

بررسی میزان اهمیت یونهای محلول در آب در خوردگی قسمتهای بتنی برجهای خنک کننده با استفاده از تئوری سطح پاسخ

مجتبی واشقانی^۱، سیدعبادالله کشاورز^۲

۱- دانشجوی دکتری خط و سازه های ریلی، دانشکده مهندسی راه آهن دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- کارشناسی مهندسی عمران، مسئول پایش سلامت سازه های بتنی در شرکت فولاد خوزستان

m_vasheghani@rail.iust.ac.ir

چکیده

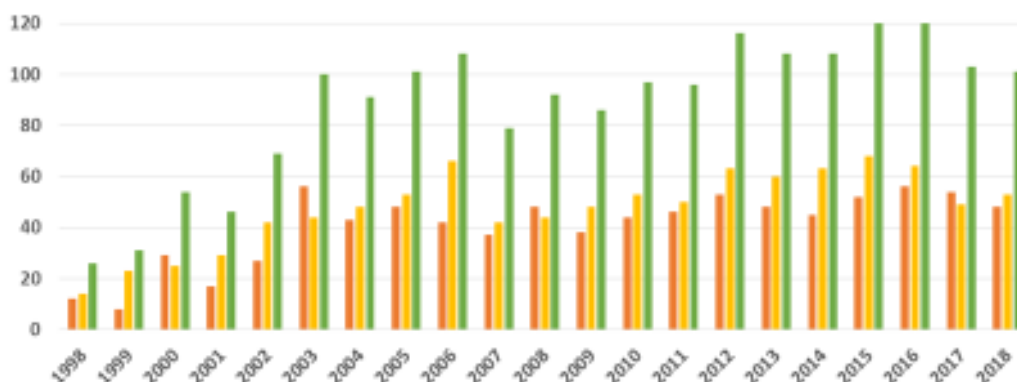
هر ساله بسیاری از سازه‌های بتنی به دلیل خوردگی ناشی از یونهای مهاجم دچار آسیب می‌شوند که این موضوع در سازه‌های موجود در صنایع مادر نمود بیشتری دارد. اهمیت محصولات و کاربری این صنایع، مسئله حفظ و نگهداری این سازه‌ها را چند برابر کرده است. در محیط‌های خورنده که ترکیبی از انواع یونهای مزاحم در تشدید آسیب تاثیر دارند، تعیین تاثیر هر یون در میزان آسیب و تعیین الگوی پیشگیری از آسیب، بسیار پراهیمت و ضروری است. در پاسخ به این ضرورت، در این پژوهش میزان تاثیر ۱۲ یون مهاجم محلول در آب مورد مصرف در خنک کردن سازه بتنی برج خنک کننده مجتمع صنایع فولاد اهواز استفاده می‌شد، اندازه‌گیری گردید. اندازه‌گیری‌های در بازه‌های زمانی متعددی صورت گرفت و حجم خرابی نظیر آنها نیز ثبت شد. نتایج اندازه‌گیری شده به عنوان یک نمونه آزمایشگاهی تلقی گردید. با استفاده از تئوری سطح پاسخ درصد اهمیت یونهای مشارکت کننده در توسعه خرابی تعیین گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که یون کلراید و سولفور مهمترین یونهای تاثیرگذار در پیشرفت خرابی‌های یک سازه بتنی بودند و یونهای بیکربنات و نیتريت کمترین مشارکت را در توسعه خرابی‌های ایجاد شده در سازه بتنی را داشتند.

کلمات کلیدی: خوردگی بتن، آنالیز سطح پاسخ، یون کلراید و یون سولفور

۱- مقدمه

وجود خوردگی در سازه‌های بتنی یکی از نگرانی‌های عمده در صنعت ساختمان است، بطوریکه این موضوع برای ساختمانها و تجهیزات واقع در صنایع مادر و حیاتی کشور که تولیدات استراتژیک دارند بسیار پراهیمت است. از جمله این صنایع، شرکت‌های بزرگ تولید کننده فولاد می‌باشند که بدلیل استفاده از منابع آبی محدود مجبور به استفاده از آب به صورت تجدید شده هستند. آب بازیافتی مرتبا در تماس با سازه بتنی است و سازه در معرض تر و خشک شدن با آب آغشته به انواع یونها می‌باشد. رسوخ یونها در قسمتهای بتنی سبب خوردگی بتن، کاهش مقاومت، خوردگی میلگرد و نهایتا از بین رفتن ظرفیت

باربری المان بنتنی خواهد شد. پایش، اندازه‌گیری و استفاده از روشهای کاهش خوردگی بالاخص در کارخانجات و صنایع بتنی مورد توجه بسیاری از پژوهشگران بوده است. شکل ۱ آمار تحقیقات مستند در پایگاه‌های علمی معتبر در دنیا در دو دهه اخیر در زمینه خوردگی بتن و میلگرد را نشان می‌دهد.



