبب تسریع خوردگی میلگردهای فونداسیون گردد. مطابق با آیین‌نامه EN 206-1 [۳۸]، از نظر شرایط وقوع کربناته شدن سازه مورد بررسی در گروه (XC4) طبقه‌بندی می‌گردد. همچنین این آیین‌نامه بیان می‌دارد، بتن مورد استفاده در این گروه باید دارای حداکثر نسبت آب به سیمان ۰/۵، حداقل عیار سیمان 300 kg/m^3 و حداقل مقاومت فشاری ۲۵ MPa باشد. با توجه به سختی در دسترسی و انتقال مصالح به محل اجرای فونداسیون‌ها، این احتمال وجود دارد که بتن در جای مورد استفاده مشخصات بیان شده جهت جلوگیری از وقوع شدید کربناته شدن را نداشته است.

در گام سوم، اکسیدهای تشکیل دهنده خمیر سیمان و آنالیز شیمیایی خاک مجاور فونداسیون به‌عنوان بخشی از شرایط محیطی مهاجم مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن به ترتیب در جدول‌های (۶) و (۷) ارائه شده است. تغییر اکسیدهای تشکیل دهنده در هر عمق از بتن آسیب‌دیده آشکار می‌باشد. مسئله جالب توجه در نتایج آنالیز (XRF)، وجود درصد بالای تری‌اکسید گوگرد (SO_3) در نمونه‌ها می‌باشد. گرچه در ترکیب سیمان از مقداری گچ جهت کنترل زمان گیرش استفاده می‌شود، اما مقدار آن مطابق با استاندارد ASTM C150 [۳۹] به مقدار حداکثر ۳٪ جرمی در سیمان نوع II محدود می‌گردد. به صورت محافظه‌کارانه با فرض این که خمیر سیمان مورد بررسی تنها حاوی آب و سیمان باشد، مقدار (SO_2) به کمتر از ۲٪ محدود می‌گردد. همچنین، درصد جرمی سولفید از ناحیه بیرونی به سمت لایه درونی کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که یون‌های سولفات اضافی در نتایج آنالیز (XRF) از منبع خارجی یعنی خاک اطراف فونداسیون به آن وارد شده است. این موضوع احتمال وقوع حمله سولفاتی و انجام واکنش‌های مخرب در خمیر سیمان را تقویت می‌کند که در آنالیزهای آتی به آن پرداخته شده است. در ادامه، می‌توان مشاهده کرد که درصد جرمی اکسید کلسیم از لایه درونی به لایه بیرونی افزایش می‌یابد، به طوری که بخش زیادی از ناحیه (۱) حاوی ترکیبات دارای کلسیم می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که بتن مورد بررسی به‌طور گسترده تحت پدیده مخرب آبشستگی و تراوش قرار گرفته است. در این پدیده با کاهش pH بتن فونداسیون به کمتر از ۱۲/۵ در اثر تماس آن با نزولات جوی، ابتدا فاز پرتلندایت و در ادامه فاز (C-S-H) تجزیه می‌شود که در نتیجه آن یون‌های Ca^{2+} به بیرون از بتن تراوش می‌کند. این پدیده نفوذ پذیری بتن را نیز به شدت افزایش می‌دهد، به طوری که ورود یون‌های مهاجم دیگر به درون بتن تسهیل می‌شود [۴۰].

