

مقایسه تاثیر استفاده از نانومواد معدنی بر عملکرد مخلوط‌های آسفالت گرم و شیشه‌ای در برابر خرابی رطوبتی

داود ساعدی^۱، حمید شیرمحمدی^۲، غلام حسین حامدی^{۳*}، یونس آذریون^۱

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد عمران - راه و ترابری، دانشگاه ارومیه

^۲ استادیار گروه عمران - راه و ترابری، دانشگاه ارومیه

^۳ استادیار گروه عمران - راه و ترابری، دانشگاه گیلان

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۳-۰۳

بازنگری: ۱۳۹۸-۰۵-۰۷

پذیرش: ۱۳۹۸-۰۶-۰۴

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۶-۰۸

کلمات کلیدی:

مخلوط آسفالت شیشه‌ای

مخلوط آسفالت گرم

حساسیت رطوبتی

نانو مواد

لاتمن اصلاح شده

خلاصه: امروزه، تکنولوژی آسفالت شیشه‌ای به عنوان روشی کارآمد جهت کاهش هزینه‌های تولید آسفالت، کاهش مصرف سوخت و کاهش آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از تولید این نوع زباله به شمار می‌رود. یکی از مشکلات اصلی در جهت توسعه روزافزون آسفالت شیشه‌ای این است که این نوع مخلوط آسفالتی در برابر خرابی رطوبتی ضعیف‌تر از سایر مخلوط‌ها است. پژوهش حاضر به ارزیابی حساسیت‌های رطوبتی مخلوط‌های آسفالت شیشه‌ای (حاوی ۱۰ درصد شیشه جایگزین قسمت ریزدانه) و مخلوط‌های آسفالت گرم و مقایسه‌ای بین عملکرد این دو نوع مخلوط به همراه تاثیر دو نوع افزودنی نانواهک هیدراته و نانو کربنات کلسیم در برابر خرابی رطوبتی پرداخته است. ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی از طریق آزمایش مکانیکی لاتمن اصلاح شده تحت استاندارد لاتمن اصلاح شده و آزمایش ترمودینامیکی صفحه ویلهلمی بر اساس روش‌های انرژی آزاد سطحی صورت گرفته است. نتایج به دست آمده از آزمایش کشش غیرمستقیم نشان می‌دهند که مقاومت مخلوط‌های آسفالت شیشه‌ای در شرایط خشک بیشتر از مخلوط‌های آسفالت گرم است. با این حال، مخلوط‌های آسفالت شیشه‌ای تحت شرایط مرطوب با افت مقاومت بیشتری نسبت به مخلوط‌های آسفالت گرم مواجه شده‌اند. نتایج به دست آمده از آزمایش ترمودینامیکی نیز نشان می‌دهند که اصلاح هر دو نوع قیر با استفاده از نانو آهک هیدراته و نانو کربنات کلسیم باعث افزایش انرژی آزاد سطحی کل و انرژی آزاد پیوستگی هر دو نوع قیر پایه شده است. این افزایش سبب بهبود مقاومت مخلوط‌های ساخته شده با این نوع قیرها در برابر خرابی‌های رطوبتی از نوع پیوستگی می‌شود که یک اثر مثبت در کاهش خرابی رطوبتی به شمار می‌رود.

موردنیاز برای دفن این مصالح می‌شود. بلکه از لحاظ زیست محیطی و اقتصادی نیز منافع زیادی به همراه دارد. به علاوه، استفاده از این مواد باعث می‌شود لزوم استفاده از منابع طبیعی جدید کم شده که در نتیجه استفاده از معادن را نیز کاهش می‌دهد [۳]. شیشه یکی از بحرانی‌ترین مواد ضایعاتی است. از مزایای شیشه ضایعاتی می‌توان گفت که شیشه خرد شده به راحتی قابل دسترس بوده و از حیث زیست محیطی نیز تمیز می‌باشد. همچنین، جذب قیر کمتری را به وسیله سنگدانه‌های شیشه‌ای نسبت به سنگدانه‌های معمولی دارد [۴]. در مقابل این

۱. مقدمه

رشد روزافزون مصرف مواد و به تبع روش‌های مورد نیاز برای منهدم کردن پسماند آن‌ها، یک نگرانی مهمی محیط زیستی است. یک راه حل برای کاهش این نگرانی، استفاده دوباره آن‌ها از طریق بازیافت می‌باشد. بازیافت به عنوان یکی از مهم‌ترین پایه‌های پایداری منابع طبیعی در نظر گرفته می‌شود. [۱، ۲]. استفاده از مواد ضایعاتی در ساخت و ساز راه‌ها، علاوه بر آن که باعث کاهش حجم این ضایعات و حذف فضای

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: hamed@guilan.ac.ir



محاسن، مشکلاتی از قبیل؛ کاهش چسبندگی بین شیشه و قیر، کاهش مقاومت لغزشی و افزایش حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالت شیشه‌ای وجود دارد [۴، ۵].

پاسخ‌رو سازی به انواع خرابی‌ها تحت تأثیر پیوند بین قیر و سنگدانه (چسبندگی) قرار دارد که به شدت تحت تأثیر رطوبت قرار می‌گیرد و رطوبت وارد شده از سطح یا لایه‌های زیرین روسازی‌های آسفالتی سبب جدا شدگی سنگدانه‌ها از قیر و یا نرمی قیر از طریق عمل امولسیون می‌شود. نتیجه به دست آمده از خرابی رطوبتی را معمولاً عریان‌شدگی می‌نامند زیرا قشر قیر از سنگدانه‌ها جدا می‌شود و سنگدانه‌ها بدون پوشش می‌مانند [۶]. عوامل مختلفی بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی مؤثر هستند که به طور کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند: دسته اول دارای منشاء داخلی بوده و با خواص مواد تشکیل دهنده مخلوط آسفالتی مانند قیر، سنگدانه و میزان حفرات هوا ارتباط مستقیم دارند. در مقابل، دسته دوم که دارای منشاء خارجی بوده و وابسته به شرایط خارج از سیستم مخلوط آسفالتی نظیر ملاحظات و نحوه اجرای روسازی، شرایط محیطی، شدت ترافیک و نوسانات آب و هوایی است [۷]. تاکنون جهت رفع یا کاهش پتانسیل عریان‌شدگی مطالعات زیادی انجام شده است که تقریباً اکثر این بررسی‌ها استفاده از افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی را به عنوان مقرون به صرفه‌ترین اقدامات در جهت کاهش خرابی‌های رطوبتی معرفی کرده‌اند [۸].

پارتل و همکاران [۹] پیش‌بینی کرد نانوتکنولوژی پتانسیل بالایی در پیشرفت تکنولوژی روسازی آسفالتی در حوزه‌های طراحی مصالح، ساخت، خواص، آزمایشات، نظارت و مدلینگ به همراه دارد. مخصوصاً بخش‌های مورد توجه در آنالیز روسازی آسفالتی، باید شامل پیوندهای بین سنگدانه، پیوندهای بین لایه‌ها، خصوصیات جرمی، خود ترمیمی و جوان‌سازی مخلوط، اثرات پیری و بهبود در سطح در اثر عبور چرخ، باشد. نانوذرات مورد نیاز برای مصالح روسازی، محصولاتی غیر خطرناک، کم هزینه هستند که به این دلایل در حجم بالایی گسترش یافته‌اند و تقریباً در تماس مستقیم با فعالیت‌های بشر هستند. کاهش انرژی مورد نیاز در حین ساخت روسازی آسفالتی به سوی توسعه فرمول‌ها (روش‌های) بهبود یافته و کاهش در ویسکوزیته مخلوط در دماهای محیط با معرفی ذرات کروی کوچک، تنها منجر به صرفه جویی انرژی پتانسیل نمی‌شود اما کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای در حین ساخت را به همراه دارد. پوشش ضخامتی مخلوط قیری حول سنگدانه، با ذرات

کوچک انجام میشود. اما بیشتر مطالعات روی خصوصیات مخلوط متمرکز روی این ابعاد کوچک نیستند. استفاده از نانوتکنولوژی باید منجر به افزایش درک و طراحی ویژگیهای بین سنگدانه و قیر گردد. با ارزیابی نقطه نظرهای مختلف، مسلم شده است که نانوتکنولوژی به طور اساسی، نقش مهمی در بهبود استفاده از مصالح موجود و در دسترس در روسازی‌ها و استفاده از این مواد برای مقاوم کردن آنها تحقق ویژگیهای مورد نیاز سازه‌های پایدار و دائمی، بازی می‌کند [۱۰].

پارتل و همکاران [۹] معیارهای مهمی را به قرار زیر برای روسازی پایدار با استفاده از مواد افزودنی و همچنین بازیافت مواد ضایعاتی تعریف می‌کنند:

۱. به حداقل رساندن استفاده از منابع طبیعی،
۲. کاهش مصرف انرژی،
۳. کاهش گازهای گلخانه‌ای،
۴. حذف آلودگی (هوا، آب، زمین، صوتی)،
۵. بهبود سلامتی، آسایش و پیشگیری از خطر، و
۶. تضمین سطح بالای راحتی و آسایش و ایمنی استفاده کننده از راه

۱.۱.۱. مروری بر مطالعات پیشین

در طی سالیان اخیر، مطالعات متعددی در زمینه حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالت گرم و مخلوط‌های آسفالت شیشه‌ای صورت گرفته است. در مطالعه‌ای که توسط اداره راه و ترابری فدرال آمریکا در سال ۱۹۹۸ در ایالت ویرجینیا انجام شد، به بررسی حداکثر مقدار خرده شیشه‌ای که می‌توان در مخلوط آسفالتی استفاده کرد بدون آن که در مقاومت آن در برابر خرابی رطوبتی دچار مشکل شود، پرداخته شده است. برای این منظور از آزمایش AASHTO T283 جهت ارزیابی مقاومت عریان‌شدگی مخلوط‌های آسفالت شیشه‌ای استفاده شد. همچنین، از دو نوع افزودنی ضد عریان‌شدگی شیمیایی و آهک هیدراته برای بهبود مقاومت مخلوط‌ها در برابر حساسیت‌های رطوبتی بهره برده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که استفاده از شیشه خرد شده تا ۱۵ درصد بخش سنگدانه‌ها در صورت استفاده از هر دو افزودنی ضد عریان‌شدگی قابل قبول است [۵]. در مطالعه دیگری، به بررسی امکان استفاده از شیشه ضایعاتی در مخلوط‌های آسفالتی پرداخته شد. به همین منظور درصد‌های مختلف شیشه (۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزن کل مصالح سنگی) به همراه یک نوع سنگدانه، قیر با

واقع شود [۱۳]. جمشیدی و صادق‌نژاد [۱۴] به ارزیابی عددی تأثیر خرده شیشه ضایعاتی بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی و پیش‌بینی پدیده شیارشدگی پرداختند نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مدل ارائه شده در این تحقیق به خوبی قادر است شیارشدگی مخلوط‌های آسفالت شیشه‌ای و معمولی را پیش‌بینی نماید. همچنین، ارزیابی نتایج مدل ارائه شده بیانگر تأثیر بالای شیشه در بهبود عملکرد ویسکوالاستیک و ویسکوالاستیک‌پلاستیک مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد. افخمی و همکاران [۱۵] به بررسی خرابی رطوبتی و مقاومت لغزشی مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف شیشه پرداختند. همچنین، از افزودنی زایکوترم به عنوان ماده ضد عریان‌شدگی به قیر استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مقاومت لغزشی مخلوط‌های آسفالتی در نتیجه افزایش درصد شیشه افزایش پیدا کرده است. همچنین، حساسیت مخلوط‌های آسفالتی شیشه‌ای در مقایسه با مخلوط‌های آسفالتی کنترل دچار ضعف شده است که مقدار ۰/۱ درصد از ماده زایکوترم باعث بهترین بهبود در عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر رطوبت شده است. در پژوهشی دیگر، به بررسی تأثیر استفاده از ۰ تا ۲۰ درصد خرده شیشه جایگزین سنگدانه پرداخته شده است. نتایج این بررسی نشان داده است که استفاده از خرده شیشه به همراه آهک هیدراته می‌تواند مخلوط آسفالتی مقاوم در برابر خرابی رطوبتی ایجاد کند. این موضوع به علت افزایش در قفل و بست سنگدانه‌ای ناشی از تأثیر خرده شیشه است [۱۶]. بیرامی و همکاران [۱۷] به بررسی تأثیر استفاده از دو نوع نانوماده فلزی به نام‌های نانواکسید آلومینیوم و نانواکسید آهن بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از شیشه ضایعاتی باعث افزایش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالت شیشه‌ای می‌شود و هر چقدر درصد شیشه خرد شده بیشتر شود، مقاومت در برابر رطوبت نیز کمتر می‌شود. استفاده از افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی نانو باعث شده است که خصوصیات رفتاری قیر تغییر کند و خصوصیات اسیدی قیر کاهش پیدا کند. این تغییر باعث چسبندگی بهتر بین قیر با شیشه خرد شده که خصوصیات اسیدی دارد، می‌شود.

