



Analysis of Regression-Based Models for Prediction of Depth Temperature of Asphalt Layers – A Review

M. Sedighian-Fard, N. Solatifar*

Department of Civil Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

ABSTRACT: Due to the viscoelastic behavior of asphalt mixtures, the depth temperature of asphalt layers is very important in the structural evaluation of flexible pavements. Depth temperature could be measured directly in the field or maybe predicted using prediction models. This paper presents a comprehensive analysis of different twelve regression-based models for the prediction of depth temperature of asphalt layers. With reference to the literature, required input parameters, sensitivity analysis, evaluation of prediction performance, as well as a comparison of the goodness of these models were discussed. Furthermore, calibrated models for different local conditions were presented. This is due to the fact that the original models were usually developed in specific geographical regions and climatic conditions. Results show that the regression-based models have a good performance and high accuracy in predicting the depth temperature of asphalt layers. Among the investigated models, according to the variety of data (or parameters) used in the model development, performance, considering the effect of various parameters, the BELLS model was introduced as one of the best regression-based models for the prediction of depth temperature of asphalt layers. The model developed by Solatifar et al. as a new version of the BELLS model showed very good accuracy for newly constructed pavements. In addition, with applying some modifications, it could be possible to use these models in different pavements and local conditions.

Review History:

Received: Mar. 30, 2020

Revised: May, 21, 2020

Accepted: Jun. 03, 2020

Available Online: Aug. 25, 2020

Keywords:

Asphalt Pavement

Depth Temperature of Asphalt Layers

Temperature Predictive Models

Regression-Based Model

BELLS Model

1- Introduction

The depth temperature of asphalt layers is one of the most significant factors in the analysis, design, and rehabilitation process of flexible pavements. By owning this temperature distribution, it is possible to determine the impacts of temperature on pavements, especially in overlay design and rehabilitation studies. The depth temperature predictive models as an alternative to field and laboratory measurements of this factor are low-cost, rapid, and simple methods to determine the depth temperature of asphalt layers [1]. In this study, a comprehensive analysis was conducted on the developed regression-based models to predict the depth temperature of asphalt layers. Evaluation of model performance, investigating input variables, sensitivity analysis of model parameters, and finally, local calibration of models for use in different conditions were also presented.

2- Regression-Based Depth Temperature Predictive Models of Asphalt Layers

Twelve developed regression-based depth temperature predictive models for asphalt layers were scrutinized in this paper. Investigated models include Ramadhan and Wahhab [2], Diefenderfer et al. [3, 4], Hassan et al. [5], Velasquez et

al. [6], Tabatabai et al. [7], Gedafa et al. [8], Islam et al. [9], Ariawan et al. [10], Albayati and Alani [11], Asefzadeh et al. [12], Lee et al. [13], and BELLS [14] models.

3- Input Variables of Models

One of the predominant parameters in the selection of depth temperature predictive model is the availability of input variables. Table 1 reports the required input variables of the developed models. As can be seen in this table, the developed models by Ramadhan and Wahhab [2] and Tabatabai et al. [7] have minimum and the maximum number of input variables, respectively.

4- Sensitivity Analysis of Model Parameters

In the sensitivity analysis of developed models, different parameters have been introduced as the most significant factors in asphalt layer depth temperature variations. The air temperature is the most crucial parameter that affects the depth temperature of asphalt layers [2, 10, 13]. The temperature at the pavement surface and depths near the surface are highly sensitive to air temperature [5, 12, 15]. The mid-depth pavement temperature is prominently sensitive to the time of day when the air temperature is high [8]. Moreover, the effect of air humidity besides air temperature is remarkable [10].

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



Table 1. Input variables of regression-based depth temperature predictive models

Model	Input Variable												
	Air Temperature	Pavement Surface Temperature	Daily Minimum and Maximum Air	Previous Day Average Air	Wind Speed	Solar Radiation	Air Humidity	Ground Temperature	Time of day (Decimal Hours)	Level of Compaction	Bitumen Content	Bitumen Type	Depth from Pavement Surface
Ramadhan and Wahhab [2]	✓												✓
Diefenderfer et al. [3, 4]	✓					✓							✓
Hassan et al. [5]			✓			✓							✓
Velasquez et al. [6]			✓		✓	✓							✓
Tabatabai et al. [7]	✓	✓							✓	✓	✓	✓	✓
Gedafa et al. [8]		✓		✓					✓				✓
Islam et al. [9]			✓			✓							✓
Ariawan et al. [10]	✓						✓						✓
Albayati and Alani [11]	✓												✓
Asefzadeh et al. [12]			✓			✓							✓
Lee et al. [13]	✓					✓		✓					✓
BELLS [14]		✓		✓					✓				✓

5- Performance of Models

Performance Comparison of the developed models investigated in this study shows that most of the models have satisfying accuracy. Among the studied models, the model developed by Tabatabai et al. [7] has good accuracy, but accessibility to information such as asphalt mixture characteristics is challenging. BELLS [14] and Gedafa et al. [8] models do not require climatic information like solar radiation and input variables of these models are typically accessible. These models can be employed for the prediction of depth temperature of asphalt layers with good accuracy and low prediction bias.

6- Local Calibration of Models

Evaluation of predictive models for the depth temperature of asphalt layers in different climatic conditions and local materials indicates that there is a need to calibrate the original models to develop new models for use in these local conditions. There are two general calibration approaches: an exponential fit of uncalibrated model outputs and updating model coefficients using nonlinear multiple regression [16].

