

Evaluation of the Effect of Magnetic Water on Durability of Concrete Made of Cast Iron Slag

Majid Abedi¹, Yousef Zandi^{2*}

1-Master Of Science, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.

2-Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.

ABSTRACT

In this study, to evaluate the effect of magnetic water along with the effect of smelting slag on concrete, electrical resistance tests, water permeation depth and frost and melting resistance tests were carried out. Three types of environmental conditions (sulfate, chlorate and ordinary water solutions) and conventional water ponds were used to perform the tests. The mixing design used in this study has two types of compressive strengths of 25, 40 MPa. If it is possible to improve the quality of concrete with magnetic water and additives, especially waste materials such as smelting slag, it can be useful both in terms of enhancing the quality of structures and in environmental and economic terms, so research is essential. The results showed that magnetic water has a great effect on the concrete and its application increases the specific electrical resistance of the concrete and reduces the chance of corrosion of buried steel in the concrete. Magnetic water also reduces the depth of water infiltration, increases the number of thawing and frost cycles, and increases the durability index. Increasing the percentage of smelting slag in concrete increases the specific electrical resistance of concrete, decreasing water penetration depth, increasing the number of frost and melting cycles, and concrete durability index. Increasing the compressive strength of the concrete from 25 to 40 MPa in addition to having a great effect on the mechanical properties, increased the specific electrical resistance of the concrete, decreased the water penetration depth, and also increased the number of frost and thaw cycles and the concrete durability index. It should be noted that the samples exposed to the sulfate medium performed better than the samples exposed to the chlorate medium and had lower electrical resistance and increased water penetration depth than the samples exposed to ordinary water.

ARTICLE INFO

Receive Date: 05 October 2019

Revise Date: 26 March 2020

Accept Date: 06 August 2020

Keywords:

Magnetic water, Iron slag, Electrical resistance, water penetration depth, melting and frost resistance

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.204047.1963>

*Corresponding author: Yousef Zandi

Email address: zandi@iaut.ac.ir

ارزیابی تاثیر آب مغناطیسی بر روی دوام بتن‌های ساخته شده با سرباره ذوب آهن

مجید عابدی^۱، یوسف زندی^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد، گروه عمران سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد واحد تبریز، تبریز، ایران

۲- استادیار، گروه عمران سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد واحد تبریز، تبریز، ایران

چکیده

در این پژوهش برای ارزیابی تاثیر آب مغناطیسی در کنار تاثیر سرباره ذوب آهن بر روی بتن، آزمایش‌های مقاومت الکتریکی، عمق نفوذ آب و آزمایش تعیین مقاومت در برابر ذوب و یخبندان انجام شد؛ که برای عمل‌آوری آزمون‌ها برای آزمایش‌های مقاومت الکتریکی، عمق نفوذ آب از سه نوع شرایط محیطی (محلول‌های سولفاته، کلراته و آب معمولی) و برای عمل‌آوری آزمون‌ها برای آزمایش ذوب و یخبندان فقط از حوضچه آب معمولی استفاده شد. طرح اختلاط‌های مورد استفاده در این پژوهش دارای دو نوع مقاومت فشاری بتن ۲۵، ۴۰ مگاپاسکال می‌باشند. اگر بهبود کیفیت بتن همراه با آب مغناطیسی و مواد افزودنی بخصوص مواد زاید همچون سرباره ذوب آهن امکان‌پذیر باشد، می‌تواند هم از لحاظ بالا رفتن کیفیت سازه‌ها و هم از لحاظ زیست محیطی و اقتصادی مفید باشد؛ پس تحقیق در این زمینه ضروری است. نتایج نشان داد که آب مغناطیسی در بتن تاثیر زیادی داشته و استفاده از آن باعث افزایش مقاومت ویژه الکتریکی بتن می‌گردد و احتمال خوردگی فولاد مدفون در بتن را کاهش می‌دهد. همچنین آب مغناطیسی باعث کاهش عمق نفوذ آب، افزایش تعداد سیکل‌های ذوب و یخبندان و افزایش شاخص دوام می‌گردد. افزایش درصد سرباره ذوب آهن در بتن باعث افزایش مقاومت ویژه الکتریکی بتن، کاهش عمق نفوذ آب، افزایش تعداد سیکل‌های ذوب و یخبندان و شاخص دوام بتن می‌گردد. افزایش مقاومت فشاری بتن از ۲۵ تا ۴۰ مگاپاسکال علاوه بر این که تاثیر زیادی بر روی مشخصات مکانیکی داشته، باعث افزایش مقاومت ویژه الکتریکی بتن، کاهش عمق نفوذ آب و همچنین باعث افزایش تعداد سیکل‌های ذوب و یخبندان و شاخص دوام بتن گردیده است. باید خاطر نشان کرد که آزمون‌های قرار گرفته شده در محیط سولفاته نسبت به آزمون‌های قرار گرفته شده در محیط کلراته بهتر عمل کرده و کاهش مقاومت الکتریکی و افزایش عمق نفوذ آب کمتری نسبت به آزمون‌های قرار گرفته در آب معمولی را داشتند.

کلمات کلیدی: آب مغناطیسی، سرباره ذوب آهن، مقاومت الکتریکی، عمق نفوذ آب، مقاومت در برابر ذوب و یخبندان

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.204047.1963	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2020.204047.1963	۱۴۰۰/۰۷/۳۰	۱۳۹۹/۰۵/۱۶	۱۳۹۹/۰۵/۱۶	۱۳۹۹/۰۱/۰۷	۱۳۹۸/۰۷/۱۳
				*نویسنده مسئول:		
				یوسف زندی zandi@iaut.ac.ir		
				پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

ترکیب یکی از مرسوم ترین مصالح ساختمانی در جهان، بتن مسلح است؛ که افزایش مقاومت فشاری بتن مزایای زیادی از قبیل: کوچک شدن مقاطع، کاهش هزینه ها و آسیب های محیط زیستی به واسطه کم شدن مواد اولیه در بتن و افزایش دوام آن را در بر دارد. همچنین افزایش روانی بتن تازه، سهولت اجرا و امکان بتن ریزی در شرایط خاص را برای مجریان فراهم می‌سازد و به مهندسين طراح امکان استفاده از طرح اختلاط های با نسبت آب به سیمان کمتر را می‌دهد، که این امر نیز منجر به افزایش مقاومت فشاری و مزایای آن میگردد. به منظور حصول مقاومت فشاری بالا عمدتاً از پوزلان ها استفاده می‌شود [۲،۱]. همچنین دوام بتن در شرایط طبیعی، محیطی و داخلی عامل مهمی برای حفظ الزامات کارایی بتن می باشد [۳]. با این وجود یکی از عوامل خرابی زودرس بتن مسلح، خوردگی فولادهای آن می‌باشد و این مسأله از مهم ترین مشکلاتی است که صنعت ساخت و ساز، در رابطه با دوام، با آن مواجه است [۴]؛ که باعث تعمیرات پر هزینه و گاهی اوقات ساخت مجدد سازه های آسیب دیده می گردد. عامل اصلی این اتفاق کاهش pH محلول آبی موجود در منافذ بتن و تسریع واکنش های اکسید شدن آهن در حضور یون کلر می باشد [۵]. که خوردگی فولاد به دو طریق به بتن مسلح آسیب می رساند. اول اینکه باعث کاهش سطح مقطع میلگرد می گردد. دوم اینکه محصولات خوردگی با حجمی بزرگتر از خود فولاد را به وجود می آورد. این افزایش حجم با ایجاد تنش های کششی در بتن منجر به ترک خوردگی و در نهایت خرابی سازه می گردد [۶].

عامل اصلی دیگری که در دوام بتن نقش دارد، نفوذپذیری آن می‌باشد. مجراها و منافذ موئین که از تبخیر آب اضافی در بتن باقی می‌ماند؛ مهم ترین علت متخلخل و نفوذپذیر بودن بتن محسوب می‌شود [۷]. هر چه این منافذ متصل تر باشند بتن نفوذ پذیرتر است. آب اضافی همچنین منجر به افزایش میزان ترک‌های جمع شدگی می‌گردد. این ترک‌ها خود مسیر عبور آب و مواد شیمیایی هستند. ترک‌های عمیق تر سریع تر به خوردگی فولاد مدفون در بتن منتهی می‌شوند [۸]. نفوذ پذیری بتن هم چنین باعث می‌شود که آب یا سیالات دیگر بتوانند در بتن جریان پیدا کرده و مواد آسیب رسان و مضر را با خود به درون بتن حمل نمایند [۹]. بتن با نفوذپذیری پایین در مقابل حملات شیمیایی مقاومت بهتری نشان می‌دهد. به گونه‌ای که می‌توان بتن نسبتاً غیرقابل نفوذ را بتن با دوام دانست [۱۰]. هر چند مهم ترین علت نفوذپذیری بتن نداشتن فشردگی لازم و وجود خلل و فرج در بتن است [۱۱]. اما میزان نفوذپذیری تنها تابع ساده‌ای از تخلخل نمی‌باشد و علاوه بر آن به اندازه، توزیع، شکل پیچ و خم مسیر و پیوستگی منافذ نیز بستگی دارد [۱۲]. درحالت کلی میزان نفوذپذیری بتن تابع دو عامل سیال عبوری و محیط متخلخل نفوذ است [۱۱].

از این رو پی بردن به خواص بتن و پیش بینی عملکرد آن در محیط‌های خورنده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. افزایش تقاضا برای دوام و مقاومت مصالح مبتنی بر سیمان موجب شده است که مواد ضایعاتی مختلف با خواص پوزولانی به مخلوط بتن وارد گردند [۱۳]. همچنین افزایش نگرانی‌های جهانی در مورد اثرات زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی کربن دی‌اکسید و انتشار گازهای گلخانه‌ای، و راه-کارهای مختلف برای کاهش میزان انتشار کربن دی‌اکسید را به همراه داشته است [۱۴، ۱۵]. این نگرانی‌های زیست محیطی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای از فرایند تولید سیمان پرتلند باعث تشویق محققان به بررسی مناسب بودن مواد جایگزین برای جایگزینی سیمان پرتلند در بتن گشته است [۱۶]. بنابراین، مواد ضایعاتی معمولاً برای کاهش هزینه و کاهش انتشار کربن دی‌اکسید برای جایگزینی سیمان پرتلند استفاده می‌شود. مواد افزودنی که در ساخت بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد، باعث کاهش آلودگی زیست محیطی می‌گردد و همچنین استفاده از مواد افزودنی شیمیایی و معدنی موجب اصلاح برخی از خواص بتن می‌شود [۱۷]. حضور مواد مکمل معدنی و سیمانی در بتن موجب بهبود خواص بتن از جمله خواص مکانیکی، خواص رئولوژیکی و انتقال می‌شود [۱۸، ۱۹].

