

## ارائه مدلی برای پیش بینی رفتار مخلوط های آسفالتی

رضا پور حسینی<sup>i\*</sup>؛ سید عبد العظیم امیر شاه کرمی<sup>ii</sup>

### چکیده

تکرار بارگذاری چرخ سبب افزایش افت و خیز به علت نرم شدگی مصالح و کاهش سختی سیستم روسازی می شود. در این تحقیق میزان کاهش سختی لایه های آسفالتی با انجام تحلیل برگشتی بر روی منحنی های خیز سطح روسازی زیر بار چرخ تعیین گردید. در تحلیل برگشتی از مدل غیر خطی ویسکو - الاستوپلاستیک و روش اجزاء محدود استفاده شد. مدلسازی رفتار بتن آسفالتی با مدل ویسکو - الاستوپلاستیک به منظور بررسی کاهش سختی روسازی برای اولین بار در اینجا مورد توجه قرار می گیرد. برتری این مدل بر مدل های ویسکو الاستیک توانایی در برآورد دقیق تر عملکرد و در پایان طول عمر مفید روکشهای آسفالتی است.

### کلمات کلیدی

مدل ویسکو - الاستوپلاستیک، نرم شدگی مصالح، بتن آسفالتی، تحلیل برگشتی

## *A Model for Behavior Prediction of Asphalt Mixtures*

R. Pourhoseini A. ; S. A. A. Shahkarami

### ABSTRACT

The vehicle load repetition on the pavements leads to further deflections due to the material softening and the reduction of pavement stiffness. In this research, the stiffness reduction studied using a back analysis of surface bowls under wheel load. In this back analysis the visco-elastoplastic model and the finite element method used. There seems to be no evidence of evaluating the stiffness reduction of pavements using visco-elastoplastic modeling of asphalt concrete behavior. The results indicated that this modeling approach provides a more accurate predication of performance and useful cycle life of asphalt mixtures when compared to the visco-elastic models.

### KEYWORDS

visco-elastoplastic model, material softening, asphalt concrete, back analysis

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۷/۹/۲۱

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۸/۴/۲۴

<sup>i\*</sup> نویسنده مسئول و استادیار، عضو هیئت علمی دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه یزد

Email: r\_porhoseini@yazduni.ac.ir

<sup>ii</sup> دانشیار، عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر Email: [amirshah@aku.ac.ir](mailto:amirshah@aku.ac.ir)

آنالیز برگشتی

در مدل‌های ویسکو-الاستوپلاستیک هنگامی که تنش از حد جاری شدن تجاوز می‌کند هم کرنش الاستیک و هم کرنش ویسکو پلاستیک بوجود می‌آید. فرض می‌شود که کرنش کل به دو جزء کرنش الاستیک،  $\epsilon_e$  و ویسکو پلاستیک،  $\epsilon_{vp}$  قابل تجزیه است [۱۰].

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_{vp} \quad (1)$$

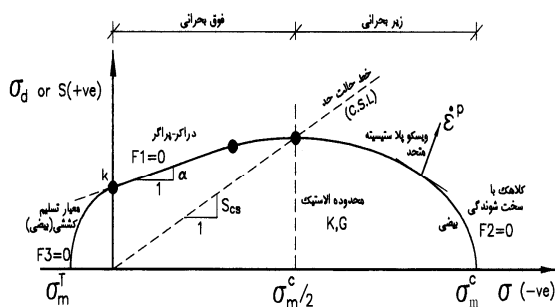
آهنگ تغییرات کرنش ویسکو پلاستیک را می‌توان از قانون جریان ویسکو پلاستیک تعیین نمود.

$$\dot{\epsilon}_{vp} = \gamma \langle \Phi(F) \rangle \frac{\partial Q}{\partial \sigma_{ij}} \quad (2)$$

در (۲)،  $\Phi$  تابع تنظیم کننده رشد کرنش،  $\gamma$  پارامتر جریان،  $F$  تابع تسلیم،  $Q$  تابع پتانسیل پلاستیک و  $\dot{\epsilon}_{vp}$  آهنگ تغییرات کرنش ویسکو پلاستیک با زمان می‌باشند. در مدل‌های همسان  $F \equiv Q$  است.

در مدل‌های رفتاری ویسکو-الاستوپلاستیک انتخاب سطح تسلیم اولین فرض به منظور پیش بینی رفتار مصالح می‌باشد، هر اندازه سطح تسلیم جامع تر باشد مدل وابسته به آن نیز قوی‌تر خواهد بود. در اینجا توابع تسلیم بر حسب تنش هیدرواستاتیک متوسط،  $\sigma_m$  و نامتغیر دوم تنش‌های تفاضلی  $s$  نوشته شده اند. تابع تسلیم در شکل (۱) نشان داده شده است. رابطه  $s$  بر اساس تانسور تنش‌های تفاضلی  $s_{ij}$  و تانسور تنش در  $\sigma_{ij}$  آمده است.

$$\sigma_m = \frac{1}{3} \sigma_{kk}, \quad s = \sqrt{\frac{1}{2} (s_{ij} s_{ij})} = \sqrt{\frac{1}{2} \left( \sigma_{ij} \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk}^2 \right)}, \quad i, j, k = 1, 2, 3 \quad (3)$$



شکل (۱): سطح تسلیم برای مدل ارائه شده [۹].

