

یخ زدایی راه با استفاده از روسازی بتن غلتکی رسانا

احسان باوفا

دانشجوی دکتری عمران گریش راه و ترابری دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران
Ehsan.bavafa71@yahoo.com

دانیال نصر

استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان
dnasr@khuisf.ac.ir

چکیده

یخ زدگی راه، سالانه باعث ایجاد تاخیرهای زیادی برای استفاده کنندگان راهها می شود، همچنین ایمنی راه را کاهش داده و نرخ تصادفات را افزایش می دهد. از دیگر مشکلات یخ زدگی روسازی راه یا باند فرودگاه، جدای از هزینه های برف روبی، می توان به اثرات مخربی که مواد یخ زدایی شیمیایی و نمکها بر روی روسازی های بتنی و آسفالتی ایجاد می کنند و باعث کاهش طول عمر آن شده و همچنین آثار مخربی که بر روی محیط زیست می گذارند اشاره کرد. در این مطالعه بررسی می گردد که افزودن براده های فولادی به بتن غلتکی در کنار الیاف فولادی تا چه میزان می تواند، توانایی هدایت الکتریکی بتن را افزایش داده تا با عبور جریان برق، روسازی های بتنی توانایی ذوب برف و یخ را داشته باشند. برای دست یابی به این هدف، ۱۷ طرح اختلاط متفاوت طراحی و برای هر طرح ۹ عدد نمونه ساخته شد و با بررسی نتایج، این نتیجه حاصل شد که با افزودن براده های فولادی به مقدار ۷ درصد حجمی مواد ریزدانه، به همراه الیاف فولادی به مقدار ۱ درصد حجمی کل مصالح سنگی، به بتن غلتکی، می توان به هدایت الکتریکی بسیار بالایی دست یافت و مقاومت الکتریکی ویژه بتن را از ۵۴/۵۲ اهم- متر برای بتن غلتکی معمولی، تا ۰/۵۳ اهم- متر برای بتن غلتکی رسانا، کاهش داد.

کلمات کلیدی: بتن غلتکی، بتن رسانا، روسازی، الیاف فولادی، بتن الیافی

۱. مقدمه

بتن غلتکی، بتنی است خشک با کارایی بسیار پایین (آزمون وی-بی برابر صفر) که میزان آب آن کمتر از میزان آب مورد استفاده در بتن های معمولی است (Berry et al., 2001). بتن غلتکی بعد از مخلوط شدن، به صورت تازه، با دستگاه های متداول روسازی پخش و بلافاصله، توسط غلتک های وایبره ای متراکم می گردد (ACI, 1999; Naik et al., 2001). در برخی موارد نیز جهت دستیابی به سطح مطلوب تر از غلتک های چرخ لاستیکی در تراکم نهایی استفاده می شود (نشریه ۳۵۴، ۱۳۸۸). در بتن غلتکی، می توان از مصالح سنگی طبیعی و شکسته یا ترکیبی از هر دو استفاده کرد. یکی از مصالح جدید که می توان از آن در روسازی های بتن غلتکی استفاده کرد سرباره حاصل از ساخت فولاد است (ASTM, 2001). سرباره یکی از محصولات جانبی شرکت های فولاد سازی است که شامل موادی همچون سیلیکات، کلسیم، فریتهای کلسیم، اکسید کلسیم، اکسید آهن، اکسید آلومینیوم، اکسید منگنز و اکسید منیزیم است که به طور همزمان با فولاد تولید می شوند (Das, Prakash, Reddy, & Misra, 2007). از جمله خواص سرباره می توان به مقاومت سایشی بالا، مقاومت برشی زیاد، دوام بیشتر در مقابل عوامل جوی نسبت به مصالح سنگی طبیعی و قیمت ارزن اشاره کرد (فرمان آرا، ۱۳۹۱).

بررسی امکان رسانا کردن بتن‌های غلتکی و حل مشکل یخ زدگی روسازی راه‌ها و فرودگاه‌ها به کمک ساخت بتن غلتکی رساناست. بتن رسانای الکتریکی (ECC) یک تکنولوژی مربوط به بتن سبک، در شورای تحقیقات ملی کانادا است (Pye, Myers, Arnott, Beaudoin, & Tumidajski, 2003). هنگامی که یک ولتاژ به بتن رسانای الکتریکی سبک متصل می‌شود، انرژی حرارتی ایجاد می‌کند بنابراین می‌توان از آن برای ذوب برف و یخ زدگی روسازی استفاده کرد (Tumidajski, 2002).

یخ زدگی راه، سالانه باعث ایجاد تاخیرهای زیادی برای استفاده کنندگان راه‌ها می‌شود، همچنین ایمنی راه را کاهش داده و نرخ تصادفات را افزایش می‌دهد. در فرودگاه‌ها نیز باعث ایجاد تاخیر در پروازها گردیده و جهت حذف برف و یخ از باند فرودگاه و آماده‌سازی آن جهت ادامه سرویس‌دهی، میلیون‌ها دلار به شرکت‌های هواپیمایی خسارت وارد می‌کند (Abdualla et al., 2018). از دیگر مشکلات یخ زدگی روسازی راه یا باند فرودگاه، جدای از هزینه‌های برف رویی، می‌توان به اثرات مخربی که مواد یخ زدای شیمیایی و نمک‌ها بر روی روسازی‌های بتنی و آسفالتی ایجاد می‌کنند و باعث کاهش طول عمر آن شده و همچنین آثار مخربی که بر روی محیط زیست می‌گذارند اشاره کرد (Yehia & Tuan, 2000). از این آثار مخرب می‌توان به پوسته پوسته شدن و ترک خوردگی روسازی اشاره کرد (Cho, 2007).

