



اثر نوع فیلر بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی تحت چرخه‌های ذوب و یخبندان و مقایسه با اجزای انرژی آزاد سطحی

فریدون مقدس نژاد*، محمد ارباب پور بیدگلی، کورش نادری، سیده زهرا میرتبار

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۲-۱۲

بازنگری: ۱۳۹۷-۰۳-۰۷

پذیرش: ۱۳۹۷-۰۳-۱۵

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۳-۱۹

کلمات کلیدی:

مخلوط‌های آسفالتی

حساسیت رطوبتی

فیلر بتن بازیافتی

انرژی آزاد سطحی

چرخه‌های ذوب و یخبندان

خلاصه: با توجه به نقش اساسی فیلر بر مشخصات مخلوط آسفالتی، این پژوهش به بررسی اثر فیلر بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، تحت چرخه‌های متوالی ذوب و یخبندان می‌پردازد. علاوه بر این، اثر تغییر نوع فیلرهای سنگی بر مقاومت در برابر رطوبت مخلوط‌های آسفالتی به خصوص جایگزینی آن با مصالح بازیافتی بتنی، با رویکرد توسعه پایدار ارزیابی می‌شود. در تحقیق پیش‌رو، در ابتدا انجام آزمایش‌های مقاومت کشش غیر مستقیم و مدول برجهندگی با ۱، ۳، ۶ و ۱۰ چرخه ذوب و یخبندان انجام می‌شود و سپس انرژی شکست در آزمایش کشش غیر مستقیم محاسبه می‌شود. از طرف دیگر، مولفه‌های انرژی آزاد سطحی ماستیک حاوی انواع فیلرهای مدنظر به کمک روش اندازه‌گیری زاویه تماس محاسبه می‌شود. نتایج همه آزمایش‌های حساسیت رطوبتی نشان می‌دهد، جایگزینی تمام فیلر مصالح سنگی با سیمان پرتلند منجر به بهترین عملکرد در مقایسه با فیلر شاهد، فیلر سنگ آهک و فیلر بتن بازیافتی است. از طرفی روند تغییرات خصوصیات مکانیکی برای سایر فیلرهای جایگزین، وابسته به تعداد چرخه‌های ذوب و یخبندان است. نتایج حاکی از بهبود ۱۵ درصدی نسبت مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی حاوی فیلر بتن بازیافتی در مقایسه با فیلر سنگ آهک پس از نخستین چرخه ذوب و یخبندان است. اگرچه نتایج انرژی آزاد سطحی با نتایج خصوصیات مکانیکی نخستین چرخه ذوب و یخبندان همخوانی دارد، ولی نمی‌تواند بیانگر رفتار بلند مدت مخلوط آسفالتی در چندین چرخه ذوب و یخبندان متوالی باشد.

۱- مقدمه

است که ترکیبات کانی‌شناسی و شکل مصالح فیلر می‌تواند رفتار مخلوط‌های آسفالتی را تغییر دهد. حساسیت رطوبتی، که عمدتاً تحت تأثیر بخش فیلر سنگدانه قرار دارد [۱]، یکی از عوامل اصلی اثرگذار بر دوام و عملکرد روسازی‌های آسفالتی است. حساسیت رطوبتی باعث ایجاد خرابی‌های زودرس روسازی‌های انعطاف‌پذیر می‌شود. طبق تعریف کیگوند و رابرتس [۲]، حساسیت رطوبتی، خرابی عملکردی پیش‌رونده مخلوط‌های آسفالتی است که توسط از دست دادن پیوند چسبندگی بین قیر و سطح سنگدانه و یا از دست رفتن مقاومت چسبندگی بین چسباننده‌های قیری، عمدتاً در اثر نفوذ

مخلوط‌های آسفالتی، مواد مرکب پیچیده‌ای هستند که حدوداً شامل ۹۵-۹۰ درصد وزنی سنگ‌دانه‌های معدنی هستند. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی سنگدانه‌ها تأثیر قابل توجهی بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی دارد. در بین بخش‌های مختلف، سنگ‌دانه‌های معدنی، فیلر (مصالح سنگی عبوری از الک شماره ۲۰۰ یا ۷۵ میکرون) به عنوان ریزترین بخش تقسیم‌بندی می‌شود و نقش مهمی در خصوصیات کلی مخلوط‌های آسفالتی بازی می‌کند. مشاهده شده

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: moghadas@aut.ac.ir



دادند که بازیافت ریزدانه‌های زائد در مخلوط‌های آسفالتی می‌تواند راه‌حلی اقتصادی و مؤثر باشد. علاوه بر این، در مطالعاتی، استفاده از سنگدانه‌های بتن بازیافتی^۳ در لایه‌های روسازی راه را مورد بررسی قرار دادند. اکثر تحقیقات انجام شده در این حوزه، به بهره برداری از سنگدانه بتن آسفالتی به عنوان مصالح دانه‌ای و یا به عنوان مصالح تثبیت شده با سیمان در لایه‌های اساس و زیر اساس تمرکز دارند [۱۷-۱۵]. وانگ و همکاران [۱۸]، دریافتند که استفاده از بتن بازیافتی به عنوان فیلر یا ریزدانه در مخلوط آسفالتی می‌تواند مدول برجهندگی را افزایش و تغییر شکل دائم را کاهش دهد. تأثیر این مصالح بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی هنوز مورد بحث است.

روش‌های آزمایش بسیاری در سازمان‌های حمل‌ونقل، برای پیش‌بینی و تخمین حساسیت رطوبتی مخلوط‌های بتن آسفالتی، مانند آزمایش لاتمن اصلاح شده، آزمایش تونیکلیف و روت^۴ و غیره توسعه یافته‌اند. اما آزمایش آشتو^۵ T283 رایج‌ترین آنها است. این آزمایش‌ها عمدتاً تجربی هستند و ویژگی‌های اساسی مصالح را نشان نمی‌دهند و ممکن است برای قضاوت مهندسی عملکرد مخلوط در حضور رطوبت، به اندازه کافی دقیق نباشند [۱۹]. نکته دیگر این است که اکثر این آزمایش‌های تجربی، از یک چرخه ذوب و یخبندان برای شبیه‌سازی تغییرات آب و هوایی فصلی استفاده می‌کنند؛ در حالی که استفاده از چندین چرخه می‌تواند مقاومت مخلوط در برابر خرابی رطوبتی را، بهتر مشخص سازد [۲۰]. برای تعیین بهتر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، مفاهیم جدیدی بر اساس خصوصیات اساسی مصالح، مانند پارامترهای شکست، انرژی آزاد سطحی^۶، پراکنده‌شدگی^۷ و واکنش‌های روی سطحی^۸ ارائه شده‌اند [۲۴-۲۱]. چندین مطالعه، نیز نشان داده‌اند که همبستگی خوبی بین پارامترهای به دست آمده با استفاده از اجزای انرژی آزاد سطحی چسباننده قیری و سنگدانه و حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، وجود دارد [۲۷-۲۵]. آلوارز و همکاران [۲۶] اثر فیلرها بر حساسیت خرابی رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی را بر اساس اندازه‌گیری‌های انرژی آزاد سطحی

آب ایجاد می‌شود. غیر از رطوبت، به طور طبیعی رخ دادن چرخه‌های ذوب و یخبندان نیز بر ساختار درونی مخلوط‌های آسفالتی اثر دارد و با گسترش فضاهای خالی، تلفیق دو حفره هوا جداگانه و ایجاد حفره هوای جدید، باعث تخریب می‌شود [۳]. کنترل حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی برای طولانی‌تر کردن عمر روسازی و بهبود دوام، ضروری است. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که خصوصیات فیلرهای معدنی، اثر چشم‌گیری بر عملکرد روسازی‌های آسفالتی دارد [۱، ۵ و ۴]. مهندسان روسازی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی را اغلب با تغییر بخش فیلر سنگدانه، اضافه کردن اصلاح‌کننده‌های ضد عریان‌شدگی به قیر و یا استفاده از اصلاح‌کننده‌های مصالح سنگی ارتقاء می‌دهند.

