

ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی با بررسی رفتار خزش دینامیکی و تغییر شکل دائم

مقاله علمی - پژوهشی

سیدمحمدحسین دهناد^{*}، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران
حسین فراهانی زنجیرانی، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران
^{*}پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m.dehnad@qom.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۳ - پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱

صفحه ۶۴-۵۱

چکیده

بر اساس مطالعات و تحقیقات صورت گرفته، پارامترهای مختلفی در خرابی رطوبتی و برهنگی مخلوط‌های آسفالتی، مرتبط با سنگدانه، قیر، مخلوط، محیط و ترافیک دخیل هستند. هدف اصلی این تحقیق، ارزیابی برهنگی در شرایط محیطی و ترافیکی متفاوت و اثر متقابل آن بر تغییر شکل دائم مخلوط‌های آسفالتی است. برای این منظور آزمایش خزش دینامیکی بر روی مخلوط‌های عمل‌آوری شده و عمل‌آوری نشده با دانه‌بندی مترآکم، جهت مقایسه رفتار نمونه‌ها در حضور و عدم حضور رطوبت انجام شده است. از بررسی ترکیبات مختلف دمایی و بارگذاری این نتیجه حاصل شد که در دمای بالا با افزایش فرکانس، پتانسیل برهنگی کاهش یافته و در دمای پایین با افزایش فرکانس، پتانسیل برهنگی افزایش می‌یابد. بر اساس تحلیل مشخصات مکانیکی نمونه‌ها مشاهده شد، نسبت مدول خزش به مدول برجهندگی معیار مناسبی برای ارزیابی تغییر شکل پلاستیک در نمونه‌ها است و می‌توان پتانسیل برهنگی و اثر رطوبت را با استفاده از این نسبت در دماهای بالا بررسی کرد. نتایج نشان داد که در دمای ۴۰ و فرکانس ۵٪ و ۱ هرتز و دمای ۲۰ و فرکانس ۵٪ هرتز نسبت مدول خزش به مدول برجهندگی در نمونه اشباع بیشتر از نمونه خشک است و در نتیجه مستعد خرابی برهنگی می‌باشد. همچنین یافته شد که در دماهای بالا، حساسیت مخلوط‌های آسفالتی به دما نسبت به رطوبت بیشتر است.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالتی، خرابی رطوبتی، برهنگی، تغییر شکل دائم، آزمایش خزش دینامیکی

۱- مقدمه

بوده‌اند که مخلوط‌های آسفالتی با عملکرد خوب و ضعیف از نظر استعداد برهنگی را متمایز کند. از همان اوایل مشخص شد که مشکل به کمبود چسبندگی بین قیر و سنگدانه و کم شدن پیوستگی چسباننده قیری ارتباط دارد (Epps, 2000). با این حال چالش‌هایی برای پیدا کردن آزمایشی جهت شناسایی حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها، وجود داشته است. آزمایش استاندارد که برای شناسایی استعداد رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار می‌گیرد آزمایش لاتمن اصلاح شده است. استاندارد AASHTO T283، روش طرح مخلوط

برای عملکرد بهینه روسازی آسفالتی، مخلوط آسفالتی باید از دوام و پایداری بالایی در عمر بهره‌برداری برخوردار باشد و چنانچه عوامل و علل ایجاد خرابی و اضمحلال روسازی‌های آسفالتی بررسی شوند، دما و رطوبت وزنه‌های سنگینی را از لحاظ تاثیر مخرب بر روسازی به خود اختصاص خواهند داد (Wei, Kayser, Gong et al., 2020, Sun et al., 2020) (and Wellner, 2013). از سالیان دور، خرابی رطوبتی یک نگرانی مهم برای پژوهشگران مهندسی روسازی بوده است. محققین از سال ۱۹۲۰، در حال تحقیق برای انجام آزمایشی

مخلوطها مقدار ITS خشک و مرطوب کمتری را نشان دادند (Xiao et al., 2010). گورکم و سنگر در تحقیقات خود نشان دادند که مخلوطهای تهیه شده با قیر اصلاح شده پلیمری الاستومتریکی و پلاستومتریکی پتانسیل عریان‌شدگی و حساسیت رطوبتی را نسبت به مخلوطهای تهیه شده با قیر معمولی در همه مخلوطهایی که ساخته بودند کاهش دادند. در واقع قیر اصلاح شده پلیمری موجب افزایش چسبندگی بین سنگدانه‌ها و ایجاد یک ساختمان شبکه‌ای در قیر معمولی می‌شود (Gorkem and Sengoz, 2009). خدایی و مهرآرا در بررسی خود به مقایسه اثر مقادیر مختلف پلیمر SBS بر روی رفتار مخلوطهای آسفالتی و تعیین مقدار بهینه آن پرداختند و همچنین رفتار مخلوطهای اصلاح شده با پلیمر SBS و مخلوطهای اصلاح نشده را در دو دمای ۴۰ و ۵۰ درجه و با سطوح تنش ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلو پاسکال با استفاده از آزمایش خزش دینامیکی مقایسه کردند. ایشان در طی تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که مخلوطهای آسفالتی اصلاح شده با SBS بطور قابل توجهی در برابر دما حساسیت کمتری نسبت به مخلوطهای اصلاح نشده دارند (Khodaii and Mehrara, 2009). در تحقیق دیگری ایشان نتیجه گرفتند که مخلوطهای حاوی ذرات درشت دانه حساسیت رطوبت کمتری دارند و بهتر از دانه‌بندی‌های متراکم در برابر تغییر شکل‌های دائمی مقاومت می‌کنند (Mehrara and Khodaii, 2011). براساس تحقیقات هوانگ و نیز گوخال و همکارانش، تغییرشکل‌های دائمی در سطح روسازی در برگرفته دو مد مختلف است که مد اول، تغییر شکل تراکمی و مد دوم، تغییرشکل پلاستیک است (Gokhale et al., 2005).

مدول خزش یا مدول وابسته به زمان بر اساس رابطه (۱) تعریف می‌شود.

$$E_c = \frac{\sigma_d}{\varepsilon(t)} \quad (1)$$

مدول یک ماده، ویژگی بسیار مهمی از آن ماده است که تنش را به کرنش مرتبط می‌سازد. اما در مورد مصالح ویسکو الاستیک، استفاده از جمله تسلیم یا $D(t)$ مفیدتر به نظر می‌رسد. تسلیم، در واقع عکس مدول می‌باشد که با رابطه (۲) نشان داده می‌شود.

$$D(t) = E(t)^{-1} = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_d} \quad (2)$$

مارشال را مورد استفاده قرارداد و با توسعه روش طرح مخلوط سوپریپو، شیوه‌ای مشابه را با اصلاح روش تراکم اتخاذ کرد. اگر چه AASHTO T283 برای سالیان زیادی، آزمایشی استاندارد برای حساسیت رطوبتی محسوب می‌شده است و برای به حداقل رساندن مشکل مورد استفاده قرار می‌گرفته است، ولی به نظر نمی‌رسد شاخص خیلی دقیقی برای ارزیابی پدیده برهنگی در شرایط گوناگون باشد و نتایج آن رفتار مورد انتظار مخلوطهای آسفالتی را نشان دهد (Santucci and Lawrence, 2002).

مطالعات گوناگونی در زمینه بررسی عوامل موثر بر برهنگی مخلوطهای آسفالتی انجام شده است. ابوقدیس اثر نوع سنگدانه را بر برهنگی مخلوط آسفالتی و رفتار خزش استاتیک ارزیابی کردند. نتایج فعالیت ایشان مویده آن است که مقاومت برهنگی مخلوط آسفالتی بطور قابل توجهی تحت تاثیر نوع سنگدانه استفاده شده در مخلوط است. نمونه‌های آسفالتی خشک و عمل‌آوری نشده ساخته شده با سنگ آهک مقاومت برهنگی بهتری را نسبت به نمونه‌های ساخته شده با بازلت، در تحقیق ایشان نشان داد (Abo-Qudais, 2007).