Asefzadeh et al. [12] calibrated the Park et al. [17] model to predict the depth temperature of asphalt layers at any time of the day. The modified model has satisfying accuracy and low bias. Furthermore, using this model, the accuracy of the back-calculation of the characteristics of the asphalt layers obtained from the Falling Weight Deflectometer (FWD) test was enhanced. Solatifar et al. [15] showed that the BELLS model has a weak performance in predicting the depth temperature of asphalt layers in newly constructed pavements in hot climate areas. Therefore, they used a multi-parametric

linear fitting (regression) to develop a new model. As can be observed in Figure 1, the developed model [15] predicts the depth temperature of asphalt layers with excellent precision and very low bias.

7- Conclusions

In this paper, a comprehensive analysis was carried out on twelve developed regression-based models for the prediction of depth temperature of asphalt layers. The following conclusions can be drawn from this study:

- All models studied in this research have acceptable results in predicting the depth temperature of asphalt layers that were very close to the laboratory/field measured values.
- The availability of input variables is a prominent parameter in selecting a suitable prediction model. The greater number of input variables, the higher the prediction accuracy.
- Sensitivity analysis shows that the air temperature has the most impact on the depth temperature, especially during the hours of the day that the air temperature is high. Several researchers have also proposed the shadow effect as a significant parameter in the prediction of depth temperature of asphalt layers.
- Among the investigated models, according to the variety of parameters used in the model development, performance, considering the effect of various parameters, such as the shadow effect, latitude, etc., BELLS model was introduced as one of the best regression-based models for prediction of depth temperature of asphalt layers. The model developed by Solatifar et al. [15] as a new version of the BELLS model showed very good accuracy ($R^2=0.97$) and low bias for newly constructed pavements.

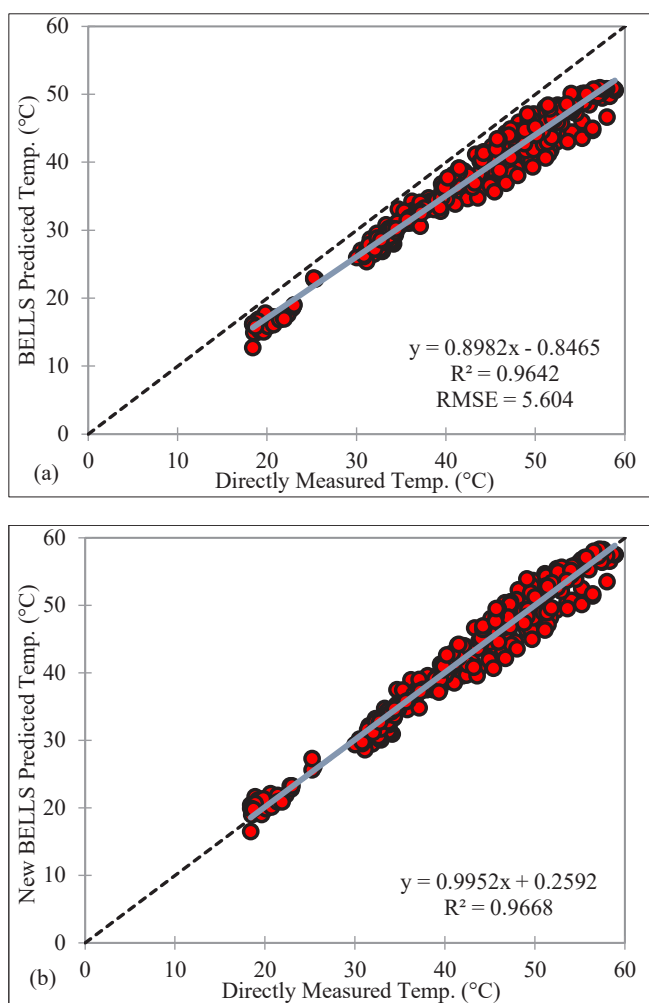


Fig. 1. Predicted vs. measured values of depth temperature: a) BELLS model, b) Solatifar et al. model [15]

• Evaluation of depth temperature predictive models in different climatic conditions and local materials shows the need for calibration of original models to develop new models for use in local conditions. Furthermore, other factors such as material characteristics, etc., can be employed to enhance the applicability of the models.

References

[1] Minhoto, J. C., Pais, J. C. and Pereira, A. A. (2005). "Asphalt Pavement Temperature Prediction", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board (TRR Journal)*, Vol. 1, No. 1919. pp. 96-110. doi: <https://doi.org/10.3141/1919-11>

[2] Ramadhan, R. H. and Wahhab, A. H. (1997). "Temperature Variation of Flexible and Rigid Pavements in Eastern Saudi Arabia", *Journal of Building and Environment*, Vol. 32, No. 4, pp. 367-373, Printed in Great Britain. doi: [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(96\)00072-8](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(96)00072-8)

[3] Diefenderfer, B. K., Al-Qadi, I. L. and Reubush, S. D. (2002). "Prediction of Daily Temperature Profile in Flexible Pavements", 81st Annual Meeting

'Transportation Research Board', Washington, D.C., USA.

[4] Diefenderfer, B. K., Al-Qadi, I. L. and Diefenderfer, S. D. (2006), "Model to Predict Pavement Temperature Profile: Development and Validation", *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 132 Issue. 2. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2006\)132:2\(162\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2006)132:2(162))

[5] Hassan, H. F., Al-Nuaimi, A. S., Taha, R. and Jafar, T. M. A. (2005). "Development of Asphalt Pavement Temperature Models for Oman", *Journal of Engineering Research*, Vol. 2, No. 1. pp. 32-42.

