

ارزیابی دوام بتن غلتکی حاوی خاکستر پسماند زغال سنگ و فاقد افزودنی هوازا در برابر اثرات

مخرب نمک‌های یخ‌زدا

سید علیرضا محمدی راد، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، مازندران، بابل

امیر مدرس*، نویسنده مسئول، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، مازندران، بابل

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: a.modarres@nit.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۶/۰۶/۲۰ - پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۱۵

صفحه ۱۴۷-۱۶۴

چکیده

هدف از این پژوهش امکان‌سنجی بکارگیری خاکستر پسماند زغال سنگ بجای بخشی از سیمان در بتن غلتکی روسازی راه و بررسی دوام آن در برابر تاثیر نمک‌های یخ‌زدا می‌باشد. در این تحقیق، از ۴ ترکیب مختلف برای ساخت نمونه‌های بتن غلتکی استفاده گردید. مقدار سیمان مخلوط کنترلی فاقد خاکستر پسماند زغال سنگ، ۱۴٪ وزن کل مصالح خشک انتخاب شد. در سایر مخلوط‌ها از خاکستر پسماند زغال سنگ به مقدار ۲، ۳ و ۴ درصد وزن کل مصالح خشک استفاده شد. برای ارزیابی دوام، آزمایش‌های مقاومت در برابر نفوذ یون کلر، مقاومت پوسته‌شدن سطح ناشی از نمک یخ‌زدا و مقاومت در برابر سیکل‌های انجماد و ذوب در حضور محلول نمک انجام شد. مخلوط حاوی ۳ و ۴ درصد خاکستر پسماند به ترتیب بیشترین و کمترین مقاومت را در برابر نفوذ یون کلر از خود نشان دادند. در انتهای آزمایش پوسته شدن سطح نتایج به دست آمده از نمونه‌های حاوی ۲ و ۳ درصد خاکستر پسماند مشابه نمونه کنترلی بود. همچنین نتایج آزمایش مقاومت در برابر سیکل‌های انجماد-ذوب حاکی از رفتار بسیار مناسب نمونه‌های کنترلی و حاوی ۲ و ۳ درصد پسماند خاکستر بوده‌است. در حالی که نمونه حاوی ۴ درصد از این ماده پس از ۱۸۰ سیکل کاهش قابل توجهی در مدول الاستیسیته دینامیکی از خود نشان داد. مطابق نتایج، بکارگیری ۲ و ۳ درصد خاکستر پسماند زغال سنگ مقاومت قابل قبولی در برابر اثرات یخ‌زدگی بلند مدت و در حضور نمک یخ‌زدا بدست می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: بتن غلتکی، خاکستر پسماند زغال سنگ، دوام، نمک یخ‌زدا

۱- مقدمه

[2007]. برای پیشگیری از وقوع این خرابیها، تحقیقات زیادی در رابطه با ارتقاء دوام بتن در برابر سیکل‌های متناوب یخبندان و ذوب یخ و همچنین مواد شیمیایی یخ‌زدا انجام گرفته است. نتایج پژوهشی آزمایشگاهی بیانگر ارتقاء مقاومت در برابر آسیب‌های ناشی از یخ‌زدگی و همچنین پوسته‌شدن سطح بتن با بکارگیری الیاف تقویتی می‌باشد. بر اساس نتایج این تحقیق، الیاف فلزی اثر بخشی بیشتری نسبت به الیاف پلی‌پروپیلن دارند. همچنین الیاف کوتاه‌تر با انتهای صاف نسبت به الیاف بلند و انتهای قلاب شده، نقش بهتری ایفا می‌نماید [Berkowski, and Kazberuk, 2015]. در پژوهشی سیمان پرتلند تیپ I، خاکستر بادی نوع F و پسماند شیشه بدست آمده از کارخانه برش شیشه بعنوان ماده چسبنده بکار گرفته شد. نمونه حاوی ۲۰٪ خاکستر بادی بجای بخشی از سیمان، بعنوان مخلوط کنترلی استفاده گردید. مطابق نتایج، بکارگیری همزمان ۱۰٪ پسماند شیشه و ۱۰٪ خاکستر بادی در مقایسه با مخلوط کنترلی، در برابر سیکل‌های انجماد و ذوب در حضور نمک یخ‌زدا، نفوذ یون کلر و پوسته‌شدن، مقاومت بیشتری بدست می‌دهد [Kim et al. 2014]. در پژوهشی مخلوط‌های بتن با مقاومت بالا و معمولی به ترتیب با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۳۳ و ۰/۴۵ و با درصدهای مختلف افزودنی هوازا تهیه شدند. نتایج بیانگر نقش حیاتی افزودنی

در طراحی روسازی علاوه بر موضوع مقاومت، توجه به بحث دوام حائز اهمیت می‌باشد. عوامل محیطی مستقیماً بر دوام روسازی اثر می‌گذارند. بعنوان مثال دوره‌های متناوب یخبندان و ذوب یخ در اثر بارش برف، در درازمدت سبب زوال و خرابی روسازی راه‌ها می‌گردد. رایج‌ترین روش برای یخ‌زدایی سطح روسازی، استفاده از نمک‌های یخ‌زدا می‌باشد. بعنوان مثال، کشور کانادا سالانه حدود ۵ میلیون تُن نمک جهت عملیات یخ‌زدایی با صرف هزینه‌ای بالغ بر ۱ میلیارد دلار، استفاده می‌نماید [Hossain, and Fu, 2015]. ایالات متحده سالانه در حدود ۲ میلیارد دلار بطور مستقیم برای عملیات یخ‌زدایی، و همچنین ۵ میلیارد دلار هزینه غیر مستقیم برای خرابیهای ناشی از نمک‌های یخ‌زدا و آسیب‌های زیست محیطی آن صرف می‌نماید [Blackburn et al. 2004]. سیکل‌های یخبندان و ذوب یخ و همچنین عملیات نمک پاشی سبب پیدایش خرابیهایی نظیر بیرون پریدگی و پوسته‌شدن سطح می‌گردد. بیرون پریدگی در اثر چرخه‌های متناوب یخبندان و ذوب یخ همراه با انبساط دانه‌ها و جدا شدن تکه‌های کوچک بتن از سطح روسازی می‌باشد. پوسته‌شدن سطح در اثر یخ زدن لایه نازکی از محلول نمک روی سطح بتن رخ می‌دهد. این پدیده شامل جدا شدن تکه‌های کوچک ورقه‌ای و پولکی شکل از سطح بتن می‌باشد [Valenza, and Scherer,]

هوازا در جلوگیری از آسیب‌های ناشی از یخ‌زدگی می‌باشد. در نمونه‌های بتن با مقاومت بالا و فاقد افزودنی هوازا، پوسته‌شدن سطح همراه با خرابی یخ‌زدگی داخلی رخ داده است. درحالی‌که نمونه‌های بتن با مقاومت بالا و حاوی مقدار مناسب افزودنی هوازا نسبت به نمونه‌های با مقاومت معمولی، پوسته‌شدن کمتری دارند. بتن با مقاومت بالا و نفوذپذیری کاهش یافته، مستعد به تشکیل ترک‌های داخلی ناشی از فشار هیدرولیکی در اثر یخ‌زدگی مداوم می‌باشد [Liu, and Hansen, 2016]. مطابق نتایج پژوهشی، مخلوط‌های بتنی حاوی سیمان آمیخته در مقایسه با مخلوط‌های دیگر مقاومت بیشتری در برابر خوردگی دارند. افزودنی هوازا در مخلوط‌های بتنی سبب کاهش عمق نفوذ آب در مقایسه با مخلوط‌های فاقد افزودنی هوازا می‌گردد. حضور این حباب‌های هوا از عریان‌شدگی و آب انداختگی سطحی بتن جلوگیری نموده و مقاومت در برابر پوسته‌شدن سطح را افزایش می‌دهد. مخلوط دارای حباب‌های هوا و سیمان آمیخته بیشترین مقاومت در برابر پوسته‌شدن سطح را نشان می‌دهد [Ramezani pour et al, 2014].

در تحقیقی تاثیر نسبت‌های مختلف آب به سیمان، مقادیر مختلف خاکستر بادی و افزودنی هوازا بر آسیب‌های ناشی از یخ‌زدگی در حضور نمک بررسی گردید. بر اساس نتایج، با افزایش نسبت آب به سیمان مقاومت در برابر یخ‌زدگی و حضور نمک کاهش می‌یابد. این پژوهش با توجه به ملاحظات مقاومت در برابر یخ‌زدگی و حضور نمک، نسبت آب به سیمان بیشتر از ۰/۴۲ را توصیه نمی‌نماید. با توجه به نتایج این تحقیق و ملاحظات دوام، مقدار خاکستر بادی بیشتر از ۳۰ درصد توصیه نمی‌گردد. همچنین ملاحظه گردید که دوام بتن در برابر شرایط یخ‌زدگی و حضور نمک با افزایش مقدار هوازایی، ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. این پژوهش مقدار بحرانی هوازایی را ۴/۸ درصد بدست آورد [Sun et al, 2012]. مطابق نتایج تحقیقی، نمونه‌های ۲۸ و ۹۱ روزه حاوی خاکستر بادی و مقدار کل ماده چسبنده معادل 450 kg/m^3 و با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵، مقاومت قابل قبولی در برابر پوسته‌شدن ناشی از نمک یخ‌زدا دارند. ایجاد مقدار کافی هوازایی مصنوعی، برای به حداقل رساندن پوسته‌شدن سطح ناشی از نمک ضروری است [Heede et al. 2013]. ضرورت هوازایی و استفاده از میکروالیاف مصنوعی بر مقاومت بتن حاوی سیمان سرباره‌ای در برابر نمک یخ‌زدا در تحقیقی به اثبات رسید. مطابق نتایج، بتن حاوی سیمان سرباره آهن‌گدازی و فاقد افزودنی هوازا در مقایسه با بتن با سیمان معمولی مقاومت کمتری در برابر نمک یخ‌زدا دارند. نتایج این تحقیق نشان داد، ۶-۵ درصد هوازایی حتی در نسبت‌های آب به سیمان نسبتاً بالا، مقاومت بالایی در برابر نمک یخ‌زدا بدست می‌دهد. همچنین افزودن الیاف‌های پلی‌پروپیلن برای دستیابی به مقاومت مطلوب در برابر نمک یخ‌زدا بسیار موثر می‌باشد [Deja, j. 2003].

کم بودن مقاومت در برابر پوسته‌شدن سطح ناشی از حضور نمک یخ‌زدا، می‌تواند به دلیل کم بودن جذب آب سطحی بتن باشد. بر اساس نتایج پژوهشی، صاف نمودن و پرداخت سطح بتن توسط میله چوبی نسبت به میله فلزی عملکرد بهتری در مقابل پوسته‌شدن سطح توسط نمک یخ‌زدا بدست می‌دهد [Urban et al. 2014]. مطابق نتایج پژوهشی، بتن حاوی سیمان سرباره‌ای و فاقد کندگیبر کننده بیشترین مقاومت در برابر انجماد و ذوب و همچنین پوسته‌شدن سطح در حضور نمک را بدست می‌دهد. مشخص گردید استفاده از افزودنی کندگیبر کننده مقاومت در برابر انجماد و ذوب و پوسته‌شدن ناشی از نمک را کاهش می‌دهد [Skripkiūnas et al. 2013].

تمرکز پژوهش آزمایشگاهی کنونی بر بررسی دوام بتن‌گلتکی روسازی^۱ حاوی خاکستر پسماند زغال‌سنگ^۲ در برابر خرابیهای ناشی از یخ‌زدگی و نمک یخ‌زدا می‌باشد. بتن‌گلتکی روسازی مخلوط سفت و نسبتاً خشک حاوی سنگدانه با حداکثر قطر اسمی ۱۹ میلیمتر، آب و سیمان می‌باشد. بتن‌گلتکی ویژه روسازی دارای اسلامپ صفر یا نزدیک به صفر است [ACI 325.10R-95, 2001]. بتن‌گلتکی برای کاربرد روسازی در حالت تازه با بتن معمولی متفاوت بوده و بسیار سفت‌تر و کارایی آن به مراتب کمتر می‌باشد. در حالت سخت شده بتن‌گلتکی روسازی از بسیاری جهات مشابه بتن معمولی است و پارامترهای اصلی تاثیرگذار روی خواص بتن معمولی مانند نسبت آب به سیمان و میزان تراکم، تاثیر مشابه روی خواص بتن‌گلتکی روسازی دارند. خصوصیات دوام بتن‌گلتکی در برابر شرایط یخبندان و ذوب یخ و یا شرایط حضور مواد شیمیایی یخ‌زدا در چندین پژوهش در گذشته بررسی گردید. در پژوهشی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد سیمان نمونه‌های بتن‌گلتکی با خاکستر بادی جایگزین گردید. همچنین تعدادی نمونه از طریق جایگزینی خاکستر بادی معادل ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد وزنی سیمان بجای بخشی از سنگدانه ساخته شد. نتایج نشان داد که با افزایش درصد جایگزینی سیمان با خاکستر بادی، جذب آب و مقدار حفرات نفوذپذیر افزایش می‌یابد. اما همین پارامترها با افزایش درصد جایگزین خاکستر بادی بجای بخشی از سنگدانه، روند کاهش دارند. استفاده از خاکستر بادی بجای بخشی از سیمان در مقایسه با مخلوط کنترلی، سبب کاهش مدول الاستیسیته دینامیکی در سیکل‌های انجماد و ذوب می‌شوند. اما جایگزینی خاکستر بادی بجای بخشی از سنگدانه منجر به ارتقاء مدول الاستیسیته دینامیکی در سیکل‌های انجماد و ذوب می‌گردد [Aghabaglou et al. 2013].

