فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۱۳، شماره ۲، زمستان ۱٤۰۰، ص. ۱۳۹۵-۱۳۸۳
مقاله علمی-پژوهشی

اصلاح خصوصیات دمای میانی و پایین قیر با پلیمر پلی بوتادین رابر

محمد وریا خورده بینان، گروه عمران، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
محمودرضا کی‌منش (مسئول مکاتبات)، استادیار، گروه عمران، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
Email: mrkeymanesh@pnu.ac.ir
شمس نوبخت، استادیار، گروه عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۱٤ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۳۰

چکیده

در این تحقیق به منظور افزایش عملکرد قیر در دمای میانی و پایین از پلیمر ضایعاتی پلی بوتادین رابر استفاده گردید. نمونه های قیر ۱۰۰-۸۵ با درصدهای ۱، ۲، ۲/۳، ۳، ٤، ۵ درصد پلیمر با استفاده از دستگاه مخلوط کن برش بالا تهیه گردید. در ابتدا آزمونهای کندروانی چرخشی، نقطه نرمی، درجه نفوذ و کشش پذیری بر روی قیر پلیمری انجام شد. نتایج اولیه تحقیق نشان داد که پلیمر پلی بوتادین رابر موجب افزایش کندروانی و نقطه نرمی و کاهش درجه نفوذ می گردد. در آزمون کشش پذیری، با افزایش مقدار پلیمر خاصیت چسبندگی قیر اصلاح شده کاهش می یابد و با درصدهای بیشتر از ۲/۳ درصد، میزان کشش پذیری کمتر از ۱۰۰ می شود. بنابراین ۲/۳ درصد به عنوان حداکثر مقدار پلیمر پلی بوتادین رابر در آزمون‌های بعدی انتخاب گردید و سپس آزمون رئومتر برش دینامیکی در دمای میانی و رئومتر تیرچه خمشی در دمای پایین برروی نمونه قیر اصلاح شده با درصدهای ۱ و ۲ و ۲/۳ انجام گردید. نتایج تحقیق نشان داد این پلیمرموجب بهبود عملکرد قیر در دمای میانی و پایین می گردد و می تواند یک درجه دمای پایین قیر را بهبود بخشد. در ادامه جهت ارزیابی نقش این پلیمر در مخلوط آسفالتی آزمون نیم دیسک خمشی در دمای پایین نیز انجام شد و نتایج آزمون مخلوط آسفالتی نشان داد که پلیمر پلی بوتادین رابر با میزان ۲/۳ درصد وزنی قیر چقرمگی شکست در دمای ۱۰- درجهٔ سانتی‌گراد را ۶۵ درصد افزایش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: قیر، پلیمر پلی بوتادین رابر، ترک‌خوردگی، دمای میانی، دمای پایین

۱. مقدمه

روسازی راه یکی از اجزای اساسی جاده‌ها محسوب می‌شود که در تأمین ایمنی و راحتی سرنشینان خودرو نقش مهمی را ایفا می‌کند. در روسازی‌ها، بارهای ترافیکی، شرایط محیطی و مصالح نامرغوب، از جمله عواملی هستند که موجب ایجاد خرابی‌هایی نظیر خستگی، شیارشدگی و عریان شدگی سنگدانه‌ها می‌گردند و در نتیجه منجر به کاهش ایمنی و راحتی مسیر می‌شود[Keymanesh et al. 2018]. تاکنون جهت افزایش عملکرد مخلوط آسفالتی روش‌های متفاوتی از قبیل اضافه نمودن فیلر به سنگدانه‌ها و افزودن پلیمرها به قیر استفاده شده است[Jamshidi and Diviandari, 2019]. ترک خوردگی دمای پایین یکی از خرابی های قابل توجه در روسازی آسفالتی است که در مناطق با آب و هوای سرد و معتدل بوجود می آید. با کاهش دما تنش های حرارتی در لایه سطحی آسفالت توسعه یافته و سپس به مقدار بحرانی خود می‌رسد که در نتیجه باعث ایجاد ترک ها خواهد شد. لذا به منظور بهبود عملکرد قیر و مخلوط آسفالت در برابر خرابی های دمای پایین، رطوبتی و ... استفاده از افزودنی های اصلاح کننده قیر در سال های اخیر متداول شده است [Teltayev et al. 2018& Ameri et al, 2019]. از طرفی دیگر اغلب مواد اصلاح کننده مقاومت قیر را در برابر تغییر شکل در دمای بالا بهبود داده اند، اما بهبود کمتری در انعطاف پذیری قیر در دمای پایین داشته‌اند. بنابراین، جهت افزایش دوام مخلوط آسفالتی و کاهش کاستیهای مربوط به قیر خام، اصلاح خواص قیر با افزودنیهایی از قبیل پلیمر یکی از گزینه های قابل بررسی است. [Laukkanen et al. 2018] تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه استفاده از انواع پودر لاستیک (صنعتی و ضایعاتی) و ترکیبات مختلف آن بر اصلاح خصوصیات قیر انجام شده است و هم اکنون استفاده از خرده لاستیک به عنوان یک راهکار موثر در بهبود خصوصیات قیر مورد توجه است. [Yang, et al. 2017] لاستیک هایی همچون استایرن بوتادین رابر (SBR) با بهبود خواص الاستیک قیر موجب بهبود مقاومت در برابر خستگی و شیارشدگی آسفالت می شوند [Yousefi, 2002 & Ameri et al. 2017] میزان ۱۰ درصد از خرده لاستیک میتواند عملکرد مشابهی در خستگی و شیارشدگی با نمونه های حاوی ۵ درصد پلیمر استایرن بوتادین استایرن داشته باشد و وجود استایرن بوتادین رابر به عنوان یکی از اصلاح کننده های قیر، موجب افزایش گرانروی، بهبود خاصیت کشسانی و افزایش خواص چسبندگی قیر می گردد. [Zhang, 2013] استفاده از نانو لوله کربنی به میزان ۵ درصد وزن قیر و نانو رس به مقدار ۰/۵ درصد وزن قیر موجب کاهش سختی و افزایش نرخ خزش در دمای -٦ تا -٢٤ می‌گردد و این موضوع می‌تواند ترک خوردگی دمای پایین قیر را کاهش دهد [Tsantilis et al. 2018]. با افزایش مقدار پلیمر SBS از ۲/۵ درصد تا ٦ درصد (وزن قیر) سختی خزشی کاهش و نرخ خزشی افزایش می‌یابد، بنابراین پلیمر SBS موجب کاهش ترک های دمای پایین شده و در ترکیب SBS به میزان ٤/٥ درصد وزنی قیر با نانوسیلیس تا میزان ٤ درصد وزنی قیر موجب افزایش مقاومت قیر در دمای پایین می‌گردد[Rezaei, 2016]. هدف از این تحقیق بررسی عملکرد دمای میانی و پایین قیر اصلاح شده با پلیمر پلی بوتادین رابر ضایعاتی است جهت دستیابی به خصوصیات قیر اصلاح شده آزمایشهای رایج کلاسیک و شارپ روی نمونه ها انجام و نتایج تحلیل و بررسی شد. در پایان جهت ارزیابی مقاومت نمونه مخلوط آسفالتی در دمای پایین آزمون نیم دیسک خمشی انجام گردید.