[6] Velasquez, R., Marasteanu, M., Clyne, T. R. and Worel, B. (2008). "Improved Model to Predict Flexible Pavement Temperature Profile", 3th International Conference on Accelerated Pavement Testing (APT). Impacts and Benefits from APT Programs, Madrid, Spain.

[7] Tabatabaie, S. A., Ziari, H. and Khalili, M. (2008). "Modeling Temperature and Resilient Modulus of Asphalt Pavements for Tropic Zones of Iran", *Asian Journal of Scientific Research*, Vol. 1, pp. 579-588. doi: 10.3923/ajsr.2008.579.588

[8] Gedafa, D. S., Hossain, M. and Romanoschi, S. A. (2014). "Perpetual Pavement Temperature Prediction Model", *Journal of Road Materials and Pavement Design*, Vol. 15, No. 1, pp. 55-65, doi: <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2013.852610>

[9] Islam, M. R., Ahsan, S. and Tarefder, R. A. (2015). "Modeling Temperature Profile of Hot-Mix Asphalt in Flexible Pavement", *Journal of Pavement Research and Technology (IJPRT)*, Vol. 8, Issue. 8, No. 1, pp. 47-52.

[10] Ariawan, A., Sugeng Subagio, B. and Hario Setiadji, B. (2015). "Development of Asphalt Pavement Temperature Model for Tropical Climate Conditions in West Bali Region", 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF-5), *Procedia Engineering*, Vol. 125, pp. 474-480. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.126>

[11] Albayati, A. H. K. and Alani, A. M. M. (2015). "Temperature Prediction Model for Asphalt Concrete Pavement", 14th Annual International Conference on Pavement Engineering and Infrastructure, Liverpool, UK.

[12] Asefzadeh, A., Hashemian, L. and Bayat, A. (2017) "Development of Statistical Temperature Prediction Models for a Test Road in Edmonton, Alberta, Canada", *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol. 10, Issue. 5, pp. 369-382. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.05.004>

[13] Li, Y., Liu, L. and Sun, L. (2018). "Temperature Predictions for Asphalt Pavement with Thick Asphalt Layer", *Construction and Building Materials*, Vol. 160, pp. 802-809. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.145>

[14] Stubstad, R. N., Baltzer, S., Lukanen, E. O. and Ertman-Larsen, H. J. (1994). "Prediction of AC Mat Temperatures for Routine Load-Deflection Measurements, in 4th International Conference on the 'Bearing Capacity of Roads and Airfields', Minneapolis, Minnesota, USA.

[15] 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>
- [16] Solatifar, N. (2018). “Analysis of Conventional Dynamic Modulus Predictive Models of Asphalt Mixtures”, Amirkabir Journal of Civil Engineering. (in Persian)
- [17] Park, D. Y., Buch, N. and Chatti, K. (2001). “Effective Layer Temperature Prediction Model and Temperature Correction Via Falling Weight Deflectometer Deflections”, Transport. Res. Rec. J. Transport. Res. Board, No. 1764, pp. 97–111.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Sedighian-Fard, N. Solatifar, Analysis of Regression-Based Models for Prediction of Depth Temperature of Asphalt Layers – A Review, Amirkabir J. Civil Eng., 53(9) (2021) 881-884.

DOI: [10.22060/ceej.2020.18131.6793](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18131.6793)





تحلیل مدل‌های رگرسیونی پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی-مطالعه مروری

محمد صدیقیان فرد، نادر صولتی‌فر*

گروه مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۱۱
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۳/۰۱
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۱۴
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۶/۰۴

کلمات کلیدی:

روسازی آسفالتی
دمای عمق لایه‌های آسفالتی
مدل‌های پیش‌بینی دمای
مدل رگرسیونی
مدل BELLS

خلاصه: دمای عمق لایه‌های آسفالتی به دلیل رفتار ویسکوالاستیک مخلوط‌های آسفالتی، در ارزیابی سازه‌های روسازی‌های انعطاف‌پذیر از اهمیت زیادی برخوردار است. دمای عمق لایه آسفالتی می‌تواند به طور مستقیم در محل اندازه‌گیری شود و یا توسط مدل‌هایی پیش‌بینی گردد. در این مقاله تحلیل جامعی در خصوص دوازده مدل رگرسیونی مهم و پرکاربرد پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی صورت گرفته و با ارائه سوابق پژوهشی، به بررسی متغیرهای ورودی مدل، تحلیل حساسیت مدل نسبت به این متغیرها، ارزیابی عملکرد آن‌ها از لحاظ دقت و قدرت پیش‌بینی و نیز مقایسه برتری آن‌ها نسبت به یکدیگر پرداخته شده است. از آن جایی که اغلب این مدل‌ها در مناطق جغرافیایی و شرایط آب و هوایی خاصی توسعه داده شده‌اند، مدل‌های توسعه یافته با کالیبراسیون مدل‌های اصلی برای استفاده در شرایط محلی متفاوت نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که مدل‌های رگرسیونی از عملکرد و دقت خوب و قابل قبولی برخوردار می‌باشند. در میان مدل‌های مورد بررسی، مدل BELLS با توجه به گستره داده‌های مورد استفاده در توسعه مدل، عملکرد و دقت مناسب و نیز در نظر گرفتن اثر پارامترهای مختلف به عنوان یکی از بهترین مدل‌های رگرسیونی پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی شناخته می‌شود. همچنین مدل صولتی‌فر و همکاران به عنوان مدل اصلاح شده BELLS برای روسازی‌های تازه ساخت با دقت بالا و برای مناطق با وضعیت آب و هوایی گرم توسعه یافته است. در مجموع بررسی نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد، مدل‌های توسعه یافته قابلیت کاربرد در پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی را با اعمال تصحیحاتی برای روسازی‌ها و شرایط محلی متفاوت دارند.

