

## بررسی آزمایشگاهی تأثیر دما بر مقاومت لغزندگی انواع مخلوطهای آسفالتی

محمد حسن میرابی مقدم (مسئول مکاتبات)، استادیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت،

دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

علی اکبری، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

E-mail: mhmirabi@eng.usb.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۲/۱۰/۱۳ پذیرش: ۱۳۹۳/۹/۲۲

### چکیده:

عوامل مختلفی در مقاومت لغزندگی روسازی های آسفالتی تأثیر دارند که یکی از آنها دمای سطح روسازی است. گرچه تعدادی از محققین ( با توجه به رفتار ویسکوالاستیک آسفالت رویه و لاستیک وسیله نقلیه) تلاش کردند تا تأثیر این پارامتر را بر ارزش مقاومت لغزندگی روسازی بررسی نمایند، اما تاکنون نتیجه مشخصی از کار آنان ارائه نشده است.

در این مقاله، تأثیرات دمای سطح روسازی بر ارزش مقاومت لغزندگی انواع مخلوطهای آسفالتی رویه راه بررسی شده است. برای این منظور از یک رویکرد آزمایشگاهی استفاده شده و با ساخت نمونه هایی از چهار نوع مخلوط بتن آسفالتی گرم، سرباره ای فولاد، استخوان بندی سنگدانه ای و متخلخل و حرارت دادن آنها به دو روش "اون" (کوره) و "حمام آبگرم"، ارزش مقاومت لغزندگی آنها در درجه حرارت های مختلف با دستگاه آونگ انگلیسی اندازه گیری شده است. نتایج نشان داد که در درجه حرارت محیط مقاومت لغزندگی مخلوط آسفالتی سرباره فولاد، در مقایسه با سایر مخلوط های آسفالتی دارای بیشترین مقدار بوده و با افزایش درجه حرارت، مقاومت لغزندگی انواع مخلوط های آسفالتی کاهش می یابد. بعلاوه، نوع منبع گرمایش تأثیری در تغییرات مقاومت لغزندگی سطح روسازی در درجه حرارت های مختلف ندارد.

واژه های کلیدی: مقاومت لغزندگی، اصطکاک، دما، آونگ انگلیسی، مخلوط آسفالتی

## ۱. مقدمه

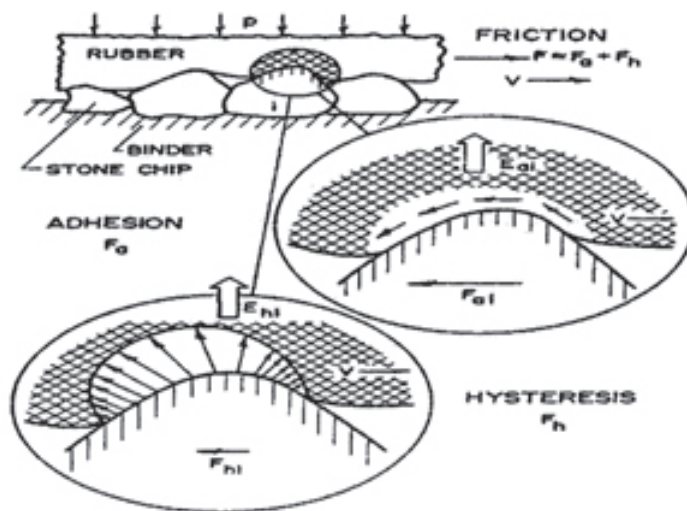
یکی از مهم ترین خصوصیات روسازی های آسفالتی در ارتباط با ایمنی راهها، مقاومت در برابر لغزندگی آنهاست. این خصوصیت در شرایط ترمزگیری (قفل شدن چرخها) به صورت یک نیروی بازدارنده از سرخوردن لاستیک وسیله نقلیه بر روی سطح خیس روسازی جلوگیری کرده و به همین جهت، نقش تعیین کننده ای در کنترل وسیله نقلیه توسط راننده و اجتناب از تصادف در شرایط بارندگی و سطح روسازی خیس دارد.

مقاومت در برابر لغزندگی روسازیاها به عوامل مختلفی وابسته است که به هم مرتبط بوده و این نوع مقاومت را تحت تأثیر قرار می دهند. یکی از این عوامل، درجه حرارت سطح روسازی است که به روشهای مختلفی مطالعه و تاکنون نتیجه مشخصی از آن ارایه نشده است. در این مقاله، تأثیر عامل دمای سطح روسازی بر مقاومت در برابر لغزندگی از طریق ساخت نمونه های مختلف آسفالتی در آزمایشگاه، حرارت دادن آنها به دو روش "اون" و "حمام آبگرم" و اندازه گیری ارزش مقاومت لغزندگی نمونه های حرارت دیده با دستگاه آونگ انگلیسی، مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل از آن تحلیل شده است.

## ۲. پیشینه تحقیق

مقاومت در برابر لغزندگی، نیروی بازدارنده و مقاومی است که تحت اندرکنش روسازی و چرخ قفل شده وسیله نقلیه ایجاد می شود [Panagouli and Kokkalis, 1998]. این نیرو همان طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، متشکل از دو جزء چسبندگی و هیستریسیس است [Crony and Crony, 1998]. Kummer and Meyer, 1967] که جزء چسبندگی به علت جاذبه بین مولکولی شیار لاستیک چرخ و ذرات مصالح و جزء هیستریسیس در نتیجه تغییر شکل آج لاستیک در هنگام تماس با دانه های سنگی روسازی بوجود می آید. هنگامی که لاستیک در تماس با سنگدانه های روسازی فشرده می شود، توزیع تنش باعث ذخیره انرژی تغییر شکل درون لاستیک شده و زمانی که لاستیک آزاد می گردد، بخشی از انرژی ذخیره شده دوباره بازگردانی و بخش دیگر نیز به صورت گرما از دست

می رود، که برگشت ناپذیر است. انتظار می رود که اصطکاک ناشی از هیستریسیس در ذرات مصالح نامنظم یا زاویه دار بیشتر از ذرات گرد گوشه باشد، زیرا نامنظم بودن باعث ایجاد تغییر شکل بیشتر در آج لاستیک می شود [Baghban, 2000]. لازم به ذکر است که جزء چسبندگی حساسیت بیشتری به بافت سطحی دارد [Ba-zlamit and Reza, 2005].



شکل ۱. شماتیک دو جزء چسبندگی و هیستریسیس اصطکاک

## بررسی آزمایشگاهی تأثیر دما بر مقاومت لغزندگی انواع مخلوطهای آسفالتی

به همراه داشته است. برخی از محققین گزارش داده‌اند که دما بر مقاومت لغزندگی تأثیر قابل ملاحظه‌ای دارد، به طوری که مقاومت لغزندگی با افزایش دما کاهش و با کاهش دما افزایش می‌یابد. [Giles, Sabey & Cardew, 1964, Wang & Flintsch, 2007, Flitsch et al, 2007, Bazlamit and Reza, 2005]

اما نتایج دیگر نشان می‌دهد که تأثیر دما بر مقاومت لغزندگی چندان قابل ملاحظه نیست. [Kumar and Meyer, 1967, Da-hir, Hemry and Meyer, 1979]

وَنگ و فلینج (۲۰۰۷) اصطکاک و خصوصیات بافت سطح روسازی ۱۲ قطعه راه‌های هوشمند ویرجینیا را در یک بازه زمانی ۶ ساله مورد مطالعه قرار دادند. تغییرات کوتاه مدت و بلند مدت خصوصیات سطح روسازی بر مبنای تغییرات درجه حرارت و زمان ارزیابی شد. نتایج مطالعه آنها نشان داد که مقاومت لغزندگی روسازی در تابستان کاهش می‌یابد و به این ترتیب، نتیجه گرفتند که درجه حرارت بر تغییرات سالانه و فصلی اصطکاک سطح روسازی تأثیر گذار است [Wang and Flintsch, 2007]. مطالعات دیگر مرتبط با راه‌های هوشمند ویرجینیا مطالعات فلینج (۲۰۰۵) و لو (۲۰۰۳) است. در گزارش هر دو، تأثیر درجه حرارت بر خصوصیات اصطکاک سطح روسازی در ۷ قطعه بتن آسفالتی تایید شد. مطالعات آنها نشان داد که اصطکاک روسازی با افزایش دمای سطح روسازی کاهش می‌یابد [Flintsch, Luo and Al-Qadi, 2005].