هرساله تعداد زیادی از تصادفات در راه‌ها به خاطر یخ زدگی و لغزندگی سطح راه رخ می‌دهد، همچنین بارش برف و باران هرساله باعث مسدود شدن راه‌ها و ایجاد مشکلات فراوان برای باند فرودگاه‌ها در کشور شده و باعث تاخیر در سفر، افزایش هزینه‌های راهداری و آژانس‌های هواپیمایی، به منظور بازگشایی راه، یا برف رویی باند هواپیما می‌شود و هزینه‌های فراوان دیگری از جمله آسیب‌های وارده از نمک‌های یخ زدا به روسازی و محیط زیست می‌شود، به همین منظور اهمیت دیگر این تحقیق، تلاش برای ساخت بتنی است که بتواند از یخ‌زدگی و لغزندگی راه جلوگیری کرده و باعث کاهش تصادفات جاده‌ای و افزایش ایمنی راه‌ها و کاهش هزینه‌ها گردد و از نوع بتن غلتکی باشد به دلیل اینکه تا کنون بتن غلتکی رسانا ساخته نشده، و مزایای بیشتری نسبت به سایر انواع روسازی بتنی، از جمله، امکان استفاده از وسایل اجرای متداول روسازی آسفالتی مانند فینیش و غلتک‌ها، عدم نیاز به استفاده از قالب بندی و عدم استفاده از آرماتور و همچنین امکان استفاده از مصالح با کیفیت پایین تر نسبت به بتن معمولی را دارد (Gomez, 1989).

بتن رسانای الکتریکی، یک تکنولوژی در شورای تحقیقات ملی کانادا است که در سال ۱۹۹۵ ساخته شد (Pye et al., 2003). هنگامی که یک ولتاژ به بتن رسانای الکتریکی متصل می‌شود، انرژی حرارتی ایجاد می‌کند بنابراین می‌توان از آن برای ذوب برف و یخ زدگی روسازی استفاده کرد (Tumidajski, 2002). بتن رسانای الکتریکی تقریباً یک مقاومت خالص با مقاومت الکتریکی کمتر از ۱۰ اهم- سانتی متر است (Xie & Beaudoin, 1995). در ساخت روسازی راه‌ها با استفاده از بتن رسانا لایه آخر را با یک لایه بتن غیر رسانا، پوشش می‌دهند تا در ولتاژهای بالا، یک مانع فیزیکی برای جلوگیری از انتقال جریان به سطح روسازی شود، دقیقاً مانند روکش پلاستیکی که بر روی سیم‌های برق کشیده می‌شود (Tumidajski, Xie, Arnott, & Beaudoin, 2003).

یکی از مهمترین موارد استفاده از بتن رسانا، استفاده در باند فرودگاه‌هاست. یخ و برف در فرودگاه، باعث ایجاد تاخیر در پروازها گردیده و حذف برف و یخ از باند فرودگاه و آماده سازی آن جهت ادامه سرویس دهی، میلیون‌ها دلار به شرکت‌های هواپیمایی خسارت وارد می‌کند (Abdualla et al., 2018). از دیگر تاثیرات مخرب برف و یخبندان می‌توان به افزایش آمار تصادفات و سوانح جاده‌ای اشاره کرد. آمار جهانی نشان می‌دهد که ۱۰ تا ۱۵ درصد از تمام حوادث جاده‌ای به طور مستقیم مربوط به شرایط آب و هوایی است. این درصد به تنهایی هزاران سانحه و تلفات انسانی و سالانه میلیون‌ها دلار از هزینه را به خود اختصاص می‌دهد (Tuan, 2008). آماری که توسط کمیسیون ایمنی راه‌ها از شرایط آب و هوایی تصادفات در ایران تهیه شده نیز نشان می‌دهد که تعداد بالایی از حوادث در زمان بارش برف و لغزندگی جاده رخ داده است، جدول (۱). همچنین لغزندگی معابر، صرفاً یک نگرانی برای رانندگان نیست؛ تجمع یخ در پیاده روها نیز، آسیب‌های شخصی متعددی را به عابرین پیاده وارد می‌کند. فناوری بتن رسانای الکتریکی، در مواردی مانند پل‌ها، رمپ‌های خروج، باند فرودگاه، تقاطع‌های خیابانی، پیاده روها و راه‌های ورودی قابل استفاده است.

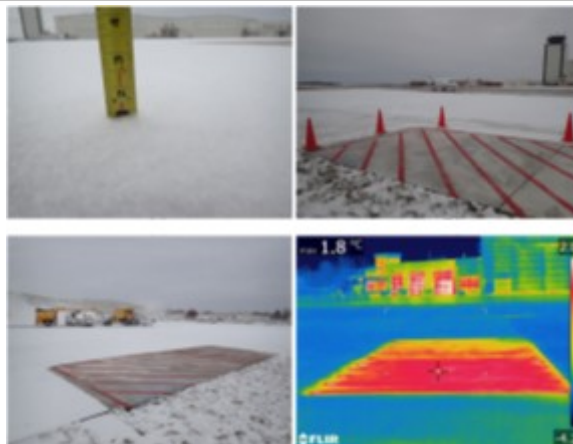
علاوه بر مواردی که ذکر شد، بتن رسانا از آسیب‌های زیست محیطی که نمک‌ها و سایر مواز یخ زدا به جا می‌گذارند می‌کاهد. همچنین باعث کاهش آثار مخرب این مواد از جمله ترک خوردگی و پوسته پوسته شدن بر روی روسازی می‌گردد (Cho, 2007). شن و ماسه مورد استفاده برای ذوب یخ و جلوگیری از سر خوردن وسایل نقلیه که بر روی سطح روسازی پخش می‌شوند نیز باعث انباشته شدن در کناره راه، آسیب به وسایل نقلیه، افزایش هزینه برای پاکسازی بعد از رفع لغزندگی و همچنین آسیب به سطح روسازی می‌گردند (صفریان، ۱۳۹۵).

