

تأثیر پارامترهای پالس بارگذاری بر مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از نظریه ویسکوالاستیک

علیرضا غنی‌زاده (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

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

E-mail:ghanizadeh@sirjantech.ac.ir

پذیرش: ۹۲/۰۶/۰۴

دریافت: ۹۲/۰۱/۱۸

چکیده:

مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی از جمله پارامترهای کلیدی در روش‌های مکانیستیک - تجربی طراحی روسازی است. مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی معمولاً تحت اثر یک بارگذاری مشخص تعیین می‌شود که این بارگذاری، شرایط واقعی بارگذاری مصالح آسفالتی را در کلیه موارد شبیه‌سازی نمی‌کند. در این مقاله، تأثیر پارامترهای مختلف بارگذاری شامل شکل پالس تنش، مدت زمان اعمال پالس تنش، نسبت دوره استراحت به مدت زمان اعمال پالس تنش و همچنین تعداد سیکل‌های پیش بارگذاری بر روی مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور از اطلاعات مدول مختلط چهار نوع مخلوط آسفالتی استفاده شده و پس از اعتبار سنجی نتایج حاصل از روش عددی بر پایه نظریه ویسکوالاستیک، مدول برجهندگی در شرایط مختلف با بهره‌گیری از نظریه ویسکوالاستیک محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد که شکل و مدت زمان بارگذاری بر روی مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی به طور قابل ملاحظه تأثیر می‌گذارد و باید در طراحی روسازی مد نظر قرار گیرد. به علاوه نسبت دوره استراحت به زمان بارگذاری باید حداقل برابر با ۹ انتخاب شود تا خطای پیش‌بینی مدول برجهندگی کمتر از ۳ درصد باشد. در این مقاله دو مدل با توانایی تعمیم‌پذیری بالا به منظور پیش‌بینی مدول برجهندگی با توجه به مدت زمان بارگذاری و دمای مخلوط آسفالتی ارائه شده است. مدل‌های فوق این امکان را فراهم می‌سازند تا با انجام تعداد محدودی آزمایش مدول برجهندگی و کالیبراسیون مدل، امکان تعیین مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی در سایر دماها و زمان‌های بارگذاری فراهم شود. همچنین مشخص شد که بین مدول برجهندگی تحت اثر بارگذاری نیم سینوسی و مربعی یک رابطه کلی بسیار دقیق برقرار است و پس از کالیبره کردن این رابطه می‌توان با انجام آزمایش تحت اثر یک شکل بارگذاری، مدول برجهندگی تحت اثر شکل بارگذاری دیگر را پیش‌بینی کرد.

واژه‌های کلیدی: مدول برجهندگی، مخلوط‌های آسفالتی، زمان بارگذاری، شکل بارگذاری، زمان استراحت

۱. مقدمه

پیش‌بینی دقیق عکس‌العمل‌ها و عملکرد روسازی نقش کلیدی در بهبود روش‌های طراحی روسازی ایفا می‌کند و طراحی نادرست روسازی و عملکرد ضعیف آن باعث کاهش سطح خدمت‌دهی، کاهش ایمنی و افزایش هزینه‌های نگهداری ناشی از تعمیرات مکرر و پیاپی می‌شود. در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های رخداده در زمینه مکانیک محاسباتی و مدل‌های رفتاری، به همراه افزایش توان سخت افزارهای رایانه‌ای، امکان محاسبه دقیق‌تر عکس‌العمل‌ها و پیش‌بینی دقیق‌تر عملکرد روسازی را تحت شرایط مختلف آب و هوایی و بارگذاری‌های مختلف فراهم کرده است. در راستای این پیشرفت‌ها، بسیاری از کشورها و مؤسسات، در حال حاضر از روش‌های طراحی مکانیستیک - تجربی برای طراحی روسازی‌های انعطاف‌پذیر استفاده می‌کنند؛ [IRC, 2012; Theyse et al., 2007; Austroads, 2004; Huang, 2004; NCHRP, 2004]. سختی مصالح آسفالتی از جمله پارامترهای مهم برای تحلیل و طراحی روسازی است. از بین پارامترهای مختلف معرف سختی مخلوط‌های آسفالتی، دو پارامتر مدول برجهندگی (M_p) و مدول دینامیک ($|E^*|$) بیشتر از سایر پارامترها در تحلیل و طراحی روسازی بکار می‌روند. مفهوم مدول برجهندگی در راهنمای طراحی روسازی اشتو ۱۹۹۳ بکار گرفته شده است [AASHTO, 1993]. مفهوم مدول دینامیک در راهنمای طراحی روسازی به روش مکانیستیک-تجربی (MEPDG) توسط NCHRP مورد استفاده قرار گرفته است [NCHRP, 2004]. پروتکل استاندارد آزمایش مدول دینامیک بر خلاف آزمایش مدول برجهندگی، زمان استراحت^۱ را بین پالس‌های بارگذاری در نظر نمی‌گیرد و شکل بارگذاری^۲ در این آزمایش همراه به صورت سینوسی^۳ است. استفاده از مدول دینامیک برای مقاصد تحلیل و طراحی روسازی نسبت به مدول برجهندگی ساده‌تر است، زیرا پارامتر مدول برجهندگی تابع شکل

بارگذاری و زمان استراحت است، در حالی که پارامتر مدول دینامیکی مستقل از شکل و زمان استراحت است. در واقع برای استفاده از مدول برجهندگی در طراحی روسازی باید علاوه بر دما و زمان بارگذاری^۴ دو عامل شکل بارگذاری و زمان استراحت مدنظر قرار گیرد.

در عمل، بارگذاری روسازی به صورت پیوسته انجام نمی‌شود، بلکه بین هر دو تکرار بارگذاری متوالی یک زمان استراحت قابل تعریف است. بنابراین استفاده از مدول دینامیکی بدون در نظر گرفتن زمان استراحت نمی‌تواند نتایج دقیقی در طراحی به همراه داشته باشد. به همین دلیل برخی از محققین استفاده از پارامتر مدول برجهندگی را در طراحی روسازی مناسب‌تر می‌دانند [Zhou et al., 2010].

همان‌گونه‌که ذکر شد، با توجه به طبیعت ویسکوالاستیک مصالح آسفالتی، مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی به عوامل متعددی مانند دمای مخلوط آسفالتی، مدت زمان بارگذاری، مدت زمان استراحت بین دو پالس متوالی و همچنین شکل پالس بارگذاری بستگی دارد و در دامنه وسیعی از مقادیر تغییر می‌کند. مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی در آزمایشگاه معمولاً با انجام آزمایش مدول برجهندگی به روش کشش غیرمستقیم و اعمال بارگذاری نیم‌سینوسی^۵ با زمان بارگذاری ۰/۱ ثانیه و زمان استراحت ۰/۹ ثانیه و در دمای ۵، ۲۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری می‌شود، [AASHTO, 1996; ASTM, 2011]. با توجه به تعدد عوامل مؤثر بر شکل و مدت زمان اعمال پالس تنش قائم در لایه‌های آسفالتی، شکل پالس، زمان بارگذاری و زمان استراحت پیشنهاد شده در استانداردهای موجود آزمایش مدول برجهندگی توانایی شبیه‌سازی دقیق رفتار میدانی مصالح آسفالتی تحت اثر شرایط مختلف بارگذاری را ندارد و اندازه‌گیری غیردقیق مدول برجهندگی، باعث پیش‌بینی اشتباه عکس‌العمل‌های بحرانی و در نتیجه، پیش‌بینی اشتباه عمر خستگی و شیارشدگی

روسازی می‌شود.

هدف این مقاله، بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بارگذاری شامل شکل پالس تنش، مدت زمان اعمال پالس تنش، نسبت دوره استراحت بین دو پالس به مدت زمان اعمال پالس تنش بر روی مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی است. به منظور بررسی پارامترهای ذکر شده از اطلاعات مدول مختلط مربوط به چهار نوع مخلوط آسفالتی با دانه‌بندی و قیر مختلف استفاده شده است. در مورد هر مخلوط، با استفاده از نظریه ویسکوالاستیک، مدول برجهندگی در سه دمای ۵، ۲۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد، زمان‌های بارگذاری ۰/۱، ۰/۰۲، ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۵، ۱، ۲، ۵ و ۱۰ ثانیه و دوره استراحت ۲، ۴، ۹ و ۳۰ برابر زمان بارگذاری تعیین شده است و در هر حالت تأثیر هر یک از این پارامترها بر مدول برجهندگی مورد بررسی قرار گرفته است و روابطی جهت پیش‌بینی مدول برجهندگی ارائه شده است.

۲. پیشینه تحقیق

حرکت ترافیک بر روی روسازی سبب ایجاد تعداد زیادی پالس تنش سریع می‌شود که به مصالح تشکیل دهنده هر لایه اعمال می‌شوند. این پالس‌های تنش تنها برای مدت زمان کوتاهی ادامه می‌یابند. بارکسدیل از روش اجزاء محدود و نظریه الاستیک چند لایه‌ای به منظور محاسبه زمان پالس تنش قائم استفاده کرد. او نتیجه‌گیری کرد که سرعت وسیله نقلیه و عمق مورد نظر، تأثیر زیادی بر روی پالس تنش فشاری قائم و آزمایش‌های دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی در آزمایشگاه دارد. او همچنین نتیجه‌گیری کرد که شکل پالس تنش قائم در سطح روسازی شبیه به یک تابع نیم سینوسی است و با افزایش عمق این شکل به تدریج در مرکز لایه اساس به تابع مثلثی تبدیل می‌شود. بنا بر مطالعات وی، ضخامت و مدول ارتجاعی هر یک از لایه‌ها بر روی شکل و مدت زمان پالس بارگذاری تأثیری نداشت. به علاوه مدت زمان

موج تنش برای محورهای منفرد و دوگانه تقریباً یکسان به دست آمد [Barksdale, 1971]. براون معادله‌ای را به منظور محاسبه زمان پالس تنش به صورت تابعی از سرعت وسیله نقلیه و عمق مورد نظر از سطح روسازی پیشنهاد کرد [Brown, 1973]. زمان پالس تنش بر اساس این معادله، به صورت تابعی از متوسط زمان پالس تنش در سه جهت اصلی تنش در نظر گرفته شد که از طریق نظریه الاستیک چند لایه‌ای به دست آمده بود. رابطه بین زمان پالس تنش $t_p(s)$ ، عمق نقطه مورد نظر $d(m)$ و سرعت وسیله نقلیه $V(km/h)$ توسط براون به شکل زیر ارائه شد.

$$\log(t_p) = 0.5d - 0.2 - 0.9 \log(V) \quad (1)$$

مک لین نموداری را به منظور تعیین مدت زمان اعمال پالس تنش قائم فشاری به صورت یک موج مربعی و به شکل تابعی از سرعت وسیله نقلیه و عمق نقطه مورد نظر از سطح روسازی به دست آورد [McLean, 1974]. مدت زمان پالس بارگذاری بر اساس موج مربعی مک لین تقریباً برابر با نصف مقدار به دست آمده بر اساس موج نیم سینوسی بارکسدیل بود، [Huang, 2004].

راهنمای طراحی روسازی به روش مکانیستیک - تجربی به همراه برنامه MEPDG در سال ۲۰۰۴ توسط NCHRP ارائه شد. بر خلاف آیین نامه اش تو ۱۹۹۳ که از مدول ارتجاعی لایه‌های آسفالتی در طراحی استفاده می‌کرد، در برنامه MEPDG از مدول دینامیک مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شود، [NCHRP, 2004]. به منظور تخمین مدول دینامیک مخلوط‌های آسفالتی در عمق‌های مختلف باید مدت زمان اعمال پالس بارگذاری یا فرکانس بارگذاری در آن عمق مشخص باشد. برای این منظور برنامه MEPDG از روش ضخامت هم‌ارز آمارک مقدار زمان مؤثر تنش قائم را محاسبه می‌کند.