۱- مقدمه

روسازی‌های انعطاف‌پذیر دارد. این سختی تابعی از دمای لایه بوده و به صورت روزانه و فصلی تغییر می‌کند. با افزایش دما سختی لایه آسفالتی کاهش می‌یابد که این امر باعث افزایش تنش در لایه‌های اساس و زیراساس روسازی می‌شود [۴]. مخلوط آسفالتی با افزایش دما، مانند مایع ویسکوز و با کاهش آن مانند جامد الاستیک عمل می‌کند [۶ و ۵]. بنابراین پاسخ روسازی به بارهای وارده، متأثر از دما است. در تحلیل، طراحی و ارزیابی روسازی، پیش‌بینی دما در سطح و عمق لایه‌های آسفالتی ضروری است. دمای عمق لایه‌های آسفالتی عموماً متأثر از ویژگی‌های جذب و انعکاس انرژی خورشیدی لایه‌ها و مشخصات حرارتی مخلوط آسفالتی می‌باشد [۷]. توزیع دما در روسازی‌های انعطاف‌پذیر تحت تاثیر شرایط محیطی (تابش نور آفتاب، انعکاس تابش توسط سطح روسازی، بارش باران، سرعت باد، امواج جوی موج بلند، انتقال گرما بین لایه‌ها و تبخیر) بوده [۸] و به دلیل رفتار ویسکوالاستیک مصالح آسفالتی، مقاومت و مدول سختی آن‌ها در دماهای مختلف، متفاوت است که در نتیجه این رفتار به صورت خرابی‌های مختلف

در سال‌های اخیر افزایش حجم ترافیک و بارهای وسایل نقلیه سنگین منجر به فرسایش شدید سازه روسازی راه‌ها شده است. این امر به طور مستقیم باعث افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری سازمان‌های متولی بهره برداری از راه‌ها شده است. این روند پیش رو، به همراه خواسته‌های معمول برای زیرساخت‌های حمل و نقل بادوام و ... منجر به نیاز به افزایش عمر روسازی‌های آسفالتی از ۲۰ سال به ۵۰ سال یا بیشتر شده است. مخلوط آسفالتی، ماده‌ای ویسکوالاستیک است و خصوصیات هر دو مصالح ویسکوز و الاستیک را دارا می‌باشد. یکی از فاکتورهای مهم محیطی که تغییر شکل روسازی‌های آسفالتی را تحت تاثیر قرار می‌دهد، دمای عمق لایه‌های آسفالتی است؛ که این تاثیر به دلیل همین رفتار ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی می‌باشد [۱-۳].

سختی لایه‌های آسفالتی تاثیر قابل توجهی بر روی ظرفیت سازه‌ای

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



برای بررسی تاثیر عوامل مختلف بر عملکرد و ویژگی‌های خاص روسازی نظیر زهکشی، ضخامت لایه‌ها و نیز بهسازی و نگهداری، طراحی و توسعه یافته‌اند. این قطعات به طور خاص برای برنامه LTPP ساخته شده است.

مدل‌ها و روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی توسط پژوهشگران ارائه شده است. این مدل‌ها را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم کرد: دسته اول، مدل‌هایی هستند که رویکرد تحلیلی^۶ دارند و بر اساس تئوری انتقال حرارت و مشخصات حرارتی روسازی آسفالتی توسعه یافته‌اند. دسته دوم، مدل‌های بر پایه محاسبات نرم^۷ می‌باشند که شامل شبکه‌های عصبی مصنوعی^۸ (ANN)، سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی^۹ (ANFIS)، روش کنترل گروهی داده‌ها^{۱۰} (GMDH)، برنامه نویسی عبارتی ژنتیک^{۱۱} (GEP) و ... می‌شود. دسته سوم، روش‌های آماری هستند که از مدل‌های رگرسیونی برای به دست آوردن رابطه بین دمای عمق لایه‌های آسفالتی و داده‌های آب و هوایی استفاده می‌کنند.

مدل‌های تحلیلی تعادل گرمایی توسط شائو^{۱۲} و لیستر^{۱۳} [۱۵]، راپر^{۱۴} [۱۶]، چاپمن^{۱۵} و همکاران [۱۷] توسعه یافته‌اند. این مدل‌ها فاقد پارامتر حرارت دریافتی و از دست رفته سطح روسازی مرتبط با عبور وسایل نقلیه هستند [۱۸]. مدل شبکه عصبی پسانتشار^{۱۶} توسط شو^{۱۷} و همکاران [۱۹] جهت پیش‌بینی دمای روسازی در مناطق سرد ارائه شده است. سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی از نوع سیستم فازی سوگنو^{۱۸} است که بر اساس یک سری از داده‌های آموزشی موجود و از فرآیند مربوط، قواعد آن به دست آمده و مقادیر بهینه پارامترهای آن تعیین می‌شود. روش کنترل گروهی داده‌ها یک رویکرد خود سازماندهی داده بوده که به تدریج مدل‌های پیچیده‌تری در طول ارزیابی عملکرد مجموعه داده‌های ورودی و خروجی تولید می‌کند. برنامه نویسی عبارتی ژنتیک با استفاده از اصول بنیادی الگوریتم ژنتیک^{۱۹} (GA) و برنامه نویسی ژنتیک^{۲۰} (GP) که بر اساس تئوری داروین ارائه

در روسازی ظاهر می‌شود. به عنوان مثال در دماهای پایین روسازی دچار ترک و در دماهای بالا دچار شیارشدگی می‌شود [۹].

