

# تحلیل شبه-استاتیک روسازی‌های انعطاف‌پذیر بر اساس منحنی‌های مرجع مدول برجهندگی بتن آسفالتی

علیرضا غنی‌زاده، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

E-mail: ghanizadeh@sirjantech.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۳/۱۰/۰۵ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۴/۰۷

## چکیده

به منظور در نظر گرفتن تأثیر زمان بارگذاری بر روی سختی مخلوط‌های آسفالتی، در روش‌های اخیر طراحی مکانیستیک-تجربی روسازی، از جمله برنامه ارائه شده در راهنمای طراحی مکانیستیک-تجربی روسازی (MEPDG)، از تحلیل شبه استاتیک با فرض رفتار الاستیک بجای تحلیل دینامیک با فرض رفتار ویسکوالاستیک مصالح آسفالتی استفاده می‌شود. تحلیل شبه استاتیک معمولاً با توجه به منحنی مرجع مدول دینامیک انجام می‌شود. با این وجود تحقیقات گذشته نشان می‌دهند که مقدار مدول دینامیک در مقایسه با مدول برجهندگی به علت در نظر گرفتن زمان استراحت در تعیین مدول برجهندگی، همواره مقدار بزرگ‌تری است. به همین دلیل استفاده از مدول دینامیک در تحلیل و طراحی شبه استاتیک روسازی سبب کاهش قابلیت اطمینان می‌شود. در این مقاله روشی جهت تحلیل شبه استاتیک روسازی با تکیه بر منحنی مرجع مدول برجهندگی برای سه شکل بارگذاری مربعی، نیم‌سینوسی و مثلثی پیشنهاد شده است. در این روش منحنی مرجع مدول برجهندگی برای شکل‌های مختلف بارگذاری با استفاده از نتایج آزمایش مدول مختلط و بهره‌گیری از نظریه ویسکوالاستیک خطی به دست می‌آید. مقایسه عمر خستگی و شیار شدگی روسازی‌های آسفالتی حاصل از تحلیل شبه استاتیک نشان می‌دهد که در صورت استفاده از منحنی مرجع مدول دینامیک به جای منحنی مرجع مدول برجهندگی عمر روسازی بسیار بیشتر از مقدار واقعی آن تخمین زده می‌شود. همچنین مطالعات انجام شده نشان می‌دهند که برای تحلیل دقیق‌تر روسازی و در نظر گرفتن شکل پالس بارگذاری و زمان استراحت بر روی سختی لایه‌های آسفالتی، می‌توان از مقادیر مدول دینامیک استفاده نمود با این فرض که برای تعیین فرکانس بارگذاری از رابطه  $(f=1/2\pi t)$  به جای رابطه  $(f=1/t)$  استفاده شود. واژه‌های کلیدی: تحلیل شبه استاتیک، طراحی روسازی، روش مکانیستیک-تجربی، منحنی مرجع مدول برجهندگی

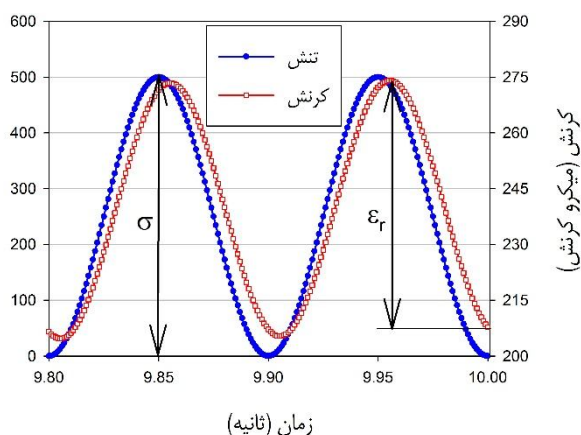
## ۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های به وجود آمده در خصوص مکانیک محاسباتی و مدل‌های رفتاری مصالح روسازی به همراه افزایش توان سخت‌افزارهای کامپیوتری، امکان محاسبه دقیق‌تر عکس‌العمل‌ها و پیش‌بینی دقیق‌تر عملکرد و عمر روسازی تحت شرایط مختلف جوی و بارگذاری‌های مختلف را فراهم ساخته است. در راستای این پیشرفت‌ها، بسیاری از کشورها و مؤسسات در حال حاضر از روش‌های طراحی مکانیستیک - تجربی<sup>۱</sup> برای طراحی روسازی‌های انعطاف‌پذیر استفاده می‌کنند [AUSTROADS, 2010; Theyse, Maina and Kannemeyer, 2007; IRC, 2012; Huang, 2004; NCHRP, 2004].

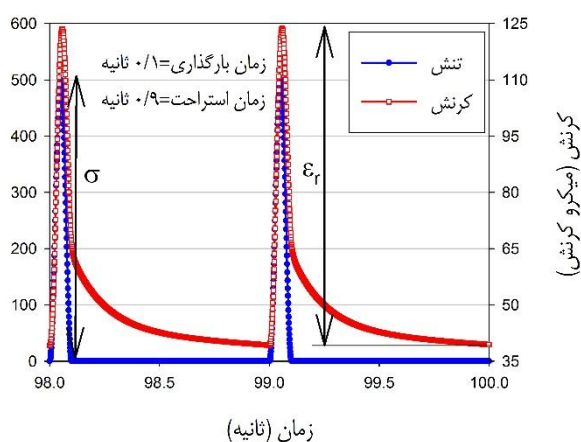
نخستین مرحله در طراحی روسازی به روش مکانیستیک - تجربی، تحلیل روسازی و تعیین عکس‌العمل‌های بحرانی آن تحت شرایط بارگذاری و آب و هوایی مختلف است. در بسیاری از روش‌های طراحی مکانیستیک - تجربی روسازی، تحلیل روسازی با فرض رفتار الاستیک خطی مصالح آسفالتی انجام می‌شود و تأثیر سرعت و همچنین پالس تنش حاصل از حرکت وسیله نقلیه بر روی رفتار مصالح آسفالتی و سختی آن‌ها در نظر گرفته نمی‌شود. با این وجود به منظور تحلیل دقیق روسازی باید با توجه به طبیعت ویسکوالاستیک مصالح آسفالتی، تأثیر دو عامل دما و تاریخچه بارگذاری بر سختی این مصالح مدنظر قرار گیرد. مناسب‌ترین روش به منظور در نظر گرفتن اثر زمان بارگذاری در تحلیل و طراحی روسازی، در نظر گرفتن مصالح آسفالتی به صورت مصالح ویسکوالاستیک و سپس استفاده از روش‌های تحلیل دینامیکی روسازی مانند روش اجزاء محدود<sup>۲</sup> و یا روش لایه محدود است<sup>۳</sup> [Siddharthan, Krishnamenon and Sebaaly, 2000; Hernandez, 2010]. از طرفی طراحی روسازی با استفاده از روش‌های مکانیستیک - تجربی مستلزم تعداد زیادی تحلیل به منظور لحاظ نمودن شرایط جوی، شرایط بارگذاری و همچنین بررسی مقاطع مختلف روسازی است. با توجه به این‌که تحلیل روسازی با استفاده از روش‌های تحلیل دینامیکی نیازمند زمان قابل توجهی است، استفاده از این روش‌ها به عنوان روش تحلیلی در طراحی مکانیستیک - تجربی روسازی با محدودیت‌هایی همراه است و در عمل قابل استفاده نیست.

در روش‌های جدیدتر طراحی مکانیستیک-تجربی روسازی، از جمله برنامه ارائه شده در راهنمای طراحی مکانیستیک-تجربی روسازی<sup>۴</sup> (MEPDG)، به منظور لحاظ نمودن تأثیر زمان بارگذاری بر روی سختی مخلوط‌های آسفالتی، از تحلیل شبه استاتیک<sup>۵</sup> با فرض رفتار الاستیک به جای تحلیل دینامیک با فرض رفتار ویسکوالاستیک مصالح آسفالتی استفاده می‌شود. به منظور تحلیل شبه استاتیک روسازی، ابتدا لایه آسفالتی به چندین زیر لایه تقسیم می‌شود و سپس با توجه به شرایط جوی، ساختار روسازی و همچنین مشخصات بارگذاری و سرعت حرکت بار، دما و فرکانس بارگذاری در مرکز هر یک از این زیر لایه‌ها محاسبه می‌شود و با توجه به منحنی مرجع<sup>۶</sup> مدول سختی مخلوط آسفالتی، مدول سختی هر یک از این زیر لایه‌ها تعیین می‌شود. با داشتن مدول سختی هر یک از زیر لایه‌ها<sup>۷</sup> می‌توان با بهره‌گیری از نظریه الاستیک چندلایه‌ای روسازی را تحلیل نمود. روش‌های مختلفی برای تعیین سختی مخلوط‌های آسفالتی پیشنهاد شده است [Witczak et al. 2000; Chehab, Quinn and Kim, 2000; AASHTO, 2003; Kim et al. 2004; Buttlar, 2004]. از بین این روش‌ها دو پارامتر مدول برجهنگی<sup>۸</sup> ( $M_r$ ) و مدول دینامیک<sup>۹</sup> ( $|E^*|$ ) بیشتر از سایر پارامترها در تحلیل و طراحی روسازی بکار می‌روند. مفهوم مدول برجهنگی در راهنمای طراحی روسازی اشتهو ۱۹۹۳ و همچنین آیین‌نامه طراحی روسازی ایران (نشریه ۲۳۴) بکار گرفته شده است [معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس‌جمهور، ۱۳۹۰، AASHTO 1993]. مفهوم مدول دینامیک در راهنمای طراحی روسازی به روش مکانیستیک-تجربی (MEPDG) توسط برنامه تحقیقات ملی راه‌ها<sup>۱۰</sup> (NCHRP) مورد استفاده قرار گرفته است [NCHRP, 2004]. پروتکل استاندارد آزمایش مدول دینامیک (AASHTO TP62) برخلاف آزمایش مدول برجهنگی (AASHTO TP31) زمان استراحت<sup>۱۱</sup> را بین پالس‌های بارگذاری در نظر نمی‌گیرد. در عمل بارگذاری روسازی به صورت پیوسته انجام نمی‌شود، بلکه بین هر دو تکرار بارگذاری متوالی یک زمان استراحت قابل تعریف است. این زمان استراحت از دو منبع اصلی ناشی می‌شود که عبارت‌اند از: (۱) زمان استراحت ناشی از عبور دو وسیله نقلیه مختلف که پشت سر یکدیگر حرکت می‌کنند و (۲) زمان استراحت ناشی از عبور دو گروه محوری مختلف یک

## تحلیل شبه-استاتیک روسازی‌های انعطاف‌پذیر بر اساس منحنی‌های مرجع مدول برجهندگی بتن آسفالتی



زمان (ثانیه)



زمان (ثانیه)

(ب)

(الف)

شکل ۱. مقایسه بین نحوه بارگذاری در آزمایش مدول برجهندگی و آزمایش مدول دینامیکی، (الف) مدول برجهندگی و (ب) مدول دینامیکی.

بنا بر نظر بسیاری از محققین، مدول دینامیکی نسبت به مدول برجهندگی پارامتر مناسب‌تری برای تحلیل و طراحی روسازی است، زیرا پارامتر مدول برجهندگی تابع شرایط بارگذاری است [Lee et al. 2012]، با این وجود به دلیل عدم در نظر گرفتن زمان استراحت در تعیین مدول مدول دینامیک این کمیت مقدار دقیق سختی مصالح تحت اثر بارگذاری‌های واقعی ترافیک را نشان نمی‌دهد. در این مقاله روشی جهت پیش‌بینی مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی تحت اثر بارگذاری‌های با شکل و فرکانس مختلف بر اساس اصل برهم‌گذاری زمان - دما و با فرض رفتار ویسکوالاستیک خطی مصالح آسفالتی بکاررفته است.