در این پژوهش از آنالیز طیف‌نگاری پراش پرتوی ایکس (XRD) جهت تعیین فازهای کریستالی موجود در بتن آسیب‌دیده استفاده شد که نتایج آن در شکل (۶) ارائه شده است. به‌طور مجدد تأکید می‌گردد که به علت حساسیت خطوط انتقال نیرو، تنها امکان برداشت بتن آسیب‌دیده و تا حد زیادی فروپاشیده ممکن بود. با توجه به عدم کسب اجازه لازم جهت تهیه مغزه بتنی، تفکیک دقیق ناحیه‌های ۱، ۲ و ۳ وجود نداشت. همچنین، به دلیل قرارگیری فونداسیون در معرض شرایط جوی به‌صورت دائمی و وقوع پدیده آبشستگی و تراوش، تأیید وجود احتمالی بسیاری از فازهای کریستالی تنها توسط آنالیز (XRD)، به‌سختی امکان‌پذیر می‌باشد. فازهای اصلی کریستالی تشکیل دهنده خمیر سیمان در ناحیه میانی بتن آسیب‌دیده شامل: کلسیت، کوارتز، دولومیت و گلاوبریت می‌باشد. کریستال‌های کوارتز و دولومیت به‌ترتیب ناشی از ریزدانه‌های سیلیسی و آهنی موجود در خمیر سیمان می‌باشد [۴۱]. گرچه برای حذف ذرات ریزدانه در پودر خمیر سیمان از الک ۴۰۰ استفاده شد، اما وجود مقدار کمی از آن‌ها توسط آنالیز (XRD) قابل تأیید می‌باشد. وجود مقدار زیادی از کریستال‌های کلسیت نشان دهنده وقوع گسترده کربناته شدن و آبشستگی و تراوش کلسیم می‌باشد. مکانیزم وقوع این پدیده در بتن فونداسیون خطوط انتقال مورد بررسی به این صورت است که ابتدا دی‌اکسید کربن موجود در هوا در مجاورت رطوبت و بارندگی به اسید کربنیک تبدیل و درون حفره‌های بتن نفوذ می‌کند. سپس، یون‌های (CO_3^{2-}) با پرتلندایت موجود در خمیر سیمان واکنش می‌دهد و کلسیت تولید می‌گردد [۴۲]. با شدت یافتن کربناته شدن، پرتلندایت بیشتری مصرف می‌گردد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که عدم وجود قله‌ی مربوط به پرتلندایت در شکل (۶)، گسترش شدید کربناته شدن را نشان می‌دهد. با تداوم مصرف پرتلندایت، pH محلول منفذی به کمتر از ۱۱/۵ کاهش می‌یابد. در این حالت کلسیم‌زدایی از (C-S-H) آغاز و ژل سیلیسی تولید می‌شود [۴۳ و ۴۴]. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که عدم حضور

کریستال‌های هیلبراندایت، به دلیل کلسیم زدایی از آن و تشکیل فازهای آمورف سیلیسی می‌باشد. مسئله جالب توجه وجود گلاوبریت در ترکیب خمیر سیمان می‌باشد. این موضوع نشان دهنده ورود یون‌های سولفات به حفره‌های بتن و واکنش با محصولات هیدراسیون می‌باشد. رسوب گلاوبریت پیش‌تر در نمونه‌های بتنی در معرض حمله یون‌های سولفات و سیکل تر و خشک شدن گزارش شده است [۴۵]. این موضوع وقوع پدیده مخرب تبلور نمک را که پیش‌تر در بازرسی بصری (شکل ۵-ج)) مشاهده شد را نیز نشان می‌دهد.

در گام پنجم، ریزساختار خمیر سیمان با استفاده از تکنیک (SEM/EDX) مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن همراه با تصویر بصری از مکانیزم خرابی رخ داده در شکل (۷) نشان داده شده است. بخش وسیعی از خمیر سیمان مورد بررسی در بیرونی‌ترین ناحیه از بتن آسیب‌دیده را کلسیت (Cal) و گچ (Gp) تشکیل می‌دهد. مطابق با شکل (۷-ج)، با توجه به اختلاف ارتفاع زیاد میان قله‌های کلسیم (Ca) و گوگرد (S) می‌توان انتظار داشت که کلسیت نسبت به گچ بخش بیشتری از ناحیه (۱) را تشکیل می‌دهد. همچنین، تجمع کلسیت (Cal) در لایه بیرونی بتن آسیب دیده وقوع پدیده آبستگي و تراوش را نشان می‌دهد. در اثر این پدیده یون‌های کلسیم با تحرک پذیری بیشتر نسبت به یون‌های آلومینیوم و سیلیسیم به خارج از بتن تراوش می‌کند [۴۶].

