

ارزیابی حساسیت رطوبتی و مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالت گرم حاوی الیاف شیشه با استفاده از دستگاه چرخ محرک

سید علی حسینی، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
امین احمدی، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران
علیرضا عاملی^{*}، مربی، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران
^{*}پست الکترونیکی نویسنده مسئول: amelii@gmail.com

دریافت: ۹۷/۰۷/۲۰ - پذیرش: ۹۷/۱۱/۰۵

صفحه ۲۶۱-۲۴۷

چکیده

با افزایش روز افزون الزامات زیست محیطی و کمبود منابع مالی، بررسی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی گرم بیش از هر زمان دیگری مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق از الیاف شیشه به طول ۱۲ میلی‌متر و با مقدار ۰/۳ درصد وزن کل مخلوط به منظور بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی گرم استفاده شده و با استفاده از دستگاه چرخ محرک در دو حالت خشک و مرطوب عملکرد شیارشدگی و حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی الیاف شیشه مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین در این تحقیق تاثیر پیرشدگی کوتاه مدت، بر رفتار شیارشدگی و حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از الیاف در مخلوط منجر به بهبود عملکرد شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی گرم می‌شود (افزایش ۱۶/۳ و ۱۲/۵ در شاخص پایداری دینامیکی) در حالی که تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر حساسیت رطوبتی مخلوط ندارد. در نقطه مقابل اما تاثیر پیرشدگی بر مقاومت شیارشدگی و حساسیت رطوبتی نمونه‌های آسفالتی گرم مثبت ارزیابی شد. در پایان این تحقیق همچنین مدل‌های رگرسیونی برای پیش‌بینی تعداد سیکل متناظر با ۲۰ میلی‌متر شیارشدگی با کمک شاخص‌های تراکم ثانویه، نرخ شیارشدگی و پایداری دینامیکی ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالتی گرم، حساسیت رطوبتی، مقاومت شیارشدگی، الیاف شیشه، پیرشدگی

۱- مقدمه

استفاده از کف قیر باعث کاهش ویسکوزیته قیر می‌شوند. از مهمترین مزایای کاهش ویسکوزیته قیر می‌توان به کاهش دمای تولید آسفالت و به تبع آن کاهش مصرف انرژی، تولید گازهای سمی در کارخانه و تولید گازهای گلخانه‌ای اشاره نمود (هرلی و پراول، ۲۰۰۵). در کنار مزایای اشاره شده برای مخلوط‌های آسفالتی گرم، به دلیل دمای کمتر گرم کردن سنگدانه‌ها و امکان باقی ماندن رطوبت در این مصالح و همچنین به دلیل پیرشدگی کمتر قیر، نگرانی‌هایی در ارتباط با

یکی از ارکان اصلی توسعه پایدار حفظ محیط زیست از طریق کاهش مصرف انرژی و مصالح تجدیدناپذیر و تولید گازهای گلخانه‌ای می‌باشد. از اقدامات صنعت راهسازی برای رسیدن به این اهداف، توسعه آسفالت‌های سازگار با محیط زیست از جمله مخلوط‌های آسفالتی گرم است که دمای تولید و اجرای پایین‌تری از مخلوط‌های آسفالتی داغ دارند (وایتکاس و همکاران، ۲۰۱۶). تکنولوژی‌های آسفالت گرم با استفاده از افزودنی‌های ارگانیک، شیمیایی و یا با

اعلام نموده‌اند (اشنبرنر و کوریر، ۱۹۹۳؛ بوناکوست، ۲۰۱۱؛ دوپل و هاوارد، ۲۰۱۳؛ کیم و همکاران، ۲۰۱۲). برخی محققین بر این باورند که اثر خرابی‌های رطوبتی زمانی که مخلوط آسفالتی همزمان تحت بار ترافیک هستند شدیدتر است. از این روست که آزمایش‌هایی همچون چرخ محرک که تاثیر همزمان این دو فاکتور را در نظر می‌گیرند نتایج واقع بینانه‌تری در ارزیابی عملکرد واقعی مخلوط در میدان ارائه می‌دهند (باس و همکاران، ۲۰۱۶؛ هیکس، ۱۹۹۱؛ لیتل و جنز، ۲۰۰۳). در این تحقیق با استفاده از دستگاه چرخ محرک با قابلیت اعمال همزمان ترافیک و رطوبت بر روی نمونه، تاثیر افزودن الیاف شیشه بر عملکرد شیارشدگی و حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی گرم مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین با توجه به اهمیت اثر شرایط پیرشدگی بر عملکرد شیارشدگی و حساسیت رطوبتی، که در تحقیقات قبلی (پانیث، ۲۰۱۲) در مخلوط‌های داغ به اثبات رسیده است، تاثیر پیرشدگی کوتاه مدت بر روی عملکرد مخلوط‌های گرم حاوی الیاف شیشه در آزمایش چرخ محرک در دو حالت خشک و اشباع مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق از پارامترهای مختلفی برای ارزیابی حساسیت رطوبتی و مقاومت شیارشدگی از جمله نقطه عطف شیارشدگی (SIP)، تراکم ثانویه (PC)، مقاومت دینامیکی (DS)، سیکل نهایی برای رسیدن به عمق شیارشدگی ۲۰ میلی‌متر (C-20) و نرخ شیارشدگی (RR) به کار بسته شده است.

۲- مصالح و شرایط آماده‌سازی نمونه

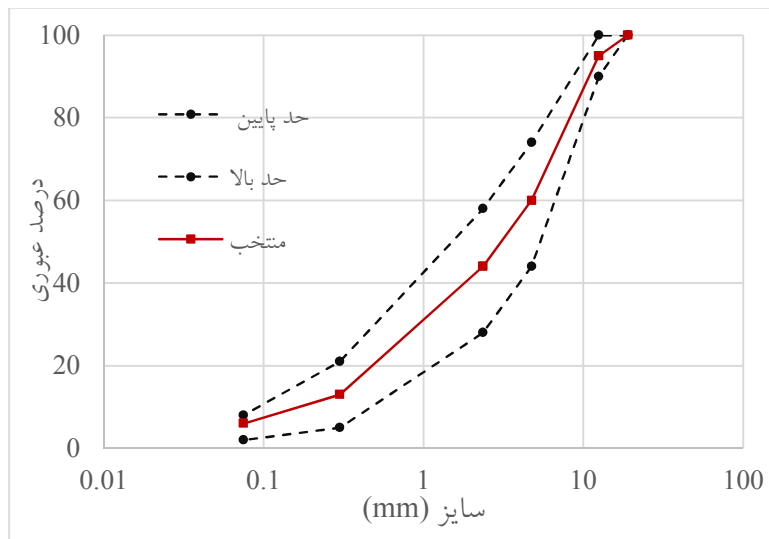
۲-۱- مصالح

مصالح سنگی استفاده شده در این تحقیق، مصالح شکسته آهکی تهیه شده از معدن اسب چران می‌باشد. نمودار دانه‌بندی انتخاب شده برای ساخت نمونه‌ها در شکل ۱ و مشخصات مصالح سنگی استفاده شده در این تحقیق در جدول ۱ ارائه شده اند. همچنین قیر ۶۰/۷۰ تهیه شده از شرکت نفت پاسارگاد در ساخت نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است که مشخصات آن در جدول ۲ ارائه شده است. به منظور اصلاح نمودن مشخصات عملکردی مخلوط‌های آسفالتی گرم، الیاف شیشه به طول ۱۲ میلی‌متر و با مقدار

