

بررسی اثر مشخصات بارگذاری بر مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی

منصور فخری، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

امین تناکی زاده*، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

علیرضا غنی زاده، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: atanakizade@mail.kntu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۳/۰۶/۰۵ - پذیرش: ۱۳۹۳/۱۲/۱۰

چکیده

یکی از پارامترهای کلیدی در طرح روسازی‌های آسفالتی مدول برجهندگی است. برای تعیین مدول برجهندگی روش‌های آزمایش استاندارد ارایه شده است که شامل اعمال بارگذاری نیم‌سینوسی نمونه‌ها در دماهای متفاوت و با زمان بارگذاری ۰/۱ ثانیه و دوره استراحت ۰/۹ ثانیه است. با توجه به طبیعت ویسکوالاستیک مخلوط‌های آسفالتی و تأثیر مقدار زمان اعمال بارگذاری، مقدار زمان استراحت و شکل پالس بار اعمالی بر مدول ارتجاعی مصالح آسفالتی، در این مقاله تأثیر زمان بارگذاری، دوره استراحت و شکل پالس بارگذاری بر مدول برجهندگی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در صورت امکان استفاده از دوره‌های استراحت کوچک‌تر، زمان انجام آزمایش مدول برجهندگی کاهش می‌یابد. برای این منظور، آزمایش مدول برجهندگی به روش کشش غیرمستقیم (IDT) روی نمونه‌های مخلوط آسفالتی تهیه شده با قیر اصلاح نشده و قیر اصلاحی با پلیمر SBS با فرض اعمال بارگذاری نیم‌سینوسی و مربعی در دماهای ۲۵، ۴۰ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد و زمان‌های بارگذاری و استراحت متفاوت صورت گرفته است. سپس به کمک تحلیل رگرسیون، مدل‌هایی جهت پیش‌بینی مدول برجهندگی ارایه شد. با مقایسه نتایج آزمایشگاهی مشخص شد که بیشترین اثرات افزایشی روی مدول برجهندگی به ترتیب مربوط به کاهش دما، افزودن پلیمر SBS، کاهش زمان بارگذاری و کاهش نسبت زمان استراحت به زمان بارگذاری است. بیشترین اثرات کاهش نیز به ترتیب مربوط به افزایش دما، تغییر شکل پالس به مربعی و افزایش زمان بارگذاری است.

واژه‌های کلیدی: مدول برجهندگی، زمان بارگذاری، نسبت زمان استراحت به بارگذاری، شکل پالس بارگذاری

۱- مقدمه

برای تحلیل و طراحی ساختاری روسازی از اوایل دهه ۱۹۶۰ دنبال می‌شود. آخرین و مهم‌ترین کوشش در این زمینه توسعه‌ی راهنمای طراحی روسازی مکانستیک- تجربی اشتو ۲۰۰۲ است (NCHRP, 2004). فرض کلیدی این روش طراحی آن است که

راهنمای اشتو^۱ ۱۹۸۶ برای طرح ساختاری روسازی، مدول برجهندگی مصالح تشکیل‌دهنده را در فرایند طراحی وارد کرده است که در راهنمای ۱۹۹۳ نیز دنبال شد (AASHTO, 1986). توسعه‌ی روش‌های مکانستیک- تجربی^۲ (AASHTO, 1993).

پژوهشنامه حمل و نقل، سال یازدهم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۹۳

پاسخ‌های ساختاری روسازی ناشی از بارهای اعمال‌شده (تنش، کرنش و تغییر شکل) با تحلیل مکانستیک- تجربی تعیین می‌شوند. بر اساس روش‌های طراحی مکانستیک- تجربی رایج، تحلیل الاستیک چند لایه‌ای روش معمول برای تعریف پاسخ روسازی به بارگذاری ترافیک و تغییرات محیطی است. در چارچوب تحلیل الاستیک چند لایه‌ای، دو ویژگی بارز مورد نیاز، مدول الاستیک و نسبت پواسون هستند. تجارب پیشین و مطالعات موجود نشان داده‌اند که مدول الاستیک اثر بارزتری روی تحلیل مکانستیک- تجربی و پیش‌بینی خرابی‌ها دارد. با فرض ویسکوالاستیک بودن مصالح آسفالتی، مدول ارتجاعی مخلوط‌های آسفالتی وابسته به دما و زمان بارگذاری است. بنابراین هر دو پارامتر به منظور انتخاب مدول ارتجاعی مناسب مصالح باید مشخص باشند. در مورد دما و اثرات آن بر ساختار روسازی، مطالعات زیادی صورت گرفته و نقش آن مشخص شده است. در راهنمای طراحی، دمای روسازی به خوبی با مدل اقلیمی یکپارچه‌ی توسعه یافته^۳ (EICM) مدل شده است. بنابراین تمامی بحث‌ها روی مدول مخلوط آسفالتی مرتبط با زمان بارگذاری است (Hu et al. 2008). چگونگی انتخاب زمان بارگذاری (یا فرکانس بارگذاری) منطقی برای ساختار روسازی مشخص هنوز به خوبی تأیید نشده است. علاوه بر این، دو وجه مهم دیگر که عبارت است از دوره استراحت^۴ و شکل پالس بارگذاری^۵ نیز باید مورد مطالعه قرار گیرد. همان طور که پیش‌تر بیان شد، پاسخ مصالح آسفالتی وابسته به زمان است و در نتیجه تحت تأثیر دوره‌های استراحت بین بارهای ترافیکی قرار دارد. همچنین جهت تعیین مدول در عمق‌های مختلف روسازی، بررسی شکل پالس بارگذاری اجتناب‌ناپذیر است.

روش رایج تعیین مدول برجهندگی شامل اعمال یک بار نیم‌سینوسی با زمان بارگذاری ۱۰۰ میلی‌ثانیه و زمان استراحت

۹۰۰ میلی‌ثانیه در سه دمای ۵، ۲۵ و ۴۰ درجه‌ی سانتی‌گراد است. بنا بر مطالعات گذشته مشخص شده است که شکل پالس بارگذاری با تغییر در ارتفاع روسازی تغییر می‌کند و شکل پالس مربعی نیز قابلیت شبیه‌سازی رفتار روسازی را در عمق‌های کم داراست. همچنین با توجه به سرعت‌های متفاوت ترافیک و فاصله‌ی محورها و نیز چگالی ترافیک عبوری، زمان بارگذاری و نسبت زمان استراحت به زمان بارگذاری متفاوت ثابت نبوده و با توجه به ساختار روسازی و مشخصات بارگذاری تغییر می‌کند. در این مقاله هدف بررسی تأثیر هر یک از این پارامترها بر مدول ارتجاعی مصالح آسفالتی و مدل سازی تغییرات مدول برجهندگی با توجه به این عوامل با استفاده از روش رگرسیون و روش سطح پاسخ است.

۲- مطالعات پیشین

با مرور تحقیقات گذشته مشخص می‌شود که عوامل زیادی می‌توانند بر مقادیر مدول برجهندگی به دست آمده از نمونه‌های متراکم آزمایشگاهی مؤثر باشند که از این میان می‌توان به دمای آزمایش، مدت بارگذاری (فرکانس بارگذاری)، زمان مورد نیاز برای بازیابی بین سیکل‌های بارگذاری (دوره استراحت)، هندسه نمونه، حالت تنش و بزرگی بار اشاره کرد.

مدول برجهندگی نمونه آسفالتی به شدت وابسته به دما است. مخلوط آسفالتی به محض افزایش دما کاهش در مدول را تجربه خواهد کرد. بودریو و دیگران متوجه شدند که مدول برجهندگی مخلوط‌های مختلف با نرخ‌های متفاوت کاهش می‌یابد. با افزایش دما به دلیل افزایش خواص ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی، مقاومت آن کاهش می‌یابد (Boudreau et al. 1992). گزارش WHRP⁶ 05-11 توسط کروتی و همکاران در ایالت ویسکانسین در مورد ارتباط بین مدول برجهندگی و دما برای مخلوط‌های

آسفالتی مورد استفاده در این ایالت ارابه شد. نتایج آزمایش مدول برجهندگی برای ارابه یک سری معادلات پیش‌بینی جهت تخمین روند خصوصیات دمایی مدول بر پایه میزان فیلر (P_{200})، میزان فضای خالی (V_v)، میزان قیر (P_b) و فرکانس آزمایش (f) استفاده شد. آن‌ها نتیجه گرفتند که معادلات ارابه شده برای پیش‌بینی مدول برجهندگی بتن آسفالتی در مقابل تغییرات دما، مناسب هستند و به خوبی با مقادیر به دست آمده از آزمایشگاه در فرکانس‌های بارگذاری ۱ و ۲ هر تزی که به ترتیب معادل زمان‌های پالس ۱۰۰ و ۵۰ میلی‌ثانیه است مطابقت دارند. به طور کلی مدول برجهندگی در هر دمایی به محض افزایش میزان فیلر، کاهش درصد قیر و یا کاهش درصد فضای خالی افزایش می‌یافت (Crovetti et al. 2005). طباطبایی و همکاران تأثیر دما روی مدول برجهندگی روسازی‌های آسفالتی در مناطق گرمسیر ایران را بررسی کردند. آزمایش مدول برجهندگی در سه دمای ۵، ۲۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد بر روی دو نوع قیر ۴۰/۵۰ و ۶۰/۷۰ و در دو سطح تراکم متوسط و بالا صورت گرفت. تفاوت بین مقادیر مدول برجهندگی در دمای پایین (۵ درجه) خیلی بیشتر از دمای متوسط (۲۵ درجه) و دمای بالا (۴۰ درجه) است. در دمای پایین بیشترین تفاوت در مدول بین سطح تراکم بالا و متوسط است. تنها تغییری که همبستگی قابل ملاحظه‌ای با مدول برجهندگی دارد درجه قیر است. بنابراین به عنوان نتیجه می‌توان گفت انتخاب درجه مناسب قیر با توجه به شرایط اقلیمی و به خصوص برای مناطق گرمسیری بسیار مهم است (Tabatabaie et al. 2008).

