



بررسی تاثیر استفاده از اکریلات استایرن اکریلونیتریل بر خرابی خستگی مخلوط‌های آسفالتی

غلام حسین حامدی^{۱*}، علی‌پور^۲، فریبا کریمیان خسروشاهی^۳

۱- دانشگاه گیلان، گیلان، ایران

۲- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهر، آذربایجان شرقی، ایران

۳- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ایلخچی، آذربایجان شرقی، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲۳

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۱/۲۸

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۱۴

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۳/۰۷

کلمات کلیدی:

مخلوط‌های آسفالتی

خرابی خستگی

اصلاح قیر

اکریلات استایرن اکریلونیتریل

بارگذاری کشش غیرمستقیم

خلاصه: یکی از پارامترهای موثر در رخدادهای ترک خوردگی خستگی خصوصیات قیر مورد استفاده می‌باشد. یکی از روش‌های کنترل این نوع خرابی استفاده از اصلاح کننده‌های قیر، سنگدانه یا مخلوط آسفالتی است. بر این اساس، در این پژوهش سعی شده است تا تاثیر استفاده از افزودنی پلیمری به نام اکریلات استایرن اکریلونیتریل (ASA) به عنوان اصلاح کننده قیر بر پتانسیل خرابی خستگی در مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی قرار گیرد. دو نوع سنگدانه، با خصوصیات کانی‌شناسی مختلف، قیر ۶۴-۱۶ PG و افزودنی ASA در دو درصد مختلف جرم قیر از مواد مورد استفاده در این پژوهش بوده‌اند که در دو دما و پنج سطح تنش مختلف مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. برای تعیین درصد قیر بهینه از روش طرح اختلاط مارشال و برای تعیین عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی از روش مقاومت کششی غیر مستقیم استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از افزودنی‌های پلیمری باعث شده است که عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی افزایش یابد. عمر خستگی نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه‌های گرانیتی نسبت به سنگدانه‌های سنگ‌آهک بیشتر بوده است اما افزایش عمر در نتیجه استفاده از ASA افزایش بیشتری در عمر نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه گرانیتی ایجاد شده است. افزایش در میزان دما و سطح تنش نیز همانطور که انتظار می‌رفت باعث کاهش در عمر خستگی نمونه‌های مخلوط آسفالتی شده است که این کاهش در نمونه‌های ساخته شده با قیرهای اصلاح شده با مواد پلیمری بسیار کمتر از نمونه‌های کنترل بوده است.

۱- مقدمه

مهم‌ترین عواملی است که باعث کاهش عمر روسازی‌های آسفالتی می‌گردد [۲ و ۳].

در سال‌های اخیر برای بهبود خواص رئولوژیکی قیر از روش‌های مختلفی توسط محققان استفاده شده است. یکی از روش‌های بهبود خواص عملکردی قیر استفاده از افزودنی‌های مناسب است. تاکنون افزودنی‌های رایجی مانند افزودنی‌های پلیمری و واکس‌ها برای اصلاح رفتار قیر در دماهای بالا و پایین مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۴ و ۲]. اگرچه وزن قیر در مخلوط‌های آسفالتی مقدار ناچیزی می‌باشد اما با این حال، بخش عمده‌ای از تحقیقات و مطالعات صورت گرفته در زمینه مخلوط‌های آسفالتی، در باره قیر است [۵ و ۶]. قیر اثر مهمی بر روی عملکرد بهینه، دوام و پایداری مخلوط‌های آسفالتی دارد و هرگونه تغییر در عملکرد قیر، بر روی عملکرد مخلوط آسفالتی اثرگذار خواهد بود [۷].

یکی از موادی که استفاده مجدد از آن‌ها به عنوان افزودنی مناسب برای اصلاح قیر در صنعت روسازی امکانپذیر است، پلیمرها می‌باشند. پلیمرها نیز

روسازی راه‌ها به عنوان سطوحی که مورد بارگذاری مکرر و متعدد محورهای گوناگون قرار می‌گیرند باید دارای مقاومت کافی در برابر خستگی، ترک خوردگی، خزش و لغزش باشند. مدول سفتی و عمر خستگی دو پارامتر مهم برای پیش بینی مقاومت روسازی‌ها در برابر خستگی می‌باشند. هنگامی که یک روسازی بتن آسفالتی گرم تحت عبور بارهای ترافیکی قرار می‌گیرد در زیر چرخ و سطح روسازی تنش و کرنش فشاری و در کناره‌های چرخ در سطح روسازی و همچنین در زیر چرخ در پایین‌ترین سطح لایه آسفالتی، تنش‌ها و یا کرنش‌های کششی به وجود می‌آید [۱]. به مرور و با تکرار بارگذاری چنان چه مقادیر کرنش‌ها و یا تنش‌ها از مقاومت مخلوط بتن آسفالتی گرم بیشتر باشد ترک‌هایی در سطح و زیر لایه بتن آسفالتی به وجود می‌آید. این ترک‌ها به تدریج و با افزایش تعداد دفعات بارگذاری توسعه پیدا می‌کنند و در جسم آسفالت پخش و منتشر می‌شود. خستگی یکی از

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



مانند اصلاح کننده‌های دیگر، دارای مزایا و معایب خاص خود هستند، اما تلاش بر این است که با توجه به شرایط مورد استفاده، ویژگی قیر را به خواص ایده‌آل نزدیک کنند [۱۰-۸].

۱-۱- مروری بر مطالعات پیشین

مطالعات متنوعی در مورد کاربرد مواد افزودنی پلیمری در کاهش پتانسیل ترک خوردگی خستگی در مخلوط‌های آسفالتی انجام شده است. مطالعات محدودی به استفاده از ASA در مخلوط آسفالتی یا قیر پرداخته‌اند. مبارکی و همکاران [۸] به بررسی تاثیر ASA و نانو اکسید آلومینیوم بر خصوصیات قیر در دمای بالا پرداختند. در این پژوهش، از ۳، ۵ و ۷ درصد از این دو افزودنی استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان داده است استفاده بیشتر از ASA باعث می‌شود تا مدول پیچیده (G^*) قیر اصلاح شده نیز افزایش یابد. این افزایش در ۵ درصد از ASA برابر با ۶۳/۷۰ درصد بوده است. همچنین، استفاده از ۵ درصد ASA سبب شده است تا پارامتر بازیابی خزش قیر ۶۹/۲۳ درصد افزایش یابد. در پژوهشی دیگر، مبارکی [۲۰] به بررسی تاثیر ASA و نانو اکسید آلومینیوم بر خصوصیات رئولوژی دو نوع قیر ۶۴-۱۶ PG و ۱۰-۷۰ PG پرداخته است. نتایج این پژوهش نشان داده است که استفاده از ۲ و ۴ درصد از این افزودنی‌ها باعث شده است تا مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر شیار شدگی و خستگی افزایش یابد. نکته مهم این است که قیرهای اصلاح شده با این افزودنی پایداری حرارتی بالایی نیز داشته‌اند. همچنین، نتایج این پژوهش نشان داده است که استفاده از ۴ درصد نانو اکسید آلومینیوم عملکردی بهتری داشته است اما هزینه استفاده از این افزودنی بسیار بالاست. علی و همکاران [۲۱] به بررسی تاثیر استفاده از ASA بر روی خصوصیات فیزیکی و رئولوژیکی قیرهای اصلاح شده با ASA پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داده است که استفاده از ASA باعث می‌شود تا پایداری حرارتی و قابلیت انبار کردن قیر اصلاح شده به میزان قابل توجهی از قیر پایه بیشتر شود. نتایج آزمایش‌های ساختاری نشان می‌دهد استفاده از ASA باعث شده است تا ساختار قیر از حالت آمورف به نیمه کریستال تبدیل شود. همچنین، نتایج آزمایش‌های رئولوژی قیر نشان می‌دهد استفاده از ASA سختی و خصوصیات الاستیک قیر پایه را افزایش داده است. این ماده سبب شده است تا مقاومت قیر در برابر تغییر شکل ماندگار کاهش یابد.

وامق و همکاران [۲۲] به بررسی تاثیر یک پلیمر ترکیبی از دو پلیمر استایرن بوتادین استایرن (SBS) و پلی‌پروپیلن (PP) بر روی عمر خستگی

مخلوط آسفالتی در سه درصد مختلف (۳، ۴ و ۵ درصد) از جرم قیر پرداخت. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد مخلوط‌های حاوی ۵ درصد از پلیمر ترکیبی شامل ۵۰ درصد SBR و ۵۰ درصد PP باعث شده است تا عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی تا ۵۰ درصد افزایش یابد. لو و همکاران [۲۳] به بررسی تاثیر استفاده از ۶ درصد از پلیمرهای مختلف در ۳ نوع قیر پرداختند. خصوصیات دما پایین قیر با استفاده از رئومتر برش دینامیکی و رئومتر تیرچه خمشی و خصوصیات مخلوط آسفالت با استفاده از آزمایش تنش کششی نمونه محدود شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد استفاده از افزودنی‌های پلیمری باعث بهبود خصوصیات قیر و مخلوط آسفالتی در برابر ترک خوردگی دما پایین شده‌اند. تاثیر افزودنی‌های پلیمری به مقدار زیادی به خصوصیات قیر کنترل بستگی دارد. ژانگ و همکاران به بررسی تاثیر پیر شدگی بلند مدت آزمایشگاهی بر روی خصوصیات رئولوژیکی و مقاومت در برابر ترک خوردگی قیر در دماهای میانه و پایین پرداختند. در این پژوهش، پلیمر SBS و دو نوع ترکیب SBS و خرده لاستیک در معرض آزمایش گرمخانه لابه نازک متحرک قیر و پیر شدگی محفظه تحت فشار قرار گرفتند. دو آزمایش جاروب فرکانس و رئومتر تیرچه خمشی و آزمایش سنتی نقطه شکست فراس بر روی نمونه‌های قیری انجام شد. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از ۲ درصد SBS بهترین عملکرد را در کاهش پتانسیل ترک خوردگی دمایی قیر داشته است [۲۴]. تلتایو و همکاران [۲۵] تاثیر استفاده از پلیمرهای مختلف بر عملکرد قیر در برابر ترک خوردگی دما پایین را مورد بررسی قرار دادند. نمونه‌های قیرهای اصلاح شده عملکرد به مراتب بهتری در برابر ترک خوردگی را هم در آزمایش‌های قیر و هم در آزمایش‌های مخلوط آسفالتی از خود نشان دادند. لیو و همکاران [۲۶] به بررسی تاثیر استفاده از پلی فسفریک اسید (PPA) در نمونه‌های قیر کنترل و قیر اصلاح شده با پلیمر در دماهای میانه و پایین پرداختند. آزمایش رئومتر تیرچه خمشی بر روی نمونه‌های قیر و آزمایش تنش کششی نمونه محدود شده بر روی نمونه‌های مخلوط آسفالتی به منظور بررسی پتانسیل ترک خوردگی دمایی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که افزودن پلیمر PPA باعث تاثیر منفی در مقاومت گسیختگی، انتقال تسریع شده الاستیک-ویسکوالاستیک شده است. نکته قابل ذکر این است که استفاده از دو پلیمر SBS و استایرن بوتادین رابر (SBR) بر روی افزایش پتانسیل ترک خوردگی دما پایین تاثیر مثبت داشته است.