سنگز و آگار به بررسی ارتباط بین ضخامت‌های مختلف فیلم قیر و ویژگی‌های در معرض رطوبت قرار گرفتن مخلوط آسفالتی به منظور یافتن ضخامت قشر بهینه که در آن خرابی رطوبتی حداقلی قابل حصول باشد، پرداختند. برای رسیدن به این هدف آن‌ها از آزمایش لاتمن اصلاح شده بر روی نمونه‌های به روش ژیراتوری متراکم شده که حاوی ۵ نوع مختلف ضخامت قشر بودند، استفاده کردند. دامنه بهینه ضخامت قشر با استفاده از آزمایش لاتمن بین ۹/۵ و ۱۰/۵ میکرومتر حاصل شد. همچنین خروجی‌های TSR منجر به این نتیجه شد که با افزایش ضخامت فیلم قیر مقادیر TSR افزایش پیدا می‌کند. این مطلب اشاره می‌کند که اثر زیان‌آور آب با افزایش در ضخامت غشاء قیر کاهش می‌یابد (Sengoz, Burak and Emin, 2007).

ژیانو و امیرخانیان در مطالعه‌ای به بررسی اثرات افزودنی‌های مایع بر رئولوژی و حساسیت رطوبتی مخلوطهای آسفالتی گرم دربردارنده آب پرداختند. مخلوطها حاوی افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی مایع و افزودنی آسفامین بعنوان افزودنی مخلوطهای آسفالتی گرم دربردارنده آب بودند. ایشان برای ارزیابی، آزمایش‌های خزش، ITS و ... را انجام دادند. مشاهده شد افزودن آسفامین بطور موثری مقاومت تغییر شکل آسفالت را بدلیل کاهش مقدار تسلیم بهبود می‌بخشد. همچنین این

به این ترتیب می‌توان با اعمال بار دینامیکی محوری، با استفاده از دستگاه UTM به نمونه‌هایی که بصورت اشباع و در داخل آب قرار دارند حالت ورود و خروج دینامیکی آب به داخل منافذ آنها را مدل نمود. به این شکل آب به سطح بین سنگدانه و قیر نفوذ می‌کند و باعث ضعف چسبندگی بین قیر و سنگدانه و ضعف پیوستگی در ساختار قیر می‌شود و به عبارت دیگر پدیده برهنگی هویدا می‌شود. خرابی برهنگی باعث تسریع در نرخ خرابی مخلوط آسفالتی شده و در نتیجه تغییر شکل‌های دائمی نمونه در معرض رطوبت افزایش می‌یابد. با مقایسه کرنش تجمعی نمونه های خشک و اشباع می‌توان حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی را ارزیابی نمود. باتوجه به انتخاب آزمایش خزش دینامیکی در این مطالعه، رفتار نمونه‌های خشک و اشباع تحت تاثیر دما و فرکانس‌های مختلف بارگذاری بررسی می‌شود و با لحاظ کردن این دو پارامتر ترکیب بحرانی تعیین خواهد شد.

۲- روش تحقیق

در تحقیق حاضر، تلاشی جهت ارزیابی حساسیت رطوبتی و اثر متقابل آن بر تغییر شکل دائم از طریق انجام آزمایش خزش دینامیکی بر روی مخلوط‌های با دانه بندی متراکم، با مقادیر منافذ هوای مشابه (بدلیل مقایسه صحیح تر نمونه‌ها و عدم تاثیرگذاری متفاوت ناشی از منافذ هوای متفاوت)، در شرایط محیطی و فرکانس بارگذاری مختلف با استفاده از دستگاه بارگذاری UTM25 صورت گرفته است. آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های خشک و اشباع بمنظور مقایسه رفتارشان در حضور و عدم حضور آب انجام شده است. با اعمال مکرر ضربات تنش محوری به نمونه‌های آسفالتی، تغییر شکل دائم توسط دو LVDT اندازه گیری شده و با استخراج اطلاعات به بررسی نمودارهای تغییر شکل دائم، مدول برجهنگی و مدول خزشی در برابر سیکل‌های بارگذاری برای مقایسه بین نمونه‌های خشک و اشباع پرداخته شده است. در فرآیند انجام آزمایشات چهار دمای مختلف (۴۰، ۲۰، ۵ و ۵- درجه سلسیوس)، چهار فرکانس بارگذاری (۰/۵، ۱، ۵ و ۱۰ هرتز) و دو حالت شرایط رطوبتی (خشک و اشباع) لحاظ شده‌اند.

مصالح سنگی استفاده شده از نوع سیلیسی و مصالح رودخانه‌ای حاصل از رسوبات رودخانه سپیدرود رشت است. در حالت کلی سنگدانه‌های سیلیسی درصد جذب آب بیشتری نسبت به سنگدانه‌های آهکی دارند و این امر در تشدید پدیده

فایده اصلی به کارگیری $D(t)$ در مصالح ویسکوالاستوپلاستیک این است که پارامتر مذکور این امکان را فراهم می‌کند که بتوان مولفه‌های مختلف کرنش (کرنش‌های الاستیک ϵ_e ، پلاستیک ϵ_p ، ویسکوالاستیک ϵ_{ve} و ویسکوپلاستیک ϵ_{vp}) را در تراز مشخصی از تنش، از هم جدا نمود. به این ترتیب کرنش تابع زمان، به راحتی به صورت رابطه (۳) نوشته می‌شود.

(۳)

$$\epsilon(t) = \sigma_d \times D(t) = \sigma_d (D_e + D_p + D_{ve} + D_{vp}(t))$$

یکی از روش‌هایی که می‌تواند تغییر شکل‌های دائمی را در مخلوط‌های آسفالتی تعیین کند، استفاده از آزمایش خزش دینامیکی است (Hussan et al, 2019). در این آزمایش بار به تعداد چند هزار سیکل به نمونه اعمال می‌شود و در نهایت تغییر شکل دائمی تجمعی، به صورت تابعی از تعداد تکرار بار رسم می‌گردد. بار اعمال شده به نمونه در این تست می‌تواند به صورت پالس‌های مستطیلی یا نیم سینوسی و یا انواع دیگر باشد. این روش آزمایش با استفاده از تست فشاری تک محوری توسط مونیس‌میت و همکارانش ارائه شد (Monismith et al, 1994). همچنین کاووسی و متولی‌زاده از آزمایش خزش دینامیکی برای بررسی ویژگی‌های تغییر شکل دائمی مخلوط های آسفالتی استفاده نمودند (Kavussi and Motevalizadeh, 2020).

تست خزش دینامیکی خروجی‌های مختلفی می‌تواند داشته باشد که می‌توان از آنها برای مقایسه بین پتانسیل تغییر شکل دائمی مخلوط‌های آسفالتی مختلف استفاده نمود (Nega et al, 2019)؛ به عنوان مثال براساس تحقیقات کالوش و همکارانش، یکی از معیارهای مقایسه می‌تواند عدد جریان باشد. همچنین آیری در تحقیقات خود، از متوسط نرخ کرنش و کرنش کل نهایی برای طبقه‌بندی عملکرد آسفالت‌های پلیمری مختلف استفاده نمود. به عقیده او متوسط نرخ کرنش در مقایسه با کرنش نهایی معیار قابل اطمینان‌تری برای بررسی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در آزمایش خزش دینامیکی است چراکه این پارامتر برخلاف پارامتر کرنش نهایی مستقل از کرنش‌های اولیه نمونه‌ها می‌باشد. براساس مطالعات و تحقیقات صورت گرفته در گذشته، آزمایش خزش دینامیکی بطور مطلوبی می‌تواند تغییر شکل‌های دائم رویه‌های آسفالتی را مدل کند (Mahmoodinia, Mehrara and Molayem and Fardealirezaei, 2016, Abo-Qudais and Al-Shweily, 2007, Khodaii, 2013).

