بررسی اثر افزودنی پلی پروپیلن بر روی مشخصات خرابی رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی

حبیب ا... امیری، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران

بابک گلچین (مسئول مکاتبات)، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران

E-mail: b-golchin@iau-ahar.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۵/۰۶/۱۲ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۱۸

چکیده

برای کاهش خرابی رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی روش‌های مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از متداول‌ترین روشها، استفاده از مواد ضدعریان شدگی مانند آهک هیدراته و مواد خانواده آمین‌ها است. مشکلات اجرایی در استفاده از آهک هیدراته در پروژه‌ها و نیز تاثیر منفی استفاده از افزودنی های ضدعریان شدگی مایع باعث شد، تا در این تحقیق به بررسی تاثیر استفاده ازافزودنی پلی‌پروپیلن (PP) و امکان استفاده از آن به عنوان ماده افزودنی ضد عریان شدگی پرداخته شود. به این منظور نمونه های مختلف آسفالتی با مصالح آهکی و گرانیت در درصدهای مختلف (۰، ۲ و ٤ درصد) پلی پروپیلن تهیه شدند. آنگاه آزمایش کشش غیر مستقیم به روش AASHTO T283 بر روی نمونه‌ها در حالت یک، سه و پنج سیکل یخ و ذوب انجام شد. همچنین، آزمایش انرژی آزاد سطحی بر روی قیر پایه و اصلاح شده و سنگدانه های مذکور انجام شد تا انرژی آزاد چسبندگی در شرایط مختلف اندازه‌گیری و بررسی شود. نتایج به دست آمده، نشان داد که استفاده از PP باعث بهبود مقاومت مخلوط‌های آسفالتی هم درشرایط مرطوب و هم درشرایط خشک شده است. به صورت کلی می‌توان گفت افزایش درصد ماده PP تا ٤ درصد وزن قیر، باعث بهبود مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر خرابی رطوبتی می‌شود. همچنین، نتایج روش انرژی آزاد سطحی نشان می‌دهد که اصلاح قیر با PP باعث افزایش انرژی آزاد چسبندگی می‌شود، در نتیجه مقاومت چسبندگی بین قیر و سنگدانه‌ها افزایش می‌یابد.

واژه های کلیدی: مخلوط آسفالتی، خرابی رطوبتی، عریان‌شدگی، انرژی آزاد سطحی، پلی پروپیلن

۱. مقدمه

خرابی رطوبتی را می‌توان به از دست دادن مقاومت و دوام مخلوط‌های آسفالتی بر اثر رطوبت، اطلاق کرد. خرابی رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی یک نگرانی عمده به خاطر هزینه‌های تعمیر و نگهداری روسازی است. اگرچه خرابی رطوبتی، از سالهای بسیار گذشته مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است، اما جنبه‌های بسیاری از این نوع خرابی هنوز ناشناخته باقیمانده است. امروزه، به صورت کلی دو روش برای بهبود چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی و به تبع آن کاهش خرابی رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی بکار می رود. روش اول استفاده از افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی مایع به منظور بهبود خصوصیات پیوستگی قیر و چسبندگی قیر و سنگدانه است. مواد ضد عریان‌شدگی مایع در واقع فعال سازهای شیمیایی هستند که با تغییر در ساختار قیر باعث بهبود چسبندگی قیر- سنگدانه و پوشش‌پذیری بهتر قیر بر روی سطح سنگدانه می‌شوند[Arabani and Hamedi, 2014]. روش دوم استفاده از پوشش سطح سنگدانه‌ها با استفاده از موادی است که باعث تغییر در خصوصیات سطح سنگدانه‌ها بویژه سنگدانه‌های اسیدی شده و میل آبدوستی این نوع از سنگدانه‌ها کاهش می دهد تا در هنگام وارد شدن آب به سیستم قیر- سنگدانه، شدت عریان‌شدگی کاهش یابد. از پرکاربردترین این مواد می‌توان به آهک هیدراته اشاره نمود [Moghadas Nejad, Hamedi, and Azarhoosh, 2012, MoghadasNejad et. al .2012]

این تحقیق سعی دارد، امکان استفاده از مواد پلیمری را در بهبود خواص عریان شدگی مخلوط های آسفالتی بررسی نماید. بدین منظور، ماده پلی پروپیلن که یکی از در دسترس ترین مواد پلیمری انتخاب شد. دلیل دیگر استفاده از این ماده این است که پلیمرها می توانند خصوصیات بازی داشته باشند و استفاده از این ماده احتمالا می تواند خصوصیات اسیدی قیر را کاهش داده و چسبندگی بیشتری با سنگدانه های اسیدی که مستعد خرابی رطوبتی هستند، ایجاد نماید.

در این تحقیق از آزمایش لاتمن اصلاح شده طبق روش AASHTO T283 و انرژی آزاد سطحی برای بررسی خرابی رطوبتی استفاده شده است. روش لاتمن اصلاح شده به صورت گسترده در تحلیلهای خراب رطوبتی استفاده می‌شود، در حالی که روش انرژی آزاد سطحی اخیرا مورد توجه زیاد قرار گرفته است. به عنوان مثال چِنگ، در قالب رساله دکتری در دانشگاه تکزاس، مطالعه جامعی بر روی مفاهیم اندازه‌گیری انرژی آزاد سطحی و کاربرد آن در روسازی‌های آسفالتی انجام داد. او نشان داد که میزان کاهش انرژی سیستم در رخداد عریان‌شدگی در حضور آب با خرابی رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی ارتباط مستقیم دارد [Cheng, 2002]. در گزارشی، لیتون و همکاران به بررسی خرابی رطوبتی با استفاده از اندازه‌گیری‌های انرژی آزاد سطحی و آنالیز مکانیکی دینامیکی پرداختند [Lytton et al. 2005]. آنان یک روش توسعه‌یافته جدید برای آنالیز نتایج مکانیکی دینامیکی و محاسبه نرخ خرابی ارائه دادند. بی‌حَسین و همکاران در پژوهشی انرژی چسبندگی بین سنگدانه و قیر و نیز کاهش در انرژی آزاد هنگامی‌که قیر از سطح سنگدانه در حضور آب عریان می‌شود، را با استفاده از مقادیر انرژی آزاد سطحی قیر و سنگدانه محاسبه کردند [Bhasin et al. 2006]. همچنین در پژوهشی دیگر، مِسد و همکاران، در بررسی خرابی رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، از درک مکانیزمی‌که چسبندگی بین قیر- سنگدانه، انرژی آزاد پیوستگی قیر یا ماستیک و گسیختگی مواد ویسکوالاستیک را تحت تاثیر قرارمی‌دهد، استفاده کردند [Masad et al. 2006]. امروزه روش انرژی آزاد سطحی در تحقیقات مربوط به مواد آسفالتی به وفور مشاهده می‌شود [Kakar et.al, 2016, Hamedi, Nejad and Oveisi, 2016].

