ارزیابی تأثیر فرسودگی آزمایشگاهی بر رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی آهک هیدراته

امیر کاووسی، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
امیر رسولی (مسئول مکاتبات)، کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
کامران رحیم اف، استادیار، دانشکده تحصیلات تکمیلی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
مرتضی جلیلی قاضی زاده، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
Email: a_rasooli842000@yahoo.com

دریافت: ۱۳۹۲/۰۲/۰۳ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۸/۰٤

چکیده:
نتایج کاربرد آهک هیدراته نشان می‌دهد که این ماده معمولاً به عنوان یک افزودنی، به منظور افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر پدیده عریان شدگی مورد استفاده قرار گرفته است و اغلب محققین فقط به این امر توجه داشته‌اند و خصوصیات دراز مدت آن در روسازی‌ها که مقاومت این مخلوط‌ها در برابر ترک‌های خستگی است کمتر مورد توجه قرار گرفته است. دراین پژوهش با استفاده از آزمایش خستگی تیرچه خمشی چهار نقطه‌ای، به بررسی اثرات مقادیر مختلف آهک هیدراته بر خصوصیات خستگی مخلوط‌های آسفالتی در دو شرایط پیرنشده و پیرشده آزمایشگاهی (مطابق روش استاندارد AASHTO PP2) پرداخته شد. آزمایش خستگی خمشی در شرایط کنترل کرنش و بارگذاری سینوسی با فرکانس بارگذاری ۱۰ هرتز (بدون زمان استراحت) در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد روی نمونه‌های آسفالتی انجام شد. رویکردهای کاهش سختی و انرژی تلف شده برای ارزیابی عمر خستگی استفاده گردید. نتایج آزمایشها نشان داد که عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی به مقادیر آهک هیدراته حساس است. نتایج نشان داد که کاربرد مقادیر ۱، ۱/۵ و ۲ درصد آهک هیدراته باعث بهبود عمر خستگی آسفالت نسبت به نمونه شاهد در شرایط پیرنشده می‌گردد. در شرایط پیرشدگی بلند مدت استاندارد فوق (عمل آوری ۱۲۰ ساعت در دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد) آهک هیدراته در مقادیر ۱ و ۱/۵ درصد به طور متوسط باعث بهبود عمر خستگی آسفالت به ترتیب به میزان ۲۵ و ۵۰ درصد گردید و در مقدار ۲ درصد، کاهش ٤۰ درصدی در عمر خستگی نتیجه شد. عمر خستگی مخلوط آسفالت در مقدار ۱/۵ درصد آهک هیدراته به عنوان درصد آهک بهینه به مقدار بیشینه می‌رسد.

واژه های کلیدی: مخلوط آسفالت پیرشده، تیر خمشی، آهک هیدراته

۱.مقدمه

شناخت رفتار مخلوط‌های آسفالتی در برابر خستگی موجب آگاهی از میزان دوام مخلوط و نحوه عملکرد دراز مدت آن در جاده می‌گردد. خستگی آسفالت عموماً در اثر تنش‌ها و کرنش‌های تکراری ناشی از بارهای ترافیکی در دماهای میانی به وجود می‌آید به طوری که به مرور زمان منجر به کاهش سختی روسازی شده و باعث بروز ترک‌هایی در زیر لایه آسفالتی و پیشرفت آن به سطح روسازی می‌شود. در نهایت با گسترش ترکها در جهت‌های مختلف به صورت شبکه ترک‌های پوست ماری نمایان می‌گردد [Al-Qadi et al. 2005]. آهک هیدراته به عنوان یک افزودنی مناسب که موجب کاهش عریان شدگی مخلوط‌های آسفالتی می‌شود با سابقه طولانی مورد استفاده قرار گرفته است. خواص شیمیایی و فیزیکی ذرات ریز آهک هیدراته سبب شده مزایای استفاده از آن در کاهش انواع خرابی‌ها مطرح شود و آنرا از سایر مواد ضد عریان شدگی متمایز ساخته و منجر به استفاده گسترده از آن گردد. نتایج مطالعات کاربرد آهک هیدراته نشان می‌دهد که این ماده معمولاً به عنوان یک افزودنی ضد عریان شدگی، به منظور افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر پدیده عریان شدگی مورد استفاده قرار گرفته و اغلب محققین فقط به این امر توجه داشته‌اند و خصوصیات دراز مدت آن در روسازی‌ها (که مقاومت این مخلوط‌ها در برابر ترکهای خستگی است) کمتر مورد توجه قرار گرفته است [European Lime Association, 2011]. مزایای آهک هیدراته در بهبود خواص عملکردی مخلوط‌های آسفالتی را می‌توان در سه بخش؛ شامل مقاومت در برابر پدیده عریان شدگی، مقاومت در برابر شیار افتادگی جای چرخ و کاهش نرخ سخت شدگی که در اثر اکسیداسیون قیر صورت می‌گیرد، بررسی کرد. در تحقیقات مختلفی نشان داده شد که آهک هیدراته باعث بهبود مقاومت عریان شدگی مخلوط‌های آسفالتی در حضور رطوبت می‌شود [Lee, 2007] و بر خلاف اغلب فیلرهای معدنی، آهک هیدراته یک ماده فعال از لحاظ شیمیایی نسبت به فیلر معمولی است و از آنجا که آهک هیدراته با ایجاد چسبندگی بین قیر و سنگدانه باعث افزایش چسبندگی و سفتی قیر می‌گردد؛ بنابراین عمق شیار شدگی جای چرخ کاهش می‌یابد [Little & Petersen, 2005]. در خصوص تأثیر آهک هیدراته در نرخ پیرشدگی اکسیداسیون قیر بر اساس نتایج محققین نتیجه شد که آهک هیدراته موجب کاهش نرخ پیرشدکی شیمیایی قیر می‌شود. اولین مشاهدات اثر ضد پیرشدگی آهک هیدراته روی مصالح قیری به اواخر سال ۱۹۶۰ میلادی در ایالت Utah برمی‌گردد. مشاهده شده که قیرهای بازیابی شده از نمونه مخلوط آسفالتی حاوی آهک هیدراته، به نحو شگفت انگیزی نرم‌تر از نمونه‌های شاهد بودند [European Lime Association, 2011]. به علاوه، اتفاق نظرچندانی میان محققین یا مؤسسات تحقیقاتی مبنی برکاهش یا افزایش عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی آهک هیدراته وجود ندارد. نتایج تحقیق با هدف ارزیابی اثر آهک هیدراته روی ویژگی‌های مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی نشان داد که افزودن آهک هیدراته به عنوان فیلر معدنی، موجب بهبود مشخصات تغییر شکل‌های ماندگار مخلوط‌های آسفالتی می‌گردد [Louay et al. 2008]. این محققین بر پایه نتایج آزمایشهای مدول دینامیکی بر روی نمونه‌های حاوی آهک هیدراته، احتمال ترک خوردگی زود رس لایه آسفالتی و در نتیجه کاهش عمر خستگی روسازی را پیش بینی کردند. محققین دیگری نشان دادند که آهک هیدراته، مدول دینامیکی مخلوط آسفالت (HMA) را در درصدهای مختلف آهک هیدراته و دماهای مختلف به میزان ۱۷ الی ٦٥ درصد افزایش می‌دهد. مدول دینامیکی مخلوط‌های حاوی آهک هیدراته (مقدار ۱الی ۲ درصد وزن مصالح سنگی) به طور متوسط به میزان ۲۵ درصد بیشتر از مخلوط‌های بدون آهک هیدراته بود [Bari & Witczak, 2005]. سؤالی که مطرح می‌شود این است که گرچه برای جلوگیری از پدیده عریان شدگی؛ آهک هیدراته اثرات سودمندی برای روسازی آسفالتی دارد، ولی با توجه به افزایش سختی مخلوط آسفالتی، آیا این ماده موجب کاهش مقاومت روسازی در برابر ترک‌خوردگی خستگی می‌گردد؟ برای پاسخ به این پرسش، پژوهش حاضر با هدف بررسی آزمایشگاهی رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با آهک هیدراته و اثر مقادیر مختلف آن بر عمر

