

بررسی آزمایشگاهی تاثیر نانورس بر حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی حاوی قیر اصلاح شده با SBS

مقاله علمی - پژوهشی

حامین چوبدار، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران
امین فرج الهی، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران
علیرضا عاملی*، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: amelii@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۴ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۲

صفحه ۴۶۰-۴۴۵

چکیده

حساسیت به رطوبت نقش مهمی در خرابی روسازی آسفالت دارد. خرابی زمانی رخ می‌دهد که قیر از ذرات سنگدانه جدا می‌شود به دلیل کاهش چسبندگی بین آسفالت و سنگدانه در مقایسه با چسبندگی بین آب و سنگدانه. در سال‌های اخیر، تلاش‌های استفاده از نانومواد برای بهبود خواص متنوع آسفالت مؤثر بوده است. در این مطالعه از سه نوع نانورس برای اصلاح قیر اصلاح شده استایرن-بوتادین-استایرن (SBS^۱-) استفاده شد. مقاومت در برابر خرابی رطوبتی قیرهای اصلاح شده با استفاده از انرژی آزاد سطحی (SFE^۲) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که کل SFE کاهش یافته و نسبت انرژی (ER^۳) با اصلاح قیر با نانورس‌ها افزایش یافته است، که نشان می‌دهد افزودن نانورس‌ها می‌تواند مقاومت رطوبتی این سیستم‌های چسبنده سنگدانه را بهبود بخشد. پس از غوطه وری، به دلیل برهم کنش بین آب و قیر، میزان ساختار سه بعدی در هر دو آسفالت SBS و اصلاح شده با نانورس مشاهده شد. با این حال، مقدار باقیمانده ساختارهای سه بعدی در آسفالت‌های اصلاح شده با نانورس بیشتر از آسفالت اصلاح شده با SBS بود، که نشان می‌دهد افزودن نانورس سبب می‌شود مورفولوژی سطح آسفالت در برابر آسیب آب مقاوم‌تر شود. در نهایت، از آزمون‌های انجماد و ذوب برای تأیید نتایج به دست آمده از طریق آزمون‌های SFE استفاده شد.

واژه‌های کلیدی: نانورس، انرژی آزاد سطحی، حساسیت رطوبتی، قیر، قیر اصلاح شده

۱- مقدمه

می‌شود به دلیل بدتر شدن چسبندگی بین آسفالت و سنگدانه در مقایسه با چسبندگی بین آب و سنگدانه، شکست ممکن است رخ دهد. پدیده فوق‌الذکر ممکن است ناشی از وجود چندین مسیر باشد که از طریق آنها رطوبت ممکن است به ساختار داخلی روسازی نفوذ کند. به عنوان مثال، رطوبت ممکن است از طریق ترک‌ها، حفره‌ها، لبه‌های شانه جاده، یا از طریق کف روسازی آسفالتی با عمل مویرگی وارد روسازی شود (kakar et al, 2015). برای جلوگیری یا کند کردن روند آسیب آب، یک اقدام گسترده اتخاذ شده اصلاح آسفالت یا سنگدانه‌ها با استفاده از

روسازی آسفالتی به طور مداوم در معرض بارگیری تکراری وسیله نقلیه و بارگذاری پیچیده محیطی در طول سال‌های خدمت خود قرار می‌گیرد که منجر به ترک خوردن، شیار شدن و خرابی رطوبتی به سطح آسفالت می‌شود (Wang et al, 2019; lou et al, 2009). این خرابی، سایش عملکرد روسازی آسفالت را کاهش داده و عمر مفید روسازی آسفالت را کاهش می‌دهد و در نتیجه ضررهای اقتصادی قابل توجهی را به همراه دارد (saeed et al, 2019). آسیب رطوبت نقش مهمی در خرابی روسازی آسفالت دارد. هنگامی که آسفالت از ذرات سنگدانه جدا

قیرهای اصلاح شده با دوزهای مختلف دو نانورس را ارزیابی کرد. پیشنهاد می‌کند که اگر این قیرها با یک عامل ضد لایه‌برداری یا افزودنی‌های دیگر اصلاح نشده باشند، قیرهای اصلاح شده با نانورس مقاومت‌های رطوبتی ضعیف‌تری نسبت به قیر پایه دارند. یکی از نانورس‌هایی که در حال حاضر به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد، مونت موریلونیت (MMT)^۸ است. با توجه به اندازه کوچک MMT و وجود تعداد زیادی کاتیون‌های قابل تعویض در لایه‌های میانی آن، مولکول‌های قیر می‌توانند به راحتی با واکنش با کاتیون‌های قابل تعویض به لایه‌های میانی MMT وارد شوند. علاوه بر این، MMT می‌تواند از طریق اصلاح آلی به مونت موریلونیت آلی (OMMT)^۹ تبدیل شود. پس از اصلاح، فاصله بین لایه‌های OMMT افزایش می‌یابد و باعث می‌شود مولکول‌های آسفالت در هم آمیخته شوند. نانورس بالقوه دیگر هیدروتالسیت دو لایه کلسینه شده (LDH)^{۱۰} است. LDH از لایه‌های بروسیت هشت وجهی و آنیون‌های بین لایه‌ای قابل تعویض تشکیل شده است. به دلیل مساحت سطح بزرگ، ظرفیت تبادل آنیون بالا، و فضای بین لایه‌ای انعطاف‌پذیر، در ترکیبات آنیونی به خوبی عمل می‌کند. علاوه بر این، LDH و MMT هر دو دارای مزایایی هستند، مانند وجود گسترده آنها در طبیعت، هزینه کم و فرآیندهای تولید مشخص (Ja et al, 2019). روش‌های سنتی مورد استفاده برای مطالعه آسیب رطوبت شامل آزمایش‌های مارشال جوشاندن، غوطه‌وری و شکافتن انجماد-ذوب، از جمله است. اگرچه مطالعات زیادی با استفاده از این روش‌های سنتی انجام شده است، اما هنوز هم کمبودهایی وجود دارد. تعداد زیادی از مطالعات نشان داده‌اند که آسیب آب یک سیستم قیر در مقیاس مولکولی یا احتمالاً حتی در مقیاس نانو رخ می‌دهد. با این حال، روش‌های ارزیابی سنتی که در بالا ذکر شد نمی‌توانند فرآیندها و مکانیسم‌های آسیب آب را در مقیاس مولکولی یا نانو آشکار کنند. علاوه بر این، شایان ذکر است که اگرچه روش‌های سنتی دارای محدودیت‌هایی هستند، اما می‌توان از آنها برای تأیید نتایج به دست آمده از آزمایش‌های دیگر استفاده کرد. از جمله روش‌هایی که اخیراً توسعه یافته‌اند، انرژی آزاد سطحی SFE (Shafabakhsh et al, 2015) می‌باشد.

روش SFE روشی است که برای بررسی کمی آسیب رطوبتی آسفالت از منظر تغییرات ترمودینامیکی استفاده می‌شود. روش SFE تأیید شده است که دارای پتانسیل زیادی در پیش بینی آسیب رطوبت است. با استفاده از این روش، آشیش و همکاران (Ashish et al, 2016) و عمر و همکاران (Omar et al, 2018) حساسیت آسفالت به رطوبت را ارزیابی کرد و به