عملکرد شیارشدگی و حساسیت رطوبتی این مخلوط‌ها وجود دارد. افزایش حساسیت رطوبتی و کاهش مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی گرم در نتایج بسیار از محققان گزارش شده است (دس و همکاران، ۲۰۱۲؛ زلو و همکاران، ۲۰۱۳). آسیب‌های رطوبتی دلیل اصلی وقوع خرابی‌های پیش از موعد در روسازی‌های آسفالتی است که می‌تواند سبب وقوع خرابی‌هایی مانند شیارشدگی، ترک و چاله نیز بشود (کیگوندا و رابرت، ۱۹۹۸؛ ترل و ال اسوایلی، ۱۹۹۴). وقوع این نوع خرابی در مخلوط‌های آسفالتی گرم به دلیل دمای اختلاط و پخش پایین‌تر، محتمل است. از طرف دیگر، شیارشدگی نیز به عنوان یکی از سه خرابی اصلی در روسازی‌های آسفالتی مطرح می‌باشد (دس و همکاران، ۲۰۱۲؛ مقدس نژاد و همکاران، ۲۰۱۴) که در تولید مخلوط‌های آسفالتی جدید می‌بایست همواره مورد توجه قرار گیرد. با توجه به مطالب اشاره شده، مطالعه دو خرابی شیارشدگی و حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی گرم از اهمیت بالایی برخوردار است و همواره محققین به دنبال راهی برای کاهش این خرابی‌ها در این نوع مخلوط‌های آسفالتی بوده‌اند. برخی محققین با عنایت به این حقیقت که مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی نسبت به مقاومت فشاری آن‌ها کمتر است، استفاده از الیاف با مقاومت کششی بالا را به منظور انتقال تنش‌های کششی و افزایش انرژی کرنشی جذب شده در پروسه خستگی و شکست پیشنهاد داده‌اند (باشینگ و همکاران، ۱۹۷۰؛ مهراز و همکاران، ۲۰۰۵). در برخی تحقیقات تاثیرات افزودن الیاف به مخلوط‌های آسفالتی داغ ارزیابی شده است که در آن‌ها به افزایش مقاومت شیارشدگی (باشینگ و همکاران، ۱۹۷۰؛ مک دنیل و شاه، ۲۰۰۳) و کاهش خرابی‌های رطوبتی اشاره شده است (پاتمن و امیرخانیان، ۲۰۰۴). در این میان الیاف مختلفی که تاکنون در تحقیقات گذشته مورد استفاده قرار گرفته‌اند، الیاف شیشه با داشتن مدول کششی و نقطه نرمی بالا توانسته به شکل موثقی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی را بهبود ببخشد (ابطحی و همکاران، ۲۰۱۳). آزمایش‌های AASHTO T283 و چرخ محرک جز متداول‌ترین آزمایش‌های ارزیابی خرابی رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی می‌باشند. بسیاری از محققین تطابق نتایج آزمایش چرخ محرک با عملکرد میدانی مخلوط‌های آسفالتی را بهتر از آزمایش AASHTO T283

مخلوط می‌شود. ساسوبیت ترکیبی از هیدروکربن‌های زنجیره‌ای بلند است که از احتراق ذغال سنگ به روش فیشر تراپش به دست می‌آید. این افزودنی ارگانیک به میزان ۱/۵ درصد وزنی قیر مخلوط، مورد استفاده قرار گرفته است. این درصد بر اساس تجربه تحقیقات قبلی انجام شده در این زمینه انتخاب شده است (ایکس چن و همکاران، ۲۰۰۷؛ گوا و همکاران، ۲۰۱۵).

۰/۳ درصد وزن کل مخلوط به کار گرفته شده است. مقدار الیاف به کار رفته بر اساس پیشنهاد شرکت سازنده و همچنین نتایج تحقیقات پیشین انتخاب شده است (مهرآز و همکاران، ۲۰۰۵). مشخصات فنی الیاف شیشه مورد استفاده در جدول ۳ ارائه شده است. وایتکاس و همکاران (۲۰۱۶) نشان داده‌اند که استفاده از مواد افزودنی ارگانیک مثل ساسوبیت در مخلوط‌های آسفالتی، باعث افزایش پایداری و کاهش روانی



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی منتخب مصالح سنگی به همراه حدود آئین‌نامه

جدول ۱. مشخصات فنی مصالح سنگی

نتیجه	استاندارد آزمایش	آزمایش
۲/۱	ASTM C-127	جذب آب مصالح درشت (%)
۲/۴	ASTM C-128	جذب آب مصالح ریز (%)
۲۰/۲	ASTM C-131	سایش لس آنجلس
۷۱	ASTM D-2419	ارزش ماسه‌ای
۹۲	ASTM D-5821	درصد شکستگی در دو وجه

جدول ۲. مشخصات قیر ۶۰/۷۰ مصرفی

قیر خالص	استاندارد	ویژگی
۶۸	ASTM D-5	درجه نفوذ (mm در ۲۵ °C)
۴۹	ASTM D-36	نقطه نرمی (°C)
۱۰۰	ASTM D-113	کشسانی (سانتیمتر در ۲۵ °C)

۳۲۰	ASTM D-92	نقطه اشتعال (°C)
۱/۰۳۲	ASTM D-70	وزن مخصوص (gr/cm ³ در ۲۵ °C)
۴۰۰	ASTM D2170	ویسکوزیته (cSt، در ۱۳۵ °C)

جدول ۳. مشخصات فنی الیاف شیشه

مقدار	استاندارد	آزمایش
E glass	-	نوع شیشه
۲/۵۸	ASTM D-792	چگالی (g/cm ³)
۱۲	-	طول (mm)
۳۴۰۰-۳۱۰۰	ASTM D-5030	مقاومت کششی (MPa)
۸۴۰	ASTM D-7138	نقطه نرمی (°C)
۱۳	-	قطر (µm)
۹۲۳	-	نسبت طول / قطر
۰/۰۳	ISO3344-1997	درصد رطوبت