تحقیقی با هدف ارزیابی تاثیر بکارگیری مواد پوزولانی مختلف شامل پوزولان‌های طبیعی، خاکستر بادی و میکروسیلیس بر خصوصیات دوام بتن‌گلتکی فاقد افزودنی هوازا صورت گرفت. نتایج نشان می‌دهد که مواد پوزولانی بطور کلی سبب ارتقاء استحکام بتن‌گلتکی می‌گردد. همچنین مقاومت در برابر پوسته‌شدن ناشی از حضور نمک یخ‌زدا با بکارگیری میکروسیلیس ارتقاء می‌یابد. با کاهش مدت زمان یخ‌زدن در سیکل‌های انجماد و ذوب، پوسته‌شدن ناشی از نمک کاهش می‌یابد [Zaheri, and Nili, 2011]. تاثیر مقادیر مختلف سیمان در محدوده $100-450 \text{ kg/m}^3$ و افزودنی هوازا بر خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و دوام بتن‌گلتکی در پژوهشی بررسی گردید. مطابق نتایج، افزایش سیمان تا مقدار 225 kg/m^3 موجب ارتقاء مقاومت فشاری، مقدار حفرات نفوذپذیر و جذب آب می‌شود. برای مقادیر سیمان بیش از 225 kg/m^3 ، روند ارتقاء خصوصیات ذکر شده کاهش می‌یابد. این تحقیق مقدار بهینه سیمان را $225 \pm 25 \text{ kg/m}^3$ بدست آورد. ملاحظه گردید که افزودنی هوازا در مخلوط‌های بتن‌گلتکی تاثیر مثبت بر مقاومت در برابر سیکل‌های انجماد و ذوب دارند [Hazaree et al. 2011]. در پژوهشی خاکستر بادی بجای بخشی از سیمان و معادل ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد وزن سیمان در بتن‌گلتکی استفاده گردید. مطابق نتایج در سنین عمل‌آوری پایین، مخلوط کنترلی فاقد خاکستر بادی کمترین میزان نفوذ یون کلر را دارد. در سنین عمل‌آوری بالا مخلوط‌های حاوی خاکستر بادی مقاومت در برابر نفوذ یون کلر بیشتری نشان می‌دهند. کمترین میزان نفوذ یون کلر برای مخلوط ۹۱ روزه حاوی ۳۰٪ خاکستر بادی بدست آمد [Won et al. 2009]. پژوهش کنونی تلاش دارد در کنار پرداختن به جنبه فنی بررسی دوام روسازی بتن‌گلتکی، با بکارگیری یک ماده پسماند رویکرد زیست محیطی را نیز

دنبال نماید. استفاده از ماده پسماند دارای خاصیت پوزولانی بعنوان جایگزین بخشی از سیمان می‌تواند دستیابی به اهداف فنی و زیست محیطی این پژوهش را میسر سازد. نتایج پژوهش‌های آزمایشگاهی پیشین حاکی از وجود ترکیبات پوزولانی در پسماند زغال‌سنگ^۲ و خاکستر آن می‌باشد [Modarres et al. 2015, Modarres, and Rahmanzadeh, 2014, Hesami et al. 2016, Modarres, and Nosoudy, 2015, Modarres, and Ayar, 2014]. علیرغم نقش تعیین کننده زغال‌سنگ در تأمین انرژی، نگرانی‌های زیست محیطی فراوانی در خصوص استفاده از این ماده وجود دارد. در مراحل استخراج، آماده سازی، ارتقاء کیفیت و حتی پس از استفاده بعنوان سوخت در نیروگاه (به دلیل تولید مقدار فراوان خاکستر) آسیب‌های زیست محیطی اجتناب ناپذیر می‌باشد. در اثر وقوع حادثه در کارخانه‌ای با سوخت زغال‌سنگ در کینگستون تنسی در سال ۲۰۰۸، آلودگی آب توسط فلزات سنگین سمی نظیر آرسنیک، سرب، تالیوم، باریم، کادمیم، کروم، جیوه و نیکل مشاهده گردید [Gottlieb et al. 2010]. با توجه به محل استخراج زغال‌سنگ، گازهای سمی موجود در خاکستر آن متفاوت می‌باشد. اما در غالب موارد حضور فلزات سمی جیوه و سلنیم در آن محرز است [U.S. Environmental Protection Agency, 2010]. فرآوری و ارتقاء کیفیت زغال‌سنگ غالباً شامل موارد الک کردن، دانه‌بندی، شست و شو، خرد کردن و جداسازی و کاهش مواد معدنی موجود مانند خاکستر و گوگرد است. فرآوری زغال‌های با اندازه متوسط و درشت توسط روش پر عیار سازی ثقلی^۴ و همچنین فرآوری زغال‌سنگ‌های ریز از طریق روش فلوتاسیون^۵ صورت می‌پذیرد [Laskowski, 2001]. در اطراف اغلب کارخانه‌های زغالشویی مقادیر بسیار زیادی از پسماند مشاهده می‌گردد. این پسماندها غالباً حاوی سولفید آهن یا پیریت می‌باشد. قرارگیری سولفید آهن و پیریت موجود در پسماند زغال‌سنگ در مجاورت اتمسفر یا آب، احتمال اکسید شدن و تولید زهاب اسیدی^۶ را افزایش می‌دهد [Moradzadeh et al. 2007]. زهاب اسیدی بواسطه PH پایین، غلظت بالای فلزات سنگین و مواد سمی دیگر، آبهای سطحی و زیرسطحی و همچنین خاک را به شدت آلوده می‌نماید [Akcil, and Koldas, 2006]. در اطراف کارخانه زغالشویی البرز مرکزی واقع در شمال ایران، در حدود ۲-۱/۵ میلیون تن پسماند زغال‌سنگ دپو گردیده که ارتفاع این دپو ۱۰ تا ۵۰ متر می‌باشد. با توجه به شرایط اقلیمی بارانی و مرطوب این ناحیه، این پسماندها منجر به مشکلات متعدد زیست محیطی شامل جریان یافتن زهاب اسیدی به هنگام بارش باران، آلودگی آبهای سطحی و زیرسطحی شده است [Modarres et al. 2015, Shahhoseiny et al. 2013]. لذا رویکرد زیست محیطی بمنظور بکارگیری این مواد در صنعت راهسازی برای کاهش آلودگی محیط، در کنار بحث فنی از اهداف مهم پژوهش کنونی است. در این پژوهش خاکستر پسماند زغال‌سنگ بجای بخشی از سیمان در روسازی بتن‌گلتکی استفاده می‌گردد. صنعت سیمان بعنوان یکی از بزرگترین منابع انتشار گاز CO₂ در اتمسفر می‌باشد. بطور مثال مقدار گاز CO₂ ناشی از تولید کلینکر سیمان پس از یک رشد ۴/۸ درصدی در سال ۲۰۱۲، افزایش ۷/۴ درصدی را در سال ۲۰۱۳ تجربه نموده است. این موضوع تا حدود زیادی ناشی از افزایش ۹/۳ درصدی تولید سیمان در چین می‌باشد [Oliver et al. 2014]. استفاده از مواد جایگزین سیمان و همچنین پسماندهای دارای خواص پوزولانی در بتن، بعنوان راه حلی برای این مشکل زیست محیطی پیشنهاد می‌گردد. پودر پسماند زغال‌سنگ دارای ترکیبات پوزولانی شامل سیلیکا و آلومینا بوده و مشخصاتی مشابه مواد پوزولانی نوع F

دارد [Modarres, and Rahmanzadeh, 2014]. تعداد محدودی پژوهش آزمایشگاهی در رابطه با استفاده از پسماندهای زغال‌سنگ در بتن معمولی و بتن‌گلتکی انجام شده است. مطابق نتایج پژوهشی، در سنین عمل‌آوری پایین نظیر ۲۸ روز نمونه‌های بتنی حاوی خاکستر تحتانی و خاکستر بادی مقاومت فشاری، خمشی و کشش غیر مستقیم مشابه با مخلوط کنترلی دارند. نتایج این پژوهش نشان داد که نمونه‌های آزمایشگاهی این تحقیق برای کاربردهایی نظیر فونداسیون، زیرساخت و روسازی راه مناسب است که موجب کاهش هزینه شده و دارای مزایای زیست محیطی می‌باشد [Rafeizonooz et al. 2016]. پژوهش دیگری با هدف بررسی تاثیر بکارگیری پودر پسماند زغال‌سنگ^۷ و پودر سنگ آهک بر مشخصات مکانیکی بتن‌گلتکی ویژه روسازی راه صورت گرفت. پسماند زغال‌سنگ به دو صورت پودر خام و همچنین خاکستر مورد استفاده قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد بکارگیری ۵ تا ۱۰ درصد CWA و ۵ درصد CWP بجای بخشی از سیمان خصوصیات مکانیکی مشابه مخلوط کنترل بدست می‌دهد [Hesami et al. 2016]. علیرغم انجام پژوهش‌های متعددی در رابطه با خصوصیات مکانیکی بتن‌گلتکی، تعداد محدودی پژوهش به بررسی دوام این نوع بتن در برابر اثرات همزمان یخبندان و ذوب یخ همراه با حضور نمک پرداختند. هدف پژوهش کنونی بررسی تاثیر بکارگیری CWA بر مقاومت بتن‌گلتکی فاقد افزودنی هوازا در برابر شرایط انجماد و ذوب و حضور نمک یخ‌زدا می‌باشد. در کنار اهداف فنی، این پژوهش با رویکردی زیست محیطی تلاش دارد اثرات مخرب ماده پسماند بر محیط زیست را نیز کاهش دهد. برای بررسی دوام، مقدار حفرات نفوذپذیر، مقاومت در برابر نفوذ یون کلر به روش تسریع شده، مقاومت پوسته‌شدن سطح تحت سیکل‌های انجماد و ذوب و حضور نمک یخ‌زدا و مقاومت در برابر سیکل‌های متناوب انجماد و ذوب در حضور محلول نمک بررسی گردید.

۲- مصالح و روش‌ها

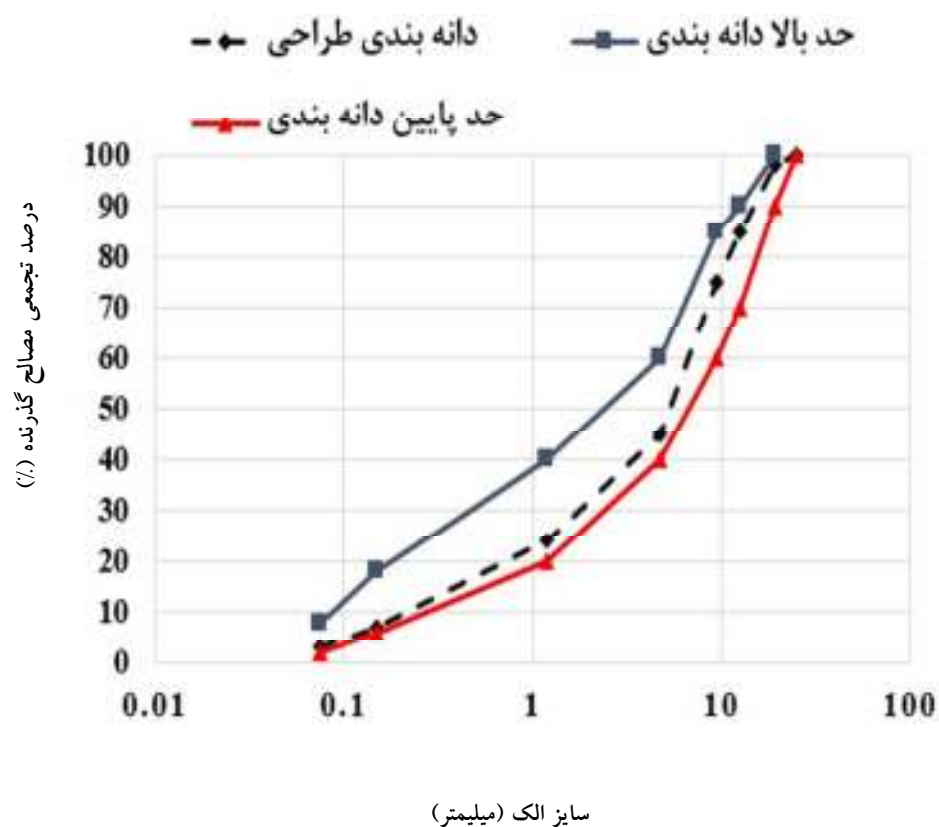
۲-۱-۲- مصالح

۲-۱-۱-۲- مصالح سنگی

شن و ماسه مورد استفاده در این تحقیق از نوع مصالح سنگی شکسته بوده و از معادن کوهپایه‌ای مازندران واقع در شمال ایران تهیه شد. دانه‌بندی مصالح سنگی این پژوهش مطابق محدوده پیشنهادی PCA [Portland cement Association, 2004]. برای مخلوط‌های بتن‌گلتکی روسازی راه‌ها انتخاب گردید. شکل ۱ محدوده دانه‌بندی پیشنهادی PCA و همچنین دانه‌بندی طراحی این تحقیق را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که حداکثر قطر اسمی سنگدانه مصرفی در این تحقیق به ۱۹ میلیمتر محدود شده است. اُفت وزنی مصالح سنگی ریزدانه و درشت‌دانه در ۵ سیکل سریع انجماد و ذوب مطابق روش A (غوطه‌وری کامل نمونه‌ها) مندرج در AASHTO T103 تعیین گردید. مطابق این آزمایش مقدار اُفت وزنی مصالح سنگی درشت‌دانه و ریزدانه به ترتیب ۲/۳ و ۹/۸ درصد بدست آمد. اُفت وزنی مصالح سنگی این تحقیق در اثر محلول سولفات سدیم در ۵ سیکل مطابق ASTM C88 معادل ۱/۸ درصد بدست آمد. ASTM C33 مقدار مجاز اُفت وزنی سنگدانه تحت ۵ سیکل محلول سولفات سدیم برای روسازی بتنی در آب و هوای سرد و حضور مواد شیمیایی یخ‌زدا را ۱۸ درصد توصیه می‌نماید. ترکیبات شیمیایی مصالح سنگی این پژوهش

آهکی می‌باشد.