بازلامیت و همکاران در سال ۲۰۰۵ به بررسی تأثیر درجه حرارت بر مقاومت لغزندگی ایجاد شده در سطح مشترک لاستیک و روسازی پرداختند. آنها روی ۱۰ سایت مختلف در ایالت اوهایو آمریکا مطالعه کرده و با ساخت نمونه‌هایی مشابه، مقاومت در برابر لغزندگی آنها را در آزمایشگاه تحت دماهای مختلف اندازه‌گیری نمودند. به منظور شبیه‌سازی جریان ترافیک و پیر شدن روسازی، از دستگاه صیقل مکانیکی در سیکل‌های مختلف استفاده شد. نتایج نشان داد که جزء پسماند اصطکاک با افزایش دما (صرفنظر از نوع بافت روسازی) کاهش یافته، اما جزء چسبندگی با افزایش دما افزایش می‌یابد. بازلامیت رابطه‌ای خطی به صورت معادله

معمولاً دو نوع تغییر بلند مدت و کوتاه مدت در مقاومت لغزندگی روسازی‌ها مشاهده می‌شود، که اولی از کاهش خصوصیات اصطکاک سنگدانه‌های روسازی تحت صیقل جریان ترافیک، و دومی در نتیجه بارش باران و تأثیر دما بر اعداد لغزندگی اندازه‌گیری شده، ناشی می‌شود.

عوامل متعددی بر مقاومت لغزندگی روسازی تأثیر دارند که بسیاری از آنها به یکدیگر مرتبط بوده و هر عامل می‌تواند بر مقاومت لغزندگی کوتاه مدت و بلند مدت روسازی و یا هر دو اثر بگذارد. بسیاری از محققین معتقدند که برای درک رفتار بلند مدت مقاومت لغزندگی روسازی ابتدا باید رفتار کوتاه مدت آن بررسی شود [Bazlamit and Reza, 2005]. کلونی عوامل و متغیرهای تأثیرگذار بر مقاومت لغزندگی را مورد بررسی قرار داده و آنها را به چهار دسته متغیرهای روسازی، ترافیکی، آب و هوایی و آلاینده‌ها طبقه‌بندی نموده است [Colony, 1992]. متغیرهای روسازی عمدتاً شامل مشخصات مخلوط آسفالتی و بافت سطح روسازی اعم از درشت و ریز هستند. ارتباط بین مقاومت لغزندگی و بافت روسازی بسیار پیچیده است، ولی بطور کلی بافت ریز در سرعت‌های پایین تأثیرگذار است و هرچه سرعت بالا می‌رود، سهم بافت درشت در مقاومت لغزندگی به علت افزایش کانالهای انتقال آب بین سطح روسازی و تیر، بیشتر می‌شود. متغیرهای ترافیکی عبارتند از: حجم و سرعت ترافیک و شرایط آب و هوایی و نیز دما و بارندگی. احتمالاً نقش دما نسبت به بارندگی در مقاومت لغزندگی بیشتر است، چرا که آب باران نیز خود به واسطه تغییر ویسکوزیته با دما، به تغییرات دما حساس است. آلاینده‌های سطح روسازی نظیر گرد و غبار، شن، روغن، گریس، خار و خاشاک و تکه‌های لاستیک از عوامل موثر بر مقاومت لغزندگی هستند، زیرا باعث لغزنده شدن سطح روسازی شده و از تماس مناسب لاستیک و سطح روسازی جلوگیری می‌کنند. همچنین، پارامترهای طرح هندسی مانند شیب و قوسها بر مقدار مقاومت لغزندگی سطح روسازی اثر می‌گذارند [Bazlamit and Reza, 2005].

در مورد تأثیر دما مطالعات متعددی انجام شده که نتایج متناقضی

لغزشی حاصله هیچگونه تأثیری ندارد [Mitchell, Phillips and Shah, 1986].

بر اساس تحقیقات گذشته نه تنها تأثیر دما بر مقاومت لغزندگی به طور کامل مشخص نشده است، بلکه تأثیر پارامترهای دیگری نظیر بافت سطحی متفاوت و قیر پلیمری بر مقاومت لغزندگی روسازی نیز مطالعه نشده است. بنابراین، ادامه تحقیقات بر روی متغیرهای تأثیر گذار بر مقاومت لغزندگی روسازی ضروری به نظر میرسد. در تحقیق آزمایشگاهی حاضر تأثیر دما، استفاده از قیر اصلاح شده با پلیمر استایرن بوتادین استایرن (SBS) و نوع مخلوط آسفالتی (چهار نوع) با بافت سطحی متفاوت بر مقاومت لغزندگی با استفاده از آزمایش آونگ انگلیسی بررسی شده است.

### ۳. انتخاب مصالح و برنامه آزمایشگاهی

#### ۳-۱ مصالح

در این تحقیق چهار نوع مصالح متداول مورد استفاده در آسفالت گرم شامل بتن آسفالتی گرم (HMA)، سرباره فولاد، استخوان بندی سنگدانه ای (SMA) و متخلخل بکار رفته است که مصالح آنها از جنس سنگی آهکی بوده و از معدن اسب چران، واقع در شرق تهران تهیه شده است. فیلر نیز از جنس پودرسنگ آهکی انتخاب شد. همچنین سرباره فولاد از سرباره‌های کوره قوس الکتریک صنایع فولاد اهواز تهیه شد و بعنوان سنگدانه و فیلر در مخلوط‌های آسفالتی سرباره‌ای استفاده شد. از آنجا که مشخصات فنی مصالح بکار رفته در نمونه‌های آسفالتی نقش تعیین کننده‌ای در چگونگی تحلیل مقاومت لغزندگی در درجه حرارت‌های مختلف دارد، قبل از ساخت نمونه‌های آزمایشی، از این مصالح نمونه‌برداری و مشخصات فنی آنها تعیین گردید که در جدول ۱ منعکس شده است.

در این تحقیق برای ساخت نمونه‌های HMA و سرباره‌ای فولاد از قیر خالص ۶۰/۷۰ و برای ساخت مخلوط‌های آسفالتی متخلخل و SMA از قیر ۶۰/۷۰ اصلاح شده با ۴

(۱) ارائه کرد که نشان دهنده ارتباط درجه حرارت با مقاومت لغزندگی است [Bazlamit and Reza, 2005].

$$BPN_T = 125.2508 - 0.232T \quad (1)$$

که BPN عدد لغزندگی و T درجه حرارت است.

در سال ۲۰۱۲ خصانه<sup>۲</sup> در تحقیقی مشابه به بررسی تأثیر دما بر خصوصیات اصطکاکی بتن آسفالتی گرم در سطوح صیقلی مختلف پرداخت. برای این منظور از آزمایش آونگ انگلیسی بر نمونه‌های آسفالتی ساخته شده که تحت سطوح مختلف صیقل قرار گرفتند، در ۳ دمای مختلف استفاده شد. او نیز مشابه تحقیق انجام شده توسط بازلامیت به این نتیجه رسید که تغییرات درجه حرارت تأثیر قابل توجهی بر مقاومت لغزندگی دارد [Kha-sawneh and Liang, 2012].

احمد و تیغه در سال ۲۰۰۹، متغیرهای اصطکاکی دو نوع مخلوط بتن آسفالتی گرم و بتن سیمانی را مورد ارزیابی قرار دادند. برای این منظور، نمونه‌های مختلفی از این دو نوع مخلوط ساخته شد و تحت آزمایش آونگ انگلیسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه، حاکی از کاهش ۰/۳۵ عدد آونگ انگلیسی (BPN) به ازای یک درجه افزایش دماست [Ahammed and Tighe, 2009].