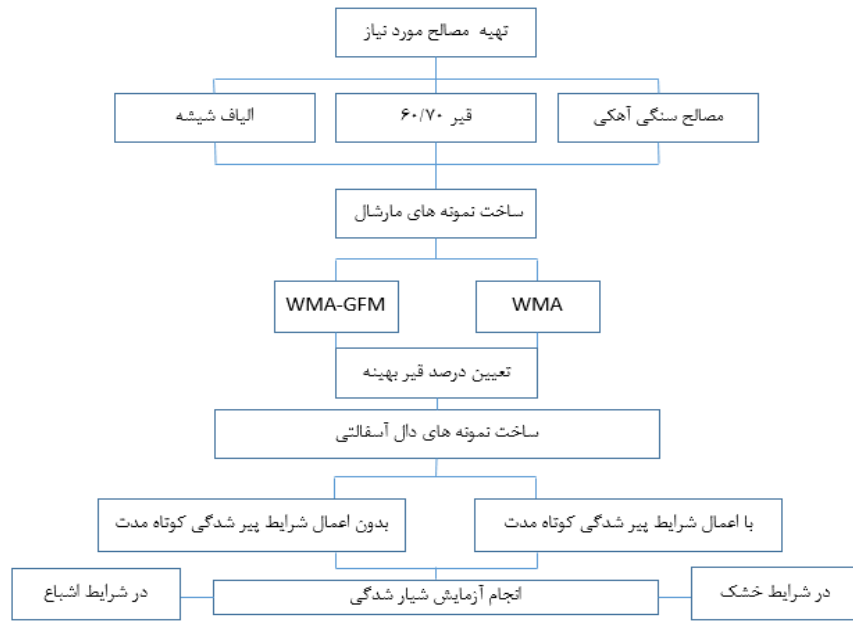
۲-۲- آماده سازی نمونه‌ها

شدند (شس، ۲۰۱۰). مصالح سنگی، الیاف و قیر پس از قرار گیری در گرمخانه به ترتیب به داخل میکسر آزمایشگاهی طراحی شده با پره‌های اختلاط مشابه میکسر کارخانه آسفالت و قابلیت کنترل درجه حرارت و سرعت چرخش ریخته شده و پس از اضافه شدن ساسویت با یکدیگر مخلوط شدند. پس از اختلاط مصالح با یکدیگر مخلوط‌ها با دمای ۱۲۵ درجه سانتی گراد به داخل قالب تراکم دستگاه چرخ محرک ریخته شده و با استفاده از دستگاه چرخ محرک متراکم شدند. بعد از اتمام عملیات تراکم، نمونه‌ها به مدت یک روز درون قالب باقی مانده و سپس آزمایش شیارشدگی بر روی آن انجام شد. همه دال‌های آسفالتی در این تحقیق با درصد هوای $7 \pm 0/5$ مطابق استاندارد AASHTO T324 ساخته شدند. به منظور رسیدن به این درصد هوا، ابتدا با دو جرم مخصوص اولیه برابر با کیلوگرم بر متر مکعب ۲۴۰۰ و ۲۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب نمونه دال ساخته شده و درصد هوای معادل آن‌ها با استفاده از آزمایش رایس محاسبه شد. سپس با درونبایی خطی جرم مخصوص معادل با ۷ درصد

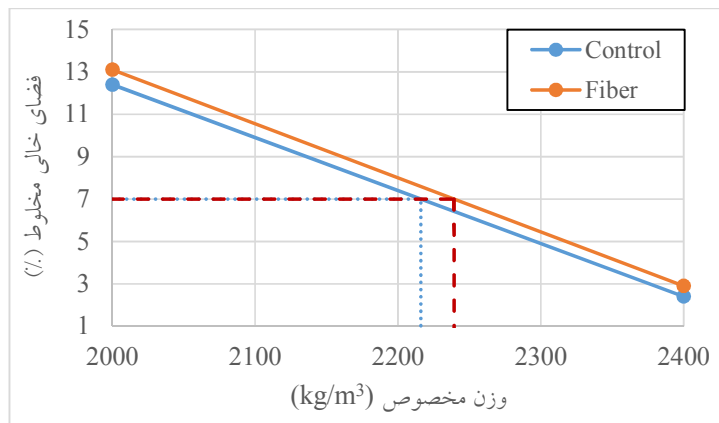
طرح اختلاط مارشال مطابق استاندارد ASTM D-1559، با اعمال ۷۵ ضربه به هر طرف نمونه برای تعیین درصد قیر بهینه مورد استفاده قرار گرفته است. درصد قیر بهینه برای دستیابی به ۴٪ فضای خالی در نمونه‌های گرم بدون الیاف برابر با ۵/۷ درصد و در نمونه‌های گرم حالی الیاف شیشه برابر با ۵/۸۳ درصد محاسبه شد. الیاف شیشه و ساسویت در این تحقیق به روش خشک به مخلوط اضافه شدند. در این روش مواد افزودنی به مصالح سنگی اضافه می‌شوند در حالی که در روش مرطوب ابتدا افزودنی به قیر اضافه شده و سپس به مصالح سنگی اضافه می‌شوند. در این تحقیق نام‌گذاری مخلوط‌ها با استفاده از حروف S، W، D، G که به ترتیب متناظر با حالات خشک، مرطوب، شرایط پیرشده کوتاه مدت و الیاف می‌باشند انجام شد. در شکل ۲ برنامه آزمایشگاهی استفاده شده در این تحقیق ارائه شده است. به منظور آماده سازی نمونه‌ها، مصالح سنگی قبل از اختلاط به مدت ۶ ساعت در دمای ۱۲۵ درجه و قیر به مدت ۱/۵ ساعت در دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد درجه قرار گرفت. این دماها بر اساس مشخصات فنی قیر و تحقیقات قبلی انتخاب

هوای محاسبه شده و با توجه به حجم ثابت قالب تراکم برابر با ۵۲۰۰ سانتی متر مکعب (۴۰×۲۶×۵ سانتی متر) و محاسبه جرم آسفالت مورد نیاز، نمونه‌ها ساخته شدند و درصد هوای

دقیق آنها مجدداً با انجام آزمایش رایس محاسبه شد. نتایج این محاسبات در شکل ۳ و جدول ۴ ارائه شده‌اند.



شکل ۲. روندنما برنامه آزمایشگاهی



شکل ۳. محاسبه وزن مخصوص نمونه‌های دال متناظر با فضای خالی ۷٪ با کمک درونابی خطی

جدول ۴. مشخصات درصد هوا و جرم مخصوص نمونه‌ها

وزن مخصوص کیلوگرم بر متر مکعب	درصد هوا	جرم کل (گرم)	نوع مخلوط
۲۲۱۶	۶/۸	۱۱۵۲۳	کنترل
۲۲۳۹/۲	۷/۲	۱۱۶۴۴	حاوی الیاف

۳-۲- آزمایش چرخ محرک

دستگاه چرخ محرک استفاده شده در این تحقیق در شکل ۴ نشان داده شده است. این دستگاه علاوه بر انجام عمل شیارشدگی قادر است عمل تراکم اسلب‌های آسفالتی را نیز انجام دهد. این دستگاه به دو سنسور تشخیص تغییر مکان با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر و با ۶۰ برداشت داده در هر ثانیه مجهز است که به کمک آن امکان ثبت نمودار شیارشدگی در برابر سیکل بارگذاری فراهم است.

به منظور اعمال شرایط پیرشدگی کوتاه مدت در نمونه‌های پیر شده، مطابق استاندارد AASHTO R30 نیمی از نمونه‌های آسفالتی قبل از تراکم به مدت ۴ ساعت در دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته و بعد از آن متراکم شدند. لازم به ذکر است که برای انجام هر آزمایش و تعیین هر یک از پارامترهای مورد نظر، سه نمونه آزمایشگاهی تهیه شد و نتایج ارائه شده مربوط به میانگین مقادیر بدست آمده از آزمایش‌ها است.



(الف)



(ب)

شکل ۴. (الف) دستگاه چرخ محرک در حال تراکم نمونه (ب) و انجام آزمایش شیارشدگی

شیارشدگی ۲۰ میلی‌متر ادامه یابد (هر کدام زودتر اتفاق بیافتد). با کمک نتایج به دست آمده از این آزمایش شاخص‌های مختلفی برای ارزیابی پتانسیل حساسیت رطوبتی و شیارشدگی قابل محاسبه است که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود.