۲. مصالح و برنامه آزمایشگاهی

۲-۱ مصالح

۲-۱-۱ قیر

در این تحقیق قیر مصرفی از نوع قیر خالص با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ می‌باشد که از پالایشگاه اصفهان تهیه شد. مشخصات قیر مصرفی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات قیر پایه مورد استفاده در این پژوهش

ویژگی	چگالی در ۲۵° C	درجه نفوذ (dmm)	نقطه نرمی ° C	شکل پذیری (cm)	درجه اشتعال (° C)	افت وزنی (٪)	درجه خلوص (٪)
استاندارد	ASTM D70-76	ASTM D5-73	ASTM D36-76	ASTM D113-79	ASTM D92-78	ASTM D1754-78	ASTM D2042-76
مقدار مجاز	-	۶۰-۷۰	۴۹-۵۶	حداقل ۱۰۰	حداقل ۲۳۲	-	-
۶۰-۷۰	۱/۰۲	۶۶	۵۱	۱۰۵	۲۶۲	۰/۷۵	۹۹/۵

۲-۱-۲ سنگدانه

دو نوع سنگدانه با خصوصیات متفاوت در برابر خرابی رطوبتی در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفتند. سنگ آهک که به عنوان یک سنگدانه مقاوم در برابر خرابی رطوبتی شناخته می‌شود و گرانیت که به عنوان یک سنگدانه آبدوست و حساس در برابر خرابی رطوبتی شناخته می‌شود، انتخاب شدند. مصالح آهکی از معدن روستای خرم‌آباد واقع در بخش سلفچگان استان قم استحصال شد در حالیکه سنگ گرانیت از معدن روستای صفرآباد در مجاورت سایت فردو مورد استفاده قرار گرفت. کانی‌های تشکیل دهنده این سنگدانه‌ها در جدول ۲ آورده شده است. در این جدول، کانی‌های با درصدهای بالا و کانی‌هایی که در تعیین آبدوستی و آبگریزی سنگدانه‌ها مهم هستند، ارائه شده است. این جدول نشان می‌دهد که سنگ آهک عمدتا از کانی Cao تشکیل شده است در حالی‌که سنگدانه‌های گرانیت عمدتا از SiO_2 و Al_2O_3 تشکیل شده است. مشخصات فیزیکی سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۳ آورده شده است. این نتایج از واحدهای کنترل کیفیت معدن هایی که مصالح از آنها تهیه شده، گرفته شده است. دلیل اصلی استفاده از این نوع سنگدانه‌ها، درجه آبدوستی متفاوت آنها بوده است تا بتوان تاثیر نوع سنگدانه‌های با کانی‌های مختلف و با حساسیت‌های مختلف در برابر خرابی رطوبتی را مورد ارزیابی قرار داد. سنگ آهک یک مصالح آبگریز است در حالی که سنگ گرانیت، یک مصالح آبدوست است.

در پژوهش حاضر از دانه بندی پیوسته ٤ (آستر و رویه) آیین نامه روسازی راه‌های ایران (نشریه ۲۳٤) استفاده شد. حدود این دانه‌بندی و دانه بندی مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲-۱-۳ پلی‌پروپیلن

در این پژوهش اثر پلی‌پروپیلن (PP) با فرمول شیمیایی –[CH2-CH(CH3)]n– بر روی مشخصات رطوبتی مخلوط اسفالتی بررسی شد. پلی‌پروپیلن از پلیمریزاسیون پروپیلن در شرایط دما و فشار نسبتاً ملایم و در حضور کاتالیست معروف زیگلر- ناتا انجام می‌شود. وجود این کاتالیست، پلیمری به صورت ایزوتاکتیک را تشکیل می‌دهد که قادر به متبلور شدن تا حدود ۹۰ درصد می‌باشد. این ماده در دو درصد وزنی ۲ و ٤ درصد وزن قیر مورد استفاده قرار گرفت.

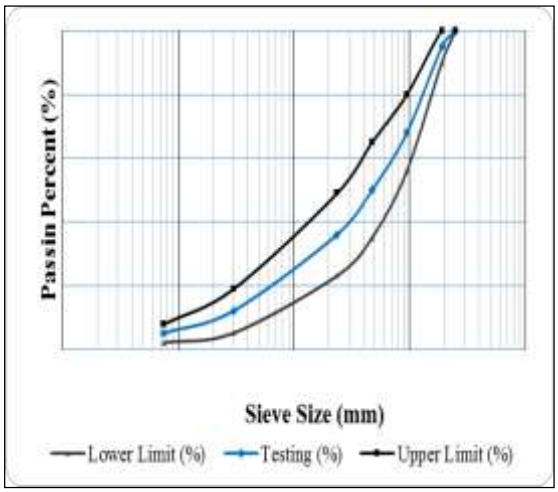
جدول ۲. مشخصات کانی‌های سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش

سنگدانه	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO
سنگ آهک	٤/۸	۰/۹	۰/۳	۱/۸	٦۲/٦
گرانیت	٥٤/۱	۱۳/۳	۲/۷	۰٫۸	٤/۷

جدول ۳. مشخصات فیزیکی مصالح سنگی

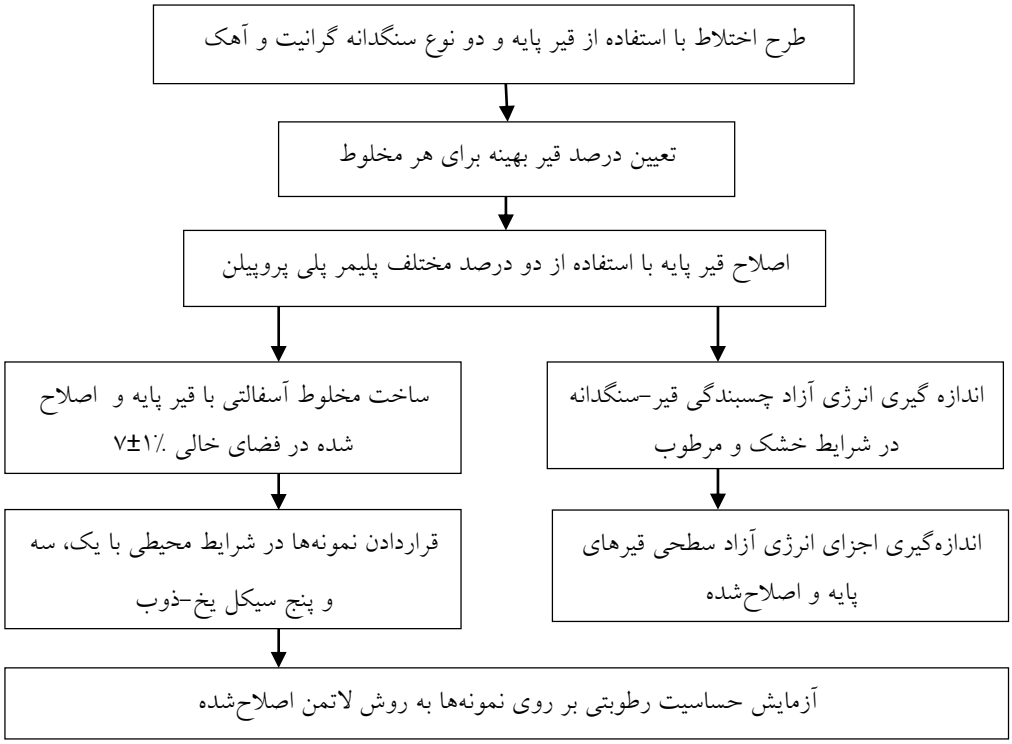
آزمایش	استاندارد	سنگ‌آهک	گرانیت	حدود آیین‌نامه
وزن ویژه (درشت‌دانه)				
حجمی		۲/۵۹	۲/٦۱	-----
موثر	ASTM C 127	۲/٦۰	۲/٦۳	-----
ظاهری		۲/٦۲	۲/٦۵	-----
وزن ویژه (ریزدانه)				
حجمی		۲/۵۷	۲/٦۰	-----
موثر	ASTM C 128	۲/۵۸	۲/٦۲	-----
ظاهری		۲/٦۱	۲/٦۵	-----
وزن ویژه (فیلر)	ASTM D854	۲/۵٦	۲/۵۵	-----
حداکثر سایش لس‌آنجلس	ASTM C 131	۲۷	۱۹	حداکثر ۳۰
حداکثر جذب آب	ASTM C127	۰/۸	۱/۲	۲/۸
ذرات سوزنی و پولکی	ASTM D 4791	۳	۹	حداکثر ۱۵
درصد شکستگی	ASTM D 5821	۸۹	۹۱	براساس ترافیک
دوام در برابر سولفات سدیم سدیم	ASTM C 88	۲	٤	حداکثر ۸