۲.۱. اهداف پژوهش

در این پژوهش سعی شده است تا به بررسی تأثیر استفاده از دو نوع نانوماده بر حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالت شیشه‌ای و مخلوط

درجه نفوذ ۱۰۰-۸۵ و افزودنی ضد عریان‌شدگی آهک هیدراته استفاده شده است. در این پژوهش، از آزمایش‌های استقامت مارشال، نسبت کشش غیرمستقیم، مقاومت لغزشی و نفوذپذیری استفاده شده است. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که افزایش مقدار شیشه باعث افزایش در تغییر شکل ماندگار می‌شود. به علاوه، استفاده از شیشه باعث افزایش در مقاومت لغزشی به ویژه در شرایط مرطوب شده است. از طرفی دیگر، بررسی‌های میدانی پس از یک سال از اجرای روسازی شیشه‌ای نشان داد که تراکم این مخلوط در مقایسه با مخلوط آسفالت گرم بیشتر بوده و نفوذپذیری آن مقدار کمتری دارد. همچنین، قطعه ساخته‌شده با ۱۰ درصد شیشه بازیافتی پس از یک سال از اجرا عملکرد بهتری را نسبت به قطعه بدون شیشه داشته و هیچ‌گونه عریان‌شدگی در آن مشاهده نشده است. در نهایت، پژوهشگران به این جمع‌بندی رسیدند که می‌توان مقدار محدودی از شیشه را به‌عنوان جایگزین سنگدانه‌های مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار داد و استفاده از افزودنی آهک هیدراته می‌تواند باعث بهبود مقاومت این نوع مخلوط‌ها در برابر حساسیت‌های رطوبتی شود [۱۱]. در مطالعه دیگری، به بررسی امکان استفاده از ذرات شیشه بازیافتی در مخلوط‌های آسفالتی بدون افت عملکرد مخلوط آسفالتی پرداخته شد. به همین منظور نمونه‌هایی با درصد‌های مختلف شیشه ساخته شدند. سپس، عملکرد مخلوط آسفالت شیشه‌ای با مخلوط کنترل مقایسه شدند. نتایج حاصل نشان دادند که استفاده از شیشه بازیافتی در مخلوط‌های آسفالتی باعث کاهش درصد قیر بهینه مخلوط می‌شود. دلیل اصلی این موضوع این است که استفاده از خرده شیشه سبب می‌شود تا جذب قیر غیرمفید در مصالح سنگی کاهش یابد. این موضوع سبب می‌شود تا قیر به شکل موثری بین سنگدانه‌ها و صرفاً برای پوشش و ایجاد چسبندگی صرف شود. همچنین، مشخص شد که استفاده از ۱۰ درصد شیشه بازیافت شده در مخلوط آسفالتی باعث افت مقاومت در برابر عریان‌شدگی می‌شود [۱۲]. نتایج مطالعه دیگری در زمینه استفاده از خرده شیشه در مخلوط‌های آسفالتی نشان داد که خرده شیشه چسبندگی بین قیر و سنگدانه را کاهش داده است. دلیل اصلی این موضوع این است که شیشه خصوصیات اسیدی دارد که چسبندگی آن با قیر که یک ماده اسیدی است، ضعیف‌تر از مصالح سنگی است. همچنین، استفاده از شیشه باعث افت مقاومت در برابر رطوبت می‌شود که استفاده از افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی مانند آهک هیدراته می‌تواند در بهبود مقاومت مفید

$$\Delta G_{ij}^a = \Gamma_{ij} - \Gamma_i - \Gamma_j = \Delta G_{ij}^{aLW} + \Delta G_{ij}^{aAB} \quad (3)$$

همچنین، روابط بیان شده تنها به دو ماده محدود نمی شوند و می توان آن را به بیش از دو ماده تعمیم داد. انرژی جدا شدگی قیر و سنگدانه در حضور آب مطابق رابطه زیر به دست می آید.

$$\Delta G_{ikj}^a = \Gamma_{ij} - \Gamma_{ik} - \Gamma_{jk} = \Delta G_{ikj}^{aLW} + \Delta G_{ikj}^{aAB} \quad (4)$$

$$W_{bsa}^a = \Gamma_{bw} + \Gamma_{sw} - \Gamma_{bs} = \left[\begin{array}{l} 2\Gamma_w^{bw} + 2\sqrt{\Gamma_b^{bw}\Gamma_s^{bw}} - 2\sqrt{\Gamma_b^{hw}\Gamma_w^{hw}} - 2\sqrt{\Gamma_s^{hw}\Gamma_w^{hw}} + 4\sqrt{\Gamma_w^+\Gamma_w^-} \\ -2\sqrt{\Gamma_w^+}\left(\sqrt{\Gamma_b^+} + \sqrt{\Gamma_s^+}\right) - 2\sqrt{\Gamma_w^-}\left(\sqrt{\Gamma_b^-} + \sqrt{\Gamma_s^-}\right) + 2\sqrt{\Gamma_b^+\Gamma_s^+} + 2\sqrt{\Gamma_b^-\Gamma_s^-} \end{array} \right] \quad (5)$$

که در معادله بالا؛ s مؤلفه مربوط به سنگدانه؛ b مؤلفه مربوط به قیر و w مؤلفه مربوط به آب است [۲۱، ۱۸].

۳. برنامه آزمایشگاهی

۳.۱. مصالح مصرفی

در این پژوهش، از ۳ نوع سنگدانه شامل سنگ آهک، گرانیت و کوارتزیت با درجه آب دوستی متفاوت (به ترتیب خاصیت بازی، اسیدی و اسیدی) استفاده شده است تا بتوان تأثیر نوع سنگدانه هایی با کانی های مختلف و با حساسیت های رطوبتی مختلف را مورد ارزیابی قرار داد. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی این سنگدانه ها به ترتیب در جدول های ۱ و ۲ ارائه شده است. همچنین دانه بندی سنگدانه های مورد استفاده در این پژوهش دانه بندی میانی مخلوط آسفالت متراکم (دانه بندی شماره ۳ نشریه ۲۳۴) است که حداکثر اندازه اسمی سنگدانه های این دانه بندی برابر ۱۹ میلی متر است. این دانه بندی در شکل ۱ ارائه شده است.

از طرفی دیگر، در این پژوهش از دو نوع قیر با درجه نفوذهای ۷۰-۶۰ و ۱۰۰-۸۵ استفاده گردیده است که خصوصیات آنها در جدول ۳ ارائه شده است.

در این پژوهش از دو نوع نانو ماده معدنی شامل نانو آهک هیدراته و نانو کربنات کلسیم به منظور بهبود مقاومت مخلوط های آسفالت شیشه ای و گرم در برابر خرابی های رطوبتی استفاده شده است. لازم به ذکر است که مقدار ۲ درصد جرمی هر یک از این نانو مواد به منظور اصلاح قیرهای پایه استفاده شده است. خصوصیات فیزیکی هر دو نانو ماده در جدول ۴ ارائه شده است. دلیل اصلی استفاده از این دو ماده این

آسفالت گرم متداول پرداخته شود و عملکرد این دو نوع مخلوط آسفالتی و تأثیر دو نوع افزودنی نانو بر عملکرد آنها در برابر خرابی رطوبتی مقایسه شود.

مهم ترین اهداف این پژوهش عبارت است از:

- ارزیابی عملکرد مخلوط های آسفالت شیشه ای در برابر حساسیت های رطوبتی با استفاده از آزمایش مکانیکی،
- ارزیابی عملکرد مخلوط های آسفالت گرم در برابر حساسیت های رطوبتی با استفاده از آزمایش مکانیکی،
- مقایسه عملکرد مخلوط آسفالت شیشه ای با مخلوط آسفالت گرم در برابر حساسیت های رطوبتی،
- بررسی تأثیر استفاده از افزودنی های نانو مواد معدنی در کاهش خرابی های رطوبتی هر دو نوع مخلوط آسفالتی،
- بررسی تأثیر استفاده از افزودنی های نانو مواد معدنی بر روی اجزای انرژی آزاد سطحی قیرهای پایه، و
- بررسی تأثیر اصلاح قیر با استفاده از افزودنی های نانو مواد معدنی بر روی پارامتر انرژی آزاد پیوستگی قیر و مقاومت مخلوط های آسفالتی در برابر حساسیت های رطوبتی با استفاده از روش انرژی آزاد سطحی.

۲. تئوری انرژی آزاد سطحی

انرژی آزاد سطحی کل هر ماده بر اساس نوع نیروهای مولکولی سطحی به سه جزء شامل؛ الف) جزء غیر قطبی که به آن جزء لیفشیتز- وندروالز (LW) یا جزء پراکنده نیز گفته می شود، ب) جزء اسیدی لوئیس و ج) جزء بازی لوئیس تقسیم می شوند [۲۰]. انرژی آزاد سطحی مطابق با این تئوری برای همه مواد با استفاده از رابطه زیر تعیین می شود.

$$\Gamma^{\text{Total}} = \Gamma^{\text{LW}} + \Gamma^{\text{AB}} = \Gamma^{\text{LW}} + 2\sqrt{\Gamma^+ \Gamma^-} \quad (1)$$

که در این رابطه؛ Γ^{Total} انرژی آزاد سطحی کل، Γ^{LW} مؤلفه غیر قطبی، Γ^{AB} مؤلفه اسیدی- بازی، Γ^+ مؤلفه اسیدی لوئیس و Γ^- مؤلفه بازی لوئیس می باشد.

به همین ترتیب انرژی آزاد پیوستگی و چسبندگی را می توان برحسب مؤلفه های قطبی و غیر قطبی بیان نمود.

$$\Delta G_i^c = -2\Gamma_i = \Delta G_i^{cLW} + \Delta G_i^{cAB} \quad (2)$$

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی سنگدانه‌های مورد استفاده

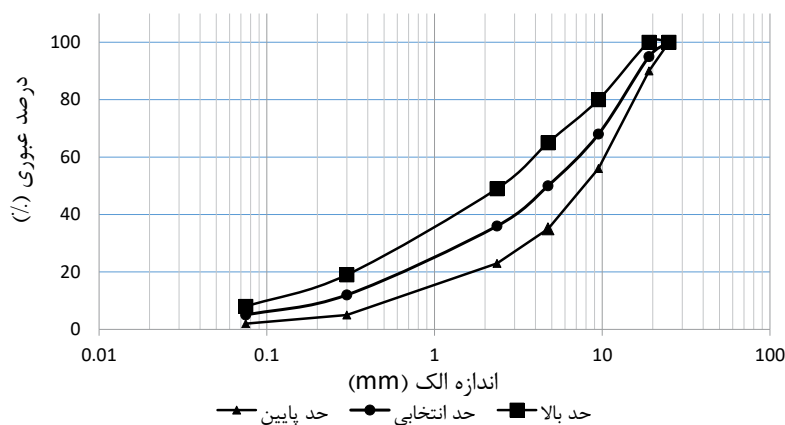
Table 1. Physical properties of the aggregates used

حدود آیین نامه	کوارتزیت	سنگ آهک	گرانیت	استاندارد	آزمایش
				ASTM C127	وزن مخصوص (سنگدانه)
-	۲/۴۸	۲/۵۹	۲/۶۱		حجمی
-	۲/۴۹	۲/۶۰	۲/۶۳		موثر
-	۲/۵۲	۲/۶۲	۲/۶۵		ظاهری
				ASTM C128	وزن مخصوص (ریزدانه)
-	۲/۴۶	۲/۵۷	۲/۶۰		حجمی
-	۲/۴۸	۲/۵۸	۲/۶۲		موثر
-	۲/۴۹	۲/۶۱	۲/۶۵		ظاهری
-	۲/۴۴	۲/۵۶	۲/۵۵	ASTM D854	وزن مخصوص (فیلر)
حداکثر ۳۰	۲۶	۲۷	۱۹	ASTM C131	حداکثر سایش لس آنجلس
۲/۸	۱/۷	۰/۸	۱/۲	ASTM C127	حداکثر جذب آب
بر اساس ترافیک	۸۶	۸۹	۹۱	ASTM D 5821	درصد شکستگی
حداکثر ۱۵	۶	۳	۹	ASTM D 4791	ذرات سوزنی و پولکی
حداکثر ۸	۷	۲	۴	ASTM C88	دوام در برابر سولفات سدیم

جدول ۲. ترکیبات شیمیایی سه نوع سنگدانه مورد استفاده

Table 2. Chemical compounds of the three types of aggregates used

خواص	سنگ آهک	گرانیت	کوارتزیت
pH	۸/۸	۷/۱	۶/۶
Silicon dioxide, SiO₂ (%)	۳/۸	۶۸/۱	۹۸
R₂O₃ (Al₂O₃ + Fe₂O₃) (%)	18	۱۶/۲	۱۳/۷
Aluminium oxide, Al₂O₃ (%)	1	۱۴/۸	۰/۸
Ferric oxide, Fe₂O₃ (%)	۰/۴	۱/۴	۲/۸
Magnesium oxide, MgO (%)	۱/۲	۰/۸	-
Calcium oxide, CaO (%)	۵۱/۳	۲/۴	۰/۰۷



شکل ۱. دانه‌بندی سنگدانه‌های مورد استفاده

Fig. 1. Gradation of aggregates used

جدول ۳. خصوصیات پایه قیرهای مورد استفاده

Table 3. Basic characteristics of the bitumens used

ویژگی	چگالی در 25°C	درجه نفوذ ^۲	نقطه نرمی $^{\circ}\text{C}$	شکل پذیری cm^4	درجه اشتعال $^{\circ}\text{C}$	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
مقدار مجاز	-	۸۵-۱۰۰	۴۵-۵۲	حداقل ۱۰۰	حداقل ۲۳۲	-	-
۸۵-۱۰۰	۱/۰۳	۹۱	۴۸	۱۱۲	۲۴۸	۰/۷۵	۹۹/۵