در این تحقیق، آزمایش‌های شیارشدگی در دو حال خشک و غرقاب و در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام شدند (شکل ۵). تمامی نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه قبل از شروع آزمایش در محیط با دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. مطابق استاندارد AAHTO T324، آزمایش شیارشدگی می‌بایست تا رسیدن به ۱۰۰۰۰ سیکل بارگذاری و یا رسیدن به عمق



(ب)



(الف)

شکل ۵. (الف) نمونه پس از اتمام آزمایش شیارشدگی در شرایط غرقاب در آب (ب) نمونه پس از اتمام آزمایش شیارشدگی در شرایط خشک

۲-۳-۱- نقطه عطف شیارشدگی

آزمون چرخ محرک علاوه بر ابزاری به عنوان سنجش مقاومت شیارشدگی، به منظور ارزیابی پتانسیل عریان‌شدگی مخلوط‌های آسفالتی نیز به کار می‌رود. برخی محققان محل دومین تغییر تفرع در نمودار تغییر مکان در مقابل تعداد سیکل بارگذاری (شکل ۶) در آزمایش چرخ محرک در شرایط مرطوب را متناظر با شروع پدیده عریان‌شدگی در نظر گرفته و آنرا نقطه عطف شیارشدگی می‌نامند. طبعاً مخلوط‌های با نقطه عطف شیارشدگی بزرگتر مقاومت در برابر رطوبت بالاتری از خود نشان می‌دهند.

۲-۳-۲- تراکم ثانویه

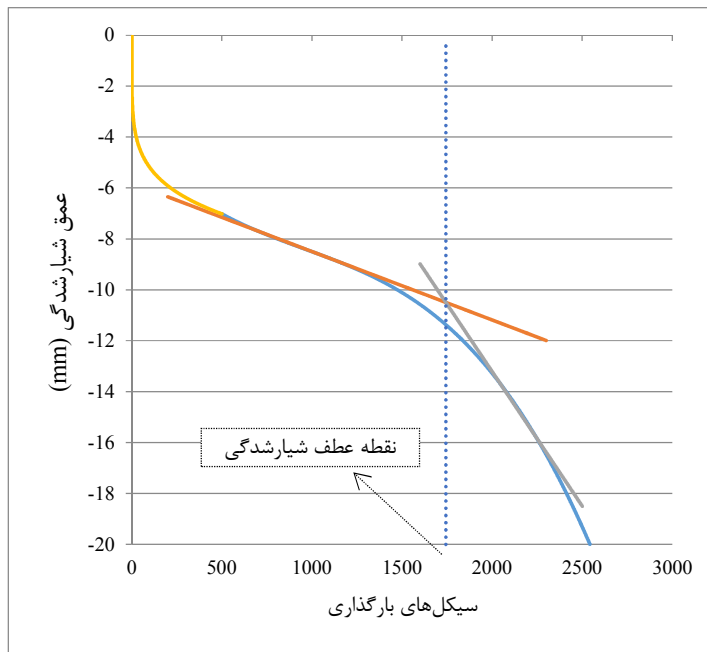
برخی محققین معتقدند که ۵ سیکل اول بارگذاری در آزمایش چرخ محرک، مخلوط را دچار یک جابه‌جایی و تراکم اولیه می‌کند و بر این اساس شاخص تراکم ثانویه را معرفی کردند. پارامتر تراکم ثانویه به عمق شیارشدگی بوجود آمده در ۵۰۰ سیکل اول آزمایش شیارشدگی اطلاق می‌شود (کلی و همکاران، ۲۰۰۰؛ یلدریم و همکاران، ۲۰۰۷).

۲-۳-۳- پایداری دینامیکی

پایداری دینامیکی یکی از پارامترهای مهم بدست آمده از آزمایش شیارشدگی در شرایط خشک می‌باشد که به منظور ارزیابی پایداری مخلوط‌ها در دماهای بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقدار شاخص پایداری دینامیکی (DS) از (۱) بدست می‌آید (اچ چن و همکاران، ۲۰۰۹؛ ایکس چن و همکاران، ۲۰۰۷؛ گوا و همکاران، ۲۰۱۵).

$$DS = \frac{(t_2 - t_1) \times N}{d_2 - d_1} \quad (1)$$

در این رابطه DS پایداری دینامیکی بر حسب چرخ/میلی‌متر، d_2 تغییر شکل بر حسب میلی‌متر در زمان t_2 (برابر با ۶۰ دقیقه در نظر گرفته شده است)، d_1 تغییر شکل بر حسب میلی‌متر در زمان t_1 (برابر با ۴۵ دقیقه در نظر گرفته شده است) و N سرعت چرخ دستگاه آزمایش شیارشدگی بر حسب چرخ/ثانیه می‌باشد. بالاتر بودن مقدار DS نشان‌دهنده مقاومت بیشتر مخلوط در برابر شیارشدگی می‌باشد.



شکل ۶. نمونه تغییرات تغییر مکان در مقابل سیکل‌های بارگذاری در آزمایش شیارشدگی در مخلوط GSW

۲-۳-۴- نرخ شیارشدگی

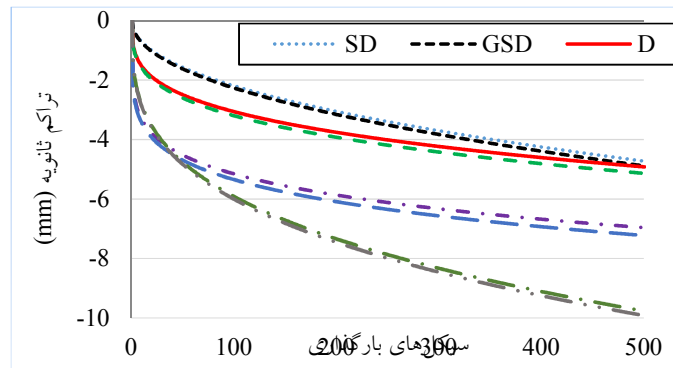
نرخ شیارشدگی شاخصی دیگر برای سنجش پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی در شرایط خشک است که به عمق شیارشدگی به ازای ۱۰۰۰ سیکل در فاصله بین سیکل‌های ۲۰۰۰ تا ۸۰۰۰ در نمودار تغییرمکان سیکل بارگذاری اطلاق می‌شود (شکل ۶).

همانگونه که پیداست نمونه اصلاح شده با الیاف شیشه به دلیل بالاتر بودن درصد هوای نمونه در مقایسه با نمونه‌های بدون الیاف (جدول ۴) در تعداد سیکل برابر در محدوده ۵۰۰ سیکل اول دارای عمق شیارشدگی بیشتری می‌باشد. همچنین از این نمودار می‌توان تاثیر پیرشدگی بر عملکرد شیارشدگی نمونه‌ها را مشاهده کرد. در اثر پیرشدگی و متعاقب آن ایجاد سختی بیشتر در قیر مخلوط، نمونه‌های پیر شده بخصوص در نمونه‌های آزمایش شده در شرایط غرقاب، عملکرد شیارشدگی بهتری از خود نشان می‌دهند. در شکل ۸ مقادیر میانگین و انحراف معیار شاخص تراکم ثانویه برای نمونه‌های مختلف ارائه شده است.