برهنگی در مخلوط‌های تهیه شده از این نوع سنگدانه‌ها تاثیرگذار است. همچنین قیر مصرفی در این تحقیق از نوع ۶۰/۷۰ تولید شده در پالایشگاه نفت پاسارگاد می‌باشد. برای ساخت نمونه‌های مورد نیاز برای آزمایش خزش ابتدا می‌بایست مقدار قیر مناسب برای دانه بندی مورد استفاده انجام می‌شد که این کار با استفاده از آزمایش مارشال انجام گرفت. در گام بعد با توجه به اینکه وقوع برهنگی در مخلوط‌هایی اتفاق می‌افتد که دارای مقدار مشخصی از تخلخل باشند که این مقدار بر اساس تحقیقات مختلف و نیز ASTM D867، ۶ الی ۸ درصد می‌باشد، باید تعداد ضربه‌های تراکم مارشال مناسب برای رسیدن به مقدار مورد نظر تخلخل تعیین می‌شد. برای این منظور اقدام به ساخت نمونه‌هایی با ۵۰، ۵۵، ۶۰، ۶۵، ۷۰ و ۷۵ ضربه شد (برای هر ضربه ۳ تکرار) و برای هر کدام از نمونه‌های با تعداد مختلف ضربه ساخته شده، آزمایش منافذ هوا انجام پذیرفت. بر اساس میانگین تخلخل محاسبه شده برای ۳ نمونه، ۵۵ ضربه برای ساخت نمونه‌های با دانه بندی متراکم و درصد تخلخل مطلوب در نظر گرفته شد. در مرحله بعد آزمایشات خزش دینامیکی با ترکیبات مختلف بار و دما بر روی نمونه‌های متراکم شده انجام گرفت. بر اساس نتایج آزمایشات مقدار درصد بهینه قیر ۴٫۵٪ تعیین گردید.

$$P_s = \left(\frac{W_{ssd} - W_a}{V_a} \right) \quad (4)$$

که در رابطه فوق W_{ssd} وزن نمونه بعد از اشباع (گرم)، W_a وزن نمونه قبل از اشباع (گرم) و V_a حجم فضا‌های خالی نمونه است.

در طول آزمایش خزش نیز نمونه اشباع در داخل محفظه‌ای قرار می‌گرفت که اطراف آن را آب فراگرفته بود. بدین ترتیب در طول آزمایش با اعمال بار دینامیکی ورود و خروج دینامیکی آب به داخل منافذ نمونه محقق می‌شد. شکل (۱) نحوه قرارگیری نمونه در داخل محفظه مذکور و دستگاه UTM را نشان می‌دهد. در طی انجام آزمایشات، بار دینامیکی ۲۰۰ کیلوپاسکال بصورت موج مربعی بهمراه پیش بارگذاری استاتیکی ۲۰ کیلوپاسکال به مدت ۵ دقیقه به نمونه‌ها اعمال گردید.



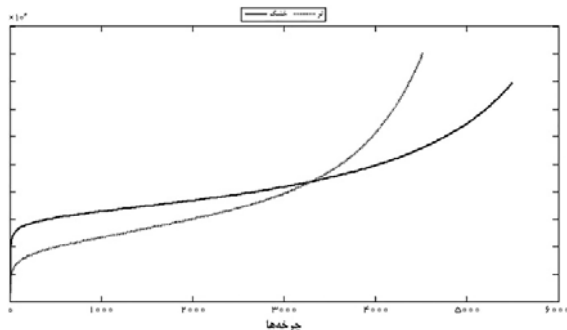
شکل ۱. نمونه اشباع تحت اعمال بار

برای این منظور آزمایش خزش دینامیکی بر روی نمونه‌های آسفالتی خشک و نمونه‌های اشباع در داخل آب انجام شد. این آزمایش با استفاده از دستگاه UTM25 و با اعمال بار دینامیکی محوری به نمونه‌ها صورت پذیرفت. آزمایش انجام گرفته با این روش، خروجی‌های متعددی دارد که از جمله آنها، منحنی خزش (نمودار تغییر شکل‌های ماندگار در مقابل تعداد سیکل‌های اعمال بار)، تغییر شکل‌های الاستیک در هر سیکل و مدول برجهنگی و همچنین مدول خزشی نمونه است. بنابراین این امکان فراهم شد که با انجام آزمایش بر روی نمونه‌های خشک و اشباع پتانسیل تغییر شکل در آنها تعیین شده و با مقایسه این دو حالت، استعداد این مخلوط‌ها در برابر برهنگی نیز مشخص گردد. لازم به ذکر است از آنجا که در بسیاری از تحقیقات انجام گرفته با استفاده از آزمایش خزش دینامیکی ۱۴۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده، سطح تنش معادل ۲۰۰ کیلوپاسکال در آزمایشات فوق به نمونه‌ها اعمال شد.

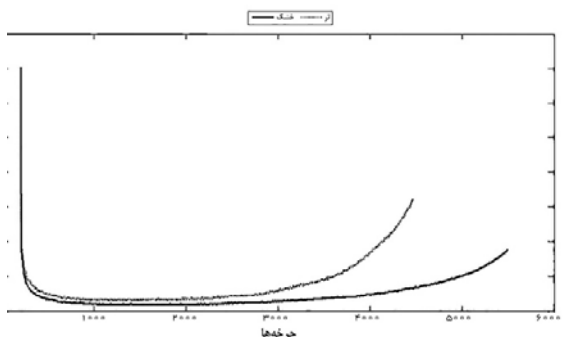
اشباع نمونه‌هایی که باید در داخل آب مورد آزمایش قرار می‌گرفتند، بر اساس استاندارد ASTM D4867 انجام گرفت.

۳- بحث

ابتدا نتایج آزمایش روی نمونه‌ها، در دمای ۴۰ درجه سلسیوس و فرکانس ۰/۵ هرتز بیان می‌شود. مطابق شکل (۲)، تا حدود ۳۲۰۰ سیکل ابتدایی مقدار کرنش دائمی در نمونه خشک بیش از نمونه اشباع می‌باشد و بدین معنی است که نمونه‌های اشباع مقاومت بالاتری در برابر نیروی اعمالی داشته‌اند. به‌طور مثال در سیکل هزارم، مقدار تغییرشکل دائم در نمونه



شکل ۲. نمودار کرنش - تعداد سیکل برای نمونه‌های اشباع و خشک در دمای ۴۰ درجه سلسیوس و فرکانس ۰.۵ هرتز



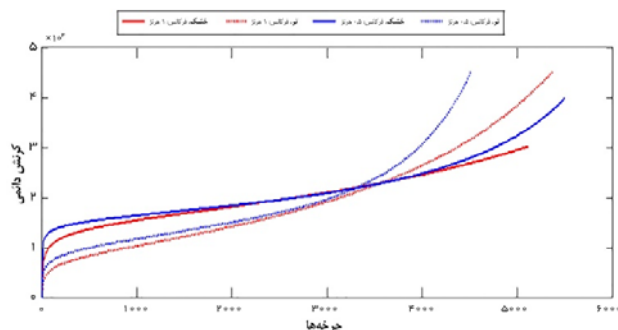
شکل ۳. نمودار شیب کرنش - تعداد سیکل برای نمونه‌های اشباع و خشک در دمای ۴۰ درجه سلسیوس و فرکانس ۰.۵ هرتز