جدول ۱- آمار تصادفات منجر به جرح و فوت در اثر بارش برف و لغزندگی جاده بین سال‌های ۹۳ تا ۹۷ (سامانه اطلاعات سوانح و حوادث حمل و نقل کشور)

تعداد کل سوانح	کشته	زخمی	
۹۷/۰۹/۰۱ ۹۷/۱۲/۲۹	۹	۹۹	۴۵
۹۶/۰۹/۰۱ ۹۶/۱۲/۲۹	۱۶	۳۳۸	۱۰۹۳
۹۵/۰۹/۰۱ ۹۵/۱۲/۳۰	۴۲	۷۹۹	۲۶۱۹
۹۴/۰۹/۰۱ ۹۴/۱۲/۲۹	۱۷	۲۵۹	۸۲۱
۹۳/۰۹/۰۱ ۹۳/۱۲/۲۹	۲۰	۳۱۶	۱۰۴۹
جمع	۱۰۴	۱۸۱۱	۵۶۲۷

۲-پیشینه تحقیقات:

هشام عبدالله و همکاران در مطالعه ای، به بررسی سیستم روسازی‌های گرم (HSP)، مبتنی بر سیستم بتن رسانای الکتریسیته (ECON)، در فرودگاه دی‌مویین ایالات متحده در سال ۲۰۱۶ پرداخت. در این مطالعه بتن با استفاده از الیاف کربن به میزان ۱ درصد حجم کل بتن رسانا شده. ۷۰ درصد از الیاف مورد استفاده طولی برابر ۰/۲۳ اینچ و ۳۰ درصد آن طولی برابر ۰/۱۲ اینچ داشته‌اند. آن‌ها با استفاده داده‌های جمع آوری شده و عملکرد اصلب‌ها، تحت شرایط آب و هوایی واقعی به این نتایج دست یافت، که سیستم روسازی‌های گرم مبتنی بر بتن رسانای الکتریسیته، توانایی ذوب کردن یخ‌ها را دارند و می‌توانند گرما را در دال توزیع کرده، برف و یخ را تحت شرایط مختلف آب و هوایی زمستانی ذوب کنند (Abdualla et al., 2018).



شکل ۱- دال بتن رسانای اجرا شده در مطالعه ذکر شده و میزان افزایش دما (Abdualla et al., 2018).

ملکی و همکاران، در مطالعه ای اقدام به افزودن الیاف کربن (CFRP)، به بتن، جهت ساخت بتن با هدایت الکتریکی بالا کردند. آن‌ها پس از ساخت نمونه‌ها جریان برق ۳/۷ ولت را به نمونه‌ها متصل کردند و در طول آزمایش دمای سطح اسلب اندازه گیری شد. آن‌ها مشاهده کردند که پس از گذشت ۲۰۰ دقیقه، در یک جریان متناوب ۳/۷۵ ولت، دمای نمونه‌های بتنی حاوی ۱٪ الیاف کربن، از دمای منفی ۱۰ به مثبت ۱۰/۵ درجه سانتی گراد و دمای نمونه‌های بتنی حاوی ۲٪ الیاف کربن، از دمای منفی ۱۰ به ۱۱/۷ درجه سانتیگراد افزایش یافت. همچنین نتایج تست‌های مقاومت فشاری و مقاومت کششی نمونه‌ها نیز، حاکی از افزایش مقاومت بوده است (Maleki, Iranpour, & Shafabakhsh, 2017).



شکل ۲- الیاف کربن استفاده شده در مطالعه ذکر شده (Maleki, Iranpour, & Shafabakhsh, 2017).

توآن و همکاران، اقدام به ساخت بتن رسانا حاوی تراشه فولادی، الیاف فولادی و پودر کربن کردند و آن را روی روسازی پل جهت آزمایش یخ زدایی استفاده کردند. در طرح اختلاط‌های متفاوت میزان براده فولادی به اندازه ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد حجمی به همراه ۱/۵ درصد حجمی الیاف فولادی استفاده شدند. محققان به این نتیجه رسیدند که اجرای یک پوشش نازک بتن رسانا و اتصال به جریان برق، بر روی عرشه پل می‌تواند از یخ زدگی سطح راه جلوگیری کند. هزینه انرژی مصرفی جهت یخ زدایی در هر بار بارش برف، حدود ۰/۶ تا ۰/۸ دلار برای هر متر مربع محاسبه شد. علاوه بر این مقاومت مکانیکی بتن نیز استانداردهای آستو و ASTM را برآورده کرد (Yehia & Tuan, 2000).



شکل ۳-۳- دال بتنی ساخته شده در مطالعه ذکر شده (Yehia & Tuan, 2000).

۳- روش تحقیق

۳-۱- مشخصات مواد و مصالح

مصالح مورد استفاده در این مطالعه سیمان، آب، سرباره کنورتور ذوب آهن (جایگزینی ۱۰۰ درصد مصالح درشت دانه)، ماسه طبیعی، الیاف فولادی و براده های فولادی است که در ادامه مشخصات آنها ارائه شده است.