برای اضافه کردن این ماده به قیر ابتدا قیر مورد نظر را تا دمای ۱٦۰ درجه سانتی‌گراد گرم کرده تا ویسکوزیته آن کاهش یابد و قابلیت اختلاط با پلیمر در همزن فراهم شود. اختلاط قیر و پلیمر در همزن با سرعت چرخش ۸۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ٦ دقیقه انجام شد. شکل ۲ تصویر پلی پروپیلن مورد استفاده را نشان می دهد.



شکل ۱. دانه‌بندی مورد استفاده برای سنگدانه‌ها در این پژوهش

شکل ۲. تصویر پلی پروپیلن مورد استفاده در این پژوهش.



شکل ۳. برنامه آزمایشگاهی آزمایشهای انجام شده در این پژوهش

۲-۲ برنامه آزمایشگاهی

در تهیه نمونه‌ها، مراحل مختلف شامل اصلاح قیر، گرم کردن مصالح سنگی و قیر، مخلوط کردن و سپس متراکم کردن مخلوط ها صورت گرفت. شکل ۳ برنامه آزمایشگاهی مربوط به ساخت و آزمایش نمونه‌های آسفالتی را نشان می دهد. در ابتدا، درصد قیر بهینه مربوط به قیر پایه برای هریک از مصالح سنگی تعیین گردید، سپس نمونه های آزمایشگاهی با قیر پایه و اصلاح شده برای انجام تست های دیگر استفاده شد. دلیل استفاده از درصد قیر بهینه مربوط به قیر کنترل در تهیه نمونه‌های با قیر اصلاح شده این است که معمولا درصد پلیمر تاثیر چندانی روی درصد قیر بهینه نمی‌گذارد [Moghadas Nejad, Hamedi and Azarhoosh, 2012, Moghadas Nejad et al. 2016]. از طرفی، تغییر در درصد قیر در نمونه‌های کنترل و اصلاح شده باعث می‌شود تا تحلیل نتایج با مشکل همراه باشد.

۲-۳ آزمایش ها

۲-۳-۱ آزمایش حساسیت در برابر خرابی رطوبتی براساس استاندارد AASHTO T283

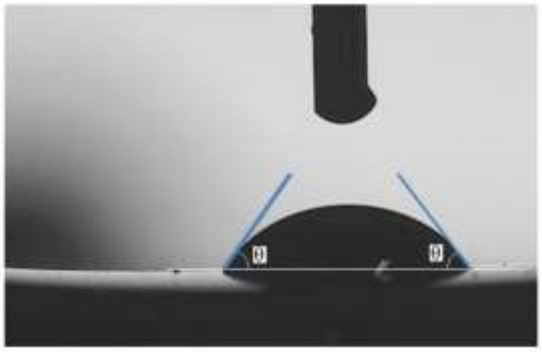
آزمایش AASHTO T283 متداولترین آزمایشی است که برای بررسی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر خرابی رطوبتی و نیز برای بررسی تاثیر مواد ضد عریان‌شدگی به کار رود. نمونه‌ها در شرایط خشک و مرطوب در درصد قیر بهینه تهیه می شوند. قبل از انجام آزمایش اصلی تعدادی آزمایش برای پیدا کردن تعداد ضربه‌های لازم برای تراکم نمونه‌های اصلی برای رسیدن به درصد حفرات هوای ۱±۷ مورد نیاز است. درصد حفرات هوا مطابق با استاندارد AASHTO T269 مشخص می‌شود. هنگامی‌که تعداد ضربات مشخص شده و نمونه متراکم شدند، نمونه‌ها به دو گروه نمونه‌های خشک و نمونه‌های تحت شرایط مرطوب قرار گرفته تقسیم می‌شوند. سپس نمونه‌هایی که تعیین شده اند تا

تحت شـرایط مرطوب قرار گیرند، تحت شـرایط خلا قرار داده می شـوند تا به میزان درجه اشـباع ۸۰-۵۵٪ برسـند. نمونه‌های اشـباع شـده به مدت ۱۶ سـاعت در فریزر با دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد و در ادامه به مدت ۲۴ ساعت در حمام آب با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری می‌شوند. بقیه نمونه‌ها در شرایط خشـک نگهداری می‌شـوند. در این پژوهش برای بررسـی تاثیر دقیق‌تر مـاده پلیمری در شـــرایط مرطوب نمونه‌ها با ۱، ۳ و ۵ سیکل یخ-ذوب انجام شدند. سپس نمونه تحت آزمایش کشش غیر مسـتقیم قرار می گیرند. نتایج آزمایش به صـورت نسـبت میانگین مقاومت کشـشـی غیر مسـتقیم نمونه‌های تحت شرایط مرطوب به میانگین مقاومت کشـــشـــی غیر مســـتقیم نمونه‌های خشک گزارش می شوند. نرخ بارگذاری در این آزمایش ۲ اینچ در دقیقه (در حدود ۵۰/۸ میلی متر بر دقیقه) است.

۲-۳-۲ اندازه‌گیری مولفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر و سنگ دانه ها