هدف اصلی این مقاله ارائه یک چارچوب به‌منظور تحلیل شبه استاتیک روسازی‌های آسفالتی بر اساس منحنی مدول

وسیله نقلیه. به‌عنوان مثال زمان استراحت بین عبور محور جلو و محور عقب یک اتوبوس. بنابراین استفاده از مدول دینامیکی بدون در نظر گرفتن زمان استراحت نمی‌تواند نتایج دقیقی را در طراحی به همراه داشته باشد. به همین دلیل برخی از محققین استفاده از پارامتر مدول برجهندگی را در طراحی روسازی مناسب‌تر می‌دانند [Zhou, Fernando and Scullion, 2010, Ghanizadeh and Fakhri, 2013, Fakhri and Ghanizadeh, 2014].

در شکل (۱) تأثیر زمان استراحت بر کرنش برگشت‌پذیر مخلوط‌های آسفالتی و همچنین بر مقادیر مدول برجهندگی و مدول دینامیک در سیکل ۱۱۰۰ بارگذاری نشان داده شده است. این شکل‌ها بر اساس شبیه‌سازی عددی تأثیر شکل پالس تنش بر کرنش یک نوع مخلوط آسفالتی بر پایه روش عددی معرفی شده در بخش دوم ترسیم شده‌اند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در مقدار تنش ثابت، مقدار کرنش نشان داده شده در شکل ( $\epsilon_r$ ) برای آزمایش مدول برجهندگی (با زمان استراحت) بیش از مقدار کرنش نشان داده شده برای آزمایش مدول دینامیک (بدون زمان استراحت) است؛ بنابراین مدول دینامیک در مجموع بزرگ‌تر از مدول برجهندگی است که در آزمایش به دست می‌آید و با توجه به اینکه در واقعیت دوره استراحت وجود دارد، بنابراین استفاده از مدول دینامیکی به‌جای مدول برجهندگی سبب می‌شود که مدول سختی آسفالت بیشتر از مقدار واقعی در نظر گرفته شود و همین مسئله باعث می‌شود تا پاسخ‌های روسازی مانند کرنش کششی تار پایین لایه آسفالت و کرنش فشاری روی خاک بستر کمتر از مقادیر واقعی محاسبه و در نتیجه عمر خستگی و شیارشدگی روسازی بیش از مقدار واقعی پیش‌بینی شود. همچنین در صورت استفاده از مفهوم حد تحمل خستگی<sup>۱۲</sup> برای طراحی روسازی‌های ماندگار<sup>۱۳</sup>، تخمین غیر صحیح کرنش کششی با استفاده از مدول دینامیک سبب غیر ماندگار شدن روسازی می‌شود؛ بنابراین دیده می‌شود که در طراحی روسازی به روش مکانیستیک - تجربی و با استفاده از روش نظریه الاستیک چندلایه‌ای باید مشخصات پالس پاسخ (شکل پالس پاسخ، زمان پاسخ، زمان استراحت یا فرکانس) به‌منظور تخمین دقیق سختی و مدول مصالح آسفالتی در نقاط مختلف روسازی مشخص باشد تا بتوان روسازی را به‌درستی تحلیل و عملکرد روسازی را در آینده پیش‌بینی نمود.

در دماها و فرکانس‌های مختلف و با بهره‌گیری از روش رگرسیون غیرخطی، می‌توان ضرایب مربوط به منحنی مرجع و ضریب انتقال را به دست آورد. با این وجود، مفهوم منحنی مرجع علاوه بر مدول دینامیک در خصوص سایر تعاریف سختی مخلوط‌های آسفالتی مانند مدول برجهندگی نیز قابل بکارگیری است. برای این منظور نیاز است تا مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی در دماها و فرکانس‌های مختلف و تحت اثر شکل پالس‌های مختلف بارگذاری (مربعی، مثلثی و نیم‌سینوسی) تعیین شود. سپس می‌توان با استفاده از اصل برهم گذاری زمان-دما و با استفاده از تابع سیگموئید، مطابق روابط (۱) الی (۳)، منحنی مرجع مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی را برای هر یک از شکل‌های پالس بارگذاری تعیین نمود. تعیین مقادیر مدول برجهندگی در دماها و فرکانس‌های مختلف بارگذاری به دو صورت امکان‌پذیر است که عبارت‌اند از:

۱- انجام آزمایش مدول برجهندگی در دماها و فرکانس‌های مختلف تحت اثر بارگذاری‌های با شکل پالس مربعی، نیم‌سینوسی و مثلثی. برای این منظور نیاز است تا مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی حداقل در چهار درجه حرارت و شش فرکانس مختلف و تحت اثر سه نوع شکل پالس بارگذاری (مجموعاً ۷۲ آزمایش مدول برجهندگی) تعیین شود. با توجه به تعداد زیاد آزمایش‌های مورد نیاز، این روش بسیار وقت‌گیر است و از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر نیست.

۲- استفاده از نتایج آزمایش مدول مختلط و تعیین مدول برجهندگی مصالح آسفالتی تحت اثر شکل‌های مختلف پالس بارگذاری در دماها و فرکانس‌های مختلف با استفاده از روش عددی و به کمک نظریه ویسکوآلاستیک خطی. برای این منظور روش‌های عددی قابل‌اطمینان با دقت مناسب توسط محققین مختلف پیشنهاد شده است [Lacroix, Khandan and Kim, 2007; Zhou, Fernando and Scullion, 2010]

در این تحقیق از روش پیشنهاد شده توسط ژو و همکاران (2010) برای تخمین مدول برجهندگی  $M_T$  با استفاده از نتایج آزمایش مدول مختلط با فرض رفتار ویسکوآلاستیک خطی استفاده شده است. بر اساس پیشنهاد ژو و همکاران، مراحل محاسبه تاریخچه کرنش مصالح ویسکوآلاستیک خطی با داشتن تاریخچه تنش و همچنین مدول مختلط مصالح به شرح زیر است [Zhou, Fernando and Scullion, 2010]:

برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی است. این روش امکان در نظر گرفتن زمان و شکل پالس بارگذاری و همچنین دمای مخلوط آسفالتی را در عمق‌های مختلف لایه آسفالتی با استفاده از مفهوم منحنی مرجع مدول برجهندگی فراهم می‌سازد. روش فوق علاوه بر در نظر گرفتن تأثیر سرعت حرکت وسایل نقلیه، امکان در نظر گرفتن تأثیر زمان استراحت بین عبور دو محور متوالی را بر روی سختی مخلوط‌های آسفالتی فراهم می‌سازد. پس از ارائه روش پیشنهادی جهت تحلیل شبه استاتیک، عمر خستگی و عمر شیارشدگی مقاطع مختلف روسازی بر پایه روش پیشنهاد شده در این مقاله و روش‌های موجود بر اساس منحنی مرجع مدول دینامیک محاسبه و نتایج با یکدیگر مقایسه شده است.

## ۲. توسعه نمودار مرجع مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی

رفتار مصالح ویسکوآلاستیک خطی، مانند مخلوط‌های آسفالتی، با استفاده از منحنی مرجع سختی این مصالح که نشان‌دهنده سختی مصالح در دامنه وسیعی از فرکانس‌ها و دماهای مختلف است، نشان داده می‌شود. منحنی مرجع مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از اصل برهم گذاری زمان-دما ساخته می‌شود و با استفاده از یک تابع سیگموئید غیرخطی<sup>۱۴</sup> مطابق رابطه (۱) قابل بیان است.

$$\log(S) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \log f_r}} \quad (1)$$

که در این رابطه  $S$  مدول سختی،  $f_r$  فرکانس تبدیل شده<sup>۱۵</sup>،  $\delta$  حداقل مقدار  $S$ ،  $\alpha + \delta$  حداکثر مقدار  $S$  و  $\beta$  و  $\gamma$  پارامترهای هستند که شکل تابع سیگموئید را تعیین می‌کنند.

فرکانس تبدیل شده با استفاده از رابطه (۲) تعیین می‌شود:

$$f_r = f \times \alpha_T \quad (2)$$

که در این رابطه،  $f$  فرکانس برحسب هر تریز و  $\alpha_T$  ضریب انتقال<sup>۱۶</sup> به صورت تابعی از درجه حرارت  $T$  است که به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود.

$$\log \alpha_T = aT^2 + bT + c \quad (3)$$

که در این رابطه، پارامترهای  $a$ ،  $b$  و  $c$  ثوابت رگرسیون هستند. در برنامه MEPDG مفهوم منحنی مرجع در خصوص مدول دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی بکار رفته است [NCHRP, 2004]. به این صورت که با اندازه‌گیری مقادیر مدول دینامیک

## تحلیل شبه-استاتیک روسازی‌های انعطاف‌پذیر بر اساس منحنی‌های مرجع مدول برجهندگی بتن آسفالتی

از طرفی، وادادگی خزشی به‌سادگی با استفاده از مدل ویگوت<sup>۲۰</sup> که مرکب از یک فنر و تعدادی المان کلویین به‌صورت سری است، قابل‌نمایش است و به‌صورت رابطه (۷) نوشته می‌شود.

$$D(t) = D_0 + \sum_{i=1}^{17} D_i \left[ 1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right] \quad (7)$$

که در این رابطه  $D_0$  وادادگی شیشه‌ای<sup>۲۱</sup>؛  $D_i$  وادادگی اُفت<sup>۲۲</sup> و  $\tau_i$  زمان تأخیر است. در این تحقیق از ۱۷ المان کلویین<sup>۳۳</sup> استفاده شده است. سری نشان داده‌شده در معادله (۷) به سری پرونی<sup>۳۴</sup> معروف است. به‌صورت مشابه وادادگی ذخیره‌شده  $D'$  در دامنه فرکانس می‌تواند به‌صورت سری پرونی و به‌صورت زیر نوشته شود [Park and Schapery, 1999]:

$$D'(\omega) = D_0 + \sum_{i=1}^{17} \frac{D_i}{\omega^2 \tau_i^2 + 1} \quad (8)$$

مرحله ۴: فرض نمودن تاریخچه بارگذاری شامل شکل بارگذاری، زمان بارگذاری و دوره استراحت و سپس پیش‌بینی تاریخچه کرنش‌ها با توجه به اصل بر هم‌گذاری بولتزمن<sup>۳۵</sup> با استفاده از انتگرال کانولشن مطابق رابطه (۹):

$$\varepsilon(t) = \int_0^t D(t-\tau) \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} d\tau \quad (9)$$

که در این رابطه  $\sigma$  تاریخچه تنش،  $\varepsilon(t)$  کرنش در زمان  $t$ ،  $D$  وادادگی خزشی و  $\tau$  متغیر انتگرال‌گیری است. در صورت انتگرال‌گیری مستقیم با استفاده از تابع کانولوشن معرفی شده در رابطه (۹)، کل تاریخچه کرنش محاسبه می‌شود. با توجه به کل تاریخچه کرنش، فرم کانولوشن به صورت یک فرم برگشتی دو مرحله‌ای به شکل زیر قابل تبدیل است [Simo and Hoghes, 2000]:

مرحله ۵: تعیین مقدار  $M_r$  نظیر بر اساس نتایج مرحله ۴ با استفاده از رابطه (۱۱):

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

مرحله ۲: توسعه منحنی مرجع مربوط به  $|E^*|$  و  $E' = |E^*| \cos \phi$  با توجه به فرکانس زاویه‌ای تبدیل‌شده<sup>۳۶</sup>. باید توجه داشت که  $\omega = 2\pi f$  است که در این رابطه  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای و  $t=1/f$  زمان تناوب است. نمودار مرجع با استفاده از رابطه (۱) قابل تعریف است.

$$\log|E^*| \text{ or } \log E' = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \log \omega_T}} \quad (1)$$

که در این رابطه  $\delta$ ،  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\gamma$  پارامترهای مصالح؛  $\omega_T = \omega \times \alpha_T$  فرکانس زاویه‌ای تبدیل‌شده و  $\alpha_T$  ضریب انتقال<sup>۳۸</sup> به‌صورت تابعی از درجه حرارت  $T$  است که به‌صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود.

$$\log \alpha_T = aT^2 + bT + c \quad (2)$$

که در این رابطه پارامترهای  $a$ ،  $b$  و  $c$  ثوابت رگرسیون هستند.