۳-۱-۱- سیمان

در بتن غلتکی می توان از انواع مختلف سیمان استفاده کرد، در بسیاری از روسازی های بتن غلتکی که تاکنون ساخته شده اند، از سیمان پرتلند نوع I یا II و خاکستر بادی کلاس F یا C استفاده شده است (ASTM, 1999). سیمان پرتلند مورد استفاده باید الزامات استاندارد ASTM C150 را ارضا کند (ASTM, 2012). تنها از سیمان پرتلند نوع III (زود سخت شونده) به دلیل عدم فرصت کافی برای کار با بتن، در بتن غلتکی استفاده نمی شود (US Army Corps of Engineers, 1995). سیمان استفاده شده در این تحقیق، سیمان پرتلند نوع II کارخانه سیمان اردستان اصفهان است. مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان مصرفی در جدول (۳-۱) و (۳-۲) ارائه گردیده است.

جدول ۲- مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی

ترکیبات	درصد (%)
SiO ₂	۲۲/۰۰
Fe ₂ O ₃	۳/۸۲
Al ₂ O ₃	۵/۰۰
MgO	۱/۹۰
CaO	۶۴/۰۰
SO ₃	۱/۵۰
K ₂ O	۰/۴۹
Na ₂ O	۰/۲۵
Cr	۰/۰۱۹
C ₃ A	۶/۵۰
L.O.I	۱/۰
L.S.F	۹۱/۰
CaO free	۱/۲
باقیمانده غیر محلول	۰/۴۶

جدول ۳- مشخصات فیزیکی سیمان مصرفی

نرمی (بلین) (سانتی مترمربع بر گرم)	زمان گیرش (دقیقه)		مقاومت فشاری (مگاپاسکال)		
	اولیه	نهایی	۳ روز	۷ روز	۲۸ روز
۳۰۰۰	۹۵	۱۵۰	>۱۷	>۲۷	>۳۷

۳-۱-۲- آب

کیفیت و الزامات آب مورد استفاده در بتن غلتکی، مشابه آب مصرفی در بتن معمولی طبق استاندارد ASTM C1602 است (ASTM, 2012). میزان آب مورد استفاده در بتن غلتکی باید در محدوده کارایی پایین (اسلامپ و آزمون وی-بی برابر با صفر) باشد. در این تحقیق از آب شرب (لوله کشی) شهر اصفهان استفاده شده است.

۳-۱-۳- سرباره کنورتور ذوب آهن

سرباره کوره ذوب آهن یکی از محصولات جانبی شرکت‌های فولاد سازی است. این تحقیق با استفاده از سرباره کنورتور شرکت ذوب آهن اصفهان انجام شده است. در تمام نمونه‌ها به جز نمونه شاهد (RCC-P0) از سرباره به عنوان جایگزین صد در صد مصالح سنگی درشت دانه استفاده گردیده است. جداول (۳) و (۴) خصوصیات فیزیکی و شیمیایی سرباره مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهند. قابل ذکر است که سرباره مورد استفاده، از دپویی که به مدت ۶ ماه در فضای باز در معرض رطوبت و بارندگی قرار داشته، استفاده شده است. شکل (۴) سرباره استفاده شده را نشان می‌دهد.

جدول ۴- مشخصات فنی سرباره کنورتور مورد استفاده در این مطالعه

مشخصه	استاندارد	مقدار
حداکثر اندازه اسمی (میلی متر)	ASTM-C136	۱۹
درصد سایش لس آنجلس	ASTM-C131	۱۸/۰
چگالی واقعی (گرم بر سانتی متر مکعب)	ASTM-C127	۲/۷۱۰
چگالی اشباع با سطح خشک (گرم بر سانتی متر مکعب)	ASTM-C127	۳/۲۵۰
درصد جذب آب	ASTM-C127	۲/۹

جدول ۵- مشخصات شیمیایی سرباره کنوتومور ذوب آهن اصفهان

ترکیبات	درصد
SiO ₂	۹-۱۱
Fe	۱۵-۱۹
Al ₂ O ₃	۰/۷ - ۱/۴
MgO	۱-۲
P ₂ O ₅	۲/۳ - ۳/۲
MnO	۴-۵
K ₂ O	۰/۰۱ - ۰/۰۴
Fe ₂ O ₃	۱۰-۱۳
Na ₂ O	۰/۰۲ - ۰/۰۴
CaO	۵۰-۵۷



شکل ۴- تصویر سرباره استفاده شده در این مطالعه

۳-۱-۴- الیاف فولادی

بتن مسلح با الیاف فولادی شامل یک کالبد بتنی مرکب از سیمان، مصالح سنگی، آب و درصدی از الیاف فولادی کوتاه است که به طور درهم و کاملاً اتفاقی در جهات مختلف مخلوط پراکنده شده اند. الیاف فولادی بتن باید استاندارد ASTM A820 را ارضا کند (ASTM, A820). وجود الیاف فولادی در بتن، باعث افزایش مقاومت خمشی، مقاومت فشاری، مقاومت برشی و مقاومت در برابر ترک خوردگی می شود (Thomas & Ramaswamy, 2007). و همچنین رسانایی بتن را افزایش می دهد (Tuan, 2008). در این تحقیق دلیل استفاده از الیاف فولادی علاوه بر بهبود مشخصات مکانیکی بتن، افزایش خاصیت رسانایی، افزایش هدایت حرارتی و کاهش مقاومت الکتریکی است. الیاف استفاده شده در این مطالعه، از نوع فولادی ۳۵ میلی متری دوسر قلاب بدون روکش است. سایر مشخصات این الیاف در جدول (۳-۵) آمده است. شکل (۲-۳) الیاف مورد استفاده در این مطالعه را نمایش می دهد.

