

ارزیابی آزمایشگاهی مدول برجهندگی و خزش دینامیکی مخلوط آسفالتی مسلح شده با الیاف ترکیبی پلی الفین و آرامید فورتا

علیرضا غنی زاده، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران
بهنام سلاجقه، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد واحد شاهرود، شاهرود، ایران
مرتضی رهروان، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران
پست الکترونیکی نویسنده مسئول: ghanizadeh@sirjantech.ac.ir

دریافت: 94/02/14 - پذیرش: 94/07/15

چکیده

با توجه به هزینه‌های زیاد تولید مخلوط آسفالتی استفاده از افزودنی در مخلوط‌های آسفالتی به منظور افزایش دوام و بهبود عملکرد آن امری ضروری است. در تحقیق حاضر درصد‌های مختلف الیاف ترکیبی پلی الفین و آرامید فورتا به مخلوط آسفالتی اضافه و آزمایش مدول برجهندگی در دو دمای مختلف و آزمایش خزش دینامیکی در دو شکل بارگذاری مختلف انجام شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که افزودن الیاف فورتا باعث افزایش سختی و مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی می‌شود. افزودن 1/5 کیلوگرم الیاف در هر تن آسفالت سبب می‌شود تا مدول برجهندگی در دو دمای 25 و 40 درجه سانتی‌گراد به ترتیب به میزان 62 و 242 درصد افزایش یابد؛ بنابراین ملاحظه می‌شود که افزایش سختی مخلوط‌های آسفالتی مسلح شده در دمای بالاتر (40 درجه سانتی‌گراد)، مشهودتر از دمای متوسط (25 درجه سانتی‌گراد) است. همچنین مشاهده گردید که افزایش 1/5 کیلوگرم الیاف به مخلوط آسفالتی سبب می‌شود تا عدد جریان نسبت به مخلوط آسفالتی اصلاح نشده به میزان دو برابر افزایش یابد. مقایسه نمودار خزش برای دو شکل پالس بارگذاری نیم‌سینوسی و مربعی نشان داد که عدد جریان و شیب مرحله دوم نمودار خزش برای شکل پالس نیم‌سینوسی به ترتیب حدود دو برابر و نصف مقادیر نظیر برای شکل پالس مربعی با همان فرکانس بارگذاری است.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالتی، الیاف پلی الفین و آرامید فورتا، مدول برجهندگی، خزش دینامیکی، شکل بارگذاری

1- مقدمه

مخلوط آسفالتی به اوایل دهه 1960 برمی‌گردد (Mahrez et al., 2003).

الیاف با تغییر در مشخصات ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی باعث بهبود رفتار آن می‌شوند (Huang and White, 1996; Shaopeng et al., 2008). الیاف به چهار دسته کلی شامل الیاف طبیعی، معدنی، فولادی و پلیمری تقسیم می‌شوند (فخری، 1385). همچنین الیاف به لحاظ اندازه به دو گروه ریز و درشت تقسیم می‌شوند (نیکوروش راد، 1384). به‌طورکلی استفاده از الیاف در

مخلوط آسفالتی با گذشت زمان و تحت تأثیر ترافیک و دما دچار خرابی‌های متعددی از جمله تغییر شکل ماندگار و ترک‌های خستگی می‌شود. افزودنی‌های مختلفی برای اصلاح خواص مخلوط آسفالتی و افزایش دوام آن‌ها وجود دارد. یکی از افزودنی‌های مخلوط آسفالتی الیاف است. استفاده از الیاف به زمان‌های گذشته برمی‌گردد، در ساخت دیوار چین بیش از 2000 سال قبل، از الیاف استفاده شده است (Hongu and Philips, 1990). با این‌وجود توسعه الیاف به‌عنوان یک مسلح کننده در

مخلوط آسفالتی با سه هدف زیر انجام می‌شود (حجازی و همکاران، 1387):

- 1- ارتقای خواص مکانیکی سازه آسفالتی
 - 2- آسفالت مکانی مناسبی برای دفن ضایعات است
 - 3- افزایش هدایت الکتریکی آسفالت به منظور تسهیل ذوب کردن یخ و برف سطح راه.
- انواع مختلفی از الیاف برای افزودن به مخلوط آسفالتی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به الیاف پلی‌استر، الیاف آزبستی، الیاف شیشه‌ای، الیاف پلی‌پروپیلن، الیاف کربنی و الیاف سلولوزی اشاره نمود (Serfass and Samanos, 1996).

کاربرد اصلی الیاف ایجاد مقاومت کششی بیشتر در مخلوط است که می‌تواند میزان کرنش در طول خستگی و شکست را افزایش دهد. به عبارت دیگر وجود الیاف در مخلوط آسفالتی باعث افزایش مقاومت در برابر ترک‌های خستگی می‌شود (Brown et al., 1990; Mahrez et al., 2003; Bueno et al., 2003; Lee et al., 2005; Mahrez et al., 2005; Jahromi and Khodaii, 2008; Oda et al., 2012). از دیگر مزایای افزودن الیاف می‌توان به افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده در برابر رطوبت و افزایش مقاومت در برابر ذوب و یخبندان اشاره نمود. افزودن الیاف همچنین باعث می‌شود که مخلوط اصلاح‌شده جذب انرژی بیشتری داشته و از این رو ترک‌های انعکاسی در آسفالت کاهش می‌یابد (Jiang and McDaniel, 1993; Echols, 1989; Maurer and Malasheskie, 1989; Putman and Amirkhanian, 2004; Wu et al., 2007; Tapkin, 2008; Taherkhani and Amini, 2016).

شیار شدگی و مدول برجهنگی دو پارامتر مهم مخلوط آسفالتی می‌باشند که با افزودن الیاف به مخلوط آسفالتی بهبود می‌یابند (Simpson et al., 1994; Serfass and Samanos, 1996; Chen et al., 2004; Najd et al., 2005; Kamal et al., 2005; Wu et al., 2007; Su and Yoshitaka, 2008; abtahi et al., 2009; Tapkin et al., 2009; Yusoff et al., 2014).

مدول دینامیک و شیارشدگی مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با الیاف سلولوزی، پلی‌استر و الیاف معدنی به‌عنوان افزودنی توسط وو و همکاران (2007) مورد

بررسی قرار گرفته است. میزان افزوده‌شده الیاف سلولوزی، پلی‌استر و الیاف معدنی به ترتیب برابر $0/2\%$ ، $0/3\%$ و $0/4\%$ بوده است. آزمایش مدول دینامیک در دماها و فرکانس‌های مختلف نشان می‌دهد که مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با الیاف در مقایسه با مخلوط اصلاح‌نشده مدول دینامیک بیشتری دارد. میزان شیار شدگی مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با افزودن الیاف نامبرده به ترتیب $1/12$ ، $1/14$ و $1/24$ برابر آسفالت اصلاح‌نشده است (Wu et al., 2007).

ابطحی و همکاران (2009) تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن و SBS بر روی مشخصات بتن آسفالتی را مورد ارزیابی قرار دادند. میزان الیاف پلی‌پروپیلن $0/125$ درصد و طول آن‌ها 12 میلی‌متر بوده است. نتایج نشان می‌دهد که مدول برجهنگی مخلوط آسفالتی شامل پلی‌پروپیلن از SBS به‌طور مطلوبی بیشتر است (Abtahi et al., 2009).

تاپکین و همکاران (2009) از الیاف پلی‌پروپیلن به طول 3 میلی‌متر و مقدار $0/3$ درصد برای اصلاح مخلوط آسفالتی (روش‌تر) استفاده نمودند. سرعت اختلاط، زمان و دما به ترتیب برابر 500 دور در دقیقه، 2 ساعت و 163 درجه سانتی‌گراد بوده است. نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌های اصلاح‌شده با پلی‌پروپیلن تحت بارگذاری خزش تکراری در الگوهای بارگذاری مختلف 5 تا 12 برابر نمونه‌های کنترلی بهبودیافته‌اند (Tapkin et al., 2009).