مرحله ۳: تبدیل مدول مختلط  $E^*$  در دامنه فرکانس به وادادگی خزشی  $D(t)$  در دامنه زمان با استفاده از وادادگی ذخیره‌شده<sup>۳۹</sup>  $D'(\omega)$  در دامنه فرکانس. رابطه بین مدول مختلط  $E^*$  و وادادگی خزشی مختلط  $D^*$  به‌صورت معادلات (۳)، (۴) و (۵) قابل بیان است.

$$E^*(\omega)D^*(\omega) = 1 \quad (3)$$

$$E^*(\omega) = E'(\omega) + iE''(\omega) \quad (4)$$

$$D^*(\omega) = D'(\omega) + iD''(\omega) \quad (5)$$

با استفاده از معادلات (۳)، (۴) و (۵) قسمت حقیقی  $D'(\omega)$  می‌تواند به‌صورت زیر نوشته شود:

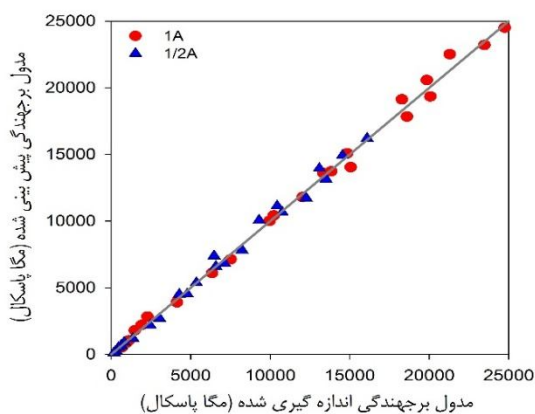
$$D'(\omega) = \frac{E'(\omega)}{E'(\omega)^2 + E''(\omega)^2} = \frac{E'(\omega)}{E^*(\omega)^2} \quad (6)$$

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

$$\varepsilon(t) = D_0 \sigma(t) + \sum_{i=1}^m D_i \left( \sigma(t) - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_i}} \times \sigma(t - \Delta t) + e^{-\frac{\Delta t}{\tau_i}} \times h^i(t - \Delta t) - e^{-\frac{\Delta t}{2\tau_i}} \times (\sigma(t) - \sigma(t - \Delta t)) \right) \quad (10)$$

در چهار دما و شش فرکانس (زمان بارگذاری) مختلف مطابق با مقادیر نظیر در آزمایش مدول دینامیک شبیه سازی و تعیین شد. مطالعات انجام شده نشان می دهند که نسبت های زمان استراحت به زمان بارگذاری بیش از ۹ تأثیر چندانی بر روی مدول برجهندگی مخلوط های آسفالتی ندارد [Monismith, 1989; Ghanizadeh and Fakhri, 2013; Fakhri and Ghanizadeh, 2014] به همین دلیل مدول برجهندگی با فرض نسبت دوره استراحت به زمان بارگذاری برابر با ۹ محاسبه گردید. به منظور تعیین مدول برجهندگی، ابتدا ۱۰۰ سیکل بارگذاری منطبق بر دما، زمان بارگذاری و زمان استراحت مورد نظر انجام شد و پس از تعیین کرنش برگشت پذیر در سیکل ۱۰۰م بارگذاری، مقدار مدول برجهندگی محاسبه شد

شکل (۲) مقادیر اندازه گیری شده مدول برجهندگی در مقابل مقادیر پیش بینی شده مدول برجهندگی با استفاده از روش عددی را برای هر یک از دو مخلوط آسفالتی نشان می دهد. همان گونه که ملاحظه می شود، مقادیر مدول برجهندگی حاصل از پیش بینی با استفاده از روش عددی بسیار نزدیک به مقادیر اندازه گیری شده مدول برجهندگی در آزمایشگاه هستند و بنابراین می توان از روش ذکر شده به منظور تعیین مدول برجهندگی تحت شرایط مختلف بارگذاری و دمایی با دقت بالا استفاده نمود. مقدار ضریب همبستگی بین مقادیر محاسبه شده و اندازه گیری شده مدول برجهندگی برای مخلوط آسفالتی 1A برابر با ۰/۹۹۵ و برای مخلوط آسفالتی 1/2A برابر با ۰/۹۹۳ است.



شکل ۲. مقایسه مدول برجهندگی اندازه گیری شده و پیش بینی شده با استفاده از نظریه ویسکوالاستیک خطی.

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (11)$$

که در آن  $M_r$  مدول برجهندگی،  $\sigma_d$  تنش انحرافی و  $\epsilon_r$  کرنش برگشت پذیر است. در آزمایش فشاری محدود نشده، تنش انحرافی برابر با تنش محوری است.

به منظور تعیین مدول برجهندگی مخلوط های آسفالتی با استفاده از مدول مختلط بر اساس روش پیشنهادی در فوق، 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 فرکانس های مختلف بارگذاری و با بهره گیری از فرآیند ذکر شده، امکان تعیین مدول برجهندگی تحت اثر بارگذاری مشخصی (با توجه به شکل، مدت زمان بارگذاری، مدت زمان استراحت و تعداد سیکل بارگذاری) را فراهم می سازد. این برنامه امکان توسعه نمودار مرجع مدول دینامیک و مدول استراحت و همچنین امکان برازش سری پرونی به داده های حاصل از نرمی خزشی را با استفاده از الگوریتم لونبرگ - مارکوادت<sup>۲۶</sup> فراهم می سازد. الگوریتم لونبرگ - مارکوادت نسبت به الگوریتم گوس - نیوتن<sup>۲۷</sup> 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 می سازد.

در این تحقیق، جهت اعتبار سنجی برنامه از نتایج آزمایش های مدول مختلط و مدول برجهندگی انجام شده بر روی دو نوع مخلوط آسفالتی مختلف استفاده شده است. مشخصات کلی دو مخلوط آسفالتی مورد استفاده در این تحقیق که برگرفته از منبع [Zhou, Fernando and Scullion, 2010] است، در جدول (۱) داده شده است. مقادیر مدول دینامیکی، زاویه فاز و مدول برجهندگی (شکل بارگذاری نیم سینوسی) اندازه گیری شده توسط ژو و همکاران (۲۰۱۰) در چهار دما و شش فرکانس مختلف در جدول (۲) داده شده است. در این مقاله برای تعیین مدول برجهندگی با توجه شکل های بارگذاری مربعی و مثلثی و در دامنه وسیعتری از دماها و فرکانس های بارگذاری از برنامه توسعه داده شده استفاده شده است.

به منظور اعتبار سنجی برنامه توسعه داده شده، مدول برجهندگی هر یک از مخلوط های آسفالتی تحت اثر بارگذاری نیم سینوسی

تحلیل شبه- استاتیک روسازی‌های انعطاف‌پذیر بر اساس منحنی‌های مرجع مدول برجهندگی بتن آسفالتی

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

کد مخلوط	بزرگ‌ترین اندازه اسمی مصالح (mm)	نوع سنگ‌دانه	نوع قیر	درصد قیر	درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی
۱/۲A	۱۲/۵	شن شکسته	۷۰-۲۲	۶/۰	۶/۲
۱A	۲۵	شن شکسته + بازالت	۷۶-۲۲	۴/۹	۴/۹۰

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

۱/۲A				۱A				فرکانس (هرتز)
Φ (°)	Mr (MPa)	E* (MPa)	دما (°C)	Φ (°)	Mr (MPa)	E* (MPa)	دما (°C)	
۶/۴	۱۶۱۰۰	۱۷۳۰۳	۱/۴	۳/۴	۲۵۴۶۲	۲۹۲۴۳	-۱/۰	۲۵
۸/۵	۱۴۵۵۰	۱۵۵۳۵	۱/۴	۶/۰	۲۴۷۴۳	۲۷۰۳۶	-۱/۰	۱۰
۱۰/۸	۱۳۰۸۶	۱۴۳۳۷	۱/۴	۷/۷	۲۳۴۷۴	۲۵۵۷۷	-۱/۰	۵
۱۴/۰	۱۰۴۲۷	۱۱۳۴۴	۱/۴	۹/۹	۲۰۰۷۵	۲۲۲۱۱	-۱/۰	۱
۱۵/۲	۹۲۹۸	۱۰۱۴۴	۱/۴	۱۰/۶	۱۸۵۹۸	۲۰۶۲۸	-۱/۰	۰/۵
۱۸/۸	۶۴۶۳	۷۶۷۲	۱/۴	۱۲/۹	۱۵۰۵۸	۱۷۰۰۶	-۱/۰	۰/۱
۷/۲	۱۳۵۰۱	۱۴۵۸۸	۴/۳	۵/۷	۲۱۲۹۱	۲۴۲۵۸	۴/۱	۲۵
۹/۹	۱۲۲۵۲	۱۲۸۲۷	۴/۳	۹/۰	۱۹۸۴۳	۲۲۰۰۰	۴/۱	۱۰
۱۲/۴	۱۰۷۵۶	۱۱۴۲۸	۴/۳	۱۰/۷	۱۸۲۷۹	۲۰۱۵۱	۴/۱	۵
۱۶/۴	۸۲۱۹	۹۰۶۰	۴/۳	۱۳/۵	۱۴۸۳۷	۱۶۷۵۴	۴/۱	۱
۱۸/۱	۷۱۱۸	۸۰۷۴	۴/۳	۱۵/۴	۱۳۳۳۴	۱۵۳۰۲	۴/۱	۰/۵
۲۲/۱	۴۷۷۰	۵۷۷۴	۴/۳	۱۸/۱	۹۹۵۴	۱۱۹۱۸	۴/۱	۰/۱
۱۶/۴	۶۵۷۲	۸۴۷۷	۱۵/۰	۱۱/۹	۱۳۸۲۹	۱۶۷۳۱	۱۵/۳	۲۵
۱۹/۰	۵۳۴۳	۶۷۷۳	۱۵/۰	۱۴/۲	۱۲۰۲۶	۱۴۰۷۹	۱۵/۳	۱۰
۲۲/۳	۴۲۷۰	۵۷۴۸	۱۵/۰	۱۷/۹	۱۰۲۰۹	۱۲۲۶۶	۱۵/۳	۵
۲۷/۶	۳۰۳۲	۳۸۲۰	۱۵/۰	۲۱/۴	۷۴۹۲	۹۰۱۷	۱۵/۳	۱
۳۰/۶	۲۴۳۰	۳۱۲۶	۱۵/۰	۲۳/۴	۶۳۳۳	۷۷۴۶	۱۵/۳	۰/۵
۳۳/۴	۱۳۵۰	۱۸۰۲	۱۵/۰	۲۵/۸	۴۱۱۱	۵۱۳۴	۱۵/۳	۰/۱
۲۵/۶	۸۱۱	۱۶۴۲	۳۶/۷	۲۱/۱	۲۲۶۰	۴۱۵۵	۳۶/۷	۲۵
۲۷/۷	۶۱۲	۱۰۲۴	۳۶/۷	۲۵/۱	۱۸۸۰	۲۹۰۸	۳۶/۷	۱۰
۲۷/۵	۴۴۴	۷۱۳	۳۶/۷	۲۷/۸	۱۴۶۱	۲۳۲۹	۳۶/۷	۵
۲۹/۹	۳۰۶	۳۹۰	۳۶/۷	۲۶/۶	۱۰۹۵	۱۴۲۱	۳۶/۷	۱
۲۹/۹	۲۴۸	۲۹۳	۳۶/۷	۲۷/۸	۹۲۸	۱۱۱۱	۳۶/۷	۰/۵
۲۴/۰	۱۶۱	۱۷۹	۳۶/۷	۲۵/۰	۶۴۶	۷۳۶	۳۶/۷	۰/۱

رگرسیون غیرخطی، تابع سیگموئید به داده‌های مدول برجهندگی در هر حالت برازش داده شد و ضرایب مربوط به منحنی مرجع برای دو نوع مخلوط آسفالتی محاسبه شد. باید توجه داشت که در منحنی‌های مرجع برازش داده‌شده، فرکانس بارگذاری در آزمایش مدول برجهندگی به صورت عکس زمان بارگذاری برحسب ثانیه در نظر گرفته شده است. ضریب رگرسیون حاصل از برازش منحنی سیگموئید به داده‌های مدول برجهندگی حاصل از شکل پالس‌های مختلف (مربعی،

به منظور تعیین مقادیر مدول برجهندگی تحت اثر شکل‌های مختلف بارگذاری در دامنه وسیعی از دما و فرکانس، مدول برجهندگی هر یک از مخلوط‌های آسفالتی در پنج دما (۲۰، ۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد) و در نه فرکانس بارگذاری مختلف (۱۰۰، ۲۰، ۱۰، ۵، ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲ و ۰/۱ هرتز) با توجه به سه شکل مختلف بارگذاری نیم‌سینوسی، مربعی و مثلثی با استفاده از روش عددی تعیین شد. سپس با بهره‌گیری از

## علیرضا غنی زاده

می یابد و با در نظر گرفتن زمان استراحت بین پالس های متوالی (مدول برجهدگی)، سختی مخلوط کاهش می یابد. کاهش سختی مخلوط آسفالتی در اثر اعمال دوره های استراحت، وابسته به شکل بارگذاری است؛ به طوری که شکل پالس مربعی نسبت به شکل پالس های مثلثی و نیم سینوسی سبب کاهش بیشتر مدول برجهدگی خواهد شد.