شکل ۱ - تحقیقات صورت گرفته در زمینه اثرات یونها در خوردگی بتن از سال ۲۰۰۰ به بعد [1]

بررسی خوردگی در برجهای خنک‌کننده اولین بار در یک گزارش فنی در کشور انگلستان صورت گرفت. در آن مطالعه، فاکتورهای زوال بتن به پارامترهای شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی طبقه‌بندی شدند [2] مصطفی‌پور و همکاران اثر یونهای سدیم سولفات بر روی حوضچه‌های بتنی آب و کانالها را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که مقاومت فشاری بتن اگر تماس یونها به صورت کوتاه مدت باشد تغییری نکرده و اگر تماس درازمدت باشد، تا ۲/۵ مگا پاسکال کاهش خواهد داشت [3]. پارک و همکاران، سرعت انتشار زوال بتن بر اثر انتشار یون کلراید در مخلوطهای بتنی را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که نسبت آب به سیمان و افزودنی‌های معدنی اضافه شده به بتن، مهمترین فاکتورها در توسعه خرابی‌های بتن هستند. [4] در تحقیقات ماریوتو و همکاران اثرات استفاده از کلسیم تا ۲۵٪ از وزن سیمان، سبب کاهش نفوذ یون کلراید به داخل بتن می‌گردد بطوریکه با افزایش مقاومت مشخصه بتن مقدار این نفوذ کاهش می‌یابد و خوردگی بتن کم می‌شود. [5].

در این پژوهش برای پایش اثرات وجود یونهای مختلف در میزان خوردگی سازه‌های بتنی و زوال میلگردهای موجود، سازه برج خنک‌کننده شرکت فولاد خوزستان به عنوان سازه هدف مورد بررسی قرار گرفت. این سازه به ظرفیت ۳۳ متر مکعب برای خنک کردن کوره‌های ذوب آهن توسط آب مورد استفاده قرار می‌گیرد. فرایندهای استفاده مجدد از آب سبب آغشته شدن آب به انواع یونها و تسریع خوردگی می‌گردد. این تحقیق در پی شناسایی میزان اهمیت یونهای مختلف در فرایند خوردگی بتن و زوال آرماتورها بر اساس آنالیز سطح پاسخ است. بدین منظور با برداشت میزان خوردگی در سه بازه زمانی مختلف، میزان خوردگی اندازه‌گیری شده و بر اساس آنالیز سطح پاسخ میزان تاثیر یونهای مختلف در فرآیند خوردگی شناسایی شد. بر اساس درصد اهمیت یونها، استراتژی استفاده از روش مناسب برای جلوگیری از فرآیند خوردگی ارائه گردید.

۲- روش انجام تحقیق

برای بررسی اثرات یونهای مختلف در گسترش خوردگی سازه بتنی برج خنک کننده، قسمتهایی از این سازه که در معرض تر و خشک شدن مداوم با آب آغشته به انواع یونهاست، باید شناسایی گردید. قسمتهای خورده شده کد گذاری شده و با ابزار مناسبی ابعاد هندسی خوردگی ها تعیین گردید و بر اساس آن حجم معادل خوردگی محاسبه شد. در محلهای مورد نظر، میزان یونهای محلول در آب اندازه گیری گردیدند. فرایند اندازه گیری ابعاد خرابی و میزان یونها، در بازه‌های زمانی متعددی دیگری تکرار شد و میزان خرابی و یونها پایش گردند. هر یک از برداشتهای ثبت شده در زمان و مکان مشخص اندازه‌گیری شده به عنوان یک کمیت آزمایشگاهی برای مطالعات بعدی در نظر گرفته شد.

برای بررسی اثر یونها در میزان خوردگی بتن از روش تحلیل سطح پاسخ استفاده شد. در این روش، متغیر هدف میزان خرابی و متغیرهای وابسته میزان یونهای محلول در آب، Ph آب و زمان است. این روش بر مبنای کمینه کردن میزان خطا بر اساس آزمایشهای ورودی است، هنگامیکه کمترین مقدار خطای نوع اول پارامتر وابسته کمتر از ۰/۵ درصد باشد متغیر مفروض، به عنوان پارامتر تاثیرگذار شناسایی شده و میزان تاثیرگذاری متغیر مورد نظر بر اساس تحلیل واریانس تک عامله محاسبه می‌گردد. فلوجارت پژوهش در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- روش انجام تحقیق

۳- آزمایشهای آزمایشگاهی

برای بررسی میزان یونهای محلول در آب در این تحقیق بر اساس ادبیات موضوع پارامترهای دما، زمان و PH آب مورد استفاده برای خنک کردن سازه بتنی در نظر گرفته شدند. در مورد یونهای محلول در آب یونهای منیزیم (MA)، کلسیم (T.H)، سدیم (C.A)، کلراید (CL⁻)، فسفات (P)، نیترات (NO₂) و سولفات (SO₄) در آب مورد بررسی قرار گرفت.

۳-۱- موقعیت آزمایشها

برای انجام آزمایشها، قسمتهایی بتنی از سازه برج خنک کننده واقع در کارخانه فولاد اهواز صورت گرفت. شرکت فولاد خوزستان دومین تولیدکننده فولاد خام در ایران است. که با وسعت ۸/۳ کیلومتر مربع، در مجاورت شهر اهواز واقع شده است. این کارخانه دارای برج خنک کننده‌ای به ظرفیت ۳۳ متر مکعب است. قسمتهای بتنی این برج توسط آب بازیافتی همواره در معرض تر و خشک شدن با آبی که آغشته به انواع یونهاست، می‌باشد. در شکل ۳ نمای از کارخانه و برج خنک کننده آن نشان داده شده است.