غدیر (2014) به کمک دستگاه WTD^1 به ارزیابی شیارشدگی و مدول برجهنگی مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با پلی‌پروپیلن پرداخت. این آزمایش در دماهای 40 ، 50 ، 55 و 60 درجه سانتی‌گراد و تحت 10000 عبور بارمحوری 700 کیلو نیوتون بوده است. میزان الیاف $0/5$ درصد وزن مخلوط بوده است. مشخص شد افزودن الیاف پلی‌پروپیلن مقاومت در برابر شیارشدگی را در دماهای بالا افزایش داده و در دمای پایین (40 درجه سانتی‌گراد) تأثیری در بهبود شیارشدگی آسفالت ندارد و بیشترین تأثیر در دمای 60 درجه بوده است. همچنین در

دمای بالا این الیاف مدول برجهندگی را نیز افزایش می-دهند (Qadir, 2014).

لواسانی در سال 1390 نشان داد که افزودن الیاف معدنی و آلی سبب بهبود خواص خزشی و مدول برجهندگی شده و پس از رسیدن به درصد الیاف بهینه، حجم بالای الیاف سبب نرم شدن نمونه و در نتیجه کاهش خصوصیات مقاومتی و خزشی آن می شود و به طور کل با افزایش دما درصد بهینه الیاف افزایش می یابد.

الیاف ترکیبی فورتا مرکب از الیاف پلی پروپیلن و آرامید برای افزودن به مخلوط آسفالتی توسط برخی محققین استفاده شده است.

در تحقیقی در دانشگاه آریزونا (Arizona State University) کالوش و همکاران (2010) عملکرد مخلوط آسفالتی را با مقادیر مختلف الیاف پلی الفین- آرامید فورتا بررسی کردند. آزمایش تغییر شکل ماندگار در دمای 130 درجه فارنهایت و با شکل بارگذاری نیمه سینوسی انجام شده است. مقدار الیاف افزوده به مخلوط آسفالتی برابر 1 و 2 پوند در تن بوده است. نتایج آزمایش تغییر شکل ماندگار برای مخلوط اصلاح شده با الیاف فورتا نشان می-دهد که عدد جریان برای مخلوط اصلاح شده با 1 و 2 تن الیاف به ترتیب 115 و 20 برابر بیشتر از نمونه کنترلی بوده است. همچنین شیب منحنی مرحله دوم نمودار تغییر شکل ماندگار با افزایش الیاف کاهش می یابد و لذا مقاومت در برابر شیارشدگی با افزایش الیاف بیشتر می شود. آزمایش مدول دینامیک بر روی نمونه های اصلاح شده در دمای 14، 40، 70، 100 و 130 درجه فارنهایت با میزان الیاف 1 و 2 پوند در تن انجام شده است. نتایج نشان می-دهد بیشترین مدول دینامیک در مقدار 1 پوند الیاف به دست می آید و همچنین افزایش دما باعث کاهش مدول دینامیک می شود (Kaloush et al., 2010).

فضایلی^۲ و همکاران (2016) به بررسی عملکرد مخلوط آسفالت ولرم شامل ساسوبیت و الیاف پلی الفین- آرامید فورتا در لایه روکش جاده کرج- چالوس پرداختند.

میزان الیاف برابر 0/5 کیلوگرم در تن و میزان ساسوبیت برابر 2 درصد قیر بوده است. نتایج این تحقیقات کاهش قابل ملاحظه تغییر شکل ماندگار در دمای بالا به میزان 2 تا 4 برابر نمونه اصلاح نشده و کاهش 30 درصدی شیارشدگی را نشان می دهد. مدول برجهندگی نمونه اصلاح شده در دمای 25 درجه سانتی گراد و بارگذاری نیمه سینوسی اندازه گرفته شده است. این تحقیق نشان می دهد که مدول برجهندگی نمونه اصلاح شده به میزان 92 درصد نمونه اصلاح نشده بهبود می یابد (Fazaeli et al., 2016).

هدف تحقیق حاضر بررسی تأثیر دما، درصد الیاف و شکل بارگذاری بر عملکرد مخلوط آسفالتی مسلح شده با الیاف ترکیبی فورتا است. بدین منظور تأثیر درصدهای مختلف الیاف فورتا در دماهای مختلف بر مدول برجهندگی و همچنین اثر درصدهای مختلف الیاف و شکل های بارگذاری نیمه سینوسی و مربعی بر خزش دینامیکی مخلوط های آسفالتی بررسی شده است.

3- کارهای آزمایشگاهی

در تحقیق حاضر ابتدا آزمایش های رایج شناسایی مصالح انجام شده است. سپس طرح اختلاط مخلوط آسفالتی با استفاده از روش مارشال و تراکم نمونه ها با 75 ضربه انجام شد. پس از آن مدول برجهندگی مخلوط آسفالت مسلح شده با الیاف ترکیبی پلی الفین و آرامید فورتا از طریق آزمایش کشش غیرمستقیم با استفاده از دستگاه بارگذاری یونیورسال UTM اندازه گیری شده است. مدول برجهندگی مطابق استاندارد ASTM-D4123 در دو دمای مختلف 25 و 40 درجه سانتی گراد با مقدار الیاف 0، 0/5، 0/9 و 1/5 کیلوگرم در تن با شکل بارگذاری نیمه سینوسی اندازه گیری شده است. همچنین آزمایش خزش دینامیکی مطابق استاندارد European: prEN 12697 25a - به منظور بررسی پتانسیل شیار شدگی و تغییر شکل های دائمی مخلوط های آسفالتی انجام شده است.

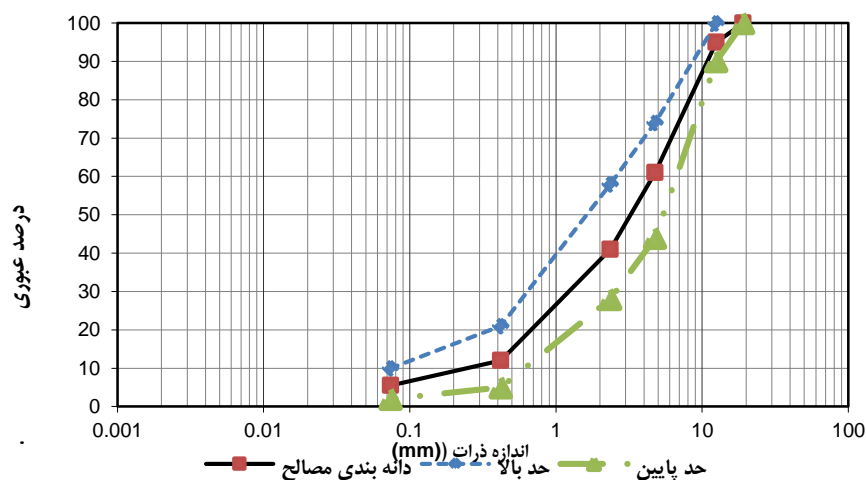
آزمایش خزش دینامیکی با دو شکل بارگذاری نیمه- سینوسی و مربعی در دمای 60 درجه سانتی‌گراد با افزودن

3-1- مصالح

3-1-1- سنگدانه

دانه‌بندی مصالح سنگی بر اساس استاندارد T27 - AASHTO و همچنین با روش شستشو برای مصالح سنگی ریزدانه انجام پذیرفت. علاوه بر این بر روی نمونه فیلر استحصالی آزمایش دانه‌بندی و آزمایش هیدرومتری به روش AASHTO- T 88 انجام شده است.

در این تحقیق مخلوط مصالح سنگی از نوع مصالح رودخانه‌ای با حداکثر اندازه 19 میلی‌متر منطبق بر محدوده تیپ 4 دانه‌بندی نشریه 234 برای قشر بیندر و توپکا انتخاب گردید. نمودار دانه‌بندی مصالح سنگدانه‌ای در شکل 1 ارائه شده است. همچنین در جداول 1 و 2 مشخصات مصالح سنگی داده شده است.