خستگی و پارامترهای مرتبط با آن انجام شد. مناسب‌ترین روش ارزیابی رفتار مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی، بکار بردن آزمایشها و شرایطی است که بیشترین شبیه سازی را با شرایط محیطی روسازی آسفالتی داشته باشند. برای رسیدن به این هدف، بهترین شیوه، انجام آزمایش‌های میدانی است، ولی از آنجا که این دسته از آزمایشها به زمان و هزینه بسیاری نیاز دارند، استفاده از روش‌های آزمایشگاهی که قادر به در نظر گرفتن شرایط محیطی و بارگذاری در حد مطلوب باشند، توصیه می‌شود. وجه تمایز این پژوهش نسبت به سایر تحقیقات صورت گرفته در این زمینه؛ شامل:

الف) انجام آزمایش خستگی به روش تیرچه خمشی، در حالی که تحقیقات گذشته مبتنی بر روش کشش غیر مستقیم بوده است.

ب) بررسی تاثیر پیرشدگی دراز مدت بر رفتار خستگی؛ که تاکنون تحقیق مشابهی در این زمینه انجام نگرفته است.

به این منظور ارزیابی تأثیر آهک هیدراته بر رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی در این تحقیق به دو شرایط پیر نشده و پیرشده آزمایشگاهی (مطابق با روش استاندارد AASHTO PP2) محدود شد. در این راستا و به منظور شبیه سازی شرایط واقعی‌تر، همان گونه که اشاره شد، آزمایش خستگی تیرچه خمشی چهار نقطه‌ای بر روی مخلوط‌های مورد تحقیق صورت گرفت. در تحلیل نتایج عمر خستگی از روشهای کاهش سختی و انرژی تلف شده استفاده شد. مرور ادبیات به نقش ذرات آهک هیدراته در جلوگیری از ترک خوردگی اشاره داشته است و بنابراین از رویکردهای انرژی تلف شده شامل روش Bouldin & Rowe با معیار گسیختگی بر اساس شروع ترک‌خوردگی و گسترش ترک که روش جدیدتر و قابل استنادتری نسبت به روش متداول کاهش ۵۰ درصدی سختی خمشی اولیه است، در تحلیل نتایج مورد استفاده قرار گرفت.

۲. مصالح و مواد

آهک هیدراته مصرفی از یکی از کارخانه‌های تولید آهک هیدراته واقع در اطراف تهران تهیه شد. آهک هیدراته مصرفی در مخلوط‌های آسفالتی بایستی دارای خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مطابق با مشخصات استاندارد (ASTM C1097) باشد. به این منظور آزمایشهای فیزیکی و شیمیایی مربوطه روی آهک هیدراته منتخب انجام و ملاحظه شد که در محدوده مشخصات استاندارد فوق الذکر قرار دارد (جدول ۱). نتایج مطالعات نشان داد که در اغلب کشورهای جهان آهک هیدراته حداکثر در مقادیر ۲ درصد وزن مصالح سنگی مورد استفاده قرار می‌گیرد [European Lime Association, 2011]. بنابراین در تحقیق حاضر نیز آهک هیدراته در مقادیر بین ۱ الی ۲ درصد استفاده شد. مصالح سنگی سیلیسی یکی از کارخانه‌های آسفالت تهران مطابق با مشخصات جداول (۲) و (۳) انتخاب و دانه بندی پیوسته مطابق با محدوده دانه بندی شماره ٤ آیین نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه ۲۳٤) انتخاب شد (شکل۱). درجه بندی نفوذی قیر مورد استفاده ٦۰-۷۰ بوده و از پالایشگاه تهران تهیه شد و آهک هیدراته به روش خشک به مصالح سنگی اضافه و نمونه‌ها آماده سازی شدند.

۳. آماده سازی نمونه‌ها و روش تحقیق

در این پژوهش با استفاده از آزمایش مارشال (ASTM D1559) میزان قیر بهینه ۵/۷ درصد به دست آمد. در ساخت نمونه‌ها، آهک هیدراته در مقادیر ۱، ۱/۵ و ۲ درصد وزن مصالح سنگی، جایگزین بخشی از مصالح فیلر با همین مقادیر طبق جدول (٤) شد. فیلر آهکی به روش خشک به سنگدانه‌ها اضافه شد و نمونه‌ها ساخته شدند. طبق استاندارد (AASHTO PP2) شرایط پیرشدگی کوتاه مدت (عمل آوری ٤ ساعته مخلوط متراکم نشده در دمای ۱۳۵ ^{o}C در گرمخانه) برای تمام نمونه‌ها اعمال شد. به منظور عمل آوری نمونه‌های پیرشده مطابق استاندارد فوق، شرایط پیرشدگی بلندمدت (عمل آوری ۱۲۰ ساعته مخلوط متراکم شده در دمای ۸۵ ^{o}C در گرمخانه) به دنبال پیرشدگی کوتاه مدت بر روی دال‌های آسفالتی اعمال شد. آزمایش خستگی خمشی چهارنقطه‌ای از نظر قابلیت اطمینان و بنیادی بودن به عنوان مناسب‌ترین آزمایش برای تعیین مشخصات خستگی لایه‌های

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و شیمیایی آهک هیدراته و الزامات استاندارد (ASTM C 1097)

مشخصه	محدوده مجاز ASTM C 1097	مقدار آزمایش
درصد مانده روی الک نمره ۳۰ (۵۹۰ میکرون)	حداکثر ۳ درصد	۰/۱۳
درصد مانده روی الک نمره ۲۰۰ (۷٤ میکرون)	حداکثر۳۰ درصد	۰/۵
درصد اکسید کلسیم در نمونه افت کرده	حداقل۹۰ درصد	۹۵/۹۵
درصد اکسید کلسیم هیدراته نشده	حداکثر ۵ درصد	۵/۳٤
درصد دی‌اکسیدکربن	حداکثر ۵ درصد	۳/۸۲
درصد رطوبت آزاد	حداکثر ۲ درصد	۰/۸۸
وزن مخصوص (gr/cm^3)	-	۲/۱۲

