

روشی تسریع شده برای تعیین عمر خستگی قیر به کمک رویکرد خرابی محیط پیوسته

محمد مهدی دیبائی^۱، دکتر امیر کاووسی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

*kavussia@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۱/۲

تاریخ دریافت: ۹۷/۱۱/۲۳

چکیده

قیر، به عنوان فاز چسبنده، نقش مهمی در رفتار مخلوط آسفالتی ایفا می‌کند. بر این اساس تعیین مشخصات خستگی آن همواره موضوع پژوهش‌های گسترده بوده است. در این میان، رویکرد خرابی محیط پیوسته ویسکوالاستیک (VECD) مورد توجه بسیاری از پژوهشگران برای تعیین مشخصات خستگی مصالح بوده است. در این رویکرد، سختی ماده به عنوان تابعی از خرابی - که مستقل از چگونگی بارگذاری است - تعیین می‌شود، که بر اساس آن بتوان عمر خستگی را برای انواع بارگذاری تعیین کرد. با این حال استفاده از این روش دارای پیچیدگی‌هایی است، زیرا از طرفی باید خرابی در طول آزمایش تعیین شود، و از طرف دیگر محاسبه خرابی نیازمند تعیین پارامترهایی است که تنها با داشتن روند تابع خرابی به دست می‌آیند. این موضوع سبب ایجاد یک فرآیند سعی و خطا در این روش می‌شود. در این مطالعه روشی ابتکاری ارائه شده است که تا حد زیادی می‌تواند در میزان محاسبات و تعداد آزمایش‌های لازم صرفه‌جویی حاصل نماید. طبق این روش، آزمایش پیمایش زمان در دو سطح کرنش مختلف انجام شده، و سپس به کمک روابطی که در این پژوهش برای پیش‌بینی رفتار خستگی توسعه داده شده است، بدون نیاز به محاسبه متغیر خرابی، تابع خرابی به کمک یک رگرسیون غیرخطی قابل تعیین خواهد بود. در ادامه، روش مذکور با نتایج آزمایش‌های خستگی روی نمونه‌های قیر اصلاح شده با پلیمر اس‌بی‌اس اعتبار سنجی شده است. نتایج حاکی از آن است که استفاده از روش رگرسیون به خوبی می‌تواند جایگزین روش سعی و خطا شده و با گذراندن زمان کمتر، تابع خرابی را بدست دهد.

واژگان کلیدی: قیر، خستگی، خرابی محیط پیوسته ویسکوالاستیک.

۱- مقدمه

بروز ترک‌های خستگی در رویه‌های آسفالتی که بر اثر تکرار بارهای ترافیکی در دماهای میانی محیط ایجاد می‌شود، یکی از خرابی‌های اصلی در روسازی‌های آسفالتی است. از این رو تعیین رفتار خستگی مخلوط آسفالتی، و قیر به عنوان ماده چسباننده مخلوط، همواره موضوع پژوهش‌های گسترده‌ای در امور ساخت و نگهداری روسازی‌ها بوده است. رفتار خستگی مخلوط، بیشتر در قالب مدل‌های پیش‌بینی عمر ارائه می‌شود که در حالت ساده آن تعداد دفعات بارگذاری برای کاهش سختی تا حدی معین، تخمین زده می‌شود [1].

مدل‌های پیش‌بینی مذکور در ابتدا با برازش یک رابطه توانی بر داده‌های حاصل از آزمایش‌های خستگی توسعه داده شدند [1]. در این رویکرد که به پدیدار شناختی معروف است، به انجام آزمایش‌های متعددی در شرایط بارگذاری متفاوت نیاز است تا بتوان مدل پیش‌بینی را توسعه داد. از آنجایی که آزمایش خستگی زمان‌بر است، انتخاب رویکرد مذکور سزاوار گذراندن زمان طولانی برای انجام آزمایش‌های متعدد است [2]. با معرفی رویکردهای مکانیستیک، امکان توسعه روابط پیش‌بینی با صرف هزینه و زمان کمتر فراهم شد، زیرا این روش‌ها بخشی از آزمایش‌های مورد نیاز را با روابط مکانیستیک جایگزین نمودند [3].

در ادامه به رویکرد خرابی محیط پیوسته ویسکوالاستیک (VECD) به عنوان یکی از روش‌های شناخته شده مکانیستیک برای تعیین ویژگیهای خستگی مصالح ویسکوالاستیک پرداخته می‌شود.

۲- خرابی محیط پیوسته ویسکوالاستیک

یکی از روش‌های شناخته شده مکانیستیک برای تعیین ویژگیهای خستگی مصالح ویسکوالاستیک روش خرابی محیط پیوسته ویسکوالاستیک (VECD) است. در این روش که بر ترمودینامیک روابط بازگشت‌ناپذیر (TIP) بنیان نهاده شده است، ماده در طول بارگذاری تا لحظه گسیختگی به

صورت یکپارچه، و بدون تغییر در هندسه آن فرض می‌شود. در عوض، برای مدل سازی کاهش مدول در طول بارگذاری، یک متغیر وضعیت داخلی^۲ با نام خرابی^۳ تعریف شده تا نماینده تمام خرابی‌های داخلی ساختمان ماده باشد [4]. با معرفی متغیر وضعیت خرابی، سختی به عنوان یک تابع وضعیت^۴ از آن خواهد بود (تابع خرابی)، که تغییرات این تابع مستقل از مسیر فرآیند است. به عبارت دیگر تحت هر شرایط بارگذاری، تابع خرابی ماده همواره شکلی ثابت خواهد داشت [5].