مواد مختلف به عنوان اصلاح کننده برای بهبود عملکرد مخلوط آسفالت است. تأثیر استفاده از آهک برای اصلاح آسفالت قادر به بهبود مقاومت در برابر رطوبت مخلوط‌های مخلوط آسفالت گرم (HMA)^۴ است. نتایج آزمایشگاهی مخلوط آسفالت متخلخل به دست آمده توسط Jiao و همکاران. نشان داد که استفاده از خرده لاستیک (CR)^۵ می‌تواند مقاومت آسفالت اصلاح شده استایرن-بوتادین-استایرن (SBS-) را در برابر آسیب آب بهبود بخشد (Jiao et al, 2019). در سال‌های اخیر، با توسعه فناوری نانو، تلاش برای استفاده از فناوری نانو برای افزایش عملکرد آسفالت و مخلوط آسفالت به یک روند تحقیقاتی رایج تبدیل شده است. مطالعات متعددی با هدف کاهش آسیب رطوبتی آسفالت و مخلوط آسفالتی انجام شده است. مامون و آریفوززمان مقدار معینی از نانولوله‌های کربنی (CNTs)^۶ را به استایرن-بوتادین (SB)^۷ و استایرن-بوتادین-استایرن (SBS) اضافه کردند و دریافتند که آسفالت اصلاح شده با پلیمر CNT مقاومت بهتری نسبت به آسیب رطوبتی از خود نشان می‌دهد. آسفالت اصلاح شده با پلیمر (Mamun et al, 2018). تحقیقات Das و Singh نشان داد که سهم پرکننده آهک هیدراته با اندازه نانو نسبت به پرکننده آهک هیدراته با اندازه معمولی در بهبود استحکام باند و مقاومت در برابر رطوبت ماستیک آسفالت قابل توجه‌تر است (Das and Singh et al, 2018). علاوه بر این، توسط سزاوار و همکاران مشخص شد که از طریق الگوریتم روش گروهی پردازش داده‌ها که نانو سیلیس می‌تواند پایداری رطوبت مخلوط‌های آسفالتی را بهبود بخشد (Sezavar et al, 2019). در چند سال اخیر، علاقه فزاینده‌ای به استفاده از نانورس برای بهبود مقاومت در برابر آب مخلوط آسفالتی وجود داشته است. گوه و همکاران دریافتند که افزودن نانورس به آسفالت می‌تواند به طور قابل توجهی پتانسیل آسیب آب مخلوط را کاهش دهد (Goh et al, 2011). به همین ترتیب، عمر و همکاران (Omar et al, 2018) و آشیش و همکاران (Ashish et al, 2016) همچنین نشان داد که استفاده از نانورس به عنوان اصلاح کننده برای مقاومت در برابر رطوبت آسفالت مفید است. اگرچه اکثر محققان تأیید کردند که نانورس پتانسیل کاهش آسیب رطوبت به آسفالت را دارد، اما هنوز هم محققانی هستند که نظرات متفاوتی دارند. در تحقیق Lopez-Montero و همکاران (Lopez et al, 2018)، یک مخلوط اصلاح شده با نانورس رفتارهای مشابهی با مخلوط کنترل نشان داد که مخلوط‌های تازه در معرض آسیب رطوبت قرار گرفتند. علاوه بر این، حسین و همکاران (Hossein et al, 2015) مقاومت در برابر آسیب رطوبتی

۲- مواد و مصالح

۲-۱- قیر

قیر اصلاح شده با SBS، به عنوان قیر کنترلی در این مطالعه استفاده شد. قیر اصلاح شده با SBS با استفاده از قیر پایه ۱۰۰-۸۵ با اصلاح کننده ۵% SBS تهیه شد. مشخصات فنی قیر در بخش ۲،۲ همراه با خواص قیر اصلاح شده با نانورس ارائه شده است. سه نوع از نانورس، یعنی مونت موریلونیت آلی نوع ۱، مونت موریلونیت آلی نوع ۲، و هیدروتالسیت دو لایه کلسینه شده، در این مطالعه برای اصلاح قیر استفاده شدند. اجزای خاص این نانورسها در جدول ۱ ارائه شده است.

این نتیجه رسید که افزودن نانورس می تواند این ویژگی آسفالت را بهبود بخشد. با این حال، نتیجه معکوس توسط حسین و همکاران با استفاده از همین روش به دست آمد. (Hossein et al, 2015). بنابراین، برای بررسی بیشتر تاثیر نانورسها بر مقاومت چسبنده های آسفالتی در برابر رطوبت، سه نوع نانورس یعنی مونت موریلونیت آلی A، مونت موریلونیت آلی B و هیدروتالسیت دو لایه کلسینه شده برای تهیه ۹ نوع نانورس انتخاب شدند. مقاومت رطوبتی این قیرها با استفاده از روش SFE ارزیابی شد. اثرات نانورس بر مقاومت آسفالت در برابر آسیب آب نیز مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت، از آزمون های تقسیم انجماد و ذوب برای تأیید نتایج به دست آمده از طریق SFE استفاده شد.

جدول ۱. خصوصیات نانورس های استفاده شده

Sample	OMMT A	OMMT B	LDH
SiO ₂ (%)	71.35	72.21	1.05
Al ₂ O ₃ (%)	18.53	19.16	98.61
MgO (%)	3.05	3.11	-
Fe ₂ O ₃ (%)	2.77	2.22	0.02
K ₂ O (%)	1.3	0.78	0.02
CaO (%)	1.2	0.25	0.02
SO ₃ (%)	0.47	0.98	-
Cl (%)	0.41	0.6	-
Na ₂ O (%)	0.32	0.23	0.23
TiO ₂ (%)	0.28	0.2	-
P ₂ O ₅ (%)	0.24	0.19	-
MnO (%)	0.03	0.04	-
ZrO ₂ (%)	0.01	0.01	-
ZnO (%)	0.01	0.01	-
SrO (%)	0.01	0	-
Rb ₂ O (%)	0	0	-
Ga ₂ O ₃ (%)	-	-	0.05
LOI	28.7	32.79	33.93

۲-۲- سنگدانه

خصوصیات فیزیکی اصلی سنگدانه ها در جداول ۲ ارائه شده است.

نوع سنگدانه مورد استفاده برای ساخت مخلوط آسفالتی برای آزمایش های تقسیم انجماد- ذوب بازالت بود. خواص فیزیکی بازالت با توجه به نشریه ۲۳۴ اندازه گیری شد.

جدول ۲. مشخصات مصالح سنگی درشت دانه

نتایج	حد آیین نامه	خصوصیت
۲,۹۲	>۲,۶	وزن مخصوص واقعی
۲,۸۷	-	وزن مخصوص ظاهری
۰,۵۴	<۲	جذب آب (%)
۱,۸	<۳	درصد سنگ نرم
۲۱	<۲۶	درصد سنگ سخت
۵,۶	<۱۲	استحکام
۲۳,۲۵	<۲۸	ارزش جذب

جدول ۳. مشخصات مصالح سنگی ریز دانه

نتایج	حد آیین نامه	خصوصیت
۲,۹۲	>۲,۶	وزن مخصوص واقعی
۲,۸۷	-	وزن مخصوص ظاهری
۰,۵۴	<۲	هم ارز ماسه ای (%)
۱,۸	<۳	ارزش متالین آبی
۲۱	<۲۶	درصد شکستگی

جدول ۴. خصوصیات فیلر

نتایج	حدود آیین نامه	خصوصیت
۲,۷۲۷	>۲,۵	وزن مخصوص واقعی
۰,۶	<۰,۸	ضریب هیدروفیلیک
۲	<۴	شاخص پلاستیسیته
۰,۲	<۱	درصد آب
-	-	شکل ظاهری

جدول ۵. خصوصیات فیزیکی قیرها

شکل پذیری	نقطه نرمی	درجه نفوذ	نوع قیر
۳۹,۳	۸۹,۴	۵۷,۸	قیر شاهد
۳۷,۷	۹۱,۴	۵۴,۳	OMMT A-1
۳۱,۳	۹۴,۹	۵۱,۴	OMMT A-3
۳۳,۶	۹۴,۶	۵۲,۵	OMMT A-5
۳۰,۸	۹۳,۲	۵۵,۸	OMMT B-1
۲۸	۹۴,۸	۵۲,۹	OMMT B-3
۲۲,۴	۸۰,۲	۴۸,۴	OMMT B-5
۳۵	۸۹,۴	۵۵,۶	LDH-1
۳۷,۶	۹۰,۲	۵۶,۷	LDH-3
۳۵,۳	۸۳	۵۶,۸	LDH-5