بلافاصله پس از مشاهده لایه متراکم از کلسیت، در ناحیه (۲) می‌توان ژل سیلیسی ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)، ژل آلومینایی ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) و نمک سولفاتی گلاوبریت ($\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$) را در میان انبوهی از حفره‌ها و ترک‌ها مطابق با شکل (۷-د) مشاهده کرد. مسئله جالب توجه عدم وجود گچ و البته حضور گلاوبریت به‌عنوان تنها محصول حاصل از واکنش یون سولفات در این ناحیه می‌باشد. در واقع گچ به‌صورت محدود تنها در ناحیه (۱) تشکیل شده است و در ناحیه‌های میانی و درونی قابل مشاهده نیست. دلیل این موضوع غلظت کم یون سولفات می‌باشد. مطالعات پیشین [۴۷ و ۴۸] نشان داده است که حداقل غلظت یون سولفات در خاک جهت تشکیل گچ در بتن مجاور آن 1400 mg/l می‌باشد. با توجه به جدول (۶) می‌توان دریافت که غلظت یون مهاجم به‌ندرت از حداقل غلظت لازم تجاوز می‌کند. در ادامه، مطابق با آیین‌نامه ACI 318 [۲۹]، شرایط خوردگی فونداسیون در دسته‌های ناچیز (S0) و ملایم (S1) قرار دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش عمق بتن، غلظت یون سولفات کاهش بیشتری پیدا کند و گچ به‌عنوان محصول حمله سولفاتی تشکیل نگیرد. همچنین، فازهای AFm و AFt در هیچ کدام از ناحیه‌های (۱) و (۲) مشاهده نگردید که دلیل آن عدم پایداری این ترکیبات در pH کمتر از ۱۰/۶ می‌باشد [۴۹].

ناحیه (۳) به‌عنوان درونی‌ترین قسمت بتن آسیب‌دیده، مطابق با شکل (۷-ه) شامل اترینگایت، هیدرات سیلیکات کلسیم و کلسیت می‌باشد. وجود اترینگایت به مقدار قابل توجه نشان می‌دهد که حمله سولفاتی رخ داده است. در واقع اترینگایت از واکنش میان یون‌های سولفات مهاجم با برخی از محصولات هیدراسیون یعنی هیدرات آلومینات کلسیم (C-A-H) و هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) به وجود آمده است.

به‌صورت کلی برای ترمیم خرابی فونداسیون خطوط انتقال نیرو لازم است ابتدا یک بازرسی جامع و مستند از تمام نشانه‌های ترک خوردگی، پوسته‌شدگی، شوره‌زدگی و تغییر رنگ بتن انجام شود تا موقعیت و شدت آسیب‌ها به دقت تعیین گردد. در گام بعد، بتن آسیب‌دیده و پوسته‌شده تا رسیدن به لایه‌های سالم با استفاده از ابزار مناسب حذف می‌گردد. در صورت مشاهده آرماتورهای زنگ‌زده، باید ضمن پاکسازی کامل زنگ از پوشش مناسب برای آن‌ها استفاده نمود. سپس با استفاده از ملات‌های اصلاح شده پایه سیمان با مقاومت مکانیکی بالا اقدام به ترمیم سطوح می‌گردد. پس از عمل‌آوری بتن برای جلوگیری از نفوذ دی‌اکسید کربن و رطوبت، یک غشای دافع آب بر پایه سیلان اجراء می‌گردد.

۵- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر وضعیت دوامی بتن فونداسیون دکل‌های منتخب در خطوط انتقال نیروی ۲۳۰ کیلو ولت فجر گنبد- مینودشت، ۲۳۰ کیلو ولت فجر گنبد- ترکمنستان و ۶۳ کیلو ولت فجر گنبد- داشلی‌برون با استفاده از بازرسی بصری، آزمون صحرایی و مطالعه ریزساختار بتن با استفاده از آنالیزهای (XRF)، (XRD) و (SEM/EDX) مورد بررسی قرار گرفت. به‌کارگیری روش‌های آنالیز ریزساختار بتن

تکنیکی مناسب و قدرتمند جهت تعیین دقیق فرآیندهای مخرب در بتن می‌باشد. در ادامه، مهمترین نتایج حاصل از این پژوهش بیان می‌گردد.

۱- شایع‌ترین نشانه‌های بصری خرابی در بتن فونداسیون خطوط انتقال برق بررسی شده شامل: ترک خوردگی، پوسته‌شدگی، شوره‌زدگی و رنگ‌پریدگی می‌باشد.