تاکنون تلاش‌های مختلفی برای تعریف یک متغیر خرابی که از نوع متغیر وضعیت با ویژگی‌های مذکور به حساب آید انجام گرفته است. در این میان شناخته شده‌ترین رابطه، قانون توانی رشد خرابی است که متغیر خرابی را به طور ضمنی با انرژی تلف شده در طول بارگذاری مربوط می‌کند [6, 7]. در این تعریف از مفهوم شبه کرنش که پیش‌تر توسط شیپری، برای حذف وابستگی معادلات ویسکوالاستیک به زمان ابداع شده بود استفاده شده است [8]. در قانون رشد خرابی که در رابطه ۱ برای بارگذاری سیکلیک آمده است، نرخ خرابی با نرخ تغییرات چگالی انرژی شبه کرنشی نسبت به خرابی، به صورت توانی وابستگی دارد [7]:

$$\frac{\partial D}{\partial N} = \left(-\frac{\partial W^R}{\partial D} \right)^\alpha \quad (1)$$

در رابطه ۱ متغیر D خرابی، W^R چگالی انرژی شبه کرنشی (Pa) ، N چرخه بارگذاری، و α توان رابطه است که وابسته به ویژگی‌های ماده است. با حل عددی رابطه ۱، می‌توان مقدار خرابی را در پایان هر سیکل بارگذاری به دست آورد:

$$D_i \cong D_{i-1} + (\Delta W^R_i)^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} = \sum_{j=1}^i (\Delta W^R_j)^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} \quad (2)$$

در رابطه ۲، i شماره سیکل بارگذاری است. برای یک نمونه قیر تحت آزمایش برشی سیکلیک کرنش-ثابت با دستگاه

۳. Damage

۴. State Function

۱. Thermodynamics of Irreversible Processes

۲. Internal State Variable

DSR خواهیم داشت [9]:

$$W^R = \pi \times G^R \times C \times (\gamma^R)^2 \quad (3)$$

در رابطه فوق γ^R شبه کرنش برشی و G^R شبه سختی برشی (Pa) ، C مدول برشی نسبی (نسبت مدول برشی به مدول برشی اولیه) هستند؛ به گونه‌ای که [9]:

$$\gamma^R = \frac{1}{G^R} \times \int_0^t G(t-x) \times \frac{\partial \gamma}{\partial x} dx \quad (4)$$

در رابطه ۴ متغیر G مدول رهایی برشی (Pa) ، γ کرنش برشی، t زمان (s) و x متغیر انتگرال‌گیری (s) هستند. همچنین متغیر G^R فقط برای تعدیل واحدها وارد شده و مقدار آن معمولاً واحد فرض می‌شود.

برای محاسبه خرابی با روابط فوق باید مقدار α تعیین شود. در این صورت با داشتن مقدار مدول نسبی (C) و محاسبه خرابی (D) در هر سیکل می‌توان در پایان آزمایش روند تابع وضعیت خرابی $C(D)$ را برای ماده مورد نظر به دست آورد. برای محاسبه α بهترین روش آن است که آزمایش خستگی کرنش-ثابت با کرنش‌های مختلف تکرار شده، و سپس با تغییر α مقدار آن به گونه‌ای تعیین شود که $C(D)$ به دست آمده از آزمایش‌های مختلف برای یک ماده با هم هماهنگ شوند [10]. در برخی از مراجع تقریب‌هایی برای α بر اساس ویژگی‌های رئولوژیکی ماده ارائه شده است [6]، که از آن‌ها به عنوان مقدار اولیه در فرآیند تعیین α استفاده شده است [10].

روند فوق تابع C بر حسب D را بر اساس داده‌های آزمایشگاهی به دست می‌دهد، که می‌توان آن را با توابع ریاضی شبیه‌سازی نمود. مراجع مختلف توابع معدودی را بدین منظور پیشنهاد داده‌اند [11, 12]، که در بین آن‌ها تابع توانی دوجمله‌ای رابطه ۵ [6, 7]، به دلیل سادگی در فرآیند مشتق‌گیری و انتگرال‌گیری از بقیه پرکاربردتر بوده است.

$$C(D) = c_0 - c_1 \cdot D^{c_2} \quad (5)$$

در رابطه فوق c_0 ، c_1 و c_2 ضرایب رگرسیون می‌باشند، که در شروط $c_0 = 1$ ، $c_1 > 0$ و $0 < c_2 < 1$ صدق می‌کنند.

با بدست آمدن رابطه صریح تابع خرابی (رابطه ۵)

می‌توان از آن در حل تحلیلی قانون رشد خرابی (رابطه ۱) در هر شرایط بارگذاری دلخواه استفاده نمود و رابطه پیش‌بینی عمر خستگی در آن شرایط را به دست آورد.

در این پژوهش روشی ارائه خواهد شد که به کمک مفاهیم خرابی محیط پیوسته، ولی بدون نیاز به محاسبه متغیر خرابی در طول آزمایش، بتوان مدل پیش‌بینی عمر خستگی را بدست آورد. برای به دست آوردن این مهم، مجموعه‌ای از معادلات توسعه داده شده‌اند که با برازش آن‌ها بر پاسخ اولیه ماده می‌توان رابطه نهایی پیش‌بینی عمر خستگی را تشکیل داد. در این راستا، روابط پیش‌بینی عمر خستگی برای حالت کرنش-کنترل (ثابت و متغیر) به دلیل سادگی فرم انتگرال‌گیری شده آن ارائه شده است.

۳- توسعه روش جدید تعیین ویژگیهای خستگی

در توسعه روش ابداعی در این پژوهش فرض بر این بوده است که آزمایش‌های انجام‌شده روی نمونه‌های قیر تحت آزمایش سیکلیک کرنش-کنترل با دستگاه DSR است. با این حال تمام روابط ارائه‌شده در این بخش می‌تواند برای نمونه‌هایی با هندسه و شرایط بارگذاری مختلف بازنویسی شود.