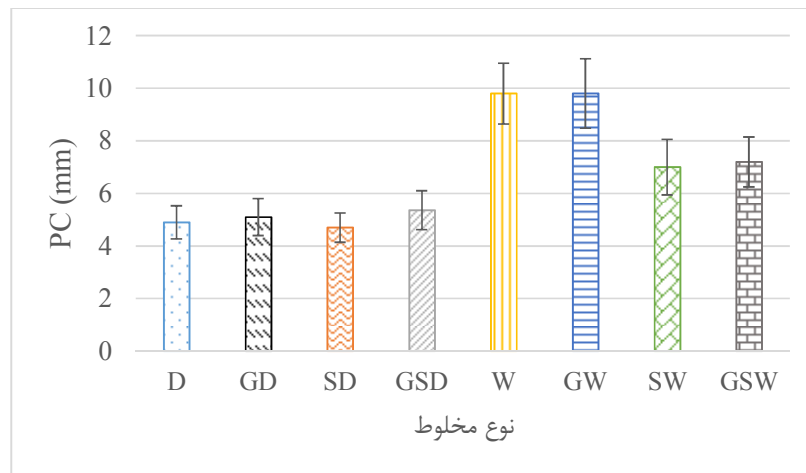
۳- نتایج آزمایش‌ها

۳-۱- نتایج شاخص تراکم ثانویه

شکل ۷ نمودار تغییرات عمق شیارشدگی در برابر سیکل‌های بارگذاری را تا ۵۰۰ سیکل اول نشان می‌دهد.



شکل ۷. عمق شیارشدگی در برابر سیکل بارگذاری در ۵۰۰ سیکل اولیه



شکل ۸. میانگین و انحراف معیار مقادیر شاخص تراکم ثانویه برای نمونه‌های مختلف

همانگونه که ذکر شد افزودن الیاف به نمونه‌ها و همچنین پیرشدگی منجر به افزایش شاخص تراکم ثانویه می‌شود، اما پراکندگی نتایج نشان می‌دهد که اهمیت این افزایش ممکن است ناشی از تغییرات تصادفی و ناشی از خطای آزمایش باشد و نه تغییرات واقعی ناشی از افزوده شدن الیاف و یا پیرشدگی. از این رو برای تشخیص اهمیت و معناداری این تغییرات آزمون آنوای یک طرفه در سطح اطمینان ۹۵٪ به کمک نرم افزار SPSS انجام شد که نتایج آن در جدول شماره ۵ ارائه شده است. چنانچه مقادیر P-value در این آزمون کوچکتر از ۰/۰۵ باشد تغییرات بین مخلوط‌های مقایسه شده به لحاظ آماری مهم قلمداد می‌شوند. همانگونه که در شکل ۸ پیداست، افزوده شدن الیاف به مخلوط منجر به افزایش ۴، ۳ و ۱ درصدی به ترتیب در نمونه‌های خشک، پیرشده غرقاب و پیرشده خشک شده است اما این افزایش‌ها بر مبنای نتایج بدست آمده از تحلیل آماری مهم نیستند (جدول ۵). تاثیر پیرشدگی بر شاخص تراکم ثانویه اما به شرایط رطوبتی مخلوط بستگی دارد. در حالی که پیرشدگی اثری غیر مهم بر شاخص تراکم ثانویه نمونه‌های خشک دارد، اما تاثیر آن بر نمونه‌های آزمایش شده در حالت غرقاب مهم ارزیابی می‌شود.

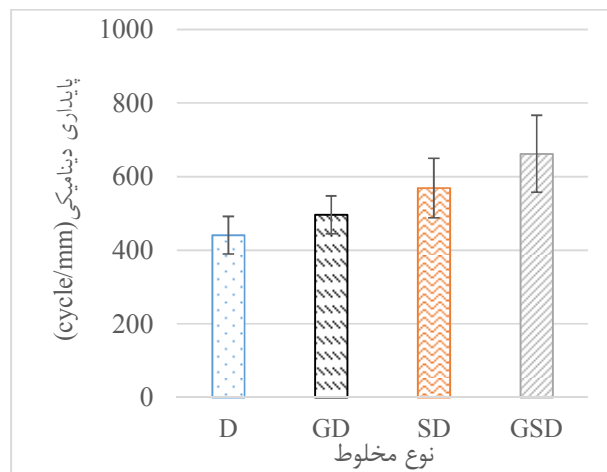
جدول ۵. ارزیابی آماری اهمیت تغییرات در شاخص تراکم ثانویه

مخلوط‌های مقایسه شده	P-value	مهم؟	مخلوط‌های مقایسه شده	P-value	مهم؟
SD~GSD	۰/۵۹	نه	D~SD	۰/۵۶	نه
D~GD	۰/۵۷	نه	GD~GSD	۰/۶	نه
SW~GSW	۰/۶۹	نه	SW~W	۰/۰۳	بلی
W~GW	۰/۸۴	نه	GSW~GW	۰/۰۴	بلی

۳-۲- نتایج شاخص پایداری دینامیکی

همچنین نتایج نشان داده شده در شکل ۹ حاکی از تاثیر قابل توجه پیرشدگی کوتاه مدت بر مقادیر پایداری دینامیکی دارد. بطوری که اعمال شرایط پیر شدگی کوتاه مدت باعث افزایش مقدار این شاخص به میزان ۳۳/۵ و ۲۹ درصد به ترتیب در نمونه‌های اصلاح شده با الیاف و نمونه‌های بدون الیاف شده است.

نتایج شاخص پایداری بدست آمده برای نمونه‌های مختلف در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مقدار پایداری دینامیکی در نمونه‌های اصلاح شده با الیاف بیشتر از نمونه‌های بدون الیاف می‌باشد. بر اساس نتایج بدست آمده، اضافه نمودن الیاف شیشه به نمونه‌ها باعث بهبود پایداری دینامیکی ۱۶/۳ و ۱۲/۵ درصدی به ترتیب برای نمونه‌های پیر شده و نمونه‌های پیر نشده می‌گردد.

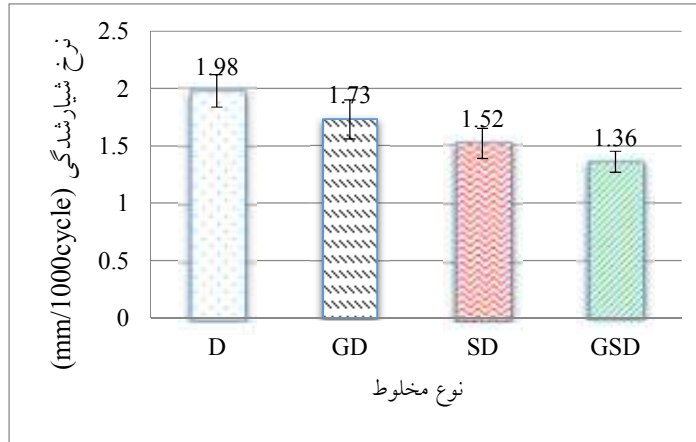


شکل ۹. مقادیر انحراف معیار و میانگین شاخص پایداری دینامیکی برای نمونه‌های آسفالتی آزمایش شده در حالت خشک

۳-۳- نتایج شاخص نرخ شیارشدگی

شکل ۱۰ مقادیر میانگین و انحراف معیار نرخ شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی را نشان می‌دهد. نتایج حکایت از بهبود این شاخص به میزان ۱۰ تا ۱۳ درصد با افزودن شدن الیاف و ۲۱ تا ۲۸ درصد با پیرشدگی کوتاه مدت نمونه دارد. باتوجه به پراکندگی داده‌ها در این نمودار، آنالیز آنوا دو طرفه در سطح اطمینان ۹۵٪ بر روی این نتایج اجرا شد که نتایج آن در جدول ۶ قابل ملاحظه است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که هر دو فاکتور الیاف و شیارشدگی تاثیر مهمی بر شاخص نرخ شیارشدگی دارند در حالی که برهم کنش این دو فاکتور از نظر آماری مهم قلمداد نمی‌شود.