جدول ۲. وزن مخصوص و جذب آب مصالح سنگی

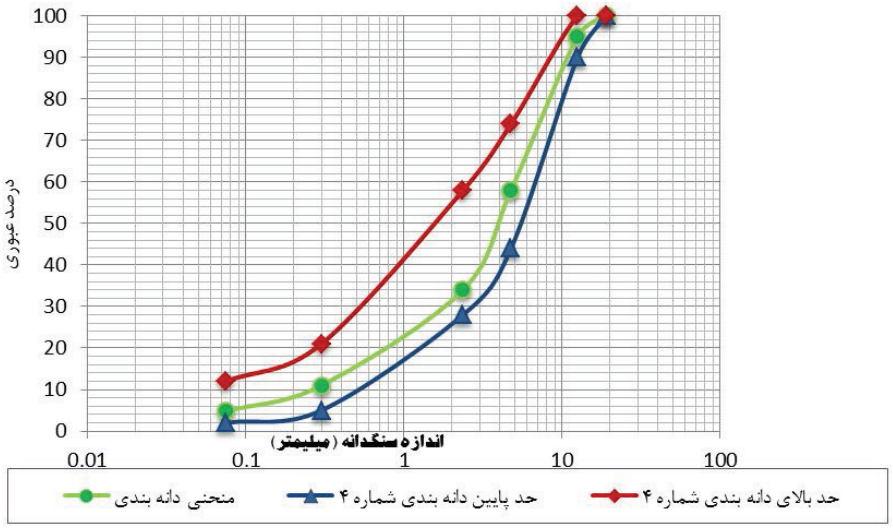
آزمایش	مصالح سنگی		
	درشت‌دانه (ASTM C127)	ریزدانه (ASTM C128)	فیلر (ASTM C188)
وزن مخصوص حجمی (gr/cm^3)	۲/۵۰۱	۲/٤۸۷	-
وزن مخصوص حجمی در حالت اشباع با سطح خشک (gr/cm^3)	۲/۵٦۳	۲/۵۷۱	-
وزن مخصوص ظاهری (gr/cm^3)	۲/٦٦۵	۲/۷۱۵	۲/۵۳٤
میزان جذب آب، درصد	۱/۹	۲/٤	

جدول ۳. خواص فیزیکی مصالح سنگی مورد تحقیق

خصوصیات مصالح درشت دانه				
آزمایش	روش آزمایش	مقدار مجاز آیین نامه حداکثر	مقدار مجاز آیین نامه حداقل	نتیجه آزمایش
سایش به روش لس‌آنجلس (درصد)	ASTM C131	۲۵	-	۲۳
افت وزنی ناشی از سولفات سدیم (درصد)	ASTM C88	۸	-	۰/۲
شکستگی (درصد)	ASTM D 5821	-	۸۵/۸۰	۹٤
سنگدانه های پهن و دراز (درصد)	ASTM D4791	۱۵	-	۱۰
خصوصیات مصالح ریزدانه				
آزمایش	روش آزمایش	مقدار مجاز آیین نامه حداکثر	مقدار مجاز آیین نامه حداقل	نتیجه آزمایش
دامنه خمیری PI (درصد)	ASTM D4318	NP	NP	NP
افت وزنی ناشی از سولفات سدیم (درصد)	ASTM C88	۱۲	-	۱/۷۱
ارزش ماسه‌ای (SE) (درصد)	ASTM D 2419	-	۵۰	۷۱

NP : غیر خمیری

آسفالتی شناخته شده است. یکی از دلایل این امر آن است که این آزمایش جزء معدود آزمایش‌هایی است که برای تفسیر نتایج آن می‌توان از روش‌های مکانیستیک نظیر روش انرژی تلف شده و روش مکانیک شکست استفاده کرد. در این پژوهش بر اساس رویکردهای کاهش سختی (کاهش ۵۰ درصدی سختی خمشی اولیه و کاهش نرخ سختی Rowe) و انرژی تلف شده، به بررسی خصوصیات خستگی نمونه‌ها پرداخته شد. به منظور بررسی اثر آهک هیدراته در رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالت، آزمایش خستگی خمشی چهار نقطه‌ای انتخاب شد (شکل ۲). نمونه‌های آزمایش طبق استاندارد (AASHTO T321) از دال‌های ساخته



شکل ۱. منحنی دانه بندی مصالح سنگی و محدوده دانه بندی مجاز

شده آسفالتی با ابعاد ۳۸۰±۶ طول، ۶۳±۶ عرض و ۵۰±۶ ارتفاع بریده شدند.

برای نمونه‌ها آزمایش خستگی مطابق با استاندارد (AASHTO T321) در حالت کرنش کنترل شده در سطوح کرنش ۵۰۰، ۶۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ میکروکرنش (محدوده مشخص شده در استانداردهای AASHTO T321 و ASTM D7460) بارگذاری به صورت الگوی موج سینوسی با فرکانس بارگذاری ۱۰ هرتز (بدون زمان استراحت) و در دمای ۲۰ ^{o}C اعمال شد.

٤. نتایج و بحث

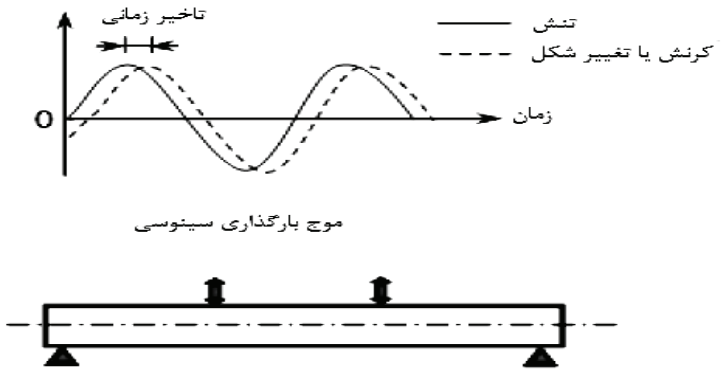
٤-١ اثر آهک هیدراته در سختی خمشی آزمایش تیرک

سختی خمشی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیر گذار در تعیین عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی است. سختی خمشی اولیه در واقع به صورت نسبت پاسخ تنش به کرنش اعمال شده در پنجاهمین سیکل بارگذاری در آزمایش خستگی خمشی چهار نقطه‌ای تعریف می‌شود. به عبارت دیگر، مقدار این پارامتر مقاومت نمونه آسفالتی را در برابر تغییر شکل خمشی نشان می‌دهد. شکل‌های (۳) و (٤) نمودارهای تغییرات سختی خمشی نمونه‌های آسفالتی را به ازای مقادیر مختلف آهک هیدراته، در سطوح کرنش متفاوت و در شرایط پیر نشده و پیر شده آزمایشگاهی نشان می‌دهند.

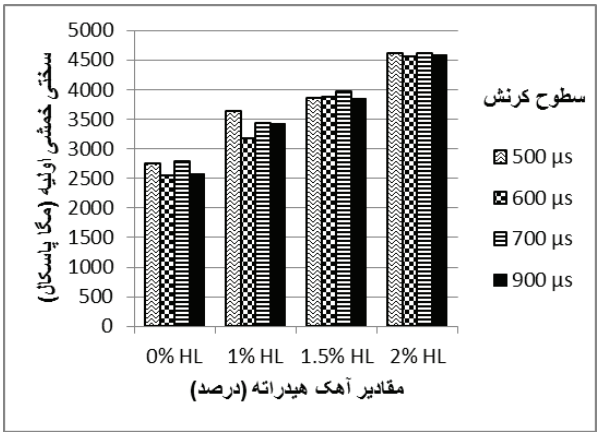
نتایج نشان می‌دهد که عموماً جایگزینی فیلر مصالح سنگی با آهک هیدراته، موجب افزایش سختی خمشی مخلوط‌های آسفالتی می‌شود. مکانیزم مطرح شده همانا فعل و انفعالات فیزیکی و شیمیایی بین قیر و ذرات آهک هیدراته است که شامل تغییر در خصوصیات رئولوژیکی قیر و واکنش ذرات