در یک آزمایش سیکلیک در صورتی که ورودی و پاسخ ماده در نقاط حداکثر ثبت شود (با توجه به تعریف شبه‌کرنش)، می‌توان نشان داد [10, 11]:

$$(\gamma_{max}^R)^2 = \left(\frac{G_0 \times \gamma_{max}}{G^R} \right)^2 \quad (6)$$

که در آن G_0 مدول دینامیکی برشی اولیه (Pa) است. بنابراین:

$$W^R \approx \pi \times \frac{G_0^2}{G^R} \times C \times (\gamma_{max})^2 \quad (7)$$

باید توجه داشت که تقریب رابطه ۷ برای سادگی و

$$\Delta W^R = W^R_{i+1} - W^R_i \approx \pi \times \frac{G_0^2}{G^R} \times (C_{i+1} \times (\gamma_{max_{i+1}})^2 - C_i \times (\gamma_{max_i})^2)$$

$$\Delta W^R|_{\gamma_{max}} \approx \pi \times \frac{G_0^2}{G^R} \times (\gamma_{max_i})^2 \times (C_{i+1} - C_i) \quad (9)$$

شکل ۱. تصویری شماتیک و تقریبی از بیشینه چگالی انرژی کرنشی در طول دو سیکل، با بیشینه کرنش غیریکسان

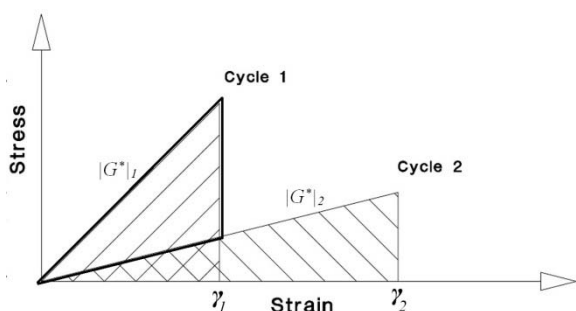


Fig. 1. Schematic diagram of approximate maximum shear strain energy density during two cycles, having different maximum strain

در صورتی که شرایط بارگذاری آزمایش کرنش-ثابت حاکم باشد، مقدار γ_{max} در طول آزمایش ثابت بوده و بنابراین می‌توان مطمئن بود که ΔW^R تنها ناشی از افزایش خرابی در ماده است. لیکن در غیر این صورت، طبق رابطه ۹ در هنگام محاسبه ΔW^R مقدار γ_{max} در دو سیکل متوالی ثابت فرض می‌شود. این بدان معنی نیست که در آزمایش‌های با کرنش غیر ثابت، مقدار کرنش باید در طول آزمایش ثابت فرض شود، بلکه بین هر دو سیکل متوالی i و $i+1$ کرنش ثابت بوده و در مرحله بعد، بین دو سیکل $i+1$ و $i+2$ مقدار γ_{max} تغییر می‌کند.

با فرض واحد بودن G^R (فرض معمول) و با جایگذاری رابطه ۹ در رابطه ۸ رابطه ۱۰ به دست می‌آید. از آن جا که $\gamma_{max,i}$ بیان‌گر بیشترین کرنش در این لحظه است، نیازی به نوشتن اندیس i نیست.

$$\Delta C \approx \left(-\frac{\Delta C}{\Delta D}\right)^{\alpha+1} \times (\pi \times (\gamma_{max})^2 \times G_0^2)^{\alpha} \quad (10)$$

کاهش محاسبات انجام می‌شود و می‌توان به جای آن از معادله دقیق آن (رابطه ۳) استفاده نموده و برای هر سیکل، مقدار شبه کرنش از انتگرال‌گیری رابطه ۴ محاسبه شود.

از طرف دیگر می‌توان رابطه ۱ را برای هر دو سیکل بارگذاری متوالی ($\Delta N = 1$) به صورت زیر تقریب نمود:

$$\Delta W^R|_{\gamma_{max}} \approx \left(-\frac{\Delta W^R|_{\gamma_{max}}}{\Delta D}\right)^{\alpha+1} \quad (8)$$

از آن جایی که در رابطه ۱ از مشتق جزئی چگالی انرژی شبه کرنشی (W^R) استفاده شده است، فقط در صورتی می‌توان آن را به فرم رابطه ۸ درآورد که اطمینان حاصل شود که تغییرات این متغیر تنها به دلیل تغییرات خرابی (D) است. افزایش D در طول آزمایش منجر به کاهش مدول شده و کاهش مدول نیز برای کاهش انرژی جذب شده توسط ماده (W^R) عمل می‌کند.

با این وجود ممکن است در طول بارگذاری مقدار γ_{max} در هر سیکل تغییر کند (برای نمونه در آزمایش تنش-ثابت) که آن نیز به طور مستقل بر W^R تأثیرگذار خواهد بود. از همین رو عبارت γ_{max} در اندیس ΔW^R به معنای آن است که تغییرات W^R نباید تحت تأثیر تغییرات γ_{max} بوده، و با فرض ثابت بودن آن است. در غیر این صورت دستیابی رابطه ۸ از رابطه ۱ صحیح نیست.