دهیر در سال ۱۹۷۹ مطالعه‌ای در دانشگاه ایالتی پنسیلوانیا جهت ارزیابی تغییرات کوتاه مدت مقاومت لغزندگی انجام داد که در آن اندازه‌گیری مقاومت لغزندگی بوسیله تریلر چرخ قفل شونده و طبق استاندارد ASTM E 274 صورت گرفت. دمای لاستیک وسیله نقلیه به صورت پیوسته به وسیله رادیومتر و دمای آب و محیط نیز به کمک ترمومتر اندازه‌گیری شد. نتایج این مطالعه نشان داد که درجه حرارت تأثیر قابل ملاحظه‌ای در مقاومت لغزندگی ندارد [Dahir, Henry and Meyer, 1979].

میچل نیز در ارتباط با این موضوع مطالعاتی در بزرگراه مریلند آمریکا انجام داد، که هدف اصلی آن تعیین پارامتر فصلی موثر بر مقاومت لغزشی بود. عدد لغزش بر اساس استاندارد ASTM E 274 با وسیله دستگاه چرخ قفل شونده اندازه‌گیری شد و اطلاعات شرایط آب و هوایی و دمایی ثبت شد. در پایان میچل و همکارانش به این نتیجه رسیدند که دمای روسازی در مقاومت

## بررسی آزمایشگاهی تأثیر دما بر مقاومت لغزندگی انواع مخلوطهای آسفالتی

### جدول ۱. مشخصات سنگدانه‌های آهکی و سرباره‌ای

استاندارد آزمایش	واحد	سنگدانه‌های سرباره فولاد	سنگدانه‌های آهکی		شرح
			ASTM	AASHTO	
-	T96	درصد	حداکثر ۱۵/۸	حداکثر ۲۱/۵	سایش به روش لوس آنجلس
-	-	درصد	حداکثر ۶	حداکثر ۱۱	ضریب تورق با روش BS812
D5821	-	درصد	حداقل ۹۸	حداقل ۹۳	شکستگی در دو وجه روی الک شماره ۴
-	T85	درصد	حداکثر ۱/۴	حداکثر ۲/۲	جذب آب (مصالح درشت دانه)
-	T84	درصد	حداکثر ۱/۷	حداکثر ۲/۴	جذب آب (مصالح ریزدانه)

جهت ساخت نمونه‌های SMA با قیر پلیمری، انتخاب شده که مطابق با تجربیات گذشته از مقاومت قابل قبولی در برابر شیارافتادگی برخوردار می‌باشند. منحنی این نوع دانه‌بندی در شکل ۲ ارائه شده است.

برای دو نوع مخلوط بتن آسفالتی گرم و سرباره‌ای فولاد، از دانه‌بندی‌های پیشنهادی آیین‌نامه روسازی آسفالتی ایران (نشریه ۲۳۴) استفاده شده است و از آنجا که دانه‌بندی شماره ۴ این آیین‌نامه از رایج‌ترین دانه‌بندی‌های بکار رفته در ساخت رویه‌های آسفالتی جاده‌های کشور است، برای ساخت نمونه‌های HMA و سرباره‌ای (مخلوط آسفالتی با ۱۰۰ درصد سرباره فولاد) از حد وسط این نوع دانه‌بندی مطابق با منحنی نشان داده شده در شکل ۳ استفاده شده است.

برای مخلوط آسفالتی متخلخل نیز حد وسط دانه‌بندی شماره ۱ پیشنهادی آیین‌نامه روسازی راه‌های آسفالتی نظیر منحنی شکل ۴ انتخاب شده است.

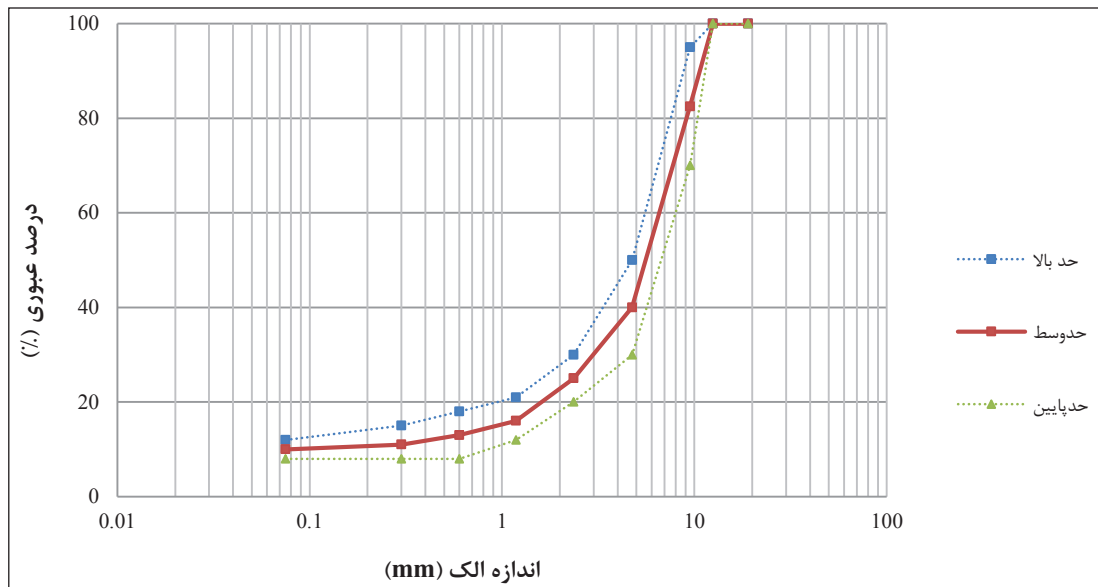
درصد پلیمر SBS استفاده شده است. دلیل استفاده از قیر پلیمری برای ساخت نمونه‌های آسفالت متخلخل و SMA، عدم پایداری این نوع مخلوط‌ها با قیر خالص و بکارگیری میزان ۴ درصد نیز استفاده بهینه و جلوگیری از افزایش بیش از حد ویسکوزیته قیر بوده است. مشخصات قیر خالص و پلیمری بکار رفته در این تحقیق در جدول ۲ ارائه شده است.

### ۲-۳ انتخاب نوع دانه‌بندی برای نمونه‌های آسفالتی مختلف

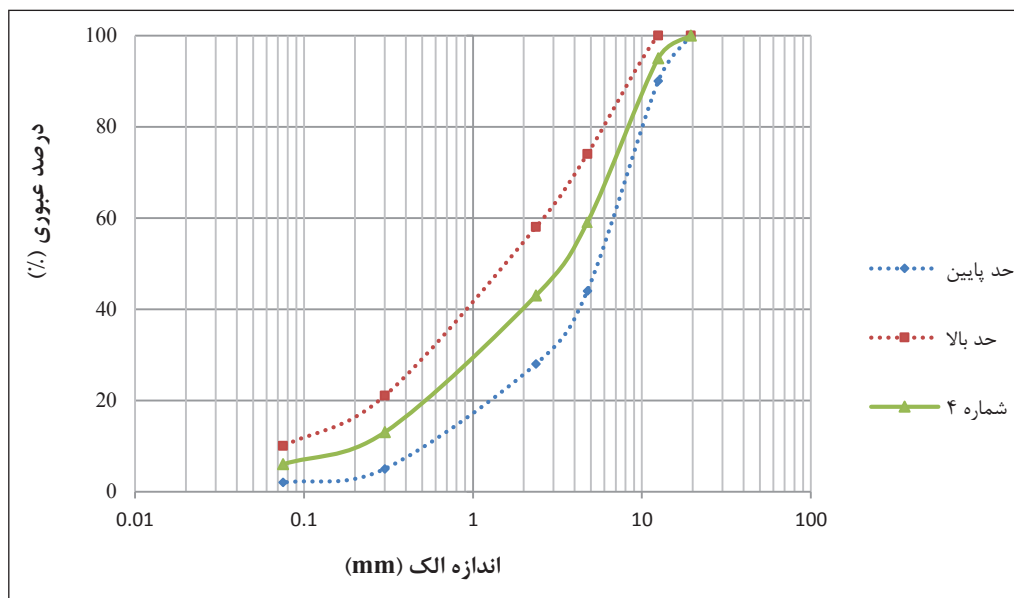
در آیین‌نامه‌ها، دانه‌بندی‌های متفاوتی برای مخلوط‌های SMA پیشنهاد شده است، که رایج‌ترین آنها دانه‌بندی‌های پیشنهادی موسسه آشتو است. در استاندارد شماره PP-41 این موسسه سه نوع دانه‌بندی با حداکثر قطر دانه‌های سنگی ۹/۵، ۱۲/۵ و ۱۹ میلی‌متر برای مخلوط آسفالتی SMA آمده است. در این تحقیق، حد وسط دانه‌بندی با بزرگ‌ترین اندازه ۹/۵ میلی‌متر