شکل ۱۰. میانگین و انحراف معیار شاخص نرخ شیارشدگی برای مخلوط‌های آزمایش شده در شرایط خشک



شکل ۱۰. میانگین و انحراف معیار شاخص نرخ شیارشدگی برای مخلوط‌های آزمایش شده در شرایط خشک

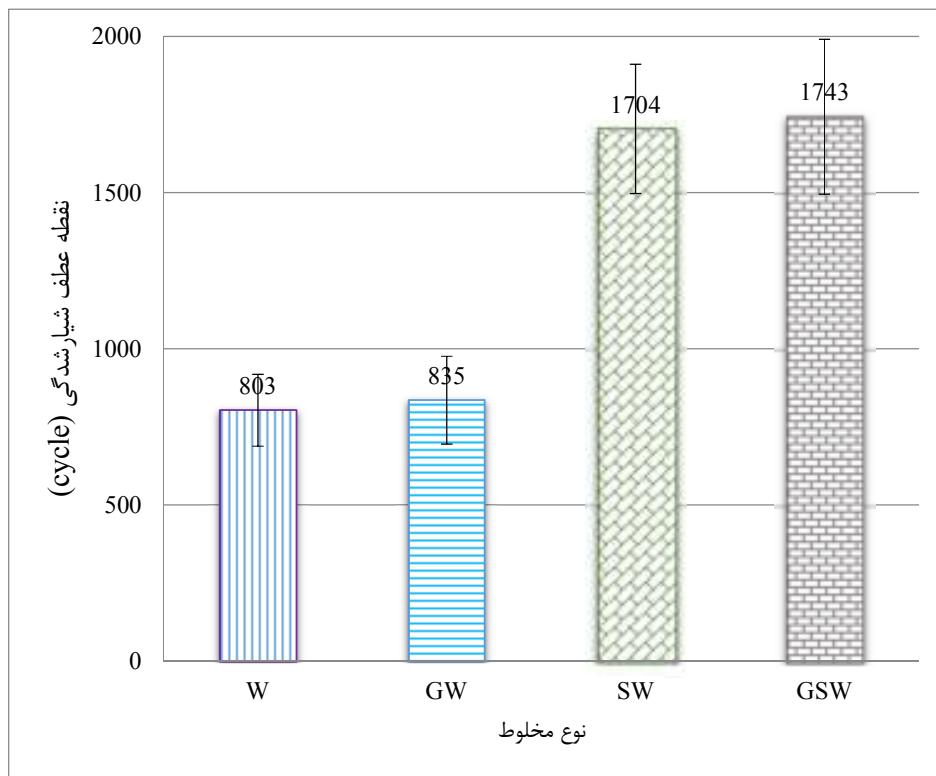
جدول ۶. نتایج آنالیز آماری ارزیابی اهمیت تاثیر الیاف شیشه و پیرشدگی بر شاخص نرخ شیارشدگی

فاکتور	p-value	F	میانگین مربعات
الیاف	۰/۰۱۸	۸/۷۱	۰/۱۲۶
پیرشدگی	۰/۰۰۰	۳۵/۷	۰/۵۱۷
الیاف × پیرشدگی	۰/۵۳۵	۰/۴۲	۰/۰۰۶

۳-۴- نقطه عطف عریان‌شدگی

شکل مقادیر شاخص نقطه عطف شیارشدگی برای مخلوط‌های مختلف را نشان می‌دهد. این نتایج به روشنی نشان می‌دهد که افزودن الیاف تاثیر چندانی بر حساسیت رطوبتی مخلوط ندارد. در نقطه مقابل، همانطور که ملاحظه می‌شود، شاخص نقطه عطف شیارشدگی برای مخلوط‌هایی که شرایط پیرشدگی را تجربه کرده‌اند به شکل قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. برای مثال این شاخص برای مخلوط کنترل و مخلوط حاوی الیاف پس از پیرشدگی به ترتیب ۱۱۲ و ۱۰۹ درصد افزایش پیدا کرده است. بر اساس پیشنهاد اشنبرنر و کوریر (۱۹۹۳) مخلوط‌های با شاخص نقطه عطف عریان‌شدگی کمتر از ۱۵۰۰ عملکرد میدانی ضعیفی خواهند داشت. مقایسه این عدد با مقادیر بدست آمده در این تحقیق لزوم پیرشدگی کوتاه مدت نمونه‌های آسفالتی در آزمایشگاه برای دستیابی به برآوردی صحیح از عملکرد مخلوط در میدان را آشکار می‌سازد.

شکل مقادیر شاخص نقطه عطف شیارشدگی برای مخلوط‌های مختلف را نشان می‌دهد. این نتایج به روشنی نشان می‌دهد که افزودن الیاف تاثیر چندانی بر حساسیت رطوبتی مخلوط ندارد. در نقطه مقابل، همانطور که ملاحظه می‌شود، شاخص نقطه عطف شیارشدگی برای مخلوط‌هایی که شرایط پیرشدگی را تجربه کرده‌اند به شکل قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. برای مثال این شاخص برای مخلوط کنترل و مخلوط حاوی الیاف پس از پیرشدگی به ترتیب ۱۱۲ و ۱۰۹ درصد افزایش پیدا کرده است. بر اساس پیشنهاد اشنبرنر و کوریر (۱۹۹۳) مخلوط‌های با شاخص نقطه عطف عریان‌شدگی کمتر از ۱۵۰۰ عملکرد میدانی ضعیفی خواهند داشت. مقایسه این عدد با مقادیر بدست آمده در این تحقیق لزوم پیرشدگی کوتاه مدت نمونه‌های آسفالتی در آزمایشگاه برای دستیابی به برآوردی صحیح از عملکرد مخلوط در میدان را آشکار می‌سازد.

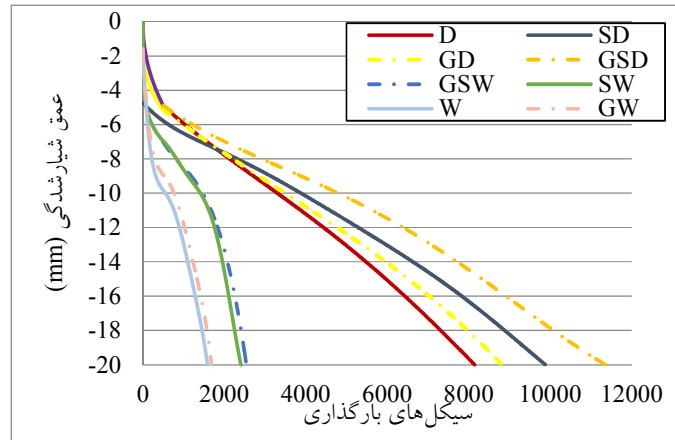


شکل ۱۱. شاخص نقطه عطف عربان‌شدگی برای مخلوط‌های مورد مطالعه

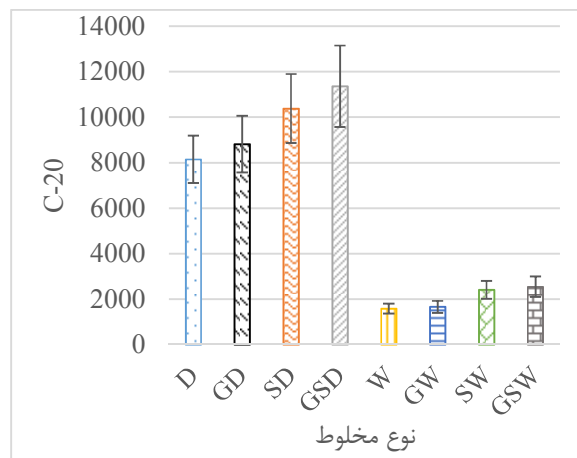
۲-۴- عمق شیارشدگی در برابر سیکل بارگذاری