ین و همکاران اثر زمان بارگذاری روی روسازی انعطاف‌پذیر را با استفاده از تحلیل اجزای محدود بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که مدت پالس تنش عمودی تحت بار یکنواخت دایره‌ای، نه تنها به سرعت وسیله و عمق از سطح روسازی، بلکه به دمای

مؤثر روسازی نیز وابسته است. علاوه بر این، مدت زمان پالس‌های متفاوت بارهای متحرک در اعماق و سرعت‌های مختلف را با استفاده از تابع نیم‌سینوسی محاسبه کردند. برای مثال در عمق ۲/۱ اینچ (۵۵ میلی‌متر) و برای سرعت‌های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ مایل بر ساعت مدت پالس‌های محاسبه شده به ترتیب ۰/۰۵۸، ۰/۰۲۷ و ۰/۰۱۸ ثانیه بودند که کوچک‌تر از مدت ۰/۱ ثانیه معمول است (Yin et al. 2008). در تحقیقی توسط وینسون استفاده از مدت بارگذاری بین ۰/۱ تا ۰/۴ ثانیه توصیه شده است. هم‌چنین مشخص شد که زمان بارگذاری ۰/۱ ثانیه معرف بهتری برای بارگذاری وسایل نقلیه است. زمان بارگذاری ۰/۰۵ ثانیه بیانگر حرکت وسایل نقلیه با سرعت بالا می‌باشد ولی برای به دست آوردن نتایج منطقی در آزمایشگاه خیلی کوچک است. مدت بارگذاری ۰/۱ ثانیه که در پروتکل LTPP⁷ P07 توصیه شده نشانگر شرایط ترافیک کندتر است (Vinson, 1990). گزارش پروژه NCHRP⁸ 1-28A بیان می‌کند که با افزایش عمق روسازی مدت پالس بار افزایش می‌یابد. آزمایش‌هایی روی نمونه‌های آسفالتی با دانه‌بندی متوسط و درشت و با استفاده از زمان‌های بارگذاری ۰/۰۵ تا ۰/۲ ثانیه انجام شدند. در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد، مدول نمونه با دانه‌بندی متوسط هیچ روندی در اثر مدت بارگذاری از خود نشان نداد. برای نمونه با دانه‌بندی درشت و با شکل موج نیم‌سینوسی، کاهش کمی با افزایش زمان بارگذاری رخ داد ولی برای شکل موج مربعی افزایش کمی مشاهده شد. چنین تفاوت‌هایی می‌تواند ناشی از رفتار وابسته به زمان بتن آسفالتی و شرایط شدیدتر بارگذاری اعمالی به وسیله شکل پالس مربعی باشد (Barksdale et al. 1997). فیرهرست و دیگران نشان دادند که مدول برجهندگی با افزایش فرکانس سیکل بارگذاری اندکی افزایش می‌یابد. فرکانس سیکل بار بزرگ‌تر منجر به دوره استراحت کوتاه‌تر و زمان بازیابی کرنش

کمتر می‌شود که نتیجه آن مقادیر مدول برجهندگی بالاتر است (Fairhurst et al. 1990). مطالعات انجام شده نشان داده است که در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد، نمونه‌های آسفالتی همانند یک مصالح الاستیک رفتار می‌کنند و مدول برجهندگی آن‌ها خیلی کم از مدت بارگذاری اثر می‌پذیرد (Law, 2004). بارکسدیل و همکاران متوجه شدند که مدت بارگذاری بزرگ‌تر به طور قابل ملاحظه‌ای مدول برجهندگی را کاهش می‌دهد و در مقایسه با زمان بارگذاری کوتاه‌تر در دماهای ۲۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد خرابی بیشتری ایجاد می‌کند. مدت بارگذاری طولانی‌تر باعث تغییر شکل‌های بزرگ‌تر و با دوره استراحت کوتاه‌تر خواهد شد و زمان بازیابی کمتری برای تغییر شکل‌های ایجاد شده در نمونه فراهم می‌کند (Barksdale et al. 1997). کمال و همکاران در تحقیقی رفتار برجهندگی بتن آسفالتی تحت بارگذاری تکراری و اثرات دما روی آن را ارزیابی نمودند. مدول برجهندگی تنها با افزایش ۱۵ درجه‌ای در دما (از ۲۵ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد) حدود ۸۵ درصد کاهش یافت. آزمایش در سه زمان پالس بار ۱۵۰، ۳۰۰ و ۴۵۰ میلی‌ثانیه انجام گرفت. مشاهده شد که با افزایش زمان پالس از ۱۵۰ تا ۴۵۰ میلی‌ثانیه مدول برجهندگی در نمونه‌های حاوی پلیمر، ۲۰ تا ۲۵ درصد و در نمونه‌های اصلاح‌نشده، ۲۰ تا ۴۵ درصد کاهش یافت (Kamal et al. 2005).

به وضوح روشن است که بارگذاری ترافیک به طور مداوم به ساختار روسازی اعمال نمی‌شود و حداقل سه نوع دوره استراحت بین بارهای اعمالی وسایل نقلیه وجود دارد. دوره‌ای که بین وسایل مختلف در حال سفر در سرعت‌های متفاوت اتفاق می‌افتد، دوره‌ای که بین وسایل در حال سفر در سرعت یکسان رخ می‌دهد و دوره‌ی استراحتی که بین محورهای جلو و عقب یک وسیله مشخص به خصوص در کامیون‌های طولیل به وجود می‌آید (Hu et al. 2008). کیم و همکاران نتیجه گرفتند که

نسبت دوره استراحت به دوره بارگذاری باید بررسی شود، چرا که به طور مستقیم روی میزان کرنش برگشت‌پذیر اثر می‌گذارد. کرنش برگشت‌پذیر کوچک‌تر مقدار مدول برجهندگی بزرگ‌تری نتیجه خواهد داد. آن‌ها همچنین تعیین کردند که به محض نزدیکی این نسبت به ۸ یا بیشتر از آن، اثر دوره استراحت خیلی قابل ملاحظه نیست (Kim et al. 1992). افزایش نسبت دوره استراحت به بارگذاری کاهش در مدول برجهندگی را باعث می‌شود. به محض کاهش دما وابستگی مدول به نسبت زمان استراحت به زمان بارگذاری کاهش می‌یابد. به ازای دوره بارگذاری یکسان، نسبت دوره استراحت به بارگذاری کوچک‌تر مقادیر مدول برجهندگی بزرگ‌تری خواهد داد (Law, 2004). فیرهرست و همکاران گزارش کردند که با کاهش در دوره استراحت افزایشی در مدول برجهندگی رخ خواهد داد. درباره اثر دوره بارگذاری ۰/۱ و ۰/۳ ثانیه هیچ نتیجه‌ای نمی‌توان گرفت زیرا هیچ اطلاعاتی از این دوره‌های بارگذاری موجود نیست (Fairhurst et al. 1990). بارکسدیل، هم‌چنین در گزارش دیگری مشخص کرد که نسبت دوره استراحت به بارگذاری تفاوت قابل ملاحظه‌ای در مدول برجهندگی به وجود نمی‌آورد (Barksdale et al. 1997). تحقیقات NCHRP 1-28A بیانگر این مدعا است که وقتی نسبت دوره استراحت به پالس بارگذاری از ۴ تا ۲۴ افزایش می‌یابد اثر کمی روی مدول برجهندگی می‌گذارد. این یافته برای هر یک از نمونه‌های آسفالتی با دانه‌بندی متوسط و درشت و دماهای از ۵ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد صحیح است. در بعضی موارد مدول برجهندگی اندکی افزایش یافت که شاید بخشی از آن به دلیل تجمع مقادیر کوچک خرابی در طی پیشروی آزمایش است. همچنین بارهای نشیمن بزرگ‌تر طی دوره‌های استراحت طولانی‌تر ممکن است مانع از ترمیم و بازیابی نمونه‌ها شده باشند (Barksdale et al. 1997). مطالعه‌ی

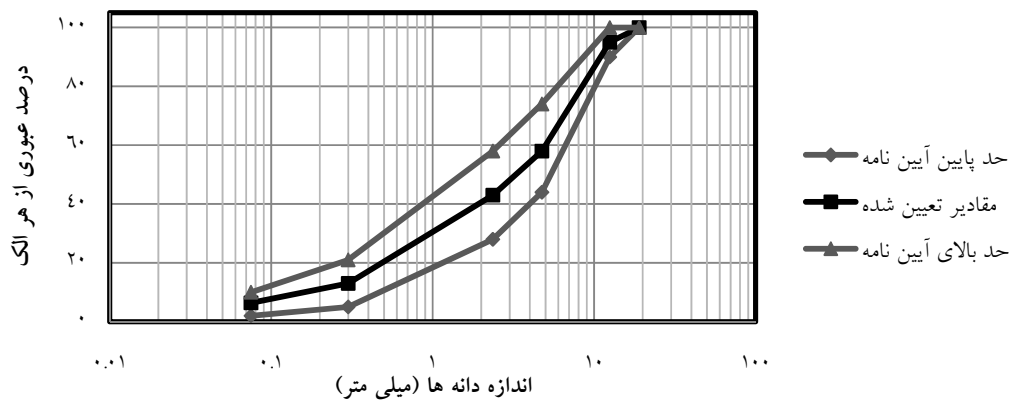
مونیسمیت نیز نشان می‌دهد که اثر دوره استراحت روی مدول برجهدگی زمانی که نسبت دوره استراحت به زمان بارگذاری از ۸ تجاوز می‌کند قابل توجه نیست (Monismith, 1989).

هیو و همکاران معادلاتی را برای تخمین زمان پالس تنش برای شکل موج‌های متفاوت و به صورت تابعی از سرعت وسیله و عمق زیر سطح روسازی، ضخامت لایه آسفالتی و نسبت مدول بین لایه مورد نظر و لایه بلافاصله زیر آن ارائه نمودند. آن‌ها دریافتند که وقتی نقطه مورد نظر نزدیک سطح است (یعنی ۰/۵ اینچ)، بهترین پالس بار منطبق، شکل مربعی است و وقتی عمق کمتر از ۳ اینچ است، شکل موج نیم‌سینوسی به نحو مطلوبی بر پالس اندازه‌گیری شده منطبق می‌شود. در نهایت وقتی عمق بزرگ‌تر از ۶ اینچ است، شکل موج مثلثی دقیق‌تر است (Hu et al. 2008). بنا بر مطالعات انجام شده در NCHRP 1-28A مقایسه‌ای بین شکل موج مربعی با زمان بارگذاری ۰/۱ ثانیه و شکل موج نیم‌سینوسی با همان زمان بارگذاری صورت گرفت. در دماهای کم تا متوسط زمانی که شکل پالس مربعی استفاده شد، کاهش در مدول برجهدگی رخ می‌دهد. تفاوت در مقادیر مدول با افزایش دما بیشتر می‌شود به طوری که در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد (۱۰۴ درجه فارنهایت) مدول برجهدگی با شکل پالس نیم‌سینوسی ۲ تا ۳ برابر پالس مربعی است (Barksdale et al. 1997). محققان متعددی به بررسی تأثیر افزودنی روی مدول برجهدگی مخلوط‌های آسفالتی پرداخته‌اند. در مورد اثر پلیمر SBS⁹ مطالعات مختلفی صورت گرفته که بیانگر افزایش قابل ملاحظه مدول برجهدگی مخلوط‌های حاوی این پلیمر است. بنا بر این تحقیقات، مقادیر افزایش مدول برجهدگی ۴۰ تا ۸۰ درصد به ثبت رسیده است (Kok and Kuloglu, 2008) (دهقانی و لطیفی، ۱۳۹۰). SBS، مخلوط آسفالتی را در دماهای

آزمایش متوسط تا کم نرم‌تر کرده و سطح سختی را در دمای بالا حفظ می‌نماید که ویژگی‌هایی مطلوب برای بهبود عملکرد آسفالت در ترک‌های حرارتی در دمای کم و شیارشدگی در دمای بالا است (Ping and Xiao, 2011). همچنین نمونه‌های اصلاح‌شده با پلیمر رفتار الاستیک بهتری از لحاظ خستگی نشان دادند. مقدار بالاتر مدول برجهدگی، سبب مقاومت بیشتر در برابر تغییر شکل‌های دائمی می‌شود (Mollahosseini et al. 2008). در مورد افزودنی نانورس نیز افزایش مدول تا ۴۰ درصد به ثبت رسیده است (Jahromi et al. 2010). مخلوط‌های اصلاحی با RGP¹⁰-SBS نیز افزایش مدول تا ۱۲۷ درصد از خود بروز داده‌اند (Ghasemi and Marandi, 2011).