سرباره ذوب آهن یکی از موادی است که به دلیل دارا بودن خواص پوزولانی به‌عنوان جایگزینی برای سیمان در بتن استفاده می‌شود. تحقیقات نشان می‌دهد که نفوذپذیری و تخلخل بتن های که در آنها از سرباره ذوب آهن استفاده شده است، در مقایسه با بتن ساخته شده با سیمان معمولی کمتر است ولی روند کسب مقاومت فشاری کندی را در سنین اولیه نسبت به بتن معمولی از خود نشان داده

¹ CO₂

اند [۲۰]. لازم به ذکر است مکانیزم عمل میکروسیلیس و سرباره به این صورت است که با هیدروکسید کلسیم^۲ ترکیب شده و تبدیل به سیلیکات کلسیم هیدراته شده^۳ می‌شوند، این محصولات جدید تولید شده، وظیفه اصلی کسب مقاومت خمیر سیمان را بر عهده دارند. سرباره جایگزین شده از مقدار سیمان در بتن کم می‌کند بنابراین در سنین اولیه حجم فضای موئینه و مقدار هیدروکسید کلسیم در بتن زیاد شده و بتن در سنین اولیه در ناحیه انتقال خمیر سیمان-سنگدانه از ریزساختار متراکم تری برخوردار نیست که این منجر به کاهش مقاومت فشاری در سنین اولیه می‌شود. اما در سنین بعدی سرباره فعالیت پوزولانی خود را شروع کرده و باعث کاهش میزان هیدروکسید کلسیم، اندازه حفرات موئینه و حجم فضای موئینه می‌شود و باعث بهبود ریزساختار بتن در ناحیه انتقالی و افزایش مشخصات مکانیکی و پایایی بتن می‌شود [۲۱].

آب مورد استفاده در بتن اهمیت زیادی دارد، مثلاً آب مغناطیسی تاثیراتی بر عملکرد بتن می‌گذارد [۲۲]. آب مغناطیسی آبی است که جریان آب با سرعت و دبی مشخصی از میان میدان مغناطیسی عبور می‌کند تغییراتی در برخی از ویژگی‌های فیزیکی آن به وجود می‌آید که به این آب اصطلاحاً آب مغناطیسی می‌گویند [۲۳]. آب مغناطیسی می‌تواند باعث دفع ذرات سیمان از یکدیگر شود و همچنین باعث تولید لایه‌های هیدراتاسیون در اطراف این ذرات می‌گردد [۲۴]. تحقیقات در برخی از کشورها مانند روسیه، ژاپن و چین نشان داده است که استفاده از آب مغناطیسی باعث افزایش کارایی، روانی و واکنش هیدراتاسیون می‌گردد، همچنین مقاومت در برابر نفوذ پذیری و مقاومت در برابر یخ زدگی را نیز افزایش می‌دهد [۲۵، ۲۶، ۲۷، ۲۸]. و برخی دیگر محققان، گزارش دادند که آب مغناطیسی بر روی سیال بودن بتن و ملات تاثیر مثبتی می‌گذارد [۲۹، ۳۰، ۳۱]. استفاده از آب مغناطیسی در بتن باعث افزایش مقاومت فشاری [۳۲، ۳۳، ۳۴]، مقاومت خمشی سیمان و مقاومت پیوستگی و چسبندگی سیمان می‌گردد و همچنین باعث کاهش زمان گیرش اولیه و ثانویه می‌شود [۳۵]. همچنین باید توجه داشت که آب مغناطیسی دارای حافظه مغناطیسی است (مدت زمانی که آب خواص آهنربایی خود را از دست نداده است) که هر چه شدت میدان مغناطیسی بیشتر باشد حافظه مغناطیسی آب دیرتر پاک می‌شود [۳۶]. لازم به ذکر است طبق گزارشات سو و همکاران بتن-های ساخته شده با آب مغناطیسی گذرنده از میدان با قدرت ۰.۸ و ۱.۲ تسلا دارای بیشترین مقاومت فشاری هستند [۳۷].

تحقیقات سرینواس ردی و همکاران^۴ [۳۸] نشان می‌دهد که آب نمکی مضر که برای استفاده در بتن مناسب نیست، با مغناطیسی کردن آن می‌توان در بتن استفاده شود و نتایج آزمایش‌ها نشانگر این امر هستند که بتن ساخته شده با آب نمکی مغناطیسی دارای توانایی به اندازه بتن ساخته شده با آب معمولی است، این بهبود به دلیل افزایش هیدراتاسیون و تغییر ساختار منافذ بتن است.

جنبه جدید و نوآوری و هدف تحقیق می‌توان گفت که تاکنون مطالعه مشخصی و جامعی در خصوص کاربرد هم‌زمان آب مغناطیسی در کنار پوزولان سرباره ذوب صورت نپذیرفته، که در این مطالعه آزمایشگاهی با درصد‌های مختلف پوزولان سرباره ذوب آهن، اثر آب مغناطیسی بر روی دوام بتن مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- روند آزمایشگاهی

در این تحقیق برای تعیین دوام بتن سخت شده از آزمون‌های مقاومت الکتریکی، عمق نفوذ آب و آزمایش تعیین مقاومت در برابر ذوب و یخبندان استفاده شده است. لازم به ذکر است این آزمایش‌های مقاومت الکتریکی، عمق نفوذ آب در شرایط محیطی کلراته، سولفات‌ها و حوضچه آب معمولی و آزمایش تعیین مقاومت در برابر ذوب و یخبندان در شرایط محیطی حوضچه آب معمولی انجام گردید که در جدول ۱ میزان غلظت یون‌های غالب در محلول ذکر شده است.

² Ca(OH)₂

³ (C-S-H)

⁴ Srinivasa Reddy et al

جدول ۱. محلول های استفاده شده در آزمایش

کد	محلول	یون	Ppm
Cl	NaCl	Na ⁺	۲۳۰۰۰
		Cl ⁻	۳۵۵۰۰
S	Na ₂ SO ₄	Na ⁺	۴۵۵۵۰
		SO ₄ ⁻²	۱۹۳۳۰۰

کد standard نمونه‌های است که در محیط آب معمولی قرار داده شده است.

۲-۱- مصالح

سیمان مصرفی، سیمان پرتلند تیپ ۲ کارخانه سیمان صوفیان، طبق استاندارد ASTM C150 [۳۹] استفاده شد. برای کسب کارایی مطلوب نیز در مخلوط های بتن از فوق روان کننده پلی کربوکسیلات، که ساخت شرکت کریزو است؛ طبق استاندارد ASTM C494 [۴۰] استفاده شد. سرباره ذوب آهن مورد استفاده در این تحقیق از شرکت ذوب آهن اصفهان تهیه شده است، که طبق استاندارد ASTM C989 [۴۱] می‌باشد. مشخصات سرباره ذوب آهن و سیمان مصرفی در جدول ۲ آمده است. همچنین از سنگدانه درشت شکسته شده با حداکثر اندازه 25 میلی متر و سنگ دانه های ریز طبیعی، طبق استاندارد ASTM C33 [۴۲] استفاده گردید. جدول ۳ مشخصات سنگدانه های استفاده شده را نشان می دهد.

جدول ۲. مشخصات سیمان مصرفی و سرباره ذوب آهن

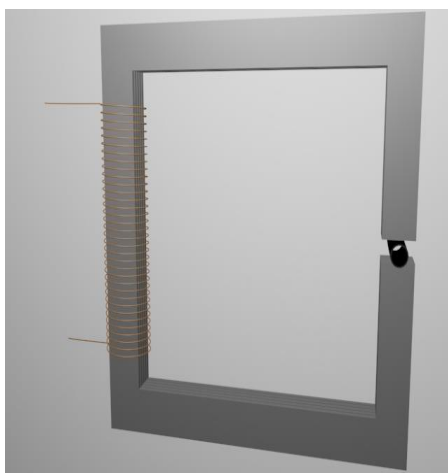
خواص فیزیکی و مکانیکی							
چگالی (gr/cm ³)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (kg/cm ²)	مقاومت فشاری ۷ روزه (kg/cm ²)	مقاومت فشاری ۳ روزه (kg/cm ²)	زمان گیرش ثانویه (min)	زمان گیرش اولیه (min)	بلین (m ² /kg)	
—	۴۶۲	۲۳۷	۱۷۱	۱۷۵	۱۱۶	۲۹۷/۴	سیمان
۲/۸۹	—	—	—	—	—	۳۴۵	سرباره ذوب آهن
ترکیبات شیمیایی (%)							
سرباره ذوب آهن	سیمان	سرباره ذوب آهن	سیمان	سرباره ذوب آهن	سیمان	سرباره ذوب آهن	سیمان
—	۰.۶۳	—	۱/۱	—	۳۷/۹۲	۲۱/۷۷	سیمان
—	۰/۰۱	—	۰/۸۷	۰/۳۲	۸/۷۹	۴/۵۳	سیمان
—	۴۵/۰۷	—	۰/۶۷	۰/۸۳	۰/۵۵	۳/۶۶	سیمان
—	۲۸/۴۱	—	۰/۰۹	۲/۲۲	۳۹/۰۱	۶۳/۱۳	سیمان
—	۵/۸۱	—	—	۱/۱	۶/۶۹	۲/۱۷	سیمان
—	۱۱/۱۳	—	۱/۴۵	۱/۳۸	۰/۱۶	—	سیمان