تغییرات دمایی روزانه و فصلی در شکل‌گیری تنش‌های حرارتی نقش به‌سزایی دارند. این تغییرات می‌تواند باعث ترک‌خوردگی لایه رویه آسفالتی شود که این امر در پیش‌بینی دوره عمر لایه‌های آسفالتی تاثیرگذار است. در مناطقی که تغییرات دمایی زیادی را تجربه می‌کنند، شرایط حرارتی لایه‌ها نقشی مهم در ترک‌خوردگی سیستم روسازی چند لایه‌ای دارد. مشخصات مخلوط آسفالتی اعم از سختی، پیرشدگی و ... نسبت به تغییرات دمایی حساس است. تغییرات دمایی روزانه هوا تاثیر چشمگیری بر وضعیت حرارتی لایه آسفالتی در عمق‌های نزدیک به سطح روسازی دارد [۱۰]. برای بررسی تاثیر دما بر رفتار لایه‌های آسفالتی، تعیین نحوه توزیع دما در عمق‌های مختلف لایه در طول شبانه روز ضروری است. با داشتن این توزیع دمایی، محاسبه اثرات دما بر روسازی به ویژه در طراحی روکش و مطالعات بهسازی راه انجام می‌شود.

با توجه به چالش‌های اندازه‌گیری دمای عمق لایه‌های آسفالتی در محل، مدل‌های پیش‌بینی این دما جایگزین ساده و کم هزینه‌ای برای تعیین دمای عمق لایه‌های آسفالتی هستند. برنامه تحقیقات راهبردی راه‌ها یا شارپ^۱ (SHRP) و نیز برنامه عملکرد بلند مدت روسازی^۲ (LTPP) از سال ۱۹۸۷ در ایالات متحده آمریکا برای تعیین بهتر رفتار روسازی راه‌ها اجرا شده است. ۶۴ قطعه از روسازی‌های LTPP به عنوان بخشی از برنامه پایش فصلی^۳ (SMP) انتخاب [۱۱] و نسخه بروز شده مدل‌های شارپ برای پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی گسترش یافته است [۱۲]. هدف از اجرای برنامه LTPP گردآوری داده‌های با کیفیت بالای مورد نیاز برای فهم دقیق عملکرد روسازی و متغیرهای تاثیرگذار بر آن و همچنین ایجاد پایگاه داده جامعی برای تحقیق و توسعه محصولات ارزشمند در تحلیل و طراحی روسازی بوده است. برنامه LTPP شامل دو نوع مطالعات است که عبارتند از مطالعات عام روسازی^۴ (GPS) و مطالعات خاص روسازی^۵ (SPS). آزمایش‌ها و مطالعات GPS بر روی بسیاری از قطعات روسازی در حال خدمت برای ارزیابی عملکرد کلی روسازی‌ها، ایجاد و توسعه یک بانک اطلاعاتی گسترده انجام شده است. این مطالعات در تحلیل و طراحی روسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۳ و ۱۴]. آزمایش‌ها و مطالعات SPS

- 6 Analytical
- 7 Soft Computing
- 8 Artificial Neural Networks
- 9 Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System
- 10 Group Method of Data Handling
- 11 Gene Expression Programming
- 12 Shao
- 13 Lister
- 14 Rayer
- 15 Chapman
- 16 Back-Propagation
- 17 Xu
- 18 Sugeno
- 19 Genetic Algorithm
- 20 Genetic Programming

- 1 Strategic Highway Research Program
- 2 Long-Term Pavement Performance
- 3 Seasonal Monitoring Program
- 4 General Pavement Studies
- 5 Specific Pavement Studies

شده، گسترش یافته است.

اصلی این پژوهش تحلیل جامع مدل‌های مهم رگرسیونی توسعه یافته توسط پژوهشگران مختلف برای تعیین دمای عمق لایه‌های آسفالتی بوده که شامل معرفی، بررسی متغیرهای ورودی، تحلیل حساسیت، ارزیابی عملکرد آن‌ها از لحاظ دقت و قدرت پیش‌بینی و در نهایت مقایسه برتری آن‌ها نسبت به یکدیگر می‌شود. همچنین مدل‌های توسعه یافته با پرداخت و کالیبراسیون مدل‌های اصلی نیز در انتها مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مدل‌های رگرسیونی پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی

در این بخش مهم‌ترین مدل‌های رگرسیونی توسعه یافته توسط پژوهشگران مختلف برای پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی معرفی و بررسی شده است.