جدول ۶. دانه بندی مصالح سنگی

اندازه الک (میلی متر)	۱۶	۱۳,۲	۹,۵	۴,۷۵	۲,۳۶	۱,۱۸	۰,۶	۰,۳	۰,۱۵	۰,۰۷۵
حد پایین-حد بالا	۱۰۰	۱۰۰-۹۰	۸۵-۶۸	۶۸-۳۸	۵۰-۲۴	۳۸-۱۵	۱۰-۲۸	۷-۲۰	۵-۱۵	۴-۸
درصد عبوری	۱۰۰	۹۵	۷۶,۵	۵۳	۳۷	۲۶,۵	۱۹	۱۳,۵	۱۰	۶

جدول ۷. اجزا انرژی آزاد سطحی مایعات

مایع	$\sqrt{\gamma^-}$	$\sqrt{\gamma^+}$	$\sqrt{\gamma}$	$\sqrt{\gamma^{iw}}$
اب	۷۲,۷	۲۵,۷	۲۵,۴	۲۱,۵
گلیسرول	۶۲	۳,۵	۵۷,۳	۳۳
فرمامید	۵۷	۲,۲۷	۳۹,۵	۳۸

۲-۳-آماده سازی نمونه های قیر اصلاح شده

نمونه های قیر اصلاح شده با افزودن سه درصد مختلف از هر نانورس (۱، ۳ و ۵ درصد وزنی قیر) به قیر تهیه شد. دلیل عدم استفاده از مقدار بیشتری از این افزودنی ها این است که خاک رس بیش از حد باعث کاهش عملکرد آسفالت در دماهای پایین می شود (به عنوان مثال، شکل پذیری آسفالت در شرایط دمای پایین ذکر شده در زیر را ببینید. جدول ۵). 500 ± 20 گرم از قیر در ظروف ریخته شد و در 175 درجه سانتی گراد به مدت ۱ ساعت قبل از فرآیند اصلاح حرارت داده شد. برای دستیابی به این گرمایش، ظروف آسفالتی را در کوره قرار دادند. نانورس ها در دمای 80 درجه سانتی گراد به مدت $1,5$ ساعت برای حذف رطوبت قبل از افزودن به قیر حرارت داده شدند. پس از حرارت دادن، نانورس ها به طور پیوسته به قیر اضافه شدند. ابتدا با سرعت 1000 دور در دقیقه ($1^{\circ}RPM$) به مدت 15 دقیقه و سپس با 5000 درجه دور در دقیقه به مدت ۱ ساعت مخلوط شدند تا اطمینان حاصل شود که تمام ذرات افزودنی به طور یکنواخت در آسفالت پراکنده شده اند. سرعت برش سپس به 1000 درجه RPM کاهش یافت و فرآیند اختلاط به مدت 15 دقیقه دیگر ادامه یافت تا حباب های ایجاد شده توسط برش با سرعت بالا حذف شوند. تمام مراحل اختلاط با استفاده از میکسر با برش بالا انجام شد. عملکرد اساسی آسفالت اصلاح شده با SBS و آسفالت های اصلاح شده با نانورس از طریق آزمایش های نفوذ، نقطه نرم شدن و شکل پذیری تعیین شد. نتایج این آزمایشات در جدول ۵ ارائه شده است. در این جدول "OMMT A-1"

آسفالت اصلاح شده با 1% OMMT A بر حسب وزن قیر و غیره را نشان می دهد.

۲-۴-آماده سازی مخلوط آسفالتی

نمونه های مخلوط آسفالت برای آزمایش های تقسیم انجماد و ذوب بر اساس استاندارد و نشریه 234 تهیه شد. دانه بندی سنگدانه ها در این مطالعه برای مخلوط های آسفالتی متراکم است و درصد عبور سنگدانه ها در جدول ۶ ارائه شده است. نسبت آسفالت بهینه با روش طراحی مخلوط مارشال تعیین شد. مخلوط آسفالتی در دمای 180 درجه سانتی گراد تهیه شد. برای آسفالت اصلاح شده با SBS، که به عنوان قیر پایه استفاده شد، نسبت آسفالت بهینه $6/2$ درصد از کل جرم سنگدانه درشت، سنگدانه ریز و پرکننده تعیین شد. نانورس از طریق فرآیند خشک اضافه شد. همان وزن پرکننده پودر با نانورس جایگزین شد. علاوه بر این، از آنجایی که مخلوط برای آزمایش تقسیم انجماد و ذوب آماده شده بود، نمونه های مارشال به جای 75 بار فقط باید 50 بار در هر دو طرف فشرده شوند.

۳- روش آزمایشگاهی

۳-۱- آزمایشات انرژی آزاد سطحی

روش قطره چسبیده یک روش رایج برای اندازه گیری انرژی آزاد سطح جامدات و مایعات است. در این مطالعه از آن برای

نگهداری و تا دمای اتاق سرد شدند. برای هر یک از قیرهای مورد مطالعه، حداقل ۳ نمونه (تعداد مایع کاوشگر) تهیه شد. اسلایدهای شیشه‌ای قیر بین یک منبع نور و یک دوربین قرار گرفتند. یک میکرو سرنگ پر از مایع کاوشگر در بالای سطح قیر قرار داده شد و یک قطره کوچک از مایع کاوشگر از سرنگ روی سطح قیر پخش شد و تصویری از قطره با استفاده از دوربین گرفته شد. برای هر نمونه قیر، زاویه تماس حداقل سه قطره از هر مایع کاوشگر اندازه گیری شد و میانگین آنها به عنوان زاویه تماس آن مایع کاوشگر با قیر در نظر گرفته شد. مقادیر زاویه تماس در معادله زیر برای بدست آوردن اجزای انرژی آزاد سطحی قیر جایگزین می‌شوند.

$$\gamma_{Li}(1 + \cos\theta) = 2\sqrt{\gamma_B^{LW}\gamma_{LI}^{LW}} + 2\sqrt{\gamma_B^+\gamma_{LI}^-} + 2\sqrt{\gamma_B^-\gamma_{LI}^+} \quad (1)$$

سه معادله با سه مجهول ($\sqrt{\gamma_B^-}$ ، $\sqrt{\gamma_B^+}$ و $\sqrt{\gamma_R^{LW}}$) به دست می‌آید. با حل مجموعه این معادلات، اجزای انرژی آزاد سطح قیر مشخص می‌شود. معادلات (۲) و (۳) را می‌توان به ترتیب برای محاسبه کار چسبندگی در شرایط خشک و جدا شدن باند در حضور آب:

$$W_{ab} = 2\sqrt{\gamma_b^{LW}\gamma_a^{LW}} + 2\sqrt{\gamma_a^+\gamma_b^-} + 2\sqrt{\gamma_a^-\gamma_b^+} \quad (2)$$

$$W_{abw} = \gamma_{aw} + \gamma_{bw} + \gamma_{ab} \quad (3)$$

نشان می‌دهد که مخلوط آسفالتی مقاومت قابل توجهی در برابر آسیب رطوبت دارد.

$$ER = \frac{W_{ab}}{ahw} \quad (4)$$

میلی‌متر $1,3 \times 63,5 \pm$ میلی‌متر بود. فرآیند انجماد و ذوب ذکر شده در بالا شامل ۱۶ ساعت انجماد در دمای ۱۸- درجه سانتیگراد و ۲۴ ساعت حمام کردن در آب در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد است. علاوه بر این، نمونه‌های مارشال باید قبل از انجام فرآیند انجماد-ذوب، تحت اشباع خلاء قرار گیرند. پس از

اندازه‌گیری اجزای انرژی آزاد سطحی قیرها استفاده شد. بر اساس این روش، انرژی آزاد سطح با استفاده از زوایای تماس سه مایع کاوشگر بر روی بستر قیر محاسبه می‌شود. مایعات کاوشگر مورد استفاده در این مطالعه آب مقطر، اتیلن گلیکول و فرمامید بودند. این مایعات همیشه مقدار یکسانی از مقادیر اجزای انرژی آزاد سطح برای سایر مواد مانند قیر، استفاده شود. در فرآیند روش قطره چسبیده، قیرهای تهیه شده تا دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد در ظرف ۵۰ میلی‌لیتری حرارت داده شدند. قیر گرم شده بر روی سطح اسلاید شیشه‌ای به ابعاد 25×75 میلی‌متر ریخته شد. نمونه‌های شیشه‌ای پوشیده شده با قیر در خشک کن