از طریق پراش اشعه X مشخص گردید و در جدول ۱ نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که مصالح سنگی بکار رفته در این پژوهش از نوع مصالح سنگی



شکل ۱. دانه‌بندی طراحی و محدوده پیشنهادی دانه‌بندی بر اساس PCA

جدول ۱. ترکیبات شیمیایی مصالح سنگی

مقدار (%)	عناصر تشکیل دهنده
۰/۷۹۳	Al ₂ O ₃
۲/۵۹	MgO
۵/۲۱۸	SiO ₂
۰/۰۱۲	P ₂ O ₅
۰/۰۵۷	SO ₃
۰/۱۷	K ₂ O
۴۹/۰۱۴	CaO
۰/۴۲۴	Fe ₂ O ₃
۰/۰۶۱	Sr
۴۱/۶۶	L.O.I
۰/۰۰۱	سایر

البرز مرکزی واقع در شمال ایران تهیه شد. ضایعات زغال‌سنگ اطراف این کارخانه ناشی از فرآوری توسط دستگاه پر عیار سازی ثقلی می‌باشد. مقدار بالای

۲-۱-۲- ماده چسبنده و افزودنی

برای ساخت نمونه‌های این پژوهش، سیمان پرتلند تیپ II و CWA بعنوان ماده چسبنده استفاده گردید. مشخصات فیزیکی، مکانیکی و ترکیبات شیمیایی بدست آمده از XRF برای سیمان مصرفی این تحقیق و همچنین مقادیر پیشنهادی ASTM C150 در جدول ۲ ملاحظه می‌گردد. پسماند زغال‌سنگ مورد استفاده در این پژوهش از محل دپو ضایعات کارخانه زغالشویی

کربن نسوخته موجود در پسماند زغال‌سنگ، مهمترین تفاوت این ماده با سایر مواد پوزولانی می‌باشد. بالا بودن مقدار کربن نسوخته بیانگر بالاتر بودن مقدار شاخص اُفت ناشی از اشتعال^۱ و همچنین کم بودن ترکیبات آهکی است. [Modarres et al. 2015, Modarres, and Rahmanzadeh, 2014]. پژوهش‌های گذشته با سوزاندن پسماند زغال‌سنگ در دماهای ۴۰۰ تا بالای

۲-۲-۱- طرح اختلاط

نمونه‌های بتن‌غلتکی این تحقیق با استفاده از مقدار رطوبت بهینه و مطابق با روش A مندرج در ASTM C1176 ساخته شدند. مقدار مواد سیمانی بر اساس الزامات مقاومت و دوام برای روسازی تعیین می‌شود و غالباً بصورت درصدی از جرم کل مصالح خشک بیان می‌گردد. مقدار مواد سیمانی بتن‌غلتکی ویژه روسازی بین ۱۰ تا ۱۷ درصد جرم مصالح خشک در نظر گرفته می‌شود [ACI 325.10R-95, 2001, Hesami et al. 2016]. در این تحقیق مقدار کل مواد سیمانی شامل سیمان و CWA، ۱۴ درصد جرم کل مصالح خشک انتخاب گردید. بگونه‌ای که مخلوط کنترلی این پژوهش فاقد CWA بوده و در سایر ترکیبات بخشی از سیمان با CWA که معادل ۲، ۳ و ۴ درصد جرم مصالح خشک انتخاب گردید، جایگزین شد. لذا مخلوط‌های فوق به ترتیب C0، C2، C3 و C4 نامگذاری شدند. مقدار رطوبت بهینه برای مخلوط کنترلی و مخلوط‌های حاوی مقادیر مختلف CWA از طریق تعیین رابطه بین وزن مخصوص خشک و مقدار رطوبت بدست آمد. ۴۸٪ مخلوط بتن‌غلتکی استوانه‌ای به ابعاد ۱۵۰×۳۰۰ میلی‌متر شامل مخلوط کنترلی و مخلوط‌های حاوی ۲، ۳ و ۴ درصد CWA برای نسبت‌های مختلف آب به سیمان شامل ۰/۳۵، ۰/۴۰، ۰/۴۵ و ۰/۵۰ ساخته شد (برای هر نسبت آب به سیمان ۳ نمونه). نمونه‌ها توسط میز ویبره و اعمال سربار ۹/۱۵ کیلوگرمی متراکم شدند. سپس مقداری نمونه از مخلوط متراکم شده جدا کرده و وزن آن اندازه‌گیری شد. این نمونه‌ها تا رسیدن به وزن ثابت در اُون و در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک گردید. مقدار رطوبت (G) مخلوط‌ها از طریق رابطه ۱ تعیین شد.

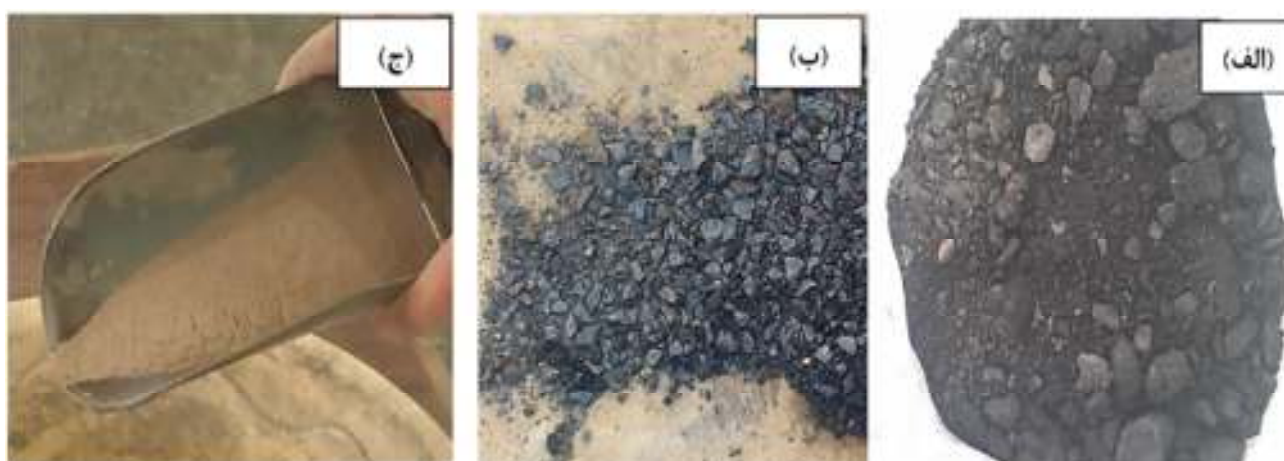
۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، مقدار پارامتر LOI را اندازه‌گیری نمودند. نتایج حاکی از آن است که با بالا رفتن دمای اشتعال، مقدار LOI کاهش می‌یابد. همچنین ملاحظه گردید که مقدار اُفت این پارامتر در دماهای بالاتر از ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد بسیار ناچیز می‌باشد [Modarres, and Rahmanzadeh, 2014, Modarres, and Nosoudy, 2015, Modarres, and Ayar, 2014]. لذا دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد بعنوان دمای کربن‌زدایی در این تحقیق انتخاب گردید. پسماندهای زغال‌سنگ ابتدا خُرد شده و سپس توسط کوره الکتریکی به خاکستر تبدیل گردید. خاکستر بدست آمده توسط الک شماره ۲۰۰ غربال گردید و مقادیر رد شده از این الک بعنوان جایگزین بخشی از سیمان مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۲ پسماند خام زغال‌سنگ قبل و بعد از خُرد شدن و همچنین خاکستر آن را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود رنگ پسماند زغال‌سنگ پس از کربن‌زدایی از سیاه به قهوه‌ای تغییر یافت. جدول ۳ ترکیبات شیمیایی بدست آمده از XRF پسماند زغال‌سنگ قبل و بعد از کربن‌زدایی را نشان می‌دهد. بر اساس جدول ۳، مجموع مقادیر ترکیبات SO_3 ، Al_2O_3 و Fe_2O_3 برای CWA برابر با ۸۴/۴ درصد می‌باشد. همچنین مقدار SO_3 و LOI برای CWA به ترتیب ۱/۳ و ۲/۸ درصد است. لذا مطابق طبقه‌بندی مندرج در ASTM C618، مشخصات CWA این تحقیق مشابه با خاکستر بادی نوع F یا N می‌باشد. با توجه به جدول ۳ می‌توان ملاحظه نمود که CWA مورد استفاده در این پژوهش از نوع مصالح سیلیسی می‌باشد.

۲-۲- روش تحقیق

جدول ۲. مشخصات فیزیکی، مکانیکی و ترکیبات شیمیایی سیمان مصرفی و مقدار مجاز مطابق ASTM C150

مشخصات فیزیکی و مکانیکی				ترکیبات شیمیایی (%)			
مقدار مجاز بر اساس استاندارد	مقدار	واحد	مشخصات	مقدار مجاز بر اساس استاندارد (ماکزیمم)	مقدار (%)	عناصر تشکیل دهنده	
-	۳۰۵۰	cm ² /gr	سطح مخصوص	-	۰/۷۴۶	Na ₂ O	
۴۵	۱۴۰	دقیقه	اولیه (مینیمم)	٪۶	۱/۹۴۶	MgO	
۳۷۵	۲۱۰	دقیقه	نهایی (ماکزیمم)				
-	۳/۱۴	g/cm ³	وزن مخصوص	-	۱۷/۰۴	SiO ₂	
۰/۸	۰/۱	٪	انبساط اتوکلاو (ماکزیمم)	-	۰/۱۲۴	P ₂ O ₅	
-	۹۵	kg/cm ²	۱ روزه	مقاومت فشاری (مینیمم)	٪۳	۴/۱۲۴	SO ₃
-	۱۷۰	kg/cm ²	۲ روزه		-	۰/۷۹۱	K ₂ O
۱۰۰	۲۱۰	kg/cm ²	۳ روزه		-	۶۴/۸۹۶	CaO
۱۷۰	۳۱۰	kg/cm ²	۷ روزه		-	۰/۲۶۷	TiO ₂
۲۸۰	۴۴۰	kg/cm ²	۲۸ روزه		-	۳/۴۴۳	Fe ₂ O ₃
-	۵۰۰	kg/cm ²	۶۰ روزه		-	۰/۰۶۳	Sr
-	-	-	-		-	۰/۰۱۶	Zr
-	-	-	-	-	۰/۱۷۳	Ba	
-	-	-	-	-	۰/۰۵۳	Pb	

-	-	-	-	-	۳/۷	۲/۶۲	L.O.I
-	-	-	-	-	-	۱/۹۴۷	سایر

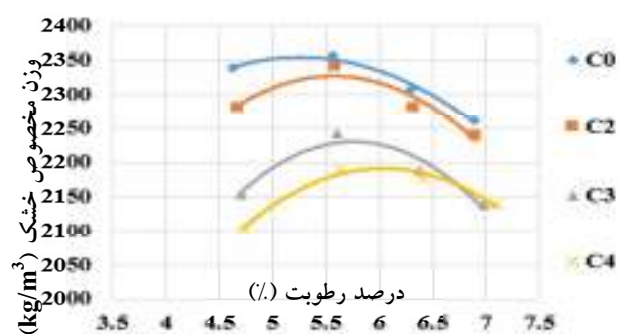


جدول ۳. ترکیبات شیمیایی پسماند خام زغال سنگ و خاکستر آن بر اساس نتایج آزمایش XRF

ترکیبات شیمیایی (%)		
پسماند زغال سنگ (CW)	خاکستر پسماند زغال سنگ (CWA)	عناصر تشکیل دهنده
۰/۳۱۶	۰/۵۵۵	Na ₂ O
۰/۹۱۹	۱/۵۲۹	MgO
۱۵/۰۹۲	۲۸/۸۰۵	Al ₂ O ₃
۲۷/۶۷۳	۵۲/۶۸۷	SiO ₂
۰/۱۰۵	۰/۲۹۷	P ₂ O ₅