۲-۱- مدل رَمَدان و وَهاب

رَمَدان و وَهاب [۲۱] با انجام دو آزمایش در محل، تغییرات دمای قطعات روسازی آسفالتی و بتنی را واقع در دانشگاه نفت و مواد معدنی کینگ‌فهد در عربستان سعودی مورد بررسی قرار داده‌اند. روسازی مورد بررسی شامل لایه ۲۵ سانتی‌متری آسفالتی با دانه‌بندی متراکم بر روی لایه زیراساس با ضخامت ۲۰ سانتی‌متر و لایه روکش آسفالتی با ضخامت پنج سانتی‌متر بوده است. داده‌های دمای روسازی در عمق‌های دو، چهار، هشت، ۱۶ و ۲۵ سانتی‌متری و همچنین داده‌های دمای هوا نیز در ارتفاع ۱/۵ متری از سطح روسازی برداشت شده است. داده‌ها از آوریل ۱۹۸۹ تا آوریل ۱۹۹۱ جمع‌آوری شده‌اند. در این پژوهش دمای عمق لایه آسفالتی بر اساس دمای هوا پیش‌بینی شده است. رابطه (۱) برای پیش‌بینی دمای عمق لایه ارائه شده است.

$$PAV = 1.692AIR + 12.670 \quad (1)$$

که در این رابطه PAV دمای لایه، درجه سلسیوس؛ و AIR دمای هوا، درجه سلسیوس است. بررسی‌ها نشان داده است که حداقل دمای لایه آسفالتی اندازه‌گیری شده دارای همبستگی خوبی با حداقل دمای هوا می‌باشد [۲۱].

۲-۲- مدل دیفندر فر و همکاران

یک مدل عمومی برای ترکیب تمامی فاکتورهای تاثیرگذار بر پیش‌بینی

توسعه روابط رگرسیونی برای پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی می‌تواند جایگزینی ارزان و سریع برای تعیین دمای روسازی در محل باشد [۲۰]. این روش‌ها به دلیل ساده‌تر بودن کار با نرم‌افزارهای آن، امکان به دست آمدن رابطه ریاضی و ... توسط بسیاری از پژوهشگران برای پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته است. مدل‌های مختلفی از جمله رَمَدان^۱ و وَهاب^۲ [۲۱]، دیفندر فر^۳ و همکاران [۵]، حسن^۴ و همکاران [۲۲]، ولاسکوئز^۵ و همکاران [۲۳]، طباطبایی^۶ و همکاران [۲۴]، گدافا^۷ و همکاران [۲۵]، اسلام^۸ و همکاران [۲۶]، آریاوان^۹ و همکاران [۲۷]، آلبیاتی^{۱۰} و علانی^{۱۱} [۲۸]، آصف‌زاده^{۱۲} و همکاران [۲۹]، لی^{۱۳} و همکاران [۳۰] و نیز مدل BELLS [۳۱] در این خصوص توسعه یافته است. در این پژوهش‌ها دمای عمق لایه آسفالتی با استفاده از داده‌های آب و هوایی پیش‌بینی می‌شود.

افت و خیز اندازه‌گیری شده روسازی در آزمایش افت و خیزسنج وزنه اُفتان^{۱۴} (FWD)، معرف پاسخ لایه‌های آن است. به دلیل رفتار ویسکوالاستیک لایه‌های آسفالتی، مقدار افت و خیز این لایه با دما تغییر می‌کند. برای یکسان سازی و امکان مقایسه نتایج، تحلیل دمایی در محاسبات بازگشتی^{۱۵} نتایج FWD با رویکرد مکانیستیک - تجربی^{۱۶} توسط نرم‌افزار ELMOD^{۱۷} یا مدل تجربی آشتو^{۱۸} در یک دمای مرجع انجام می‌شود [۳۲]. تعیین دمای عمق لایه‌های آسفالتی جهت طراحی و بهسازی روسازی مستلزم انجام اندازه‌گیری در محل است؛ این امر بسیار زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد. با توجه به اهمیت آگاهی از دمای عمق لایه‌های آسفالتی در تحلیل، طراحی، اجرا، ارزیابی سازه‌ای و بهسازی روسازی، هدف

- 1 Ramadhan
- 2 Wahhab
- 3 Diefenderfer
- 4 Hassan
- 5 Velasquez
- 6 Tabatabai
- 7 Gedafa
- 8 Islam
- 9 Ariawan
- 10 Albayati
- 11 Alani
- 12 Asefzadeh
- 13 Li
- 14 Falling Weight Deflectometer
- 15 Backcalculation
- 16 Mechanistic-Empirical
- 17 Evaluation of Layer Moduli and Overlay Design
- 18 AASHTO

نظر گرفته شده است. مدل پیش‌بینی خطی که به عنوان مدل کامل در نظر گرفته شده به صورت رابطه (۴) می‌باشد.

$$y = A + Bx_1 + Cx_2 + Dx_3 \quad (4)$$

که در این رابطه D ضریب عمق؛ و x_3 عمق از سطح روسازی، متر بوده و بقیه متغیرها قبلاً تعریف شده‌اند.