برای اندازه‌گیری اجزای انرژی آزاد سطحی قیر در این پژوهش از روش قطره چسـبان استفاده شده است. ابتدا نمونه قیر ما بین منبع نور و دوربین قرار داده می‌شـود. محفظه سـیسـتم کنترل شرایط محیطی را بر اساس دمای مورد نظر تنظیم کرده تا به آن دما برسد. میکروسرنگ را با مایع آزمایش پر می‌کنند و نوک آن را ۵ میلی‌متر بالای سطح نمونه قرار می‌دهند. یک قطره از مایع آزمایش را رها کرده تا روی سـطح قیر پخش شـود. باید توجه شـود که حجم مواد مایع آزمایش رهاشـده روی سطح قیر زیاد نباشـد. پس از گذشـت چند ثانیه قطره شکل ثابتی پیدا می‌کند. در این لحظـه، با اســـتفاده از دوربین یک عکس از قطره روی سـطح گرفته می‌شـود. برای هر مایع آزمایش حداقل سـه نمونه باید آزمایش و ســـه زاویه ثبت شـــود که میانگین آنها به عنوان زاویه تماس مورد نظر ثبت می‌گردد. با انجام آزمایش ذکرشـــده برای هر نوع سـنگدانه و یا قیر با سه نوع مایع آزمایش مختلف می‌توان ســـه رابطـه مـانند رابطه ۱ تشـــکیل داد که اندیس L نشان‌دهنده مولفه‌های انرژی آزاد سطحی مایع آزمایش است که معلوم هستند. زاویه تماس نیز از آزمایش قطره چسبان به دست می‌آید. ســه مولفه انرژی آزاد ســطحی قیر با اندیس S مجهول هسـتند که اگر سه بار با مایع آزمایش‌های مختلف این آزمایش تکرار شـود، سـه رابطه بدسـت می‌آید که در آنها سـه مجهول مشـترک وجود دارد که با حل همزمان این سـه رابطه، این سـه مجهول به دسـت می‌آیند. شـکل ٤ عکس گرفته شـده از قطره شـکل‌گرفته مایع آزمایش بر روی سـطح یک نمونه را نشـان می‌دهد.

$$\Gamma_L(1+\cos\theta)=2\left[\left(\sqrt{\Gamma_L^{lw}\Gamma_S^{lw}}\right)+\left(\sqrt{\Gamma_L^{+}\Gamma_S^{-}}\right)+\left(\sqrt{\Gamma_L^{-}\Gamma_S^{+}}\right)\right] \quad (1)$$



$$\Gamma_L(1+\cos\theta)=2$$

شکل ٤. عکس گرفته‌شده از قطره شکل‌گرفته مایع آزمایش بر روی سطح نمونه

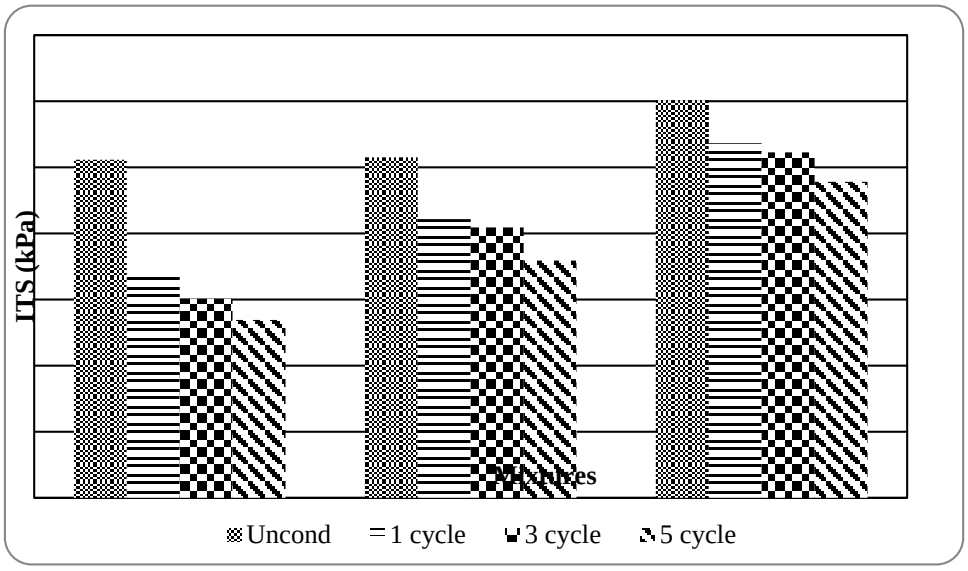
همانطور که قبلا گفته شـد، در این پژوهش دو نوع سـنگدانه مورد اسـتفاده قرار گرفت اسـت. با توجه به اینکه معدن تامین سـنگدانه‌های مورد اسـتفاده با پژوهشی دیگر یکسان می باشد، برای تعیین اجزای انرژی آزاد ســطحی ســنگـدانـه‌های مورد اســتفـاده در این پژوهش از نتایج آن تحقیق، اســتفاده شـد [Hamedi, 2015]. قـابل ذکر اســت که اجزای انرژی آزاد ســطحی ســنگدانه‌ها با اســتفاده از روش جذب همگانی انجام شده است.

۳. نتایج و بحث

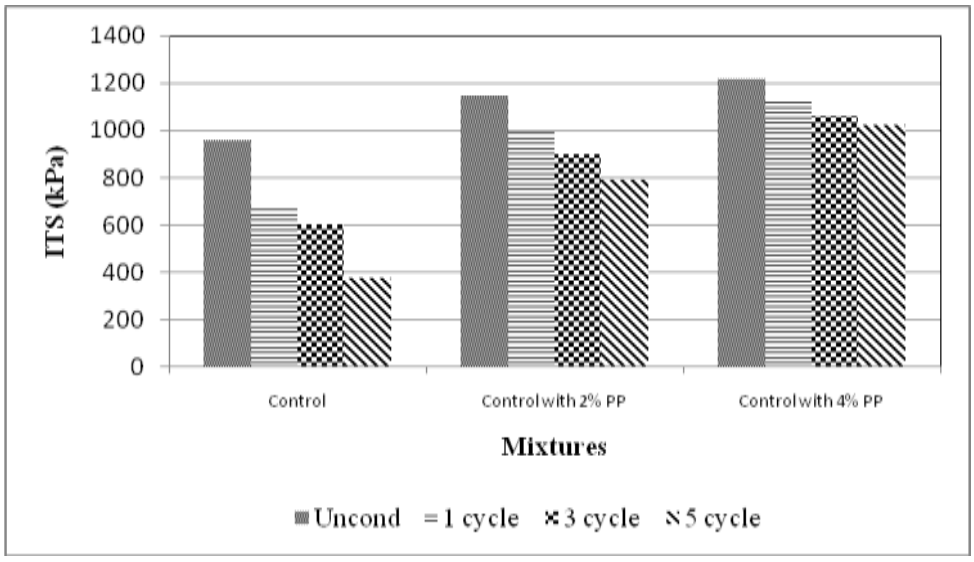
۳-۱ نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی

نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها در سیکل‌های مختلف یخ-ذوب در شـکل های ۵ و ٦ آورده شـده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مقدار کشش غیرمستقیم نمونه‌های ساخته شده با افزایش تعداد سیکل‌های یخ-ذوب کاهش می‌یابد. کاهش در مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها با افزایش تعداد سیکل‌های یخ-ذوب را می‌توان به از دســت دادن چســبندگی مخلوط یا

پیوستگی قیر ناشی از حضور بیشتر نمونه‌ها در معرض رطوبت نسبت داد. همچنین می‌توان از داده های این دو شکل نتیجه گیری کرد که اضافه کردن ماده پلی‌پروپیلن، چسبندگی و پیوستگی را در مخلوط آسفالتی افزایش داده و اجازه جا به جایی سریع قیر را از روی سطوح سنگدانه‌ها نمی‌دهد و سبب می‌شود که مخلوط پس از سیکل‌های یخ- ذوب مقاومت بالاتری در برابر رطوبت نسبت به نمونه‌های بدون مواد افزودنی پلی‌پروپیلن داشته باشد. این ویژگی برای هر دو سنگدانه آهک و گرانیت مشاهده شده است.