پژوهشنامه حمل و نقل، شماره ۵۳، زمستان ۱۳۹۶

۱/۶۰۴	۱/۳۴۹	SO ₃
۰/۰۴۸	-	Cl
۱/۹۴۶	۳/۸	K ₂ O
۰/۷۶۶	۱/۱۴۲	CaO
۰/۹۳	۱/۹۱۴	TiO ₂
۲/۰۳۸	۴/۹۵۴	Fe ₂ O ₃
۰/۰۰۹	۰/۰۱۸	Rb
۰/۰۱۶	۰/۰۳۴	Sr
۰/۰۱۸	۰/۰۳۳	Zr
-	۰/۰۲۲	Zn
۴۸/۵۲	۲/۸۶	L.O.I
-	۰/۰۰۱	سایر



شکل ۳. منحنی‌های رابطه بین وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت

جدول ۴. طرح اختلاط مصالح برای ساخت نمونه‌های بتن غلتکی

نسبت آب به ماده چسبنده	آب (kg/m ³)	سنگدانه (kg/m ³)		خاکستر پسماند زغال سنگ (kg/m ³)	سیمان (kg/m ³)	درصد سیمان (درصد نسبت به وزن مصالح خشک)	درصد خاکستر باطله زغال سنگ (درصد نسبت به وزن مصالح خشک)	نام مخلوط (RCC)
		درشت‌دانه	ریزدانه					
۰/۳۷	۱۰۶	۱۲۰۸	۸۰۵	۰	۲۸۲	٪۱۴	٪۰	C0
۰/۳۹	۱۱۲	۱۲۰۸	۸۰۵	۴۲	۲۴۱	٪۱۲	٪۲	C2
۰/۴۱	۱۱۶	۱۲۰۸	۸۰۵	۵۷	۲۲۱	٪۱۱	٪۳	C3
۰/۴۳	۱۲۱	۱۲۰۸	۸۰۵	۸۴	۲۰۱	٪۱۰	٪۴	C4

جدول ۵. درصد رطوبت بهینه، وزن مخصوص خشک حداکثر و نسبت آب به چسبنده‌های سیمانی

نام مخلوط (RCC)	رابطه بین درصد رطوبت (ω) و وزن مخصوص خشک (γ_d)	R^2	مقدار رطوبت بهینه (%)	وزن مخصوص خشک حداکثر	نسبت آب به ماده چسبنده
C0	$\gamma_d = -36/158w^2 + 380/44w + 1353/7$	۰/۹۸	۵/۲۶	۲۳۵۴	۰/۳۷
C2	$\gamma_d = -53/36w^2 + 594/52w + 671/2$	۰/۹۰	۵/۵۷	۲۳۲۷	۰/۳۹
C3	$\gamma_d = -65/291w^2 + 752/25w + 62/971$	۰/۹۲	۵/۷۶	۲۲۳۰	۰/۴۱
C4	$\gamma_d = -49/771w^2 + 601/35w + 375/18$	۰/۹۷	۶/۰۴	۲۱۹۱	۰/۴۳

چسبنده افزایش می‌یابد. مقدار رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر در جدول ۵ آمده است.

$$\omega = \left(\frac{m_{wet} - m_{dry}}{m_{wet}} \right) \times 100 \quad (1)$$

در رابطه ۱، m_{dry} و m_{wet} به ترتیب وزن مرطوب و وزن خشک نمونه گرفته شده از مخلوط تازه بر حسب کیلوگرم می‌باشد. و ω بر حسب درصد است. وزن مخصوص مخلوطها در حالت مرطوب از رابطه ۲ [Aghabaglou et al. 2013]. محاسبه گردید. پارامترهای $(kg)m$ و $(m^3)v$ به ترتیب جرم و حجم نمونه‌های استوانه‌ای می‌باشد. γ_{wet} وزن مخصوص مرطوب بر حسب kg/m^3 است. نهایتاً وزن مخصوص خشک (kg/m^3) نمونه‌ها از رابطه ۳ محاسبه شد.

$$\gamma_{wet} = \frac{m}{v} \quad (2)$$

$$\gamma_{dry} = \frac{\gamma_{wet}}{1 + \omega} \quad (3)$$

شکل ۳ رابطه بین وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت نمونه‌های بتن غلتکی را نشان می‌دهد. هریک از مقادیر این شکل میانگین سه اندازه‌گیری می‌باشد. رطوبت بهینه مخلوط، مقدار متناظر با نقطه بیشینه نمودار است. جدول ۴ نسبت اختلاط مصالح برای ساخت نمونه‌های این تحقیق را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۴، با افزایش درصد جایگزینی CWA بجای سیمان، نسبت آب به

۲-۲-۲- آماده سازی نمونه

تمامی مخلوط‌های بتن غلتکی این تحقیق مطابق روش A مندرج در ASTM C1176 تهیه و طراحی شدند. تراکم تمامی نمونه‌های این تحقیق توسط میز ویبره و روش اعمال سربار با وزن مناسب صورت گرفت. بگونه‌ای که ابتدا یک سوم از حجم قالب با بتن غلتکی تازه پر شده و سپس سربار با وزن مناسب روی سطح بتن قرار می‌گیرد. تا زمانیکه شیره بتن تازه از فاصله اندک میان سطح خارجی سربار و جداره داخلی قالب بیرون بزند عمل تراکم ادامه می‌یابد. پس از تراکم لایه اول، برای دو لایه بعدی به همین ترتیب عمل شد. پس از تراکم کافی نمونه‌ها، برای حفظ رطوبت سطح بتن پوشش پلاستیکی روی سطح نمونه‌ها قرار داده شده و نمونه‌ها در همین حالت به مدت ۲۴ ساعت در محیط آزمایشگاه قرار گرفتند. پس از ۲۴ ساعت نمونه‌ها از قالب خارج شده و در حمام آب با دمای 23 ± 2 درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۸ روز عمل‌آوری شدند (غیر از نمونه‌های بلوکی مربوط به آزمایش پوسته‌شدن سطح). عمل‌آوری نمونه‌های بلوکی مربوط به آزمایش پوسته‌شدن سطح در در دستگاه انکوباتور صورت گرفت. شکل ۴ ظاهر بتن غلتکی تازه و همچنین مراحل ساخت و عمل‌آوری را برای بعضی از نمونه‌های این پژوهش نشان می‌دهد.



پژوهشنامه حمل و نقل، شماره ۵۳، زمستان ۱۳۹۶

شکل ۴. (الف). ظاهر بتن غلتکی تازه، (ب). نحوه پر کردن قالب برای ساخت و تراکم نمونه‌های منشوری شکل آزمایش انجماد و ذوب، (ج). نمونه‌های بلوکی قبل از خارج شدن از قالب همراه با پوشش پلاستیکی روی سطح آن، (د). عمل آوری نمونه‌های آزمایش انجماد و ذوب و آزمایش نفوذ یون کلر در حمام آب

۳-۲- مقاومت در برابر نفوذ یون کلر

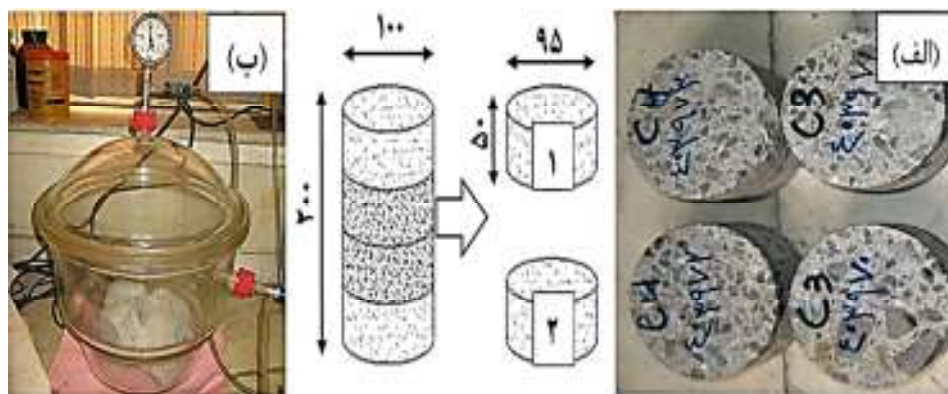
مقاومت نمونه‌های بتن غلتکی این پژوهش در برابر نفوذ یون کلر مطابق ASTM C1202 به روش تسریع شده بدست آمد. برای هریک از ترکیب‌های این پژوهش ۲ نمونه استوانه‌ای به قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۲۰۰ میلیمتر تهیه شد. تراکم نمونه‌های استوانه‌ای مربوط به این آزمایش توسط میز ویبره و همزمان با اعمال سربار ۴/۴۷ کیلوگرمی صورت گرفت. پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در حمام آب، از هریک از نمونه‌های استوانه‌ای مطابق شکل ۵، دو عدد مغزه به قطر ۹۵ و ارتفاع ۵۰ میلیمتر بدست آمد. مغزه‌های بدست آمده از سطح بالایی و پایینی نمونه به ترتیب سری ۱ و ۲ نامگذاری گردید. تمامی مغزه‌ها بر اساس شیوه مندرج در ASTM C1202 مطابق شکل ۵ توسط خشک‌کن خلأ یا دسیکاتور بحالت اشباع در آمدند. سپس نمونه‌ها از دسیکاتور خارج و درون دستگاه آزمایش قرار گرفتند. ظرف‌های اطراف مغزه در دستگاه آزمایش توسط محلول ۳ درصد نرمال کلرید سدیم (قطب منفی) و محلول ۳ درصد نرمال هیدروکسید سدیم (قطب مثبت) پر گردید. شکل ۶ قرارگیری نمونه‌ها در دستگاه آزمایش را نشان می‌دهد. اختلاف پتانسیل ۶۰ ولت به مدت ۶ ساعت به دو سر مغزه‌ها اعمال گردید. جریان عبوری از مغزه‌ها در پایان هر ۳۰ دقیقه ثبت شد. در نهایت پروفیل جریان (بر حسب آمپر) در برابر زمان (بر حسب ثانیه) رسم شده و سطح زیر منحنی که همان میزان رسانایی بتنی (بر حسب کلمب) در مدت زمان آزمایش است، محاسبه گردید.

۳- مطالعات آزمایشگاهی

۳-۱- درصد حفرات نفوذپذیر

برای هریک از ترکیب‌های این تحقیق، ۲ نمونه مکعبی به ارتفاع ۱۰۰ میلیمتر ساخته شد. تراکم نمونه‌های مکعبی این آزمایش توسط میز ویبره و همزمان با اعمال سربار ۲/۲۵ کیلوگرمی صورت گرفت. پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در حمام آب، درصد حفرات نفوذپذیر این نمونه‌ها مطابق ASTM C642 محاسبه گردید. وزن اشباع با سطح خشک برای تمامی نمونه‌ها محاسبه شد (A). سپس نمونه‌ها در اُون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت خشک شده و وزن آنها ثبت گردید (B). نمونه‌ها در یک ظرف مناسب و در حالت غوطه‌وری کامل در آب به مدت ۵ ساعت جوشانده شدند. سپس نمونه‌ها به مدت ۲۰ ساعت در دمای 23 ± 3 درجه سانتی‌گراد در محیط آزمایشگاه خنک شده و وزن آنها پس از خشک کردن سطح با پارچه، محاسبه گردید (C). وزن ظاهری نمونه‌ها در آب در حالی که نمونه‌ها توسط یک مفتول معلق هستند محاسبه گردید (D). درصد حفرات نفوذپذیر نمونه‌ها توسط رابطه ۴ محاسبه شد. در رابطه ۴ تمامی پارامترهای وزن بر حسب گرم و مقدار حفرات نفوذپذیر بر حسب درصد می‌باشد.

$$\text{Permeable void content} = \left(\frac{C - A}{C - D} \right) \times 100 \quad (4)$$



شکل ۵. (الف): نحوه مغزه گیری از نمونه‌های استوانه‌ای، (ب): اشباع نمودن مغزه‌ها در خشک‌کن خلأ یا دسیکاتور



شکل ۶. قرار گیری نمونه‌ها در دستگاه آزمایش هدایت الکتریکی برای اندازه‌گیری مقاومت در برابر نفوذ یون کلر

۳-۳- مقاومت در برابر پوسته شدن

برای هریک از ترکیب‌های این پژوهش دو بلوک بتنی به ابعاد $75 \times 180 \times 250$ میلیمتر (در مجموع ۸ نمونه) ساخته شد. تراکم بلوک‌های بتن‌غلتکی از طریق میز ویبره و همزمان اعمال سربار $11/5$ کیلوگرمی صورت گرفت. نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز و در رطوبت ۹۳ درصد مطابق شکل ۷ در دستگاه انکوباتور عمل‌آوری شدند. بر روی نمونه‌های این تحقیق مطابق ASTM C672 آزمایش پوسته شدن سطح در سیکل‌های انجماد و ذوب در حضور نمک یخ‌زدا صورت گرفت. پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد که بیشترین خرابی‌های ناشی از یخ‌زدگی و حضور نمک یخ‌زدا، توسط محلول نمک با غلظت ۵-۴ درصد اتفاق می‌افتد [Kim et al. 2014, Marchand et al. 1999, Mehta, and Monteiro, 2005]. لذا در این پژوهش از محلول نمک $NaCl+CaCl_2$ و با غلظت ۴ درصد جهت انجام آزمایش مقاومت در برابر پوسته شدن سطح استفاده گردید. نسبت کلرید سدیم به کلرید کلسیم در محلول نمک استفاده شده در این آزمایش ۷ به ۳ انتخاب شد. برای حصول اطمینان از اینکه تنها سطح نمونه‌ها در سیکل‌های انجماد و ذوب در تماس با محلول نمک باشند، یک نوار از جنس ایزوگام و به ارتفاع ۴۰ میلیمتر و با وزن مشخص در اطراف محیط سطح بلوک‌ها برای نگهداری محلول نمک چسبانده شد. در تمامی سیکل‌های انجماد و ذوب، لایه محلول نمک به ضخامت ۶ میلیمتر در تماس با سطح بلوک‌های بتنی قرار دارد. نمونه‌ها در هر سیکل به مدت ۱۸ ساعت در دمای -18 درجه سانتیگراد و به مدت ۶ ساعت در دمای 23 درجه سانتیگراد محیط آزمایشگاه با رطوبت ۴۵ درصد قرار گرفتند. در پایان هر ۵ سیکل وزن نمونه و همچنین وضعیت خرابی سطح نمونه بر اساس مشاهدات چشمی مطابق جدول کیفی مندرج در استاندارد ASTM C672 گزارش شد.