برای روشن شدن موضوع، نمودار شماتیک شکل (۱)، تقریبی از بیشینه چگالی انرژی کرنشی (W^R) را در طول دو بارگذاری مختلف نشان می‌دهد. تغییرات W^R در دو سیکل نمایش داده شده، ناشی از دو موضوع است: تغییر مدول و تغییر حداکثر کرنش برشی در سیکل. بر اساس نکته مذکور در بالا، در محاسبه تغییرات چگالی انرژی کرنشی (ΔW^R) باید بخشی از این تغییر مورد نظر قرار بگیرد که تنها ناشی از اختلاف مدول است، که در شکل عبارت است از ناحیه مشخص شده با خطوط پرننگ. پس بر اساس رابطه ۷ می‌توان نوشت:

همانطور که پیش تر آورده شد، یکی از مدل های شناخته شده که توسط مراجع مختلف پیشنهاد شده است و می تواند فرم کلی تابع خرابی $C(D)$ را تشکیل دهد، مدل توانی دوجمله ای است (رابطه ۵). با فرض هماهنگی $C(D)$ بر این مدل، مشتق C نسبت به D بر حسب C به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{dC}{dD} = -c_1^{1/c_2} c_2 \cdot (1 - C)^{1-1/c_2} \quad (11)$$

با فرض کوچک بودن تغییرات مدول نسبی (C) و با جایگزینی رابطه فوق در رابطه ۱۰ می توان برای دو چرخه متوالی نوشت:

$$dC \approx \frac{(c_1^{1/c_2} c_2)^{\alpha+1} (\pi \times G_0^2)^{\alpha} \times (\gamma_{max})^{2\alpha}}{((1 - C)^{1/c_2-1})^{\alpha+1}} \quad (12)$$

با انتگرال گیری از شروع آزمایش $(C = I \text{ و } N = 0)$ تا پایان آزمایش (چرخه N و مدول $C(N)$ خواهیم داشت x) متغیر انتگرال گیری است):

$$C(N) \approx 1 - c_1 \left[(\alpha(1 - c_2) + 1) (\pi G_0^2 c_1 c_2)^{\alpha} \times \int_0^N (\gamma_{max})^{2\alpha} dx \right]^{\frac{c_2}{\alpha(1-c_2)+1}} \quad (13)$$

رابطه ۱۳ مدلی از تابع سختی نسبی قیر را، تحت آزمایش برشی سیکلیک، بر حسب تعداد چرخه بارگذاری (N) ، مدول اولیه (G_0) و کرنش اعمالی (γ) نشان می دهد، که بر پایه تحلیل خرابی محیط پیوسته شکل گرفته است.

این در حالی است که رابطه بین متغیرهای مذکور، در عمل با انجام آزمایش، اندازه گیری شده و قابل مقایسه با مدل فوق است. به عبارت دیگر رابطه ۱۳ یک مدل رگرسیون غیرخطی است که می تواند بر مشاهدات آزمایشگاهی (C, N) و (γ) برازش شده تا پارامترهای برازش $(c_1, c_2 \text{ و } \alpha)$ به دست آیند. برازش مدل های رگرسیون غیرخطی می تواند توسط روش حداقل مربعات غیرخطی یا سایر روش ها انجام شود، که امروزه با بکارگیری برخی از نرم افزارهای تخصصی به

راحتی قابل انجام است.

لازم به یادآوری است که برای تعیین متغیر α به اعمال سطوح مختلف بارگذاری نیاز است. این موضوع از آن جهت اهمیت دارد که لازم است فرآیند رگرسیون با برازش هم زمان داده های هر دو سطح بارگذاری، مقداری از متغیر α را به دست دهد که با شرایط بارگذاری مختلف هماهنگ باشد.

سطوح مختلف بارگذاری را می توان در دو یا چند آزمایش جداگانه اعمال نمود و سپس داده های مشاهدات همه آنها را به طور همزمان با مدل رابطه ۱۳ برازش کرد، و یا با اعمال یک بارگذاری پله ای دو یا چند سطح بارگذاری را در طول یک آزمایش سیکلیک وارد نمود. آزمایش های انجام شده روی نمونه ها باید حداقل تا کاهش ۵۰ درصدی مدول نمونه ها ادامه داشته باشد.

پس از تعیین متغیرهای برازش $(c_1, c_2 \text{ و } \alpha)$ ، می توان با معکوس کردن رابطه ۱۳، مدل پیش بینی عمر خستگی را ساخت. برای انجام این کار لازم است تا الگوی بارگذاری به صورت مشخص در دست باشد.

۳-۱- بارگذاری با کرنش ثابت

رایج ترین الگوی بارگذاری در آزمایش های خستگی، اعمال سیکل های با کرنش حداکثر ثابت است. در این حالت می توان نوشت:

$$\gamma_{max} = \gamma_0$$

$$C(N) = 1 - c_1 [(\alpha(1 - c_2) + 1) (\pi G_0 c_1 c_2)^{\alpha} \gamma_0^{2\alpha} \times N]^{\frac{c_2}{\alpha(1-c_2)+1}} \quad (14)$$

در مدل رگرسیون حالت کرنش-ثابت (رابطه ۱۴)، متغیر G_0 عدد ثابت بوده و متغیرهای C, N و γ_0 مشاهدات آزمایش هستند که داده های آنها، به تعداد سیکل های بارگذاری، در مدل رگرسیون وارد شده تا متغیرهای برازش $(c_1, c_2 \text{ و } \alpha)$ تعیین شوند. همان گونه که ذکر شد، داده های ورودی به مدل، باید متعلق به حداقل دو آزمایش با دو سطح کرنش ثابت متفاوت باشند. به همین دلیل است که γ_0 به عنوان عدد ثابت در مدل قرار داده نمی شود. پس از انجام برازش و به دست آوردن متغیرهای آن، مدل پیش بینی عمر خستگی برای بارگذاری

سیکلیک کرنش-ثابت قابل تعیین است:

$$N_f = \frac{\left(\frac{1-C_f}{c_1}\right)^{\frac{\alpha(1-c_2)+1}{c_2}}}{(\alpha(1-c_2)+1)(\pi G_0 c_1 c_2)^\alpha} \gamma_0^{-2\alpha} \quad (15)$$

در رابطه فوق N تعداد بار گذاری و اندیس f به معنای لحظه پایان فرآیند است. برای نمونه در صورتی که پایان عمر روسازی، رسیدن سختی به ۵۰٪ مقدار اولیه آن فرض شود، در رابطه ۱۵، $C_f = 0.5$ قرار داده می‌شود. مدل پیش‌بینی رابطه ۱۵ با گرفتن C_f و γ_0 به عنوان ورودی، تعداد بار گذاری تا لحظه خرابی را پیش‌بینی می‌نماید.