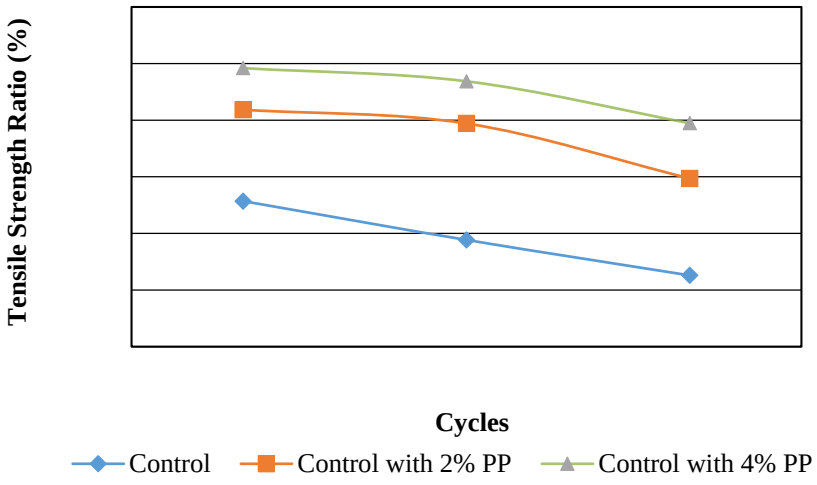


شکل ۵. رابطه بین مقاومت کششی غیرمستقیم با درصد مواد افزودنی پلی‌پروپیلن در سیکل‌های مختلف یخ-ذوب در نمونه‌های ساخته شده با سنگ گرانیت

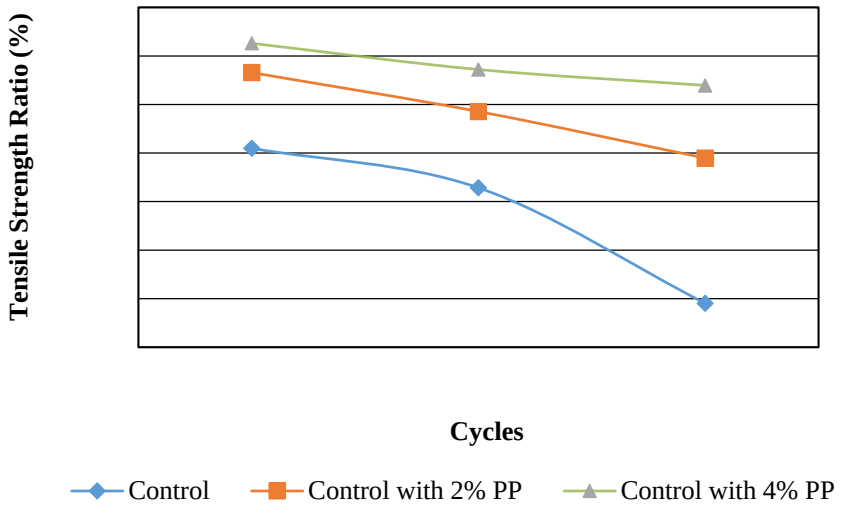


شکل ٦. رابطه بین مقاومت کششی غیرمستقیم با درصد مواد افزودنی پلی‌پروپیلن در سیکل‌های مختلف یخ-ذوب در نمونه‌های ساخته شده با سنگ آهک

شـکل ۷ و ۸، نشان دهنده مقادیر نسبت کشش غیرمستقیم برای مخلوط های ساخته شده با پلی‌پروپیلن در چرخه های مختلف یخ و ذوب در مصالح سنگی گرانیت و آهک می باشد. همانطور که مشـخص اسـت، مقاومت کشـشـی نمونه‌های مرطوب از نمونه‌های تحت شـرایط خشـک به میزان قابل توجهی کم می باشد. این رخداد، خرابی رطوبتی را در کلیه مخلوطهای آسفالتی نشـان می دهد. نتایج اضـافه کردن پلی‌پروپیلن نشان می‌دهد که افزودن این مـاده در همـه درصـدهای مورد اسـتفاده در این پژوهش تاثیر مثبت در مقدار نسـبت کشـش غیرمسـتقیم دارد. اضـافه کردن ۲ درصد از این ماده، باعث افزایش قابل توجه در مقدار نسـبت کشـش غیرمستقیم شده است. این در حالی است که اثر افزایشـی ٤ درصد، در مقایسه با ۲ درصد افزودنی، بسیار زیاد نیسـت. این به این معنی است که افزایش بیش از ۲ درصد از این ماده شـاید منطقی نباشـد، زیرا هزینه های اجرایی را بالا خواهد برد. همچنین از آنجا که، سـنگ آهک، آبگریز و سـنگ گرانیت، آبدوسـت اسـت. با اسـتفاده از روند اشـکال ۷ و ۸، می‌توان تشخیص داد که سنگ آهک در مقایسه با سنگ گرانیت مخلوط‌های مقاوم تری را در برابر رطوبت فراهم کرده است. به عنوان مثال، نمونه‌های سـاخته شـده با سنگ آهک و ٤ درصد پلی‌پروپیلن دارای بالاترین مقدار نسـبت کشـش غیرمسـتقیم (۹۲٪) در سـیکل اول می‌باشـد که این مقدار در پایان سـیکل پنجم به ۸٤٪ می‌رسد. نتایج نمودار ها نشان می دهد افزایش در تعداد سیکل‌های یخ- ذوب، نسبت کشش غیرمستقیم را کاهش می‌دهـد. کـاهش در مقادیر نسـبت کشـش غیرمسـتقیم در سـیکل‌های بین ۱ تا ۳ کمتر از کاهش در مقادیر نسـبت کشش غیرمسـتقیم در سـیکل‌های ۳ تا ۵ بوده اسـت. دلیل این امر این اسـت که افزایش سیکل‌های یخ – ذوب، عریان‌شدگی قیر را از روی سـطح سـنگدانه ها افزایش می دهد و باعث می‌شـود سنگدانه‌های عریان شده، دیگر در باربری شرکت نکنند. به طور کلی می‌توان گفت افزودن پلی پروپیلن، اثر ضـد عریان‌شـدگی در مخلوط های آسـفالتی از خود نشـان می دهد به طوری که سـبب می‌شـود نمونه ها پس از سـیکل‌های مختلف یخ- ذوب مقاومت بالاتری در برابر رطوبت نسبت به نمونه‌های بدون مواد افزودنی داشته باشند.