که $\sqrt{\gamma_{LI}^-}$ و $\sqrt{\gamma_{LI}^+}$ اجزای انرژی آزاد سطح مایع کاوشگر هستند و $\sqrt{\gamma_B^-}$ ، $\sqrt{\gamma_B^+}$ و $\sqrt{\gamma_R^{LW}}$ اجزای انرژی آزاد سطحی قیر هستند. علاوه بر این $\sqrt{\gamma_{Li}}$ انرژی آزاد سطحی کل مایع کاوشگر است و θ نشان‌دهنده زاویه تماس بین قیر و مایع کاوشگر است. با جایگزینی مقادیر انرژی آزاد سطحی هر مایع کاوشگر در معادله،

نسبت انرژی (ER)، که پتانسیل آسیب رطوبت را کمی می‌کند، می‌تواند با استفاده از رابطه (۴) محاسبه شود. یک مقدار ER بالا

۳-۱-۴- آزمایش ذوب و یخبندان

تست تقسیم انجماد-ذوب. تست تقسیم انجماد-ذوب یک روش سنتی است که برای ارزیابی حساسیت آب مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شود. مقاومت کششی غیرمستقیم^{۱۱} (ITS) نمونه‌های مارشال با و بدون انجام فرآیند انجماد-ذوب اندازه‌گیری شد. اندازه‌های این نمونه‌های مارشال همگی ۱۰۱,۶

انجماد-ذوب قرار گرفتند، در حالی که ITS2 نشان دهنده ITS نمونه هایی است که تحت فرآیند انجماد-ذوب قرار نگرفته اند.

$$TSR = \frac{ITS_1}{ITS_2}$$

اندازه گیری مقاومت کششی غیرمستقیم، نسبت استحکام کششی (TSR) نمونه ها با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد و در این معادله، ITS نشان دهنده نمونه های IT 1 است که تحت فرآیند

(۵)

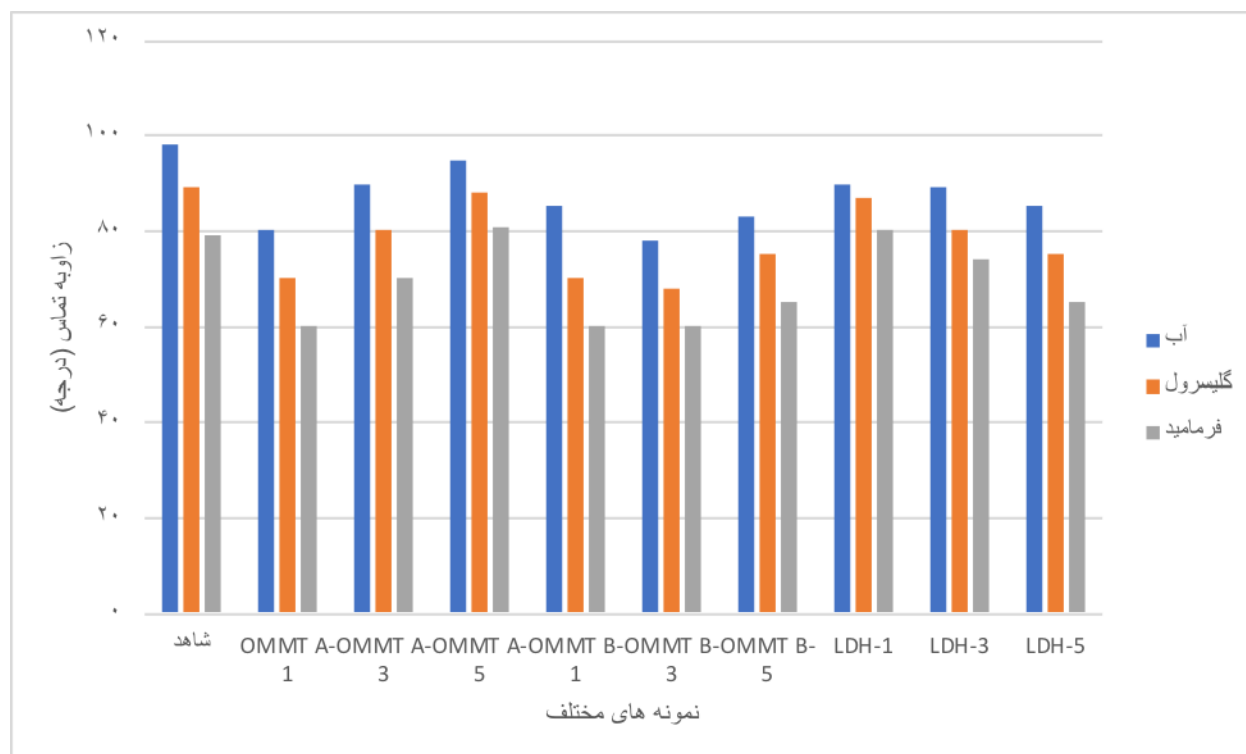
۴-بحث

۴-۱-نتایج آزمایش انرژی ازاد سطحی

۴-۱-۱-زاویه تماس قیر

(Wang et al, 2020) انجام شد نتایج در شکل ۲ نشان داده شده است. ضریب برازش خطی (R2) بین ۰,۹۸۸۷ و ۱ است که نشان دهنده یک رابطه خطی خوب بین c و $c \cos \Phi$ است. بنابراین، داده های تجربی معتبر است. همانطور که در بالا ذکر شد، زاویه تماس ممکن است برای محاسبه اجزای SFE آسفالت استفاده شود و این شاخص ها در ادامه مورد بحث قرار خواهند گرفت.

میانگین زوایای تماس نمونه های آسفالتی در شکل ۱ نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می شود که زوایای تماس بین قیرهای آسفالت زمانی که از مایعات پروب خاص استفاده می شود، متفاوت است. تغییرات حاصل از افزودن نانورس است و منعکس کننده تغییر اجزای SFE قیر پس از اصلاح است. برای تأیید اعتبار داده های تجربی زاویه تماس، مقادیر $\Phi \cos c$ و c مایعات پروب مختلف به صورت خطی برازش شدند، همانطور که توسط Li و همکاران و وانگ و همکاران (Li et al, 2017;)