جدول ۳. دانه بندی و خواص فیزیکی سنگدانه ها

انواع الک (چشمه بر حسب میلیمتر)		۰/۰۷۵	۰/۱۵۰	۰/۳	۰/۶	۱/۱۸	۲/۳۶	۴/۷۵	۹/۵	۱۲/۵	۱۹	۲۵
بادامی	درصد عبوری از الک	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۱	۰/۲	۴	۳۲	۹۵	۱۰۰
نخودی		۰	۰	۰	۰	۰	۴/۵	۱۵/۱	۸۵	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
ماسه		۱/۶	۴	۲۴	۳۳	۵۸	۷۴	۸۷	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰

۲-۲- شرایط اعمال میدان مغناطیسی

برای اعمال میدان مغناطیسی به آب روش‌های گوناگونی مانند Copper Coil, Magnets on Copper و... وجود دارد. در این تحقیق دستگاه مورد استفاده برای تولید آب مغناطیسی مورد مطالعه قرار گرفته [۴۳] و طراحی و ساخته شد. این دستگاه دارای قدرت ۱ تسلا می‌باشد که شامل سیم پیچ با تعداد دور ۱۸۰۰۰ و قطر سیم مشخص (۱,۵ میلی متر) که دارای یک هسته از جنس ورقه‌های ترانسفورماتور (ورقه‌های دینامو) است. همچنین در این دستگاه از جریان DC با قدرت یک آمپر استفاده شده است و هسته آن به شکل U می‌باشد که دارای سطح مقطع ۴ سانتی متر مربع و طول ۴۰ سانتی متر است؛ که فاصله هوایی بین هسته، برای عبور لوله در نظر گرفته شده، ۲*۴*۴ سانتی متر می‌باشد و دبی آب عبوری از لوله در میدان مغناطیسی ۰,۲۳ لیتر بر ثانیه می‌باشد. لازم به ذکر است که برای انتخاب جنس هسته مطالعات گسترده انجام گرفت، که با مقایسه هسته‌های همچون آهن، چدن، آهن الکتریکی و... در نظر گرفته شد که هسته از جنس ورقه‌های ترانسفورماتور (ورقه‌های دینامو) باشد [۴۳، ۴۴]. شکل ۱ دستگاه تولید آب مغناطیسی را نشان می‌دهد.



شکل ۱. دستگاه تولید آب مغناطیسی

۲-۳- طرح اختلاط

در این تحقیق مخلوط‌های بتن با استاندارد ACI 211.1 [۴۵] در مقاومت ۲۵ و ۴۰ مگاپاسکال مورد آزمایش قرار گرفته اند. در این طرح جایگزینی ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵، ۵۰ درصدی سرباره ذوب آهن به جای سیمان انجام گردیده است. این پژوهش تحت شرایط آزمایشگاهی و در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد مطابق با استاندارد ASTM C192 [۴۶] نگهداری شده است. جدول ۳ طرح اختلاط مورد استفاده را نشان می‌دهد. در جدول طرح اختلاط‌ها نام گذاری بدین صورت می‌باشد که P40-20 یعنی طرحی که در آن f_c در نظر گرفته شده برابر ۴۰ مگاپاسکال (P40)، نیز قسمت دوم سرباره ذوب آهن (20) را نشان می‌دهد. همچنین P و N به ترتیب نشان‌دهنده بتن ساخته شده با آب مغناطیسی و آب معمولی است. لازم به ذکر است در تمام طرح‌ها ۱ درصد مواد هوازا استفاده شده است.

جدول ۳. مشخصات مخلوط های بررسی شده

شماره	کد طرح اختلاط	fc (MPa)	اجزای تشکیل دهنده (kg/m ³)						سرباره ذوب آهن		فوق روان کننده (%)
			سیمان	آب	شن بادامی	شن نخودی	ماسه	درصد وزنی	وزن		
۱	P25-0	۲۵	۳۱۶/۵	۱۳۵	۳۰۲	۷۰۷	۹۲۸	۰	۰	-/۷	
۲	P25-5	۲۵	۳۰۰/۵	۱۳۵	۳۰۲	۷۰۷	۹۲۸	۵	۱۶	-/۷	
۳	P25-10	۲۵	۲۸۵	۱۳۵	۳۰۲	۷۰۷	۹۲۸	۱۰	۳۱/۵	-/۷	
۴	P25-15	۲۵	۲۶۹	۱۳۵	۳۰۲	۷۰۷	۹۲۸	۱۵	۴۷/۵	-/۷	
۵	P25-20	۲۵	۲۵۳	۱۳۵	۳۰۲	۷۰۷	۹۲۸	۲۰	۶۳/۵	-/۷	
۶	P25-25	۲۵	۲۳۷/۵	۱۳۵	۳۰۲	۷۰۷	۹۲۸	۲۵	۷۹	-/۷	
۷	P25-30	۲۵	۲۲۱/۵	۱۳۵	۳۰۲	۷۰۷	۹۲۸	۳۰	۹۵	-/۷	
۸	P25-35	۲۵	۲۰۵/۵	۱۳۵	۳۰۲	۷۰۷	۹۲۸	۳۵	۱۱۱	-/۷	
۹	P25-40	۲۵	۱۹۰	۱۳۵	۳۰۲	۷۰۷	۹۲۸	۴۰	۱۲۶/۵	-/۷	
۱۰	P25-45	۲۵	۱۷۴	۱۳۵	۳۰۲	۷۰۷	۹۲۸	۴۵	۱۴۲/۵	-/۷	
۱۱	P25-50	۲۵	۱۵۸	۱۳۵	۳۰۲	۷۰۷	۹۲۸	۵۰	۱۵۸/۵	-/۷	
۱۲	P40-0	۴۰	۴۵۹/۵	۱۴۲	۳۰۴	۷۰۹	۷۷۴	۰	۰	-/۷	
۱۳	P40-5	۴۰	۴۳۶/۵	۱۴۲	۳۰۴	۷۰۹	۷۷۴	۵	۲۳	-/۷	
۱۴	P40-10	۴۰	۴۱۳/۵	۱۴۲	۳۰۴	۷۰۹	۷۷۴	۱۰	۴۶	-/۷	
۱۵	P40-15	۴۰	۳۹۰/۵	۱۴۲	۳۰۴	۷۰۹	۷۷۴	۱۵	۶۹	-/۷	
۱۶	P40-20	۴۰	۳۶۷/۵	۱۴۲	۳۰۴	۷۰۹	۷۷۴	۲۰	۹۲	-/۷	
۱۷	P40-25	۴۰	۳۴۴/۵	۱۴۲	۳۰۴	۷۰۹	۷۷۴	۲۵	۱۱۵	-/۷	
۱۸	P40-30	۴۰	۳۲۱/۵	۱۴۲	۳۰۴	۷۰۹	۷۷۴	۳۰	۱۳۸	-/۷	
۱۹	P40-35	۴۰	۲۹۸/۵	۱۴۲	۳۰۴	۷۰۹	۷۷۴	۳۵	۱۶۱	-/۷	
۲۰	P40-40	۴۰	۲۷۵/۵	۱۴۲	۳۰۴	۷۰۹	۷۷۴	۴۰	۱۸۴	-/۷	
۲۱	P40-45	۴۰	۲۵۲/۵	۱۴۲	۳۰۴	۷۰۹	۷۷۴	۴۵	۲۰۷	-/۷	
۲۲	P40-50	۴۰	۲۲۹/۵	۱۴۲	۳۰۴	۷۰۹	۷۷۴	۵۰	۲۳۰	-/۷	
۲۳	N25-0	۲۵	۳۱۶/۵	۱۳۵	۳۰۲	۷۰۷	۹۲۸	۰	۰	-/۷	
۲۴	N25-5	۲۵	۳۰۰/۵	۱۳۵	۳۰۲	۷۰۷	۹۲۸	۵	۱۶	-/۷	
۲۵	N25-10	۲۵	۲۸۵	۱۳۵	۳۰۲	۷۰۷	۹۲۸	۱۰	۳۱/۵	-/۷	
۲۶	N25-15	۲۵	۲۶۹	۱۳۵	۳۰۲	۷۰۷	۹۲۸	۱۵	۴۷/۵	-/۷	
۲۷	N25-20	۲۵	۲۵۳	۱۳۵	۳۰۲	۷۰۷	۹۲۸	۲۰	۶۳/۵	-/۷	
۲۸	N25-25	۲۵	۲۳۷/۵	۱۳۵	۳۰۲	۷۰۷	۹۲۸	۲۵	۷۹	-/۷	
۲۹	N25-30	۲۵	۲۲۱/۵	۱۳۵	۳۰۲	۷۰۷	۹۲۸	۳۰	۹۵	-/۷	
۳۰	N25-35	۲۵	۲۰۵/۵	۱۳۵	۳۰۲	۷۰۷	۹۲۸	۳۵	۱۱۱	-/۷	
۳۱	N25-40	۲۵	۱۹۰	۱۳۵	۳۰۲	۷۰۷	۹۲۸	۴۰	۱۲۶/۵	-/۷	
۳۲	N25-45	۲۵	۱۷۴	۱۳۵	۳۰۲	۷۰۷	۹۲۸	۴۵	۱۴۲/۵	-/۷	
۳۳	N25-50	۲۵	۱۵۸	۱۳۵	۳۰۲	۷۰۷	۹۲۸	۵۰	۱۵۸/۵	-/۷	
۳۴	N40-0	۴۰	۴۵۹/۵	۱۴۲	۳۰۴	۷۰۹	۷۷۴	۰	۰	-/۷	
۳۵	N40-5	۴۰	۴۳۶/۵	۱۴۲	۳۰۴	۷۰۹	۷۷۴	۵	۲۳	-/۷	
۳۶	N40-10	۴۰	۴۱۳/۵	۱۴۲	۳۰۴	۷۰۹	۷۷۴	۱۰	۴۶	-/۷	
۳۷	N40-15	۴۰	۳۹۰/۵	۱۴۲	۳۰۴	۷۰۹	۷۷۴	۱۵	۶۹	-/۷	
۳۸	N40-20	۴۰	۳۶۷/۵	۱۴۲	۳۰۴	۷۰۹	۷۷۴	۲۰	۹۲	-/۷	
۳۹	N40-25	۴۰	۳۴۴/۵	۱۴۲	۳۰۴	۷۰۹	۷۷۴	۲۵	۱۱۵	-/۷	
۴۰	N40-30	۴۰	۳۲۱/۵	۱۴۲	۳۰۴	۷۰۹	۷۷۴	۳۰	۱۳۸	-/۷	
۴۱	N40-35	۴۰	۲۹۸/۵	۱۴۲	۳۰۴	۷۰۹	۷۷۴	۳۵	۱۶۱	-/۷	
۴۲	N40-40	۴۰	۲۷۵/۵	۱۴۲	۳۰۴	۷۰۹	۷۷۴	۴۰	۱۸۴	-/۷	
۴۳	N40-45	۴۰	۲۵۲/۵	۱۴۲	۳۰۴	۷۰۹	۷۷۴	۴۵	۲۰۷	-/۷	
۴۴	N40-50	۴۰	۲۲۹/۵	۱۴۲	۳۰۴	۷۰۹	۷۷۴	۵۰	۲۳۰	-/۷	