شکل ۷. **رابطه بین نسبت کششی غیرمستقیم با درصد مواد افزودنی پلی‌پروپیلن در سیکل‌های مختلف یخ-ذوب درنمونه‌های ساخته شده با سنگدانه گرانیت**



شکل ۸. رابطه بین نسبت کششی غیرمستقیم با درصد مواد افزودنی پلی‌پروپیلن در سیکل‌های مختلف یخ-ذوب در نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه سنگ آهک

۳-۲ نتایج آزمایش‌های انرژی آزاد سطحی

۳-۲-۱ نتایج آزمایش‌های انرژی آزاد سطحی قیر

نتایج انرژی آزاد کل قیر و اجزای آن با و بدون استفاده از ماده پلی‌پروپیلن در جدول ٤ آورده شده است. قیر مخلوطی تک فاز و همگن از مولکول‌های مختلفی است که این مولکول‌ها به دو دسته کلی قطبی و غیر قطبی تقسیم بندی می‌شوند. مولکول‌های غیرقطبی به عنوان یک شبکه یا حلال برای قرارگیری مولکول‌های قطبی عمل می‌کنند که این موضوع سبب شکل گیری شبکه ای ضعیف از ترکیبات قطبی- قطبی می‌شود. مولکول‌های قطبی به صورت یکنواخت در سراسر فضای قیر پخش شده اند که براساس گرما این پیوندهای ضعیف شکسته می‌شود و قیر به سمت تبدیل شدن به یک سیال نیوتونی حرکت می‌کند. بیشتر مولکول‌ها و گروه‌های مولکولی تشکیل دهنده قیر خاصیت اسیدی دارند و بر این اساس قیر به عنوان یک ماده اسیدی شناخته می‌شود. همانطور که در جدول ٤ نشان داده شده است، جز اسیدی و بازی قیر خالص ۷۰-٦۰ مورد استفاده در این پژوهش به ترتیب ۲/۷۱ و ۰/٤۱ ($ergs/cm^2$) است. در مورد مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده از سنگدانه‌های اسیدی و قیر، با فرض اینکه قیر خاصیت اسیدی دارد، خاصیت شیمیایی این سطوح اجازه چسبندگی مناسب بین این دو ماده اسیدی را نمی‌دهد.

پوشش‌دهی یکی از توانایی‌های مایعات در تماس با سطح جامد می‌باشد که در نتیجه تماس دو ماده که در کنار یکدیگر قرار گرفته اند، بروز می‌کند. اگرچه این مفهوم از چسبندگی معنای متفاوتی دارد اما براساس نظر بعضی پژوهشگران می‌تواند شرایط لازم برای چسبندگی مناسب را فراهم کند. هر چه زاویه تماس کمتر باشد نشان دهنده این است که قابلیت پوشش دهی آن ماده بهتر است. از داده‌های جدول می‌توان دریافت که استفاده از پلی‌پروپیلن باعث کاهش در زاویه تماس قیر شده است که می‌تواند منجر به بهبود پوشش دهی سنگدانه‌ها توسط قیر شود.

الف: نتایج اصلاح با پلی‌پروپیلن بر روی جز غیرقطبی انرژی آزاد سطحی قیر

بیشتر سنگدانه‌ها دارای سطوح با بار الکتریکی می‌باشند که باعث ایجاد قطبیت بر روی سطوحشان می‌شود. قیر که به طور عمده از مولکول‌های سنگین وزن هیدروکربن تشکیل شده است، فعالیت قطبی کمی از خود نشان می‌دهد. بنابراین نیروی چسبندگی بین قیر و سنگدانه در این حالت از نیروهای پراکنده

ضـعیف تشـکیل شـده است. همانطور که از داده‌های جدول ٤ مشخص است پلی‌پروپیلن باعث افزایش در میزان جز غیرقطبی انرژی آزاد سـطحی کل قیر شـده است. افزایش در میزان مولفه غیرقطبی انرژی آزاد سـطحی باعث تشکیل پیوندهایی می شود که به صـورت کوالانسی و غیرقطبی هستند و در حضور آب به راحتی شکسته نمی شوند.

ب: نتایج اصـلاح با پلی‌پروپیلن بر روی اجزای اسـیدی و بازی انرژی آزاد سطحی قیر

نتایج ارائه شـده در مورد اندازه‌گیری اجزای انرژی آزاد سطحی قیر نشـان می‌دهد که استفاده از پلی‌پروپیلن باعث شده است تا مولفه‌های اسـیدی و بازی انرژی آزاد سـطحی قیر به ترتیب کاهش و افزایش یابند. قیر در حالت پایه خصـوصـیات اسیدی دارد که چسبندگی آن با مواد اسیدی مانند سنگدانه‌های گرانیتی را مشـکل می‌سازد. تغییرات ذکر شده در مولفه‌های انرژی آزاد سـطحی قیر باعث کاهش در خصـوصیات اسیدی و افزایش در خصـوصیات بازی آن می‌شود که چسبندگی آن با سنگدانه‌های اسیدی را افزایش می‌دهد و مقاومت آن در حضور آب را بهبود می‌بخشد.

پ: نتایج اصـلاح با پلی‌پروپیلن بر روی انرژی آزاد سطحی کل قیر

مقایسه بین نتایج نشان می‌دهد که افزودن مواد ضد عریان‌شدگی پلی‌پروپیلن باعث افزایش انرژی آزاد سـطحی کل در قیر مورد استفاده در این پژوهش شده است. در این پژوهش مشاهده شد کـه افزودن پلی‌پروپیلن نـه تنهـا بـاعـث کـاهش در انرژی آزاد سـطحی قیر نمی‌شـونـد بلکـه آن را افزایش می‌دهند که این افزایش باعث افزایش در انرژی آزاد پیوسـتگی قیر می‌شـود. انرژی آزاد پیوسـتگی قیر مقدار انرژی لازم برای گسـیختگی با سطح واحد در غشای قیری است. مطابق با نتایج به دست آمده، اسـتفاده از پلی‌پروپیلن باعث شده است تا احتمال رخداد ترک خوردگی در ماسـتیک آسفالت کاهش یابد. مشابه این نتایج در سـایر پژوهش‌ها نیز به دسـت آمده اسـت [Wasiuddin, 2007].

۳-۲-۲ اجزای انرژی آزاد سطحی سنگدانه

انرژی آزاد سـطحی سـنگدانه‌ها در جدول ٥ نشـان داده شـده اسـت. همانطور که انتظار می رفت، سـنگ آهک که سـنگدانه بـازی به شـمار آید، دارای جز بازی بزرگتری در مقایسـه با گرانیت اسـت، برعکس گرانیت دارای جز اسـیدی بزرگتری در مقایسه با سنگ آهک است.

جدول ٤. اجزای انرژی آزاد سطحی قیر پایه و اصلاح شده به همراه زوایای تماس آنها با مایعات آزمایش

نوع قیر	قیر خالص	قیر خالص اصلاح شده با ۲درصد پلی‌پروپیلن	قیر خالص اصلاح شده با ٤درصد پلی‌پروپیلن
زاویه تماس با آب (درجه)	۱۰۳/۳۰	۹٥/۰۱	۹۲/۷۲
زاویه تماس با گلیسرول (درجه)	۸٥/۸٤	۷٥/٥٤	۷۳/۳۸
زاویه تماس با فرمامید (درجه)	۸۱/۳٤	٦۸/٥۹	٦٥/٤۸
انرژی آزاد کل ($ergs/cm^2$)	۱٤/٥۷	۲۳/۷۷	۲۷/۲۲
انرژی آزاد غیرقطبی ($ergs/cm^2$)	۱۲/٤٦	۲۱/۳۷	۲٤/۷٦
انرژی آزاد قطبی ($ergs/cm^2$)	۲/۱۱	۲/٤۰	۲/٤٦
جز اسیدی انرژی آزاد سطحی ($ergs/cm^2$)	۲/۷۱	۲/۲۹	۱/۸۷
جز بازی انرژی آزاد سطحی($ergs/cm^2$)	۰/٤۱	۰/٦۳	۰/۸۱