شکل 1. نمودار دانه‌بندی مخلوط مصالح سنگی

جدول 1. مشخصات مصالح سنگی

نتیجه آزمایش		مشخصه
مصالح سنگی درشت دانه		
C	نوع دانه‌بندی	افت وزنی در مقابل سایش به روش لوس آنجلس (درصد) (AASHTO-T96)
500	تعداد دور	
22	درصد سایش	
13	تطویل	تطویل و تورق (درصد) (BS-812)
17	تورق	
100	در یک جبهه	شکستگی مصالح سنگی روی الک شماره 4 (درصد) (ASTM-D5821)
98	در دو جبهه	
مصالح سنگی ریزدانه		
NP	دامنه خمیری (PI)	حدود اتربرگ (AASHTO-T89,90)
-	حد خمیری (PL)	
غیر قابل تعیین	حد روانی (LL)	
73		ارزش ماسه‌ای (AASHTO-T176)
فیلر مصالح سنگی		
NP	دامنه خمیری (PI)	حدود اتربرگ

-	حد خمیری (PL)	(AASHTO-T89,90)
غیر قابل تعیین	حد روانی (LL)	

جدول 2. وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی

درصد جذب آب	وزن مخصوص		استاندارد	مشخصه
	حقیقی	ظاهری		
0/9	2/628	2/694	AASHTO-T85	مصالح سنگی مانده روی الک شماره 8
1/3	2/625	2/72	AASHTO-T84	مصالح سنگی رد شده از الک شماره 8 و مانده روی الک شماره 200
-	2/733		AASHTO-T100	مصالح سنگی رد شده از الک شماره 200
	2/631			وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی، G _{sb}

3-1-2- قیر

الیاف آرامید است. الیاف پلی الفین موجود در ترکیب در محدوده دمای آسفالت ذوب می‌شوند و به همین دلیل به عنوان اصلاح کننده قیر عمل می‌کنند. الیاف آرامید به دلیل مقاومت کششی بالا در آسفالت به عنوان مسلح کننده سه بعدی مخلوط می‌باشند و به افزایش مقاومت مخلوط کمک می‌کنند (Kaloush et al., 2010). در جدول 4 ویژگی‌های فیزیکی این الیاف داده شده است. همچنین شکل ظاهری این الیاف در شکل 2 نشان داده شده است.

قیر مورد استفاده در این تحقیق از نوع قیر خالص 60-70 است که از پالایشگاه نفت جی اصفهان تهیه شده است. در جدول 3 مشخصات قیر مصرفی داده شده است. همچنین مشخصات قیر با مشخصات استاندارد نشریه 234 مقایسه شده است.

3-1-3- الیاف پلی الفین و آرامید فورتا

الیاف مورد استفاده در این مطالعه تولید شده توسط شرکت فورتا در آمریکا است که ترکیبی از پلی الفین و

جدول 3. نتایج آزمایش‌های قیر خالص

مشخصات استاندارد	نتایج		روش آزمایش	آزمایش‌های قیرهای خالص
	حداقل	حداکثر		
	60	66	T49 AASHTO	درجه نفوذ در 25 ^o (100 گرم-5 ثانیه)
	49	47/8	AASHTO T53	نقطه نرمی برحسب درجه سانتی گراد
	100	100	AASHTO T51	مقدار کشش در 25 درجه سانتی گراد
	99	99/5	AASHTO T44	حلالیت در تری کلرو اتیلن
	232	308	AASHTO T48	درجه اشتعال (رو باز-کلوند) برحسب درجه سانتی گراد
0/8	-	0/04	AASHTO T201	فرآیند اون لایه نازک قیر، تغییر جرم اولیه (درصد) در 163 درجه سانتی گراد-5 ساعت

جدول 4. ویژگی‌های فیزیکی الیاف ترکیبی فورتا فای

آرامید	پلی آلفین	مواد
تک رشته	رشته‌های بهم بافته شده و تک رشته	شکل
1/44	0/91	وزن مخصوص
400000	70000	مقاومت کششی (psi)
19	19	طول (میلی‌متر)
زرد	مشکی	رنگ
بی‌اثر	بی‌اثر	مقاومت اسیدی/ بازی
427	100	دمای ذوب (درجه سانتی‌گراد)



شکل 2. الیاف فورتا

3-2- طرح اختلاط

مخلوط آسفالتی متراکم (Air Voids)، درصد فضای خالی مخلوط مصالح سنگی (V.M.A) و درصد فضای خالی مخلوط مصالح سنگی پر شده با قیر (V.F.A) با استناد به محاسبات مندرج در نشریه 2- MS انستیتو آسفالت محاسبه گردید.

مقدار درصد قیر بهینه مخلوط آسفالتی قشر بیندر 0-19 میلی‌متر، با توجه مندرجات نشریه 234 و نشریه 2- MS انستیتو آسفالت، با توجه به درصد قیر نظیر فضای خالی 3 الی 6 درصد، برابر با 4/4 درصد تعیین شد. مقادیر

طرح اختلاط مخلوط آسفالتی با استفاده از روش مارشال انجام شد. برای این منظور، نمونه‌های مخلوط آسفالتی با درصدهای مختلف قیر، با اعمال 75 ضربه به هر طرف نمونه، با استفاده از قیر 60-70 به روش مارشال تهیه شدند. وزن مخصوص نمونه‌های مخلوط آسفالتی متراکم بر اساس استاندارد AASHTO:T 166 استحکام و روانی نمونه‌ها با استناد به روش AASHTO:T 245 و حداکثر وزن مخصوص تئوری بر اساس روش استاندارد AASHTO:T209 تعیین گردید. درصد فضای خالی

پارامترهای طرح اختلاط به ازاء درصد قیر بهینه در جدول (5) داده شده است.

جدول 5. پارامترهای مخلوط آسفالتی به ازاء درصد قیر بهینه

استاندارد	مقدار	پارامتر
6-3	4/5	درصد فضای خالی
حدافل 13/5	14/38	درصد فضای خالی مخلوط مصالح سنگی (V.M.A)
75-60	66	درصد فضای خالی مخلوط مصالح سنگی پر شده با قیر (V.F.A)
3/5-2	2/6	روانی (mm)
-	2357	وزن مخصوص (kg/m ³)
حدافل 800	1280	استقامت مارشال (kg)

منظور حفظ رفتار ویسکوالاستیک خطی به ترتیب برابر 15 و 5 درصد مقاومت کششی غیرمستقیم (1320 و 440 نیوتون) انتخاب شد (AASHTO-TP31). همچنین در این آزمایش تعداد سیکل‌های پیش‌بارگذاری برابر با 200 سیکل انتخاب شد.

به منظور حذف اثرات نحوه‌ی ساخت و تراکم، هر نمونه باید دو بار تحت آزمایش مدول برجهندگی قرار گیرد. ابتدا در راستای اول آزمایش انجام می‌شود و سپس نمونه در نوبت دوم به اندازه 90 درجه چرخانده شده و آزمایش مجدداً انجام می‌شود. مقدار میانگین دو آزمایش به عنوان مقدار مدول برجهندگی گزارش می‌شود. جهت تعیین مقدار مدول برجهندگی از رابطه‌ی (1) استفاده می‌شود:

$$M_R = \frac{P \times (v + 0.27)}{t \times \Delta H} \quad (1)$$

که در آن:

MR: مدول برجهندگی بر حسب مگاپاسکال (MPa)،

P: بار تکراری بر حسب نیوتن (N)،

v: نسبت پواسون،

t: ضخامت نمونه بر حسب میلی‌متر،

و ΔH : تغییرشکل برگشت‌پذیر افقی بر حسب میلی‌متر

نسبت متوسط استحکام سه نمونه آزمایشگاهی مارشال مخلوط آسفالتی که 24 ساعت در شرایط مستغرق در داخل آب 1 ± 60 درجه سانتی‌گراد قرار گرفته به متوسط استحکام سه نمونه دیگر با همان وزن واحد حجم و درصد قیر که 30 تا 40 دقیقه در داخل آب با همان دما قرار گرفته است، برابر با 0/87 به دست آمد. شایان‌ذکر است که بر اساس توصیه نشریه 234 این نسبت نباید کمتر از 0/75 باشد. برای ساخت نمونه‌های مسلح شده با الیاف، ابتدا الیاف به مصالح سنگی اضافه و پس از مخلوط شدن با مصالح سنگی قیر به مصالح اضافه شد.

3-3- آزمایش مدول برجهندگی

در تحقیق حاضر آزمایش کشش غیرمستقیم طبق استاندارد AASHTO-TP31 توسط دستگاه UTM انجام شده است (شکل 3). شکل بارگذاری به صورت نیم‌سینوسی، زمان بارگذاری برابر با 0/1 ثانیه و زمان استراحت برابر با 0/9 ثانیه در نظر گرفته شد.

آزمایش مدول برجهندگی در دو دمای 25 و 40 درجه سانتی‌گراد انجام شد و مقدار بار اعمال شده به

است.