### جدول ۲. خصوصیات قیر خالص و پلیمری

روش آزمایش	قیر پلیمری	قیر ۶۰/۷۰	واحد	خصوصیات
ASTM D-70	۱/۰۱	۱/۰۳	Gr/cm <sup>3</sup>	وزن مخصوص در ۲۵ درجه سانتی‌گراد
ASTM D-5	۴۸	۶۷	دهم میلی‌متر	درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی‌گراد
ASTM D-36	۶۲	۵۳	درجه سانتی‌گراد	نقطه نرمی
ASTM D-113	۱۰۰+	۱۰۰+	سانتیمتر	انگمی در ۲۵ درجه سانتی‌گراد
ASTM D-92	۲۵۰	۳۰۴	درجه سانتی‌گراد	نقطه اشتعال



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی با بزرگترین اندازه ۹/۵ میلیمتر



شکل ۳. منحنی دانه بندی مخلوط های بتن آسفالتی گرم و سرباره‌ای

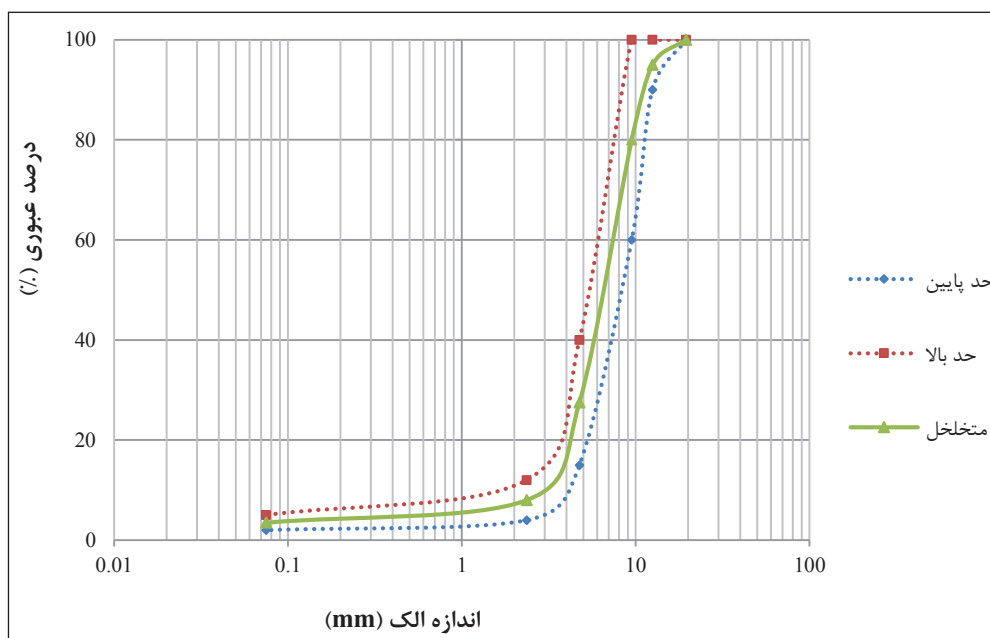
فولاد و SMA از روش طرح اختلاط مارشال مطابق با استاندارد ASTM D1559 و برای نمونه‌های آسفالت متخلخل‌های از روش طرح اختلاط کانتابرو<sup>۳</sup> استفاده شد.

در تعیین قیر بهینه برای مخلوط‌های آسفالتی سرباره‌ای و HMA معیارهای طرح اختلاط مارشال استفاده شد، ولی در مخلوط SMA به دلیل اینکه مقاومت مارشال و روانی معیار مناسبی جهت تعیین قیر بهینه برای مخلوط SMA نیستند، معیارهای

### ۳-۳ ساخت نمونه‌های آسفالتی و تعیین درصد قیر بهینه

نمونه‌های آسفالتی مورد آزمایش در این تحقیق در دو مرحله ساخته شدند. نخست، نمونه‌های آسفالتی به منظور تعیین درصد قیر بهینه چهار نوع مخلوط آسفالتی با روش‌های رایج طرح اختلاط تهیه شدند و سپس، نمونه‌های آسفالتی با قیر بهینه توسط دستگاه ژیراتوری ساخته و تحت آزمایش آونگ انگلیسی قرار گرفتند. برای تعیین درصد قیر بهینه نمونه‌های HMA، سرباره‌ای

## بررسی آزمایشگاهی تأثیر دما بر مقاومت لغزندگی انواع مخلوطهای آسفالتی



شکل ۴. منحنی دانه‌بندی آسفالت متخلخل

### ۳-۴-۱ آزمایش مارشال

در این تحقیق جهت تعیین درصد قیر بهینه نمونه‌های HMA، سرباره ای فولاد و SMA از روش طرح اختلاط مارشال مطابق با استاندارد ASTM D1559 استفاده شده است. نمونه‌های آسفالتی با درصد قیرهای مختلف و با سه نمونه از هر کدام آماده شدند. مصالح سنگی در دمای ۱۷۵ درجه سانتیگراد در حدود ۲۴ ساعت در گرمخانه گرم شدند. سپس مصالح سنگی با قیر مخلوط شده و در داخل قالب‌های از قبل گرم شده ریخته، و با چکش مارشال متراکم شدند. بعد از تعیین استحکام مارشال، وزن مخصوص، روانی، درصد فضای خالی و درصد فضای خالی مصالح سنگی نمونه‌ها، منحنی‌های مارشال ترسیم و مقدار قیر بهینه برای هر یک از مخلوطها محاسبه شد. ذکر این نکته ضروری است که به دلیل اینکه مقاومت مارشال و روانی معیار مناسبی جهت تعیین قیر بهینه برای مخلوط‌های آسفالتی SMA نیستند، معیارهای اصلی برای این مخلوط درصد فضای خالی، درصد فضای خالی مصالح سنگی و وزن مخصوص در نظر گرفته شدند.

### ۳-۴-۲ آزمایش کانتابرو

در این تحقیق جهت تعیین درصد قیر بهینه نمونه‌های بتن

اصلی درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی، درصد فضای خالی مصالح سنگی و وزن مخصوص در نظر گرفته شدند. بنابراین قیر نظیر ۴٪ فضای خالی کل مخلوط آسفالتی و وزن مخصوص حداکثر، با حداقل درصد فضای خالی مصالح سنگی ۱۷٪ به عنوان درصد قیر بهینه تعیین شد. همچنین در مورد مخلوط متخلخل معیارهای طرح اختلاط کانتابرو مورد استفاده قرار گرفت که شامل موارد زیر است:

- حداقل درصد فضای خالی نمونه‌ها ۱۸٪ باشد.

- افت وزنی نمونه‌ها در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد حداکثر ۲۰٪ باشد.

