

# بررسی تاثیر استفاده از سرباره فولاد و اندودهای سطحی مختلف بر عملکرد

## مقاومت برشی بین لایه‌ای روسازی مرکب

غلامعلی شفافبخش (مسئول مکاتبات)، استاد، دانشکده عمران، دانشگاه سمنان، سمنان

سعید احمدی، دانشجوی دکتری، دانشکده عمران، دانشگاه سمنان، سمنان

Email: ghshafabakhsh@semnan.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۰۶ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۲۰

### چکیده

چسبندگی لایه‌های روسازی مرکب، نقش بسزایی در عملکرد این نوع روسازی‌ها در بلندمدت ایفا می‌کند. چسبندگی ضعیف می‌تواند سبب لغزش لایه‌ها بر روی یکدیگر شده و خرابی‌هایی نظیر ترک‌های هلالی و خستگی زودرس را ایجاد نماید. با توجه به اینکه سرباره بعنوان محصولی جانبی در تولید فولاد، مطرح می‌باشد. تحقیقات صورت گرفته در مورد تاثیر سرباره بر عملکرد بتن نشان می‌دهد سرباره خصوصیات مکانیکی بتن را بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. بنابراین در این پژوهش از خصوصیات اصطکاکی و دوام سرباره فولاد استفاده کرده تا بتوان زبری سطح روسازی بتنی را افزایش داده و در نهایت چسبندگی لایه‌های روسازی مرکب را ارتقاء داد. علاوه بر آن به منظور افزایش چسبندگی بین لایه‌ای روسازی مرکب اثرات اندودهای سطحی مختلف شامل قیر ۱۶-۶۴ PG، قیر اصلاح شده با پودر لاستیک و زئولیت و قیر امولسیون تند شکن (CRS-1) با نرخ استفاده ۰/۳، ۰/۶، ۰/۹، ۰/۲ و ۱/۵ کیلوگرم بر متر مربع مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق ابتدا درصد بهینه سرباره با توجه به آزمایش‌های خصوصیات مکانیکی و همچنین آزمایش پاندول انگلیسی و سایش مطابق استاندارد EN 1338 انتخاب شد. سپس به منظور تعیین خصوصیات چسبندگی اندودهای سطحی از آزمایش برش مستقیم استفاده شد. نتایج بیانگر آن است که جایگزینی ۵۰ درصد سنگدانه با سرباره فولاد به لحاظ اقتصادی و خصوصیات مکانیکی و در عین حال سایش و لغزندگی عملکرد مناسبی داشته است. علاوه بر آن نتایج آزمایش مقاومت برشی روسازی مرکب نشان داد نرخ بهینه اندود سطحی بین ۰/۶ تا ۰/۹ کیلوگرم بر مترمربع متغیر بوده و بستگی به نوع اندود سطحی دارد. با در نظر گرفتن مقادیر بهینه اندود سطحی، رده بندی مقاومت برشی قیرهای مختلف عبارتند از: قیر امولسیون > قیر شاهد > قیر پودر لاستیکی حاوی زئولیت.

واژگان کلیدی: روسازی مرکب، اندود سطحی، مقاومت سایشی، مقاومت برشی اندود سطحی، سرباره فولاد

## ۱. مقدمه

یا جداشدگی لایه ها می تواند سبب لغزش لایه ها بر روی یکدیگر شده و مقاومت برشی بین لایه های روسازی را کاهش دهد و نتیجتاً ظرفیت انتقال بار کم خواهد شد. از جمله خرابی های دیگری که می تواند به چسبندگی ضعیف بین لایه ها مرتبط باشد شامل خستگی زودرس، ترک خوردگی بالا به پایین و تکه تکه شدن سطح روسازی می شود [Biglari, Asgharzadeh and Kavussi, 2018]. کرانچوا و همکاران در سال ۲۰۰۵ گزارش داده اند که جداشدگی لایه ها ۲۰ تا ۳۵ درصد از عمر روسازی را کاهش می دهد [Kruncheva, Collop and Thom 2006]. مونچ و موماو در سال ۲۰۰۹ گزارش داده اند که به دلیل اندود سطحی ضعیف بین لایه ها یا نفوذ آب به درون ترک ها و همچنین تراکم ناکافی لایه ها، جداشدگی بین لایه های روسازی مرکب اتفاق می افتد [Muench and Moomaw 2009]. مطالعه میدانی لنگ و همکارانش در سال ۲۰۰۹ نشان می دهد که مقاومت برشی بالاتر در سطح مشترک روسازی مرکب سبب می شود شیارشدگی کمتری در روکش آسفالتی رخ دهد [Leng et al. 2008].

رایج ترین روش در جهت چسبندگی بین لایه های روسازی، استفاده از اندود سطحی و یا اندود نفوذی بین لایه های روسازی است. از این رو از اندود سطحی جهت اجرای یک لایه روکش جدید بر روی روسازی مضمحل استفاده می شود تا با استفاده از این ماده دو لایه بر روی هم کاملاً چسبیده شوند. مطابق با تعریف انستیتو آسفالت در سال ۲۰۰۷ مصالح اندود سطحی فراهم کننده یک لایه چسبنده بین روسازی موجود و یک لایه روکش جدید هستند تا از خرابی های زودرسی مانند خرابی لغزندگی جلوگیری شود [Asphalt Institute, 2007]. محمد و همکاران در سال ۲۰۱۲، مقاومت برشی روسازی مرکب حاوی اندودهای سطحی شامل دو نوع قیر PG 64-22 و PG76-22M و چهار نوع قیر امولسیون سی-۲P، CSS-2P

روسازی های مرکب با عملکرد بسیار خوبی که از خود نشان داده اند پتانسیل بسیار زیادی برای تبدیل به یک جایگزین مناسب برای بزرگراه های با حجم ترافیک سنگین و فوق سنگین دارند [Sheng, Zhao-hui and Yu-zhi, 2012]. این روسازی ها به صورت گسترده در کشورهایی مانند آلمان، فرانسه و اسپانیا مورد استفاده قرار گرفته اند [Thoegersen, Busch and Henrichsen, 2004]. در روسازی مرکب بتنی-آسفالتی، بسیاری از عیوب روسازی آسفالتی توسط اساس بتنی و عیوب روسازی بتنی توسط لایه آسفالتی از بین می روند. مهم ترین مشکل روسازی های آسفالتی سختی پایین آن هاست که استفاده از یک اساس بتنی در زیر لایه آسفالتی سبب افزایش مقاومت روسازی می شود. همچنین برخی از مشکلات روسازی های بتنی مانند سطح فاقد اصطکاک کافی و برخی خرابی ها از قبیل مکنندگی و تراوش آب، سوراخ شدن<sup>۲</sup> و خردشدگی<sup>۳</sup> با وجود لایه آسفالتی بر روی آن رفع خواهند شد. در مطالعه مریل و همکاران در سال ۲۰۰۶ مشخص گردید، روسازی های مرکبی که در انگلستان، هلند و مجارستان احداث شده بودند عملکرد رضایت بخشی از نظر شیارشدگی، ترک ها و تغییر شکل از خود نشان دادند. ساختار روسازی مرکب نسبتاً نازک (کل ضخامت برابر با ۲۵۰ میلیمتر یا ۱۰ اینچ) عملکرد رضایت بخشی را تحت ترافیک سنگین در مدت زمان طولانی از خود نشان می دهد. علاوه بر این مشاهدات میدانی نیز تأیید کرد که روسازی مرکب عمر طولانی تری نسبت به سایر روسازی ها دارد [Merrill, Van Dommelen and Gáspár 2006]. در صورتی می توان یک روسازی مرکب مناسب را به عنوان یک روسازی یکپارچه در نظر گرفت که از چسبندگی بین لایه های روسازی مرکب اطمینان حاصل شود تا این نوع روسازی در انتقال بار به لایه های زیرین مؤثر عمل کند. از طرف دیگر چسبندگی ضعیف

## بررسی تاثیر استفاده از سرباره فولاد و اندودهای سطحی مختلف بر عملکرد مقاومت برشی بین لایه‌ای روسازی مرکب

پذیری در دمای متوسط و ویسکوزیته در دمای بالای اندود سطحی بیشترین تاثیر را در خصوصیات برشی سطح مشترک روسازی آسفالتی دارد [Hu et al. 2017].

تلاش کشورها به منظور توسعه هر چه بیشتر صنایع فولاد به عنوان یک صنعت مادر در سه دهه گذشته منجر به تولید حجم بسیار زیادی از محصولات جانبی این صنعت به خصوص سرباره فولاد شده است. از آنجایی که کاربرد تعریف شده و مشخصی برای این محصولات وجود ندارد، این محصول یکی از مشکلات اساسی کارخانجات فولاد سازی بوده است که باید برای دپوی آن فضای وسیعی در نظر گرفت. در ایران سالانه بیش از سه میلیون تن سرباره فولاد تولید می‌شود که بیشتر آنها در فضای وسیعی دپو شده‌اند. تقریباً ۵۰ درصد تولید سرباره در ایران از نوع کوره قوس الکتریک (EAF) است [Kavussi and Jalili Qazizadeh 2014]. تخصیص این فضا می‌تواند هزینه‌های مالی سنگینی را برای کارخانه‌ها به همراه داشته باشد. علاوه بر اشغال فضای بسیار زیادی از محوطه کارخانه و تخریب محیط زیست، به دلیل حضور برخی فلزات سنگین درون ترکیبات این محصول، آب شستگی سرباره فولاد می‌تواند برای منابع آب زیرزمینی نیز خطرناک باشد. بنابراین توجه به مبانی توسعه پایدار مبنی بر حفظ و نگهداری از محیط‌زیست، کشورها را بر آن داشته است که به دنبال راهکارهایی به منظور استفاده صحیح از این منابع با ارزش باشند. با وجود کاربردهای فراوانی که امروزه برای این محصول یافت شده است، کاربردهای عمرانی به خصوص راهسازی بیشترین پتانسیل را برای بکارگیری این محصول دارد. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مطلوب سنگدانه سرباره فولاد شامل مقاومت فشاری و سایشی بالا، زاویه اصطکاک داخلی زیاد، شکل گوشه دار و سطح زبر است که می‌توان از آن به عنوان سنگدانه در لایه‌های روسازی به خصوص لایه رویه استفاده کرد [Kavussi and Jalili Qazizadeh 2014]. یکی از کاربردهای مهم سرباره استفاده از این ماده در روسازی بتنی است. مصالح سنگی بیش از ۷۵