ب- نمایی از کارخانه فولاد اهواز



الف- موقعیت قرار گیری

شکل ۳ - موقعیت کارخانه و برج خنک کننده آن

آب بازیافتی مورد استفاده به دلیل مجاورت با تاسیسات مختلف همواره در معرض یونهای متعدد است و سازه‌های بتنی که در مجاورت این آب هستند و با این آب خنک می‌شوند، همواره در معرض خوردگی و زوال هستند. در شکل ۴ نمایی از خوردگی‌های حادث شده در قسمت‌های مختلف این مجتمع نشان داده شده است.



شکل ۴ - نمونه های از خوردگی‌های بتن

با توجه به الگوی های خرابی‌های مشاهده شده، ۱۷ نقطه آزمایشی برای اندازه‌گیری ابعاد خرابی و میزان یونهای موجود در آب، در نظر گرفته شد. در جدول ۱ موقعیت نقاط مورد نظر و کد مورد استفاده برای آنها بیان شده است.

جدول ۱ - معرفی ایستگاه های اندازه‌گیری خرابی

نام	موقعیت	نام	موقعیت	نام	موقعیت
S۱	دال	B۱	تیر	C۱	ستون
S۲	دال	B۲	تیر	C۲	ستون
S۳	دال	B۳	تیر	C۳	ستون
S۴	دال	B۴	تیر	C۴	ستون
S۵	دال	B۵	تیر	C۵	ستون
		B۶	تیر	C۶	ستون

۲-۳- روش انجام آزمایشها

برای بررسی میزان خوردگی در موقعیتهای ذکر شده لازم است در گام اول مشخصات هندسی موقعیتهای مشخص شده که در معرض خوردگی هستند اندازه گیری گردد. بدین منظور از ابزارهای مناسبی همانند کولیس مهندسی و متر استفاده شد. در شکل ۵ نمایی از اندازه گیری ابعاد هندسی ترک برای محاسبه حجم خوردگی نشان داده شده است.



شکل ۵ - اندازه گیری ابعاد هندسی ناحیه خورده شده

برای اندازه گیری دما آب و هوا در هنگام اندازه گیری از دماسنج دیجیتال استفاده گردید و غلظت تمامی یونهای محلول در آب بر اساس استاندارد ASTM D انجام شد [6].

۳-۳- یافته های آزمایشها

با توجه به آزمایشهای صورت گرفته نتایج ابعاد هندسی ترکها، حجم نظیر ترک و میزان یونهای محلول در آب در هنگام ترک در موقعیتهای ذکر شده در جدول ۳ آمده است. برداشتها در سه موقعیت زمانی متفاوت ۱۲۰ روزه برداشت شده اند.



مرکز تحقیقات
راه، مسکن و شهرسازی

یازدهمین کنفرانس ملی بتن
۱۴، ۱۵، ۱۶ مهرماه ۱۳۹۸

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی



انجمن علمی بتن ایران

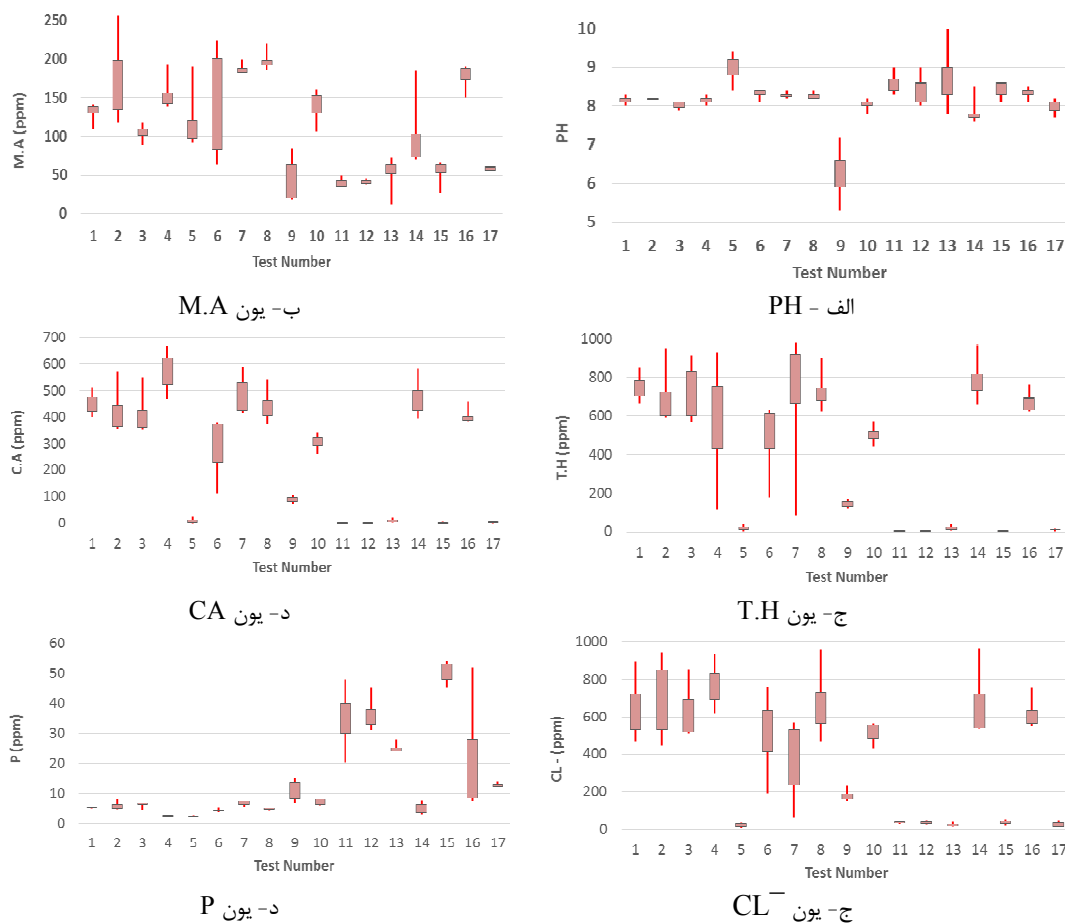


انجمن بتن ایران

جدول ۳ - نتایج اندازه گیری pH و غلظت یونهای محلول در آب در موقعیتهای آزمایش (غلظت یونها بر حسب گرم در لیتر آب مصرفی بتن)