۲-۳- بار گذاری با کرنش پله‌ای

می‌توان به جای اعمال دو سطح بار گذاری مختلف در دو آزمایش متفاوت (برای تعیین α) دو یا چند بار گذاری را در خلال یک آزمایش، و به صورت پله‌ای انجام داد. مشابه این بار گذاری در روش آزمایش پیمایش کرنش خطی (LAS) که در استاندارد AASHTO TP 101 آمده است [13]، وجود دارد. در این استاندارد، در فرکانس ۱۰ هرتز، سطح کرنش در هر ۱۰ ثانیه به میزان ۱٪ افزایش یافته تا به سطح ۳۰٪ برسد. پس می‌توان نوشت:

$$\gamma_{max} = \frac{\left\lfloor \frac{N}{100} \right\rfloor + 1}{100} = \frac{Floor\left(\frac{N}{100}\right) + 1}{100}$$

$$C(N) \approx 1 - c_1 \left[(\alpha(1-c_2)+1)(\pi G_0 c_1 c_2)^\alpha \times \left(\frac{\left(\frac{Floor\left(\frac{N}{100}\right) + 1}{20} \right) \left(\frac{N}{50} - Floor\left(\frac{N}{100}\right) \right) }{20} \right)^{2\alpha} \right]^{\frac{c_2}{\alpha(1-c_2)+1}} \quad (16)$$

رابطه ۱۶ می‌تواند بر نتایج آزمایش (LAS) برازش داده شود تا متغیرهای c_1 ، c_2 و α به دست آیند. تابع Floor در روابط بالا همان تابع «جزء صحیح» است. حال در صورتی که در نظر باشد که تعداد دفعات بار گذاری تا خرابی (عمر خستگی) نمونه‌ای تحت بارگذاری پله‌ای فوق تعیین شود باید معکوس رابطه ۱۶ را به دست آورد. بدین منظور، با تقریبی قابل

قبول می‌توان تابع جزء صحیح را نادیده گرفت:

$$N_f = 10 \times \sqrt{200 \times \frac{\left(\frac{1-C_f}{c_1}\right)^{\frac{\alpha(1-c_2)+1}{c_2}}}{(\alpha(1-c_2)+1)(\pi G_0 c_1 c_2)^\alpha} + 0.25} - 5 \quad (17)$$

در ادامه، روش پیشنهادی با نتایج آزمایش‌های خستگی روی نمونه‌های قیر اصلاح شده با پلیمر اس‌بی‌اس، به عنوان یکی از انواع قیرهای اصلاح شده شناخته شده اعتبار سنجی شده است.

۴- اعتبارسنجی آزمایشگاهی

(Experimental validation)

برای اعتبارسنجی روش ارائه شده در این پژوهش از نمونه‌های قیر ساده و قیر اصلاح شده پلیمری استفاده شد. نمونه‌های قیر اصلی دارای رده نفوذی ۸۵-۱۰۰ بودند. رده عملکردی نمونه‌های مورد استفاده در تحقیق در جدول (۱) ارائه شده است. از هر کدام از انواع این قیرها چهار نمونه ساخته شده تا در دو آزمایش و با یک بار تکرار مورد بررسی قرار گیرند.

جدول ۱. مشخصات و رده عملکردی قیرهای مورد استفاده در این پژوهش

Notation	Polymer Modification	Performance Grading
Neat	-	PG 58-16
S4	Neat + 4% SBS	PG 64-22
S6	Neat + 6% SBS	PG 70-22

Table 1. Specifications and performance grading of asphalt binders

برای اعتبارسنجی روش پیشنهادی تعیین متغیرهای VECD، این متغیرها با روش جدید و روش معمولی به دست آمده و نتایج با هم مقایسه شدند. بدین منظور از آزمایش پیمایش زمان ۱ در دو سطح بارگذاری و در دمای ۱۵°C برای اعتبارسنجی استفاده شد.

روند کار به این صورت بود که دو آزمایش سیکلیک با کرنش ثابت ۲٪ و ۴٪ انجام گرفت. سپس یک بار با سعی و خطا مقدار α به گونه‌ای تعیین شد که منحنی‌های $C(D)$ دو آزمایش تا حد ممکن بر یکدیگر هماهنگ شوند. سپس با

منحنی مربوط به دو سطح بارگذاری ۲٪ و ۴٪، در روش سعی و خطا و همچنین در روش برازش هماهنگی بالایی دارند. تفاوت جزئی آن دو شاید به دلیل داده‌های پراکنده اطراف منحنی است که در روش برازش در نظر گرفته شده ولی در روش چشمی نادیده گرفته شده‌اند. نتایج جدول (۲) نیز نشان می‌دهد که تفاوت مقادیر α بسیار ناچیز بوده و بنابراین روش پیشنهادی به خوبی عمل کرده است.

برای مقایسه بهتر، در شکل (۳) مقادیر پارامترهای VECD که از دو روش فوق به دست آمده‌اند در برابر هم رسم شده‌اند. رگرسیون خطی (تک‌برازنده) برازش یافته بر این داده‌ها نشان می‌دهد که اولاً مقادیر به دست آمده از دو روش به یکدیگر نزدیک هستند (ضریب ۰٫۹۹۹۴) و دوم این همبستگی از قطعیت بالایی برخوردار است ($R^2 = 99.9\%$).

