

## Calibration of Witczak and Modified Witczak Models for Prediction of Dynamic Modulus of In-Service Asphalt Layers

N. Solatifar \*

Department of Civil Engineering, Urmia University, Urmia, Iran.

**ABSTRACT:** One of the important input parameters of the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG) for asphalt pavements is the dynamic modulus ( $|E^*|$ ) that can be defined as the viscoelastic property of asphalt materials. For the determination of dynamic modulus of in-service asphalt layers, MEPDG uses results of both Falling Weight Deflectometer (FWD) and laboratory dynamic modulus predictive models. This method in some cases lacks precision. Hence, it is needed to improve the current method and develop accurate predictive models. In this research, ten asphalt pavement sites, having various structures, ages, and conditions, were selected in Khuzestan and Kerman provinces in Iran. Field and laboratory testing were performed and the dynamic modulus of in-service asphalt layers was determined. Developed predictive models for dynamic modulus of asphalt mixes including Witczak and Modified Witczak were calibrated and new models were constructed for predicting in-situ dynamic modulus of asphalt layers. These two calibrated models entitled “In-situ Witczak Model” and “In-situ Modified Witczak Model” could be directly used for the prediction of dynamic modulus of in-service asphalt layers from volumetric properties of asphalt mixes and viscosity characteristics of extracted binders without any need for FWD testing. Performance evaluation and validation of new models showed high accuracy and low bias with a very good correlation between predicted and measured values ( $R^2=0.93$ ).

### Review History:

Received: Dec. 25, 2018

Revised: Jan. 24, 2019

Accepted: Feb. 13, 2019

Available Online: Feb. 20, 2019

### Keywords:

Dynamic modulus of asphalt layers  
FWD  
Dynamic modulus predictive models  
Witczak model  
Modified witczak model

### 1. Introduction

Asphalt dynamic modulus is measured in the laboratory during expensive and time-consuming tests. Prediction models were developed to determine dynamic modulus with a few usual laboratory works based on mix volumetric properties and binder viscosity characterization. The objective of this study is to apply and evaluate two conventional dynamic modulus predictive models including Witczak and Modified Witczak in determining the dynamic modulus of in-service asphalt layers with different characteristics in Iran. In addition, new in-situ dynamic modulus predictive models with high accuracy and low bias are developed.

### 2. Existing Predictive Models

Two conventional dynamic modulus predictive models for asphalt mixtures were investigated in this paper including:

- Witczak model [1];
- Modified Witczak model [2].

### 3. Experimental Work

In this research, ten flexible pavement sites were selected in Khuzestan and Kerman provinces in Iran. The sites were selected from different roads having pavements with different characteristics concerning their thickness, number of layers, ages, and types of base and subbase layers. Falling Weight Deflectometer (FWD) testing was conducted (“Fig. 1”) and



Fig. 1. FWD testing on a site

core samples were taken at each site. These were then tested for volumetric analysis. The results of the tests were used as input parameters in dynamic modulus predictive models.

### 4. Prediction of Dynamic Modulus of Asphalt Layers

Predicted dynamic moduli for all samples at different temperatures using original predictive models as well as FWD back-calculated ones are shown in “Fig. 2”. As can be seen in

\*Corresponding author's email: n.solatifar@urmia.ac.ir.

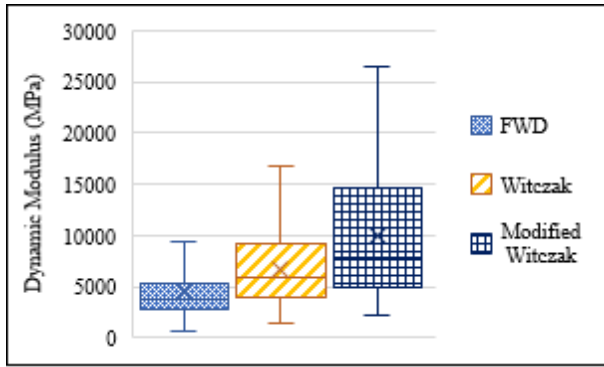


Fig. 2. FWD back-calculated and predicted dynamic moduli for all samples at different temperatures using original predictive models.

this figure, the moduli predicted with Witezak and Modified Witezak models are greater than the back-calculated values. In addition, moduli predicted with the Modified Witezak model has shown a large difference with the back-calculated ones.

### 5. Development of In-situ Predictive Models

Nonlinear regression analysis was employed and two new in-situ predictive models were developed based on calibration of the original models. Newly developed models were named “In-situ Witezak” and “In-situ Modified Witezak” models. The predicted dynamic moduli using these new in-situ models as well as FWD back-calculated ones are shown in “Fig. 3”. As it can be seen in this figure, in-situ models could predict dynamic moduli at a similar range of the back-calculated values and this shows the capability of the newly proposed models in predicting dynamic modulus of in-service asphalt layers.

### 6. Performance of New Models

Goodness-of-fit and bias were the two parameters that were used to evaluate the prediction performance of the new models. “Fig. 4” and “Fig. 5” show the predicted moduli versus FWD back-calculated values using In-situ Witezak

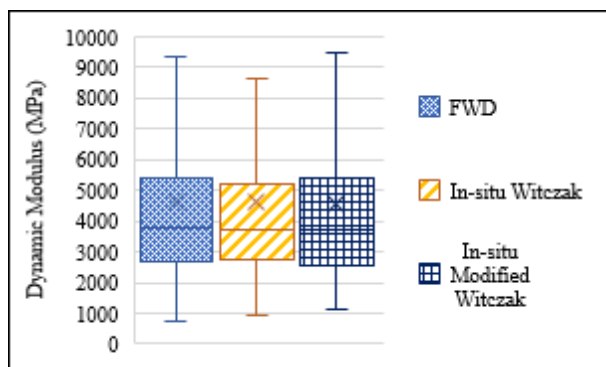


Fig. 3. FWD back-calculated and predicted dynamic moduli using new in-situ models.

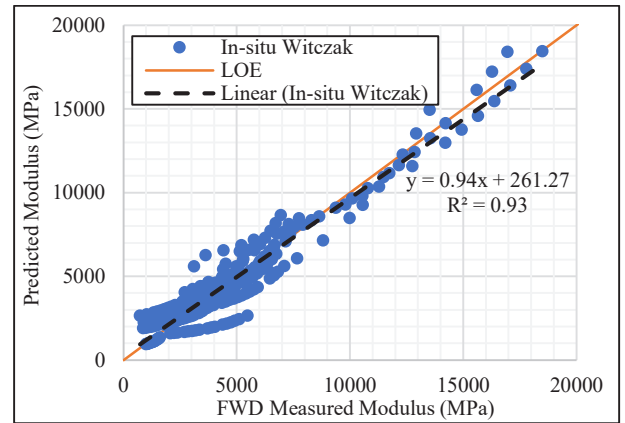


Fig. 4. Predicted dynamic moduli using In-situ Witezak model versus FWD back-calculated values.

and In-situ Modified Witezak models, respectively. As can be seen in these figures, the newly developed models could predict the dynamic modulus of in-service asphalt layers very close to the line of equality.

### 7. Conclusions

In this research, field and laboratory testing were carried out to predict the dynamic modulus of in-service asphalt layers in some flexible pavements in Iran. Two conventional dynamic modulus predictive models were utilized and the following findings were obtained:

- Feasibility investigation of using two dynamic modulus predictive models including Witezak and Modified Witezak models showed that it is possible to predict dynamic moduli of in-service asphalt layers using these models, although improvement of prediction accuracy is necessary.
- New in-situ predictive models with calibration of the above two original models were developed and their prediction performance was evaluated. Results showed that proposed models could predict the dynamic modulus of in-service asphalt layers with high accuracy and low bias, especially in the temperature range of this study.
- Directly prediction of dynamic modulus of in-service asphalt layers using mixture volumetric properties and asphalt

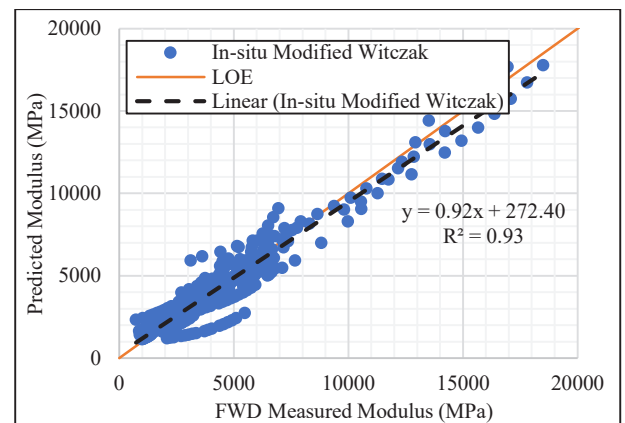


Fig. 5. Predicted dynamic moduli using In-situ Modified Witezak model versus FWD back-calculated values.

binder characteristics without the need for FWD testing is the main advantage of new developed in-situ predictive models.

- The best prediction performance belonged to the “In-situ Witzak model” with an R2 of 0.93.

### References

[1] Andrei, D., Witzak, M. W. and Mirza, M. W. (1999). “Development of a Revised Predictive Model for the Dynamic (Complex) Modulus of Asphalt Mixtures”,

Inter Team Technical Rep. prepared for the NCHRP 1-37A Project, University of Maryland, College Park, MD.

[2] Bari, J. and Witzak, M. W. (2006). “Development of a New Revised Version of the Witzak E\* Predictive Model for Hot Mix Asphalt Mixtures”, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 75, pp. 381-423.

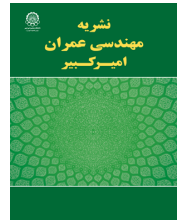
#### HOW TO CITE THIS ARTICLE

N. Solatifar, *Calibration of Witzak and Modified Witzak Models for Prediction of Dynamic Modulus of In-Service Asphalt Layers*, Amirkabir J. Civil Eng., 53(3) (2021) 183-186.

DOI: [10.22060/ceej.2019.15510.5937](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15510.5937)







## کالیبراسیون مدل‌های ویتزاک و ویتزاک اصلاح شده برای پیش‌بینی مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی در حال بهره‌برداری

نادر صولتی فر\*

گروه مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۰۴  
بازنگری: ۱۳۹۷/۱۱/۰۴  
پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۲۴  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۱۲/۰۱

### کلمات کلیدی:

مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی  
آزمایش FWD  
مدل‌های پیش‌بینی مدول دینامیکی  
مدل ویتزاک  
مدل ویتزاک اصلاح شده

**خلاصه:** یکی از ورودی‌های مهم روش طراحی روسازی آسفالتی مکانیستیک - تجربی (MEPDG)، مدول دینامیکی ( $E^*$ ) است که به عنوان مشخصه رفتار ویسکوالاستیک مخلوط‌های آسفالتی شناخته می‌شود. MEPDG برای تعیین مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی در روسازی‌های در حال بهره‌برداری، از ترکیبی از نتایج آزمایش افت و خیزسنج وزنه افتان (FWD) و مدل‌های پیش‌بینی آزمایشگاهی مدول دینامیکی بهره می‌گیرد. این در حالی است که این روش با چالش‌هایی همراه بوده و نیاز به ارائه مدل‌های دقیق و بهبود روش فعلی احساس می‌شود. در این پژوهش با انجام آزمایش‌های میدانی و آزمایشگاهی در ده سایت روسازی آسفالتی در استان‌های خوزستان و کرمان، به بررسی و تحلیل مدول دینامیکی در جای لایه‌های آسفالتی با استفاده از نتایج محاسبات بازگشتی FWD پرداخته شده است. در هر سایت، آزمایش FWD انجام شده و مغزه‌هایی برای تجزیه و تعیین خصوصیات حجمی مخلوط‌ها و مشخصات ویسکوزیته قیرهای بازیابی گرفته شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی موجود ویتزاک و ویتزاک اصلاح شده، امکان ساخت مدل‌های جدید درجا با کالیبراسیون این مدل‌ها وجود دارد. با استفاده از مدل‌های جدید توسعه یافته تحت عنوان مدل ویتزاک درجا و مدل ویتزاک اصلاح شده درجا، مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی در حال بهره‌برداری بدون نیاز به انجام آزمایش FWD به طور مستقیم با استفاده از خصوصیات حجمی لایه‌ها و مشخصات ویسکوزیته قیر بازیابی از آنها با دقت پیش‌بینی بالا و آریب پیش‌بینی پایین تعیین می‌شود. ارزیابی عملکرد و اعتبارسنجی مدل‌های جدید، دقت پیش‌بینی این مدل‌ها را با ضریب تعیین ۰/۹۳ نشان می‌دهد.