در آزمایش بعد با ثابت نگه داشتن دما در ۴۰ درجه سلسیوس مقدار فرکانس بار به ۱ هرتز افزایش می‌یابد. زمان اعمال بار ۱۰۰ میلی ثانیه و زمان استراحت ۹۰۰ میلی ثانیه در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که زمان کل سیکل بارگذاری معیاری از سرفاصله زمانی حرکت اتومبیل‌ها است و زمان بارگذاری نیز که بخشی از زمان سیکل را تشکیل می‌دهد، سرعت حرکت اتومبیل‌ها را نشان می‌دهد. حال که زمان سیکل بارگذاری از ۲ ثانیه (فرکانس ۰/۵ هرتز) به ۱ ثانیه (فرکانس ۱ هرتز) کاهش پیدا کرده نشان دهنده افزایش میزان ترفیک بوده و کاهش زمان اعمال بار از ۵۰۰ میلی ثانیه به ۱۰۰ میلی ثانیه نشان دهنده سرعت بالاتر بارگذاری و سرعت بالاتر حرکت وسایل نقلیه می‌باشد. با افزایش فرکانس بارگذاری به ۱ هرتز رفتار مشابهی با حالت قبل که مقدار فرکانس ۰/۵ هرتز بود دیده می‌شود. همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود تلاقی دو نمودار در سیکل ۳۵۰۰ است که در مقایسه با حالت قبل این مقدار سیکل در نقطه تلاقی افزایش پیدا کرده است. این مطلب را میتوان اینگونه بیان نمود که در فرکانس ۱ هرتز، برهنگی دیرتر اثر مخرب خود را نشان می‌دهد.

خشک ۱/۳۸ برابر مقدار تغییر شکل در نمونه اشباع است؛ ولی اعمال تعداد سیکل‌های بیشتر بار به نمونه‌ها، نسبت تغییر شکل دائم نمونه خشک به اشباع کمتر می‌گردد تا اینکه در سیکل ۳۲۰۰، این مقدار برابر با یک می‌شود. در ادامه رفتار نمونه‌های خشک و اشباع متفاوت می‌شود، به طوری که تغییر شکل ماندگار در نمونه اشباع از نمونه خشک با نرخ زیادی پیشی می‌گیرد. ملاحظه می‌گردد که در سیکل ۴۰۰۰، کرنش دائمی در نمونه خشک ۰/۸ برابر نمونه اشباع است و هرچه تعداد سیکل بالاتر می‌رود این نسبت کاهش می‌یابد.

دلیل بیشتر بودن مقاومت نمونه‌های اشباع در سیکل‌های ابتدایی را بدین صورت می‌توان بیان نمود که در مراحل اولیه، چسبندگی بین قیر و سنگدانه و پیوستگی در ساختار قیر دچار اختلال جدی نشده است. از طرفی وجود آب در منافذ نمونه آسفالتی، باعث ایجاد فشار آب حفره‌ای می‌گردد که این فشار آب حفره‌ای قسمتی از بار اعمال شده را می‌گیرد و اثر بار دینامیکی را کاهش می‌دهد، اما با ادامه اعمال بار دینامیکی و ورود و خروج دینامیکی آب به داخل منافذ آسفالت، به تدریج آب به سطح بین سنگدانه و قیر نفوذ کرده و آثار برهنگی را در آن بوجود می‌آورد و همین مسئله سبب تسریع در نرخ خرابی و افزایش تغییر شکل‌های ماندگار نمونه اشباع می‌شود.

همچنین در این شرایط دمایی و بارگذاری مشاهده می‌شود که هر سه فاز منحنی خزش پدید آمده است. از شکل (۲) برمی‌آید که مدت زمان فاز دوم در نمونه خشک بیش از نمونه اشباع می‌باشد و نمونه اشباع در سیکل کمتری فاز سوم منحنی خزش خود را شروع می‌کند. تعیین دقیق‌تر زمان‌های شروع هر فاز با کمک نمودار شیب کرنش در برابر سیکل‌های بارگذاری امکان‌پذیر است. با مقایسه رفتار نمونه خشک و اشباع در شکل (۳) نشان می‌دهد که افزایش در نرخ تغییر شکل نمونه اشباع به نسبت نمونه خشک در فاز سوم بسیار بزرگتر است، بطوریکه در سیکل ۴۴۰۰ مقدار نرخ تغییر شکل دائم در نمونه اشباع بیش از ۴/۵ برابر نمونه خشک بدست آمده است؛ که بیانگر سریع‌تر بودن نرخ خرابی در نمونه‌های اشباع بعلت حضور رطوبت و کاهش بیشتر چسبندگی بین قیر و سنگدانه می‌باشد.



شکل ۴. نمودار کرنش - تعداد سیکل برای نمونه‌های اشباع و خشک در دمای ۴۰ درجه سلسیوس و فرکانس ۰.۵ و ۱ هرتز

شکل (۵) برداشت می‌شود. در طول اعمال ۱۰۰۰۰ سیکل بار، برخلاف دو حالت قبل از ابتدا تغییر شکل دائم در نمونه اشباع بیشتر از نمونه خشک است و نمونه‌های اشباع مقاومت کمتری از خود نشان می‌دهند. در این حالت در هر ۰/۲ ثانیه یک سیکل بار به نمونه وارد می‌شود. از آنجایی که در این حالت سرعت بارگذاری بسیار بالا است و فرصتی برای ورود و خروج دینامیکی آب وجود ندارد، رطوبت نتوانسته چسبندگی بین قیر و سنگدانه را بطور قابل توجهی تحت تاثیر قرار دهد و از این رو خرابی تغییر شکل دائم به نسبت خرابی برهنگی مد غالب گسیختگی است. از آنجا که نرخ افزایش کرنش در نمونه خشک بیش از نمونه اشباع می‌باشد، این حالت مویده وقوع تاثیرگذاری بیشتر خرابی تغییر شکل دائم بر خرابی برهنگی در ایجاد کرنش دائم در نمونه‌های آسفالتی تحت شرایط دمایی و بارگذاری مذکور می‌باشد. نکته قابل توجه در شکل (۵) این است که گرچه منحنی خزش نمونه اشباع در فاز خطی خود است ولی با پیدایش نقطه عطف در منحنی خزش نمونه خشک، این منحنی با شیب بیشتری وارد مرحله سوم می‌شود و روند رو به گسیختگی را طی می‌کند. بنابراین انتظار می‌رود که با افزایش تعداد سیکل‌های اعمال بار دو نمودار همدیگر را قطع کنند و از آن به بعد تغییر شکل نمونه خشک بر نمونه اشباع پیشی گیرد. در نتیجه در این فرکانس رفتار کرنش دائمی از خرابی تغییر شکل دائم بیشتر تاثیر می‌گیرد و خرابی برهنگی نقش کم‌رنگ‌تری ایفا می‌کند.

در ادامه به بررسی رفتار مدول برجهنگی نمونه‌های آسفالتی ساخته شده پرداخته می‌شود. در شکل (۶) مدول برجهنگی در برابر تعداد سیکل اعمال بار بر روی نمونه‌های خشک در دمای ۴۰ درجه برای فرکانس‌های ۰/۵، ۱، ۵ و ۱۰ هرتز ترسیم شده است. در شکل مذکور مدول برجهنگی که

روند افزایش کرنش نمونه‌ها در فرکانس‌های ۰/۵ هرتز و ۱ هرتز، بیانگر این است که طی اعمال بار مقدار کرنش در نمونه‌های خشک و اشباع در فرکانس ۰/۵ هرتز بیش از مقدار کرنش در فرکانس ۱ هرتز است. پس از مقایسه این دو حالت نتیجه می‌شود که افزایش فرکانس بارگذاری، کاهش تغییر شکل دائم را در پی خواهد داشت. علت این رفتار را می‌توان بدین صورت بیان نمود که با افزایش فرکانس مدت زمان اعمال بار به نمونه تقلیل یافته و فرصت کمتری برای ایجاد تغییر شکل‌های دائم در نمونه وجود دارد. همچنین از شکل (۴) مشاهده می‌شود که در فرکانس ۱ هرتز، نمونه اشباع از سیکل ۲۰۰۰ به بعد و در نمونه خشک از سیکل ۴۰۰۰ به بعد، منحنی خزش وارد فاز سوم خود می‌گردد، به طوری که نرخ تغییر شکل دائم در نمونه اشباع بیش از نمونه خشک است که علت آن اثر تخریبی رطوبت و ایجاد پدیده برهنگی در نمونه اشباع می‌باشد.