استفاده از ترکیب نانو مواد و پلیمر نیز در برخی پژوهش‌ها مورد توجه بوده است. در مطالعه‌ای توسط شفا بخش و همکاران [۲۷] به بررسی تاثیر

جدول ۱. مشخصات کانی‌های سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش (درصد)

Table 1. Specifications of the aggregate minerals used in this study (percentage)

Calcium oxide, CaO	Magnesium oxide, MgO	Ferric oxide, Fe ₂ O ₃	Aluminium oxide, Al ₂ O ₃	R ₂ O ₃ (Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃)	Silicon dioxide, SiO ₂	سنگدانه
۵۱/۳	۱/۲	۰/۴	۲/۳	۱۸	۳/۸	سنگ
						آهک
۲/۴	۰/۸	۱/۴	۴/۸	۱۶/۲	۶۸/۱	گرانیت

۱-۲- اهداف پژوهش

عمده‌ترین هدف از پژوهش موجود بررسی تاثیر اصلاح قیر با استفاده از ماده پلیمری ASA بر روی خصوصیات مختلف مخلوط آسفالتی در برابر خرابی خستگی است. بدین منظور سعی بر آن شد تا با تغییرات در مواد مخلوط آسفالتی مورد استفاده در کشور آن را به نحوی مطلوب در برابر بارگذاری مقاوم کرد. اهداف کلی این تحقیق عبارتند از:

- بررسی رفتار خستگی مخلوط آسفالت گرم ساخته شده با قیر اصلاح شده با ASA

- تاثیر نوع سنگدانه بر روی عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با ASA

- بررسی تاثیر درصد ASA بر روی عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی مختلف

- بررسی تاثیر تغییرات در دما و شدت تنش بر عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با ASA

۲- روش تحقیق

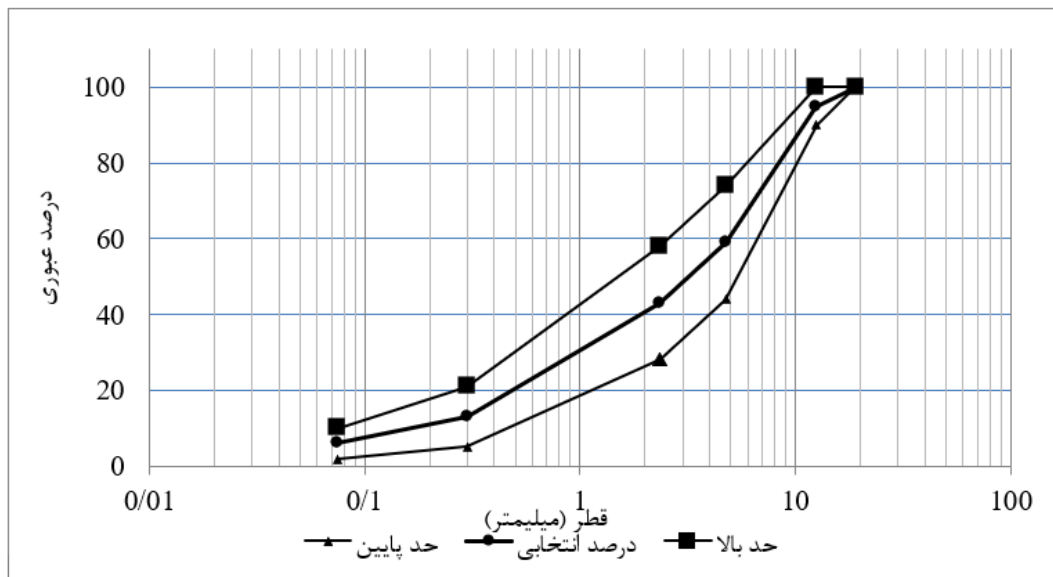
۲-۱- مصالح

۲-۱-۱- سنگدانه

دو نوع سنگدانه با خصوصیات متفاوت در برابر خرابی رطوبتی در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته اند: سنگ آهک و گرانیت. سنگ آهک مورد استفاده دارای درصد بالایی از کانی کرنات کلسیم است و خصوصیات بازی دارد و سنگدانه‌های گرانیتی مورد استفاده در این پژوهش دارای درصد بالایی از کانی دی اکسید سیلیکا است که خصوصیات اسیدی دارد [۲۹]. کانی‌های تشکیل دهنده این سنگدانه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. دلیل این انتخاب این بوده است تا سنگدانه‌های با عملکرد متفاوت مورد بررسی

نانوکامپوزیت پلیمری بر روی خصوصیات رئولوژی قیر در دمای میانی و پتانسیل خستگی پرداخته شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد تا ۶ درصد استفاده از نانوکامپوزیت پلیمری SBS و نانوسیلیکا میزان عمر خستگی قیر و مخلوط‌های آسفالتی نیز افزایش می‌یابد. ژانگ و همکاران [۲۸] به بررسی تاثیر استفاده از نانو مواد و نیز مواد پلیمری بر روی عملکرد مخلوط آسفالتی در دماهای پایین و بالا پرداختند. به منظور عملکرد این مواد آزمایش‌های سنتی قیر و آزمایش رئومتر تیرچه خمشی به منظور پتانسیل عملکرد قیر در برابر ترک خوردگی دمایی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که نانو مواد پخش بسیار خوبی در قیر داشته‌اند. همچنین، استفاده از نانو مواد باعث پخش بهتر پلیمر در قیر و سازگاری بهتر بین این دو ماده شده است که در نتیجه آن عملکرد قیرهای اصلاح شده در برابر آزمایش‌های سنتی و آزمایش‌های قیر در دمای پایین از قیرهای کنترل بهتر بوده است.

مطابق با مطالعات پیشین، می‌توان گفت استفاده از نانو مواد و افزودنی‌های پلیمری در سالیان اخیر مورد توجه پژوهشگران بوده است. با توجه به قیمت تهیه یا تولید بسیار پایین‌تر استفاده از مواد پلیمری استفاده از این مواد در این پژوهش مورد توجه قرار گرفته است. همچنین، مطالعات پیشین نشان داده است که پژوهش‌های محدودی که در مورد استفاده از ASA در صنعت قیر و آسفالتی انجام شده است، عمدتاً بر روی خصوصیات رئولوژی قیر و مخصوصاً در دماهای بالا انجام شده است. بر این اساس، در این پژوهش سعی شده است تا به بررسی تاثیر استفاده از پلیمر ASA بر روی خصوصیات مخلوط آسفالتی در برابر ترک خوردگی خستگی که عموماً در دماهای میانی رخ می‌دهد، پرداخته شود. از دلایل اولیه انتخاب این ماده می‌توان به افزایش مقاومت در دماهای بالا تحت فرآیند اصلاح قیر، مقاومت در برابر ژیرشدگی، افزایش مدول سختی و هزینه‌ی پایین آن نام برد.



شکل ۱. دانه‌بندی مورد استفاده برای سنگدانه‌ها در این پژوهش [۳۰]

Fig. 1. Grading used for aggregates used in this study [30]

قرار گیرند. کانی‌های تشکیل دهنده این سنگدانه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

در پژوهش حاضر از دانه‌بندی پیوسته شماره ۴ آیین نامه روسازی راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴) مورد استفاده قرار گرفته است [۳۰] که معیارهای مورد نظر برای لایه رویه (توپکا) بوده است. حدود این دانه بندی و دانه بندی مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲-۱-۲- اکریلات استایرن اکریلونیتریل

ASA نوعی پلیمر است که در اثر فشار کم و استفاده از کاتالیت زیگلر-ناتا به دست می‌آید و دارای ساختار خطی است و این ماده به صورت ذرات خیلی ریز جامد به اندازه حدود ۱۵۰-۱۲۰ میکرومتر است [۳۱].

در وزن مولکولی خیلی بالا ASA دارای خواص بی‌همتایی است که سایر مواد آن‌ها را ندارند که عبارتند از:

- مقاومت سایش برجسته و خوب
- مقاومت ضربه خیلی بالا
- حالت غیر چسبنده بودن (سطح ماده خود مانند نرم کننده عمل می‌کند)
- مقاومت شیمیایی عالی

- جذب آب خیلی ناچیز
- خواص مکانیکی عالی
- مقاومت ترک خوردگی عالی
- جاذب انرژی خوب و منهدم کننده‌ی عالی صدا [۳۱]

یکی دیگر از ویژگی‌های برجسته اکریلات استایرن اکریلونیتریل نگهداری آن بین دماهای ۹۰ درجه سانتی‌گراد تا ۲۶۹ درجه سانتی‌گراد و یا حتی دمای بالاتر در دوره‌ی تناوبی کوتاه مدت است. برخلاف پلی‌اتیلن با وزن مولکولی کم ویسکوزیته‌ی جریان مذاب خیلی بالا است. و رفتار غیر سیالی آن به علت درجه‌ی زیاد در هم رفتگی و گره خوردگی زنجیرها در زنجیر خیلی زیاد است [۳۱]. در پژوهشی، به بررسی تاثیر استفاده از ASA بر خصوصیات رئولوژی پلی‌وینیل کلراید (PVC) پرداخته شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد هم پارامتر زمان پلاستیک و مدول ذخیره در نتیجه استفاده از این ترکیب کاهش یافته است که نشان‌دهنده این است که استفاده از ASA خصوصیات الاستیک ترکیب این دو ماده را افزایش داده است [۹]. این موضوع باعث می‌شود تا خصوصیات الاستیک قیر و مخلوط آسفالتی بهبود یابد و در سیکل‌های بارگذاری مقدار انرژی کمتری از مخلوط

جدول ۲. مشخصات قیر به کار رفته در ساخت نمونه‌ها

Table 2. Specifications of bitumen used in making samples

روش آزمایش	مشخصات	نتیجه آزمایش
نقطه اشتعال (درجه سانتی‌گراد)	حداقل ۲۳۰	۲۹۲
ویسکوزیته چرخشی در ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد (پاسکال)	حداکثر ۳	۰/۳۲
رئومتر برش دینامیکی بدون پیرشدگی		
دمای آزمایش	حداقل ۱ کیلوپاسکال	پارامتر شیارشدگی ($G^*/\sin\delta$)
۶۴ درجه سانتی‌گراد		۱/۵
رئومتر برش دینامیکی با پیرشدگی کوتاه مدت		
دمای آزمایش	حداقل ۲/۲ کیلوپاسکال	پارامتر شیارشدگی ($G^*/\sin\delta$)
۶۴ درجه سانتی‌گراد		۳/۱
رئومتر برش دینامیکی با پیرشدگی کوتاه مدت و بلندمدت مدت		
دمای آزمایش	حداکثر ۵۰۰۰ کیلوپاسکال	پارامتر خستگی ($G^* \sin\delta$)
۲۵ درجه سانتی‌گراد		۲۹۵۰
رئومتر تیرچه خمشی		
دمای آزمایش	سختی	حداکثر ۳۰۰ مگاپاسکال
۲۵ درجه سانتی‌گراد	نرخ تغییرات سختی	۱۴۷ مگاپاسکال
		۰/۳۲۹۹