با انجام آزمایش های غیر مخرب ( Falling Weight Deflectometer (F.W.D. تیر بنکمن، Road Rater و انجام آنالیز برگشتی بر اساس اندازه گیری خیزها می‌توان خصوصیات مکانیکی و عملکرد لایه های روسازی را بطور غیر مستقیم برآورد نمود [۱]. مطالعات متعدد انجام شده بر روی مقاطع روسازی آزمایشی و در حال بهره برداری نشان داده اند که ارتباط نزدیکی بین عملکرد و خیز سطح روسازی وجود دارد [۲]. استفاده از انحنای کاسه ای شکل بوجود آمده در زیر چرخ در مقالات علمی معتبر به منظور برآورد کیفیت لایه های روسازی مورد توجه قرار گرفته است، برای مثال [۳]. در این روش پارامتر های مکانیکی لایه های روسازی برای بهترین انطباق با نتایج میدانی تعیین می‌شوند. برنامه های مختلفی بدین منظور تهیه شده اند. برنامه آنالیز برگشتی VESYSBACK [۴] نمونه ای از این برنامه ها می‌باشد که بر اساس برنامه VESYS III [۵] آماده شده است. برنامه VESYS III بر اساس تئوری لایه ای برمیستر عمل می‌نماید.

مدل‌های ویسکو-الاستوپلاستیک در مدلسازی رفتار آسفالت در مجموعه روسازی راه و پیش بینی عملکرد دراز مدت توسط محققین استفاده می‌شوند. به عنوان نمونه [۶] از روش ویسکو-الاستوپلاستیک در تعیین عملکرد روسازی [۷] در تعیین شیار شدگی (Rutting) آسفالت از مدل الاستو-ویسکو پلاستیک به همراه تاثیر تغییرات دما بهره برده‌اند. Uzan (۲۰۰۵) مدلی بصورت ویسکو الاستیک - ویسکو پلاستیک به منظور پیش بینی گسیختگی برای آسفالت ارائه نموده است [۸]. این مدلها کرنش را به مولفه های الاستیک، ویسکو الاستیک، پلاستیک و ویسکو پلاستیک تجزیه می‌نمایند.

در این تحقیق ابتدا مدل ویسکو-الاستوپلاستیک مناسب برای آسفالت ارائه شده است. رویه تسلیم این مدل از [۹] انتخاب گردید. آنالیزهای عددی توسط برنامه اجزاء محدود POLYMAT انجام پذیرفت. این برنامه توسط مؤلف تهیه شده است و مدل‌های غیر خطی و ویسکو-الاستوپلاستیک را نیز شامل می‌شود. در ادامه اعتبار این مدل در شبیه سازی رفتار خزشی بتن آسفالتی مورد بررسی قرار می‌گیرد و با استفاده از این مدل و آنالیز برگشتی، کاهش پارامترهای مکانیکی لایه های آسفالتی به علت عبور چرخ مشخص خواهد شد.

$$\bar{\varepsilon}_V^p = \bar{\varepsilon}_V^p + \varepsilon_V^p \quad (8)$$

$$\bar{\varepsilon}_V^p = W [1 - \exp(D\sigma_m^c)] \quad (9)$$

ناحیه انقطاع کشش  $F_3 = 0$  معیار تسلیمی است که در وضعیت تنش های کششی مورد استفاده قرار می‌گیرد. سطح تسلیم در ناحیه کشش به صورت بیضی در نظر گرفته شد که از نقطه  $(s = 0, \sigma_m = \sigma_m^T)$  عبور کرده و در نقطه  $(s = k, \sigma_m = 0)$  بر معیار دراگر - پراگر مماس می‌باشد. پارامتر مقاومت کششی آسفالت است.

$$F_3 = \frac{(k - 2\alpha\sigma_m^T)}{(\sigma_m^T)^2} \left( \sigma_m + \frac{\alpha(\sigma_m^T)^2}{k - 2\alpha\sigma_m^T} \right)^2 + \frac{s^2}{k} - \frac{(k - \alpha\sigma_m^T)^2}{k - 2\alpha\sigma_m^T} = 0 \quad (10)$$

در ادامه از روش آنالیز برگشتی بمنظور تعیین پارامتر های مدل استفاده خواهد شد.

### ۳- مدلسازی خزش بتن آسفالتی با مدل ارائه شده

نتایج آزمایشهای خزش نمونه های آسفالتی ارائه شده در [۱۲] به منظور اعتبار سنجی رفتار خزش در مدل ویسکو-الاستوپلاستیک پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات مصالح، قیر مصرفی و مخلوط آسفالتی بصورت جداول و منحنی‌ها در همان مقاله مشخص شده اند.