¹ Specific Gravity

² Penetration

³ Softening Point

⁴ Ductility

⁵ Flash Point

⁶ Loss of Heating

⁷ Solubility in Trichloroethylene

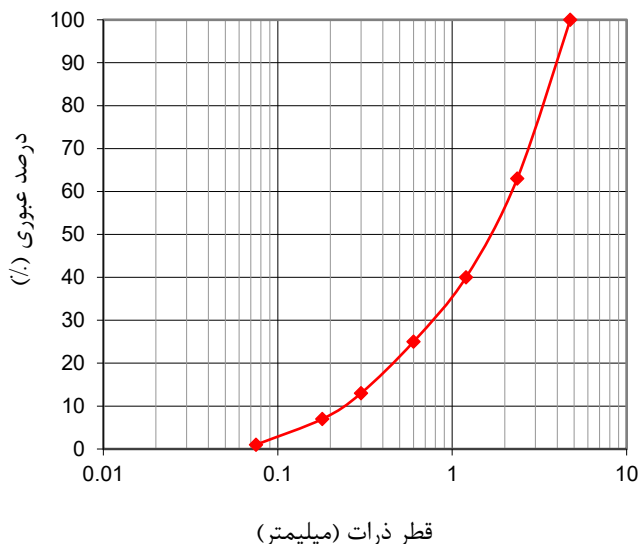
جدول ۴. خصوصیات فیزیکی هر دو نانو ماده مورد استفاده

Table 4. Physical properties of both nanomaterials used

خواص	نانو کربنات کلسیم	نانو آهک هیدراته
ساختار	کریستالی کلسیت	هگزاگونال
شکل ذرات	مکعبی	مکعبی
جرم مخصوص (gr/cm^3)	۲/۵	۲/۲۴
شاخص انکساری	۱/۲-۱/۷	۱/۱-۱/۵
مساحت سطح ویژه (m^2/gr)	32 ± 2	۱۶
میانگین اندازه ذرات (nm)	$60 \approx$	$42 \approx$
جرم مخصوص حجمی (gr/m^3)	۰/۵۳-۰/۵۴	۰/۵-۰/۶
درجه اسیدیته	۸-۱۰	۱۲/۴
درصد آب	$\leq 0/5$	$0/75 \leq$

در این پژوهش، مخلوط‌های آسفالت شیشه‌ای از جایگزینی ۱۰ درصد خرده شیشه به جای قسمت ریزدانه (ریزتر از الک ۴/۷۵ میلی‌متر) و مانده روی الک ۰/۷۵ میلی‌متر) هر یک از سه نوع سنگدانه تهیه شده است. درصد شیشه انتخاب شده بر اساس نتایج مطالعات پیشین

بوده است که هر دوی آنها در حالت فیلر توانسته‌اند حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی را کاهش دهند زیرا باعث افزایش خصوصیات چسبندگی ماستیک و سنگدانه‌های اسیدی می‌شوند که در این پژوهش از آنها به عنوان اصلاح‌کننده‌ی قیر استفاده شده است.



شکل ۲. نمودار دانه‌بندی خرده‌شیشه مورد استفاده در این پژوهش

Fig. 2. Particle size distribution of glass cullet used in this research

جدول ۵. مشخصات کانی‌های تشکیل دهنده خرده شیشه مورد استفاده

Table 5. Characteristics of the constituent minerals of glass used

خواص	خرده شیشه
Silicon dioxide, SiO ₂ (%)	۷۰/۵۰
Potassium oxide, K ₂ O (%)	۱/۲
Aluminium oxide, Al ₂ O ₃ (%)	۲/۶
Sodium oxide, Na ₂ O (%)	۱۶/۳
Magnesium oxide, MgO (%)	۲/۹
Calcium oxide, CaO (%)	۵/۷

اسیدهای قوی و بازها مقاومت کرده و تحت تاثیر خوردگی واقع نمی شود، به همین علت ظروف آزمایشگاهی را از آن می‌سازند. فقط اسید فلئوئوریک بر آن اثر داشته و شیشه را در خود حل می‌کند. حداکثر اندازه ذرات شیشه مورد استفاده ۴/۷۵ میلی‌متر است. دانه‌بندی خرده‌شیشه مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۲ ارائه شده است.

همچنین، کانی‌های تشکیل دهنده خرده شیشه مصرفی در این مطالعه در جدول ۵ قابل مشاهده است.

۳.۲. آماده سازی نمونه ها

در این پژوهش، جهت ارزیابی پتانسیل حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالت شیشه‌ای و گرم، ۳۶ ترکیب مختلف مطابق با جدول ۶ تهیه شده است. جهت آماده سازی این ترکیبات، همان طور که پیش تر نیز اشاره شد از سه نوع سنگدانه شامل سنگ آهک،

بوده است [۱۵، ۱۶].

شیشه، مایعی است بسیار سرد شده و در حرارتی پایین تر از نقطه انجماد آن، در حالت مایع قرار دارد و به طور عمومی، جسمی است شفاف که نور به خوبی از آن عبور می‌کند و پشت آن به وضوح قابل رؤیت است. شیشه از نظر ساختمان مولکولی در حالت جامد آرایش مولکولی نامنظم دارد. در درجه حرارت‌های بالا شیشه مثل هر مایع دیگری رفتار می‌کند. اما با کاهش دما گرانیوی آن به طور غیر عادی افزایش می‌یابد و باعث می‌شود مولکول‌ها نتوانند در آرایشی که مورد نیاز بلور است، قرار گیرند. به این ترتیب شیشه از نظر ساختمان مولکولی مانند مایعات نامنظم است ولی این ساختمان غیر منظم دیگر متحرک نیست. شیشه جسمی سخت است که سختی آن حدود ۸ می‌باشد و همه چیز به جز الماس را خط می‌اندازد. وزن مخصوص شیشه ۲/۵ گرم بر سانتی متر مکعب بوده و بسیار ترد و شکننده است. شیشه در مقابل تمام مواد شیمیایی حتی

جدول ۶. ترکیبات مختلف مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده

Table 6. Different compositions of asphalt mixtures made

ترکیب	سنگدانه	قیر	خرده شیشه	افزودنی
				(مخلوط آسفالت گرم)
۱	سنگ آهک	AC 60-70	-	-
۲	سنگ آهک	AC 60-70	-	نانو آهک هیدراته
۳	سنگ آهک	AC 60-70	-	نانو کربنات کلسیم
۴	گرانیت	AC 60-70	-	-
۵	گرانیت	AC 60-70	-	نانو آهک هیدراته
۶	گرانیت	AC 60-70	-	نانو کربنات کلسیم
۷	کوارتزیت	AC 60-70	-	-
۸	کوارتزیت	AC 60-70	-	نانو آهک هیدراته
۹	کوارتزیت	AC 60-70	-	نانو کربنات کلسیم
۱۰	سنگ آهک	AC ۸۵-۱۰۰	-	-
۱۱	سنگ آهک	AC ۸۵-۱۰۰	-	نانو آهک هیدراته
۱۲	سنگ آهک	AC ۸۵-۱۰۰	-	نانو کربنات کلسیم
۱۳	گرانیت	AC ۸۵-۱۰۰	-	-
۱۴	گرانیت	AC ۸۵-۱۰۰	-	نانو آهک هیدراته
۱۵	گرانیت	AC ۸۵-۱۰۰	-	نانو کربنات کلسیم
۱۶	کوارتزیت	AC ۸۵-۱۰۰	-	-
۱۷	کوارتزیت	AC ۸۵-۱۰۰	-	نانو آهک هیدراته
۱۸	کوارتزیت	AC ۸۵-۱۰۰	-	نانو کربنات کلسیم
				مخلوط آسفالت شیشه‌ای
۱۹	سنگ آهک	AC 60-70	۱۰ درصد	-
۲۰	سنگ آهک	AC 60-70	۱۰ درصد	نانو آهک هیدراته
۲۱	سنگ آهک	AC 60-70	۱۰ درصد	نانو کربنات کلسیم
۲۲	گرانیت	AC 60-70	۱۰ درصد	-
۲۳	گرانیت	AC 60-70	۱۰ درصد	نانو آهک هیدراته
۲۴	گرانیت	AC 60-70	۱۰ درصد	نانو کربنات کلسیم
۲۵	کوارتزیت	AC 60-70	۱۰ درصد	-
۲۶	کوارتزیت	AC 60-70	۱۰ درصد	نانو آهک هیدراته
۲۷	کوارتزیت	AC 60-70	۱۰ درصد	نانو کربنات کلسیم
۲۸	سنگ آهک	AC ۸۵-۱۰۰	۱۰ درصد	-
۲۹	سنگ آهک	AC ۸۵-۱۰۰	۱۰ درصد	نانو آهک هیدراته
۳۰	سنگ آهک	AC ۸۵-۱۰۰	۱۰ درصد	نانو کربنات کلسیم
۳۱	گرانیت	AC ۸۵-۱۰۰	۱۰ درصد	-
۳۲	گرانیت	AC ۸۵-۱۰۰	۱۰ درصد	نانو آهک هیدراته
۳۳	گرانیت	AC ۸۵-۱۰۰	۱۰ درصد	نانو کربنات کلسیم
۳۴	کوارتزیت	AC ۸۵-۱۰۰	۱۰ درصد	-
۳۵	کوارتزیت	AC ۸۵-۱۰۰	۱۰ درصد	نانو آهک هیدراته
۳۶	کوارتزیت	AC ۸۵-۱۰۰	۱۰ درصد	نانو کربنات کلسیم

نکته ضروری است که طرح اختلاط فقط در نمونه های کنترل (بدون افزودنی) انجام شده است و در نمونه های حاوی افزودنی از درصد قیر مشابه با نمونه کنترل استفاده شده است تا تفاوت در درصد قیر باعث اشکال در تفسیر نتایج نشود.

درصد قیر بهینه بر اساس میانگین سه درصد قیر متناظر با حداکثر وزن مخصوص حقیقی، حداکثر استقامت مارشال و درصد فضای خالی ۴ درصد تعیین شده است و سایر پارامترهای طرح اختلاط بر اساس این درصد قیر با مقادیر آیین نامه ۲۳۴ کنترل شده است.

۳.۳.۳ آزمایش لاتمن اصلاح شده (AASHTO T283)

برای انجام آزمایش حساسیت رطوبتی به روش لاتمن اصلاح شده برای هر ترکیب، سه نمونه در شرایط مرطوب و سه نمونه در شرایط خشک ساخته شده است. نمونه‌ها در این استاندارد دارای قطر و ارتفاع، به ترتیب ۱۰۰ میلی‌متر و $63/5 \pm 2/5$ میلی‌متر یا ۱۵۰ میلی‌متر و 95 ± 5 می‌باشد. از طرفی، نمونه‌ها باید به نحوی متراکم شوند که درصد هوای بین آن‌ها $7 \pm 0/5$ درصد باشد که در این مطالعه نمونه‌ها با استفاده از دستگاه چکش مارشال ساخته شده‌اند. پس از متراکم نمودن نمونه‌ها، قطر، ارتفاع و وزن آن‌ها اندازه‌گیری می‌شود. در ادامه وزن مخصوص حجمی و حداکثر اندازه‌گیری شده و بر اساس آن‌ها حجم نمونه و میزان حجم حفرات هوا اندازه‌گیری می‌شوند. در نهایت، سه نمونه از هر گروه در شرایط خشک باقی می‌ماند و سه نمونه از هر ترکیب به شرایط مرطوب برده می‌شود. برای تحت شرایط مرطوب قرار دادن نمونه‌ها، ابتدا آن‌ها را به وسیله شرایط خلأ نسبی (فشار مطلق ۶۷-۱۳ کیلو پاسکال) به مدت پنج دقیقه اشباع می‌نمایند. سپس، به مدت ۵-۱۰ دقیقه در حالت مستغرق و بدون شرایط خلأ نگهداری می‌شوند. درصد اشباع نمونه باید بین ۷۰ تا ۸۰ درصد شود. سپس، نمونه‌ها در داخل کیسه‌های پلاستیکی قرار داده شده و ده میلی گرم آب داخل آن قرار داده شده و درب کیسه بسته می‌شود. سپس، کیسه‌ها درون فریزر در دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۶ ساعت نگهداری می‌شوند. نمونه‌ها را در حمام آب گرم با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده می‌شود که ۲۴ ساعت در این دما باقی بمانند. در نهایت، نمونه‌ها به دمای اتاق (۲۵ درجه سانتی‌گراد) آورده می‌شوند و ۲۴ ساعت در این دما باقی می‌مانند. این نمونه‌ها را نمونه‌های مرطوب می‌نامند. در نتیجه، نمونه‌های خشک و مرطوب تحت آزمایش مقاومت کشش غیرمستقیم

گرانیت و کوارتزیت، دو نوع قیر با درجه نفوذهای ۶۰-۷۰ و ۸۵-۱۰۰، افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی نانو شامل نانو آهک هیدراته و نانو کربنات کلسیم به عنوان اصلاح کننده قیری (۲ درصد جرم قیر) و همچنین، خرده شیشه ضایعاتی استفاده شده است. شایان ذکر است، برای هر یک از ۳۶ ترکیب ذکر شده، سه نمونه برای شرایط خشک و سه نمونه برای شرایط مرطوب تهیه شده و هر نمونه با دو بار تکرار در این تحقیق مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

۳.۳.۳.۳ آزمایش‌ها

۱.۳.۳ اصلاح قیر

به منظور اصلاح قیر ابتدا ۲ گرم از نانوماده مورد نظر در ۹۸ گرم کروئوزن ریخته می‌شود. ترکیب ایجاد شده با همزن مکانیکی با سرعت ۴۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۵ دقیقه هم زده شده و سپس ترکیب حاصل در داخل حمام التراسونیک قرار می‌گیرد. حمام التراسونیک در واقع یک ظرف فلزی است که مقداری آب داخل آن می‌باشد. دستگاه متصل به این ظرف امواج فراصوت ایجاد می‌کند. یکی از موارد استفاده از محصولات حمام التراسونیک پخش ذرات داخل محلول و در نتیجه یکنواخت شدن محلول مورد نظر می‌باشد. این امواج می‌توانند پیوندهای بین تکه های کلوخه شده را بشکنند و باعث افزایش کیفیت محلول شود. ۱۰۰ گرم از ترکیب ایجاد شده با ۹۸ گرم قیر در دمای ۱۶۰-۱۵۰ درجه سانتیگراد با همزن دور بالا با سرعت چرخشی ۸۰۰۰ دور بر دقیقه مخلوط می‌شود. دمای تبخیر ماده کروئوزن حدود ۱۴۰ درجه سانتیگراد است. عملیات اختلاط ادامه پیدا می‌کند و در بازه‌های زمانی یک دقیقه وزن ظرف اندازه‌گیری می‌شود. اختلاط آنقدر ادامه پیدا می‌کند که ماده کروئوزن به صورت کامل تبخیر شده و وزن قیر و نانوماده به ۱۰۰ گرم برسد. از همزن دور بالا با حداکثر توان سرعت چرخشی ۱۴۰۰۰ دور بر دقیقه استفاده شده است. با توجه به اینکه زمان و دمای اختلاط قیر ممکن است باعث مقداری پیرشدگی در قیرهای اصلاح شده شود، لذا این فرآیند بر روی قیرهای پایه نیز انجام شده است.