1، SS-1 و SS-1h را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که بهترین نوع اندود سطحی امولسیون -CRS 2P است. آن‌ها نتیجه گرفتند که افزایش مقدار اندود سطحی در دماهای پایین به‌طورکلی مقاومت برشی در سطح مشترک لایه‌ها را کاهش می‌دهد [Mohammad et al. 2012]. شنگ و همکاران در سال ۲۰۱۶، پژوهشی بر روی اندود سطحی بین لایه‌های روسازی مرکب انجام دادند. در این تحقیق چهار نوع اندود سطحی شامل قیر خالص با درجه نفوذ ۵۰ و ۷۰، قیر اصلاح شده حاوی پلیمر SBS و قیر حاوی پودر لاستیک استفاده شد. نتایج پژوهش آنها نشان داد قیرهای حاوی پلیمر SBS و پودر لاستیک مقاومت برشی بالاتری نسبت به قیرهای خالص داشته‌اند. علاوه بر آن مقدار بهینه قیر حاوی پلیمر SBS، ۱/۴ کیلوگرم بر مترمربع بدست آمده است. ذکر این نکته حائز اهمیت است که قیر مورد استفاده در اندود سطحی باید دارای خاصیت الاستیسیته خوب باشد و در مقابل خستگی عملکرد خوبی از خود نشان دهد [Sheng, Huang and Zhao-hui 2016]. هو و همکاران در سال ۲۰۱۸ بر روی عملکرد اندود سطحی اصلاح شده در روسازی مرکب مطالعه‌ای انجام دادند. آنها در این مطالعه از افزودنی‌های پلیمری SBS، uintaite mastic، asphalt, anti-rut asphalt master batch و Sasobit wax استفاده کردند که به قیر پایه با درجه نفوذ ۵۰ اضافه شد. مقاومت برشی بین لایه‌ای با استفاده از اندود سطحی اصلاح شده ۶۹ درصد افزایش یافته است. همچنین مقاومت چسبندگی اندود سطحی اصلاح شده بیشتر از قیر معمولی بوده است [Hou et al. 2018]. هو و همکاران در سال ۲۰۱۷ مطالعه آزمایشگاهی بر روی نوع اندود سطحی، نرخ اندود سطحی و دما انجام دادند. در این مطالعه دو نوع امولسیون، سه نرخ اندود سطحی و همچنین چهار دمای ۱۰-، ۰، ۲۵ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد مقاومت برشی در سطح مشترک به طور تدریجی با افزایش دما کاهش می‌یابد. کرنش گسیختگی نمونه‌ها در بیشترین دما (۵۰ درجه سانتی‌گراد) مشاهده شد. علاوه بر آن نتایج نشان داد که تردی در دمای پایین، جریان

فشاری، مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته بتن در سن ۲۸ روز به ترتیب ۳۳، ۹/۸ و ۲۲ درصد افزایش می‌یابد [Saxena and Tembhurkar 2018]. همچنین مطالعاتی در زمینه کاربرد سرباره در مخلوط آسفالتی انجام شده که نشان می‌دهد، استفاده از سرباره فولادی می‌تواند منجر به افزایش مقاومت مخلوط در برابر حساسیت رطوبتی توسط آملیان و همکاران ۲۰۱۸ و فخری و احمدی ۲۰۱۷، افزایش مقاومت در برابر ترک‌های حرارتی توسط یانگجی و همکاران ۲۰۰۶، افزایش مقاومت در برابر ترک خستگی و تغییر شکل دائمی توسط گرانیگر و همکاران ۲۰۱۷ و فخری و احمدی ۲۰۱۷، افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی و خزش دینامیکی توسط شفابخش و جعفری ۲۰۱۵ انجام شده است [Amelian et al. 2018, Fakhri and Ahmadi 2017, Yongjie et al. 2006, Groenniger et al. 2017, Shafabakhsh and Jafari 2015]. سرباره فولاد شامل سنگدانه‌های شکسته گوشه دار و با سطح زیر است. عموماً این سنگدانه در هر دو وجه ۱۰۰ درصد شکسته‌اند و سنگدانه پولکی و سوزنی ندارند. به این ترتیب این سنگدانه‌ها قفل و بست خوبی با هم دارند و زاویه اصطکاک داخلی آن زیاد است (حدود ۴۵ درجه). از سرباره در آسفالت-های سطحی با توجه به فراهم نمودن زبری مورد نیاز جهت مقاومت در برابر لغزش استفاده می‌شود. مصالح سنگی طبیعی به خوبی قادر نیستند تا سطحی مقاوم در برابر صیقلی شدن را ایجاد نمایند، بنابراین در هنگام بارندگی کاملاً لغزنده خواهد شد. بدین ترتیب به دلیل تیزگوشگی و مقاومت بالای سرباره در برابر لغزش و سائیدگی و همچنین چسبندگی زیاد بین سرباره و قیر این محصول مناسب‌ترین انتخاب جهت عملیات چپ سیل است. شکل زاویه دار، سختی و بافت سرباره باعث شده است که از آن به عنوان مصالح سنگی در آسفالت استفاده شود و مقاومت مخلوط را در برابر لغزندگی افزایش دهد [Huang, Bird and Heidrich 2007]. همکاران در سال ۲۰۰۸ ارائه کرده‌اند، مشخصات زبری اندازه گیری شده توسط توموگرافی کامپیوتری نشان داد که بافت

درصد وزنی یا حجمی بتن را تشکیل می‌دهند که خواص فیزیکی و مکانیکی آنها در خواص بتن تاثیر بسیار مهمی را دارد. مشکلات زیست محیطی دپوی سرباره‌ها در مجتمع فولادسازی از یک سو و عدم وجود منابع سنگدانه‌های مناسب برای کاربردهای مختلف در صنعت راه از سوی دیگر، استفاده از این سرباره‌ها را در جایگزینی سنگدانه‌های طبیعی توجیه می‌نماید. تنگ و همکاران (۲۰۱۳)، خواص مکانیکی و دوام بتن مقاومت بالای حاوی سرباره آسیاب شده کوره بلند را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق آنها دو مخلوط بتنی با ۴۵۰ و ۵۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب از سیمان پرتلند معمولی و دو مخلوط معادل کل مواد سیمانی با ۳۰ درصد جایگزینی سرباره آسیاب شده کوره بلند را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که بتن با سرباره کوره بلند آسیاب شده دارای مقاومت اولیه بالاتر، نفوذپذیری کمتر و دوام بیشتر است. همچنین سرباره کوره بلند آسیاب شده باعث بهبود کارایی، مقاومت فشاری و مقاومت خمشی می‌شود. علاوه بر آن در نسبت آب به سیمان کمتر خواص مکانیکی بتن بهبود بیشتری داشته است [Teng et al. 2013]. گنزالز ارتگا و همکاران در سال ۲۰۱۴ خصوصیات بتن حاوی سرباره فولادی EAF<sup>۱</sup> را مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعات آنها نشان داد، با اضافه کردن سرباره فولادی به بتن چگالی آن ۲۵ درصد افزایش یافته و وزن بتن نسبت به بتن حاوی سنگدانه آهکی سنگین‌تر می‌شود. همچنین مقاومت فشاری بتن حاوی سرباره ۲۵ درصد بیشتر از بتن حاوی سنگدانه باریت است. مدول الاستیسیته بتن حاوی سرباره ۱۰ درصد، بیشتر از بتن معمولی با سنگدانه آهکی بوده و این نتیجه نشان دهنده سختی بیشتر سرباره است [Gonzalez-Ortega et al 2014]. براساس پژوهشی که ساکسنا و تمبورکار در سال ۲۰۱۸ انجام دادند خصوصیات بتن تازه و سخت شده حاوی ۱۵، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد جایگزینی درشت دانه با سرباره فولاد و آب فاضلاب را مورد بررسی قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که جایگزینی ۵۰ درصد سنگدانه بازالت با سنگدانه سرباره فولاد مقاومت

## بررسی تاثیر استفاده از سرباره فولاد و اندودهای سطحی مختلف بر عملکرد مقاومت برشی بین لایه‌ای روسازی مرکب

در این پژوهش جهت ارتقاء چسبندگی روسازی مرکب دو رویکرد مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه سرباره فولاد دارای سنگدانه‌های شکسته گوشه‌دار، سطح زبر و در عین حال مقاومت بالا در برابر لغزش و سائیدگی است، بنابراین می‌توان زبری روسازی بتنی را افزایش داد تا چسبندگی بین لایه‌ای روسازی مرکب بیشتر شود. علاوه بر آن اثرات اندودهای سطحی مختلف شامل قیر ۱۶-۶۴ PG<sup>۲</sup>، قیر اصلاح شده با پودر لاستیک و زئولیت و قیر امولسیون تند شکن (YCRS) با نرخ استفاده ۰/۳، ۰/۶، ۰/۹، ۱/۲ و ۱/۵ کیلوگرم بر متر مربع با استفاده از آزمایش برش مستقیم، چسبندگی لایه‌های بتنی و آسفالتی مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. بنابراین این پژوهش در دو مرحله انجام می‌شود. ابتدا نمونه‌های بتنی حاوی درصد‌های مختلف سرباره فولاد (۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد) جایگزین سنگدانه در روسازی بتنی شده، سپس آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی، خمشی و همچنین مقاومت سایشی به روش EN 1338 و لغزندگی به روش پاندول انگلیسی بر روی هریک از نمونه‌ها انجام می‌شود تا درصد بهینه این ماده انتخاب شود. در مرحله بعد به منظور تعیین خصوصیات چسبندگی اندودهای سطحی و نرخ مختلف هر کدام از آنها از آزمایش برش مستقیم استفاده می‌شود. در ادامه جزئیات بیشتری از روش تحقیق و آزمایش‌ها ارائه می‌گردد.

### ۲-۱ مصالح مصرفی

قیر استفاده شده در این تحقیق از نوع قیر با طبقه بندی عملکردی ۶۴-۱۶ PG بوده که از شرکت قیر آکام تهیه شد. همچنین امولسیون مصرفی در این تحقیق از نوع کاتیونیک تند شکن (CRS-1) بوده است. مشخصات قیر خالص از نظر طبقه بندی عملکردی و از نظر درجه بندی نفوذی و قیر امولسیونی CRS-1 به ترتیب در جدول ۱، ۲ و ۳ نشان داده شده است. سنگدانه‌های مورد استفاده جهت ساخت مخلوط آسفالتی و بتن معمولی از معادن اطراف شهر سمنان تهیه شد. دانه بندی مصالح سنگی مصرفی در این تحقیق حد وسط دانه بندی پیوسته شماره ۵

درشت دانه تر منجر به افزایش در مقاومت برشی سطح مشترک خواهد شد [Santagata et al. 2008].

تحقیقات مختلف نشان می‌دهد عملکرد قیر اصلاح شده با پودر لاستیک بعنوان اندود سطحی رضایت بخش بوده و افزایش چسبندگی لایه‌های روسازی مرکب را در پی داشته است [Huang et al. 2015، Sheng et al. 2016]. از سویی دیگر مهمترین دلیل استفاده از زئولیت در قیر را می‌توان به دسترسی مناسب، قیمت ارزان و اختلاط آسان آن با قیر اشاره کرد. همچنین لازم به توضیح است سنگز و همکاران در سال ۲۰۱۳ نشان دادند زئولیت سبب کاهش دمای اختلاط و تراکم مخلوط آسفالتی می‌شود [Sengoz et al. 2013]. لازم به توضیح است، استفاده از پودر لاستیک در قیر باعث افزایش دمای اختلاط و کاهش کارایی قیر می‌شود، بنابراین باید از ماده‌ای استفاده کرد تا کارپذیری قیر لاستیکی را افزایش دهد. با توجه به توضیحات فوق در این پژوهش تاثیر این دو افزودنی بر عملکرد چسبندگی روسازی مرکب پرداخته می‌شود.

هدف از مقاله حاضر اندازه‌گیری و مقایسه فاکتورهای مختلف جهت رسیدن به مقاومت برشی ماکزیمم بین لایه‌های روسازی بتنی اصلاح شده و مخلوط آسفالتی است. بدین منظور از قیرهای مختلف بعنوان اندود سطحی و سرباره بجای سنگدانه در بتن استفاده شده است تا بتوان چسبندگی لایه‌های روسازی مرکب را افزایش داده و نهایتاً مقاومت برشی روسازی‌های مرکب را ارتقاء داد. بر خلاف تحقیقات فوق، بررسی کمی در زمینه استفاده از سرباره به جهت افزایش زبری و اصطکاک روسازی بتنی و در ادامه تاثیر اندودهای سطحی در روسازی مرکب انجام شده است. در پژوهش حاضر ابتدا درصد‌های مختلف سرباره در روسازی بتنی از لحاظ خصوصیات مکانیکی و سایشی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و سپس تاثیر اندودهای سطحی مختلف و نرخ استفاده از آنها بررسی می‌شود.

### ۲. روش تحقیق

بهبود خواص مخلوط آسفالتی ثابت در نظر گرفته شده است [CALTRANS Asphalt Rubber Usage Guide, 2003, Kavussi et al., 2016]. استخری در تحقیقات خود گزارش داده که افزودنی ژئولیت طبیعی در قیر به میزان ۴ تا ۶ درصد وزن قیر مصرفی، سبب بهبود خصوصیات رفتاری قیر و مخلوط آسفالتی شده است [Estakhri, Button and Alvarez 2010]. در این تحقیق میزان ژئولیت طبیعی مصرفی ۷ درصد وزن قیر مصرفی استفاده شده است. قیر حاوی پودر لاستیک و ژئولیت هر کدام به مدت ۶۰ دقیقه، در سرعت چرخشی ۵۰۰۰ rpm و شرایط کنترل دمایی ۱۷۵ درجه سانتی‌گراد در دستگاه مخلوط کن باهم ترکیب شدند که مشخصات فیزیکی قیر اصلاح شده با پودر لاستیک و ژئولیت در جدول ۵ نشان داده شده است. دلیل بالا بودن زمان واکنش، سطح ویژه زیاد مصالح و شکل نامنظم پودر لاستیک است.

مخلوط آسفالت گرم مربوط به قشر توپکا مطابق با نشریه ۲۳۴ آیین نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران بوده که در جدول ۴ ارائه شده است. برای آماده سازی نمونه‌های آسفالتی از قیر با طبقه بندی عملکردی ۱۶-۶۴ PG استفاده گردیده است. مشخصات قیر مصرفی در جدول ۱ داده شده است. از اندوهای سطحی شامل قیر ۱۶-۶۴ PG، قیر امولسیون 1-CRS و قیر اصلاح شده حاوی پودر لاستیک و ژئولیت جهت ارزیابی مقاومت برشی بین لایه‌های روسازی بتنی و آسفالتی استفاده گردید. پودر لاستیک مورد استفاده در این پژوهش از شرکت سپیدان لاستیک تهیه گردید. پودر لاستیک مورد نظر از تایرهای ضایعاتی خودرو بوده و از فرایند خرد کردن در دمای محیط تولید شده است. اندازه اسمی ذرات پودر لاستیک از ۰ تا ۱ میلی‌متر بوده است. با توجه به تحقیقات انجام شده بر روی پودر لاستیک و مشاهده تاثیر مثبت ۱۵ درصد وزنی پودر لاستیک و کمتر از آن در قیر، این ماده در بهبود خصوصیات رفتاری و

بررسی تاثیر استفاده از سرباره فولاد و اندوذهای سطحی مختلف بر عملکرد مقاومت برشی بین لایه‌ای روسازی مرکب

جدول ۱. مشخصات قیر ۱۶-۶۴ PG

| طبقه بندی عملکردی قیر PG                       |  |                 |           |          |
|--|--|-----------------|-----------|----------|
| ردیف   | ویژگی / شرح آزمون  | حد قابل قبول    | استاندارد | قیر اصلی |
| ۱  | دمای نقطه اشتعال (°C)                                      | حداقل ۲۳۰°C     | D92       | ۲۸۸      |
| ۲  | کندروانی (RV) در دمای ۱۳۵°C سانی گراد                      | حداکثر ۳ Pa.s   | D4402     | ۰/۳۲     |
| ۳  | برش دینامیکی G*/sinδ قیر اصلی، دمای آزمایش در ۱۰rad/s (°C) | حداقل ۱ kPa     | D7175     | ۱/۲      |
| قیر باقیمانده از آزمایش لعاب نازک چرخشی (RTFO) |  |                 |           |          |
| ۴  | افت وزنی (%)   | حداکثر ۱٪       | D2872     | ۰/۰۵     |
| ۵  | برش دینامیکی G*/sinδ، دمای آزمایش در ۱۰rad/s (°C)          | حداقل ۲/۲ kPa   | D7175     | ۲/۵۵     |
| قیر باقیمانده از محفظه تسریع پیری (PAV)        |  |                 |           |          |
| ۶  | دمای قیر باقیمانده از محفظه تسریع پیرشدگی قیر (PAV)        |                 | D6521     | ۲۸       |
| ۷  | برش دینامیکی (DSR) G*×sinδ، دمای آزمایش در ۱۰rad/s (°C)    | حداکثر ۵۰۰۰ kPa | D7175     | ۳۹۸۰     |
|  | رئومتر تیرچه دمای آزمایش (°C)                              |                 |           | -۱۶      |
| ۸  | خمشی سفتی خزشی (S)   | حداکثر ۳۰۰ MPa  | D6648     | ۶۴       |
|  | نرخ خزش (m-value) (BBR)                                    | حداقل ۰/۳       | D6648     | ۰/۳۳۲    |

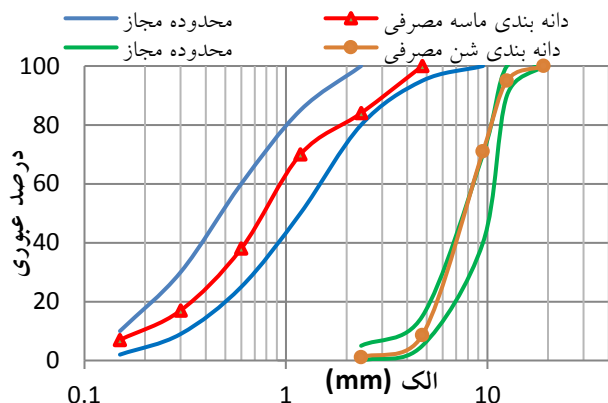
جدول ۲. مشخصات قیر ۱۶-۶۴ PG معادل درجه بندی نفوذی ۶۰/۷۰

| نتیجه | حدود مشخصات |        | روش آزمایش | نوع آزمایش                                       |
|-------|-------------|--------|------------|--|
|       | حداقل       | حداکثر |            |  |
| ۶۳    | ۶۰          | ۷۰     | ASTM D5    | درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانی گراد (۱۰۰ گرم-۵ ثانیه) |
| ۴۹/۶  | ۴۹          | ۵۹     | ASTM D36   | نقطه نرمی (گلوله-حلقه) بر حسب درجه سانی گراد     |
| ۱۱۲   | ۱۰۰         | -      | ASTM D113  | مقدار کشش در ۲۵ درجه سانی گراد بر حسب سانی متر   |
| ۱/۰۳  | ۱/۰۱        | ۱/۰۶   | ASTM D70   | وزن مخصوص قیر (گرم بر سانی متر مربع)             |

جدول ۳. مشخصات قیر امولسیون CRS-1

| نتیجه | حدود مشخصات |        | استاندارد | آزمایش   |
|-------|-------------|--------|-----------|--|
|       | حداقل       | حداکثر |           |  |
| ۱۰۰   | ۲۰          | ۲۱     | D 7496    | کندروانی- سیبولت فیورل در دمای ۵۰ درجه سانی گراد (ثانیه) |
| ۱     | -           | ۰/۸    | D 6930    | پایداری در برابر ته نشینی در ۲۴ ساعت (%)                 |
| -     | ۴۰          | ۴۶     | D 6936    | شکست ۰/۸ درصد محلول دی اکتیل سولفوسکسینات سدیم (%)       |
| مثبت  | مثبت        | مثبت   | D 7402    | تعیین بار ذره‌ای   |
| ۰/۱   | -           | ۰/۰۴   | D 6933    | دانه بندی الک (%)  |
| -     | ۶۰          | ۶۲     | D 6997    | تعیین مقدار قیر باقیمانده (%)                            |
| ۳     | -           | ۲/۶    | D 6997    | مقدار روغن تقطیر شده امولسیون (%)                        |
| ۲۵۰   | ۱۰۰         | ۹۳     | D 5       | درجه نفوذ  |
| -     | ۴۰          | ۴۷     | D 113     | خاصیت انگمی  |

آزمایش XRF انجام شد که در جدول ۶ نتایج این آزمایش نشان داده شده است.



شکل ۱. دانه بندی سنگدانه جهت ساخت بتن معمولی

جدول ۶. نتایج آزمایش XRF بر روی سنگدانه سرباره فولاد

| آنالیز شیمیایی سرباره فولاد |                                |
|-----------------------------|--------------------------------|
| درصد وزنی                   |                                |
| ۱۷/۲۱                       | SiO <sub>2</sub>               |
| ۴/۱۳۲                       | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
| ۲۴/۳۳۷                      | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
| ۵/۲۳۳                       | MgO                            |
| ۳۸/۵۷۱                      | CaO                            |
| ۰/۳۸۴                       | Na <sub>2</sub> O              |
| <b>خصوصیات فیزیکی</b>       |                                |
| ۳/۰۲                        | وزن مخصوص                      |

۲-۲ ساخت نمونه های بتنی، مخلوط آسفالتی و نمونه-

### های مرکب

طرح اختلاط نمونه های بتنی در جدول ۶ نشان داده شده که درصد های اختلاط اجزاء بتن مطابق با استاندارد ACI-211-91 تعیین گردیده است. مطابق جدول ۷ نمونه شاهد با کد SH و نمونه های حاوی درصد های مختلف سرباره با کد SL- % نمایش داده شده است. نمونه های بتنی با استفاده از یک

جدول ۴- دانه بندی مورد استفاده برای ساخت لایه آسفالتی

| اندازه سنگدانه (mm) | حد بالا | حد پایین | دانه بندی |
|---------------------|---------|----------|-----------|
| ۱۲/۵                | ۱۰۰     | ۱۰۰      | ۱۰۰       |
| ۹/۵                 | ۱۰۰     | ۹۰       | ۹۵        |
| ۴/۷۵                | ۸۵      | ۵۵       | ۷۰        |
| ۲/۳۶                | ۶۷      | ۳۲       | ۵۰        |
| ۰/۳                 | ۲۳      | ۷        | ۱۵        |
| ۰/۰۷۵               | ۱۰      | ۲        | ۶         |

جدول ۵. مشخصات فیزیکی قیر اصلاح شده با پودر لاستیک و زئولیت

| نوع آزمایش  | روش آزمایش | نتیجه |
|---|------------|-------|
| درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی-گراد (۱۰۰ گرم-۵ ثانیه) | ASTM D5    | ۴۹    |
| نقطه نرمی (گلوله-حلقه) بر حسب درجه سانتی-گراد     | ASTM D36   | ۵۵/۵  |
| مقدار کشش در ۲۵ درجه سانتی-گراد بر حسب سانتی-متر  | ASTM D113  | ۴۳    |
| وزن مخصوص قیر (گرم بر سانتی متر مربع)             | ASTM D70   | ۱/۰۰۵ |

در این تحقیق جهت ساخت بتن معمولی از سنگدانه، سیمان و سرباره فولاد استفاده شده است. اندازه ذرات درشت دانه مصرفی در این تحقیق از ۲/۳۶ تا ۱۹ میلی تر بوده است. ماسه مصرف شده زیر الک ۴/۷۵ میلی تر انتخاب شد که دارای هم ارز ماسه ای به میزان ۸۳ درصد بوده به طوری که در شکل ۱ منحنی درشت دانه و ریزدانه مصالح آزمایشگاهی موجود، با توجه به محدوده ذرات درشت دانه و ریزدانه طبق استاندارد ASTM C 33 نشان داده شده است. سیمان مورد استفاده، سیمان پرتلند معمولی تیپ ۲ تولید کارخانه سیمان شاهرود است. سرباره مورد استفاده در این تحقیق سرباره حاصل از کوره قوس الکتریکی (EAF) از فولاد مبارکه اصفهان تهیه شد. وزن مخصوص سرباره ۳/۰۲ گرم بر سانتی متر مکعب و سایش لس آنجلس ۱۲/۱ درصد است. همچنین به منظور تعیین عناصر و ترکیبات شیمیایی سرباره فولاد



## بررسی تاثیر استفاده از سرباره فولاد و اندودهای سطحی مختلف بر عملکرد مقاومت برشی بین لایه‌ای روسازی مرکب

پودرلاستیکی حاوی زئولیت با مقادیر ۰/۳، ۰/۶، ۰/۹، ۱/۲ و ۱/۵ کیلوگرم بر مترمربع بر روی سطح مشترک دولایه با استفاده از قلم‌مو پخش شده و بلافاصله مخلوط آسفالتی را بر روی نمونه بتنی در داخل قالب مخصوص ریخته و لایه فوقانی جهت رسیدن به درصد هوای مورد نیاز و همچنین حداقل وزن مخصوص توده ای ۹۸ درصد، ۱۲۵ ضربه با استفاده از چکش مارشال کوبیده شد. از آنجایی که مطابق استاندارد امکان تراکم هرطرف از نمونه به ۷۵ ضربه‌ی مارشال وجود نداشت، بر اساس پیشنهاد آیین نامه ایتالیا، تراکم تنها از یک طرف نمونه و به تعداد ۱۲۵ ضربه انجام شد [Tozzo et al., 2014]. در شکل ۲ نحوه ساخت نمونه مرکب دولایه و همچنین نمایی از نمونه‌های مرکب پس از باز شدن از قالب نشان داده شده است.



شکل ۲. مراحل ساخت نمونه‌های مرکب (بتنی اصلاح شده- آسفالتی)

### ۳-۲ روش‌های آزمایش

به منظور اندازه گیری مقاومت برشی بین لایه‌ای بتن و مخلوط آسفالتی از دستگاه برش مستقیم موجود در آزمایشگاه سمنان استفاده شد. کلیه نمونه‌ها تحت بارگذاری ثابت قطری با شدت اعمال بار ۵۱ میلی‌متر بر دقیقه و در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج انجام آزمایش‌ها به صورت منحنی نیروی-جابجایی رسم گردید و از روی این منحنی، حداکثر نیروی وارده (مقاومت برشی) تعیین گردید. از هر نمونه ۳ عدد ساخته شده و عدد نهایی میانگین مقاومت برشی گزارش شده برای هر سه نمونه است. نمونه‌های بتنی سخت شده برای مقاومت فشاری و مقاومت کششی دونیم شدن در سن ۲۸ روز آزمایش می‌شوند. این آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های

میکسر مکانیکی آماده و در قالب‌های مخصوص مربوط به هر آزمایش ریخته شد. جهت تراکم نمونه‌ها از میله استاندارد و پس از آن از میز ویبره استفاده شد. بعد از اتمام اختلاط، نمونه‌ها در شرایط آزمایشگاهی به مدت ۲۴ ساعت در قالب نگهداری شدند. سپس نمونه‌ها را از قالب خارج و در حوضچه‌های آب در دمای بین ۲۲-۲۵ درجه سانتی‌گراد تا مدت ۲۸ روز عمل‌آوری شدند. در هر طرح اختلاط ۳ نمونه مقاومت فشاری و کششی استوانه‌ای به ابعاد ۱۵۰×۳۰۰ میلی‌متر، تیر منشوری به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۵۰۰ میلی‌متر جهت تعیین مقاومت خمشی بتن ساخته شد. همچنین جهت انجام آزمایش سایش به روش EN 1338 از نمونه به ابعاد ۱۵mm<sup>H</sup> × 6mm<sup>W</sup> × 15mm<sup>L</sup> جهت انجام آزمایش لغزندگی به روش پاندول انگلیسی ابتدا تیرمنشوری به ابعاد ۱۰\*۱۰\*۵۰ ساخته شده و سپس به ابعاد ۱۵mm<sup>H</sup> × 10mm<sup>W</sup> × 15mm<sup>L</sup> سانتی‌متر برش داده شد. برش با طول ۱۵ سانتی‌متر به این دلیل است که طبق استاندارد ASTM E 303 مسیر مورد نیاز جهت عبور لغزنده آونگ انگلیسی بر روی سطح بتن باید بین ۱۲/۴ تا ۱۲/۷ سانتی‌متر باشد.

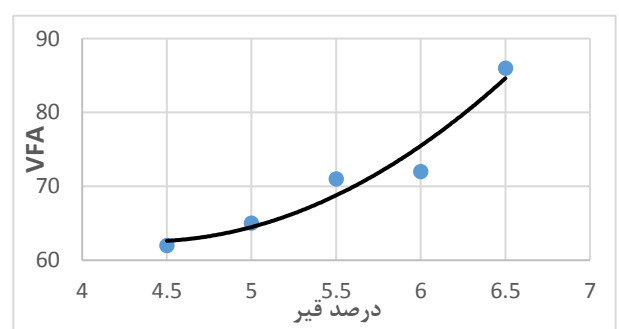
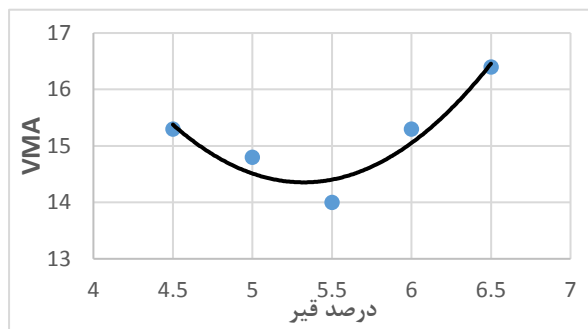
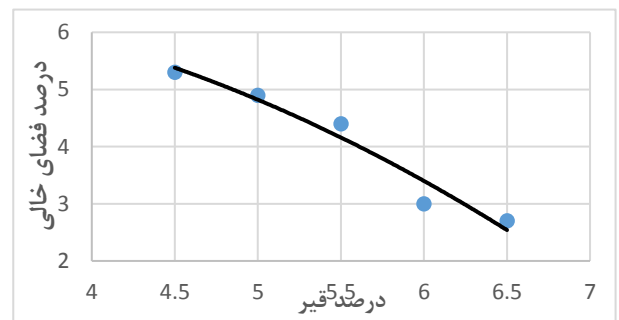
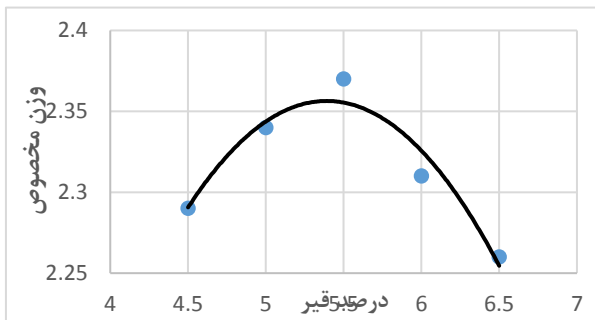
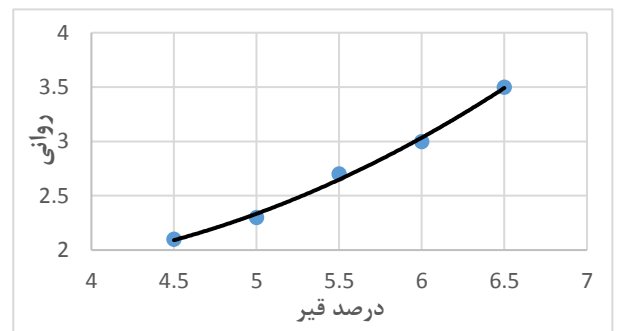
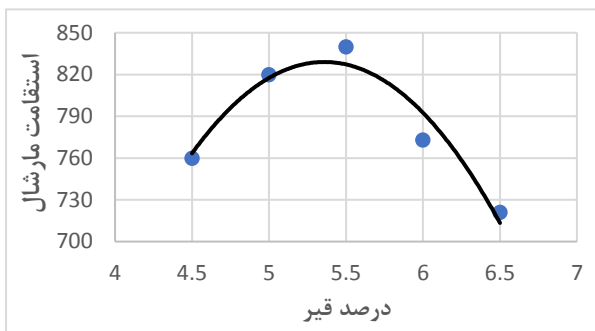
در این پژوهش برای تعیین درصد قیر بهینه ابتدا ۱۵ نمونه مخلوط آسفالتی با مقادیر قیر ۴/۵، ۵، ۵/۵، ۶، ۶/۵ درصد ساخته شده و پس از انجام آزمایشات مارشال، درصد قیر بهینه تعیین شد. برای تهیه نمونه‌های آسفالتی، پس از اختلاط قیر و سنگدانه در دمای ۱۴۵ درجه، با ۷۵ ضربه مارشال به طرفین نمونه‌های ۱۰۲ میلی‌متری به منظور در نظر گرفتن شرایط ترافیکی سنگین، در دمای ۱۳۵ درجه متراکم گردید. پس از سرد شدن نمونه‌ها، آزمایش مارشال بر روی نمونه‌ها انجام پذیرفت. با توجه به نمودارهای مارشال، مقدار قیر بهینه مخلوط آسفالتی ۵/۶ درصد بدست آمده که این نمودارها در شکل ۳ ارائه شده است.

جهت ساخت نمونه‌های روسازی مرکب، قالب مخصوصی به ارتفاع ۱۲۰ میلی‌متر و قطر داخلی ۱۰۰ میلی‌متر ساخته شد. در این قالب نمونه بتنی اصلاح شده با سرباره با ارتفاع ۳ اینچ و قطر ۴ اینچ در قسمت زیرین قرار داده شد. سپس به ترتیب اندودهای سطحی امولسیون CRS-1، قیر ۱۶-۶۴ PG و قیر

غلامعلی شفا بخش، سعید احمدی

جدول ۷. طرح اختلاط مورد استفاده در این پژوهش

| سری   | افزودنی (%) | شن (kg) | سیمان (kg) | ماسه (kg) | آب (kg) |
|-------|-------------|---------|------------|-----------|---------|
| SH.   | -           | ۹۸۷     | ۴۰۰        | ۸۰۸       | ۱۶۰     |
| SL 25 | ۲۵          | ۷۴۰     | ۴۰۰        | ۸۰۸       | ۱۶۰     |
| SL 50 | ۵۰          | ۴۹۳/۵   | ۴۰۰        | ۸۰۸       | ۱۶۰     |
| SL 75 | ۷۵          | ۲۴۷     | ۴۰۰        | ۸۰۸       | ۱۶۰     |
| SL100 | ۱۰۰         | ۹۸۷     | ۴۰۰        | ۸۰۸       | ۱۶۰     |



شکل ۳- نمودارهای مارشال جهت تعیین قیر بهینه مخلوط آسفالتی

استوانه‌ای بر اساس استانداردهای ASTM و ASTM C39 و C496 انجام شده است نمونه‌های بتنی سخت شده برای مقاومت فشاری و مقاومت کششی دونیم شدن در سن ۲۸ روز آزمایش می‌شوند. این آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های استوانه‌ای بر اساس استانداردهای ASTM C39 و ASTM C496 انجام شده است. در آزمایش مقاومت فشاری، نمونه‌های بتن با اعمال نیروی محوری فشاری با سرعتی مشخص به حد مقاومت نهایی می‌رسند. سرعت معادل بارگذاری برابر  $0.3 \text{ MPa/sec}$  است که با توجه به استاندارد مربوطه در محدوده بین  $0.15 \text{ MPa/sec}$  تا  $0.3$  قرار دارد. در آزمایش مقاومت کششی دو نیم شدن، یک نمونه استوانه‌ای استاندارد  $15 \times 30 \times 15$  سانتیمتر به طور قطری در محفظه مخصوص در دستگاه فشار قرار می‌گیرد و نیرو به صورت یکنواخت در امتداد قطر قائم استوانه وارد می‌شود تا گسیختگی روی دهد. سرعت معادل بارگذاری برابر  $1 \text{ MPa/min}$  است که با توجه به استاندارد مربوطه در محدوده بین  $0.7 \text{ MPa/min}$  تا  $1/4$  قرار دارد. به منظور اندازه‌گیری مقاومت خمشی تیرهایی با ابعاد  $10 \times 10 \times 50$  سانتیمتر ساخته شده است که پس از ۲۸ روز توسط یک دوم بار نقطه‌ای طبق استاندارد ASTM C78 مورد آزمایش قرار گرفته است. تیرها روی دو تکیه‌گاه در نزدیک دو انتها به فاصله ۴۰ سانتی‌متر از یکدیگر قرار می‌گیرند و بار در وسط نمونه اعمال می‌شود تا نمونه گسیخته گردد. سرعت معادل بارگذاری برابر  $1 \text{ MPa/min}$  است که با توجه به استاندارد مربوطه در محدوده بین  $0.86 \text{ MPa/min}$  تا  $1/12$  قرار دارد. مقاومت در برابر سایش مطابق روش مشخص شده در BS EN1338 بر روی نمونه های ۲۸ روزه بدست آمده از برش نمونه های منشوری به ابعاد  $15 \text{mm}^L \times 6 \text{mm}^W \times 10 \text{mm}^H$  بر آن از آزمایش پاندول انگلیسی طبق استاندارد ASTM E-303 جهت اندازه گیری مقاومت لغزندگی بتن حاوی سرباره استفاده شده است. مقادیر اندازه گیری شده توسط دستگاه پاندول انگلیسی تعیین کننده عدد آونگ انگلیسی (BPN) یا عدد لغزندگی (SN) است. در صورت اصطکاک بیشتر بین لبه

لغزنده آونگ و سطح نمونه، نوسان کند و آهسته شده و عدد لغزندگی بیشتری قرائت می‌شود [Asi et al. 2007].

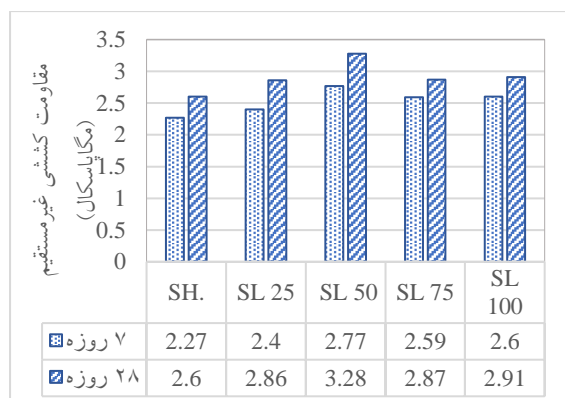
### ۳. تحلیل نتایج آزمایشگاهی

#### ۳-۱ اثر سرباره فولاد بر خصوصیات مکانیکی روسازی

##### بتنی

مقاومت فشاری نمونه های بتنی حاوی سرباره و بدون سرباره پس از عمل آوری در سنین ۷ و ۲۸ روز تعیین شد. نتایج آزمایش در شکل ۴ نشان داده شده است. از نتایج آزمون، می توان مشاهده کرد که مقاومت فشاری مخلوطهای بتنی حاوی سرباره با ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰ درصد جایگزینی درشت دانه با سرباره نسبت به بتن شاهد افزایش داشته است. بطور کلی با افزایش میزان جانشین سازی سنگدانه توسط سرباره فولاد در ابتدا مقاومت فشاری افزایش و در ادامه کاهش می‌یابد. برای مثال جایگزینی ۵۰ درصد حجم سنگدانه با سرباره در نسبت آب به سیمان ۰/۴۰، موجب افزایش ۵۶/۴ درصدی در مقاومت شده است. این روند واضح در افزایش مقاومت فشاری در ۵۰ درصد جایگزینی سرباره بجای سنگدانه دیده می‌شود. همچنین جایگزین کردن ۱۰۰ درصد حجم سنگدانه توسط سرباره نسبت به مقدار بینه کاهش ۵/۷۷ درصدی در مقاومت را موجب شده است. بر خلاف انتظار استفاده هر چه بیشتر از سرباره سبب بالا رفتن ظرفیت مقاومت فشاری بتن نشده است. طبق مطالعه‌ای که آقای ساکسنا و تمبورکار در سال ۲۰۱۸ بر روی بتن معمولی انجام داده‌اند، با افزایش میزان سرباره فولاد تا مقدار ۵۰٪ مقاومت فشاری افزایش یافته و در ادامه با افزایش مقدار سرباره فولاد، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد [Saxena and Tembhurkar 2018]. بدلیل اینکه حداقل مقاومت فشاری مورد نیاز برای روسازی بتنی در آیین نامه -ACI 325.10R 99 برابر ۲۷/۶ مگاپاسکال تعیین شده است. بنابراین در این مطالعه مقاومت فشاری نمونه ها بیشتر از معیار طراحی روسازی بتنی است. در بتن سه ناحیه وجود دارد که شکست در هر ناحیه ای که رخ دهد باعث شکست نمونه می‌شود. این سه منطقه متشکل از سنگدانه‌ها، خمیر سیمان و ناحیه تماس سنگدانه‌ها و

مقاومت کششی نسبت به نمونه‌ی شاهد نشان داده است. همچنین جایگزین نمودن ۵۰ و ۱۰۰ درصد سرباره با سنگدانه به ترتیب ۲۶ درصد و ۱۲ درصد افزایش در مقاومت کششی رخ داده است. می‌توان این افزایش را این گونه تشریح نمود که به علت واکنش پوزولانی و چسبندگی مناسب بین خمیر و سنگدانه مقاومت کششی بهبود یافته است. طبق مطالعه‌ای که آقای متوالی و همکاران در سال ۲۰۱۷ بر روی بتن معمولی انجام داده‌اند به این نتیجه رسیدند که با افزایش میزان سرباره فولاد تا مقدار ۳۰ درصد، مقاومت کششی افزایش یافته و پس از آن مقاومت کششی کاهش پیدا می‌کند [Metwally et al. 2017].



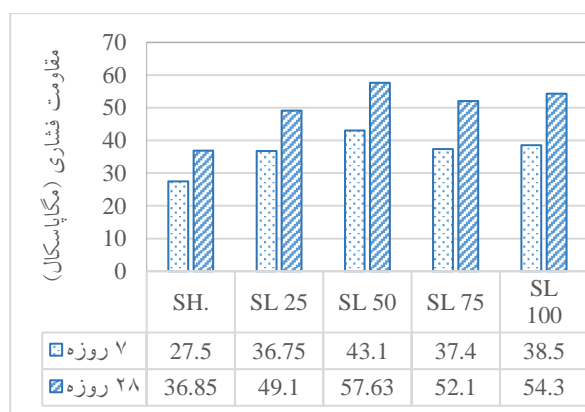
شکل ۵. مقاومت کششی غیرمستقیم روسازی بتنی در مقادیر مختلف سرباره فولاد در سنین مختلف

مقاومت فشاری مورد قبول براساس مطالعات انجام شده ۲۷/۵۶ مگاپاسکال و برای مقاومت خمشی حداقل ۴/۵ مگاپاسکال است [Jiang, Darter and Owusu-Antwi 1996]. از نکات قابل توجهی که در اجرای راه بسیار حائز اهمیت است ارتباط بین مقاومت فشاری و خمشی بتن است؛ چرا که در بیشتر مواقع در آزمایشات صحرائی مغزه گیری از بتن بصورت استوانه‌ای انجام می‌شود. با توجه به اینکه آزمایش مقاومت خمشی روی تیر منشوری انجام پذیر است نمونه گیری به صورت منشوری از محل، ساده نخواهد بود از این رو پیش بینی مقاومت خمشی به عنوان معیاری برای طراحی در روسازی بتنی از اهمیت زیادی برخوردار است.

شکل ۶ رفتار مقاومت خمشی بتن حاوی سرباره فولاد را در سنین ۷ و ۲۸ روزه نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود

خمیر سیمان است. برای بتن معمولی و بتن سرباره‌ای خمیر سیمان مشابه است و با توجه به آزمایشات سنگدانه ای چنین برداشت می‌شود که سرباره‌ها محکم تر از سنگدانه های سیلیسی هستند. بنابراین تنها ناحیه ای که ممکن است سبب کاهش مقاومت فشاری در بتن سرباره‌ای شود ناحیه تماس سرباره‌ها و خمیر سیمان است. همچنین از دیگر دلایل افزایش مقاومت فشاری می‌توان به اثر پوزولانی سرباره فولاد نسبت داد. در سنین اولیه سرباره به آرامی با هیدروکسید کلسیم آزاد شده در طول هیدراتاسیون سیمان واکنش نشان می‌دهد و به طور قابل توجهی به تراکم ماتریس بتن در سنین اولیه کمک می‌کند، [Metwally,

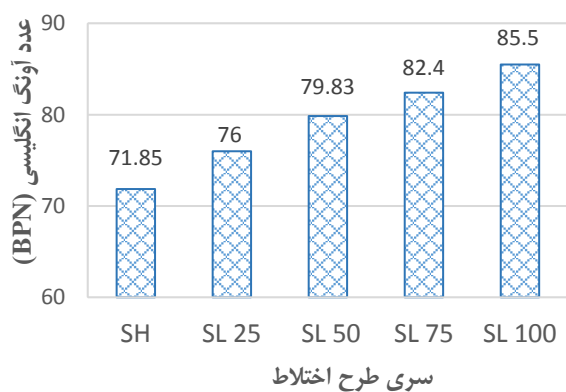
Faried and Tawfik 2017]



شکل ۴. مقاومت فشاری روسازی بتنی در درصدهای مختلف سرباره در سنین مختلف

آزمایش مقاومت کششی دونیم شدن بر روی نمونه های استوانه- ایی به ابعاد ۱۵×۳۰ سانتیمتر و در عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه صورت گرفته است که مقادیر حاصل در شکل ۵ آورده شده است. مطابق شکل ۵ روند کلی تغییرات مقاومت کششی مطابق با مقاومت فشاری بوده به طوری که ابتدا به صورت افزایشی و بعد از مقدار بهینه سرباره فولاد (۵۰٪) بصورت کاهش می‌باشد. با افزودن درصدهای مختلفی از سرباره بعنوان جایگزین سنگدانه در بتن، مقاومت کششی افزایش کمی می‌یابد. این در حالی است که مقاومت کششی نمونه‌های تقویت شده نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته است. بنابراین در همه‌ی نمونه‌ها با افزایش سرباره از ۲۵ به ۵۰ درصد مقاومت کششی ۱۵ درصد بهبود می‌یابد. در این بین، افزودن ۲۵ درصد سرباره سبب کمترین میزان افزایش

بهتری از لحاظ مقاومت لغزندگی دارد. همچنین نمونه ساخته شده با ۱۰۰ درصد سرباره نیز بیشترین مقدار عدد لغزندگی را در بین نمونه‌ها دارد. مقادیر اندازه گیری شده مقاومت لغزندگی در بتن حاوی ۱۰۰ درصد سرباره تا ۱۹ درصد و نمونه حاوی ۵۰ درصد سرباره ۱۶ درصد نسبت به بتن شاهد افزایش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود که نمونه ۱۰۰ درصد جایگزینی سرباره تاثیر چشمگیری نداشته است. دلیل این افزایش ناشی از بافت متخلخل و زبر سنگدانه‌های سرباره‌ای است. به دلیل مقاومت سایشی بالاتر سرباره فولاد نسبت به مصالح سیلیسی در آزمایش لس آنجلس، بتن سرباره‌ای تحت بار ترفیکی نیز قادر به حفظ مقاومت اصطکاکی خود برای مدت زمان طولانی خواهند بود.

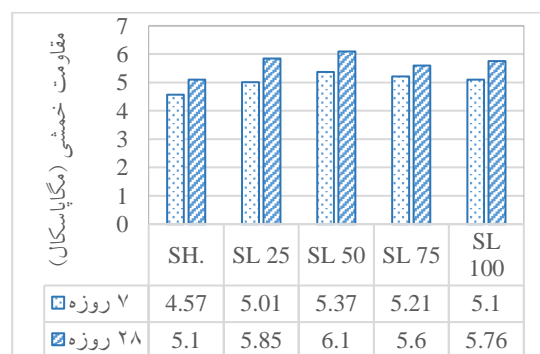


شکل ۷. نمودار مقادیر عدد آونگ انگلیسی (BPN) برای نمونه‌های مختلف بتنی تقویت شده



شکل ۸. نحوه انجام آزمایش آونگ انگلیسی

مشابه روندی که در مقاومت فشاری و کششی بدست آمده در مقاومت خمشی هم به این ترتیب شده است، به طوری که ۵۰ درصد جایگزینی سرباره نسبت به بتن شاهد ۱۶ درصد افزایش داشته است. بر اساس نتایج بیشترین مقاومت خمشی مربوط به طرح ۳ و مقدار آن ۶/۱ مگاپاسکال است. مطابق نتایج مقاومت خمشی بدست آمده از این پژوهش و همچنین مطالعه‌ی ساکسنا و تمبورکار در سال ۲۰۱۸، با افزایش مقدار سرباره فولاد به میزان ۵۰ درصد، مقاومت خمشی افزایش یافته و پس از آن کاهش می‌یابد، بنابراین مقدار بهینه سرباره فولاد ۵۰ درصد در نظر گرفته شده است [Saxena and Tembhurkar 2018]. ذکر این نکته حائز اهمیت است که با توجه به قیمت ارزانتر سرباره نسبت به سنگدانه‌های طبیعی، بکارگیری سرباره در روسازی بتنی سبب کاهش هزینه‌های ساخت شده و قیمت تمام شده را کاهش می‌دهد.



شکل ۶. مقاومت خمشی روسازی بتنی در مقادیر مختلف سرباره فولاد در سنین مختلف

۲-۳ مقاومت لغزندگی و سایشی روسازی بتنی تقویت شده

۱-۲-۳ مقاومت لغزندگی به روش آونگ انگلیسی

مقاومت لغزندگی برای ۵ نوع بتن با درصد‌های مختلف سرباره در دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد) با دستگاه آونگ انگلیسی مطابق استاندارد ASTM E303 اندازه گیری شده، که در شکل ۷ نشان داده شده است. در شکل ۸ نحوه انجام آزمایش آونگ انگلیسی نشان داده شده و BPN برای هر کدام محاسبه شده است. با توجه به شکل ۷ مشاهده می‌شود که نمونه‌های بتنی حاوی درصد‌های مختلف سرباره نسبت به بتن شاهد عملکرد

۲-۲-۳ مقاومت سایشی به روش EN 1338

جهت ارزیابی مقاومت سایشی بتن از آزمایش مقاومت سایشی به وسیله یک استوانه دوار استفاده می‌شود. برای این منظور از دستگاهی منطبق بر استاندارد EN 1338 استفاده کرده و از آن به منظور ارزیابی مقاومت سایشی بتن استفاده شد. سایش سطح رویه یک بلوک بتنی با ابعاد مذکور توسط استوانه دوار زبر به همراه یک ماده ساینده، تحت شرایط استاندارد انجام می‌شود. عرض ساییده شده نمونه‌های بتنی برای سن ۲۸ روزه در جدول ۸ نشان داده شده است. نتایج این جدول متعلق به نمونه‌های بتن حاوی سرباره و بتن شاهد است. همانطور که مشهود است تفاوت چشمگیری بین میزان سایش نمونه‌های شاهد و اصلاح شده با سرباره وجود دارد. سایش نمونه بتنی حاوی ۵۰ درصد سرباره در مقایسه با نمونه شاهد ۲۵ درصد افزایش داشته است. به طور کلی عرض سایش نمونه‌ها بین ۱۵ تا ۲۳ میلی‌متر است. همچنین سایش نمونه بتنی حاوی ۵۰ درصد جایگزینی سرباره فولاد تفاوت چندانی با جایگزینی ۷۵ و ۱۰۰ درصد سرباره فولاد نداشته است. مطابق استاندارد EN1338 نمونه حاوی ۲۵ درصد سرباره در رده سایش متوسط (رده ۲) این استاندارد قرار گرفته که در این رده مقدار سایش بین ۲۰-۲۳ میلی متر است. نمونه حاوی ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد سرباره فولاد در رده سایش بتنی در رده مطلوب از نظر سایش (عرض سایش کمتر از ۲۰ میلی‌متر) طبق استاندارد قرار دارند. همانگونه که نتایج نشان می‌دهد، با افزایش درصد افزودنی سرباره فولاد مقاومت سایش نمونه‌ها نیز افزایش می‌یابد. بهبود ۵۶/۴ درصدی در مقاومت فشاری و ۲۵ درصدی در مقاومت سایشی متعلق به نقطه بهینه ۵۰ درصد سرباره است.

جدول ۸ نتایج آزمایش سایش به روش EN 1338

| عرض شیار (میلی‌متر) | درصد جایگزینی سنگدانه |
|---------------------|-----------------------|
| ۲۳                  | ۰                     |
| ۲۰/۴                | ۲۵                    |
| ۱۷/۲                | ۵۰                    |
| ۱۶/۱                | ۷۵                    |
| ۱۴/۹                | ۱۰۰                   |

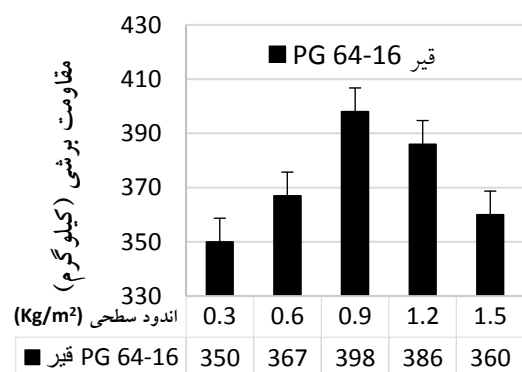
بنابراین با توجه به نتایج فوق، جهت افزایش مقاومت چسبندگی بین دو لایه و انتخاب سطح زیرین با سطوح زبرتر، نمونه حاوی جایگزینی ۵۰ درصد سرباره به جای سنگدانه به عنوان نمونه مناسب از لحاظ خصوصیات مکانیکی و سایشی و همچنین از لحاظ صرفه اقتصادی از این درصد در روسازی مرکب بتنی اصلاح شده و آسفالتی استفاده می‌شود.

۳-۳ اثر نوع قیر و نرخ اندود سطحی بین لایه‌های روسازی مرکب

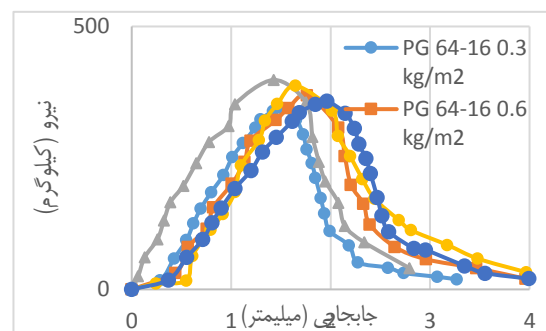
همانطور که در مطالب فوق بیان شد نوع اندود سطحی و نرخ اندود سطحی مورد استفاده بر روی سطح لایه زیرین روسازی مرکب نقش مهمی در مقاومت چسبندگی سطح مشترک لایه های روسازی بتنی و آسفالتی دارد. بنابراین در این مطالعه نوع اندودهای سطحی استفاده شده، قیر خالص (۱۶-۶۴ PG)، قیر اصلاح شده با پودر لاستیک و ژئولیت (۲۲-۷۰ PG) و قیر امولسیون تند شکن CRS-1 است. همچنین نرخ اندودهای سطحی مذکور ۰/۳، ۰/۶، ۰/۹، ۱/۲ و ۱/۵ کیلوگرم در مترمربع در نظر گرفته شده است.

سه فاکتور مهم در مقاومت چسبندگی میان لایه روسازی تاثیر دارد که شامل اصطکاک، قفل و بست سنگدانه و مقاومت چسبندگی لایه‌ها می‌شود [Sheng, Huang and Zhao-hui, 2016]. در این پژوهش لایه روکش و لایه زیرین از دو جنس متفاوت روسازی بتنی و روسازی آسفالتی است. بنابراین می‌توان گفت مقاومت چسبندگی تاثیر بیشتری از اصطکاک و قفل و بست سنگدانه بین دو لایه خواهد داشت. در این بخش اندود سطحی مورد استفاده بین لایه های آسفالتی و بتنی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و عملکرد چسبندگی اندودهای سطحی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در شکل ۹ و ۱۰ به ترتیب نرخ اندود سطحی قیر خالص ۱۶-۶۴ PG در برابر مقاومت برشی سطح مشترک روسازی بتنی و آسفالتی و منحنی نیرو در مقابل جابجایی قیر خالص نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود هرچه نرخ استفاده از قیر خالص زیاد می‌شود مقاومت

چسبندگی در ابتدا افزایش و سپس کاهش پیدا می‌کند. این نتایج نشان می‌دهد که در مقدار پخش کم اندود سطحی بر روی روسازی بتنی بدلیل ویسکوزیته بالای قیر خالص، اندود سطحی کل سطح را پوشش نداده و مقاومت چسبندگی افزایش ناچیزی می‌یابد. از سویی دیگر هرچه نرخ استفاده از قیر بیشتر شود لزوماً به معنای افزایش مقاومت چسبندگی بین لایه‌ها نیست. واضح است که قیر اضافی سبب می‌شود سطح رویه بتنی اشباع شده و مقادیر اضافی بر روی سطح سبب کاهش مقاومت می‌شود. به هرحال زمانی که مقدار اندود سطحی بیش از ۱/۲ کیلوگرم بر مترمربع پخش شود، لغزش برشی در سطح مشترک بین دو لایه ایجاد شده و مقاومت برشی دچار افت زیادی می‌شود. با توجه به نتایج بدست آمده مقدار بهینه اندود سطحی قیر خالص (۱۶- PG ۶۴) ۰/۹ کیلوگرم بر مترمربع می‌باشد که در این مقدار بیشترین مقاومت برشی حاصل شد.



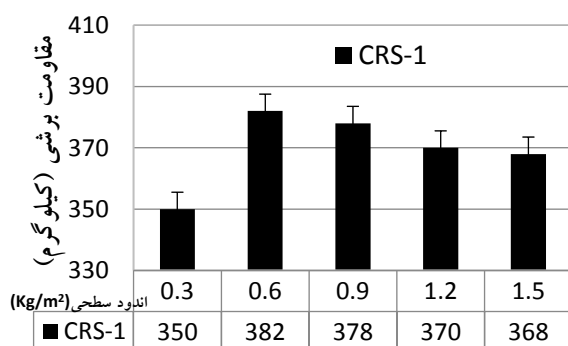
شکل ۹. مقاومت برشی بین لایه‌ای حاوی قیر خالص بین لایه‌های روسازی مرکب



شکل ۱۰. منحنی نیرو-جابجایی مربوط به قیر PG 64-16 در آزمایش برش مستقیم

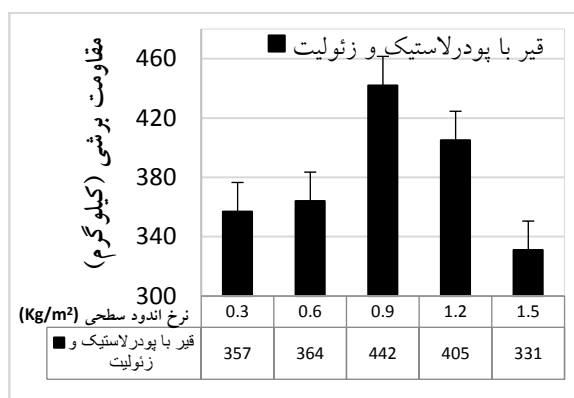
دما نرخ مهمی در مقاومت برشی لایه های روسازی مرکب دارد. در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، اندود سطحی نقش مهمی در مقاومت برشی بین لایه های روسازی مرکب ایفا می‌کند. این در حالی است که در دمای بالا ۶۰ درجه سانتی‌گراد تغییر در نرخ استفاده از اندود سطحی تاثیر چشمگیری در مقاومت برشی ایفا نمی‌کند [Sheng, Huang and Zhao-hui 2016]. شکل ۱۱ و ۱۲ به ترتیب اثر نرخ استفاده از قیر امولسیون CRS-1 به عنوان اندود سطحی در مقابل مقاومت برشی و منحنی نیرو-جابجایی قیر امولسیون در روسازی مرکب نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار قیر امولسیون مقاومت چسبندگی در ابتدا افزایش و سپس شروع به کاهش می‌کند.

با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان مشاهده نمود که هرچه مقدار قیر امولسیون بیشتر شود بالتبع مقدار آب بیشتری در نمونه‌های قیر امولسیون وجود دارد که باعث می‌شود لغزندگی بین لایه بتنی و آسفالتی بوجود بیاید. در واقع مقدار آبی باقیمانده بر روی سطح به افزایش مقدار قیر باقیمانده برتری یافته و باعث کاهش چسبندگی شده است. همچنین می‌توان بیان نمود که با افزایش مقدار مصرف ۰/۶ کیلوگرم بر مترمربع از قیر امولسیونی، حجم آب موجود در آنها بیشتر شده و سبب شده سرعت شکست بالای این نوع قیر نیز نتوانسته تاثیر چندانی در خروج و کاهش آب موجود بر روی سطح داشته باشد و بنابراین مقاومت چسبندگی کاهش می‌یابد [Biglari, Asgharzadeh and Kavussi, 2018].

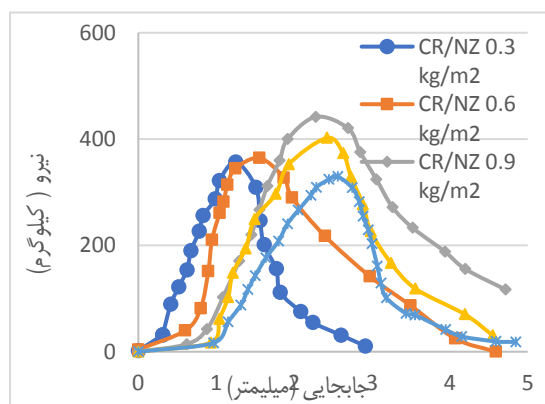


شکل ۱۱. مقاومت برشی بین لایه‌ای حاوی امولسیون تندشکن بین لایه‌های روسازی مرکب

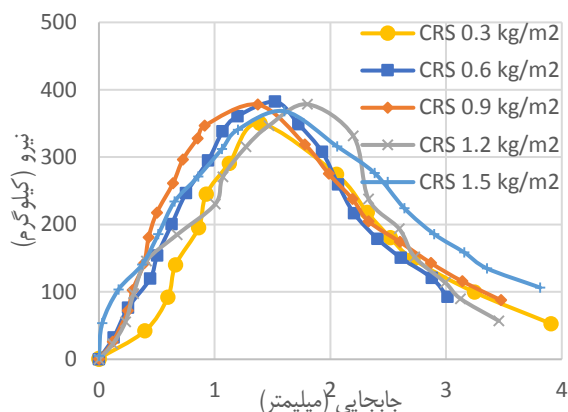
نفوذ کند. این در حالی است که ویسکوزیته بالای قیر اصلاح شده و قیر ۱۶-۶۴ PG موجب عملکرد ضعیف این اندودهای سطحی در مقادیر کم استفاده از آن می گردد. همچنین با توجه به نتایج بدست آمده از مقاومت برشی نمونه‌ها، می توان مشاهده کرد که از قیر اصلاح شده و قیر خالص بهتر است در مقادیر بالای مصرف استفاده شود، این در حالی است که در مقادیر اندود سطحی کم، پیشنهاد می شود از قیر امولسیون استفاده شود. میزان مقاومت برشی قیر اصلاح شده با پودرلاستیک و زئولیت در مقایسه با نمونه‌های دیگر بیشتر شده است. می توان این گونه تفسیر نمود که خصوصیات چسبندگی بالاتر قیر اصلاح شده نسبت به قیر معمولی و قیر امولسیون و همچنین پخش بهتر آن در بافت زیر روسازی بتنی سبب شده بیشترین مقاومت برشی حاصل شود.



شکل ۱۳. مقاومت برشی بین لایه‌های حاوی قیر اصلاح شده با پودرلاستیک و زئولیت بین لایه‌های روسازی مرکب



شکل ۱۴- منحنی نیرو- جابجایی مربوط به قیر اصلاح شده با پودرلاستیک و زئولیت در آزمایش برش مستقیم



شکل ۱۲. منحنی نیرو- جابجایی مربوط به قیر امولسیون در آزمایش برش مستقیم

در شکل ۱۳ و ۱۴ به ترتیب مقاومت برشی میان لایه قیری اصلاح شده حاوی پودرلاستیک و زئولیت بین لایه های روسازی مرکب و منحنی نیرو- جابجایی در آزمایش برش مستقیم مربوط به قیر اصلاح شده با پودرلاستیک و زئولیت نشان داده است. همانطور که مشاهده می شود نرخ اندود سطحی بهینه برای قیرپودرلاستیکی حاوی زئولیت بین ۰/۹ تا ۱ کیلوگرم بر مترمربع است. با توجه به شکل ۱۳ روند افزایش مقاومت برشی همانند نمودارهای ۹ و ۱۱ بوده است. در شکل ۱۳ میزان اندود سطحی پخش شده بر روی لایه بتنی نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۵، زمانی که مقدار اندود سطحی کمی بر روی سطح وجود داشته مقاومت برشی افزایش آن چنانی نمی یابد. این در حالی است که وقتی مقدار قیر بیش از حد بر روی سطح پخش شود دو لایه بر روی یکدیگر با کمترین نیرو لغزیده می- شوند.

با کمی دقت بر روی شکل‌های ۹، ۱۱ و ۱۳ می توان مشاهده کرد که با توجه به ویسکوزیته بالای قیر خالص و قیر اصلاح شده با پودرلاستیک و زئولیت نسبت به قیر امولسیون، مقاومت برشی این قیرها در مقادیر کم استفاده از آنها بر روی روسازی بتنی، کمتر از قیر امولسیون تندشکن شده است. در حقیقت این گونه می توان تفسیر نمود که ویسکوزیته‌ی پایین قیرهای امولسیونی سبب می شود که این اندود بتواند به خوبی در سطح نمونه پخش شود و به خوبی در منافذ موجود در سطح زیرین



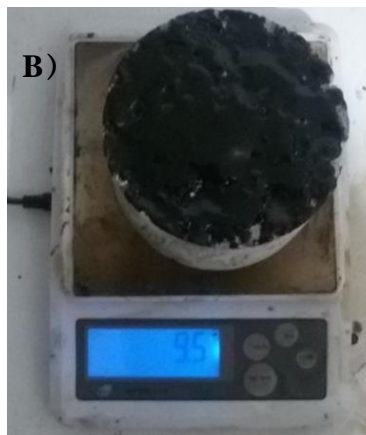
آسفالتی افزایش یابد. سپس جهت تعیین مقاومت برشی بین لایه-ای روسازی مرکب از سه نوع اندود سطحی مختلف قیر ۱۶-PG ۶۴، قیر امولسیون CRS-1 و قیر اصلاح شده حاوی پودر لاستیک و زئولیت به مقدار ۰/۳، ۰/۶، ۰/۹، ۱/۲ و ۱/۵ کیلوگرم بر مترمربع بر روی سطح مشترک دولایه استفاده شد. در نهایت برخی از نتایج این پژوهش در ادامه ارائه شده است:

- با توجه به مقاومت فشاری حداقلی که در -ACI 325.10R 99 برای روسازی‌های بتنی ذکر شده، در این مطالعه مقاومت فشاری نمونه‌ها بیشتر از معیار طراحی روسازی بتنی است. بنابراین نتایج آزمایش‌های خصوصیات مکانیکی نشان می‌دهد که جایگزینی ۵۰ درصد سرباره فولاد با سنگدانه طبیعی موجب می‌شود مقاومت فشاری، کششی و خمشی به ترتیب ۵۶، ۲۶ و ۱۶ درصد افزایش یابد. زیرا سرباره‌ها دارای وجوه کاملاً شکسته می‌باشند و موجب شکل‌گیری و قفل و بست مناسب میان سرباره‌ها و خمیر سیمان می‌شوند.

- مطابق استاندارد EN1338، مقاومت سایشی بتن حاوی ۵۰ درصد سرباره نسبت به بتن شاهد ۲۵ درصد افزایش یافت و همچنین در رده مطلوب از نظر سایش قرار گرفت. در بین نمونه‌های ساخته شده آزمایشگاهی، بیشترین مقدار BPN مربوط به نمونه بتنی حاوی ۱۰۰ درصد سرباره فولاد بوده که تفاوت آنچنانی با نمونه ۵۰ درصد سرباره نداشته است.

- به جهت افزایش مقاومت چسبندگی بین دو لایه روسازی مرکب و انتخاب سطح زیرین با سطوح زبرتر، نمونه حاوی جایگزینی ۵۰ درصد سرباره به جای سنگدانه به عنوان نمونه مناسب از لحاظ خصوصیات مکانیکی و سایشی و همچنین به لحاظ صرفه اقتصادی از این درصد در روسازی مرکب بتنی اصلاح شده و آسفالتی استفاده می‌شود.