نیم سینوسی و مثلثی) بیش از ۰/۹۹۹ است. ضرایب مربوط به منحنی مرجع مدول دینامیک و مدول برجهدگی در جدول (۳) داده شده است.

برای مقایسه، منحنی مرجع حاصل از داده های مدول دینامیک و مدول برجهدگی در شکل (۳) نشان داده شده است. شکل (۴) نشان می دهد که سختی مخلوط های آسفالتی تحت اثر بارگذاری بدون در نظر گرفتن زمان استراحت (مدول دینامیک) افزایش

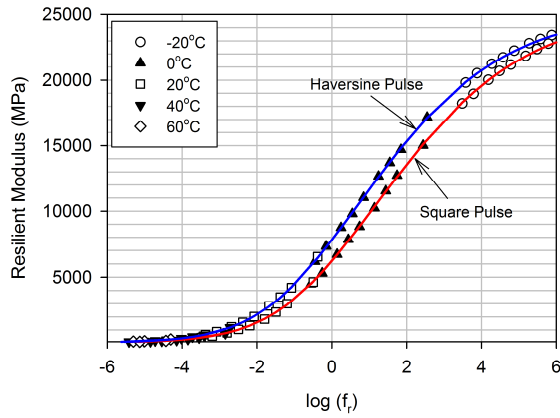
جدول ۳. پارامترهای منحنی مرجع مربوط به مدول دینامیکی و مدول برجهدگی.

مخلوط آسفالتی	$\delta$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	a	b	c
مدول دینامیک (E*)							
۱A	۱/۸۱۴۰۲	۲/۷۷۳۱۹	-۱/۹۸۱۵۲	-۰/۴۵۵۵۴	۰/۰۰۰۴۷	-۰/۱۵۵۱۵	۰/۵۷۵۸۳
۱/۲A	۱/۱۳۲۷۸	۳/۲۵۹۵۰	-۱/۹۴۲۲۹	-۰/۴۹۳۳۰	۰/۰۰۱۰۵	-۰/۱۷۴۹۷	۰/۶۸۴۴۰
مدول برجهدگی (شکل پالس نیم سینوسی)							
۱A	۱/۷۲۰۸۷	۲/۸۷۵۱۸	-۱/۷۹۸۴۵	-۰/۴۳۶۶۳	۰/۰۰۰۴۴	-۰/۱۵۶۰۳	۰/۵۹۷۰۳
۱/۲A	۱/۰۲۵۶۲	۳/۳۸۰۱۶	-۱/۷۲۰۴۷	-۰/۴۷۳۲۹	۰/۰۰۰۹۵	-۰/۱۷۳۹۳	۰/۷۱۹۰۶
مدول برجهدگی (شکل پالس مثلثی)							
۱A	۱/۷۳۱۱۶	۲/۸۶۲۸۱	-۱/۸۳۳۵۲	-۰/۴۳۷۰۴	۰/۰۰۰۴۴	-۰/۱۵۶۱۴	۰/۶۱۱۷۳
۱/۲A	۱/۰۵۲۴۵	۳/۳۴۹۸۹	-۱/۸۰۲۶۹	-۰/۴۷۷۰۳	۰/۰۰۰۹۵	-۰/۱۷۴۲۰	۰/۶۳۶۳۴
مدول برجهدگی (شکل پالس مربعی)							
۱A	۱/۶۷۲۳۸	۲/۹۲۵۱۵	-۱/۵۸۷۰۱	-۰/۴۲۶۳۲	۰/۰۰۰۴۳	-۰/۱۵۶۰۶	۰/۵۴۳۸۸
۱/۲A	۰/۹۴۳۲۳	۳/۴۶۴۱۶	-۱/۵۳۶۱۹	-۰/۴۵۷۴۵	۰/۰۰۰۹۵	-۰/۱۷۴۵۳	۰/۶۱۲۵۲

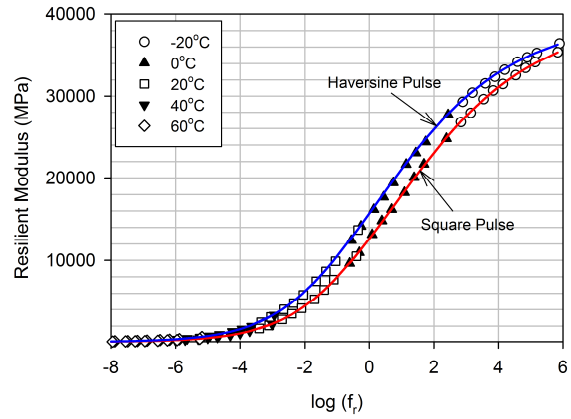
با انجام آزمایش مدول دینامیک در دماها و فرکانس های مختلف بارگذاری می توان، ضریب انتقال را تعیین نمود و در عمل نیازی به اندازه گیری مدول برجهدگی در دامنه وسیعی از دماها و فرکانس ها نیست و می توان ضریب انتقال را در هنگام ساختن نمودار مرجع مدول برجهدگی مطابق با ضریب انتقال حاصل از نمودار مرجع مدول دینامیک در نظر گرفت.

ضریب انتقال منحنی مرجع مربوط به دو مخلوط آسفالتی در دماهای مختلف برای مدول دینامیک و مدول برجهدگی در جدول (۴) داده شده است. همان گونه که دیده می شود، ضریب انتقال در دماهای مختلف برای مدول دینامیک و مدول برجهدگی با شکل های مختلف پالس بارگذاری بسیار نزدیک به یکدیگر است. نکته اخیر بسیار حائز اهمیت است، زیرا تنها



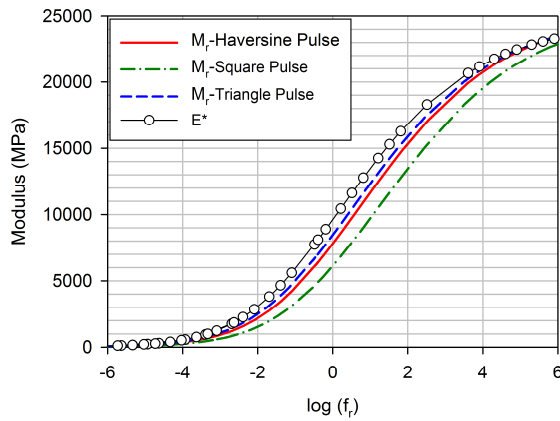


ب) مخلوط آسفالتی ۱/۲A

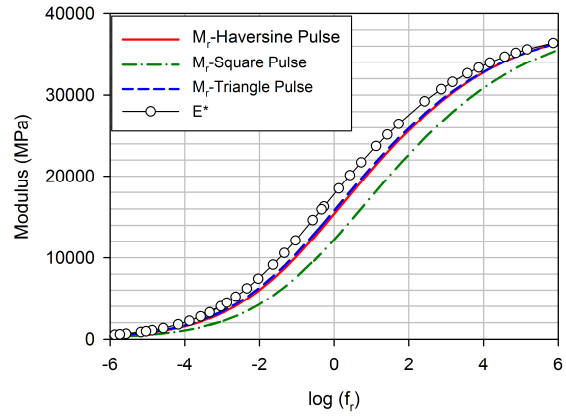


الف) مخلوط آسفالتی ۱A

شکل ۳. خوبی برازش منحنی سیگموئید به داده‌های مدول برجهندگی برای دو شکل بارگذاری نیم سینوسی و مربعی.



ب) مخلوط آسفالتی ۱/۲A



الف) مخلوط آسفالتی ۱A

شکل ۴. مقایسه منحنی سیگموئید برازش داده شده به داده‌های مدول دینامیک و داده‌های مدول برجهندگی.

جدول ۴. ضریب انتقال  $\alpha_T$  در دماهای مختلف برای منحنی مرجع مدول دینامیک و مدول برجهندگی.

۱/۲A				۱A			مخلوط آسفالتی	
$M_f$ (مربعی)	$M_f$ (مثلثی)	$M_f$ (نیم سینوسی)	$E^*$	$M_f$ (مربعی)	$M_f$ (مثلثی)	$M_f$ (نیم سینوسی)	$E^*$	درجه حرارت (°C)
۴/۴۸	۴/۵۰	۴/۵۸	۴/۶۰	۳/۸۴	۳/۹۱	۳/۸۹	۳/۸۷	-۲۰/۰۰
۰/۶۱	۰/۶۴	۰/۷۲	۰/۶۸	۰/۵۴	۰/۶۱	۰/۶۰	۰/۵۸	۰/۰۰
-۲/۵۰	-۲/۴۷	-۲/۳۸	-۲/۴۰	-۲/۴۰	-۲/۳۴	-۲/۳۵	-۲/۳۴	۲۰/۰۰
-۴/۸۵	-۴/۸۱	-۴/۷۲	-۴/۶۴	-۵/۰۰	-۴/۹۳	-۴/۹۴	-۴/۸۸	۴۰/۰۰
-۶/۴۴	-۶/۴۰	-۶/۳۱	-۶/۰۴	-۷/۲۵	-۷/۱۸	-۷/۱۸	-۷/۰۴	۶۰/۰۰

### ۳. تحلیل شبه‌استاتیک روسازی

در روش‌های فعلی تحلیل شبه استاتیک روسازی، مانند برنامه MEPDG، ابتدا لایه آسفالتی به چندین زیرلایه تقسیم و سپس با توجه به شرایط جوی، ساختار روسازی و همچنین مشخصات بارگذاری و سرعت حرکت بار، دما و فرکانس بارگذاری در مرکز هر یک از این زیرلایه‌ها محاسبه می‌شود. سپس با توجه به منحنی مرجع مدول دینامیک، مدول سختی هر یک از این زیرلایه‌ها با توجه به دما و فرکانس بارگذاری تعیین می‌شود. با معلوم بودن مدول سختی هر یک از زیر لایه‌ها، می‌توان با بهره‌گیری از نظریه الاستیک چندلایه‌ای روسازی را تحلیل نمود و پاسخ‌ها را به دست آورد. در برنامه MEPDG فرکانس بارگذاری بر اساس طول پالس تنش قائم ایجادشده در عمق موردنظر که با استفاده از روش ضخامت هم‌ارز آدمارک محاسبه می‌شود، تعیین می‌گردد. با توجه به اینکه کلیه لایه‌ها در این حالت دارای مدول یکسان می‌باشند، این زاویه در سرتاسر عمق روسازی ثابت و برابر با ۴۵ درجه در نظر گرفته می‌شود [NCHRP, 2004]. به منظور محاسبه زمان پالس بارگذاری نیاز است تا ابتدا عمق مؤثر نقطه موردنظر (مرکز هر زیرلایه) با استفاده از رابطه زیر تعیین شود.