چسبندگی سطح مصالح سنگی و قیر و همچنین کاهش پیوستگی ذرات قیر توجیه شود. همانطور که در شکل ۱۱ تا شکل ۱۲ ملاحظه می‌شود، پیرشدگی باعث بهبود مقاومت شیارشدگی می‌شود. این افزایش مقاومت ممکن است به دلیل ایجاد سختی بیشتر در قیر مخلوط در پروسه پیرشدگی باشد. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۱۲، اصلاح نمودن نمونه‌ها با الیاف شیشه منجر به افزایش ۴/۹، ۵/۶، ۸/۲ و ۴/۷ درصدی در سیکل نهایی برای رسیدن به عمق شیارشدگی میلی‌متر ۲۰ را به ترتیب برای نمونه‌های GSD، GSW، GD و GW به همراه خواهد داشت.

نمودار عمق شیارشدگی در برابر تعداد سیکل بارگذاری برای نمونه‌های آزمایش شده در شرایط مختلف رطوبت و پیرشدگی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که اصلاح نمونه‌ها با الیاف باعث بهبود عملکرد شیارشدگی نمونه‌ها شده است. الیاف شیشه با قابلیت جذب قیر بر روی سطح خود و همچنین تشکیل شبکه‌های سه بعدی در مخلوط و افزایش مقاومت در برابر نیروهای برشی، از روان شدن قیر در دمای بالا ممانعت کرده و باعث افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی می‌شود. تاثیر منفی رطوبتی بر عملکرد شیارشدگی نمونه‌ها به وضوح در شکل ۱۱ ملاحظه می‌شود. این تاثیر منفی، می‌تواند با تاثیر رطوبت بر کاهش



شکل ۱۱. عمق شیارشدگی در برابر سیکل بارگذاری

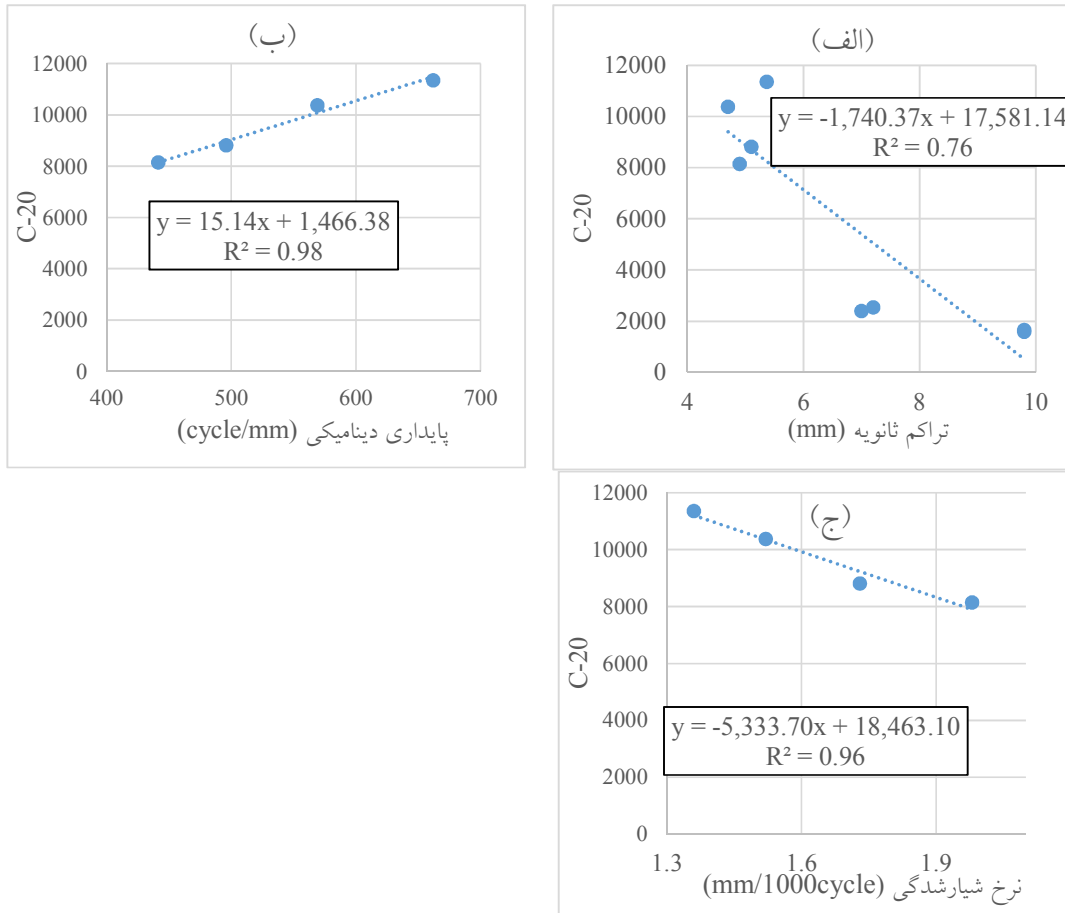


شکل ۱۲. میانگین و انحراف معیار تعداد سیکل نهایی متناظر با عمق شیارشدگی ۲۰ میلی متر

۵- مدل سازی

نتایج نشان می‌دهد که شاخص تراکم ثانویه نامزد مناسبی برای پیش بینی تعداد سیکل متناظر با عمق ۲۰ میلی متر نیست ($R^2 = ۷۶\%$). در نقطه مقابل اما هر دو شاخص پایداری دینامیکی و نرخ شیارشدگی به خوبی توانستند این پارامتر را پیش‌بینی کنند ($R^2 > ۹۶\%$). دقت کمتر مدل شاخص تراکم ثانویه قابل پیش‌بینی بود چرا که رتبه‌بندی توان بربری مخلوط‌ها توسط این شاخص در برخی موارد با آنچه که دیگر شاخص‌ها رتبه‌بندی کرده‌اند متفاوت است.

استاندارد AASHTO T324 تصریح دارد که آزمایش چرخ محرک تا رسیدن به عمق شیارشدگی ۲۰ میلی‌متر ادامه پیدا کند. این در حالی است که پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه مهمترین شاخص‌های شیارشدگی از جمله تراکم ثانویه، پایداری دینامیکی و نرخ شیارشدگی در زمان بسیار کوتاه‌تری به دست می‌آیند. لذا در این بخش از تحقیق به منظور پیش‌بینی عمق شیارشدگی با کمک شاخص‌های یاد شده مدل رگرسیون خطی ارائه شده است. شکل ۱۳ سه مدل ارائه شده در این تحقیق را به شکل گرافیکی نشان می‌دهد.



شکل ۱۳. رابطه شاخص‌های تراکم ثانویه، پایداری دینامیکی و نرخ شیارشدگی با تعداد سیکل متناظر با عمق شیارشدگی ۲۰ میلی‌متر

۶- نتیجه‌گیری

رسیدن به عمق شیارشدگی ۲۰ و ۱۲/۵ میلی‌متر در نمونه‌های آسفالتی گرم می‌شود.