نمونه های تهیه شده برای آزمایش خزش دارای قطر (۴ in) ۱۰۲mm و ارتفاع (۸ in) ۲۰۳ mm می‌باشند و توسط دستگاه تراکم دورانی تکراس (Texas Gyrotory Compactor) متراکم شده اند. عمل متراکم سازی نمونه‌ها به گونه ای تنظیم شده تا درصد حفرات هوا (تخلخل) در کلیه نمونه‌ها چیزی بین ۵ الی ۶٪ باشد. آزمایش های خزش آسفالت به روش سیستم ویسکو-الاستیک [۷] انجام گرفته است و تغییر شکل‌های نمونه در بارگذاری استاتیک (۶ psi) ۴۱ kPa برای دوره بارگذاری ۱۰۰۰ sec و درجه حرارت ۴۰°C اندازه گیری شده است.

شکل‌های (۳) الی (۶) نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی را در درصد های شکستگی مختلف نشان می‌دهند.

سطوح تسلیمی که با ترکیب آنها سطح تسلیم مدل شکل می‌گیرد عبارتند از:  $F_1 = 0$  معیار تسلیم دراگر- پراگر (۱۹۵۲) که در وضعیت گسیختگی برشی فعال می‌گردد،  $F_2 = 0$  کلاهدک بیضی شکلی است که بر خط دراگر- پراگر مماس است و در وضعیت تنش های جانبی زیاد فعال خواهد شد،  $F_3 = 0$  سطح تسلیم ناحیه کششی در نظر گرفته شده است. در شکل (۱)،  $\sigma_m^T, \sigma_m^c, k, \alpha$  پارامتر های مدل می‌باشند که در ادامه تعریف می‌شوند.

معیار تسلیم دراگر- پراگر به صورت (۴) نوشته می‌شود.

$$F_1 = \alpha\sigma_m + s - k = 0 \quad (4)$$

$k, \alpha$  به ترتیب بر حسب زاویه اصطکاک داخلی  $\phi$  و ضریب چسبندگی  $C$  ارائه می‌شود.

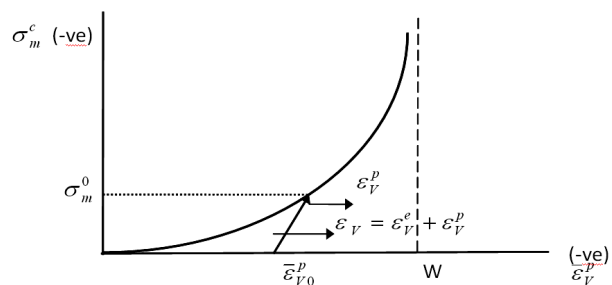
$$\alpha = \frac{6\sin\phi}{\sqrt{3}(3-\sin\phi)}, k = \frac{6C\cos\phi}{\sqrt{3}(3-\sin\phi)} \quad (5)$$

در مدل حاضر کلاهدک به شکل بیضی در نظر گرفته شده است که بر خط دراگر- پراگر مماس است و از مبدأ مختصات و مقاومت فشاری  $\sigma_m^c$  نیز عبور می‌کند و با توجه به پارامترهای  $\sigma_m^c, k, \alpha$  و شکل (۱) به صورت (۶) می‌باشد.

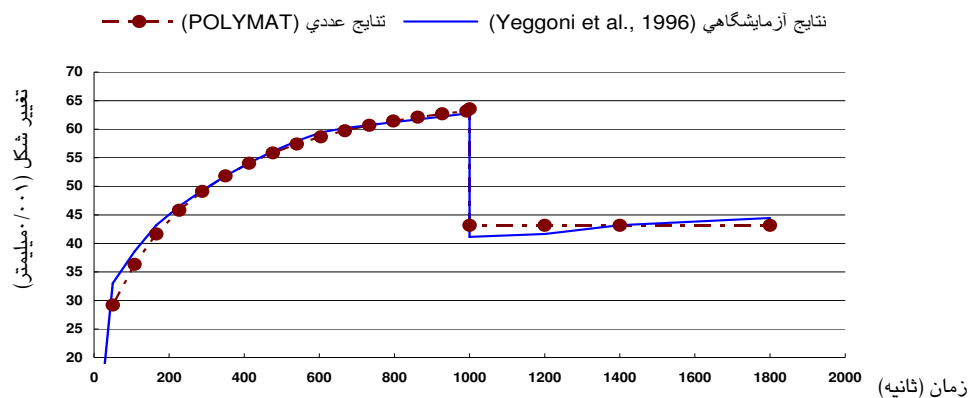
$$F_2 = \frac{\sigma_m(\sigma_m - \sigma_m^c) + R^2 s^2}{R^2 s - R\sigma_m^c/2} = 0 \quad (6)$$