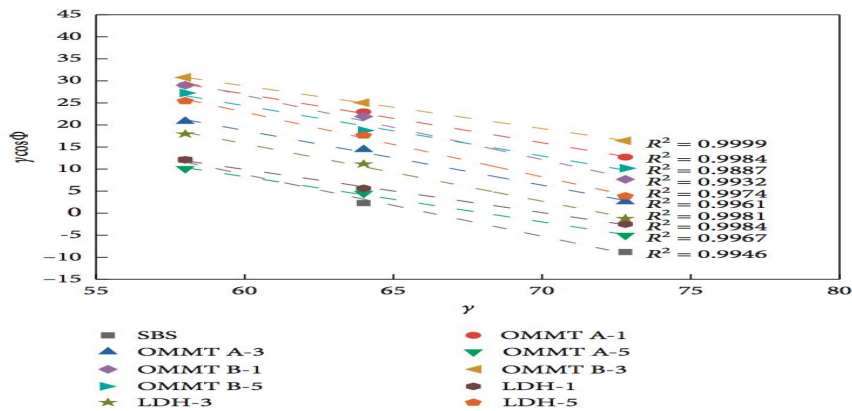
شکل ۱. میانگین زاویه تماس مایعات

۴-۲-۱- اجزاء انرژی آزاد سطحی

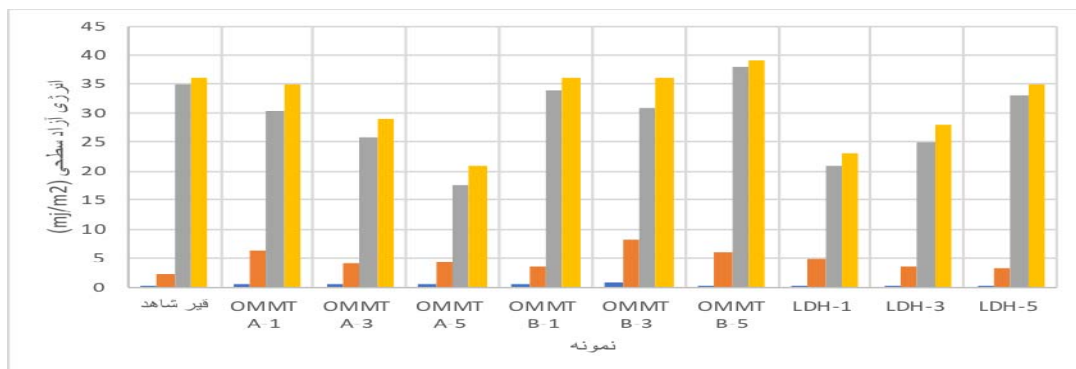
نشان داد. با افزایش دوز OMMT A، SFE آسفالت اصلاح شده به تدریج کاهش یافت، اگرچه بیشتر از آسفالت کنترل باقی ماند. در مورد استفاده از OMMT B به عنوان یک اصلاح کننده، اثر افزودن نانورس باعث بهبود SFE چسباننده آسفالت در مقادیر افزودنی ۱٪ و ۵٪ وزنی آسفالت پایه شد. هنگامی که ۳٪ از OMMT B به آسفالت اضافه شد، قیر کاهش SFE را نشان داد، اگرچه این کاهش قابل توجه نبود.

روندهای متفاوتی در قیرهای اصلاح شده با LDH مشاهده شد. کل ۳۵٪ SFE LDH-1 کمتر از آسفالت کنترل بود. با این حال، با افزایش مقدار افزودنی، SFE آسفالت به تدریج بهبود یافت. هنگامی که دوز اصلاح کننده به ۵٪ رسید، تفاوت معنی داری بین آسفالت اصلاح شده با LDH و آسفالت کنترل با در نظر گرفتن SFE وجود نداشت.

شکل ۳ اجزای SFE از قیر اصلاح شده را نشان می‌دهد. از آنجایی که سه نوع نانورس همگی دارای بارهای مثبت و منفی فراوانی هستند، بهبود کلی را می‌توان به وضوح در اجزای اسیدی و بازی همه قیرهای اصلاح شده مشاهده کرد، به استثنای OMMT B-5. با این حال، یک روند معکوس برای مقادیر کل SFE، همچنین به استثنای OMMT B-5، مشاهده شد. دلیل اصلی این کاهش در کل SFE این است که افزودن نانورس‌ها باعث تضعیف اجزای غیرقطبی آسفالت می‌شود که نقش غالب در کل SFE آسفالت دارند. قابل توجه‌ترین کاهش (حدود ۴۹٪) از اجزای غیر قطبی در OMMT A-5 مشاهده شد. همانطور که مهم‌ترین کاهش (حدود ۴۲٪) از کل SFE مشاهده شد. هنگامی که OMMT A برای اصلاح آسفالت استفاده شد، قیر اصلاح شده با ۱٪ OMMT A بالاترین SFE را