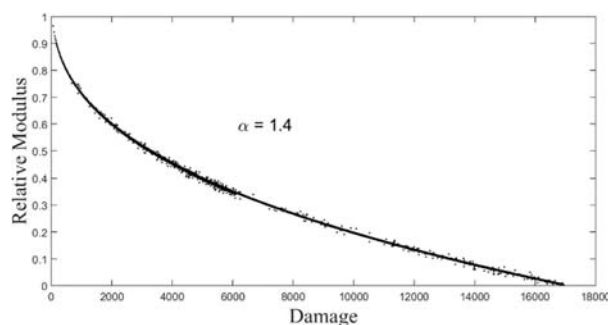
برازش یک مدل توانی دو جمله‌ای بر هر دو منحنی مقادیر C_1 و C_2 نیز تعیین شدند. در مرحله بعد داده‌های پاسخ اولیه این دو آزمایش با رابطه ۱۴ برازش شده و مقادیر C_1 ، C_2 و α به دست آمدند. در عمل مشاهده شد که نتایج این دو روش تفاوت بسیار کمی با یکدیگر دارند زیرا همان فرآیندی که در روش اول به صورت چشمی باید انجام شود، در روش پیشنهادی این پژوهش با یک مرحله برازش مدل رابطه ۱۴ انجام می‌شود.

شکل (۲) نمایی از نتایج تابع $C(D)$ که به دو روش مذکور به دست آمده‌اند را نشان می‌دهد. داده‌های این نمودارها برای یکی از تکرارها است.

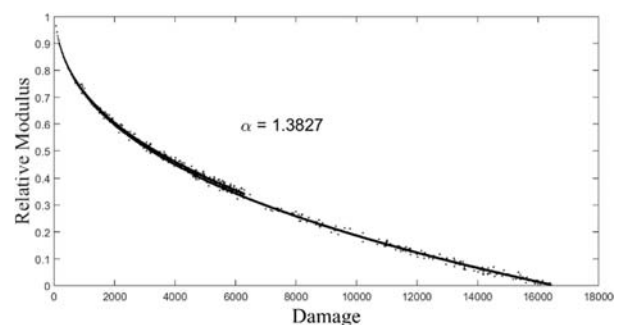
همچنین نتایج برازش منحنی رابطه ۵ بر داده‌های به دست آمده از دو روش فوق در آمده است. متغیرهای این جدول میانگین دو تکرار آزمایش‌ها است.

همانگونه که در منحنی‌های شکل (۲) دیده می‌شود، دو

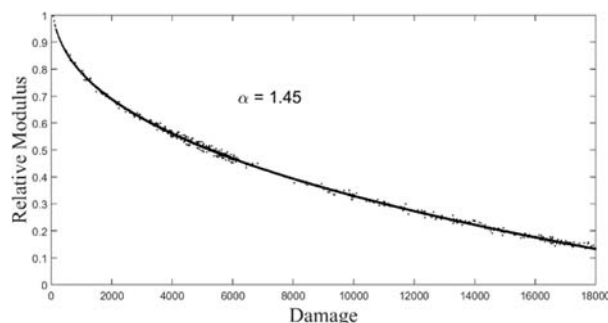
شکل ۲. نتایج تشکیل منحنی‌های $C(D)$ برای نمونه‌های مختلف قیر، به دو روش سعی و خطا و برازش