SO ₄			NO ₂			P			CL ⁻			CA			TH			MA			PH			شماره موقعیت
۲۴۰	۱۲۰	شروع	۲۴۰	۱۲۰	شروع	۲۴۰	۱۲۰	شروع	۲۴۰	۱۲۰	شروع	۲۴۰	۱۲۰	شروع	۲۴۰	۱۲۰	شروع	۲۴۰	۱۲۰	شروع	۲۴۰	۱۲۰	شروع	
روز	روز		روز	روز		روز	روز		روز	روز		روز	روز		روز	روز		روز	روز		روز	روز		
۴۵	۲۳	۱۲	۱۰۳	۱۲۹	۲۳۶	۴/۸	۵/۴	۵/۱	۸۹۶	۴۶۵	۶۱۸	۵۱۰	۳۹۹	۴۷۶	۸۵۰	۶۶۵	۷۶۸	۱۱۰	۱۴۱	۱۳۸	۸/۱	۸/۳	۸/۱	۱
۲۰۳	۱۵۳	۱۰	۴۲	۵۳	۸۹	۴/۶	۵/۲	۸	۹۴۴	۴۴۶	۶۳۳	۵۷۰	۳۵۴	۳۷۲	۹۵۰	۵۹۰	۶۰۰	۱۱۸	۱۳۵	۲۵۷	۸/۲	۸/۲	۸/۲	۲
۴۲۳	۱۸۰	۱۴۶	۲۳۶	۱۰۹	۱۶۳	۶/۵	۶/۸	۴/۵	۸۵۵	۵۱۰	۵۲۲	۵۴۹	۳۸۵	۳۵۲	۹۱۵	۶۴۳	۵۶۸	۱۰۷	۱۱۸	۸۹	۸/۱	۸/۱	۹/۷	۳
۴۰۳	۳۶۵	۲۳۶	۲۳۰	۱۲۰	۵۳	۲/۲	۲/۵	۲/۵	۹۳۵	۷۷۰	۶۱۸	۵۵۸	۶۶۷	۴۶۸	۹۳۰	۱۱۳	۷۵۵	۱۹۳	۱۳۸	۱۵۴	۸/۲	۸	۸/۳	۴
۴۰۲	۶۳	۱۰۸	۲۱۴	۲۳۵	۴۲۱	۲/۳	۲/۳	۲/۳	۸	۳۸	۱۵	۲۴	۴/۸	۲	۴۰	۸	۳	۹۹	۹۳	۱۹۰	۹/۴	۸/۴	۹/۲	۵
۴۱۰	۳۹۰	۳۶۲	۵۰	۵۶	۴۲	۴/۵	۳/۸	۵/۳	۱۹۰	۵۲۴	۷۵۹	۱۱۰	۳۷۸	۳۷۰	۱۷۵	۶۳۰	۵۹۷	۶۳	۱۷۸	۲۲۴	۸/۱	۸/۴	۸/۳	۶
۳۶۹	۲۴۳	۲۳۶	۱۰۳	۸۳	۱۷	۷/۳	۷/۳	۵/۴	۶۰	۵۱۸	۵۷۰	۵۸۸	۴۶۲	۴۱۴	۹۸۰	۶۷۰	۶۶۷	۱۹۹	۱۸۱	۱۸۳	۸/۴	۸/۲	۸/۳	۷
۵۶	۱۸	۱۲	۹۷	۱۴۵	۱۸۹	۴/۲	۴/۸	۵/۱	۹۶۰	۴۶۵	۶۸۶	۵۴۰	۳۷۴	۴۶۱	۹۰۰	۶۲۴	۷۴۴	۱۹۵	۱۸۶	۲۲۰	۸/۴	۸/۲	۸/۳	۸
۹۰	۱۲۰	۳۰۲	۴۲	۳۶	۱۸	۱۵	۱۳/۷	۶/۶	۲۳۰	۱۵۰	۱۷۹	۹۶	۷۲	۱۰۵	۱۵۴	۱۲۰	۱۶۹	۱۸	۲۱	۸۴	۵/۳	۶/۱	۷/۲	۹
۳۰۳	۲۳۶	۴۳۲	۴۳	۲۵	۶۳	۵/۹	۷/۶	۸/۲	۵۵۵	۴۳۰	۵۶۳	۳۴۲	۲۶۲	۳۲۲	۵۷۰	۴۴۰	۵۲۰	۱۰۶	۱۴۸	۱۶۰	۷/۸	۸/۲	۸/۱	۱۰
۴۳۲	۶۳	۱۲۵	۱۸	۳۶	۴۵	۴۸	۲۰/۲	۳۹/۸	۴۴	۳۸	۲۸	۳	۳	۳	۵	۵	۵	۵۰	۳۸	۳۴	۸/۷	۸/۳	۹	۱۱
۱۲۳	۴۳۰	۲۳	۴۳	۸۳	۹۳	۴۵	۳۰/۹	۳۵	۳۲	۴۸	۲۴	۳/۶	۳	۳	۶	۵	۵	۳۸	۴۰	۴۵	۸	۸/۱	۹	۱۲
۲۵۶	۱۷۶	۶۳	۳۴۶	۶۶۱	۳۴	۲۴/۱	۲۴/۱	۲۴/۱	۱۵	۴۰	۱۷	۲۲	۹/۶	۳	۳۸	۱۶	۵	۵۱	۷۲	۱۲	۹	۱۰	۷/۸	۱۳
۳۲۰	۴۲۰	۲۳۰	۳۶۰	۱۳۶	۳۲	۲/۹	۵	۷/۵	۹۶۲	۵۴۲	۵۳۳	۵۸۲	۳۹۴	۴۹۹	۹۷۰	۶۵۸	۸۰۵	۷۰	۷۵	۱۸۵	۷/۷	۷/۷	۸/۵	۱۴
۱۲۳	۵۳۶	۱۹۰	۴۲۳	۱۷۳	۸۹	۴۵	۵۲	۵۳	۳۰	۵۲	۲۰	۳	۳	۴	۵	۵	۶	۲۷	۶۶	۶۰	۸/۱	۸/۵	۸/۶	۱۵
۷۳۰	۶۳۲	۲۳۶	۷۶	۸۳	۱۲	۵۲	۷/۳	۹/۶	۷۵۶	۵۴۸	۵۹۹	۴۵۹	۳۸۴	۳۸۶	۷۶۵	۶۴۰	۶۲۳	۱۵۰	۱۸۲	۱۹۰	۸/۴	۸/۱	۸/۵	۱۶
۳۵۶	۴۲۳	۹۶	۱۷۹	۱۲۹	۶۸	۱۲/۳	۱۲/۳	۱۲/۳	۱۵	۴۸	۱۵	۹/۶	۵/۴	۲	۱۶	۹	۳	۶۱	۵۶	۵۶	۸/۲	۸/۱	۷/۷	۱۷