شکل ۲. نمودار $\cos \phi$ نسبت به γ

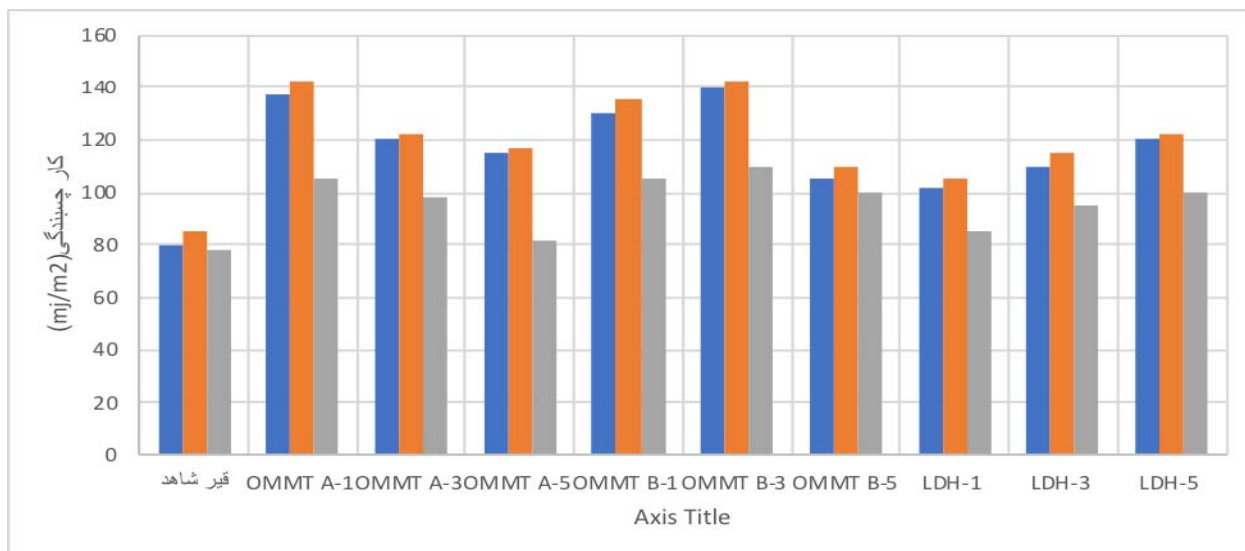


شکل ۳. انرژی آزاد سطحی نمونه‌ها

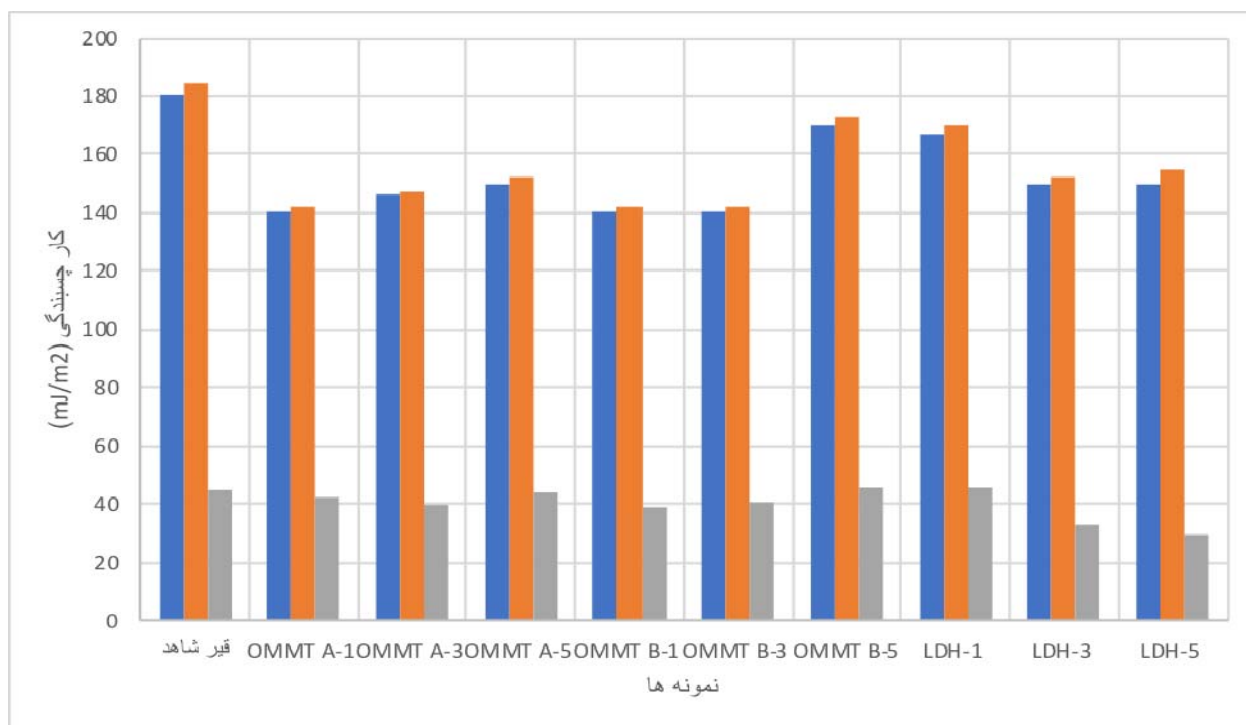
۴-۳-۱- کار چسبندگی

1 و LDH-3 بود. مشاهده می‌شود که مقادیر مطلق Wabw برای آسفالت‌های اصلاح شده با نانورس برای هر دو سنگ آهک ۱ و سنگ آهک ۲ کاهش یافته است. از آنجایی که مقدار مطلق کم Wabw نشان دهنده پتانسیل کم برای آسیب آب است، می‌توان گفت که افزودن نانورس باعث افزایش مقاومت در برابر رطوبت سیستم‌های متشکل از سنگ آهک و قیر می‌شود. کاهش این مقدار در مورد ۲۱ درصد (OMMT B-3 برای سنگ آهک ۱ و سنگ آهک ۲) قابل توجه ترین بود. اثرات نانورس‌ها بر روی سیستم‌های مرکب از بازالت و قیرها مشابه با سیستم‌های متشکل از سنگ آهک و قیرها است، به استثنای OMMT B-5 و LDH-1. در این دو مورد استثنایی مقادیر مطلق Wabw افزایش جزئی را نشان دادند. به طور خلاصه افزودن نانورس می‌تواند مقاومت سیستم‌های آسفالت - سنگدانه را در برابر آب بهبود بخشد که به دلیل تغییر جهت مولکولی آسفالت اصلاح شده، آب دوستی کاهش می‌یابد و چسبندگی بین سطح آسفالت - سنگدانه تقویت می‌شود. همانطور که در بالا ذکر شد، نسبت انرژی (ER) ممکن است با استفاده از Wab و Wabw محاسبه شود. این شاخص‌ها در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرند.

Wab (کار چسبندگی در شرایط خشک) و Wabw (کار جدا کردن باند در مجاورت آب) برای نمونه‌های قیر با انواع مختلف سنگدانه‌ها محاسبه شد و در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. هر دو آسفالت اصلاح شده با SBS و آسفالت اصلاح شده با نانورس مورد ارزیابی قرار گرفتند. از شکل ۴، نشان داده شده است که Wab با افزودن هر سه نوع نانورس افزایش یافته است. Wab بالا نشان دهنده استحکام باند بالا بین سنگدانه و آسفالت در شرایط بی‌آب است. بنابراین، استحکام پیوند در شرایط بدون آب با افزودن نانورس‌ها بهبود یافت. از نظر نوع سنگدانه، اگرچه مقادیر Wab سنگدانه‌های مختلف روند افزایشی مشابهی را نشان داد، اما افزایش سنگ آهک ۱ و سنگ آهک ۲ در مقایسه با بازالت معنی دارتر است. به عبارت دیگر، با توجه به این افزایش Wab، اثر افزودن نانورس به سیستمی متشکل از قیرها و سنگ آهک مؤثرتر از آن چیزی است که برای سیستمی متشکل از قیرها و بازالت به دست آمده است. در بین تمام قیرهای OMMT B-3 بیشترین افزایش در مقادیر Wab را داشت (از ۳۴ درصد برای بازالت تا ۷۶ درصد برای سنگ آهک ۱). در مورد آسفالت‌های اصلاح شده با OMMT A و LDH، مقادیر Wab بالاتری نسبت به OMMT A-3 و OMMT A-5 نشان داد، در حالی که LDH-5 دارای Wab بالاتری نسبت به LDH-



شکل ۴. مقادیر کار چسبندگی در حالت خشک

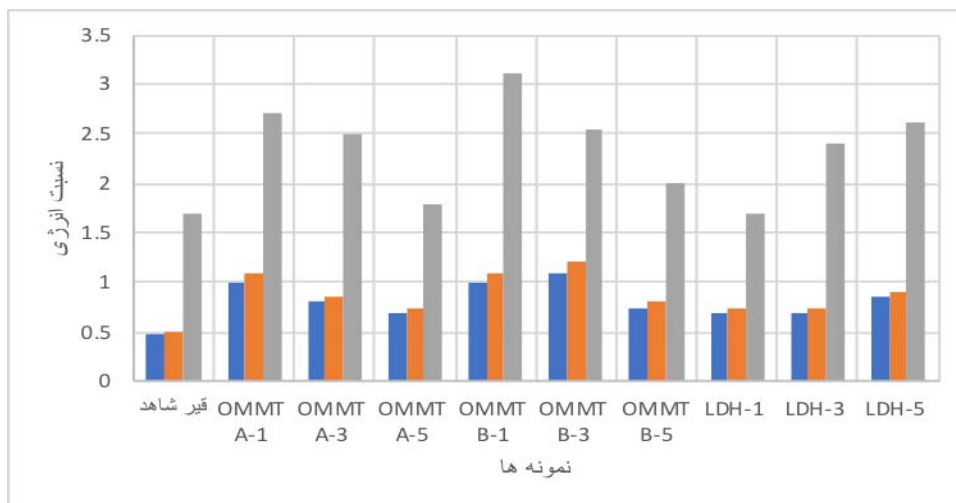


شکل ۵. مقادیر کار چسبندگی در حالت مرطوب

۴-۳-۲-نسبت انرژی

مقادیر ER به دلیل افزایش Wab افزایش یافت. در مورد سیستم های بازالت قیر، با افزایش دوز LDH، مقدار ER به تدریج افزایش یافت. هنگامی که دوز LDH با وزن قیر به ۵٪ افزایش یافت، بهبود در مقدار ER برجسته بود (۵۷٪ بهبود برای بازالت). هنگامی که OMMT A به عنوان یک اصلاح کننده استفاده شد، روند متفاوتی مشاهده شد. اگرچه ERS برای آسفالت های اصلاح شده OMMT-A صرف نظر از نوع سنگدانه مورد استفاده به طور قابل توجهی بالاتر از آسفالت کنترل بود، تمایل متفاوتی نسبت به آسفالت های اصلاح شده با LDH مشاهده شد. به طور دقیق تر، مقادیر ER آسفالت های اصلاح شده OMMT-A با افزایش مقادیر OMMT A به دلیل کاهش کار چسبندگی در شرایط خشک کاهش یافت.

نسبت انرژی شاخصی است که پتانسیل آسیب رطوبت را کمی می کند. یک مقدار ER بالا نشان می دهد که سیستم متشکل از قیرها و سنگدانه ها مقاومت زیادی در برابر آسیب رطوبت در حضور آب دارد. مقادیر ER سیستم های مختلف قیر-دانه در شکل ۶ ارائه شده است. همانطور که قبلاً بحث شد، افزودن نانورس به طور قابل توجهی باعث بهبود Wab قیر شد در حالی که مقادیر مطلق Wabw را در بیشتر موارد کاهش داد. در نتیجه، پارامتر نسبت انرژی به طور قابل توجهی بهبود یافت. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، LDH می تواند ER سیستم های متشکل از قیرها و سنگدانه های آسفالت را بهبود بخشد. در سیستم های اتصال دهنده سنگ آهک، زمانی که دوز LDH از ۱٪ به ۳٪ افزایش یافت، ER به طور قابل توجهی تغییر نکرد. با این حال، زمانی که دوز LDH بیشتر افزایش یافت،



شکل ۶. نسبت انرژی نمونه‌های مختلف

اگرچه این روش نمی‌تواند فرآیندها و مکانیسم‌های آسیب آب را در مقیاس‌های مولکولی یا نانو آشکار کند، اما می‌توان از آن برای تأیید نتایج آزمایش‌های دیگر مانند آزمون SFE استفاده کرد، زیرا ممکن است با این آزمایش‌های دیگر همبستگی خوبی داشته باشد. نتایج آزمایش‌های تقسیم انجماد و ذوب در شکل ۷ نشان داده شده است.