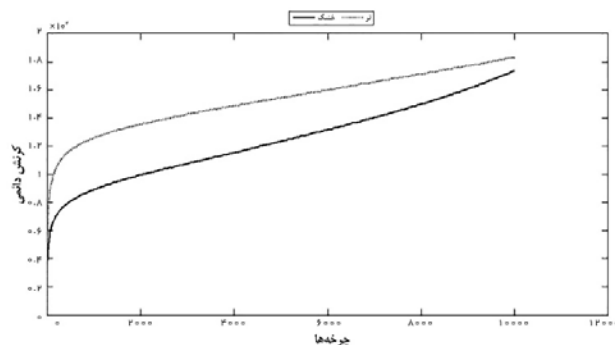
از مقایسه مقدار و نرخ کرنش در فرکانس‌های ۰/۵ و ۱ هرتز مشخص می‌شود که نسبت مقدار کرنش نمونه اشباع به نمونه خشک در سیکل ۴۰۰۰ و در فرکانس ۰/۵ هرتز برابر با ۱/۲۳ و این نسبت در سیکل ۴۰۰۰ در فرکانس ۱ هرتز برابر با ۱/۰۷ می‌باشد. از طرفی نسبت نرخ کرنش نمونه اشباع به نمونه خشک در همان سیکل و در فرکانس ۰/۵ هرتز برابر با ۳/۵ و در فرکانس ۱ هرتز برابر با ۲/۲ می‌باشد. از این رو می‌توان گفت که در فرکانس ۰/۵ هرتز پدیده برهنگی بیشتر اتفاق افتاده و رطوبت تاثیر مخرب‌تری در فرکانس مذکور دارد.

۴- آزمایش‌ها

در آزمایش بعد مجدداً با ثابت نگه داشتن دما، فرکانس به میزان ۵ هرتز افزایش داده می‌شود. مشاهدات قابل توجهی از

الاستیک کمتری نشان می‌دهند. همچنین مشاهده می‌شود که در این فرکانس‌ها در مراحل اولیه مدول برجهندگی کاهش نیافته و در سیکل‌هایی این مقدار افزایش پیدا کرده که دلیل آن حادث شدن تغییر شکل متراکم در مراحل اولیه نمونه است. نکته مهم دیگری که از نمودار مذکور یافته می‌شود این است که هرچه فرکانس کاهش یابد در تعداد سیکل کمتری تغییر شکل‌های برشی رو به گسیختگی شروع شده و به عبارتی دیگر از یک سیکلی به بعد مدول برجهندگی روند نزولی را طی می‌کند. در فرکانس ۱۰ هرتز بعلت سرعت بسیار بالای بارگذاری، بار ایجاد شده باعث متراکم شدن نمونه می‌شود و خرابی و تغییر شکل پلاستیک در نمونه به چشم نمی‌آید و تغییر شکل متراکم ایجاد می‌شود.

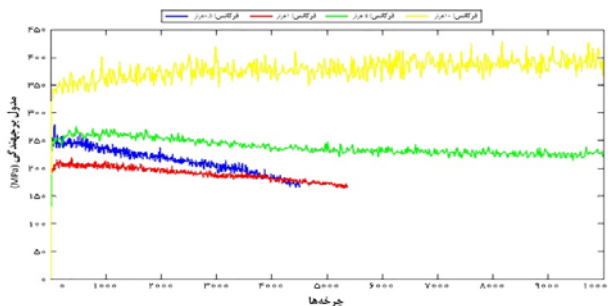
مبین رفتار الاستیک می‌باشند، برای مخلوط‌های آسفالتی در فرکانس‌های ۰/۵، ۱ و ۵ هرتز با افزایش تعداد سیکل‌های اعمال بار روند رو به کاهش دارد که این سیر نزولی در فرکانس ۰/۵ و ۵ هرتز به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار را دارا است. ولی این رفتار در فرکانس ۱۰ هرتز متفاوت ظاهر می‌شود. در این فرکانس میزان مدول برجهندگی تقریباً مقدار ثابت را حفظ کرده و حتی در بعضی سیکل‌ها میزان آن بیشتر نیز شده است. اگر افزایش مدول دلیل بر متراکم شدن آسفالت و کاهش مدول دلیل بر گسترش خرابی در آن باشد، بخوبی از شکل (۶) مشاهده می‌گردد که با اعمال بار روند رو به گسیختگی در فرکانس‌های ۰/۵، ۱ و ۵ هرتز بعد از یک تعداد سیکل محدودی شروع شده و مدول آنها کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر نمونه‌ها خاصیت



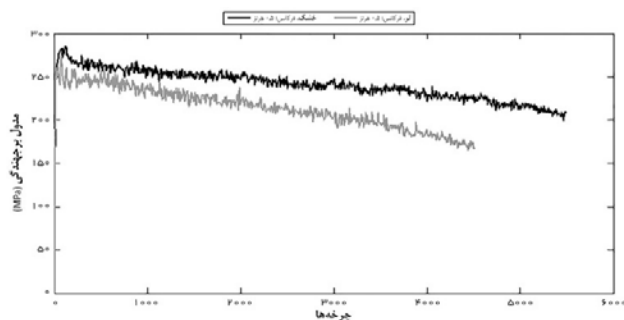
شکل ۵. نمودار کرنش - تعداد سیکل برای نمونه‌های اشباع و خشک در دمای ۴۰ سلسیوس و فرکانس ۵ هرتز

پارامتر مدول برجهندگی نیز تاثیر بیشتر مخرب رطوبت در فرکانس ۰/۵ هرتز به نسبت ۱ هرتز دیده می‌شود. با کاهش دما از ۴۰ درجه به ۲۰ و ۵ درجه سلسیوس مدول برجهندگی نمونه‌ها افزایش پیدا می‌کند. در دمای ۴۰ درجه، مخلوط آسفالتی خاصیت پلاستیک بیشتری از خود نشان می‌دهد و با کاهش دما خاصیت الاستیک بیشتری پیدا می‌کند. بهمین دلیل در دماهای پایین نمونه‌ها مقدار مدول برجهندگی بیشتری دارند.