$$R^2 = \frac{(\sigma_m^c)^2}{4k(k - \alpha\sigma_m^c)} \quad (7)$$

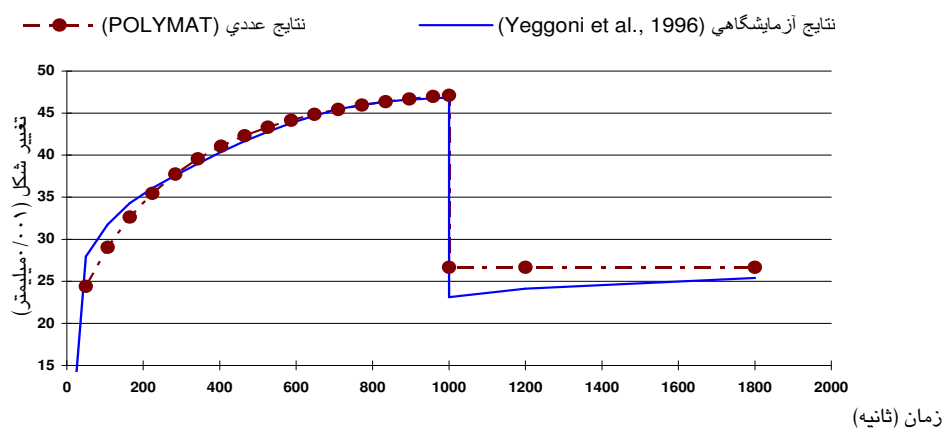
برای این قسمت از سطح سیالان سخت شوندهگی ایزوترپ غیرخطی مطابق با شکل (۲) در نظر گرفته شده است. در این مدل پارامتر سخت شوندهگی به کرنش حجمی پلاستیک وابسته شده است. میزان تراکم اولیه با،  $\bar{\varepsilon}_{V_0}^p$  (کرنش مؤثر حجمی پلاستیک اولیه)، مشخص شده است. با این حساب میزان افزایش تراکم به علت بارگذاری برابر است با [۱۱]:



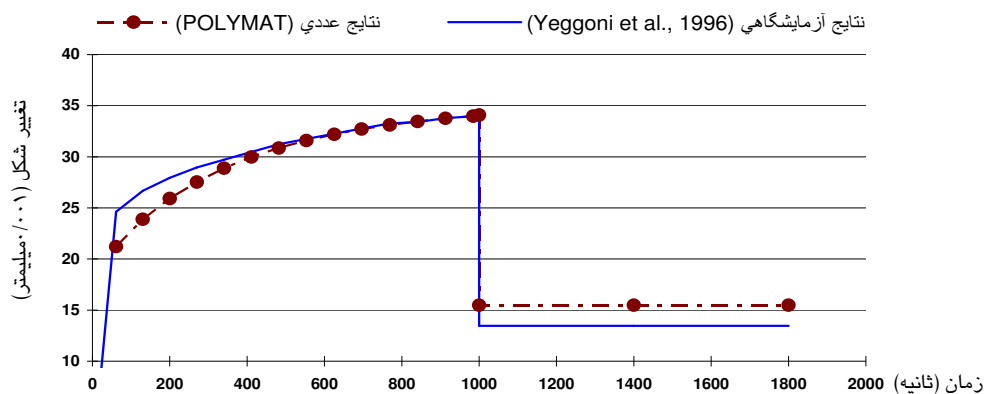
شکل (۲): منحنی سخت شوندهگی غیر خطی برای کلاهدک [۱۱].



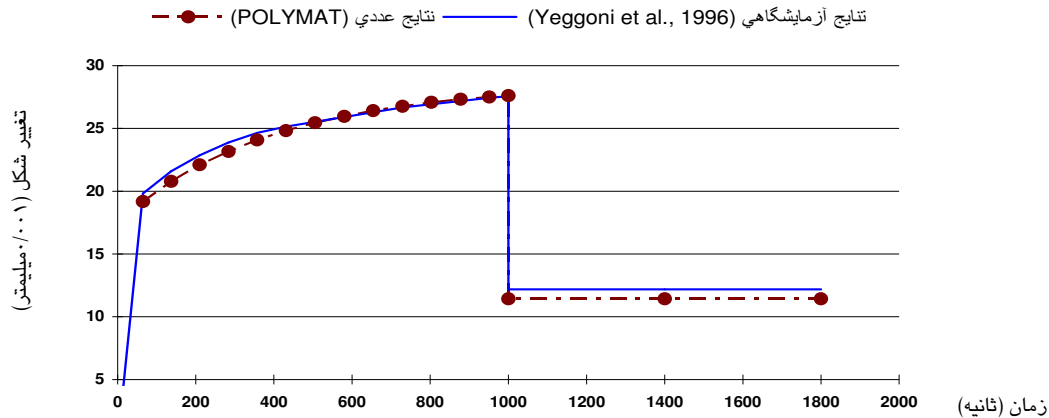
شکل (۳): نتایج آزمایشگاهی و عددی خزش استاتیک مخلوط آسفالتی با ۰٪ مصالح آهکی شکسته.



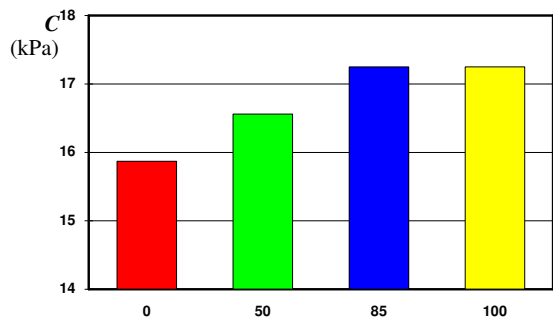
شکل (۴): نتایج آزمایشگاهی و عددی خزش استاتیک مخلوط آسفالتی با ۵۰٪ مصالح آهکی شکسته.