۳- روش تحقیق و برنامه آزمایشگاهی

هدف دو مخلوط آسفالتی متفاوت برای آزمایش‌های مدول برجهدگی در نظر گرفته شد و طرح اختلاط هر یک به روش مارشال انجام شد. در این مطالعه، قیر ۶۰/۷۰ پالایشگاه تهران و قیر اصلاح شده با پلیمر SBS به میزان ۵ درصد وزنی قیر، به عنوان بخش چسبباندن‌دهی مخلوط و سنگدانه‌های شکسته رودخانه‌ای به عنوان اسکلت مخلوط در طرح مخلوط‌های آزمایش به کار رفتند. سنگدانه‌های مورد استفاده از محل سیلوی گرم کارخانه آسفالت و با دانه‌بندی مطلوب گرفته شدند. برای بررسی بهتر رفتار مخلوط تحت آزمایش مدول برجهدگی و نشان دادن اثر عوامل مورد بحث و حذف اثر دانه‌بندی سنگدانه روی مقدار مدول، در این تحقیق تنها از یک نوع دانه‌بندی مصالح سنگی استفاده شده است. دانه‌بندی به کار رفته، دانه‌بندی شماره ۴ آیین نامه روسازی آسفالتی ایران است. این دانه‌بندی قابل کاربرد در هر دو لایه‌ی آستر و رویه می‌باشد.



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی مورد استفاده در طرح اختلاط

جدول ۱. مشخصات قیر خالص مورد استفاده در طرح اختلاط

نتایج	روش آزمایش		آزمایش‌های قیرهای خالص
	AASHTO	ASTM	
۱/۰۱۳	T228	D70	وزن مخصوص در ۲۵ °C
۷۷	T49	D5	درجه نفوذ در ۲۵ °C (۱۰۰ گرم - ۵ ثانیه) بر حسب ۰/۱ میلی‌متر
۴۷	T53	D36	نقطه نرمی (ساجمه - حلقه) بر حسب درجه سانتی‌گراد
بیشتر از ۱۰۰	T51	D113	مقدار کشش در ۲۵ °C بر حسب سانتی‌متر
۹۹/۸	T44	D2042	حلالیت در تری‌کلرواتیلن بر حسب درصد (درجه خلوص)
۳۱۳	T48	D92	درجه اشتعال (روباژ-کلیولند) بر حسب درجه سانتی‌گراد
۳۸۰	T201	D2170	کندروانی کینماتیک در ۱۳۵ °C (سانتی استوکس)
۰/۰۱	T179	D1754	لعب نازک قیر (۱۶۳ °C - پنج ساعت) تغییر در جرم اولیه، درصد
۶۴	-	-	درجه نفوذ بعد از آزمایش اُفت حرارتی بر حسب ۰/۱ میلی‌متر
۸۳	-	-	نسبت درصد درجه نفوذ بعد از آزمایش اُفت حرارتی به درجه نفوذ اولیه
بیشتر از ۱۰۰	-	-	مقدار کشش قیر بعد از آزمایش اُفت حرارتی در ۲۵ °C (سانتی‌متر)

(ASTM, 2011, AASHTO, 1996) (ITS¹¹) نمونه‌ها می‌باشد

(and ASTM, 2007). از این رو، نیاز به انجام آزمایش تعیین

مقاومت کششی غیرمستقیم می‌باشد.

مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی با بارگذاری

نمونه استوانه‌ای مارشال در راستای صفحه قطر عمودی آن و با

طرح اختلاط با توجه به قیر ۶۰/۷۰، به روش مارشال مطابق

استاندارد AASHTO-T245 انجام شد و درصد قیر بهینه برابر

۵/۵ درصد و با میزان فضای خالی هدف ۴ درصد تعیین گردید.

مقدار بار وارده در آزمایش تعیین مدول برجهندگی مخلوط‌های

آسفالتی بر اساس درصدی از مقاومت کششی غیرمستقیم

پژوهشنامه حمل و نقل، سال یازدهم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۹۳

نرخ تغییر شکل و دمای مشخص انجام می‌شود. بار اوج گسیختگی، ثبت شده و برای محاسبه‌ی مقاومت کششی غیرمستقیم به کار می‌رود. آزمایش در دمای معمول ۲۵ درجه سانتی‌گراد و با نرخ تغییر شکل متداول 5 ± 0.5 میلی‌متر در دقیقه انجام شد. آزمایش به روش استاندارد ASTM¹²-D6931 صورت می‌گیرد. مقاومت کششی غیرمستقیم از رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود (ASTM, 2007).

$$S_t = \frac{2000 \times P}{\pi \times t \times D} \quad (1)$$

که در آن S_t مقاومت کششی غیرمستقیم بر حسب کیلوپاسکال، P بار حداکثر بر حسب نیوتن، t ارتفاع نمونه بر حسب میلی‌متر و D قطر نمونه بر حسب میلی‌متر است. مقاومت کششی غیرمستقیم ۳ نمونه مشابه محاسبه شده و میانگین آن به عنوان نتیجه گزارش می‌شود. این مقدار برای نمونه آسفالتی اصلاح نشده برابر $792/5$ کیلوپاسکال و برای نمونه آسفالتی اصلاحی با پلیمر برابر $982/5$ کیلوپاسکال است.

در این مطالعه، مقادیر مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی به روش کشش غیرمستقیم مطابق استاندارد ASTM-D7369-11 تعیین شده است. در این پروژه از دستگاه آزمایش یونیورسال^{۱۳} (UTM-14) با قابلیت اعمال بارگذاری تا ۱۴ کیلوپاسکال استفاده شده است که دارای محفظه‌ی کنترل دما است. بعد از اعمال ۱۰۰ سیکل پیش بارگذاری، آزمایش با اعمال ۱۰ تکرار بار انجام شده و میانگین نتایج ۵ سیکل آخر جهت محاسبه مدول به کار می‌رود. ارزیابی مدول برجهندگی با انجام آزمایش در سه دمای ۵، ۲۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد و روی دو نوع مخلوط آسفالتی اصلاح نشده و اصلاحی با پلیمر SBS صورت گرفته است. شکل توابع بارگذاری به صورت نیم‌سینوسی و مربعی و زمان‌های بارگذاری مورد استفاده ۵۰، ۱۰۰ و ۳۰۰ میلی‌ثانیه انتخاب شد. تنها در دمای

۴۰ درجه و روی مخلوط‌های آسفالتی معمولی، زمان پالس بارگذاری ۱۰۰۰ میلی‌ثانیه مورد استفاده قرار گرفت و پس از بررسی نتایج و تعیین اثر ناچیز زمان‌های بارگذاری بیش از ۳۰۰ میلی‌ثانیه روی مقدار مدول، زمان پالس بارگذاری ۳۰۰ میلی‌ثانیه انتخاب گردید.

نسبت‌های دوره استراحت به دوره بارگذاری به کار رفته در آزمایش ۴، ۹ و ۳۰ در نظر گرفته شد. یکی دیگر از دلایل حذف زمان ۱۰۰۰ میلی‌ثانیه، عدم توانایی دستگاه در اعمال بارگذاری با این زمان و نسبت دوره استراحت به بارگذاری ۳۰ بود. در مورد زمان بارگذاری ۵۰ میلی‌ثانیه نیز اعمال بار با نسبت دوره استراحت به بارگذاری ۴ توسط دستگاه امکان پذیر نبود و آزمایش‌ها تنها در دو نسبت ۱۰ و ۳۰ انجام گرفتند. زمان بارگذاری ۵۰ میلی‌ثانیه حداقل زمان بارگذاری است که دستگاه قادر به اعمال آن است. زمان بارگذاری ۱۰۰ میلی‌ثانیه نیز زمان پالس معمول مورد استفاده در آزمایش مدول برجهندگی است.

سه زمان بارگذاری ۵۰، ۱۰۰ و ۳۰۰ میلی‌ثانیه به ترتیب نشانگر سرعت ترافیک بالا، متوسط و پایین هستند. سه نسبت ۴، ۹ و ۳۰ نیز بیانگر چگالی‌های ترافیک متفاوت و نیز فاصله محورهای متفاوت در وسایل نقلیه است. بنا بر مطالعات صورت گرفته، نسبت دوره استراحت به بارگذاری بیش از ۳۰ تأثیر چندانی بر مقدار مدول نداشته است و در این مطالعه به عنوان حد بالا در نظر گرفته شده است. بازه پیشنهادی برای بارگذاری، ۱۰ تا ۵۰ درصد مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه است (ASTM, 2011). در این پروژه مقدار بار اعمالی برای دماهای ۵، ۲۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برابر ۳۰، ۱۵ و ۵ درصد مقاومت کششی غیرمستقیم بود که مقادیر پیشنهادی در استاندارد AASHTO-TP31-96 نیز هست. جهت تعیین مقدار مدول برجهندگی از رابطه‌ی ۲ استفاده می‌شود.

محاسبه‌ی نسبت مقادیر مدول مورد نظر به مقدار مدول مبنا را نشان می‌دهد.

$$Ratio = 1 + \frac{(M_{R,interest} - M_{R,Control})}{M_{R,Control}} \quad (3)$$

که در آن، Ratio نسبت مقدار مورد نظر به مقدار مبنا، $M_{R,interest}$ مقدار مدول برجهندگی مورد نظر و $M_{R,Control}$ مقدار مدول برجهندگی مبنا را نشان می‌دهد.