صورت پودر گرانول جامد است که به تدریج به قیر اضافه شده است. عمل اختلاط در همزن با کنترل دمایی، به مدت ۲۵ دقیقه در سرعت چرخش ۲۰۰۰ دور بر دقیقه انجام شده است. این دما و زمان از نتیجه مطالعات پیشین در مورد اصلاح قیر با مواد پلیمری و سعی و خطای انجام شده در پژوهش موجود انتخاب شده است. بر اساس مطالعات پیشین، درصد افزودنی پلیمری ۲ و ۴ درصد وزن قیر انتخاب شده است [۲۰ و ۲۱]. نتایج بررسی‌های انجام شده نشان داد که در استفاده از ۲ و ۴ درصد از پلیمر ASA قیر همگن به دست می‌آید. برای کنترل این موضوع از آزمایش‌های درجه نفوذ و نقطه نرمی در قسمت‌های مختلف ظرف قیر استفاده شده است که نتایج قسمت‌های مختلف قیر اصلاح شده تقریباً یکسان بوده است. در استفاده بیشتر از این ماده (۶ درصد) پخش مواد به خوبی در فضای قیر ایجاد نمی‌شود. پارامترهای درجه نفوذ و نقطه نرمی انجام شده از چند نقطه ظرف اصلاح قیر نشان می‌دهد که این پارامترها در نقاط مختلف ظرف یکسان نیست که نشان‌دهنده پخش نامناسب یا لخته شدن این ماده است. بر این اساس، از دو درصد (۲ و ۴ درصد جرم قیر) استفاده شده است.

قابل ذکر است که نمونه‌های قیر کنترل نیز در زمان، دوران و دمای

آسفالتی تلف شود که می‌تواند باعث بهبود عمر خستگی مخلوط آسفالتی شود. از طرفی دیگر، مقاومت و پایداری شیمیایی عالی ASA باعث می‌شود تا قیر در برابر پیر شدگی مقاومت بیشتری داشته باشد.

ASA در ایران توسط تولیدات پتروشیمی قائد بصیر تحت لیسانس شرکت کمهو تولید می‌شود. در این پژوهش، این ماده از تولیدات پتروشیمی قائد بصیر تهیه شده است.

۲-۱-۳- قیر

قیر به علت داشتن دو خاصیت مهم یعنی غیر قابل نفوذ بودن در برابر آب و چسبندگی بودن، یکی از مصالح ساختمانی پرکاربرد است. در این تحقیق قیر مصرفی از نوع قیر با درجه نفوذ ۶۰-۷۰ و درجه عملکردی ۶۴-۱۶ PG می‌باشد که از شرکت آذرروام یول تبریز تهیه شده است. قیر ۶۴-۱۶ PG مطابق با شرایط آب و هوایی معتدل است که خستگی نیز عمدتاً در دمای بین ۵ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد اتفاق می‌افتد. مشخصات قیر مصرفی در جدول ۲ ارائه شده است.

به منظور اصلاح قیر، ابتدا قیر پایه تا دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد گرم شده و افزودنی به تدریج به آن اضافه شده است. ماده افزودنی ASA به

اختلاط قرار گرفتند ولی به آن‌ها افزودنی اضافه نشده است. این عمل برای این انجام شده است که تاثیر فرآیند اختلاط و پیر شدگی آن بر روی تحلیل و مقایسه نتایج قیرهای کنترل و اصلاح شده تاثیری نگذارد.

۲-۲- ترکیب و تعداد نمونه‌ها

در این پژوهش سعی شده است تا از ترکیبات مختلف مخلوط‌های آسفالتی با پتانسیل‌های متفاوت در برابر خستگی استفاده شود. از این رو دو نوع سنگدانه با ساختار کانی شناسی مختلف، قیر پایه ۷۰-۶۰ (PG ۶۴-۱۶) به عنوان متداول‌ترین قیر مورد استفاده در پروژه‌های اجرایی کشور استفاده شده است. از روی درجه عملکردی این قیر می‌توان دریافت که این نوع قیر برای دماهای روسازی از ۶۴ تا ۱۶- درجه سانتیگراد مناسب است که این دما در اکثر مناطق معتدل کشور مشاهده می‌شود. به همراه افزودنی ASA به عنوان اصلاح کننده قیر در دو درصد مختلف جرم قیر از مواد مورد استفاده در این پژوهش بوده‌اند. با توجه به این مهم که مقایسه نمونه‌های مختلف آسفالتی بدون در نظر گرفتن پارامترهای گوناگون تأثیرگذار بر خصوصیات مکانیکی و مقاومتی آن‌ها امری غیر منطقی به نظر می‌رسد، در این پژوهش ابتدا درصد قیر بهینه مربوط به هر اختلاط تعیین گردیده و پس از ساخت هر نمونه با قیر بهینه مربوط به خود نتایج به دست آمده در شرایط بهینه این نمونه با حالت و شرایط بهینه نمونه‌های دیگر مقایسه گردیده است.

با ترکیب مواد ذکر شده ۶ ترکیب مختلف مخلوط آسفالتی ایجاد می‌شود. ترکیب‌های اول، دوم و سوم شامل ترکیب سنگدانه سنگ آهک با قیر کنترل، قیر اصلاح شده با ۲ درصد افزودنی و قیر اصلاح شده با ۴ درصد افزودنی بوده است. ترکیب‌های چهارم، پنجم و ششم نیز با ترکیب سنگدانه گرانیتی و قیرهای ذکر شده بوده است. طبق توصیه استاندارد اروپایی EN ۱۲۶۹۷-۲۴ مورد استفاده در این پژوهش تنش اعمالی باید به گونه‌ای باشد که پس از ۱۰ تکرار بار کرنش کششی در بازه ۱۰۰ تا ۴۰۰ میکروکرنش بوده و دمای آزمایش در بازه ۲ تا ۲۰ درجه سانتیگراد باشد [۳۲]. بر این اساس، در این پژوهش دمای ۵ و ۲۰ درجه سانتیگراد و سطح تنش‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ کیلو پاسکال در نظر گرفته شده است. برای هر ترکیب ۱۰ حالت دمایی وجود دارد که با در نظر گرفتن ۳ تکرار برای هر آزمایش باید ۳۰ نمونه مخلوط آسفالتی ساخته شود که مجموعاً ۱۸۰ آزمایش انجام شده است. همچنین تعداد ۶۰ نمونه نیز برای تعیین درصد قیر بهینه مخلوط کنترل ساخته می‌شود. قابل ذکر است که درصد قیر بهینه فقط در نمونه‌های با قیر کنترل انجام شده است تا در بین نمونه‌های با سنگدانه مشابه، درصد

قیر متفاوت نباشد.

ساخت و تراکم نمونه‌های مخلوط آسفالتی با استفاده به ترتیب با استفاده از همزن دستی و متراکم کننده‌ی مارشال انجام شده است. دمای اختلاط و تراکم مخلوط آسفالتی نیز به نحوی انتخاب شده است که ویسکوزیته قیر در این مراحل به ترتیب در بازه 170 ± 20 و 280 ± 30 سانتی استوکس باشد [۳۰].

۲-۳- آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش

۲-۴- آزمایش طرح اختلاط مارشال براساس استاندارد ASTM D ۱۵۵۹
طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده در این پژوهش بر اساس روش مارشال بر اساس دستورالعمل MS-۲ انستیتو آسفالت تعیین شده است انجام شده است [۳۳]. در این روش درصد قیر بهینه بر اساس میانگین سه درصد قیر معادل با حداکثر استقامت، حداکثر وزن مخصوص و درصد فضای خالی برابر با ۴ درصد تعیین و با مقادیر آیین‌نامه‌ای کنترل شده است.

۲-۴-۱- آزمایش خستگی

عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی به وسیله آزمایش کشش غیر مستقیم به دست آمده است. آزمایش کشش غیر مستقیم یک نوع آزمایش خستگی است که بارگذاری به صورت تکراری بر یک نمونه سیلندری وارد می‌شود به طوری که بار فشاری بر وجه‌های استوانه‌ای و به صورت موازی و قائم اعمال می‌شود. این شکل بارگذاری سبب تنش کششی یکنواختی در نمونه شده که عمود بر جهت بارگذاری و در طول نمونه استوانه خواهد بود. حالت بارگذاری در آزمایش خستگی به دو صورت می‌باشد: کنترل تنش و کنترل کرنش. در حالت کنترل تنش، بزرگی تنش در طول آزمایش ثابت می‌ماند. در این حالت بارگذاری، تعریف وضعیت گسیختگی (پایان آزمایش) آسان می‌باشد زیرا نمونه در آخر آزمایش می‌شکند. در آزمایش کنترل کرنش، بزرگی کرنش در طول آزمایش ثابت نگه داشته می‌شود. تعریف دقیق گسیختگی در شکل کرنش ثابت قدری مشکل است زیرا جهت ثابت نگه داشتن کرنش در طول آزمایش بایستی تنش کاهش یابد. در نتیجه بعد از سیکل‌های زیاد تنش بسیار کوچک گردیده و گسیختگی نمونه مشکل است. تعدادی از محققین گسیختگی را در حالت کرنش ثابت، کاهش ۵۰ درصدی سختی اولیه و بعضی دیگر کاهش ۵۰ درصدی تنش یا نیروی اولیه تعریف کرده اند [۳۴].