در شکل ۵ نمودار تغییرات پارامترهای مفروض در ۱۷ نقطه معرفی شده برای آزمایش، در بازه زمانی ۲۴۰ روزه مورد بررسی، نشان داده شده است.



شکل ۵ - تغییرات پارامترهای مفروض در ۱۷ موقیعت مورد بررسی

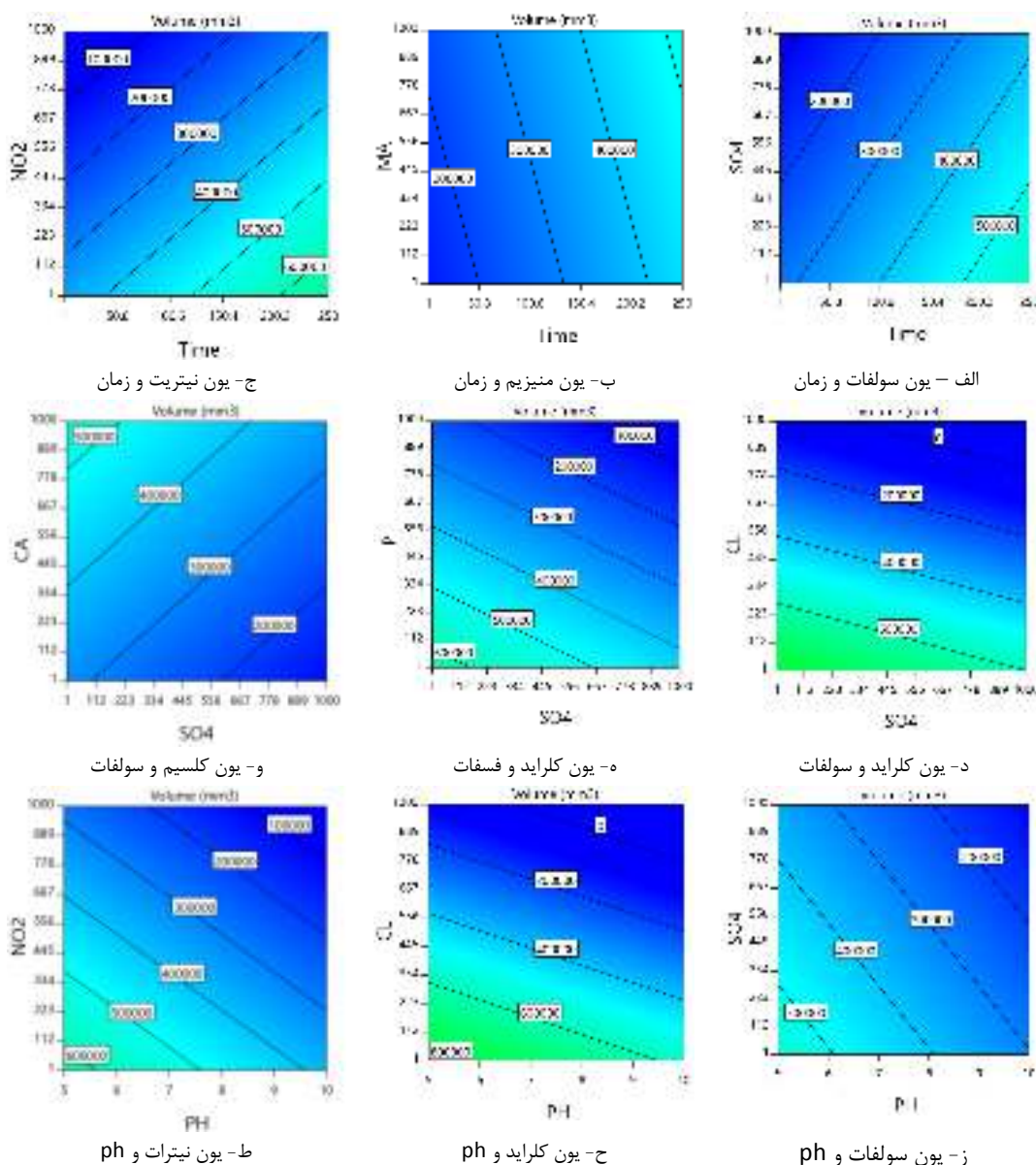
بر اساس اندازه‌گیریهای میدانی از میزان طول، عرض، ضخامت و حجم تقریبی قسمت خورده شده در طی زمانهای اندازه‌گیری شده، محاسبه شده و در جدول ۴ آمده است.