جدول ۵. اجزای انرژی آزاد برای دو نوع سنگدانه مورد استفاده در این پژوهش

نوع سنگدانه	انرژی آزاد سطحی کل	جز غیرقطبی	جز قطبی	جز بازی	جز اسیدی
گرانیت	۲۸٦/۹۹	۵۷/٤۰	۲۲۹/۵۹	۵٦۸/۲٤	۲۳/۱۹
سنگ آهک	۲۸٦/۵۲	۹۸/۹۰	۱۸۷/٦۲	۵۷۰/۳۲	۱۵/٤۳

۳-۲-۳ اجزای انرژی آزاد چسبندگی

بر طبق تحقیقات انجام شده، انرژی آزاد چسبندگی مثبت است و مقادیر مثبت بزرگتر نشان‌دهنده اینست که چسبندگی بهتری فراهم شده است [Good and Van Oss, 1992]. نتایج انرژی آزاد سطحی چسبندگی بین قیر و سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش قبل و بعد از اصلاح با استفاده از پلی‌پروپیلن در جدول ٦ آورده شده است. این نتایج بر اساس اندازه‌گیری‌های ارائه شده در جدول ٤ و جدول ۵ با استفاده از روابط ترمودینامیک محاسبه شده‌اند. در همه نمونه‌ها انرژی آزاد چسبندگی قیر- سنگدانه از مقداری مثبت به مقداری منفی در حضور آب تغییر می‌کند. این روند از قبل نیز مورد انتظار بود زیرا آب دارای اجزای انرژی آزاد سطحی بزرگتری نسبت به قیر می‌باشد. بنابراین، هنگامی‌که سه ماده قیر، آب و سنگدانه در تماس با هم قرار گیرند، آب انرژی آزاد سیستم را برای رسیدن به حالت با کمترین سطح انرژی تغییر می‌دهد که در واقع عریان‌شدگی رخ می‌دهد. هر چقدر مقدار انرژی آزاد چسبندگی در حضور آب کمتر باشد رسیدن به حالت با کمترین انرژی با سرعت بیشتری رخ می‌دهد. همانطور که از داده های جدول مشاهده می‌شود استفاده از پلی‌پروپیلن سبب شده است تا انرژی آزاد چسبندگی قیر و سنگدانه مقداری افزایش یابد که این موضوع به این معناست که میل سیستم برای عریان‌شدگی و رسیدن به حالت پایدار با کمترین انرژی کاهش می‌یابد. افزایش در درصد پلی‌پروپیلن این میل را کمتر می‌کند. قدر مطلق مقادیر انرژی آزاد جداشدگی در شکل زیر نشان داده شده است. علاوه بر انرژی آزاد چسبندگی مقدار انرژی اولیه برای رخداد عریان‌شدگی هم اهمیت دارد. در واقع در مقدار انرژی اولیه برای عریان‌شدگی برابر با انرژی است که باید برای از بین بردن انرژی آزاد چسبندگی قیر-سنگدانه صرف شود. همانطور که مشاهده می‌شود استفاده از افزودنی‌های پلی‌پروپیلن باعث شده است تا مقدار انرژی آزاد چسبندگی قیر-سنگدانه به مقدار قابل توجهی افزایش یابد. افزایش در مقدار پلی‌پروپیلن باعث شده است که این مقدار بیشتر هم شود و پتانسیل عریان‌شدگی کاهش یابد.

جدول ٦. انرژی آزاد چسبندگی ($ergs/cm^2$)

نوع سنگدانه	نوع قیر	قیر-سنگدانه	قیر-سنگدانه در حضور آب	آب-سنگدانه	قیر-آب
گرانیت	قیر پایه	۱۳۸,۱٤	-۱۳۲/۳۷	۳۵۹/۸۱	۵۵/۹۰
	قیر اصلاح شده با ۲ درصد پلی‌پروپیلن	۱٤۹/۸٤	-۱۳۱/۰٤		٦٦/۲۷
	قیر اصلاح شده با ٤ درصد پلی‌پروپیلن	۱٤۹/۲٦	-۱۳٤/۵۰		٦۹/۱۵
سنگ آهک	قیر پایه	۱۵۳/۸۷	-۱۳۰/۱٤	۳٤۳/۳۰	۵۵/۹۰
	قیر اصلاح شده با ۲ درصد پلی‌پروپیلن	۱۷۰/٤٦	-۱۲۳/۹۱		٦٦/۲۷
	قیر اصلاح شده با ٤ درصد پلی‌پروپیلن	۱۷۱/۳٦	-۱۲۵/۹۰		٦۹/۱۵

جدول ۷. انرژی مورد نیاز برای رخداد عریان‌شدگی (erg/gr)

نوع سنگدانه	نوع قیر	مساحت سطح ویژه سنگدانه (cm^2/gr)	انرژی آزاد قیر- سنگدانه ($ergs/cm^2$)	انرژی مورد نیاز برای عریان‌شدگی یک گرم از سنگدانه (erg/gr)
گرانیت	قیر پایه	۲۸۲۰۰	۱۳۸/۱٤	۳۸۹٥٤۷٦/٥۷٦
	قیر اصلاح شده با ۲ درصد پلی‌پروپیلن		۱٤۹/۸٤	٤۲۲٥٤۱۸/٦٥۹
	قیر اصلاح شده با ٤ درصد پلی‌پروپیلن		۱٤۹/۲٦	٤۲۰۹۱۷۹/٦۷۲
سنگ آهک	قیر پایه	۳۲۱۰۰	۱٥۳/۸۷	٤۹۳۹۰۹٦/۱۲۹
	قیر اصلاح شده با ۲ درصد پلی‌پروپیلن		۱۷۰/٤٦	٥٤۷۱۷٤۳/۷٥٦
	قیر اصلاح شده با ٤ درصد پلی‌پروپیلن		۱۷۱/۳٦	٥٥۰۰٤۹۹/۸۷۸

فاکتور تعیین کننده در عریان‌شدگی میزان انرژی مورد نیاز برای گسیختگی قیر از روی سطح سنگدانه‌ها می‌باشد. برای تعیین این انرژی باید انرژی آزاد چسبندگی-قیر سنگدانه که واحد آن انرژی در واحد سطح ($ergs/cm^2$) است در سطح تماس قیر-سنگدانه ضرب شود. سطح تماس قیر-سنگدانه در واقع همان مساحت سطح ویژه سنگدانه‌ها می‌باشد که سطح تماس قیر-سنگدانه است.

براساس داده‌های ارائه شده در جدول٦ و با استفاده از سطح ویژه سنگدانه‌های گرانیتی و سنگ آهک مورد استفاده در این پژوهش، مقدار انرژی مورد نیاز برای عریان‌شدگی در جدول ۷ ارائه شده است. همانطور که از داده‌های این جدول مشخص است مقدار انرژی بزرگتری برای عریان‌شدگی سنگدانه‌ها از قیر در نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه آهکی مورد نیاز است. این روند نشان‌دهنده این است که احتمال رخداد عریان‌شدگی در

نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه سنگ آهک کمتر است. همچنین، استفاده از پلی‌پروپیلن باعث شده است تا میزان انرژی مورد نیاز برای عریان‌شدگی نسبت به نمونه‌های ساخته شده با قیر پایه افزایش یابد. این مسئله باعث می‌شود تا این انتظار وجود داشته باشد که استفاده از پلی‌پروپیلن باعث مقاومت بیشتر قیر در برابر جدا شدن از روی سطح سنگدانه شود.