آهک هیدراته و سیمان پرتلند، رایج‌ترین و تأثیرگذارترین فیلرهای ضدعریان‌شدگی هستند که می‌توانند به طور قابل ملاحظه‌ای خصوصیات مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی را بهبود دهند [۹-۵]. پژوهش‌های بسیاری پتانسیل این فیلرها را در بهبود مقاومت رطوبتی مقایسه کرده‌اند. به عنوان مثال، هوانگ و همکاران [۱۰] حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی داغ^۱ شامل فیلرهای سیمانی مانند آهک هیدراته، خاکستر بادی و سرباره کوره سیمان را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها از آزمایش‌های مدول دینامیکی و لاتمن اصلاح شده^۲ برای ارزیابی عملکرد آزمایشگاهی بتن آسفالتی تحت شرایط رطوبتی، استفاده کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که فیلر آهک هیدراته به دلیل خصوصیات خاص خود، هم به صورت فیزیکی و هم شیمیایی قیر را تحت تأثیر قرار می‌دهد. آن‌ها همچنین متوجه شدند که واکنش قوی بین قیر و آهک هیدراته می‌تواند پیوند بین ذرات سنگدانه‌ای و چسباننده‌های قیری را بهبود دهد که به کاهش حساسیت رطوبتی منجر می‌شود [۱۰].

در طی تخریب و بازسازی سازه‌ها مقادیر قابل توجهی از مواد زائد تولید می‌شوند، که اخیراً توجه زیادی به استفاده مجدد و بازیافت این منابع صورت گرفته است. به طور خاص، پتانسیل زیادی در استفاده مجدد از مواد زائد به عنوان سنگدانه‌های بازیافتی در ساخت روسازی راه‌ها وجود دارد. پژوهشگرانی پتانسیل استفاده از پودرهای مواد زائد مختلف را برای جایگزینی فیلرهای معدنی در مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۴-۱۱]. این مطالعات نشان

3 Recycled Concrete Aggregate (RCA)
4 Tunncliff and Root Test
5 AASHTO
6 Surface Free Energy (SFE)
7 Diffusivity
8 Interfacial Interactions

1 Hot Mixture Asphalt (HMA)
2 Modified Lottman

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی قیر مورد استفاده
Table 1. Specifications of the bitumen used

آزمایش	استاندارد	قیر ۶۰-۷۰
درجه نفوذ (۱۰۰ گرم، ۵ ثانیه، ۲۵ °C)، ۰/۱ میلی‌متر	ASTM D5	۷۰
نقطه نرمی، °C	ASTM D36	۵۰/۴
شاخص نفوذ (PI)	-	-۰/۲۶۸
شکل‌پذیری (۵ cm/min، ۲۵ °C)، سانتی‌متر	ASTM D113	+۱۰۰
ویسکوزیته در ۱۳۵ °C، سانتی‌پواز	ASTM D4402	۳۱۵
نقطه اشتعال، °C	ASTM D92	۲۷۵
کاهش وزن پس از آزمایش لعاب نازک (TFOT)، %	ASTM D1754	۰/۱
کاهش درجه نفوذ پس از آزمایش لعاب نازک، %	-	۸۳

(SiO₂) در آن نشان داده شد، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. سطح این سنگدانه‌ها دارای بار الکتریکی منفی است و جز مواد آب‌دوست و با حساسیت رطوبتی بالا، طبقه‌بندی می‌شود. بزرگترین اندازه اسمی سنگدانه‌ها ۱۹ میلی‌متر بوده و دانه‌بندی آن مطابق با شکل ۱ انتخاب شد.

فیلر سنگ آهک، سیمان پرتلند و فیلر سیلیسی به دست آمده به ترتیب از شرکت سپندار، شرکت سیمان تهران و معدن سنگ درام کاشان، به عنوان بخش فیلر مخلوط آسفالتی استفاده شدند. پودر سیلیس به عنوان فیلر در نمونه شاهد استفاده شد. پودر خرده بتن از بقایای تخریب و بهسازی تیر ساختمان بتنی در دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران، به عنوان فیلر بتن بازیافتی استفاده شد که به علت نداشتن نقشه ساخت از ساختمان مورد نظر، اطلاعاتی دقیقی از مشخصات مکانیکی بتن استفاده شده در سازه آن ساختمان در دست نیست. جهت تهیه فیلر بازیافتی، پس از استخراج خرده بتن از تیرهای بتنی تخریب شده، اقدام به میکرونیزه کردن آنها بوسیله دستگاه آسیاب تویی شده است. فیلرهای به کار گرفته شده در شکل ۲ نمایش داده شده است. در تمام طرح‌های اختلاط نمونه‌های آسفالتی، درصد وزنی فیلر مورد استفاده، ۵٪ در نظر گرفته شدند.

ترکیب شیمیایی به دست آمده از آزمایش فلوروسنس اشعه ایکس فیلرها و سنگدانه در جدول ۲، ارائه شده است. همه فیلرها قبل از استفاده در مخلوط آسفالتی از الک ۰/۰۷۵ میلی‌متر عبور داده شدند.

را ارزیابی کردند و بیان کردند که فیلر می‌تواند مقاومت شکست و همچنین خرابی رطوبتی سیستم ماستیک-سنگدانه را تغییر دهد. کیم و همکاران [۲۷] همچنین از مفهوم انرژی آزاد سطحی، برای پیش‌بینی پتانسیل خرابی رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی در شرایط بارگذاری چرخه‌ای، استفاده کردند.

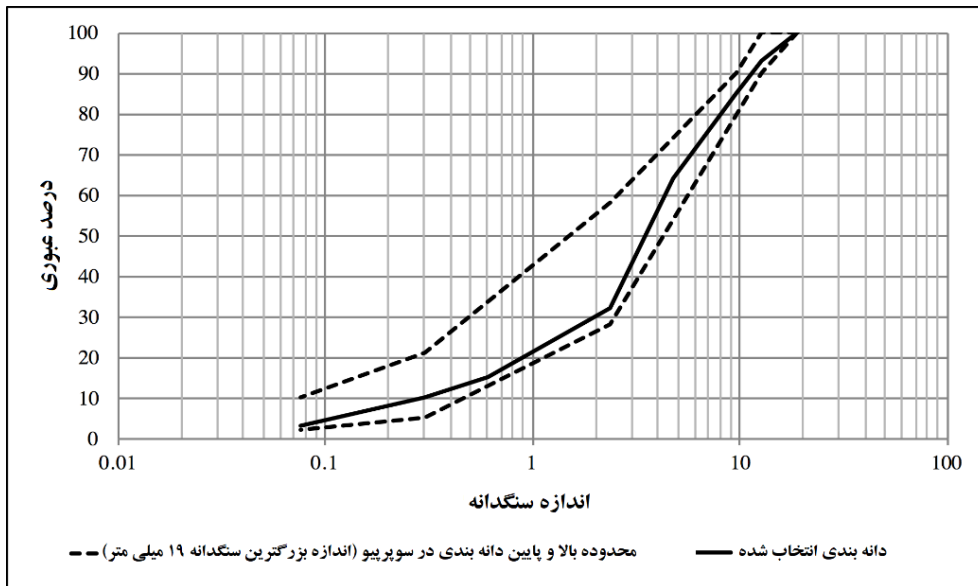
با وجود این که ماستیک در پیوستگی ماستیک^۱ و همین‌طور چسبیدگی ماستیک-سنگدانه^۲ اهمیت دارد و با در نظر گرفتن محدودیت‌های موجود در روش‌های مکانیکی ارزیابی حساسیت رطوبتی، تحقیقات محدودی مستقیماً نقش این جز مخلوط آسفالتی در کنترل خرابی رطوبتی را مورد بررسی قرار داده‌اند. استفاده از روش انرژی آزاد سطحی، که بر اساس ویژگی‌های اجزای تشکیل‌دهنده مخلوط آسفالتی است، اجازه بررسی نقش اجزای مختلف مخلوط آسفالتی در ویژگی‌های رفتاری آن را می‌دهد. بر این اساس، این تحقیق، به مطالعه تأثیر انواع فیلر بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی قرار گرفته تحت چندین چرخه ذوب و یخبندان، با استفاده از روش‌های مکانیکی و ترمودینامیکی، می‌پردازد. مصالح انتخاب شده برای بخش فیلر سنگدانه در این تحقیق، پودر سنگ آهک، سیمان پرتلند و سیلیس هستند. به علاوه، در این مطالعه تلاش شده است تا پتانسیل استفاده از بتن آسفالتی به عنوان مصالح فیلر برای بهبود خصوصیات خرابی رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی داغ ارزیابی شود. به این منظور، مقاومت کشش غیر مستقیم^۳، مدول برجهنگی^۴، پارامترهای شکست مخلوط‌های آسفالتی و همچنین انرژی آزاد سطحی ماستیک استفاده شدند. خصوصیات عملکردی مخلوط‌های آسفالتی با انواع مختلف فیلر که تحت چندین چرخه ذوب و یخبندان قرار گرفتند، ارزیابی شدند.