جدول ۴ - ابعاد هندسی ترکها و حجم خوردگی [طول، عرض، عمق (حجم)] (ابعاد به میلیمتر)

شماره موقعیت	شروع	۱۲۰ روز	۲۴۰ روز
۱	[۴۵، ۱۲۰، ۱۶۶] (۸۹۶۴۰۰)	[۵۰، ۱۲۰، ۱۶۶] (۹۹۶۰۰۰)	[۵۵، ۱۲۰، ۱۶۶] (۱۰۹۵۶۰۰)
۲	[۴۵، ۱۲۰، ۹۰] (۴۸۶۰۰۰)	[۴۵، ۱۲۰، ۱۰۰] (۵۴۰۰۰۰)	[۴۵، ۱۲۰، ۱۰۲] (۵۵۰۸۰۰)
۳	[۴۵، ۲۳، ۱۶۶] (۱۲۰۳۶۵)	[۴۵، ۱۲۰، ۱۷۰] (۹۱۸۰۰۰)	[۵۰، ۱۲۱، ۱۷۲] (۱۰۴۰۶۰۰)
۴	[۴۵، ۱۲۰، ۱۵۳] (۱۰۲۳۶۸)	[۱۷، ۵۶، ۱۶۶] (۴۲۵۰۱۲)	[۴۵، ۱۲۰، ۹۸] (۵۲۹۲۰۰)
۵	[۴۵، ۴۴، ۶۶] (۱۳۰۶۸۰)	[۴۵، ۱۲۰، ۶۹] (۵۴۲۳۶۵)	[۴۵، ۱۲۰، ۱۶۶] (۸۹۶۴۰۰)
۶	[۴۵، ۹۰، ۳۰] (۱۲۱۵۰۰)	[۴۵، ۹۰، ۳۵] (۱۴۱۷۵۰)	[۴۵، ۱۲۰، ۷۰] (۳۷۸۰۰۰)
۷	[۴۵، ۱۲۰، ۱۶۶] (۱۲۰۰۳۲)	[۱۵، ۴۵، ۱۵۰] (۱۲۵۲۳۶)	[۴۵، ۱۵۰، ۲۴۳] (۱۶۴۰۲۵۰)
۸	[۴۵، ۱۲۰، ۱۲۳] (۱۰۲۳۴۱)	[۴۵، ۱۲۰، ۱۶۶] (۸۹۶۴۰۰)	[۴۵، ۱۲۰، ۱۸۳] (۹۸۸۲۰۰)
۹	[۴۵، ۱۲۰، ۱۴۲] (۸۹۶۴۰۰)	[۴۵، ۱۲۰، ۱۷۰] (۹۱۸۰۰۰)	[۴۵، ۱۲۰، ۱۷۵] (۹۴۵۰۰۰)
۱۰	[۴۵، ۱۲۰، ۱۱۰] (۸۹۶۴۰۰)	[۴۵، ۱۲۰، ۱۶۶] (۸۹۶۴۰۰)	[۴۵، ۱۲۰، ۱۲۵] (۸۹۶۴۰۰)
۱۱	[۴۵، ۱۲۰، ۱۶۶] (۸۹۶۴۰۰)	[۴۵، ۱۲۰، ۱۶۶] (۲۳۶۵۹۸)	[۴۵، ۱۲۰، ۱۶۶] (۸۹۶۴۰۰)
۱۲	[۴۵، ۱۲۰، ۹۷] (۸۹۶۴۰۰)	[۴۵، ۱۲۰، ۱۶۶] (۸۹۶۴۰۰)	[۴۵، ۱۲۰، ۱۶۶] (۸۹۶۴۰۰)
۱۳	[۴۵، ۱۲۰، ۱۶۶] (۸۹۶۴۰۰)	[۴۵، ۱۲۰، ۱۶۶] (۸۹۶۴۰۰)	[۴۵، ۱۲۰، ۱۶۶] (۸۹۶۴۰۰)
۱۴	[۴۵، ۱۲۰، ۱۶۶] (۵۶۳۲۰۲)	[۴۵، ۸۵، ۱۶۶] (۸۹۶۴۰۰)	[۴۵، ۱۲۰، ۱۰۸] (۸۹۶۴۰۰)
۱۵	[۳۵، ۱۲۰، ۸۰] (۳۳۶۰۰۰)	[۳۵، ۱۲۰، ۱۱۰] (۴۶۲۰۰۰)	[۴۰، ۱۲۰، ۱۲۰] (۵۷۶۰۰۰)
۱۶	[۲۰، ۱۳۰، ۵۵] (۱۴۳۰۰۰)	[۳۰، ۱۲۰، ۸۵] (۳۰۶۰۰۰)	[۴۵، ۱۲۰، ۱۲۳] (۶۶۴۲۰۰)
۱۷	[۴۵، ۸۰، ۹۰] (۳۲۴۰۰۰)	[۴۵، ۱۲۰، ۱۱۰] (۵۹۴۰۰۰)	[۴۵، ۱۲۰، ۱۴۰] (۷۵۶۰۰۰)