(۱۱)

$$Z_{\text{eff}} = \sum_{i=1}^{n-1} \left( h_i \sqrt[3]{\frac{E_i}{E_{SG}}} \right) + h_n \sqrt[3]{\frac{E_n}{E_{SG}}}$$

که در این رابطه  $E_i$  مدول سختی لایه  $i$ ام،  $h_i$  ضخامت لایه  $i$ ام،  $E_{SG}$  = مدول سختی خاک بستر و  $h_n$  ضخامت لایه‌ای است که نقطه موردنظر در آن قرار دارد. برای مثال اگر عمق مؤثر برای وسط لایه سوم روسازی مدنظر باشد،  $n=3$  و مقدار  $h_n = h_3/2$  خواهد بود.

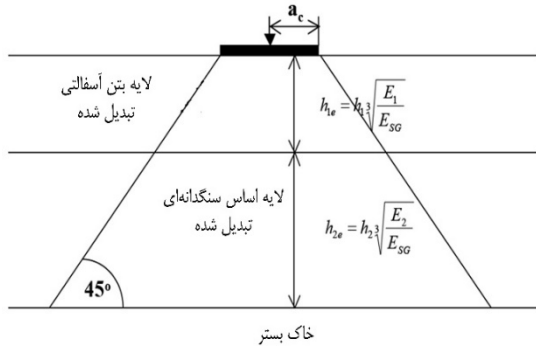
با توجه به شکل (۵) طول مؤثر در حالت محور ساده از رابطه (۱۲) قابل محاسبه است.

$$L_{\text{eff}} = 2(a_c + Z_{\text{eff}}) \quad (12)$$

با داشتن سرعت حرکت وسیله نقلیه و همچنین طول مؤثر می‌توان زمان مؤثر بارگذاری را در عمق مؤثر از رابطه (۱۳) به دست آورد:

$$t = \frac{L_{\text{eff}}}{27.78V} \quad (13)$$

که در این رابطه  $t$  برابر با زمان بارگذاری برحسب ثانیه و  $V$  برابر با سرعت حرکت بار برحسب کیلومتر بر ساعت است.



شکل ۵. محاسبه طول مؤثر برای محور ساده (NCHRP, 2004)

علاوه بر روش مورد استفاده در برنامه MEPDG، معادلات دیگری نیز به منظور تعیین مدت زمان اعمال پالس بارگذاری در عمق‌های مختلف لایه آسفالتی ارائه شده است. کلیه روش‌های ارائه شده با فرض یک شکل پالس مشخص بارگذاری، زمان اعمال پالس را محاسبه می‌کنند. به عنوان مثال معادله ارائه شده توسط مک لین<sup>۲۸</sup> با فرض شکل پالس مربعی و معادله ارائه شده توسط بارکسدیل<sup>۲۹</sup> با فرض شکل پالس مثلثی و نیم‌سینوسی مدت زمان بارگذاری را محاسبه می‌کنند [McLean, 1988; Barksdale, 1990]. هیو<sup>۳۰</sup> و همکاران با توجه به تحلیل الاستیک لایه‌ای ۱۰۰۰ مقطع روسازی با ضخامت‌ها و نسبت مدول‌های برجستگی متفاوت و تحت بارگذاری محور استاندارد منفرد، روابطی جهت تعیین شکل و مدت زمان پالس تنش قائم در عمق‌های مختلف لایه آسفالتی ارائه نمودند که این روابط با استفاده از مقاطع روسازی آزمایش تمام‌مقیاس راه هوشمند ویرجینیا<sup>۳۱</sup> اعتبار سنجی شده‌اند. در روش پیشنهاد شده توسط هیو و همکاران، با توجه به سرعت حرکت بار، شعاع تماس چرخ، ضخامت لایه آسفالتی و همچنین نسبت مدول برجستگی لایه آسفالت به مدول برجستگی لایه اساس، شکل و مدت زمان پالس تنش قائم در عمق‌های مختلف لایه آسفالتی با استفاده از یکسری معادلات قابل تعیین است [Hu et al. 2010]. با توجه به تأثیر مستقیم شکل پالس بارگذاری بر روی مدول برجستگی مخلوط آسفالتی، باید علاوه بر مدت زمان اعمال بارگذاری، شکل پالس بارگذاری نیز در عمق‌های مختلف تعیین و در نظر

## تحلیل شبه-استاتیک روسازی‌های انعطاف‌پذیر بر اساس منحنی‌های مرجع مدول برجهدگی بتن آسفالتی

گرفته شود تا امکان استفاده از مدول برجهدگی به‌جای مدول دینامیک در تحلیل شبه استاتیکی روسازی فراهم شود. با توجه به معادلات ارائه‌شده توسط Hu و همکاران به‌منظور تعیین شکل و مدت‌زمان اعمال پالس تنش قائم در عمق‌های مختلف لایه آسفالتی و همچنین روش توصیه‌شده در این مقاله به‌منظور توسعه منحنی مرجع مدول برجهدگی مخلوط‌های آسفالتی تحت اثر شکل‌های مختلف پالس بارگذاری، تحلیل شبه استاتیک روسازی مطابق مراحل زیر قابل انجام است:

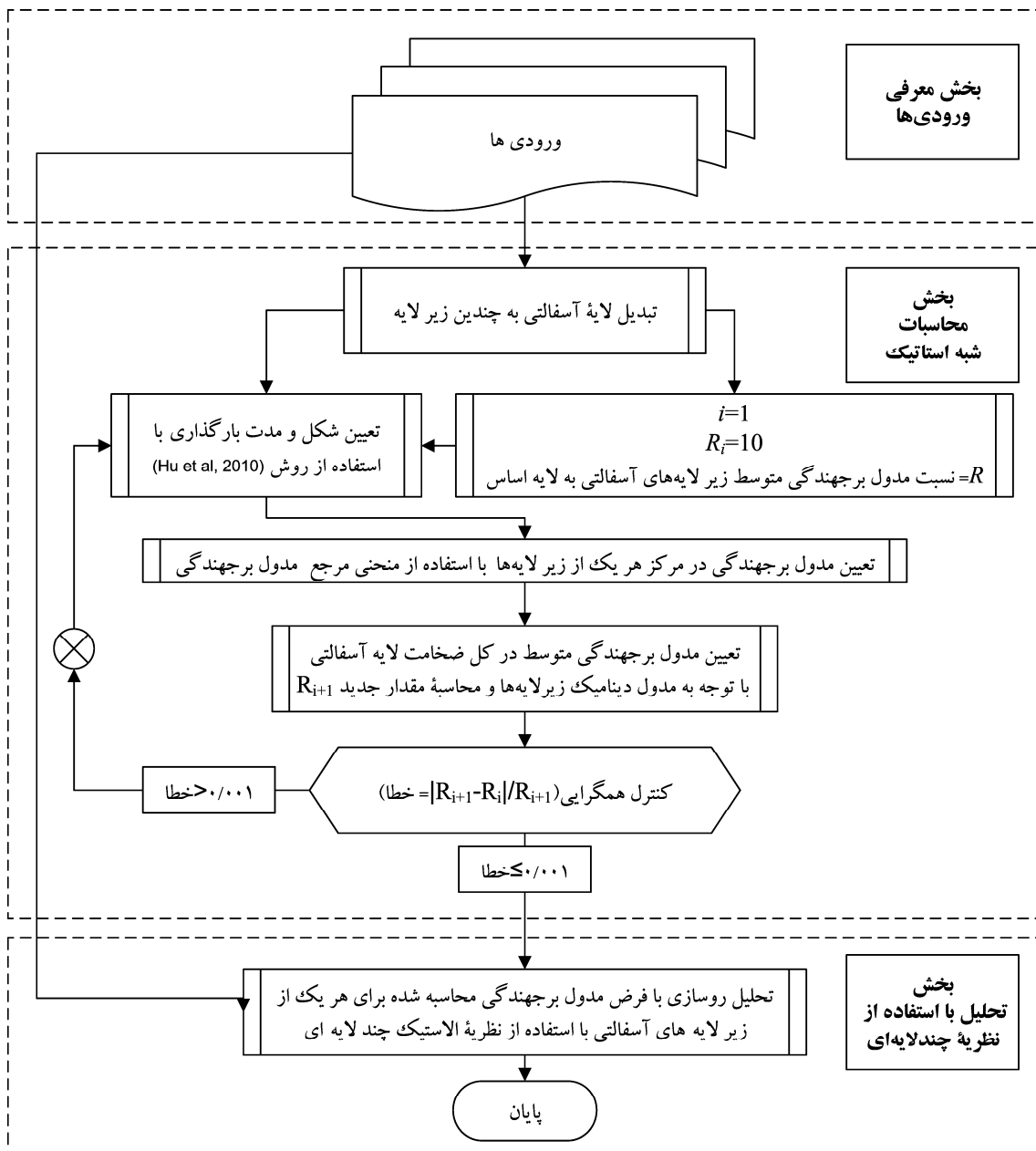
ضخامت کل لایه بتن آسفالتی	۱/۲۵ سانتیمتر
	۱/۲۵ سانتیمتر
	تا عمق ۱۰ سانتیمتر هر ۲/۵ سانتیمتر یک زیرلایه
	عمق ۱۰ تا ۲۰ سانتیمتر یک زیرلایه
کل ضخامت باقیانده به عنوان یک زیرلایه	

شکل ۶. نحوه تقسیم لایه‌های بتن آسفالتی به تعدادی زیرلایه بر اساس پیشنهاد [NCHRP, 2004].

۳- بخش تحلیل با استفاده از نظریه الاستیک چندلایه‌ای: در این بخش با در نظر گرفتن یک سیستم الاستیک چندلایه‌ای متشکل از زیرلایه‌های آسفالتی و لایه‌های غیر آسفالتی که هر یک دارای مشخصات الاستیک (مدول برجهدگی و ضریب پوآسن) می‌باشند، روسازی تحلیل می‌شود. فرآیند تحلیل شبه استاتیک روسازی با استفاده از روش پیشنهادشده در شکل (۷) نشان داده شده است. روش پیشنهادشده، امکان تحلیل روسازی‌های آسفالتی را در دامنه وسیعی از دما و فرکانس بارگذاری فراهم می‌سازد. برتری عمده استفاده از منحنی‌های مرجع مدول برجهدگی نسبت به منحنی مرجع مدول دینامیک در تحلیل شبه استاتیک روسازی امکان در نظر گرفتن شکل پالس بارگذاری و همچنین زمان استراحت بین پالس‌های مختلف بارگذاری در عمق‌های مختلف لایه آسفالتی است که امکان تحلیل دقیق‌تر روسازی و محاسبه عکس‌العمل‌های بحرانی با قابلیت اطمینان بیشتر را فراهم می‌سازد.

۱- معرفی ورودی‌ها: در این مرحله ورودی‌های موردنیاز شامل مشخصات بارگذاری (فشار تماس چرخ‌ها، شعاع سطح تماس چرخ‌ها و مختصات مرکز سطح تماس چرخ‌ها)، مشخصات لایه‌های روسازی (ضخامت لایه‌ها، مدول برجهدگی لایه‌های غیر آسفالتی، ضریب پوآسن لایه‌ها)، منحنی مرجع مدول برجهدگی لایه آسفالتی (برای سه شکل پالس بارگذاری نیم‌سینوسی، مثلثی و مربعی)، سرعت حرکت بار، درجه حرارت لایه آسفالتی و مختصات نقاط موردنظر جهت محاسبه پاسخ‌ها معرفی می‌شوند.