۲- مصالح و روش‌های آزمایش

۲-۱- مصالح

قیر (AC ۶۰/۷۰) تهیه‌شده از شرکت نفت پاسارگاد با خصوصیات فیزیکی ارائه شده در جدول ۱ و سنگدانه گرانیتی معدن سنگ درام شهر کاشان که با ارزیابی شیمیایی، وجود مقادیر زیاد سیلیس

- 1 Mastic Cohesion
- 2 Mastic-Aggregate Adhesion
- 3 Indirect Tensile Strength (ITS)
- 4 Modules Resilient (MR)



شکل ۱. دانه‌بندی انتخاب شده سنگدانه‌ها
Fig. 1. Selected grading of aggregates



شکل ۲. نمایش فیزیکی فیلرهای به کار گرفته شده در پژوهش مورد نظر
Fig. 2. Fillers used in this study

۲-۲- طرح اختلاط و آماده‌سازی

طرح اختلاط بر اساس روش مارشال و مندرجات نشریه MS-2 انستیتو آسفالت انجام شد و درصد قیر متناظر با ۴ درصد فضای خالی به عنوان درصد قیر بهینه انتخاب شد. مشخصات حجمی مخلوط آسفالتی تهیه شده در جدول ۳ ارائه شده است. بر این اساس همه نمونه‌های آسفالتی به طور یکنواخت با ۴/۴ درصد قیر ساخته شدند.

۲-۳- روش‌های آزمایش

۲-۳-۱- آزمایش کشش غیر مستقیم (ITS)

برای تعیین مقاومت کشش غیر مستقیم، نمونه‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری فشاری در امتداد دو محور بارگذاری با نرخ تغییرشکل ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه در دمای ۲۵ °C قرار گرفتند. بارگذاری ادامه داده می‌شود تا زمانی که گسیختگی و جدا شدن نمونه‌ها در امتداد

جدول ۲. ترکیبات شیمیایی فیلرها
Table 2. Chemical composition of fillers

LOI *	Mn O	P ₂ O ₅	K ₂ O	TiO ₂	Mg O	Na ₂ O	Ca O	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	نوع مصالح
۲/۵۳	۰/۱۱۴	۱/۰۸۸	۱/۰۳	۰/۶۷	۲/۶	۲/۰۸	۷/۴	۱۱/۲	۲/۷	۶۵/۱	سنگدانه سیلیسی
۱۲/۳۲	۰/۱۱۷	۰/۱۷	۱/۸۲	۰/۴۶	۱/۹۸	۱/۲۹	۲۲/۹	۶/۹	۴/۲۸	۴۷/۲	سنگدانه بتن بازیافتی
۳/۴۵	-	-	-	-	۲/۵	-	۶۳/۵	۵/۵	۴/۵	۲۰/۵	سیمان پرتلند
۲۵/۱۵	-	-	۰/۱	۰/۱	۰/۵۳	۰/۱	۷۱/۴	۰/۶۹	۰/۱۲	۱/۱۹	سنگ آهک

*Loss on Ignition

جدول ۳. مشخصات حجمی مخلوط آسفالتی شاهد
Table 3. Volumetric characteristics of control asphalt mixture

روانی (یک چهارم میلی متر)	مقاومت (کیلو نیوتون)	درصد فضای خالی سنگدانه‌ها	وزن مخصوص واقعی	وزن مخصوص ماکزیمم	درصد قیر
۱۱/۸	۱۲/۶۳	۱۵/۹۵۹	۲/۳۶۳	۲/۴۶۲	۴/۴

اعمال شده (کیلو نیوتون) و μ ضریب پواسون است.

۳-۲-۳- آزمایش حساسیت رطوبتی

آزمایش لاتمن اصلاح شده (AASHTO T283) به طور گسترده‌ای برای تعیین مقاومت در برابر خرابی رطوبتی مخلوط متراکم شده استفاده می‌شود. این آزمایش تأثیر رطوبت بر مقاومت کشش غیر مستقیم مخلوط را اندازه می‌گیرد. نمونه‌هایی که تحت چرخه ذوب و یخبندان قرار می‌گیرند، باید ابتدا ۱۰ تا ۸۰ درصد فضای خالی اشباع شوند، سپس در یخ زدگی برای حداقل ۱۶ ساعت در دمای $5 \pm 18^\circ\text{C}$ و سپس در حمام آب داغ برای مدت 1 ± 24 ساعت در دمای $5 \pm 60^\circ\text{C}$ قرار داده می‌شوند. در نهایت، نمونه‌های عمل‌آوری شده پس از خارج کردن از حمام آب $5 \pm 25^\circ\text{C}$ برای 5 ± 45 دقیقه آماده آزمایش هستند. در این مطالعه، چندین چرخه ذوب و یخبندان پی‌درپی در نظر گرفته شده است. بدین صورت که پس از چرخه اول ذوب و یخبندان، آزمایش‌های مورد نظر روی دسته اول نمونه‌های آسفالتی، شامل ۳ نمونه، در حالت خشک و تر اعمال شدند. چرخه‌های ذوب و یخبندان با بقیه نمونه‌های آسفالتی مطابق با استاندارد تشریح شده تا ۱۰ چرخه ادامه پیدا کردند. در چرخه‌های ۳، ۶ و نیز چرخه ۱۰ ام، همه

صفحه بارگذاری رخ دهد. رابطه ۱ برای محاسبه مقاومت کشش غیر مستقیم برای هر یک از نمونه‌ها استفاده می‌شود:

$$ITS = \frac{2P_{max}}{\pi t D} \quad (1)$$

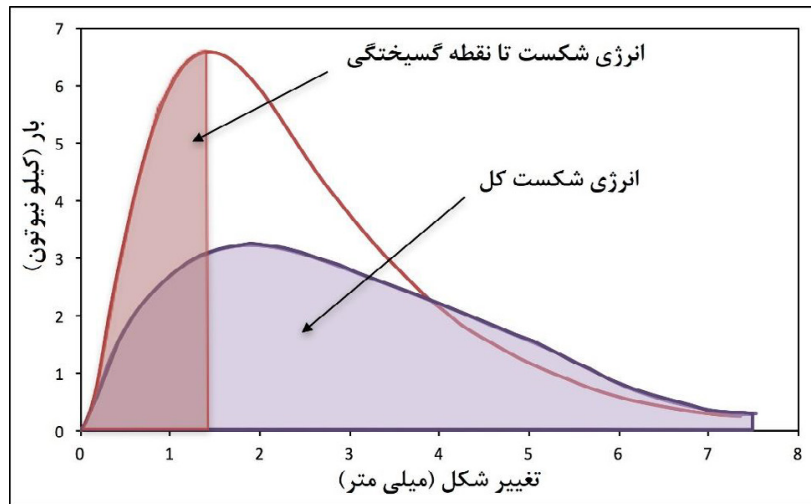
که در این رابطه، P_{max} ، ماکزیمم بار اعمال شده (کیلو نیوتون)، t و D ضخامت و قطر نمونه بر حسب متر هستند.

۳-۲-۲- آزمایش مدول برجهنگی (MR)

مدول برجهنگی به صورت نسبت تنش اعمال شده به کرنش قابل بازگشت، زمانی که بارگذاری چرخه‌ای اعمال می‌شود، تعریف می‌شود. در این آزمایش، بار فشاری به صورت موج سینوسی در امتداد محور شعاعی نمونه‌های استوانه‌ای با قطر $10.1/6$ میلی‌متر اعمال می‌شود. بارگذاری به صورت $1/10$ ثانیه بارگذاری و $9/10$ ثانیه دوره استراحت، است. بار و تغییرشکل به صورت مداوم ثبت شده و مدول برجهنگی بر اساس رابطه ۲، مطابق با استاندارد ASTM D7369 محاسبه می‌شود:

$$M_R = \frac{P_{cyclic}}{\delta_h t} (0.2699 - \mu) \quad (2)$$

که M_R مدول برجهنگی برحسب کیلوپاسکال، δ_h کرنش افقی قابل بازگشت، t ضخامت نمونه برحسب متر، P_{cyclic} بار چرخه‌ای



شکل ۳. شماتیک محاسبه نموداری انرژی شکست
Fig. 3. Schematic of graphic calculation of fracture energy

کل به صورت کار انجام شده برای شکست نمونه تعریف می‌شود که با محاسبه کل سطح زیر نمودار بار-تغییر شکل آزمایش کشش غیر مستقیم، محاسبه می‌شود. از طرف دیگر، انرژی شکست تا گسیختگی، به صورت سطح زیر نمودار بار-تغییر شکل تا بار گسیختگی تعریف می‌شود که شماتیک محاسبه انرژی شکست در شکل ۳ قابل مشاهده است.