بر اساس روش پیشنهادی توسط یولیتز، برنامه طراحی مکانیستیک - تجربی روسازی‌های انعطاف‌پذیر اداره حمل و نقل کالیفرنیا با

عنوان CalME از رابطه (۲) به منظور محاسبه زمان اعمال پالس تنش قائم استفاده می‌کند [Ullidtz, 2005].

$$t_p = \frac{2(a+Z)}{V} \quad (2)$$

که در این رابطه a شعاع سطح تماس چرخ و Z عمق واقعی نقطه مورد نظر است.

لولیزی و همکاران پالس تنش قائم ایجاد شده در اثر حرکت کامیون و همچنین آزمایش FWD را در آزمایش راه Smart Road در عمق‌های مختلف اندازه‌گیری کردند. زمان پالس نیم‌سینوسی از 0.02 ثانیه برای سرعت 70 km/h و در عمق 597 mm تا زمان 1 ثانیه برای سرعت 10 km/h و در عمق 597 mm تغییر می‌کرد. در مورد آزمایش FWD زمان پالس تنش در تمام عمق‌ها برابر با 0.03 ثانیه به دست آمد. لولیزی و همکاران پیشنهاد کردند که در آزمایش مدول برجهندگی آسفالت به جای استفاده از زمان پالس بارگذاری 0.1 ثانیه از زمان پالس 0.03 ثانیه استفاده شود تا شرایط واقعی بارگذاری در اثر عبور کامیون‌های با سرعت متوسط بهتر شبیه‌سازی شود [Loulizi et al., 2002].

ین و همکاران اثر زمان بارگذاری روی روسازی انعطاف پذیر 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 قشر آسفالت نیز وابسته است [Yin et al., 2008].

هیو و همکاران، شکل و مدت زمان پالس تنش قائم را علاوه بر سرعت وسیله نقلیه و عمق نقطه مورد نظر، به صورت تابعی از نسبت مدول ارتجاعی بین لایه‌ها پیشنهاد و نسبت مدول ارتجاعی بین لایه‌ها را به عنوان یک عامل مؤثر در محاسبه شکل و زمان پالس تنش قائم معرفی کردند. در تحقیق انجام شده، آنها با توجه به تحلیل الاستیک لایه‌ای 1000 مقطع روسازی متعارف با ضخامت‌ها و نسبت مدول‌های ارتجاعی متفاوت و تحت بارگذاری محور استاندارد منفرد، روابطی جهت تعیین شکل پالس

(مربعی، نیم‌سینوسی و مثلثی) و مدت زمان پالس تنش قائم ارایه کردند که این روابط با استفاده از مقاطع روسازی Smart Road اعتبار سنجی شدند [Hu et al., 2010].

فیرهارست و همکاران نشان دادند که مدول برجهندگی با افزایش فرکانس بارگذاری افزایش می‌یابد. فرکانس بیشتر بارگذاری باعث کاهش دوره استراحت و کاهش زمان بازیابی کرنش می‌شود که نتیجه آن مقادیر مدول برجهندگی بالاتر است [Fairhurst et al., 1990]. مطالعات انجام شده توسط لاو نشان داده است که در دمای 5 درجه سانتیگراد، نمونه‌های آسفالتی همانند یک مصالح الاستیک رفتار می‌کنند و مدول برجهندگی آنها از مدت زمان بارگذاری بسیار کم اثر می‌پذیرد [Law, 2004]. بارکسدیل و همکاران نشان دادند که مدت بارگذاری می‌پذیرد، بزرگ‌تر مدول برجهندگی را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد و در مقایسه با زمان بارگذاری کوتاه‌تر در دماهای 25 و 40 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 آزمایش مدول ارتجاعی را با استفاده از آزمایش کشش غیرمستقیم با زمان استراحت $1/5$ ثانیه و شکل پالس بارگذاری نیم‌سینوسی با زمان 0.15 ، 0.3 و 0.45 انجام دادند و مشاهده کردند که مدول ارتجاعی مخلوط‌های آسفالتی حاوی قیر پلیمری حدود 20 تا 25 درصد و مخلوط‌های آسفالتی حاوی قیر اصلاح نشده حدود 20 تا 45 درصد با افزایش زمان پالس بارگذاری از 0.15 به 0.45 ثانیه، کاهش می‌یابد [Kamal et al., 2005]. مطالعه انجام شده توسط لاو حاکی از تأثیر قابل ملاحظه زمان پالس بارگذاری بر روی مدول ارتجاعی با وجود زمان استراحت نسبتاً زیاد بود [Law, 2004].

به وضوح روشن است که بارگذاری ترافیک به طور مداوم

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 مدول برجهدگی با شکل پالس نیم سینوسی ۲ تا ۳ برابر پالس مربعی است [Barksdale et al., 1997].

با توجه به مطالب ذکر شده می‌توان نتایج تحقیقات گذشته را به صورت خلاصه به شرح زیر بیان کرد:

* شکل و مدت زمان اعمال پالس تنش قائم در لایه آسفالت مقدار ثابتی نیست و بستگی به پارامترهای بسیاری از جمله سرعت حرکت چرخ، شعاع سطح بارگذاری، ضخامت لایه آسفالت، نسبت مدول ارتجاعی قشر آسفالت به قشر اساس و همچنین عمق نقطه مورد نظر در داخل لایه آسفالتی دارد.

* مدول برجهدگی مخلوط‌های آسفالتی که تحت اثر بارگذاری نیم‌سینوسی با زمان بارگذاری ۰/۱ ثانیه و زمان استراحت ۰/۹ ثانیه اندازه‌گیری می‌شود، معرف شرایط واقعی بارگذاری در لایه‌های آسفالتی نیست.

* مدول برجهدگی با افزایش زمان بارگذاری کاهش می‌یابد. هیچ تابع مشخصی برای تعیین روند این تغییرات پیشنهاد نشده است. * برخی محققین استفاده از زمان استراحت‌های بزرگ را لازم دانسته‌اند و برخی از پژوهشگران ذکر کرده‌اند که زمان استراحت در حد ۴ برابر زمان بارگذاری نیز دارای دقت کافی است.

* رابطه مشخصی به منظور برآورد تأثیر توأم دو عامل مدت زمان اعمال پالس بارگذاری و دمای مخلوط آسفالتی بر روی مدول برجهدگی مخلوط‌های آسفالتی پیشنهاد نشده است.

* رابطه مشخصی به منظور برقراری ارتباط بین مدول برجهدگی تحت اثر بارگذاری نیم‌سینوسی و بارگذاری مربعی پیشنهاد نشده است.

هدف اصلی این مقاله بررسی تأثیر پارامترهای مختلف پالس

به ساختار روسازی اعمال نمی‌شود و حداقل سه نوع دوره استراحت بین بارهای اعمالی وسایل نقلیه وجود دارد که عبارتند از (۱) دوره استراحتی که بین وسایل مختلف در حال سفر در سرعت‌های متفاوت اتفاق می‌افتد، (۲) دوره‌های که بین وسایل نقلیه در حال سفر در سرعت یکسان رخ می‌دهد و (۳) دوره استراحتی که بین محورهای جلو و عقب یک وسیله مشخص به خصوص در کامیون‌های طولی به وجود می‌آید. [Zhou et al., 2010]. کیم و همکاران نتیجه گرفتند که نسبت دوره استراحت به دوره بارگذاری باید بررسی شود، زیرا به طور مستقیم بر روی میزان کرنش برگشت پذیر اثر می‌گذارد. کرنش برگشت پذیر کوچک‌تر مقدار مدول برجهدگی بزرگ‌تری نتیجه خواهد داد. آنها همچنین تعیین کردند که به محض نزدیکی این نسبت به ۸ یا بیشتر از آن، اثر دوره استراحت چندان قابل ملاحظه نیست [Kim et al., 1992]. فیرهارست و همکاران گزارش کردند که با کاهش در دوره استراحت افزایشی در مدول برجهدگی 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]. تحقیقات انجام شده توسط بارکسدیل و همکاران بیانگر این مدعا است که وقتی نسبت دوره استراحت به زمان بارگذاری از ۴ تا ۲۴ افزایش می‌یابد، اثر کمی روی مدول برجهدگی می‌گذارد. همچنین در بعضی موارد مدول برجهدگی اندکی افزایش یافت که علت این امر تجمع مقادیر کوچک خرابی در طی پیشروی آزمایش، بیان شده است [Barksdale et al., 1997]. مطالعات مونسمیت 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]. بنا بر مطالعات انجام شده در NCHRP ۱-۲۸۸ مقایسه‌ای بین شکل موج مربعی با زمان بارگذاری ۰/۱ ثانیه و شکل موج نیم سینوسی با

پیشنهاد شده است [Park and Schapery, 1999; Oza et al., 2006; Sorvari and Malinen, 2007]. در این تحقیق از روش پیشنهاد شده توسط Zhou و همکاران برای تحلیل ویسکوالاستیک و تخمین مدول ارتجاعی M_r با استفاده از نتایج آزمایش مدول مختلط با فرض رفتار ویسکوالاستیک خطی استفاده شده است. مراحل محاسبه تاریخچه کرنش مصالح ویسکوالاستیک خطی با داشتن تاریخچه تنش و همچنین مدول مختلط مصالح به شرح زیراند. [Zhou et al., 2010]:

مرحله ۱: انجام آزمایش مدول مختلط. در این آزمایش مدول دینامیک $|E^*|$ و زاویه فاز ϕ در فرکانس‌ها و دماهای مختلف اندازه‌گیری می‌شود.

مرحله ۲: توسعه نمودار مرجع مربوط به $|E^*|$ و $\cos\phi$ با توجه به فرکانس زاویه‌ای تبدیل شده^۹. باید توجه داشت که $\omega = 2\pi f$ است که در این رابطه ω فرکانس زاویه‌ای و $t = 1/f$ زمان تناوب است. نمودار مرجع با استفاده از رابطه (۳) قابل تعریف است.

$$\log|E^*| - \log E' = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \log \omega_r}} \quad (3)$$

که در این رابطه δ ، α ، β و γ پارامترهای مصالح؛ $\omega_r = \omega \times \alpha_T$ فرکانس زاویه‌ای تبدیل شده و α_T ضریب انتقال^{۱۰} به صورت تابعی از درجه حرارت T است که به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود.

$$\log \alpha_T = \bar{a}^{-2} + \bar{b} + c \quad (4)$$

که در این رابطه پارامترهای a ، b و c ثابت رگرسیون هستند. مرحله ۳: تبدیل مدول مختلط E^* در دامنه فرکانس به وادادگی خزشی $D(t)$ در دامنه زمان با استفاده از وادادگی ذخیره شده^{۱۱} $D'(t)$ در دامنه فرکانس. رابطه بین مدول مختلط E^* و وادادگی خزشی مختلط D^* به صورت معادلات (۵)، (۶) و (۷) قابل بیان است.

$$E^*(\omega)D^*(\omega) = 1 \quad (5)$$

بارگذاری شامل شکل پالس تنش، مدت زمان اعمال پالس تنش، نسبت دوره استراحت به مدت زمان اعمال پالس تنش و همچنین تعداد سیکل‌های پیش بارگذاری بر روی مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی است. هدف دیگر این مقاله ارائه روابطی به منظور پیش‌بینی مدول برجهندگی با توجه به مدت زمان پالس بارگذاری و دمای مخلوط آسفالتی و همچنین تعیین ارتباط بین مدول برجهندگی تحت اثر بارگذاری با شکل نیم‌سینوسی و مربعی است.