۲- بخش محاسبات شبه استاتیک: در این بخش ابتدا لایه آسفالتی مطابق با پیشنهاد NCHRP به چندین زیر لایه تقسیم می‌شود [NCHRP, 2004]. نحوه تقسیم لایه آسفالتی به چندین زیرلایه، در شکل (۶) نشان داده شده است. سپس با استفاده از روش پیشنهادشده توسط هیو و همکاران شکل و مدت زمان اعمال پالس تنش قائم در مرکز هر یک از زیرلایه‌ها تعیین می‌شود. با توجه به اینکه نسبت مدول لایه آسفالتی به مدول لایه اساس (R) در تعیین شکل و مدت‌زمان اعمال پالس تنش قائم مؤثر است، نیاز است تا با استفاده از یک روش تکراری مقدار نهایی این پارامتر تخمین زده شود. برای این منظور در تکرار اول، با فرض  $R=10$ ، شکل و مدت‌زمان پالس تنش قائم در مرکز هر یک از زیرلایه‌ها و همچنین مدول برجهدگی در مرکز هر یک از زیرلایه‌ها تعیین می‌شود و سپس با مقایسه مقدار



شکل ۷. روش پیشنهادی جهت تحلیل شبه- استاتیکی روسازی بر اساس منحنی مرجع مدول برجهندگی.

#### ۴. انجام تحلیل شبه استاتیکی روسازی و

##### محاسبه پاسخ‌های بحرانی

به منظور مقایسه نتایج حاصل از تحلیل با استفاده از روش پیشنهادی در این مقاله و روش MEPDG جهت تحلیل شبه استاتیکی روسازی، دو مقطع روسازی انعطاف‌پذیر سه لایه در نظر گرفته شد. ضخامت و مشخصات مصالح مورداستفاده در هر یک از لایه‌های روسازی در جدول (۵) آورده شده است. ضریب پواسن لایه‌های آسفالت، اساس سنگدانه‌ای و خاک بستر به ترتیب برابر با ۰/۳۵، ۰/۳۵ و ۰/۴۰ در نظر گرفته شد. بارگذاری

به صورت یک محور استاندارد هم‌ارز ۸/۲ تنی در نظر گرفته شد. شعاع سطح تماس چرخ‌ها با سطح روسازی برابر با ۹/۶ سانتیمتر و فاصله مرکز تا مرکز چرخ‌ها برابر با ۳۵ سانتیمتر در نظر گرفته شد. منحنی مرجع مدول دینامیک و منحنی مرجع مدول‌های برجهندگی لایه آسفالتی مطابق با جدول (۳) برای مخلوط آسفالتی نوع ۱A در نظر گرفته شد.

## تحلیل شبه- استاتیک روسازی های انعطاف پذیر بر اساس منحنی های مرجع مدول برجهندگی بتن آسفالتی

روش اول: تعیین شکل و مدت زمان پالس بارگذاری با استفاده از روابط هیو و همکاران [Hu at al. 2010] و تعیین مدول سختی زیر لایه های آسفالتی بر اساس منحنی مرجع مدول برجهندگی (روش پیشنهاد شده در این مقاله).

روش دوم: تعیین زمان پالس بارگذاری با استفاده از روابط هیو و همکاران و تعیین مدول سختی زیر لایه های آسفالتی بر اساس منحنی مرجع مدول دینامیک.

روش سوم: تعیین زمان پالس بارگذاری با استفاده از روابط MEPDG و تعیین مدول سختی زیر لایه های آسفالتی بر اساس منحنی مرجع مدول دینامیک.

با استفاده از روش هیو و همکاران و همچنین روش MEPDG مدت زمان پالس بارگذاری و نه فرکانس بارگذاری قابل تعیین است. از طرفی مدول دینامیک در دامنه فرکانس و نه در دامنه زمان تعیین می شود. به منظور انتقال از دامنه زمان به دامنه فرکانس روابط متعددی پیشنهاد شده است. مهم ترین روابطی که استفاده می شود عبارتند از تعیین فرکانس بر اساس عکس زمان بارگذاری ( $f=1/t$ ) و فرکانس زاویه ای ( $f=1/2\pi t$ ). رابطه عکس زمان بارگذاری در حال حاضر در برنامه MEPDG استفاده می شود و رابطه فرکانس زاویه ای معمولاً در علم رئولوژی برای انتقال از دامنه زمان به دامنه فرکانس مورد استفاده قرار می گیرد [Dongre, Myers and D'Angelo, 2006]. در مطالعه انجام شده در روش های دوم و سوم به منظور انتقال از دامنه زمان به دامنه فرکانس جهت تعیین مدول دینامیک مخلوط آسفالتی از هر دو روش محاسبه فرکانس استفاده شده است تا انطباق هر یک از این روش ها با روش پیشنهادی مورد بررسی قرار گیرد.

عمر خستگی و عمر شیارشدگی با استفاده از روابط انستیتو آسفالت تعیین شد. روابط انستیتو آسفالت جهت تعیین عمر خستگی و عمر شیارشدگی به صورت زیر هستند (AI, 1982):

$$(14)$$

$$N_f = 0.0796(\epsilon_t)^{-3.291} |E|^{-0.854}$$

$$(15)$$

$$N_d = 1.365(\epsilon_c)^{-4.477}$$

که در این روابط  $N_f$  تعداد مجاز بارگذاری جهت کنترل ترک های خستگی،  $\epsilon_t$  کرنش کششی تار پایین لایه آسفالت،

جدول ۵. مشخصات مقاطع روسازی.

مقطع	ضخامت (سانتی متر)			مدول برجهندگی (مگا پاسکال)
	آسفالت	اساس	اساس خاک	
نازک	۱۰	۱۰	۲۰۰	۷۰
ضخیم	۳۰	۳۰	۲۰۰	۴۰

توجه: ضخامت خاک بستر روسازی بی نهایت در نظر گرفته شده است.

در این تحقیق به منظور تحلیل روسازی با استفاده از فرآیند نشان داده شده در شکل (۷) برنامه ای در محیط Visual Basic.Net توسعه داده شد. زیر برنامه تحلیل روسازی در این برنامه از برنامه NonPAS اقتباس شده است. این زیر برنامه امکان تحلیل یک سیستم الاستیک ۱۰ لایه را حداکثر تحت اثر شش سطح بارگذاری دایره ای (محور سه گانه با چرخ زوج) با استفاده از نظریه الاستیک چند لایه ای فراهم می سازد. همچنین این برنامه امکان محاسبه عکس العمل ها را در ۳۰۰ نقطه مختلف از روسازی فراهم می کند. اعتبار سنجی نتایج به دست آمده از تحلیل خطی و غیر خطی برنامه NonPAS با پاسخ های به دست آمده از برنامه KENLAYER نشان دهنده انطباق بسیار خوب پاسخ های حاصل از این دو برنامه در دو حالت تحلیل خطی و غیر خطی است و نشان می دهد که با قابلیت اطمینان بالا می توان از این برنامه برای مقاصد تحلیل و طراحی روسازی استفاده نمود [Fakhri and Ghanizadeh, 2010].

تحلیل روسازی و محاسبه عکس العمل های بحرانی آن (حداکثر کرنش کششی تار پایین لایه آسفالت و حداکثر کرنش فشاری روی خاک بستر) با فرض سه سرعت عبور ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ کیلومتر در ساعت و سه دمای ۵، ۲۵ و ۴۰ درجه سانتی گراد برای لایه آسفالت انجام شد. پاسخ های بحرانی در مرکز یکی از چرخ ها و حد واسط بین دو چرخ محاسبه شد و بیشترین مقدار به عنوان پاسخ بحرانی در نظر گرفته شد. به منظور مقایسه روش های مختلف در پیش بینی عمر خستگی و شیارشدگی روسازی های آسفالتی، هر یک از مقاطع روسازی با استفاده از روش های شبه استاتیک زیر تحلیل شدند:

لایه‌های آسفالتی، می‌توان از مقادیر مدول دینامیک استفاده نمود با این فرض که برای تعیین فرکانس بارگذاری از رابطه  $(f=1/2\pi t)$  به جای رابطه  $(f=1/t)$  استفاده شود.

به علاوه ملاحظه می‌شود که اختلاف پاسخ‌های بحرانی و عمر به دست آمده با استفاده از روش‌های مختلف، در روسازی‌های با قشر آسفالت ضخیم‌تر بیشتر از مقاطع روسازی با قشر آسفالتی نازک‌تر است؛ بنابراین تحلیل شبه استاتیکی دقیق‌تر در روسازی‌های ضخیم‌تر دارای اهمیت بیشتری است.

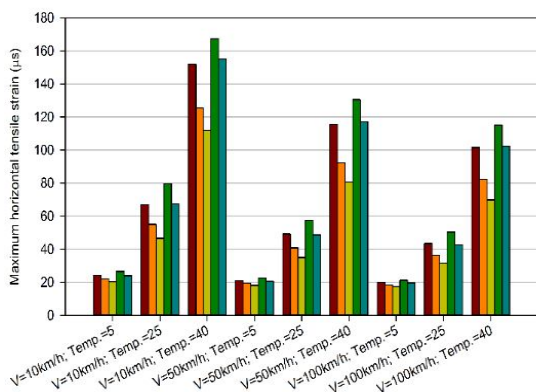
مقایسه عمر خستگی لایه آسفالتی به دست آمده از روش پیشنهادی و روش بکاررفته در برنامه MEPDG نشان می‌دهد که نسبت عمر خستگی پیش‌بینی شده بر اساس روش پیشنهادی به عمر خستگی پیش‌بینی شده بر اساس روش MEPDG در روسازی نازک و ضخیم به ترتیب می‌تواند تا حدود ۶۳ درصد و ۴۶ درصد کاهش یابد. همچنین مقایسه عمر شیارشدگی نشان می‌دهد که نسبت عمر شیارشدگی پیش‌بینی شده بر اساس روش پیشنهادی به عمر شیارشدگی پیش‌بینی شده بر اساس روش MEPDG در روسازی نازک و ضخیم می‌تواند تا حدود ۴۷ درصد و ۳۳ درصد کاهش یابد. به عبارت دیگر استفاده از مدول دینامیک به همراه روش تحلیل شبه استاتیکی MEPDG می‌تواند عمر روسازی را بسیار بیشتر از مقدار واقعی پیش‌بینی کند. برای مثال در صورت تحلیل و طراحی روسازی ضخیم ذکر شده در این مقاله با استفاده از روش MEPDG، روسازی در وضعیت سرویس‌دهی با توجه به دو معیار خرابی خستگی و شیارشدگی به ترتیب تنها تحمل عبور ۴۶ و ۳۳ درصد تعداد عبور محور استاندارد لحاظ شده در طراحی را دارد. اختلاف بسیار زیاد بین عمر پیش‌بینی شده با استفاده از سختی مخلوط‌های آسفالتی بر اساس مدول برجهندگی با عمر پیش‌بینی شده با استفاده از سختی مخلوط‌های آسفالتی بر اساس مدول دینامیک لزوم بهره‌گیری از مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی به جای مدول دینامیک را به اثبات می‌رساند.

$|E|$  مدول مخلوط آسفالتی،  $N_d$  تعداد مجاز بارگذاری جهت کنترل شیارشدگی روسازی و  $\epsilon_c$  کرنش فشاری روی خاک بستر است.