۳-۴- مقاومت در برابر سیکل‌های انجماد - ذوب و محلول نمک

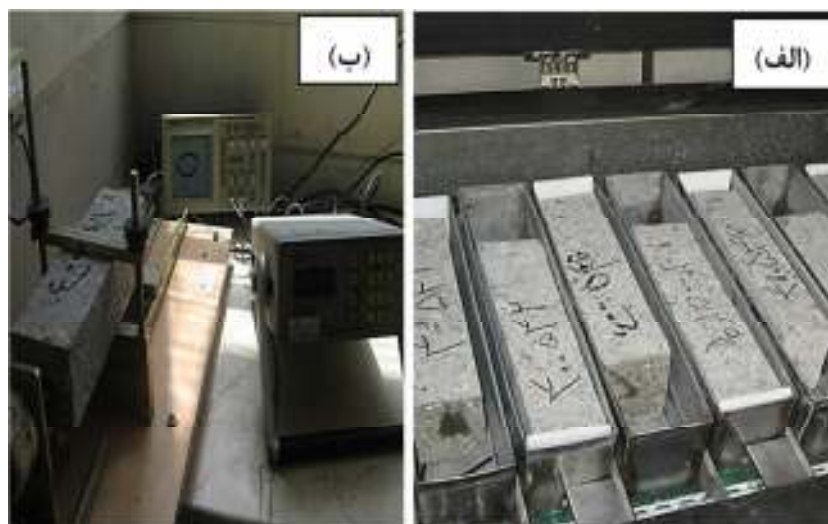
برای هریک از ترکیب‌های این پژوهش ۲ نمونه منشوری با ابعاد $400 \times 100 \times 70$ میلیمتر ساخته شد. تراکم این نمونه‌ها توسط میز ویبره و همزمان اعمال سربار $9/5$ کیلوگرمی صورت گرفت. نمونه‌ها مطابق روش A مندرج در استاندارد ASTM C666 تحت سیکل‌های متناوب انجماد و ذوب قرار گرفتند. تمامی نمونه‌ها در حین سیکل‌های انجماد و ذوب در محلول نمک $NaCl+CaCl_2$ و با غلظت ۴ درصد قرار دارند. نسبت کلرید سدیم به کلرید کلسیم در محلول نمک مورد استفاده در این آزمایش ۷ به ۳ است. نمونه‌های این تحقیق در هر سیکل به مدت ۵ ساعت تحت کاهش دما از ۴ درجه سانتیگراد به -18 درجه سانتیگراد و سپس افزایش دما از -18 درجه سانتیگراد به ۴ درجه سانتیگراد قرار گرفتند. در پایان هر ۶۰ سیکل مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. آزمایش به مدت ۳۰۰ سیکل یا تا زمانیکه مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی نمونه‌ها به کمتر از ۶۰ درصد مقدار اولیه برسد ادامه می‌یابد. مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی نمونه‌ها توسط دستگاه فراصوت^۹ و با ارسال فرکانس اولیه و همچنین تعیین فرکانس‌های طولی اصلی بعد از تعداد سیکل مشخص محاسبه گردید. مقدار مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی و همچنین فاکتور دوام نمونه‌ها به ترتیب توسط روابط ۵ و ۶ محاسبه شد. شکل ۸ قرارگیری نمونه‌ها در دستگاه انجماد و ذوب و همچنین اندازه‌گیری سرعت امواج فراصوت در نمونه‌ها جهت تعیین مدول الاستیسیته دینامیکی را نشان می‌دهد. در روابط فوق f_1 و f_n به ترتیب سرعت امواج فراصوت در شروع و در پایان N سیکل بر حسب متر بر ثانیه می‌باشد.

$$P_n = \left(\frac{f_n^2}{f_1^2} \right) \times 100 \quad (5)$$

$$D_f = P_n \times \left(\frac{N}{100} \right) \quad (6)$$



شکل ۷. (الف): عمل‌آوری بلوک‌های بتن‌غلتکی در دستگاه انکوباتور، (ب): نمونه‌های بلوکی بتن‌غلتکی پس از اتمام عمل‌آوری



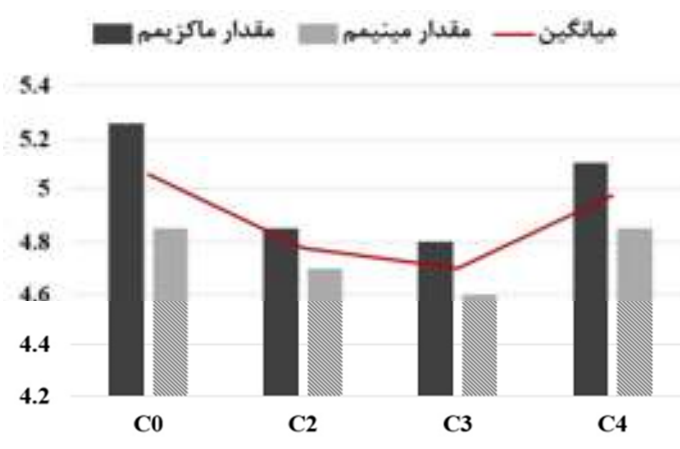
شکل ۸. (الف): قرار گیری نمونه‌ها در دستگاه انجماد و ذوب، (ب): دستگاه اندازه‌گیری امواج فراصوت

۴- نتایج

۴-۱- مقدار حفرات نفوذپذیر

C204، سطح مخصوص CWA مورد استفاده در این پژوهش $3350 \text{ Cm}^2/\text{gr}$ بدست آمد. که این موضوع بیانگر ریزدانه‌تر بودن CWA نسبت به سیمان پرتلند معمولی تیپ II می‌باشد. بکارگیری CWA بجای بخشی از سیمان سبب پُر شدن و همچنین بهبود شبکه منافذ موئین خمیر سیمان می‌گردد. مطابق شکل ۹ جایگزینی CWA بجای قسمتی از سیمان تا مقدار ۳ درصد، منجر به کاهش حفرات نفوذپذیر می‌گردد. درحالی‌که استفاده از ۴ درصد CWA بجای سیمان، مقدار حفرات نفوذپذیر بیشتری نسبت به سایر مقادیر بکارگیری خاکستر پسماند زغال‌سنگ بدست می‌دهد. با این وجود مقدار حفرات نفوذپذیر ترکیب C4 کمتر از مخلوط کنترلی است. بکارگیری ۲، ۳ و ۴ درصد CWA بجای بخشی از سیمان نسبت به مخلوط کنترلی، مقدار حفرات نفوذپذیر را به ترتیب ۱۴، ۱۷/۷۵ و ۴ درصد کاهش می‌دهد.

درصد حفرات نفوذپذیر نمونه‌های بتن‌غلتکی ۲۸ روزه این تحقیق در شکل ۹ نشان داده شده است. برای هر یک از ترکیبات این پژوهش ۲ اندازه‌گیری صورت گرفت. مقادیر ماکزیمم و مینیمم بصورت ستونی و مقدار میانگین توسط خط مشخص گردیده است. درصد حفرات نفوذپذیر محاسبه شده علاوه بر منافذ موئین، شامل هوای محبوس در بتن نیز می‌باشد [Aghabaglou et al. 2014, Banthia et al. 1992]. ملاحظه می‌گردد که با افزایش مقدار جایگزینی CWA بجای بخشی از سیمان، مقدار حفرات نفوذپذیر ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. مطابق جدول ۲، سطح مخصوص سیمان پرتلند معمولی مورد استفاده در این پژوهش $3050 \text{ Cm}^2/\text{gr}$ می‌باشد. بر اساس روش مشابه مطابق ASTM



مقدار حفرات نفوذپذیر (%).

شکل ۹. مقدار حفرات نفوذپذیر نمونه‌های بتن‌غلتکی

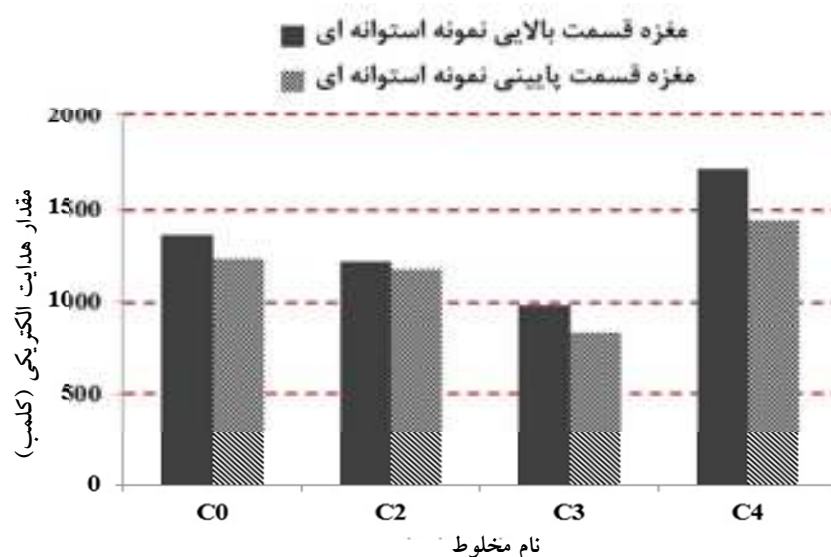
بکارگیری ۲ و ۳ درصد CWA مقدار هدایت الکتریکی مغزه‌های بدست آمده از بخش بالایی نمونه‌های استوانه‌ای بتن‌غلتکی به ترتیب ۱۰/۴۷ و ۲۷/۵ درصد کاهش می‌یابد. این کاهش برای مغزه‌های بدست آمده از بخش پایینی نمونه‌های استوانه‌ای بتن‌غلتکی به ترتیب ۴/۴۸ و ۳۶/۶۲ درصد می‌باشد. با بکارگیری ۴ درصد CWA مقدار هدایت الکتریکی برای مغزه‌های بدست آمده از بخش بالایی و پایینی نمونه‌های استوانه‌ای بتن‌غلتکی به ترتیب ۲۶/۶۲ و ۱۶/۸۰ درصد افزایش یافت. مطابق شکل ۱۰ مقدار نفوذ یون کلر با افزایش بکارگیری CWA تا مقدار ۳ درصد وزن کل مصالح خشک، روند کاهشی و برای مقدار بیشتر روند افزایشی دارد. این موضوع می‌تواند به دلیل اثر پُر کنندگی و بهبود منافذ خمیر سیمان

۴-۲- مقاومت در برابر نفوذ یون کلر

شکل ۱۰ مقدار هدایت الکتریکی ترکیب‌های این پژوهش را نشان می‌دهد. همچنین تقسیم‌بندی مقاومت در برابر نفوذ یون کلر برای ترکیبات این پژوهش مطابق رتبه‌بندی مندرج در ASTM C1202، در جدول ۶ مشاهده می‌شود. هر یک از مقادیر شکل ۱۰ میانگین دو اندازه‌گیری می‌باشد. لازم به ذکر است که هر اندازه مقدار هدایت الکتریکی نمونه‌ها کمتر باشد، مقاومت در برابر نفوذ یون کلر بیشتر خواهد بود. از شکل ۱۰ ملاحظه می‌گردد که مخلوط کنترلی و مخلوط C2 مقاومت تقریباً مشابهی در برابر نفوذ یون کلر دارند. مخلوط C3 بیشترین و مخلوط C4 کمترین مقاومت را در برابر نفوذ یون کلر نشان می‌دهند. با

است که در سنین عمل‌آوری بالاتر تاثیر استفاده از خاکستر بادی بسیار چشمگیرتر از سنین عمل‌آوری پایین می‌باشد [Sengul, and Tasdemir, 2009, Sim, and Park, 2011]. بتن‌غلتکی در مقایسه با بتن معمولی مخلوطی خشک‌تر و همچنین دارای نفوذپذیری بیشتری می‌باشد [Banthia et al. 1992]. CWA به دلیل دانه‌بندی ریزدانه‌تر نسبت به سیمان می‌تواند نقش پرکنندگی و بهبود منافذ را ایفا نماید. اما در بتن‌غلتکی امکان غلبه اثر دور کردن سنگدانه‌ها و همچنین بزرگتر شدن منافذ مویین به دلیل غیر فعال ماندن قسمتی از ترکیبات پوزولانی برای مقادیر بیشتر CWA وجود دارد. با توجه به جدول ۶ ملاحظه می‌گردد که تمام مغزه‌های تهیه شده از بخش بالایی نمونه‌های استوانه‌ای (سری ۱)، مقاومت کمتری نسبت به مغزه‌های قسمت پایینی دارند. دلیل این موضوع می‌تواند مربوط به تراکم بهتر بخش پایینی نمونه‌های استوانه‌ای نسبت به بخش بالایی آنها بر روی میز ویبره و اعمال سربار باشد.