پارامتر انرژی شکست معمولاً بر اساس ابعاد نمونه نرمال‌سازی شده و به صورت رابطه ۴ بیان می‌شود:

$$F_e = \frac{\int_0^{\delta_{at Pmax}} P(\delta) d(\delta)}{tD} \quad (4)$$

که F_e ، انرژی شکست تا گسیختگی نرمال شده (J/m²)، P بار بر حسب نیوتن، d تغییر شکل بر حسب متر، t و D به ترتیب ضخامت و قطر نمونه بر حسب متر هستند.

۳-۲-۵- انرژی آزاد سطحی

انرژی آزاد سطحی، به صورت مقدار انرژی مورد نیاز برای تشکیل واحد سطح جدید در مواد تحت خلاء تعریف می‌شود. چسبندگی ماستیک قیر و چسبیدگی آن به سطح سنگدانه می‌تواند با انرژی آزاد سطحی ارزیابی شود. روش‌های متعددی برای تعیین انرژی آزاد سطحی اجزای مخلوط آسفالتی از جمله، صفحه ویلهلمی^۲، دستگاه جذب جهانی^۳ و قطره چسبیده^۴ توسعه یافته‌اند [۲۹]. روش قطره

آزمایش‌های مورد نظر روی دسته‌های ۳ تایی نمونه‌های آسفالتی انجام شدند. با وجود ۴ طرح اختلاط به ازای فیلرهای مختلف، دسته‌های ۳ تایی مخلوط آسفالتی و ۴ ایستگاه انجام آزمایش در چرخه‌های ۱، ۳، ۶ و ۱۰ ذوب و یخبندان و حالت خشک، ۶۰ نمونه آسفالتی برای انجام آزمایش‌ها ساخته شدند.

مقدار مقاومت کشش غیر مستقیم نمونه‌های شاهد و عمل‌آوری شده در دمای ۲۵ °C تعیین می‌شود. نسبت مقاومت کششی^۱ به صورت میانگین مقاومت کشش غیر مستقیم نمونه‌های عمل‌آوری شده ($ITS_{conditioned}$) به میانگین مقاومت کشش غیر مستقیم نمونه‌های خشک ($ITS_{unconditioned}$) مطابق با رابطه ۳ تعریف می‌شود:

$$TSR = \frac{ITS_{conditioned}}{ITS_{unconditioned}} \times 100 \quad (3)$$

۳-۲-۴- انرژی شکست

بریجیسون و همکاران [۲۸] نشان دادند که رطوبت به طور چشم‌گیری مقاومت شکست نمونه‌های آسفالتی را کاهش می‌دهد. خصوصیات شکست مخلوط آسفالتی داغ از آزمایش کشش غیر مستقیم، همچنین می‌تواند برای بررسی اثر خرابی رطوبتی بر مخلوط مورد استفاده قرار گیرد. دو نوع پارامترهای انرژی شکست وجود دارد که می‌توان از آزمایش کشش غیر مستقیم به دست آید. انرژی شکست

2 Wilhelmy Plate (WP)
3 Universal Sorption Device (USD)
4 Sessile Drop

1 Tensile Strength Ratio (TSR)

حاصل شود و اندازه‌گیری‌ها در دمای کنترل شده اتاق ۲۵ °C انجام شد. برای هر مایع (i_{th}) داده شده L_i انرژی آزاد سطحی Γ_{Li} از رابطه ۵ به دست می‌آید [۲۹-۲۵]:

$$\frac{1}{2}\Gamma_{Li} \times (1 + \cos(\theta_i)) = x_1\sqrt{\Gamma_{Li}^{LW}} + x_2\sqrt{\Gamma_{Li}^-} + x_3\sqrt{\Gamma_{Li}^+} \quad (5)$$

که θ_i زاویه تماس قطره مایع کاوش (i_{th}) با سطح جامد، x_1 تا x_3 ریشه دوم اجزای انرژی آزاد سطحی ماستیک ناشناخته، Γ_{Li}^{LW} ، Γ_{Li}^+ و Γ_{Li}^- به ترتیب اجزای لیفیشیز ون دروالز، اسیدی و پایه هستند. بخش های اسیدی و بازی به طور پارامتر سطح اسیدی Γ^+ و پارامتر سطح بازی Γ^- می‌تواند بازآرایی شود:

$$\Gamma = \Gamma^{LW} + \Gamma^{AB} \quad (6)$$

$$\Gamma^{AB} = 2\sqrt{\Gamma^+\Gamma^-} \quad (7)$$

انرژی آزاد پیوستگی ΔG^c و انرژی آزاد چسبندگی ΔG^a بین قیر و سنگدانه مطابق رابطه ۸ قابل تعریف است.

$$\Delta G^c = -2\Gamma \quad (8)$$

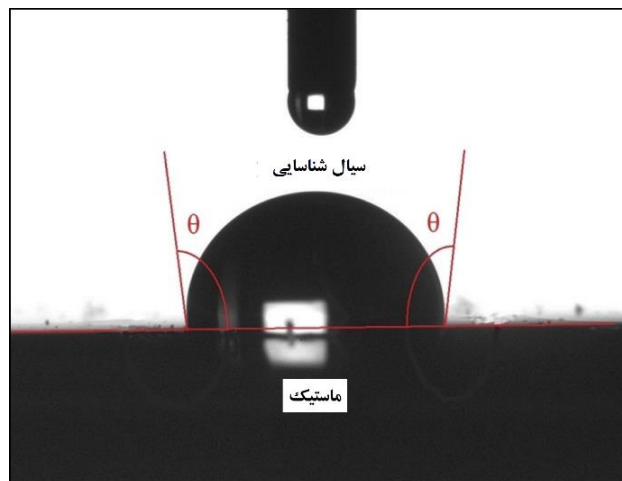
در حضور سیال قطبی، چسبندگی بین قیر و سنگدانه از رابطه ۹ پیروی می‌کند [۳۳].

$$\Delta G_{IS}^a = \Delta G_{IS}^{aLW} + \Delta G_{IS}^{aAB} = -2[\sqrt{\Gamma_s^{LW}\Gamma_l^{LW}} + \sqrt{\Gamma_s^+\Gamma_l^-} + \sqrt{\Gamma_s^-\Gamma_l^+}] \quad (9)$$

در این رابطه اندیس های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب مربوط به قیر، سنگدانه و آب است [۲۵].

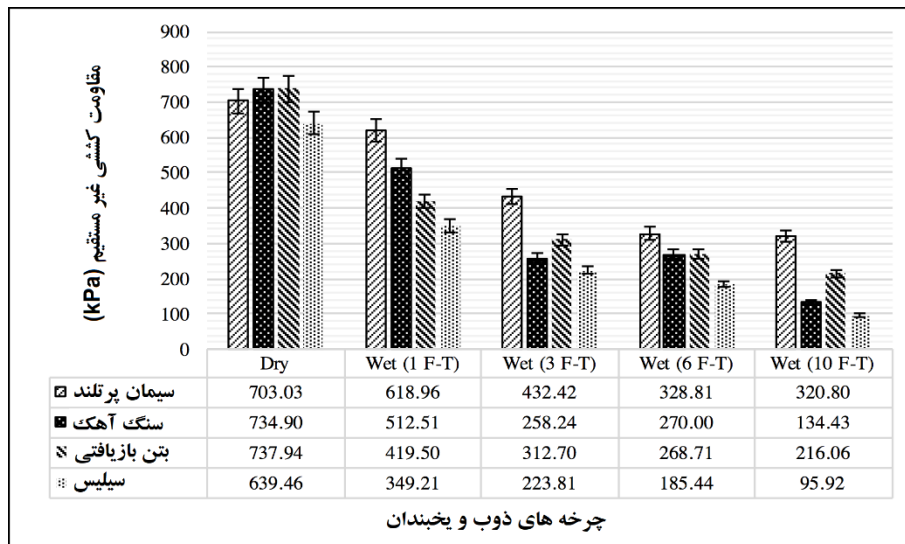
$$\Delta G_{132}^a = +\Gamma_{12} - \Gamma_{13} - \Gamma_{23} = 2 \left[\begin{aligned} &\sqrt{\Gamma_1^{LW}\Gamma_3^{LW}} + \sqrt{\Gamma_2^{LW}\Gamma_3^{LW}} - \sqrt{\Gamma_1^{LW}\Gamma_2^{LW}} \\ &-\Gamma_3^{LW} + \sqrt{\Gamma_3^+}(\sqrt{\Gamma_1^-} + \sqrt{\Gamma_2^-} - \sqrt{\Gamma_3^-}) \\ &+ \sqrt{\Gamma_3^-}(\sqrt{\Gamma_1^+} + \sqrt{\Gamma_2^+} - \sqrt{\Gamma_3^+}) \\ &-\sqrt{\Gamma_1^+\Gamma_2^-} - \sqrt{\Gamma_1^-\Gamma_2^+} \end{aligned} \right] \quad (10)$$

لیتل و بشین جهت ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط های آسفالتی دو شاخص انرژی آزاد سطحی ER_1 ، ER_2 را ارائه کردند که از روابط ۱۲ و ۱۱ قابل محاسبه است.