### ۱- مقدمه

ارزیابی وضعیت درجای لایه‌های آسفالتی، در امر بهسازی روسازی‌های انعطاف‌پذیر مورد تاکید این روش می‌باشد [۲]. مدول دینامیکی ( $E^*$ ) به عنوان مشخصه رفتار ویسکوالاستیک لایه‌های آسفالتی یکی از مهم‌ترین ورودی‌های روش MEPDG برای طراحی و بهسازی روسازی‌های آسفالتی است [۲]. هزینه بالا، نیاز به تجهیزات خاص و گران قیمت، پرسنل متخصص و نیز مدت زمان طولانی مورد نیاز برای انجام آزمایش، از جمله چالش‌های آزمایش مدول دینامیکی در آزمایشگاه محسوب می‌شود. از این رو نیاز به روش‌های ساده‌تر و غیرمستقیم تعیین این مدول، منجر به تمرکز پژوهشگران برای

ارزیابی وضعیت روسازی از لحاظ سازه‌ای و عملکردی، نقش مهمی در فعالیت‌های تعمیر، نگهداری و بهسازی در فرآیند سیستم مدیریت روسازی<sup>۱</sup> (PMS) دارد [۱]. با توسعه روش طراحی روسازی مکانیستیک - تجربی<sup>۲</sup> (MEPDG) [۲]، نیاز به تعیین دقیق وضعیت سازه‌ای روسازی‌ها بیش از پیش افزایش یافته است. انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی دقیق و همچنین آزمایش‌های غیرمخرب<sup>۳</sup> (NDT)

- 1 Pavement Management System
- 2 Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide
- 3 Non-Destructive Testing

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: n.solatifar@urmia.ac.ir

### 4 Dynamic Modulus

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لایسنس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



توسعه مدل‌های پیش‌بینی مدول دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی شده است [۳].

مدل‌های پیش‌بینی مدول دینامیکی با استفاده از خصوصیات حجمی مخلوط و نیز مشخصات ویسکوزیته قیر، روش‌های عمده تعیین این مدول می‌باشند. مدل‌های معمول توسعه یافته شامل مدل ویتزاک<sup>۱</sup> [۴]، مدل ویتزاک اصلاح شده<sup>۲</sup> [۵]، مدل هیرش<sup>۳</sup> [۶]، مدل الخطیب<sup>۴</sup> [۷]، مدل‌های رگرسیونی پیشرفته [۸] و نیز مدل‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی<sup>۵</sup> [۹-۱۲] هستند.

برای ارزیابی سازه‌های لایه‌های آسفالتی در حال بهره‌برداری نیز با توجه به تاکید روش MEPDG برای استفاده از مدول دینامیکی در بهسازی روسازی‌های آسفالتی [۲]، روش‌های مختلفی توسط پژوهشگران برای تعیین مدول دینامیکی درجا ارائه شده است. این روش‌ها بر اساس ترکیبی از نتایج آزمایش‌های غیرمخرب (عموماً آزمایش افت و خیزسنج وزنه افتان<sup>۶</sup> (FWD)) و مغزه‌گیری برای انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی از جمله تجزیه مخلوط، دانه‌بندی، تعیین فضای خالی، بازیابی قیر و تعیین مشخصات ویسکوزیته آن می‌باشد. روش پیشنهادی آشتو<sup>۷</sup> در MEPDG [۲]، سئو<sup>۸</sup> و همکاران [۱۳]، گئورگولی<sup>۹</sup> و همکاران [۱۴] و نیز صولتی‌فر و همکاران [۱۵] از جمله این روش‌های توسعه یافته هستند. به طور کلی در این روش‌ها از مدول محاسبات بازگشتی نتایج آزمایش FWD برای تعیین مدول میدانی (درجای) لایه‌های آسفالتی بهره گرفته شده و سپس مغزه‌هایی از محل برای انجام آزمایش‌های تعیین خصوصیات حجمی و مشخصات ویسکوزیته قیرهای بازیابی گرفته می‌شود. با به کارگیری مدل‌های پیش‌بینی مدول دینامیکی و استفاده از نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی، مدول دینامیکی پیش‌بینی تعیین شده و در نهایت این مدول پیش‌بینی با استفاده از مدول محاسبات بازگشتی تصحیح شده و مدول دینامیکی درجای لایه‌های آسفالتی به دست می‌آید. لولیزی<sup>۱۰</sup>

- 1 Witzzak
- 2 Modified Witzzak
- 3 Hirsch
- 4 Al-Khateeb
- 5 Artificial Neural Network
- 6 Falling Weight Deflectometer
- 7 AASHTO
- 8 Seo
- 9 Georgouli
- 10 Loulizi

و همکاران [۱۶]، کاووسی<sup>۱۱</sup> و همکاران [۱۷] و نیز صولتی‌فر و همکاران [۱۸] با انجام آزمایش‌های میدانی و آزمایشگاهی، روش پیشنهادی MEPDG در بهسازی روسازی‌های آسفالتی را در سه سطح طراحی مورد ارزیابی قرار داده و امکان بهره‌گیری از این روش را در تعیین مدول دینامیکی درجای لایه‌های آسفالتی بررسی کرده‌اند. نتایج این بررسی‌ها لزوم انجام اصلاحاتی در فرآیند روش‌ها و نیز بهبود مدل‌های پیش‌بینی مورد استفاده را نشان می‌دهد.

علاوه بر توسعه روش‌های تجربی، تلاش‌هایی نیز برای ارائه روش‌های تحلیلی و عددی تعیین مدول دینامیکی به طور مستقیم از نتایج آزمایش FWD صورت گرفته است که از جمله می‌توان به پژوهش‌های کوتای<sup>۱۲</sup> و همکاران [۱۹]، وارما<sup>۱۳</sup> و همکاران [۲۰-۲۱] و نیز گوپالاکریشنان<sup>۱۴</sup> و همکاران [۲۲-۲۳] اشاره کرد. کوتای و همکاران از تحلیل دینامیکی محاسبات بازگشتی تاریخچه زمانی داده‌های بار و افت و خیز برای تعیین مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی استفاده کرده‌اند [۱۹]. در ادامه همین پژوهش، وارما و همکاران تغییرات دمایی لایه آسفالتی در عمق را در هنگام انجام آزمایش FWD در محاسبات بازگشتی لحاظ نموده و نتایج خوبی گرفته‌اند [۲۰-۲۱]. همچنین گوپالاکریشنان و همکاران نیز از شبکه‌های عصبی مصنوعی در راستای استخراج خواص ویسکوالاستیک لایه‌های آسفالتی از داده‌های تاریخچه زمانی افت و خیز FWD استفاده کرده‌اند [۲۲-۲۳]. نتیجه این پژوهش‌ها اذعان می‌دارد که اگر چه قابلیت استخراج مدول دینامیکی از داده‌های یک بارگذاری سقوط وزنه FWD با این روش‌ها وجود دارد، اما با این حال دقت پیش‌بینی‌های فعلی برای استفاده از این روش‌ها در پروژه‌های اجرایی کافی نیست.

بنابراین تمرکز روی روش‌های تعیین دقیق سختی و مقاومت لایه‌های آسفالتی در روسازی‌های در حال بهره‌برداری با استفاده از آزمایش‌های سریع و کم هزینه غیرمخرب، از جمله مهم‌ترین نیازهای پژوهشی برای توسعه هر چه بیشتر روش طراحی مکانیستیک - تجربی در روسازی‌های انعطاف پذیر است [۲]. ساخت مدل‌های پیش‌بینی مدول دینامیکی بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و به تبع

- 11 Kavussi
- 12 Kutay
- 13 Varma
- 14 Gopalakrishnan



در این رابطه  $|E^*|$  مدول دینامیکی (پوند بر اینچ مربع)،  $\eta$  ویسکوزیته قیر ( $10^6$  پواز<sup>۳</sup>)،  $f$  فرکانس بارگذاری (هرتز)،  $V_a$  فضای خالی (درصد)،  $V_{beff}$  درصد حجمی قیر موثر (درصد)،  $\rho_{۲۴}$  درصد تجمعی مانده روی الک ۳/۴ اینچ (درصد)،  $\rho_{۳۸}$  درصد تجمعی مانده روی الک ۳/۸ اینچ (درصد)،  $\rho_{۴۰}$  درصد تجمعی مانده روی الک چهارم (درصد)  $\rho_{۲۰۰}$  درصد عبور کرده از الک شماره ۲۰۰ (درصد) است. برای بخش ویسکوزیته در رابطه فوق، MEPDG تمامی ورودی های قیر را به مقادیر A و VTS که پارامترهای مدل ویسکوزیته - دما مطابق استاندارد ای اس تی ام<sup>۴</sup> D2493 [۲۵] هستند، تبدیل می کند تا در ساخت منحنی اصلی مدول دینامیکی استفاده شود. علاوه بر این، مدل ویتزاک دارای رابطه ای جهت تبدیل این پارامترها از قیرهای خالص به مقادیر پیر شده RTFO<sup>۵</sup> و PAV<sup>۶</sup> نیز است [۲].

### ۲-۲- مدل ویتزاک اصلاح شده

مدل ویتزاک توسط باری و ویتزاک [۵] مورد بازنگری قرار گرفته است. همانند مدل قبلی، این رابطه نیز بر اساس تحلیل رگرسیون غیرخطی با استفاده از ۳۴۶ نمونه مخلوط آسفالتی شامل ۷۴۰۰ سری داده توسعه یافته است. این مدل هم دومین رابطه مورد استفاده در روش MEPDG تحت عنوان پروتکل NCHRP 1-40D می باشد. مدل ویتزاک اصلاح شده به صورت رابطه (۲) است.

$$\begin{aligned} \log|E^*| = & 3.750063 + 0.02932\rho_{200} \\ & - 0.001767(\rho_{200})^2 - 0.002841\rho_4 \\ & - 0.058097V_a - 0.802208\left(\frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a}\right) \\ & + \frac{3.871977 - 0.0021\rho_4 + 0.003958\rho_{38}}{1 + e^{(-0.603313 - 0.313351\log(f) - 0.393532\log(\eta))}} \\ & + \frac{-0.000017(\rho_{38})^2 + 0.005470\rho_{34}}{1 + e^{(-0.603313 - 0.313351\log(f) - 0.393532\log(\eta))}} \\ & + 0.006\rho_{38} - 0.00014(\rho_{38})^2 - 0.08V_a - 1.06\left(\frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a}\right) \Bigg\} + \\ & \frac{2.56 + 0.03V_a + 0.71\left(\frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a}\right) + 0.012\rho_{38} - 0.0001(\rho_{38})^2 - 0.01\rho_{34}}{1 + e^{(-0.7814 - 0.5785\log(G_a^*) + 0.8834\log(\delta_s))}} \end{aligned} \quad (2)$$

- 3 Poise
- 4 ASTM
- 5 Rolling Thin-Film Oven
- 6 Pressure Aging Vessel

آن عدم کارایی این مدل ها در تعیین مدول دینامیکی در جای لایه های آسفالتی در روسازی های در حال بهره برداری نیز در شرایط مختلف ترافیکی و آب و هوایی، نیاز به توسعه مدل های بومی پیش بینی مدول دینامیکی در جای لایه های آسفالتی را نشان می دهد. هدف اصلی این پژوهش بررسی انطباق پذیری مدول های حاصل از مدل های پیش بینی مدول دینامیکی ویتزاک و ویتزاک اصلاح شده با مدول محاسبات بازگشتی FWD و توسعه مدل های پیش بینی مدول دینامیکی در جای جدید با پرداخت و کالیبراسیون مدل های اصلی با استفاده از نتایج آزمایش FWD است.

### ۲- مدل های پیش بینی مدول دینامیکی

در این بخش دو مدل پیش بینی مدول دینامیکی ویتزاک و ویتزاک اصلاح شده، معرفی و بررسی شده است.