جدول ٤. جزئیات ترکیب فیلر مصالح سنگی و فیلر آهکی مورد استفاده در تحقیق

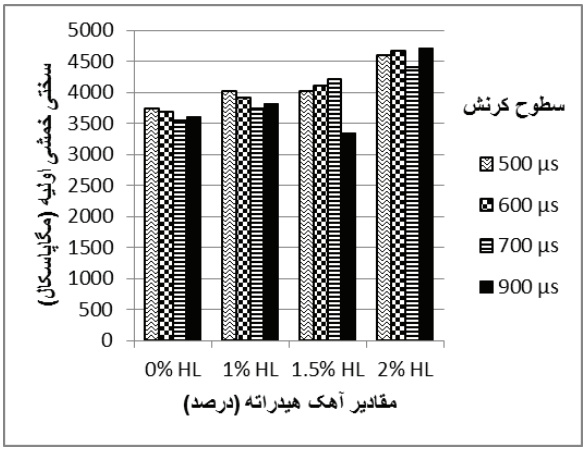
نوع مخلوط	درصد فیلر سنگی	درصد فیلر آهکی	درصد کل فیلر
شاهد	٤/٨	۰	٤/٨
حاوی ۱ درصد آهک	۳/۸	۱	٤/٨
حاوی ۱/۵ درصد آهک	۳/۳	۱/۵	٤/٨
حاوی ۲ درصد آهک	۲/۸	۲	٤/٨



شکل۲. نمایی از آزمایش تیرچه خمشی چهار نقطه ای و حالت بارگذاری در شرایط تغییرشکل (کرنش) کنترل شده



شکل ۳. نمودار تغییرات سختی خمشی اولیه مخلوط‌های آسفالتی در شرایط پیر نشده



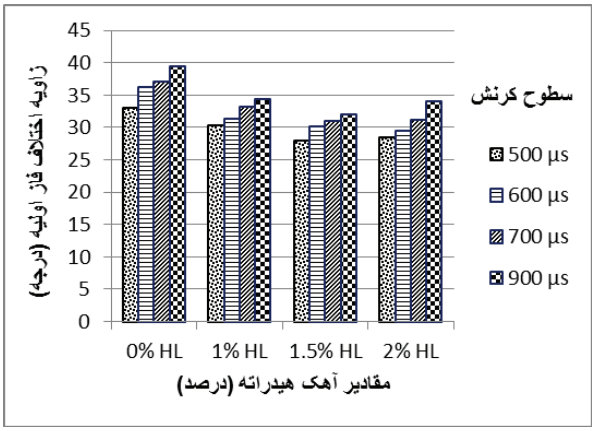
شکل ٤. نمودار تغییرات سختی خمشی اولیه مخلوط‌های آسفالتی در شرایط پیر شده

آهک هیدراته با مولکول‌های قطبی قیر (کربوکسیلیک اسیدها) است. مشاهده می‌شود که در یک درصد آهک هیدراته مشخص، تغییرات سختی خمشی اولیه نسبت به تغییرات سطح کرنش چندان محسوس نیست. این روند تقریباً برای تمام مقادیر آهک هیدراته بکار رفته، صادق است. این امر ممکن است به دلیل این باشد که سختی خمشی پارامتری است که بیشتر به خصوصیات درونی مخلوط وابسته است تا به شرایط بارگذاری. به عبارت دیگر سختی خمشی، پارامتری چند متغیره است که وابسته به عواملی چون جنس مصالح سنگی، نحوه قرار گیری مصالح درشت‌دانه و ریز دانه در مخلوط، نوع دانه بندی، نحوه ساخت و تراکم نمونه آسفالتی، درصد فضای خالی واقعی نمونه، میزان قیر، دما و نرخ بارگذاری است. با توجه به یکسان بودن شرایط ساخت نمونه‌ها و آزمایش و استدلال فوق می‌توان عنوان کرد که در یک درصد آهک مشخص، سختی خمشی آنچنان تحت تاثیر سطح کرنش اعمالی نیست. در شرایط پیرشده از یک جهت فرآیندهای اکسیداسیون و پلیمریزاسیون موجب افزایش قطبیت مولکول‌های قیرمی‌شود و از سوی دیگر با تصعید مواد فرار قیر، خصوصیات رئولوژیکی و کلوئیدی آن تحت تأثیر قرار گرفته و در نتیجه سختی خمشی نمونه‌های پیرشده در مقایسه با نمونه‌های پیرنشده افزایش می‌یابد. نقش آهک هیدراته در کاهش نرخ افزایش سختی خمشی مخلوط آسفالتی در مقایسه با مخلوط شاهد در دو شرایط نشان از کاهش نرخ اکسیداسیون ناشی از واکنش ذرات آهک هیدراته با مولکول‌های قطبی قیر دارد.

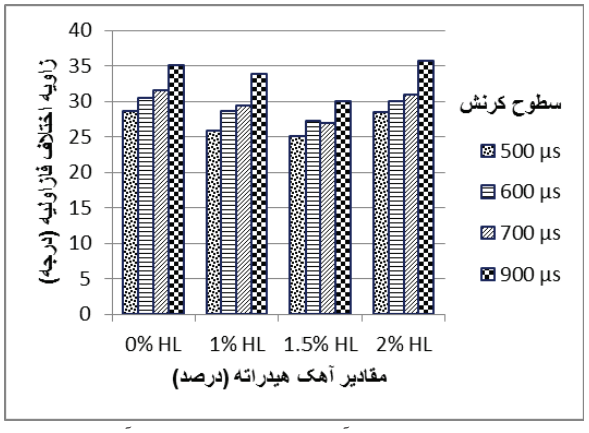
٤-٢ اثر آهک هیدراته در زاویه اختلاف فاز

زاویه اختلاف فاز فاصله زمانی بین نیروی اعمال شده و تغییر شکل ایجاد شده در آزمایش تیرخمشی تعریف می‌گردد. این پارامتر معیاری از طبیعت الاستیک یا جامد بودن مخلوط است. شکل (٥) زاویه اختلاف فاز بین مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر متفاوت آهک هیدراته در شرایط پیرنشده را نشان می‌دهد. به طور متوسط نمونه‌های حاوی آهک هیدراته در مقایسه با نمونه‌های شاهد، زاویه اختلاف فاز کمتری از خود نشان دادند. مقادیر کاهش در سطح کرنش‌های مختلف، متفاوت به نظر می‌رسد، این به این مفهوم است که آهک هیدراته باعث افزایش خصوصیات الاستیک مخلوط آسفالتی می‌گردد. کاهش زاویه اختلاف فاز مخلوط‌های حاوی آهک هیدراته را می‌توان در فعل و انفعالات فیزیکی و شیمیایی بین قیر و ذرات آهک هیدراته بررسی کرد. افزایش چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی را شاید بتوان ناشی از وجود آهک هیدراته در بین آنها دانست و به علاوه اعتقاد بر آن است که تشکیل و گسترش زنجیره‌های مولکولی ناشی از واکنش کلسیم دو ظرفیتی آهک هیدراته با مولکول‌های قطبی (کربوکسیلیک اسیدها) موجود در قیر موجب می‌شود که پیوستگی (چسبندگی درونی) قیر درون مخلوط نیز افزایش یابد و در نتیجه رفتار الاستیک‌تری نسبت به نمونه‌های شاهد از خود نشان دهند. این ویژگی یقینا منجر به بهبود عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی خواهد شد. در شکل (٥) مشاهده می‌شود که کمترین زاویه اختلاف فاز، مربوط به نمونه‌های حاوی ١/٥ درصد آهک هیدراته بوده و بیشترین آن مربوط به نمونه‌های شاهد است. می‌توان نتیجه گرفت که در بین مقادیر آهک هیدراته بکار رفته در مخلوط در این تحقیق، مقدار ١/٥ به عنوان درصد بهینه تلقی شده که بیشترین رفتار الاستیک را نیز به مخلوط می‌دهد.