جدول ۶- مشخصات الیاف فولادی

مقدار	مشخصه
۰/۸۰	قطر (میلیمتر)
۱۱۵۰	مقاومت کششی (مگاپاسکال)
< ۳	درصد کشیدگی
۳۵	طول (میلیمتر)
۷/۶۹۰	وزن مخصوص (گرم بر سانتی متر مکعب)
۴۳/۷۴	نسبت طول به قطر



شکل ۵- الیاف فولادی مورد استفاده

۳-۱-۵- براده فولادی

استفاده از براده فولادی به عنوان درصدی از مصالح سنگی در بتن، به همراه الیاف فولادی باعث افزایش رسانایی و کاهش مقاومت الکتریکی بتن می‌شود (Tuan, 2008). براده‌های استفاده شده در این تحقیق از فولاد CK45، در دو اندازه‌ی، ریز تراش و درشت تراش با طول متوسط، ۸ میلیمتر و عرض ۱ و ۳ میلیمتر، که به طور مساوی کاملاً با هم مخلوط شده اند، است شکل (۶). و به عنوان درصد حجمی از مصالح سنگی ریزدانه استفاده شده است. فولاد CK45 دارای وزن مخصوص ۷/۸۵، گرم بر سانتی متر مکعب است. سایر مشخصات شیمیایی فولاد CK45 در جدول (۶)، آمده است.

جدول ۶- آنالیز شیمیایی براده فولادی مورد استفاده

ترکیبات	درصد
C	۰/۴۲ - ۰/۵۰
Si	< ۰/۴
Mn	۰/۵ - ۰/۸
P	< ۰/۰۳
S	< ۰/۰۳۵
Cr+Ni+Mo	< ۰/۶۳



شکل ۶- براده‌های فولادی مورد استفاده در این مطالعه

۳-۱-۶- مصالح سنگی طبیعی

حدود ۷۵ تا ۸۵ درصد بتن، از مصالح سنگی تشکیل شده است، که نقش مهمی در خصوصیات بتن و مقاومت آن ایفا می‌کنند (نشریه ۳۵۴، ۱۳۸۸). الزامات عمومی سنگدانه‌ها باید مطابق استاندارد ASTM C33 باشد (ASTM, 2003). در بتن غلتکی مصالح سنگی بر کارایی، کیفیت، تراکم و جداشدگی تاثیر می‌گذارند. مقاومت، مدول الاستیسیته، خواص حرارتی و دوام بتن سخت شده، نیز متاثر از خواص سنگدانه‌ها است. سنگدانه‌های به کار رفته در بتن غلتکی باید دارای بخش ماسه به صورت مجزا و بخش شن به صورت مجزا باشند (Jofre, 1993). سنگدانه‌های مصرفی در این تحقیق از معادن سنگ لاشتر اصفهان است.

الف) درشت دانه‌ها: درشت دانه‌های مصرفی، در بتن غلتکی می‌توانند از سنگدانه‌های طبیعی یا شکسته یا مخلوطی از این دو باشند. اندازه حداکثر شن مصرفی باید به ۱۹ میلیمتر محدود گردد تا امکان دستیابی به کیفیت مطلوب سطح فراهم آید (US Army Corps of Engineers, 1995). بتن غلتکی ساخته شده با شن شکسته به انرژی بیشتری برای تراکم نیاز

خواهد داشت و لیکن جداسدگی در آن کمتر اتفاق می افتد. همچنین بتن غلتکی ساخته شده با شن شکسته معمولاً مقاومت خمشی بیشتری به دست می دهد. مشخصات کیفی مصالح در جدول (۷) بیان شده است.

جدول ۷- مشخصات فیزیکی سنگدانه های طبیعی

مشخصه	استاندارد	ریزدانه	درشت دانه
حداکثر اندازه اسمی مصالح سنگی	ASTM-C136	۴/۷۵	۱۹
سایش لس انجلس (درصد)	ASTM-C131	-	۱۶/۰
چگالی واقعی (گرم بر سانتی متر مکعب)	ASTM-C127	۲/۷۱۰	۲/۶۸۰
چگالی اشباع با سطح خشک (گرم بر سانتی متر مکعب)	ASTM-C127	۲/۷۳۰	۲/۷۱۶
جذب آب (درصد)	ASTM-C127	۰/۵۸	۰/۵۳
رس (درصد)	ASTM-C142	۰/۰۱۷	۰/۰۱

(ب) ریزدانه ها: ریزدانه ها ممکن است شامل ماسه طبیعی، ماسه شکسته و یا ترکیبی از آن دو باشد. ریزدانه ها باید مصالح مانده روی الک های شماره ۸، ۱۶، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ با درصدهای مشخص باشند.