۲. روش تحقیق

۲-۱ مواد و مصالح

انتخاب قیر مورد استفاده در پروژه ها متأثر از دمای محیط است و از قیرهای خالص با درجهٔ نفوذ ۱۰۰-۸۵ برای مناطق سردسیر و با درجهٔ نفوذ ٦۰/۷۰ برای مناطق معتدل و گرم استفاده می‌شود[Iran Code of Practice for Pavements,

2011]. در این پروژه از قیر ۱۰۰-۸۵ (PG58-22) پالایشگاه تهران استفاده شد.

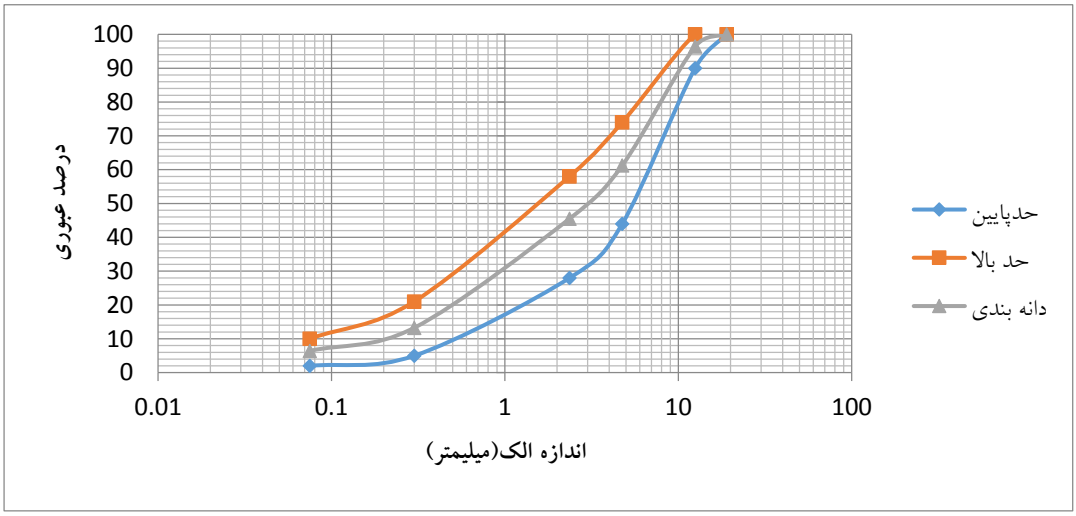
پلیمر پلی بوتادین رابر یک لاستیک مصنوعی غیر قطبی است که از پلیمرازیسیون ۱ واحد منومر و ۳ واحد بوتادین تشکیل شده است. پلی بوتادین رابر دارای مقاومت بالا در برابر سایش است و به ویژه در تولید انواع لاستیک استفاده میشود که حدود ۷۰ درصد از تولید این پلیمر را مصرف میکند. پلی بوتادین رابر حدود یک چهارم کل مصرف جهانی لاستیک مصنوعی را در سال ۲۰۱۲ به خود اختصاص داده است. بوتادین موجود در این پلیمر با پخش شدن در ذرات قیر، الاستیسیته آنرا افزایش و ویسکوزیته را کاهش می دهد [Rossmann, 2007] پلیمر مصرفی در این تحقیق پلی بوتادین رابر از نوع ساختار مولکولی خطی با نام تجاری(PBR 1220) می باشد و از پالایشگاه شازند تهیه گردید.

مصالح سنگی در مخلوط‌های آسفالتی نقش استخوان بندی سازه مخلوط را دارند. مصالح سنگی مورد استفاده در این پژوهش از نوع مصالح آهکی دولومیتی با دانه بندی شکل۱ تعیین گردید. دانه بندی مصالح مطابق با منحنی شماره ٤ نشریه ۲۳٤ برای آستر و رویه تعیین گردید [Iran Code of Practice for Pavements, 2011].

۲-۲ تهیه نمونه

به منظور تهیه ترکیبات دوگانه قیر و پلی بوتادین رابر از مخلوط کن برش بالا و مجهز به ترموکوپل استفاده شد. در این تحقیق پلیمر پلی بوتادین رابر با مقدار ۱، ۲، ۲/۳، ۳، ٤ و ۵ درصد وزنی قیر استفاده گردید. بر همین اساس، برای تهیه نمونه‌های ترکیبی قیر ۱۰۰-۸۵ و پلیمر، ابتدا قیر تا دمای ۱۷٦ درجهٔ سانتی‌گراد داغ شد. سپس با حفظ این دما، پلیمر اندک اندک در حین چرخش مخلوط کن مکانیکی به قیر اضافه شد تا در ظاهر قیر و پلیمر به خوبی مخلوط شدند. آنگاه ترکیب قیر و پلیمر در مخلوط کن برش بالا با سرعت ٤۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت دو ساعت به صورت کامل مخلوط گردید [Rezaei et al. 2016].

طرح اختلاط نمونه‌های آسفالتی ساخته شده بر مبنای دستور العمل ASTM D1559 و با روش مارشال انجام گرفت. برای تعیین میزان قیر بهینه، مصالح سنگدانه‌ای در دمای ۱٦۵ درجه سانتیگراد با ٤، ٤/۵، ۵ و ۵/۵ درصد قیر مخلوط و جهت تراکم برای ترافیک بالا به هر طرف نمونه‌ها با استفاده از چکش مارشال ۷۵ ضربه کوبیده شد. میزان قیر بهینه به مقدار ۵ درصد وزن مخلوط بر اساس معیارهای حداکثر وزن مخصوص، حداکثر مقاومت فشاری، درصد فضای خالی نمونه متراکم شده و میزان روانی بدست آمد. پس از یافتن قیر بهینه، نمونه‌های مورد نیاز جهت انجام آزمون خمش نیم دیسک در دمای پایین به دو نیم تقسیم شدند و در آنها با استفاده از تیغهٔ سنگبری ۱/۵ میلی‌متری ترک ایجاد شد.