در نهایت مدل‌های توسعه یافته برای پیش‌بینی حداکثر و حداقل دمای روزانه لایه آسفالتی به ترتیب به صورت رابطه (۵) و رابطه (۶) می‌باشد.

$$y = 3.2935 + 0.6356x_1 + 0.1061x_2 - 27.7975x_3 \quad (5)$$

$$y = 1.6472 + 0.6504x_1 + 0.0861x_2 - 7.2385x_3 \quad (6)$$

که تمامی متغیرها قبلاً تعریف شده‌اند. همچنین دیفنדרفر و همکاران [۶] برای پیش‌بینی دمای عمق لایه آسفالتی روسازی‌های واقع در ویرجینیا، مدل رگرسیونی خطی را توسعه داده‌اند. برای توسعه مدل از داده‌های برداشت شده از فوریه ۲۰۰۰ تا می ۲۰۰۱ استفاده شده است. در نهایت مدل‌های توسعه یافته برای پیش‌بینی حداکثر و حداقل دمای روزانه لایه‌های آسفالتی به ترتیب به صورت رابطه (۷) و رابطه (۸) می‌باشد.

$$T_{p \max} = 2.78752 + 0.6861T_{a \max} + 5.6736 \times 10^{-4}R_s + 27.8739P_d \quad (7)$$

$$T_{p \min} = -1.2097 + 0.6754T_{a \min} + 3.7642 \times 10^{-4}R_s + 7.2043P_d \quad (8)$$

که در این روابط $T_{p \min}$ و $T_{p \max}$ به ترتیب حداکثر و حداقل دمای عمق روزانه لایه آسفالتی، درجه سلسیوس؛ $T_{a \min}$ و $T_{a \max}$ به ترتیب حداکثر و حداقل دمای محیط، درجه سلسیوس؛ R_s تابش آفتاب محاسبه شده، کیلوژول بر متر مربع - روز؛ و P_d عمق از سطح لایه، متر است.

۲-۳- مدل حسن و همکاران

مدل‌های رگرسیونی برای پیش‌بینی حداکثر و حداقل دمای قطعه روسازی واقع در عمان توسط حسن و همکاران [۲۲] توسعه داده شده‌اند. داده‌های دمای هوا، روسازی و تابش آفتاب به مدت ۴۴۵ روز از ایستگاه آب و هوایی واقع در محوطه دانشگاه سلطان قابوس جمع‌آوری شده است. تحلیل

دمای عمق لایه‌های آسفالتی توسط دیفنדרفر و همکاران [۵] توسعه یافته است. هدف اصلی این پژوهش پیش‌بینی حداکثر و حداقل دمای لایه آسفالتی بوده است. برای پیش‌بینی دمای عمق، تاثیر دمای هوا و تغییرات فصلی مانند گرم و خنک شوندگی مورد بررسی قرار گرفته است. داده‌ها از مارس ۲۰۰۰ تا می ۲۰۰۱ در ایالت ویرجینیا، آمریکا جمع‌آوری شده است. در مجموع از ۱۱۵ دماسنج در راه آزمایشی هوشمند ویرجینیا در همه ۱۲ قطعه روسازی در عمق ۰/۰۳۸ تا ۱/۱۲ متر از سطح لایه آسفالتی استفاده شده است. زیر مدل‌ها شامل همه متغیرهای ارزیابی شده نبوده و تاثیر ترکیب متغیرهای مختلف در مدل مورد مقایسه قرار گرفته است. ابتدا زیر مدل‌ها بررسی شده و سپس مدل نهایی ارائه شده است.

اولین زیر مدل برای پیش‌بینی حداکثر و حداقل دمای روزانه لایه آسفالتی توسط محسنی [۳۳] ارائه شده است. در واقع مدل‌های مجزا برای هر قطعه روسازی در هر عمق آن توسعه یافته‌اند. رابطه بین دمای لایه و دمای هوای نزدیک سطح آن به صورت رابطه (۲) ارائه شده است.

$$y = A + Bx_1 \quad (2)$$

که در این رابطه y دمای عمق لایه، درجه سلسیوس؛ A ثابت مدل؛ B ضریب دمای نزدیک سطح روسازی؛ و x_1 دمای نزدیک سطح روسازی، درجه سلسیوس است.

زیر مدل دوم برای پیش‌بینی دمای روزانه لایه آسفالتی می‌باشد که یک پارامتر فصلی علاوه بر دمای نزدیک سطح روسازی را در مدل ترکیب می‌کند. مدل پیش‌بینی خطی به صورت رابطه (۳) می‌باشد.

$$y = A + Bx_1 + Cx_2 \quad (3)$$

که در این رابطه C ضریب روز در سال؛ و x_2 روز سال (بین محدوده اول ژانویه تا دوم جولای) است.

زیر مدل سوم برای پیش‌بینی دمای روزانه لایه، با استفاده از پارامتر عمق مورد نظر از سطح لایه علاوه بر پارامترهای فوق توسعه یافته است. پارامتر عمق از سطح روسازی برای پیش‌بینی دمای آن ساده‌سازی شده است. برای این منظور حداکثر عمق از سطح لایه آسفالتی، ۰/۱۸۸ متر در

- 1 Virginia Smart Road
- 2 Mohseni

حداکثر دمای هوا، وات - ساعت بر متر مربع و بقیه پارامترها قبلاً تعریف شده‌اند.