#### ۲-۱- مدل ویتزاک

مدل ویتزاک بر اساس ۲۷۵۰ سری داده از ۲۰۵ نمونه مخلوط آسفالتی شامل قیرهای خالص و اصلاح شده توسعه داده شده است [۴]. اساس توسعه مدل، تحلیل رگرسیون غیرخطی با استفاده از رویکرد بهینه سازی گرادیان کاهشی تعمیم یافته<sup>۱</sup> در مازول سالور نرم افزار اکسل مایکروسافت<sup>۲</sup> بوده است. این مدل از خصوصیات حجمی مخلوط و دانه بندی مصالح سنگدانه ای بهره گرفته و در حال حاضر یکی از دو مدل توسعه داده شده برای استفاده در روش MEPDG تحت عنوان پروتکل NCHRP 1-37A می باشد [۲۴]. مدل تجربی ویتزاک به صورت رابطه (۱) است [۴].

$$\begin{aligned} \log|E^*| = & 3.750063 + 0.02932\rho_{200} \\ & - 0.001767(\rho_{200})^2 - 0.002841\rho_4 \\ & - 0.058097V_a - 0.802208\left(\frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a}\right) \\ & + \frac{3.871977 - 0.0021\rho_4 + 0.003958\rho_{38}}{1 + e^{(-0.603313 - 0.313351\log(f) - 0.393532\log(\eta))}} \\ & + \frac{-0.000017(\rho_{38})^2 + 0.005470\rho_{34}}{1 + e^{(-0.603313 - 0.313351\log(f) - 0.393532\log(\eta))}} \end{aligned} \quad (1)$$

- 1 Generalized Reduced Gradient
- 2 Microsoft Excel's Solver

در استان کرمان برای نمونه گیری آزمایشهای میدانی پژوهش حاضر انتخاب شده است. جدول ۱ نیز مشخصات عمومی روسازیهای انتخابی شامل نوع روسازی (جدید یا بهسازی شده)، عمر روسازی، تعداد و ضخامت لایه های آسفالتی و همچنین مشخصات قیر مخلوط های آسفالتی را ارائه می کند.

روسازیها شامل هر دو نوع روسازی جدید (روسازیهای در حال بهره برداری جدید بدون روکش) و بهسازی شده (روسازیهای روکش شده در طی دوره بهره برداری) هستند. عمر روسازیها با یکدیگر متفاوت بوده و از دو هفته تا ۲۵ سال عمر دارند. سختی قیرها هم در دو درجه معمول قیرهای مورد استفاده در اکثر راههای کشور، قیر با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ و نیز قیر با درجه سختی بالاتر ۴۰/۵۰ (سایت S۰۳) موجود است. ضخامت و تعداد لایه های آسفالتی و نیز لایه های اساس و زیراساس هم با یکدیگر متفاوت بوده و متغیر است. میتوان گفت روسازیهای نمونه مورد آزمایش در این پژوهش طیف وسیعی از روسازی راههای در حال بهره برداری به خصوص در مناطق آب و هوایی گرم ایران را در بر میگیرند.

### ۳-۱- آزمایش FWD و تحلیل نتایج

در هر یک از سایت های آزمایش، از نتایج آزمایش FWD که با استفاده از دستگاه HWD<sup>۱</sup> مدل ۸۰۰۰ دایناتست انجام گرفته، استفاده شده است. در انجام این آزمایش ها برای تعیین دقیق مدول لایه آسفالتی، از چهار سطح تنش برای بارگذاری بهره گرفته شده است. همچنین پیکربندی ژئوفون ها به صورتی بوده که تعداد بیشتری ژئوفون در نزدیکی صفحه بارگذاری قرار گرفته است. به عنوان نمونه شکل ۲ انجام آزمایش FWD را در سایت S۰۵ همراه با اندازه گیری دمای لایه آسفالتی در عمق های مختلف [۲۶] نشان می دهد. همان گونه که در این تصویر دیده می شود، مطابق توصیه MEPDG آزمایش در مسیر چرخ خارجی (راست) جاده انجام شده است [۲].

محاسبات بازگشتی مدول لایه ها توسط نرم افزار ELMOD انجام شده است. در این نرم افزار روسازی به صورت یک سیستم سه لایه ای مدل شده و از روش های مختلف محاسبات بازگشتی مانند روش الاستیک خطی<sup>۲</sup> (LET)، روش ضخامت معادل<sup>۳</sup> (MET) و

در این رابطه  $|G_b^*|$  مدول دینامیکی برشی قیر (پوند بر اینچ مربع)،  $\delta_b$  زاویه فاز قیر (درجه) و بقیه متغیرها قبلاً در رابطه (۱) تعریف شده است. از آن جایی که برخی از مخلوط های پایگاه داده مورد استفاده در توسعه مدل فاقد مقادیر  $|G_b^*|$  بوده اند، ضرایب اصلاحی مطابق رابطه (۳) جهت محاسبه  $|G_b^*|$  از مقادیر A و VTS ارائه شده است [۵].

$$|G_b^*| = 0.0051 f_s \eta_{f_s, T} (\sin \delta_b)^{7.1542 - 0.4929 f_s + 0.0211 f_s^2} \quad (3)$$

$$\delta_b = 90 + (-7.3146 - 2.6162 \times VTS') \times \log(f_s \times \eta_{f_s, T}) + (0.1124 + 0.2029 \times VTS') \times \log(f_s \times \eta_{f_s, T})^2 \quad (4)$$

$$\log \log (\eta_{f_s, T}) = 0.9699 f_s^{-0.0527} \times A + 0.9668 f_s^{-0.0575} \times VTS \log T_R \quad (5)$$

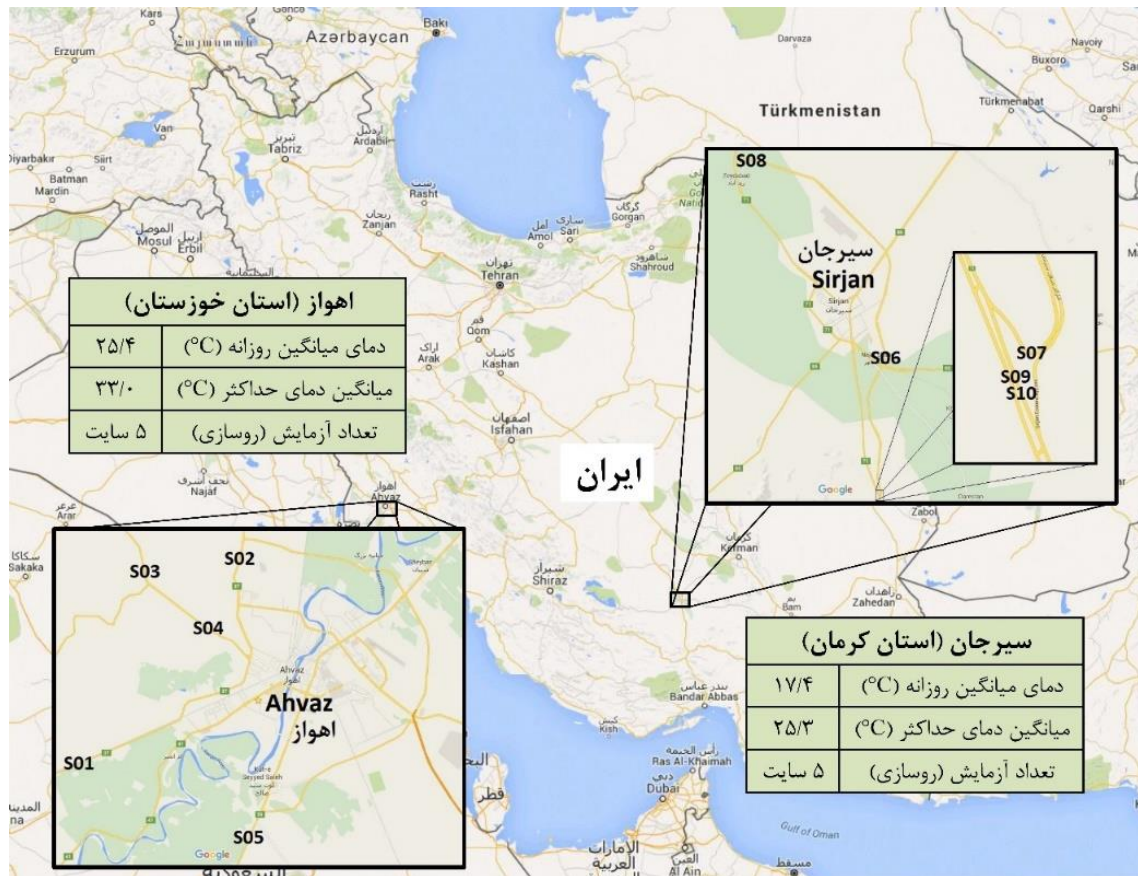
در این روابط  $f_s$  فرکانس برشی دینامیکی (هرتز)،  $\delta_b$  زاویه فاز قیر پیش بینی شده با رابطه (۴) (درجه)،  $\eta_{f_s, T}$  ویسکوزیته قیر در فرکانس بارگذاری مشخص  $f_s$  و دمای T که توسط رابطه (۵) تعیین می شود (سانتی پواز) و  $T_R$  دما در مقیاس رانکین است.

### ۳-۲ برنامه آزمایشها

مکان یابی نقاط برداشت داده های میدانی بر اساس امکانات موجود و بررسیها روی راه های پر تردد کشور انجام شده است. توجه به تنوع آب و هوایی و با تمرکز روی مناطق با آب و هوای گرم (جنوب کشور)، وضعیت ترافیکی، تاریخچه ساخت روسازی، دانه بندی و سایر خصوصیات مخلوط آسفالتی، از جمله متغیرها در انتخاب روسازیهای مورد آزمایش بوده است. استان خوزستان و استان کرمان به عنوان مناطق انجام آزمایشها تعیین شده است. موقعیت جغرافیایی و نیز اطلاعات عمومی وضعیت آب و هوایی سایت های آزمایشی (با کدهای S۰۱ تا S۱۰) در دو استان فوق در شکل ۱ ارائه شده است. همان گونه که در این شکل مشاهده می شود پنج محور منتهی به شهر اهواز در استان خوزستان و پنج محور منتهی به شهر سیرجان

1 Heavy Weight Deflectometer  
2 Linear Elastic Theory  
3 Method of Equivalent Thickness





شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و وضعیت آب و هوایی سایت‌های آزمایشی (استانهای خوزستان و کرمان)

Fig. 1. Geographical and climatic condition of pavement sites (Khuzestan and Kerman provinces)

جدول ۱. مشخصات عمومی روسازی‌های نمونه‌گیری برای آزمایشی (بر اساس تاریخچه ساخت)

Table 1. General specifications of asphalt pavement test sections (based on construction history)

درجه نفوذ قیر لایه آسفالتی	ضخامت هر زیر لایه آسفالتی (mm)				مجموع ضخامت لایه‌های آسفالتی (mm)	عمر روسازی	نوع روسازی	محور آزمایش	کد سایت	استان
	۴	۳	۲	۱						
۶۰/۷۰	-	-	-	۷۵	۷۵	۲ هفته	جدید	اهواز - شیرین شهر	S01	خوزستان
۶۰/۷۰	-	-	-	۹۵	۹۵	۴ سال	جدید	اهواز - شوش	S02	
۴۰/۵۰	-	-	-	۱۱۵	۱۱۵	۵ سال	بهسازی شده	اهواز - حمیدیه (۱)	S03	
۶۰/۷۰	-	۸۰	۷۰	۴۰	۱۹۰	۱۰ سال	بهسازی شده	اهواز - حمیدیه (۲)	S04	
۶۰/۷۰	-	۱۲۰	۴۰	۶۰	۲۲۰	۲۵ سال	بهسازی شده	اهواز - خرمشهر	S05	
۶۰/۷۰	-	-	۶۰	۶۰	۱۲۰	۶ ماه	جدید	سیرجان - بافت	S06	کرمان
۶۰/۷۰	-	-	۶۰	۶۰	۱۲۰	۱ سال	جدید	رмп خروجی سیرجان	S07	
۶۰/۷۰	-	۵۰	۵۰	۴۵	۱۴۵	۱ سال	بهسازی جدید	کهربندی سیرجان	S08	
۶۰/۷۰	۱۰۰	۸۰	۶۰	۶۰	۳۰۰	۱۵ سال	بهسازی شده	سیرجان - بندرعباس (۱)	S09	
۶۰/۷۰	۲۰۰	۸۰	۶۰	۶۰	۴۰۰	۱۵ سال	بهسازی شده	سیرجان - بندرعباس (۲)	S10	



شکل ۲. آزمایش FWD همراه با اندازه‌گیری دمای عمق لایه آسفالتی در یک سایت روسازی

Fig. 2. FWD testing with measuring the asphalt layer depth temperature at a pavement site

به روش استخراج قیر مطابق استانداردهای ای اس تی ام D2172 [۲۸] و آشتو T164 [۲۹] قرار گرفته اند. در این روش از حلال تری کلروراتیلن برای شستشوی مخلوط استفاده شده تا کمترین اثری را بر روی مشخصات قیر بازیابی از مخلوط داشته باشد. پس از شستشو و تجزیه مخلوط، محلول محتوی حلال، قیر و مصالح ریزدانه عبوری از فیلتر جمع آوری شده است. به منظور بازیابی قیر از محلول، ابتدا مصالح ریزدانه درون آن توسط دستگاه سانتریفیوژ با سرعت ۹۰۰۰ دور در دقیقه جداسازی و از محلول خارج شده است.