۴- تحلیل سطح پاسخ

با توجه به اندازه گیری های صورت گرفته، هر یک از مقادیر اندازه گیری حجم ترک به عنوان کمیت هدف بر حسب مقادیر یونهای اندازه گیری شده به عنوان متغیرهای آزمایش به عنوان یک نمونه آزمایشی در تحلیل سطح پاسخ تلقی می گردد. بنابر اطلاعات جمع آوری شده متغیرهای وابسته ۸ پارامتر مربوط به یونها و آب و یک پارامتر زمان هستند و یک متغیر هدف که حج خوردگی است در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت مه در مجموع ۹۰ آزمایش مقایسه ای دودویی به منشور بررسی اثر پارامترهای بر روی پارامتر هدف صورت گرفت که نتایج بعضی از آنها در گرافهای شکل ۶ نشان داده شده است.

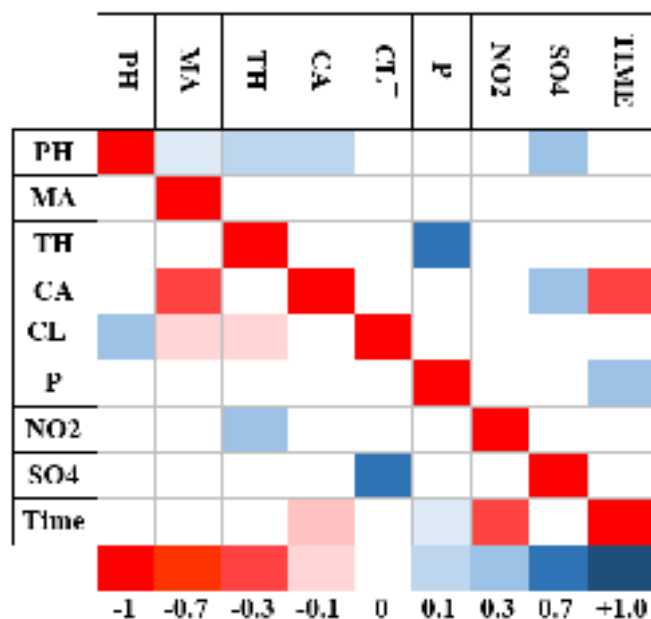


شکل ۶- مقایسه دو-دویی بعضی از متغیرها نسبت به زمان

همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است در مقایسه دو دویی دو متغیر مفروض در نظر گرفته شده و سایر متغیرها مقدار ثابت مدل مرجع را داشتند. برای مثال در شکل ۶-الف با استفاده از نتایج یون سولفات با سایر متغیرها ترسیم شده است. در بررسی ارتباط این دو متغیر می توان گفت که با افزایش هر دو متغیر به صورت همزمان میزان خوردگی بیشتر می گردد و بالعکس.

از آنجاییکه که تبیین این ارتباط برای ۹۰ حالت بیان شده بسیار مفصل می باشد بنابراین برای بررسی دو دویی متغیر از ضریب همبستگی استفاده شده که در نتایج آن در شکل ۷ نشان داده شده است. ضریب همبستگی مثبت بیان کننده آن است که در میزان خوردگی افزایش یک پارامتر با افزایش پارامتر دیگر همراه است و ضریب همبستگی منفی عکس این نتیجه است

و هر چه این ضریب به صفر نزدیک تر باشد نشان دهنده استقلال دو پارامتر در میزان خوردگی است و نزدیکی به مثبت یک است هم راستا بودن و منفی یک خلاف هم بودن پارامترها در خوردگی بتن را نشان میدهد



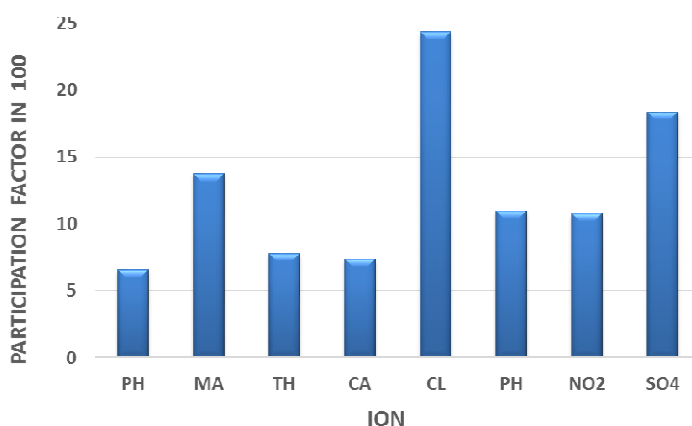
شکل ۷ - وابستگی پارامترها در خوردگی حاصل از آنالیز سطح پاسخ

برای تعیین اثر گذاری پارامترها در خوردگی با لحاظ کردن تمامی پارامترهای فرض شده در روش سطح پاسخ از آزمون T-Test استفاده گردید. که نتایج آن در جدول ۸ خلاصه شده است.