۴-۱-۱- بررسی تأثیر دما

برای بررسی نقش دما روی مقدار مدول برجهندگی، مقدار مدول برجهندگی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد به عنوان مقدار مبنا تعیین شد و سایر مقادیر نسبت به آن سنجیده شدند. مقایسه‌ی مقادیر در شکل‌های ۲ الی ۴ برای مخلوط‌های معمولی و پلیمری نشان داده شده است. با توجه به شکل ۲ می‌توان دریافت که کاهش دما تا ۵ درجه سانتی‌گراد باعث افزایش مدول تا ۳/۶ برابر مدول در دمای ۲۵ درجه می‌شود که این افزایش در زمان بارگذاری ۱۰۰ میلی‌ثانیه بارزتر است. افزایش دما تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد نیز باعث کاهش مدول تا کمتر از ۰/۲ برابر حالت مبنا می‌شود که با نتیجه‌ی مطالعه کمال در این زمینه یکسان است (Kamal et al. 2005). برای شکل پالس مربعی هم می‌توان دید که کاهش دما باعث افزایش مدول تا ۴/۷ برابر حالت مبنا می‌گردد و با افزایش نسبت استراحت به بارگذاری به مقدار ناچیزی افزایش می‌یابد. افزایش دما نیز موجب کاهش مدول تا حدود ۰/۱ برابر حالت مبنا می‌شود (شکل ۳). نتایج به دست آمده در مورد تأثیر دما بر مدول برجهندگی مطابق نتایج کارهای بودریو و طباطبایی است و از این نظر مؤید مطالعات گذشته است (Boudreau et al. 1992, Tabatabaie et al. 2008). افزایش مدول ناشی از کاهش دما و یا کاهش آن به دلیل افزایش دما در شکل پالس مربعی مشهودتر است. در مورد مخلوط اصلاح شده می‌توان گفت که با افزایش دما برای شکل پالس نیم‌سینوسی تا بیش از ۰/۳ برابر و برای شکل پالس مربعی تا کمتر از ۰/۳ برابر حالت مبنا کاهش در مدول را داریم (شکل ۴).

$$M_R = \frac{P \times (\nu + 0.27)}{t \times \Delta H} \quad (2)$$

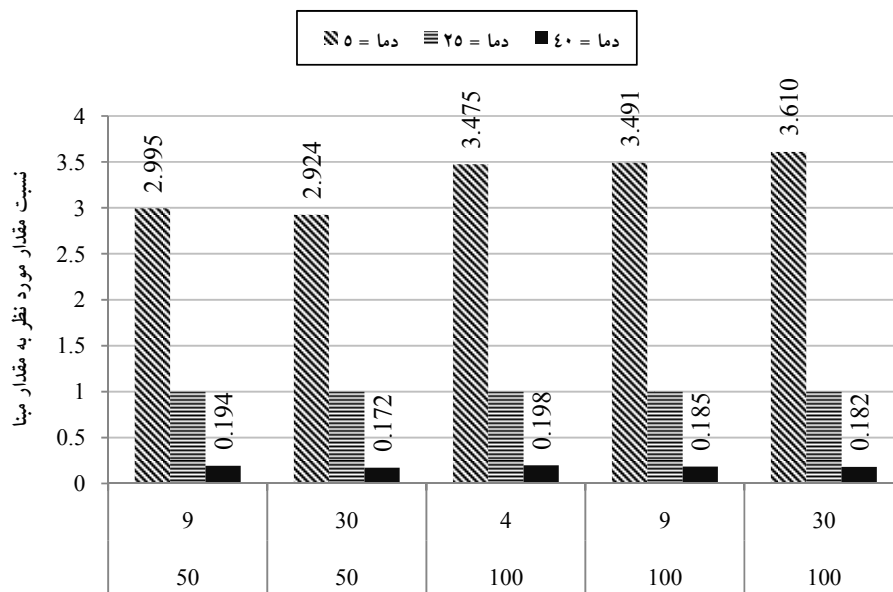
که در آن M_R مدول برجهندگی بر حسب مگاپاسکال، P بار تکراری بر حسب نیوتن، ν نسبت پواسن، t ضخامت نمونه بر حسب میلی‌متر و ΔH تغییر شکل برگشت‌پذیر افقی بر حسب میلی‌متر می‌باشد. مقدار نسبت پواسن در آزمایش فرضی است. با توجه به مقادیر پیشنهاد شده در راهنمای طراحی روسازی مکانستیک- تجربی اشتو ۲۰۰۲، این مقدار برای سه دمای ۵، ۲۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد (۴۱، ۷۷ و ۱۰۴ درجه فارنهایت) به ترتیب برابر ۰/۲، ۰/۳۵ و ۰/۴ در نظر گرفته شده است (NCHRP, 2004). تحلیل و تفسیر نتایج آزمایش‌ها در ادامه آمده است.

۴- تفسیر نتایج

مقایسه‌ای بین نتایج آزمایش مدول برجهندگی در شرایط متفاوت صورت گرفته و اختلاف مقادیر به صورت نسبت مقدار مورد نظر به مقدار مبنا بیان شده است. جهت یافتن توابع منطبق بر داده‌های آزمایشگاهی از تخمین غیرخطی و تحلیل رگرسیون استفاده شده است. برای این کار نرم‌افزار صفحه گسترده‌ی اکسل^۴ و نرم افزار آماری استاتستیکا^{۱۵} نگارش ۱۰ به کار گرفته شده‌اند.

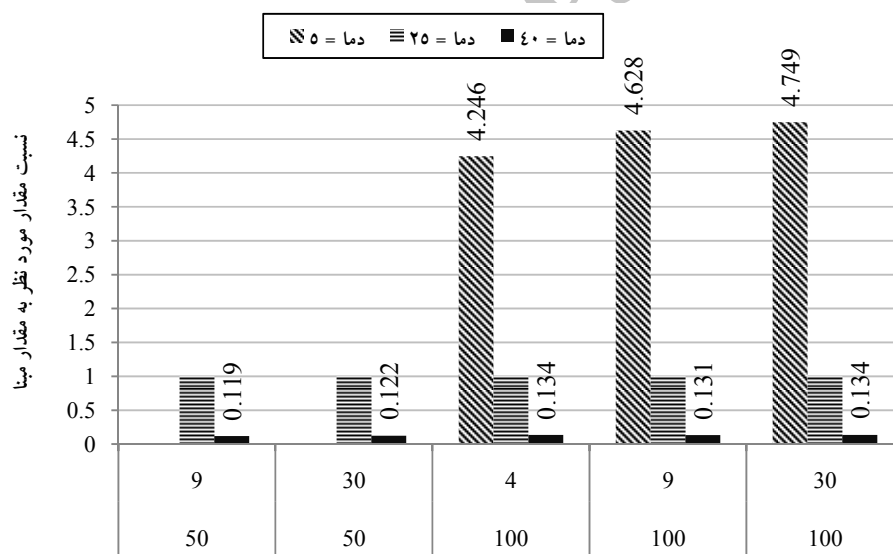
۴-۱- تفسیر نتایج آزمایشگاهی مدول برجهندگی

به منظور تعیین میزان تأثیر متغیرهای آزمایش شامل دما، زمان بارگذاری، نسبت زمان استراحت به بارگذاری و شکل پالس بارگذاری، نتایج آزمایشگاهی به دست آمده مورد سنجش و ارزیابی قرار گرفت. این کار با مقایسه‌ی مقادیر مدول برجهندگی در شرایط مختلف با مقدار مبنا انجام شد. رابطه‌ی (۳) روش



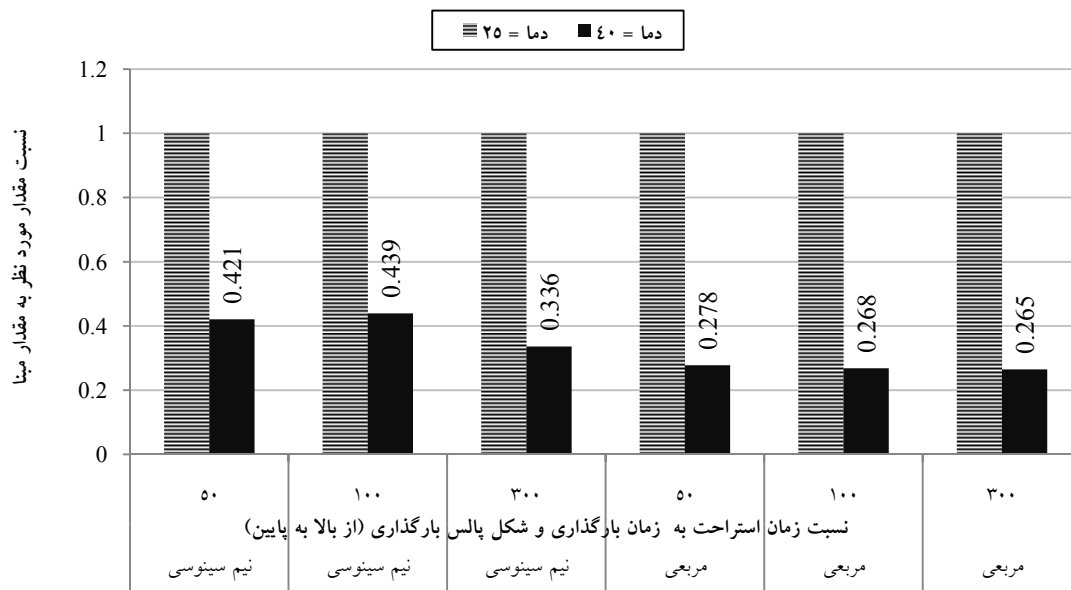
نسبت زمان استراحت به زمان بارگذاری و زمان بارگذاری (میلی ثانیه) (از بالا به پایین)

شکل ۲. مقایسه مقادیر مدول برجهندگی نسبت به مدول در دمای 25°C برای مخلوط‌های اصلاح‌نشده و با پالس نیم‌سینوسی