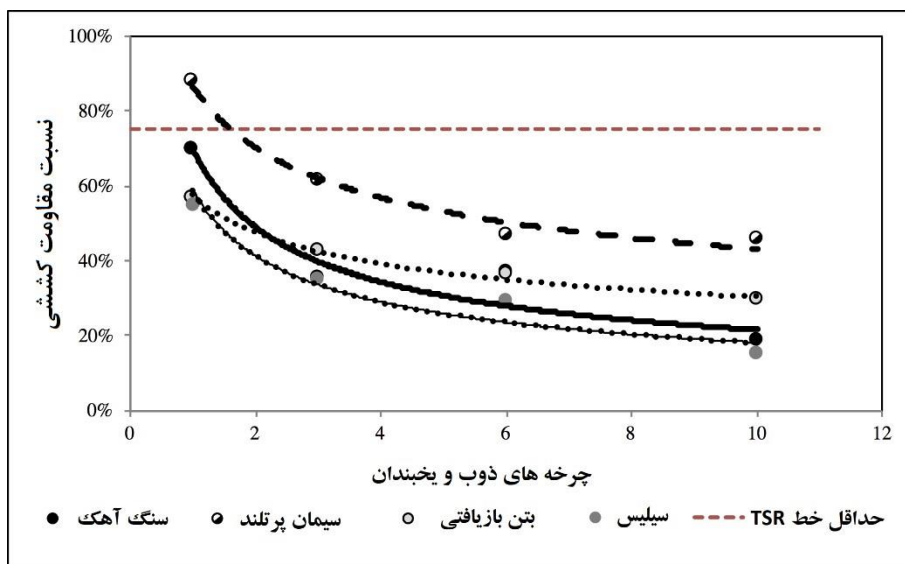


شکل ۴. زاویه تماس در آزمایش قطره چسبیده
Fig. 4. Contact angle in the sessile drop method

چسبیده، روش اندازه‌گیری نوری بر اساس زاویه تماس اندازه‌گیری شده با مایع‌های کاوش متفاوت است که می‌تواند برای ارزیابی خیس‌شدگی سطح جامد استفاده شود. مایع کاوشی روی سطح افقی صاف پوشیده شده با قیر پراکنده می‌شود. تصویر قطره مایع تشکیل شده روی سطح قیر و مصالح سنگی با استفاده از دوربین دیجیتال گرفته می‌شود. زاویه تماس با تحلیل تصویر بوسیله نرم‌افزار پردازش تصویر به دست می‌آید [۳۰]. شکل شماتیک زاویه تماس آزمایش قطره چسبیده در شکل ۴ نشان داده شده است. در این مطالعه، نمونه‌های ماستیک شامل انواع متفاوت فیلر تحت آزمایش قطره چسبیده قرار گرفتند. نمونه‌ها با ترکیب فیلرها با قیر به نسبت ۵ به ۴/۴ آماده شدند. نمونه‌ها در دمای ۱۴۵ °C ترکیب شدند و سپس بر روی صفحه میکروسکوپ با استفاده از تیغه نمونه‌گیری شدند که سطح صافی به دست آید. نمونه مصالح سنگی به کمک قلوه سنگ (با ابعاد بیش از ۲۵ میلیمتر) و با برش اره (Autosaw, IPC) از سطح آن ساخته شد و سطح آن با کمک پولیش کاملاً هموار شد. تصویربرداری دیجیتالی در آزمایشگاه نانو مهندسی سطح دانشگاه تهران و به کمک دستگاه Jikan CAG-10 انجام شد، زوایا با نرم‌افزارهای SPPF و imageJ به دست آمده و در تمام آزمایش‌ها اندازه قطره ۶ میکرولیتر بوده است. از آنجا که سه نوع مایع کاوش برای تعیین انرژی آزاد سطحی کافی است، آب، اتیلن گلیکل و گلیسرول (با خلوص بیش از ۹۹ درصد) برای اندازه‌گیری زاویه تماس در این آزمایش استفاده شدند. هر چکیدن قطره مایع ۳ بار تکرار شد تا از تکرارپذیری نتایج اطمینان



شکل ۵. کشش غیر مستقیم نمونه‌های با فیلرهای مختلف در چرخه‌های ذوب و یخبندان
 Fig. 5. Indirect tensile strength results with different fillers versus freeze and thaw cycles



شکل ۶. نسبت مقاومت کشش غیر مستقیم نمونه‌های خشک به تر بر حسب تعداد چرخه ذوب و یخبندان برای مخلوط‌های با فیلرهای مختلف
 Fig. 6. Indirect tensile strength ratio values of asphalt mixtures versus freeze and thaw cycles

نمونه‌های عمل‌آوری نشده (خشک) و عمل‌آوری شده (تر) برای ۱، ۳، ۶ و ۱۰ چرخه ذوب و یخبندان، تعیین شد. چندین چرخه ذوب و یخبندان در نظر گرفته شد تا کاهش مقاومت مخلوط آسفالتی در شرایط محیطی واقعی‌تر شبیه‌سازی شود. در فرآیند طراحی آزمایش، ۳ تکرار برای هر آزمایش در نظر گرفته شد و میانگین نتایج سه تکرار به عنوان خروجی گزارش شد. شکل ۵، میانگین مقادیر مقاومت کشش غیر مستقیم بر حسب کیلوپاسکال را برای

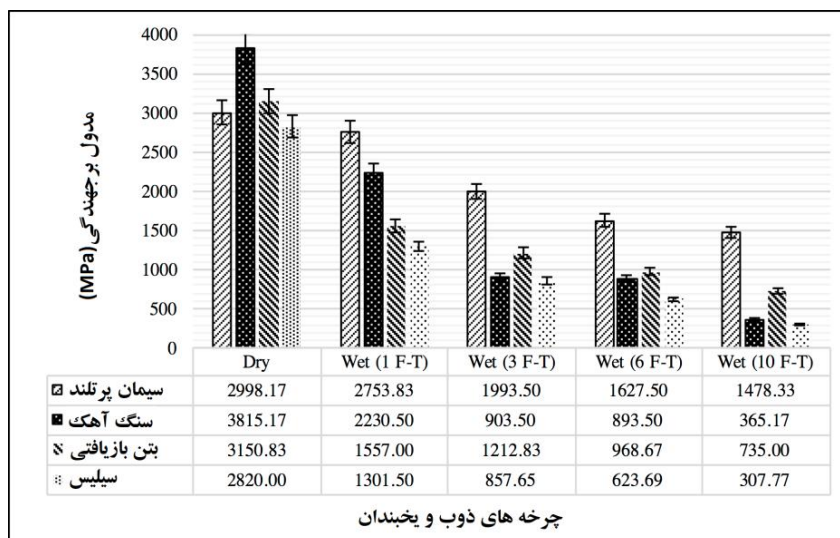
$$ER_1 = \left| \frac{\Delta G_{ls}^a}{\Delta G_{132}^a} \right| \quad (11)$$

$$ER_2 = \left| \frac{\Delta G_{ls}^a - \Delta G^c}{\Delta G_{132}^a} \right| \quad (12)$$