مقدار نسبت پواسون برای دو دمای 25 و 40 درجه سانتی‌گراد به ترتیب برابر با 0/35 و 0/4 در نظر گرفته شده است (ARA, 2004).

4- نتایج و بحث

4-1- نتایج آزمایش مدول برجهندگی

شکل 5 نتایج آزمایش مدول برجهندگی را در دو دمای 25 و 40 درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد.

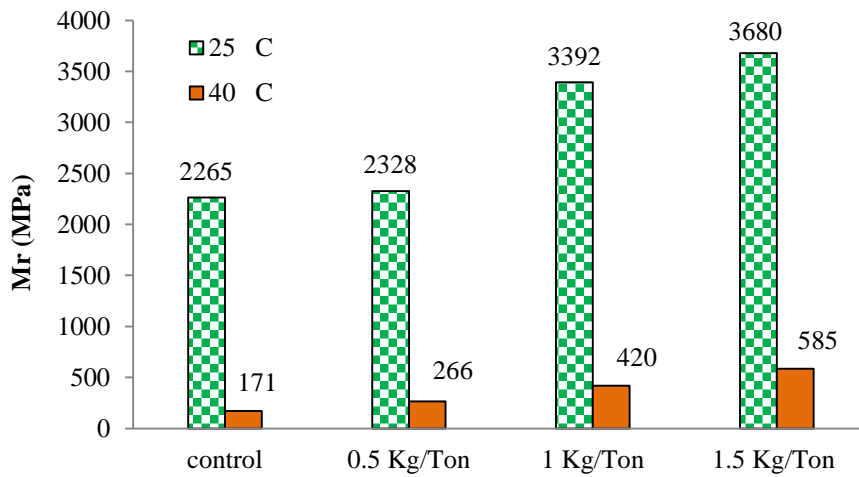
شکل 6 درصد افزایش مدول برجهندگی نمونه‌های اصلاح‌شده نسبت به نمونه‌های اصلاح نشده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود با افزایش مقدار الیاف در مخلوط آسفالتی، مدول برجهندگی نیز افزایش می‌یابد که این یافته با تحقیقات گذشته هم‌خوانی دارد (Kaloush et al., 2010; Alrajhi, 2012; Fazaeli et al., 2016). مقایسه نتایج آزمایش مدول برجهندگی نمونه‌های مخلوط آسفالتی در دمای 25 و 40 درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد که با افزایش دما، مدول برجهندگی برای کلیه مخلوط‌ها به‌طور چشمگیری کاهش پیدا می‌کند. لذا اثر دما در تغییرات مدول برجهندگی بیشتر از درصد الیاف است. شکل 7 مقدار درصد کاهش مدول برجهندگی برای مخلوط‌های آسفالتی مختلف را با افزایش دما از 25 درجه سانتی‌گراد به 40 درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که کاهش مدول برجهندگی با افزایش دما از 25 به 40 درجه سانتی‌گراد برای نمونه اصلاح‌نشده در مقایسه با نمونه‌های اصلاح‌شده کمتر است. همچنین با افزایش میزان الیاف در مخلوط آسفالتی، کاهش مدول برجهندگی با افزایش دما یا به عبارت دیگر حساسیت دمایی مخلوط آسفالتی، کاهش می‌یابد. از آنجائی که تفاوت مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی در درصدهای الیاف متفاوت در دمای 40 درجه سانتی‌گراد به‌مراتب بیشتر از دمای 25 درجه سانتی‌گراد است، لذا در دمای بالا، تأثیر الیاف در افزایش نرخ مدول برجهندگی بیشتر است.



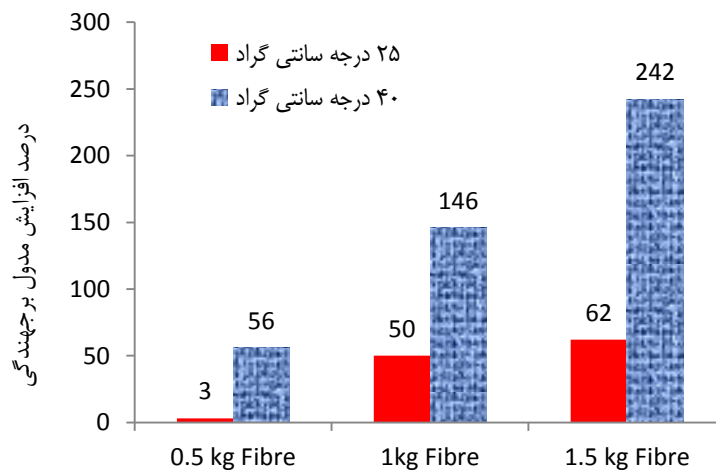
شکل 3. آزمایش کشش غیر مستقیم به منظور تعیین مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی

3-4- آزمایش خزش دینامیک

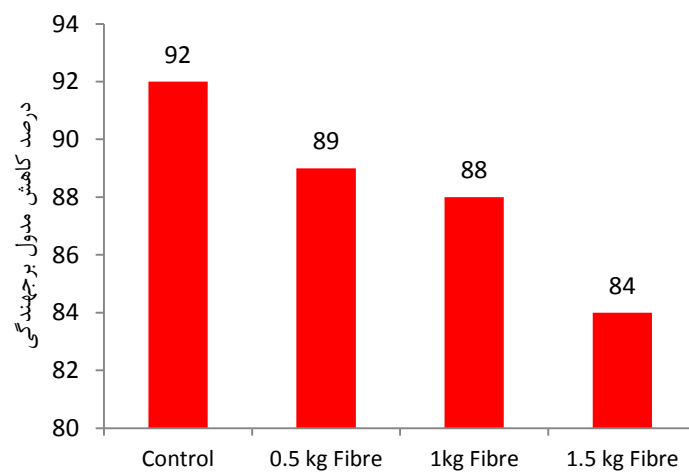
آزمایش خزش دینامیکی طبق استاندارد European: prEN 12697 - 25a با دستگاه UTM انجام شده است. در این تحقیق به‌منظور انجام آزمایش خزش دینامیک، بارگذاری بر روی نمونه‌های شاهد و مسلح شده با الیاف فورتافای به قطر 100 میلی‌متر و ارتفاع 65 میلی‌متر با شکل بارگذاری نیمه سینوسی و مربعی با 0/1 ثانیه بارگذاری و 0/1 ثانیه زمان استراحت انجام شد. آزمایش‌های خزش دینامیکی در دمای 60 درجه سانتی‌گراد انجام شدند. همچنین تنش انحرافی در این آزمایش برابر با 300 kPa در نظر گرفته شد.