توسط CWA تا مقدار ۳ درصد و در نتیجه کاهش مقدار نفوذ یون کلر باشد. اما افزایش مقدار نفوذ یون کلر در مخلوط C4 می‌تواند مربوط به اثر دور شدن سنگدانه‌ها و بزرگتر شدن منافذ مویین بتن باشد. تاثیر مثبت CWA بسته به پیشرفت قابل توجه واکنش بین ترکیبات پوزولانی این ماده و کلسیم هیدروکسید تولید شده توسط هیدراتاسیون می‌باشد. اگر غلظت کلسیم هیدروکسید برای مصرف تمام ترکیبات پوزولانی این ماده کافی نباشد، مقداری از این ترکیبات پوزولانی غیر فعال می‌ماند. اصطلاحاً مقداری از این ماده بصورت ماده غیر فعال عمل می‌کند. علیرغم افزایش مقدار نفوذ یون کلر در مخلوط C4 نسبت به سایر ترکیبات، مقاومت این مخلوط بر اساس اطلاعات جدول ۶ قابل قبول می‌باشد. نتایج پژوهش‌های پیشین با هدف بررسی اثر بکارگیری پوزولان‌های مختلف مانند خاکستر بادی و سرباره آهن‌گدازی در بتن معمولی حاکی از کاهش مقدار نفوذ یون کلر با افزایش مقدار جایگزینی سیمان با پوزولان می‌باشد. لازم به ذکر



شکل ۱۰. مقدار هدایت الکتریکی نمونه‌های بتن‌غلتکی

جدول ۶. مقدار هدایت الکتریکی و میزان نفوذ یون کلر

نام مخلوط	مقدار هدایت الکتریکی (کلمب)	مقدار نفوذ یون کلر بر اساس مقدار هدایت الکتریکی
C0	۱۳۵۶	کم
	۱۲۲۶	کم
C2	۱۲۱۴	کم
	۱۱۷۱	کم
C3	۹۸۳	خیلی کم
	۸۲۶	خیلی کم
C4	۱۷۱۷	کم
	۱۴۳۲	کم

پوسته‌شدن کم تا متوسط، (۳): پوسته‌شدن متوسط بگونه‌ای که تعدادی از سنگدانه‌های درشت‌دانه نمایان است، (۴): پوسته‌شدن متوسط تا شدید، (۵): پوسته‌شدن شدید بگونه‌ای که سنگدانه‌های درشت در تمام سطح نمونه نمایان است. شکل ۱۱ وضعیت ظاهری بعضی از نمونه‌های بلوکی این پژوهش پس از اتمام آزمایش مقاومت در برابر پوسته‌شدن سطح در حضور محلول نمک را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌گردد، در نمونه حاوی ۴ درصد CWA در پایان

۴-۳- مقاومت در برابر پوسته‌شدن سطح

نتایج مشاهدات چشمی خرابی سطحی نمونه‌های این تحقیق در پایان هر ۵ سیکل منطبق بر محدوده نرخ خرابی مندرج در استاندارد ASTM C672 در جدول ۷ نشان داده شده‌است. محدوده نرخ خرابی سطح بر اساس استاندارد به شرح زیر است: (۰): فاقد پوسته‌شدن سطح، (۱): پوسته‌شدن بسیار کم با عمق تخریب حداکثر ۳ میلیمتر بگونه‌ای که سنگدانه‌های درشت‌دانه نمایان نباشد، (۲):

۳۵۰۰-۴۵۰۰: خوب

بیشتر از ۴۵۰۰: قوی

با توجه به مقدار UPV در سیکل‌های مختلف، مخلوط کنترلی و مخلوط‌های C2 و C3 در تمام سیکل‌های انجماد و ذوب از نظر مقاومتی قوی می‌باشند. با وجود افت زیاد UPV برای مخلوط C4 در طول ۳۰۰ سیکل، این مخلوط از نظر مقاومتی خوب می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود، تغییرات UPV برای مخلوط کنترلی و مخلوط‌های C2 و C3 در طول ۳۰۰ سیکل تقریباً مشابه است. تا پایان سیکل ۱۸۰ مقدار UPV برای مخلوط کنترلی اندکی بیشتر از مخلوط‌های حاوی CWA می‌باشد. اما در سیکل ۲۴۰ و همچنین در پایان ۳۰۰ سیکل مقدار UPV برای مخلوط C3 اندکی بیشتر از مخلوط کنترلی و مخلوط C2 است. بیشترین مقدار افت UPV در طول ۳۰۰ سیکل آزمایش مربوط به مخلوط C4 می‌باشد. در حالت کلی مقدار UPV برای مخلوط کنترلی فاقد CWA بیشتر از سایر ترکیبات است که این نتایج تقریباً سازگار با نتایج پژوهش آزمایشگاهی دیگری می‌باشد. نتایج پژوهشی آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مقدار UPV در نمونه‌های بتن‌غلتکی راهسازی حاوی خاکستر بادی برای تمام سنین عمل‌آوری (۳ تا ۹۰ روز) کمتر از مخلوط کنترلی فاقد خاکستر بادی می‌باشد [Rao et al. 2016]. شکل ۱۴ تغییرات مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی نمونه‌های این تحقیق را در شرایط انجماد و ذوب و همچنین حضور نمک یخ‌زدا نشان می‌دهد. هریک از مقادیر این شکل میانگین ۲ اندازه‌گیری است. همانطور که پیش‌بینی می‌شد، تغییرات مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی مخلوط کنترلی، C2 و C3 تقریباً مشابه می‌باشد. مخلوط C3 کمترین و مخلوط C4 بیشترین افت مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی را در پایان ۳۰۰ سیکل نشان می‌دهد. در سیکل ۳۰۰ مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی مخلوط C4 به کمتر از ۶۰ درصد مقدار اولیه می‌رسد. در حالت کلی غیر از مخلوط C4، بکارگیری CWA تغییرات چشمگیری در مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی مخلوط‌ها ایجاد نمی‌کند. علیرغم کاهش بیش از ۴۰ درصدی مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی برای مخلوط C4 در پایان ۳۰۰ سیکل، این مخلوط در ۲۴۰ سیکل مقاومت قابل قبولی در برابر شرایط یخ‌زدگی و ذوب شدن و حضور محلول نمک نشان می‌دهد. همچنین مخلوط C4 در ۱۸۰ سیکل تغییرات مدول الاستیسیته دینامیکی تقریباً مشابه سایر ترکیبات دارد. می‌توان نتیجه گرفت این مخلوط برای مناطق با دوره‌های کوتاه مدت یخبندان عملکرد قابل قبولی دارد. نتایج پژوهشی آزمایشگاهی نشان می‌دهد نمونه‌های بتن‌غلتکی حاوی خاکستر بادی و فاقد افزودنی هوازا مقاومت قابل قبولی در برابر سیکل‌های انجماد و ذوب دارند. اما نتایج این پژوهش افزودن مواد هوازا را برای شرایط بلند مدت یخ‌زدگی توصیه می‌نماید [Piegeon, and Malhotra, 1995]. شکل ۱۵ مقدار فاکتور دوام مخلوط‌های این پژوهش را در پایان ۳۰۰ سیکل نشان می‌دهد. هریک از مقادیر این شکل میانگین ۲ اندازه‌گیری است. وضعیت بتن بر اساس مقدار فاکتور دوام به شرح زیر است [Neville, 2010]: بیشتر از ۶۰: رضایت‌بخش، ۴۰-۶۰: مشکوک، کمتر از ۴۰: عدم رضایت. با توجه به مقادیر فاکتور دوام در شکل ۱۵، مخلوط‌های کنترلی، C2 و C3 دوام قابل قبولی در ۳۰۰ سیکل انجماد و ذوب و حضور محلول نمک دارند. مخلوط C4 وضعیت مشکوکی داشته و دوام آن در شرایط یخ‌زدگی طولانی مدت با توجه به تمهیدات دیگری نظیر استفاده از افزودنی‌های هوازا قابل قبول می‌باشد. بکارگیری ۲ و ۳ درصد CWA، فاکتور دوام در اتمام ۳۰۰ سیکل یخبندان و ذوب و حضور محلول نمک را به ترتیب ۵ و ۹/۸۶ درصد افزایش می‌دهد.

۴۵ سیکل، بالاترین نرخ پوسته‌شدن سطح رخ می‌دهد بگونه‌ای که در تمام سطح آن سنگدانه‌ها نمایان است. درحالی‌که نمونه C3 علیرغم اتمام ۵۰ سیکل، همچنان بیشتر سطح آن فاقد پوسته شدن یا دارای نرخ کم پوسته‌شدن است. مخلوط C0 فاقد CWA عملکرد متوسطی در برابر پوسته شدن سطح از خود نشان داده‌است. مطابق جدول ۷، مخلوط‌های C2 و C3 عملکردی مشابه مخلوط کنترلی در آزمایش پوسته‌شدن سطح توسط یک لایه محلول نمک یخ‌زدا دارند. افزایش بکارگیری CWA تا ۳ درصد وزنی مصالح خشک، شروع خرابیهای سطحی را تقریباً به مقدار ۵ سیکل به تاخیر می‌اندازد. همچنین ملاحظه می‌گردد که در پایان ۵۰ سیکل، مخلوط‌های C2 و بخصوص مخلوط C3 درجه پوسته‌شدن پایین‌تری نسبت به سایر مخلوط‌ها دارند. خرابیهای پوسته‌شدن سطح در مخلوط C4 در سیکل‌های پایین‌تری شروع می‌شود. همچنین مخلوط C4 در پایان ۴۵ سیکل به بالاترین نرخ پوسته‌شدن سطح می‌رسد. تغییرات وزن در واحد سطح نمونه‌ها در پایان هر ۵ سیکل در شکل ۱۲ ملاحظه می‌گردد. هریک از مقادیر این شکل میانگین ۲ اندازه‌گیری می‌باشد. مخلوط‌های C0، C2 و C3 در پایان ۵۰ سیکل کمترین افت وزنی را دارند. در بین تمام ترکیبات، در مخلوط C3 کمترین و در مخلوط C4 بیشترین افت وزنی رخ می‌دهد. این موضوع با توجه به نتایج آزمایش مقاومت در برابر نفوذ یون کلر قابل پیش‌بینی می‌باشد. افزایش افت وزنی نمونه‌ها تا پایان سیکل ۴۰ با شدت بیشتری اتفاق می‌افتد اما در سیکل‌های پس از آن از شدت آن کاسته شد. با کاهش نسبت آب به سیمان و همچنین افزایش مقدار هوای محبوس در حفرات، پوسته‌شدن سطح به مقدار چشمگیری کاهش می‌یابد [Valenza, and Scherer, 2007, Liang et al. 2014]. یک مقدار بحرانی حفرات هوا متناسب با نوع بتن برای بهبود مقاومت پوسته‌شدن سطح وجود دارد [Valenza, and Scherer, 2007]. در ترکیبات این تحقیق مخلوط C4 نسبت آب به چسبنده بیشتری نسبت به سایر ترکیبات دارد. همچنین درصد حفرات نفوذپذیر مخلوط C4 بیشتر از مخلوط‌های C2 و C3 است. مخلوط‌های C2 و C3 با وجود نسبت آب به سیمان بیشتر نسبت به مخلوط کنترلی عملکرد بهتری در مقابل پدیده پوسته‌شدن سطح دارند. این موضوع می‌تواند مربوط به اثر بهبود منافذ خمیر سیمان با بکارگیری CWA تا ۳ درصد وزنی مصالح خشک باشد. اما کاهش مقاومت برای مخلوط C4 احتمالاً بدلیل غیر فعال ماندن مقداری از ترکیبات پوزولانی موجود در CWA و نسبت آب به سیمان بالاتر می‌باشد. هرچقدر سن عمل‌آوری نمونه افزایش یابد، تاثیر افزودنی‌های سیمانی نظیر خاکستر بادی بر مقاومت پوسته‌شدن بیشتر است [Ramezaniapour et al. 2014].