۲- عمق کربناته شدن بتن در فونداسیون‌های دارای پوشش محافظ قیری کمتر از نصف مواردی است که در آن‌ها از هیچ پوشش محافظی استفاده نشده است. همچنین، برخی از فونداسیون‌ها از منظر خرابی ناشی از کربناته شدن عمر بهره‌برداری کمتر ۵۰ سال دارند.

۳- نتایج آنالیز طیف‌نگاری فلورسانس پرتوی ایکس (XRF) نشان داد که بتن آسیب‌دیده حاوی مقدار قابل توجهی یون سولفات با منشاء خاک مجاور فونداسیون می‌باشد، به طوری که با افزایش عمق بتن از غلظت آن کاسته می‌شود.

۴- نتایج آنالیز طیف‌نگاری پراش پرتوی ایکس (XRD) وقوع پدیده‌های مخرب آب‌سستگی و تراوش کلسیم به سطح خارجی بتن و تبلور نمک سولفاتی گلاوبریت را نشان داده است.

۵- نتایج آنالیز طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتوی ایکس همراه با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM/EDX) وجود سه ناحیه شامل فازهای متفاوت در بتن آسیب دیده را نشان داده است به طوری که ناحیه (۱) شامل: کلسیت و گچ، ناحیه (۲) شامل: ژل‌های آمورف سیلیسی و آلومینایی و ناحیه (۳) شامل: محصولات هیدراسیون و اترینگایت می‌باشد.

۶- دلایل اصلی تخریب بتن فونداسیون خطوط انتقال به ترتیب آب‌سستگی و تراوش، کربناته شدن و حمله سولفاتی می‌باشد. همچنین، اترینگایت در غیاب گچ به عنوان محصول حمله سولفاتی قابل مشاهده می‌باشد.

تشکر و قدردانی

این مقاله با استفاده از اعتبارات ویژه پژوهشی (Grant) دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل با شماره طرح ۱۰۹۶/م/پ انجام شده است. بخشی از اعتبار مالی این پژوهش نیز توسط شرکت سهامی برق منطقه ای مازندران و گلستان تأمین شده است. همچنین، از جناب آقای مهندس مهرداد بخشنده کارشناس محترم دفتر فنی بهره برداری بخش خطوط و سرکار خانم مهندس قره توفه مدیر دفتر تحقیقات و کنترل کیفیت تجهیزات تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع

- [1] Shayan, A., & Grimstad, J. (2006). Deterioration of concrete in a hydroelectric concrete gravity dam and its characterisation. *Cement and Concrete Research*, 36(2), 371-383.
- [2] Fernandes, I., Noronha, F., & Teles, M. (2007). Examination of the concrete from an old Portuguese dam: texture and composition of alkali-silica gel. *Materials Characterization*, 58(11-12), 1160-1170.
- [3] Fernandes, I., Silva, A. S., Gomes, J. P., de Castro, A. T., Noronha, F., & dos Anjos Ribeiro, M. (2013). Characterization of deleterious expansive reactions in Fagilde dam. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2, 299-312.
- [4] Grengg, C., Mittermayr, F., Baldermann, A., Böttcher, M. E., Leis, A., Koraimann, G., Grunert, P., & Dietzel, M. (2015). Microbiologically induced concrete corrosion: A case study from a combined sewer network. *Cement and Concrete Research*, 77, 16-25.
- [5] Qu, F., Zhao, H., Wu, K., Liu, Y., Zhao, X., & Li, W. (2023). Phase transformation and microstructure of in-situ concrete after 20-year exposure to a harsh mining environment: A case study. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02287.
- [6] Bahramloo, R. (2007). Investigation of concrete degradation causes in irrigation canal linings (Case Study: Hamedan-Bahar Plain). *Irrigation and Drainage Structural Engineering Research*, 8(3), 81-92.
- [7] Anbarsouz, M., Ebrahimi, K., & Amiri Talkedani, E. (2023). Study on the impact of water quality on dam structures and the Voshmgir irrigation network. *Water Management and Irrigation*, 13(2), 351-368.