شکل 5. نتایج آزمایش مدول برجهندگی



شکل 6. درصد افزایش مدول برجهندگی نسبت به نمونه اصلاح نشده

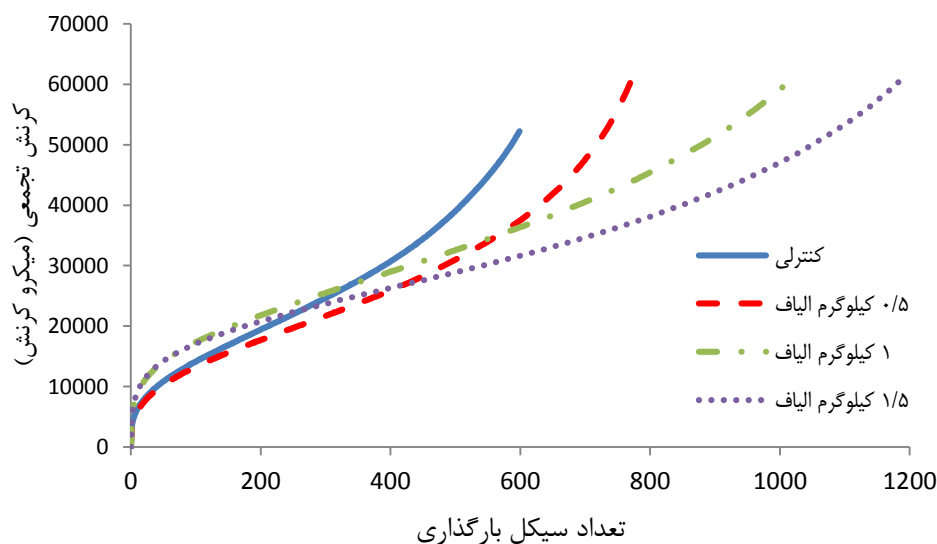


شکل 7. درصد کاهش مدول برجهندگی با افزایش دما از 25 به 40 درجه سانتی گراد

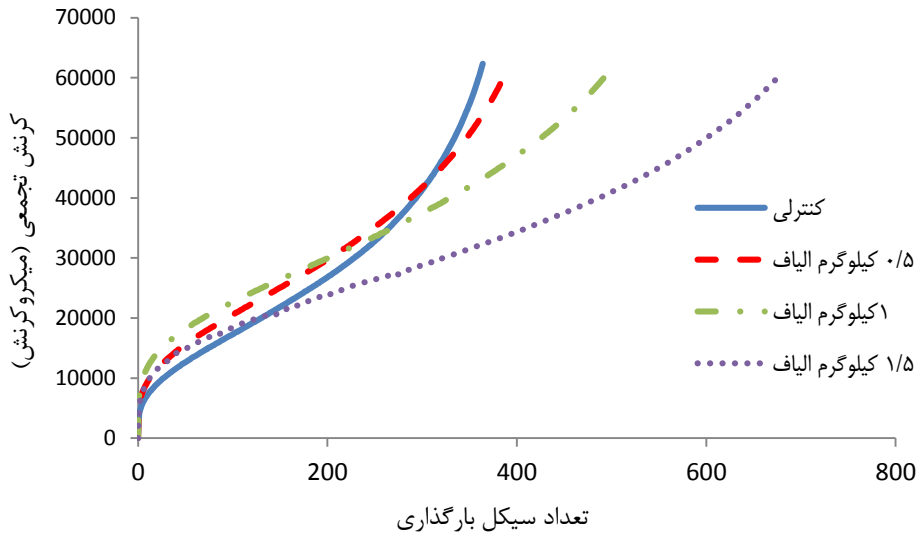
4-2- نتایج آزمایش خزش دینامیکی

شکل‌های 8 و 9 نتایج آزمایش خزش دینامیکی را بر روی نمونه‌های شاهد و اصلاح‌شده به ترتیب برای دو شکل بارگذاری نیم‌سینوسی و مربعی نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود در کلیه نمونه‌ها افزودن الیاف باعث افزایش چشمگیر مقاومت نمونه‌ها در مقابل تغییر شکل‌های دائمی می‌شود. مطلب بیان شده با بسیاری از تحقیقات گذشته هم‌خوانی دارد (Wu et al., 2007; Tapkin et al., 2009; Kaloush et al., 2010; Qadir, 2014). مخلوط آسفالتی مسلح شده با 1/5 کیلوگرم الیاف فورتافای در تن بیشترین استحکام شیار شدگی را در بین چهار مخلوط دارد و این بدین مفهوم است که این مخلوط بیشترین تعداد سیکل بارگذاری را تا رسیدن به ناحیه تسلیم شیارشدگی یا ناحیه سوم خزش تحمل می‌کند. بعدازآن به ترتیب مخلوط‌های مسلح شده با یک و سپس نیم کیلوگرم الیاف درای بیشترین استحکام شیار شدگی می‌باشند.

از مقایسه درصد افزایش مدول برجهندگی نمونه‌های کنترلی با نمونه‌های مسلح شده نتیجه گرفته می‌شود که مسلح نمودن آسفالت با 0/5 کیلوگرم الیاف در تن، تأثیر چندانی بر مدول برجهندگی در دمای 25 درجه سانتی‌گراد ندارد. درحالی‌که افزودن این مقدار الیاف در دمای 40 درجه سانتی‌گراد، سبب افزایش مدول برجهندگی به میزان 56 درصد می‌شود. همان‌طور که بیان شد مقدار افزایش مدول برجهندگی با افزایش درصد الیاف در دمای 40 درجه سانتی‌گراد بسیار بیشتر از مقدار این تغییرات در دمای 25 درجه سانتی‌گراد است. علت این موضوع این است که در دماهای متوسط و خصوصاً دماهای پایین، رفتار قیر نزدیک به رفتار ارتجاعی است و مشخصات ویسکوز قیر تأثیر چندانی بر پاسخ‌های مخلوط آسفالتی ندارد. در دماهای بالا، رفتار ویسکوز قیر افزایش می‌یابد و بنابراین پاسخ‌های قیر به شدت تابع دما و نرخ بارگذاری است و می‌توان انتظار داشت که در این حالت وجود الیاف باعث تأثیر قابل ملاحظه در سختی قیر شود.



شکل 8. نمودار تغییر شکل - سیکل بارگذاری برای مخلوط‌های مختلف در دمای 60 درجه سانتی‌گراد با شکل بارگذاری نیمه سینوسی



شکل 9. نمودار تغییر شکل - سیکل بارگذاری برای مخلوط‌های مختلف با الیاف فورتافای در دمای 60 درجه سانتی‌گراد با شکل بارگذاری مربعی

به شروع مرحله دوم، ϵ_{st} کرنش دائمی مربوط به شروع مرحله سوم، N تعداد سیکل، N_{ps} تعداد سیکل مربوط به شروع مرحله دوم، N_{st} تعداد سیکل مربوط به شروع مرحله سوم و a ، b ، c و d ضرایب ثابت معادله می‌باشند که روش تعیین آنها از طریق رگرسیون خطی توسط ژائو و همکاران شرح داده شده است.

در شکل 11 عدد روانی (F_N) در دمای 60 درجه سانتی‌گراد برای مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده و اصلاح‌نشده را نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود افزایش الیاف باعث بیشتر شدن عدد جریان می‌شود که این با تحقیق کالوش و همکاران (2010) مطابقت دارد. مقادیر عدد جریان به دست آمده در شکل بارگذاری مربعی از نیم‌سینوسی کمتر است.

نمودار خزش دینامیکی مطابق شکل (10) به سه قسمت قابل تفکیک است. نقطه آغاز قسمت سوم نمودار خزش، عدد جریان (F_N) نامیده می‌شود. عدد جریان عبارتست از تعداد سیکل بارگذاری که سبب می‌شود تا مخلوط آسفالتی بدون تغییرات حجم دچار تغییر شکل برشی شود. در تحقیق حاضر برای تعیین عدد جریان از مدل تغییر شکل ماندگار سه‌بخشی که توسط ژائو و همکاران ارائه شده است، استفاده گردید (Zhou et al, 2004). ژائو و همکاران یک مدل ریاضی سه ضابطه‌ای را برای مدلسازی نمودار خزش دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی پیشنهاد نمودند. بر طبق این مدل، مراحل اول، دوم و سوم خزش با استفاده از روابط زیر قابل مدلسازی است.

مرحله اول:

$$\epsilon_p = aN^b \quad (1)$$

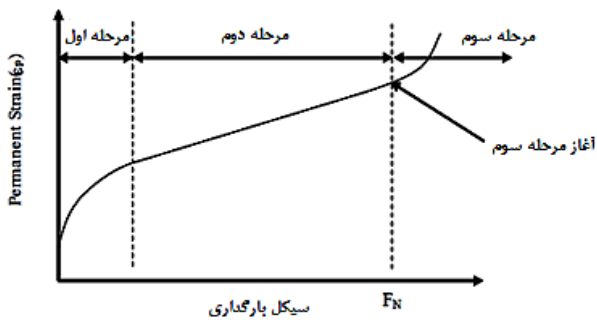
مرحله دوم:

$$N_{ps} \leq N \leq N_{st} \quad (2)$$

مرحله سوم:

$$\epsilon_p = \epsilon_{ST} + d(e^{f(N-N_{st})} - 1) \quad N \geq N_{st} \quad (3)$$