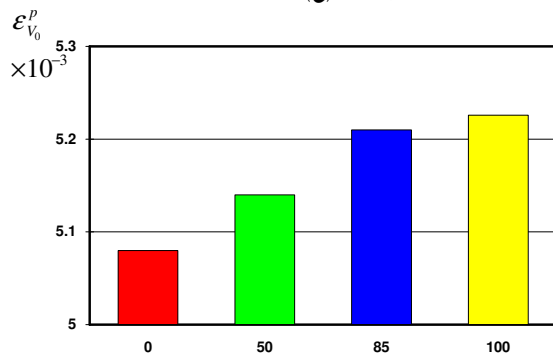
شکل (۵): نتایج آزمایشگاهی و عددی خزش استاتیک مخلوط آسفالتی با ۸۵٪ مصالح آهکی شکسته.



شکل (۶): نتایج آزمایشگاهی و عددی خزش استاتیک مخلوط آسفالتی با ۱۰۰٪ مصالح آهکی شکسته.



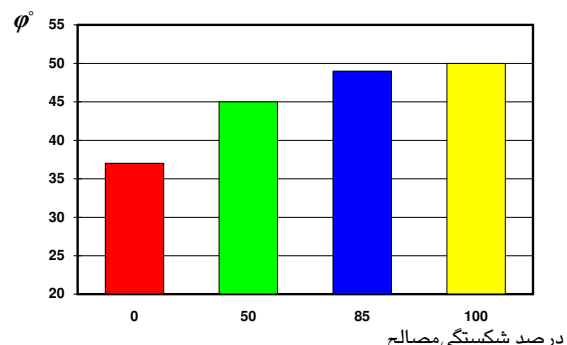
(ج) درصد شکستگی مصالح



(د) درصد شکستگی مصالح

با توجه به شکل های (۳) الی (۶)، نتایج عددی به دست آمده از مدل برابری خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند. براین اساس اعتبار مدل پیشنهادی برای مدل سازی رفتار خزشی آسفالت با توجه به نتایج یادشده تأیید می‌گردد.

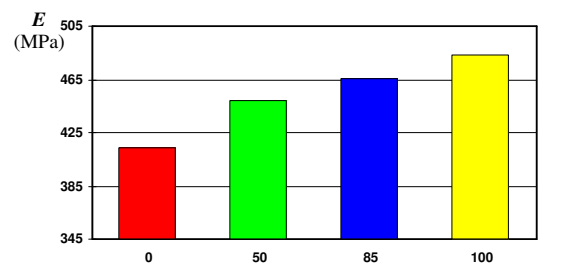
شکل (۷) تغییرات پارامتر مدل در شبیه سازی خزش نمونه های مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش درصد شکستگی پارامترهای مدول الاستیسیته، زاویه اصطکاک داخلی، میزان چسبندگی، افزایش می‌یابند که ضمن تطابق با واقعیت بر درستی عملکرد و نتایج مدل دلالت دارد.



(الف)

شکل (۷): تغییرات پارامترهای مدل ویسکو الاستو پلاستیک با درصد شکستگی در آزمایش خزش استاتیک و دمای ۴۰ °C.

درصد شکستگی مصالح (درصد وزنی دانه های مانده بر روی الک نمره ۸ که حداقل در دوجبهه شکستگی دارند) بر روی تمام پارامترهای مکانیکی مدل اثر می‌گذارد، این تاثیر بر روی پارامترهای مدول الاستیسیته  $E$  و زاویه اصطکاک داخلی  $\phi$  بیشتر می‌باشد.



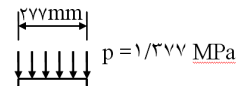
(ب)

### ۴- نرم شوندگی آسفالت با تکرار بارگذاری

اندازه گیری های انجام شده از نمونه آزمایشی Mulgrave [۱۳] در مرکز تحقیقات راههای استرالیا (ARRB) توسط Cebon و Collop (۱۹۹۶) به منظور آنالیز برگشتی مورد استفاده قرار گرفته است.

مشخصات کلی استفاده شده در این آنالیز برگشتی در شکل (۸) نشان داده شده است. بار چرخ ۸۳ kN می باشد که در سطح دایره ای با قطر ۲۷۷ mm و فشار یکنواخت بر روسازی اعمال می گردد.

به لحاظ اینکه منحنی خیز کاسه ای نسبت به ضریب پواسن لایه ها حساس نیست [۳]، مقدار آن در کلیه آنالیزها ثابت فرض گردید. در اینجا سیستم سه لایه ای روسازی به صورت تقارن محوری و با المان های هشت گره ای مدل سازی شد. از ضخامت نامحدود بستر ۱/۵ متر آن در مدل اجزاء محدود در نظر گرفته شده است.