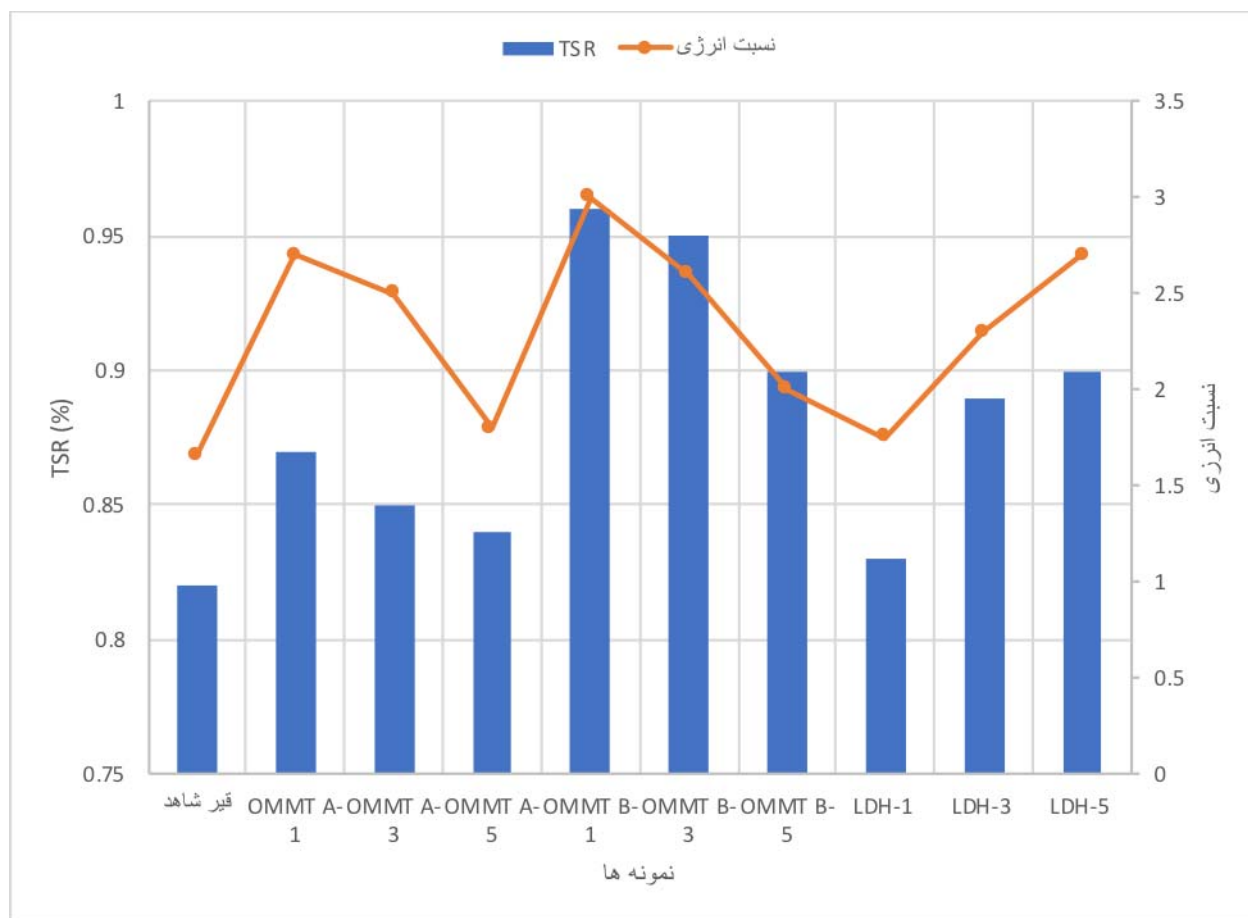
با مقایسه TSRها با ERهای سیستم‌های چسباننده و بازالت که در شکل ۷ نشان داده شده است، می‌توان به راحتی مشاهده کرد که این دو شاخص روندهای مشابهی را هنگام افزودن نانورس به مخلوط آسفالت و آسفالت نشان می‌دهند. این روندهای مشابه نشان دهنده اعتبار نتایج به دست آمده در آزمایش‌های انرژی سطحی است. TSR آسفالت‌های اصلاح‌شده با نانورس بالاتر از آسفالت اصلاح‌شده با SBS است که نتایج آزمایش‌های AFM را نیز تأیید می‌کند.

همبستگی خطی بین TSRها و ERها در شکل ۸ نشان داده شده است. ضریب تعیین (R²) برای این همبستگی ۰,۶۸۹۶ است. اگرچه ضریب تعیین (R²) خیلی زیاد نیست، اما با توجه به پیچیدگی ترکیبات آسفالت و بسیاری از عوامل دیگر که ممکن است بر این رابطه تأثیر بگذارد، می‌توان این رابطه را بین این دو شاخص خوب دانست.

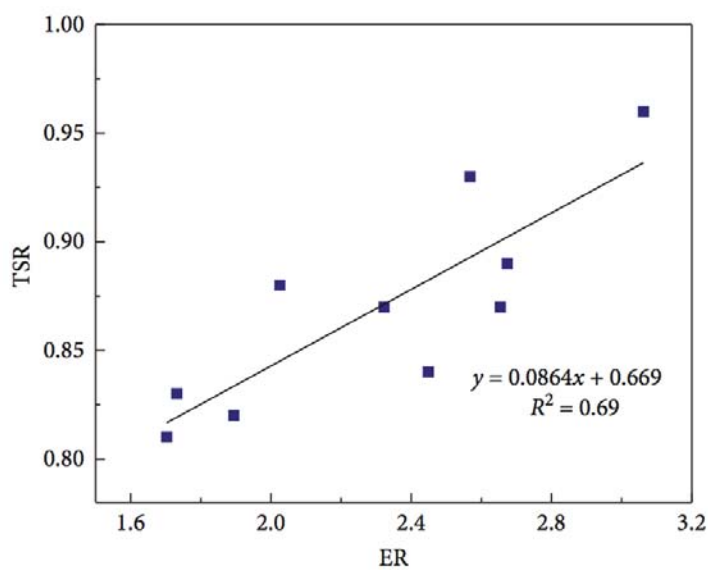
مقادیر ER سیستم‌های متشکل از آسفالت اصلاح‌شده با بازالت و OMMT-B روند مشابهی را با سیستم‌های متشکل از آسفالت اصلاح‌شده با بازالت و OMMT-A نشان داد. با این حال، در مورد سیستم‌های اتصال دهنده سنگ آهک، زمانی که دوز OMMT B از ۱٪ به ۳٪ افزایش یافت، ER افزایش یافت و زمانی که دوز از ۳٪ به ۵٪ افزایش یافت، کاهش یافت. این روند با تحقیقات عمر و همکاران همخوانی دارد. در میان تمام قیرهای اصلاح‌شده با نانورس در نظر گرفته شده در این مقاله، OMMT B-3 بالاترین ER را در ارتباط با سنگ‌های آهکی (سنگ آهک ۱ و سنگ آهک ۲) نشان داد. در همین حال، OMMT A-1، OMMT B-1 و LDH-5 بالاترین مقادیر ER را با بازالت نشان دادند. از آنجایی که مقدار ER بالایی را می‌توان با دوز نسبتاً کم (۱٪) به دست آورد، OMMT A و OMMT B پتانسیل بالایی برای کاربرد در پروژه‌های مهندسی دنیای واقعی دارند. علاوه بر این، همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، بازالت از نظر ER سازگاری بهتری با قیرهای اصلاح‌شده نسبت به سنگ‌های آهکی نشان داد.

۴-۳-۴- آزمایش ذوب و یخبندان

تست یخ زدایی- ذوب شدن یک روش سنتی است که برای ارزیابی حساسیت آب مخلوط آسفالتی استفاده می‌شود.