۴-۴- مقاومت در برابر سیکل‌های انجماد - ذوب و محلول نمک

شکل ۱۳ تغییرات سرعت امواج فراصوت در نمونه‌های ۲۸ روزه این تحقیق و در سیکل‌های مختلف انجماد و ذوب در حضور محلول نمک یخ‌زدا را نشان می‌دهد. هریک از مقادیر این شکل میانگین ۲ اندازه‌گیری می‌باشد. مقدار UPV در بتن به پارامترهایی مانند عمر نمونه‌ها، شرایط رطوبت، تخلخل بتن و نوع سنگدانه‌ها بستگی دارد [Aghabaglou et al. 2013]. رابطه کیفی بین مقدار UPV (بر حسب متر بر ثانیه) و مقاومت بتن به شرح زیر می‌باشد. [Whitehurst, 1951]:

کمتر از ۲۰۰۰ متر بر ثانیه: ضعیف

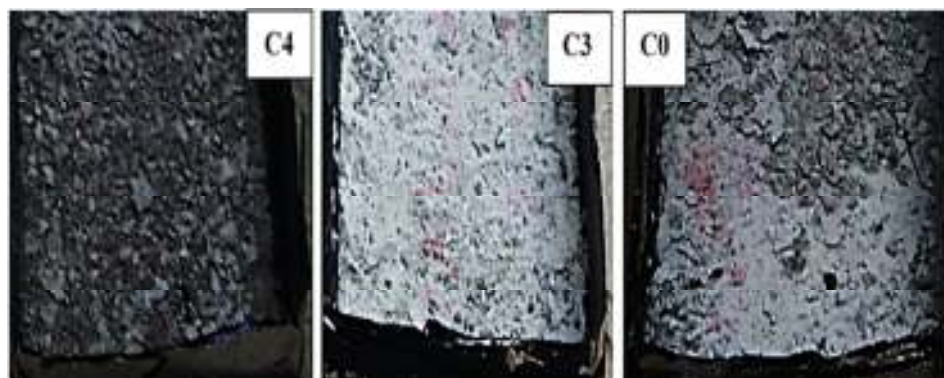
۳۰۰۰-۳۵۰۰ متر بر ثانیه: متوسط

است. این وضعیت برای مخلوط C0 فاقد CWA کمتر مشاهده می‌شود. ریزش دانه‌های سنگی برای مخلوط C3 حاوی ۳ درصد CWA کمتر از سایر ترکیبات است. هرچند پس از اتمام آزمایش، در تمام ترکیبات مصالح سنگی مشاهده می‌گردد.

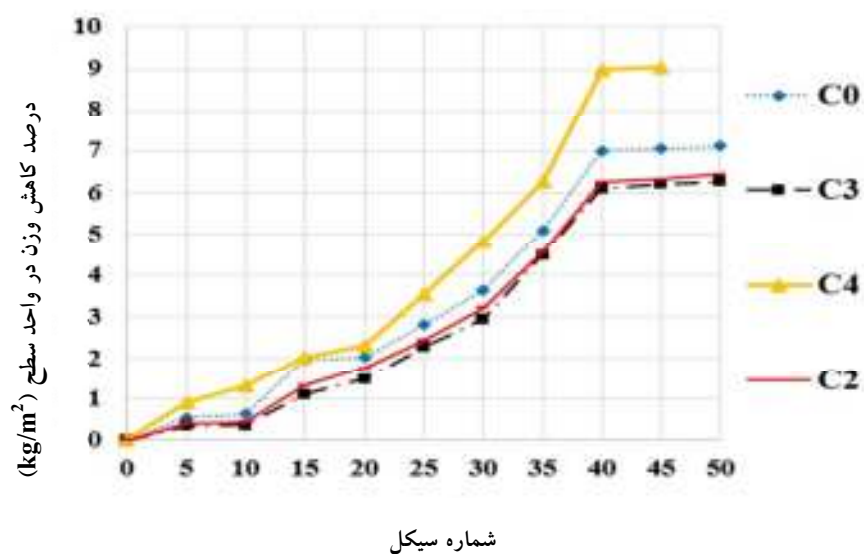
درحالی‌که فاکتور دوام برای مخلوط C4 ۲۴/۹۶ درصد نسبت به مخلول کنترلی کاهش یافت. شکل ۱۶ وضعیت ظاهری بعضی از نمونه‌های منشوری بتن‌غلتکی این پژوهش قبل و پس از اتمام آزمایش یخبندان و ذوب و حضور محلول نمک را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، مخلوط C4 پس از اتمام سیکل‌های یخبندان و ذوب در بیشتر قسمت‌ها همراه با ریزش شدید دانه در سطح همراه

جدول ۷. نرخ پوسته‌شدن سطح در سیکل‌های انجماد و ذوب و حضور محلول نمک یخ‌زدا

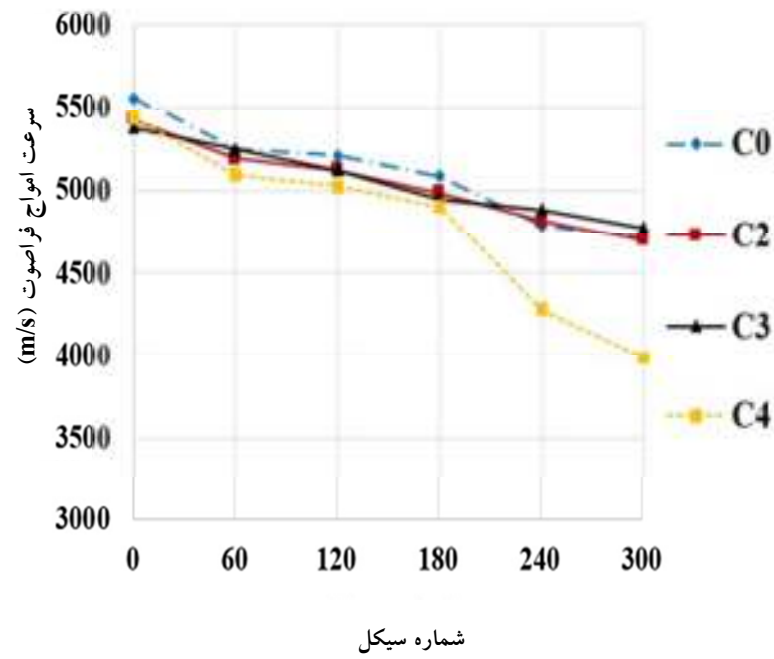
C4		C3		C2		C0		تعداد سیکل
۲	۱	۲	۱	۲	۱	۲	۱	
۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵
۱	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱۰
۳	۳	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱۵
۳	۳	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۲۰
۳	۳	۱	۱	۱	۱	۳	۳	۲۵
۳	۳	۱	۱	۳	۳	۳	۳	۳۰
۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳۵
۴	۴	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۴۰
۵	۵	۳	۳	۴	۴	۴	۴	۴۵
-	-	۴	۴	۵	۴	۵	۵	۵۰



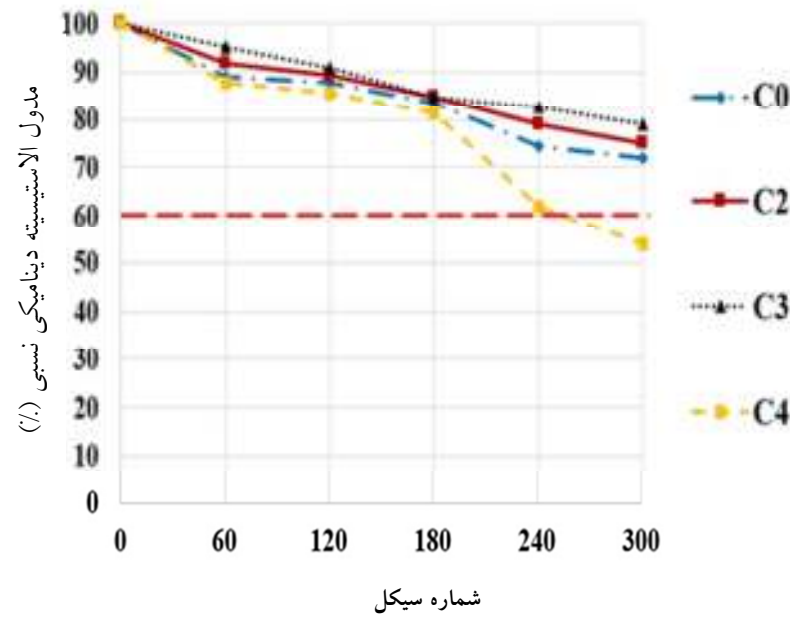
شکل ۱۱. وضعیت ظاهری بلوک‌های بتن‌غلتکی پس از اتمام آزمایش مقاومت در برابر پوسته شدن در حضور محل نمک



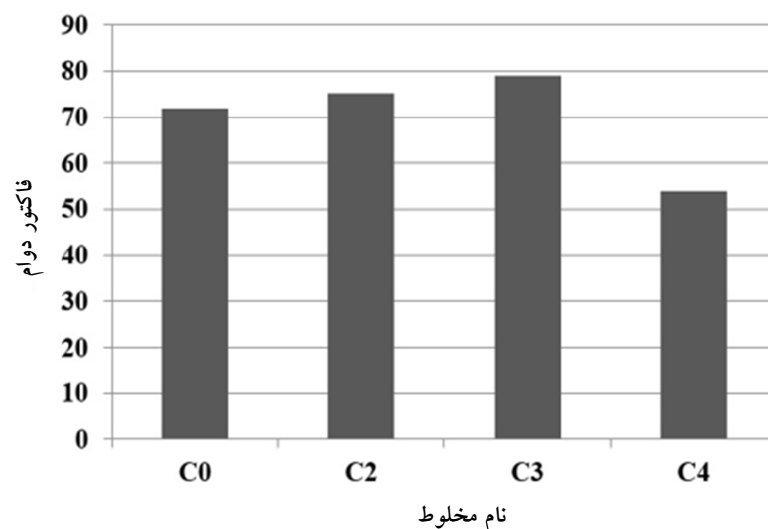
شکل ۱۲. تغییرات آفت وزنی ناشی از پوسته‌شدن سطح در سیکل‌های انجماد و ذوب و حضور محلول نمک یخ‌زدا



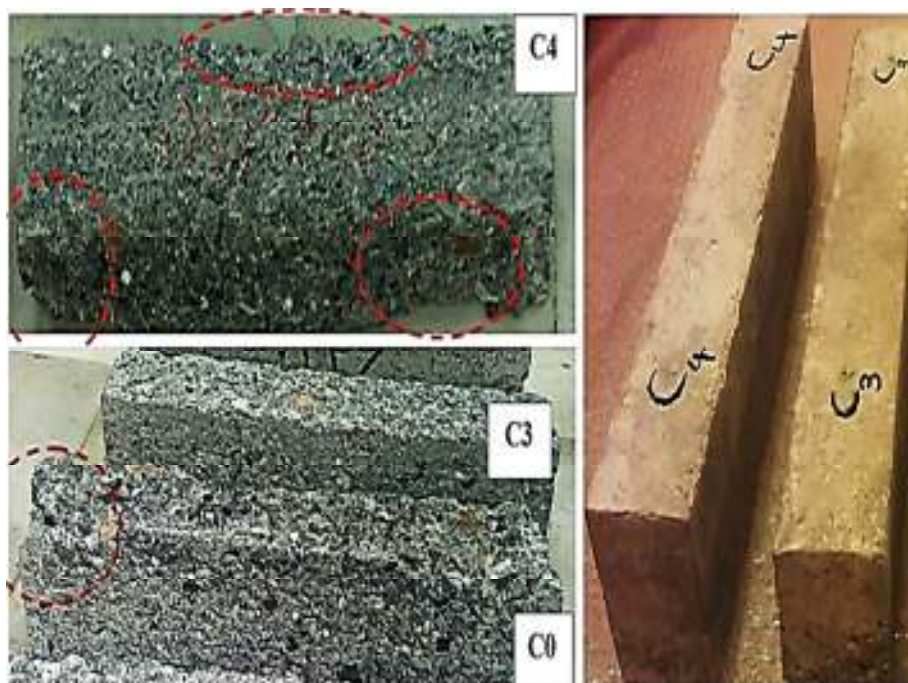
شکل ۱۳. تغییرات سرعت امواج فراصوت در سیکل‌های مختلف یخبندان و ذوب و حضور محلول نمک یخ‌زدا



شکل ۱۴. تغییرات مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی در سیکل‌های مختلف یخبندان و ذوب و حضور محلول نمک یخ‌زدا



شکل ۱۵. فاکتور دوام مخلوط‌های بتن‌غلتکی در پایان ۳۰۰ سیکل یخبندان و ذوب و حضور محلول نمک یخ‌زدا



شکل ۱۶. وضعیت ظاهری بعضی از نمونه‌های منشوری بتن‌غلتکی پس از اتمام آزمایش یخبندان و ذوب و حضور محلول نمک یخ‌زدا

۵- نتیجه‌گیری

- مخلوط کنترلی و C2 عملکرد تقریباً مشابهی در برابر پوسته شدن سطح نشان می‌دهند. مخلوط حاوی ۳ درصد CWA بیشترین و مخلوط C4 کمترین مقاومت در برابر پوسته شدن سطح را دارا هستند. بالا بودن نسبت آب به سیمان مخلوط C4 ممکن است مهمترین علت برای این موضوع باشد.
- بر اساس نتایج آزمایش سرعت امواج فراصوت و مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی، مخلوط کنترلی، C2 و C3 در طول ۳۰۰ سیکل عملکرد تقریباً مشابهی دارند. درحالی‌که مخلوط C4 پس از سیکل ۱۸۰ کاهش شدیدی نشان می‌دهد. این ترکیب در شرایط بلند مدت یخبندان و ذوب و همچنین حضور محلول نمک یخ‌زدا می‌تواند بحرانی باشد. استفاده از افزودنی هوازا برای ترکیب C4 در شرایط بلند مدت یخبندان و ذوب یخ توصیه می‌گردد.
- بر اساس نتایج آزمایش‌های دوام صورت گرفته در این پژوهش، مخلوط حاوی ۳ درصد CWA و ۱۱ درصد سیمان پرتلند تیپ II و نسبت آب به سیمان ۰/۴۱، بعنوان طرح اختلاط پیشنهادی معرفی می‌گردد.