شکل ۱. منحنی دانه بندی مصالح

جدول ۱. مشخصات قیر پایه و پلیمر

PBR ضایعاتی		قیر ۱۰۰-۸۵	
مشخصات	مقدار	ترکیبات	درصد وزنی (٪)
مقدار CIS (درصد وزنی)	>۹۷٪		
مقدار خاکستر (درصد وزنی)	<٪ ۰/۳	آسفالتین‌ها	۱۰/۷
مقدار مواد فرار (درصد وزنی)	<٪ ۰/۵	اشباع‌ها	۱۳/۸
استحکام کششی در ۳۵ دقیقه (Kgf/cm3)	>۱۵۰	آروماتیک قطبی	۳٤/۵
کرنش نقطهٔ شکست در ۳۵ دقیقه (٪)	>٤٤۰	نفتن-آروماتیک	٤۱

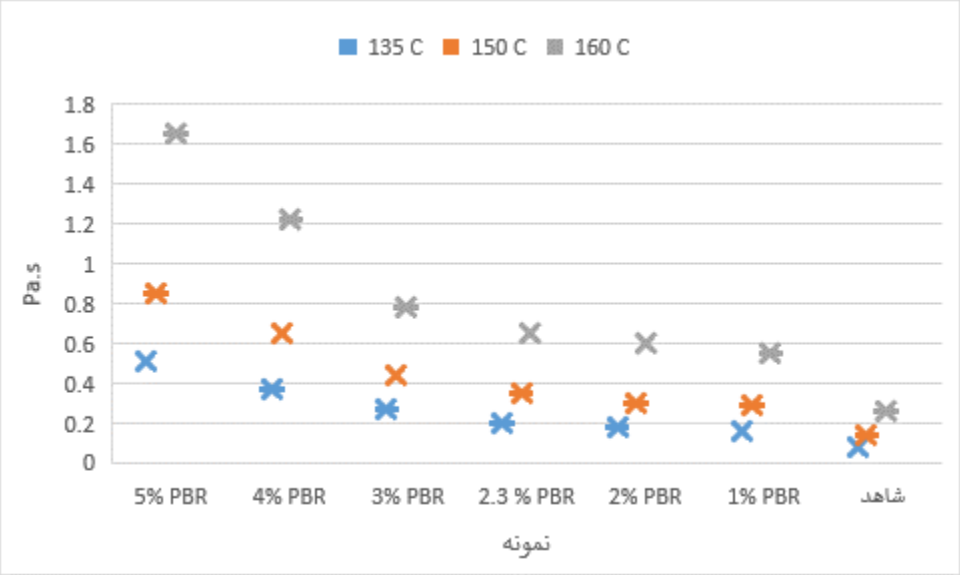
جدول ۲. مشخصات مصالح سنگی

مصالح	آزمایش		نتایج
مصالح سنگی درشت‌دانه (شن بادامی و شن نخودی)	شکستگی مصالح سنگی (ASTM D5821)	در یک جبهه	۹۸ درصد
		در دو جبهه	۹۵ درصد
	افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (AASHTO T104)		۰/٦۸ درصد
	تطویل و تورق (BS 812)		۱۳ درصد
	افت وزنی در مقابل سایش به روش لوس انجلس (AASHTO T96)		۱٦ درصد
	درصد جذب آب		۲/۲ درصد
مصالح سنگی ریزدانه (ماسه)	حدود آتربرگ (AASHTO T89,90)	دامنهٔ خمیری (PI)	NP
	افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (AASHTO T104)		۲/۵ درصد
	ارزش ماسه‌ای مصالح ریزدانه (AASHTO T176)		۸۱ درصد
	درصد جذب آب		۲/۷ درصد
فیلر مصالح سنگی	حدود آتربرگ (AASHTO T89,90)	دامنهٔ خمیری (PI)	NP

۳. تحلیل نتایج

۳-۱ خصوصیات فیزیکی

آزمون ویسکومتر دورانی بر مبنای استاندارد AASHTO T 316 در دمای ۱۳۵ درجه، ۱۵۰ درجه و ۱۶۰ درجه سانتیگراد انجام گرفت. نتایج این آزمون در شکل ۲ نشان داده شده است. مطابق با شکل ۲ با افزایش مقدار پلیمر، ویسکوزیته ترکیب قیر با پلی بوتادین رابر افزایش می یابد. در مقدار پلیمر ۵ درصد به دلیل غالب شدن مقدار رابر موجود در پلیمر نسبت به قیر، ویسکوزیته دورانی در دمای ۱۳۵ درجه و ۱۵۰ درجه و ۱۶۰ درجه ، به ترتیب ۶۳۷ و ۶۰۷ و ۶۳۴ درصد افزایش می‌یابد. طبق آئین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران [Iran Code of Practice for Pavements, 2011] مقدار ویسکوزیته دورانی در دمای ۱۳۵ درجه بایستی کمتر از ۳ پاسکال ثانیه باشد که در همه ترکیب‌ها این معیار برآورده می گردد. آزمون‌های درجه نفوذ (ASTM D5) در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد، نقطه نرمی (ASTM D36)، کشش‌پذیری (ASTM D113) در ۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد بر روی نمونه‌های قیر خالص و اصلاح شده با PBR صورت پذیرفت. نتایج این آزمون‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است.



شکل۲. ویسکوزیته دورانی در دمای ۱۳۵ و ۱۵۰ و ۱۶۰ درجه سانتیگراد

جدول ۳. مشخصات فیزیکی قیر پایه و اصلاح شده

نام آزمون	قیر خالص	1% PBR	2% PBR	2.3% PBR	2.4% PBR	2.5% PBR	3% PBR	4% PBR	5% PBR
نقطه نرمی(سانتیگراد)	٤٩	٥٠/٦	٥١/٤	٥١/٨	–	–	٥٢/٤	٥٤	٥٤/٧
درجه نفوذ (دهم میلیمتر)	٨٩	٨٦	٨٥	٨٣	–	–	٨٢	٨١	٨٠
شاخص نفوذ(PI)	٠/٠٤٤	٠/٣٧٤	٠/٥٤٨	٠/٦١٥	–	–	٠/٧٣١	١/٠٨٨	١/١٧٩
کشش پذیری(سانتیمتر)	>١٠٠	>١٠٠	>١٠٠	>١٠٠	٩٨	٩٢	٨٥	٥٥	٣٦