۳. تعیین مدول برجهندگی با استفاده از نظریه ویسکوالاستیک

آزمایش مدول برجهندگی باید در سطوحی از تنش انجام شود که رفتار مصالح آسفالتی از حالت ویسکوالاستیک خطی خارج نشود. بنابراین می‌توان فرض کرد که در طی انجام این آزمایش، رفتار مصالح به صورت ویسکوالاستیک خطی است. به منظور تحلیل ویسکوالاستیک و رفتار سنجی تنش-کرنش مصالح آسفالتی، توابع پاسخ در دامنه زمان برای در نظر گرفتن تاریخچه بارگذاری مورد نیازند. مدول استراحت $E(t)$ ، وادادگی خزشی $D(t)$ و مدول مختلط E^* پارامترهای پایه جهت بیان رفتار ویسکوالاستیک خطی بتن آسفالتی هستند. از بین این سه پارامتر، $E(t)$ و $D(t)$ در دامنه زمان و E^* در دامنه فرکانس اندازه‌گیری می‌شود. مدول مختلط مصالح آسفالتی می‌تواند به منظور تعیین رفتار ویسکوالاستیک مخلوط‌های آسفالتی در دامنه وسیعی از دماها و فرکانس‌های مختلف مورد استفاده قرار گیرد. به منظور تعیین رفتار تنش - کرنش مصالح آسفالتی نیاز است تا با استفاده از پارامترهای ویسکوالاستیک مخلوط‌های آسفالتی در دامنه فرکانس، پارامترهای ویسکوالاستیک در دامنه زمان تعیین شوند. روابط ریاضی متعددی توسط محققین بین پارامترهای ویسکوالاستیک مصالح در دامنه زمان و فرکانس

تأثیر پارامترهای پالس بارگذاری بر مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی...

انحرافی برابر با تنش محوری است.

به منظور اعتبار سنجی روش ذکر شده از نتایج آزمایش‌های مدول مختلط و مدول برجهندگی انجام شده بر روی چهار نوع مخلوط آسفالتی مختلف استفاده شده است. ژو و همکاران (۲۰۱۰) مقدار مدول دینامیک و مدول برجهندگی را در دماها و فرکانس‌های بارگذاری مختلف برای این چهار نوع مخلوط آسفالتی در آزمایشگاه اندازه‌گیری کردند. مشخصات کلی چهار نوع مخلوط آسفالتی مورد استفاده در این تحقیق که برگرفته از منبع (Zhou et al., 2010) است، در جدول (۱) داده شده است. منحنی دانه‌بندی هر یک از این چهار مخلوط آسفالتی در شکل (۱) نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، مخلوط‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل دامنه وسیعی از مخلوط‌های آسفالتی با دانه‌بندی مختلف، نوع قیر متفاوت و درصد قیر مختلف هستند. مدول دینامیکی و زاویه فاز هر یک از مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی در چهار دما و شش فرکانس بارگذاری مختلف مطابق جدول (۲) اندازه‌گیری شده است. همچنین در هر دما و هر فرکانس با فرض شکل پالس بارگذاری نیم‌سینوسی و در نظر گرفتن زمان بارگذاری ۰/۱ ثانیه و دوره استراحت ۰/۹ ثانیه، مقدار مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی اندازه‌گیری شده است.

به منظور تعیین مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از مدول مختلط بر اساس نظریه ویسکوالاستیک، یک برنامه جامع در محیط $Matlab^{\circledR}$ توسعه داده شد. این برنامه با دریافت مقادیر مدول دینامیک و زاویه فاز مخلوط آسفالتی در دماها و فرکانس‌های مختلف بارگذاری و با بهره‌گیری از فرآیند ذکر شده در بخش ۳، امکان تعیین مدول برجهندگی تحت اثر بارگذاری مشخصی (با توجه به شکل، مدت زمان بارگذاری، مدت زمان استراحت و تعداد سیکل بارگذاری) را فراهم می‌سازد. این برنامه امکان توسعه نمودار مرجع مدول دینامیک و مدول استراحت و همچنین امکان برازش سری پرونی به داده‌های حاصل از نرمی

$$E^*(\omega) = E'(\omega) + iE''(\omega) \quad (6)$$

$$D^*(\omega) = D'(\omega) + iD''(\omega) \quad (7)$$

با استفاده از معادلات (۵)، (۶) و (۷) قسمت واقعی $D'(\omega)$ می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$D'(\omega) = \frac{E'(\omega)}{E'(\omega)^2 + E''(\omega)^2} = \frac{E'(\omega)}{E^*(\omega)^2} \quad (8)$$

بنابراین وادادگی ذخیره شده در دامنه فرکانس با داشتن مدول دینامیک و زاویه فاز قابل تعیین است.

از طرفی، وادادگی خزشی به سادگی با استفاده از مدل ویگوت^{۱۱}، که مرکب از یک فنر و تعدادی مدل کلوین به صورت سری است، قابل نمایش است و به صورت رابطه (۹) نوشته می‌شود.

$$D(t) = D_0 + \sum_{i=1}^r D_i \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right] \quad (9)$$

که در این رابطه D_0 وادادگی شیشه‌ای^{۱۲}؛ D_i وادادگی اُفت^{۱۳} و τ_i زمان تأخیر است. در این تحقیق از ۱۷ مدل کلوین^{۱۴} استفاده شده است. سری نشان داده شده در معادله (۹) به سری پرونی^{۱۵} معروف است. به صورت مشابه وادادگی ذخیره شده D' در دامنه فرکانس می‌تواند به صورت سری پرونی و به صورت زیر نوشته شود [Park and Schapery, 1999]:

$$D'(\omega) = D_0 + \sum_{i=1}^r \frac{D_i}{\omega^2 \tau_i^2 + 1} \quad (10)$$

مرحله ۴: فرض کردن تاریخچه بارگذاری شامل شکل بارگذاری، زمان بارگذاری و دوره استراحت و سپس پیش‌بینی تاریخچه کرنش‌ها با توجه به اصل برهم گذاری بولتزمن^{۱۶} با استفاده از انتگرال کانولشن مطابق رابطه (۱۱):

$$\varepsilon(t) = \int_0^t D(t-\tau) \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} d\tau \quad (11)$$

مرحله ۵: تعیین مقدار M_T نظیر بر اساس نتایج مرحله ۴ با استفاده از رابطه (۱۲):

$$M_T = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (12)$$

که در آن M_T مدول برجهندگی، σ_d تنش انحرافی و ε_r کرنش برگشت پذیر است. در آزمایش فشاری محدود نشده، تنش

از تعیین کرنش برگشت‌پذیر در سیکل ۱۰۰ بارگذاری، مقدار مدول برجهندگی با استفاده از رابطه (۱۲) محاسبه شد. شکل (۴) مقادیر اندازه‌گیری شده مدول برجهندگی و پیش‌بینی شده با استفاده از برنامه توسعه داده شده را برای هر یک از مخلوط‌های آسفالتی نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، مقادیر مدول برجهندگی حاصل از پیش‌بینی با استفاده از شبیه‌سازی عددی بسیار نزدیک به مقادیر حاصل از اندازه‌گیری با استفاده از آزمایش کشش غیر مستقیم هستند و بنابراین می‌توان از روش ذکر شده به منظور تعیین مدول برجهندگی تحت شرایط مختلف بارگذاری و دمایی استفاده کرد. لازم به ذکر است که مدل عددی ارائه شده برای چهار نوع مخلوط آسفالتی در دماها و فرکانس‌های بارگذاری مشخص اعتبارسنجی شده است و در خصوص سایر مخلوط‌های آسفالتی و در محدوده دماها و فرکانس‌های بارگذاری وسیع‌تر نیاز به بررسی بیشتری دارد. در ادامه با استفاده از روش عددی ذکر شده مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی تحت شرایط بارگذاری مختلف تعیین و تأثیر هر یک از پارامترهای مرتبط با بارگذاری شامل تعداد سیکل‌های پیش بارگذاری، زمان بارگذاری، نسبت دوره استراحت به دوره بارگذاری بر روی مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

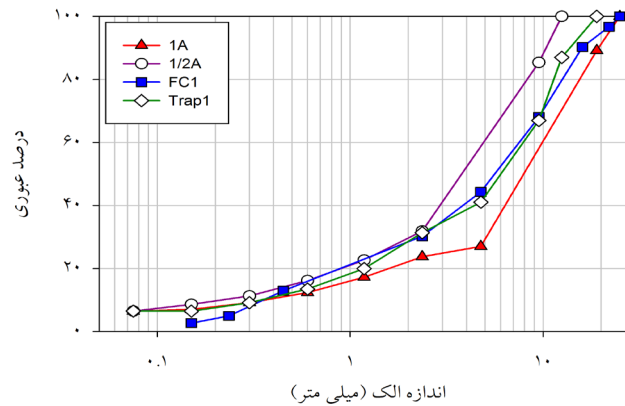
خزشی را با استفاده از الگوریتم لونیبرگ - مارکوادت^{۱۱} فراهم می‌سازد. الگوریتم لونیبرگ - مارکوادت نسبت به الگوریتم گوس-نیوتن^{۱۱} از قابلیت بیشتری برخوردار است زیرا در صورت عدم نزدیک بودن نقطه شروع اولیه به جواب بهینه، امکان حل و تعیین پاسخ بهینه را فراهم می‌سازد. پارامترهای نمودار مرجع مدول دینامیک و مدول استراحت هر یک از مخلوط‌های آسفالتی به ترتیب در جدول (۳) و جدول (۴) داده شده است. همچنین یک نمونه از سری پرونی برازش داده شده به داده‌های نرمی خزشی در شکل (۲) نشان داده شده است. تاریخچه تنش-کرنش حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از روش ذکر شده برای مخلوط آسفالتی FC۱ در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد تحت اثر بارگذاری نیم‌سینوسی و مربعی و زمان بارگذاری ۰/۱ ثانیه و زمان استراحت ۰/۹ ثانیه در شکل (۳) نشان داده شده است.

با استفاده از برنامه توسعه داده شده، مدول برجهندگی هر یک از مخلوط‌های آسفالتی تحت اثر بارگذاری نیم‌سینوسی در چهار دما و شش فرکانس (زمان بارگذاری) مختلف مطابق با مقادیر نظیر در آزمایش مدول دینامیک شبیه‌سازی و تعیین شد. جهت تعیین مدول برجهندگی نخست ۱۰۰ سیکل بارگذاری منطبق بر دما، زمان بارگذاری و زمان استراحت مورد نظر انجام شد و پس

جدول ۱. مشخصات کلی مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده در این تحقیق [Zhou et al., 2010].

کد مخلوط	بزرگ‌ترین اندازه اسمی مصالح (mm)	نوع سنگ دانه	نوع قیر	درصد قیر	درصد فضای خالی
۱/۲A	۱۲/۵	شن شکسته	۷۰-۲۲	۶/۰	۶/۲
۱A	۲۵	شن شکسته + بازالت	۷۶-۲۲	۴/۹	۴/۹۰
FC۱	۲۵	سنگ آهکی	۶۴-۲۲	۴/۵	۵/۸۱
Trap۱	۱۹	بازالت	۷۶-۲۲	۵/۶	۴/۲۰

تأثیر پارامترهای پالس بارگذاری بر مدول برجهنگی مخلوط‌های آسفالتی...



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی مخلوط‌های آسفالتی مختلف [Zhou et al., 2010].

جدول ۲. مدول دینامیکی و زاویه فاز اندازه‌گیری شده برای مخلوط‌های آسفالتی [Zhou et al., 2010].