هدف این پژوهش بررسی دوام بتن‌غلتکی روسازی راه در برابر شرایط یخبندان و ذوب و همچنین حضور محلول نمک یخ‌زدا می‌باشد. در کنار ابعاد فنی، این پژوهش تلاش دارد از یک پسماند دارای اثرات مخرب زیست محیطی که در حالت خاکستر دارای ترکیبات پوزولانی است بجای قسمتی از سیمان استفاده نماید. مقدار چسبنده مورد استفاده در این پژوهش (سیمان پرتلند معمولی + خاکستر پسماند زغال سنگ) به مقدار ۱۴٪ وزن کل مصالح خشک ثابت ماند. مخلوط کنترلی فاقد خاکستر پسماند زغال سنگ بوده و به مقدار ۱۴٪ وزن کل مصالح خشک حاوی سیمان پرتلند معمولی تیپ II می‌باشد (C0). در سایر ترکیبات به مقدار ۲، ۳ و ۴ درصد وزن کل مصالح خشک از خاکستر پسماند زغال سنگ بجای قسمتی از سیمان استفاده گردید (C2، C3 و C4). بر اساس نتایج آزمایشات موارد زیر بیان می‌گردد:

- بکارگیری CWA تا مقدار ۳٪ وزن کل مصالح خشک مقدار حفرات نفوذپذیر را کاهش می‌دهد. درحالی‌که برای مقدار ۴ درصد CWA مقدار این پارامتر بیشتر از سایر مقادیر است. با این وجود مقدار حفرات نفوذپذیر ترکیبات حاوی ۴ درصد CWA همچنان کمتر از مخلوط کنترلی فاقد خاکستر پسماند زغال سنگ است. مهمترین دلیل این موضوع ممکن است مربوط به ریزدانه تر بودن CWA نسبت به سیمان پرتلند معمولی باشد. درحالی‌که در ترکیبات حاوی ۴ درصد CWA مقداری از ترکیبات پوزولانی موجود در خاکستر غیر فعال بوده و مانند یک ماده غیر فعال عمل می‌کند.
- بر اساس نتایج آزمایش مقاومت در برابر نفوذ یون کلر، ترکیبات حاوی ۲ و ۳ درصد CWA مقاومت بیشتری نسبت به مخلوط کنترلی بدست می‌دهند. با وجود کاهش در مقاومت ترکیبات حاوی ۴ درصد CWA، این ترکیبات بر اساس طبقه‌بندی ASTM C1202 از مقاومت قابل قبولی برخوردار است.

۶- پی‌نوشت‌ها

1. Roller Compacted Concrete Pavement
2. Coal Waste Ash
3. Coal Waste
4. Gravity Concentration Machine
5. Flotation
6. Acid Mine Drainage
7. Coal Waste Powder
8. Loss of Ignition
9. Ultrasonic Pulse Velocity

- "Human and Ecological Risk Assessment of Coal Combustion Wastes", (2010), "U.S. Environmental Protection Agency", Office of Solid Waste and Emergency Response, Office of resource Conservation and Recovery, April.
- Kim, J. Moon, J.H. Shim, J.W. Sim, J. Lee, H.G. Zi, G. (2014) "Durability properties of a concrete with waste glass sludge exposed to freeze-and-thaw condition and de-icing salt", *Cons. and Bui. Mat.*, 66, pp.398-402.
- Laskowski, J. (2001), "Coal flotation and fine coal utilization", The Netherlands, Amsterdam: Elsevier, pp. 475-480.
- Liang, W.J. Tao, S.L. Min, N. (2014), " Study on the Salt Scaling Resistance of Pavement Cement Concrete", *J. of Hig. and Trans. Res. and Dev.*, 8(2), pp.1-4.
- Liu, Z. Hansen, W. (2016), "Freeze-thaw durability of high strength concrete under deicer salt exposure", *Cons. and Bui. Mat.*, 102, pp.478-485.
- Marchand, J. Pigeon, M. Bager, D. Talbot, C. (1999), "Influence of Chloride Solution Concentration on Deicer Salt Scaling Deterioration of Concrete", *ACI. Mat. J.*, 96, pp.429-435.
- Mehta, P.K. Monteiro, P. (2005), "Concrete: microstructure, properties, and materials" McGraw-Hill Professional, 3th Edn., New York. pp. 684.
- Modarres, A. Ayar, P. (2014), "Coal waste application in recycled asphalt mixtures with bitumen emulsion", *J. of Clea. Pro.*, 83, pp.263-272.
- Modarres, A. Nosoudy, Y.M. (2015), "Clay stabilization using waste and lime-Technical and environmental impacts", *App. Cl. Sci.*, 116-117, pp.281-288.
- Modarres, A. Rahmanzadeh, M. (2014), "Application of coal waste powder as filler in hot mix asphalt", *Cons. and Bui. Mat.*, 66, pp.476-483.
- Modarres, A. Rahmanzadeh, M. Ayar, P. (2015), "Effect of coal powder in hot mix asphalt compared to conventional fillers: mix mechanical properties and environmental impacts", *J. of Clea. Pro.*, 91, pp.262-268.
- Moradzadeh, A. Ardejani, F.D. Shokri, B.J. Sarkheil, H. Osanloo, M. (2007), "A method for coal waste disposal site selection for prevention of environmental impacts", *IMWA Symposium: Water in Mining Environment, Caligari, Italy, May*, pp.1-4.
- Neville, A.M. (2010), "Concrete Technology", Longman Group, 2th Edn., pp.460, UK,.
- ACI 325.10R-95. (Reapproved 2001) (1995), "Report on Roller-Compacted Concrete Pavements", Report by ACI Committee 325, March.
- Aghabaglou, A.M. Cakir, Ö.A. Ramyar, K. (2013), "Freeze-thaw resistance and transport properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum density method", *Cem. & Conc. Com.*, 37, pp.259-266.
- Akcil, A. and Koldas, S., (2006), "Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies", *J. of Clea. Pro.*, 14, pp.1139-1145.
- Berkowski, P. Kazberuk, M.K. (2015), "Effect of fiber on the concrete resistance to surface scaling due to cyclic freezing and thawing", *proc. Eng.*, 111, pp.121-127.
- Banthia, N. Pigeon, M. Marchand, J. Boisvert, J. (1992), "Permeability of Roller Compacted Concrete", *J. of Mat. Civ. Eng.*, 4, pp.27-40.
- Blackburn, R.R. Bauer, M.K. Amsler, E.D. Boselly, E.S. Mcelory, D.A. (2004), "Snow and Ice Control: Guidelines for Materials and Methods", NCHRP Report 526, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board of National Academies, Washington, D.C.
- Deja, J. (2003), "Freezing and de-icing resistance of blast furnace slag concrete", *Cem. & Conc. Com.*, 25, pp.357-361.
- Gottlieb, B. Gilbert, S.G. Evans, L.G. (2010), "Coal Ash: The toxic threat to our health and environment", A Report from Physicians for Social Responsibility and Earth Justice, US, Washington. D.C, September.
- Hazaree, C. Ceylan, H. Wang, K. (2011), "Influences of mixture composition on properties and freeze-thaw resistance of RCC", *Cons. and Bui. Mat.*, 25, pp.313-319.
- Heede, P.V.D. Furniere, J. Belie, N.D. (2013), "Influence of air entraining agents on deicing salt resistance and transport properties of high-volume fly ash concrete", *Cem. & Conc. Com.*, 37, pp.293-303.
- Hesami, S. Modarres, A. Soltaninejad, M. Madani, H. (2016), "Mechanical properties of roller compacted concrete pavement containing coal waste and limestone powder as partial replacements of cement", *Cons. & Bui. Mat.*, 111, pp.625-636.
- Hossain, K. and Fu, L. (2015) "Optimal Snow and Ice Control of Parking Lots and Sidewalks: A Summary Final Report", University of WATERLOO Report, Its Lab, Department of Civil & Environmental Engineering, Ontario, Canada, January.

- Coal Washing Plant, Zirab, Northern Iran”, *Mine. Water. Environ.*, 32, pp.84-96.
- Sim, J. Park, C. (2011), “Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate”, *Waste. Manag.*, 31, pp.2352-2360.
 - Skripkiūnas, G. Nagrockienė, D. Girskas, G. Vaičienė, M. Baranauskaitė, E. (2013), “The Cement Type Effect on Freeze-Thaw and Deicing Salt Resistance of Concrete”, *Proc. Eng.*, 57, pp.1045-1051.
 - Sun, C. Li, W. Hou, B. (2012), “Study on Frost-salt Resistance of Fly Ash Concrete”, *Adv. Mat. Res.*, 598, pp.432-437.
 - Urban, J. Kostelecká, M. Klečka, T. (2014), “Surface layer parameter of concrete in relation to deicing salt scaling resistance”, *Adv. Mat. Res.*, 1000, pp.298-301.
 - Valenza, J.J. and Scherer, G.W. (2007), “A review of salt scaling: I. Phenomenology”, *Cem. Con. Res.*, 37, pp.1007-1021.
 - Whitehurst, E.A. (1951), “Soniscope tests concrete structures”, *J. of Ame. Con. Ins.*, 47, pp.443-444.
 - WON, J.P. JANG, C.I. LEE, S.W, KIM, W.Y. (2009), “Durability Performance of Roller Compacted Concrete Using Fly Ash”, *Brit. Mat. Com.*, 9, 161-168.
 - Zaheri, M. Nili, M. (2011), “Deicer salt-scaling resistance of non-air-entrained roller-compacted concrete pavements”, *Cons. and Bui. Mat.*, 25, pp.1671-1676.
 - Oliver, J.G.J. Maenhout, G.J. Muntean, M. Peters, J.A.H.W. (2014), “Trends in global CO2 emissions”, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, Institute for Environment and Sustainability(IES) & European Commission’s Joint Research Centre (JRC), December.
 - Pigeon, M. Malhotra, V.M. (1995), “Frost Resistance of Roller-Compacted High-Volume Fly Ash Concrete”, *J. of Mat. Civ. Eng.*, 7, pp.208-211.
 - Portland Cements Association (OCA). (2004), “Guide Specification for Construction of Roller-Compacted Concrete Pavements”, USA, Illinois, Skokie, June.
 - Rafieizonooz, M. Mirza, J. Salim, M.R. Hussin, M.W. Khankhaje, E. (2016), “Investigation of coal bottom ash and fly ash in concrete as replacement”, *Cons. & Bui. Mat.*, 116, pp.15-24.
 - Ramezaniapour, A.A. Nadooshan, M.J, Peydayesh, M. Ramezaniapour, A.M. (2014), “Effect of Entrained Air Voids on Salt Scaling Resistance of Concrete Containing a New Composite Cement”, *J. of Civ. Eng.*, 18(1), pp.213-219.
 - Rao, S.K. Sravana, P. Rao, T.C. (2016), “Experimental studies in Ultrasonic Pulse Velocity of Roller Compacted Concrete Pavement Containing Fly Ash and M-Sand”, *Int. J. of Pave. Res. and Tech.*, Article in Press. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.08.003>.
 - Sengul, O. Tasdemir, M.A. (2009), “Compressive Strength and Rapid Chloride Permeability of Concrete with Ground Fly Ash and Slag”, *J. of Mat. Civ. Eng.*, 21, pp.494-501.
 - Shahhoseiny, M. Ardejani, F.D. Shafaei, S.Z. Noaparast, M. Hamidi, D. (2013), “Geochemical and Mineralogical Characterization of a Pyritic Waste Pile at Anjir Tangeh