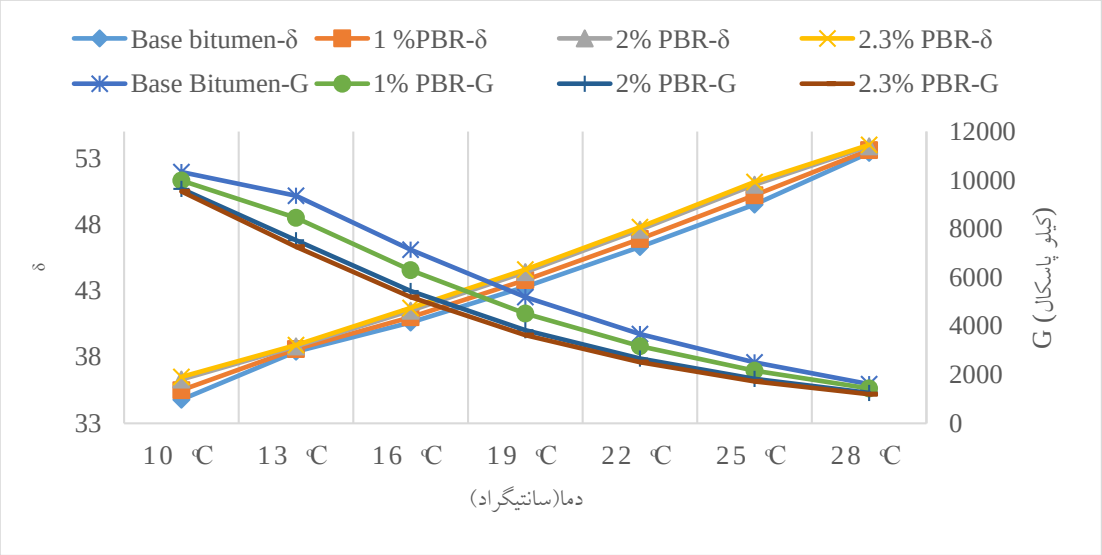
همانطور که مشاهده می‌گردد با افزودن PBR ضایعاتی به قیر، درجه نفوذ کاهش و نقطهٔ نرمی افزایش می‌یابد. کاهش درجهٔ نفوذ و افزایش نقطه نرمی منجر به کاهش حساسیت قیر به تغییرات دمایی، بهبود عملکرد آن در دمای بالا و افزایش مقاومت قیر در برابر تغییر شکل‌های ماندگار (شیارشدگی) می‌شود [Rezaei et al. 2016]. شاخص نفوذ نشانه‌ای از حساسیت قیر نسبت به درجهٔ حرارت است. همانطور که مشاهده می‌گردد شاخص نفوذ برای قیر خالص ۰/۰٤ است که با افزایش مقدار پلیمر پلی بوتادین رابر به قیر خالص شاخص نفوذ افزایش می یابد. چسبندگی قیر به مصالح سنگی نقش مهمی در افزایش مقاومت مخلوط و کاهش خرابی عریان شدگی دارد. برای تعیین میزان چسبندگی قیرها، مقدار قابلیت کشش‌پذیری اندازه گیری میشود زیرا که هر اندازه قیری چسبنده‌تر باشد، دارای قابلیت کشش‌پذیری بیشتری خواهد بود. طبق نشریه ۲۳٤ مقدار کشش‌پذیری در دمای ۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد باید بیش از ۱۰۰ سانتی‌متر باشد. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌گردد از مقدار پلیمر برابر ۲/۳ درصد به بعد کشش‌پذیری، مقدار استاندارد آئین‌نامه روسازی آسفالتی راه های ایران [Iran Code of Practice for Pavements, 2011]را برآورده نمی‌کند و مقدار آن کمتر از ۱۰۰ است. بنابراین حداکثر مقدار پلیمر پلی بوتادین رابر به ۲/۳درصد محدود می گردد.

۳-۲ رئومتر برش دینامیکی

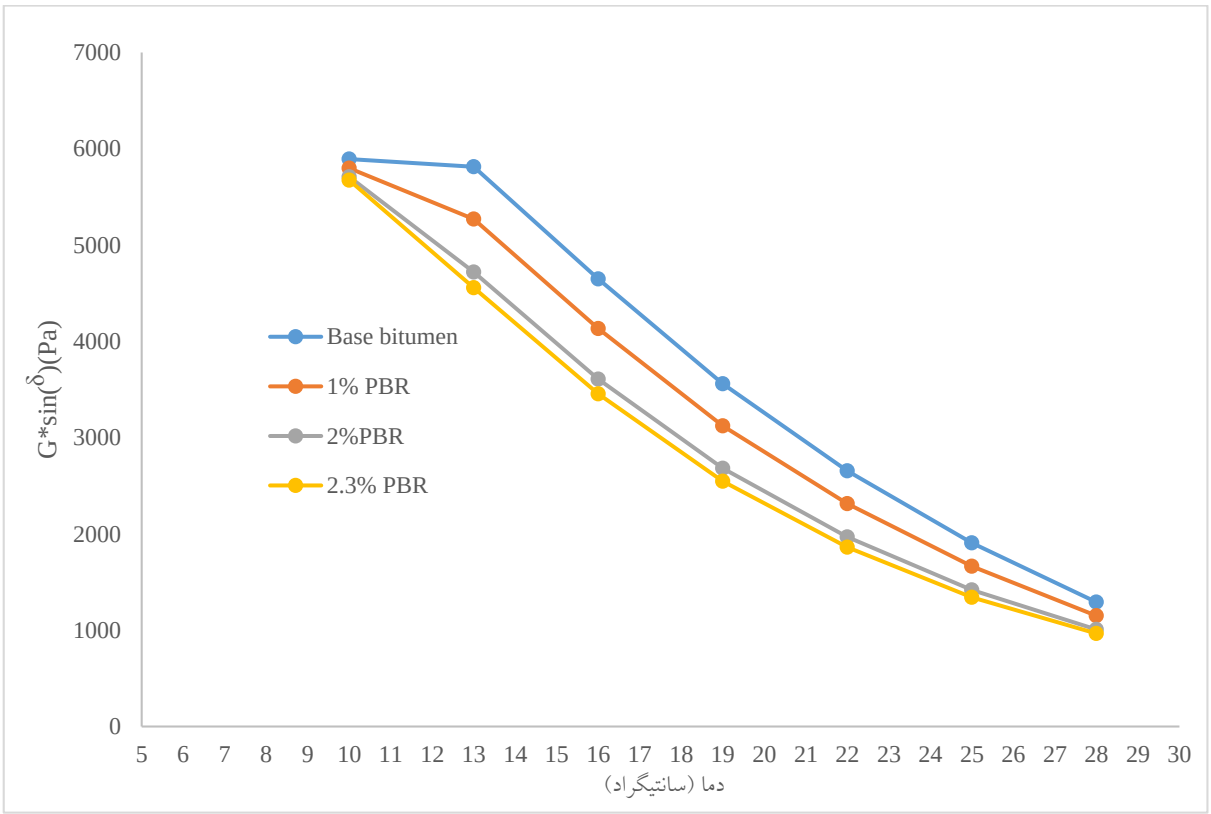
قیر دارای رفتار رئولوژیکی منحصر بفرد بوده و رفتار آن براساس دما و زمان بارگذاری، از ویسکوز تا الاستیک تغییر میکند و در دمای پایین و سرعت بارگذاری کم بصورت جامد الاستیک و در دمای بالا و زمان بارگذاری زیاد بصورت سیال ویسکوز عمل می کند. به منظور اندازه‌گیری ویژگی‌های ویسکوالاستیک و رئولوژی قیرها از آزمون رئومتر برش دینامیکی مطابق استاندارد ASTM D7175 استفاده می‌شود. در این آزمون مدول مختلط (*G) و زاویه فاز(δ) اندازه گیری می‌شود [Anderson et al. 1994]. جهت بررسی خرابی قیر در دمای میانی، این آزمون در دمای ۱۰، ۱۳، ۱٦، ۱۹، ۲۲، ۲۵ و ۲۸ درجه سانتیگراد و با فرکانس ۱،۵۹ هرتز بر روی نمونه‌های پیر شده کوتاه مدت بعلاوهٔ بلند مدت انجام شد. در اینجا پیرشدگی کوتاه مدت و بلند مدت نمونه‌های قیر به ترتیب مطابق با استاندارد ASTM D2872 و ASTM D6521 انجام گرفت. در شکل ۳ تغییرات مقادیر مدول مختلط (*G) و زاویه فاز(δ) در یک نمودار نمایش داده شده است.