-شاخص پایداری دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی گرم با اضافه نمودن الیاف شیشه به نمونه‌ها بین ۱۶/۳ و ۱۲/۵ درصد افزایش پیدا می‌کند. پیرشدگی کوتاه مدت نیز منجر به بهبود این شاخص به میزان ۲۹ تا ۳۳/۵ درصد می‌شود.

-شاخص نرخ شیارشدگی با افزوده شدن الیاف شیشه به میزان ۱۰ تا ۱۳ درصد و پس از پیرشدگی کوتاه مدت نمونه‌ها بین ۲۱ تا ۲۸ درصد کاهش پیدا می‌کند.

-افزودن الیاف شیشه به مخلوط‌های آسفالتی تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر شاخص نقطه عطف عریان شدگی ندارد. در حالیکه پیرشدگی منجر به افزایش تقریباً دو برابری این شاخص می‌شود.

در تحقیق آزمایشگاهی انجام شده تاثیر الیاف شیشه به طول ۱۲ میلی‌متر و با مقدار ۰/۳ درصد وزنی کل مخلوط و همچنین تاثیر اعمال شرایط پیرشدگی کوتاه مدت بر عملکرد شیارشدگی و حساسیت رطوبتی مخلوط‌های گرم با استفاده از دستگاه چرخ محرک مورد بررسی قرار گرفته است. دست آوردهای این تحقیق به طور خلاصه در ادامه ارائه شده است:

-اگرچه افزوده شدن الیاف به مخلوط منجر به افزایش ۱ تا ۴ درصدی در شاخص تراکم ثانویه می‌شود اما این افزایش‌ها بر مبنای نتایج بدست آمده از تحلیل آماری مهم نیستند. تاثیر پیرشدگی بر شاخص تراکم ثانویه اما به شرایط رطوبتی مخلوط بستگی دارد.

-اصلاح نمودن نمونه‌ها با الیاف شیشه، منجر به افزایش ۴ تا ۹ و ۸ تا ۱۳ درصدی به ترتیب در سیکل مورد نیاز برای

analyzer". Road Materials and Pavement Design, 8(3), pp.595-604.

-Cooley, L., Kandhal, P. S. Buchanan, M. S. Fee, F. & Epps, A., (2000), "Loaded wheel testers in the United States: State of the practice: Transportation Research Board", National Research Council.

-Das, P. K., Tasmir, Y., & Birgisson, B., (2012), "Evaluation of fracture and moisture damage performance of wax modified asphalt mixtures". Road Materials and Pavement Design, 13(1), pp.142-155.

-Doyle, J. D., & Howard, I. L. (2013), "Rutting and moisture damage resistance of high reclaimed asphalt pavement warm mixed asphalt: loaded wheel tracking vs". conventional methods. Road Materials and Pavement Design, 14(sup2), pp.148-172.

-Guo, Q., Li, L., Cheng, Y., Jiao, Y., & Xu, C., (2015), "Laboratory evaluation on performance of diatomite and glass fiber compound modified asphalt mixture". Materials & Design, 66, pp.51-59.

-Hicks, R. G., (1991), "Moisture damage in asphalt concrete: Transportation Research Board".

-Hurley, G. C., & Prowell, B. D., (2005), Evaluation of Sasobit for use in warm mix asphalt. NCAT report, 5(06).

-Kiggundu, B. M., & Roberts, F. L. (1988), "The Success/Failure of Methods Used to Predict the Stripping Propensity in the Performance of Bituminous Pavement Mixtures". Paper presented at the Presented at the Annual Transportation Research Board Meeting.

-Kim, Y.-R., Zhang, J., & Ban, H., (2012), "Moisture damage characterization of warm-mix asphalt mixtures based on laboratory-field evaluation". Construction and Building Materials, 31, pp.204-211.

-مدل‌های رگرسیونی ارائه شده در این تحقیق قادرند با دقت بالا تعداد سیکل متناظر با ۲۰ میلی‌متر شیارشدگی را با کمک شاخص‌های نرخ شیارشدگی و پایداری دینامیکی پیش‌بینی کنند.

۷- مراجع

-Abtahi, S. M., Esfandiarpour, S., Kunt, M., Hejazi, S. M., & Ebrahimi, M. G. (2013), Hybrid reinforcement of asphalt-concrete mixtures using glass and polypropylene fibers. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 8(2), pp.25-35.

-Aschenbrener, T. (1995), "Evaluation of Hamburg wheel-tracking device to predict moisture damage in hot-mix asphalt". Transportation Research Record (1492), pp.193-201.

-Aschenbrener, T., & Currier, G., (1993), Influence of testing variables on the results from the Hamburg wheel-tracking device.

-Bonaquist, R. F., (2011), "Mix design practices for warm mix asphalt (Vol. 691): Transportation Research Board.

-Busching, H., Elliott, E., & Reyneveld, N., (1970), "A state-of-the-art survey of reinforced asphalt paving. Paper presented at the Association of Asphalt Paving Technologists Proc".

-Buss, A., Williams, R. C., & Schram, S. (2016), "Evaluation of moisture susceptibility tests for warm mix asphalts. Construction and Building Materials, 102, pp.358-366.

-Chen, H., Xu, Q., Chen, S., & Zhang, Z. (2009), Evaluation and design of fiber-reinforced asphalt mixtures. Materials & Design, 30(7), pp.2595-2603.

-Chen, X., Huang, B., & Xu, Z. (2007), "Comparison between flat rubber wheeled loaded wheel tester and asphalt pavement

- asphalt mixtures". Resources, Conservation and Recycling, 42(3), pp.265-274.
- Sheth, N. M. (2010), "Evaluation of selected warm mix asphalt additives". (MS (Master of Science) thesis), The University of Iowa.
- Terrel, R. L., & Al-Swailmi, S. (1994), Water sensitivity of asphalt-aggregate mixes: test selection.
- Vaitkus, A., Cygas, D., Laurinavičius, A., Vorobjovas, V., & Perveneckas, Z., (2016), "Influence of warm mix asphalt technology on asphalt physical and mechanical properties". Construction and Building Materials, 112, pp. 800–806.
- Yildirim, Y., Jayawickrama, P. W., Hossain, M. S., Alhabshi, A., Yildirim, C., Smit, A. d. F., & Little, D. N., (2007), "Hamburg wheel-tracking database analysis".
- Zezelew, H., Paugh, C., Corrigan, M., Belagutti, S., & Ramakrishnareddy, J., (2013), "Laboratory evaluation of the mechanical properties of plant-produced warm-mix asphalt mixtures". Road Materials and Pavement Design, 14(1), pp.49-70.
- Little, D. N., & Jones, D., (2003), "Chemical and mechanical processes of moisture damage in hot-mix asphalt pavements". Paper presented at the National seminar on moisture sensitivity of asphalt pavements.
- 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.
- McDaniel, R., & Shah, A. (2003), "Asphalt additives to control rutting and cracking". Moghadas Nejad, F., Azarhoosh, A., Hamed, G. H., & Roshani, H., (2014), "Rutting performance prediction of warm mix asphalt containing reclaimed asphalt pavements". Road Materials and Pavement Design, 15(1), pp.207-219.
- Punith, V. S., et al. "Effects of long-term aging on moisture sensitivity of foamed WMA mixtures containing moist aggregates Materials and structures", 45.1-2 (2012), pp.251-264.
- Putman, B. J., & Amirhanian, S. N. (2004), "Utilization of waste fibers in stone matrix