در شکل (۷) مدول برجهندگی نمونه‌های اشباع در دمای ۴۰ درجه و فرکانس‌های ۰/۵، ۱، ۵ و ۱۰ در برابر تعداد سیکل‌های اعمال بار ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تفاوت قابل توجهی در مدول برجهندگی مخلوط‌های خشک نسبت به مخلوط‌های اشباع وجود دارد. از طرفی افزایش مدول در مراحل اولیه بخوبی مشهود است. همچنین ملاحظه می‌شود نرخ نزول مدول برجهندگی در نمونه‌های مرطوب بسیار بیشتر از نمونه‌های خشک است. در نتیجه با استفاده از



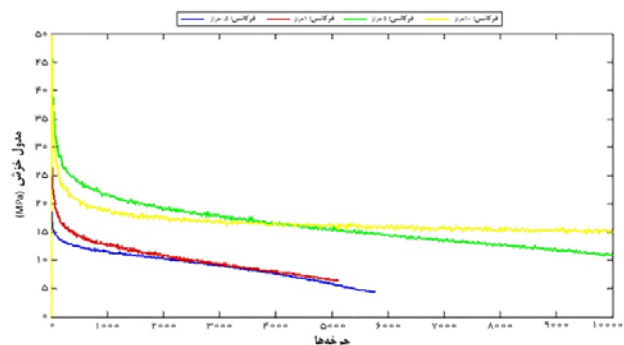
شکل ۶. نمودار مدول برجهندگی - تعداد سیکل در نمونه‌های خشک و دمای ۴۰ درجه سلسیوس در فرکانس‌های مختلف



شکل ۷. نمودار مدول برجهنگی - تعداد سیکل در نمونه‌های اشباع و دمای ۴۰ درجه سلسیوس

که اشاره گردید مدول خزشی معیاری از خواص پلاستیک آسفالت می‌باشد و هرچه مدول خزشی بیشتر باشد مقاومت آسفالت در برابر تغییرشکل‌های پلاستیک بیشتر است. در شکل (۸) مقدار مدول خزشی نمونه‌های خشک در دمای ۴۰ درجه و فرکانس‌های ۰/۵، ۱، ۵ و ۱۰ هرتز ترسیم شده است. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود در فرکانس‌های ۰/۵، ۱ و ۵ هرتز با ادامه اعمال سیکل‌های بار، مقدار مدول خزش کاهش پیدا کرده است؛ که نشان می‌دهد مقاومت نمونه‌ها در برابر تغییرشکل پلاستیک کمتر شده است. بیشترین کاهش در تغییرشکل پلاستیک در فرکانس ۰/۵ و ۱ هرتز اتفاق افتاده است و نرخ نزول در این فرکانس‌ها بیشتر از فرکانس ۵ هرتز می‌باشد و این نشان می‌دهد که با افزایش تغییرشکل‌های پلاستیک، نمونه‌ها روندی رو به گسیختگی خود را طی می‌کنند. ولی در فرکانس ۱۰ هرتز این رفتار مشاهده نمی‌شود و تغییرشکل پلاستیک و مدول خزش در ۱۰۰ سیکل مقدار ثابتی دارد.

در شکل (۸) روند مقدار مدول برجهنگی در دمای ۲۰ درجه و فرکانس ۱ هرتز برای نمونه‌های خشک و اشباع مقایسه شده است. در هر دو نمونه‌ها مشاهده می‌شود که با کاهش دما مدول افزایش پیدا کرده است. در نمونه خشک با اعمال تعداد سیکل‌های بیشتر بار مدول برجهنگی افزایش پیدا می‌کند و این نشان می‌دهد که در این ترکیب بار و دما تغییرشکل مترکم در نمونه ایجاد می‌شود و تغییرشکل برشی رو به گسیختگی دیده نمی‌شود. مقدار مدول در نمونه اشباع تا حدی ثابت و در بعضی مواقع کم می‌شود که این کاهش بعلاوه اثر رطوبت بر کمتر کردن رفتار الاستیک آسفالت است. در نتیجه رطوبت باعث کاهش مدول برجهنگی و آغاز تغییرشکل‌های برشی می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که کاهش دما باعث افزایش مدول برجهنگی در هر دو نمونه‌های خشک و اشباع شده است. از دیگر خروجی‌های مهم دیگر آزمایش خزش دینامیکی نمودار مدول خزش در برابر تعداد سیکل اعمال بار می‌باشد. همانطور



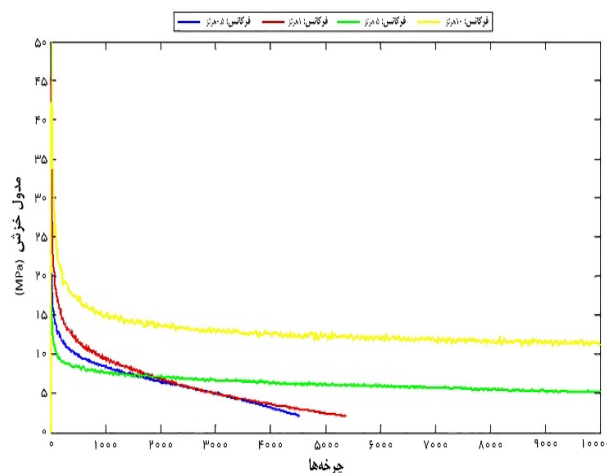
شکل ۸. نمودار مدول خزشی - تعداد سیکل در نمونه‌های خشک در دمای ۴۰ درجه سلسیوس و فرکانس ۰/۵، ۱، ۵ و ۱۰ هرتز

برخلاف نمونه خشک کاهش نمی‌یابد. در نتیجه رطوبت تاثیر مخرب خود را در فرکانس‌های ۰/۵ و ۱ نشان داده و در فرکانس ۵ و ۱۰ نه تنها تاثیر مخرب ندارد بلکه باعث افزایش مدول خزش و کاهش تغییرشکل پلاستیک و خرابی گردیده است.

در نمونه‌های اشباع ملاحظه می‌شود (شکل ۹) که در فرکانس ۰/۵ و ۱ هرتز نرخ کاهش مدول خزش کمتر از نمونه‌های خشک است ولی در فرکانس ۵ و ۱۰ هرتز مقدار مدول خزش بیشتر از نمونه‌های خشک می‌باشد، بگونه‌ای که حتی در فرکانس ۵ هرتز مقدار مدول خزش با اعمال مکرر بار در مقدار ثابتی قرار دارد و

مدول خزش و مدول برجهندگی در سیکل ۵۰۰۰ و مابقی نمونه‌ها در سیکل ۱۰۰۰۰ ثبت شده است. در ستون آخر نیز نسبت مدول خزش به مدول برجهندگی درج شده است. هرچه مدول خزش بیشتر و مدول برجهندگی کمتر باشد تغییرشکل‌های الاستیک در نمونه بیشتر و تغییرشکل‌های پلاستیک و برشی رو به گسیختگی کمتر می‌باشد. بدین معنی که اگر این نسبت در نمونه اشباع از نمونه خشک کمتر باشد رطوبت اثر تخریبی داشته و در آن ترکیب بارگذاری و دما پتانسیل برهنگی بالا می‌باشد. با توجه به جدول در حالات دمای ۴۰ و فرکانس ۰/۵ و ۱ هرتز و دمای ۲۰ و فرکانس ۰/۵ هرتز نسبت مدول خزش به مدول برجهندگی در نمونه اشباع بیشتر از نمونه خشک است و در نتیجه مستعد خرابی برهنگی است.

از آنجا که افزایش مدول خزش و کاهش مدول برجهندگی سبب تغییرشکل‌های پلاستیک و یا تغییرشکل‌های برشی رو به گسیختگی در نمونه‌های آسفالتی می‌گردد، به نظر می‌آید نسبت مدول خزش به مدول برجهندگی معیار مناسبی برای ارزیابی تغییرشکل پلاستیک در نمونه‌ها باشد و با مقایسه این نسبت در نمونه‌های خشک و اشباع پتانسیل برهنگی و اثر رطوبت بر نمونه آسفالتی بررسی گردد. بدین منظور در جدول (۱) مقدار مدول خزشی نمونه‌ها در دمای ۵، ۲۰ و ۴۰ درجه و فرکانس‌های ۰/۵، ۱، ۵ و ۱۰ هرتز در حالت خشک و اشباع در ستون چهارم درج شده است. در ستون پنجم نیز میزان مدول برجهندگی نمونه‌ها در انتهای بارگذاری آورده شده است. لازم به ذکر است در دمای ۴۰ درجه و فرکانس ۰/۵ و ۱ که نمونه گسیخته شده بود مقدار



شکل ۹. نمودار مدول خزشی - تعداد سیکل در نمونه‌های اشباع در دمای ۴۰ درجه سلسیوس و فرکانس ۰/۵، ۱، ۵ و ۱۰ هرتز

نسبت قابلیت خوبی برای ارزیابی پتانسیل برهنگی در دماهای پایین نداشته و فقط در دمای ۴۰ درجه است که نتیجه حاصل با نتایج قبل که از مقدار و نرخ کرنش گرفته شد همخوانی دارد. بنابراین این نسبت معیار مناسبی برای ارزیابی پتانسیل برهنگی در دماهای بالا می‌باشد.