با توجه به شکل (۳) در دمای میانی با افزودن PBR زاویه فاز افزایش و مدول مختلط کاهش می‌یابد. نکته حایز اهمیت این است که تاثیر این پلیمر در کاهش مدول مختلط بیش از افزایش زاویه فاز است، به عنوان مثال در دمای ۱۹ درجه سانتیگراد ۱ درصد پلیمر ۱۹ درصد مدول مختلط را کاهش و ۲ درصد زاویه فاز را افزایش می‌دهد.

با افزایش تعداد ترافیک عبوری از روی روسازی، مهمترین خرابی در دمای میانی خستگی است. کیفیت قیر در مخلوط آسفالتی نقش تعیین کننده‌ای در ایجاد و گسترش ترک های خستگی دارد. [Marasteanu et al. 2004] پارامتر G*.sinδ معیاری برای ترک‌های خستگی قیر تعریف می گردد. هر چه مقدار این پارامتر بیشتر باشد، مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر پدیده خستگی و ترک خوردگی در دمای میانی کمتر می‌گردد [Anderson et al. 1994]. در شکل ٤ تغییرات G*.sinδ نمایش داده شده است.



شکل ۳. زاویه فاز قیر پایه و قیر اصلاح شده با پلیمر پلی بوتادین رابر برای قیر پیر شده بلند مدت



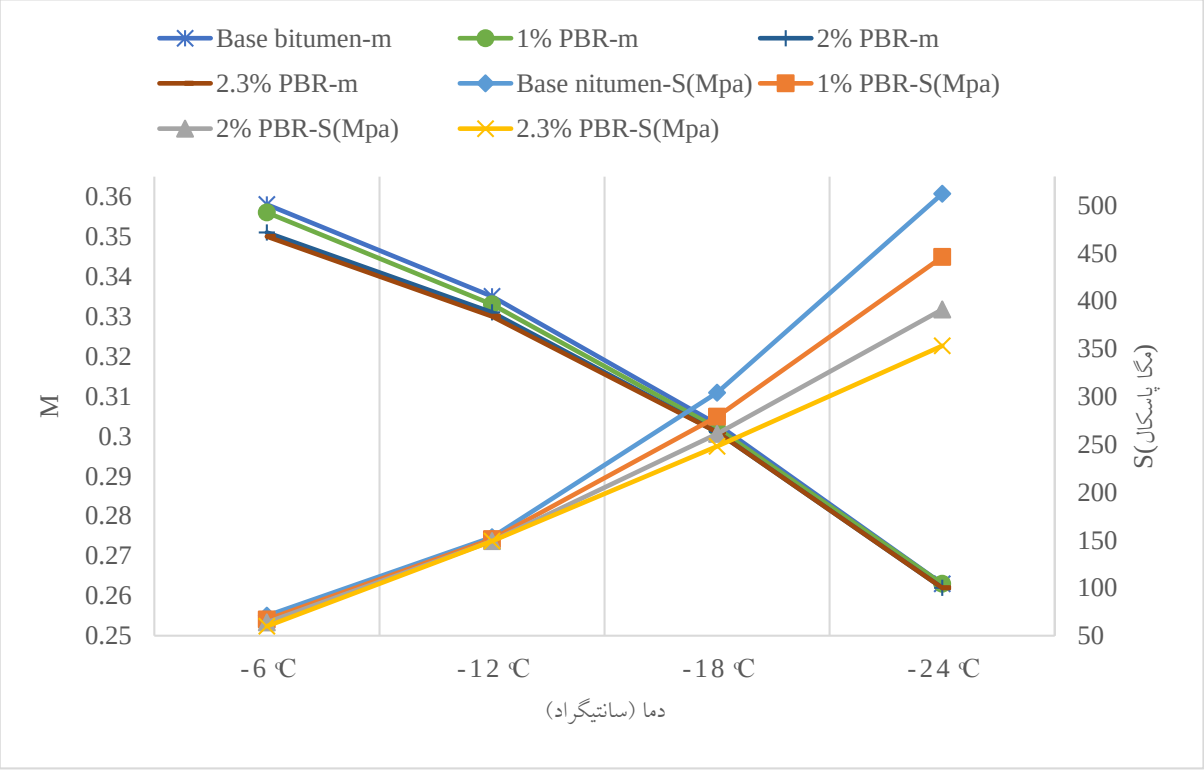
شکل ٤. تغییرات G*.sinδ قیر پایه و اصلاح شده پیر شده بلند مدت در دمای میانی

به دلیل قرار گیری ذرات پلی بوتادین رابر در میان ذرات قیر و تشکیل شبکه‌های سه بعدی پلیمری با افزایش مقدار پلی بوتادین رابر به قیر خالص مقاومت در برابر ترک خوردگی در دمای میانی افزایش می‌یابد. در دمای ۱۶ درجه سانتیگراد با افزودن ۲/۳ درصد پلیمر، مقدار G*.sinδ نسبت به قیر خالص ۲۶ درصد کاهش می یابد. مطابق با آئین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران مقدار G*.sinδ برای قیر پیر شده بلند مدت باید کمتر از ۵۰۰۰ کیلوپاسکال باشد[Iran Code of Practice

for Pavements, 2011] . با توجه به شکل ٤ در دمای ۱۳ درجه سانتیگراد، ترکیب قیر خالص با ۲ و ۲/۳ درصد پلیمر می‌تواند این معیار را برآورده سازد ولی مقدار $G^*.\sin\delta$ برای قیر خالص ۵۸۱۳ کیلوپاسکال بدست آمد که نمی‌تواند معیار فوق را ارضا نماید. با افزایش دمای آزمایش از ۱۳ درجه سانتیگراد، بدلیل کاهش مدول مختلط مقدار $G^*.\sin\delta$ برای همه ترکیب‌ها کمتر از ۵۰۰۰ کیلوپاسکال حاصل گردید.