شکل (٦) مقادیر زاویه اختلاف فاز بین مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر متفاوت آهک هیدراته در شرایط پیرشدگی تسریع یافته آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در یک سطح کرنش مشخص، با جایگزینی بیشتر آهک هیدراته، این زاویه در ابتدا روند کاهشی (در مقادیر ١ و ١/٥ درصد آهک هیدراته) داشته و سپس با افزایش درصد آهک هیدراته (٢ درصد) افزایش می‌یابد. در تحلیل نتایج فوق می‌توان گفت که در مقادیر بیشتر از ١/٥ درصد، به دلیل افزایش بیش از حد سختی، نمونه خاصیت انعطاف پذیری خود را کم کم از دست داده و حالت تردی و شکنندگی به خود می‌گیرد و این ویژگی در حالت پیرشدگی شدت یافته و موجب می‌شود که نمونه رفتار پلاستیک در برابر تغییر شکل‌های خمشی داشته باشد و زاویه اختلاف فاز، روند افزایشی به خود بگیرد. به عبارت دیگر در مقدار ١/٥ درصد نمونه به بیشترین حالت انعطاف پذیری می‌رسد. نکته قابل توجه در مقایسه بین شکل‌های (٥) و (٦) آن است که برای نمونه‌های پیر شده در مقایسه با نمونه‌های پیر نشده به جز نمونه‌های حاوی ٢ درصد آهک هیدراته، مقادیر زاویه اختلاف فاز کمتری در سطوح



شکل ٥. زاویه اختلاف فاز اولیه مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر متفاوت آهک هیدراته در شرایط پیرنشده



شکل ٦. زاویه اختلاف فاز اولیه‌ی مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر متفاوت آهک هیدراته در شرایط پیرشده

کرنش متفاوت ایجاد خواهد شد. به عبارت دیگر، مخلوط‌های پیر شده، دارای رفتار الاستیک‌تری نسبت به مخلوط‌های پیر نشده هستند. دلیل این رفتار را می‌توان در اکسایش مولکول‌های قیر و نیز تصعید مواد فرار موجود در قیر بررسی کرد. کاهش زاویه اختلاف فاز با در نظر گرفتن افزایش شدید در سختی خمشی مخلوط‌های شاهد می‌تواند رفتار خستگی آنها را تحت‌الشعاع قرار دهد.

٤-٣ نتایج عمر خستگی بر اساس کاهش سختی خمشی اولیه

در این معیار تعداد سیکل های متناظر با کاهش ۵۰ درصد سختی خمشی اولیه نمونه به عنوان عمر خستگی در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش برای رسیدن به نتایج واقعی، ۷۵ درصد کاهش سختی خمشی به عنوان معیار در دستگاه آزمایش تنظیم شد و آزمایش انجام شد.

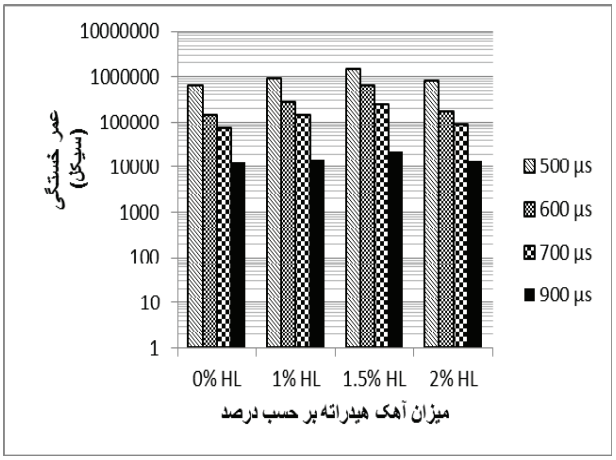
شکل‌های (۷) و (۸) به ترتیب نتایج عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی را بر اساس کاهش ۵۰ درصدی در سختی خمشی اولیه نمونه‌ها مطابق با روش استاندارد (AASHTO T321) برای شرایط پیرنشده و پیرشده نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که بیشترین عمر خستگی در هر چهار سطح کرنش مربوط به نمونه‌های حاوی ۱/۵ درصد آهک هیدراته است.

با دقت در شکل‌های فوق چنین نتیجه می‌شود که در شرایط پیر نشده، عمر خستگی نمونه‌های حاوی آهک هیدراته بیشتر از نمونه‌های شاهد است. همچنین برای نمونه‌های حاوی ۲ درصد آهک هیدراته در مقایسه با نمونه‌های شاهد، بهبود عمر خستگی، و در مقایسه با نمونه‌های حاوی ۱ درصد آهک هیدراته کاهش عمر خستگی نتیجه شد.

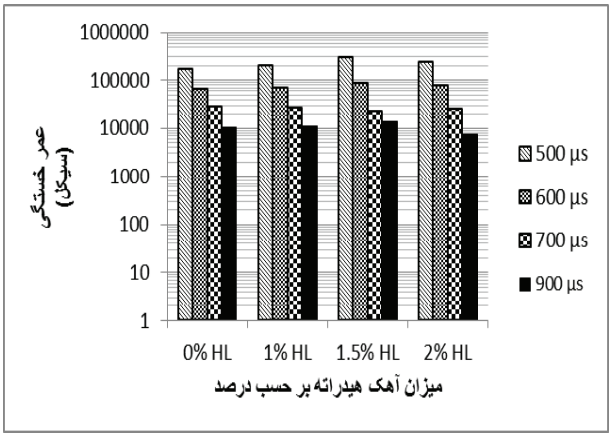
در شرایط پیرشدگی، روند منظمی از کاهش یا افزایش عمرخستگی در مقادیر مختلف آهک هیدراته و سطوح کرنش مختلف نتیجه نشد. علت این امر شاید حساسیت نمونه به ترد شدگی ناشی از پیرشدگی باشد. برای نمونه‌های حاوی ۲ درصد آهک هیدراته در سطوح کرنش ۵۰۰ و ۶۰۰ میکروکرنش بهبود در عمر خستگی حاصل شد، ولی در سطوح کرنش ۷۰۰ و ۹۰۰ میکروکرنش، کاهش در عمر خستگی نمونه‌های حاوی ۲ درصد آهک هیدراته در مقایسه با نمونه‌های شاهد نتیجه شد. به نظر می‌رسد که سختی بیش از حد نمونه‌های حاوی ۲ درصد آهک هیدراته در شرایط پیرشدگی بلند مدت دلیل اصلی این رفتار باشد.