۳.۳.۳.۲ طرح اختلاط

برای طرح اختلاط مخلوط های آسفالتی از روش مارشال بر اساس دستورالعمل نشریه MS-2 انستیتو اسفالت استفاده شده است. ذکر این

جدول ۷. مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی مایع‌های آزمایش در روش صفحه ویلهلمی

Table 7. Components of surface free energy of test liquids in Wilhelmy plate method

مایع آزمایش	مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی (ergs/cm ²)				
	کل Γ^t	غیر قطبی Γ^{LW}	قطبی Γ^{AB}	بازی Γ^-	اسیدی Γ^+
آب	۷۲/۸	۲۱/۸	۵۱	۲۵/۵	۲۵/۵
گلیسرول	۶۴	۳۴	۳۰	۵۷/۴	۳/۹۲
فرمامید	۵۸	۳۹	۱۹	۳۹/۶	۲/۲۸

۳.۳.۴. اندازه‌گیری اجزای انرژی آزاد سطحی قیر

در این قسمت سعی شده است تا مراحل انجام آزمایش اندازه‌گیری مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر به صورت تشریحی آورده شود:

۱- انتخاب سه مایع آزمایش مناسب که مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی آنها معلوم باشد. به طور معمول فرمامید، گلیسرول و آب مقطر در تحقیقات مختلف بیشتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی این سه ماده مطابق جدول ۷ می‌باشد.

۲- برای هر نوع قیر، ۱۲ صفحه نازک شیشه‌ای آماده می‌شود. ابعاد این صفحات ۵۰*۲۴*۰/۱۵ میلی‌متر است. ابتدا باید صفحات شیشه‌ای را با تولوئن و سپس استون شست. سپس به مدت ۲۰ دقیقه در محلول NaOH قرار داد. بعد از شستشو، باید روی صفحه را آب گرفت و خشک کرد.

۳- در این مرحله غشای نازکی از قیر بر روی صفحه شیشه‌ای پوشش داده می‌شود. ابتدا باید قیر را در گرم خانه تا دمای ۱۳۵-۹۰ درجه سانتی‌گراد (بر اساس گرانشی قیر مورد استفاده) گرم کرد. صفحه شیشه‌ای را در ظرف قیر ذوب شده تا ۱۵ میلی‌متر (از بعد ۵۰ میلی‌متری) فرو می‌برند.

۴- صفحه شیشه‌ای در داخل گرم خانه آن را آویزان می‌کنند. اجازه داده می‌شود تا مقدار قیر اضافی از روی صفحه شیشه‌ای به پایین بچکد تا بر روی صفحه شیشه‌ای فقط غشای نازکی از قیر باقی بماند. صفحه شیشه‌ای آغشته به قیر را بر عکس کرده تا پس از مدتی صفحه همواری از قیر به دست آید. در این حالت در حدود ۱۰ میلی‌متر بالایی صفحه آغشته به قیر خواهد بود. ابعاد قسمتی از صفحه که توسط قیر پوشش داده شده است، اندازه‌گیری می‌شود و نمونه را به مدت ۲۴ ساعت در دسیکاتور قرار می‌دهند.

قرار می‌گیرند که در این آزمایش بارگذاری با نرخ ۵/۰۸ سانتی متر (۲ اینچ) بر دقیقه انجام می‌شود تا لحظه‌ای که نمونه گسیخته شود. با استفاده از رابطه ۶ مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم برای هر شش نمونه خشک و مرطوب ساخته شده برای هر ترکیب مخلوط آسفالتی به دست می‌آید.

$$ITS = 2000F / t\pi d \quad (6)$$

در رابطه بالا؛ ITS مقدار مقاومت کشش غیر مستقیم (kPa)، F مقدار نیروی لحظه گسیختگی (N)، t ضخامت نمونه آسفالتی (mm) و d قطر نمونه آسفالتی (mm) می‌باشد.

میانگین مقاومت کشش غیر مستقیم برای نمونه‌های خشک (سه نمونه) و مرطوب (سه نمونه) به صورت جداگانه محاسبه می‌شود. حساسیت رطوبتی یا پتانسیل عریان‌شدگی نمونه‌های آسفالتی با نسبت میانگین مقاومت کشش غیرمستقیم نمونه‌های مرطوب به خشک (برحسب درصد) طبق رابطه ۷ تعیین می‌شود.

$$TSR = \left(\frac{ITS_{wet}}{ITS_{dry}} \right) \times 100 \quad (7)$$

که در این رابطه؛ TSR نسبت مقاومت کشش غیرمستقیم (%)، ITS_{wet} میانگین مقدار مقاومت کشش غیرمستقیم نمونه‌های مرطوب (kPa) و ITS_{dry} میانگین مقدار مقاومت کشش غیرمستقیم نمونه‌های خشک (kPa) می‌باشد. در این پژوهش، به منظور بررسی دقیق تر عملکرد مخلوط‌های آسفالت شیشه‌ای و گرم در برابر حساسیت‌های رطوبتی و همچنین اثر افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی بر روی عملکرد این مخلوط‌ها یک، سه و پنج سیکل یخ-ذوب به نمونه‌های آسفالتی اعمال شده است.

هنگامی که صفحه آغشته به قیر در یک مایع غوطه‌ور می‌شود رابطه‌ی (۸) به رابطه‌ی (۹) تبدیل می‌شود:

$$F = W_{plate} + W_{asphalt} - V_{im} \cdot \rho_l \cdot g - (V - V_{im}) \cdot \rho_{air} \cdot g - P_t \Gamma_L \cos \theta \quad (9)$$

که در این رابطه، P_t محیط صفحه آغشته به قیر، Γ_L انرژی آزاد سطحی کل مایع، θ زاویه تماس دینامیکی بین قیر و مایع آزمایش، V_{im} حجم قسمت غوطه‌ور صفحه آغشته به قیر، V حجم کل صفحه قیری و P_L وزن مخصوص مایع.

با ترکیب دو رابطه‌ی بالا، رابطه‌ی (۱۰) به دست می‌آید:

$$\Delta F = P_t \Gamma_L \cos \theta - V_{im} \cdot \rho_L \cdot g + V_{im} \cdot \rho_{air} \cdot g \quad (10)$$

با نوشتن دوباره رابطه‌ی (۱۰) بر حسب مجهول زاویه تماس همه مجهولات سمت راست تساوی را می‌توان با استفاده از آزمایش صفحه ویلهلمی به دست آورد.

$$\cos \theta = \frac{\Delta F + V_{im} (\rho_L - \rho_{air}) g}{P_t \Gamma_L} \quad (11)$$

بر اساس رابطه‌ی Young-Dupre و با فرض اینکه تعادل فشار غشا برای قیر قابل اغماض است، رابطه‌ی (۱۲) به دست می‌آید:

$$\Gamma_L (1 + \cos \theta) = 2(\sqrt{\Gamma_S^{LW} \Gamma_L^{LW}} + \sqrt{\Gamma_S^+ \Gamma_L^-} + \sqrt{\Gamma_S^- \Gamma_L^+}) \quad (12)$$

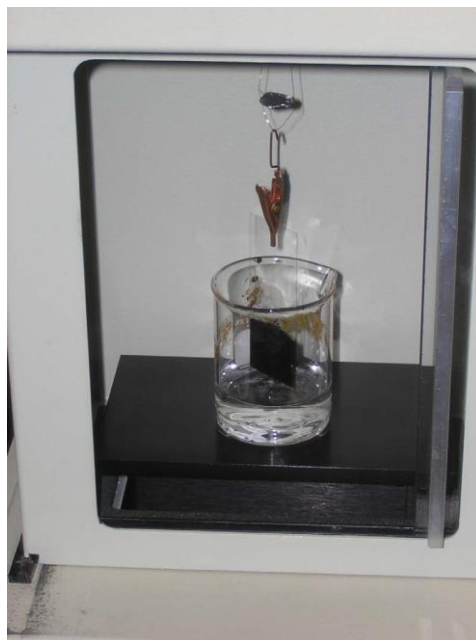
که در این رابطه، Γ_{Li}^{LW} و Γ_{Li}^+ و Γ_{Li}^- مولفه‌های انرژی آزاد سطحی مایع مورد استفاده، و Γ_S^+ و Γ_S^- و Γ_S^{LW} مولفه‌ها انرژی آزاد سطحی قیر می‌باشند. همانطور که پیشتر گفته شد، پارامتر زاویه تماس (θ) در رابطه‌ی (۱۲) را می‌توان از آزمایش صفحه ویلهلمی به دست آورد.

برای به دست آوردن مولفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر، شبیه آنچه برای به دست آوردن مولفه‌های انرژی آزاد سطحی سنگدانه‌ها گفته شد، نیاز به داشتن حداقل ۳ مایع آزمایش است. رابطه‌ی (۱۲) برای قیر مورد نظر برای هر سه مایع آزمایش مورد نظر انجام می‌شود و یک سیستم سه رابطه برای به دست آوردن سه جز انرژی آزاد سطحی (سه مجهول) مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۲].

۴. نتایج و بحث

۴.۱. آزمایش لاتمن اصلاح شده

نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) برای نمونه‌های



شکل ۳. غوطه‌وری صفحه آغشته به قیر و خارج کردن آن.

Fig. 3. Immersion of the screen impregnated with bitumen and removing it

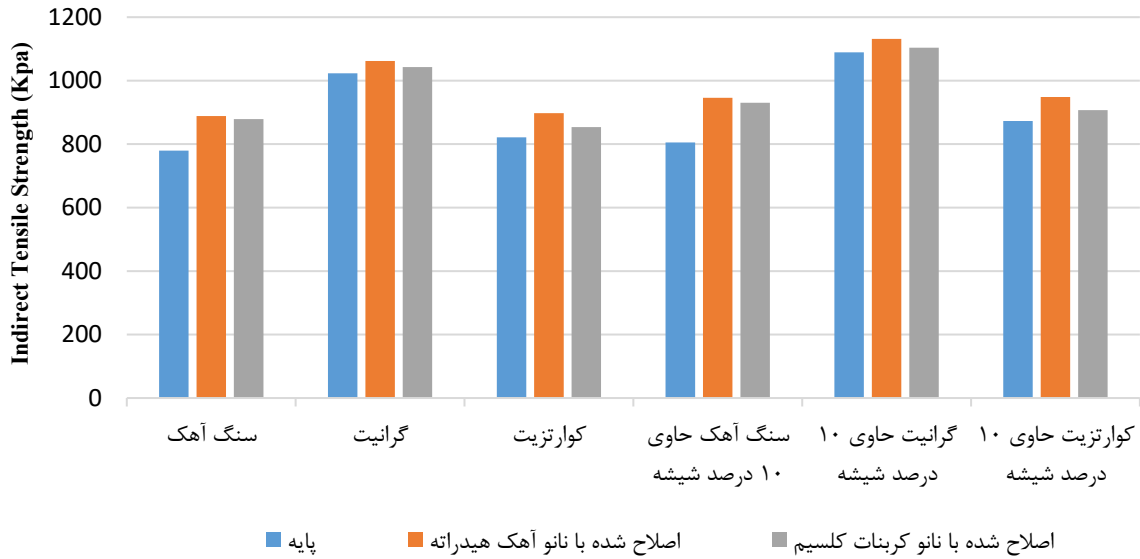
۵- سپس با استفاده از روش صفحه ویلهلمی مقدار زاویه تماس قیر مورد نظر در هر سه مایع آزمایش اندازه‌گیری می‌شود. برای اندازه‌گیری زاویه تماس بین قیر مورد نظر و هر یک از مایع‌های آزمایش حداقل ۴ تکرار لازم است. هر صفحه فقط یک بار باید مورد استفاده قرار گیرد. همچنین از هر بار انجام آزمایش باید نمونه مایع را نیز دور ریخت زیرا غوطه‌وری قیر در داخل مایع ممکن است دچار تغییر در خواص آن شود. شکل ۳ به طور شماتیک نحوه انجام آزمایش صفحه ویلهلمی را نشان می‌دهد.

۶- با اندازه‌گیری زاویه تماس بین قیر مورد نظر و سه مایع آزمایش، با استفاده از روابطی که در ادامه شرح داده شده است و تشکیل سه رابطه، سه مجهول مورد نظر (مولفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر) به دست می‌آید.