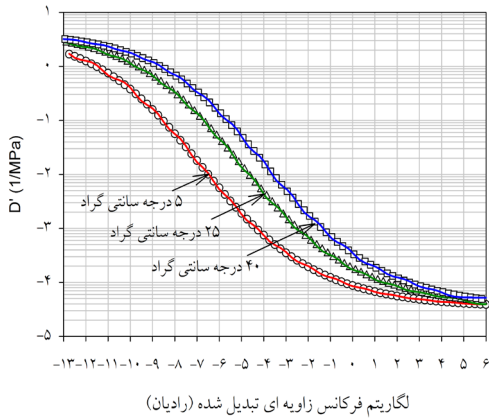
Trap1			FC1			1/2A			1A			فرکانس (هرتز)
Φ	E^*	دما	Φ	E^*	دما	Φ	E^*	دما	Φ	E^*	دما	
($^\circ$)	(mPa)	($^\circ$ C)	($^\circ$)	(mPa)	($^\circ$ C)	($^\circ$)	(mPa)	($^\circ$ C)	($^\circ$)	(mPa)	($^\circ$ C)	
2/7	15710	2/9	3/0	19760	2/9	6/4	17303	1/4	3/4	29243	-1.0	25/0
5/8	13892	2/9	6/0	18498	2/9	8/5	15535	1/4	6/0	27036	-1.0	10/0
6/2	12942	2/9	6/9	17307	2/9	10/8	14337	1/4	7/7	25577	-1.0	5/0
8/1	11162	2/9	9/1	15031	2/9	14/0	11344	1/4	9/9	22211	-1.0	1/0
8/6	10087	2/9	10/0	13962	2/9	15/2	10144	1/4	10/6	20628	-1.0	0/5
10/0	8563	2/9	12/4	11754	2/9	18/8	7672	1/4	12/9	17006	-1.0	0/1
3/9	14029	5/3	3/9	18445	5/3	7/2	14588	4/3	5/7	24258	4/10	25/0
6/4	12427	5/3	6/8	17125	5/3	9/9	12827	4/3	9/0	22000	4/10	10/0
7/2	11445	5/3	8/0	16047	5/3	12/4	11428	4/3	10/7	20151	4/10	5/0
9/5	9550	5/3	10/1	13724	5/3	16/4	9060	4/3	13/5	16754	4/10	1/0
10/3	8472	5/3	11/4	12844	5/3	18/1	8074	4/3	15/4	15302	4/10	0/5
11/2	6990	5/3	14/5	10377	5/3	22/1	5774	4/3	18/1	11918	4/10	0/1
7/7	11267	15/4	9/2	12867	15/4	16/4	8477	15/0	11/9	16731	15/30	25/0
9/5	9665	15/4	11/9	11095	15/4	19/0	6773	15/0	14/2	14079	15/30	10/0
12/3	8662	15/4	15/2	10015	15/4	22/3	5748	15/0	17/9	12266	15/30	5/0
15/2	6695	15/4	18/5	7755	15/4	27/6	3820	15/0	21/4	9017	15/30	1/0
16/8	5853	15/4	20/8	6817	15/4	30/6	3126	15/0	23/4	7746	15/30	0/5
18/2	4333	15/4	24/7	4872	15/4	33/4	1802	15/0	25/8	5134	15/30	0/1
15/3	5054	36/9	23/0	3571	36/9	25/6	1642	36/7	21/1	4155	36/70	25/0
17/1	3767	36/9	25/8	2522	36/9	27/7	1024	36/7	25/1	2908	36/70	10/0
23/6	3157	36/9	29/9	1991	36/9	27/5	713	36/7	27/8	2329	36/70	5/0
24/7	2101	36/9	32/7	1114	36/9	29/9	390	36/7	26/6	1421	36/70	1/0
25/8	1662	36/9	34/3	851	36/9	29/9	293	36/7	27/8	1111	36/70	0/5
24/5	1143	36/9	31/3	468	36/9	24/0	179	36/7	25/0	736	36/70	0/1

جدول ۳. پارامترهای منحنی مرجع مدول دینامیک (E^*) بر اساس فرکانس زاویه‌ای برای مخلوط‌های آسفالتی مختلف.

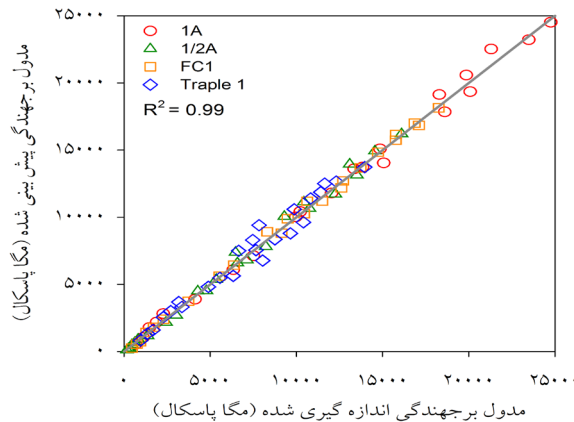
کد مخلوط	δ	α	β	γ	c	c	c
1/2A	1/81402	2/77319	-1/70420	-0/45554	0/00047	-0/15515	0/38643
1A	1/13291	3/25935	-1/71614	-0/49328	0/00105	-0/17498	0/34479
FC1	0/12094	4/31096	-2/32270	-0/40184	0/00091	-0/18498	0/90547
Trap1	1/68565	2/66250	-1/48481	-0/43219	-0/00021	-0/08584	0/35183

جدول ۴. پارامترهای منحنی مرجع مدول استراحت (E') بر اساس فرکانس زاویه‌ای برای مخلوط‌های آسفالتی مختلف.

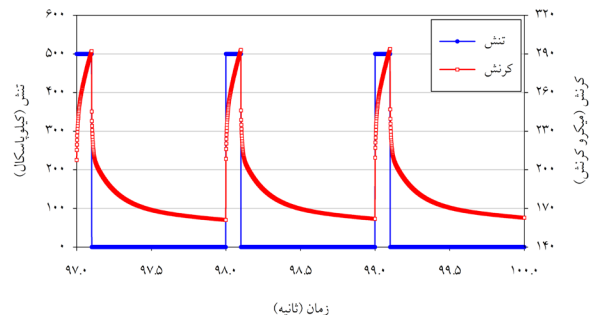
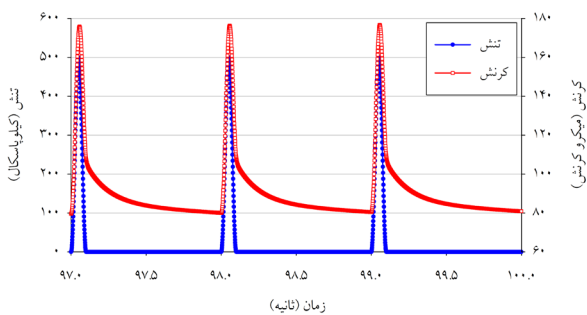
کد مخلوط	δ	α	β	γ	c	c	c
1/2A	1/94717	2/62885	-1/64662	-0/48969	0/00052	-0/15477	0/34030
1A	1/32387	3/05120	-1/64797	-0/53845	0/00117	-0/17669	0/30216
FC1	0/87717	3/52755	-2/17398	-0/46051	0/00094	-0/18352	0/83501
Trap1	1/90929	2/41259	-1/42268	-0/47813	-0/00018	-0/08697	0/31355



شکل ۲. منحنی مرجع وادادگی خزشی (D') و سری پرونی برازش داده شده برای مخلوط آسفالتی FC1.



شکل ۴. مقایسه مدول برجهندگی اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از نظریه ویسکوالاستیک.



شکل ۳. شبیه‌سازی تاریخچه تنش- کرنش در سه سیکل آخر بارگذاری در آزمایش تعیین مدول برجهندگی برای مخلوط آسفالتی FC1 با توجه به دو شکل پالس بارگذاری نیم‌سینوسی و مربعی.

۴. تأثیر نسبت دوره استراحت به زمان بارگذاری

در جدول (۵) تأثیر نسبت دوره استراحت به زمان بارگذاری (R/D) بر روی مدول برجهندگی هر یک از مخلوط آسفالتی در دماهای مختلف (۵، ۲۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد) و زمان‌های بارگذاری مختلف (۱/۰، ۱/۱ و ۱ ثانیه) با توجه به دو شکل پالس بارگذاری نیم‌سینوسی و مربعی نشان داده شده است. با توجه به این که در عمل زمان استراحت بسیار بیشتر از مقدار پیشنهاد شده در استانداردهای تعیین مدول برجهندگی است، مدول برجهندگی در نسبت زمان استراحت به زمان بارگذاری ۳۰، به عنوان معیار در نظر گرفته شد و مدول برجهندگی در سایر نسبت‌ها با این مقدار مقایسه شد. مقادیر نشان داده شده در جدول (۵) درصد خطای حاصل از برآورد مدول برجهندگی در یک نسبت R/D مشخص را نسبت به $R/D=30$ نشان می‌دهد.

همان‌گونه که دیده می‌شود، در صورت استفاده از زمان بارگذاری طولانی‌تر نیاز است تا از نسبت‌های بیشتر زمان استراحت به زمان بارگذاری استفاده شود. همچنین دیده می‌شود که استفاده از نسبت‌های کم دوره استراحت به زمان بارگذاری در دماهای پایین خطای چندانی ایجاد نمی‌کند، در صورتی که در دماهای متوسط و بالا استفاده از حداقل زمان ۹ ثانیه مطابق با روش‌های استاندارد آزمایشگاهی تعیین مدول برجهندگی بسیار حائز اهمیت است. همان‌گونه که انتظار می‌رود در مقایسه با شکل پالس نیم‌سینوسی، درصد خطای حاصل در صورت استفاده از شکل موج مربعی به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد، که علت این امر نیاز به زمان طولانی‌تر به منظور برگشت کرنش‌های الاستیک به دلیل انرژی بیشتر پالس مربعی نسبت به پالس نیم‌سینوسی با زمان بارگذاری یکسان است. تحقیقات بارکسدیل نشان می‌دهند که استفاده از نسبت‌های بیش از ۴، تأثیر چندانی بر روی مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی ندارد. [Barksdale et al., 1997]. همچنین سایر تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده نشان

می‌دهند که نسبت زمان استراحت بیش از ۹ تأثیر چندانی بر مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی ندارد [Kim, Shah and Khosla, 1992; Monismith, 1989].
 اخیر استفاده از نسبت دوره استراحت ۴ به جای نسبت ۳۰، در بیشترین حالت به ترتیب باعث خطایی در حدود ۴/۳۷ درصد و ۷/۶۶ درصد در پیش‌بینی مدول برجهندگی تحت اثر بارگذاری نیم‌سینوسی و مربعی می‌شود. در نسبت دوره استراحت ۹ به جای نسبت ۳۰، این میزان خطا تحت اثر بارگذاری نیم‌سینوسی و مربعی به ترتیب برابر با ۱/۴۲ درصد و ۲/۲۷ درصد خواهد بود. به طور کلی می‌توان دید که اهمیت بکارگیری زمان‌های استراحت بیشتر در مورد آسفالت‌های حاوی قیر غیر اصلاح شده حائز اهمیت است که علت این امر حساسیت بالای مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با این نوع قیر به درجه حرارت است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، استفاده از نسبت ۴ با توجه به نوع مخلوط آسفالتی و همچنین شکل پالس بارگذاری می‌تواند خطاهای زیادی تا حدود ۸ درصد ایجاد نماید. بنابراین پیشنهاد می‌شود که در انجام آزمایش مدول برجهندگی در دماهای متوسط و بالا، حداقل نسبت زمان استراحت به زمان بارگذاری برابر با ۹ و در مواردی که خطاهای کمتر از ۲ درصد مدنظر است، حتی بیشتر از این مقدار در نظر گرفته شود. رابطه مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی و پارامتر نسبت دوره استراحت به زمان بارگذاری به صورت یک رابطه توانی قابل بیان است، به طوری که با کاهش نسبت دوره استراحت به زمان بارگذاری، مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی به صورت توانی افزایش می‌یابد و همچنین نسبت‌های استراحت به بارگذاری بیش از مقادیر بالاتر از ۳۰ بر روی مدول برجهندگی بی تأثیر است. با توجه به این که در تعیین مدول برجهندگی بین سیکل‌های بارگذاری زمان استراحت در نظر گرفته می‌شود و در تعیین مدول دینامیک بارگذاری به صورت تناوبی و بدون اعمال دوره استراحت تعیین می‌شود، در