پس از استخراج قیر لایه ها توسط دستگاه تقطیر، جهت تعیین مشخصات ویسکوزیته قیر از آزمایش رئومتر برشی دینامیکی<sup>۲</sup> (DSR) (در حالت آزمایش طیف دما<sup>۳</sup>) بهره گرفته شده است. این آزمایش خواص رئولوژیکی و تغییرشکل پذیری قیر مانند مدول برشی ( $G^*$ ) و زاویه فاز ( $\delta$ ) را در دماهای میانی تا دماهای بالای وضعیت خدمت‌دهی روسازی مطابق با استانداردهای ای اس تی ام D7175 [۳۰] و آشتو T315 [۳۱] اندازه‌گیری می‌کند. جدول ۲ شرایط آزمایش DSR را روی قیرهای بازیابی از نمونه‌های تجزیه شده ارائه می‌کند.

برای تعیین خصوصیات ویسکوزیته قیر جهت استفاده در تحلیل

نیز روش اجزای محدود<sup>۱</sup> (FEM) برای تعیین مدول لایه ها استفاده می‌شود. در فرآیند محاسبات بازگشتی از روش ضخامت معادل با توجه به برتری این روش نسبت به سایر روش ها بهره گرفته شده است [۲۷].

### ۲-۳- مغزه‌گیری و تهیه نمونه‌ها

پس از انجام آزمایش FWD، سونداژ به منظور تعیین دقیق ضخامت لایه‌ها برای استفاده در محاسبات بازگشتی و همچنین مغزه‌گیری برای تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی در سایت‌های روسازی انجام شده است. در هر سایت، دو مغزه برای انجام آزمایش تجزیه مخلوط آسفالتی جهت تعیین مشخصات مخلوط ها تهیه و به آزمایشگاه منتقل شده است. شکل ۳ تصویری از عملیات سونداژ و مغزه‌گیری را در یکی از سایت‌های انتخابی نشان می‌دهد.

### ۳-۳- تجزیه مخلوط‌های آسفالتی برای تعیین خصوصیات حجمی مخلوط و مشخصات ویسکوزیته قیرهای بازیابی شده

در این مرحله آزمایش تجزیه مخلوط، بازیابی قیر و تفکیک سنگدانه ها برای دانه بندی جهت تعیین خصوصیات حجمی مخلوط انجام شده است. نمونه ها تحت آزمایش تجزیه مخلوط آسفالتی

2 Dynamic Shear Rheometer

3 Temperature Sweep

1 Finite Element Method



شکل ۳. انجام سونداز و مغزه‌گیری در یک سایت روسازی

Fig. 3. Drilling and core extraction of a pavement site

جدول ۲. شرایط آزمایش طیف دما با دستگاه DSR برای تعیین ویسکوزیته قیر لایه‌ها

Table 2. Temperature spectrum test condition with DSR device to determine the viscosity of asphalt binders

ردیف	پارامتر	شرح
۱	دمای آزمایش (درجه سلسیوس) - قطر نمونه قیر ۸ میلی‌متر	۴۰-۵
۲	دمای آزمایش (درجه سلسیوس) - قطر نمونه قیر ۲۵ میلی‌متر	۶۰-۴۰
۳	فرکانس بارگذاری (رادیان بر ثانیه)	۱۰ (۱/۵۹ هرتز)
۴	کرنش (درصد)	۱
۵	نرخ افزایش دما (درجه سلسیوس بر دقیقه)	۳
۶	نقاط قرائت مدول برشی و زاویه فاز	گام یک درجه سلسیوس افزایش دما

از مدل‌های پیش‌بینی (با استفاده از خصوصیات حجمی مخلوط‌های آسفالتی تعیین شده از تجزیه مغزه‌های گرفته شده از محل و نیز پارامترهای سختی و ویسکوزیته قیر بازیابی از آنها) با نتایج مدول محاسبات بازگشتی میدانی (از آزمایش FWD) مقایسه و مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به محدوده دمایی انجام آزمایش FWD، برای هر لایه آسفالتی در هر سایت ۲۱ داده دمایی از ۳۰ تا ۵۰ درجه سلسیوس (با گام یک درجه) (برای سایت‌های S09 و S10 تا ۴۵ درجه با توجه به داده‌های موجود) در نظر گرفته شده است. از آن جایی که مخلوط‌های آسفالتی در سایت‌های S09 و S10 مشابه یکدیگر بوده‌اند، لذا فقط داده‌های سایت S09 در تعیین مدول دینامیکی پیش‌بینی مورد تحلیل قرار گرفته است. بنابراین

مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی در ادامه پژوهش، از روش ارائه شده MEPDG [۲] بهره گرفته شده است. طبق این روش با داشتن مقادیر مدول برشی قیر با انجام آزمایش DSR در چندین دما و حداقل یک فرکانس (فرکانس برشی ۱/۵۹ هرتز معادل ۱۰ رادیان بر ثانیه)، پارامترهای ویسکوزیته (A و VTS) و عامل انتقال قیر به دست می‌آید. خلاصه خصوصیات حجمی لایه‌ها و مشخصات ویسکوزیته قیرهای بازیابی شده در جدول ۳ ارائه شده است.

#### ۴- تعیین مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی اصلی (موجود)

در این بخش نتایج مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی حاصل

جدول ۳. خصوصیات حجمی و ویسکوزیته قیر لایه‌ها

Table 3. Volumetric properties and viscosity of binders

پارامترهای ویسکوزیته قیر		خصوصیات حجمی مخلوط آسفالتی						کد لایه
<i>VTS</i>	<i>A</i>	<i>V<sub>beff</sub></i>	<i>V<sub>a</sub></i>	<i>ρ<sub>34</sub></i>	<i>ρ<sub>38</sub></i>	<i>ρ<sub>4</sub></i>	<i>ρ<sub>200</sub></i>	
-۲/۵۲۱۷	۷/۸۱۰۸	۸/۵	۶/۲	۰/۰	۲۲/۰	۵۲/۰	۵/۰	S01L1
-۲/۲۴۱۸	۷/۰۸۱۶	۷/۱	۵/۷	۱/۰	۱۱/۰	۳۳/۰	۷/۹	S02L1
-۱/۸۲۷۰	۵/۹۸۴۲	۷/۰	۶/۶	۰/۰	۲۷/۰	۴۹/۰	۶/۴	S03L1
-۱/۶۵۲۶	۵/۵۱۰۸	۶/۲	۶/۳	۳/۷	۲۸/۹	۴۷/۹	۴/۱	S04L1
-۱/۶۹۹۳	۵/۶۳۴۵	۶/۴	۵/۹	۴/۸	۱۸/۹	۴۰/۶	۳/۷	S04L2
-۱/۹۰۶۰	۶/۱۷۴۴	۷/۷	۵/۲	۱۳/۰	۳۷/۸	۶۰/۳	۶/۲	S04L3
-۱/۹۸۲۶	۶/۴۵۲۲	۸/۲	۵/۷	۰/۸	۱۹/۷	۴۱/۰	۸/۷	S05L1
-۱/۸۳۰۰	۶/۰۳۵۷	۸/۸	۳/۰	۰/۰	۱۵/۲	۳۶/۸	۸/۷	S05L2
-۱/۹۱۱۶	۶/۲۳۳۲	۸/۲	۳/۲	۷/۰	۳۴/۳	۵۵/۵	۴/۹	S05L3
-۲/۵۰۰۴	۷/۷۸۹۷	۹/۴	۵/۵	۵/۰	۱۹/۰	۳۲/۰	۱۲/۰	S06L1
-۲/۸۶۱۶	۸/۷۶۶۷	۱۱/۰	۴/۵	۰/۰	۱۱/۰	۳۲/۰	۷/۲	S06L2
-۲/۷۲۶۶	۸/۳۹۹۴	۷/۶	۶/۹	۰/۰	۷/۰	۳۲/۰	۸/۵	S07L1
-۲/۲۹۱۸	۷/۲۲۰۰	۷/۵	۶/۳	۶/۶	۱۹/۹	۳۵/۱	۷/۶	S07L2
-۲/۵۰۴۱	۷/۷۸۲۷	۷/۱	۴/۰	۰/۰	۵/۳	۳۴/۴	۷/۷	S08L1
-۲/۷۰۹۹	۸/۳۵۰۶	۵/۳	۷/۱	۵/۰	۳۰/۰	۴۶/۰	۷/۲	S08L2
-۲/۸۰۸۹	۸/۶۲۵۵	۶/۴	۸/۲	۲/۰	۱۹/۰	۳۵/۰	۸/۲	S08L3
-۱/۹۱۷۱	۶/۲۵۷۹	۹/۵	۲/۱	۰/۰	۱۵/۱	۳۴/۲	۷/۰	S09L1
-۱/۹۱۷۵	۶/۲۴۰۰	۱۰/۶	۲/۱	۰/۰	۲۴/۳	۳۷/۸	۸/۷	S09L2
-۲/۶۱۵۹	۸/۰۹۲۸	۷/۳	۴/۲	۱/۰	۲۰/۰	۳۷/۰	۴/۴	S09L3
-۲/۳۶۱۰	۷/۳۸۵۷	۶/۴	۵/۵	۳/۰	۳۱/۰	۴۱/۰	۶/۲	S09L4
-۱/۹۱۷۱	۶/۲۵۷۹	۹/۵	۲/۱	۰/۰	۱۵/۱	۳۴/۲	۷/۰	S10L1
-۱/۹۱۷۵	۶/۲۴۰۰	۱۰/۶	۲/۱	۰/۰	۲۴/۳	۳۷/۸	۸/۷	S10L2
-۲/۶۱۵۹	۸/۰۹۲۸	۷/۳	۴/۲	۱/۰	۲۰/۰	۳۷/۰	۴/۴	S10L3
-۲/۳۶۱۰	۷/۳۸۵۷	۶/۴	۵/۵	۳/۰	۳۱/۰	۴۱/۰	۶/۲	S10L4

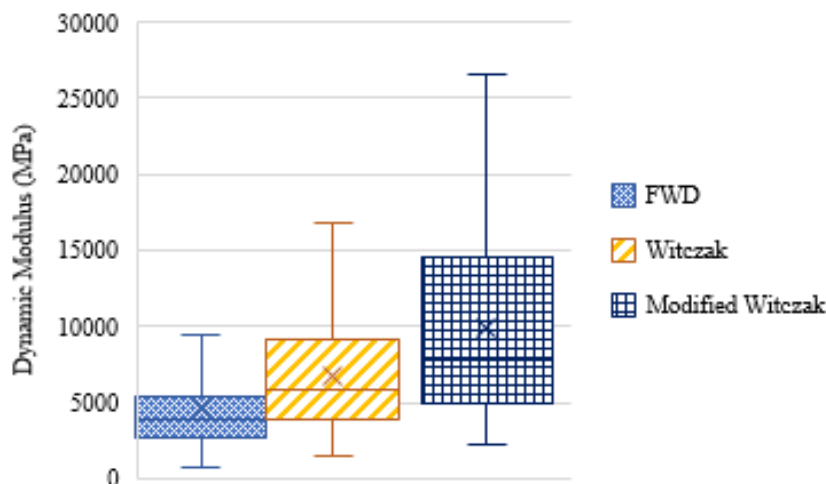
$$f_{FWD} = \frac{1}{2\Delta t} \quad (۶)$$

که در آن  $f_{FWD}$  فرکانس بارگذاری سقوط وزنه FWD (هرتز) و  $\Delta t$  مدت زمان بارگذاری (ثانیه) است.

مدول دینامیکی پیش بینی در دماهای محدوده انجام آزمایش FWD (۳۰ تا ۵۰ درجه سلسیوس) با استفاده از دو مدل ویتزاک و ویتزاک اصلاح شده با استفاده از داده‌های ارائه شده در جدول ۳ تعیین شده است. علاوه بر داده های این جدول، از مقادیر  $|G^*|$  و  $\delta$  حاصل از آزمایش DSR نیز در محدوده دمایی ۳۰ تا ۵۰ درجه

تعداد ۲۰ لایه آسفالتی در ۹ سایت روسازی در حال بهره برداری در محدوده دمایی ۳۰ تا ۵۰ درجه سلسیوس و در مجموع ۴۰۰ سری داده در ارزیابی مدل های پیش بینی در این بخش و کالیبراسیون این مدل ها برای ساخت مدل‌های جدید درجا در بخش‌های بعدی مورد استفاده قرار گرفته است.