- حداکثر میزان جاری شدن قیر ۳۰٪ باشد.

### ۳-۴-۳ آزمایشها

برنامه آزمایشگاهی به دو بخش تقسیم شده است. در بخش اول با استفاده از روش مارشال و کانتابرو مقادیر قیر بهینه به دست آمد و برای هر نوع مخلوط ۹ نمونه با استفاده از دستگاه متراکم کننده چرخشی یا دستگاه ژیراتوری جهت انجام آزمایش مقاومت لغزندگی تهیه شده است. در بخش دوم آزمایش آونگ انگلیسی بر روی نمونه‌های ژیراتوری انجام شد.

پایین قوس برداشته و در حدود درصد معینی از قیر به صورت افقی در می آید. بنظر می رسد این میزان حداقل برای اطمینان از چسبندگی لازم باشد. درصد افت وزنی ۵ نمونه که از رابطه (۲) به دست می آید نباید از ۲۰ درصد بیشتر باشد.

$$P = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \quad (2)$$

که در آن،  $P$  = درصد سایش،  $P_1$  = وزن اولیه نمونه و  $P_2$  = وزن پس از سایش است. آزمایش فروریزش قیر به صورت خاص برای مخلوطهای آسفالتی متخلخل کاربرد دارد. با توجه به معیارهای استفاده شده برای تعیین قیر بهینه مخلوط ها، قیر بهینه برای مخلوطهای HMA، سرباره‌ای، SMA و متخلخل به ترتیب ۴/۷٪، ۵/۳٪، ۷٪ و ۵/۲٪ به دست آمد.

### ۳-۴-۳ آزمایش آونگ انگلیسی

در این تحقیق برای ارزیابی مقاومت لغزندگی مخلوطهای آسفالتی در دماهای مشخص، آزمایش آونگ انگلیسی بر روی نمونه‌های ساخته شده با دستگاه متراکم کننده ژیراتوری انجام گرفت. این آزمایش در استانداردهای مختلفی تشریح شده است که کاملترین آنها دستورالعمل موسسه تحقیقات راه و حمل و نقل انگلستان (TRRL) و استاندارد ASTM E-303 است. در این تحقیق

آسفالتی متخلخل از روش طرح اختلاط کانتابرو استفاده شده است. آزمایش سایش کانتابرو که توسط سه محقق اسپانیایی ابداع شده، عبارت است از آزمایش کردن نمونه های مارشال در درون دستگاه لوس آنجلس (بدون گلوله‌های فلزی) به تعداد ۳۰۰ دور با سرعت ۳۰ تا ۳۴ دور در دقیقه و در درجه حرارت ۱۸ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد. دستگاه لس آنجلس مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۵ نشان داده شده است.

در روش کانتابرو حداقل مقدار قیر بر اساس آزمایش کانتابرو (سایش) و حداکثر آن بر اساس شرط حداقل درصد فضای خالی تعیین می‌شود. حداکثر درصد جاری شدن قیر نیز به عنوان معیار کنترلی در نظر گرفته می‌شود. از معیارهای دیگری که در روش کانتابرو برای تعیین درصد قیر بهینه نمونه‌های آسفالتی متخلخل و بعنوان کنترل کننده دو معیار سایش و درصد فضای خالی مورد استفاده قرار می‌گیرد، فروریزش قیر است، که مقدار ریزش قیر در نمونه‌های آسفالتی را هنگامیکه نمونه در دماهای بالاتر از دمای تولید، ذخیره سازی، حمل و نقل و پخش مخلوط با آن مواجه می‌شود، نشان می‌دهد. فرسایش نمونه‌ها به صورت جرم از دست رفته در مقابل درصد قیر به صورت نمودار ترسیم می‌گردد. میزان فرسایش با افزایش میزان قیر کم می‌شود. منحنی به طرف



شکل ۵. دستگاه سایش لس آنجلس



## بررسی آزمایشگاهی تأثیر دما بر مقاومت لغزندگی انواع مخلوطهای آسفالتی

شد. مقادیر قیر بهینه مخلوطهای آسفالتی در شکل ۷ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود قیر بهینه مخلوط SMA دارای مقدار بیشینه است. همچنین مقدار قیر بهینه به دست آمده برای مخلوطهای سرباره‌ای و متخلخل هم از مقدار قیر بهینه مخلوط آسفالتی معمول بیشتر است. انتظار می‌رود با افزایش درصد قیر ضخامت غشای قیر بر روی سنگدانه‌های مخلوط آسفالتی افزایش یافته و باعث کاهش جزء چسبندگی نیروی اصطکاک ایجاد شده بین تاپر و سطح روسازی و در نتیجه کاهش مقاومت لغزندگی کل شود.

### ۴-۲ مقاومت لغزندگی

مقاومت لغزندگی اندازه‌گیری شده با دستگاه آونگ انگلیسی مطابق استاندارد ASTM E 303 برای نوع مخلوط آسفالتی در دمای محیط (۲۵ درجه سانتیگراد) در شکل ۸ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که مخلوط آسفالتی سرباره‌ای دارای بیشترین مقدار BPN است. مقادیر اندازه‌گیری شده مقاومت لغزندگی در مخلوط آسفالتی سرباره‌ای تا ۱۱٪ نسبت به مخلوط بتن آسفالتی افزایش پیدا کرد. دلیل این افزایش ناشی از بافت متخلخل و زبر (بافت ریز) سنگدانه‌های سرباره‌ای است. به دلیل

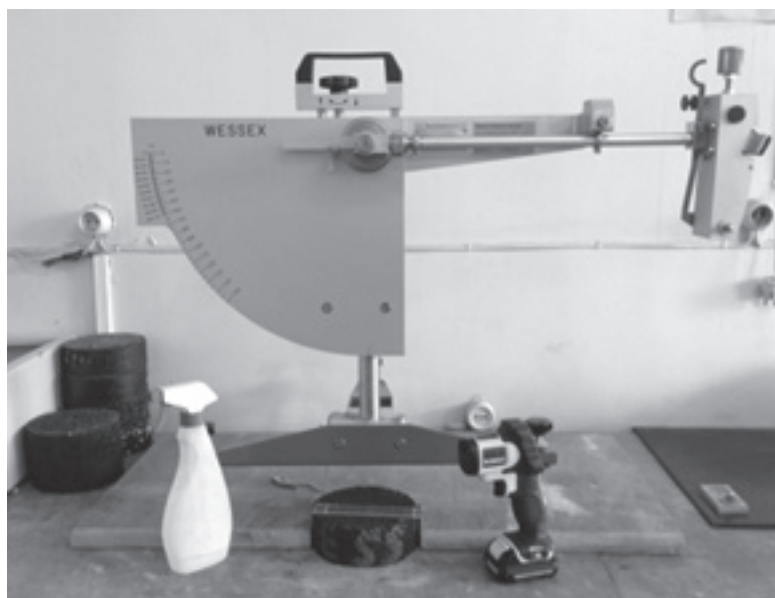
از استاندارد ASTM E-303 استفاده شده است. در شکل ۶ آونگ انگلیسی موجود در آزمایشگاه قیر و آسفالت دانشگاه علم و صنعت نشان داده شده است.

هدف اصلی این تحقیق بررسی تأثیر تغییرات درجه حرارت بر مقاومت لغزندگی مخلوطهای آسفالتی است. برای این منظور، نمونه‌ها تحت درجه حرارت‌های مختلف قرار گرفته و آزمایش آونگ انگلیسی بر روی آنها انجام شده است. نمونه‌ها قبل از انجام آزمایش آونگ انگلیسی به مدت ۲۴ ساعت تحت دماهای ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. همچنین به منظور کاهش خطا، دمای نمونه‌ها همزمان با انجام آزمایش، بوسیله تفنگ مادون قرمز اندازه‌گیری دما، اندازه‌گیری و ثبت شد. سپس با توجه به استاندارد ASTM E-303 آزمایش آونگ انگلیسی بر روی نمونه‌ها انجام گرفت و میانگین ۵ قرائت متوالی مشروط بر این که بیش از ۳ واحد با هم اختلاف نداشته باشند به عنوان BPN ثبت شد.