۴-۲- جزئیات و نحوه انجام آزمایش

آزمایش مقاومت الکتریکی

آزمایش تعیین مقاومت الکتریکی بر اساس استاندارد ACI 222 [۴۷] بر روی آزمون مکعبی ۱۰۰ میلی متری در هر یک از سنین ۲۸، ۹۰ روزه انجام گرفت و همچنین فرکانس مورد استفاده در این آزمایش یک کیلو هرتز می باشد. این آزمون ها بعد از متراکم کردن با میز ویبره و قالب گیری، آزمون ها به مدت ۲۴ ساعت در شرایط استاندارد نگهداری شدند. پس از قالب برداری، آزمون ها در حوضچه آب قرار گرفتند. انجام این آزمایش از یک دستگاه اندازه گیری مقاومت الکتریکی استفاده شد. برای این منظور دو صفحه مسی به همراه لایه نازکی از خمیر سیمان کم اسلاپ در دو طرف آزمون اشباع با سطح مرطوب قرار داده شد، و مقاومت الکتریکی بین آن دو اندازه گیری شد (شکل ۲). برای تعیین مقاومت ویژه الکتریکی، مقاومت الکتریکی اندازه گیری شده در سطح مقطع آزمون ضرب و بر ارتفاع آن تقسیم گردید، که از فرمول شماره ۱ بدست می آید [۴۸].

$$\rho = R \frac{A}{H} \quad (1)$$

ρ : مقاومت ویژه الکتریکی (اهم متر)

R: مقاومت الکتریکی قرائت شده از دستگاه (اهم)

A (B*L): مساحت سطح آزمون (متر مربع)

H: ارتفاع آزمون (متر)

آزمایش عمق نفوذ آب

آزمایش عمق نفوذ آب تحت فشار طبق استاندارد BS EN-12390-8 [۴۹] برای ارزیابی نفوذ پذیری بتن در سن ۲۸ روزه استفاده شد. در این روش یک وجه نمونه‌ی استوانه‌ای ۱۵۰*۳۰۰ میلی متری، تحت آب با فشار ۰/۵ مگاپاسکال قرار داده می شود. این فشار برای ۷۲ ساعت اعمال می شود. پس از اتمام، نمونه‌ها از دستگاه خارج و به دو نیم تقسیم می شوند. سپس، با توجه به پروفیل نفوذ آب به بتن، حداکثر عمق نفوذ آب ثبت می شود و به عنوان شاخصی برای نفوذ پذیری بتن در نظر گرفته می شود. همچنین طبق استاندارد DIN1048 [۵۰] اگر میزان نفوذ آب در بتن کمتر از ۳ سانتی متر باشد، بتن با کیفیت خیلی خوب می باشد و اگر میزان نفوذ آب در بتن بین ۳ تا ۵ سانتی متر باشد، بتن با کیفیت خوب می باشد و بیشتر از ۵ سانتی متر برای کارهای مربوط به آب بندی و نفوذ ناپذیری مناسب نمی باشد. شکل ۳ دستگاه عمق نفوذ آب را نشان می دهد.



شکل ۳. دستگاه عمق نفوذ آب

شکل ۲. دستگاه مقاومت الکتریکی دو نقطه‌ای

آزمایش تعیین مقاومت در برابر ذوب و یخبندان

این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM C666 [۵۱] بر روی نمونه‌های منشوری که عرض و ارتفاع آن‌ها باید بین ۷۵ تا ۱۲۵ میلی‌متر و طولشان نیز باید بین ۲۷۵ تا ۴۰۵ میلی‌متر باشد، در سن ۲۸ روزه انجام شده است. با توجه به اینکه نمونه‌های اخذ شده از پانل به صورت مغزه استوانه‌ای بوده، به وسیله دستگاه برش داده شده و به ابعاد استاندارد منشوری تبدیل می‌گردند. تخریب نمونه‌ها با فرکانس رزونانس طبق استاندارد ASTM C215 [۵۲] تعیین می‌گردد، که نخستین معیار تخریب است. فرکانس‌های عرضی پایه در حداکثر هر ۳۶ دوره اندازه‌گیری می‌شود و برای محاسبه مدول الاستسیته دینامیکی نسبی به کار برده می‌شود که به شکل فرمول شماره ۲ محاسبه می‌گردد. نیز فاکتور دوام (DF) مقاومت در برابر ذوب و یخبندان به شکل فرمول شماره ۳ محاسبه می‌گردد. شکل ۴ دستگاه اندازه‌گیری فرکانس رزونانس طبق استاندارد ASTM C215 را نشان می‌دهد.

$$P_C = \left(\frac{n_1}{n}\right)^2 * 100 \quad (2)$$

PC: مدول الاستسیته دینامیکی نسبی، بعد از c چرخه یخ زدن-آب شدن است (بر حسب درصد).

n: فرکانس عرضی پایه در چرخه صفر

n1: فرکانس عرضی پایه بعد از c چرخه یخ زدن-آب شدن است

$$DF = \frac{PN}{M} \quad (3)$$

DF: فاکتور دوام نمونه

P: مدول الاستسیته دینامیکی نسبی، در N چرخه بر حسب درصد).

N: تعداد چرخه‌های که مدول الاستسیته دینامیکی نسبی به حداقل مقدار مشخصی که در آن باید آزمایش را قطع کرد یا تعداد چرخه‌های مشخصی که قرار گیری در معرض آزمایش به پایان می‌رسد، است (هر کدام که کمتر باشد).

M: تعداد چرخه‌های مشخصی که قرار گیری در معرض آزمایش به پایان می‌رسد



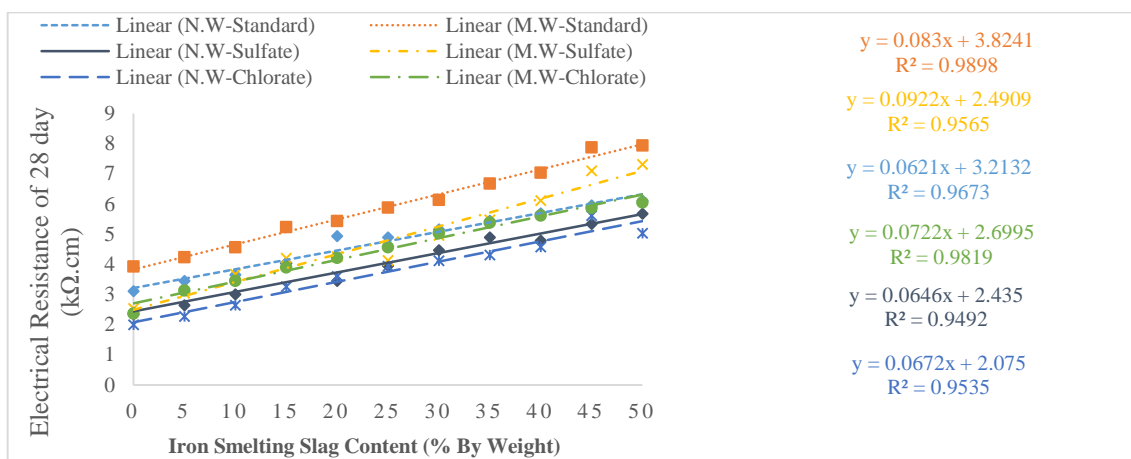
شکل ۴. دستگاه اندازه‌گیری فرکانس رزونانس طبق استاندارد ASTM C215

۳- نتایج آزمایش ها و تجزیه و تحلیل آن ها

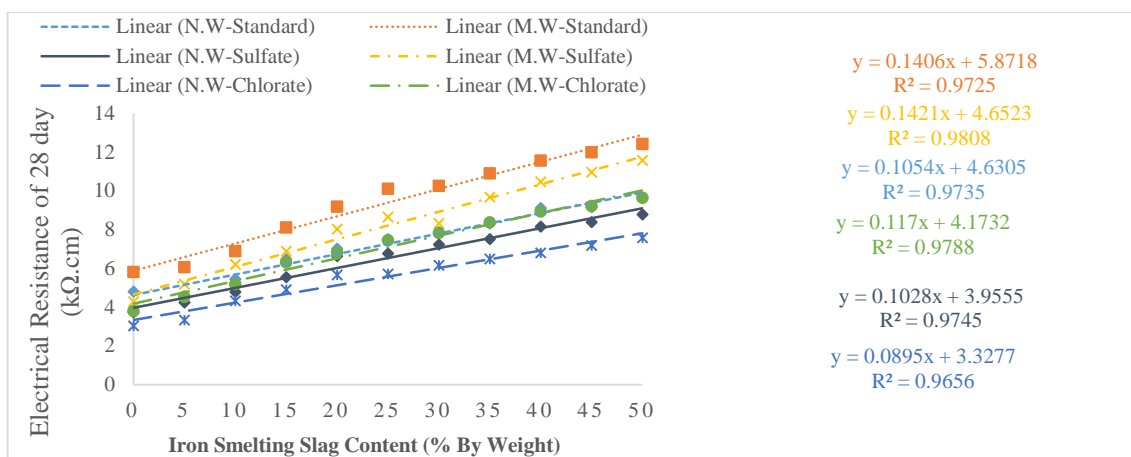
نتایج آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی

نتایج آزمون مقاومت ویژه الکتریکی با توجه به شرایط محیطی (کلراته، سولفات و حوضچه آب معمولی) قرار گرفته آزمونه‌ها نشان داد که، آب مغناطیسی به دلیل کاهش منافذ بتن و دفع ذرات سیمان از یکدیگر باعث افزایش مقاومت الکتریکی می‌شود. همچنین با افزایش درصد سرباره ذوب آهن، مقاومت ویژه الکتریکی افزایش می‌یابد. چون سرباره ذوب آهن باعث مصرف آب آهک موجود در بتن می‌شود که موجب افزایش ژل سیلیکاتی می‌گردد. در نتیجه از تخلخل موجود در بتن کاسته شده و نمونه بتنی متراکم‌تر می‌گردد. با افزایش سن، سرعت انجام واکنش‌ها (هیدراتاسیون و واکنش پوزولانی) در بتن کاهش یافته و از غلظت یون‌های موجود در بتن نیز کاسته می‌شود که این امر موجب افزایش مقاومت الکتریکی نمونه‌ها می‌گردد. با پیشرفت هیدراتاسیون سیمان و همچنین انجام واکنش پوزولان که هیدروکسید کلسیم تولیدی از هیدراتاسیون سیمان را مصرف می‌کند در مخلوط‌های بتنی، ژل سیلیکاتی افزایش یافته و موجب تراکم بیشتر در نمونه می‌گردد. در نتیجه عملاً میزان یون آزاد در نمونه کاهش می‌یابد و در نتیجه مقاومت الکتریکی نمونه افزایش خواهد یافت. بنابراین می‌توان انتظار داشت که با افزایش سن نمونه و پیشرفت هیدراتاسیون نمونه و همچنین انجام واکنش پوزولانی در طرح مخلوط‌ها، میزان مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شده افزایش یابد. لازم به ذکر است آزمونه‌های قرار گرفته شده در محیط سولفات نسبت به آزمونه‌های قرار گرفته شده در محیط کلراته بهتر عمل کرده و کاهش مقاومت الکتریکی کم‌تری نسبت به آزمونه‌های قرار گرفته در آب معمولی را داشتند. دلیل آن این است که بتن در محیط‌های کلراته نسبت به محیط‌های سولفات تخریب می‌گردد.

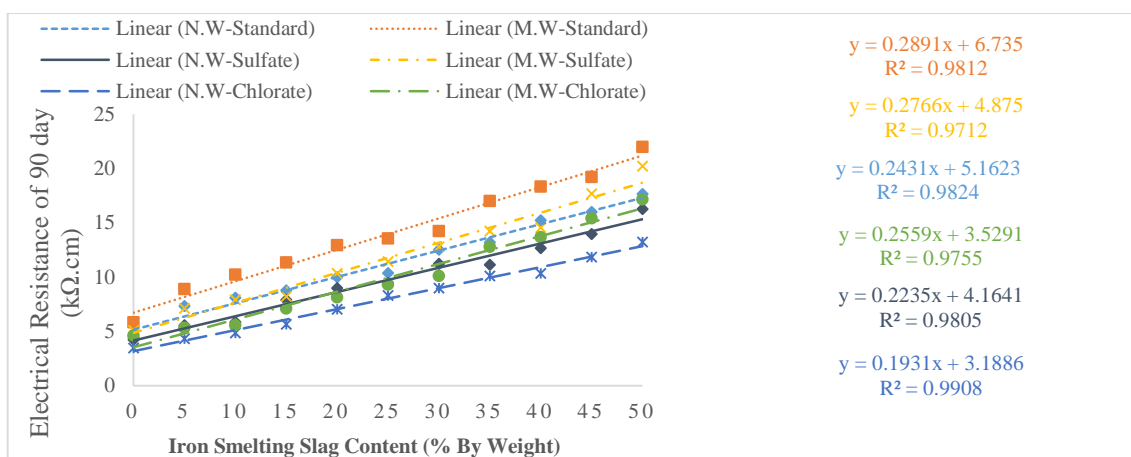
بر اساس نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت الکتریکی می‌توان گفت مقاومت الکتریکی در آزمونه‌ها بر اساس آیین‌نامه ACI222 در محدوده خوب قرار گرفته است. به عبارت بهتر می‌توان گفت که احتمال خوردگی در آزمونه‌ها ساخته شده با آب مغناطیسی با افزایش درصد سرباره ذوب آهن، کاهش می‌یابد [۵۳].



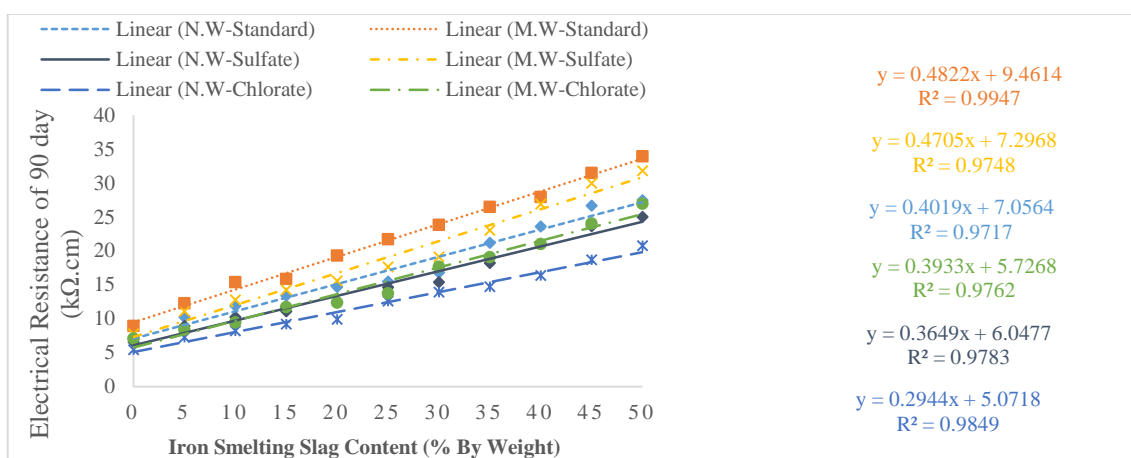
شکل ۵. مقاومت الکتریکی ۲۸ روزه بتن مغناطیسی ساخته شده با سرباره ذوب آهن و عیار ۲۵ مگاپاسکال



شکل ۶. مقاومت الکتریکی ۲۸ روزه بتن مغناطیسی ساخته شده با سرباره ذوب آهن و عیار ۴۰ مگاپاسکال



شکل ۷. مقاومت الکتریکی ۹۰ روزه بتن مغناطیسی ساخته شده با سرباره ذوب آهن و عیار ۲۵ مگاپاسکال



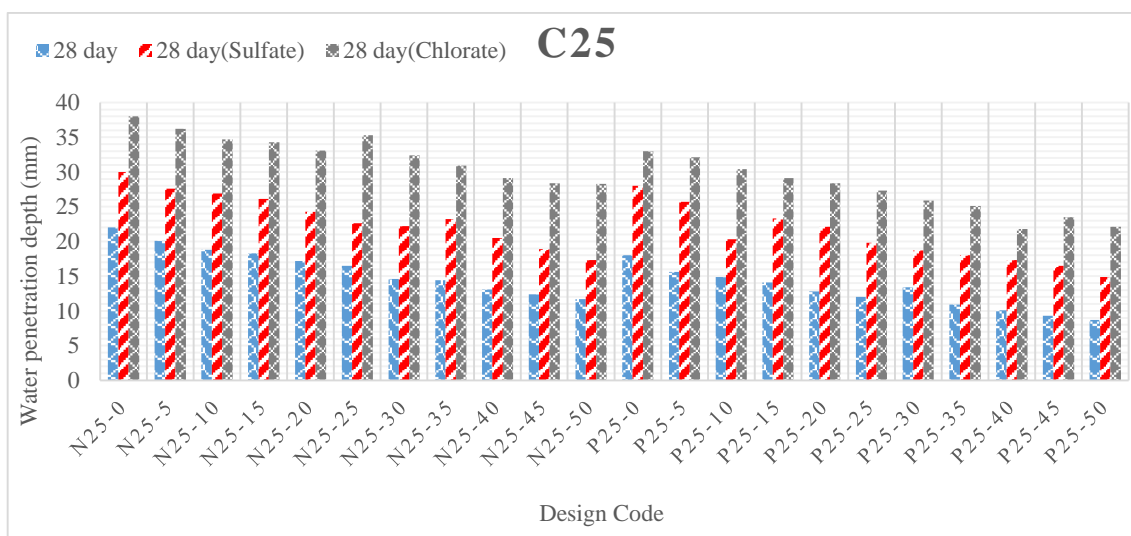
شکل ۸. مقاومت الکتریکی ۹۰ روزه بتن مغناطیسی ساخته شده با سرباره ذوب آهن و عیار ۴۰ مگاپاسکال

با توجه به نتایج مقاومت الکتریکی می توان دریافت که آزمون P40-50 دارای بیشترین مقاومت الکتریکی می باشد که استفاده از آب مغناطیسی و سرباره ذوب آهن (۵۰ درصد به جای سیمان) در سنین ۲۸ روزه باعث افزایش ۱۵۸ درصد و همچنین در سنین ۹۰ روزه باعث افزایش ۳۸۹ درصدی مقاومت الکتریکی گردیده است.