فرکانس بارگذاری FWD با استفاده از تاریخچه زمانی بار و افت و خیز و فرض مقدار میانگین ۳۰ میلی ثانیه برای مدت زمان هر بارگذاری سقوط وزنه این آزمایش به دست آمده است. در این پژوهش فرکانس FWD از رابطه (۶) محاسبه شده و برابر ۱۶/۶۷ هرتز تعیین شده است [۳۲].



شکل ۴. مدول دینامیکی پیش‌بینی لایه‌های آسفالتی با مدل‌های اصلی در مقایسه با مقادیر محاسبات بازگشتی  
 Fig. 4. FWD backcalculated and predicted dynamic moduli for all samples using original predictive models

$$S_e = \sqrt{\frac{SSE}{n-1}} \quad (8)$$

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum [E_m - \bar{E}_m]^2}{n-1}} \quad (9)$$

در این روابط SSE مجموع مربعات خطا<sup>۳</sup>،  $|E^*|$  مدول دینامیکی پیش‌بینی و  $E_m$  مدول محاسبات بازگشتی،  $\bar{E}_m$  میانگین مقادیر مدول محاسبات بازگشتی،  $S_e$  خطای استاندارد<sup>۴</sup> (انحراف معیار خطاها)،  $S_y$  انحراف معیار مقادیر مدول محاسبات بازگشتی و  $n$  تعداد مشاهدات است.

برای ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل از پارامترهای  $S_e/S_y$  نسبت خطای استاندارد به انحراف معیار مقادیر مدول محاسبات بازگشتی و  $R^2$  ضریب تعیین نسبت به خط برابری (LOE) به صورت رابطه (۱۰) و برای محاسبه اریب پیش‌بینی مدل از پارامترهای شیب<sup>۵</sup> و عرض از مبدأ<sup>۶</sup> خط روند<sup>۷</sup> مقادیر پیش‌بینی در مقابل مقادیر محاسبات بازگشتی استفاده شده است.

سلسیوس در تعیین مقادیر پیش‌بینی مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی بهره‌گرفته شده که به جهت اختصار از ارائه آنها صرف نظر شده است.

نتایج مدول‌های پیش‌بینی و نیز مقادیر مدول FWD متناظر در همان دما در قالب پارامترهای آماری در شکل ۴ ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، مدول‌های دینامیکی پیش‌بینی با مدل‌های ویتزاک و ویتزاک اصلاح‌شده دارای مقادیر بزرگ‌تری نسبت به مدول‌های محاسبات بازگشتی هستند. مدل ویتزاک اصلاح‌شده پراکندگی پیش‌بینی بالایی از خود نشان داده و بیشترین اختلاف را با مقادیر محاسبات بازگشتی دارد.

## ۵- ارزیابی عملکرد مدل‌های پیش‌بینی اصلی

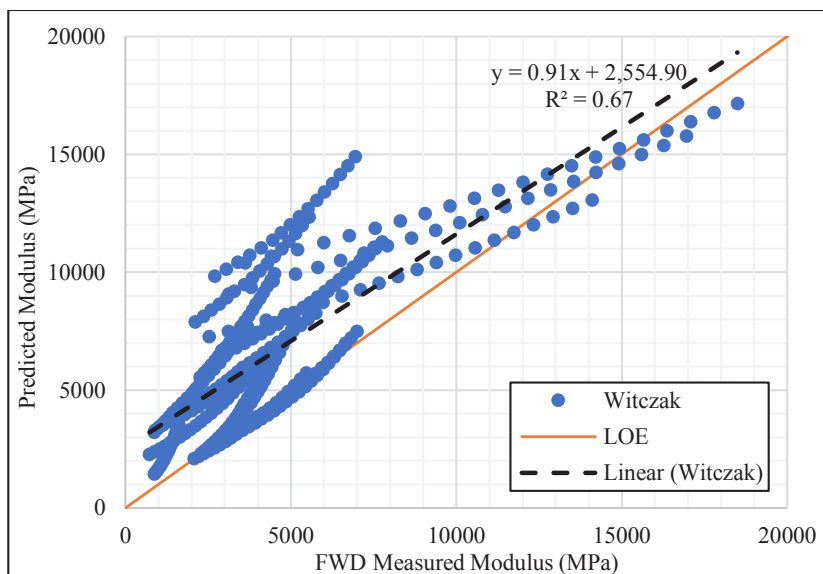
عملکرد پیش‌بینی مدل‌های تعیین مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی توسط دو معیار دقت<sup>۱</sup> و اریب<sup>۲</sup> پیش‌بینی مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور مدول دینامیکی به عنوان متغیر مستقل تعریف شده و خطاها به صورت زیر محاسبه شده است.

$$SSE = \sum \left[ \left| E_p^* - E_m \right| \right]^2 \quad (7)$$

- 3 Sum of Squared Error
- 4 Standard Error
- 5 Slope
- 6 Intercept
- 7 Trend Line

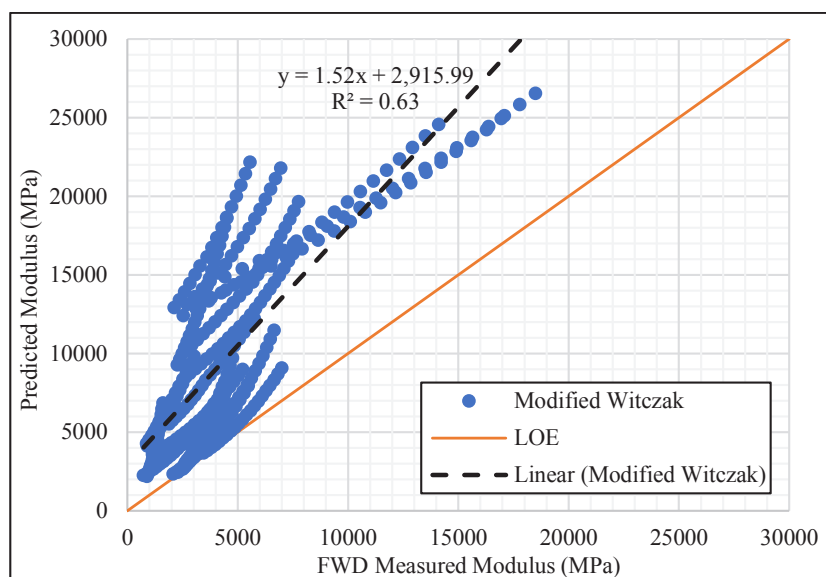
- 1 Goodness-of-fit
- 2 Bias





شکل ۵. مدول دینامیکی پیش‌بینی توسط مدل ویتزاک در برابر مقادیر مدول محاسبات بازگشتی FWD

Fig. 5. Predicted dynamic moduli using Witczak model versus FWD backcalculated values



شکل ۶. مدول دینامیکی پیش‌بینی توسط مدل ویتزاک اصلاح شده در برابر مقادیر مدول محاسبات بازگشتی FWD

Fig. 6. Predicted dynamic moduli using Modified Witczak model versus FWD backcalculated values

یک میل کند، دقت پیش‌بینی مدل بالاتر است. از سوی دیگر هر چه شیب خط روند به یک و همچنین عرض از مبدأ این خط به صفر نزدیک باشد، مدل دارای اریب پیش‌بینی کمتری خواهد بود.

شکل ۵ و شکل ۶ مقادیر مدول دینامیکی پیش‌بینی را به ترتیب توسط مدل های ویتزاک و ویتزاک اصلاح شده در برابر مدول

$$R^2 = 1 - \frac{n-p}{n-1} \left( \frac{S_e}{S_y} \right)^2 \quad (10)$$

که در این رابطه  $p$  تعداد پارامترهای مدل است. بدیهی است هر چه نسبت  $S_e/S_y$  کمتر و به صفر نزدیک باشد و نیز مقدار  $R^2$  به



جدول ۴. پارامترهای ارزیابی عملکرد مدل‌های پیش‌بینی اصلی

Table 4. Performance evaluation parameters of original predictive models

مدل پیش‌بینی	SSE	$S_e$	$S_e/S_y$	$R^2$ (LOE)	شیب	عرض از مبدأ
ویتزاک	$3/4 \times 10^9$	۲۹۴۰	۰/۹۲	۰/۱۵	۰/۹۰۶	۲۵۵۵
ویتزاک اصلاح شده	$1/8 \times 10^{10}$	۶۶۶۸	۲/۱۰	غیرقبول	۱/۵۱۷	۲۹۱۶

به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار عرض از مبدأ رابطه خطی روند مقادیر پیش‌بینی و محاسبات بازگشتی مدول دینامیکی لایه های آسفالتی را دارا هستند.

بنابراین مدل پیش‌بینی ویتزاک به عنوان مدل دقیق‌تر و مدل ویتزاک اصلاح شده به عنوان مدل با دقت کم پیش‌بینی مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی در روسازی های در حال بهره برداری مطرح می‌شوند. همچنین هر دو مدل دارای اریب قابل توجه پیش‌بینی مدول دینامیکی برای لایه های آسفالتی بوده و اریب بیشتر نیز متعلق به مدل ویتزاک اصلاح شده می باشد. نتایج ارزیابی عملکرد مدل‌های پیش‌بینی مدول دینامیکی در قالب دو معیار دقت و اریب، قابلیت پرداخت و ارائه مدل‌های جدیدی را برای پیش‌بینی مدول دینامیکی لایه های آسفالتی در روسازی‌های در حال بهره برداری نشان می دهد. در بخش بعدی، مدل های جدید ارائه شده است.

۶- کالیبراسیون (پرداخت) مدل‌های پیش‌بینی اصلی و ارائه مدل‌های جدید درجا

در این بخش با استفاده از روش برازش غیرخطی<sup>۲</sup>، پرداخت مدل ها برای استفاده در پیش‌بینی مدول دینامیکی لایه های آسفالتی روسازی های در حال بهره برداری با استفاده از داده های FWD انجام شده و مدل های جدیدی ارائه شده است. برای این منظور داده‌های موجود به دو دسته ۸۰ درصد (۳۲۰ سری داده) و ۲۰ درصد (۸۰ سری داده) به ترتیب برای مدل سازی و اعتبارسنجی مدل‌های جدید تفکیک شده اند. قبل از تفکیک، برای توزیع یکنواخت داده ها از اعداد تصادفی جهت مرتب سازی سری های داده بهره گرفته شده و ترتیب داده ها به صورت کاملاً یکنواخت و تصادفی در آمده است. در این بخش دو مدل جدید با پرداخت مدل‌های پیش‌بینی در بخش

محاسبات بازگشتی FWD ارائه می کند. عمده مقادیر پیش‌بینی توسط مدل های ویتزاک و ویتزاک اصلاح شده در بالای خط برابری<sup>۱</sup> (LOE) قرار گرفته اند که این نشان دهنده بیش پیش‌بینی این دو مدل در تعیین مدول دینامیکی لایه های آسفالتی روسازی های در حال بهره برداری است. همچنین در این شکل ها خط روند بین مقادیر پیش‌بینی و مقادیر محاسبات بازگشتی ترسیم شده و معادله خط روند همراه با ضریب تعیین ( $R^2$ ) آن در شکل ارائه شده است. از این رابطه می توان به نوعی برای تصحیح مقادیر پیش‌بینی با مقادیر محاسبات بازگشتی استفاده نمود. همان‌طور که در این شکل ها دیده می شود، خط روند در مدل ویتزاک با ضریب تعیین ۰/۶۷ رابطه خطی مقادیر پیش‌بینی مدول دینامیکی لایه های آسفالتی بهتری را با مقادیر محاسبات بازگشتی در مقایسه با مدل ویتزاک اصلاح شده دارد.

پارامترهای ارزیابی عملکرد مدل های پیش‌بینی در جدول ۴ ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول آمده است مقدار بیشتر ضریب تعیین ( $R^2$ ) نسبت به خط برابری (LOE) برای مدل ویتزاک با مقدار ۰/۱۵ بوده ولی این پارامتر برای مدل ویتزاک اصلاح شده دارای مقدار غیرقابل قبولی بوده است. در مورد نسبت خطای استاندارد پیش‌بینی به انحراف معیار محاسبات بازگشتی ( $S_e/S_y$ ) نیز مقدار کمتر برای مدل ویتزاک با مقدار ۰/۹۲ و مقدار بیشتر برای مدل ویتزاک اصلاح شده برابر ۲/۱۰ می باشد.