۵. تأثیر تعداد سیکل‌های پیش بارگذاری

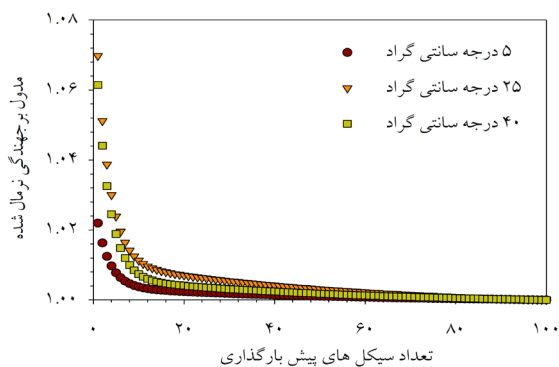
در برخی استانداردها، مقادیر مختلفی برای تعداد سیکل‌های پیش بارگذاری جهت تعیین مدول برجهندگی با توجه به دما ذکر شده است. برای مثال مطابق روش اشوتو AASHTOTP31-96 تعداد سیکل پیش بارگذاری برابر با حدود ۲۰ الی ۱۵۰ سیکل تعیین شده است [AASHTO, 1996]. در شکل (۵) تأثیر تعداد سیکل‌های پیش بارگذاری بر روی مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی مختلف نشان داده شده است. بررسی انجام شده بر اساس

یک دما و فرکانس مشخص مدول دینامیک مخلوط آسفالتی بیشتر از مدول برجهندگی مخلوط خواهد بود و بنابراین استفاده از پارامتر مدول دینامیک به منظور تعیین سختی مخلوط‌های آسفالتی و تحلیل روسازی سبب می‌شود تا پاسخ‌های بحرانی روسازی به دلیل افزایش سختی مصالح آسفالتی، کمتر از مقادیر واقعی و در نتیجه عمر خستگی و شیارشدگی روسازی بیشتر از مقادیر واقعی پیش‌بینی شوند. مورد اخیر توسط برخی محققین ارزیابی و به تأیید رسیده است [AlQadi et al., 2008].

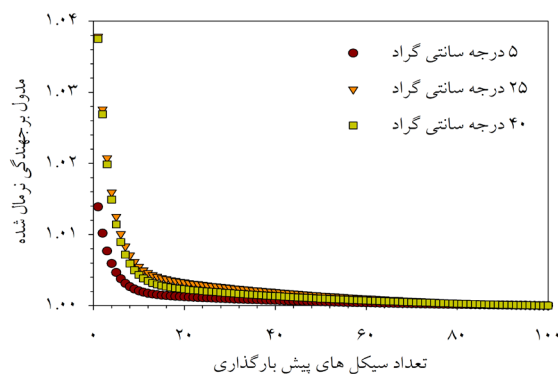
جدول ۵. درصد خطای برآورد مدول برجهندگی در نسبت دوره استراحت به زمان بارگذاری نسبت به $R.D = 30$

Trap	FC		1/2A		1A		R.D	زمان بارگذاری (ثانیه)	دما (°C)	
	مربعی	نیم‌سینوسی	مربعی	نیم‌سینوسی	مربعی	نیم‌سینوسی				
۲/۲۵	۰/۷۷	۱/۶۴	۰/۵۴	۲/۸۶	۱/۰۳	۲/۱۷	۰/۷۴	۲	۰/۰۱	۵
۰/۷۴	۰/۲۵	۰/۵۲	۰/۱۷	۱/۰۱	۰/۳۶	۰/۷۳	۰/۲۵	۴	۰/۰۱	۵
۰/۳۶	۰/۰۹	۰/۲۶	۰/۰۶	۰/۴۸	۰/۱۳	۰/۳۵	۰/۰۸	۹	۰/۰۱	۵
۴/۰۰	۱/۴۶	۲/۹۷	۱/۰۲	۵/۴۱	۲/۱۰	۴/۰۱	۱/۴۶	۲	۰/۱۰	۵
۱/۳۳	۰/۵۰	۰/۹۸	۰/۳۴	۱/۹۱	۰/۷۷	۱/۳۵	۰/۵۱	۴	۰/۱۰	۵
۰/۱۵	۰/۱۱	۰/۱۰	۰/۰۸	۰/۳۰	۰/۲۰	۰/۱۶	۰/۱۲	۹	۰/۱۰	۵
۵/۲۱	۱/۸۹	۴/۰۴	۱/۳۸	۷/۷۲	۳/۰۷	۵/۴۴	۱/۹۹	۲	۱/۰۰	۵
۲/۲۳	۰/۸۵	۱/۷۵	۰/۶۳	۳/۴۲	۱/۴۴	۲/۳۵	۰/۹۰	۴	۱/۰۰	۵
۰/۵۳	۰/۲۲	۰/۴۲	۰/۱۷	۰/۹۲	۰/۴۲	۰/۵۸	۰/۲۴	۹	۱/۰۰	۵
۳/۹۱	۱/۵۱	۴/۷۵	۱/۹۴	۷/۸۶	۳/۷۵	۵/۳۶	۲/۲۷	۲	۰/۰۱	۲۵
۱/۳۵	۰/۵۲	۱/۷۵	۰/۷۳	۳/۰۸	۱/۵۱	۱/۹۳	۰/۸۳	۴	۰/۰۱	۲۵
۰/۶۴	۰/۱۸	۰/۸۱	۰/۲۶	۱/۳۷	۰/۵۴	۰/۸۹	۰/۲۹	۹	۰/۰۱	۲۵
۶/۴۷	۲/۶۴	۸/۳۷	۳/۶۸	۱۱/۸۷	۶/۰۲	۸/۴۰	۳/۷۴	۲	۰/۱۰	۲۵
۲/۱۹	۰/۹۲	۳/۰۹	۱/۴۳	۴/۳۰	۲/۲۹	۲/۸۶	۱/۳۲	۴	۰/۱۰	۲۵
۰/۲۸	۰/۲۲	۰/۵۸	۰/۴۱	۰/۷۹	۰/۶۳	۰/۴۰	۰/۳۲	۹	۰/۱۰	۲۵
۷/۷۴	۳/۱۰	۱۱/۵۴	۵/۲۶	۱۳/۱۲	۶/۳۱	۹/۳۸	۴/۰۲	۲	۱/۰۰	۲۵
۳/۲۸	۱/۳۸	۵/۲۴	۲/۵۷	۵/۴۹	۲/۷۹	۳/۹۱	۱/۷۵	۴	۱/۰۰	۲۵
۰/۷۸	۰/۳۵	۱/۵۵	۰/۸۳	۱/۳۵	۰/۷۳	۰/۹۱	۰/۴۳	۹	۱/۰۰	۲۵
۵/۴۹	۲/۳۵	۸/۸۳	۴/۴۶	۹/۶۷	۵/۱۷	۶/۹۸	۳/۳۲	۲	۰/۰۱	۴۰
۱/۹۳	۰/۸۴	۳/۵۴	۱/۸۶	۳/۷۰	۲/۰۲	۲/۴۶	۱/۱۹	۴	۰/۰۱	۴۰
۰/۹۰	۰/۲۹	۱/۵۹	۰/۶۹	۱/۶۳	۰/۷۰	۱/۱۳	۰/۴۱	۹	۰/۰۱	۴۰
۸/۲۳	۳/۶۵	۱۳/۸۷	۷/۴۳	۱۲/۰۹	۶/۳۸	۹/۲۶	۴/۳۸	۲	۰/۱۰	۴۰
۲/۷۴	۱/۲۵	۵/۴۷	۳/۱۲	۳/۹۷	۲/۱۷	۲/۹۳	۱/۴۲	۴	۰/۱۰	۴۰
۰/۳۴	۰/۲۹	۱/۲۷	۰/۹۸	۰/۵۲	۰/۵۱	۰/۲۹	۰/۳۰	۹	۰/۱۰	۴۰
۸/۷۳	۳/۶۹	۱۷/۱۲	۹/۰۷	۱۰/۸۱	۴/۹۷	۸/۳۴	۳/۵۱	۲	۱/۰۰	۴۰
۳/۶۱	۱/۵۹	۷/۶۶	۴/۳۷	۴/۳۲	۲/۰۷	۳/۳۶	۱/۴۷	۴	۱/۰۰	۴۰
۰/۸۱	۰/۳۸	۲/۲۷	۱/۴۲	۰/۹۰	۰/۴۵	۰/۶۸	۰/۳۱	۹	۱/۰۰	۴۰

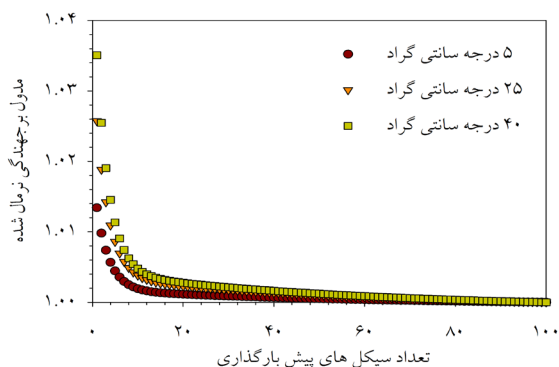
تأثیر پارامترهای پالس بارگذاری بر مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی...



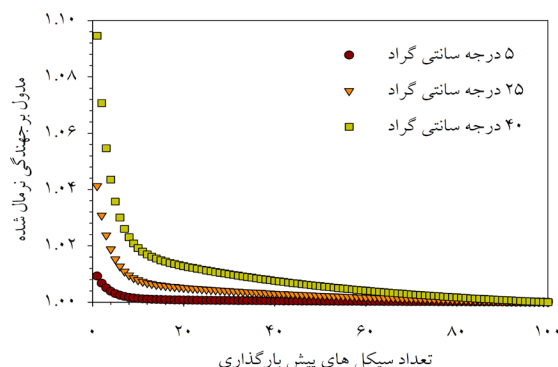
ب) مخلوط ۱/۲A



الف) مخلوط ۱A



د) مخلوط Trap۱



ج) مخلوط FC۱

شکل ۵. تأثیر تعداد سیکل‌های پیش بارگذاری بر روی مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی.