پیش از این با توجه به پارامترهای مقدار و نرخ کرنش این نتیجه حاصل شد که در دمای ۵ درجه و فرکانس‌های بالا پدیده برهنگی مشاهده می‌شود لیکن با استفاده از نسبت مدول خزش به مدول برجهندگی این مطلب تایید نمی‌شود. از آنجا که مدول برجهندگی در دماهای بالا معیار مناسبی برای ارزیابی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر تغییرشکل‌ها دائمی‌باشد و مدول برجهندگی در دماهای پایین مقادیری با نوسان زیاد دارد، لذا این

جدول ۱. نسبت مدول خزشی به برجهندگی در ترکیبات مختلف بار و دما

مدول خزش / مدول برجهندگی	مدول برجهندگی	مدول خزش	شرایط رطوبتی	فرکانس	دما
۰,۰۳۱	۲۴۸	۷,۷	خشک	۰,۵	۴۰
۰,۰۲۹	۲۱۹	۶,۴	مرطوب	۰,۵	۴۰
۰,۰۲۸	۲۴۰	۶,۶	خشک	۱	۴۰
۰,۰۲۷	۱۷۵	۴,۷	مرطوب	۱	۴۰
۰,۰۴۴	۲۴۵	۱,۸	خشک	۵	۴۰
۰,۰۴۶	۲۲۶	۱۰,۴	مرطوب	۵	۴۰
۰,۰۳	۵۰۵	۱۵,۱۵	خشک	۱۰	۴۰
۰,۰۵۸	۳۹۳	۲۲,۸	مرطوب	۱۰	۴۰
۰,۰۲۶	۶۹۵	۱۸	خشک	۰,۵	۲۰
۰,۰۱۹	۹۹۲	۱۸,۸	مرطوب	۰,۵	۲۰
۰,۰۱۹	۱۲۰۰	۲۳	خشک	۱	۲۰
۰,۰۳۷	۷۲۲	۲۶,۶	مرطوب	۱	۲۰
۰,۰۱۷	۱۱۶۰	۱۹,۶	خشک	۵	۲۰
۰,۰۳۲	۷۴۹	۲۴	مرطوب	۵	۲۰
۰,۰۲۵	۹۹۵	۲۵	خشک	۱۰	۲۰
۰,۰۴۱	۱۰۷۰	۴۴	مرطوب	۱۰	۲۰
۰,۰۱۸	۷۹۱	۱۴	خشک	۰,۵	۵
۰,۰۷۲	۷۰۸	۵۱	مرطوب	۰,۵	۵
۰,۰۲۱	۷۹۰	۱۷	خشک	۱	۵
۰,۰۲۷	۵۸۴	۱۶	مرطوب	۱	۵
۰,۰۲۸	۷۵۸	۲۱,۶	خشک	۵	۵
۰,۰۳۲	۶۷۳	۲۱,۵	مرطوب	۵	۵
۰,۰۲۵	۹۹۶	۲۵	خشک	۱۰	۵
۰,۰۴۱	۱۰۷۳	۴۴	مرطوب	۱۰	۵

۵ - نتیجه گیری

استفاده گردید که آب به سطح بین سنگدانه و قیر نفوذ می‌کند و باعث ضعف چسبندگی بین قیر و سنگدانه و ضعف پیوستگی در ساختار قیر می‌شود و بعبارت دیگر پدیده برهنگی آشکار می‌شود. خرابی برهنگی باعث تسریع در نرخ خرابی مخلوط آسفالتی شده و در نتیجه تغییر شکل‌های دائمی نمونه در معرض رطوبت افزایش می‌یابد. در نهایت با مقایسه کرنش تجمعی نمونه های خشک و اشباع حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی ارزیابی گردید. مهمترین نتایج حاصل از تحقیق صورت پذیرفته را می‌توان بصورت ادامه خلاصه کرد.

در مقاله حاضر سعی گردید تا با انجام تست خزش دینامیکی بر روی مخلوط‌های آسفالتی اشباع و خشک تحت شرایط کنترل شده دمایی و با اعمال سطوح مختلف بار با فرکانس‌های مختلف، تعیین شود که در چه ترکیبی از نوع و مقدار بار و دمای محیط بتن آسفالتی آسیب پذیری بیشتری از خود نسبت به برهنگی نشان خواهد داد. با استفاده از این آزمایش امکان ترکیب اثرات بار دینامیکی و حضور آب در دماهای مختلف فراهم گردید. در این روش با اعمال بار دینامیکی محوری، به نمونه‌هایی که بصورت اشباع و در داخل آب قرار دارند حالت ورود و خروج دینامیکی آب به داخل منافذ آنها مدل شد. در ادامه از این تئوری

پلاستیک در نمونه‌ها می‌باشد و با مقایسه این نسبت در نمونه‌های خشک و اشباع می‌توان پتانسیل برهنگی و اثر رطوبت بر نمونه آسفالتی را بررسی کرد. نتیجه مهمی که از بررسی نسبت فوق در نمونه‌ها گرفته شد بدین صورت است که این نسبت قابلیت خوبی برای ارزیابی پتانسیل برهنگی در دماهای پایین نداشته و فقط در دمای ۴۰ درجه است که نتیجه حاصل با نتایج قبل که از مقدار و نرخ کرنش گرفته شد همخوانی دارد. بنابراین، این نسبت معیار مناسبی برای ارزیابی پتانسیل برهنگی در دماهای بالا می‌باشد.

۶- مراجع

-Abo-Qudais, S., & Al-Shweily, H. (2007). Effect of aggregate properties on asphalt mixtures stripping and creep behavior. *Construction and Building Materials*, 21(9), 1886-1898.

-Abo-Qudais, S. (2007). The effects of damage evaluation techniques on the prediction of environmental damage in asphalt mixtures. *Building and Environment*, 42(1), 288-296.

-Epps, J. A. (2000). Compatibility of a test for moisture-induced damage with superpave volumetric mix design (No. 444). *Transportation Research Board*.

-Gokhale, S., Choubane, B., Byron, T., & Tia, M. (2005). Rut initiation mechanisms in asphalt mixtures as generated under accelerated pavement testing. *Transportation Research Record*, 1940(1), 136-145.

-Gong, Y., Xu, J., Yan, E., & Chang, R. The Investigation of Microscopic Moisture-Thermal Damage Behaviors of SBS Modified Asphalt. *In CICTP 2020*, 1727-1740.

-Gorkem, C., & Sengoz, B. (2009). Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime. *Construction and Building Materials*, 23(6), 2227-2236.

-Hussan, S., Kamal, M. A., Hafeez, I., & Ahmad, N. (2019). Evaluation and modelling of permanent deformation behaviour of asphalt mixtures using dynamic creep test in uniaxial mode. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(9), 1026-1043.