(ج) پرکننده: پرکننده ها مصالح عبوری از الک شماره ۲۰۰ هستند، ASTM C33 مقدار حداکثر عبوری از الک ۲۰۰ را به ۵ درصد وزن ماسه محدود کرده است (ASTM, 2003). بالا بودن مواد بسیار ریز غیر پلاستیک به عنوان یک پرکننده معدنی می تواند در بتن غلتکی مفید باشد و مقدار خمیر را در مخلوط افزایش دهد. لذا در صورت غیر پلاستیک بودن مواد عبوری از الک شماره ۲۰۰ حداکثر این مقدار به صورت درصدی از وزن کل مصالح می تواند تا حداکثر ۸ درصد، مجاز تلقی شود (Berry et al., 2001). همچنین وجود ذرات بسیار ریز غیر پلاستیک نظیر سیلت در ماسه به عنوان پر کننده سبب کاهش مقدار سیمان مورد نیاز خواهد شد. مقدار رس زیاد، آب مورد نیاز مخلوط را بیشتر کرده و باعث جمع شدگی، ایجاد ترک و کاهش مقاومت می شود (نشریه ۳۵۴، ۱۳۸۸).

۳-۲- آزمون مقاومت الکتریکی

بر روی کل نمونه های ساخته شده آزمایش مقاومت الکتریکی انجام شد. برای انجام آزمایش، نمونه استوانه ای مرطوب را بین دو الکترود فلزی از جنس مس قرار داده و برای برقراری تماس بهتر بین صفحه مسی و سطح نمونه بتنی، از یک لایه نازک خمیر سیمان استفاده شد. سپس به دو الکترود، جریان الکتریسیته ۹۰ ولت مستقیم (DC)، ۱۵ آمپر متصل گردید. سپس دمای سطح نمونه و میزان جریان عبوری از هر نمونه در طی انجام آزمایش اندازه گیری شده و با استفاده از معادله (۳-۱)، میزان مقاومت الکتریکی نمونه استوانه ای محاسبه گردید (Tuan, 2008).

$$R = \frac{V}{I} \quad (1-3)$$

R = مقاومت ظاهری نمونه (اهم)

V = اختلاف پتانسیل (ولت)

I = جریان عبوری از نمونه (آمپر)

هنگام عبور جریان برق مستقیم از بتن بدون الیاف فلزی یا براده، جریان باید از داخل سنگدانه ها و یا خمیر سیمان عبور کند که مقاومت الکتریکی بسیار بالایی دارند و نمی توانند به راحتی جریان برق را عبور دهند، اما در صورتی که مواد رسانا، مثل الیاف فولادی و براده فولادی به بتن اضافه شود به دلیل ارتباطی که این مواد رسانا با یکدیگر و با بتن برقرار می کنند می توانند جریان برق را به راحتی از بتن عبور دهند. با عبور جریان برق از بتن، نمونه مانند المنت حرارتی عمل کرده و دمایش افزایش می یابد.

پس از آنکه مقاومت ظاهری هر کدام از نمونه‌ها با رابطه (۱-۳) محاسبه شد، مقاومت الکتریکی ویژه بتن نیز از رابطه (۲-۳) برای همه نمونه‌ها محاسبه گردید (Tuan, 2008).

$$\rho = R \frac{A}{L}$$

(۲-۳)

ρ = مقاومت الکتریکی ویژه بتن (اهم در متر)

R = مقاومت ظاهری بتن (اهم)

A = سطح مقطع نمونه (مترمربع)

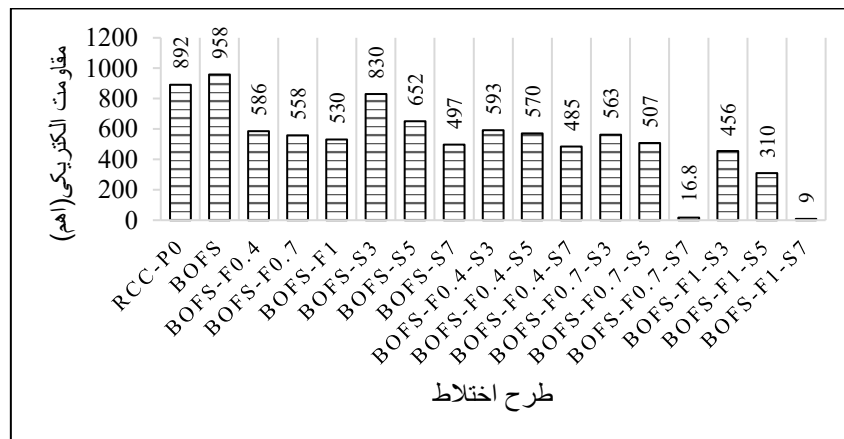
L = طول نمونه (متر)

به منظور بررسی احتمال خطر برای انسان، در حین آزمایشات، ولتاژ سطح نمونه‌ها اندازه گیری شد و در بیشترین مقدار، ولتاژ سطح نمونه از ۳۲ ولت تجاوز نکرد، که در محدوده خطر برای انسان محسوب نمی‌شود. حداقل ولتاژ خطرناک برای انسان، ۵۰ ولت متناوب (AC) با فرکانس ۵۰ هرتز بر اساس استاندارد انگلیس و ۶۵ ولت متناوب (AC) با فرکانس ۵۰ هرتز برای استاندارد آلمان و برای برق غیر متناوب (DC) (استفاده شده در این مطالعه) به دلیل عدم تغییر فرکانس، ولتاژ خطرناک در محدوده بالای ۱۲۰ ولت قرار می‌گیرد (محمدی، ۱۳۸۹).