با داشتن کرنش کششی معین برای هر میزان از تنش می‌توان رابطه بین کرنش کششی و تعداد سیکل‌های منجر به شکست را رسم کرد. در



شکل ۲. نحوه بارگذاری روی نمونه‌ها در آزمایش خستگی

Fig. 2. How to load samples on a fatigue test

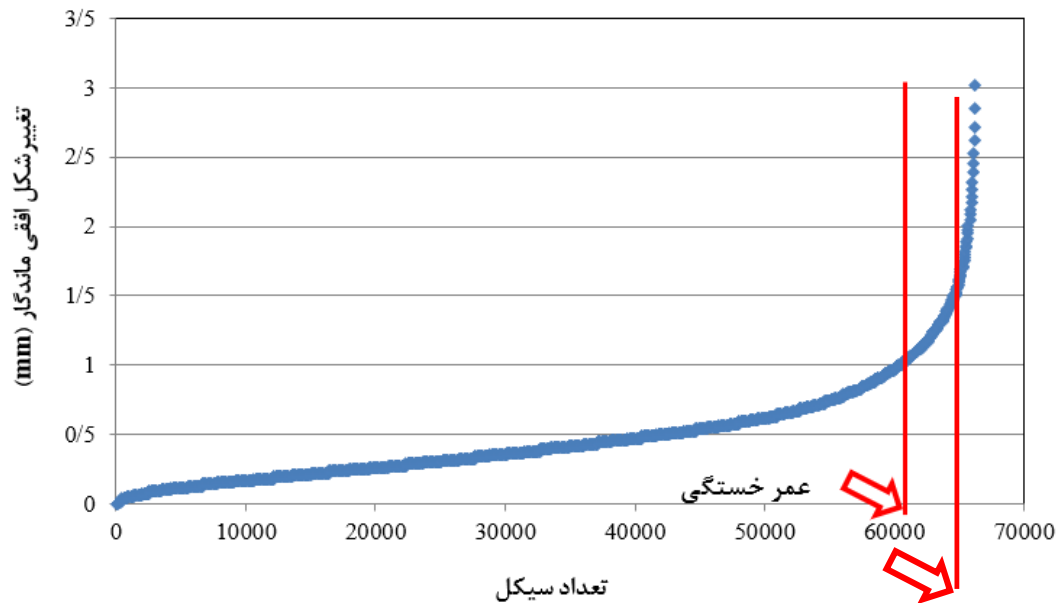
تعداد تکرار بار تا گسیختگی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$N_f = K_1 \left(\frac{1}{\sigma} \right)^{K_2} \quad (1)$$

که در آن N_f تعداد تکرار بار وارده تا گسیختگی است. σ تنشهای وارده و بدین ترتیب K_1 و K_2 ثابت‌های آزمایشگاهی میباشند. مطالعات آزمایشگاهی نشان میدهد که این ثابتها بستگی به مشخصات مختلف مخلوط آسفالتی مثل سختی، درصد فضاخالی، درصد قیر و اندازه سنگدانه‌ها دارد. عمرخستگی نمونه‌ها به روش کنترل تنش اندازه‌گیری شده است. بارگذاری تکراری با زمان بندی ۰/۱ ثانیه بارگذاری و ۰/۴ ثانیه استراحت به نمونه‌ها اعمال گردید [۳۲]. همچنین از نمونه‌های استوانه‌ای شکل (با ابعاد ۱۰۱/۶ میلی‌متر قطر و ۴۰ میلی‌متر ارتفاع) با شرایط دمایی ۵ و ۲۰ درجه

نتیجه اعمال تنش عمودی فشاری در آزمایش خستگی، تنش و کرنش کششی غیر مستقیم به صورت افقی اتفاق می‌افتد و تکرار بارگذاری در نهایت منجر به ایجاد ترک عمودی در مرکز نمونه خواهد شد. نحوه بارگذاری در آزمایش خستگی نیز به مانند آزمایش مدول سختی، به صورت خطی و در امتداد محور قطرهای نمونه صورت می‌پذیرد. روابط و پارامترهای مربوط به خستگی، از جمله عمر خستگی و تعداد سیکل‌های لازم برای گسیختگی ناشی از خستگی به وسیله آزمایش خستگی به روش کشش غیر مستقیم (ITFT) تعیین می‌شود [۳۵].

یکی از متعارفترین کاربرد مدل‌های خستگی پدیده شناختی مربوط به پاسخ اولیه (مثل تنش کششی) یک مخلوط آسفالتی در عمر خستگی است. این مدل پدیده شناختی به آسانی قابل استفاده است زیرا تنها نیاز به اندازه گیری پاسخ خستگی آزمایشات خستگی در سطوحهای مختلف تنش است [۳۶]. مشخصه و ویژگی خستگی مواد تحت عنوان رابطه بین تنش وارده با



شکل ۳. تعریف عمر خستگی در آزمایش کشش غیرمستقیم

Fig. 3. Definition of fatigue life in indirect tensile fatigue test

۳- نتایج و بحث

در این قسمت نتایج آزمایشات انجام گرفته بر روی مخلوط‌های آسفالتی که در فصل قبل شرح داده شد، بیان و بررسی شده است. در ابتدای این فصل نتایج آزمایش مارشال برای تعیین مقدار قیر بهینه آورده شده است. در ادامه نتایج آزمایش بارگذاری تکراری به روش مقاومت کششی غیر مستقیم برای بررسی تاثیر مواد افزودنی مورد استفاده در این پژوهش آورده شده است.

۳-۱- تحلیل نتایج آزمایشات مارشال بر روی نمونه‌های آسفالتی کنترل

به جهت مقایسه علمی و منطقی نتایج به دست آمده از آزمایش بر روی نمونه‌های آسفالتی کنترل و اصلاح شده، درصد قیر بهینه مربوط به هر نوع اختلاط (شامل دو نوع سنگدانه گرانیب و سنگ آهک) به کمک آزمایشات مارشال تعیین گردید و سپس نمونه‌های آسفالتی با درصد قیر بهینه در شرایط مختلف ساخته شد. بر اساس روند ذکر شده در قسمت قبل مقدار درصد قیر بهینه برای نمونه‌های با سنگدانه سنگ آهک و گرانیب به ترتیب ۵/۷ و ۵/۵ درصد به دست آمده است. این نتایج در جدول ۳ ارائه شده است.

سانتی‌گراد و سطوح تنش ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال جهت ارزیابی رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده است. در شکل ۲ چگونگی بارگذاری و قرارگیری نمونه در دستگاه NAT در آزمایش خستگی نشان داده شده است.

در استاندارد EN ۱۲۶۹۷-۲۴ عمر خستگی نمونه‌های آسفالتی برابر با تعداد تکرار بار که منجر به شکست کامل نمونه (گسیختگی) میشود، تعریف میگردد. همانطور که در شکل ۳ مشاهده میشود، عمر خستگی از طریق ایجاد ارتباط بین تعداد تکرار بار و تغییر شکل افقی برگشتناپذیر در نمونه‌های آسفالتی نشان داده میشود. همچنین، شکل ۳ مراحل ایجاد و انتشار ترک در یک نمونه آسفالتی تحت آزمایش کشش غیر مستقیم را نشان میدهد. در زمانی که نرخ تغییر شکل ماندگار به یک باره افزایش یابد، اپراتور می‌تواند آزمایش را متوقف کند و تعداد سیکل منجر به گسیختگی را یادداشت کند. در غیر این صورت، دستگاه تا شکست کامل نمونه بارگذاری را ادامه می‌دهد و سپس از روی خروجی دستگاه می‌تواند عمر خستگی را از روی نمودار مشابه شکل ۳ عمر خستگی را استخراج کند.

جدول ۳. درصد قیر بهینه نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه‌های سنگ آهک و گرانیت

Table 3. Optimal bitumen samples made of limestone, and granite

ترکیب	نوع سنگدانه	درصد قیر متناظر با حداکثر استقامت مارشال	درصد قیر متناظر با حداکثر وزن مخصوص	درصد قیر متناظر با ۴ درصد حجم حفرات	درصد قیر بهینه
۱	سنگ آهک	۵/۷	۵/۸	۵/۶	۵/۷
۲	گرانیت	۵/۵	۵/۵	۵/۶	۵/۵

جدول ۴. کنترل پارامترهای متناظر با درصد قیر بهینه در نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه‌های سنگ آهک و گرانیت

Table 4. Controls the parameters corresponding to the percentage of optimal bitumen in samples made with limestone and granite aggregates

ترکیب	درصد قیر بهینه	استقامت (کیلوگرم)	روانی (میلی‌متر)	درصد فضای خالی	درصد فضای خالی بین مصالح سنگی	درصد فضای خالی پر شده با قیر
مقدار مجاز آیین‌نامه‌ای	حداقل ۸۰۰	بین ۲ تا ۳/۵	بین ۳ تا ۵	حداقل ۱۴	بین ۶۰ تا ۷۵	
۱	۵/۷	۱۰۳۰	۲/۷	۳/۹	۱۴/۵	۷۲
۲	۵/۵	۱۰۲۰	۲/۷	۴	۱۴/۲	۷۴

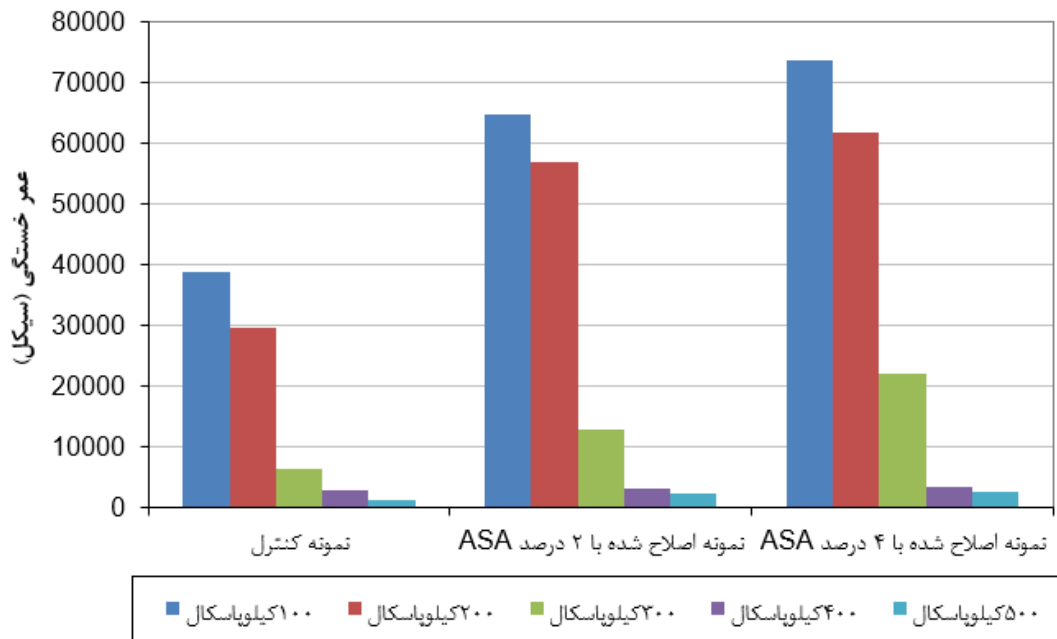
نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه گرانیتی نمایش داده شده است. با توجه به شکل‌های زیر ملاحظه می‌شود که نمونه‌های آسفالتی اصلاح شده با ASA به طور قابل ملاحظه‌ای عملکرد خستگی بهتری در مقایسه با نمونه‌های آسفالتی ساده از خود بروز می‌دهند. زیرا در اثر اختلاط قیر با ASA، کربنهای آزاد شده با پر کردن فضاهای خالی، با زنجیره‌های قیر پیوندهای قوی ایجاد می‌کنند که باعث بالا رفتن چسبندگی قیر با سنگدانه می‌گردد. این چسبندگی بهتر بین قیر و سنگدانه نیز باعث می‌گردد که جابجایی ذرات مصالح سنگی نسبت به هم به حداقل رسیده و بنابراین عمر خستگی به سبب تأخیر در روند ایجاد و گسترش ترک بهبود یابد. علاوه بر این باقیمانده ذرات ASA که در واکنش شیمیایی وارد نمی‌شوند، میتوانند دانه بندی مصالح فیلر را کامل کند و بخش بسیار ریز منحنی دانه بندی را

پس از اینکه با میانگین گرفتن از درصد قیر متناظر با حداکثر وزن مخصوص، حداکثر استقامت و ۴ درصد درصد فضای خالی مقدار درصد قیر بهینه به دست آمد، باید مقادیر متناظر با پنج پارامتر استقامت، روانی، درصد فضای خالی، درصد فضای خالی مصالح سنگی و درصد فضای خالی پر شده با قیر با مقادیر آیین‌نامه‌ای کنترل شود که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود همه موارد آیین‌نامه‌ای در درصد‌های قیر بهینه صدق می‌کند.