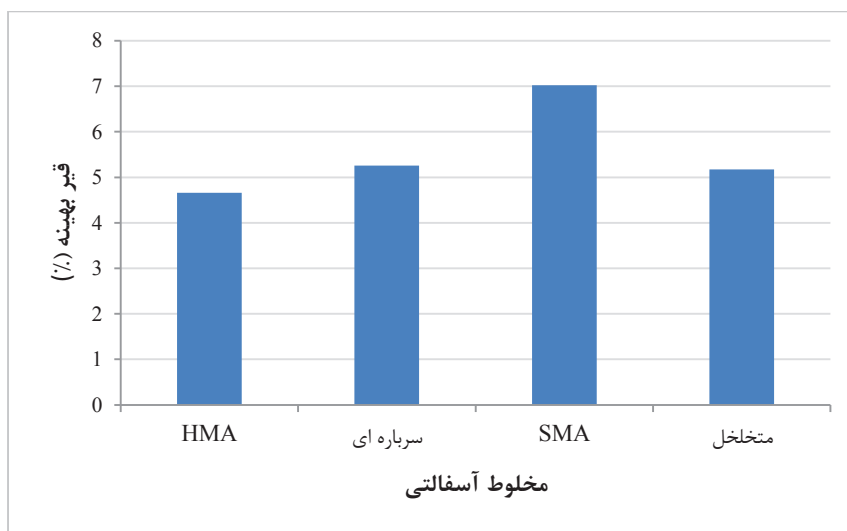
### ۴. نتایج و بحث

#### ۴-۱ قیر بهینه

برای تعیین قیر بهینه مخلوطهای HMA، سرباره‌ای و SMA از روش مارشال و برای مخلوط متخلخل از روش کانتابرو استفاده



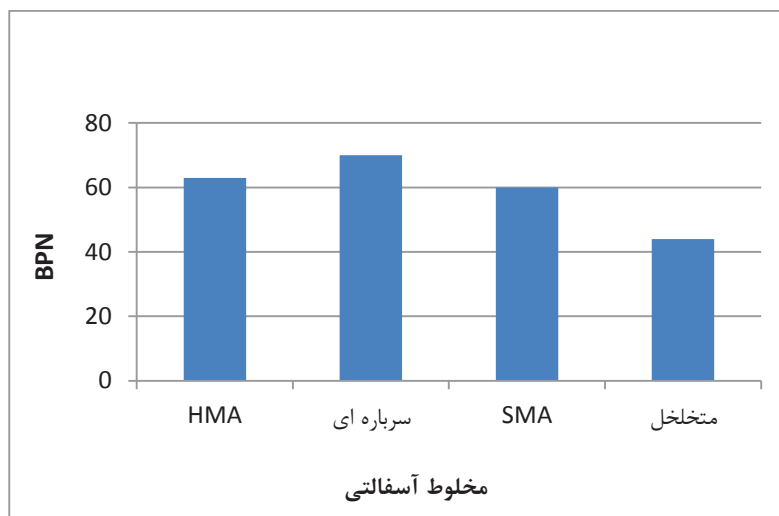
شکل ۶. دستگاه آونگ انگلیسی



شکل ۷. قیر بهینه مخلوطهای آسفالتی

BPN پایینی را نشان داده است. در مخلوط آسفالتی متخلخل به دلیل وجود ریزدانه و فیلر کمتر، مقدار قیر کمتری جذب بخش ریزدانه می‌شود و در نتیجه غشاء قیر بیشتری بر روی سنگدانه‌های موجود در سطح نمونه تشکیل می‌گردد، در نتیجه BPN پایین‌تری نسبت به مخلوط SMA به دست آمد. دلیل دیگر کم بودن BPN مخلوطهای متخلخل و SMA نسبت به مخلوط معمول و سرباره‌ای کاهش سطح تماس لاستیک آونگ با سطح مخلوطهای متخلخل و SMA نسبت به مخلوطهای معمول و سرباره‌ای است. کاهش سطح تماس باعث کاهش جزء چسبندگی نیروی اصطکاک شده و در نتیجه مقاومت لغزندگی را کاهش می‌دهد.

مقاومت سایشی بالاتر سرباره فولاد نسبت به مصالح آهکی در آزمایش لس-آنجلس، مخلوطهای آسفالتی سرباره‌ای تحت بار ترافیکی نیز قادر به حفظ مقاومت اصطکاکی خود برای مدت زمان طولانی خواهند بود. همچنین مشاهده می‌شود که BPN به دست آمده برای مخلوط SMA کمتر از مخلوطهای سرباره‌ای و HMA به دست آمده است. دلیل این امر می‌تواند ناشی از مقدار زیاد قیر (۷٪) مخلوط SMA باشد که باعث ایجاد غشاء ضخیمی از قیر بر روی سنگدانه‌های سطح نمونه شده و در نتیجه موجب کاهش BPN اندازه‌گیری شده با آونگ انگلیسی گردیده است. لازم به ذکر است که مخلوط آسفالتی متخلخل نیز به دلیلی مشابه،



شکل ۸. مقاومت لغزندگی مخلوطهای آسفالتی

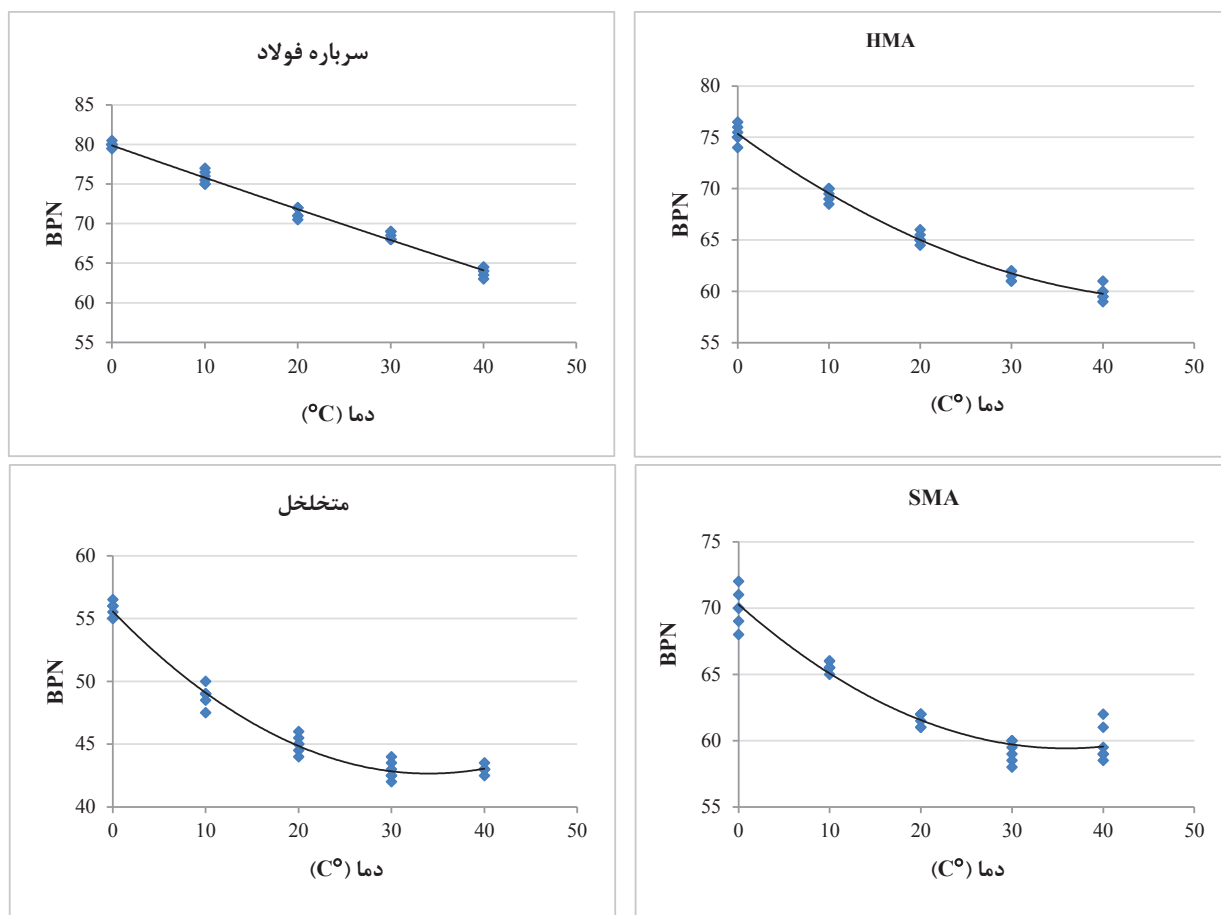
### بررسی آزمایشگاهی تأثیر دما بر مقاومت لغزندگی انواع مخلوطهای آسفالتی