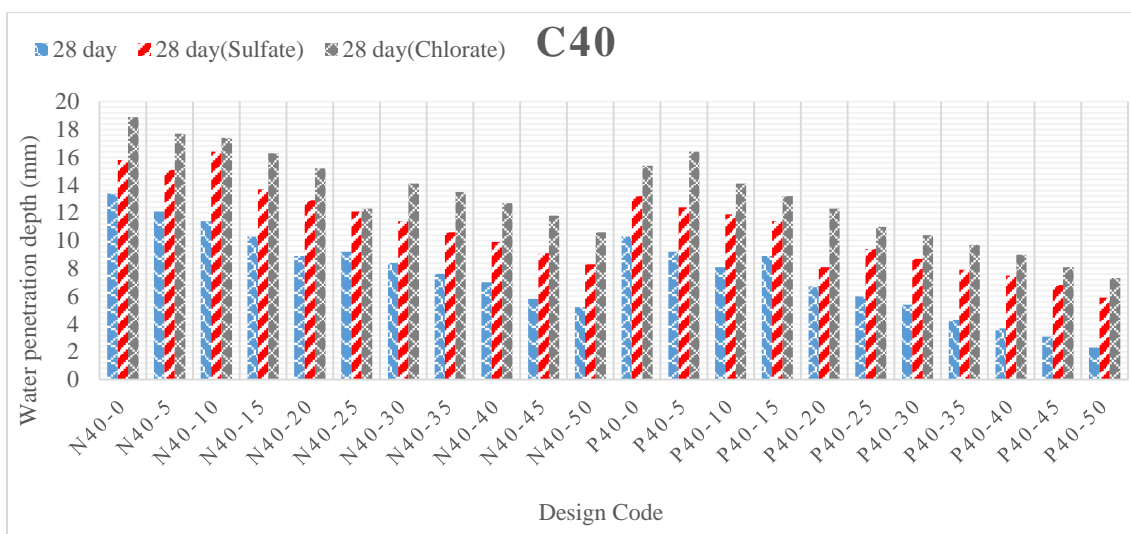
نتایج آزمایش عمق نفوذ آب

یکی از عوامل اصلی دوام بتن، نفوذپذیری آن می باشد. در این تحقیق آزمایش عمق نفوذ آب تحت فشار بر اساس BS EN-12390-8 برای ارزیابی نفوذپذیری بتن مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به نتایج عمق نفوذ آب می توان دریافت که آب مغناطیسی باعث کاهش عمق نفوذ آب می گردد. علت این امر کاهش یافتن تخلخل بتن هنگام استفاده از آب مغناطیسی است. در مورد سرباره ذوب آهن می توان گفت که با عمل پوزولانی و افزایش ژل سیلیکاتی در بتن باعث کاهش عمق نفوذ آب می گردد. لازم به ذکر است آزمون های قرار گرفته در محیط سولفات به نسبت به آزمون های قرار گرفته در محیط کلراته بهتر عمل کرده و افزایش عمق نفوذ آب کمتری نسبت به آزمون های قرار گرفته در آب معمولی را داشتند.

نتایج عمق نفوذ آب نشان می دهد که آزمون P40-50 دارای کمترین عمق نفوذ آب بوده و استفاده از آب مغناطیسی و سرباره ذوب آهن (۵۰ درصد به جای سیمان) در آن باعث کاهش ۸۳ درصد عمق نفوذ آب می گردد و همچنین آزمون N25-0 قرار گرفته در محیط کلراته دارای بیشترین عمق نفوذ آب می باشد؛ که ۷۲ درصد نسبت به آزمون قرار گرفته در آب معمولی دارای عمق نفوذ آب بیشتری است.



شکل ۹. عمق نفوذ آب نمونه ها ۲۵ مگاپاسکال



شکل ۱۰. عمق نفوذ آب نمونه ها ۴۰ مگاپاسکال

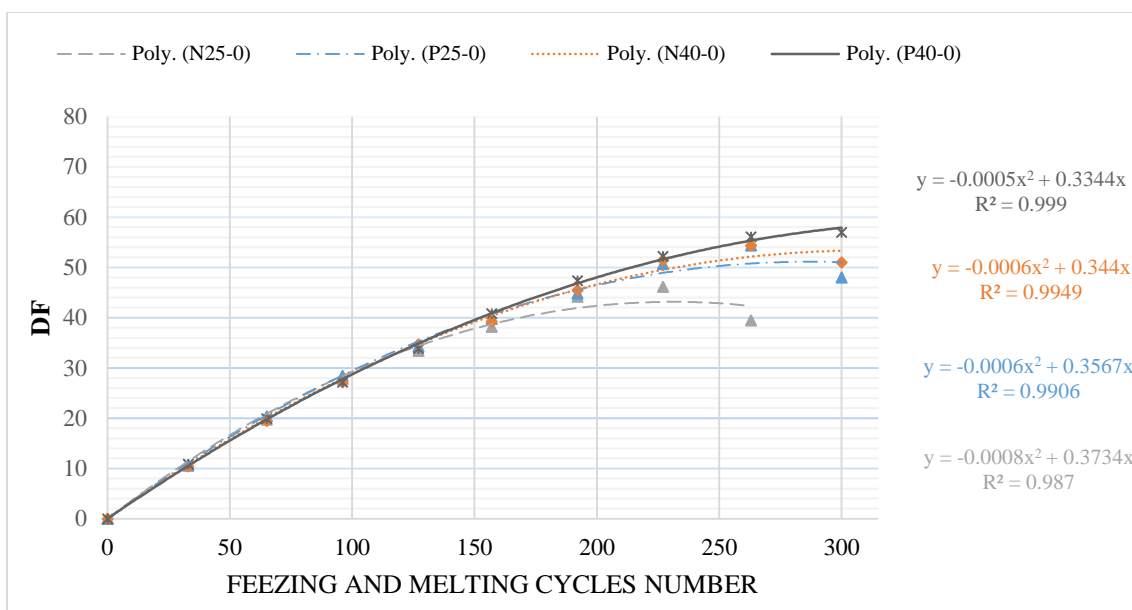
نتایج آزمایش مقاومت در برابر ذوب و یخبندان

با توجه به اهمیت موضوع تخریب سازه‌های بتنی بر اثر سیکل‌های یخ‌زدن و آب شدن، این یکی از مسائل مهم اساسی صنعت بتن سازی در مناطق سرد سیر محسوب می‌گردد. در این تحقیق تلاش جهت دستیابی به بتن مغناطیسی ساخته شده با خاکستر بادی و سرباره ذوب آهن مقاوم در برابر یخبندان در مناطق سردسیر شده است. لازم به ذکر است در آزمایش ذوب و یخبندان اگر مدول الاستیسیته دینامیکی بیشتر از ۴۰ درصد مدول الاستیسیته دینامیکی اولیه افت داشته باشد آزمایش متوقف می‌گردد. ضمن اینکه اگر تغییری در ظاهر نمونه اعم از ریزش لبه‌ها یا شکستن نمونه نیز اتفاق بیفتد آزمایش متوقف می‌گردد.

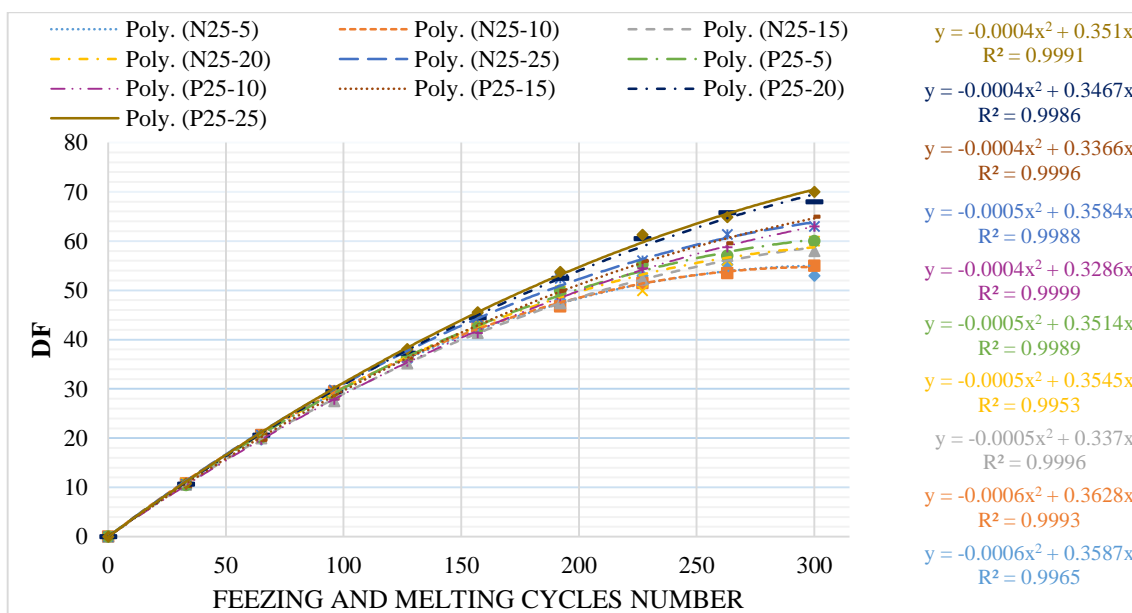
با توجه به نتایج شکل ۱۱ تا ۱۵ می‌توان دریافت که آب مغناطیسی و همچنین افزایش درصد سرباره ذوب آهن باعث افزایش تعداد سیکل‌ها و شاخص دوام در بتن می‌گردد. علت این امر به خاطر کاهش تخلخل در بتن و افزایش ژل‌های سیلیکاتی می‌باشد. همچنین افزایش مقاومت فشاری بتن از ۲۵ تا ۴۰ مگاپاسکال باعث افزایش تعداد سیکل‌ها و شاخص دوام در بتن می‌شود.

درمقایسه نتایج آزمایش عمق نفوذ آب با آزمایش ذوب و یخبندان به این نتیجه می‌رسیم که با کاهش عمق نفوذ آب، شاخص دوام بتن در آزمایش ذوب و یخبندان افزایش می‌یابد.