۳-۲- نتایج آزمایش‌های عمر خستگی

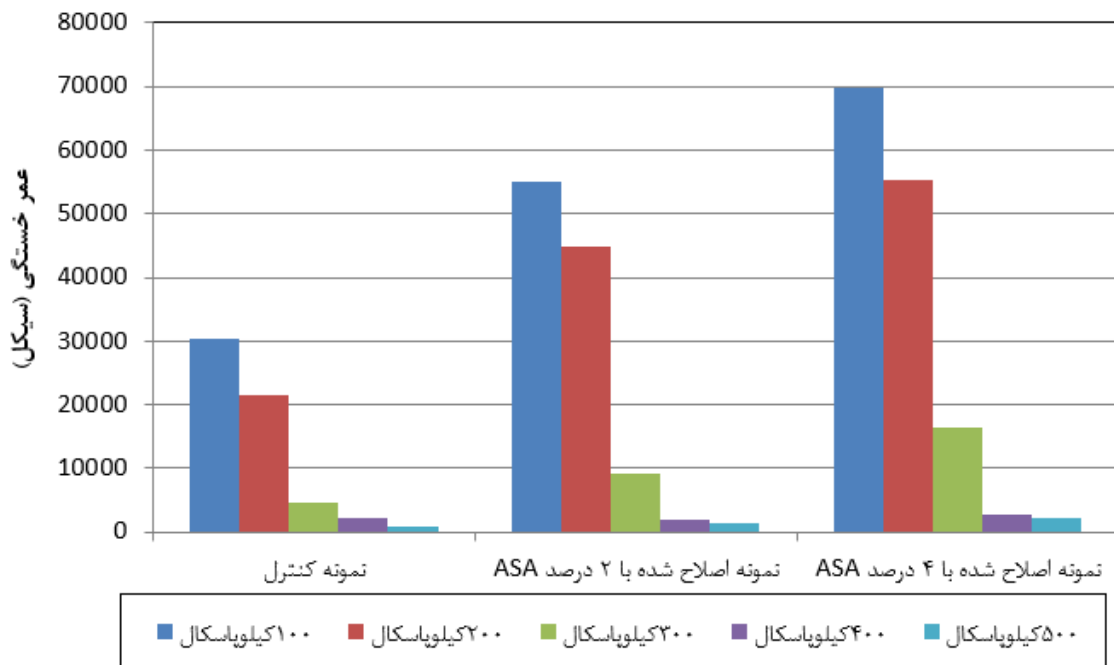
۳-۲-۱- نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه گرانیتی

در شکل‌های ۴-۵ تعداد سیکل‌های بارگذاری منجر به گسیختگی نمونه‌های آسفالتی برای مخلوط‌های کنترل و اصلاح‌شده با ASA در



شکل ۴. تعداد سیکل‌های منجر به شکست در آزمایش خستگی در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد (نمونه‌های با سنگدانه گرانیت)

Fig. 4. The number of cycles leading to failure in the fatigue test at 5 °C (granite aggregate samples)



شکل ۵. تعداد سیکل‌های منجر به گسیختگی در آزمایش خستگی در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد (نمونه‌های با سنگدانه گرانیت)

Fig. 5. The number of breakdown cycles in the fatigue test at 20 °C (granite aggregate samples)

این موضوع نشان می‌دهد رفتار این ماده الاستیک‌تر می‌شود.

در شکل‌های ۶ و ۷ به مقایسه نتایج حاصل از آزمایشات خستگی بر روی نمونه‌های آسفالتی ساده و حاوی ASA پرداخته شده است. در این اشکال، خطوط رگرسیون از میان نمونه‌ها در هر سطح تنش رسم شد. نتایج حاصله یک رابطه خطی مناسب بین لگاریتم تنش و لگاریتم عمر خستگی را نشان می‌دهد. آنالیز نتایج به دست آمده از خستگی بهبود عمده‌های در عمرخستگی مخلوط‌های اصلاح شده با ASA را نشان می‌دهد. معادله خستگی، مقادیر K_1 و K_2 و ضرایب همبستگی مربوط به هر یک از مخلوط‌ها در جدول ۵ آورده شده است.

۳-۲-۲- نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه سنگ آهک

در شکل‌های ۸-۹ تعداد سیکل‌های بارگذاری منجر به گسیختگی نمونه‌های آسفالتی برای مخلوط‌های کنترل و اصلاح‌شده با ASA با سنگدانه سنگ آهک نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود به طور کلی نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه سنگ آهک دارای عمر خستگی کمتری در مقایسه با سنگدانه‌های گرانیتی می‌باشند.

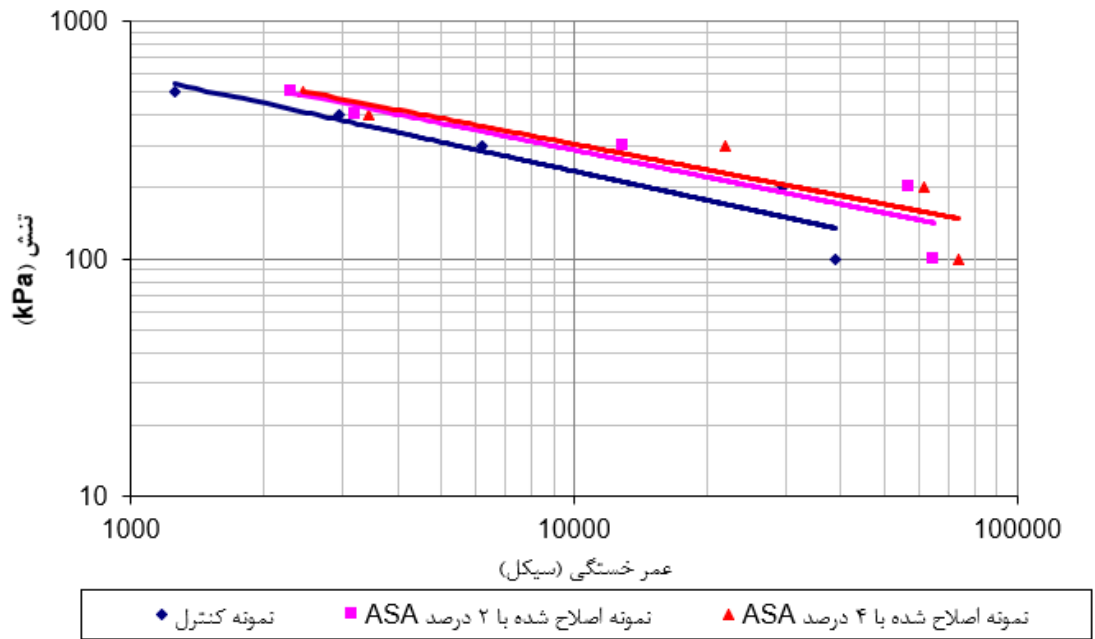
جنس کانی‌ها و ساختار ظاهری سنگدانه‌ها می‌تواند باعث ایجاد مقاومت در برابر ترک خوردگی خستگی شود. از نظر کانی شناسی هر چه سنگدانه چسبندگی بهتری با قیر داشته باشد، باعث می‌شود چسبندگی آن برابر ترک خوردگی خستگی بهبود یابد. از نظر ساختار ظاهری نیز سه پارامتر فرم، شکستگی و بافت سطحی در ایجاد مقاومت مکانیکی سنگدانه‌ی مخلوط آسفالتی در برابر ترک خوردگی خستگی موثر هستند. قیر خصوصیات اسیدی ضعیفی دارد و لذا چسبندگی آن با سنگدانه‌های سنگ آهک که خصوصیات بازی دارند، قوی‌تر از چسبندگی این ماده با سنگدانه‌های گرانیتی است. از سویی دیگر، سنگدانه‌های سنگ آهک از نظر خصوصیات مکانیکی دارای عملکرد ضعیف‌تری نسبت به سنگدانه گرانیت هستند. نتایج این پژوهش نشان داده است که نمونه‌های مخلوط آسفالتی ساخته شده با سنگدانه‌های گرانیتی دارای عمر خستگی بیشتری نسبت به نمونه‌های مخلوط آسفالتی ساخته شده با سنگدانه‌های سنگ آهک هستند. دلیل اصلی این موضوع را می‌توان به خصوصیات مکانیکی بسیار بهتر سنگدانه گرانیتی مورد استفاده در این پژوهش در مقایسه با سنگدانه سنگ آهک دانست. همچنین، مشاهده می‌شود استفاده از ASA باعث شده است تا مقدار بهبود کمتری در عمر خستگی نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه سنگ آهک ایجاد شود. زیرا ASA خصوصیات بازی دارد و استفاده از آن در قیر باعث می‌شود تا

پوشش دهند. در نتیجه با کاهش فضای خالی در مخلوط‌های آسفالتی می‌تواند به افزایش عمر خستگی آن‌ها منجر گردد. از طرف دیگر، اضافه کردن ASA به قیر موجب افزایش سختی قیر می‌گردد. اگر در آزمایش خستگی سطح تنش ثابت باشد، با افزایش سختی نمونه‌ها کرنش کششی کاهش یافته و عمر خستگی متناظر افزایش می‌یابد.