۳-۳ رئومتر تیرچه خمشی

هنگامی که دمای سطح روسازی کاهش می یابد، مخلوط های آسفالتی در لایه رویه منقبض می شود. از آنجا که اصطکاک با لایه زیرین روسازی مانع جابجایی لایه آسفالتی می‌شود، تنش های کششی در سطح روسازی بوجود می‌آید. هنگامی که این تنش‌ها از مقاومت کششی مخلوط آسفالتی بیشتر شود، ترک‌های دمای پایین شروع می شود. در آزمایش رئومتر تیرچه خمشی مطابق استاندارد AASHTO T 313 یک بار خزشی کوچک به نمونه تیرچه قیر اعمال می شود و سفتی خزشی قیر تعیین می گردد. اگر سفتی خزشی خیلی زیاد باشد، قیر رفتار شکننده و ترد خواهد داشت که احتمال وقوع ترک های دمای پایین زیاد است. در شکل ۵ نتایج آزمون رئومتر تیرچه خمشی برای ترکیبات قیر و پلیمر PBR پیر شده بلند مدت نشان داده شده است.

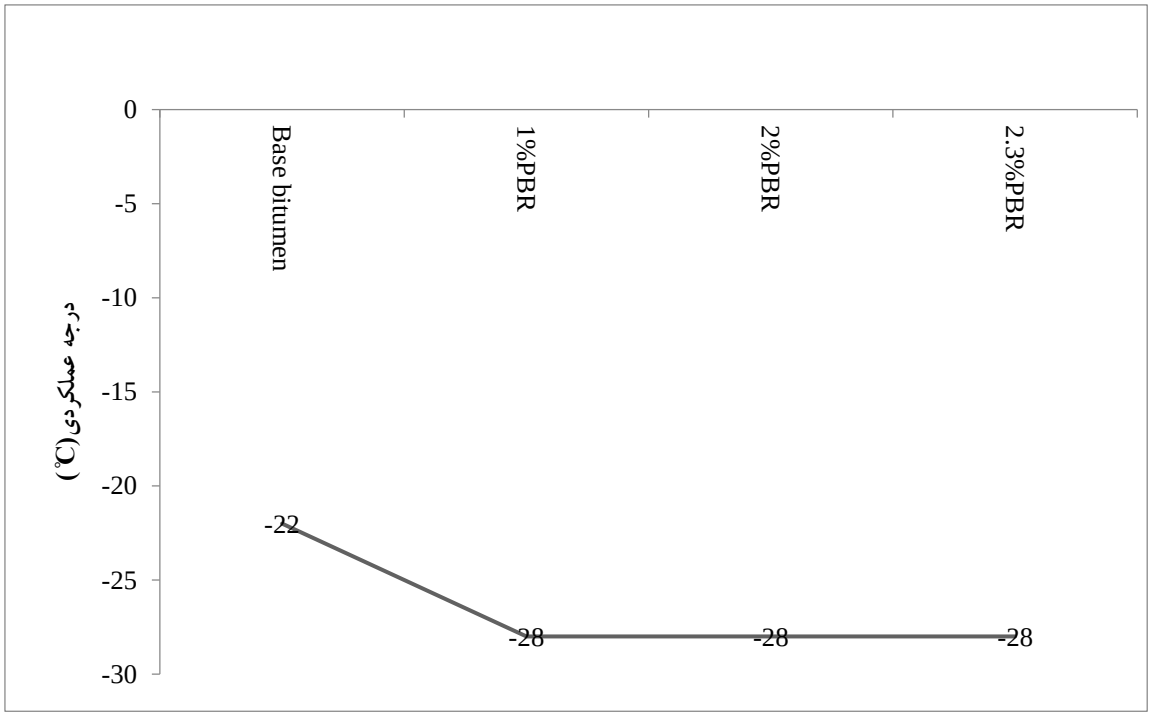


شکل ۵. سفتی خزشی و شیب منحنی سفتی خزشی قیر خالص و اصلاح شده در دمای پایین

رابر موجود در پلیمر پلی بوتادین رابر با پراکنده شدن و قرار گرفتن در میان ذرات قیر، پیوند بین آنها را مستحکم تر می کند. بنابراین این پلیمر در دمای پایین می تواند کشش‌پذیری قیر را افزایش دهد و موجب افزایش مقاومت قیر در برابر ترک خوردگی در دمای پایین می‌گردد. با توجه به شکل ۵ با افزایش مقدار پلیمر سفتی خزشی کاهش و شیب منحنی خزشی افزایش می‌یابد. مطابق با آئین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران [Iran Code of Practice for Pavements, 2011]، برای جلوگیری از بوجود آمدن ترک در دمای پایین سفتی خزشی باید کمتر از ۳۰۰ مگا پاسکال و شیب منحنی

خزشی در برابر زمان پس از گذشت ٦٠ ثانیه باید بیش از ۰,۳ باشد. در دمای ۱۸- درجه سانتیگراد، مقدار سفتی خزشی قیر خالص بیش از ۳۰۰ مگاپاسکال و شیب منحنی خزش کمتر از ۰,۳ بدست آمد ولی با افزودن ۱ درصد پلیمر پلی بوتادین رابر سفتی خزشی به ۲۹۱ کاهش و شیب منحنی خزش به ۰,۳۰۳ افزایش می‌یابد.

با توجه به نتایج آزمون رئومتر برشی و تیرچه خمشی افزودن پلیمر PBR می تواند یک درجه گرید عملکردی دمای پایین قیر را بهبود ببخشد. در شکل (٦) تغییرات درجه عملکردی قیر خالص و اصلاح شده در دمای پایین نشان داده شده است.