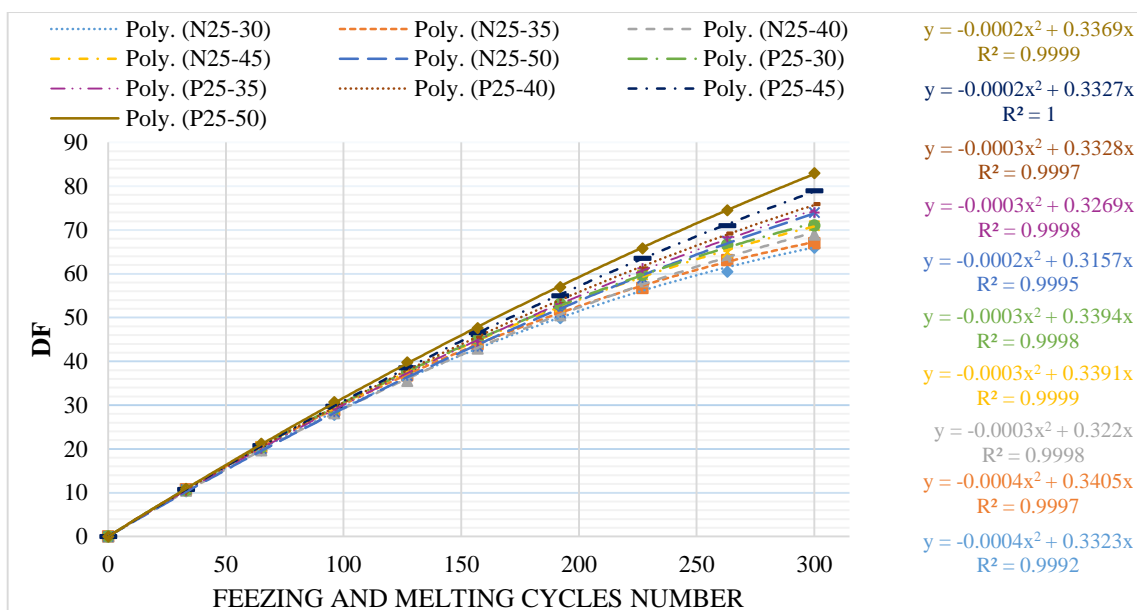
همچنین نتایج آزمایش ذوب و یخبندان نشان می‌دهند که آزمونه P40-50 با تعداد ۳۰۰ سیکل دارای بیشترین فاکتور دوام می‌باشد و استفاده از آب مغناطیسی و سرباره ذوب آهن (۵۰ درصد به جای سیمان) در آن باعث افزایش ۶۷ درصد فاکتور دوام می‌گردد و همچنین آزمونه N25-0 با تعداد ۲۶۳ سیکل دارای کمترین فاکتور دوام می‌باشد.



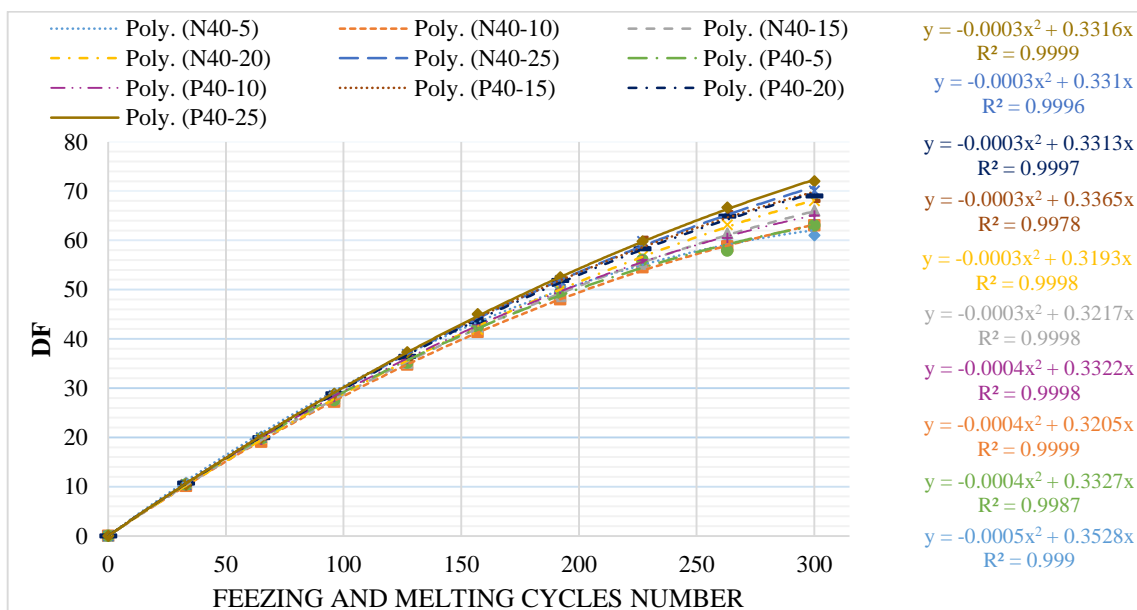
شکل ۱۱. میزان ذوب و یخبندان بتن بر حسب شاخص دوام در نمونه ها بدون پوزولان



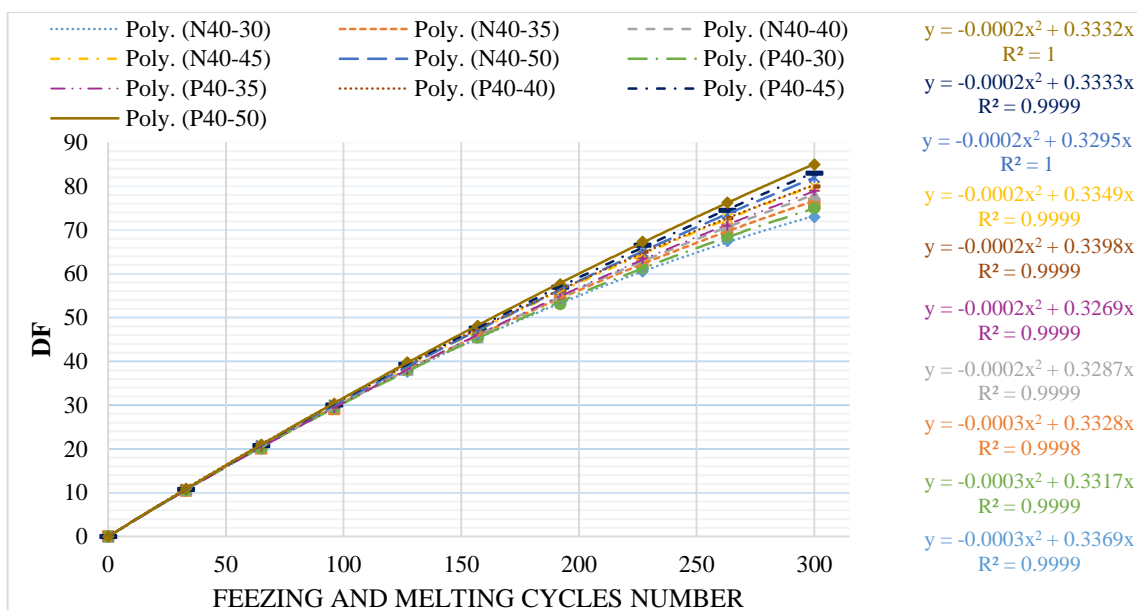
شکل ۱۲. میزان ذوب و یخبندان بتن بر حسب شاخص دوام در نمونه ها با سرباره ذوب آهن ۵ تا ۲۵ درصدی (۲۵ مگاپاسکال)



شکل ۱۳. میزان ذوب و یخبندان بتن بر حسب شاخص دوام در نمونه ها با سرباره ذوب آهن ۳۰ تا ۵۰ درصدی (۲۵ مگاپاسکال)



شکل ۱۴. میزان ذوب و یخبندان بتن بر حسب شاخص دوام در نمونه ها با سرباره ذوب آهن ۵ تا ۲۵ درصدی (۴۰ مگاپاسکال)



شکل ۱۵. میزان ذوب و یخبندان بتن بر حسب شاخص دوام در نمونه ها با سرباره ذوب آهن ۳۰ تا ۵۰ درصدی (۴۰ مگاپاسکال)

لازم به ذکر است برای بدست آوردن روابط مقاومت الکتریکی و روابط ذوب و یخبندان از الگوریتم های استفاده شده است که در اکثر موارد به دلیل پراکندگی داده ها، با استفاده از الگوریتم Linear دقت مورد نظر به دست نمی آید و R-Square آن پایین می باشد، به همین خاطر از الگوریتم Polynomial استفاده شده است که دارای R-Square بالا ۰٫۹ می باشد.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش تاثیر آب مغناطیسی بر روی دوام بتن های ساخته شده با سرباره ذوب آهن مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به تاثیر این پارامتر روی بتن از طریق داده های آزمایشی، نتایج زیر بدست آمدند:

- (۱) آب مغناطیسی باعث افزایش مقاومت ویژه الکتریکی در تمامی آزمون های ساخته شده با آن (آب مغناطیسی) گردیده است.
- (۲) افزایش درصد سرباره ذوب آهن منجر به افزایش مقاومت ویژه الکتریکی بتن می گردد؛ که با افزایش سن نمونه و پیشرفت هیدراتاسیون این روند بهتر قابل مشاهده است. همچنین افزایش مقاومت فشاری بتن از ۲۵ تا ۴۰ مگاپاسکال، مقاومت ویژه الکتریکی بتن نیز افزایش می یابد.
- (۳) با توجه به این که خوردگی فولاد مدفون در بتن با مقاومت الکتریکی رابطه عکس دارد، احتمال خوردگی فولاد مدفون در تمام آزمون ها با استفاده از آب مغناطیسی و همچنین افزایش درصد سرباره ذوب آهن کاهش می یابد.
- (۴) استفاده از آب مغناطیسی و افزایش درصد سرباره ذوب آهن در بتن باعث کاهش عمق نفوذ آب می گردد. همچنین افزایش مقاومت فشاری بتن از ۲۵ تا ۴۰ مگاپاسکال به کاهش عمق نفوذ آب شدت می بخشد.
- (۵) افزایش تعداد سیکل های ذوب و یخبندان و شاخص دوام بتن ارتباط مستقیمی با استفاده از آب مغناطیسی و افزایش درصد سرباره ذوب آهن در بتن دارد. همچنین افزایش مقاومت فشاری بتن از ۲۵ تا ۴۰ مگاپاسکال باعث افزایش تعداد سیکل های ذوب و یخبندان و شاخص دوام بتن می گردد.