همچنین با افزایش دما از میزان عمر خستگی نمونه‌های آسفالتی کاسته می‌شود. این امر به دلیل حساسیت بالای مدول ارتجاعی نمونه‌های آسفالتی نسبت به تغییرات دماست. به گونه‌ای که با افزایش دما و در نتیجه کاهش مدول ارتجاعی نمونه‌ها، کاهش عمر خستگی نمونه‌ها تحت بارگذاری سیکلی ایجاد می‌شود. در واقع، آزمایش ITFT که برای تعیین عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی در این پژوهش استفاده شده است به روش کنترل تنش انجام می‌شود. در آزمایش‌های کنترل تنش که عموماً برای آسفالت‌های ضخیم (با ضخامت بیش از ۱۰ سانتی‌متر) متداول است، افزایش سختی باعث افزایش عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی می‌شود. زیرا افزایش سختی باعث می‌شود تا مقدار کرنش کششی غیرمستقیم در این بارگذاری کاهش یابد. ذکر این نکته ضروری است که افزایش سختی در حالت کلی باعث شکننده‌تر شدن مخلوط آسفالتی نیز می‌شود که می‌تواند عمر خستگی را کاهش دهد. اما برآیند کاهش کرنش کششی و کاهش قابلیت انعطاف‌پذیری به نحوی است که افزایش سختی در کل باعث بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر ترک خوردگی خستگی می‌شود.

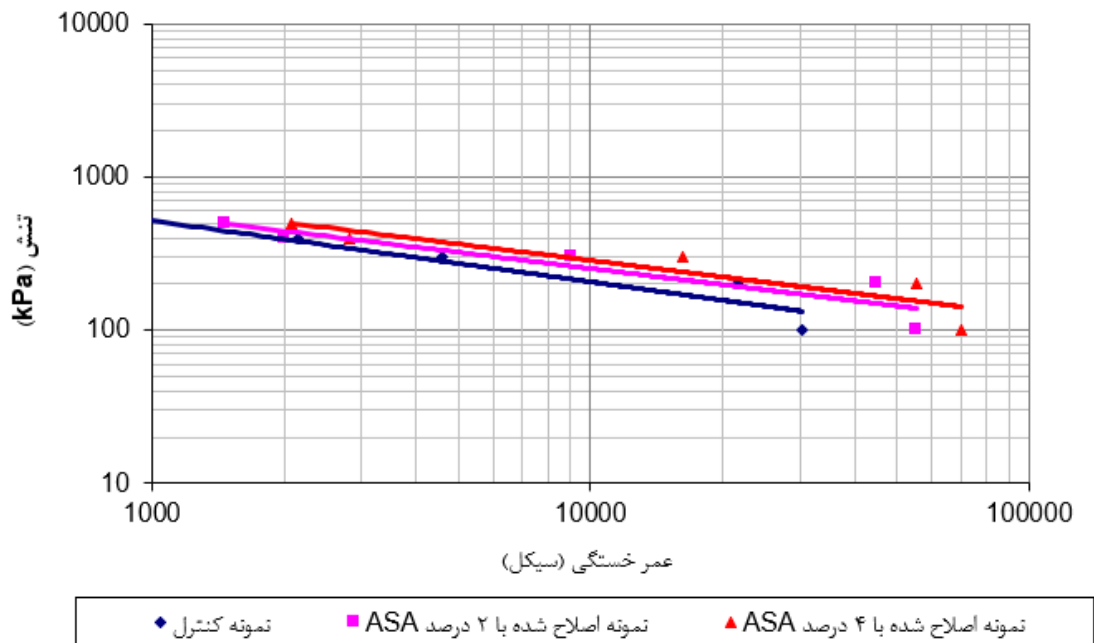
نتایج این دو دسته نمودار نشان می‌دهد که استفاده از سطح تنش بالاتر باعث کاهش در میزان عمر خستگی می‌شود. در واقع، افزایش در سطح تنش باعث افزایش میزان کرنش کششی در نمونه‌ها می‌شود که عمر خستگی نمونه‌های مخلوط آسفالتی را کاهش می‌دهد. نکته قابل توجه افزایش در سطح تنش از ۲۰۰ به ۳۰۰ کیلو پاسکال است که عمر خستگی را به شدت در همه نمونه‌ها کاهش می‌دهد.

نتایج عمر خستگی در ۵ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد که استفاده از ASA باعث شده است تا عمر خستگی نمونه‌های مخلوط آسفالتی به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد. این افزایش در دو درصد از ماده افزودنی پلیمری نسبت به نمونه‌های کنترلی بسیار مشهود است. دلیل اصلی این موضوع را می‌توان کاهش کرنش کششی در مخلوط آسفالتی به علت استفاده از ASA دانست. همچنین، نتایج مطالعات پیشین بر روی خصوصیات رئولوژیکی قیرهای اصلاح شده با ASA نشان داده است استفاده از این ماده باعث می‌شود تا مدول قیر افزایش و زاویه فاز کاهش یابد [۲۱ و ۸] که



شکل ۶. مقایسه رفتار خستگی مخلوط ها در دمای ۵ درجه سانتی گراد (نمونه های با سنگدانه گرانیت)

Fig. 6. Comparison of fatigue behavior of mixtures at 5 °C (granite aggregate samples)



شکل ۷. مقایسه رفتار خستگی مخلوط ها در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد (نمونه های با سنگدانه گرانیت)

Fig. 7. Comparison of fatigue behavior of mixtures at 20 °C (granite aggregate samples)

جدول ۵. معادله خستگی و ضرایب آن در نمونه‌های آسفالتی ساده و اصلاح شده با ASA (نمونه‌های با سنگدانه گرانیت)

Table 5. Equation of fatigue and its coefficients in simple and modified asphalt samples with ASA (granite aggregate samples)

K_1	K_2	R^2	معادله خستگی	دمای آزمایش (سانتی‌گراد)	نوع مخلوط	ردیف
۹۸۷۳	۰/۴۰۶	۰/۸۸۷۵	$N_f = 9873 \sigma^{-0.406}$	۵	کنترل	۱
۹۲۰۹	۰/۳۷۷	۰/۸۵۲۵	$N_f = 9209 \sigma^{-0.377}$	۵	قیر پایه با ۲ درصد ASA	۲
۸۴۵۲	۰/۳۶۱	۰/۸۱۷۴	$N_f = 8452 \sigma^{-0.361}$	۵	قیر پایه با ۴ درصد ASA	۳
۸۱۱۰	۰/۳۹۸	۰/۸۹۴۹	$N_f = 8110 \sigma^{-0.398}$	۲۰	کنترل	۴
۶۳۳۶	۰/۳۵	۰/۸۵۹	$N_f = 6336 \sigma^{-0.35}$	۲۰	قیر پایه با ۲ درصد ASA	۵
۷۶۷۲	۰/۳۵۷	۰/۸۴۷	$N_f = 7672 \sigma^{-0.357}$	۲۰	قیر پایه با ۴ درصد ASA	۶

نیز این روند مشاهده می‌شود. به طور مثال در سطح تنش ۵۰۰ کیلوپاسکال و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد، مقدار عمر خستگی در نمونه‌های کنترل ۷۸۹ سیکل بوده است که در نتیجه ۲ و ۴ درصد از ماده ASA به ۱۲۱۸ و ۱۹۷۴ رسیده است.

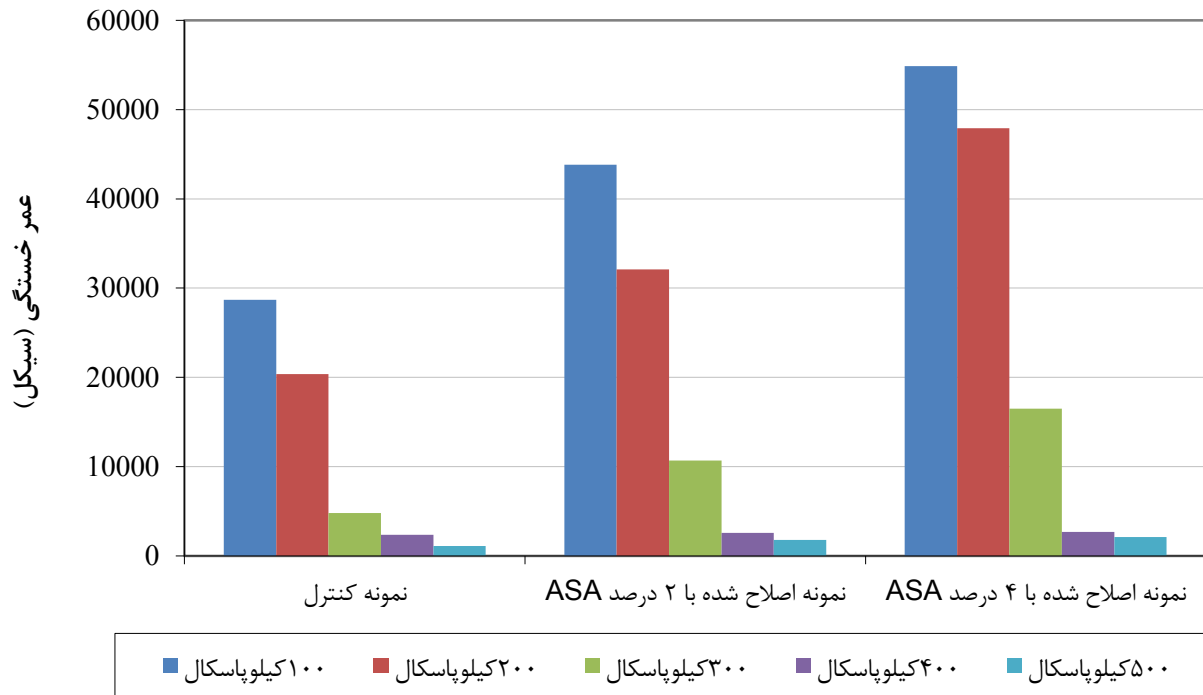
مشابه با نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه گرانیتی مشاهده می‌شود که با افزایش دما از میزان عمر خستگی نمونه‌های آسفالتی کاسته می‌شود. درصد کاهش در عمر خستگی در نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه سنگ آهک در مقایسه با سنگدانه گرانیتی کمتر بوده است.

در دو شکل زیر، به مقایسه نتایج حاصل از آزمایشات خستگی بر روی نمونه‌های آسفالتی ساده و حاوی ASA پرداخته شده است. در این اشکال، خطوط رگرسیون از میان نمونه‌ها در هر سطح تنش رسم شد. نتایج حاصله یک رابطه خطی مناسب بین لگاریتم تنش و لگاریتم عمر خستگی را نشان می‌دهد. آنالیز نتایج به دست آمده از خستگی بهبود عمده‌های در عمر خستگی مخلوط‌های اصلاح شده با ASA را نشان می‌دهد.

معادله خستگی، مقادیر K_1 و K_2 و ضرایب همبستگی مربوط به هر یک از مخلوط‌ها در جدول ۶ آورده شده است.