٤-٤ نتایج عمر خستگی بر اساس روش Bouldin & Rowe

به منظور بررسی دقیق‌تر نحوه تغییر مقاومت خستگی نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف آهک هیدراته، عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی به روش Bouldin & Rowe، هم برای نمونه‌های پیر نشده و هم نمونه‌های پیر شده حاوی مقادیر مختلف آهک



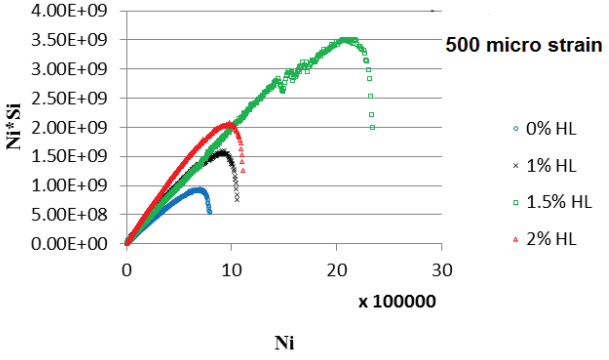
شکل ۷. عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر مختلف آهک هیدراته بر اساس رویکرد ۵۰ درصد کاهش در سختی خمشی در شرایط پیر نشده



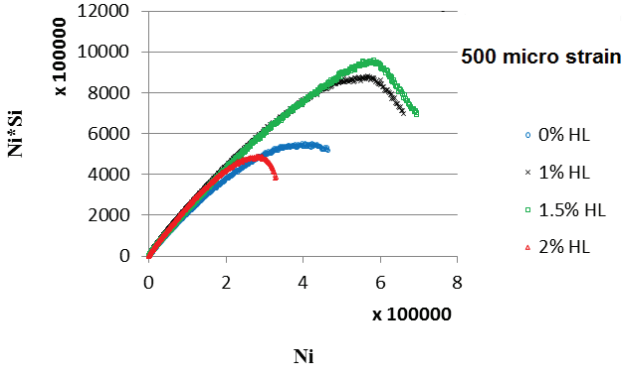
شکل ۸. عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر مختلف آهک هیدراته بر اساس رویکرد ۵۰ درصد کاهش در سختی خمشی در شرایط پیر شده

هیدراته در سطح کرنش ۵۰۰ میکروکرنش در شکل‌های (۹) و (۱۰) آورده شده است. در این روش تعداد سیکل (Ni) متناظر با حداکثر مقدار Ni*Si، همانند نمودار رسم شده در شکل (۹) نقطه گسیختگی نمونه است. به عبارت دیگر با تکرار بارگذاری سختی خمشی نمونه کم می‌شود و این کاهش تا آنجا ادامه می‌یابد که نمونه بعد از آن قادر به مقاومت در برابر تغییر شکل‌های خمشی نیست. این نقطه همان نقطه اوج منحنی است [Rowe & Boul-din, 2000].

شکل‌های (۹) و (۱۰) به ترتیب کاهش نرخ سختی خمشی در برابر تعداد سیکل بارگذاری نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف آهک هیدراته را در سطح کرنش ۵۰۰ میکروکرنش در شرایط پیر نشده و پیر شده به روش Rowe & Bouldin نشان می‌دهند. مقادیر بیشینه منحنی‌های فوق بیانگر آستانه مقاومت در برابر تغییر شکل‌های خمشی ناشی از تکرار بارگذاری و نقطه متناظر با آن روی محور Xها، بیانگر عمر خستگی نمونه است. در شکل (۹) ملاحظه می‌شود که نمونه شاهد دارای کمترین عمر خستگی و نمونه حاوی ۱/۵ درصد آهک هیدراته دارای بیشترین عمر خستگی است. برای درک بهتر این رفتار، شیب نمودارهای فوق نکته بسیار جالبی را نشان می‌دهد و آن این است که نمونه‌های حاوی آهک هیدراته دارای شیب بیشتری نسبت به مخلوط شاهد هستند. به عبارت دیگر، در یک تعداد سیکل بارگذاری مشخص، نمونه‌های آسفالتی حاوی آهک هیدراته مقاومت بیشتری در برابر تغییر شکل‌های خمشی از خود نشان می‌دهند. به بیان دیگر هرچه سختی خمشی نمونه بیشتر باشد، نمودار به سمت بالاتر انتقال می‌یابد. این مفهوم برای نمونه‌های پیرنشده در مقدار ۲ درصد به اوج رسیده است. با قبول این فرض که نرخ کاهش سختی خمشی در فاز تشکیل ریز ترک‌ها ثابت است [Rowe & Boul-din, 2000]، برای بیان علت افزایش عمر خستگی نمونه حاوی ۱/۵ درصد آهک هیدراته، می‌توان نتیجه گرفت که با مراجعه به نمودارهای فوق می‌توان ادعا کرد که با توجه به خطی بودن قسمت اعظم کاهش مدول در نمونه حاوی ۱/۵ درصد آهک هیدراته، نشان از اثر آهک هیدراته در جلوگیری از ایجاد ریز ترک‌ها و در نتیجه مقاومت بیشتر مخلوط در برابر کاهش سختی است. در بررسی دقیق‌تر این موضوع بایستی عنوان نمود که یکی از دلایلی که باعث می‌شود آهک هیدراته موجب افزایش عمر خستگی روسازی‌ها گردد، در عین حال که باعث افزایش سختی خمشی مخلوط‌های آسفالتی می‌شود، مکانیزم اتصال یا بسته شدن ترک[1] است. ذرات آهک هیدراته با جلوگیری از ایجاد ریزترک‌ها و ممانعت از گسترش ریز ترک‌ها[2] (که منجر به شکل‌گیری ترک‌های بزرگ[3] می‌شوند) باعث بهبود عمر خستگی می‌شوند. آهک هیدراته به دلیل خاصیت شیمیایی، ترکیبات اسیدی قیر را به سطح خود جذب کرده و همین مسئله موجب می‌شود که حجم مؤثر ذرات آهک هیدراته افزایش یابد که به صورت ذرات ترک‌گیر باعث جلوگیری از ایجاد ریزترک‌ها در نمونه شده و بنابراین افزایش مقاومت گسیختگی نمونه‌ها تحت تکرار بار را به دنبال دارد [Lesueur & Little, 1999].



شکل ۹. تاثیر آهک هیدراته در کاهش نرخ سختی مخلوط‌های آسفالتی در شرایط پیرنشده بر اساس روش Rowe& Bouldin



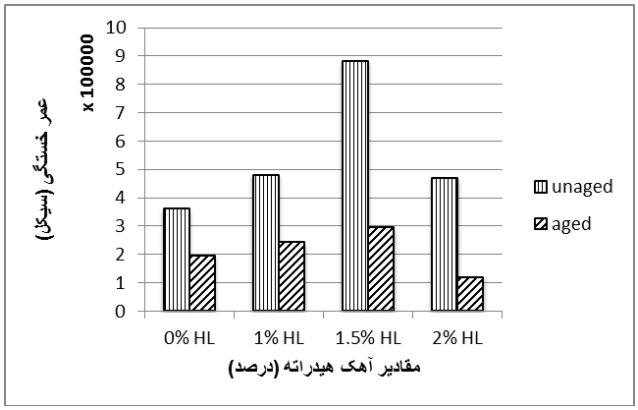
شکل ۱۰. تاثیر آهک هیدراته در کاهش نرخ سختی مخلوط‌های آسفالتی در شرایط پیرشده بر اساس روش Rowe& Bouldin

در شکل (۱۰) ملاحظه می‌شود که نمونه پیرشده حاوی ۲ درصد آهک هیدراته دارای کمترین عمر خستگی و نمونه حاوی ۱/۵ درصد آهک هیدراته دارای بیشترین عمر خستگی است. فشردگی نمودارها در شکل (۱۰)، نشان از اثر شدید پیرشدگی بر سختی خمشی نمونه‌های آسفالتی دارد. همان طور که مشاهده می‌گردد، در شرایط پیرشدگی آزمایشگاهی، مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر ۱ و ۱/۵ درصد آهک هیدراته، سختی خمشی تقریباً یکسانی دارند. به عبارت دیگر با مقایسه سختی‌های خمشی نمونه‌های پیرشده و پیر نشده، می‌توان نتیجه گرفت که سختی خمشی مخلوط حاوی ۲ درصد آهک هیدراته آنچنان تحت تأثیر پیرشدگی قرار نگرفته است، ولی سختی سایر مخلوطها افزایش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود که نمونه‌های حاوی آهک هیدراته در نقطه گسیختگی افت ناگهانی در نقطه پیک دارند. شاید علت آن باشد که نمونه‌های حاوی آهک هیدراته با مقاومت در برابر ایجاد ترک‌های ریز، مقاومت گسیختگی بیشتری از خود نشان می‌دهند. این روند برای مخلوط‌های پیر شده با شدت کمتری مشاهده شد.