- [8] Kim, S. S., & Lee, S. T. (2010). Microstructural observations on the deterioration of concrete structure for sewage water treatment. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 14, 753-758.
- [9] Ma, B., Gao, X., Byars, E. A., & Zhou, Q. (2006). Thaumassite formation in a tunnel of Bapanxia Dam in Western China. *Cement and Concrete Research*, 36(4), 716-722.
- [10] Long, G. C., Xie, Y. J., Deng, D. H., & Li, X. K. (2011). Deterioration of concrete in a railway tunnel suffering from sulfate attack. *Journal of Central South University*, 18(3), 881-888.
- [11] Ma, K. L., Long, G. C., & Xie, Y. J. (2012). Railway tunnel concrete lining damaged by formation of gypsum, thaumasite, and sulfate crystallization products in southwest China. *Journal of Central South University*, 19(8), 2340-2347.
- [12] Liu, Z., Zhang, F., Deng, D., Xie, Y., Long, G., & Tang, X. (2017). Physical sulfate attack on concrete lining—A field case analysis. *Case Studies in Construction Materials*, 6, 206-212.
- [13] Li, C., Wu, M., Chen, Q., & Jiang, Z. (2018). Chemical and mineralogical alterations of concrete subjected to chemical attacks in complex underground tunnel environments during 20–36 years. *Cement and Concrete Composites*, 86, 139-159.
- [14] Sarkar, S. L., Bhadra, A. K., & Mandal, P. K. (1994). Investigation of mortar and stone deterioration in the Victoria Memorial, Calcutta. *Materials and Structures*, 27, 548-556.
- [15] Bartholomew, R. F. (1980). The protection of concrete piles in aggressive ground conditions: An international appreciation. *Recent Developments in the Design and Construction of Piles*, 131-141
- [16] Del Monte, M., & Rossi, P. (1997). Fog and gypsum crystals on building materials. *Atmospheric Environment*, 31(11), 1637-1646.
- [17] Detwiler, R. J., Taylor, P. C., Powers, L. J., Corley, W. G., Delles, J. B., & Johnson, B. R. (2000). Assessment of concrete in sulfate soils. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 14(3), 89-96.
- [18] Sahu, S., Badger, S., & Thaulow, N. (2002). Evidence of thaumasite formation in Southern California concrete. *Cement and Concrete Composites*, 24(3-4), 379-384.
- [19] Yoshida, N., Matsunami, Y., Nagayama, M., & Sakai, E. (2010). Salt weathering in residential concrete foundations exposed to sulfate-bearing ground. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 8(2), 121-134.
- [20] Scherer, G. W., Kutchko, B., Thaulow, N., Duguid, A., & Mook, B. (2011). Characterization of cement from a well at Teapot Dome Oil Field: Implications for geological sequestration. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 5(1), 115-124.
- [21] Leemann, A., & Loser, R. (2011). Analysis of concrete in a vertical ventilation shaft exposed to sulfate-containing groundwater for 45 years. *Cement and Concrete Composites*, 33(1), 74-83.
- [22] Piasta, W. (2017). Analysis of carbonate and sulphate attack on concrete structures. *Engineering Failure Analysis*, 79, 606-614.
- [23] Ragab, A. M., Elgammal, M. A., Hodhod, O. A., & Ahmed, T. E. (2016). Evaluation of field concrete deterioration under real conditions of seawater attack. *Construction and Building Materials*, 119, 130-144.
- [24] Hoseini, S. A., Khatirnamani, J., & Akbarzadeh, M. (2015). Vegetation changes in semi-steppe rangelands of Golestan province (Case study: Maraveh Tapeh). *Iranian Natural Ecosystems*, 12(2), 685-697.
- [25] Mahmoudian, A., Akhrian, M., & Taher, M. N. (2021). Analysis of *Aeluropus littoralis* Distribution in Grazed and Protected Areas of Saline and Alkaline Rangelands in Golestan Province. *Iranian Natural Ecosystems*, 12(2), 1-15.
- [26] American Concrete Institute (ACI) Committee 201. (2008). Guide for conducting a visual inspection of concrete in service. *ACI 201.1 R-08*.
- [27] British Standard Institution. (2006). BS EN 14630: Products and systems for the protection and repair of concrete structure—Test Methods—Determination of carbonation depth in hardened concrete by the Phenolphthalein method.