تغییرات در ویسکوزیته آب موجود بر سطح نمونه باشد. این دو عامل می‌توانند بر هر دو بخش هیستریسیس و چسبندگی اصطکاک تأثیرگذار باشند. از آنجا که سطح روسازی مخلوطهای آسفالتی و لاستیک تایر وسایل نقلیه هر دو موادی ویسکوالاستیک هستند، درجه حرارت بر خصوصیات اصطکاک اندازه‌گیری شده تأثیرگذار است. سختی لاستیک بازوی آونگ انگلیسی و قیر، با افزایش درجه حرارت کاهش می‌یابد. برای یک میزان مشخص از تغییر شکل، با افزایش دما مجموع انرژی تلف شده در لاستیک در اثر تغییر شکل کاهش می‌یابد و در نتیجه جزء هیستریسیس اصطکاک کاهش می‌یابد. علاوه بر این بدلیل انعطاف‌پذیری بیشتر قیر در دماهای بالاتر، فشار تراکمی وارد شده بر سنگدانه صلب می‌تواند باعث تورفتگی‌هایی در لایه زیرین و در نتیجه کاهش ارتفاع زبری سنگدانه‌های سطح مخلوط شود. این پدیده نیز به

### ۳-۴ تأثیر تغییرات درجه حرارت بر مقدار مقاومت لغزندگی مخلوطهای آسفالتی

برای بررسی تأثیر تغییرات درجه حرارت بر مقاومت لغزندگی مخلوط HMA، سرباره‌ای SMA، و متخلخل نمونه‌های آزمایشی به مدت ۲۴ ساعت در داخل گرمخانه قرار داده شد و درجه حرارت‌های ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه سانتیگراد برای آن‌ها ثبت گردید. این نمونه‌ها در درجه حرارت‌های ثبت شده تحت آزمایش آونگ انگلیسی قرار گرفتند که نتایج حاصل از آن برای چهار مخلوط در شکل ۹ نشان داده شده است.

با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۹ می‌توان دریافت که مقاومت لغزندگی سطح روسازی در تمامی مخلوطهای آسفالتی ذکر شده با افزایش درجه حرارت کاهش یافته و روند مشابهی را نشان داده است. این تأثیر می‌تواند ناشی از تغییرات سختی قیر بعلاوه

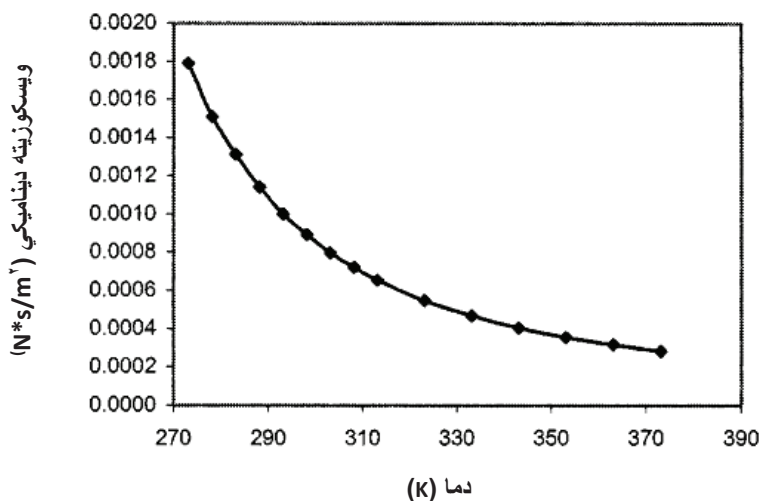


شکل ۹. تأثیر تغییرات درجه حرارت بر مقاومت لغزندگی مخلوطهای آسفالتی (روش گرمایش: گرمخانه)

یکدیگر درگیر شده و از تغییر شکل بیشتر جلوگیری می‌کنند. همچنین به علت سختی بیشتر قیر پلیمری در دماهای بالا تغییر شکل مخلوط کاهش می‌یابد که این دو موضوع باعث می‌شود تغییرات بخش هیستریسیس اصطکاک ناچیز شود و در نتیجه تغییرات BPN کاهش یابد.

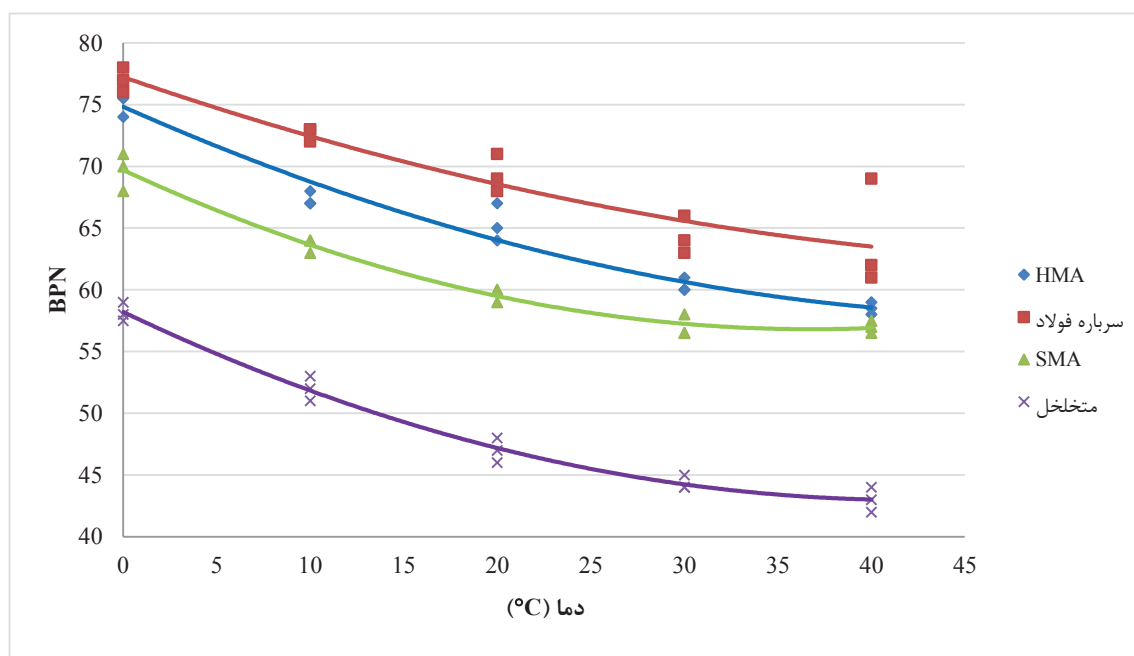
۴-۴ اثرات نوع گرمایش در تغییرات مقاومت لغزندگی برای بررسی تأثیر نوع گرمایش نمونه‌های آسفالتی در مقاومت لغزندگی، نمونه‌های HMA، سرباره‌ای، SMA و متخلخل به روش حمام آب حرارت داده شدند و در دماهای ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت لغزندگی آنها توسط آزمایش آونگ انگلیسی اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از این آزمایش برای چهار مخلوط در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که روند تغییرات مقاومت لغزندگی با افزایش درجه حرارت در تمامی مخلوط‌های آسفالتی به صورت کاهشی بوده و این روند مشابه حالت قبل یعنی گرمادهی نمونه‌ها توسط گرمخانه است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نوع روش گرمایش نمونه‌های آسفالتی در آزمایشگاه، تأثیر قابل ملاحظه‌ای در روند تغییرات مقاومت لغزندگی اندازه‌گیری شده با آونگ انگلیسی تحت تأثیر تغییرات دما ندارد.