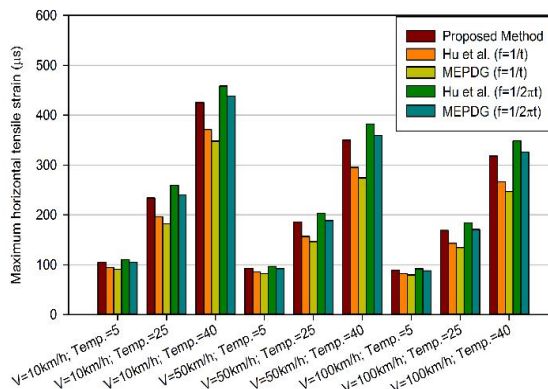
## ۵. مقایسه عمر خستگی و شیارشدگی حاصل از روش‌های مختلف تحلیل شبه استاتیکی روسازی

در شکل‌های (۸) و (۱۰) به ترتیب مقدار حداکثر کرنش کششی تار پایین لایه آسفالت و همچنین حداکثر کرنش فشاری روی خاک بستر که با استفاده از روش‌های مختلف تعیین سختی رویه آسفالتی پیش‌بینی شده‌اند، نشان داده شده است. همچنین در شکل‌های (۹) و (۱۱) به ترتیب عمر خستگی و عمر شیارشدگی با استفاده از روش‌های مختلف تعیین سختی رویه آسفالتی مقایسه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود استفاده از مدول دینامیک و رابطه عکس زمان بارگذاری  $(f=1/t)$  به منظور انتقال از دامنه زمان به دامنه فرکانس (روش MEPDG) سبب می‌شود تا پاسخ‌های بحرانی روسازی کمتر از سایر روش‌ها، پیش‌بینی شوند و به این ترتیب عمر خستگی و شیارشدگی روسازی بیش از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌شود. در حقیقت روش فعلی به کاررفته در برنامه MEPDG مقادیر پاسخ‌های بحرانی را در مقایسه با سایر روش‌ها کمتر پیش‌بینی می‌کند که این موضوع سبب کاهش قابلیت اطمینان طرح خواهد شد. پاسخ‌های حاصل از روش پیشنهادی (تعیین سختی زیرلایه‌های آسفالتی بر اساس نمودار مرجع مدول برجهندگی) بسیار نزدیک به پاسخ‌های حاصل از روش MEPDG (تعیین سختی بر اساس مدول دینامیک) با فرض استفاده از رابطه فرکانس زاویه‌ای  $(f=1/2\pi t)$  به منظور تعیین فرکانس با توجه به زمان بارگذاری است؛ بنابراین به منظور تحلیل دقیق‌تر روسازی و در نظر گرفتن شکل پالس بارگذاری و همچنین دوره استراحت بر روی سختی

## تحلیل شبه-استاتیک روسازی‌های انعطاف‌پذیر بر اساس منحنی‌های مرجع مدول برجهندگی بتن آسفالتی

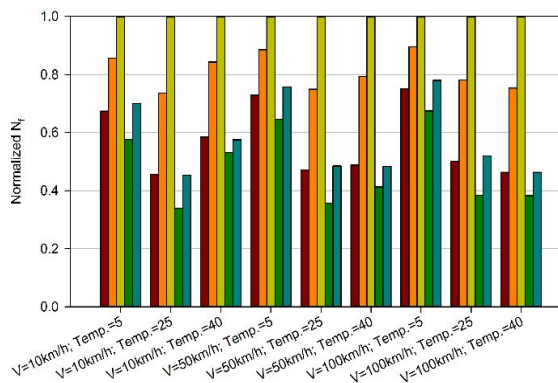
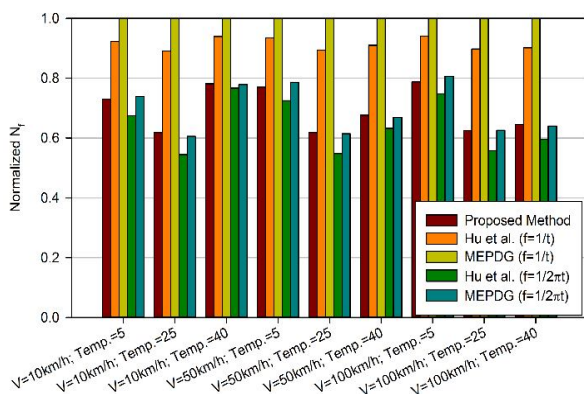


ب) مقطع روسازی ضخیم

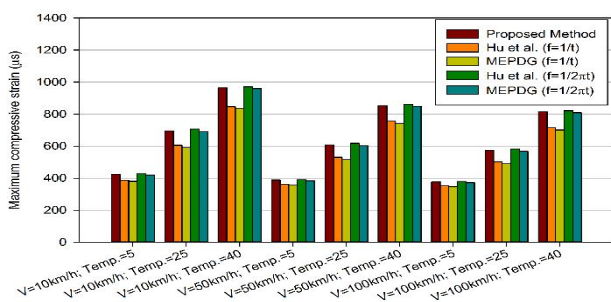


الف) مقطع روسازی نازک

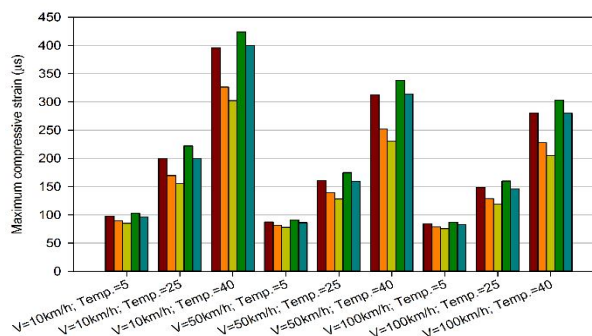
شکل ۸. حداکثر کرنش کششی تار پایین لایه آسفالت با استفاده از روش‌های مختلف.



شکل ۹. نسبت عمر خستگی پیش‌بینی شده با استفاده از روش‌های مختلف و روش MEPDG

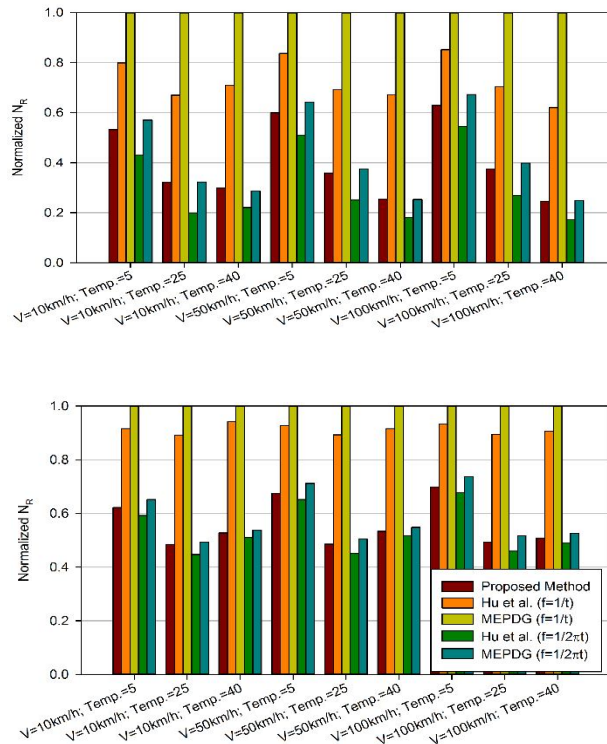


ب) مقطع روسازی ضخیم



الف) مقطع روسازی نازک

شکل ۱۰. حداکثر کرنش فشاری روی خاک بستر با استفاده از روش‌های مختلف.



ب) مقطع روسازی ضخیم

الف) مقطع روسازی نازک

شکل ۱۱. نسبت عمر شیار شدگی پیش‌بینی شده با استفاده از روش‌های مختلف و روش MEPDG.

## ۶. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق چارچوبی به‌منظور تحلیل شبه استاتیک روسازی‌های آسفالتی بر اساس منحنی مرجع مدول برجهدگی مخلوط‌های آسفالتی پیشنهاد شده است. این روش امکان در نظر گرفتن زمان و شکل پالس بارگذاری و همچنین دمای مخلوط آسفالتی را در عمق‌های مختلف لایه آسفالتی با استفاده از مفهوم منحنی مرجع مدول برجهدگی فراهم می‌سازد. روش فوق توانایی در نظر گرفتن تأثیر سرعت حرکت وسایل نقلیه، و زمان استراحت بین عبور دو محور متوالی را بر روی سختی مخلوط‌های آسفالتی فراهم می‌سازد. نتایج حاصل از تحلیل شبه استاتیک روسازی بر اساس منحنی مرجع مدول دینامیک و پایه روش‌های مختلف محاسبه فرکانس بارگذاری و روش ارائه شده در این مقاله بر اساس منحنی مرجع مدول برجهدگی به طور خلاصه به شکل زیر قابل بیان هستند:

۱- استفاده از مدول دینامیک و رابطه عکس زمان بارگذاری ( $f=1/t$ ) به‌منظور انتقال از دامنه زمان به دامنه فرکانس (روش MEPDG) سبب می‌شود تا پاسخ‌های بحرانی روسازی

کمتر از سایر روش‌ها، پیش‌بینی شوند. در حقیقت روش فعلی به‌کاررفته در برنامه MEPDG مقادیر پاسخ‌های بحرانی را در مقایسه با سایر روش‌ها کمتر پیش‌بینی می‌کند که موضوع سبب کاهش قابلیت اطمینان طرح خواهد شد.

۲- پاسخ‌های حاصل از روش پیشنهادی (تعیین سختی زیرلایه‌های آسفالتی بر اساس نمودار مرجع مدول برجهدگی) بسیار نزدیک به پاسخ‌های حاصل از روش MEPDG (تعیین سختی بر اساس مدول دینامیک) با فرض استفاده از رابطه فرکانس زاویه‌ای ( $f=1/2\pi t$ ) به‌منظور تعیین فرکانس با توجه به زمان بارگذاری است؛ بنابراین به‌منظور تحلیل دقیق‌تر روسازی و در نظر گرفتن شکل پالس بارگذاری و همچنین دوره استراحت بر روی سختی لایه‌های آسفالتی، می‌توان از مقادیر مدول دینامیک استفاده نمود با این فرض که برای تعیین فرکانس بارگذاری از رابطه ( $f=1/2\pi t$ ) به‌جای رابطه ( $f=1/t$ ) استفاده شود.

۳- اختلاف پاسخ‌های بحرانی و عمر به‌دست‌آمده با استفاده از روش‌های مختلف، در روسازی‌های با قشر آسفالت ضخیم‌تر بیشتر از مقاطع روسازی با قشر آسفالتی نازک‌تر است؛



- Chehab, G. R., Quinn, E., and Kim, Y. R. (2000) "Specimen geometry study for direct tension test based on mechanical tests and air void variation in asphalt concrete specimens compacted by superpave gyratory compactor". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1723, pp. 125-132.
- Dongre, R., Myers, L. and D'Angelo, J. (2006) "Conversion of testing frequency to loading time: impact on performance predictions obtained from the ME pavement design guide", Paper presented at the Transportation Research Board 85th Annual Meeting, Washington DC, United States.
- Fakhri, M. and Ghanizadeh, A. R. (2014) "An experimental study on the effect of loading history parameters on the resilient modulus of conventional and SBS-modified asphalt mixes", Construction and Building Materials, Vol. 53, pp. 284-293.
- Ghanizadeh, A. R. and Fakhri, M. (2013) "Effect of waveform, duration and rest period on the resilient modulus of asphalt mixes", Procedia-Social and Behavioral Sciences, Vol. 104, pp. 79-88.
- Hernandez, J. A. (2010) "Evaluation of the response of perpetual pavement at accelerated pavement loading facility: Finite element analysis and experimental investigation", M.S. Thesis, Ohio University.
- 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.
- Huang, Y. H. (2004) "Pavement analysis and design" (2nd ed.). USA, New Jersey: Prentice Hall, Inc.
- IRC (2012) "Guidelines for the design of flexible pavements" (3rd ed.): Indian Road Congress.
- Kim, Y. R., Seo, Y., King, M. and Momen, M. (2004) "Dynamic modulus testing of asphalt concrete in indirect tension mode". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1891, pp. 163-173.
- Lacroix, A., Khandan, A. A. M. and Kim, Y. R. (2007) "Predicting the resilient modulus of asphalt concrete from the dynamic modulus", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2001, pp. 132-140.
- Lee, H. S., Kim, S., Choubane, B. and Upshaw, P. (2012) "Construction of Dynamic Modulus Master Curves with Resilient Modulus and Creep Test

بنابراین تحلیل شبهه استاتیک دقیق تر در روسازی های ضخیم تر دارای اهمیت بیشتری است.