- [28] Cruz-Hernandez, Y., Chrysochoou, M., & Wille, K. (2020). Wavelength dispersive X-ray fluorescence method to estimate the oxidation reaction progress of sulfide minerals in concrete. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 172, 105949.
- [30] American Concrete Institute (ACI) Committee 318. (2014). Building code requirements for structural concrete and commentary. *ACI 318 R-14*.
- [31] Maslehuddin, M., Al-Zahrani, M. M., Ibrahim, M., Al-Mehthel, M. H., & Al-Idi, S. H. (2007). Effect of chloride concentration in soil on reinforcement corrosion. *Construction and Building Materials*, 21(8), 1825-1832.
- [32] Neville, A. (2004). The confused world of sulfate attack on concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(8), 1275-1296.
- [33] Sakr, M. R., Bassuoni, M. T., Hooton, R. D., Drimalas, T., Haynes, H., & Folliard, K. J. (2020). Physical salt attack on concrete: Mechanisms, influential factors, and protection. *ACI Materials Journal*, 117(6), 253-268.
- [34] Lollini, F., & Bertolini, L. (2013). Factors that affect color loss of concrete paving blocks. *ACI Materials Journal*, 110(1), 45.
- [35] Zhou, C., Zhu, Z., Zhu, A., Zhou, L., Fan, Y., & Lang, L. (2019). Deterioration of mode II fracture toughness, compressive strength, and elastic modulus of concrete under the environment of acid rain and cyclic wetting-drying. *Construction and Building Materials*, 228, 116809.
- [36] Pan, X., Shi, Z., Shi, C., Ling, T. C., & Li, N. (2017). A review on surface treatment for concrete—Part 2: Performance. *Construction and Building Materials*, 133, 81-90.
- [37] European Committee for Standardization (CEN). (2004). EN 1992-1-1: Design of concrete structures—Part 1-1: General rules and rules for buildings.
- [38] European Standard EN 206-1. (2004). Concrete: Specification, performance, production, and conformity.
- [39] Standard AS. (2001). ASTM C150: Standard specification for Portland cement. *Annual Book of ASTM Standards*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- [40] Hu, J. (2020). Carbonisation and calcium leaching-induced deterioration of concrete in dams: Field inspection and microstructural investigation. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 24(12), 2046-2069.
- [41] Sakr, M. R., Abuzeid, M. A., & Bassuoni, M. T. (2022). Performance of repaired concrete piles partially embedded in sulfate-bearing soil. *Engineering Failure Analysis*, 138, 106365.
- [42] Štukovnik, P., Bosiljkov, V. B., & Marinšek, M. (2019). Detailed investigation of ACR in concrete with silica-free dolomite aggregate. *Construction and Building Materials*, 216, 325-336.
- [43] Jain, J., & Neithalath, N. (2009). Analysis of calcium leaching behavior of plain and modified cement pastes in pure water. *Cement and Concrete Composites*, 31(3), 176-185.
- [44] Moranville, M., Kamali, S., & Guillon, E. (2004). Physicochemical equilibria of cement-based materials in aggressive environments—experiment and modeling. *Cement and Concrete Research*, 34(9), 1569-1578.
- [45] Liu, P., Chen, Y., Wang, W., & Yu, Z. (2020). Effect of physical and chemical sulfate attack on performance degradation of concrete under different conditions. *Chemical Physics Letters*, 745, 137254.
- [46] Liu, X., Feng, P., Yu, X., & Huang, J. (2022). Decalcification of calcium silicate hydrate (CSH) under aggressive solution attack. *Construction and Building Materials*, 342, 127988.
- [47] Bellmann, F., Möser, B., & Stark, J. (2006). Influence of sulfate solution concentration on the formation of gypsum in sulfate resistance test specimen. *Cement and Concrete Research*, 36(2), 358-363.
- [48] Long, Z., Zhang, R., Wang, Q., Xie, C., Zhang, J., & Duan, Y. (2022). Mechanism analysis of strength evolution of concrete structure in saline soil area based on 15-year service. *Construction and Building Materials*, 332, 127281.
- [49] Gabrisova, A., Havlica, J., & Sahu, S. (1991). Stability of calcium sulphoaluminate hydrates in water solutions with various pH values. *Cement and Concrete Research*, 21(6), 1023-1027.