که در این روابط ϵ_p کرنش دائمی، ϵ_{ps} کرنش دائمی مربوط



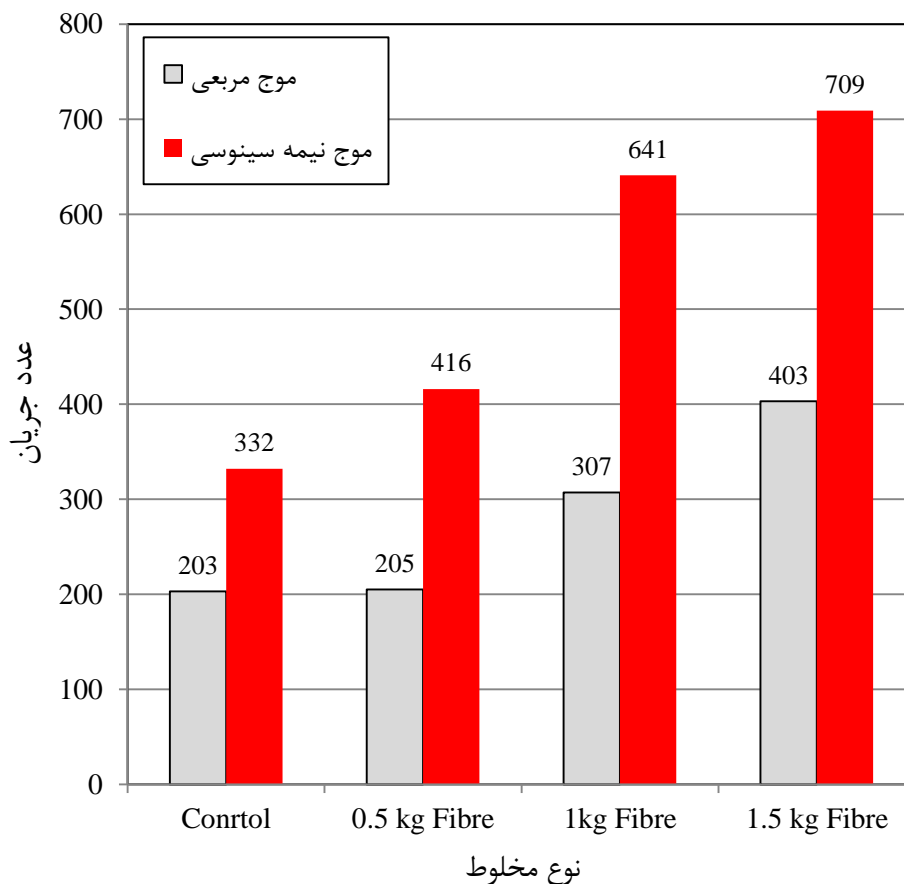
شکل 10. عدد جریان

مخلوط آسفالتی، میزان استحکام شیار شدگی از 203 سیکل به ترتیب 205، 307 و 403 سیکل افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر با افزایش الیاف به میزان 0/5، 1 و 1/5 کیلوگرم در تن استحکام شیار شدگی به ترتیب 1، 51 و 98 درصد افزایش می‌یابد.

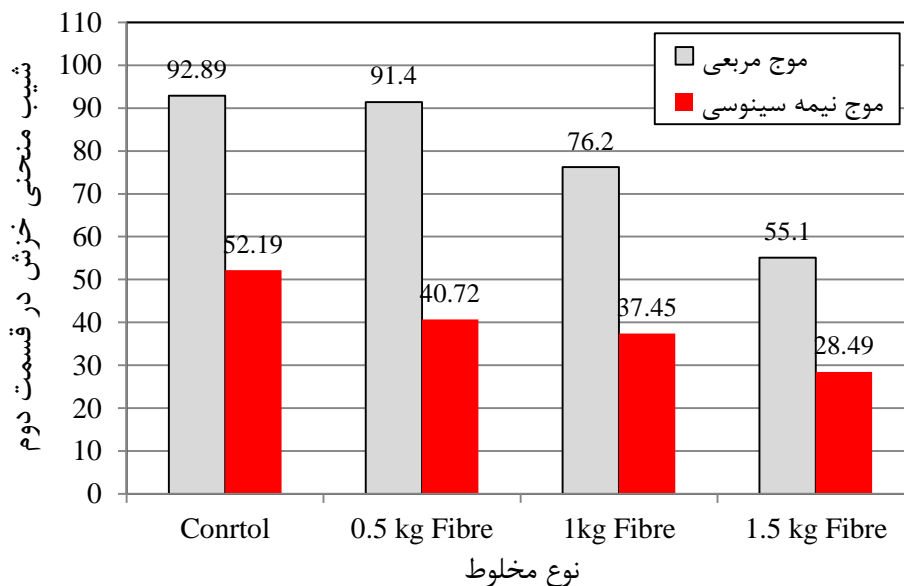
در بارگذاری با شکل موج نیمه سینوسی با افزایش 0/5، 1 و 1/5 کیلوگرم الیاف در تن، میزان استحکام شیار شدگی از 332 سیکل به ترتیب به 416، 641 و 709 سیکل افزایش یافت. به عبارت دیگر با افزایش الیاف به میزان 0/5، 1 و 1/5 کیلوگرم در تن استحکام شیار شدگی به ترتیب 25، 93 و 114 درصد افزایش می‌یابد.

شیب نمودار خزش در مرحله دوم (ضریب c) معرف نرخ افزایش تغییر شکل‌های ماندگار است. این مقدار در شکل 12 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش میزان الیاف نرخ افزایش تغییر شکل ماندگار روند کاهشی دارد کالوش و همکاران (2010) در تحقیقی به نتایج مشابه دست یافتند. همچنین ملاحظه می‌شود که بارگذاری به شکل مربعی در مقایسه با بارگذاری نیمه سینوسی نرخ افزایش تغییر شکل‌های ماندگار بیشتری به دست می‌دهد.

می‌توان نتیجه گرفت در بارگذاری با شکل موج مربعی با افزایش الیاف به میزان 0/5، 1 و 1/5 کیلوگرم در تن به



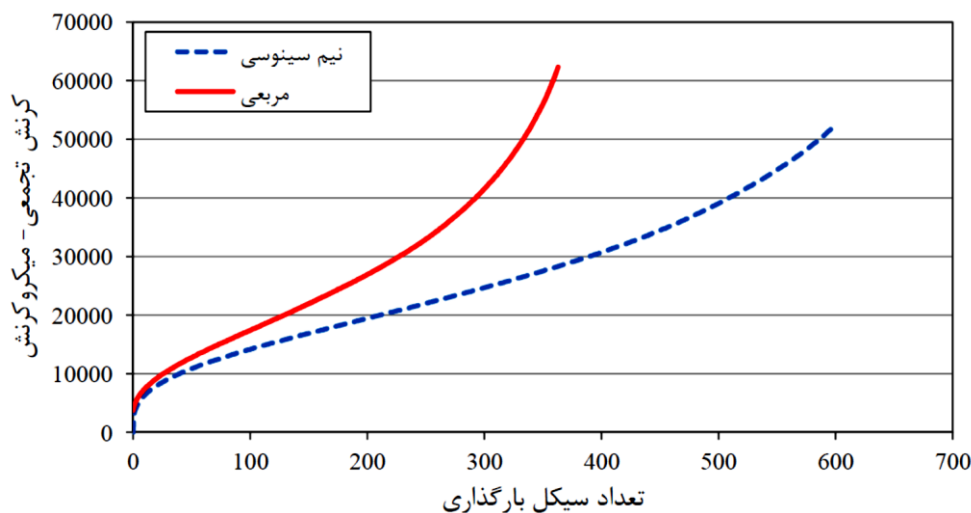
شکل 11. عدد جریان برای مخلوط‌های آسفالتی مختلف



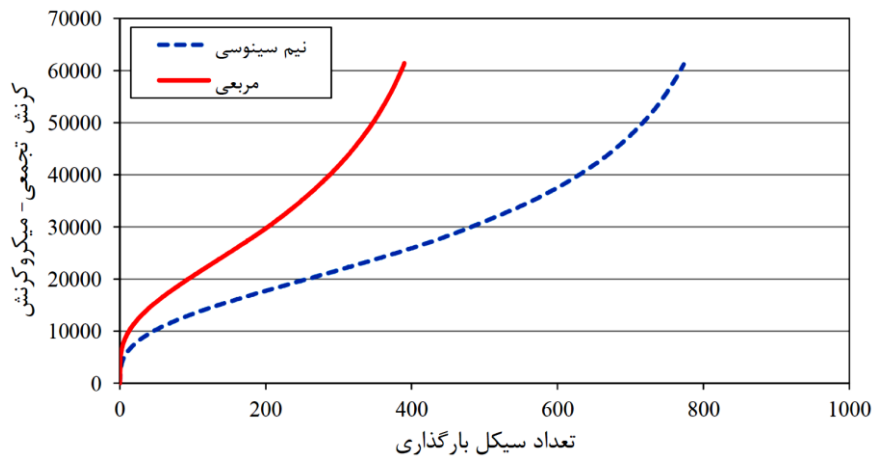
شکل 12. شیب منحنی خزش در قسمت دوم

از نمودار خزش مربوط به شکل پالس مربعی واقع شده است که بیانگر این حقیقت است که خزش مخلوط‌های آسفالتی به شدت متأثر از شکل پالس بارگذاری است. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهند که شکل پالس بارگذاری در نزدیکی سطح آسفالت به صورت مربعی و با افزایش عمق تدریجاً به صورت نیم‌سینوسی تبدیل می‌شود. بنابراین بهره‌گیری از مخلوط‌های آسفالتی با مقاومت بالای شیارشدگی مانند مخلوط‌های آسفالتی الیافی در بخش‌های فوقانی قشر آسفالتی در کاهش شیارشدگی روسازی بسیار مؤثر است.