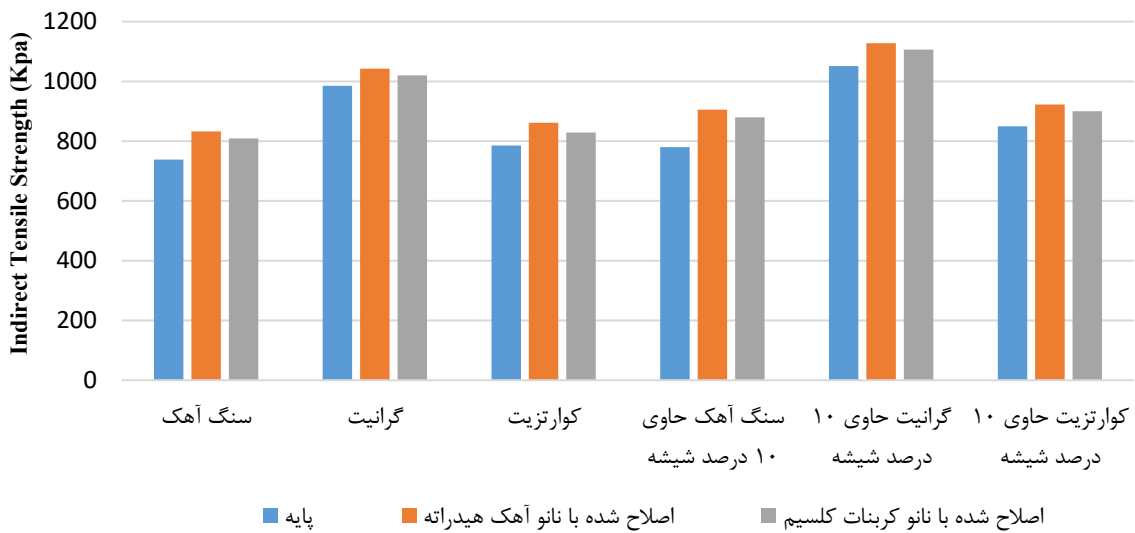
هنگامی که یک صفحه در هوا معلق باشد، رابطه (پ ۳-۶) برای تعیین میزان نیروی لازم برای نگهداشتن آن در وضعیت تعادل به کار می‌رود:

$$F = W_{plate} + W_{asphalt} - V \cdot \rho_{air} \cdot g \quad (8)$$

که در این رابطه، F نیروی لازم برای ثابت نگه‌داشتن صفحه، W_{plate} وزن صفحه فلزی، $W_{asphalt}$ وزن قیر، V حجم صفحه قیری، g شتاب جاذبه محلی و ρ وزن مخصوص هوا است.



شکل ۴. مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) نمونه‌های ساخته شده با قیر ۶۰-۷۰ در شرایط خشک
 Fig. 4. Indirect tensile strength (ITS) of samples made with AC 60-70 in dry conditions



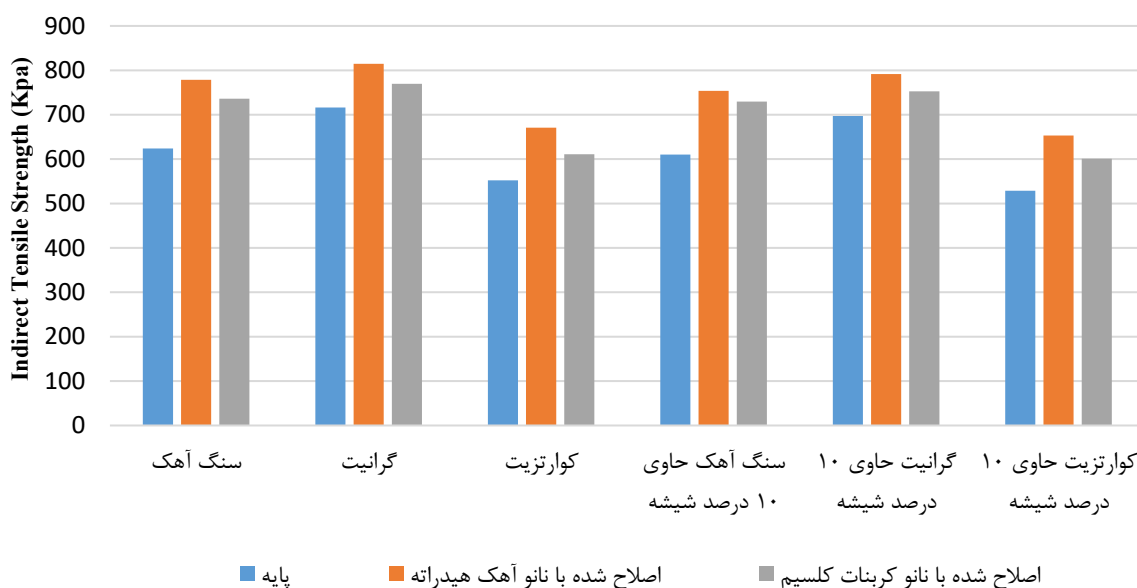
شکل ۵. مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) نمونه‌های ساخته شده با قیر ۸۵-۱۰۰ در شرایط خشک
 Fig. 5. Indirect tensile strength (ITS) of samples made with AC 85-100 in dry conditions

توجه به نتایج می‌توان گفت که در شرایط خشک مخلوط‌های آسفالت شیشه‌ای عملکرد بهتری را نسبت به مخلوط‌های آسفالت گرم از خود نشان داده‌اند. دلیل اصلی این موضوع را می‌توان به افزایش نیروی قفل و بست سنگدانه‌ای بهتر در مخلوط آسفالتی شیشه‌ای نسبت به مخلوط آسفالت بدون شیشه دانست که باعث بهبود افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر گسیختگی شده است. با مقایسه نتایج مقاومت کششی نمونه‌های ساخته شده با هر دو نوع قیر، می‌توان دریافت که قیرهای با درجه نفوذ کمتر (۶۰-۷۰) نسبت به قیرهای با درجه نفوذ بیشتر (۱۰۰-۸۵) مقاومت بهتری در برابر بارگذاری در شرایط خشک در هر دو نوع

ساخته شده با قیرهای ۶۰-۷۰ و ۸۵-۱۰۰ در شرایط خشک به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. همان طور که از داده‌های ارائه شده در شکل ۴ مشخص است اضافه کردن هر دو افزودنی نانو آهک هیدراته و نانو کربنات کلسیم باعث افزایش در میزان مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های ساخته شده با هر سه نوع سنگدانه سنگ آهک، گرانیت و کوارتزیت هم در مخلوط‌های آسفالت گرم و هم در مخلوط‌های آسفالت شیشه‌ای شده است. اگر چه چسبندگی بین قیر و سنگدانه شیشه‌ای در مقایسه با سنگدانه اصلی کمتر است و این موضوع می‌تواند باعث کاهش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر بارگذاری شود اما با

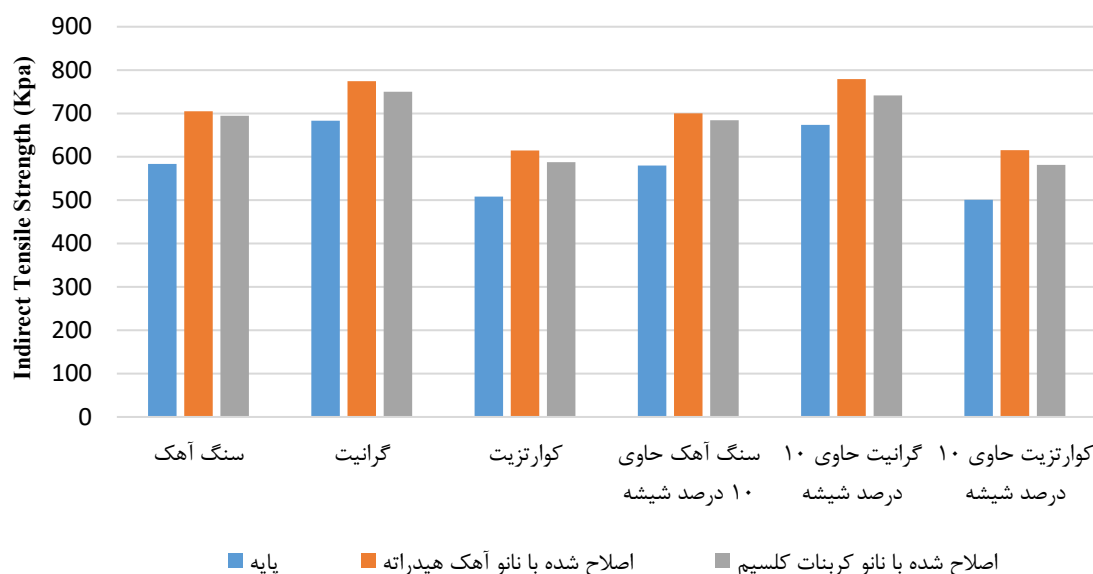
غیرمستقیم در برابر رطوبت مواجه شده‌اند که نشان دهنده عملکرد ضعیف مخلوط‌های آسفالت شیشه‌ای نسبت به مخلوط‌های آسفالت گرم در شرایط مرطوب می‌باشد. علاوه بر این، با توجه به داده‌های ارائه شده مشاهده می‌شود که عملکرد نمونه‌های شیشه‌ای و گرم ساخته شده با سنگدانه کوارتزیت در شرایط مرطوب به نحو قابل توجهی از سنگدانه‌های گرانیت و سنگ آهک ضعیف تر بوده است که این مطلب با توجه به میل آب دوستی کانی‌های تشکیل دهنده این سنگدانه و

مخلوط آسفالتی از خود نشان داده‌اند. مشابه با شرایط خشک، نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) نمونه‌های ساخته شده با قیرهای ۶۰-۷۰ و ۸۵-۱۰۰ در شرایط مرطوب تحت یک، سه و پنج دوره سیکل یخ-ذوب به ترتیب در شکل‌های ۶ تا ۱۱ نشان داده شده است. همان طور که از شکل‌های ۶، ۸ و ۱۰ مشخص است، نمونه‌های آسفالت شیشه‌ای ساخته شده با هر سه نوع سنگدانه سنگ آهک، گرانیت و کوارتزیت با کاهش مقاومت کششی



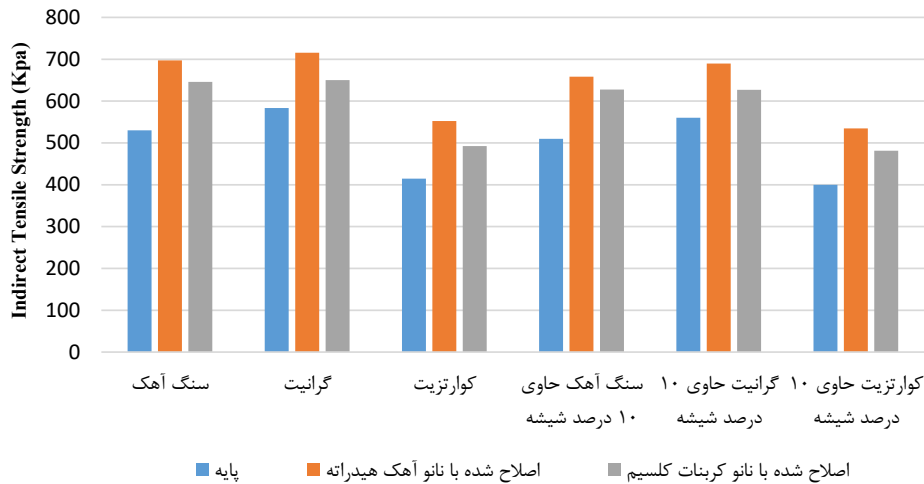
شکل ۶. مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) نمونه‌های ساخته شده با قیر ۶۰-۷۰ تحت شرایط مرطوب با یک دوره سیکل یخ - ذوب

Fig. 6. Indirect tensile strength (ITS) of samples made with AC 60-70 under wet conditions with an ice-melting cycle period



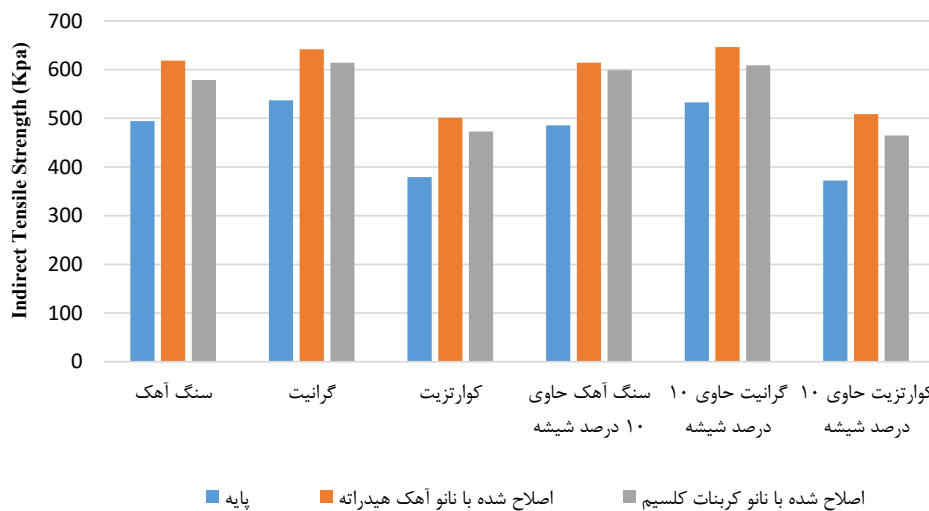
شکل ۷. مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) نمونه‌های ساخته شده با قیر ۸۵-۱۰۰ تحت شرایط مرطوب با یک دوره سیکل یخ - ذوب

Fig. 7. Indirect tensile strength (ITS) of specimens made of AC 85-100 under wet conditions with an ice-melting cycle period