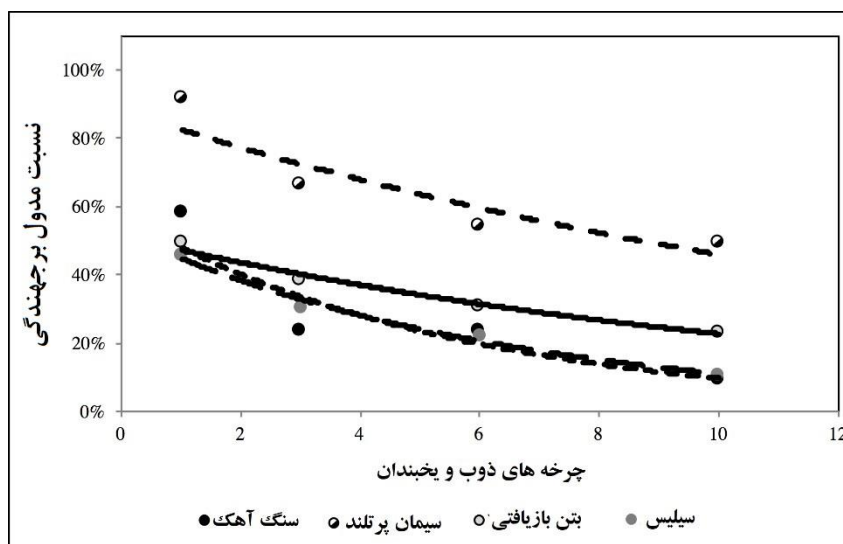
۳- بیان و تحلیل نتایج

۳-۱- آزمایش کشش غیر مستقیم

در این مطالعه، مقاومت کشش غیر مستقیم در ۲۵ °C برای



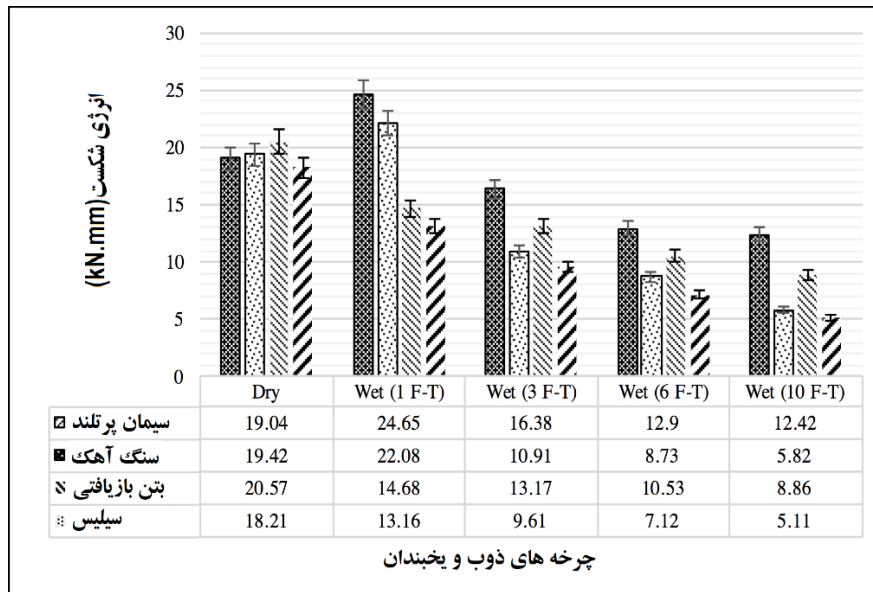
شکل ۷. مدول برجهنگی نمونه‌های با فیلرهای مختلف در چرخه‌های ذوب و یخبندان
 Fig. 7. Resilient modulus results with different fillers versus freeze and thaw cycles



شکل ۸. نسبت مدول برجهنگی نمونه‌های خشک به تر بر حسب تعداد چرخه ذوب و یخبندان برای مخلوط‌های با فیلرهای مختلف
 Fig. 8. Resilient modulus ratio values of asphalt mixtures versus freeze and thaw cycles

غیر مستقیم نمونه‌های عمل‌آوری شده به عمل‌آوری نشده، برای چرخه‌های مختلف ذوب و یخبندان تعیین می‌شود که نتایج آن در شکل ۶ ارائه شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود، مقادیر نسبت مقاومت نمونه‌های تر به خشک مخلوط‌های آسفالتی شامل سیمان پرتلند برای همه چرخه‌های ذوب و یخبندان، بزرگتر از سایر مخلوط‌هاست. مطابق نتایج مقاومت کشش غیر مستقیم نشان داده شده در شکل ۵، اگرچه همه نمونه‌های آسفالتی شامل

چرخه‌های ذوب و یخبندان مخلوط آسفالتی شامل فیلرهای مختلف نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که مقدار مقاومت کشش غیر مستقیم مخلوط‌های شامل فیلر سیمان پرتلند و سنگ آهک و پودر بتن بازیافتی بزرگتر از مخلوط شاهد شامل فیلر سیلیسی است. با افزایش چرخه‌های ذوب و یخبندان، مخلوط‌های شامل سیمان، احتمالاً به دلیل اثرات سیمان‌شدگی در طی دوره عمل‌آوری، بهتر از سایر مخلوط‌ها عمل می‌کنند [۳۱]. سپس نسبت مقاومت کشش



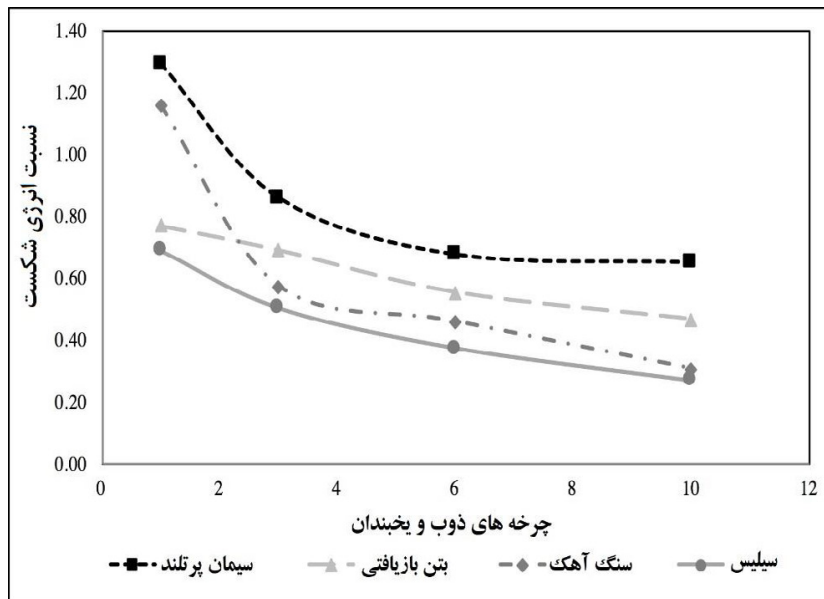
شکل ۹. انرژی شکست نمونه‌های با فیلهای مختلف در چرخه‌های ذوب و یخبندان
 Fig. 9. Fracture energy results with different fillers versus freeze and thaw cycles

۳-۲- آزمایش مدول برجهندگی

شکل ۷ نتایج مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی شامل فیلهای مختلف در 25°C در چرخه‌های ذوب و یخبندان متوالی را نشان می‌دهد. نتایج مدول برجهندگی در توافق با نتایج آزمایش کشش غیر مستقیم ارائه شده در شکل ۵ است. بر طبق نتایج این آزمایش، بعد از سومین چرخه ذوب و یخبندان، روند کاهش مقادیر مدول برجهندگی بین نمونه‌های شامل فیله بتن بازیافتی و فیله سنگ آهک تغییر می‌کند و در چرخه‌های بالاتر، مخلوط‌های آسفالتی شامل فیله بتن بازیافتی عملکرد بهتری را در مقایسه با مخلوط شامل فیله سنگ آهک نشان می‌دهد. واکنش شیمیایی سیمان غیر هیدراته با آب برای تشکیل محصولات سیمانی جدید در فیله بتن بازیافتی در طی چرخه‌های ذوب و یخبندان عمل‌آوری، ممکن است دلیل این مشاهده باشد [۳۲]. به علاوه، مخلوط‌های آسفالتی شامل فیله بتن بازیافتی، نسبت مدول برجهندگی بالاتر در مقایسه با مخلوط‌های با فیله سنگ آهک و سیلیس در طی چرخه‌های ذوب و یخبندان نشان می‌دهد. تغییرات یاد شده و روند تغییر نسبت مدول برجهندگی مخلوط‌های بتن آسفالتی برای حالت عمل‌آوری شده به عمل‌آوری نشده، شامل فیلهای مختلف در شکل ۸، ارائه شده است.

فیلهای سیمان، سنگ آهک و بتن بازیافتی در شرایط خشک مقاومت تقریباً برابر دارند، اما کاهش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی برای مخلوط‌های با فیله مختلف در چرخه‌های ذوب و یخبندان قابل توجه است. همچنین با افزایش چرخه‌های ذوب و یخبندان، روند نسبت مقاومت کشش غیر مستقیم مخلوط‌های مختلف تغییر می‌کند.

در اولین چرخه ذوب و یخبندان، فیله سیمانی ۲۶ درصد افزایش مقدار نسبت مقاومت کشش غیر مستقیم در مقایسه با مخلوط آسفالتی شامل فیله سنگ آهک را نشان می‌دهد. در حضور رطوبت، فیله سیمانی رفتار متفاوتی نشان می‌دهد و ممکن است فرآیند سیمانی شدن یا سایر واکنش‌ها اتفاق افتد. این فرآیند، افزایش چسبندگی بین قیر و سنگدانه را نتیجه می‌دهد. در اولین چرخه عمل‌آوری، مقادیر نسبت مقاومت کشش غیر مستقیم نمونه‌های شامل فیله سنگ آهک و بتن بازیافتی، به ترتیب ۲۸ و ۴ درصد بیشتر از نمونه شاهد مشاهده شد. در چرخه‌های عمل‌آوری بیشتر، مقادیر نسبت مقاومت کششی رفتار متفاوتی را نشان می‌دهد، به طوری که مقادیر نسبت مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی شامل فیله بتن بازیافتی، تا ۱۵ درصد به طور میانگین، در مقایسه با مخلوط‌های آسفالتی شامل فیله سنگ آهک بعد از سومین چرخه افزایش می‌یابد.