کاهش جزء هیستریسیس اصطکاک با افزایش دما کمک می‌کند. جزء چسبندگی اصطکاک تحت تأثیر تغییرات خصوصیات هیدرودینامیکی آب با تغییر درجه حرارت قرار می‌گیرد. ویسکوزیته آب به صورت نمایی با افزایش دما، کاهش می‌یابد [Crowe et al. 2002]. رابطه نوعی بین ویسکوزیته و دمای آب در شکل ۱۰ نشان داده شده است. تنش برشی در سیالات نیوتونی از جمله آب متناسب با ویسکوزیته و نرخ زمان کرنش است. هنگامی که ویسکوزیته آب با افزایش دما کاهش می‌یابد، تنش برشی نیز کاهش می‌یابد و در نتیجه جزء چسبندگی اصطکاک کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که روند کاهش BPN مخلوط‌های HMA و سرباره‌ای تقریباً ثابت است، در حالیکه در مخلوط‌های SMA و متخلخل، ابتدا با افزایش دما شدت کاهش BPN زیاد بوده و سپس با افزایش بیشتر دما روند کاهشی BPN کند می‌شود. دلیل روند اشاره شده برای مخلوط‌های SMA و متخلخل این است که ابتدا با افزایش دما و نرم شدن قیر سنگدانه‌های موجود در این مخلوط‌ها تحت فشار تراکمی به یکدیگر نزدیک شده و ارتفاع زبری سنگدانه‌های سطح کاهش می‌یابد که این امر باعث کاهش شدید در بخش هیستریسیس نیروی اصطکاک شده و در نتیجه BPN به شدت کاهش می‌یابد. اما با افزایش بیشتر دما و جابجایی سنگدانه‌ها در درون مخلوط، سنگدانه‌ها در



شکل ۱۰. تغییر ویسکوزیته آب با دما (Crowe et al., 2002)

## بررسی آزمایشگاهی تأثیر دما بر مقاومت لغزندگی انواع مخلوطهای آسفالتی



شکل ۱۱. تأثیر تغییرات درجه حرارت بر مقاومت لغزندگی مخلوطهای آسفالتی (روش گرمایش: حمام آب)

استفاده از حمام آب در هر چهار نوع مخلوط به صورت کاهشی است. همچنین مشاهده شد که روند این تغییرات مشابه با روند تغییرات مقاومت لغزندگی تحت تأثیر درجه حرارت به روش گرمایش گرمخانه است.

- روش گرم کردن نمونه‌های آسفالتی در روند تغییرات مقاومت لغزندگی تأثیر قابل ملاحظه‌ای ندارد.

### ۵. پی نوشتها

- 1- Viscosity
- 2- Khasawneh
- 3- Kantabro
- 4- Transport and Road Research Laboratory
- 5- Viscoelastic

### ۶. مراجع

- باغبان، مهدی (۱۳۸۹) "رابطه مشخصات مخلوطهای آسفالتی با مقاومت لغزندگی روسازی راهها"، پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران.

### ۵. جمع بندی و نتیجه گیری

هدف اصلی این مقاله، بررسی و تحلیل تأثیر تغییرات درجه حرارت بر مقدار مقاومت لغزندگی مخلوطهای آسفالتی است. چهار نوع مخلوط آسفالتی با بافت سطحی متفاوت در دماهای مختلف تحت آزمایش آونگ انگلیسی قرار گرفتند و مقاومت لغزندگی آنها با تغییرات دما اندازه‌گیری و مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

- مقاومت لغزندگی سطح روسازی در تمامی مخلوطهای آسفالتی با افزایش درجه حرارت کاهش یافته و روند مشابهی را نشان داد.

- در مخلوطهای SMA و متخلخل ابتدا با افزایش دما و کاهش ارتفاع زبری سنگدانه‌های سطح مخلوط شدت کاهش BPN زیاد بوده و سپس با افزایش بیشتر دما و درگیر شدن سنگدانه‌ها در یکدیگر، روند کاهشی BPN کند می‌شود.

- پلیمر SBS در دماهای بالا باعث افزایش سختی مخلوط آسفالتی شده و از کاهش شدید بخش هیستریسیس و چسبندگی اصطکاک جلوگیری می‌کند و در نتیجه مقاومت لغزندگی را افزایش می‌دهد.

- روند تغییرات مقاومت لغزندگی با افزایش درجه حرارت با

- Luo, Y. "effect of pavement temperature on frictional properties of hot-mix-asphalt pavement surfaces at the Virginia Smart Road", Virginia, Polytechnic Institute and State University, MSc Thesis, Blacksburg, Virginia, USA, 2003
- Mitchell, J. C., Phillips, M. I. and Shah, G. N. (1986) "Report No. FHWA/MD-86/02: Seasonal variation of friction numbers", Maryland Department of Transportation (MDOT), Baltimore. 1986.
- Panagouli, O. K. and Kokkalis, A. G. (1998) "Skid resistance and fractal structure of pavement surface", Chaos, Solitons and Fractals, 9(3), pp. 493-505.
- Wang, H. and Flintsch, G. W. (2007) "Investigation of short and long-term variations of pavement surface characteristics at the Virginia Smart Road", Transportation Research Board. National Research Council, Washington, D.C., USA.
- مهریاری لیلیمی، فرهاد و قربانی، مهران (۱۳۸۵) "گزارش جهانی در خصوص پیشگیری از صدمات ناشی از تصادفات جاده ای"، وزارت راه و ترابری، معاونت آموزش و تحقیقات و فناوری، دفتر مطالعات فناوری و ایمنی، ایران.
- Bazlamit, Subhi M. and Reza, Farhad (2005) "Changes in asphalt pavement friction components and adjustment of skid number for temperature", Journal of Transportation Engineering, 131(6), pp. 470-476.
- Colony, D. C. (1992). "Influence of traffic, surface age and environment on skid number". Columbus, Ohio. Ohio Department of Transportation Project Number 14460(0) Final Rep.
- Croney, P. and Croney, D. (1998). "The design and performance of road pavements" (3rd ed.), New York: McGraw-Hill
- Crowe, Clayton T., Elger, Donald F. and Roberson, John A. (2002) "Engineering fluid mechanics" (7th ed.). New York: John Wiley and Sons.
- Dahir, S. H., Henry, J. J. and Meyer, W. E. (1979) "Seasonal skid resistance variations", Harrisburg, Pennsylvania, USA.: Pennsylvania Department of Transportation.
- Flintsch, G. W., Luo, Y. and Al-Qadi, I. L. (2005) "Analysis of the effect of pavement temperature on the frictional properties of flexible pavement surfaces", Transportation Research Board.
- Giles, C. G., Sabey, B. E. and Cardew, K. H. F. (1964) "Development and performance of the portable skid resistance tester". Road Research Technical Paper Number 66.
- Khasawneh, M. A. and Liang, R. W. (2012) "Temperature effect on frictional properties of hma at different polishing stages", Jordan Journal of Civil Engineering, 6. pp.. 39-53.
- Kummer, H. W. and Meyer, W. E. (1967) "Tentative skid-resistance requirements for main rural highways", Highway Research Board NCHRP Report.