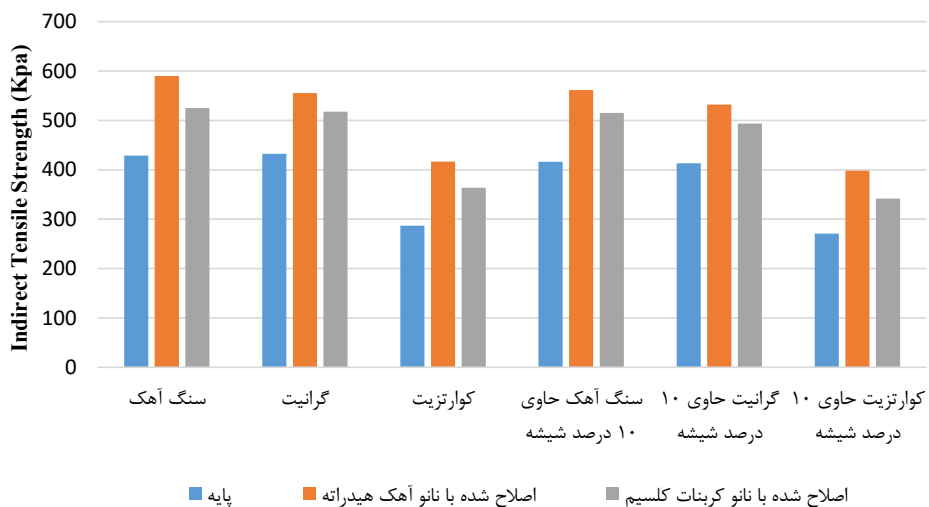
شکل ۸. مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) نمونه‌های ساخته شده با قیر ۶۰-۷۰ تحت شرایط مرطوب با سه دوره سیکل یخ - ذوب

Fig. 8. Indirect tensile strength (ITS) of specimens made of AC 60-70 under wet conditions with three ice-thaw cycles



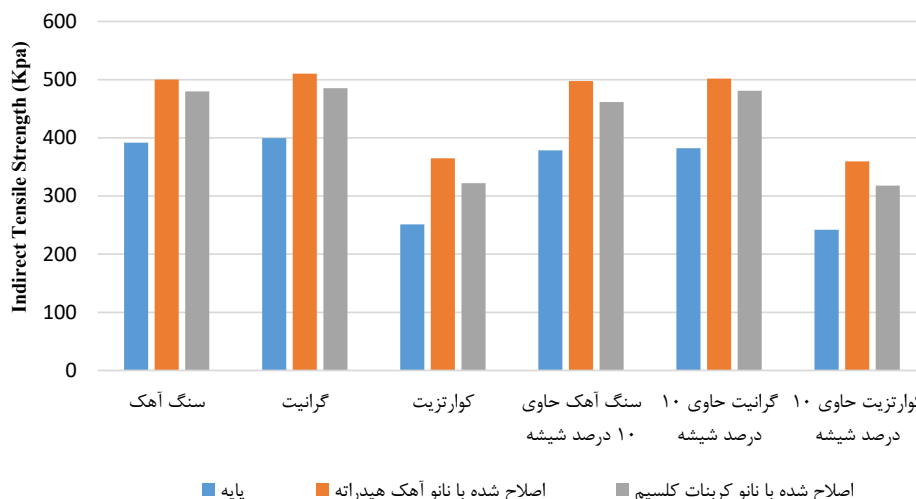
شکل ۹. مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) نمونه‌های ساخته شده با قیر ۸۵-۱۰۰ تحت شرایط مرطوب با سه دوره سیکل یخ - ذوب

Fig. 9. Indirect tensile strength (ITS) of specimens made of AC 60-70 under wet conditions with three ice-melting cycles



شکل ۱۰. مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) نمونه‌های ساخته شده با قیر ۶۰-۷۰ تحت شرایط مرطوب با پنج دوره سیکل یخ - ذوب

Fig. 10. Indirect tensile strength (ITS) of specimens made of AC 60-70 under wet conditions with five ice-thaw cycles



شکل ۱۱. مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) نمونه‌های ساخته شده با قیر ۱۰۰-۸۵ تحت شرایط مرطوب با پنج دوره سیکل یخ-ذوب

Fig. 11. Indirect tensile strength (ITS) of samples made of AC 60-70 under wet conditions with five ice-thaw cycles

کربنات کلسیم را سست کرده و در نتیجه گاز دی اکسید کربن یا فرمول CO_2 از آن جدا شده و وارد جو می‌شود. محصول نهایی همان آهک می‌باشد که ساختار معدنی تری نسبت به کربنات کلسیم دارد زیرا بخش عمده آن کانی Ca است که خصوصیات بازی قوی دارد که می‌تواند برای ایجاد بهبود چسبندگی با قیر که یک ماده ذاتا اسیدی است، موثر باشد. این ماده هنگامی که به صورت هیدراته در آید، میل به ترکیب با آب در آن به شدت کاهش یافته و خصوصیات بازی قوی پیدا می‌کند. کربنات کلسیم به علت کربناتی که در ساختار خود دارد، تمایل بیشتری به ترکیب با آب دارد. این در حالیست که آهک هیدراته در حالت پایدارتری قرار دارد و میل به ترکیب با آب در این ماده بسیار پایین است.

شکل‌های ۹، ۷ و ۱۱ نیز به بیان نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم در شرایط مرطوب در نمونه‌های ساخته شده با قیر ۱۰۰-۸۵ پرداخته است. نتایج ارائه شده در مورد روند مقاومتی در نمونه‌های پایه (بدون افزودنی) و اصلاح‌شده ساخته شده با این قیر مشابه با قیر ۶۰-۷۰ است. این نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌های آسفالت شیشه‌ای عملکرد ضعیف تری را نسبت به نمونه‌های آسفالت گرم در شرایط مرطوب داشته است. همچنین، نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه‌های کوارتزیتی و سنگ آهک به ترتیب ضعیف‌ترین و پایدارترین عملکرد در برابر بارگذاری بر روی نمونه‌های آسفالت شیشه‌ای و گرم در شرایط مرطوب را داشته است. همچنین، استفاده از هر دو نانو ماده معدنی باعث افزایش قابل ملاحظه مقاومت همه نمونه‌ها در شرایط مرطوب شده است. درنهایت، بر اساس شکل‌های ۶ تا ۱۱ می‌توان دریافت که قیر ۶۰-۷۰ عملکرد

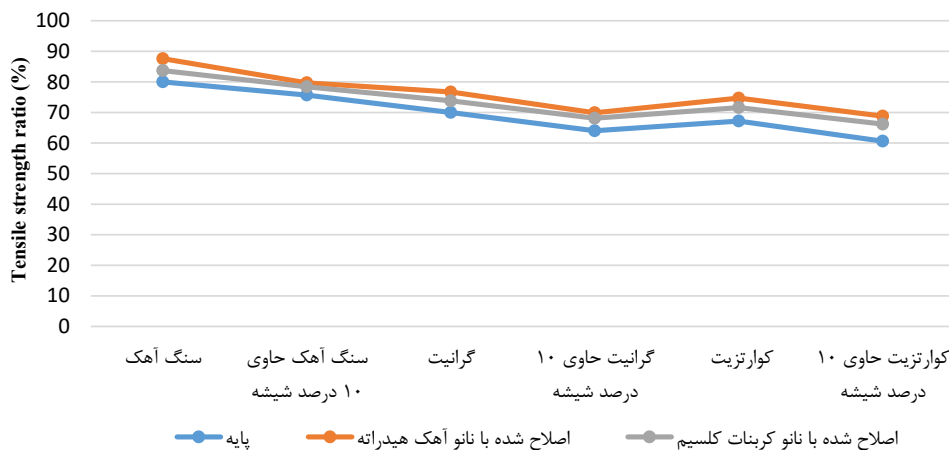
همچنین مقاومت در شرایط خشک نمونه‌های ساخته شده با این نوع سنگدانه قابل پیش بینی بود. نتیجه دیگری که از شکل‌های می‌توان دریافت این است که نرخ کاهش مقاومت کششی نمونه‌های ساخته شده با هر سه نوع سنگدانه در هر دو مخلوط آسفالت شیشه‌ای و گرم با افزایش تعداد سیکل‌های یخ-ذوب افزایش بیشتری می‌یابد که این افت مقاومت می‌تواند به علت از دست رفتن چسبندگی مخلوط یا پیوستگی قیر ناشی از حضور بیشتر نمونه‌ها در معرض رطوبت باشد. از طرفی دیگر، استفاده از هر دو افزودنی ضد عریان‌شدگی نانو آهک هیدراته و نانو کربنات کلسیم در همه نمونه‌های ساخته شده با قیر ۶۰-۷۰ و سه نوع سنگدانه سنگ آهک، گرانیت و کوارتزیت باعث بهبود قابل ملاحظه در مقاومت کششی هم در مخلوط‌های آسفالت شیشه‌ای و هم مخلوط‌های آسفالت گرم در شرایط مرطوب شده است که از بین این دو نوع افزودنی، تأثیر افزایش مقاومت در همه نمونه‌ها توسط نانو آهک هیدراته مشهودتر است. دلیل اصلی این موضوع را می‌توان در ویژگی‌های شیمیایی این دو ماده دانست زیرا از نظر ظاهر و خصوصیات فیزیکی بسیار به یکدیگر شبیه هستند. کربنات کلسیم همانگونه که از نام آن مشخص است، از یون‌های کربنات و کلسیم با فرمول $CaCO_3$ تشکیل شده است. در حالیکه در تولید آهک خالص، یون کربنات با فرمول CO_3 باید از ترکیب حذف شود. به این منظور سنگ کربنات کلسیم که سنگ آهک نیز نامیده می‌شود، را باید توسط یک فرآیند تصفیه خالص‌سازی نمود. عامل اصلی این فرآیند حرارت است. حرارت زیاد (بیش از هزار درجه سانتیگراد) می‌تواند پیوند اجزاء تشکیل‌دهنده

را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودارها، همان طور که برای مقادیر مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) اشاره شد، نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (TSR) نمونه‌های شیشه‌ای و معمولی نیز با افزایش تعداد سیکل‌های یخ-ذوب کاهش یافته است. همچنین، مقادیر این نسبت برای مخلوط‌های آسفالت شیشه‌ای کمتر از مخلوط آسفالت گرم بوده است که نشان دهنده مقاومت کمتر این نوع مخلوط‌ها در شرایط مرطوب می‌باشد. به علاوه، نمونه‌های ساخته شده با قیر ۶۰-۷۰ عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌های ساخته شده با قیر ۸۵-۱۰۰ از خود نشان داده‌اند. از طرف دیگر، بر اساس نتایج مشاهده می‌شود که استفاده از افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی نانو آهک هیدراته و نانو کربنات کلسیم باعث افزایش مقادیر این نسبت و به تبع بهبود مقاومت نمونه‌های ساخته شده با هر

بهتری در مقایسه با قیر ۸۵-۱۰۰ در مقاومت مخلوط‌های آسفالت شیشه‌ای و گرم در شرایط مرطوب داشته است.

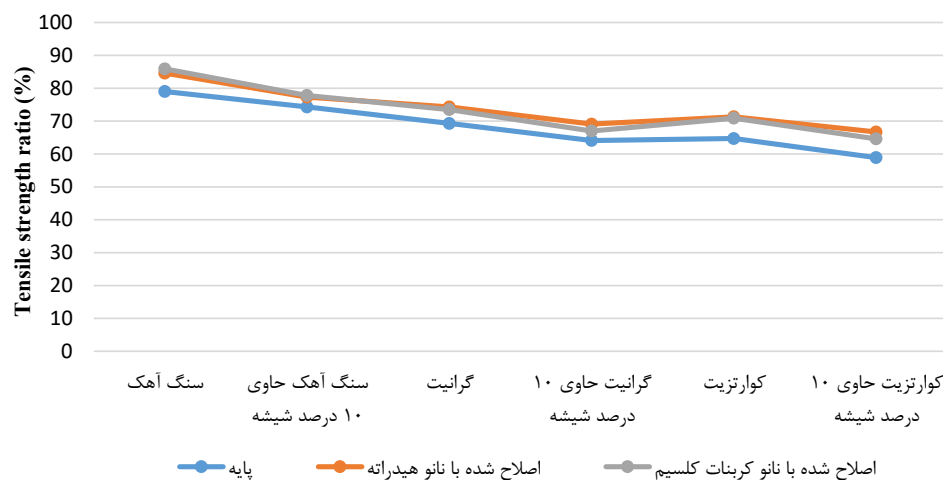
استفاده از افزودنی‌های نانو با توجه به خصوصیات بازی بیشتری که نسبت به قیر دارند، باعث افزایش خصوصیات بازی قیرهای اصلاح شده می‌شود. این موضوع باعث افزایش چسبندگی بین سنگدانه‌های اسیدی مانند گرانیت و کوارتزیت با قیر که خصوصیات بازی بیشتری پیدا کرده است، می‌شود. از اینرو می‌توان گفت استفاده از افزودنی‌های بازی باعث بهبود چسبندگی و افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم در شرایط مرطوب شده است.