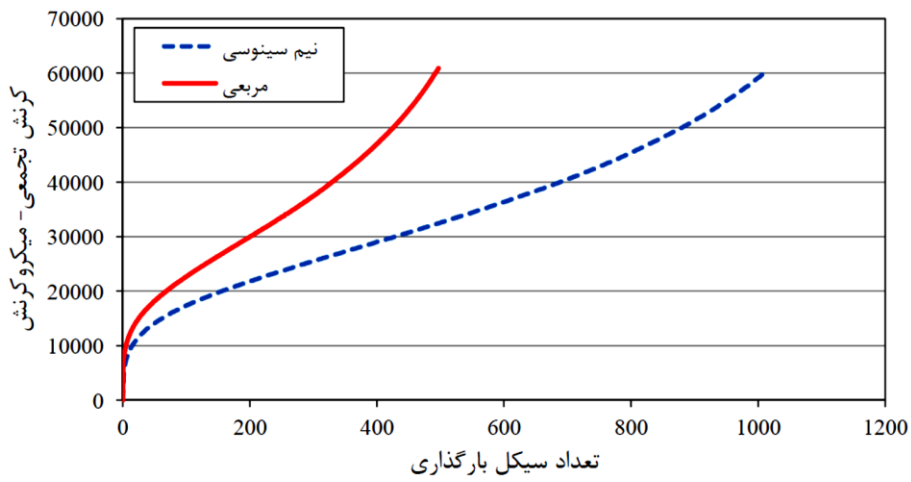
ملاحظه می‌شود که عدد جریان و شیب مرحله دوم نمودار خزش برای شکل پالس نیم‌سینوسی به ترتیب حدود دو برابر و نصف عدد جریان و شیب مرحله دوم نمودار خزش حاصل از شکل پالس مربعی با همان فرکانس بارگذاری است. همچنین ملاحظه می‌شود که اثر الیاف در بهبود مشخصات مخلوط‌های آسفالتی برای شکل پالس نیم‌سینوسی بیش از شکل پالس مربعی است. شکل‌های 13 الی 16، نمودار خزش را با توجه به شکل بارگذاری نیمه سینوسی و مربعی برای مخلوط‌های آسفالتی مختلف نشان می‌دهند. همانگونه که ملاحظه می‌شود، نمودار خزش مربوط به پالس نیم‌سینوسی در کلیه موارد پائین تر



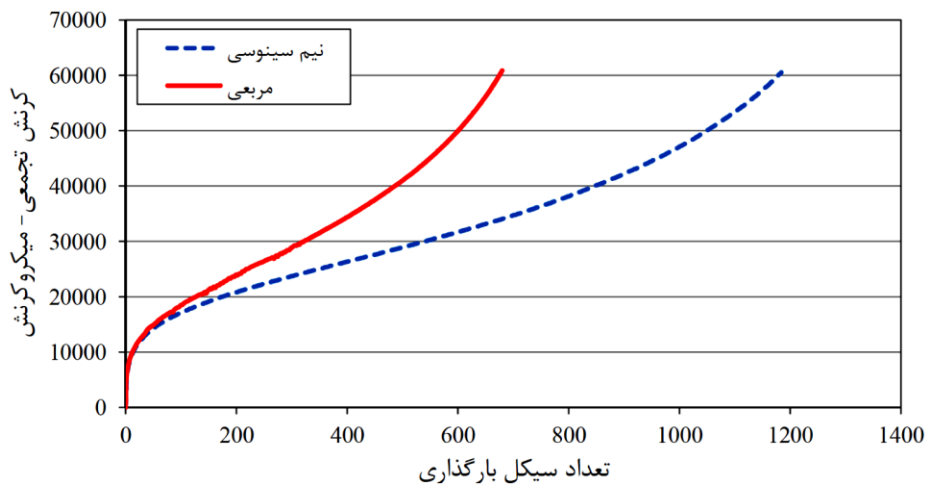
شکل 13. کرنش تجمعی برای نمونه اصلاح شده با توجه به شکل بارگذاری نیم‌سینوسی و مربعی



شکل 14. کرنش تجمعی برای نمونه اصلاح شده با 0/5 کیلوگرم الیاف با توجه به شکل بارگذاری نیم سینوسی و مربعی



شکل 15. کرنش تجمعی برای نمونه اصلاح شده با 1 کیلوگرم الیاف با توجه به شکل بارگذاری نیم سینوسی و مربعی



شکل 16. کرنش تجمعی برای نمونه اصلاح شده با 1/5 کیلوگرم الیاف با توجه به شکل بارگذاری نیم سینوسی و مربعی

5- نتیجه گیری

نتایج حاصل از این تحقیق به صورت زیر قابل بیان می‌باشند:

- با افزایش الیاف فورتا در مخلوط آسفالتی مدول برجهندگی زیاد می‌شود. همچنین نرخ افزایش مدول برجهندگی با افزایش الیاف زیاد می‌شود.

- اثر دما در تغییرات مدول برجهندگی بیشتر از الیاف فورتا است. به‌طورکلی افزایش دما باعث کاهش مدول برجهندگی در نمونه‌های اصلاح‌شده و اصلاح‌نشده می‌شود. کاهش مدول برجهندگی نمونه اصلاح‌نشده با افزایش دما از 25 به 40 درجه سانتی‌گراد در مقایسه با نمونه اصلاح‌شده بیشتر است.

- افزودن 1/5 کیلوگرم الیاف به مخلوط آسفالتی در دمای 25 و 40 درجه سانتی‌گراد به ترتیب باعث افزایش مدول برجهندگی به میزان 62 و 242 درصد خواهد شد.

- افزودن 1/5 کیلوگرم الیاف به مخلوط آسفالتی سبب می‌شود تا عدد روانی به حدود دو برابر مقدار عدد روانی مخلوط آسفالتی اصلاح‌نشده افزایش یابد.

- افزودن 1/5 کیلوگرم الیاف به مخلوط آسفالتی سبب می‌شود تا شیب قسمت دوم نمودار خزش به حدود نصف مقدار نظیر برای مخلوط آسفالتی اصلاح‌نشده کاهش یابد.

- عدد جریان و شیب مرحله دوم نمودار خزش برای شکل پالس نیم‌سینوسی به ترتیب حدود دو برابر و نصف عدد جریان و شیب مرحله دوم نمودار خزش حاصل از شکل پالس مربعی با همان فرکانس بارگذاری است.

6- پی‌نوشت‌ها

- 1- Wheel Tracking Device
- 2- Fazaeli

7- مراجع

- حجازی، م، شیخزاده، م، ابطحی، م و سمنانی، د، (1387)، "بررسی کاربرد مواد نساجی گوناگون جهت تسلیح مکانیکی بتن آسفالتی و تحلیل نتایج حاصل با استفاده از یک شبکه عصبی مصنوعی"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.

- فخری، م. (1385)، "کاربرد پلیمر در بهبود خواص قیرها و مخلوط‌های آسفالتی"، وزارت راه و شهرسازی، ص. 54-110.

- لوسانی، م. (1390)، "بررسی آزمایشگاهی اثر الیاف آلی و معدنی بر خصوصیات خزش و مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی AMS و AMH"، پایان‌نامه درجه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.