همچنین دیده می‌شود که در مورد کلیه مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی، پیش بارگذاری با ۵۰ سیکل خطایی کمتر از ۱ درصد را نسبت به تعداد ۱۰۰ سیکل پیش بارگذاری باعث می‌شود که قابل صرف نظر کردن است. استاندارد ASTM D 7369-11 تعداد سیکل‌های پیش بارگذاری جهت اندازه‌گیری مدول برجهندگی را در کلیه دماها برابر با ۱۰۰ سیکل تعیین کرده است [ASTM, 2011]. با توجه به شبیه‌سازی انجام شده، این تعداد سیکل پیش بارگذاری در دامنه دمایی ۵ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد برای رساندن نمونه به وضعیت پایدار کاملاً کفایت می‌کند. استاندارد AASHTOTP31-96 برای دمای ۵ درجه، ۲۵ درجه و ۴۰ درجه سانتی‌گراد تعداد سیکل‌های پیش بارگذاری را به ترتیب ۵۰-۱۵۰، ۵۰-۱۰۰ و ۲۰-۵۰ در نظر می‌گیرد [AASHTO,

پروتکل استاندارد انجام آزمایش مدول برجهندگی شامل بارگذاری با شکل موج نیم‌سینوسی، زمان بارگذاری ۰/۱ ثانیه و زمان استراحت ۰/۹ ثانیه انجام شده است. در هر حالت مدول برجهندگی نرمال شده (نسبت مدول برجهندگی در سیکل مورد نظر به مدول برجهندگی در سیکل ۱۰۰ام بارگذاری) تعیین و نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، مخلوط‌های آسفالتی در دمای متوسط و بالا نیاز به تعداد سیکل پیش بارگذاری بیشتری دارند که این واقعیت ناشی از افزایش خواص ویسکوز مخلوط‌های آسفالتی با افزایش دما است. دمایی که در آن نیاز به تعداد سیکل پیش بارگذاری بیشتری است بسته به نوع قیر مورد استفاده و دانه‌بندی مخلوط آسفالتی می‌تواند دمای متوسط (۵۲ درجه سانتی‌گراد) یا دمای بالا (دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد) باشد.

تأثیرگذار بر روی مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی است و استفاده از تنها یک مقدار زمان بارگذاری (معمولاً برابر با ۰,۱) به منظور تعیین مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی سبب می‌شود تا دقت تحلیل و طراحی روسازی با روش‌های مکانیستیک - تجربی به شدت کاهش یابد. همچنین بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که شکل و زمان اعمال پالس بارگذاری به صورت تابعی از سرعت عبور بار، شعاع سطح تماس چرخ، ضخامت لایه آسفالت، نسبت مدول ارتجاعی قشر آسفالت به قشر اساس و عمق نقطه مورد نظر است به طوری که شکل پالس بارگذاری در عمق‌های کم به صورت مربعی و در عمق‌های بیشتر به صورت نیم‌سینوسی است و با توجه به پارامترهای ذکر شده مقدار زمان بارگذاری ممکن است از چند صدم ثانیه تا حدود یک ثانیه تغییر کند که این مقدار نیز در عمق‌های مختلف قشر آسفالت تغییر می‌کند و باید در طراحی مد نظر قرار گیرد [Hu et al., 2010].

با بررسی روابط مختلف بین مدول برجهندگی و زمان بارگذاری مشخص شد که بین مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی و زمان بارگذاری یک رابطه‌ی نمایی مطابق رابطه (۱۳) برقرار است.

$$M_r = a + B^c \quad (13)$$

که در این رابطه M_r مدول برجهندگی، d مدت زمان بارگذاری و a ، b و c ضرایب ثابت مدل می‌باشند. در شکل (۶) رابطه‌ی نمایی برازش داده شده در دماهای مختلف و برای دو شکل پالس مربعی و نیم‌سینوسی نشان داده شده است. ضرایب ثابت مدل به همراه ضریب رگرسیون حاصل از برازش معادله (۱۳) در جدول (۶) نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود معادله (۱۳) با دقت بسیار بالا، توانایی پیش‌بینی تغییرات مدول برجهندگی با توجه به تغییرات زمان بارگذاری را دارد. مدل فوق در تعیین مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی در فرکانس‌های مختلف بارگذاری با استفاده از یک تعداد آزمایش محدود بسیار مفید است. برای این منظور توصیه می‌شود تا آزمایش مدول برجهندگی

[1996]. با توجه به افزایش خواص ویسکوالاستیک مخلوط‌های آسفالتی در دماهای بالاتر و افزایش خواص الاستیک در دماهای پایین‌تر، تعداد سیکل‌های پیش بارگذاری پیشنهاد شده در دمای بالا (۴۰ درجه سانتی‌گراد) بسیار کم است و نیاز است تا از حداقل ۵۰ سیکل پیش بارگذاری در این دما استفاده شود. از طرفی در دماهای پایین نیز نمونه بعد از حداکثر ۵۰ سیکل به وضعیت پایدار می‌رسد و تعداد سیکل پیش بارگذاری ۱۰۰-۱۵۰ سیکل در این دما بسیار دست بالا است.

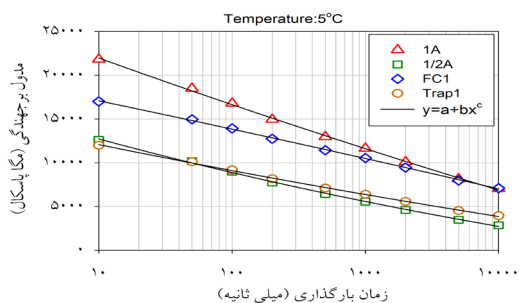
۶. تأثیر زمان بارگذاری بر مدول برجهندگی مصالح آسفالتی

در شکل (۶) تأثیر زمان بارگذاری، بر روی مدول برجهندگی چهار نوع مخلوط آسفالتی در دماهای مختلف (۵، ۲۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد) نشان داده شده است. مدول برجهندگی در هر حالت با فرض شکل پالس بارگذاری نیم‌سینوسی و مربعی با نسبت زمان استراحت به زمان بارگذاری برابر با ۹ به دست آمده است.

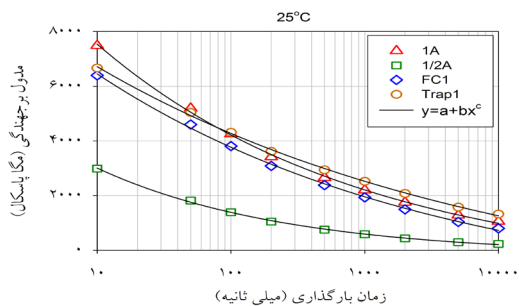
همان‌گونه که ملاحظه می‌شود با افزایش زمان بارگذاری، مقدار مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی کاهش می‌یابد. همچنین دیده می‌شود که مقدار مدول برجهندگی تحت اثر بارگذاری مربعی کمتر از مقدار مدول برجهندگی تحت اثر بارگذاری نیم‌سینوسی است. اختلاف مدول برجهندگی حاصل از دو شکل پالس بارگذاری نیم‌سینوسی و مربعی با افزایش دما، افزایش می‌یابد که علت این امر افزایش خواص ویسکوز آسفالت در دماهای بالاتر است. روند مشاهده شده در تغییرات مدول برجهندگی به دلیل کاهش یا افزایش زمان بارگذاری مشابه تحقیقات آزمایشگاهی صورت گرفته توسط بارکسدیل و همکاران، فیرهارست و همکاران و لاو است [Barksdale et al., 1997; Fairhurst et al., 1990; Law, 2004]. بررسی اخیر نشان می‌دهد که پارامتر زمان بارگذاری از جمله مشخصات بسیار حائز اهمیت و

تأثیر پارامترهای پالس بارگذاری بر مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی...

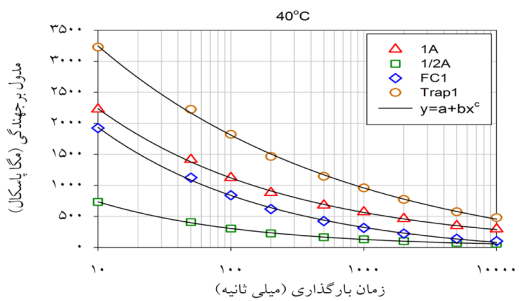
برجهندگی در چهار دما و شش زمان بارگذاری در هر دما (مجموعاً ۲۴ داده برای هر مخلوط)، مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به تأثیر بسیار کم زمان استراحت بیش از ۹ برابر زمان بارگذاری، مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی با فرض نسبت دوره استراحت ۹ محاسبه شد. پس از بررسی توابع مختلف به منظور پیش‌بینی مدول برجهندگی به صورت تابعی از دما و زمان بارگذاری، رابطه رگرسیون غیر خطی (۱۴) به منظور پیش‌بینی مقادیر مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی پیشنهاد شد.



(ب) دمای ۵ درجه سانتی‌گراد و شکل پالس مربعی



(د) دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و شکل پالس مربعی

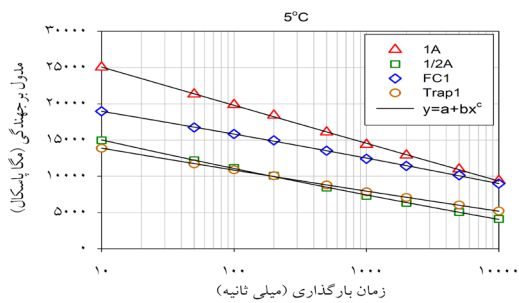


(و) دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد و شکل پالس مربعی

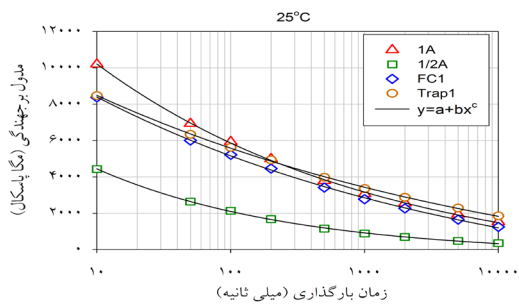
در دمای مورد نظر و در سه زمان بارگذاری ۰/۱، ۰/۱ و ۱ ثانیه انجام شود و سپس معادله (۱۳) به داده‌های حاصل برازش داده شود. با تعیین ضرایب ثابت a ، b و c می‌توان مدول برجهندگی مصالح در سایر زمان‌های بارگذاری را پیش‌بینی کرد.

۷. مدل پیش‌بینی مدول برجهندگی با توجه به دما و مدت بارگذاری

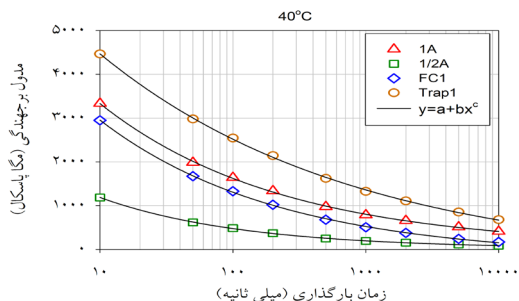
به منظور پیش‌بینی مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی در دماها و زمان‌های بارگذاری مختلف، اطلاعات حاصل از مدول



(الف) دمای ۵ درجه سانتی‌گراد و شکل پالس نیم سینوسی



(ج) دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و شکل پالس نیم سینوسی



(ه) دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد و شکل پالس نیم سینوسی

شکل ۶. تأثیر مدت زمان بارگذاری بر مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی مختلف.

نیم‌سینوسی، توابع مختلف برای برقراری ارتباط بین این دو مقدار بررسی شد. بررسی انجام شده بر روی چهار مخلوط آسفالتی بکار رفته در این تحقیق نشان می‌دهد که ارتباط بین مدول‌های برجهدگی یک مخلوط آسفالتی تحت اثر بارگذاری نیم‌سینوسی و مربعی در کلیه دماها و زمان‌های بارگذاری را می‌توان تنها با استفاده از یک رابطه برقرار کرد. این رابطه به صورت یک چندجمله‌ای درجه دوم با عرض از مبدأ صفر به شکل معادله (۱۵) قابل بیان است.

$$M_s = aMr_H + b(M_H)^2 \quad (15)$$

که در این رابطه M_s مدول برجهدگی تحت اثر بارگذاری مربعی و M_H مدول برجهدگی تحت اثر بارگذاری نیم‌سینوسی و ضرایب a ، b و c ثابت‌های هستند.