پارامترهای خط روند مقادیر پیش‌بینی و مقادیر محاسبات بازگشتی نیز نشان می دهد مدل ویتزاک با شیب ۰/۹۰۶ نزدیک ترین مقدار به یک و مدل ویتزاک اصلاح شده با مقدار شیب ۱/۵۱۷ بیشترین اختلاف با مقدار شیب یک را دارا است. همچنین مدل ویتزاک با مقدار ۲۵۵۵ و مدل ویتزاک اصلاح شده با مقدار ۲۹۱۶،

2 Nonlinear Regression

1 Line of Equality

قبل آمده است.

### ۶-۲- مدل ویتزاک اصلاح شده درجا

مدل پیش بینی مدول دینامیکی ویتزاک اصلاح شده نیز با استفاده از داده های مدل سازی پرداخت شده است. شکل ریاضی این مدل به صورت رابطه (۱۲) است.

$$\log|E^*| = b_1 + b_2 \left( |G_b^*|^{b_3} \right) \times \left\{ b_4 + b_5 \rho_{200} + b_6 (\rho_{200})^2 + b_7 \rho_4 + b_8 (\rho_4)^2 + b_9 \rho_{38} + b_{10} (\rho_{38})^2 + b_{11} V_a + b_{12} \left( \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right) \right\} + \frac{b_{13} + b_{14} V_a + b_{15} \left( \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right) + b_{16} \rho_{38} + b_{17} (\rho_{38})^2 + b_{18} \rho_{34}}{1 + e^{(b_{19} + b_{20} \log(|G_b^*|) + b_{21} \log(\rho_b))}}$$

که تمامی پارامترهای آن قبلاً تعریف شده است. ضرایب  $b_1$  تا  $b_{14}$  مربوط به پارامترهای مدل اصلی و مدل درجا برای لایه های آسفالتی در حال بهره برداری که مدل ویتزاک اصلاح شده درجا<sup>۱</sup> نامیده شده است به صورت جدول ۶ ارائه شده است.

### ۷- ارزیابی عملکرد مدل های درجا

نتایج مدول های دو مدل پیش بینی مدول دینامیکی درجای لایه های آسفالتی شامل مدل ویتزاک درجا و مدل ویتزاک اصلاح شده درجا که توسط داده های پرداخت مدل ها (۸۰ درصد داده ها) محاسبه شده اند و نیز مقادیر مدول FWD متناظر در همان دما در قالب پارامترهای آماری در شکل ۷ ارائه شده است. همان طور که در این شکل دیده می شود، مدول های دینامیکی پیش بینی توسط مدل های درجا، محدوده نتایج مشابهی با مقادیر مدول محاسبات بازگشتی FWD ارائه کرده اند. می توان مشاهده کرد مدل های جدید قابلیت بسیار خوبی در تعیین مدول دینامیکی درجای لایه های آسفالتی دارند.

همانند مدل های اصلی، عملکرد پیش بینی مدل های جدید تعیین مدول دینامیکی لایه های آسفالتی توسط دو معیار دقت و اریب پیش بینی مورد ارزیابی قرار گرفته است. شکل ۸ و شکل ۹ مقادیر مدول دینامیکی پیش بینی را به ترتیب توسط مدل های

### ۶-۱- مدل ویتزاک درجا

مدل پیش بینی مدول دینامیکی ویتزاک با استفاده از داده های مدل سازی تعریف شده (۳۲۰ سری داده) پرداخت شده است. شکل ریاضی این مدل مطابق رابطه اصلی آن به صورت رابطه (۱۱) می باشد.

$$\log|E^*| = b_1 + b_2 \rho_{200} + b_3 (\rho_{200})^2 + b_4 \rho_4 + b_5 V_a + b_6 \left( \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right) + \frac{b_7 + b_8 \rho_4 + b_9 \rho_{38} + b_{10} (\rho_{38})^2 + b_{11} \rho_{34}}{1 + e^{(b_{12} + b_{13} \log(f) + b_{14} \log(\eta))}}$$

که تمامی پارامترهای این رابطه قبلاً تعریف شده است. ضرایب  $b_1$  تا  $b_{14}$  مربوط به پارامترهای مدل اصلی و مدل درجا برای لایه های آسفالتی در حال بهره برداری که مدل ویتزاک درجا<sup>۱</sup> نامیده شده است به صورت جدول ۵ می باشد.

جدول ۵. ضرایب پارامترهای مدل ویتزاک (اصلی) و مدل ویتزاک درجا (کالیبره)

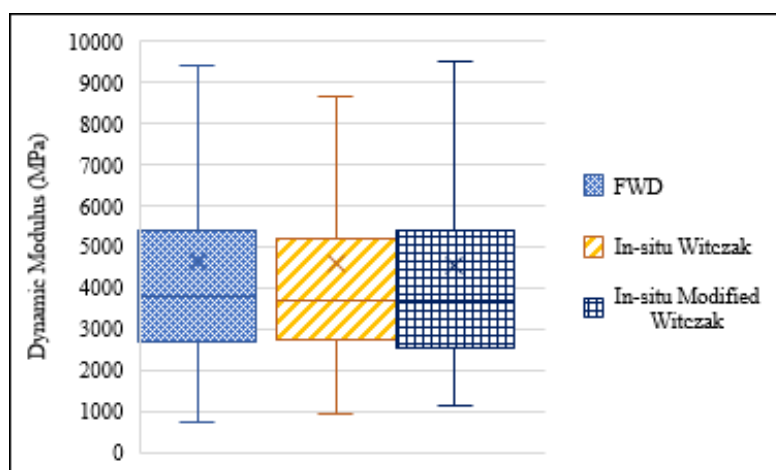
Table 5. Coefficients of Witzzak model (original) and in-situ Witzzak model (calibrated) parameters

مقدار کالیبره	مقدار اولیه	ضریب
۷/۷۱۸۳۱۷	۳/۷۵۰۰۶۳	$b1$
-۰/۰۰۵۸۰۵	۰/۰۲۹۳۲۰	$b2$
۰/۰۰۳۵۵۶	-۰/۰۰۱۷۶۷	$b3$
-۰/۰۱۲۲۳۶	-۰/۰۰۲۸۴۱	$b4$
-۰/۱۲۵۱۲۲	-۰/۰۵۸۰۹۷	$b5$
-۲/۳۰۳۵۱۱	-۰/۸۰۲۲۰۸	$b6$
۱/۳۳۴۵۲۴	۳/۸۷۱۹۷۷	$b7$
۰/۰۴۹۵۷۲	-۰/۰۰۲۱۰۰	$b8$
-۰/۱۲۷۵۳۵	۰/۰۰۳۹۵۸	$b9$
۰/۰۰۲۲۵۱	-۰/۰۰۰۰۱۷	$b10$
۰/۰۸۸۳۶۷	۰/۰۰۵۴۷۰	$b11$
۵/۹۳۱۵۹۶	-۰/۶۰۳۳۱۳	$b12$
-۳/۱۱۶۹۸۲	-۰/۳۱۳۳۵۱	$b13$
-۰/۹۴۹۲۵۶	-۰/۳۹۳۵۳۲	$b14$

جدول ۶. ضرایب پارامترهای مدل ویتزاک اصلاح شده (اصلی) و مدل ویتزاک اصلاح شده درجا (کالیبره)

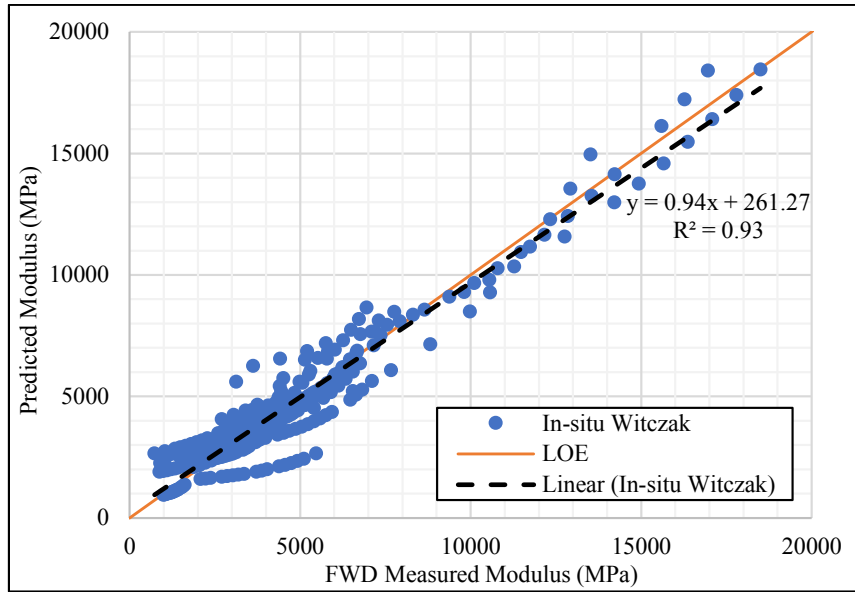
Table 6. Coefficients of Modified Witzak model (original) and in-situ Modified Witzak model (calibrated) parameters

مقدار کالیبره	مقدار اولیه	ضریب
۰/۸۱۳۴۲	-۰/۳۴۹۰۰	<i>b1</i>
۰/۷۶۵۱۷	۰/۷۵۴۰۰	<i>b2</i>
-۰/۰۱۶۹۵	-۰/۰۰۵۲۰	<i>b3</i>
۸/۲۲۴۸۸	۶/۶۵۰۰۰	<i>b4</i>
-۰/۰۱۲۹۷	-۰/۰۳۲۰۰	<i>b5</i>
۰/۰۰۵۵۵	۰/۰۰۲۷۰	<i>b6</i>
۰/۰۰۰۱۰	۰/۰۱۱۰۰	<i>b7</i>
۰/۰۰۰۰۶	-۰/۰۰۰۱۰	<i>b8</i>
۰/۰۴۲۰۹	۰/۰۰۶۰۰	<i>b9</i>
-۰/۰۰۱۷۶	-۰/۰۰۰۱۴	<i>b10</i>
-۰/۱۶۷۲۸	-۰/۰۸۰۰۰	<i>b11</i>
-۳/۷۴۵۷۰	-۱/۰۶۰۰۰	<i>b12</i>
۵/۷۶۴۲۷	۲/۵۶۰۰۰	<i>b13</i>
-۰/۱۰۶۶۰	۰/۰۳۰۰۰	<i>b14</i>
-۰/۱۸۹۶۷	۰/۷۱۰۰۰	<i>b15</i>
-۰/۱۷۴۹۸	۰/۰۱۲۰۰	<i>b16</i>
۰/۰۰۵۲۹	-۰/۰۰۰۱۰	<i>b17</i>
۰/۰۷۶۰۸	-۰/۰۱۰۰۰	<i>b18</i>
-۲/۸۰۵۶۷	-۰/۰۷۸۱۴۰	<i>b19</i>
-۰/۶۳۹۳۴	-۰/۵۷۸۵۰	<i>b20</i>
۲/۹۵۳۳۴	۰/۸۸۳۴۰	<i>b21</i>



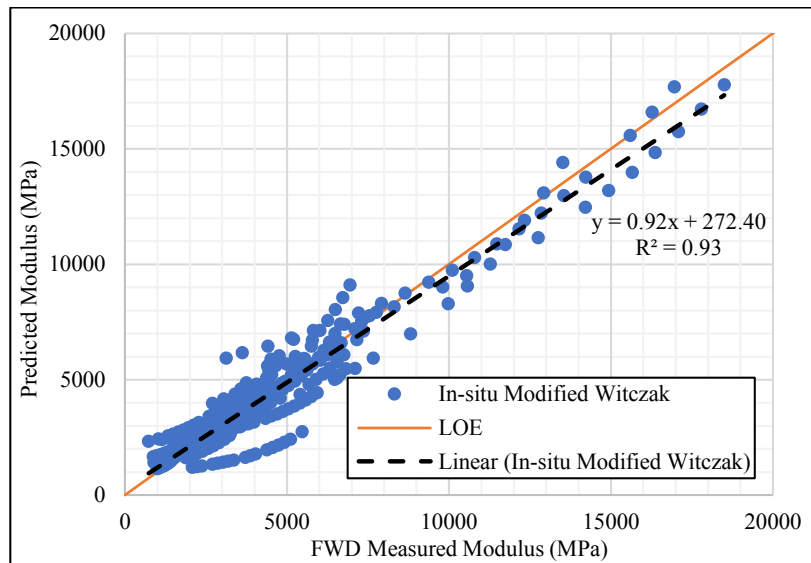
شکل ۷. مدول دینامیکی پیش‌بینی لایه‌های آسفالتی با مدل‌های درجا (داده‌های مدل‌سازی)