شکل (۱۱) متوسط عمرخستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر متفاوت آهک هیدراته را در شرایط پیرشده و پیرنشده به روش Rowe & Bouldin نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در شرایط پیرنشده، آهک هیدراته بهبود در عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی را به دنبال دارد، به طوری که آهک تنها در مقدار ۱/۵ درصد به بیشترین میزان عمر خستگی می‌رسد و مقدار بهینه درصد آهک هیدراته ۱/۵ درصد به دست آمده است که با نتایج کارهای [Aragao et al. 2010] که آزمایش خستگی بر روی نمونه های استوانه ای شکل به روش کشش غیرمستقیم (IDF) در دو حالت تنش ثابت و کرنش ثابت انجام شده بود، همخوانی دارد. ولی در شرایط پیرشده، آهک هیدراته در مقادیر ۱ و ۱/۵ درصد باعث بهبود عمر خستگی شده و در مقدار ۲ درصد کاهش عمر نسبت به مخلوط شاهد نتیجه شد.

٤-٥ تحلیل رفتار خستگی بر اساس روش نسبت تغییر انرژی تلف شده (RDEC)

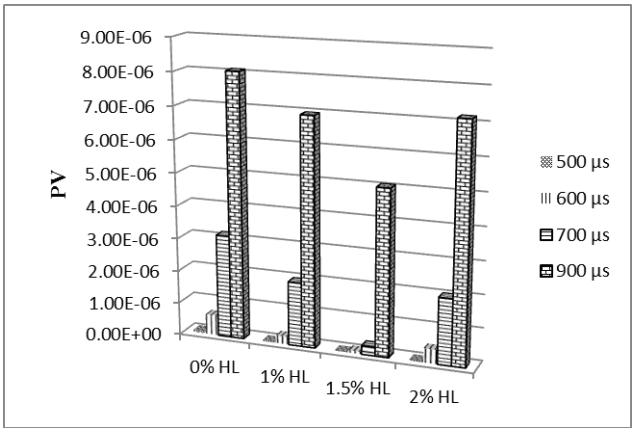
رویکرد جدیدی بر اساس روشهای انرژی تلف شده مطرح شد که به طور مستقیم به بررسی میزان انرژی تلف شده در ارتباط با ایجاد خرابی در حین بارگذاری، پرداخت. به این طریق معیار PV مطرح شد که پارامتری است از روند تغییرات انرژی تلف شده در طول سیکل بارگذاری و در واقع نشان دهنده روند تعییرات نسبتا ثابتی از انرژی تلف شده است که به طور مستقیم در ارتباط با ایجاد خرابی (ایجاد ریز ترکها) در نمونه تحت آزمایش خستگی است [Carpenter & Shen, 2005]. به عبارت دیگر هر چه مقدار PV کمتر باشد، به این معنی است که نرخ تغییرات انرژی تلف شده در طول سیکل بارگذاری کمتر بوده و بنابراین مرحله ایجاد ریزترکها در نمونه تحت آزمایش در مدت زمان زیادی به طول انجامیده که نتیجه آن افزایش عمر خستگی است (عمر خستگی ارتباط مستقیمی با سرعت ایجاد ریز ترک ها در حین



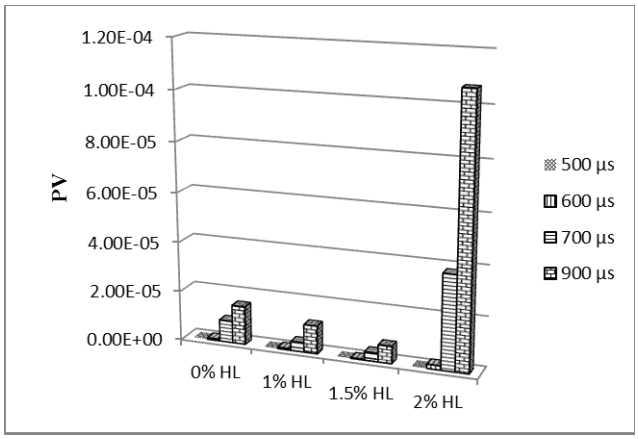
بارگذاری سیکلیک دارد). در این پژوهش نیز از رابطه پیشنهادی آنها در محاسبه PV استفاده شد. در این بخش با استفاده از مفهوم نسبت تغییر انرژی تلف شده[4] (RDEC) سعی شده است که به توجیه عمر خستگی نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف آهک هیدراته پرداخته شود. به همین جهت با استفاده از روش انرژی، نسبت تغییر انرژی تلف شده (RDEC) هر نمونه برای تمام سیکل‌ها محاسبه و ثابت خرابی[5] PV محاسبه شد. شکل‌های (۱۲) و (۱۳) به ترتیب مقادیر (PV) نمونه‌های آسفالتی حاوی مقادیر مختلف آهک هیدراته را به ازای سطوح کرنش مختلف، در شرایط بدون پیرشدگی و پیر شده در گرمخانه نشان می‌دهد. بررسی نمودارهای شکل (۱۲) و (۱۳) نشان می‌دهد که برای تمام مقادیر آهک هیدراته با افزایش میزان سطح کرنش یا به عبارت دیگر با افزایش میزان تغییر شکل‌های خمشی، ثابت خرابی (PV) افزایش می‌یابد، بخه این مفهوم که ایجاد ریز ترک‌ها با سرعت بیشتری صورت می‌گیرد. شدت افزایش ثابت خرابی بسته به نوع مخلوط و شرایط پیرشدگی متغیر است. به عبارت دیگر، ثابت خرابی وابستگی شدیدی به میزان تغییر شکل‌های خمشی دارد. در نمودار شکل (۱۲) مشاهده می‌شود که نمونه‌های حاوی آهک هیدراته مقدار (PV) کمتری نسبت به نمونه‌های شاهد در تمام سطوح کرنش دارند. بنابراین می‌توان چنین استنباط کرد که مخلوط‌های حاوی آهک هیدراته در برابر ایجاد ریزترک‌ها مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهند. بیشترین مقدار (PV) مربوط به نمونه‌های شاهد بوده و نمونه‌های حاوی ۱/۵ درصد آهک هیدراته کمترین مقدار (PV) را به خود اختصاص دادند. با افزایش میزان آهک هیدراته روند نزولی در میزان ثابت خرابی حاصل می‌شود. شکل (۱۳) نمودار ثابت خرابی نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف آهک هیدراته در شرایط پیرشدگی بلند مدت تسریع یافته آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. بجز نمونه‌های حاوی ۲ درصد آهک هیدراته، ثابت خرابی نمونه‌های حاوی ۱ و ۵/۱ درصد آهک هیدراته، کمتر از ثابت خرابی نمونه‌های شاهد هستند. بنابراین انتظار می‌رود این نمونه‌ها عمر خستگی بیشتری نسبت به نمونه‌های شاهد داشته باشند. نتایج به دست آمده از روش Rowe & Bouldin صحت این رفتار را تأیید می‌کند. بالابودن PV در مقدار ۲ درصد آهک هیدراته نشان از کاهش عمر خستگی نمونه حاوی ۲ درصد آهک هیدراته در شرایط پیرشدگی دارد. نتایج به دست آمده از عمر خستگی نمونه‌های حاوی ۲ درصد آهک هیدراته در شرایط پیرشدگی با استفاده از روش Rowe & Bouldin صحت ادعا را تأیید می‌کنند.