-Kavussi, A., & Motevalizadeh, S. M. (2020). Application of Dynamic Creep Testing to Investigate Permanent Deformation Characteristics of Asphalt Mixes. *In Proceedings of the 9th International*

-فرکانس اعمال بار، یکی از عوامل بسیار تأثیرگذار بر حالت گسیختگی نمونه‌های آسفالتی در تست خزش دینامیکی می‌باشد. در این تحقیق با بررسی رفتار نمونه در دماهای مختلف به این نتیجه مشخص شد که در دمای بالا (۴۰ درجه) با افزایش فرکانس پتانسیل برهنگی کاهش یافته و در دمای پایین (۵ درجه) با افزایش فرکانس پتانسیل برهنگی افزایش می‌یابد.

-با افزایش فرکانس مقدار و نرخ تغییرشکل دائم هم در نمونه‌های خشک و هم اشباع کاهش می‌یابد. دلیل آن کوتاه‌تر شدن زمان بارگذاری و زمان سیکل می‌باشد که فرصت کمتری برای ایجاد تغییرشکل‌های دائم در نمونه وجود دارد. همچنین با مقایسه رفتار در دماهای مختلف مشاهده شد که دمای پایین‌تر تأثیر بیشتری بر کاهش مقدار کرنش با افزایش فرکانس دارد.

-در دمای ۴۰ درجه سلسیوس، در فرکانس‌های پایین مثل ۰/۵ و ۱ هرتز، بعلاوه بیشتر بودن زمان بارگذاری و زمان سیکل اعمال بار به نمونه‌ها و بالا بودن دمای نمونه، بعد از سیکل معینی کرنش نمونه‌ها با سرعت زیادی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر با ایجاد فشار هیدرولیکی ناشی از اعمال بار دینامیکی به نمونه اشباع، چسبندگی بین قیر و سنگدانه توسط آب دچار اختلال شده و این امر افزایش مقدار و نرخ کرنش و تسریع در نرخ خرابی را در پی خواهد داشت.

-از آنجا که ماستیک نقش عمده‌ای در تعیین رفتار مخلوط دارد، در دماهای بالا (به عنوان مثال ۴۰ درجه) به دلیل پایین بودن ویسکوزیته قیر و روان تر شدن پوشش قیری بر روی سنگدانه‌ها، این عامل کاهش چسبندگی بین قیر و سنگدانه را ارتقاء داده و موجب افزایش پتانسیل برهنگی می‌گردد، در حالی که در دمای پایین مثل ۵ درجه، قیر ویسکوزیته بالایی دارد و رطوبت موجود نیاز به انرژی بیشتری برای کم کردن چسبندگی دارد. در نتیجه در فرکانس ۰/۵ هرتز و دمای ۵ درجه پتانسیل وقوع برهنگی بسیار کمتر از دمای ۴۰ درجه می‌باشد.

-با مقایسه مدول برجهنگی مخلوط‌های خشک نسبت به مخلوط‌های اشباع ملاحظه می‌شود نرخ کاهش میزان مدول برجهنگی در نمونه‌های مرطوب بسیار بیشتر از نمونه‌های خشک است.

-افزایش مدول خزش و کاهش مدول برجهنگی سبب تغییرشکل‌های پلاستیک و یا تغییرشکل‌های برشی رو به گسیختگی در نمونه‌های آسفالتی می‌گردد، از این رو نسبت مدول خزش به مدول برجهنگی معیار مناسبی برای ارزیابی تغییرشکل

- Monismith, C. L., Hicks, R. G., Finn, F. N., Sousa, J., Harvey, J., Weissman, S., & Paulsen, G. (1994). Permanent deformation response of asphalt aggregate mixes (No. SHRP-A-415).
- Santucci, L. (2002). Moisture sensitivity of asphalt pavements. *Tech Topics*.
- Sengoz, B., & Agar, E. (2007). Effect of asphalt film thickness on the moisture sensitivity characteristics of hot-mix asphalt. *Building and Environment*, 42(10), 3621-3628.
- Sun, Y., Du, C., Gong, H., Li, Y., & Chen, J. (2020). Effect of temperature field on damage initiation in asphalt pavement: A microstructure-based multiscale finite element method. *Mechanics of Materials*, 144, 103367.
- Wei, L., Kayser, S., & Wellner, F. (2013). Impact of surface temperature on fatigue damage in asphalt pavement. *Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition)*, 7(3), 1-6.
- Xiao, F., & Amirkhanian, S. N. (2010). Effects of liquid antistripping additives on rheology and moisture susceptibility of water bearing warm mixtures. *Construction and Building Materials*, 24(9), 1649-1655.
- Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements Mairepav9*, Springer, Cham, 761-770.
- Khodaii, A., & Mehrara, A. (2009). Evaluation of permanent deformation of unmodified and SBS modified asphalt mixtures using dynamic creep test. *Construction and Building Materials*, 23(7), 2586-2592.
- Nega, A., Karami, M., & Nikraz, H. (2019). Permanent Deformation Characteristics of BRA Modified Asphalt Paving Mixtures Using Dynamic Creep Test Analysis. In *Airfield and Highway Pavements 2019: Testing and Characterization of Pavement Materials*, Reston, VA: *American Society of Civil Engineers*, 75-87.
- Mahmoodinia, N., Molayem, M., & Fardealirezaei, A. (2016). Investigating the permanent deformation behavior of asphalt concrete mixtures in repeated load creep tests. In *International Conference on Transportation and Development*, 981-992.
- Mehrara, A., & Khodaii, A. (2013). A review of state of the art on stripping phenomenon in asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 38, 423-442.
- Mehrara, A., & Khodaii, A. (2011). Evaluation of asphalt mixtures' moisture sensitivity by dynamic creep test. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(2), 212-219.

Evaluation of the Moisture Sensitivity of Asphalt Mixtures by Investigating Dynamic Creep Test and Permanent Deformation Behavior

*Mohammad Hosein Dehnad, Assistant Professor, Department of Civil Engineering,
University of Qom, Qom, Iran.*

*Hossein Farahani Zanjerani, Assistant Professor, Department of Civil Engineering,
University of Tafresh, Tafresh, Iran.*

E-mail: m.dehnad@qom.ac.ir

Received: November 2024- Accepted: February 2025

ABSTRACT

According to previous studies and investigations, various parameters influence the moisture sensitivity and stripping of asphalt mixtures. These parameters are associated with the aggregate, asphalt, mixture design and construction, environmental conditions, and traffic. The primary objective of the present research is to evaluate stripping under different environmental and traffic conditions and to assess its counter effect on the permanent deformation of asphalt mixtures. For this study, the dynamic creep test was conducted on both conditioned and unconditioned dense-graded mixtures to compare their behaviors in the presence and absence of moisture. In this method, an axial dynamic load was applied to the saturated samples to model the dynamic entry and exit of water into their pores. The theory posits that water penetrates the interface between the aggregate and bitumen, leading to poor adhesion and reduced cohesion within the bitumen structure. This phenomenon, known as stripping, accelerates the failure rate of the asphalt mixture, resulting in permanent deformation of specimens exposed to moisture. Through the examination of various temperature and loading combinations, it was concluded that at high temperatures, an increase in frequency results in a decrease in stripping potential, whereas at low temperatures, an increase in frequency leads to an increase in stripping potential. Analyzing the mechanical characteristics of the samples revealed that the ratio of creep modulus to resilient modulus serves as an appropriate criterion for evaluating permanent deformation in the samples. This ratio allows for the investigation of stripping potential and moisture effects at elevated temperatures. Furthermore, it was found that at high temperatures, asphalt mixtures are more sensitive to temperature changes than to moisture content. A comparison of the modulus of resilience between dry and saturated samples indicated that the reduction rate of the resilience modulus in wet samples is significantly higher than that in dry samples.

Keywords: Asphalt Mixture, Moisture Damage, Permanent Deformation, Stripping, Dynamic Creep Test