۶) لازم به ذکر است آزمون‌های قرار گرفته شده در محیط سولفات‌ها نسبت به آزمون‌های قرار گرفته شده در محیط کلراته بهتر عمل کرده و کاهش مقاومت الکتریکی و افزایش عمق نفوذ آب کم‌تری نسبت به آزمون‌های قرار گرفته در آب معمولی را داشتند.

مراجع

- [1] Elahi, A. and Basheer, P.A.M and Nanukuttan, S.V, Khan, Q.U.Z., “Mechanical and durability properties of high performance concrete containing supplementary cementitious materials”; Construction and building materials; 27(2010)292-299.
- [2] Valipour, M and Pargar, F and Shekarchi, M and Khani, s., “Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study”. Construction and building materials; 41(2013) 879-888.
- [3] Zandi, Y., Effect of Mixture Composition on Washout Resistance of Highly Flow able Underwater Concrete , 2nd International FIB Congress- Naples- Italia 5-8 June 2006.
- [4] Ramezani-pour, A.A., Pilvar, A.R., Mahdikhani, M., Moodi, F., 2011, Practical Evaluation Of Relationship Between Concrete Resistivity, Water Penetration, Rapid Chloride Penetration And Compressive Strength , Construction and Building Materials, vol. 25, pp. 2472–2479.
- [5] Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M., Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 3rd ed. São Paulo: IBRACON; 2008. 674p.
- [6] Yoon-Seok, Ch., Jung Gu, k., Kwang-Myon., L., 2006, Corrosion behavior of steel bar embedded in fly ash concrete, Corrosion Science, No. 48, pp. , 1733-1745.
- [7] Zandi.Y, Concrete tests and interpretation of laboratory result concrete mixing design Tabriz: Forouzou Publication, first Edition, 2007 (in Persian)
- [8] Zandi.Y, 2009, " Advanced concrete technology" , Tabriz: Forouzou Publication, Second Edition (in Persian)
- [9] Won Song, Ha., Woo Pack, Seung., Hyeok Nam, Sang., Chul Jang, Jong. and Saraswathy, Velu., 2010, “ Estimation of the permeability of silica fume cement concrete ”, Construction and building material.
- [10] Guneyisi, E., Gesoslu, M., Strength , permeability and shrinkage cracking of silica fume and metakaolin concretes, Construction and Building Materials . Volume 34, September 2012 .
- [11] Vahidi,A ,MirAhmadi,M, Hassanzadeh,M , Zabetiyan,F , Investigation of Effective Factors on Concrete impermeability Studies ,Case Study of the First Iranian Concrete boat, International Conference on Impermeability Concrete of Drinking Water Tanks, 2011 (in Persian)
- [12] Powers, T.C., Structure and physical properties of hardened Portland cement paste, Ceramic Soc. Volume 41, Jan. 1958
- [13] Ericikdi, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H., Alp, I., Utilization of industrial waste products as pozzolanic material in cemented paste backfill of high sulphide mill tailings, J. Hazard. Mater. 168 (2009) 848–856.
- [14] Fais, B., Sabio, N., Strachan, N., The critical role of the industrial sector in reaching long-term emission reduction, energy efficiency and renewable targets, Appl. Energy 162 (2016) 699–712.
- [15] Rajamma, R., Ball, R.J., Tarelho, L.A.C., Allen, G.C., Labrincha, J.A., Ferreira, V.M., Characterisation and use of biomass fly ash in cement-based materials, J. Hazard. Mater. 172 (2009) 1049–1060
- [16] Embong, R., Kusbiantoro, A., Shafiq, N., Nuruddin, M.F., Strength and microstructural properties of fly ash based geopolymer concrete containing high-calcium and waterabsorptive aggregate, J. Clean. Prod. 112 (2016) 816–822.

- [17] Siddique, R., Jameel, A., Singh, M., Barnat-Hunek Kunal, D., Ait-Mokhtar, A., Belarbi, R., Rajor, A., Effect of bacteria on strength, permeation characteristics and micro-structure of silica fume concrete, *Constr. Build. Mater.* 142 (2017) 92–100.
- [18] Khan, M.I., Siddique, R., 2011, Utilization of silica fume in concrete: Review of durability properties. *Resources, Conservation and Recycling*, 57, 30-35.
- [19] de Sensale, G.R., 2006, Strength development of concrete with rice-husk ash. *Cement and concrete composites*, 28(2), 158-160.
- [20] Bouikni, A., Swamyb, R.N., Bali, A., Durability properties of concrete containing 50% and 65% slag. *Construction and Building Materials* (2009)
- [21] J.M.R. Dotto, A.G. de Abreu, D.C.C. Dal Molin, I.L. Muller., Influence of silica fume addition on concretes physical properties and on corrosion behaviour of reinforcement bars. *Cement & Concrete* 26 (2004) 31–39
- [22] Wei H, Wang Y, Luo J. Influence of magnetic water on early-age shrinkage cracking of concrete. *Constr Build Mater* 2017;147(1):91–100. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.140>.
- [23] Nan Su, Yeong-Hwa Wu, Chung-Yo Mar, Effect of magnetic water on the engineering properties of concrete containing granulated blast-furnace slag, *Cem. Concr. Res.* 30 (2000) 599–605. 1.1016/S0008-8846(00)00215–5.
- [24] S. Singh, S. Naval, Effect of magnetic water on the engineering properties of self compacting concrete using binary and ternary blends, *Int. J. Sci. Managment. Technol.* 9 (1) (2016)
- [25] Su, N., Wu, Ch.F., Mar, Ch.Y., Effect of magnetic field treated water on mortar and concrete containing fly ash, *Cement and concrete research* 25,(2003) 681-688
- [26] Afshin, H., Gholizadeh, M., Khorshidi, N., Improving mechanical properties of high strength concrete by magnetic water technology, *Sci. Iranica* 17 (1) (2010) 74–79.
- [27] Khorshidi, N., Ansari, M., Bayat, M., An investigation of water magnetization and its influence on some concrete specificities like fluidity and compressive strength, *Comput. Concr.* 13 (5) (2014) 649–657. 10.12989/cac.2014.13.5.649.
- [28] Pradnya Ubale, Rahul D. Pandit, and Abhijeet P. Wadekar, Performance Evaluation of Magnetic Field Treated Water on Convectional Concrete Containing Fly Ash, *International Journal of Science Technology and Management*, 5(2) (2016) 68-77.
- [29] Zou, Chao., song Jiang, Yu., Experimental research on the physical mechanic performances of magnetized concrete, *West China Explor. Eng.* 7 (2006) 118.
- [30] jiu Wang, Li., Zhi Li, Hui., Present research and development of the concrete with magnetized water, *Res. Appl. Build. Mater.* 1 (2007) 13–18.
- [31] Feng Pang, Xiao., Zhu, X.S., The influences of magnetized water on physical properties of concrete, *International Conferenc on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices IEEE* (2011) 270–274.
- [32] Bhatath, S., Subraja, S., Arun Kumar, P., Influence of magnetized water on concrete by replacing cement partially with copper slag, *J. Chem. Pharmaceutical Sci.* 9 (4) (2016).
- [33] Siva Konda Reddy , B., Ghorpade, V.G., Sudarsana Rao, H., Influence of Magnetic Water on Strength Properties of Concrete ndian *Journal of Science and Technology*, Vol 7(1), 14–18, January 2014
- [34] Jain, A., Laad, A., Singh, K.Ch., Murari, K., Effect of Magnetic Water on Properties of Concrete, *International Journal of Engineering Science and Computing*, May 2017, Volume 7 Issue No.5
- [35] Weilin, S., Yun, L., Hanzhao, H., Quingwang, L., Effects of magnetic treatment on properties of cement slurry, *Society of Petroleum Engineers of AIME*, (Paper) SPE (1992).
- [36] Pang, X.F., Deng B., 2009, Investigation of magnetic-field effects on water. *international Conference on applied superconductivity and electronic devices* 25-27.

- [37] Su, N., Wu, Y.H, Mar, Ch.Y., Effect of magnetic water on the engineering properties of concrete containing granulated blast-furnace slag, *Cement and Concrete Research* Volume 30, Issue 4, April 2000, Pages 599-605
- [38] Srinivasa Reddy, V., Kranthi Kumar, A., Sumanth, A., Effect of Magnetic Field Treated Water on Fresh and Hardened Properties of Concrete, *Journal of Civil Engineering and Environmental Technology* p-ISSN: 2349-8404; e-ISSN: 2349-879X; Volume 4, Issue 2; April-June, 2017, pp. 134-138
- [39] ASTM C150, Standard Specification for Portland Cement
- [40] ASTM C494, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete
- [41] ASTM C989, Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars
- [42] ASTM C33, Standard Specification for Concrete Aggregates
- [43] Fitzgerald, A.E., Charles Kingsley, JR., Umans, S.D., *Electric Machinery*. 6th Edition
- [44] Sung Yao, Wu., Rapid Optimization of Double-Stators Switched Reluctance Motor with Equivalent Magnetic Circuit, *Energies* 2017, 10(10), 1603; <https://doi.org/10.3390/en10101603>
- [45] ACI C211.1-91, Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete
- [46] ASTM C192, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory
- [47] ACI-222R-01 Protection of Metals in Concrete Against Corrosion Reported by ACI Committee 222
- [48] COST 509, Corrosion and Protection of Metals in Contact with Concrete, Final report, R. N. Cox, R. Cigna, O. Vennesland, T. Valente (Eds.), European Commission, Directorate General Science, Research and Development, Brussels, EUR 17608 EN, 1997.
- [49] Bs En 12390-8 Testing Hardened Concrete, Part 8 Depth Of Penetration Of Water Under Pressure
- [50] DIN 1048-5:1991, Testing Concrete; Testing Of Hardened Concrete (Specimens Prepared In Mould).
- [51] ASTM C666, Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing
- [52] ASTM C215, Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens.