

# بررسی عوامل موثر بر چسبندگی بین لایه روسازی بتن غلتکی و میان لایه ماسه

## آسفالت جاذب تنش

معین بیگلری، کارشناسی ارشد، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

سید محمد اصغرزاده (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

امیر کاوسی، دانشیار، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

E-mail: sm.asgharzadeh@modares.ac.ir

پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۱۱

دریافت: ۱۳۹۶/۰۵/۱۷

### چکیده

یکی از راهکارهای کاهش ترک‌ها در روکش های آسفالتی استفاده از میان لایه های جاذب تنش است که مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. اما در اجرای میان لایه های جاذب تنش نیز باید مواردی از جمله چسبندگی درست بین میان لایه و لایه روسازی قدیمی رعایت گردد تا خرابی های دیگری مانند ترک های هلالی در روکش ایجاد نگردد و عمر روسازی جدید افزایش یابد. در این مقاله چسبندگی بین میان لایه جاذب تنش ماسه آسفالت و لایه بتن غلتکی مورد بررسی قرار گرفت. به همین دلیل عواملی مانند نوع اندود سطحی، مقدار اندود سطحی مورد استفاده و دمای لایه زیرین که در اجرای میان لایه اهمیت دارند در این پژوهش مورد ارزیابی قرار گرفت. چهار نوع قیر متفاوت شامل قیر ۶۰/۷۰، قیر ۶۰/۷۰ اصلاح شده با پودر لاستیک، قیر امولسیون CSS و قیر امولسیون CRS به منظور تعیین قیر مناسب برای اندود سطحی انتخاب گردید و هر کدام به میزان ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ گرم بر مترمربع بر روی سطح بتن غلتکی اجرا گردید. همچنین برای تعیین دمای مناسب پخش اندود سطحی، دمای لایه بتن غلتکی ۰ و ۲۵ و ۶۰ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شد. آزمایش مقاومت چسبندگی بین لایه های با استفاده از دستگاه ال پی دی اس و بر روی نمونه های استوانه ای انجام گرفت. بر این اساس مشخص گردید که عواملی چون ویسکوزیته اندود سطحی و مدت زمان شکست قیر امولسیون تأثیر زیادی بر روی میزان چسبندگی بین لایه ای دارند. نتایج این آزمایش نشان داد که استفاده از قیر ۶۰/۷۰ و قیر ۶۰/۷۰ اصلاح شده با پودر لاستیک در دماهای بالاتر چسبندگی مناسب تری ایجاد می کند در حالی که افزایش دمای روسازی برای قیرهای امولسیون لزوماً نتایج مطلوبی را در پی نخواهد داشت. همچنین در دماهای بسیار پایین سطح روسازی، استفاده از قیرهای امولسیون با مقدار کمتر توصیه می گردد؛ در شرایطی که در این دما استفاده از قیرهای خالص و اصلاح شده با مقدار بالاتر موجب افزایش چسبندگی می شود.

واژه های کلیدی: چسبندگی بین لایه ای، میان لایه ماسه آسفالت جاذب تنش، دستگاه ال پی دی اس، اندود سطحی

## ۱. مقدمه

- عدم تراکم کافی لایه اساس، زیر اساس و لایه بستر
- جداشدگی در لایه اساس به دلیل بزرگ بودن ابعاد سنگدانه‌ها (اندازه‌ی اسمی ۴۰ میلی متر و بزرگتر از آن)
- جنس قیر مورد استفاده در لایه آسفالتی
- شرایط آب و هوایی در زمان اجرای لایه آسفالتی
- آلودگی سطح لایه‌های زیرین
- جریان آب بین لایه‌ای و همچنین نفوذ رواناب‌های سطحی از طریق ترک‌های ایجاد شده در سطح روسازی استفاده کم و یا بیش از اندازه از اندود سطحی و یا استفاده از اندود سطحی نامناسب

روش رایجی که به منظور ایجاد چسبندگی در بین لایه‌های روسازی به کار می‌رود استفاده از یک لایه اندود سطحی یا اندود نفوذی بین لایه‌های روسازی می باشد [Cho, 2016]. طبق تعریف نشریه ۲۳۴ ایران پخش یک لایه قیر با کندروانی کم و یا متوسط روی سطح شنی راه، اندود نفوذی و روی سطح آسفالتی یا بتنی راه، اندود سطحی نامیده می‌شود. تحقیقات نشان داده‌اند استفاده از اندود سطحی باعث افزایش میزان چسبندگی بین لایه‌های روسازی می‌شود [West, Zhang and Moore, 2005]. بر اساس تعریف انستیتو آسفالت در سال ۲۰۰۷، اندود سطحی به منظور ایجاد چسبندگی بین لایه موجود و لایه جدید به کار می‌رود تا از بروز خرابی‌های زودرس مانند ترک‌های ناشی از جداشدگی<sup>۱</sup> جلوگیری کند [Asphalt Institute, 2007].

محققان مختلف با استفاده از تحقیقات آزمایشگاهی و میدانی و همچنین به وسیله روش‌های عددی خصوصیات چسبندگی بین دو لایه را مورد بررسی قرار داده‌اند. بیشتر این تحقیقات بر اهمیت و لزوم اتصال کامل بین لایه‌های روسازی تاکید کرده‌اند. کینگ و همکارانش در سال ۲۰۰۴ با استفاده از نرم افزار بیزار، تاثیر چسبندگی بر روی لایه‌های روسازی را مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور ایشان یک سیستم روسازی دو لایه را مدل نمودند و نشان دادند که با کاهش میزان چسبندگی از چسبندگی کامل به چسبندگی ۹۰ درصد، مقدار کرنش‌ها و تنش‌ها افزایش یافته و در نتیجه عمر خستگی روسازی تا ۵۰ درصد کاهش یافت [King and May, 2003]. راف و همکارانش

با توجه به مشخصات فنی و اقتصادی روسازی‌های آسفالتی، وجود لایه‌های متعدد در این روسازی‌ها اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. از سوی دیگر بروز خرابی‌های متعدد که در طول عمر روسازی ایجاد می‌گردد ادارات راهداری و شهرداری‌ها را وادار به اجرای لایه روکش بر روی روسازی‌های فرسوده می‌کند. اما اجرای روکش نیز به طور کامل نمی‌تواند ترک‌های سطح روسازی را از بین ببرد و این ترک‌ها به سرعت در سطح روکش بیدار می‌گردند. یکی از راهکارهای کاهش ترک‌ها در روکش‌های آسفالتی استفاده از میان لایه‌های جاذب تنش است که مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. پیدایش و گسترش میان لایه‌های جاذب تنش در سال‌های اخیر، باعث افزایش تعداد سطوح چسبندگی در روسازی گردیده است. لایه‌های متفاوت دارای خصوصیات و عملکردهای ویژه‌ای هستند و زمانی می‌توانند عملکرد مناسب و دلخواهی داشته باشند که تمام روسازی به صورت یک لایه بتواند ایفای نقش نماید [Diakhaté et al. 2011]. این مساله تنها زمانی میسر می‌گردد که اتصال بین لایه‌ها به طور کامل صورت گیرد و این لایه‌ها تحت تنش‌های موجود در روسازی از یکدیگر جدا نشوند. چسبندگی ضعیف بین لایه‌های روسازی می‌تواند باعث ایجاد مشکلات بسیاری برای روسازی گردد. معمولاً لغزندگی<sup>۱</sup> یکی از خرابی‌هایی است که بر اثر چسبندگی ضعیف بین لایه‌ها ایجاد می‌گردد و معمولاً در مکان‌هایی ایجاد می‌گردد که ترافیک عبوری افزایش سرعت و یا کاهش سرعت دارد. این مشکل همچنین در محل‌هایی که دور زدن خودروها بیشتر اتفاق می‌افتد به وضوح دیده می‌شود [West, Zhang and Moore, 2005]. همچنین بسیاری از خرابی‌های دیگر می‌تواند با چسبندگی ضعیف بین لایه‌ها مرتبط باشند که خستگی زودرس، ترک خوردگی بالا به پایین و تکه تکه شدن سطح روسازی از جمله این خرابی‌ها می‌باشد. عوامل موثر در جداشدگی هنوز به طور کامل شناسایی نشده است اما می‌توان گفت عوامل زیر جزو عوامل تاثیرگذار در ایجاد این پدیده هستند [Cho, 2016].

- جنس مصالح لایه اساس

در سال ۲۰۰۲ تحقیقات مشابهی را انجام دادند و مقادیر مختلف چسبندگی را از چسبندگی کامل تا مورد بدون چسبندگی مدل کرده و نشان دادند که در صورت عدم وجود چسبندگی بین لایه‌های روسازی عمر خدمت‌دهی روسازی از ۲۰ سال به ۷ سال کاهش می‌یابد [Roffe and Chaignon, 2002]. هاجیا و همکارانش (۱۹۹۷) برای بررسی خرابی‌های بوجود آمده در سطح روسازی فرودگاه‌ها در ژاپن، تحقیقاتی را بر روی تاثیر اندود سطحی و تمیزی سطح لایه آسفالتی انجام دادند. مشاهدات ایشان در خصوص بروز خرابی‌ها در روسازی فرودگاه‌ها نشان داد که اکثر خرابی‌ها معمولاً در محل‌هایی اتفاق می‌افتد که هواپیما در آن محل‌ها ترمز می‌گیرد و یا با سرعت زیاد دور می‌زند. آنها تنش‌های موجود در زیر چرخ هواپیمای بویینگ ۷۴۷ را مدل کردند و نشان دادند که لایه رویه زمانی دچار مشکلات جدی می‌گردد که چسبندگی آن با لایه زیرین تحت بارهای وارده از بین رفته باشد. ایشان برای مقابله با این مشکل دو راهکار افزایش ضخامت لایه رویه و افزایش چسبندگی بین لایه‌های روسازی را نیز پیشنهاد دادند [Hachiya, Sato and Umeno, 1997]. در تحقیقات دیگری که توسط مولنار و همکارانش (۱۹۸۶) انجام شد چسبندگی بین لایه‌های مختلف آسفالتی مورد آزمایش قرار گرفت. مولنار چسبندگی این لایه‌ها را در شرایط وجود میان لایه نیز مورد ارزیابی قرار داد. نمونه‌هایی که وی برای انجام آزمایش چسبندگی مورد استفاده قرار داد، به شکل استوانه‌ای بودند و از دستگاه اندازه‌گیری مقاومت مارشال برای اعمال بار استفاده شد. قطر نمونه‌های مورد آزمایش ۱۰۰ میلی‌متر و دما و سرعت اعمال بار ۱۵ درجه سانتی‌گراد و ۰/۸۵ میلی‌متر بر ثانیه بودند. بر اساس یافته‌های مولنار مقاومت چسبندگی برای نمونه‌های حاوی اندود سطحی و فاقد آن تقریباً یکسان بود [Molenaar, Heerkens and Verhoeven, 1986]

در سال ۲۰۰۲ تحقیقات مشابهی را انجام دادند و مقادیر مختلف چسبندگی را از چسبندگی کامل تا مورد بدون چسبندگی مدل کرده و نشان دادند که در صورت عدم وجود چسبندگی بین لایه‌های روسازی عمر خدمت‌دهی روسازی از ۲۰ سال به ۷ سال کاهش می‌یابد [Roffe and Chaignon, 2002]. هاجیا و همکارانش (۱۹۹۷) برای بررسی خرابی‌های بوجود آمده در سطح روسازی فرودگاه‌ها در ژاپن، تحقیقاتی را بر روی تاثیر اندود سطحی و تمیزی سطح لایه آسفالتی انجام دادند. مشاهدات ایشان در خصوص بروز خرابی‌ها در روسازی فرودگاه‌ها نشان داد که اکثر خرابی‌ها معمولاً در محل‌هایی اتفاق می‌افتد که هواپیما در آن محل‌ها ترمز می‌گیرد و یا با سرعت زیاد دور می‌زند. آنها تنش‌های موجود در زیر چرخ هواپیمای بویینگ ۷۴۷ را مدل کردند و نشان دادند که لایه رویه زمانی دچار مشکلات جدی می‌گردد که چسبندگی آن با لایه زیرین تحت بارهای وارده از بین رفته باشد. ایشان برای مقابله با این مشکل دو راهکار افزایش ضخامت لایه رویه و افزایش چسبندگی بین لایه‌های روسازی را نیز پیشنهاد دادند [Hachiya, Sato and Umeno, 1997]. در تحقیقات دیگری که توسط مولنار و همکارانش (۱۹۸۶) انجام شد چسبندگی بین لایه‌های مختلف آسفالتی مورد آزمایش قرار گرفت. مولنار چسبندگی این لایه‌ها را در شرایط وجود میان لایه نیز مورد ارزیابی قرار داد. نمونه‌هایی که وی برای انجام آزمایش چسبندگی مورد استفاده قرار داد، به شکل استوانه‌ای بودند و از دستگاه اندازه‌گیری مقاومت مارشال برای اعمال بار استفاده شد. قطر نمونه‌های مورد آزمایش ۱۰۰ میلی‌متر و دما و سرعت اعمال بار ۱۵ درجه سانتی‌گراد و ۰/۸۵ میلی‌متر بر ثانیه بودند. بر اساس یافته‌های مولنار مقاومت چسبندگی برای نمونه‌های حاوی اندود سطحی و فاقد آن تقریباً یکسان بود [Molenaar, Heerkens and Verhoeven, 1986]

## ۲-۱ عوامل تاثیرگذار بر چسبندگی بین لایه‌ای

### ۱-۲-۱ نوع اندود سطحی مورد استفاده

در حال حاضر قیرهای امولسیون‌ی بیشترین نوع اندود سطحی بکار رفته در روسازی‌ها هستند [Roffe and Chaignon, 2002]. قیرهای امولسیون‌ی مورد استفاده به عنوان اندود سطحی شامل قیرهای کند شکن، دیر شکن و تند شکن و قیر امولسیون‌ی با سرعت شکست بسیار بالا<sup>۳</sup>، قیر امولسیون‌ی اصلاح شده با پلیمر و قیر امولسیون‌ی اصلاح شده با پودر لاستیک هستند [Hachiya et al. 1997, West et al. 2005]. همچنین از قیرهای خالص که در ساخت مخلوط آسفالتی از آنها استفاده می‌شود نیز می‌توان به عنوان اندود سطحی استفاده نمود. استفاده از قیرهای محلول به عنوان اندود سطحی تا دهه قبل مرسوم بوده اما طی ۳۰ سال گذشته و با توجه به اثرات مخرب مواد فرار گسیل شده از این قیرها بر روی محیط زیست، استفاده از این نوع قیرها منسوخ گردیده است [West, Zhang and Moore, 2005]. بر اساس تحقیقات پاول و همکارانش در سال ۱۹۹۸ رایج‌ترین قیر امولسیون‌ی مورد استفاده به عنوان اندود سطحی قیر SS-1h و SS-1h ، CSS-1h و CSS-1h است و تنها در یک ایالت (جورجیا) در آمریکا از قیر خالص (AC-20 و AC-30) استفاده می‌شود [Paul and Scherocman, 1998]. تنوع قیرهای تولید شده مختلف و عملکرد متفاوت آنها به عنوان اندود سطحی یکی از دغدغه‌های اصلی محققین در سال‌های اخیر بوده است، به نحوی که محققین مختلف با بررسی انواع قیرهای مختلف سعی در انتخاب بهترین و مناسب‌ترین نوع اندود سطحی را دارند تا بوسیله آن بتوان اتصال کامل بین لایه‌های گوناگون روسازی را تضمین نمود. محمد و همکارانش در سال ۲۰۰۵ از نمونه‌هایی با قطر ۱۵

عوامل موثر بر روی مقاومت چسبندگی نیز در تحقیقات مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. به‌طورکلی می‌توان گفت این عوامل شامل مقدار اندود سطحی، نوع اندود سطحی، نوع مخلوط آسفالتی، خصوصیات سطحی و نیرویی که هنگام تراکم وارد می‌شود، است [Raposeiras et al. 2013]. این درحالی است که میزان وابستگی مقاومت چسبندگی بین لایه‌ای به دمای

### ۱-۲-۲ مقدار اندود سطحی

استفاده از مقدار مناسب اندود سطحی باعث افزایش چسبندگی بین لایه‌ای و همچنین کاهش قیمت تمام شده روسازی می‌گردد. استفاده از مقدار کم اندود سطحی می‌تواند باعث کاهش مقاومت چسبندگی بین دو لایه گردد. همچنین استفاده بیش از اندازه از اندود سطحی باعث ایجاد لغزندگی و سرخوردن لایه‌های آسفالتی بر روی یکدیگر می‌گردد [Raposeiras et al. 2013]. بنابراین اندود سطحی مورد استفاده باید دارای مقداری بهینه باشد تا مقاومت چسبندگی بین لایه‌ای به خوبی تامین گردد. محققان مختلفی با انجام آزمایش‌های گوناگون مقدار اندود سطحی بهینه را تعیین کرده‌اند که خلاصه‌ای از این تحقیقات در جدول ۱ نشان داده شده است. مقادیر فوق بر اساس مقدار باقیمانده قیر در امولسیون محاسبه شده است. همچنین مشاهده می‌شود که مقدار قیر خالص بهینه بیشتر از قیرهای امولسیونی بوده است. برخی از محققین با بررسی مقاومت چسبندگی بین لایه‌های مختلف عنوان کرده‌اند که مقدار اندود سطحی بهینه تابع وضعیت روسازی موجود می‌باشد. به طوری که برای لایه‌های روسازی بتنی و یا زمانی که لایه‌ی موجود، فرسوده و قدیمی باشد باید از مقادیر بیشتری برای اندود سطحی استفاده نمود [Mohammad, Raqib and Huang., 2002]. بر اساس آیین‌نامه اسپانیا زمانی که لایه موجود از نوع آسفالت متخلخل باشد مقدار اندود سطحی را باید به بیش از ۰/۲۵ لیتر بر مترمربع افزایش داد [NLT-328/08, 2008].

### ۱-۲-۳ زمان عمل آوری قیر امولسیونی

تاکنون محققان به اتفاق نظری پیرامون زمان مناسب برای پخش کردن لایه‌ی دوم دست نیافته‌اند. بر اساس تحقیقات چایگون و همکارانش در سال ۲۰۰۱ مدت زمان عمل‌آوری قیر امولسیون ارتباط مستقیم با میزان تاثیرگذاری آن دارد. این زمان همچنین می‌تواند بین چند دقیقه برای قیرهای امولسیونی شکسته شده تا چندین ساعت برای قیرهای امولسیونی خشک شده متفاوت باشد [Roffe and Chaignon, 2002]. برای مثال این زمان برای ایالت آلاسکا معادل ۲ ساعت (قیر امولسیونی CSS-1) برای ایالت آرکانزاس ۷۲ ساعت (برای قیر امولسیونی SS-1) و برای ایالت تگزاس ۴۵ دقیقه (قیر امولسیونی SS-1 و MS-2) است [Cho, 2016].

سانتی‌متر استفاده کردند تا بتوانند بهترین نوع اندود سطحی را تعیین کنند. به این منظور ۱۵۶ نمونه ساخته شد و در دستگاه بارگذاری تحت نیروی برشی قرار گرفتند. آنها با بررسی اندودهای سطحی SS-1, SS-1h, PG64-22, PG76-22, CSS-1h, CRS-2P, اندود سطحی CRS-2P ساخته شدند دارای بیشترین مقدار مقاومت چسبندگی هستند [Mohammad, Raqib and

Huang., 2002]. طیب علی و همکارانش در سال ۲۰۰۴ از یک برنامه‌ی رایانه‌ای به منظور شبیه‌سازی نیروی وارد شده به روسازی در هنگام شتاب‌گیری و یا ترمز گرفتن استفاده کردند. بر این اساس نیروی برشی در محل اندود سطحی محاسبه شد و در بارگذاری مورد استفاده قرار گرفت. سپس اندودهای سطحی مختلف (CMS-2, PG64-22) را مورد آزمایش قرار دادند و نشان دادند که اندود سطحی CMS-2 بهترین عملکرد را از خود نشان می‌دهد [Tayebali et al. 2004]. تحقیقات وست و همکارانش که در اداره حمل و نقل آلاباما انجام شد، نشان داد که در میان اندودهای سطحی CSS-1, PG64-22, CRS-2, اندود سطحی PG64-22 بهترین عملکرد را دارا می‌باشد [West, Zhang and Moore, 2005]. داس و همکارانش در سال ۲۰۱۷ از دستگاه برش مستقیم برای ارزیابی مقاومت چسبندگی بین لایه‌ای استفاده نمودند. آنها نشان دادند که مقاومت چسبندگی بین لایه‌ای تا حدود زیادی به نوع روسازی موجود و بافت سطحی آن بستگی دارد. همچنین آنها نشان دادند در بین اندودهای سطحی Trackless, SS-1 and SS-1H، اندود سطحی Trackless دارای بهترین عملکرد است. این اندود سطحی، یک نوع اندود سطحی تندشکن ساخته شده توسط اداره حمل و نقل ویرجینیا است که برای اولین بار در سال ۲۰۰۵ ساخته و بکار گرفته شد [Das et al. 2017]. هرچند تحقیقات کلمپ و همکارانش که بر روی نمونه‌های دارای اندود سطحی امولسیونی و نمونه بدون اندود سطحی انجام گرفت گویای این مطلب بود که نمونه بدون اندود سطحی دارای مقاومت چسبندگی بیشتری هستند [Collop et al. 2009].

همان‌طور که مشاهده می‌شود، طیف وسیعی از نتایج شامل قیر خالص، قیر امولسیون کند شکن، قیر امولسیون دیر شکن و حتی نمونه بدون اندود سطحی می‌توانند به عنوان گزینه‌های بهینه انتخاب گردند.

پخش اندود سطحی اجرا و متراکم گردد [Raposeiras et al. 2012].

## ۲. مواد و مصالح

سنگ‌دانه‌های مورد استفاده برای ساخت بتن غلتکی و مخلوط آسفالتی از معادن واقع در غرب استان تهران (حاوی ۵۳ درصد سیلیس) تهیه گردید. مشخصات مصالح مورد استفاده در جدول ۲ نشان داده شده است. در این پژوهش لایه بتن غلتکی و لایه ماسه آسفالت به ترتیب به عنوان لایه روسازی قدیمی و میان‌لایه در نظر گرفته شد. برای ساخت لایه بتن غلتکی از سیمان تیپ ۱ کارخانه سیمان ساروج بوشهر استفاده شد. همچنین آب مورد استفاده برای ساخت بتن غلتکی از نوع آب شرب شهر تهران بوده است. ۴ نوع اندود سطحی مختلف برای ارزیابی مقاومت چسبندگی بین لایه‌های بتن غلتکی و آسفالتی به یکدیگر به کار گرفته شد که شامل دو نوع قیر معمولی (قیر ۶۰/۷۰ و قیر ۶۰/۷۰ اصلاح شده با پودر لاستیک) و دو نوع قیر امولسیون (قیر CRS-1 و قیر CSS-1) بود. مشخصات

قیر ۶۰/۷۰ ، قیر CRS-1 و قیر CSS-1 به ترتیب در جداول ۳، ۴ و ۵ نشان داده شده است.

پژوهشگران مختلف مدت زمان شکست قیرهای امولسیونی و زمان پخش لایه‌ی دوم را مورد مطالعه قرار دادند تا مشخص گردد که زمان شکست و حضور آب در امولسیون می‌تواند چه تأثیری بر روی میزان چسبندگی لایه‌های روسازی داشته باشد. دی سارکر و همکارانش نشان دادند که اجرای روکش پس از گذشت ۵ دقیقه از زمان پخش اندود سطحی تفاوت چندانی را در میزان چسبندگی نسبت به اجرای فوری لایه روکش نداشته است. اما مقاومت چسبندگی پس از گذشت ۳۰ الی ۶۰ دقیقه از زمان پخش اندود سطحی به مراتب نتایج بهتری را در بر داشته است [Deysarkar, 2004]. چن و همکارانش (۲۰۱۰) نشان دادند که مقاومت چسبندگی زمانی که اجرای لایه روکش پس از شکست کامل قیر امولسیونی صورت گیرد به طور چشمگیری افزایش می‌یابد [Chen and Huang, 2010]. پاندا و همکارانش (۲۰۱۵) نشان دادند که زمانی زمان عمل‌آوری قیر تند شکن ۱ ساعت در نظر گرفته شود، بیشترین چسبندگی بین لایه‌ای حاصل می‌گردد [Panda, Giri and Sutradhar, 2015]. مطالعات صورت گرفته در این زمینه انجام نشان می‌دهد که به‌منظور استفاده بهینه از مقاومت قیر امولسیونی بهتر است که لایه روکش پس از گذشت ۴۰ الی ۵۰ دقیقه از زمان

جدول ۱. خلاصه‌ای از تحقیقات انجام شده برای تعیین مقدار اندود سطحی

مقدار بهینه (لیتر بر متر مربع)	نوع اندود سطحی	سال انجام پژوهش	مرجع	مرجع پژوهش
۰/۵	قیر ۶۰-۷۰	۱۹۷۸	[Uzan , Livneh and Eshed., 1978]	اوزان
۰/۱۸	قیر امولسیونی کاتیونی اصلاح شده با پودر لاستیک	۱۹۹۷	[Hachiy, Sato and Umeno., 1997]	هاشیا
۰/۰۹	قیر امولسیونی CRS-2P	۲۰۰۲	[Mohammad, Raqib and Huang., 2002]	محمد
۰/۱۲	قیر امولسیونی CRS	۲۰۱۰	[Chen and Huang, 2010]	چنگ
۰/۱۸-۰/۳۶	قیر امولسیونی	۲۰۱۲	[NCDOT, Raleigh, NC, 2012]	آیین نامه کارولینای شمالی
۰/۱۸	قیر امولسیونی SS-1vh	۲۰۱۲	[Hasiba, 2012]	هاسیبا
۰/۲	قیر امولسیونی	۲۰۱۳	[NLT-328/08, 2008]	آیین نامه اسپانیا
۰/۲ (وزن کلی)	امولسیونی CRS	۲۰۱۶	[Nguyen et al., 2016]	نگوین

جدول ۲. نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی مصالح سنگی

نتیجه	محدوده مجاز آیین‌نامه		استاندارد آزمایش	آزمایش
	حداقل	حداکثر		
۹۱	-	-	ASTM D 5821	میزان شکستگی (درصد)
۱/۴	۸	-	ASTM C 88	افت وزنی ناشی از سولفات سدیم (درصد)
۱۳	۲۵	-	ASTM C 131	سایش لس آنجلس (درصد)
۱۵	۱۵	-	ASTM D 4791	مقدار سنگ‌دانه‌های سوزنی و پولکی (درصد)

جدول ۳. مشخصات قیر ۶۰/۷۰

نتیجه	حدود مشخصات		روش آزمایش	نوع آزمایش
	حداقل	حداکثر		
۶۳/۵	۷۰	۶۰	ASTM D5	درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی‌گراد (۱۰۰ گرم-۵ ثانیه)
۴۹/۳	۵۹	۴۹	ASTM D36	نقطه نرمی (گلوله-حلقه) برحسب سانتی‌گراد
۱۰۷	-	۱۰۰	ASTM D113	مقدار کشش در ۲۵ درجه سانتی‌گراد برحسب سانتی‌متر
۱/۰۱۴	۱/۰۱۷	۱/۰۱۳	ASTM D3289	وزن مخصوص قیر (گرم بر سانتی مترمربع)

جدول ۴. مشخصات قیر امولسیون‌ی CRS

نتیجه	حدود مشخصات		روش استاندارد	آزمایش
	حداقل	حداکثر		
قیر امولسیون‌ی اولیه				
۱۰۰	۲۰	۴۰	ASTM D244	کندروانی سیبولت - فیورول در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد (ثانیه)
	مثبت	مثبت	ASTM D244	تعیین بار ذره‌ای
۰/۱	ندارد	۰	ASTM D6933	دانه‌بندی الک (٪)
۱	ندارد	۰/۴	ASTM D6930	پایداری در برابر ته‌نشینی در ۲۴ ساعت (٪)
۳	ندارد	۲/۵	ASTM D6934	مقدار روغن تقطیر شده‌ی امولسیون (٪)
ندارد	۶۰	۶۳	ASTM D6997	تعیین مقدار قیر باقی‌مانده از تقطیر (٪)
قیر پسماند فرآیند تقطیر				
۲۵۰	۱۰۰	۱۰۵	ASTM D5	نفوذ در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و با وزن ۱۰۰ گرم و مدت ۵ ثانیه (۰/۱ میلی‌متر)

جدول ۵. مشخصات قیر امولسیون‌ی CSS

نتیجه	حدود مشخصات		روش استاندارد	آزمایش
	حداقل	حداکثر		
قیر امولسیون‌ی اولیه				
۱۰۰	۲۰	۲۲	ASTM D244	کندروانی سیبولت - فیورول در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد (ثانیه)
	مثبت	مثبت	ASTM D244	تعیین بار ذره‌ای
۰/۱	ندارد	۰	ASTM D6933	دانه‌بندی الک (٪)
۲	ندارد	۰/۲	ASTM D6935	اختلاط باسیمان
۱	ندارد	۰	ASTM D6930	پایداری در برابر ته‌نشینی در ۲۴ ساعت (٪)
ندارد	۵۷	۶۳	ASTM D6997	تعیین مقدار قیر باقی‌مانده از تقطیر (٪)
قیر پسماند فرآیند تقطیر				
۲۵۰	۱۰۰	۱۱۵	ASTM D5	نفوذ در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و با وزن ۱۰۰ گرم و مدت ۵ ثانیه (۰/۱ میلی‌متر)

جدول ۶. دانه بندی مورد استفاده برای ساخت لایه بتن غلتکی

اندازه سنگدانه (mm)	حد بالا	حد پایین	دانه بندی
۰/۰۷۵	۸	۲	۵
۰/۱۵	۱۸	۶	۱۶
۰/۳	۲۷	۱۱	۲۴
۰/۶	۳۶	۱۸	۳۱
۱/۱۸	۴۶	۲۸	۳۶
۲/۳۶	۵۶	۳۸	۴۹
۴/۷۵	۶۹	۵۱	۶۵
۹/۵	۸۵	۶۶	۸۰
۱۲/۵	۹۳	۷۲	۹۰
۱۹	۱۰۰	۸۲	۱۰۰
۲۵	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰

در این پژوهش برای ساخت مخلوط ماسه آسفالت از دانه بندی شماره ۶ جدول ۱-۹ نشریه ۲۳۴ سازمان مدیریت و برنامه ریزی استفاده گردید. در جدول ۷ دانه بندی و محدوده مربوط به دانه بندی شماره ۶ نشریه ۲۳۴ سازمان مدیریت و برنامه ریزی نشان داده شده است.

جدول ۷. دانه بندی مورد استفاده برای ساخت لایه ماسه آسفالت

اندازه سنگدانه (mm)	حد بالا	حد پایین	دانه بندی
۹/۵	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۴/۷۵	۱۰۰	۸۰	۹۰
۲/۳۶	۱۰۰	۶۵	۸۲/۵
۱/۱۸	۸۰	۴۰	۶۰
۰/۶	۶۵	۲۵	۴۵
۰/۳	۴۰	۷	۲۳/۵
۰/۱۵	۲۰	۳	۱۱/۵
۰/۰۷۵	۱۰	۲	۵/۵

درصد قیر بهینه مخلوط های ماسه آسفالت به روش مارشال برابر ۸/۵٪ تعیین گردید. برای تعیین مقاومت برشی بین لایه زیرین (لایه بتن غلتکی) و لایه ی آسفالتی، نمونه های استوانه ای با قطر

پودر لاستیک مورد استفاده در این تحقیق از کارخانه ی کویر تاپر تهیه گردید. با توجه به در دسترس نبودن دانه بندی های مختلف پودر لاستیک در کشور، سعی گردید تا معیار اصلی این دانه بندی ها (رد شده از الک شماره ۴۰) رعایت گردد. مخلوط آسفالتی اصلاح شده با پودر لاستیک می تواند به دو روش اختلاط تر و اختلاط خشک تهیه شود. در این تحقیق به دلیل دستیابی به اختلاط بهتر و همگن قیر و پودر لاستیک از روش اختلاط تر استفاده شد. در این روش قیر و پودر لاستیک باید در دمای مناسب و تحت نیروی برشی با یکدیگر مخلوط گردند تا در زمان مناسب با یکدیگر واکنش دهند. بر اساس مطالعات پیشین صورت گرفته توسط مولفین [Biglari, 2015]، قیر حاوی ۱۵ درصد پودر لاستیک به عنوان قیر لاستیکی مورد استفاده در این تحقیق در نظر گرفته شد. قیر و پودر لاستیک به مدت ۴۵ دقیقه در دمای اختلاط ۱۸۰ درجه ی سانتی گراد و با سرعت ۴۰۰۰ rpm با استفاده از دستگاه مخلوط کن برش بالا با یکدیگر مخلوط شدند [Asgharzadeh et al, 2013, Kavussi, Taghavi and Azarnia et al, 2016].



شکل ۱. پودر لاستیک استفاده شده برای اصلاح قیر ۶۰/۷۰

### ۳. ساخت نمونه های آزمایشگاهی و انجام آزمایش

طرح اختلاط بتن غلتکی مورد استفاده بر اساس نشریه ۳۵۴ سازمان مدیریت و برنامه ریزی انتخاب گردید. مقدار سیمان مورد استفاده ۳۵۰ کیلوگرم در متر مکعب و نسبت آب به سیمان ۰/۴۲ تعیین شد. دانه بندی مصالح مورد استفاده در جدول ۶ نشان داده شده است.

و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر ساخته شد. آماده‌سازی نمونه‌ها به این صورت بود که ابتدا نمونه‌های بتن غلتکی با استفاده از قالبی به ارتفاع ۵ سانتی‌متر ساخته شد و سپس با توجه به استاندارد ASTM C192 به مدت ۲۸ روز در آب عمل‌آوری گردید. سپس نمونه‌ها پس از خروج از آب، در دمای محیط به مدت ۷۲ ساعت قرار گرفتند تا کاملاً خشک گردند. در مرحله بعد اندود سطحی موردنظر با توجه به نوع قیر (خالص یا امولسیون) با مقادیر مختلف بر روی نمونه‌های بتنی اعمال گردید. برای قیرهای خالص مقدار اندود مورد نظر بر اساس وزن کل قیر و برای قیرهای امولسیونی کاتیونیک بر اساس مقدار قیر باقی مانده محاسبه گردید. برای آغشته کردن سطح نمونه‌های بتنی به اندود سطحی از قلم‌موی رنگ زنی استفاده گردید. نمونه آغشته شده به اندود سطحی در شکل ۲ نشان داده شده است. در ادامه نمونه‌های بتنی در داخل قالب قرار گرفتند و با توجه به توصیه محققین، به نمونه‌های آغشته شده به اندود سطحی امولسیونی ۴۵ دقیقه زمان داده شد تا اندود سطحی شکسته شده و آب موجود در قیر امولسیونی جدا گردد (برای قیرهای ۶۰/۷۰ و قیر

اصلاح‌شده با پودر لاستیک این زمان لازم نبود). در اینجا ذکر این نکته لازم است که نمونه‌های بتنی که برای ارزیابی اثر دمای سطح زیرین ساخته شده بودند به مدت ۲ ساعت در دمای ثابت (صفر، ۲۵ و ۶۰ درجه سانتیگراد) قرار گرفتند تا در هنگام اعمال اندود سطحی دمای ثابت برای سطح بدست آید. این دماها بیانگر دمای هوا و به تبع آن دمای سطح روسازی در حین اجرای لایه اندود سطحی است. در این مرحله قیر و مصالح سنگی که در گرمخانه قرار داده شده بود با یکدیگر مخلوط گردید و بر روی نمونه‌های بتنی آغشته به اندود سطحی که در قالب مارشال قرار گرفته بود ریخته شد و متراکم گردید. از آنجایی که مطابق استاندارد امکان تراکم هرطرف از نمونه به ۷۵ ضربه‌ی مارشال وجود نداشت، بر اساس پیشنهاد آیین‌نامه ایتالیا، تراکم تنها از یک طرف نمونه و به تعداد ۱۲۵ ضربه انجام شد [Tozzo, Fiore and D'andrea et al. 2014]. تصویر نمونه موردنظر پس از باز شدن قالب در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. نمونه آماده شده برای آزمایش



شکل ۲. لایه بتن غلتکی آغشته به اندود سطحی



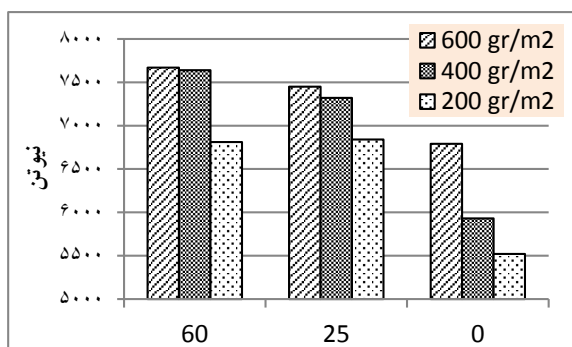


شکل ۴. دستگاه ال پی دی اس موجود در آزمایشگاه روسازی دانشگاه تربیت مدرس

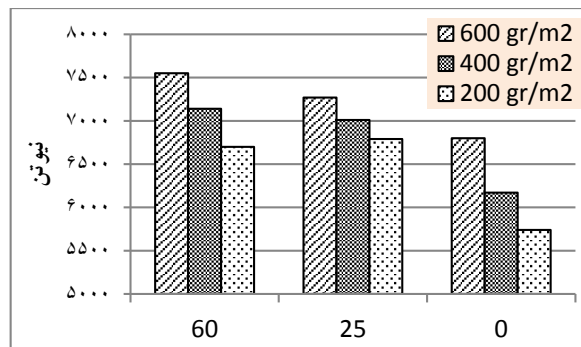
در این مقاله مقاومت چسبندگی بین لایه بتنی (بتن غلتکی) و لایه آسفالتی مورد ارزیابی قرار گرفت. نمونه‌های ساخته شده شامل ۴ نوع اندود سطحی مختلف (سه نوع اندود سطحی رایج در کشور و یک اندود سطحی اصلاح شده با پودر لاستیک) بود که در سه نرخ مختلف اجرا (۲۰۰ و ۴۰۰ و ۶۰۰ گرم بر مترمربع) و در سه دمای مختلف اجرا (۰ و ۲۵ و ۶۰ درجه سانتیگراد) اعمال گردید. از هر نمونه ۳ عدد ساخته شده و عدد نهایی میانگین مقاومت چسبندگی گزارش شده برای هر سه نمونه است.

برای تعیین مقاومت چسبندگی بین لایه‌ای از دستگاه ال پی دی اس<sup>۴</sup> موجود در آزمایشگاه روسازی دانشگاه تربیت مدرس استفاده شد. تصویر این دستگاه در شکل ۴ نشان داده شده است. کلیه نمونه‌ها تحت بارگذاری ثابت قطری با شدت اعمال بار ۵۱ میلی‌متر در دقیقه و در دمای ثابت اتاق (۲۰ درجه سانتیگراد) مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج انجام آزمایش‌ها به صورت منحنی نیروی جابجایی رسم گردید و از روی این منحنی، حداکثر نیروی وارده (نیروی گسیختگی) مشخص گردید.

#### ۴. نتایج و تحلیل



۵-ب- قیر ۶۰/۷۰ اصلاح شده با پودر لاستیک



۵-الف- مقاومت چسبندگی قیر ۶۰/۷۰

شکل ۵. مقاومت چسبندگی قیر ۶۰/۷۰ و قیر ۶۰/۷۰ اصلاح شده با پودر لاستیک

امولسیون دیرشکن CSS نسبت داد. این امولسیون زمان شکست بالایی دارد و آب موجود در امولسیون تا زمان نسبتاً زیادی بر روی سطح روسازی باقی خواهد ماند. لذا افزایش دما می‌تواند علاوه بر افزایش سرعت گیرش، آب ناشی از شکست را نیز با سرعت بیشتری تبخیر نموده بطوریکه زمانی که روکش آسفالتی بر روی سطح اجرا می‌شود، با یک سطح خشک و فاقد رطوبت مواجه گردد. مجموعه این عوامل باعث می‌شود تا نمونه‌های اجرا شده بر روی روسازی با دمای سطحی بالاتر مقاومت چسبندگی بیشتری را از خود نشان دهند. از سوی دیگر همانطور که مشاهده می‌گردد با افزایش مقدار اندود سطحی مقاومت چسبندگی کاهش می‌یابد. علت این امر را نیز می‌توان در وجود مقادیر آب بیشتر در نمونه‌های حاوی مقادیر بیشتر قیر امولسیونی دانست که باعث ایجاد لغزندگی بین لایه روکش و لایه بتنی می‌شود. در واقع افزایش مقدار آب باقی مانده بر روی سطح به افزایش مقدار قیر باقیمانده برتری یافته و در مجموع باعث کاهش چسبندگی شده است. البته باید به این نکته توجه داشت که مدت زمان پیشنهادی برای شکستن قیرهای امولسیونی در این پژوهش مقدار ثابت ۴۵ دقیقه تنظیم و اعمال گردیده است و زمان‌های شکستن متفاوت با این مقدار شاید بتواند به عملکرد متفاوتی در میزان چسبندگی منجر شود.

ویسکوزیته‌ی پایین قیرهای امولسیونی یکی از عوامل تاثیرگذار در چسبندگی بین لایه‌ای است. این عامل موجب می‌گردد تا در مقادیر پایین استفاده از قیر امولسیونی، این اندود بتواند به خوبی در سطح نمونه پخش گردد و به خوبی در منافذ موجود در سطح زیرین نفوذ کند در حالی که ویسکوزیته بالای قیرهای ۶۰/۷۰ و ۶۰/۷۰ اصلاح شده با پودر لاستیک موجب عملکرد ضعیف این اندودهای سطحی در مقادیر کم استفاده از آن می‌گردد.

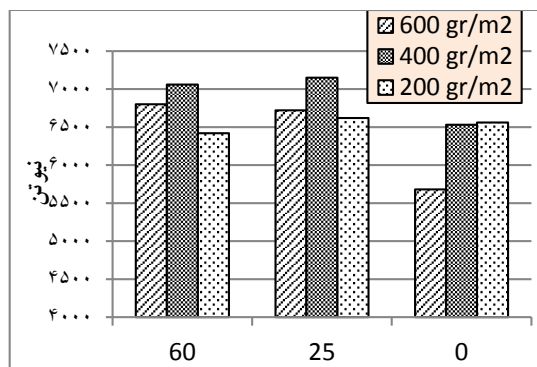
شکل ۶-ب مقاومت چسبندگی اندود سطحی اجرا شده با قیر امولسیونی CRS را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود این قیر هم نسبت به افزایش دمای سطح بتن غلظتی و هم نسبت به مقدار اندود استفاده شده، رفتاری متفاوت از خود نشان می‌دهد. در دماهای ۲۵ و ۶۰ درجه سانتیگراد، با افزایش مقدار اندود مصرفی از ۲۰۰ به ۴۰۰ گرم بر مترمربع ابتدا مقاومت چسبندگی افزایش می‌یابد و سپس با ادامه افزایش میزان مصرف تا ۶۰۰ گرم بر مترمربع مقاومت چسبندگی کاهش پیدا می‌کند؛ به طوری که استفاده از اندود سطحی به میزان ۴۰۰ گرم بر مترمربع باعث ایجاد بیشترین مقدار مقاومت چسبندگی (تقریباً ۷۰۰۰

مقاومت چسبندگی اندود سطحی قیر ۶۰/۷۰ در شکل ۵-الف نشان داده شده است. همانطور که از روی این شکل مشخص است با افزایش دمای سطحی لایه بتنی و همچنین افزایش مقدار اندود سطحی مورد استفاده، مقاومت چسبندگی بین لایه‌ای افزایش پیدا می‌کند؛ به طوری که در دمای سطحی ۶۰ درجه سانتیگراد و مقدار اندود سطحی ۶۰۰ گرم بر مترمربع مقاومت چسبندگی در بیشترین مقدار خود و در حدود ۷۵۵۰ نیوتن است. علت افزایش مقاومت چسبندگی را می‌توان به کاهش ویسکوزیته قیر در دماهای بالا و نفوذ بیشتر به درون خلل و فرج موجود در سطح بتن غلظتی نسبت داد. کاهش ویسکوزیته همچنین می‌تواند باعث سهولت در پخش قیر و توزیع یکنواخت اندود سطحی در مقادیر بالای اندود سطحی شود. رفتار مشابهی را نیز می‌توان برای قیر ۶۰/۷۰ اصلاح شده با پودر لاستیک در شکل ۵-ب مشاهده نمود. همچنین در مقایسه بین قیرهای ۶۰/۷۰ و ۶۰/۷۰ اصلاح شده با پودر لاستیک می‌توان مشاهده نمود که در دماهای ۲۵ و ۶۰ درجه سانتیگراد مقاومت چسبندگی قیر اصلاح شده با پودر لاستیک تا حدی بیشتر از قیر خالص است، درحالی که این روند در دمای صفر درجه نسبتاً تغییر می‌کند. علت این امر را می‌توان در ویسکوزیته بالای قیر اصلاح شده با پودر لاستیک در مقایسه با قیر خالص دانست که تاثیر خود را در دماهای پایین‌تر به شدت نشان می‌دهد. اما در دماهای بالاتر این خصوصیات چسبندگی پودر لاستیک است که تا حدی بر ویسکوزیته بالای آن غلبه می‌کند. نکته دیگری که در مورد قیرهای خالص و اصلاح شده فوق باید به آن اشاره کرد عدم مشاهده پدیده لغزندگی در مقادیر بالای اندود سطحی است. همانطور که پیش از این اشاره شد استفاده زیاد از اندود سطحی می‌تواند منجر به وقوع پدیده لغزندگی گردد. اما به نظر می‌رسد مقدار ۶۰۰ گرم بر مترمربع که حد بالای استفاده از اندود سطحی در این پژوهش بوده است آنقدر زیاد نیست که منجر به ایجاد این پدیده گردد، به طوری که با افزایش مقدار قیر تا ۶۰۰ گرم بر مترمربع هنوز شاهد افزایش مقاومت چسبندگی بوده‌ایم. مقاومت چسبندگی اندود سطحی قیر امولسیونی CSS در شکل ۶-الف نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، همانند نمونه‌های قیرهای ۶۰/۷۰ و ۶۰/۷۰ اصلاح شده با پودر لاستیک، افزایش دما باعث افزایش مقاومت چسبندگی می‌گردد. اما باید توجه داشت که این بهبود، مانند قیرهای خالص، ناشی از کاهش ویسکوزیته قیر نبوده و باید علت این امر را به افزایش سرعت شکست

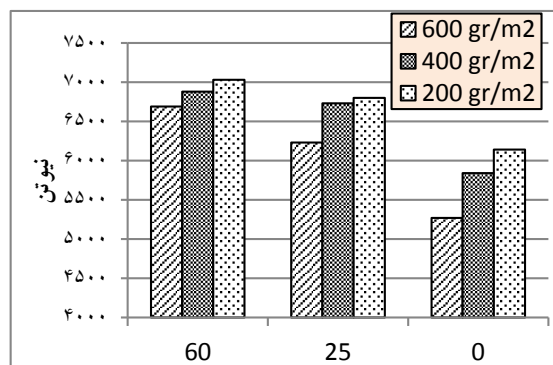
## بررسی عوامل موثر بر چسبندگی بین لایه روسازی بتن غلتکی.....

نتوانسته تاثیر چندانی در خروج و کاهش آب موجود بر روی سطح داشته باشد و بنابراین کاهش مقاومت چسبندگی رخ دهد. از سوی دیگر همانطور که مشاهده می شود افزایش دمای سطح بیشترین تاثیر را در مقدار بالای مصرف قیر امولسیون گداشته است. با توجه به اینکه قیر امولسیون در مقادیر بالای استفاده شده دیرتر می شکند و مقدار آب ناشی از شکست نیز بیشتر می باشد، افزایش دما می تواند با افزایش سرعت شکست و تبخیر آب موجود تاثیر به سزایی در کسب مقاومت چسبندگی داشته باشد. این در حالیست که مقاومت چسبندگی قیرها با میزان مصرف ۲۰۰ و ۴۰۰ گرم بر مترمربع کمتر تحت تاثیر دمای سطح قرار گرفته اند.

نیوتن در دماهای ۲۵ و ۶۰ درجه سانتیگراد) می گردد. در دمای صفر درجه سانتیگراد نیز تقریباً تفاوت خاصی در میزان چسبندگی در دو مقدار ۲۰۰ و ۴۰۰ گرم بر مترمربع مشاهده نمی شود و کاهش قابل توجه در ۶۰۰ گرم بر مترمربع نیز همانند دماهای دیگر رخ می دهد. آب موجود در قیر امولسیون CRS به دلیل سرعت بالای شکست آن در مقایسه با قیر CSS سریع تر جدا می گردد و این امر سبب آن شده که در مقادیر ۲۰۰ و ۴۰۰ گرم بر مترمربع استفاده از اندود سطحی، چسبندگی خوبی بین سطح موجود و رویه جدید ایجاد شود و این چسبندگی همانند قیرهای خالص با افزایش مقدار اندود سطحی افزایش یابد. اما در مقدار مصرف ۶۰۰ گرم بر مترمربع از قیر امولسیون، حجم آب موجود به حدی است که سرعت شکست بالای این نوع قیر نیز

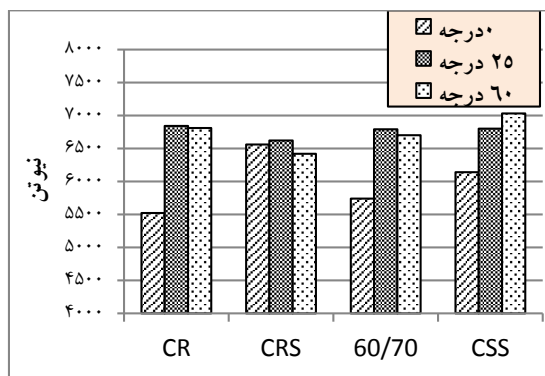


۶-ب- مقاومت چسبندگی قیر CRS

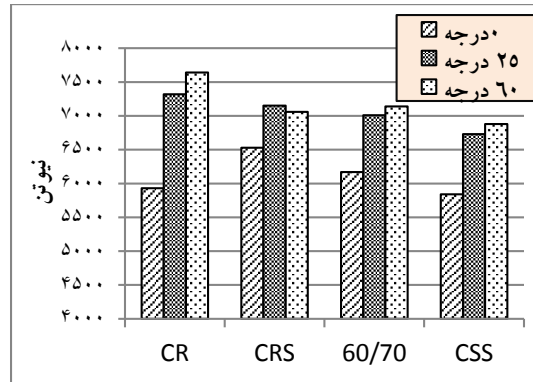


۶-الف- مقاومت چسبندگی قیر CSS

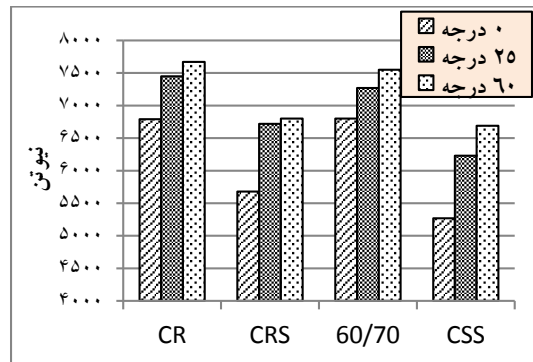
شکل ۶. مقاومت چسبندگی قیر CSS و قیر CRS



شکل ۷. مقاومت چسبندگی اندودهای سطحی (۲۰۰ گرم بر مترمربع)



شکل ۸. مقاومت چسبندگی اندوهای سطحی (۴۰۰ گرم بر مترمربع)



شکل ۹. مقاومت چسبندگی اندوهای سطحی (۶۰۰ گرم بر مترمربع)

شدیدا بر روی چسبندگی تاثیر منفی خواهد داشت. اما در مورد قیرهای خالص و اصلاح شده، افزایش مقدار قیر اندود سطحی با دمای حدود ۱۴۵ و ۱۸۰ درجه سانتیگراد می‌تواند تا حدی تاثیر دمای صفر درجه سطح را از بین ببرد. بنابراین تاثیر منفی دمای پایین سطحی برای قیرهای خالص و اصلاح شده در مقادیر کم استفاده از اندود سطحی خود را نشان می‌دهد.

### ۵. نتیجه گیری

در این مقاله مقاومت چسبندگی بین دو لایه بتن غلتکی و مخلوط آسفالتی از جنس ماسه آسفالت که به عنوان میان‌لایه جاذب تنش در روسازی به کار گرفته می‌شود، مورد ارزیابی قرار گرفته است. به همین منظور از ۴ نوع اندود سطحی مختلف (قیر ۶۰/۷۰، قیر ۶۰/۷۰ اصلاح شده با پودر لاستیک، قیر امولسیون CR و قیر امولسیون CSS) به عنوان ماده‌ی چسباننده استفاده گردید. برای تعیین مقدار قیر بهینه مورد استفاده از اندودهای سطحی به مقدار ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ گرم بر مترمربع استفاده گردید. همچنین با تغییر دمای لایه بتن غلتکی (۰ و ۲۵ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد) برای اولین بار تاثیر دمای سطح لایه‌ی زیرین بر روی مقاومت چسبندگی مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت نتایج بدست آمده از این تحقیق را می‌توان به صورت زیر ارائه نمود:

شکل ۷، ۸ و ۹ مقایسه‌ای از مقاومت چسبندگی چهار نوع قیر موجود را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، قیر اصلاح شده با پودر لاستیک و همچنین قیر خالص ۶۰/۷۰ در مقادیر بالای مصرف ۴۰۰ و ۶۰۰ گرم بر مترمربع مقاومت چسبندگی بیشتری در مقایسه با قیرهای امولسیونی داشته و بنابراین استفاده از این نوع قیرها تنها در مقادیر بالای مصرف پیشنهاد می‌گردد. قیر امولسیونی CSS قیری است که در مقدار مصرف ۲۰۰ گرم بر مترمربع که کمترین مقدار مصرف است، بهترین عملکرد را در مقایسه با سایر قیرها از خود نشان داده است. همچنین به نظر می‌رسد که قیر CRS نیز همچون قیر CSS در مقادیر مصرف کمتر عملکرد بهتری دارد.

همچنین با مشاهده مقاومت چسبندگی چهار نوع قیر مورد نظر در دمای صفر درجه می‌توان اینگونه برداشت نمود که قیرهای امولسیونی در مقادیر کم مصرف و قیرهای خالص و پلیمری در مقادیر بالای مصرف کمتر تحت تاثیر این کاهش دما قرار گرفته اند. در واقع در قیرهای امولسیونی وجود آب باقی‌مانده از فرآیند شکست است که تاثیر نهایی بر عملکرد چسبندگی قیر دارد و استفاده از مقدار بالای این نوع اندود سطحی در دماهای پایین، لایه ضحیمی از آب را بر روی سطح نمونه ایجاد می‌کند که

- Asgharzadeh, S. M., Tabatabaee, N., Naderi, K. and Partl, M. (2013) "An empirical model for modified bituminous binder master curves", Mater. Struc., Vol. 46, No. 9, pp. 1459-1471.
  - Asphalt Institute (2007) "The Asphalt Handbook MS-4", Asphalt Institute, Lexington, KY.
  - Chen, J.-S. and Huang, C.-C. (2010) "Effect of surface characteristics on bonding properties of bituminous tack coat", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2180, pp.142-149.
  - Cho, S. H. (2016) "Evaluation of interfacial stress distribution and bond strength between asphalt pavement layers", A dissertation submitted to the Graduate Faculty of North Carolina State University in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy, advisor: Dr. Y. Richard Kim North Carolina State University.
  - Collop, A., Sutanto, M., Airey, G. and Elliott, R. (2009) "Shear bond strength between asphalt layers for laboratory prepared samples and field cores" Construction and Building Materials, Vol 23, pp. 2251-2258.
  - Das, R., Mohammad, L. N., Elseifi, M., Cao, W. and Cooper Jr, S. B. (2017) "Effects of tack coat application on interface bond strength and short-term pavement performance" Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol 2633, pp. 1-8.
  - Deysarkar, I. (2004). "Test set-up to determine quality of tack coat", A dissertation submitted to the Graduate Faculty of North Carolina State University in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Doctor
- ۱. افزودن پودر لاستیک به اندود سطحی از نوع قیر ۶۰/۷۰ می-تواند باعث افزایش مقاومت چسبندگی گردد. به طوری که استفاده از این نوع اندود سطحی با مقادیر بالا می‌تواند مقاومت چسبندگی به مراتب بیشتری را نسبت به اندود سطحی ۶۰/۷۰، CRS و CSS حاصل نماید.
  - ۲. دمای لایه زیرین می‌تواند تاثیر به سزایی در مقاومت چسبندگی بین لایه‌های روسازی داشته باشد. اگر هنگام پخش اندود سطحی دمای لایه زیرین در حد یخبندان باشد مقاومت چسبندگی به طرز چشمگیری کاهش می‌یابد. این کاهش مقاومت در هنگام استفاده از قیرهای امولسیون در مقادیر بالای مصرف و در هنگام استفاده از قیرهای خالص در مقادیر کم مصرف اندود سطحی نمود بیشتری دارد. همچنین به طور کلی افزایش دمای لایه زیرین زمانی که اندود سطحی از نوع قیر ۶۰/۷۰ و ۶۰/۷۰ اصلاح شده با پودر لاستیک باشد می‌تواند کمک زیادی به افزایش مقاومت چسبندگی کند.
  - ۳. با بررسی مقادیر مختلف اندودهای سطحی برای هر یک از اندودهای مورد استفاده مشخص گردید که مقدار بهینه اندود سطحی از نوع قیر امولسیونی CRS و CSS به ترتیب ۴۰۰ گرم بر مترمربع و ۲۰۰ گرم بر مترمربع است. همچنین افزایش مقدار اندود سطحی از نوع قیر ۶۰/۷۰ و قیر ۶۰/۷۰ اصلاح شده با پودر لاستیک به ۶۰۰ گرم بر مترمربع یا بیش از آن می‌تواند باعث افزایش مقاومت چسبندگی گردد.
- ۶. پی نوشتها**
- Slippage<sup>1</sup>  
Slippage cracking<sup>2</sup>  
quick set emulsions<sup>3</sup>  
Layer-Parallel Direct Shear (LPDS)<sup>4</sup>
- ۶. مراجع**
- کاوسی، 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.

- placement", Transportation Research Board, NCHRP, Report 712.
- Mohammad, L., Raqib, M. and Huang, B. (2002) "Influence of asphalt tack coat materials on interface shear strength", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1789, pp. 56-65.
  - Molenaar, A., Heerkens, J. and Verhoeven, J. (1986) "Effects of stress absorbing membrane interlayers", Association of Asphalt Paving Technologists Proc, Vol. 55, pp. 453-481
  - NCDOT - North Carolina Department of Transportation (2012) "Standard specifications for roads and structures", NCDOT, Raleigh, NC.
  - Nguyen, N. L., Van Dong, D. A. O., Nguyen, M. L. and Huu, D. (2016) "Investigation of bond between asphalt layers in flexible pavement" , 8<sup>th</sup>. Rilem International Conference on Mechanisms of Cracking and Debonding in Pavements, Nantes, France.
  - NLT-328/08 2008 "Evaluation of the adhesion between asphalt layers, through shear test [Evaluación de la adherencia entre capas de firme, mediante ensayo de corte]", 1<sup>a</sup> edn, CEDEX Spanish Standard, Madrid.
  - Panda, M., Prakash Giri, J. and Bikash Sutradhar, B. (2015) "Influence of setting time of tack coat on bond strength of bituminous paving layers", International Journal of Transportation Engineering, Vol. 2, No. 4, pp. 297-306.
  - Paul, H. and Scherocman, J. (1998)" Friction testing of tack coat surfaces", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1616, pp. 6-12.
  - Diakhate, M., Millien, A., Petit, C., Phelipot-Mardele, A. and Pouteau, B. (2011) "Experimental investigation of tack coat fatigue performance: Towards an improved lifetime assessment of pavement structure interfaces", Construction and Building Materials, Vol. 25, pp. 1123-1133
  - Hachiya, Y., Umeno, S. and Sato, K. (1997) "Effect of tack coat on bonding characteristics at interface between asphalt concrete layers", Doboku Gakkai Ronbunshu, Vol. 1997, No. 572, pp.109-209.
  - Hasiba, K. I. Q. (2012) "Development of a testing approach for tack coat application rate at pavement layer interfaces", Thesis Submitted in Partial Fulfilment of the Requirement for the MSc Degree in highway and transportation engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign.
  - King, G. and May, R. (2003) "New approaches to tack application", Presentation made to the 83rd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
  - Leng, Z., Ozer, H., Al-qadi, I. and Carpenter, S. (2008) "Interface bonding between hot-mix asphalt and various Portland cement concrete surfaces, laboratory assessment", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2057, pp. 46-53.
  - Biglari, M. (2016) "Reflective cracking evaluation of SAMI application", Thesis submitted in partial fulfilment of the requirement for the degree of master of science (M.Sc) in Highway and Transportation Engineering, Supervisor: Dr. Seyed Mohammad Asgharzadeh, Tarbiat Modares University.
  - Mohammad, L. N. (2012) " Optimization of tack coat for HMA of Philosophy, University of Texas at El Paso.

- Tayebali, A. A., Rahman, M. S., Kulkarni, M. B. and Xu, Q. (2004) "A mechanistic approach to evaluate contribution of prime and tack coat in composite asphalt pavements", North Carolina Department of Transportation.
- 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.
- Uzan, J., Livneh, M. and Eshed, Y. (1978) "Investigation of adhesion properties between asphaltic-concrete layers", Association of Asphalt Paving Technologists Proc, Vol. 47, pp. 495-521.
- West, R. C., Zhang, J. and Moore, J. (2005) "Evaluation of bond strength between pavement layers", NCAT report, 05-08.
- Raposeiras, A. C., Vega-Zamanillo, Á., Calzada-Perez, M. Á. and Castro-Fresno, D. (2012) "Influence of surface macro-texture and binder dosage on the adhesion between bituminous pavement layers", Construction and Building Materials, Vol. 28, pp. 187-192.
- Raposeiras, A., Castro-Fresno, D., Vega-Zamanillo, A. and Rodriguez-Hernandez, J. (2013) "Test methods and influential factors for analysis of bonding between bituminous pavement layers", Construction and Building Materials, Vol. 43, pp. 372-381.
- Roffe, J.-C. and Chaignon, F. (2002) "Characterisation tests on bond coats: worldwide study, impact, tests, recommendations", Proceedings Of The 3rd International Conference on Bituminous Mixtures And Pavements, Held Thessaloniki, Greece.

## معین بیگلری، سید محمد اصغرزاده، امیر کاوسی

معین بیگلری، درجه کارشناسی در رشته عمران- عمران را در سال ۱۳۹۲ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج و درجه کارشناسی ارشد در رشته عمران، راه و ترابری را در سال ۱۳۹۵ از دانشگاه تربیت مدرس اخذ نمود. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مدیریت و تعمیر و نگهداری روسازی راه و تکنولوژی قیر و آسفالت است



سید محمد اصغرزاده، درجه کارشناسی در رشته عمران- عمران را در سال ۱۳۸۳ از دانشگاه صنعتی شریف و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی و برنامه ریزی حمل و نقل را در سال ۱۳۸۵ از همین دانشگاه اخذ نمود. وی در سال ۱۳۹۲ موفق به کسب درجه دکتری در رشته عمران- راه و ترابری از دانشگاه صنعتی شریف گردیده است. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان رتولوژی قیر، مدیریت و تعمیر و نگهداری روسازی راه، تکنولوژی قیر و آسفالت و طراحی روسازی‌ها است. وی در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار، در دانشگاه تربیت مدرس است.



امیر کاوسی، درجه کارشناسی در رشته عمران را در سال ۱۳۵۸ از دانشگاه ناپل ایتالیا و درجه کارشناسی ارشد در رشته عمران- راه و ترابری را در سال ۱۳۶۱ از همان دانشگاه اخذ نمود. وی در سال ۱۳۶۷ موفق به کسب درجه دکتری در رشته عمران- راه و ترابری از دانشگاه بیرمنگهام انگلستان گردیده است. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان طراحی روسازی‌ها، مدیریت و تعمیر و نگهداری روسازی راه و تکنولوژی قیر و آسفالت است. وی در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه دانشیار، در دانشگاه تربیت مدرس است.