جدول ۸ - نتایج آماری تاثیر میزان متغیرهای وابسته در میزان خوردگی

شاخصه گروه	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	F-Value	P-Value	I.F	W
PH	۷/۶	۱۰	۸/۷	۱/۱۱	۵/۷۱	۰/۰۱۸۵	۳/۳	۲/۸
MA	۱۲	۲۵۷	۱۲۲/۷	۵/۸۱	۱۱/۴۳	۰/۰۰۱	۶/۹	۷/۰۵
TH	۲	۹۸۰	۳۵۶/۷	۶/۹۰	۸/۱۴	۰/۰۰۵۱	۳/۹	۳/۵۵
CA	۲	۶۶۷	۲۳۱/۷	۲/۲۴	۱۲/۰۲	۰/۰۰۰۷	۳/۷	۴/۱
CL-	۸	۹۴۴	۳۸۳/۷	۲/۶۳	۱۵/۳۹	۰/۰۰۰۲	۱۲/۲	۱۰/۵۵
P	۲/۱	۵۳	۹/۷	۱/۴۶	۴/۶۸	۰/۰۳۲۶	۵/۵	۵/۹
NO ₂	۲/۹	۶۶۱	۳۸۲/۳	۳/۳۲	۴/۵۳	۰/۰۳۲۱	۵/۴	
SO ₄	۱۰	۷۳۰	۴۲۳/۵	۲/۸۹	۴/۶۳	۰/۰۲۳۶	۹/۲	

نمودار درصد مشارکت یونها که بر اساس ۱۰۰ واحد تنظیم شده است و در ستون آخر جدول ۸ آمده است در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۸ - توزیع درصد مشارکت یونها در توسعه خرابی

۵- بحث و نتیجه گیری

بر اساس اندازه گیری‌های یونها و حجم خرابی ایجاد شده در ۱۷ موقعیت متفاوت در قسمتهای بتنی سازه برج خنک کننده کارخانه فولاد اهواز در طی زمان، هر یک از برداشتها به عنوان یک کمیت آزمایشگاهی در نظر گرفته شد. مقادیر اندازه گیری شده بر اساس آنالیز سطح پاسخ مورد مقایسه دو دویی با هم قرار گرفتند تا میزان تاثیر آنها در خرابی ایجاد شده مشخص گردد. دی این مقایسه کمیتهای وابسته ای که کمترین خطای نوع اول آنها از ۰/۵ درصد کمتر بود، به عنوان پارامتر تاثیرگذار شناسایی شدند. میزان تاثیرگذاری متغییرهای تاثیر گذار بر اساس تحلیل واریانس تک عامله محاسبه گردیدند.

نتایج تحلیل سطح پاسخ نشان داد که یونهای منیزیم (MA)، سدیم (T.H)، کلسیم (C.A)، کلراید (CL⁻)، فسفات (P)، نیترات (NO₂) و سولفات (SO₄) محلول در آب همگی در میزان خوردگی تاثیر دارند و به عنوان پارامتر تاثیر گذار باید تلقی گردند. در بین یونهای بررسی شده یونهای کلراید و سولفات بیشترین تاثیر در توسعه خرابی را داشته و یون کلسیم و PH کمترین تاثیر را در توسعه خرابی در پی دارند.

۶- قدردانی

بدین وسیله از پرسنل محترم آزمایشگاه مجتمع فولاد مبارکه خوزستان و مدیریت آن مجتمع که در تهیه نمونه ها و کلیه مراحل انجام آزمایشهای آزمایشگاهی کمال همکاری را داشتند، قدردانی صورت می‌گیرد.

۷- مراجع

- [۱] "https://scholar.google.com/".
- [۲] rose corrosion services, "Treatment and Corrosion Control of Cooling Water.," United Kingdom, ۲۰۰۵.
- [۳] A. Mostafaeipour, "The effect of water containing sodium sulfate ions on strength of concrete of aquaculture ponds and channels," *Iran. J. Fish. Sci.*, vol. ۱۴, no. ۲, pp. ۴۶۷-۴۸۴, 2015.
- [۴] J. I. Park, K. M. Lee, S. O. Kwon, S. H. Bae, S. H. Jung, and S. W. Yoo, "Diffusion Decay Coefficient for Chloride Ions of Concrete Containing Mineral Admixtures," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. ۲۰۱۶, ۲۰۱۶.



مرکز تحقیقات
راه، مسکن و شهرسازی

یازدهمین کنفرانس ملی بتن

۱۴،۱۵،۱۶ مهرماه ۱۳۹۸

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی



انجمن علمی بتن ایران



انجمن بتن ایران

- [۵] A. Maryoto, B. S. Gan, N. I. S. Hermanto, and R. Setijadi, "The Compressive Strength and Resistivity toward Corrosion Attacks by Chloride Ion of Concrete Containing Type i Cement and Calcium Stearate," *Int. J. Corros.*, vol. ۲۰۱۸, ۲۰۱۸.
- [۶] American Society for Testing and Materials Annual, "Annual Book of ASTM Standards.," *Philadelphia, PA, USA*, vol. Sec., ۴, pp. ۰۴-۰۸, ۱۹۹۲.