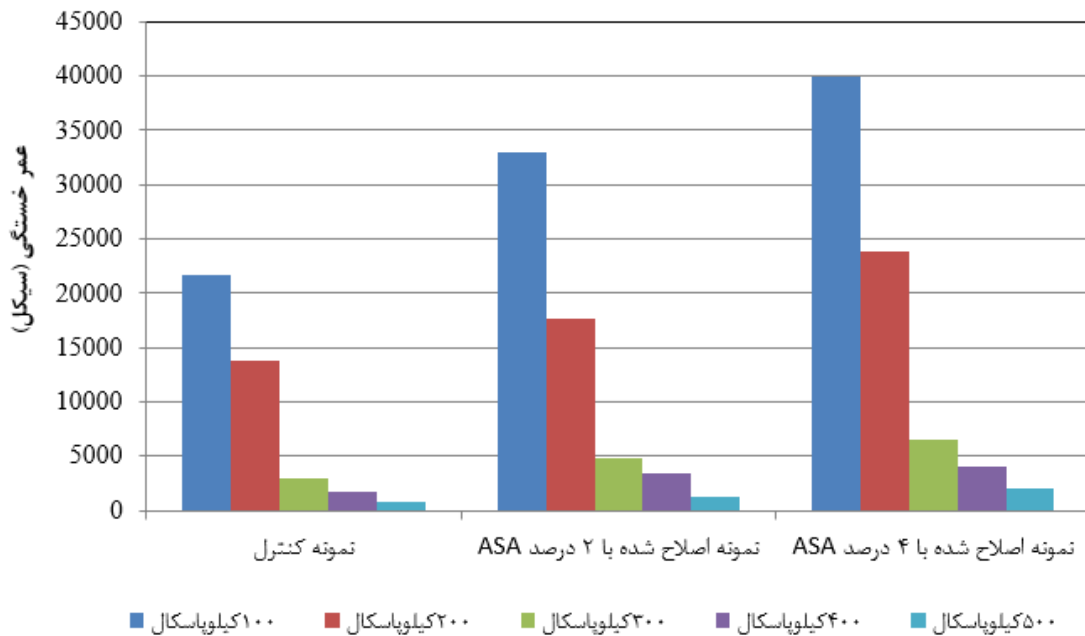
خصوصیات اسیدی قیر کمتر شود و چسبندگی آن با سنگدانه‌های سنگ آهک که خصوصیات بازی دارند، کاهش یابد و افزایش در سختی قیر است که باعث می‌شود تا کرنس کششی غیر مستقیم کاهش یابد و عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی در این نمونه‌ها افزایش یابد اما در مورد نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه گرانیتی می‌توان گفت استفاده از ASA باعث می‌شود تا چسبندگی قیر با این سنگدانه که خصوصیات اسیدی دارد، نیز بهبود یابد.

با توجه به شکل‌های ۸ و ۹ ملاحظه می‌شود که مشابه با نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه گرانیتی نمونه‌های آسفالتی اصلاح شده با ASA به طور قابل ملاحظه‌ای عملکرد خستگی بهتری در مقایسه با نمونه‌های آسفالتی کنترل از خود نشان داده‌اند. تفاوت قابل توجه در این دسته از نمونه‌ها این است که استفاده از ماده پلیمری به میزان ۴ درصد نسبت به ۲ درصد تفاوت قابل توجهی ایجاد کرده است که در نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه گرانیتی چشمگیر نبود. به طور مثال در سطح تنش ۱۰۰ کیلو پاسکال، مقدار عمر خستگی در نمونه‌های کنترل، ۲ و ۴ درصد ASA به ترتیب ۲۸۶۹۳، ۴۳۸۳۶ و ۵۴۸۸۲ سیکل بوده است. در سطح تنش‌های بالا



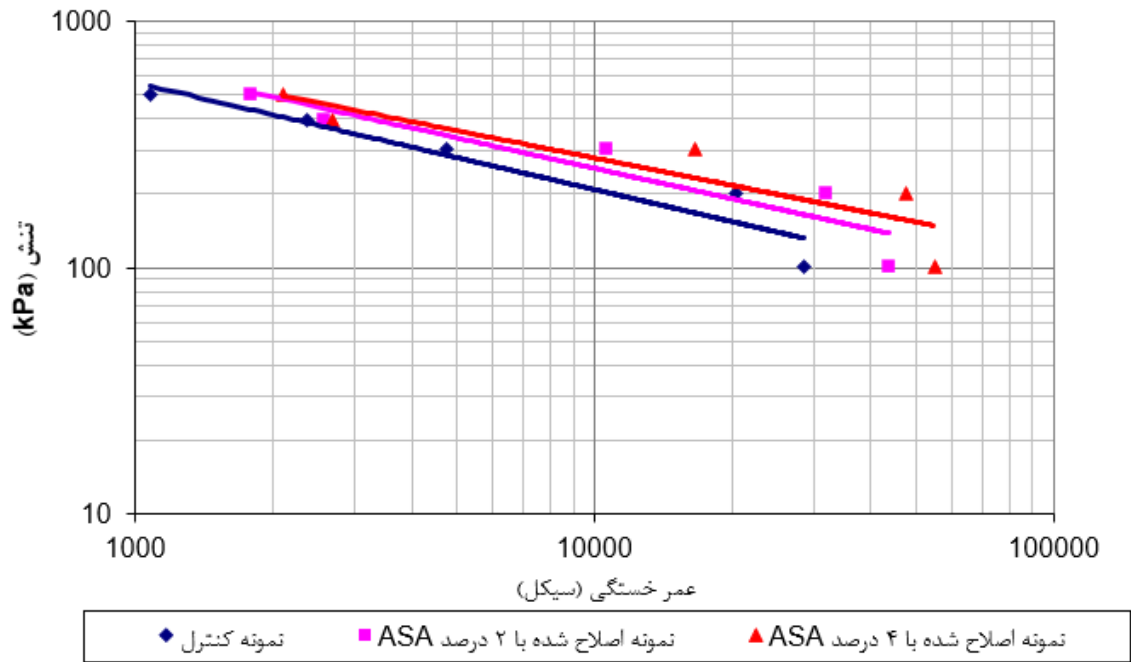
شکل ۸. تعداد سیکل‌های منجر به گسیختگی در آزمایش خستگی در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد (نمونه‌های با سنگدانه سنگ آهک)

Fig. 8. Number of breakdown cycles in the fatigue test at 5 °C (limestone specimens)



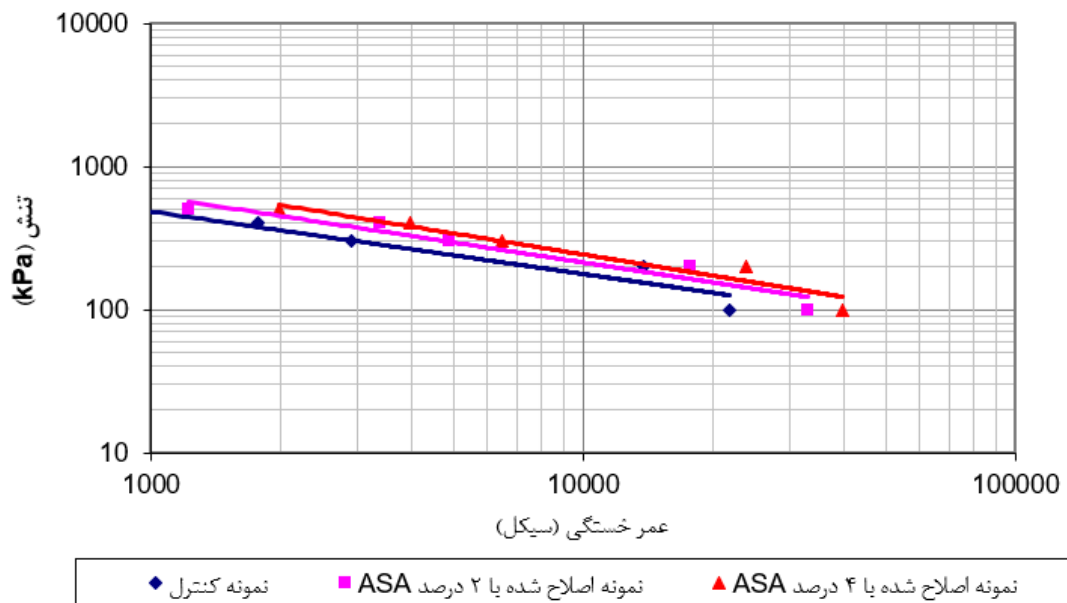
شکل ۹. تعداد سیکل‌های منجر به گسیختگی در آزمایش خستگی در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد (نمونه‌های با سنگدانه سنگ آهک)

Fig. 9. Number of rupture cycles in the fatigue test at 20 °C (limestone specimens)



شکل ۱۰. منحنی دیسپرزین سرعت فاز لوله فولادی با قطر ۲۲۰ میلی‌متر و ضخامت ۴/۸ میلی‌متر

Fig. 10. Phase velocity dispersion curves for a steel pipe with outer diameter of 220 mm and wall thickness of 4.8 mm



شکل ۱۱. منحنی دیسپرزین سرعت فاز لوله فولادی با قطر ۲۲۰ میلی‌متر و ضخامت ۴/۸ میلی‌متر

Fig. 11. Phase velocity dispersion curves for a steel pipe with outer diameter of 220 mm and wall thickness of 4.8 mm

جدول ۶. معادله خستگی و ضرایب آن در نمونه‌های آسفالتی ساده و اصلاح شده با ASA (نمونه‌های با سنگدانه سنگ آهک)

Table 6. Equation of fatigue and its coefficients in simple and modified asphalt samples with ASA (limestone aggregate samples)

ردیف	نوع مخلوط	دمای آزمایش (سانتی‌گراد)	معادله خستگی	R ²	K ₂	K ₁
۱	کنترل	۵	$N_f = 1153 \sigma^{-0.433}$	۰/۸۸۷۵	۰/۴۳۳	۱۱۵۳
۲	قیر پایه با ۲ درصد ASA	۵	$N_f = 11124 \sigma^{-0.411}$	۰/۸۶۸۹	۰/۴۱۱	۱۱۱۲۴
۳	قیر پایه با ۴ درصد ASA	۵	$N_f = 8439 \sigma^{-0.37}$	۰/۸۱۴۳	۰/۳۷	۸۴۳۹
۴	کنترل	۲۰	$N_f = 9870 \sigma^{-0.436}$	۰/۹۱۸۸	۰/۴۳۶	۹۸۷۰
۵	قیر پایه با ۲ درصد ASA	۲۰	$N_f = 15464 \sigma^{-0.465}$	۰/۹۲۰۷	۰/۴۶۵	۱۵۴۶۴
۶	قیر پایه با ۴ درصد ASA	۲۰	$N_f = 22585 \sigma^{-0.492}$	۰/۹۳۴۹	۰/۴۹۲	۲۲۵۸۵

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش سعی شده است تا با استفاده از مواد افزودنی ASA به عنوان اصلاح کننده قیر به بهبود عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی کمک شود. قیمت افزودنی ASA مشابه با قیر است. با توجه به اینکه این افزودنی جایگزین قیر می‌شود، استفاده از این ماده باعث افزایش هزینه تولید مخلوط آسفالتی نمی‌شود. از طرفی، بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر ترک‌خوردگی خستگی باعث می‌شود تا عمر مخلوط آسفالتی در نتیجه استفاده از ASA به میزان قابل توجهی بهبود یابد. تنها نکته‌ای که باید به آن توجه شود، تامین تجهیزات اصلاح قیر در کارخانه‌های آسفالت است که با توجه به زمان و سرعت چرخش نسبتاً پایین همزن مورد نیاز، می‌توان گفت استفاده از این ماده پتانسیل اجرایی بالایی دارد. در این قسمت مهمترین نتایج حاصل شده از این پژوهش آورده شده است:

۱- نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه سنگ آهک دارای درصد قیر بهینه بالاتری نسبت به نمونه‌های مشابه ساخته شده با سنگدانه گرانیتی هستند. دلیل اصلی این امر را می‌توان خلل و فرج سطحی بیشتر سنگدانه‌های سنگ آهک در مقایسه با سنگدانه‌های گرانیتی دانست.