بر اساس داده های جدول ۷، مشاهده می شود افزودن پلی پروپیلن به قیر، مقدار انرژی مورد نیاز برای عریان‌شدگی را افزایش می دهد. ضمناً با افزایش مقدار افزودنی از ۲ به ٤ درصد، مقدار انرژی مورد نیاز برای عریان‌شدگی در مصالح آهکی افزایش می یابد، در حالی که افزایش مقدار افزودنی از ۲ به ٤ درصد، مقدار انرژی مورد نیاز برای عریان‌شدگی در مصالح گرانیتی را افزایش نمی دهد. این نشان می‌دهد افزایش بیشتر مقدار افزودنی لزوماً شرایط بهتری را از لحاظ عریان شدگی به وجود نمی‌آورد، بلکه اندرکنش بین نوع سنگدانه و درصد افزودنی بر روی انرژی مورد نیاز در عریان‌شدگی تاثیر دارد.

٤. جمع‌بندی

مهم‌ترین نتایج به دست آمده در این پژوهش عبارتند از:

۱- اضافه کردن ماده پلی‌پروپیلن چسبندگی و پیوستگی را در مخلوط آسفالتی افزایش داده و اجازه جا به جایی سریع قیر را از روی سطوح سنگدانه‌ها نمی‌دهد و سبب می‌شود که مخلوط پس از سیکل‌های یخ-ذوب مقاومت بالاتری در برابر رطوبت نسبت به نمونه‌های بدون مواد افزودنی داشته باشد.

۲- مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های اصلاح شده با پلی‌پروپیلن چه در شرایط مرطوب و چه در شرایط خشک،

افزایش یافته است. دلیل عمده این موضوع را می‌توان بهبود در انرژی آزاد پیوستگی قیر و نیز انرژی آزاد چسبندگی قیر- سنگدانه دانست.

۳- افزودن پلی‌پروپیلن به مقدار قابل توجهی سبب افزایش مقاومت در برابر خرابی رطوبتی و افزایش مقدار نسبت کشش غیرمستقیم در نمونه‌های اصلاح شده با این ماده نسبت به نمونه‌های با قیر کنترل شده است.

۵- استفاده از ماده پلی‌پروپیلن باعث افزایش در میزان جز غیرقطبی انرژی آزاد سطحی کل قیر شده است. این افزایش باعث می‌شود که پیوندهای غیرقطبی که در حضور آب به راحتی گسیخته نمی‌شوند بهبود یابد و مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر رطوبت بهبود یابد.

٦- استفاده از پلی‌پروپیلن باعث افزایش در مولفه بازی انرژی آزاد سطحی و کاهش در مولفه اسیدی انرژی آزاد سطحی قیر شده است. این موضوع باعث افزایش خصوصیات بازی قیر می شود که این عوامل باعث چسبندگی بیشتر بین قیر و سنگدانه‌های اسیدی که مستعد خرابی رطوبتی هستند، می‌شود.

۷- پلی‌پروپیلن باعث افزایش انرژی آزاد سطحی کل در قیر مورد استفاده در این پژوهش شده است که این مسئله نشاندهنده کاهش پتانسیل گسیختگی در غشای قیری و ماستیک می‌شود.

۸- اصلاح با پلی پروپیلن باعث افزایش در انرژی آزاد چسبندگی می‌شود که چسبندگی بین قیر و سنگدانه‌های مورد آزمایش را افزایش می‌دهد و جداشدگی قیر از واحد سطح سنگدانه را سخت‌تر می‌کند.

۵. مراجع

- Arabani, M. and Hamedi, G. H. (2014) "Using the surface free energy method to evaluate the effects of liquid antistrip additives on moisture sensitivity in hot mix asphalt", International Journal of Pavement Engineering, Vol. 15, No. 1, pp. 66-78.

- Bhasin, A., Masad, E., Little, D. and Lytton, R. (2006) "Limits on adhesive bond energy for improved resistance of hot-mix asphalt to moisture damage", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1970, No. 1, pp. 3-13.

- Cheng, D. (2002) "Surface free energy of asphalt-aggregate system and performance analysis of asphalt concrete", Texas A&M University. USA.

- Good, R. J. and Van Oss, C. J. (1992) "The modern theory of contact angles and the hydrogen bond components of surface energies", in the book: Modern Approaches to Wettability", Springer.

- Hamedi, G. H. (2015) "Moisture damage modeling based on surface free energy theory", Department of Civil and Environmental Engineering, Amir kabir University of Technology, Iran.

- Hamedi, G. H., Nejad, F. M. and Oveisi, K. (2016) "Estimating the moisture damage of asphalt mixture modified with nano zinc oxide", Materials and Structures, Vol. 49, pp. 1165-1174.

- Kakar, M. R., Hamzah, M. O., Akhtar, M. N. and Woodward, D. (2016) "Surface free energy and moisture susceptibility evaluation of asphalt binders modified with surfactant-based chemical additive", Journal of Cleaner Production, Vol. 112, pp. 2342-2353

- Lytton, R. L., Masad, E. A., Zollinger, C., Bulut, R. and Little, D. N. (2005) "Measurements of surface energy and its relationship to moisture damage" Texas Transportation Institute, Texas, USA.

- Masad, E. A., Zollinger, C., Bulut, R., Little, D. N. and Lytton, R. L. (2006) "Characterization of HMA moisture damage using surface energy and fracture properties (With Discussion)", Journal of the Association Of Asphalt Paving Technologists, Vol. 75, pp. 713-754.

- MoghadasNejad, F., Azarhoosh, A. R., Hamedi, G. H. and Azarhoosh, M. J. (2012) "Influence of using nonmaterial to reduce the moisture susceptibility of hot mix asphalt", Construction and Building Materials", Vol. 31, pp. 384-388.

- MoghadasNejad, F., Hamedi, G. H. and Azarhoosh, A. (2012) "Use of surface free energy method to evaluate the mechanism of the effect of hydrate lime on moisture damage of hot mix asphalt", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 25, No. 8, pp.1119-1126.

- Wasiuddin, N. M. (2007) "Effect of additives on surface free energy characteristics of aggregates and binders in hot mix asphalt", ProQuest.

بررسی اثر افزودنی پلی پروپیلن بر روی مشخصات خرابی رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی

حبیب ا... امیری، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران – عمران را در سال ۱۳۹۲ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران – راه و ترابری را در سال ۱۳۹۵ از دانشگاه دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه وی تکنولوژی آسفالت است.

بابک گلچین، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران – عمران را در سال ۱۳۷۹ از دانشگاه ارومیه و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران – راه و ترابری را در سال ۱۳۸۱ از دانشگاه علم وصنعت ایران اخذ نمود. وی در سال ۱۳۹۳ موفق به کسب درجه دکتری در رشته عمران – راه و ترابری از دانشگاه یو اس ام مالزی گردید. زمینه پژوهشی مورد علاقه ایشان تکنولوژی آسفالت بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیاری در دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر است.