Fig. 7. FWD backcalculated and predicted dynamic moduli using new in-situ models (modeling data points)



شکل ۸. مدول دینامیکی پیش‌بینی مدل ویتزاک در جا در برابر مدول محاسبات بازگشتی FWD (مدل‌سازی)

Fig. 8. Predicted dynamic moduli using in-situ Witczak model versus FWD backcalculated values (modeling data points)



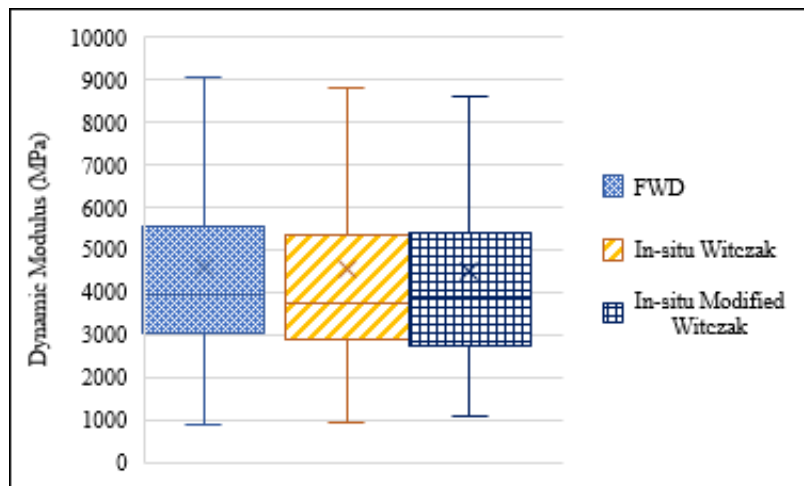
شکل ۹. مدول دینامیکی پیش‌بینی مدل ویتزاک اصلاح شده در جا در برابر مدول محاسبات بازگشتی FWD (مدل‌سازی)

Fig. 9. Predicted dynamic moduli using in-situ Modified Witczak model versus FWD backcalculated values (modeling data points)

جدول ۷. پارامترهای ارزیابی عملکرد مدل‌های پیش‌بینی درجا (داده‌های مدل‌سازی)

Table 7. Performance evaluation parameters of in-situ predictive models (modeling data points)

مدل پیش‌بینی	SSE	$S_e$	$S_e/S_y$	$(LOE)R^2$	شیب	عرض از مبدأ
ویتزاک درجا	$2/2 \times 10^4$	۸۳۷	۰/۲۶	۰/۹۳	۰/۹۴۲	۲۶۱
ویتزاک اصلاح شده درجا	$2/4 \times 10^4$	۸۷۱	۰/۲۷	۰/۹۳	۰/۹۲۲	۲۷۲



شکل ۱۰. مدول دینامیکی پیش‌بینی لایه‌های آسفالتی با مدل‌های درجا (داده‌های اعتبارسنجی)

Fig. 10. FWD backcalculated and predicted dynamic moduli using new in-situ models (validation data points)

و بیشترین مقدار عرض از مبدأ رابطه خطی روند مقادیر پیش‌بینی و محاسبات بازگشتی مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی را دارا هستند. بنابراین هر دو مدل پیش‌بینی ویتزاک درجا و ویتزاک اصلاح شده درجا دارای دقت پیش‌بینی بسیار خوبی هستند. همچنین مقایسه اریب پیش‌بینی مدل‌های درجا نیز نشان می‌دهد دو مدل درجا دارای اریب پیش‌بینی کم و قابل قبولی می‌باشند.

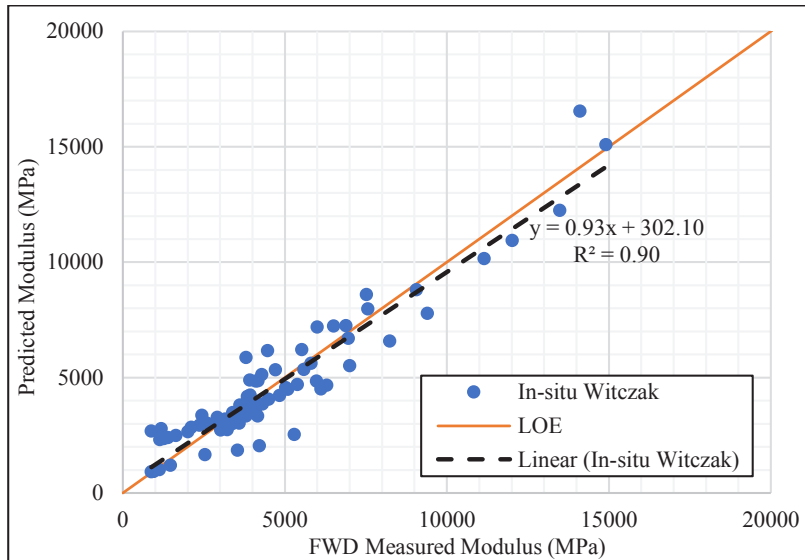
#### ۸- اعتبارسنجی مدل‌های جدید درجا

برای اعتبارسنجی مدل‌های جدید درجا، ارزیابی عملکرد این مدل‌ها با استفاده از داده‌های اعتبارسنجی تفکیک شده از مجموعه داده‌های پژوهش (داده‌های غیر از ساخت و پرداخت مدل) استفاده شده است. نتایج مدول‌های دو مدل پیش‌بینی درجای مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی در بخش قبل که توسط داده‌های اعتبارسنجی (۲۰ درصد داده‌ها) محاسبه شده‌اند، همراه با مقادیر مدول FWD متناظر در همان دما در قالب پارامترهای آماری در شکل ۱۰ ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، مدول‌های دینامیکی

ویتزاک درجا و ویتزاک اصلاح شده درجا در برابر مدول محاسبات بازگشتی FWD ارائه می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل‌های جدید نتایج پیش‌بینی مدول دینامیکی را در امتداد خط برابری (LOE) ارائه کرده‌اند.

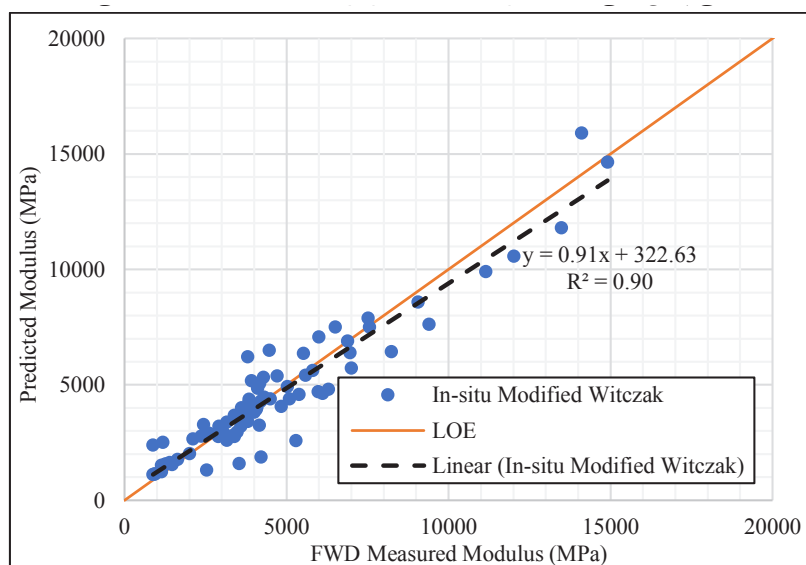
برای مدل‌های درجا نیز پارامترهای ارزیابی عملکرد در جدول ۷ ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول آمده است دو مدل دارای مقدار ضریب تعیین ( $R^2$ ) نسبت به خط برابری (LOE) یکسان ۰/۹۳ هستند. در مورد نسبت خطای استاندارد پیش‌بینی به انحراف معیار محاسبات بازگشتی ( $S_e/S_y$ ) نیز مقدار کمتر برای مدل ویتزاک درجا برابر ۰/۲۶ و مقدار بیشتر برای مدل ویتزاک اصلاح شده درجا با مقدار ۰/۲۷ می‌باشد.

پارامترهای خط روند مقادیر پیش‌بینی مدل‌های درجا و مقادیر محاسبات بازگشتی نیز نشان می‌دهد مدل ویتزاک درجا با شیب ۰/۹۴۲ نزدیک‌ترین مقدار به یک و مدل ویتزاک اصلاح شده درجا با مقدار شیب ۰/۹۲۲ بیشترین اختلاف با مقدار شیب یک را دارا است. همچنین این دو مدل با مقادیر ۲۶۱ و ۲۷۲، به ترتیب کمترین



شکل ۱۱. مدول دینامیکی پیش‌بینی مدل ویتزاک درجا در برابر مدول محاسبات بازگشتی FWD (اعتبارسنجی)

Fig. 11. Predicted dynamic moduli using in-situ Witzzak model versus FWD backcalculated values (validation data points)



شکل ۱۲. مدول دینامیکی مدل ویتزاک اصلاح شده درجا در برابر مدول محاسبات بازگشتی FWD (اعتبارسنجی)

Fig. 12. Predicted dynamic moduli using in-situ Modified Witzzak model versus FWD backcalculated values (validation data points)

درجای لایه های آسفالتی نیز توسط دو معیار دقت و اریب پیش‌بینی اعتبارسنجی شده است. شکل ۱۱ و شکل ۱۲ مقادیر مدول دینامیکی پیش‌بینی را به ترتیب توسط مدل های ویتزاک درجا و ویتزاک اصلاح شده درجا در برابر مدول محاسبات بازگشتی FWD ارائه می

پیش‌بینی توسط مدل های درجا برای داده های اعتبارسنجی نیز محدوده نتایج مشابهی با مقادیر مدول محاسبات بازگشتی FWD همانند داده های ساخت مدل ها ارائه کرده اند. عملکرد پیش‌بینی مدل های جدید تعیین مدول دینامیکی



جدول ۸. پارامترهای ارزیابی عملکرد مدل‌های پیش‌بینی درجا (داده‌های اعتبارسنجی)

Table 8. Performance evaluation parameters of in-situ predictive models (validation data points)

مدل پیش‌بینی	SSE	$S_e$	$S_e/S_y$	$(LOE) R^2$	شیب	عرض از مبدأ
ویتزاک درجا	$7/2 \times 10^7$	۹۵۱	۰/۳۳	۰/۸۹	۰/۹۲۷	۳۰۲
ویتزاک اصلاح شده درجا	$7/1 \times 10^7$	۹۴۸	۰/۳۲	۰/۸۹	۰/۹۰۷	۳۲۳

قبولی در مقایسه با دقت و اریب مدل‌ها با داده‌های ساخت مدل‌ها دارد. با جمع بندی نتایج هر دو ارزیابی عملکرد ساخت و اعتبارسنجی مدل‌های درجا، قابلیت پیش‌بینی مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی در روسازی‌های در حال بهره‌برداری به ویژه در محدوده دمایی آزمایش‌های این پژوهش، با دقت بالا و اریب پیش‌بینی پایین توسط این مدل‌ها مشخص می‌شود. همچنین با بررسی دو مدل درجای جدید ارائه شده در این پژوهش، بهترین عملکرد پیش‌بینی به ترتیب به مدل‌های ویتزاک درجا و ویتزاک اصلاح شده درجا تعلق می‌گیرد.

۹- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با انجام آزمایش‌های میدانی و آزمایشگاهی در روسازی‌های آسفالتی در حال بهره‌برداری در دو استان خوزستان و کرمان، مدل‌هایی جهت پیش‌بینی مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی با استفاده از نتایج آزمایش FWD ارائه شده است. با داشتن نتایج آزمایش‌ها، مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی توسط دو مدل پیش-بینی ویتزاک و ویتزاک اصلاح شده در محدوده دماها و فرکانس انجام آزمایش FWD تعیین شده و امکان استفاده از این مدل‌ها برای ساخت مدل‌های جدید جهت پیش‌بینی مدول دینامیکی درجای لایه‌های آسفالتی در حال بهره‌برداری بررسی شده است. مدل‌های جدید پیش‌بینی شامل مدل ویتزاک درجا و مدل ویتزاک اصلاح شده درجا با پرداخت مدل‌های موجود توسعه یافته و مورد ارزیابی و اعتبارسنجی قرار گرفته‌اند.

ارزیابی مدول دینامیکی لایه‌های آسفالتی روسازی‌های در حال بهره‌برداری توسط دو مدل پیش‌بینی مدول دینامیکی ویتزاک و ویتزاک اصلاح شده با نتایج محاسبات بازگشتی FWD، نشان دهنده امکان استفاده از این مدل‌ها در ساخت مدل‌های جدید پیش‌بینی مدول دینامیکی درجای لایه‌های آسفالتی است.