- نیکوروش راد، س.ع. (1384)، "تأثیر الیاف فولادی بر مقاومت خمشی بتن آسفالتی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف.

- Abtahi SM, Ameri M, Sheikhzadeh M, Hejazi SM, Rahnama E. (2009), A comparative study on the use of sbs polymers and poly propylene fibers modifying asphalt concrete structures. In: 8th international conference sustainable aggregates, asphalt technology and pavement engineering, Liverpool, UK.

- Alrajhi, A. (2012), Fiber Dosage Effects in Asphalt Binders And Hot Mix Asphalt Mixtures (MS-c Tesies, Arizona State University).

- ARA, I., (2004), ERES Consultants Division, "Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures," National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, Champaign, Illinois 61820.

- Jiang, Y., & McDaniel, R. S. (1993), Application of cracking and seating and use of fibers to control reflective cracking. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1388. pp. 150–159.
- Kaloush, K. E., Biligiri, K. P., Zeiada, W. A., Rodezno, M. C., Reed, J. X., (2010), Evaluation of fiber-reinforced asphalt mixtures using advanced material characterization tests, Journal of Testing and Evaluation, 38(4), pp.1-12.
- Kamal, MA., Shazib, F., and Yasin, B., (2005), "Resilient Behavior of Asphalt Concrete Under Repeated Loading and Effects of Temperature" Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 6, pp.1329-1343.
- Lee, S. J., Rust, J. P., Hamouda, H., Kim, Y. R., Borden, R. H. (2005), Fatigue Cracking Resistance of Fiber-Reinforced Asphalt Concrete. Textile Research Journal, Vol. 75, No.2, pp. 123-128.
- Mahrez, A., Karim, M., & Katman, H. (2003), Prospect of using glass fiber reinforced bituminous mixes. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 5, pp.794-807.
- Mahrez, A., Karim, M. R., & Katman, H. Y. B. (2005), Fatigue and deformation properties of glass fiber reinforced bituminous mixes. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 6, pp.997-1007.
- Maurer, D. A., & Malasheskie, G. J. (1989), Field performance of fabrics and fibers to retard reflective cracking. Geotextiles and Geomembranes, 8(3), pp.239-267.
- Najd A, Chao Z, Ying G. (2005), Experiments of fracture behavior of glass fiber reinforced asphalt concrete. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition); 25(3):pp.28–32.
- Oda, S., Fernandes, J. L., & Ildfonso, J. S. (2012), Analysis of use of natural fibers and asphalt rubber binder in discontinuous asphalt mixtures Construction and Building Materials, 26(1), pp.13-20.
- Brown, S. F., Rowlett, R. D., & Boucher, J. L. (1990), "Asphalt Modification", Proceedings of the Conference on the United States Strategic Highway Research Program; Sharing the Benefits. London: Thomas Telford. pp. 181–203.
- Chen, H. X., Li, N. L., Hu, C. S., & Zhang, Z. (2004), Mechanical performance of fibers-reinforced asphalt mixture. J Chan Univ (Nat Sci Ed), 24(2), pp.1-5.
- De S. Bueno, B., Da Silva, W. R., de Lima, D. C., & Minete, E. (2003), Engineering properties of fiber reinforced cold asphalt mixes. Journal of Environmental Engineering, 129(10), 952-955.
-Decoene Y. Contribution of cellulose fibers to the performance of porous asphalts. Trans Res Rec 1990; pp.1265:82.
- Echols J. New mix method for fiber-reinforced asphalt. Public Works 1989;119(8): pp.72–73.
- Fazaeli, H., Samin, Y., Pirnoun, A., & Dabiri, A. S. (2016). Laboratory and field evaluation of the warm fiber reinforced high performance asphalt mixtures (case study Karaj–Chaloos Road). Construction and Building Materials, 122, pp.273-283.
- Hongu T, Philips G. (1990). New fibers ellis horwood series in polymer science and technology. Fibers and Polymers, Springer, New York, 3, pp.1-7.
- Huang, Y. (2004). Pavement Analysis and Design, second edition. Kentucky. Prentice Hall.

Huang, H., & White, T. (1996), Dynamic properties of fiber-modified overlay mixture. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (1545), pp.98-104.
- Jahromi, S. G., & Khodaii, A. (2008), Carbon fiber reinforced asphalt concrete. Arabian Journal for Science and Engineering, 33(2), 355.

- Concrete. *International Journal of Science and Engineering Investigations*. vol. 5(48). pp. 1-6.
- Tapkin, S. (2008), the effect of polypropylene fibers on asphalt performance. *Building and Environment*, 43(6), pp.1065-1071.
 - Tapkin S, Usar U, Tuncan A, Tuncan M. (2009), repeated creep behavior of polypropylene fiber-reinforced bituminous mixtures. *Journal of Transportation Engineering*. 135(4): pp.240-9.
 - Wu, S., Ye, Q., Li, N., & Yue, H. (2007), Effects of fibers on the dynamic properties of asphalt mixtures. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 22(4), pp.733-736.
 - Yusoff, N. I. M., Breem, A. A. S., Alattug, H. N., Hamim, A., & Ahmad, J. (2014). The effects of moisture susceptibility and ageing conditions on nano-silica/polymer-modified asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 72, pp.139-147.
 - Zhou, F., T. Scullion, and L. Sun. (2004). Verification and Modeling of Three Stage Permanent Deformation Behavior of Asphalt Mixes. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 130, No. 4, pp. 486-494.
 - Putman, B. J., & Amirkhanian, S. N. (2004), Utilization of waste fibers in stone matrix asphalt mixtures. *Resources, conservation and recycling*, 42(3), pp.265-274.
 - Serfass, J. P., & Samanos, J. (1996), "Fiber-Modified Asphalt Concrete Characteristics, Applications and Behavior", *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 65, pp. 193-230.
 - Shaopeng W, Qunshan Y, Ning L.(2008), Investigation of rheological and fatigue properties of asphalt mixtures containing polyester fibers. *Construction and Building Materials*; 22(10): 2111-2115.
 - Simpson, A. L., & Mahboub, K. C. (1994), October). Case study of modified bituminous mixtures: Somerset, Kentucky. In *Infrastructure: New Materials and Methods of Repair* pp. 88-96. ASCE.
 - SU. K., Yoshitaka. Y., (2008), Examination of fiber – added recycled asphalt concretes for surface course in airport pavements. In: *First international conference on transportation infrastructure*, Beijing, China. pp. 24-26.
 - Taherkhani, H., Amini, H., (2016), Investigating the Properties of Nylon Fiber Reinforced Asphalt

A Study on Resilient Modulus and Dynamic Creep of Asphalt Mixes Reinforced With Polyolefin – Aramid FORTA Composite Fibers

A.R. Ghanizadeh, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran.

B. Salajegheh, M.Sc. Grad., Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Shahrood Branch, Shahrood, Iran.

M. Rahrovan, M.Sc. Grad., Student, Department of Civil Engineering, University of Yazd, Yazd, Iran.

E-mail: ghanizadeh@sirjantech.ac.ir

ABSTRACT

Due to the high production costs of asphalt mixes, utilization of additives in asphalt mixtures to enhance the durability and performance is necessary. In this study, different percentages of Polyolefin – Aramid FORTA composite fibers were added to the asphalt mix and the resilient modulus testing at two different temperatures and dynamic creep test with two different loading waveforms was carried out. The results indicate that adding fiber increases the stiffness and resistance to rutting of asphalt mixtures. By adding 1.5 kg fiber per ton of asphalt concrete, the resilient modulus of asphalt concrete increased 62% and 242% at temperature of 25 ° C and 40° C, respectively. So it is evident that increasing of stiffness in case of fiber reinforced asphalt mixtures at higher temperature (40 ° C) is greater than that at the average temperature (25° C). It was also observed that an increase of 1.5 kg of fibers to the mix causes the flow number to be increased to double of flow number of unmodified asphalt mixture. In addition, comparison of dynamic creep curves under haversine and square loading waveform shows that the flow number and slope of creep curve at second stage are double and half of these values under square loading waveform at the same loading frequency.

Keywords: Asphalt Mix, Polyolefin, Aramid FORTA Composite Fibers, Resilient Modulus, Dynamic Creep, Loading Waveform

¹ Wheel Tracking Device

² Fazaeli