۲- افزایش در سطح تنش باعث کاهش در میزان عمر خستگی نمونه‌های مخلوط آسفالتی می‌شود. میزان افت عمر خستگی نمونه‌های در

سطح تنش‌های ۳۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال بسیار چشمگیر است.

۳- افزایش دما باعث کاهش در مدول سختی نمونه‌های مخلوط آسفالتی می‌شود. این امر باعث شده است تا مقدار کرنش کششی در مخلوط آسفالتی در دماهای بالا افزایش یافته و عمر خستگی به شدت کاهش یابد.

۴- استفاده از مواد افزودنی ASA باعث شده است تا مقدار سختی نمونه‌های مخلوط آسفالتی کاهش یابد. از سویی دیگر، باعث می‌شود تا چسبندگی قیر-سنگدانه افزایش یابد. این موضوع باعث می‌شود تا مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر خرابی خستگی افزایش یافته و عمر خستگی نمونه‌ها بیشتر شود.

۵- افزودن ۲ درصد از ماده ASA باعث بهبود قابل توجه در مقدار عمر خستگی نمونه‌های هر دو گروه شده است. مقدار بهبود در عمر خستگی نمونه‌های مخلوط آسفالتی ساخته شده با سنگدانه گرانیتی در ۴ درصد نسبت به ۲ درصد به اندازه افزایش یاد شده بین ۲ درصد و ۰ درصد نیست. از این رو می‌توان گفت که برای تعیین مقدار بهینه افزودنی ASA حتماً باید آنالیز اقتصادی انجام پذیرد. از سویی دیگر روند منظمی بین افزایش در درصد ماده افزودنی و عمر خستگی در نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه سنگ آهک وجود دارد. این دو رخداد در نمونه‌های دو گروه لزوم آنالیز اقتصادی در نمونه‌های با سنگدانه‌های مختلف را نشان می‌دهد.

- [11] D.B. Ghile, Effects of nanoclay modification on rheology of bitumen and on performance of asphalt mixtures, Delft, The Netherlands: Delft University of Technology, (2006).
- [12] S.G. Jahromi, B. Andalibizade, S. Vossough, Engineering properties of nanoclay modified asphalt concrete mixtures, The Arabian Journal for Science and Engineering, 35(1B) (2010) 89-103.
- [13] Z. You, J. Mills-Beale, J.M. Foley, S. Roy, G.M. Odegard, Q. Dai, S.W. Goh, Nanoclay-modified asphalt materials: Preparation and characterization, Construction and Building Materials, 25(2) (2011) 1072-1078.
- [14] G. Liu, Characterization and identification of bituminous materials modified with montmorillonite nanoclay, TU Delft, Delft University of Technology, 2011.
- [15] F. Xiao, A.N. Amirkhani, S.N. Amirkhani, Influence of carbon nanoparticles on the rheological characteristics of short-term aged asphalt binders, Journal of Materials in Civil Engineering, 23(4) (2010) 423-431.
- [16] F. Xiao, A.N. Amirkhani, S.N. Amirkhani, Long-term ageing influence on rheological characteristics of asphalt binders containing carbon nanoparticles, International Journal of Pavement Engineering, 12(6) (2011) 533-541.
- [17] M.J. Khattak, A. Khattab, H.R. Rizvi, P. Zhang, The impact of carbon nano-fiber modification on asphalt binder rheology, Construction and Building Materials, 30 (2012) 257-264.
- [18] J. Shen, B. Huang, X. Shu, B. Tang, Size effect of sub nano-scaled hydrated lime on selected properties of HMA, International Journal of Pavement Research and Technology, 4(4) (2011) 252.
- [19] G. Shafabakhsh, S. Mirabdolazimi, M. Sadeghnejad, Evaluation the effect of nano-TiO₂ on the rutting and fatigue behavior of asphalt mixtures, Construction and Building Materials, 54 (2014) 566-571.
- [20] M. Mubaraki, Comparison of laboratory performance of two superpave binders mixed with two modifiers, Road Materials and Pavement Design, (2018) 1-15.
- [1] F. Moghadas Nejad, A. Azarhoosh, Evaluating Fatigue Life of Asphalt Mixtures Using Surface Free Energy Parameters, AUT Journal of Civil Engineering, 50 (2), (2018) 365-376.
- [2] Y.-R. Kim, D.N. Little, I. Song, Mechanistic evaluation of mineral fillers on fatigue resistance and fundamental material characteristics, Transportation Research Board, Washington, DC, (2003).
- [3] F. Moghadas Nejad, A. Azarhoosh, G.H. Hamedi, Effect of high density polyethylene on the fatigue and rutting performance of hot mix asphalt—a laboratory study, Road Materials and Pavement Design, 15(3) (2014) 746-756.
- [4] A. Pasandín, I. Pérez, The influence of the mineral filler on the adhesion between aggregates and bitumen, International Journal of Adhesion and Adhesives, 58 (2015) 53-58.
- [5] X. Shu, B. Huang, D. Vukosavljevic, Laboratory evaluation of fatigue characteristics of recycled asphalt mixture, Construction and Building Materials, 22(7) (2008) 1323-1330.
- [6] Y.-R. Kim, D. Little, R. Lytton, Fatigue and healing characterization of asphalt mixtures, Journal of Materials in Civil Engineering, 15(1) (2003) 75-83.
- [7] A.R. Azarhoosh, Evaluating fatigue of asphalt mixtures using surface free energy method, Amirkabir University of Technology, 2018.
- [8] M. Mubaraki, S.I.A. Ali, A. Ismail, N.I.M. Yusoff, Rheological evaluation of asphalt cements modified with ASA polymer and Al₂O₃ nanoparticles, Procedia engineering, 143 (2016) 1276-1284.
- [9] Y.-g. Du, J.-g. Gao, J.-b. Yang, X.-q. Liu, Dynamic rheological behavior and mechanical properties and of PVC/ASA blends, Journal of Polymer Research, 19(11) (2012) 9993.
- [10] M. Ameri, S. Yeganeh, P.E. Valipour, Experimental evaluation of fatigue resistance of asphalt mixtures containing waste elastomeric polymers, Construction and Building Materials, 198 (2019) 638-649.

- [28] H.-l. Zhang, M.-m. Su, S.-f. Zhao, Y.-p. Zhang, Z.-p. Zhang, High and low temperature properties of nano-particles/polymer modified asphalt, *Construction and Building Materials*, 114 (2016) 323-332.
- [29] N. Esmaeili, G.H. Hamed, M. Khodadadi, Determination of the stripping process of asphalt mixtures and the effective mix design and SFE parameters on its different phases, *Construction and Building Materials*, 213 (2019) 167-181.
- [30] Iran Highway Asphalt Paving Code No. 234, Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision, Tehran, Iran, 2011 (In Persian).
- [31] C. Benson, R. Burford, Morphology and properties of acrylate styrene acrylonitrile/polybutylene terephthalate blends, *Journal of materials science*, 30(3) (1995) 573-582.
- [32] CEN, Test methods for hot mix asphalt—Part 24: Resistance to fatigue, in, EN12697-24. British Standards Institution London, 2012.
- [33] MS-2 Asphalt Mix Design Methods, Asphalt Institute, 2014.
- [34] M. Arabani, S. Mirabdolazimi, A. Sasani, The effect of waste tire thread mesh on the dynamic behaviour of asphalt mixtures, *Construction and Building Materials*, 24(6) (2010) 1060-1068.
- [35] M. Arabani, A. Haghi, S. Mirabdolazimi, M. Haghgoo, Increment of fatigue resistance of HMA by waste tire thread, in: 7th International congress on civil engineering, Tehran, Iran, 2006.
- [36] F. Moghadas Nejad, E. Aflaki, M. Mohammadi, Fatigue behavior of SMA and HMA mixtures, *Construction and Building Materials*, 24(7) (2010) 1158-1165.
- [21] S.I.A. Ali, A. Ismail, N.I.M. Yusoff, M.R. Karim, R.A. Al-Mansob, D.I. Alhamali, Physical and rheological properties of acrylate–styrene–acrylonitrile modified asphalt cement, *Construction and Building Materials*, 93 (2015) 326-334.
- [22] M. Vamegh, M. Ameri, S.F.C. Naeni, Performance evaluation of fatigue resistance of asphalt mixtures modified by SBR/PP polymer blends and SBS, *Construction and Building Materials*, 209 (2019) 202-214.
- [23] X. Lu, U. Isacsson, J. Ekblad, Influence of polymer modification on low temperature behaviour of bituminous binders and mixtures, *Materials and Structures*, 36(10) (2003) 652-656.
- [24] H. Zhang, G. Xu, X. Chen, R. Wang, K. Shen, Effect of long-term laboratory aging on rheological properties and cracking resistance of polymer-modified asphalt binders at intermediate and low temperature range, *Construction and Building Materials*, 226 (2019) 767-777.
- [25] B. Teltayev, C. Rossi, G. Izmailova, E. Amirbayev, A. Elshibayev, Evaluating the effect of asphalt binder modification on the low-temperature cracking resistance of hot mix asphalt, *Case Studies in Construction Materials*, 11 (2019) e00238.
- [26] L. Sun, X. Xin, J. Ren, Asphalt modification using nano-materials and polymers composite considering high and low temperature performance, *Construction and Building Materials*, 133 (2017) 358-366.
- [27] G. Shafabakhsh, M. Rajabi, The fatigue behavior of SBS/nanosilica composite modified asphalt binder and mixture, *Construction and Building Materials*, 229 (2019) 116796.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Gh. H. Hamed, A. Alipour, F. Karimian Khosroshahi, Investigating the Effect of Acrylon Acrylonitrile Acrylate on the Fatigue Life of Asphalt Mixtures, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(9) (2021) 3785-3802.

DOI: [10.22060/ceej.2020.18110.6770](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18110.6770)