۵. نتیجه گیری

در این پژوهش رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر متفاوت آهک هیدراته در دو شرایط پیر نشده و پیرشده بلند



شکل ۱۲. مقایسه مقادیر ثابت خرابی (PV) نمونه‌های آسفالتی حاوی مقادیر مختلف آهک هیدراته در شرایط پیرنشده



شکل ۱۲. مقایسه مقادیر ثابت خرابی (PV) نمونه‌های آسفالتی حاوی مقادیر مختلف آهک هیدراته در شرایط پیرشده

مدت تسریع یافته آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها و بررسی رویکردهای کاهش سختی و انرژی تلف شده منجر به حصول دستاوردهایی به شرح زیر شد:

– جایگزینی آهک هیدراته به جای فیلر مصالح سنگی، افزایش سختی خمشی مخلوط‌های آسفالتی را به دنبال دارد و با افزایش میزان آهک هیدراته این روند افزایش می‌یابد.

– نتایج نشان داد که جایگزینی آهک هیدراته به جای فیلر مصالح سنگی در آزمایش تیر خمشی، کاهش زاویه اختلاف فاز مخلوط‌های آسفالتی را به دنبال دارد. با افزایش میزان آهک هیدراته زاویه اختلاف فاز کاهش می‌یابد. این به این مفهوم است که آهک هیدراته باعث افزایش رفتار الاستیک مخلوط آسفالتی می‌گردد.

– مطابقت بیشتر نتایج به دست آمده از روش های تحلیل انرژی (روش نسبت تغییر انرژی تلف شده (RDEC) و روش Rowe & Bouldin) در این تحقیق، بیانگر این واقعیت است که روشهای انرژی قابل اطمینان‌تر و دقیق‌تر از روش پیشنهادی استانداردهای خستگی خمشی (کاهش ۵۰ درصدی سختی خمشی اولیه) در تعیین عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی است.

– نتایج عمر خستگی بر اساس رویکرد Bouldin & Rowe نشان داد که در شرایط پیر نشده، عمر خستگی نمونه‌های حاوی آهک هیدراته بیشتر از نمونه‌های شاهد است و نمونه‌های حاوی ۱/۵ درصد آهک هیدراته دارای بیشترین عمر خستگی هستند. به طور متوسط بهبود در عمر خستگی به ازای مقادیر ۱، ۱/۵ و ۲ درصد آهک هیدراته به ترتیب ۳۳، ۱٤۵ و ۳۰ درصد نسبت به مخلوط شاهد نتیجه شد.

– نتایج عمر خستگی بر اساس رویکرد Bouldin & Rowe نشان داد که در شرایط پیرشدگی بلند مدت تسریع یافته آزمایشگاهی، آهک هیدراته در مقادیر ۱ و ۱/۵ درصد وزن سنگدانه‌ها بهبود در عمر خستگی را نتیجه داد و در مقدار ۲ درصد، کاهش در عمر خستگی حاصل شد. نمونه‌های حاوی ۱/۵ درصد آهک هیدراته دارای بیشترین عمر خستگی هستند. به طور متوسط بهبود در عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی به ازای مقادیر ۱و ۱/۵ درصد آهک هیدراته به ترتیب به میزان ۲۵ و ۵۰ درصد بوده و کاهش در عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی به ازای ۲ درصد آهک هیدراته به میزان ٤۰ درصد نسبت به مخلوط شاهد نتیجه شد.

٦. سپاسگزاری

از کارکنان محترم آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک وزارت راه و شهرسازی که ما را در انجام این پژوهش یاری دادند، صمیمانه قدردانی می شود.

۷. پی نوشت‌ها

1-Crack Pinning
2-Micro crack
3-Macro crack
4- Ratio of Dissipated Energy Change
5- Plateau Value

۷. مراجع

– سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، دفتر امور فنی و تدوین معیارها، وزارت راه و ترابری، مرکز تحقیقات و آموزش(۱۳۹۰) "آیین نامه روسازی آسفالتی راهای ایران" نشریه شماره ۲۳٤.

- Al-Qadi, I. L., Diefenderfer, S. and Loulizi, A. (2005) "Fatigue life characterization of superpave mixtures at the Virginia Smart Road", Virginia Transportation Research Council.

- Aragao, F. T. S., Lee, J., Kim, Y. R. and Karki, P. (2010) "Material-specific effects of hydrated lime on the properties and performance behavior of asphalt mixtures and asphaltic pavement", Journal of the Construction and Building Materials, Vol. 24, No. 2, pp. 538–544.

-Bari, J. and Witczak, M. W. (2005) "Evaluation of the effect of lime modification on the dynamic modulus stiffness of hot-mix asphalt", In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1929, No. 2, pp.10-19.

- Carpenter, S. H. and Shen, S. A. (2006) "Dissipated energy approach to study HMA healing in fatigue",

chemical interactions revisited", Journal of Materials in Civil Engineering. ASCE. March/April 2005. pp. 207-218.

-Mamlouk, M., Souliman, M. and Zeiada, W. (2012) "Optimum testing conditions to measure HMA fatigue and healing using flexural bending test", TRB Annual Meeting.

-Mohammad, Louay N, Saadeh, Shadi, Kabir, M. D., Othman, Ayman and Cooper, Sam (2008) "Mechanistic properties of hot-mix asphalt mixtures containing hydrated lime", Journal of Transportation Research Board, No. 2051, pp. 49–63.

-Rowe, G. M. (1993) "Performance of asphalt mixtures in the trapezoidal fatigue test", Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 62, pp. 344-384.

-Rowe, G. M. and Bouldin, M. G. (2000) "Improved techniques to evaluate to the fatigue resistance of asphalt mixtures" 2nd. Eurasphalt & Eurobitume Congress Barcelona, Spain.

Proceedings 85th. Annual Transportation Research Board Meeting, CDROM. Transportation Research Board of the National Academics, Washington, DC, USA.

-European Lime Association (2011) "The hydrated lime, a proven additive for durable asphalt pavements", Report to the European Lime Association, Asphalt Task Force December.

-Lee, S. (2007) "Investigation of the effects of lime on the performance of HMA using advanced testing and modeling techniques", Ph. D. Dissertation, North Carolina State University.

-Lesueur, D. and Little, D. N. (1999) "Effect of hydrated lime on rheology, fracture and aging of bitumen" Transportation Research Record No. 1661, pp. 93-105.

-Little, D. N. and Petersen, J. C. (2005) "Unique effects of hydrated lime filler on the performance-related properties of asphalt cements: Physical and