شکل٦. درجه عملکردی قیر خالص و اصلاح شده در دمای پایین

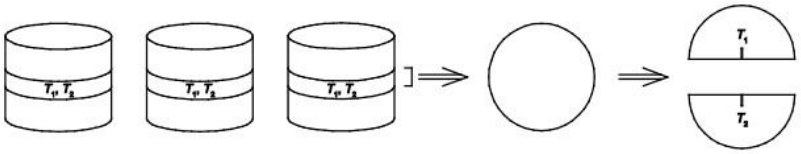
٤-۳ نیم دیسک خمشی

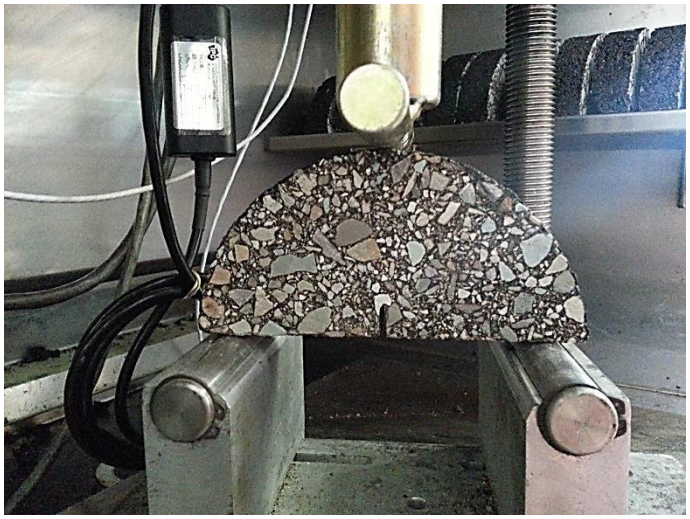
به منظور تعیین عملکرد دمای پایین مخلوط آسفالتی از آزمون مکانیک شکست نیم‌دیسک خمشی (SCB) با کمک دستگاه UTM استفاده شد. این آزمون معیاری مناسب برای ارزیابی مقاومت نمونه‌های ساخته شده با قیر خالص و قیر پلیمری است. همهٔ نمونه‌ها در دمای ۱۰- درجهٔ سانتی‌گراد مورد آزمایش قرار گرفتند. نمونه‌ها وضعیت غیر اشباع دارند. با استفاده از دستگاه UTM مقادیر بار در برابر جابه‌جایی خطی بار نمونه‌های نیم‌دیسک خمشی تعیین شد. به عبارتی نمودار جابه‌جایی قائم فک بارگذاری در مقابل بار ترسیم گردید و سطح زیر نمودار آن به عنوان مقاومت در شکست در دمای پایین ثبت شد. این آزمایش طبق استاندارد AASHTO TP 105-13 صورت پذیرفت. مطابق این استاندارد ابتدا قطر (D) و ضخامت (t) هر آزمونه با دقت ۰/۵ میلی‌متر و وزن خشک با دقت ۰/۱ گرم تعیین گردید.

طبق آزمون مکانیک شکست نیم‌دیسک خمشی (SCB) استاندارد AASHTO TP 105-13، نمونه‌های آسفالتی با قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر درصد ساخته شدند. سپس طبق شکل ۷ با کمک دستگاه برش، نمونه‌های SCB به قطر ۱۵ سانتی‌متر و ضخامت ۲/۵ سانتی‌متر با ترک مرکزی به طول ۱/۵ سانتی‌متر و عرض ۱/۵ میلی‌متر ساخته شد. در این

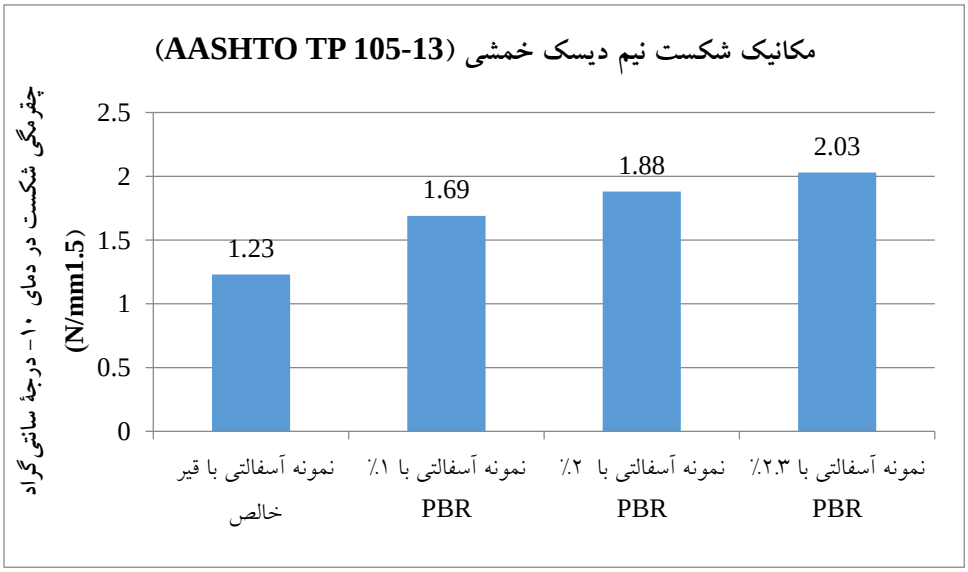
آزمون بار به میزان 0.6 kN با نرخ جابه‌جایی خطی بار 0.005 mm/s وارد شد و مقاومت شکست نمونه‌ها اندازه گیری گردید. در شکل (۸) مقاومت ترکیب‌های مختلف تحقیق نمایش داده شده است.

با توجه به شکل (۸) با افزایش مقدار پلیمر مقاومت مخلوط در برابر بار اعمال شده در دمای پایین افزایش یافته است. رابر موجود در این پلیمر چسبندگی مناسبی بین ذرات قیر برقرار می‌کند و موجب افزایش دوام و استحکام نمونه‌ها می‌شود و در اثر کاهش دما پیوند بین ذرات قیر با اعمال نیروی بیشتری شکسته می‌شود.