شکل ۱۰. نسبت انرژی شکست نمونه های خشک به تر بر حسب تعداد چرخه ذوب و یخبندان برای مخلوط های با فیلهای مختلف
 Fig. 10. Fracture energy ratio values of asphalt mixtures versus freeze and thaw cycles

۳-۳- انرژی شکست

مخلوطهای با فیلهای مختلف محاسبه شده است. مطابق نتایج بدست آمده، نسبت انرژی شکست شامل فیلهر بتن بازیافتی، کمترین نسبت کاهش را برای چرخه های ذوب و یخبندان دارد.

۴-۳- روش انرژی آزاد سطحی

در محاسبه انرژی آزاد سطحی، زاویه تماس استاتیکی با استفاده از مایع های کاوش مختلف بر روی سطح جامد ماستیک اندازه گیری می شود. نتایج اجزای انرژی آزاد سطحی ماستیک ها و سنگدانه محاسبه شد و در جدول ۴ نشان داده شده است. تأثیر فیلهای سیمان پرتلند، سنگ آهک، بتن بازیافتی و سیلیس بر اجزای انرژی آزاد سطحی چسباننده قیری متفاوت هستند. همان طور که در جدول ۴ قابل مشاهده است، اجزای پایه ای و اسیدی ماستیک ها مقادیر کمی در مقایسه با جز لیفشیز ون در والز دارند. این مشاهده، با این واقعیت که اغلب چسباننده های قیری مصالح با قطبیت ضعیف هستند، هم راستا است [۲۹].

انرژی آزاد سطحی کل بین $16/8$ و $30/3$ (میلی ژول بر متر مربع) تغییر می کند. مقادیر بیشتر انرژی آزاد سطحی مربوط به ماستیک شامل سیمان پرتلند و کمترین انرژی آزاد سطحی مربوط به ماستیک شامل فیلهر سیلیس است. همچنین می توان مشاهده کرد که جایگزینی فیلهر شاهد با فیلهر بتن بازیافتی، سنگ آهک و سیمان، افزایش جز پایه ای

انرژی شکست در طی آزمایش کشش غیر مستقیم مخلوط های آسفالتی می تواند برای اندازه گیری حساسیت رطوبتی مورد استفاده قرار گیرد. با بررسی نتایج آزمایش انرژی شکست، هر دو روش اندازه گیری انرژی شکست (کل سطح زیر نمودار بار- تغییرشکل و سطح زیر نمودار تا بار گسیختگی) روند مشابهی را در طی چرخه های ذوب و یخبندان برای نمونه های آزمایش شده، نشان می دهد. برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط های آسفالتی با استفاده از انرژی شکست، انرژی شکست نتیجه شده از محاسبات سطح زیر نمودار بار- تغییرشکل در نظر گرفته شد که در شکل ۹ نشان داده شده است. می توان مشاهده نمود که به جز اولین چرخه ذوب و یخبندان، برای مخلوط های با فیلهر سیمان پرتلند و سنگ آهک، انرژی شکست روند مشابه با روند نتایج آزمایش کشش غیر مستقیم و مدول برجهندگی را نشان می دهد. افزایش انرژی شکست مخلوط های آسفالتی در چرخه اول ذوب و یخبندان برای مخلوط های با فیلهر سیمان و سنگ آهک، می تواند ناشی از رفتار انعطاف پذیر آنها باشد که مقادیر بالاتر کرنش شکست را نتیجه می دهد. روند نسبت انرژی شکست در حالت عمل آوری شده به عمل آوری نشده نیز بر حسب چرخه های ذوب و یخبندان در شکل ۱۰ نشان داده شده است. این نسبت با استفاده از انرژی شکست نمونه های عمل آوری شده و عمل آوری نشده، برای

جدول ۴. اجزای انرژی آزاد سطحی ماستیک‌های شامل فیلهای مختلف
Table 4. The surface free energy components of asphalt mastic including different fillers

مصالح	ماستیک فیلهر سیلیسی	ماستیک فیلهر بتن باز یافتی	ماستیک فیلهر سنگ آهک	ماستیک فیلهر سیمان پرتلند	سنگ‌دانه سیلیسی
جز لیفشیز ون در والز، $\Gamma^{LW} (J/m^2)$	۰/۰۱۶۸	۰/۰۲۱۱	۰/۰۲۲۹	۰/۰۳۰۳	۰/۱۲۲۶
جز پایه‌ای، $\Gamma^{-} (J/m^2)$	-۰/۰۶۵۱/۶۸	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۲۹	۰/۲۳۶
جز اسیدی، $\Gamma^{+} (J/m^2)$	۰/۰۳۵۶
انرژی آزاد سطحی کل، $\Gamma (J/m^2)$	۰/۰۱۶۸	۰/۰۲۱۱	۰/۰۲۲۹	۰/۰۳۰۳	۰/۳۰۵۹

جدول ۵. پارامترهای حساسیت رطوبتی بر اساس اجزای انرژی آزاد سطحی
Table 5. Moisture susceptibility parameters based on surface free energy components

پارامتر	ماستیک فیلهر سیمان پرتلند	ماستیک فیلهر سنگ-آهک	ماستیک فیلهر بتن باز یافتی	ماستیک فیلهر سیلیسی
$\Delta G_{fs} (J/m^2)$	-۰/۰۹۱	-۰/۱۰۹	-۰/۱۱۷	-۰/۱۴۲
$\Delta G_{132} (J/m^2)$	-۰/۱۲۱	-۰/۱۱۳	-۰/۱۱۰	-۰/۱۰۰
ER ₁	۰/۷۵۶	۰/۹۶۶	۱/۰۶۱	۱/۴۲۶
ER ₂	۰/۸۹۵	۱/۱۵۳	۱/۲۶۹	۱/۷۲۹
$\Delta G^c (J/m^2)$	۰/۰۳۳۶	۰/۰۴۲۳	۰/۰۴۵۷	۰/۰۶۰۵

بتن باز یافتی به عنوان فیلهر ارزیابی شد. روش‌های مختلفی جهت بررسی تکامل عملکرد وابسته رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی با توجه به چرخه‌های ذوب و یخبندان متوالی انجام شدند. به طور کلی در جمع بندی نتایج تحقیق به موارد زیر می‌توان اشاره کرد:

• نتایج آزمایش کشش غیر مستقیم برای نمونه‌های خشک به ازای فیلهای سنگ آهک، سیمان پرتلند و بتن باز یافتی افزایش مقدار مقاومت کششی را نشان می‌دهد. دلیل اصلی آن می‌تواند در اثر پیوند قیری مخلوط آسفالتی به صورت بازی باشد که با ترکیب اسیدی با سنگدانه‌های گرانیتهی مخلوط‌ها، باعث افزایش چسبندگی شود.

• افزایش تعداد چرخه‌های ذوب و یخبندان اثر مضر آب در چسبندگی بین سنگدانه و ماستیک را ایجاد می‌کند و افت قابل توجه مقدار مقاومت کششی را در پی دارد. اما فیلهر سیمان پرتلند با

چسبندگی قیری را نتیجه می‌دهد که می‌تواند چسبندگی را بهبود دهد. برای مقایسه نتایج انرژی آزاد سطحی برای حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، شاخص‌های مختلفی محاسبه شد که نتایج آن‌ها در جدول ۵ ارائه شده است. واضح است که نتایج نخستین چرخه ذوب و یخبندان مشابه نتایج شاخص‌های انرژی آزاد سطحی (ER₁, ER₂) است. جایگزینی فیلهر شاهد با سیمان پرتلند، فیلهر سنگ آهک و فیلهر بتن باز یافتی هر دو شاخص انرژی آزاد سطحی را افزایش می‌دهد و منجر به بهبود حساسیت رطوبتی می‌شود. لیکن این پارامترها نمی‌تواند رفتار مخلوط آسفالتی در چندین چرخه ذوب و یخبندان پی در پی را پیش‌بینی کند.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر انواع فیلهای سنگی روی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی در مقایسه با مخلوط‌های آسفالتی حاوی پودر