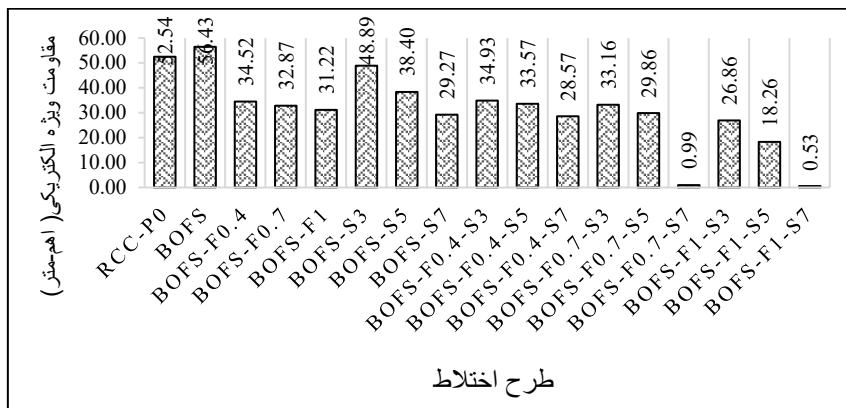
۴- تجزیه و تحلیل

۴-۱- نتایج آزمون مقاومت الکتریکی

همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، هدایت الکتریکی بتن در نمونه شاهد نسبت به نمونه ساخته شده با سرباره (بدون اجزای رسانی فولادی)، کمتر است، که دلیل آن ناشی از عبور جریان از خمیر سیمان به جای عبور از سنگدانه‌ها باشد و مقدار بالای اکسید آهن در سرباره تاثیر مثبتی بر روی مقاومت الکتریکی استوانه‌های بتنی ندارد. بعد از اضافه شدن ۰/۴ درصد حجمی الیاف فولادی به بتن، افت شدیدی در مقاومت الکتریکی رخ می‌دهد و بعد از آن هرچه درصد الیاف فولادی در بتن بالاتر رود، مقاومت الکتریکی با شیب کمتری پایین تر می‌آید. زمانی که ۷ درصد حجمی براده فولادی به تنهایی استفاده شد، حتی مقاومت الکتریکی کمتری از نمونه‌های حاوی ۰/۴ درصد حجمی الیاف را موجب می‌شود. در نمونه‌های ترکیبی حاوی ۰/۴ درصد الیاف فولادی با درصدهای مختلف براده، مقاومت الکتریکی کاهش ناچیزی نسبت به نمونه‌های بدون براده دارد. در نمونه‌های ترکیبی، BOFS-F0.7-S7 و BOFS-F1-S7، که شامل ۰/۷ و ۱ درصد حجمی الیاف فولادی و درصد بالای براده فولادی هستند، مقاومت الکتریکی به شدت افت می‌کند و رسانایی بتن به طرز چشم‌گیری افزایش می‌یابد که دلیل آن می‌تواند ارتباط و درگیر شدن بیشتر مصالح فولادی (الیاف و براده فولاد) با یکدیگر، به دلیل بالارفتن حجم آن‌ها در بتن باشد. نتایج افزایش دمای نمونه‌ها بعد از گذشت ۳۰ دقیقه از اتصال برق، در جدول (۸) قابل مشاهده است.



شکل ۷- نتایج آزمون مقاومت الکتریکی



شکل ۸- نتایج محاسبه مقاومت الکتریکی ویژه نمونه ها

جدول ۸- نتایج آزمون مقاومت الکتریکی و مقاومت الکتریکی ویژه و میزان افزایش متوسط دمای نمونه‌ها

طرح اختلاط	مقاومت الکتریکی (اهم)	مقاومت الکتریکی ویژه (اهم بر متر)	دمای اولیه (درجه سانتی گراد)	دمای ثانویه (درجه سانتی گراد)	میزان افزایش دما (درجه سانتی گراد)
RCC-P0	892	۵۲/۵۴	۲۰	۲۰	۰
BOFS	958	۵۶/۴۳	۲۰	۲۰	۰
BOFS-F0.4	586	۳۴/۵۲	۲۰	۲۲	۲
BOFS-F20.7	558	۳۲/۸۷	۲۰	۲۲/۵	۲/۵
BOFS-F1	530	۳۱/۲۲	۲۰	۲۲/۵	۲/۵
BOFS-S3	830	۴۸/۸۹	۲۰	۲۱	۱
BOFS-S5	652	۳۸/۴۰	۲۰	۲۲	۲
BOFS-S7	497	۲۹/۲۷	۲۰	۲۳	۳
BOFS-F0.4-S3	593	۳۴/۹۳	۲۰	۲۲	۲
BOFS-F0.4-S5	570	۳۳/۵۷	۲۰	۲۱/۵	۱/۵
BOFS-F0.4-S7	485	۲۸/۵۷	۲۰	۲۴	۴
BOFS-F0.7-S3	563	۳۳/۱۶	۲۰	۲۲	۲
BOFS-F0.7-S5	507	۲۹/۸۶	۲۰	۲۴	۴
BOFS-F0.7-S7	16.8	۰/۹۹	۲۰	۹۱	۷۱
BOFS-F1-S3	456	۲۶/۸۶	۲۰	۲۳/۵	۳/۵
BOFS-F1-S5	310	۱۸/۲۶	۲۰	۲۵	۵
BOFS-F1-S7	9.0	۰/۵۳	۲۰	بالای ۱۰۰	بالای ۸۰

۵- جمع بندی و نتیجه گیری:

افزودن براده و الیاف فولادی هر کدام به تنهایی، باعث کاهش مقاومت الکتریکی بتن غلتکی می‌شود و در صورتی که به طور همزمان استفاده گردند، مقاومت الکتریکی بتن به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. در نمونه‌های ساخته شده با ۰/۷ درصد

حجمی الیاف فولادی و ۷ درصد حجمی براده فولاد، و ۱ درصد حجمی الیاف و ۷ درصد حجمی براده، کمترین مقاومت الکتریکی (بالاترین هدایت الکتریکی) حاصل گردید. با بررسی نتایج مقاومت فشاری و کششی، مشاهده می‌گردد که نمونه حاوی ۰/۷ درصد حجمی الیاف فولادی و ۷ درصد حجمی براده فولاد، مقاومت فشاری و کششی بیشتری در مقایسه با نمونه‌های ساخته شده با مصالح طبیعی دارد و این حالت میزان الیاف و براده فولادی بهینه است، چون در صورت افزایش میزان این دوماه، هزینه ساخت بتن افزایش پیدا می‌کند.