شکل‌های ۱۲ تا ۱۷ نتایج این شاخص را برای مخلوط‌های آسفالت شیشه‌ای و گرم ساخته شده با دو نوع قیر مورد استفاده در این پژوهش



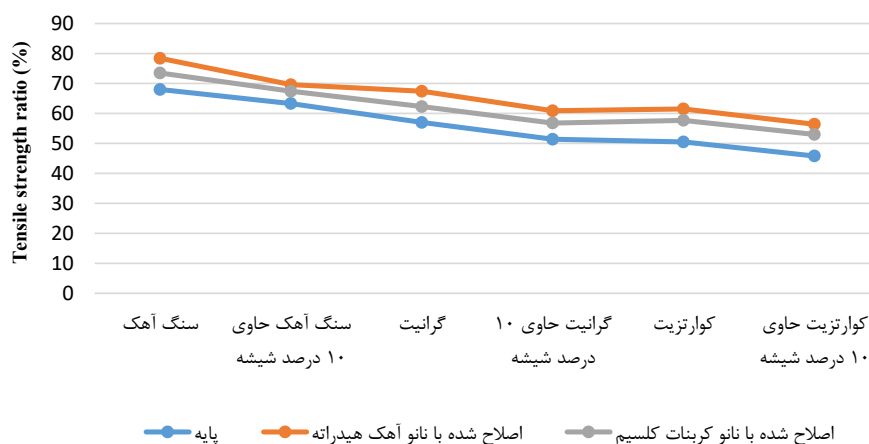
شکل ۱۲. نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (TSR) نمونه‌های ساخته شده با قیر ۶۰-۷۰ تحت یک دوره سیکل یخ - ذوب

Fig. 12. Indirect tensile strength ratio (TSR) of specimens made with AC 60-70 under an ice-melting cycle period



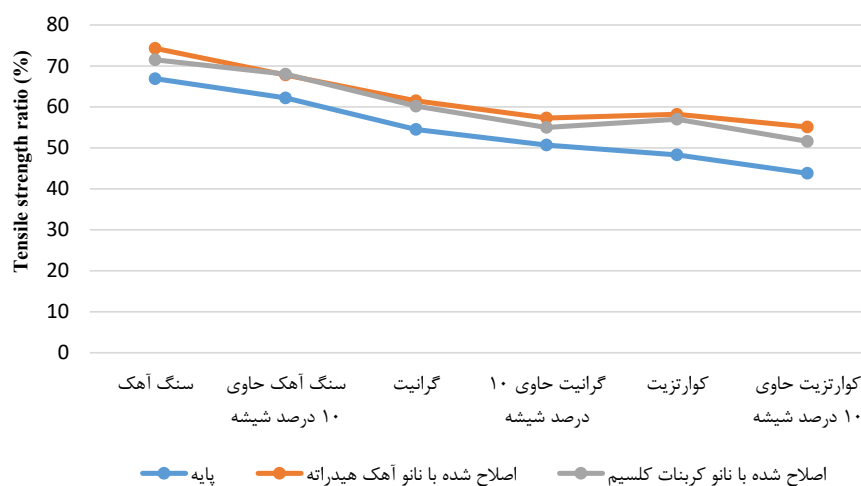
شکل ۱۳. نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (TSR) نمونه‌های ساخته شده با قیر ۸۵-۱۰۰ تحت یک دوره سیکل یخ - ذوب

Fig. 13. Indirect tensile strength ratio (TSR) of samples made with AC 60-70 under an ice-melting cycle period



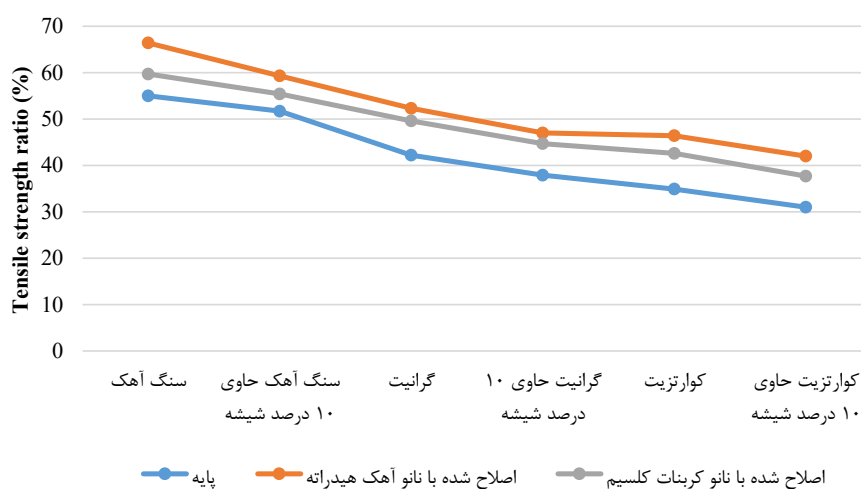
شکل ۱۴. نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (TSR) نمونه‌های ساخته شده با قیر ۶۰-۷۰ تحت سه دوره سیکل یخ - ذوب

Fig. 14. Indirect tensile strength ratio (TSR) of samples made with AC 60-70 under three ice-melting cycle periods



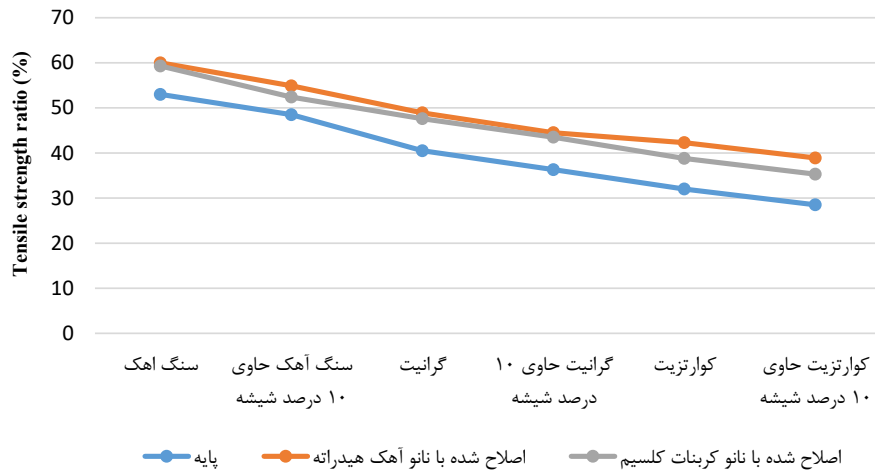
شکل ۱۵. نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (TSR) نمونه‌های ساخته شده با قیر ۸۵-۱۰۰ تحت سه دوره سیکل یخ - ذوب

Fig. 15. Indirect tensile strength ratio (TSR) of samples made with AC 85-100 under three periods of ice-melting cycle



شکل ۱۶. نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (TSR) نمونه‌های ساخته شده با قیر ۶۰-۷۰ تحت پنج دوره سیکل یخ - ذوب

Fig. 16. Indirect tensile strength ratio (TSR) of samples made with AC 60-70 under five ice-melting cycle periods



شکل ۱۷. نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (TSR) نمونه‌های ساخته شده با قیر ۱۰۰-۸۵ تحت پنج دوره سیکل یخ - ذوب

Fig. 17. Indirect tensile strength ratio (TSR) of samples made with AC 60-70 under five ice-melting cycle periods

جدول ۸. زاویه تماس بین قیر و مایعات آزمایش

Table 8. Contact angle between bitumen and test liquids

نوع قیر	زاویه تماس (درجه)	فرماید	گلیسرول	آب
قیر ۶۰-۷۰	۹۱/۷۹	۷۷/۱	۱۰۲/۱۲	
قیر ۶۰-۷۰ اصلاح شده با نانو آهک هیدراته	۸۹/۷۰	۷۵/۵۲	۱۰۱/۱۶	
قیر ۶۰-۷۰ اصلاح شده با نانو کربنات کلسیم	۸۹/۴۱	۷۳/۹۳	۱۰۰/۱۳	
قیر ۸۵-۱۰۰	۹۰/۲۹	۷۴/۶۷	۱۰۰/۸۹	
قیر ۸۵-۱۰۰ اصلاح شده با نانو آهک هیدراته	۹۰/۵۲	۷۷/۱۹	۱۰۴/۴۲	
قیر ۸۵-۱۰۰ اصلاح شده با نانو کربنات کلسیم	۸۸/۶۱	۷۳/۷۰	۹۹/۳۷	

بدین معناست که سیستم قیر-سنگدانه در شرایط متعادل تری از نظر ترمودینامیک قرار گرفته است و میل به عریان شدگی کاهش یافته است. این موضوع باعث می شود تا حساسیت رطوبتی در مخلوط های آسفالتی اصلاح شده کاهش یابد.

۴.۲. انرژی آزاد سطحی

در این پژوهش، برای محاسبه انرژی آزاد سطحی قیر از روش صفحه ویلهلمی استفاده شده است. نتایج زاویه تماس اندازه گیری شده برای سه مایع آزمایش با دو نوع قیر پایه و دو نوع قیر اصلاح شده مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۸ ارائه شده است که با استفاده از این زوایا و معادله یانگ دوپری و تشکیل سه معادله و سه مجهول مؤلفه های انرژی آزاد سطحی قیر به دست آمده اند. در رابطه با این زوایای تماس می توان گفت که هر چه این زاویه تماس بین مایع مورد نظر و قیر کمتر

سه نوع سنگدانه هم در مخلوط های آسفالت شیشه ای و هم مخلوط های آسفالت گرم نسبت به نمونه های کنترل شده است. برای هر دو نوع قیر مقادیر این نسبت برای سنگدانه های آهکی پایه و اصلاح شده بیشتر است. به عبارتی سنگدانه آهکی بیشترین مقاومت را در برابر خرابی رطوبتی از خود نشان داده اند و سنگدانه کوارتزیتی کمترین میزان مقاومت در برابر رطوبت را دارا هستند. در نهایت، در تکمیل نتایج به دست آمده از آزمایش لاتمن اصلاح شده می توان گفت که مخلوط های آسفالت شیشه ای با وجود این که در برابر رطوبت دچار افت مقاومت می شوند ولی می توان با استفاده از افزودنی های ضد عریان شدگی که در این پژوهش نیز از دو نوع نانو مواد معدنی استفاده شد این کاهش مقاومت را جبران نمود و به مقاومتی تقریباً برابر با مخلوط های آسفالت گرم دست یافت. استفاده از افزودنی های نانو باعث شده است تا انرژی جداشدگی در مخلوط های آسفالتی اصلاح شده کاهش یابد. این رخداد

جدول ۹. مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیرهای پایه و اصلاح شده با نانو مواد

Table 9. Components of surface free energy of base bitumen modified with nanomaterials

مایع آزمایش	مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی (ergs/cm ²)				
	کل Γ^t	غیر قطبی Γ^{LW}	قطبی Γ^{AB}	بازی Γ^-	اسیدی Γ^+
قیر ۶۰-۷۰	۱۶/۶۶	۱۴/۴۵	۲/۲۱	۰/۶۵	۱/۸۸
قیر ۶۰-۷۰ اصلاح شده با نانو آهک هیدراته	۱۹/۵۸	۱۷/۹۵	۱/۶۳	۰/۴۴	۱/۵۲
قیر ۶۰-۷۰ اصلاح شده با نانو کربنات کلسیم	۱۸/۰۳	۱۵/۶۰	۲/۴۳	۰/۷۲	۲/۰۶
قیر ۸۵-۱۰۰	۱۷/۱۱	۱۴/۵۶	۲/۵۵	۰/۸	۲/۰۳
قیر ۸۵-۱۰۰ اصلاح شده با نانو آهک هیدراته	۲۰/۱۱	۱۸/۹۳	۱/۱۸	۰/۳	۱/۱۷
قیر ۸۵-۱۰۰ اصلاح شده با نانو کربنات کلسیم	۱۹/۴۰	۱۷/۲۳	۲/۱۷	۰/۵۷	۲/۰۷

می‌باشد. اما باید در نظر داشت که انرژی آزاد سطحی کل دارای تأثیر دوگانه بر روی مقاومت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد. چرا که افزایش آن سبب بهبود مقاومت در برابر خرابی رطوبتی از نوع پیوستگی شده که یک اثر مثبت در کاهش گسیختگی پیوستگی به شمار می‌آید و از طرفی باعث کاهش در پوشش پذیری قیر بر روی سطح سنگدانه می‌شود که برای ایجاد چسبندگی مناسب بین قیر-سنگدانه نامطلوب است. همچنین، نتایج حاصل نشان داد، همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد مؤلفه‌های غیرقطبی هر دو نوع قیر بسیار بزرگ‌تر از مؤلفه‌های قطبی آن‌ها می‌باشد که تأیید می‌کند قیر یک ماده با خصوصیات قطبی ضعیف است و پیوند آن با سایر مواد اغلب از طریق مؤلفه غیر قطبی انرژی آزاد سطحی و با پیوندهای کووالانسی می‌باشد. به علاوه، مشاهده می‌شود که مؤلفه غیر قطبی قیر پایه ۸۵-۱۰۰ از قیر پایه ۶۰-۷۰ بزرگ‌تر است که با اصلاح هر دو نوع قیر با استفاده از نانو آهک هیدراته و نانو کربنات کلسیم، مقادیر این مؤلفه افزایش یافته است. در رابطه با مقایسه بین این دو افزودنی نیز می‌توان گفت که در هر دو نوع قیر، نانو آهک هیدراته اثر بیشتری در افزایش مؤلفه غیرقطبی داشته است. همچنین، با توجه به مؤلفه‌های اسیدی و بازی قیرها مشاهده می‌شود که قیر پایه ۸۵-۱۰۰ دارای مؤلفه اسیدی و بازی بزرگتری نسبت به قیر پایه ۶۰-۷۰ می‌باشد که این عامل باعث می‌شود که مخلوط‌های ساخته شده با این نوع قیر و سنگدانه‌های بازی مقاومت مناسبی در برابر گسیختگی از خود نشان دهند. به علاوه، اصلاح هر دو نوع قیر با نانو آهک هیدراته باعث کاهش قابل توجه مؤلفه‌های اسیدی و بازی شده است که در نتیجه، سنگدانه‌هایی مانند گرانیت و کوارتزیت که خاصیت اسیدی دارند چسبندگی ضعیفی را با این نوع قیرهای اصلاح شده به وجود می‌آورند. در مقابل،

باشد نشان دهنده قابلیت پوشش پذیری بالای قیر است که این قابلیت می‌تواند شرایط لازم برای چسبندگی مناسب را فراهم آورد. به طور معمول زوایای تماس کمتر از ۹۰ درجه را به عنوان پوشش پذیری خوب و زوایای تماس بزرگ‌تر از ۹۰ درجه را به عنوان پوشش پذیری ضعیف در نظر می‌گیرند [۱۸].