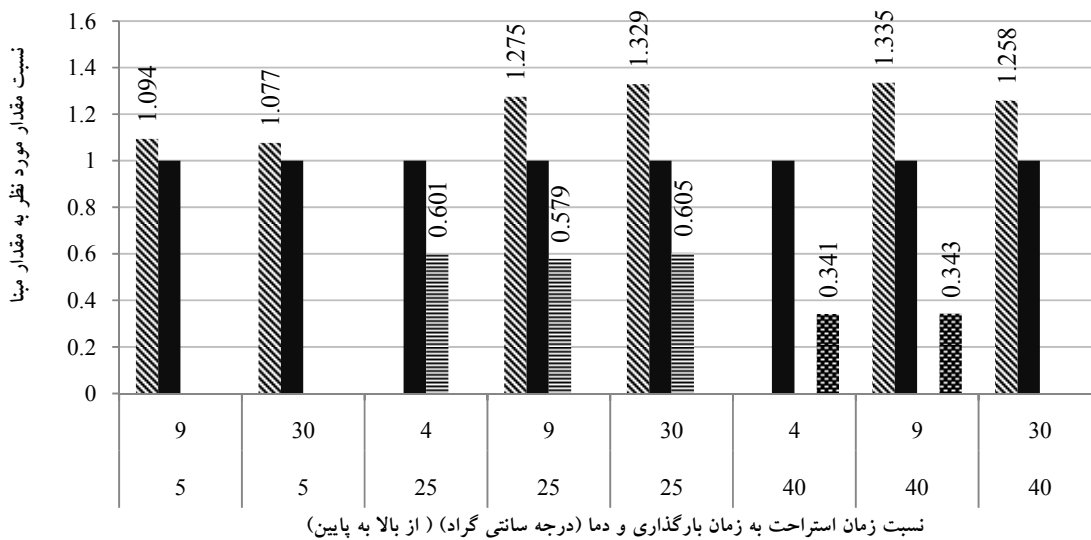
نسبت زمان استراحت به زمان بارگذاری و زمان بارگذاری (میلی ثانیه) (از بالا به پایین)

شکل ۳. مقایسه مقادیر مدول برجهندگی نسبت به مدول در دمای 25°C برای مخلوط‌های اصلاح‌نشده و با پالس مربعی



شکل ۴. مقایسه مقادیر مدول برجهنگی نسبت به مدول در دمای ۲۵°C برای مخلوط‌های اصلاح‌شده و با نسبت استراحت به بارگذاری ۹

زمان بارگذاری = ۱۰۰۰ میلی ثانیه زمان بارگذاری = ۳۰۰ میلی ثانیه زمان بارگذاری = ۱۰۰ میلی ثانیه زمان بارگذاری = ۵۰ میلی ثانیه



شکل ۵. مقایسه مدول برجهنگی نسبت به مدول در زمان بارگذاری ۱۰۰ میلی ثانیه برای مخلوط‌های اصلاح‌نشده و با پالس نیم‌سینوسی

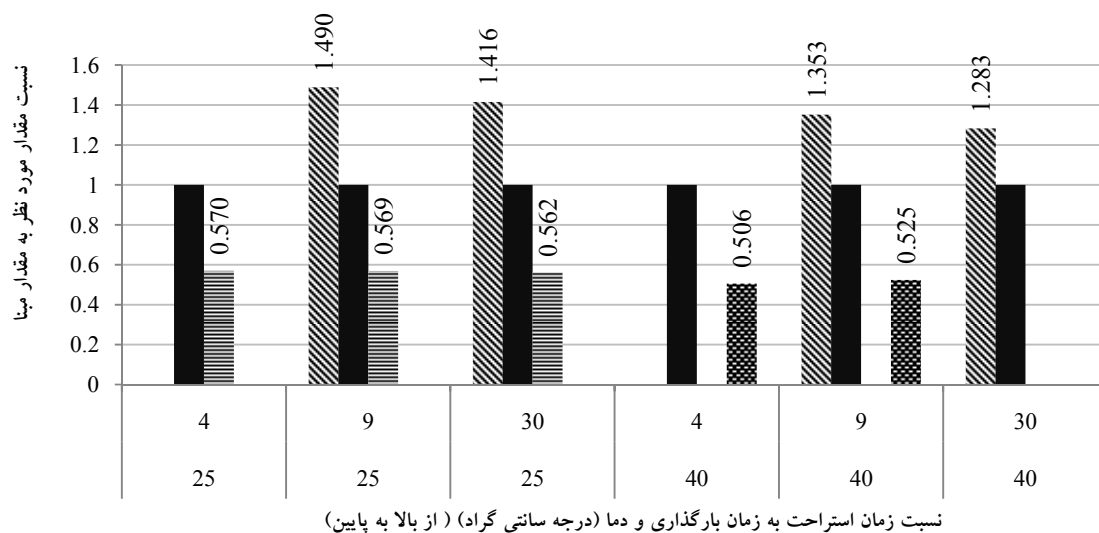
مشاهده می‌شود که کاهش مدول ناشی از افزایش دما در مخلوط‌های اصلاح شده کمتر از مخلوط‌های اصلاح نشده است که بیانگر بهبود عملکرد مخلوط حاوی پلیمر SBS در دمای بالا و کاهش احتمال شیارشدگی آن است که با تحقیقات پینگ و ژیاو نیز سازگار می‌باشد (Ping and Xiao, 2011).

۴-۱-۲- بررسی تأثیر زمان بارگذاری

به منظور بررسی تأثیر زمان بارگذاری روی مدول برجهدگی، مقدار مدول برجهدگی در زمان بارگذاری ۱۰۰ میلی‌ثانیه به عنوان مقدار مبنا تعیین شد و سایر مقادیر نسبت به آن سنجیده شدند. مقایسه‌ی مقادیر در شکل‌های ۵ تا ۷ برای مخلوط‌های معمولی و پلیمری نشان داده شده است. با نگاهی به شکل ۵ می‌توان دریافت که با کاهش زمان بارگذاری تا ۵۰ میلی‌ثانیه مقدار مدول بیش از ۱/۳ برابر نسبت به حالت مبنا افزایش می‌یابد.

که این روند با افزایش دما مشهودتر است. همچنین با افزایش زمان بارگذاری تا ۳۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌ثانیه مقدار مدول تا حدود ۰/۶ و ۰/۳ برابر مقدار مبنا کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ۶ نیز مشخص است که کاهش زمان بارگذاری تا ۵۰ میلی‌ثانیه مقدار مدول را تا ۱/۵ برابر حالت مبنا افزایش می‌دهد که با افزایش دما کمتر می‌شود. افزایش زمان بارگذاری تا ۳۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌ثانیه نیز باعث کاهش مدول تا حدود ۰/۶ و ۰/۵ برابر حالت مبنا می‌گردد. روند مشاهده شده در تغییرات مدول برجهدگی به دلیل کاهش یا افزایش زمان بارگذاری مشابه تحقیقات صورت گرفته توسط بارکسدیل (NCHRP 1-28A)، فیرهرست و لاو است که در بخش قبل بیان شدند (Barksdale et al. 1997, Fairhurst et al. 1990 and Law, 2004). همانند شکل پالس نیم‌سینوسی، تغییرات مدول تعیین شده با شکل پالس مربعی هم تحت تأثیر نسبت زمان استراحت به زمان بارگذاری نیست.

■ زمان بارگذاری = ۱۰۰۰ میلی‌ثانیه ■ زمان بارگذاری = ۳۰۰ میلی‌ثانیه ■ زمان بارگذاری = ۱۰۰ میلی‌ثانیه ■ زمان بارگذاری = ۵۰ میلی‌ثانیه



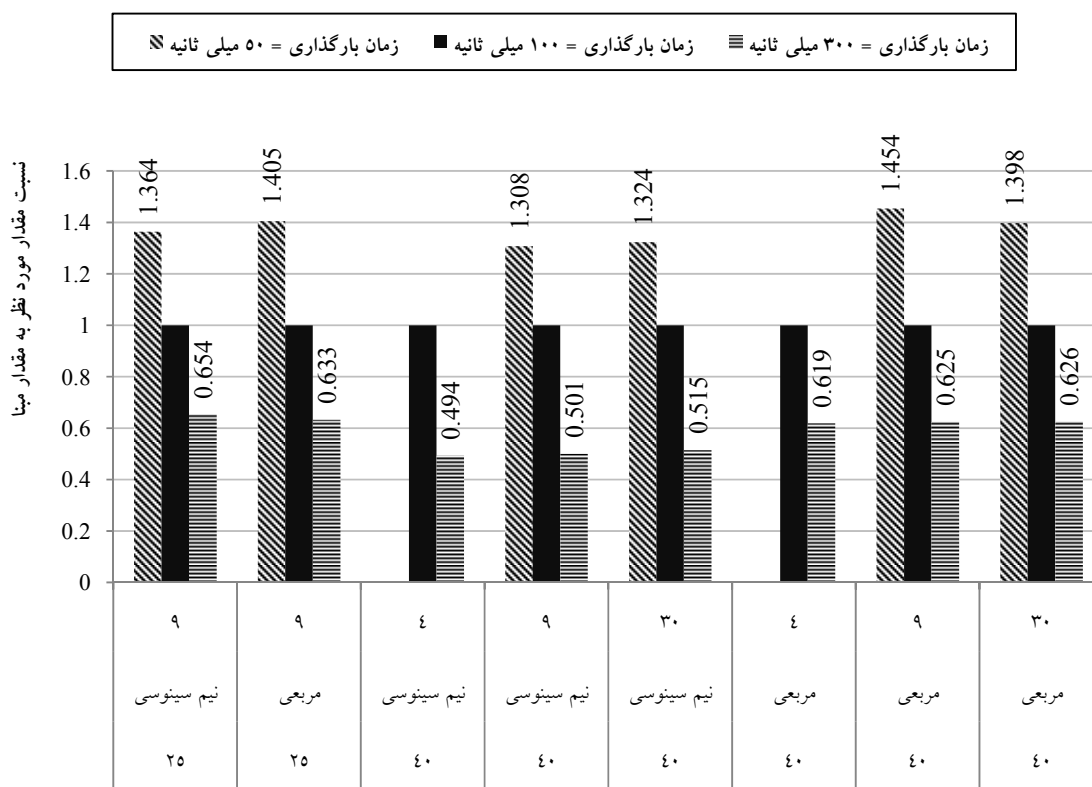
شکل ۶. مقایسه مقادیر مدول برجهدگی نسبت به مدول در زمان بارگذاری ۱۰۰ میلی‌ثانیه برای مخلوط اصلاح‌نشده و با پالس مربعی

هر دو نوع مخلوط از نظر میزان افزایش یا کاهش در مدول ناشی از تغییرات زمان بارگذاری تقریباً یکسان است.