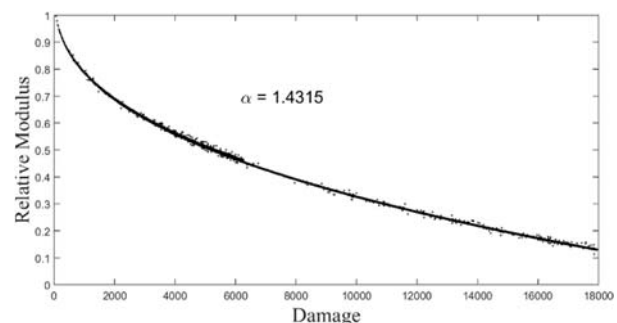
a) Neat sample, try and error method



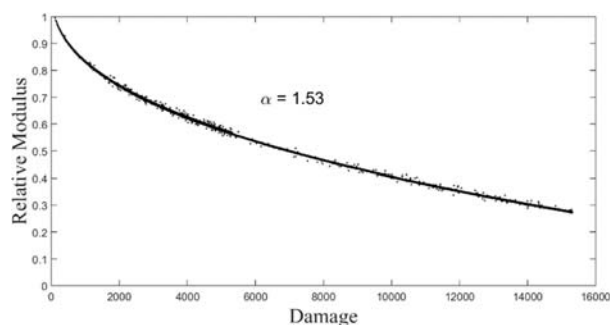
b) Neat sample, regression method



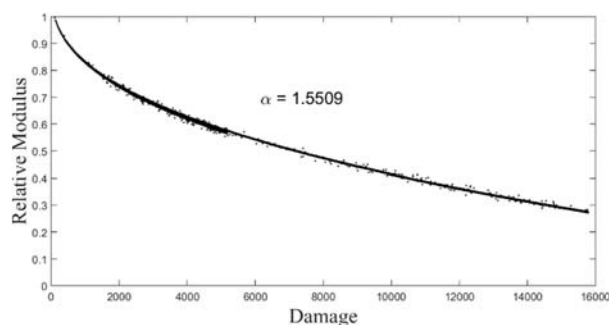
c) S4 sample, try and error method



d) S4 sample, regression method



e) S6 sample, try and error method



f) S6 sample, regression method

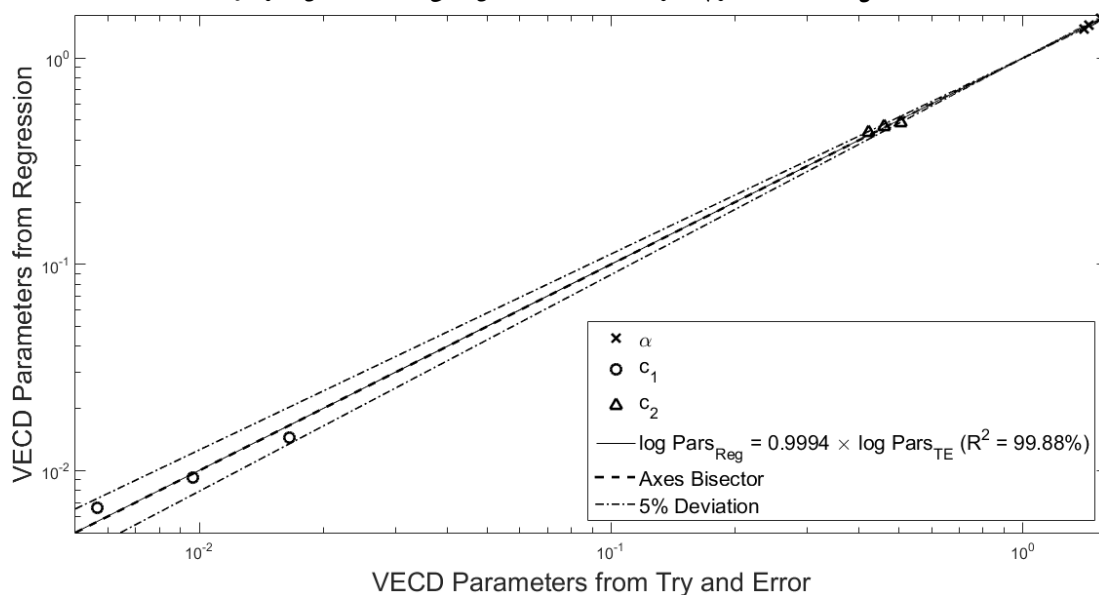
Fig. 2. Damage data of different asphalt samples, acquired from “try and error” and “regression” methods

جدول ۲. نتایج پارامترهای روش VECD، به دست آمده از دو روش (میانگین دو تکرار)

	Try and error method			Regression method		
	α	c_1	c_2	α	c_1	c_2
Neat	1.41	0.01655	0.4214	1.3742	0.01443	0.4371
S4	1.45	0.009665	0.4597	1.4472	0.009207	0.4653
S6	1.545	0.005651	0.5051	1.5492	0.006596	0.4871

Table 2. Parameters of VECD Analysis, acquired from “try and error” and “regression” methods (values are the average of two replications)

شکل ۳. مقایسه مقادیر پارامترهای VECD از روش سعی و خطا و روش رگرسیون

**Fig. 3.** VECD parameters acquired from Try and Error method vs. Regression method

بنابراین تفاوت مقادیر به دست آمده برای این دو متغیر در دو روش ارائه شده در بالا دلیل بر تفاوت شکل تابع خرابی نیست. با این وجود جدول (۲) هماهنگی تقریبی مقادیر c_1 و c_2 را در دو روش سعی و خطا و برازش تأیید می کند.

مقادیر پارامترهای c_1 و c_2 در جدول (۲) اختلاف کمی بین دو روش مذکور دارند. البته لازم به ذکر است که شکل کلی تابع $C(D)$ تنها به مقدار α بستگی دارد. مقادیر c_1 و c_2 برای تقریب زدن روند این منحنی تعیین می شوند. همچنین ممکن است دو ترکیب مختلف c_1 و c_2 منجر به ایجاد شکل یکسانی از تابع رابطه ۵ شوند، در حالی که مقادیر آن‌ها در دو ترکیب متفاوت باشد.

۵- نتیجه گیری و پیشنهاد

در این پژوهش روشی بهینه برای تعیین عمر خستگی قیر، بدون نیاز به آزمایش‌های متعدد ارائه شد. همچنین روش معرفی شده به کمک آزمایش‌هایی، روی نمونه‌های قیر اصلاح شده با پلیمر اس‌بی‌اس (SBS) اجرا شده و نتایج آن با روش‌های معمولی مقایسه شد. از مزایا و ویژگی‌های این روش می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- این روش بر پایه رویکرد خرابی محیط پیوسته ویسکوالاستیک (VECD) بنا شده است. با این وجود برای به دست آوردن مدل عمر خستگی نیازی به محاسبه مقدار خرابی در طول آزمایش نیست.
 - در این روش تنها یک مدل رگرسیون بر پاسخ اولیه ماده برازش شده و متغیرهای لازم برای تشکیل رابطه عمر خستگی به دست می‌آید.
 - مدل رگرسیون مذکور برای دو حالت خاص آزمایش خستگی کرنش-ثابت و آزمایش پله‌ای (برای نمونه آزمایش LAS) ساده‌سازی شده، و مدل‌های عمر خستگی متناظر با هر کدام نیز ارائه شد.
 - نتایج اعتبارسنجی نشان داد که روش معرفی شده در این پژوهش به خوبی می‌تواند به تعیین پارامترهای مورد نیاز در تحلیل VECD، و در ادامه به تشکیل مدل عمر خستگی ماده منجر شود. هماهنگی نتایج روش رگرسیون با روش سعی و خطا به ضریب همبستگی ۹۹٫۸۸٪ انجامید.
- مدل‌های ارائه شده در این پژوهش برای حالاتی خاص توسعه داده شدند، که عبارت است از: بارگذاری سیکلیک برشی کرنش-کنترل نمونه قیر با دستگاه DSR، با تقریب رابطه توانی دوجمله‌ای، و در نظر گرفتن تقریب‌های مقادیر شبه‌کرنش. حالت فوق برای کاهش حجم گزارش انتخاب شده است، در حالی که هر کدام از ویژگی‌های مذکور می‌توانند تغییر کرده و معادلات دوباره بازنویسی شوند. برای نمونه تمامی روابط می‌توانند برای سایر بارگذاری‌ها، روی هندسه‌های مختلف نمونه‌های مخلوط، با محاسبه دقیق مقادیر شبه‌کرنش و به کمک سایر روابط پیشنهادی در مراجع مختلف برای شبیه‌سازی روند تابع خرابی به دست آیند.