شکل ۷. نمونه‌های SCB در آزمون مکانیک شکست نیم‌دیسک خمشی



شکل ۸ چقرمگی شکست نمونه‌ها در آزمون مکانیک شکست نیم‌دیسک خمشی

٤. نتیجه‌گیری

مطالعه حاضـــر به بررســـی اثر پلیمر پلی بوتادین رابر بر قیر با اســـتفاده از آزمون‌های ویســـکوزیته، نقطه نرمی، درجه نفوذ، کشش پذیری و رئومتر برش دینامیکی و رئومتر تیرچه خمشی، می‌پردازد. نتـایج این تحقیق نشـــان داد کـه افزودن پلیمر پلی بوتادین رابر موجب افزایش ویســکوزیته قیر می‌گردد. همچنین با افزایش مقدار پلیمر پلی بوتادین رابر کشش‌پذیری قیر اصلاح شـده کاهش می‌یابد و چنانچه مقدار پلیمر از ۲/۳ درصد فراتر رود، میزان کشـــش پـذیری کمتر از ۱۰۰ ســـانتیمتر می‌گردد. بنابراین حداکثر مقدار مجاز اسـتفاده از این پلیمر به ۲/۳ درصد محدود شـد. نتایج حاصل از آزمون رئومتر برشی دینامیکی در دمای میانی نشـان داد که افزودن ۲/۳ درصـد پلی بوتادین رابر موجـب افزایشِ مقـاومـت قیر اصـــلاح شـــده در برابر پدیده ترک‌هـای خســـتگی می‌گردد. پلیمر PBR تـاثیر مهمی در افزایش مقاومت قیر در برابر ترک خوردگی در دمای پایین دارد و بـا توجـه به نتایج آزمون رئومتر تیرچه خمشـــی، پلیمر پلی بوتـادین رابر یـک درجـه دمـای پـایین قیر خـالص را بهبود می‌بخشـد. در خاتمه آزمون نیم دیسـک خمشی در دمای ۱۰- درجه سانتیگراد انجام شد و نتایج این آزمون نشان داد که پلیمر پلی بوتـادین رابر در افزایش مقاومت مخلوط تأثیر بیش از ٦۰ درصدی دارد.

٥. منابع

- امیری، ح.، گلچین، ب.،(۱۳۹۸) "بررسی اثر افزودنی پلی پروپیلن بر روی مشخصات خرابی رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره دهم، شماره سوم، ص.۵۸۱-۵٦۷.

- جمشیدی، ا.، دیواندری، ح.، (۱۳۹۸) "ارزیابی تاثیر گیلسونایت بر بهبود خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره یازدهم، شماره اول، ص.۱٦۲-۱٤٥.

- کی‌منش، م.، میرشکاریان بابکی، م.، شهریاری، ن (۱۳۹٦) " ارایه مدل ریاضی خصوصیات مکانیکی مخلوط های کف قیری اصلاح شده با سیمان "، مهندسی زیرساخت حمل و نقل، دوره سوم، شماره سوم.

- معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری (۱۳۹۰) "آیین نامه روسازی راه های آسفالتی ایران"، نشریه شماره ۲۳٤، وزارت راه و شهرسازی، پژوهشکده حمل و نقل، موسسه قیر آسفالت. تجدید نظر اول.

- Ameri, M., Reza Seif, M., Abbasi, M. and Khavandi Khiavi, A. (2017) "Viscoelastic fatigue resistance of asphalt binders modified with crumb rubber and styrene butadiene polymer", Petroleum Science and Technology, Vol. 35, Issue 1, pp.30-36.

- Anderson, D. A., D. W. Christensen, H.U. Bahia, R. Dongre, M. G. Sharma, C. E. Antle, and J. Button (1994) "Binder characterization and Eualuation", Vol 3, Physical Characterization; SHRP-A-369. National Research Council, Washington, DC.

- Laukkanen, L., Soenen, H., Winter, H., Seppala, J. (2018) "Low-temperature rheological and morphological characterization of SBS modified bitumen" Construction and Building Materials, Vol. 179, pp.348-359.

- Marasteanu, M., Li, X., Clyne, T., Voller, V., Timm, D., Newcomb, D. (2004) "Low Temperature Cracking of Asphalt Concrete

Pavements", Minnesota Department of Transportation Office of Research Services.

- Rezaei, S., Ziari, H., Nowbakht, S. (2016a) "High-temperature functional analysis of bitumen modified with composite of nano-SiO2 and styrene butadiene styrene polymer ", Petroleum Science and Technology, Vol. 34, pp. 1195-1203.

- Rezaei, S., Ziari, H., Nowbakht, S. (2016b) " Low temperature functional analysis of bitumen modified with composite of nano-SiO2 and styrene butadiene styrene polymer", Petroleum Science and Technology, Vol. 34, pp. 415-421.

- Rossmann, S. (2007) "Technical guideline: the use of modified binders in road construction", Pretoria, Asphalt Academy, CSIR Built Environment.

- Teltayev, B., Amirbayev, E., Radovskiy, B. (2018) "Viscoelastic characteristics of blown bitumen at low temperatures", Construction and Building Materials, Vol. 189, pp. 54-61.

- Tsantilis, L., Orazio, B., Santagata, E. (2018) "Low-temperature properties of bituminous nanocomposites for road applications", Construction and Building Materials, Vol.171, pp.397-403.

- Yang, X., You, Z., Hasan, M. R. M., Diab, A., Shao, H., Chen, S. and Ge, D. (2017) "Environmental and mechanical performance of crumb rubber modified warm mix asphalt using Evotherm". J. Clean. Prod., Vol 159, pp.346-358.

- Yousefi, A. (2002) "Rubber-modified Bitumens", Iranian Polymer Journal, Vol.11, pp. 303-309.

- Zhang, F. and Hu, C. (2013) "The research for SBS and SBR compound modified asphalts with polyphosphoric acid and sulfur", Construction and Building Materials, Vol. 43, pp.461-468.

محمودرضا کی‌منش، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۶۳ از دانشگاه سیستان و بلوچستان و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران–راه و ترابری در سال ۱۳۷۰ را از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. دارای درجه دکتری در رشته مهندسی عمران–راه و ترابری از دانشگاه انستیتو تکنولوژی اینسا فرانسه (دانشگاه دولتی) که زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مهندسی روسازی، تعمیر و نگهداری روسازی و ایمنی راه بوده و هم اکنون عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه پیام نور است.

شمس نوبخت، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران–عمران را در سال ۱۳۴۸ از دانشگاه علم و صنعت ایران، درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران–راه و ترابری ر سال ۱۳۷۱ از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. در سال ۱۳۷۸ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی عمران–راه و ترابری از دانشگاه علم و صنعت ایران گردید. زمینه های مورد علاقه ایشان طرح هندسی، نقشه برداری و روسازی راه و تونل بوده و در حال حاضر عضو هیأت علمی دانشگاه علم و صنعت ایران با مرتبه استادیار است.

محمد وریا خورده بینان، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران – عمران را در سال ۱۳۸۵ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد سنندج و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران – راه و ترابری را در سال ۱۳۸۸ از دانشگاه تهران اخذ نمود. دارای درجه دکتری در رشته مهندسی عمران–راه و ترابری است. زمینه های پژوهشی مورد علاقه طرح هندسی راه و راه آهن، روسازی راه و مدیریت پروژه است.