۴-۱-۳- بررسی تأثیر نسبت زمان استراحت به زمان بارگذاری

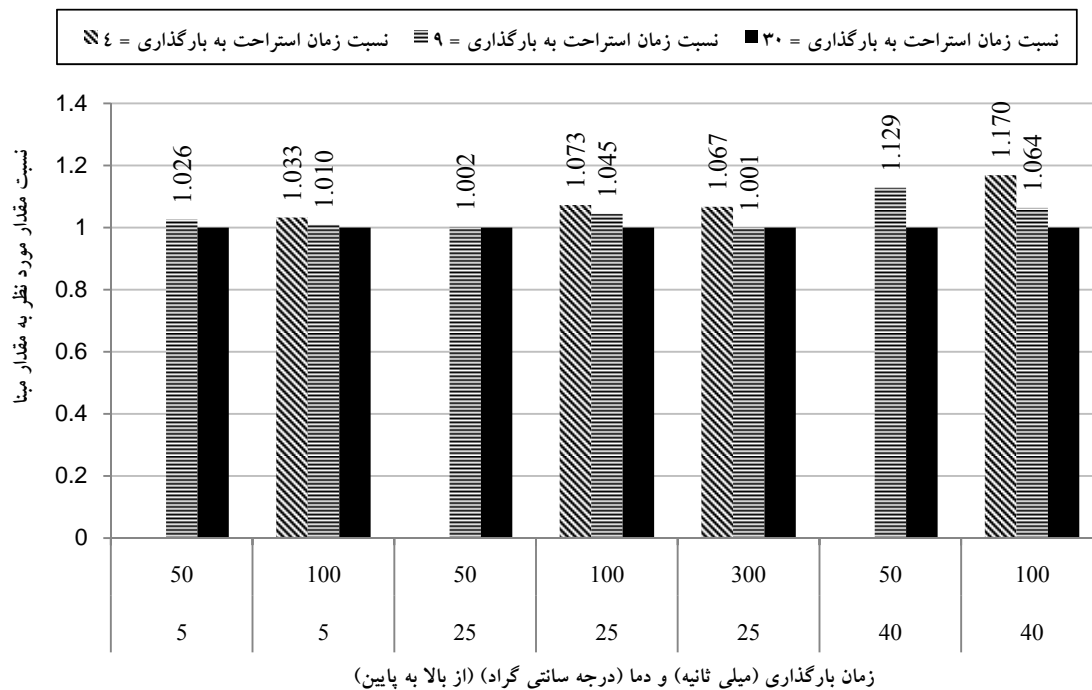
برای بررسی تأثیر نسبت زمان استراحت به زمان بارگذاری روی مدول برجهدگی، مقدار مدول برجهدگی در نسبت ۳۰ به عنوان مقدار مبنا تعیین شد و سایر مقادیر نسبت به آن سنجیده شدند. مقایسه‌ی مقادیر در شکل‌های ۸ تا ۱۰ آمده است.

شکل ۷ نشان می‌دهد که با کاهش زمان بارگذاری تا ۵۰ میلی‌ثانیه، مدول تا بیش از ۱/۴ برابر حالت مبنا افزایش می‌یابد که این روند با تغییر دما، شکل پالس یا نسبت استراحت به بارگذاری تغییر بارزی نشان نمی‌دهد. افزایش زمان بارگذاری تا ۳۰۰ میلی‌ثانیه نیز باعث کاهش مدول تا ۰/۵ برابر حالت مبنا می‌شود که در مورد شکل پالس نیم‌سینوسی با افزایش دما کاهش ناچیزی را نشان می‌دهد. نتایج مربوط به مخلوط‌های پلیمری از نظر اثر زمان بارگذاری مشابه با نتایجی است که کمال و همکاران به دست آوردند (Kamal et al. 2005). با مقایسه‌ی نتایج دو مخلوط اصلاح نشده و اصلاح شده نیز مشخص می‌شود که رفتار

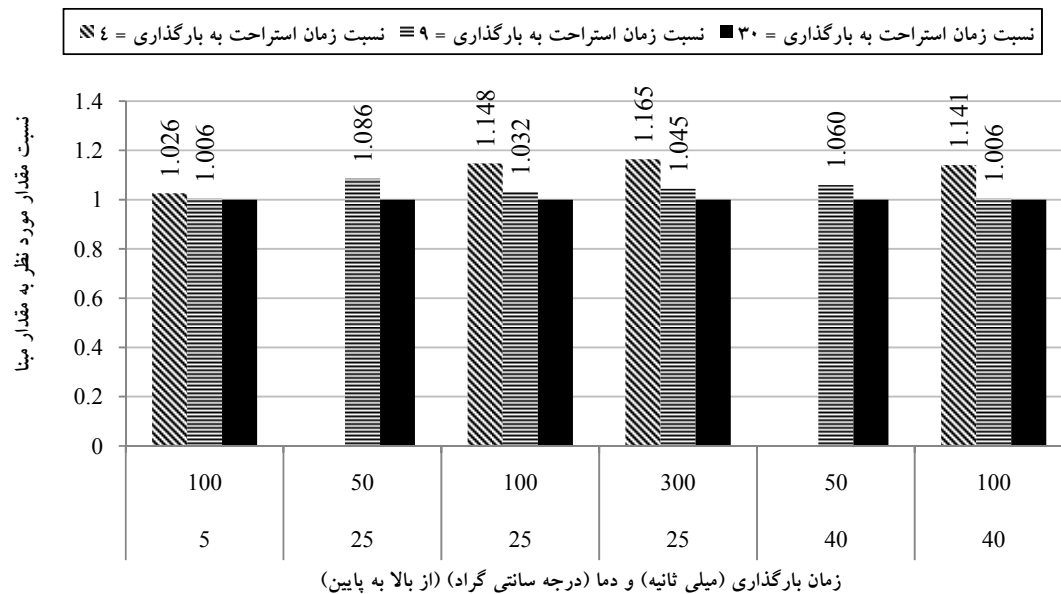


نسبت زمان استراحت به زمان بارگذاری، شکل پالس بارگذاری و دما (درجه سانتی گراد) (از بالا به پایین)

شکل ۷. مقایسه مقادیر مدول برجهدگی نسبت به مدول در زمان بارگذاری ۱۰۰ میلی‌ثانیه برای مخلوط اصلاح شده



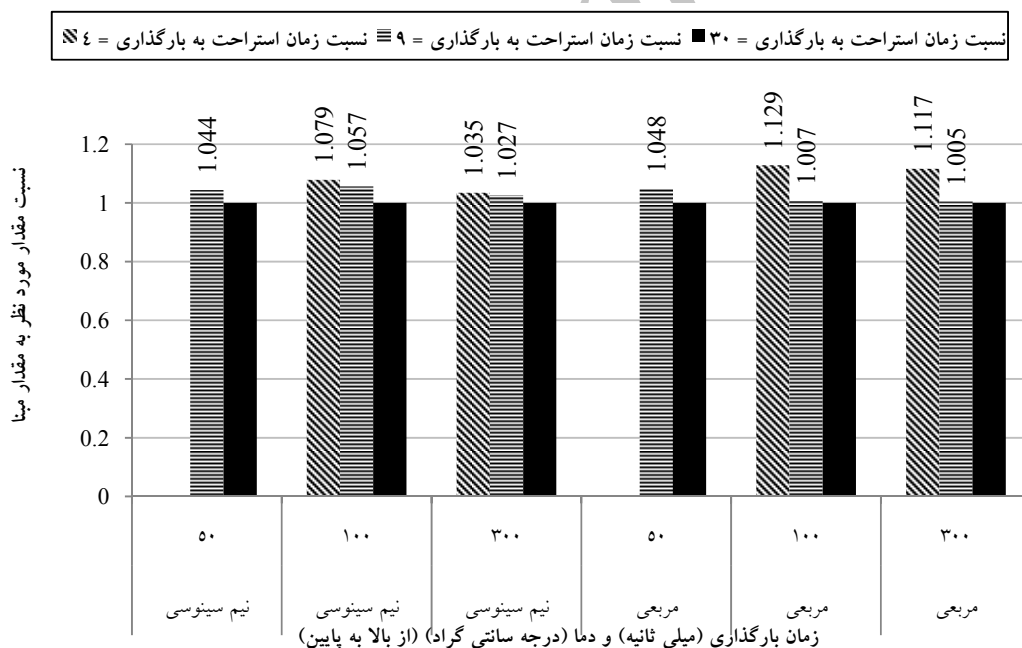
شکل ۸. مقایسه مقادیر مدول برجهندگی نسبت به مدول در نسبت زمان استراحت به بارگذاری برابر ۳۰ برای مخلوط اصلاح‌نشده و با شکل پالس نیم‌سینوسی



شکل ۹. مقایسه مقادیر مدول برجهندگی نسبت به مدول در نسبت زمان استراحت به بارگذاری برابر ۳۰ برای مخلوط اصلاح‌نشده و با شکل پالس مربعی

اندکی آشکارتر است و در دمای پایین اثر قابل ملاحظه‌ای دیده نشد. مقادیر مدول برجهندگی مخلوط اصلاح شده (شکل ۱۰) با تغییر نسبت دوره استراحت به بارگذاری به ۹ و ۴، به ترتیب تا بیش از حدود ۱/۰۶ و ۱/۱۲ برابر افزایش نسبت به حالت مبنا را نشان می‌دهند. این افزایش در مورد شکل پالس مربعی بارزتر است. با مقایسه‌ی تغییرات مدول بین دو نوع مخلوط و به خصوص در مورد شکل پالس مربعی می‌توان دریافت که اثر تغییر نسبت استراحت به بارگذاری روی مدول در مخلوط اصلاح شده تقریباً مشابه مخلوط معمولی است. در مجموع، نتایج گویای تأثیر اندک نسبت زمان استراحت به بارگذاری روی مدول برجهندگی به خصوص برای تغییر به نسبت ۹ است که تأییدی بر تحقیقات افرادی چون کیم، مونسمیت و بارکسدیل است (Kim et al. 1992, Monismith, 1989 and Barlsdale et al. 1997).

با توجه به شکل ۸، با کاهش میزان نسبت دوره استراحت به بارگذاری به ۹ و ۴، مقدار مدول به ترتیب به بیش از حدود ۱/۰۶ و ۱/۱۷ برابر مقدار مدول مبنا افزایش می‌یابد. بنابر شکل ۹ نیز، با کاهش میزان نسبت استراحت به بارگذاری به ۹ و ۴، مقادیر مدول تا کمتر از ۱/۱ و ۱/۲ برابر نسبت به حالت مبنا افزایش می‌یابد. این روند با تغییر دما و زمان بارگذاری اختلاف محسوسی با مقدار مبنا نشان نمی‌دهد. با مقایسه‌ی نتایج به دست آمده با نتایج مطالعات لاو و فیهرست انطباق آن‌ها از لحاظ کاهش و افزایش مدول ناشی از تغییرات نسبت زمان استراحت به زمان بارگذاری مشهود است (Fairhurst et al. 1990, Law, 2004). مقایسه‌ی نتایج مربوط به دو شکل پالس، گویای این مطلب است که اثر تغییر نسبت دوره‌ی استراحت به زمان بارگذاری روی مدول برجهندگی در مورد شکل پالس مربعی



شکل ۱۰. مقایسه مدول برجهندگی نسبت به مدول در نسبت استراحت به بارگذاری برابر ۳۰ برای مخلوط اصلاح شده و در دمای ۴۰°C

۴-۱-۴- بررسی تأثیر شکل پالس بارگذاری

برای بررسی تأثیر شکل پالس بارگذاری روی مدول برجهنگی، مقدار مدول برجهنگی با شکل پالس نیم سینوسی به عنوان مقدار مبنا تعیین شد و سایر مقادیر نسبت به آن سنجیده شدند. مقایسه‌ی مقادیر در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ برای مخلوط‌های معمولی و پلیمری نشان داده شده است.