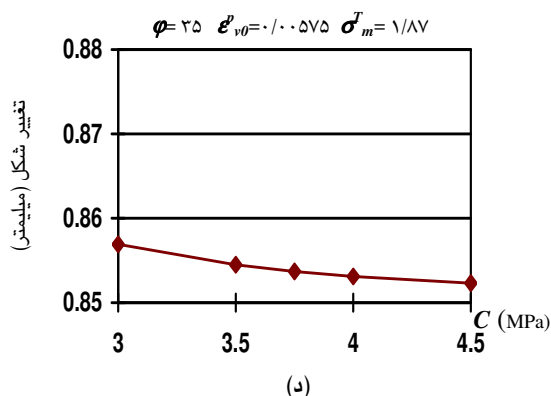
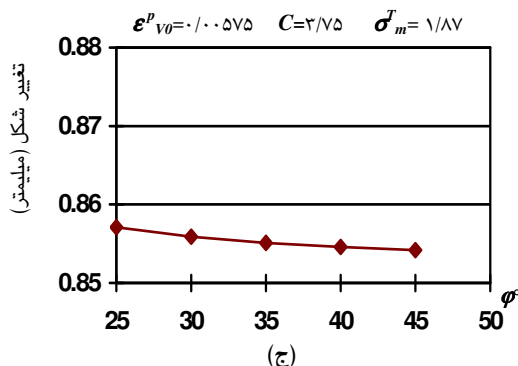
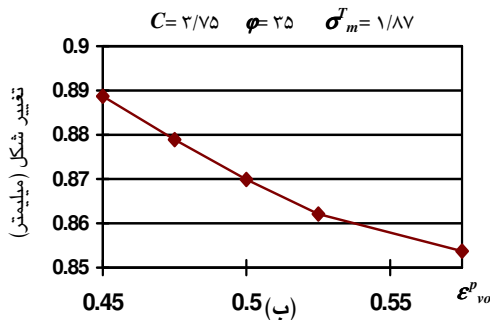
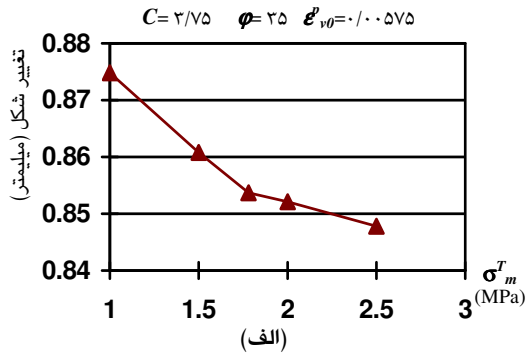


$v = 0.4$	$E = \text{VAR.}$	لایه اول (آسفالت)	۱۲۰ mm
$v = 0.4$	$E = \text{VAR.}$	لایه دوم (اساس)	۸۰۰ mm
$v = 0.4$	$E = \text{VAR.}$	لایه سوم (بستر)	∞

شکل (۸): مشخصات کلی مقطع روسازی mulgrave، مورد استفاده در آنالیز برگشتی

با توجه به انتشار و رشد ترک ها با افزایش دفعات عبور چرخ از روی لایه آسفالت پارامترهای مکانیکی مصالح آسفالتی کاهش می یابد [۱۴]. بدین لحاظ با افزایش تعداد عبور چرخ، افت و خیز بیشتری در سیستم روسازی بوجود می آید. به کمک مدل ارائه شده در این تحقیق تغییر در پارامترهای ویسکو-الاستوپلاستیک آسفالت با گذشت زمان (تکرار بارگذاری) تعیین می شود.

به منظور تعیین میزان تأثیر گذاری پارامترهای مدل بر نتایج آنالیزها، مطالعه پارامتری (Parameter Study) انجام شده است. در این مطالعه تأثیر چهار پارامتر  $(\phi, \sigma_m^T, \epsilon_{v0}^p, C)$  بر تغییر شکل مرکز بارگذاری بررسی شده است و پارامترهای  $W$  و  $D$  بترتیب برابر  $0.06$  و  $0.79$  فرض شده اند. شکل (۹) تأثیر این پارامترها را نشان می دهد. مطالعه پارامتری نشان می دهد نتایج آنالیزها به پارامتر زاویه اصطکاک داخلی  $\phi$  و پارامتر چسبندگی  $C$ ، حساسیت کمتری نسبت به دو پارامتر



شکل (۹): تأثیر پارامترهای  $(\phi, \sigma_m^T, \epsilon_{v0}^p, C)$  بر تغییر شکل مرکز بارگذاری

جدول (۱) تغییرات پارامترهای مدل ویسکو-الاستوپلاستیک آسفالت را با توجه با آنالیز برگشتی منحنی های خیز

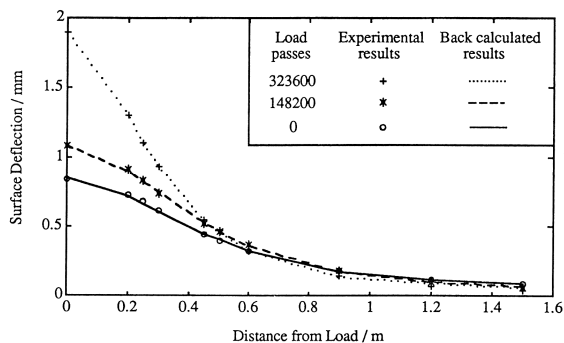
جدول (۱): پارامترهای مدل ویسکو الاستو پلاستیک آسفالت در دفعات عبور چرخ

تعداد دفعات عبور	E (MPa)	$\nu$	$\sigma_{Tm}$ (MPa)	C (MPa)	$\epsilon_{pv} \times 10^{-3}$	$\varphi^{\circ}$	$\gamma \times 10^{-4}$
(۱)	(۲)	(۳)	(۴)	(۵)	(۶)	(۷)	(۸)
۰	۶۲۵۰	۰/۴	۱/۸۷	۳/۷۵	۵/۷۵	۳۵	۱/۲
۱۴۸۲۰۰	۴۱۶۰	۰/۴	۱/۰۷	۲/۱۵	۵	۳۵	۱۰
۳۲۳۶۰۰	۷۹۸	۰/۴	۰/۵۵	۱/۱	۲/۷	۳۵	۱۰

در این شکل‌ها انطباق بسیار خوبی بین اندازه گیری ها و نتایج عددی مدل دیده می‌شود. جدول (۱) کاهش پارامترهای مقاومتی آسفالت با عبور چرخ را نشان می‌دهد.