شکل ۷. مقادیر نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم و نسبت انرژی برای قیرها و بازالت



شکل ۸. ارتباط بین نسبت کشش غیرمستقیم و نسبت انرژی

۵- نتیجه گیری

-استحکام پیوند بین سیستم‌های چسباننده سنگدانه در شرایط بی آب با افزودن نانورس افزایش یافت. برای سنگ‌های آهکی، افزایش بیشتر از بازالت بود. علاوه بر این، به دلیل این اصلاح، کار جداسازی در حضور آب از نظر قدر مطلق کاهش یافت.

-افزودن نانورس باعث بهبود مقاومت رطوبتی سنگدانه‌ها و سیستم‌های قیر اصلاح شده شد. درجه بهبود بسته به انواع و دوزهای نانورس و همچنین نوع سنگدانه متفاوت بود. علاوه بر این، از نظر ER برای قیرها با سنگدانه‌های مختلف، بازالت سازگاری بهتری با قیرهای اصلاح شده نسبت به سنگ‌های آهکی (هم برای سنگ آهک ۱ و هم برای سنگ آهک ۲) نشان داد.

-نتایج آزمایش تقسیم انجماد و ذوب به خوبی با نتایج آزمایش‌های SFE همبستگی دارد و نتایج را تأیید می‌کند.

در این مطالعه، دوزهای متنوعی از سه نوع نانورس برای اصلاح قیرهای آسفالتی اصلاح شده با SBS استفاده شد. مقاومت در برابر رطوبت قیرهای اصلاح شده از طریق تکنیک SFE ارزیابی شد. علاوه بر این، از آزمون‌های تقسیم انجماد و ذوب برای تأیید نتایج به دست آمده از طریق آزمون‌های SFE استفاده شد. نتایج به دست آمده به شرح ادامه می‌باشد.

-اگرچه بهبودهای کلی را می‌توان به وضوح برای اجزای اسیدی و بازی همه قیرهای اصلاح شده مشاهده کرد، مقادیر کل SFE زمانی که آسفالت با نانورس‌ها اصلاح شد کاهش یافت. کاهش عمدتاً به دلیل کاهش اجزای غیرقطبی است که در کل SFE این قیرها نقش غالب دارند.

۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Styrene-Butadiene-Styrene
- 2- Surface Free Energy
- 3- Energy Ratio
- 4- Hot Mix Asphalt
- 5- Crumb Rubber
- 6- Carbon Nano Tube
- 7- Styrene-Butadiene
- 8- Montmorillonite
- 9- Organic Montmorillonite
- 10- Layered Double Hydroxides
- 11- Round Per Minute
- 12- Indirect Tensile Strength
- 13- Tensile Strength Ratio

۷- مراجع

mastic. *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2672, No. 28, 31-41.

-Goh. S. W., M. Akin, Z. You, and X. Shi. (2011). Effect of deicing solutions on the tensile strength of micro- or nano-modified asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, Vol. 25, No. 1, 195-200

-Ashish. P. K., D. Singh, and S. Bohm (2016). Evaluation of rutting, fatigue and moisture damage performance of nanoclay modified asphalt binder. *Construction and Building Materials*, Vol. 113, 341-350.

-Das. A. K. and D. Singh (2018). Effects of regular and nano sized hydrated lime fillers on fatigue and bond strength behavior of asphalt

- Mamun. A. A. and M. Arifuzzaman (2018). Nano-scale moisture damage evaluation of carbon nanotube-modified asphalt,” *Construction and Building Materials*, Vol. 193, 268–275.
- Omar. H. A., N. I. M. Yusoff, H. Ceylan et al., (2018). Determining the water damage resistance of nano-clay modified bitumen’s using the indirect tensile strength and surface free energy methods. *Construction and Building Materials*. Vol. 167, 391–402.
- Saeed. F., M. Rahman, D. Chamberlain, and P. Collins (2019). Asphalt surface damage due to combined action of water and dynamic loading. *Construction and Building Materials*, Vol. 196, 530–538.
- Sezavar. R., G. Shafabakhsh, and S. M. Mirabdolazimi (2019). New model of moisture susceptibility of nano silica-modified asphalt concrete using GMDH algorithm. *Construction and Building Materials*. Vol. 211, 528–538.
- Shafabakhsh. G. H., M. Faramarzi, and M. Sadeghnejad (2015). Use of surface free energy method to evaluate the moisture susceptibility of sulfur extended asphalts modified with anti-stripping agents. *Construction and Building Materials*, Vol. 98.
- Wang. W., L. Wang, H. Xiong, and R. Luo, (2019). A review and perspective for research on moisture damage in asphalt pavement induced by dynamic pore water pressure. *Construction and Building Materials*, Vol. 204, 631–642.
- Wang. R., Z. Qi, R. Li, and J. Yue. (2020). Investigation of the effect of aging on the thermodynamic parameters and the intrinsic healing capability of graphene oxide modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*, Vol. 230.
- Hossain. Z., M. Zaman, T. Hawa, and M. C. Saha. (2015). Evaluation of moisture susceptibility of nanoclay-modified asphalt binders through the surface science approach. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 27, No. 10.
- Jiao. Y., Y. Zhang, L. Fu, M. Guo, and L. Zhang (2019). Influence of crumb rubber and taffpack super on performances of SBS modified porous asphalt mixtures,” *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 20, No. 1, S196–S216.
- Jia. M., Z. Zhang, L. Wei et al., (2019). Study on properties and mechanism of organic montmorillonite modified bitumens: view from the selection of organic reagents. *Construction and Building Materials*, Vol. 217, 331–342.
- Kakar. M. R., M. O. Hamzah, and J. Valentin (2015). A review on moisture damages of hot and warm mix asphalt and related investigations. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 99, 39–58.
- López. T. -Montero, J. Crucho, L. Picado-Santos, and R. Miró, (2018). Effect of nanomaterials on ageing and moisture damage using the indirect tensile strength test. *Construction and Building Materials*, Vol. 168, 31–40.
- Li. H., B. Li, Q. Wang, L. Li, and Y. Wang (2017). Adhesion of aged SBS modified asphalt binder containing warm mix additive based on surface free energy. *Materials Review*, Vol. 31, No. 8, 129–133.
- Luo. D., A. Khater, Y. Yue et al., (2019). Performance of asphalt mixtures modified with lignin fiber and glass fiber: a review. *Construction and Building Materials*, Vol. 209, 377–387.

Laboratory Investigation of the Effect of Nanoclay on the Moisture Sensitivity of Asphalt Mixture Containing Bitumen Modified with SBS

*Hamin Chobdar, Department of Civil Engineering, Malard Branch,
Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.*

*Amin Farajollahi, Department of Civil Engineering, Malard Branch,
Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.*

*Alireza Ameli, Department of Civil Engineering, Malard Branch,
Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.*

E-mail: amelii@gmail.com

Received: February 2024- Accepted: June 2024

ABSTRACT

Modification plays an important role in asphalt deterioration. Failure occurs when bitumen separates from aggregate particles due to reduced adhesion between asphalt and aggregate compared to adhesion between water and aggregate. In recent years, the use of nanomaterials can be used to improve various asphalt properties. In this study, three types of nanoclay were used to modify styrene-butadiene-styrene modified bitumen (SBS1-). The resistance to failure of modified bitumen was evaluated using surface free energy (SFE2). The results showed that the SFE decreased and the energy ratio (ER3) increased by modifying bitumen with nanoclays, indicating that nanoclays can improve the resistance of these aggregate cohesive systems. After immersion, due to the interaction between water and bitumen, the subsequent degradation rate was observed in both SBS and nanoclay modified asphalt. However, the residual amount of 3D structures in nanoclay modified asphalt was higher than that of SBS modified asphalt, indicating that nanoclay makes the surface morphology more resistant to water damage. Finally, freezing and melting tests were used for the results obtained through SFE tests.

Keywords: Nanoclay, Surface Free Energy, Moisture Sensitivity, Bitumen, Modified Bitumen