کند. با استفاده از داده‌های اعتبارسنجی نیز نتایج مشابهی با نتایج پیش‌بینی‌های مدول دینامیکی با داده‌های ساخت مدل‌ها در بخش قبل به دست آمده است.

پارامترهای ارزیابی عملکرد مدل‌های درجا در اعتبارسنجی این مدل‌ها در جدول ۸ ارائه شده است. دو مدل دارای مقدار ضریب تعیین ( $R^2$ ) نسبت به خط برابری (LOE) یکسان ۰/۸۹ هستند. در مورد نسبت خطای استاندارد پیش‌بینی به انحراف معیار محاسبات بازگشتی ( $S_e/S_y$ ) نیز مقدار کمتر به مدل ویتزاک اصلاح شده درجا با مقدار ۰/۳۲ و مقدار بیشتر به مدل ویتزاک درجا برابر ۰/۳۳ تعلق دارد.

پارامترهای خط روند مقادیر پیش‌بینی مدل‌های درجا و مقادیر محاسبات بازگشتی در اعتبارسنجی مدل‌ها نیز نشان می‌دهد مدل ویتزاک درجا با شیب ۰/۹۲۷ نزدیک‌ترین مقدار به یک و مدل ویتزاک اصلاح شده درجا با مقدار شیب ۰/۹۰۷ بیشترین اختلاف با مقدار شیب یک را دارا است. همچنین این دو مدل با مقادیر ۳۰۲ و ۳۲۳، به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار عرض از مبدأ رابطه خطی روند مقادیر پیش‌بینی و محاسبات بازگشتی مدول لایه‌های آسفالتی را دارا هستند.

بنابراین نتایج این بخش نیز مشابه نتایج ارزیابی دقت و اریب مدل‌ها توسط داده‌های ساخت مدل‌ها است. هر دو مدل پیش‌بینی ویتزاک درجا و مدل ویتزاک اصلاح شده درجا دارای دقت بسیار خوبی بوده‌اند. همچنین مقایسه اریب پیش‌بینی مدل‌های درجا نیز نشان می‌دهد دو مدل درجا دارای اریب پیش‌بینی کم و قابل قبولی می‌باشند و بین آن دو، مدل ویتزاک درجا تا حدودی دارای اریب کمتری است.

از این رو می‌توان نتیجه گرفت اعتبارسنجی مدل‌های درجا که با ارزیابی دقت و اریب پیش‌بینی مدل‌ها انجام شده است، نتایج قابل

Model for the Dynamic (Complex) Modulus of Asphalt Mixtures”, Inter Team Technical Rep. prepared for the NCHRP 1-37A Project, University of Maryland, College Park, MD.

- [5] Bari, J. and Witzak, M. W. (2006). “Development of a New Revised Version of the Witzak E\* Predictive Model for Hot Mix Asphalt Mixtures”, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 75, pp. 381-423.
- [6] Christensen, D. W., Pellinen, T. and Bonaquist, R. F. (2003). “Hirsch Model for Estimating the Modulus of Asphalt Concrete”, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 72, pp. 97-121.
- [7] Al-Khateeb, G., Shenoy, A., Gibson, N. and Harman, T. (2006). “A New Simplistic Model for Dynamic Modulus Predictions of Asphalt Paving Mixtures”, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 75, pp. 1254-1293.
- [8] Sakhaeifar, M. S., Kim, Y. R. and Kabir, P. (2015). “New Predictive Models for the Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt”, Construction and Building Materials, No. 76, pp. 221-231. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.011>
- [9] Sakhaeifar, M. S., Underwood, B. S., Ranjithan, S., Kim, Y. R. and Jackson, N. C. (2009). “Application of Artificial Neural Networks for Estimating Dynamic Modulus of Asphalt Concrete”, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2127, pp. 173-186. doi: <http://dx.doi.org/10.3141/2127-20>
- [10] Sakhaeifar, M. S., Underwood, B. S., Kim, Y. R., Puccinelli, J. and Jackson, N. (2010). “Development of Artificial Neural Network Predictive Models for Populating Dynamic Moduli of Long-Term Pavement Performance Sections”, Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, No. 2181, pp. 88-97. doi: <http://dx.doi.org/10.3141/2181-10>

دو مدل ویتزاک درجا و ویتزاک اصلاح شده درجا که با کالیبراسیون مدل‌های موجود توسعه یافته‌اند، قابلیت پیش بینی مدول دینامیکی لایه های آسفالتی روسازی‌های در حال بهره برداری را به ویژه در محدوده دمایی آزمایش های این پژوهش، با دقت پیش‌بینی بالا و اریب پیش‌بینی پایین نشان داده است. با بررسی نتایج دو مدل، بهترین عملکرد پیش بینی به مدل ویتزاک درجا با ضریب تعیین ۰/۹۳ تعلق دارد. عدم نیاز به انجام آزمایش میدانی FWD و پیش بینی مدول دینامیکی درجای لایه های آسفالتی به طور مستقیم از خصوصیات مصالح لایه ها با دقت قابل قبولی نیز مهم ترین مزیت مدل های پیش‌بینی جدید درجای توسعه یافته در این پژوهش به شمار می‌آید.

### تشکر و قدردانی

از دفتر مهندسی مشاور شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک کشور و به ویژه مدیرکل محترم این دفتر، جناب آقای دکتر مجتبی عباس‌قربانی در راستای فراهم نمودن امکان انجام آزمایش‌های این پژوهش، کمال تشکر و قدردانی را دارد. همچنین از راهنمایی‌های ارزنده جناب آقای دکتر امیر کاوسی، استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس سپاسگزاری می‌شود.

### مراجع

- [1] AASHTO. (2001). “AASHTO Pavement Management Guide”, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- [2] ARA. (2004). “Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures”, NCHRP 1-37A, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- [3] Solatifar, N. (2018). Analysis of Conventional Dynamic Modulus Predictive Models of Asphalt Mixtures, Amirkabir Journal of Civil Engineering, In press. doi: <http://dx.doi.org/10.22060/ceej.2018.15006.5811>
- [4] Andrei, D., Witzak, M. W. and Mirza, M. W. (1999). “Development of a Revised Predictive

- Civil Engineering, Vol. 4, No. 1, pp. 18-29. doi: <https://doi.org/10.22075/jrce.2016.488>
- [18] Solatifar, N., Kavussi, A., Abbasghorbani, M. and Katicha, S. W. (2019). "Development of Dynamic Modulus Master Curves of In-service Asphalt Layers Using MEPDG Models", Road Materials and Pavement Design. Vol 20, No. 1, pp. 225-243. doi: <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1380688>
- [19] Kutay, E., Chatti, K. and Lei, L. (2011). "Backcalculation of Dynamic Modulus Master Curve from Falling Weight Deflectometer Surface Deflections", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2227, pp. 87-96. doi: <https://doi.org/10.3141/2227-10>
- [20] Varma, S., Kutay, M. E. and Levenberg, E. (2013). "Viscoelastic Genetic Algorithm for Inverse Analysis of Asphalt Layer Properties from Falling Weight Deflections", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2369, pp. 38-46. doi: <https://doi.org/10.3141/2369-05>
- [21] Varma, S. and Kutay, M. E. (2016). "Backcalculation of Viscoelastic and Nonlinear Flexible Pavement Layer Properties from Falling Weight Deflections", International Journal of Pavement Engineering, Vol. 17, No. 5, pp. 388-402. doi: <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.993196>
- [22] Gopalakrishnan, K., Kim, S., Ceylan, H. and Kaya, O. (2014). "Development of Asphalt Dynamic Modulus Master Curve Using Falling Weight Deflectometer Measurements", Technical Report: TR-659. Institute for Transportation, Iowa State University.
- [23] Gopalakrishnan, K., Kim, S., Ceylan, H. and Kaya, O. (2015). "Use of Neural Networks Enhanced Differential Evolution for Backcalculating Asphalt Concrete Viscoelastic Properties from Falling Weight Deflectometer Time Series Data", 6th International Conference "Bituminous Mixtures and Pavements", Thessaloniki, Greece: 10-12 Jun.
- [11] Ceylan, H., Gopalakrishnan, K. and Kim, S. (2008). "Advanced Approaches to Hot-Mix Asphalt Dynamic Modulus Prediction", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 35, No. 7, pp. 699-707. doi: <http://dx.doi.org/10.1139/L08-016>
- [12] Ceylan, H., Schwartz, C. W., Kim, S. and Gopalakrishnan, K. (2009). "Accuracy of Predictive Models for Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 21, No. 6, pp. 286-293. doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2009\)21:6\(286\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:6(286))
- [13] Seo, J., Kim, Y., Cho, J. and Jeong, S. (2013). "Estimation of In Situ Dynamic Modulus by Using MEPDG Dynamic Modulus and FWD Data at Different Temperatures", International Journal of Pavement Engineering, Vol. 14, No. 4, pp. 343-353. doi: <https://doi.org/10.1080/10298436.2012.664274>
- [14] Georgouli, K., Pomoni, M., Cliatt, B. and Loizos, A. (2015). "A Simplified Approach for the Estimation of HMA Dynamic Modulus for In Service Pavements", 6th International Conference 'Bituminous Mixtures and Pavements', Thessaloniki, Greece: 10-12 Jun.
- [15] Solatifar, N., Kavussi, A., Abbasghorbani, M. and Sivilevičius, H. (2017). "Application of FWD Data in Developing Dynamic Modulus Master Curves of In-Service Asphalt Layers", Journal of Civil Engineering and Management, Vol. 23, No. 5, pp. 661-671. doi: <https://doi.org/10.3846/13923730.2017.1292948>
- [16] Loulizi, A., Flintsch, G. W. and McGhee, K. (2007). "Determination of the In-place Hot-Mix Asphalt Layer Modulus for Rehabilitation Projects by a Mechanistic-Empirical Procedure", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2037, pp. 53-62. doi: <https://doi.org/10.3141/2037-05>
- [17] Kavussi, A., Solatifar, N. and Abbasghorbani, M. (2016). "Mechanistic-Empirical Analysis of Asphalt Dynamic Modulus for Rehabilitation Projects in Iran", Journal of Rehabilitation in

- from Bituminous Paving Mixtures (D2172/D2172M-11)", West Conshohocken, PA. doi: [http://dx.doi.org/10.1520/D2172\\_D2172M-11](http://dx.doi.org/10.1520/D2172_D2172M-11)
- [29] AASHTO. (2014). "Standard Method of Test for Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Hot-Mix Asphalt (HMA)", AASHTO Designation: T 164-14.
- [30] ASTM. (2015). "Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (D7175-15)", West Conshohocken, PA. doi: <http://dx.doi.org/10.1520/D7175-15>
- [31] AASHTO. (2012). "Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)", AASHTO Designation: T 315-12.
- [32] Lytton, R. L., Germann, F. P., Chou, Y. J. and Stoffels, S. M. (1990). "Determining Asphaltic Concrete Pavement Structural Properties by Nondestructive Testing", National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Report 327, Transportation Research Board, Washington D.C.
- [24] Kim, Y. R., Underwood, B. S., Sakhaeifar, M. S., Jackson, N. and Puccinelli, J. (2011). "LTPP Computed Parameter: Dynamic Modulus", Final Report for Project: DTFH61-02-D-00139, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- [25] ASTM. (2009). "Standard Viscosity-Temperature Chart for Asphalts (D2493/D2493M-09)", West Conshohocken, PA. doi: [http://dx.doi.org/10.1520/D2493\\_D2493M-09](http://dx.doi.org/10.1520/D2493_D2493M-09)
- [26] Solatifar, N., Abbasghorbani, M., Kavussi, A. and Sivilevičius, H. (2018). "Prediction of Depth Temperature of Asphalt Layers in Hot Climate Areas", Journal of Civil Engineering and Management, Vol. 24, No. 7, pp. 516-525. doi: <https://doi.org/10.3846/jcem.2018.6162>
- [27] Ullidtz, P. (2000). "Will Nonlinear Backcalculation Help?", Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli, Third Volume, ASTM STP 1375, S. D. Tayabji and E. O. Lukanen, Eds., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA. doi: <http://dx.doi.org/10.1520/STP14757S>
- [28] ASTM. (2011). "Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Bitumen

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

N. Solatifar, Calibration of Witczak and Modified Witczak Models for Prediction of Dynamic Modulus of In-Service Asphalt Layers. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(3) (2021) 787-806.

DOI: [10.22060/ceej.2019.15510.5937](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15510.5937)