- به طور کلی در هر سه نوع اندود سطحی استفاده شده بین لایه‌های روسازی مرکب، هرچه نرخ استفاده از قیر زیاد شود مقاومت چسبندگی در ابتدا افزایش و سپس با نرخ کمی کاهش پیدا می‌کند. مقدار بهینه نرخ اندودهای سطحی مورد استفاده در



شکل ۱۵. میزان پخش قیر پودر لاستیکی حاوی زئولیت بر روی روسازی بتنی اصلاح شده الف) ۰/۳ (کیلوگرم بر مترمربع) ب) ۱/۵ (کیلوگرم بر مترمربع)

#### ۴. نتیجه گیری

در این پژوهش مقاومت برشی بین لایه‌های روسازی بتنی تقویت شده با سرباره و مخلوط آسفالتی مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. به منظور آنالیز اثر اندودهای سطحی مختلف بر روی خصوصیات چسبندگی بین لایه‌ای، از دستگاه برش مستقیم استفاده شد. بدین منظور ابتدا نمونه‌های بتنی حاوی درصد‌های مختلف سرباره فولاد (۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد) جایگزین سنگدانه در روسازی بتنی شد. سپس آزمایش‌های خصوصیات مکانیکی و همچنین مقاومت سایشی به روش EN 1338 و لغزندگی به روش پاندول انگلیسی بر روی هریک از نمونه‌ها انجام شد تا بهترین درصد سرباره تعیین شود تا زبری روسازی بتنی افزایش یافته و در نهایت چسبندگی بین روسازی بتنی و

- (ACI211,91,11," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1991, 38pp.
- Amelian, S., Manian, M., Abtahi, S.M., Goli, A. (2018) "Moisture sensitivity and mechanical performance assessment of warm mix asphalt containing by-product steel slag", Journal of Cleaner Production, Vol.176, pp.329-337.
  - Asi, I.M., (2007) "Evaluating Skid Resistance of Different Asphalt Concrete Mix" Building and Environment, Vol. 42, pp. 325-329.
  - Asphalt Institute, (2007) "The Asphalt Handbook MS-4", Asphalt Institute, Lexington, KY.
  - California Department of Transportation, Materials Engineering and Testing Services (2003) "Asphalt Rubber Usage Guide", California
  - Estakhri, C., Button, J. and Alvarez, A. E. (2010) "Field and laboratory investigation of warm mix asphalt in texas", Texas Transportation Institute, The Texas A&M University.
  - Fakhri, M. and Ahmadi, A. (2017) "Recycling of RAP and steel slag aggregates into the warm mix asphalt: A performance evaluation", Construction and Building Materials, Vol. 147, pp. 630-638.
  - Gonzalez-Ortega, M. A., Segura, I., Cavalaro, S.H.P., Toralles-Carbonari, B., Aguado, A. and Andrello, A.C. (2014) "Radiological protection and mechanical properties of concretes with EAF steel slags", Construction and Building Materials, Vol. 51, pp. 432-438.
  - Groenniger, J., Falchetto, A. C., Isailovic, I. and Wang, D. and Wistuba, M. P. (2017) "Experimental investigation of asphalt mixture containing Linz-Donawitz steel slag", Journal of Traffic and Transportation Engineering, Vol. 4, Issue 4, pp.372-379.
  - Hou, D., Han, M., Muhammad, Y., Liu, Y., Zhang, F., Yin, Y., Duan, SH. and Li, J. (2018) "Performance evaluation of modified asphalt based trackless tack coat materials",
- این پژوهش متغیر بوده و بین ۰/۶ تا ۰/۹ کیلوگرم بر متر مربع است.
- بررسی های انجام شده نشان می دهد افزودن پودر لاستیک و زئولیت به قیر سبب افزایش قابل ملاحظه مقاومت برشی نسبت به نمونه های دیگر شده است. به طور کلی مقاومت برشی سه اندود سطحی استفاده شده عبارتند از: قیر امولسیون > قیر شاهد > قیر پودر لاستیکی حاوی زئولیت
  - با توجه به نتایج بدست آمده با افزایش نرخ اندود سطحی، مقاومت چسبندگی سطح مشترک در ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت. به طوری که مقدار بهینه اندود سطحی قیر پودر لاستیکی حاوی زئولیت و قیر ۱۶-۶۴ PG، ۰/۹ کیلوگرم بر متر مربع بدست آمده ولی این مقدار در قیر امولسیون CRS-1، ۰/۶۵ کیلوگرم بر متر مربع شده است. هنگامی که قیر اصلاح شده با پودر لاستیک و زئولیت بیش از ۱/۲ کیلوگرم بر متر مربع بر روی بتن پخش شود شیب نمودار مقاومت برشی شدیدتر شده و مقاومت برشی نمونه مرکب کمتر از تمام نمونه ها می شود.
- ۵. پی نوشت ها**
1. Electric Arc Furnace Slag
  2. Cationic Rapid Setting
  3. Performance Grade
  4. British Pendulum Number
- ۶. مراجع**
- بیگلری، معین، اصغرزاده، سید محمد و کاووسی، امیر، (۱۳۹۶) "بررسی عوامل موثر بر چسبندگی بین لایه روسازی بتن غلتکی و میان لایه ماسه آسفالت جاذب تنش"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۹، شماره ۳۵، ص. ۸۹-۱۰۴.
  - کاووسی، امیر، تقوی زواره، حسن و آذرنیا، مهدی (۱۳۹۵) "ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی حاوی گوگرد پلیمری با بکارگیری قیر لاستیکی"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۷، شماره ۳، ص. ۵۵۷-۵۶۷.
  - ACI Committee 211 "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete

- throughout Europe on deterioration in fully-flexible and semi-rigid long-life pavements", *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 7, No. 2, pp. 101-109.
- Metwally, Kh. A., Faried, A. S. and Tawfik, T. A., (2017) "Significance of blast furnace slag as coarse aggregate in concrete", *Life Science Journal*, Vol. 14, No. 9, pp. 1-6.
  - Mohammad, L. N., M. A. Elseifi, A. Bae, N. Patel, J. Button, and Scherocman, J. A. (2012) "Optimization of Tack Coat for HMA Placement", Publication NCHRP Report 712, 142 pages., Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.
  - Muench, S. and Moomaw, T. (2008) "De-bonding of hot mix asphalt pavements in Washington State: an initial investigation", Technical Report TNW 2008-2010, Transportation Northwest (TransNow), University of Washington and Washington State Transportation Commission
  - Santagata, F. A., Partl, M. N., Ferrotti, G., Canestrari, F. and Flisch, A. (2008) "Layer characteristics affecting interlayer shear resistance in flexible pavements", *Journal of the AAPT*, Vol. 77, pp. 221-254.
  - Saxena, S. and Tembhurkar, A. R. (2018) "Impact of use of steel slag as coarse aggregate and wastewater on fresh and hardened properties of concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 165, pp. 126-137.
  - Sengoz, B., Topal, A. and Gorkem, C. (2013) "Evaluation of natural zeolite as warm mix asphalt additive and its comparison with other warm mix additives", *Construction and Building Materials*, 43, pp. 242-252.
  - Shafabakhsh, G. H. and Jafari Ani, O. (2015) "Experimental investigation of effect of Nano  $TiO_2/SiO_2$  modified bitumen on the rutting and fatigue performance of asphalt mixtures containing steel slag aggregates", *Construction and Building Materials*, Vol. 98, pp. 692-702.
  - Sheng L., Huang, Y. and Zhao-hui, L. (2016) "Experimental evaluation of asphalt material for interlayer in rigid-flexible composite Construction and Building Materials, Vol. 165, pp. 385-394.
  - Huang, Y., Bird, R. and Heidrich, N., (2007) "A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements" *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 52, pp. 58-73.
  - Huang Weidong, Lv Quan, Tian Jianjun, (2015) "Effects of Tack Coat Type and Surface Characteristics on Interface Bond Strength," international symposium on Frontiers in Road and Airport Engineering.
  - Hu, X., Lei, Y., Wang, H., Jiang, P., Yang, X., You ZH., (2017) "Effect of tack coat dosage and temperature on the interface shear properties of asphalt layers bonded with emulsified asphalt binders", *Construction and Building Materials*, Vol. 141, pp 86-93.
  - Jiang, Y., Darter, M.I., and Owusu-Antwi, E. (1996) "Analysis of current state rigid pavement design practices in the united states", *Transportation Research Record* 1525, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp. 72-82.
  - Kavussi, A., Jalili Qazizadeh, M. (2014) "Fatigue characterization of asphalt mixes containing electric arc furnace (EAF) steel slag subjected to long term aging", *Construction and Building Materials*, Vol. 72, pp. 158-166.
  - Kruntcheva, M., Collop, A.C. and Thom, N., (2005) "Effect of bond condition on flexible pavement performance", *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 131, No.11, pp. 880-888.
  - Leng, Z., Al-Qadi, I. L., Carpenter, S. and Ozer, H. (2009) "Interface bonding between hot-mix asphalt and various portland cement concrete surfaces- assessment of accelerated pavement testing and measurement of interface strain", In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, TRB, Vo90l. 2127, No. 1, pp. 20-28.
  - Merrill, D., Van Dommelen, A. and Gáspár, L. (2006) "A review of practical experience

- pavements - An incremental approach", Mechanistic Design of Semi-Rigid Pavements, No. 138., 118 pages, ISSN: 0909-1386.
- Tozzo, C., Fiore, N. and D'andrea, A. (2014) "Dynamic shear tests for the evaluation of the effect of the normal load on the interface fatigue resistance", Construction and Building Materials, Vol. 61, pp. 200-205.
  - Xue, Y., Wu, S., Hou, H. and Zha, J. (2006) "Experimental investigation of basic oxygen furnace slag used as aggregate in asphalt mixture", Journal of Hazardous Materials, Vol 138, No. 2, pp. 261-268.
  - Sheng, Li., Zhao-hui, Liu. and Yu-zhi, Li. (2012) "Influence of structure layer thickness of CRC+AC composite pavement on temperature effect and rutting deformation", China J. Highway Transp. Vol. 25, No. 1, pp. 21-28.
  - Teng, Susanto, Tze Yang, Darren Lim, and Bahador, Sabet Divsholi, (2013) "Durability and mechanical properties of high strength concrete incorporating ultra fine ground granulated blast-furnace slag", Construction and Building Materials", Vol. 40, No. 1, pp. 875-881.
  - Thoegersen, F., Busch, C. and Henrichsen, A. (2004) "Mechanistic design of semi-rigid pavement", Construction and Building Materials, Vol. 102, pp. 699-705.

غلامعلی شفابخش، درجه کارشناسی در رشته عمران-عمران را در سال ۱۳۶۶ از دانشگاه شهید باهنر کرمان و درجه کارشناسی ارشد در رشته عمران-راه و ترابری را در سال ۱۳۷۰ از دانشگاه علم و صنعت ایران و همچنین دومین کارشناسی ارشد خود را در رشته عمران-ژئوتکنیک را در سال ۱۳۷۲ از دانشگاه INSA فرانسه اخذ نمود. در سال ۱۳۷۸ موفق به کسب درجه دکتری در رشته عمران-راه و ترابری از دانشگاه INSA فرانسه گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان راه و ترابری، مدیریت و نگهداری روسازی راه، زیرسازی و روسازی راه و راه آهن و طراحی روسازی‌ها بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استاد، در دانشگاه سمنان است.



سعید احمدی، درجه کارشناسی در رشته عمران-عمران را در سال ۱۳۹۰ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد و درجه کارشناسی ارشد در رشته عمران-راه و ترابری در سال ۱۳۹۲ را از دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل اخذ نمود. در سال ۱۳۹۸ موفق به کسب درجه دکتری در رشته عمران-راه و ترابری از دانشگاه سمنان گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان تکنولوژی قیر و آسفالت و طراحی روسازی‌ها بوده است.