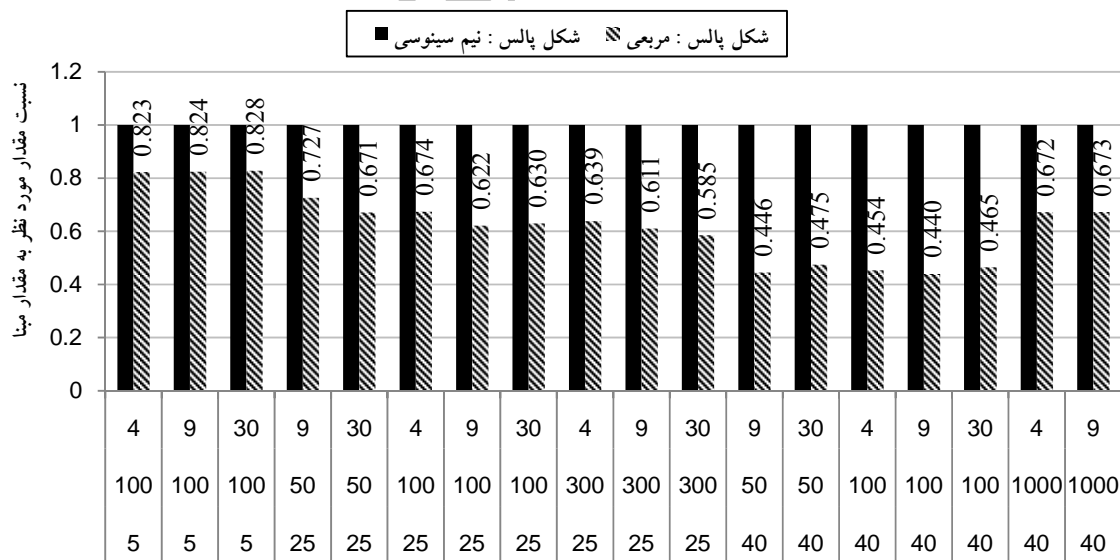
با توجه به شکل ۱۱ مشخص است که با تغییر شکل پالس از نیم سینوسی به مربعی، مقادیر مدول تا حدود ۰/۴ برابر کاهش نشان می‌دهند. این روند کاهش با افزایش دما از ۵ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد بیشتر شده و با افزایش زمان بارگذاری و نسبت دوره استراحت به بارگذاری در دمای پایین تغییر محسوسی نمی‌کند ولی در دمای میانی، کاهش اندکی در مدول و در دمای بالا، افزایش کمی در مدول را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۱۲ مقادیر مدول برجهنگی مربوط به شکل پالس مربعی نسبت به شکل پالس نیم سینوسی کاهش در حدود ۰/۴ برابر نشان می‌دهند. این روند کاهش با افزایش دما به ۴۰ درجه سانتی‌گراد ملموس‌تر است. بارکسدیل و همکاران نیز

دریافتند که مدول برجهنگی با شکل پالس مربعی در دمای ۴۰ درجه ۰/۵ تا ۰/۳ برابر مدول با شکل پالس نیم سینوسی است و با افزایش دما روند کاهش بارزتر است (Barksdale et al. 1997). با مقایسه‌ی نتایج مربوط به دو نوع مخلوط، مشاهده می‌شود که تغییرات در مدول برجهنگی ناشی از تغییر شکل پالس بارگذاری روی هر دو مخلوط تقریباً مشابه است. به عبارتی مخلوط اصلاح شده با پلیمر SBS نسبت به شکل پالس بارگذاری حساس نیست.

۴-۲- آرایه مدل پیش‌بینی مقدار مدول برجهنگی

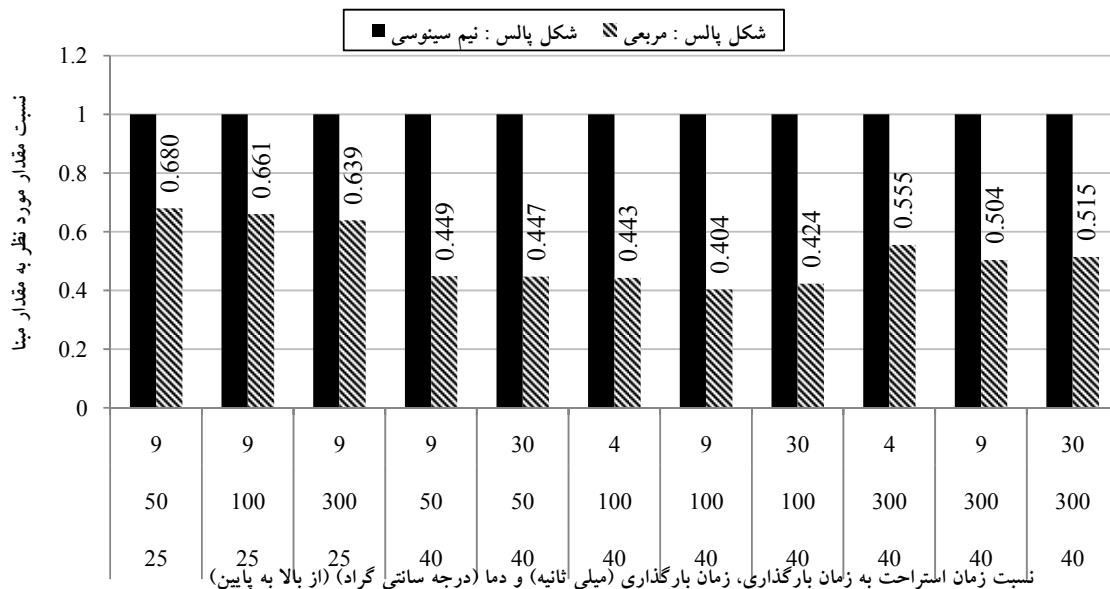
به منظور تعیین اثر پارامترهای بارگذاری از جمله زمان پالس بارگذاری و نسبت زمان استراحت به بارگذاری روی مقدار مدول برجهنگی مخلوط‌های آسفالتی، نیاز به انجام تحلیل آماری روی داده‌های به دست آمده از آزمایش‌ها در شرایط ذکر شده است.



نسبت زمان استراحت به زمان بارگذاری، زمان بارگذاری (میلی ثانیه) و دما (درجه سانتی‌گراد) (از بالا به پایین)

شکل ۱۱. مقایسه مقادیر مدول برجهنگی نسبت به مدول با شکل پالس نیم سینوسی برای مخلوط اصلاح نشده

پژوهشنامه حمل و نقل، سال یازدهم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۹۳



شکل ۱۲. مقایسه مقادیر مدول برجهدگی نسبت به مدول با شکل پالس نیم سینوسی برای مخلوط اصلاح شده

است. روابط (۴) تا (۹) برای مخلوط‌های اصلاح‌نشده و اصلاحی با پلیمر ارایه شده است. در روابط داده شده، T_L زمان بارگذاری بر حسب میلی‌ثانیه و $(\frac{R}{L})$ نسبت زمان استراحت به زمان بارگذاری است. مخلوط معمولی در دمای ۲۵ درجه و با شکل پالس نیم‌سینوسی:

(۴)

$$M_R = 3810.497 \times e^{(-0.01 \times T_L)} + 70.368 \times \ln\left(\frac{R}{L}\right) + 1781.518 \quad (R^2 = 0.9983)$$

مخلوط معمولی در دمای ۲۵ درجه و با شکل پالس مربعی:

(۵)

$$M_R = 3349.179 \times e^{(-0.013 \times T_L)} - 118.685 \times \ln\left(\frac{R}{L}\right) + 1328.532 \quad (R^2 = 0.9952)$$

مخلوط معمولی در دمای ۴۰ درجه و با شکل پالس نیم‌سینوسی:

(۶)

$$M_R = 1302.808 \times e^{(-0.011 \times T_L)} - 122.092 \times \ln\left(\frac{R}{L}\right) + 425.020 \quad (R^2 = 0.9647)$$

برای این کار و تعیین مدل منطبق بر داده‌ها و ایجاد رابطه‌ای بین مقدار مدول برجهدگی و پارامترهای بارگذاری از تحلیل رگرسیون چند متغیره استفاده شد. ترکیب‌های مختلف توابع منتخب برای تعیین ارتباط بین مقدار مدول و دو پارامتر زمان بارگذاری و نسبت دوره استراحت به زمان بارگذاری مورد بررسی قرار گرفتند. این کار به کمک تخمین غیرخطی نرم‌افزار آماری انجام شد. جهت برازش منحنی از روش حداقل مربعات با سطح اطمینان ۹۵ درصد ($\alpha=0.05$) استفاده شده است. اهمیت آماری پارامترها با توجه به آزمون‌های آماری T و F مشخص گردید. با توجه به کافی نبودن داده‌ها در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد برای هر دو نوع مخلوط اصلاح شده و غیر اصلاحی و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد برای مخلوط‌های اصلاح شده با پلیمر، این داده‌ها در تحلیل‌های مربوط به برازش توابع وارد نشده‌اند. از این رو با نگاهی به پارامترهای آماری محاسبه شده و نیز نتایج آزمون T، تابع نمایی- لگاریتمی دارای بهترین انطباق بر داده‌های هر دو مخلوط بود و هر دو پارامتر بارگذاری را نیز در مدل وارد کرده

مخلوط معمولی در دمای ۴۰ درجه و با شکل پالس مربعی:

$$M_R = 329.218 \times e^{(-0.009 \times T_L)} - 16.1534 \times \ln\left(\frac{R}{L}\right) + 167.6278 \quad (R^2 = 0.9935) \quad (7)$$

مخلوط پلیمری در دمای ۴۰ درجه و با شکل پالس نیم‌سینوسی:

$$M_R = 2038.470 \times e^{(-0.008 \times T_L)} - 39.632 \times \ln\left(\frac{R}{L}\right) + 648.024 \quad (R^2 = 0.9984) \quad (8)$$

مخلوط پلیمری در دمای ۴۰ درجه و با شکل پالس مربعی:

$$M_R = 973.673 \times e^{(-0.014 \times T_L)} - 28.525 \times \ln\left(\frac{R}{L}\right) + 437.726 \quad (R^2 = 0.9934) \quad (9)$$

۴-۳- تعیین رابطه بین مدول برجهندگی برای شکل پالس

نیم‌سینوسی و مربعی

رابطه‌ی بین مقادیر مدول با دو شکل پالس متفاوت به کمک

روش تخمین غیرخطی نرم‌افزار آماری مورد بررسی قرار گرفت. تعداد ۱۸ نقطه داده در تعیین رابطه مورد استفاده قرار گرفته است. پس از بررسی روابط مختلف نمایی، لگاریتمی، توانی، خطی و سهمی، رابطه‌ی توانی بیشترین مقادیر R^2 و F را به خود اختصاص داد. شکل کلی معادله همراه با مقادیر T و P و مقادیر ثابت رگرسیون در جدول (۲) آمده است.