سپاسگزاری

نویسندگان تمایل دارند که مراتب قدردانی خود را از شرکت نفت جی و شرکت نفت پا سارگاد، به دلیل حمایت‌های فنی و تدارکاتی اعلام نمایند.

مراجع

- [1] Tayebali, A.A., Rowe, G.M. & Sousa, J.B., 1992. Fatigue response of asphalt-aggregate mixtures (with discussion). *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 61.
- [2] Baburamani, P., 1999. *Asphalt fatigue life prediction models: a literature review* (No. ARR 334).
- [3] Bankowski, W. & Sybilski, D., 2007, September. Energetic method as an alternative for conventional method in fatigue life analysis of bituminous mixtures. In *4th International SIIV Congress*.
- [4] Holzapfel Gerhard, A., 2000. Nonlinear solid mechanics.
- [5] Kelly PA. Mechanics Lecture Notes: An introduction to Solid Mechanics: Available from <http://homepages.engineering.auckland.ac.nz/~pkel015/SolidMechanicsBooks/index.html>.
- [6] Park, S.W. & Schapery, R.A., 1997. A viscoelastic constitutive model for particulate composites with growing damage. *International Journal of Solids and Structures*, 34(8), 931-947.
- [7] Park, S.W., Kim, Y.R. & Schapery, R.A., 1996. A viscoelastic continuum damage model and its application to uniaxial behavior of asphalt concrete. *Mechanics of Materials*, 24(4), 241-255.
- [8] Schapery, R.A., 1975. A theory of crack initiation and growth in viscoelastic media, Part I: Theoretical Development, Part II: Approximate Method of Analysis, Part III: Analysis of Continuous Growth. *International Journal of Fracture*, 11(1), 141-159; 369-388, 549-562.
- [9] Johnson, C.M., 2010. Estimating asphalt binder fatigue resistance using an accelerated test method (Doctoral dissertation).
- [10] Lytton, R.L., Chen, C.W. & Little, D.N., 2001. *Microdamage healing in asphalt and asphalt concrete, volume IV: A viscoelastic continuum damage fatigue model of asphalt concrete with*

- microdamage healing* (No. FHWA-RD-98-144,).
- [11] Lytton, R.L., Chen, C.W. & Little, D.N., 2001. *Microdamage healing in asphalt and asphalt concrete, volume III: A micromechanics fracture and healing model for asphalt concrete* (No. FHWA-RD-98-143,).
- [12] Underwood, B.S., Baek, C. & Kim, Y.R., 2012. Simplified viscoelastic continuum damage model as platform for asphalt concrete fatigue analysis. *Transportation Research Record*, 2296(1), 36-45.
- [13] AASHTO Designation: TP 101-12-UL. Standard Method of Test for Estimating Damage Tolerance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep. Washington, D.C.: America Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Report No.: TP 101-12-UL.

An Accelerated Method to Determine Fatigue Life of Asphalt Binder Using Viscoelastic Continuum Damage Approach

Mohammad Mahdi Dibae¹, Amir Kavussi^{2*}

1- Ph.D Student., Highway Group., Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

2- Prof., Highway Group., Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

*kavussia@modares.ac.ir

Abstract:

Asphalt binder has an important role in asphalt mixture behavior. Therefore binder fatigue characterization has been widely investigated. Significant research efforts were focused on developing reliable fatigue prediction models. Those efforts in the beginning were concentrated on relating initial responses, such as strain or stress levels of asphalt mixtures to their fatigue life. Such phenomenological relationships were usually developed by means of testing samples under different loading conditions and generating regression models. Considering different combinations of loading conditions, and the long time duration needed for a single fatigue test, the phenomenological approach requires extensive time and funding. Therefore, the mechanistic approaches which substitute excessive testing with analytic equations, have become more common in the field of fatigue behavior characterization. Viscoelastic continuum damage (VECD) mechanics is one of the well-studied mechanistic approaches to characterize the fatigue life of viscoelastic materials. In this approach an internal state variable (ISV), called damage, is defined to stand as a representative of material structural state. Then the state of the modulus is determined as a function of damage, namely damage function. Determination of damage function can facilitate asphalt fatigue prediction under different loading patterns. However, VECD analysis has its own complications. The damage parameter needs to be calculated in each cycle during the test, while its calculation needs damage function trend to be known. Thus, damage parameter can only be determined using a procedure of try and error. In this research an inventive method has been introduced that can simplify efforts to yield damage function, requiring less time and fewer samples. A formulation framework has been presented here which is based on an analytical solution of the governing differential equation of damage evolution power-law. The solution is made assuming the ruling conditions of this study. These assumptions which are clarified in the paper could be reconsidered to form new formulations through a similar approach. Using the formulation, developed in this study, damage function can be found, using the data obtained from two constant-strain, or a single incremental-strain tests. According to this method Time Sweep Test can be performed at two different strain amplitudes and the developed models could be fit to the initial responses data of the material to yield VECD parameters needed to constitute the fatigue prediction model. This approach uses a nonlinear regression analysis to determine VECD parameters, even without calculating the values of damage during test. Afterward, the proposed procedure was validated by experimental tests. Time Sweep tests were performed on binder samples modified with SBS polymer. The binder samples were modified using SBS Polymer, due to its popularity among asphalt researchers. Such modification transforms a simple binder to a complex one. Results showed that the try and error procedure can be substituted by regression model to yield damage function in less time. The discrepancies between the data obtained from the two above-mentioned methods were negligible. It was concluded that the similar results are due to the same mechanism, used in try and error and regression methods which is performed through different approaches.

Keywords: Asphalt, Fatigue, Viscoelastic Continuum Damage