منابع

Berry, J. R., Duncan, R. L., Fluhr, R. J., Harvey, R. L., a Mccomb, R., Mccullough, B. F., ... & Rice, J. L. (2001). Report on roller-compacted concrete pavements. Farmington Hills, MI: ACI committee report.

Naik, T. R., Chun, Y. M., Kraus, R. N., Singh, S. S., Pennock, L. L. C., & Ramme, B. W. (2001). Strength and durability of roller-compacted HVFA concrete pavements. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 6(4), 154-165.

ACI 325-10R, "Roller Compacted Concrete Pavement," American Concrete Institute, 1999.

معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، وزارت راه و ترابری، "راهنمای طراحی و اجرای بتن گلتنکی در روسازی راه های کشور، نشریه شماره ۳۵۴"، پژوهشکده حمل و نقل، ۱۳۸۸.

ASTM D5106, "Standard Specification for Steel Slag Agregates for Bituminous Paving Mixtures ", ASTM International West Conshohocken, 2001.

Das, B., Prakash, S., Reddy, P. S. R., & Misra, V. N. (2007). An overview of utilization of slag and sludge from steel industries. Resources, conservation and recycling, 50(1), 40-57.

فهامی، او فرمان‌آرا، ا. "بررسی خواص بتن تولید شده با مصالح سنگی مصنوعی (سرباره کوره آهنگدازی)،" نهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، اصفهان، ۱۳۹۱.

Pye, G. B., Myers, R. E., Arnott, M. R., Beaudoin, J. J., & Tumidajski, P. J. (2003). U.S. Patent No. 6,503,318. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Tumidajski, P. J. (2002). High powered concrete. St. Lawrence Cem. Canada. World, 61(5).

Abdualla, H., Ceylan, H., Kim, S., Mina, M., Cetin, K. S., Taylor, P. C., ... & Vidyadharan, A. (2018). Design and Construction of the World's First Full-Scale Electrically Conductive Concrete Heated Airport Pavement System at a US Airport. Transportation Research Record, 2672(23), 82-94.

Yehia, S. A., & Tuan, C. Y. (2000). Thin conductive concrete overlay for bridge deck deicing and anti-icing. Transportation Research Record, 1698(1), 45-53.

Cho, T. (2007). Prediction of cyclic freeze–thaw damage in concrete structures based on response surface method. *Construction and Building Materials*, 21(12), 2031-2040.

Gomez, J. (1989). Fatigue strength of roller compacted concrete. In 4th International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, 1989. 4.

Xie, P., & Beaudoin, J. J. (1995). Electrically conductive concrete and its application in deicing. *Special Publication*, 154, 399-418.

Tumidajski, P. J., Xie, P., Arnott, M., & Beaudoin, J. J. (2003). Overlay current in a conductive concrete snow melting system. *Cement and concrete research*, 33(11), 1807-1809.

Tuan, C. Y. (2008). Implementation of conductive concrete for deicing (Roca Bridge).

شریف‌تهرانی، ص. و صفدریان، الف، "اثرات مخرب استفاده از روش پاشش مخلوط نمک شن بر روس انواع روسازی جهت یخ زدایی و بررسی شیوه های نوین یخ زدایی در فرودگاه وسایر راه ها،" سومین کنفرانس بین المللی علوم و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، ۱۳۹۵.

سامانه اطلاعات سوانح و حوادث حمل و نقل کشور، <http://havades.mrud.ir>.

Maleki, P., Iranpour, B., & Shafabakhsh, G. (2019). Investigation of de-icing of roads with conductive concrete pavement containing carbon fibre-reinforced polymer (CFRP). *International Journal of Pavement Engineering*, 20(6), 682-690.

ASTM C150/C150M-12, "Standard specification for Portland cement", ASTM International West Conshohocken, PA, USA, 2012.

Design, R. C. C. P. (1995). Construction. Technical Letter ETL 1110-3-475. US Army Corps of Engineers.

ASTM C1602/C1602M-12, "Standard specific cation for mixing water used in the production of hydraulic cement concrete," ASTM International West Conshohocken, PA, USA, 2012.

ASTM A820, "S. Fibers, Type I cold drawn, high tensile steel wire for use as primary reinforcing in slab-on-grade," ASTM International, vol. 18.

Thomas, J., & Ramaswamy, A. (2007). Mechanical properties of steel fiber-reinforced concrete. *Journal of materials in civil engineering*, 19(5), 385-392.

ASTM C33, "Standard Specification for Coarse Aggregates", ASTM International West Conshohocken, 2003.

Jofre, C. (1993). The use of roller compacted concrete for roads (No. 07.05. B).

United States Army Corps of Engineers, "Roller Compacted Concrete Pavement Design and Construction", 1995.

محمدی، ر، برق و خطرات آن، نشر شهر، تهران، ۱۳۸۹.