قیر یک مخلوط تک فاز و همگن از مولکول‌های قطبی و غیرقطبی شامل آسفالتین‌ها و مالتن‌ها است که خود این مواد نیز شامل آروماتیک‌ها، رزین‌ها و پارافین می‌باشند. بیشتر مولکول‌های تشکیل دهنده قیر خاصیت اسیدی و غیر قطبی دارند. در نتیجه، قیر به عنوان یک ماده با خصوصیات اسیدی شناخته می‌شود که می‌تواند واکنش پذیری مناسبی با سنگدانه‌های بازی مانند سنگدانه سنگ آهک و واکنش پذیری نامناسبی با سنگدانه‌های اسیدی مانند سنگدانه‌های گرانیتی و کوارتزیتی داشته باشد. نتایج به دست آمده از آزمایش صفحه ویلهلمی برای مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیرهای پایه و قیرهای اصلاح شده با هر دو نانو مواد معدنی در جدول ۹ ارائه شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود اصلاح هر دو نوع قیر پایه با نانو آهک هیدراته و نانو کربنات کلسیم باعث افزایش انرژی آزاد سطحی کل آن‌ها شده است که نتیجه آن، بهبود مقاومت مخلوط‌های ساخته شده با قیرهای اصلاح شده نسبت به قیرهای پایه در برابر خرابی‌های رطوبتی بوده و اثر مثبتی در کاهش گسیختگی پیوستگی دارد. چرا که انرژی بیشتری نیاز خواهد شد تا گسیختگی از نوع پیوستگی در مخلوط‌های ساخته شده با قیرهای اصلاح شده رخ دهد. در رابطه با مقایسه اثر هر دو نانو ماده می‌توان گفت که بیشترین نرخ افزایش در انرژی آزاد کل هر دو نوع قیر مربوط به نانو آهک هیدراته

جدول ۱۰. انرژی آزاد پیوستگی قیرهای پایه و اصلاح شده با نانو مواد

Table 10. Free energy of base and modified bitumens with nanomaterials

انرژی آزاد پیوستگی (ergs/cm^2)	نوع قیر
۳۳/۳۲	قیر ۶۰-۷۰
۳۹/۱۶	قیر ۶۰-۷۰ اصلاح شده با نانو آهک هیدراته
۳۶/۰۶	قیر ۶۰-۷۰ اصلاح شده با نانو کربنات کلسیم
۳۴/۲۲	قیر ۸۵-۱۰۰
۴۰/۲۲	قیر ۸۵-۱۰۰ اصلاح شده با نانو آهک هیدراته
۳۸/۸۰	قیر ۸۵-۱۰۰ اصلاح شده با نانو کربنات کلسیم

می‌شوند. این موضوع در تعداد سیکل‌های یخ-ذوب بالاتر باعث ایجاد تفاوت بیشتری شده است.

نتایج آزمایش‌های مکانیکی حساسیت رطوبتی نشان داده است که استفاده از هر دو نوع افزودنی مورد استفاده در این پژوهش باعث شده است تا حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالت شیشه‌ای کاهش یابد.

- عملکرد نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه کوارتزیت به میزان چشمگیری از نمونه‌های ساخته با دو سنگدانه دیگر برای هر دو مخلوط آسفالتی در شرایط مرطوب ضعیف‌تر بوده است. در مقابل سنگدانه آهک در هر دو مخلوط آسفالتی پایداری بهتری را در برابر رطوبت داشته است. از طرفی دیگر، از بین دو نوع قیر مورد استفاده در پژوهش قیر ۶۰-۷۰ عملکرد بهتری را در مقایسه با قیر ۸۵-۱۰۰ در مقاومت مخلوط آسفالت شیشه‌ای و گرم در برابر رطوبت داشته است.

- شاخص نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم برای مخلوط‌های آسفالت شیشه‌ای کمتر از مخلوط آسفالت گرم بوده است و با افزایش تعداد سیکل‌های یخ و ذوب مقادیر این شاخص کاهش بیشتری یافته است. به علاوه، استفاده از هر دو افزودنی نانو مواد باعث افزایش قابل توجه این شاخص و به تبع بهبود مقاومت هر دو نوع مخلوط آسفالتی در برابر حساسیت‌های رطوبتی شده است.

- استفاده از نانومواد باعث کاهش مولفه اسیدی و افزایش مولفه بازی انرژی آزاد سطحی قیر پایه شده است. این رخداد باعث می‌شود تا چسبندگی بین قیر و شیشه که خصوصیات اسیدی قوی نسبت به سایر سنگدانه‌ها دارد، افزایش یابد.

- استفاده از هر دو افزودنی نانو آهک هیدراته و نانو کربنات کلسیم سبب افزایش پارامتر انرژی آزاد پیوستگی برای هر دو نوع قیر شده است که نتیجه آن بهبود مقاومت در برابر گسیختگی پیوستگی می‌باشد که

سنگدانه آهکی که دارای خاصیت بازی می‌باشد چسبندگی قوی تری را با این نوع قیر ایجاد می‌کند. از طرفی دیگر، اصلاح هر دو نوع قیر با نانو کربنات کلسیم باعث افزایش خاصیت اسیدی و کاهش خاصیت بازی قیرها شده است که نتیجه آن، بهبود چسبندگی با سنگدانه‌های اسیدی و کاهش چسبندگی با سنگدانه‌های بازی است. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که افزودن مواد ضد عریان‌شدگی به هر دو نوع قیر مورد استفاده در این پژوهش باعث بهبود در مقاومت آن در برابر گسیختگی پیوستگی شده است که در هر دو نوع قیر، عملکرد نانو آهک هیدراته عملکرد بهتری در افزایش مقاومت پیوستگی قیر ایجاد کرده است.

۵. نتیجه‌گیری

خرابی رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی، مخصوصاً مخلوط‌های آسفالت شیشه‌ای، یکی از معضلات بزرگ در کاهش عمر مفید روسازی و افزایش سایر خرابی‌ها است. به منظور کاهش این خرابی‌های مختلف وجود دارد که مهم‌ترین این روش‌ها استفاده از مواد ضد عریان‌شدگی اصلاح‌کننده قیر یا مخلوط است. بر این اساس، در این پژوهش به بررسی تاثیر استفاده از نانومواد به عنوان اصلاح‌کننده‌ی قیر در کاهش خرابی رطوبتی مخلوط آسفالت شیشه‌ای پرداخته شده است. مهم‌ترین نتایج به دست آمده از این پژوهش عبارت‌اند از:

- استفاده از نانومواد مورد استفاده در این پژوهش باعث افزایش مقاومت مخلوط آسفالت شیشه‌ای در شرایط خشک و مرطوب شده است. این افزایش در نمونه‌های اصلاح شده با نانو آهک هیدراته مشهودتر بوده است.

- نمونه‌های مخلوط آسفالت شیشه‌ای در شرایط مرطوب نسبت به نمونه‌های مخلوط آسفالتی معمولی دچار افت مقاومت بیشتری

in asphaltic concrete mixtures: Field evaluation, Transportation Research Board, 1995.

- [9] M. Partl, R. Gubler, M. Hugener, Nano-science and-technology for Asphalt Pavements, SPECIAL PUBLICATION-ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY, 292 (2004) 343-356.
- [10] M. Maher, L. Uzarowski, G. Moore, V. Aurilio, Sustainable Pavements-Making the Case for Longer Design Lives for Flexible Pavements, in: PROCEEDINGS OF THE FIFTY-FIRST ANNUAL CONFERENCE OF THE CANADIAN TECHNICAL ASPHALT ASSOCIATION (CTAA): CHARLOTTETOWN, PRINCE EDWARD ISLAND, NOVEMBER 2006, 2006.
- [11] N. Su, J. Chen, Engineering properties of asphalt concrete made with recycled glass, Resources, conservation and recycling, 35(4) (2002) 259-274.
- [12] É. Lachance-Tremblay, M. Vaillancourt, D. Perraton, Evaluation of the impact of recycled glass on asphalt mixture performances, Road Materials and Pavement Design, 17(3) (2016) 600-618.
- [13] M. Arabani, Effect of glass cullet on the improvement of the dynamic behaviour of asphalt concrete, Construction and Building Materials, 25(3) (2011) 1181-1185.
- [14] R. Chenari, M. Sadeghnejad, Numerical Evaluation of the Effect of Waste Glass Cullet on Asphalt Mixtures' Behavior, Transportation Infrastructure Engineering, (2016), 1 (2), pp. 21-31.
- [15] P.A. Meybodi, H.K. Sanij, S. Hosseini, M. Olazar, Effect of Crushed Glass on Skid Resistance, Moisture Sensitivity and Resilient Modulus of Hot Mix Asphalt, Arabian Journal for Science and Engineering, 44(5) (2019) 4575-4585.
- [16] Z.T.A. Salem, T.S. Khedawi, M.B. Baker, R. Abendeh, Effect of Waste Glass on Properties of Asphalt Concrete Mixtures, Jordan Journal of Civil Engineering, 11(1) (2017).
- [17] R. Beyrami, Gh. H. Hamedi, B. Golchin, Investigation of the effect of waste glass and metal oxide nanoparticles on the stripping resistance of asphalt mixtures, Transportation Research, (2019), 15 (4), pp. 97-112.
- [18] A.W. Hefer, Adhesion in bitumen-aggregate systems and

از بین این دو افزودنی، نانو آهک هیدراته عملکرد بهتری را در بهبود مقاومت مخلوط‌های ساخته شده با هر دو نوع قیر مورد استفاده در این پژوهش دارد.

- نتایج به دست آمده در این پژوهش نشان می‌دهد که برای رفع مشکل حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی می‌توان از نانومواد معدنی به صورت اصلاح‌کننده‌ی قیر استفاده کرد. این مواد هم در شرایط مرطوب و هم در شرایط خشک باعث بهبود مقاومت مخلوط آسفالتی می‌شوند. این موضوع علاوه بر آنکه باعث کاهش زباله‌های شیشه‌ای تولیدی می‌شود، باعث افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر رطوبت نیز می‌شود زیرا عملکرد آنها حتی از مخلوط آسفالتی پایه نیز بهتر بوده است. درصد و نوع افزودنی مورد استفاده در هر نوع مخلوط آسفالت شیشه‌ای نیاز به آزمایش‌های مقدماتی دارد زیرا درصد و نوع بهینه این ماده با توجه به نوع سنگدانه، نوع و درصد قیر می‌تواند متفاوت باشد.

منابع

- [1] S. Wu, W. Yang, Y. Xue, Preparation and properties of glass-asphalt concrete, Wuham, China: Key Laboratory for Silicate Materials Science and Engineering of Ministry of Education, Wuham University of Technology, (2004).
- [2] G. Arnold, S. Werkmeister, D. Alabaster, The Effect of Adding Recycled Glass on the Performance of Basecourse Aggregate, 2008.
- [3] J. Wartman, D.G. Grubb, A. Nasim, Select engineering characteristics of crushed glass, Journal of Materials in Civil Engineering, 16(6) (2004) 526-539.
- [4] P.S. Kandhal, Waste materials in hot mix asphalt—An overview, in: Use of waste materials in hot-mix asphalt, ASTM International, 1993.
- [5] G. Maupin Jr, Effect of glass concentration on stripping of glassphalt, 1998.
- [6] F. Xiao, e. al, Improved Resistance of Long Term Aged Warm Mix Asphalt to Moisture Damage, 6th Transport Research, Arena, 2012.
- [7] E.A. Mercado, Influence of fundamental material properties and air void structure on moisture damage of asphalt mixes, PhD Dissertation A&M University, Texas, USA, 2007.
- [8] D.G. Tunncliff, R.E. Root, Use of antistripping additives

- [21] F.M. Fowkes, Determination of interfacial tensions, contact angles, and dispersion forces in surfaces by assuming additivity of intermolecular interactions in surfaces, *The Journal of Physical Chemistry*, 66(2) (1962) 382-382.
- [22] D.N. Little, A. Bhasin, A. Hefer, Using surface energy measurements to select materials for asphalt pavement, *Transportation Research Board*, 2006.
- [23] R.L. Lytton, E.A. Masad, C. Zollinger, R. Bulut, D.N. Little, Measurements of surface energy and its relationship to moisture damage, 2005.
- quantification of the effect of water on the adhesive bond, Texas A&M University, 2005.
- [19] G. Shafabakhsh, M. Faramarzi, M. Sadeghnejad, Use of surface free energy method to evaluate the moisture susceptibility of sulfur extended asphalts modified with antistripping agents, *Construction and Building Materials*, 98 (2015) 456-464.
- [20] C.J. Van Oss, M.K. Chaudhury, R.J. Good, Interfacial Lifshitz-van der Waals and polar interactions in macroscopic systems, *Chemical Reviews*, 88(6) (1988) 927-941.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

D. Saedi , H. Shirmohammadi, G.H. Hamed, Y. Azarion, Comparison of the effect of using mineral nanomaterials on the performance of HMA and glassphalt against the moisture damage, Amirkabir J. Civil Eng., 52(12) (2021) 2965-2986.

DOI: [10.22060/ceej.2019.16413.6214](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16413.6214)