با بهره‌گیری از رابطه فوق می‌توان با انجام تعداد محدودی آزمایش مدول برجهدگی تحت اثر هر دو بارگذاری نیم‌سینوسی و مربعی رابطه اخیر را برای مخلوط آسفالتی مورد نظر کالیبره و سپس تنها با انجام آزمایش مدول برجهدگی تحت اثر بارگذاری نیم‌سینوسی در دماها و فرکانس‌های مختلف، مقدار مدول برجهدگی تحت اثر بارگذاری مربعی را پیش‌بینی کرد. برای این منظور پیشنهاد می‌شود که آزمایش مدول برجهدگی تحت اثر بارگذاری نیم‌سینوسی و مربعی در سه دمای ۵، ۲۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد و به ترتیب با سه فرکانس ۱۰، ۲۵ و ۱ هرتز (معادل زمان بارگذاری ۴۰، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌ثانیه) انجام شود تا محدوده بالا، متوسط و پایین مقادیر مدول برجهدگی تعیین شود. سپس با استفاده از برازش رابطه (۱۵) به این سه داده می‌توان مقادیر مدول برجهدگی نمونه آسفالتی را در دما و فرکانس مشخص تحت اثر بارگذاری نیم‌سینوسی با استفاده از آزمایش تعیین کرد و مقدار نظیر مدول برجهدگی با توجه به پالس مربعی را با استفاده از رابطه کالیبره شده با دقت بالا تعیین کرد. ضرایب رگرسیون حاصل از برازش رابطه (۱۵) به اطلاعات مدول برجهدگی برای چهار نوع مخلوط

$$M_r = c_1 \exp\left(-\left(\frac{(c_2 T + c_3 \ln(D) + c_4)^4}{c_5}\right)\right) \quad (14)$$

در این رابطه rM مدول برجهدگی مخلوط آسفالتی، T دمای مخلوط آسفالتی (درجه سانتی‌گراد)، D مدت زمان بارگذاری (میلی ثانیه) و c ضرایب ثابت مدل هستند. برازش رابطه فوق به اطلاعات مدول برجهدگی با استفاده از روش کمترین مربعات وزن داده شده انجام شد. با توجه به دامنه تغییرات بسیار وسیع مدول برجهدگی از مقادیر بسیار بالا (دما و زمان بارگذاری کم) تا مقادیر بسیار پایین (دما و زمان بارگذاری زیاد)، استفاده از روش رگرسیون وزن‌دار بسیار حائز اهمیت است. در برازش‌های انجام شده، وزن هر نقطه داده به صورت عکس مدول برجهدگی در نظر گرفته شده است. ضرایب ثابت مدل پیش‌بینی مدول برجهدگی برای هر یک از مخلوط‌های آسفالتی برای دو شکل پالس بارگذاری نیم‌سینوسی و مربعی به ترتیب در جدول‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است.

۸. رابطه مدول برجهدگی مخلوط‌های آسفالتی با

توجه به شکل پالس مربعی و نیم‌سینوسی

مدول برجهدگی مخلوط‌های آسفالتی در آزمایشگاه معمولاً تحت اثر بارگذاری نیم‌سینوسی اندازه‌گیری می‌شود. همان‌گونه که قبلاً بیان شد، شکل پالس تنش در عمق‌های کم از سطح روسازی به صورت مربعی است و نیاز است تا مقادیر مدول برجهدگی با استفاده از شکل پالس مربعی نیز تعیین شوند تا امکان تعیین مدول برجهدگی در عمق‌های پایین لایه آسفالتی فراهم شود. تعیین دقیق مدول برجهدگی در نزدیکی سطح روسازی با توجه به اینکه مکانیزم خرابی ترک‌های بالا به پایین وابسته به محاسبه کرنش کششی در تار فوقانی لایه آسفالت است، از اهمیت بسیاری برخوردار است [NCHRP, 2004]. به منظور برقراری ارتباط بین مدول برجهدگی تحت اثر بارگذاری مربعی و بارگذاری

تأثیر پارامترهای پالس بارگذاری بر مدول برجهنگی مخلوط‌های آسفالتی...

آسفالتی در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، در مورد کلیه مخلوط‌های آسفالتی رابطه فوق دارای دقت کافی است.

جدول ۶. ضرایب ثابت و ضریب رگرسیون حاصل از برازش معادله (۱۳) به داده‌های مدول برجهنگی مطابق شکل (۶).

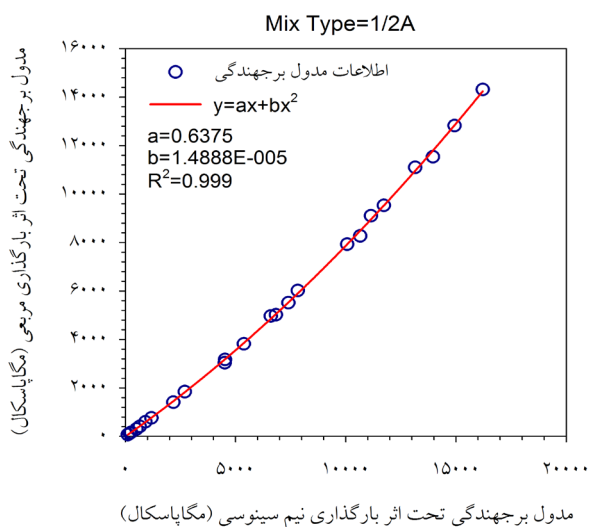
R^2	c	b	a	نوع مخلوط	شکل بارگذاری	دما (درجه سانتی‌گراد)
۰/۹۹۹	۰/۰۰۶۱۸	-۳۵۵۲۰۰	-۳۸۵۳۰۰	۱/۲A	نیم‌سینوسی	۵
۰/۹۹۹	-۰/۰۳۳۵۳	۵۷۳۳۰	-۳۸۰۵۰	۱A		
۰/۹۹۹	۰/۰۲۴۶۲	-۵۰۸۱۰	۷۲۷۴۰	FC۱		
۰/۹۹۹	-۰/۰۱۹۹۸	۷۰۷۱۰	-۵۳۶۴۰	Trap۱		
۰/۹۹۹	-۰/۰۲۵۱۷	۱۰۰۲۰۰	-۷۲۶۱۰	۱/۲A	مربعی	۵
۰/۹۹۹	-۰/۰۶۵۱۲	۳۲۰۶۰	-۱۴۸۷۰	۱A		
۰/۹۹۹	۰/۰۱۵۳۰	-۸۶۸۰۰	۱۰۷۰۰۰	FC۱		
ظ۰/۹۹۹	-۰/۰۳۶۳۶	۴۰۲۱۰	-۲۴۹۱۰	Trap۱		
۰/۹۹۹	-۰/۰۲۰۶۴۰	۱۸۴۹۰	-۱۲۸۰	۱/۲A	نیم‌سینوسی	۲۵
۰/۹۹۹	-۰/۰۲۹۸۶۰	۹۳۶۵	-۲۶۹	۱A		
۰/۹۹۹	-۰/۰۱۴۶۹۰	۱۵۸۴۰	-۲۸۹۲	FC۱		
۰/۹۹۹	-۰/۰۱۲۹۴۰	۱۵۱۷۰	-۲۷۷۶	Trap۱		
۰/۹۹۹	-۰/۰۲۱۷۴۰	۱۳۹۱۰	-۸۹۳	۱/۲A	مربعی	۲۵
۰/۹۹۹	-۰/۰۳۱۰۳۰	۶۴۷۹	-۱۶۹	۱A		
۰/۹۹۹	-۰/۰۱۶۹۹۰	۱۲۲۵۰	-۱۸۴۲	FC۱		
۰/۹۹۹	-۰/۰۱۴۲۰۰	۱۲۰۷۰	-۱۹۶۸	Trap۱		
۰/۹۹۹	-۰/۰۳۱۹۱۰	۶۸۴۰	۴۸۴۰	۱/۲A	نیم‌سینوسی	۴۰
۰/۹۹۹	-۰/۰۴۰۴۶۰	۲۹۷۲	۱۵	۱A		
۰/۹۹۹	-۰/۰۳۳۳۵۰	۶۶۰۲	-۱۸۲	FC۱		
۰/۹۹۹	-۰/۰۲۲۶۰۰	۸۰۸۳	-۳۳۸	Trap۱		
۰/۹۹۹	-۰/۰۳۰۲۲۰	۴۴۶۵	۱۱	۱/۲A	مربعی	۴۰
۰/۹۹۹	-۰/۰۳۸۷۶۰	۱۷۷۷	۷	۱A		
۰/۹۹۹	-۰/۰۳۲۸۸۰	۴۴۰۴	-۱۳۱	FC۱		
۰/۹۹۹	-۰/۰۲۲۷۶۰	۵۹۵۳	-۲۷۶	Trap۱		

جدول ۷. خلاصه اطلاعات حاصل از برازش مدل پیش‌بینی مدول برجهنگی با توجه به شکل پالس نیم‌سینوسی.

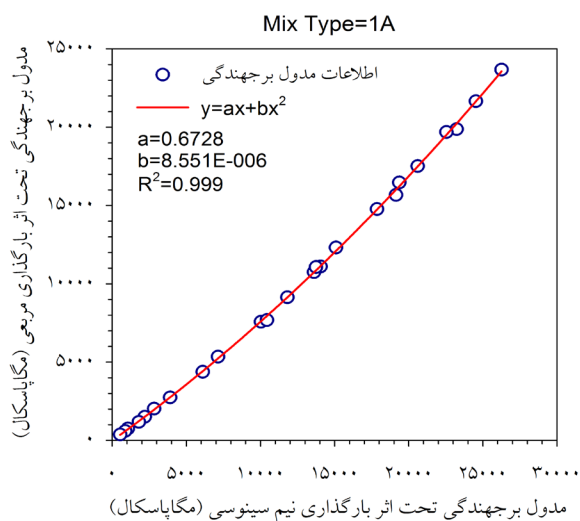
R^2	c_0	c_1	c_2	c_3	c_4	کد مخلوط آسفالتی
۰/۹۹۹	۵۰۸۷/۲۳	-۱۶۲/۵۸	-۵۴/۸۶	-۴۰۴۲/۳۲	۵۲۵۹۸/۰۹	۱A
۰/۹۹۶	۴۵۲۰/۴۱	-۱۴۷/۷۰	-۵۱/۹۷	-۳۹۵۸/۳۶	۴۳۶۸۹/۴۹	۱/۲A
۰/۹۹۹	۴۸۶۳/۵۹	-۱۸۱/۷۰	-۶۵/۳۷	-۳۰۴۴/۳۱	۲۷۸۸۳/۴۳	FC۱
۰/۹۹۹	۴۸۲۶/۰۵	-۱۷۸/۱۳	-۳۸/۵۱	-۳۴۸۸/۲۳	۲۲۹۷۵/۴۳	Trap۱

جدول ۸. خلاصه اطلاعات حاصل از برازش مدل پیش‌بینی مدول برجهنگی با توجه به شکل پالس مربعی.