### ۵- مقایسه بین نتایج آنالیز برگشتی با POLYMAT و VESYSBACK

با مراجعه به شکل (۱۳) که نتایج آنالیز برگشتی VESYSBACK را نشان می‌دهد، دیده می‌شود مماس بر منحنی خیز در محور تقارن ( $r=0$ ) موازی با محور افقی نمی‌باشد. این وضعیت با توجه به تقارن موجود در بارگذاری و هندسه توجیه پذیر نیست. در سازه های متقارن شیب منحنی خیز در محور تقارن صفر می‌باشد.

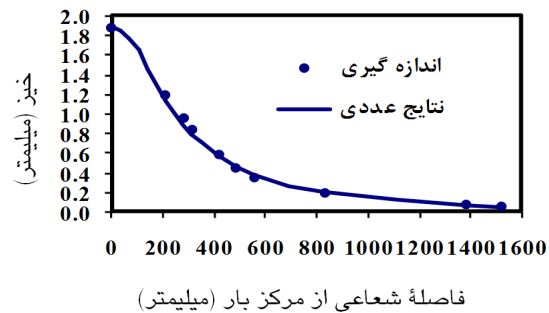


شکل (۱۳): اندازه گیری های محلی و نتایج آنالیز برگشتی منحنی کاسه ای با VESYSBACK [۴].

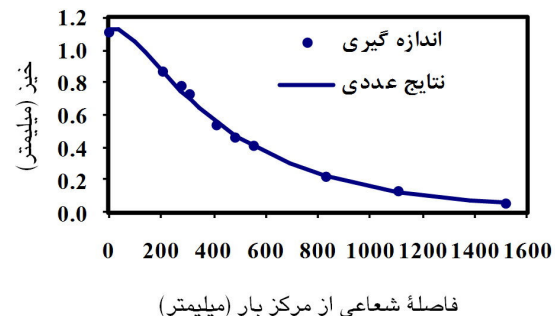
از طرف دیگر منحنی خیز بدست آمده از VESYS III در فواصل شعاعی ۰-۲۷۷ میلیمتر با رفتار فیزیکی روسازی برابری ندارد که می‌توان به تغییر شکل های تیز در این ناحیه اشاره نمود. منحنی های خیز بدست آمده از POLYMAT، شکل های (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) با فرم خیز واقعی هماهنگی بهتری دارند.

مقایسه ای بین تنش های کششی افقی در پایین لایه آسفالت محاسبه شده از دو برنامه POLYMAT و VESYS III انجام گردیده است. تنش های کششی بدست آمده از دو مدل در شکل (۱۴) آمده است. به علت اینکه در VESYS III آسفالت به صورت ویسکو الاستیک مدل شده است؛ صلبیت بیشتری

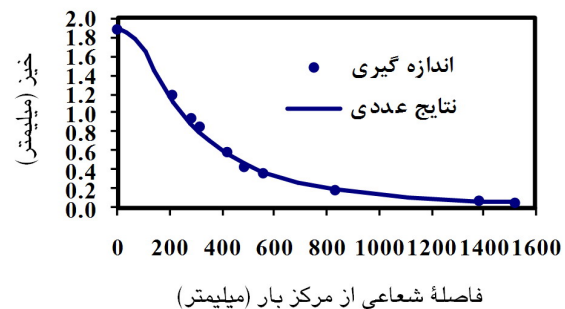
اشکال (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) به ترتیب نتایج آنالیز برگشتی POLYMAT و اندازه گیری های محلی را در ۰، ۱۴۸۲۰۰ و ۳۲۳۶۰۰ عبور را نشان می‌دهند.



شکل (۱۰): نتایج اندازه گیری و نتایج عددی POLYMAT قبل از عبور چرخ.



شکل (۱۱): نتایج اندازه گیری و نتایج عددی POLYMAT پس از ۱۴۸۲۰۰ عبور چرخ.



شکل (۱۲): نتایج اندازه گیری و نتایج عددی POLYMAT پس از ۳۲۳۶۰۰ عبور چرخ.

## ۶- نتیجه گیری

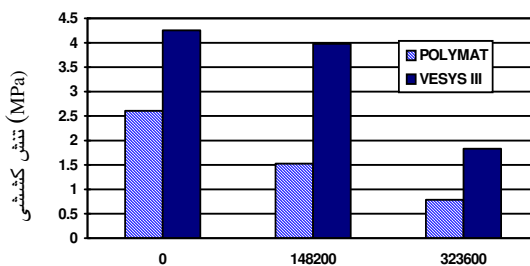
مدل ویسکو- الاستوپلاستیک ارائه شده رفتار آسفالت را به گونه ای قابل قبول شبیه سازی می کند بطوریکه نتایج آنالیز برگشتی خیز روسازی با مقادیر اندازه گیری شده برابری بسیار خوبی دارند.