- & Design, 74 (2015) 157-163.
- [6] S.-C. Huang, R.E. Robertson, J.F. Branthaver, J. Claine Petersen, Impact of Lime Modification of Asphalt and Freeze-Thaw Cycling on the Asphalt-Aggregate Interaction and Moisture Resistance to Moisture Damage, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(6) (2005) 711-718.
- [7] Y.-R. Kim, J.S. Lutfi, A. Bhasin, D.N. Little, Evaluation of Moisture Damage Mechanisms and Effects of Hydrated Lime in Asphalt Mixtures through Measurements of Mixture Component Properties and Performance Testing, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(10) (2008) 659-667.
- [8] D.N. Little, J.C. Petersen, Unique Effects of Hydrated Lime Filler on the Performance-Related Properties of Asphalt Cements: Physical and Chemical Interactions Revisited, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(2) (2005) 207-218.
- [9] A.E.A.E.-M. Behiry, Laboratory evaluation of resistance to moisture damage in asphalt mixtures, *Ain Shams Engineering Journal*, 4(3) (2013) 351-363.
- [10] B. Huang, X. Shu, Q. Dong, J. Shen, Laboratory Evaluation of Moisture Susceptibility of Hot-Mix Asphalt Containing Cementitious Fillers, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(7) (2010) 667-673.
- [11] H.Y. Ahmed, A.M. Othman, A.A. Mahmoud, Effect of using waste cement dust as a mineral filler on the mechanical properties of hot mix asphalt, *Ass. Univ. Bull. Environ. Res*, 9(1) (2006) 51-60.
- [12] D.S. Kathem Taeh Alnealy, Effect of Using Waste Material as Filler in Bituminous Mix Design, *American Journal of Civil Engineering*, 3(3) (2015) 88.
- [13] M. Chen, J. Lin, S. Wu, Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture, *Construction and Building Materials*, 25(10) (2011) 3909-3914.
- [14] M.-z. Chen, J.-t. Lin, S.-p. Wu, C.-h. Liu, Utilization of recycled brick powder as alternative filler in asphalt

بیشترین تأثیر، باعث بهبود حساسیت رطوبتی مخلوط های آسفالتی در چرخه های بالای ذوب و یخبندان می شود.

- نتایج آزمایش نسبت مدول برجهندگی، روند مشابه نتایج مقاومت کششی را نشان می دهد. جایگزینی فیلر سیلیس در مخلوط آسفالتی در این پارامتر اثر قابل توجهی داشته و کمترین مقدار را به خود اختصاص داده است.

- به کارگیری فیلرهای بازی باعث افزایش انرژی شکست مخلوط های آسفالتی می شود. این نتیجه نشان می دهد که انرژی بیشتری برای جداسازی ماستیک از سطح سنگدانه ها در مقایسه با مخلوط آسفالتی شاهد نیاز است و نسبت جداسازی در مخلوط های حاوی فیلر سنگ آهک، سیمان پرتلند و بتن بازیافتی کندتر است.

- جایگزینی فیلر سیلیس با فیلرهای سیمان پرتلند، سنگ آهک و بتن بازیافتی باعث افزایش انرژی آزاد سطحی و کار پیوستگی می شود و متعاقباً می تواند باعث کمتر شدن امکان خرابی در فاز ماستیک شود. بیش از آن به کارگیری این فیلرها در افزایش کار چسبندگی و کاهش امکان خرابی چسبندگی بین قیر و سطح سنگدانه اثر دارد.

مراجع

- [1] G.D. Airey, A.C. Collop, S.E. Zoorob, R.C. Elliott, The influence of aggregate, filler and bitumen on asphalt mixture moisture damage, *Construction and Building Materials*, 22(9) (2008) 2015-2024.
- [2] B.M. Kiggundu, F.L. Roberts, Stripping in HMA mixtures: State-of-the-art and critical review of test methods, (1988).
- [3] H. Xu, W. Guo, Y. Tan, Internal structure evolution of asphalt mixtures during freeze-thaw cycles, *Materials & Design*, 86 (2015) 436-446.
- [4] W.S. Mogawer, K.D. Stuart, Effects of Mineral Fillers on Properties of Stone Matrix Asphalt Mixtures, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1530(1) (1996) 86-94.
- [5] D. Movilla-Quesada, A.C. Raposeiras, D. Castro-Fresno, D. Peña-Mansilla, Experimental study on stiffness development of asphalt mixture containing cement and Ca(OH)₂ as contribution filler, *Materials*

- characterization of warm-mix asphalt mixtures based on laboratory-field evaluation, *Construction and Building Materials*, 31 (2012) 204-211.
- [24] M. Guo, A. Motamed, Y. Tan, A. Bhasin, Investigating the interaction between asphalt binder and fresh and simulated RAP aggregate, *Materials & Design*, 105 (2016) 25-33.
- [25] A. Bhasin, E. Masad, D. Little, R. Lytton, Limits on Adhesive Bond Energy for Improved Resistance of Hot-Mix Asphalt to Moisture Damage, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1970(1) (2006) 2-13.
- [26] A.E. Alvarez, E. Ovalles, S. Caro, Assessment of the effect of mineral filler on asphalt-aggregate interfaces based on thermodynamic properties, *Construction and Building Materials*, 28(1) (2012) 599-606.
- [27] S.-H. Kim, J.-H. Jeong, N. Kim, Use of surface free energy properties to predict moisture damage potential of Asphalt concrete mixture in cyclic loading condition, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 7(4) (2003) 381-387.
- [28] B. Birgisson, R. Roque, G.C. Page, Evaluation of water damage using hot mix asphalt fracture mechanics (with discussion), *Journal of the association of asphalt paving technologists*, 72 (2003).
- [29] D.N. Little, A. Bhasin, Using surface energy measurements to select materials for asphalt pavement, NCHRP Project 9-37, 2006.
- [30] M. Koc, R. Bulut, Assessment of a Sessile Drop Device and a New Testing Approach Measuring Contact Angles on Aggregates and Asphalt Binders, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(3) (2014) 391-398.
- [31] S. Likitlersuang, T. Chompoorat, Laboratory investigation of the performances of cement and fly ash modified asphalt concrete mixtures, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 9(5) (2016) 337-344.
- [32] B.J. Blankenagel, Characterization of recycled concrete for use as pavement base material, *Brigham* mixture, *Construction and Building Materials*, 25(4) (2011) 1532-1536.
- [15] T. Bennert, W.J. Papp, A. Maher, N. Gucunski, Utilization of Construction and Demolition Debris Under Traffic-Type Loading in Base and Subbase Applications, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1714(1) (2000) 33-39.
- [16] I. Pérez, A.R. Pasandín, L. Medina, Hot mix asphalt using C&D waste as coarse aggregates, *Materials & Design* (1980-2015), 36 (2012) 840-846.
- [17] A.R. Pasandín, I. Pérez, Overview of bituminous mixtures made with recycled concrete aggregates, *Construction and Building Materials*, 74 (2015) 151-161.
- [18] Y.D. Wong, D.D. Sun, D. Lai, Value-added utilisation of recycled concrete in hot-mix asphalt, *Waste Management*, 27(2) (2007) 294-301.
- [19] M. Arabani, G.H. Hamed, Using the surface free energy method to evaluate the effects of liquid antistripping additives on moisture sensitivity in hot mix asphalt, *International Journal of Pavement Engineering*, 15(1) (2013) 66-78.
- [20] E.Y. Hajj, P.E. Seebaly, S. Kass, T. Liske, L.G. Loria-Salazar, Impact of high RAP content on the performance characteristics of asphalt mixtures in Manitoba, in: 2011 Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada - Transportation Successes: Let's Build on Them, Edmonton, Canada, 2011.
- [21] M. Arabani, G.H. Hamed, Using the Surface Free Energy Method to Evaluate the Effects of Polymeric Aggregate Treatment on Moisture Damage in Hot-Mix Asphalt, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(6) (2011) 802-811.
- [22] N. Kringos, A. Scarpas, Physical and mechanical moisture susceptibility of asphaltic mixtures, *International Journal of Solids and Structures*, 45(9) (2008) 2671-2685.
- [23] Y.-R. Kim, J. Zhang, H. Ban, Moisture damage

and quantification of the effect of water on the adhesive bond, Texas A&M University, 2005.

Young University, 2005.
[33] A.W. Hefer, Adhesion in bitumen-aggregate systems

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

F. Moghadas Nejad, M. Arbabpour Bidgoli, K. Naderi, S.Z. Mirtabar, Effect of Filler Type on Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures by Successive Freeze-Thaw Cycles and Comparing Results with Components of Surface Free Energy, Amirkabir J. Civil Eng., 51(6) (2020) 1205-1220.

DOI: [10.22060/ceej.2018.14396.5643](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14396.5643)