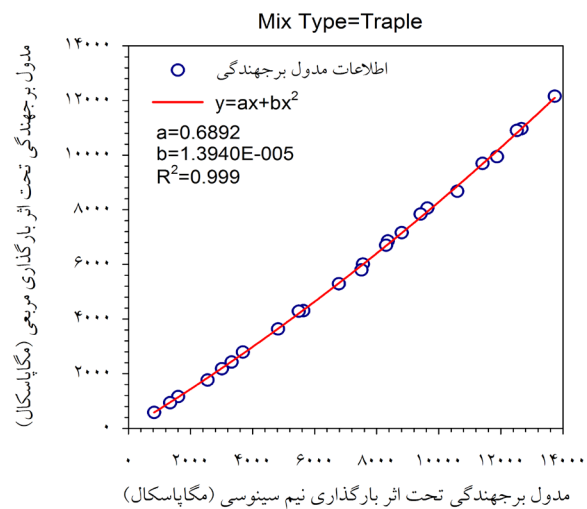
R^2	c_0	c_1	c_2	c_3	c_4	کد مخلوط آسفالتی
۰/۹۹۸	۴۸۷۸/۳۲	-۰/۶۲	-۱/۳۴	-۰/۰۲	۶۷۷۵۶/۰۵	۱A
۰/۹۹۶	۴۵۴۶/۸۳	-۱۳۲/۷۷	-۴۷/۴۵	-۴۵۴۲/۱۴	۶۳۶۳۰/۹۷	۱/۲A
۰/۹۹۹	۴۸۳۴/۱۷	-۱۷۰/۱۷	-۶۲/۳۰	-۳۴۴۷/۵۰	۳۰۴۳۹/۷۷	FC۱
۰/۹۹۹	۴۶۰۳/۱۳	-۱۵۹/۴۹	-۳۴/۲۳	-۳۷۲۳/۵۵	۲۵۱۸۰/۶۶	Trap۱



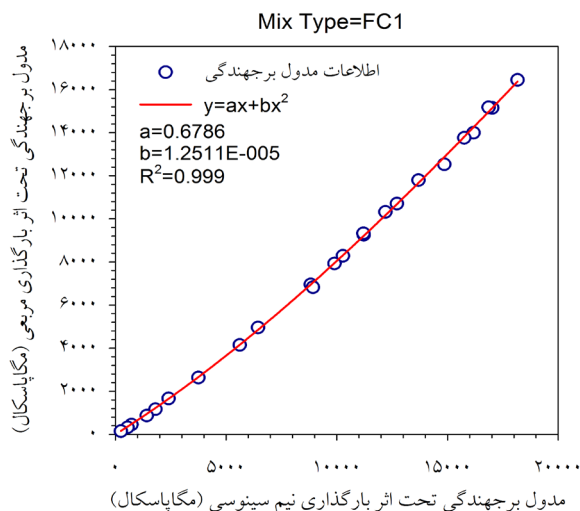
ب) مخلوط آسفالتی 1/2A



الف) مخلوط آسفالتی 1A



د) مخلوط آسفالتی Trap



ج) مخلوط آسفالتی FC1

شکل ۷. رابطه مدول برجهندگی تحت اثر شکل پالس نیم‌سینوسی و مربعی در دماها و زمان‌های بارگذاری مختلف.

دماها و فرکانس‌های بارگذاری مورد استفاده در این تحقیق بررسی شده است و در مورد سایر مخلوط‌های آسفالتی و در محدوده دماها و فرکانس‌های بارگذاری وسیع‌تر نیاز به بررسی بیشتری است.

۲. نسبت دوره استراحت به بارگذاری ۴ که توسط برخی از پژوهشگران پیشنهاد شده است، می‌تواند خطایی تا حدود ۸ درصد را در پیش‌بینی مدول برجهندگی تحت اثر بارگذاری مربعی در پی داشته باشد.

۹. خلاصه و نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق به طور خلاصه به صورت زیر قابل بیان است:

۱. مدل‌سازی رفتار ویسکوالاستیک خطی مصالح آسفالتی بر اساس مدل ویگوت حاصل از داده‌های مدول مختلط، امکان تعیین دقیق رفتار تنش- کرنش و مدول برجهندگی مصالح آسفالتی را در دامنه وسیعی از دماها و فرکانس‌ها فراهم می‌سازد. صحت مدل عددی ارایه شده به منظور پیش‌بینی مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی بر اساس مدول مختلط، در محدوده مخلوط‌های آسفالتی،

برجهندگی نظیر تحت اثر پالس مربعی را پیش‌بینی کرد.

۱۰. پی‌نوشت‌ها

- 1- Rest period
- 2- Loading waveform
- 3- Sinusoidal
- 4- Duration
- 5- Haversine
- 6- Relaxation modulus
- 7- Creep compliance
- 8- Complex modulus
- 9- Angular reduced frequency
- 10- Shift factor
- 11- Storage compliance
- 12- Vigot model
- 13- Glassy compliance
- 14- Loss compliance
- 15- Kelvin model
- 16- Prony series
- 17- Bultzman
- 18- Levenberg–Marquardt algorithm
- 19- Gauss–Newton algorithm
- 20- Weighted least square method

۱۱. مراجع

- AASHTO (1993) “Guide for design of pavement structures”, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC

۳. تأثیر دوره استراحت بر مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی با افزایش دمای مخلوط آسفالتی و اعمال بارگذاری مربعی افزایش می‌یابد. بنابراین در خصوص تعیین مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی در دماهای متوسط و بالا و تحت اثر بارگذاری مربعی باید از دوره‌های استراحت طولانی‌تر (حداقل برابر با ۹ برابر زمان بارگذاری برای دستیابی به خطای کمتر از ۳ درصد) استفاده شود. ۴. پیش بارگذاری با ۵۰ سیکل خطایی کمتر از ۱ درصد را نسبت به تعداد ۱۰۰ سیکل پیش بارگذاری باعث می‌شود. بنابراین تعداد ۵۰ سیکل پیش بارگذاری در محدوده تنش‌های ویسکوالاستیک خطی مصالح آسفالتی برای تعیین مدول برجهندگی این مصالح کفایت می‌کند.

۵. افزایش زمان بارگذاری سبب کاهش قابل ملاحظه مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی می‌شود. اثر زمان بارگذاری در دماهای بالا و متوسط و همچنین شکل پالس مربعی مشهودتر است. رابطه بین زمان بارگذاری و مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی با دقت بسیار زیاد با استفاده از یک رابطه توانی قابل بیان است.

۶. تأثیر همزمان درجه حرارت و زمان بارگذاری بر روی مدول برجهندگی با استفاده از یک رابطه رگرسیون غیر خطی قابل بیان است. با کالیبره کردن این رابطه در تعداد محدودی دما و زمان بارگذاری، می‌توان مدول برجهندگی را در سایر دماها و زمان‌های بارگذاری پیش‌بینی کرد.

۷. ارتباط بین مدول‌های برجهندگی یک مخلوط آسفالتی مشخص تحت اثر بارگذاری نیم‌سینوسی و مربعی در کلیه دماها و زمان‌های بارگذاری با استفاده از یک رابطه به صورت یک چندجمله‌ای درجه دوم با عرض از مبدأ صفر قابل بیان است. بنابراین می‌توان با انجام آزمایش مدول برجهندگی در چندین دما تحت اثر هر دو شکل پالس بارگذاری، رابطه را کالیبره و سپس تنها با اندازه‌گیری مدول برجهندگی تحت اثر بارگذاری نیم‌سینوسی، مقدار مدول

- Barksdale, R. D., Alba, J., Khosla, N., Kim, R., Lambe, P. and Rahman, M. (1997), "Laboratory determination of resilient modulus for flexible pavement design (NCHRP Project 1-28)", Transportation Research Board
- Brown, S. (1973) "Determination of Young's modulus for bituminous materials in pavement design", Highway Research Record, Vol. 431, No., pp. 38-49.
- Fairhurst, C., Kosla, N. and Kim, Y. (1990) "Resilient modulus testing of asphalt specimens in accordance with ASTM D4123-82", Mechanical Tests for Bituminous Mixes. Characterization, Design and Quality Control. Proceedings of the Fourth International Symposium held by RILEM.
- Ghaffarpour Jahromi, S. and Khodaii, A. (2009) "Comparing factors affecting resilient modulus in asphalt mixtures", Transaction A: Civil Engineering, Vol. 16, No. 5, pp. 367-375.
- Hu, X., Zhou, F., Hu, S. and Walubita, L.F. (2010) "Proposed loading waveforms and loading time equations for mechanistic-empirical pavement design and analysis", Journal of Transportation Engineering, Vol. 136, No. 6, pp. 518-527.
- AASHTO (1996) "AASHTO TP31-96: Standard test method for determining the resilient modulus of bituminous mixtures by indirect tension", American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC., United States.
- Al-Qadi, I.L., Elseifi, M.A., Yoo, P.J., Dessouky, S.H., Gibson, N., Harman, T., D'Angelo, J. and Petros, K. (2008a) "Accuracy of current complex modulus selection procedure from vehicular load pulse: NCHRP Project 1-37A Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide", Transportation Research Record, Vol. 2087, No., pp. 81-90.
- ASTM (2011) "ASTM D7369-11: Standard test method for determining the resilient modulus of bituminous mixtures by indirect tension test", ASTM International, Washington, DC, USA.
- AUSTRROADS. (2010) "Guide to pavement technology (APT-02/10) – Part 2: Pavement structural design", Austroads, Sydney, Australia.
- Barksdale, R. D. (1971) "Compressive stress pulse times in flexible pavements for use in dynamic testing", Highway Research Record, Vol. 345, No., pp. 32-44.

- McLean, D. B. (1974) "Permanent deformation characteristics of asphalt concrete", Ph.D dissertation, University of California, Institute of Transportation and Traffic Engineering.
- Monismith, C. (1989) "Resilient modulus testing: interpretation of laboratory results for design purposes", Workshop on Resilient Modulus Testing to be Held at Oregon State University, Corvallis, Oregon.
- NCHRP (2004) "Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures, Final Report for Project 1-37A", National Cooperative Research Program, Washington, DC.
- Oza, A., Vanderby, R. and Lakes, R. S. (2006) "Generalized solution for predicting relaxation from creep in soft tissue: application to ligament", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 48, No. 6, pp. 662-673.
- Park, S. and Schapery, R. (1999) "Methods of interconversion between linear viscoelastic material functions. Part I—a numerical method based on Prony series", International Journal of Solids and Structures, Vol. 36, No. 11, pp. 1653-1675.
- Huang, Y. H. (2004) "Pavement analysis and design", Prentice Hall, inc., USA, New Jersey.
- IRC (2012) "Guidelines for the design of flexible pavements", Indian Road Congress
- Kamal, M., Shazib, F. and Yasin, B. (2005) "Resilient behaviour of asphalt concrete under repeated loading & effects of temperature", Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 6, No., pp. 1329-1343.
- Kim, Y., Shah, K. and Khosla, N. (1992) "Influence of test parameters in SHRP P07 Procedure on resilient moduli of asphalt concrete field cores", Transportation Research Record, Vol. No. 1353, pp.
- Law, T. L. (2004) "Resilient modulus of asphalt concrete mixtures", M.S. thesis, University of Manitoba, Manitoba.
- Loulizi, A., Al-Qadi, I. L., Lahouar, S. and Freeman, T.E. (2002) "Measurement of vertical compressive stress pulse in flexible pavements: Representation for dynamic loading tests", Transportation Research Record, Vol. 1816, No., pp. 125-136.

- Sorvari, J. and Malinen, M. (2007) “Numerical interconversion between linear viscoelastic material functions with regularization”, International Journal of Solids and Structures, Vol. 44, No. 3, pp. 1291-1303.
- Theyse, H., Maina, J. and Kannemeyer, L. (2007) “Revision of the South African flexible pavement design method: mechanistic-empirical components”.
- Ullidtz, P. (2005) “Frequency / loading time”, Committee Notes.
- Yin, H., Solaimanian, M., Kumar, T. and Stoffels, S. (2007) “The effect of loading time on flexible pavement dynamic response: a finite element analysis”, Mechanics of Time-Dependent Materials, Vol. 11, No. 3, pp. 265-288.
- Zhou, F., Fernando, E. and Scullion, T. (2010) “Development, calibration, and validation of performance prediction models for the Texas ME flexible pavement design system”, Texas Transportation Institute, Texas A&M University.