برنامه POLYMAT می تواند به طور همزمان کاهش پارامترهای مقاومتی آسفالت و سختی رویه های آسفالتی را با عبور چرخ نشان می دهد. این خصوصیت سبب برتری بر مدل های ویسکوالاستیک می باشد.

آنالیز برگشتی انجام شده توسط برنامه POLYMAT هماهنگی بیشتری نسبت به VESYSBACK با اندازه گیری های میدانی دارد. بنابراین تعیین عمر مفید روسازی با استفاده از نتایج برنامه POLYMAT با دقت بیشتری انجام می پذیرد. مدل ارائه شده رفتار خزشی آسفالت را با دقت بالا شبیه سازی می کند.

با توجه به جدول (۱)، با تکرار بارگذاری چرخ پارامترهای مدول الاستیسیته  $E$  مقاومت کششی  $\sigma_m^T$  و چسبندگی  $C$  بیشترین کاهش را نشان می دهند.

نسبت به مدل ویسکو - الاستوپلاستیک خواهد داشت و تنش کششی بزرگتری در مقایسه با POLYMAT نتیجه می دهد. اختلاف بین تنش های کششی در دفعات عبور بیشتر، افزایش می یابند. با مدل پیشنهادی می توان نرم شوندگی آسفالت (انقباض محدوده الاستیک) را با گذشت زمان (تکرار بارگذاری) نشان داد در حالیکه برنامه VESYS III این قابلیت را ندارد. این مسأله برتری مدل ارائه شده بر مدل های ویسکوالاستیک را نشان می دهد.



شکل (۱۴): نقش کششی افقی در پایین لایه آسفالت محاسبه شده از دو برنامه POLYMAT و VESYS III.

## ۷- مراجع

- [۸] Uzan, J.; "Viscoelastic-Viscoplastic Model With Damage for Asphalt Concrete" J. of Materials in Civil Engineering, ASCE, 17(5), p.p.528-534, (2005).
- [۹] پورحسینی، رضا؛ "آنالیز عددی رویه های آسفالتی" رساله دکتری، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران، ۱۳۸۰.
- [۱۰] Owen, D. R. J.; Hinton, E.; "Finite Element In Plasticity", Pineridge Press Limited, Swansea, UK, (1980).
- [۱۱] Bathe, K. J.; ADINA - A Finite Element Program for Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis, Report AVL 82448-1, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Tech, (revised 1978), (1975).
- [۱۲] Yegooni, M.; Button, J. W.; Zollinger, D. G.; "Fractals of Aggregates Correlated With Creep in Asphalt Concrete" J. Transp. Engrg. ASCE, 122 (1), p.p.22-28, (1996).
- [۱۳] Johnson-Clark, J. R.; Vertessy, N. J.; Fossey, D. W.; Smith, P. B.; Sharp, K. G.; "Data Report on Testing of Full Depth Asphalt Pavements: Mulgrave ALF Trial" Res. Rep. ARR No. 209, Australian Road Res. Board, Victoria Australia, (1991).
- [۱۴] Ramsamooj, D. V.; Ramadam, J.; Lin G. S. "Model Prediction of Rutting in Asphalt Concrete" J. Transp. Engrg. ASCE, 124 (5), p.p.448-456, (1998).
- [۱] Siddharthan, R.; Sebaaly, P. E.; Javaregowde, M. "Influence of Statistical Variation in Falling Weight Deflectometers on Pavement Analysis" Transp. Res. Rec. 1377, Transp. Res. Board, Washington, D.C., p.p.57-66, (1992).
- [۲] Croney, D., "Is the Measured Deflection of A Flexible Pavement A Reliable Guide to Life Prediction and Overlay Design", Highways, Surrey, England, 58 (part 1986), p.p. 24-26, (1990).
- [۳] Maestas, J. M.; Mamlouk, M. S. "Comparison of Pavement Deflection Analysis Methods Using Overlay Design" Transp. Res. Rec. 1377, Transp. Res. Board, Washington, D. C., p.p.17-25, (1991).
- [۴] Collop, A. C.; Cebon, D.; "Stiffness Reductions of Pavements Due to Cumulative Fatigue Damage", J. of Transp. Engrg., 122 (2), p.p.131-139, (1996).
- [۵] Kenis, W. J.; "Predictive Design Procedures: VESYS User's Manual" FHWA Rep, p.p.77-154, Washington, D. C, (1978).
- [۶] Lu, Y.; Lu, L.; Wright, P.J.; "Visco-Elastoplastic Method for Pavement Performance Evaluation" Proc. Of The Institution of Civil Engineering, vol(153), p.p.227-234, (2002).
- [۷] Ali, B.; Sadek, M.; Shahrour, I.; "Elasto-Viscoplastic Finite Element Analysis of Long Term Behavior of Flexible Pavements, Application to Rutting" International Journal Road Material and Pavement Design, vol(9/3), p.p.463-479, (2008).