۵- نتیجه‌گیری

در مقاله‌ی حاضر به بررسی اثر پارامترهای مختلف بارگذاری شامل شکل پالس بارگذاری، زمان بارگذاری و نسبت زمان بارگذاری به زمان استراحت بر روی مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی در دماهای مختلف و برای دو مخلوط مختلف اصلاح نشده و اصلاح شده با پلیمر SBS پرداخته شد.

جدول ۲. ثابت‌های رگرسیون و مقادیر T و P رابطه‌ی انتخابی

$M_{R(Square)} = a \left(M_{R(Haver sine)} \right)^b \quad (R^2 = 0.999)$				شکل کلی معادله
مقدار P	مقدار T	خطای استاندارد	مقدار تخمینی	ثابت رگرسیون
۰/۰۰۰۰۰۰	۹/۳۳۱۸۴	۰/۰۱۵۹۴۲	۰/۱۴۹۳۵۳	a
۰/۰۰۰۰۰۰	۱۰۱/۶۳۲۸	۰/۰۱۱۶۵۰	۱/۱۸۳۹۷۴	b

برای مخلوط اصلاح نشده و اصلاح شده به ترتیب تا حدود ۵۵ و ۶۰ درصد کاهش نشان می‌دهند. بیشترین کاهش مدول برجهندگی در اثر تغییر شکل پالس بارگذاری در مورد هر دو مخلوط، در دمای بالا (۴۰ درجه سانتی‌گراد) مشاهده شد. بیشترین افزایش مدول برجهندگی در اثر تغییر زمان بارگذاری برای مخلوط معمولی در شکل پالس مربعی و دمای ۲۵ درجه و برای مخلوط اصلاحی در شکل پالس نیم‌سینوسی و دمای ۴۰

افزایش و کاهش مدول ناشی از تغییرات دمایی در شکل پالس مربعی مشهودتر است. کاهش در مدول ناشی از افزایش دما در مخلوط پلیمری کمتر از معمولی است که بیانگر بهبود عملکرد مخلوط پلیمری در دمای بالا و کاهش احتمال شیارشدگی آن است.

اعمال بارگذاری با شکل پالس مربعی سبب کاهش قابل ملاحظه‌ی مدول برجهندگی مصالح آسفالتی می‌شود. با تغییر شکل پالس از نیم‌سینوسی به مربعی، مقادیر مدول

درجه رخ داد. بیشترین افزایش در مدول برجهنگی به علت کاهش نسبت زمان استراحت به بارگذاری برای هر دو مخلوط در دمای ۴۰ درجه و زمان بارگذاری ۱۰۰ میلی‌ثانیه بود. این افزایش برای مخلوط اصلاح نشده با شکل پالس نیم‌سینوسی و برای مخلوط پلیمری با شکل پالس مربعی اتفاق افتاد.

- با اندازه‌گیری مدول برجهنگی تحت اثر یک شکل بارگذاری نیم‌سینوسی می‌توان مقدار مدول برجهنگی تحت اثر بارگذاری مربعی را با دقت بالا با استفاده از یک معادله توانی به دست آورد. با افزایش درصد مصالح

۵- پی‌نوشت‌ها

1. American Association of State Highway and Transportation Officials
2. Mechanistic-Empirical
3. Enhanced Integrated Climate Model
4. Rest Period
5. Loading Waveform
6. Wisconsin Highway Research Program
7. Long Term Pavement Performance
8. National Cooperative Highway Research Program
9. Styrene Butadiene Styrene
10. Recycled Glass Powder
11. Indirect Tensile Strength
12. American Society for Testing and Materials
13. Universal Testing Machine
14. Excel
15. Statistica V.10.0

۷- مراجع

- دهقانی، م. و لطیفی، م. (۱۳۹۰) "بررسی آزمایشگاهی تأثیر قیر پلیمری (استایرن بوتادین استایرن) بر مدول برجهنگی مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان، ایران.

بازیافتی آسفالتی درصد قیر بهینه کاهش می‌یابد و این ناشی از افزایش قیر موجود در مصالح بازیافتی آسفالتی در مخلوط کل می‌باشد؛ اما با افزایش درصد پودر لاستیک مقادیر درصد قیر بهینه افزایش می‌یابد و علت آن این است که با افزایش ذرات پودر لاستیک در مخلوط مقادیر بیشتری از روغن‌های سبک موجود در قیر توسط ذرات پودر لاستیک جذب‌شده و متورم می‌شوند و باعث افزایش ویسکوزیته قیر می‌شوند. بنابراین مقدار قیر بیشتری برای رسیدن به درصد فضای خالی مناسب نیاز می‌باشد.

- معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهوری، (۱۳۹۰) "آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران"، تجدید نظر اول، نشریه شماره ۲۳۴، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهوری، دفتر نظام فنی اجرایی، تهران، ایران.

- AASHTO, (1986). "AASHTO Guide for Design of Pavement Structures". American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC 20001, USA.

- AASHTO, (1993). "AASHTO Guide for Design of Pavement Structures". American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC 20001, USA.

- AASHTO, (1996). "Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension". American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC 20001, USA, AASHTO TP31-96.

- Fairhurst, C.N. Khosla, N.P. & Kim, Y.R. (1990). "Resilient modulus testing of asphalt specimens in accordance with ASTM D4123-82". Presented at Proceedings of the Fourth International Symposium on Mechanical Tests for Bituminous Mixes: Characterization, Design and Quality Control, RILEM.
- Ghasemi, M. & Marandi, S.M. (2011). "Laboratory Investigation of the Properties of Stone Matrix Asphalt Mixtures Modified With RGP-SBS". Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures, 6(4), pp. 1823-1834.
- Hu, S. Zhou, F. Hu, X. & Scullion, T. (2008). "Consideration of HMA Resilient Modulus ($M_{sub r}$) for ME Pavement Design and Analysis (With Discussion)". Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 77, pp. 663-708.
- Jahromi, S.G. Andalibizade, B. & Vossough, S. (2010). "Engineering properties of nanoclay modified asphalt concrete mixtures". Arabian Journal for Science and Engineering, 35(1B), pp. 89-103.
- Kamal, M.A. Shazib, F. & Yasin, B. (2005). "Resilient behaviour of asphalt concrete under repeated loading & effects of temperature". Journal of the Eastern Asia Society, 6, pp. 1329-1343.
- Kim, Y.R. Shah, K.A. & Khosla, N.P. (1992). "Influence of test parameters in SHRP P07 Procedure on resilient moduli of asphalt concrete field cores" Journal of the Transportation Research Board, 1353, pp. 82-89.
- Al-Qadi, I.L. Wang, H. Yoo, P.J. & Dessouky, S.H. (2008). "Dynamic analysis and in situ validation of perpetual pavement response to vehicular loading". Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, 2087, pp. 29-39.
- ASTM, (2011). "Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension Test". ASTM International, Washington, DC 20001, USA, ASTM D7369-11.
- ASTM, (2007). "Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Bituminous Mixtures". ASTM International, Washington, DC 20001, USA, ASTM D6931-07.
- Barksdale, R.D. Alba, J. Khosla, N.P. Kim, Y.R. Lambe, P.C. & Rahman, M.S. (1997). "Laboratory determination of resilient modulus for flexible pavement design". National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, NCHRP Webdoc 14-Final Report (Project 1-28).
- Boudreau, R.L. Hicks, R.G. & Furber, A.M. (1992). "Effects of test parameters on resilient modulus of laboratory-compacted asphalt concrete specimens". Transportation Research Record, Journal of Transportation Research Board, 1353, pp. 46-52.
- Crovetti, J. Hall, K.T. & Williams, C. (2005). "Development of Modulus-to-Temperature Relations for HMA Mixtures in Wisconsin". Wisconsin Department of Transportation, Division of Transportation Infrastructure Development, Research Coordination Section, Madison, WI 53707, Rep. No. WHRP 05-11.

Champaign, Illinois 61820, USA.

- Ping, W.V. & Xiao, Y. (2011). "Evaluation of SBS Polymer Binder Effect on Resilient Modulus Properties of Florida HMA Mixtures". Paper presented at The 24th ICTPA Annual Conference & NACGEA International Symposium on Geo-Trans, Los Angeles, California.
- Tabatabaie, S.A. Ziari, H. & Khalili, M. (2008). "Modeling Temperature and Resilient Modulus of Asphalt Pavements for Tropic Zones of Iran". Asian Journal of Scientific Research, 1(6), pp. 579-588.
- Vinson, T.S. (1989). "Fundamentals of resilient modulus testing". Paper presented at Workshop on Resilient Modulus Testing, Oregon State University, Corvallis, OR, USA.
- Yin, H. Solaimanian, M. & Kumar, T. (2007). "The effect of loading time on flexible pavement dynamic response: a finite element analysis". Mechanics of Time-Dependent Materials, 11(3), pp. 265-288.
- KÖK, B.V. & KULOĞLU, N. (2008). "Investigation of mechanical properties of asphalt concrete containing styrene butadiene styrene". Journal of Engineering and Natural Science, 26(1), pp. 81-94.
- Law, T.L. (2004). "Resilient modulus of asphalt concrete mixtures". M.Sc. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba.
- Mollahosseini, H. Yadollahi, G. & Amoosoltani, E. (2008). "Testing and appraisal of Lucobit polymer effect as an additive on asphalt mixture performance". Paper presented at 1st International Bitumen Conference, Tehran, Iran.
- Monismith, C. (1989). "Resilient modulus testing: interpretation of laboratory results for design purposes". Paper presented at Workshop on Resilient Modulus Testing, Oregon State University, Corvallis, Oregon.
- NCHRP, (2004). "Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures". National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council,