- ۴- نسبت عمر خستگی پیش بینی شده بر اساس روش پیشنهادی به عمر خستگی پیش بینی شده بر اساس روش MEPDG برای روسازی های نازک و ضخیم به ترتیب برابر با حدود ۶۳ درصد و ۴۶ درصد به دست آمده است. همچنین نسبت عمر شیارشدگی پیش بینی شده بر اساس روش پیشنهادی به عمر شیارشدگی پیش بینی شده بر اساس روش MEPDG در روسازی نازک و ضخیم به ترتیب برابر با حدود ۴۷ درصد و ۳۳ درصد به دست آمده است. به عبارت دیگر استفاده از مدول دینامیک به همراه روش تحلیل شبهه استاتیک MEPDG می تواند عمر روسازی را بسیار بیشتر از مقدار واقعی پیش بینی کند. بنابراین برای افزایش قابلیت اطمینان طرح باید از منحنی های مرجع مدول برجهندگی به جای مدول برجهندگی مدول دینامیک استفاده شود.

#### فهرست منابع

- AASHTO (1993) "Guide for design of pavement structures": American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
- AASHTO (2003) "AASHTO T 320-03: Standard method of test for determining the permanent shear strain and stiffness of asphalt mixtures using the superpave shear tester (SST)", Washington DC., United States: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AI. (1982) "Research and development of the asphalt institute's thickness (MS-1)" (9th edition ed.): Asphalt Institute.
- AUSTROADS. (2010) "Guide to Pavement Technology (APT-02/10) – Part 2: Pavement Structural Design". Sydney, Australia: Austroads.
- Barksdale, R. D. (1971) "Compressive stress pulse times in flexible pavements for use in dynamic testing". Highway Research Record, Vol. 345, pp. 32-44.
- Buttlar, W., Wagoner, M., You, Z. and Brovold, S. (2004) "Simplifying the hollow cylinder tensile test procedure through volume-based strain ". Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 73, pp. 367-399.

- Theyse, H., Maina, J. and Kannemeyer, L. (2007) "Revision of the South African flexible pavement design method; mechanistic-empirical components", Paper presented at the 9th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA2007)
- Witczak, M., Bonaquist, R., Von Quintus, H., and Kaloush, K. (2000) "Specimen geometry and aggregate size effects in uniaxial compression and constant height shear tests", Journal of Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 69, pp. 457-496.
- 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 and M University System.
- فخری، منصور و غنی زاده، علیرضا (۱۳۹۱) "توسعه برنامه‌ای جهت تحلیل غیرخطی روسازی‌های انعطاف‌پذیر"، فصلنامه علمی و پژوهشی حمل و نقل، سال سوم، شماره ۳، ص. ۲۴۵-۲۵۸.
- معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس‌جمهور (۱۳۹۰) "نشریه ۲۳۴: آیین نامه طراحی روسازی‌های آسفالتی ایران"، تجدید نظر اول.
- Data", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2296, pp. 1-14.
- 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", Paper presented at the Workshop on Resilient Modulus Testing, Oregon State University, Corvallis, Oregon.
- NCHRP. (2004) "Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures, final report for project 1-37A". Washington, DC: National Cooperative Research Program.
- Park, S. and Schapery, R. (1999) "Methods of inter-conversion 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.
- Siddharthan, R., Krishnamenon, N. and Sebaaly, P. (2000) "Pavement response evaluation using finite-layer approach". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1709, pp. 43-49.

## ضمیمه

(الف). روابط ارائه شده توسط هیو و همکاران به منظور تعیین شکل و مدت زمان پالس بارگذاری در روسازی هیو و همکاران (۲۰۱۰) با توجه به تحلیل الاستیک لایه‌ای ۱۰۰۰ روسازی متعارف با ضخامت‌ها و نسبت مدول‌های ارتجاعی متفاوت و تحت بارگذاری محور استاندارد منفرد هم‌ارز، روابطی جهت تعیین شکل پالس و مدت زمان پالس تنش قائم ارائه نمودند که این روابط با استفاده از مقاطع راه هوشمند ویرجینیا اعتبار سنجی شدند [Hu et al., 2010]. شکل پالس تنش قائم در عمق‌های مختلف به سه شکل مربعی، نیم‌سینوسی و مثلثی در نظر گرفته شد که رابطه‌ی هر یک به ترتیب در معادلات (الف-۱) الی (الف-۳) داده شده است.

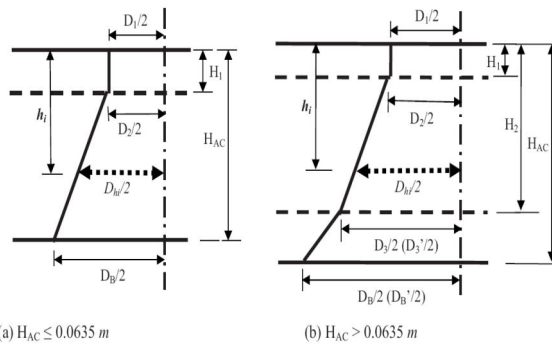
$$y(x) = 1 \quad \left( |x| \leq \frac{d}{2} \right) \quad \text{(الف-۱)}$$

$$y(x) = \sin^2 \left( \frac{\pi}{2} + \pi \frac{x}{d} \right) \quad \left( |x| \leq \frac{d}{2} \right) \quad \text{(الف-۲)}$$

$$y(x) = -\frac{2}{d} |x| + 1 \quad \left( |x| \leq \frac{d}{2} \right) \quad \text{(الف-۳)}$$

که در این روابط  $d$  طول پالس تنش فشاری قائم است.

تحلیل شبه-استاتیک روسازی‌های انعطاف‌پذیر بر اساس منحنی‌های مرجع مدول برجهندگی بتن آسفالتی



شکل الف. ۱. محاسبه مدت زمان پالس تنش قائم [Hu et al., 2010]

با توجه به شکل (الف-۱)، روابط ارائه شده برای تعیین شکل پالس تنش قائم در لایه‌ی آسفالتی در دو حالت ارائه شده‌اند [Hu et al., 2010]:

حالت اول:  $H_{AC} \leq 0.0635 \text{ m}$

اگر  $h_i \leq H_1$  باشد، شکل پالس تنش قائم به صورت مربعی خواهد بود و زمان بارگذاری به صورت معادله (الف-۳) بدست خواهد آمد، که در این رابطه  $T$  مدت زمان بارگذاری بر حسب ثانیه و  $V$  برابر با سرعت بر حسب کیلومتر بر ساعت و  $D$  قطر سطح تماس چرخ (برابر با ۱۹ سانتی‌متر برای محور استاندارد) است.

$$T = \frac{D}{V} \quad \text{(الف-۳)}$$

اگر  $h_i > H_1$  باشد، دو حالت ممکن است. اگر  $R < 5$  باشد شکل پالس تنش قائم به صورت مربعی خواهد بود و زمان بارگذاری از رابطه (الف-۳) بدست خواهد آمد. در غیر این صورت شکل پالس تنش قائم به صورت نیم‌سینوسی و زمان بارگذاری از رابطه زیر بدست خواهد آمد:

$$T = \frac{(D_B - D_2)h_i - H_1 D_B + H_{AC} D_2}{V(H_{AC} - H_1)} \quad \text{(الف-۴)}$$

که در این رابطه:

$h_i$  = عمق نقطه مورد نظر (m)

$R$  = نسبت بین مدول ارتجاعی لایه آسفالتی و لایه زیر آن

$D_1$  = قطر سطح بارگذاری چرخ (m) برای چرخ زوج هم‌ارز برابر با 0.21m

$$H_1 = H_{AC}/2$$

$$D_2 = 0.4 \text{ m}$$

$$D_B = 0.3304(R \times H_{AC})^{0.5445} + 0.9551 R + 1.6151 \times H_{AC} - 0.8115 \text{ (m)}$$

حالت دوم:  $H_{AC} > 0.0635 \text{ m}$

اگر  $h_i \leq H_1$  باشد، شکل پالس تنش قائم به صورت مربعی خواهد بود و زمان بارگذاری از رابطه (الف-۳) بدست خواهد آمد.

اگر  $H_1 \leq h_i \leq H_2$  باشد، پالس تنش قائم به صورت نیم‌سینوسی خواهد بود و زمان بارگذاری از معادله زیر بدست خواهد آمد.

$$T = \frac{(D_3 - D_2)h_i - H_1 D_3 + H_2 D_2}{V(H_2 - H_1)} \quad \text{(الف-۵)}$$

اگر  $h_i > H_2$  باشد، دو حالت اتفاق می‌افتد. اگر  $(0.0635 \text{ m} \leq H_{AC} \leq 0.2032 \text{ m})$  یا  $(0.2032 \text{ m} \leq H_{AC} \leq 0.508 \text{ m})$  و  $(R \leq 20)$  باشد، شکل پالس تنش قائم به صورت نیم‌سینوسی خواهد بود و زمان بارگذاری از معادله زیر بدست می‌آید.

$$T = \frac{(D_B - D_3)h_i - H_2 D_B + H_{AC} D_3}{V(H_{AC} - H_2)} \quad \text{(الف-۶)}$$

در سایر حالت‌ها پالس تنش قائم به صورت مثلثی می‌باشد و زمان بارگذاری از رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$T = \frac{(D_{B'} - D_{3'})h_i - H_1 D_{B'} + H_{AC} D_{3'}}{V(H_{AC} - H_1)} \quad (\text{الف-۷})$$

که در این روابط:

$$h_i = \text{عمق نقطه مورد نظر (m)}$$

R = نسبت بین مدول ارتجاعی لایه آسفالتی و لایه زیر آن

D<sub>1</sub> = قطر سطح بارگذاری چرخ (m) برای چرخ زوج هم‌ارز برابر با 0.21m

$$H_1 = 0.0508 \text{ (m)}$$

$$H_2 = 0.8553 H_{AC} - 0.0082 \text{ (m)}$$

$$D_2 = 0.4 \text{ m}$$

$$D_3 = 1.8189 H_{AC}^2 + 0.3507 H_{AC} + 0.3929 \text{ (m)}$$

$$D_{3'} = 2.4606 H_{AC} + 0.0667 \text{ (m)}$$

$$D_B = 0.3304 (R \times H_{AC})^{0.5445} + 0.9551 R + 1.6151 \times H_{AC} - 0.8115 \text{ (m)}$$

$$D_B = 3.7715 (R \times H_{AC})^{0.1497} + 3.2098 \times H_{AC} - 4.3379 \text{ (m)}$$

## پی‌نوشتها

- |   |  |
|---|--|
| <sup>۱۶</sup> Shift factor                  | <sup>۱</sup> Mechanistic-Empirical                                 |
| <sup>۱۷</sup> angular reduced frequency     | <sup>۲</sup> Finite Element Method                                 |
| <sup>۱۸</sup> shift factor                  | <sup>۳</sup> Finite Layer Method                                   |
| <sup>۱۹</sup> storage compliance            | <sup>۴</sup> Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG)   |
| <sup>۲۰</sup> Vigot model                   | <sup>۵</sup> Quasi-Static  |
| <sup>۲۱</sup> glassy compliance             | <sup>۶</sup> Master Curve  |
| <sup>۲۲</sup> loss compliance               | <sup>۷</sup> Sub-layers  |
| <sup>۲۳</sup> Kelvin model                  | <sup>۸</sup> Resilient Modulus                                     |
| <sup>۲۴</sup> Prony series                  | <sup>۹</sup> Dynamic Modulus                                       |
| <sup>۲۵</sup> Boltzman                      | <sup>۱۰</sup> National Cooperative Highway Research Program(NCHRP) |
| <sup>۲۶</sup> Levenberg–Marquardt algorithm | <sup>۱۱</sup> Rest period  |
| <sup>۲۷</sup> Gauss–Newton algorithm        | <sup>۱۲</sup> Fatigue endurance limit                              |
| <sup>۲۸</sup> McLean                        | <sup>۱۳</sup> Perpetual pavements                                  |
| <sup>۲۹</sup> Barksdale                     | <sup>۱۴</sup> Nonlinear Sigmoid function                           |
| <sup>۳۰</sup> Hu                            | <sup>۱۵</sup> Reduced frequency                                    |
| <sup>۳۱</sup> Virginia Smart Road           |  |