۲-۴- مدل ولاسکوئز و همکاران

برای پیش‌بینی نیمرخ دمایی روسازی، ولاسکوئز و همکاران [۲۳] از مقادیر اندازه‌گیری شده دمای هوا، رطوبت، سرعت باد و تابش آفتاب با استفاده از روش حداقل مربعات^۱ بهره گرفته‌اند. این پژوهش با استفاده از تجهیزات بارگذاری تسریع یافته روسازی^۲ MnRoad انجام شده و در مجموع از ۱۳۸۶۹ مجموعه داده (طی ۱۱ سال) برای چهار نوع مخلوط آسفالتی در توسعه مدل‌های رگرسیونی استفاده شده است. مدل‌های رگرسیونی خطی و چندجمله‌ای برای پیش‌بینی حداکثر و حداقل دمای روسازی توسعه داده شده‌اند. دو مدل توسعه یافته برای پیش‌بینی حداکثر و حداقل دمای روزانه روسازی به ترتیب به صورت رابطه (۱۲) و رابطه (۱۳) می‌باشد.

$$T_{MAX-PAV} = 11.432 + 7.123 \times 10^{-3} T_{MAX-AIR}^2 + 0.743 T_{MAX-AIR} - 61.742 D + 4.604 \times 10^{-4} S - 0.108 H - 1.313 W \quad (12)$$

$$T_{MIN-PAV} = 2.136 + 5.353 \times 10^{-3} T_{MIN-AIR}^2 + 0.902 T_{MIN-AIR} + 32.926 D + 1.687 \times 10^{-4} S - 0.025 H - 0.49 W \quad (13)$$

که در این روابط $T_{MIN-PAV}$ و $T_{MAX-PAV}$ به ترتیب حداکثر و حداقل دمای روسازی، درجه سلسیوس؛ $T_{MIN-AIR}$ و $T_{MAX-AIR}$ به ترتیب حداکثر و حداقل دمای هوا، درجه سلسیوس؛ D عمق از سطح لایه آسفالتی، متر؛ S مقدار تابش آفتاب، کیلوژول بر متر مربع - روز؛ H رطوبت، درصد؛ و W سرعت باد، متر بر ثانیه می‌باشد.

۲-۵- مدل طباطبایی و همکاران

مدل پیش‌بینی دمای روسازی آسفالتی برای مناطق گرمسیری توسط طباطبایی و همکاران [۲۴] توسعه داده شده است. برای پیش‌بینی دمای عمق، ۲۴ نمونه آسفالتی با مشخصات مصالح مختلف مشابه روسازی در محل ساخته شده است. چهار پارامتر در ساخت نمونه‌ها در نظر گرفته شده

رگرسیون برای توسعه مدل دمای حداقل روسازی انجام شده و از رگرسیون گام به گام برای توسعه مدل‌های حداکثر دمای روسازی بر اساس پارامترهای دمای هوا، تابش آفتاب و مدت زمان تابش آن به عنوان متغیرهای مستقل بهره گرفته شده است. مدل پیش‌بینی دمای حداقل روسازی با استفاده از پارامتر دمای هوا به عنوان متغیر مستقل و پارامتر دمای سطح روسازی به عنوان متغیر پاسخ توسعه یافته است. حداقل دمای هوا در هر روز برای همه داده‌های جمع‌آوری شده و حداقل دمای روزانه متناظر با آن در سطح روسازی، تعیین شده است. تحلیل رگرسیون با استفاده از نرم‌افزار Minit-ab برای توسعه مدل با ۴۴۵ مجموعه داده استفاده شده است. مدل توسعه یافته به صورت رابطه (۹) می‌باشد.

$$T_{surf} = -1.437 + 1.121 T_{air} \quad (9)$$

که در این رابطه T_{surf} حداقل دمای سطح روسازی، درجه سلسیوس؛ و T_{air} حداقل دمای هوا، درجه سلسیوس است.

حداکثر دمای هوا و روسازی در عمق ۲۰ میلی‌متری از سطح لایه آسفالتی برای هر روز اندازه‌گیری شده و رگرسیون خطی با استفاده از پارامتر حداکثر دمای هوا به عنوان متغیر مستقل و حداکثر دمای لایه آسفالتی در عمق ۲۰ میلی‌متری از سطح روسازی به عنوان متغیر وابسته انجام شده است. مدل توسعه یافته به صورت رابطه (۱۰) می‌باشد.

$$T_{20mm} = 3.160 + 1.319 T_{air} \quad (10)$$

که در این رابطه T_{20mm} دما در عمق ۲۰ میلی‌متری از سطح روسازی، درجه سلسیوس؛ و T_{air} حداکثر دمای هوا، درجه سلسیوس می‌باشد. با توجه به این که حداکثر دمای روسازی تحت تاثیر پارامترهای دیگری علاوه بر دمای هوا است؛ از پارامترهای دیگری نیز برای افزایش دقت مدل استفاده شده است. پارامترهایی که به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شده‌اند شامل دمای هوا و تابش تجمعی آفتاب از سحرگاه تا وقوع حداکثر دمای هوا می‌باشد. مدل نهایی توسعه یافته به صورت رابطه (۱۱) است.

$$T_{20mm} = 2.713 + 1.281 T_{air} + 0.00053 Solar \quad (11)$$

که در این رابطه $Solar$ تابش تجمعی آفتاب از سحرگاه تا زمان وقوع

1 Least Squares

2 Accelerated Loading Facilities

دمای سطح روسازی، درجه سلسیوس؛ T_{ave} میانگین دمای هوای روز قبل، درجه سلسیوس؛ t_d زمان اندازه‌گیری دما، به صورت اعشاری؛ و D عمق از سطح روسازی، میلی‌متر است.

۲-۷- مدل اسلام و همکاران

اسلام و همکاران [۲۶] مدل‌های پیش‌بینی دمای روسازی را بر اساس داده‌های آب و هوایی مربوط به قطعه روسازی واقع در نیومکزیکو توسعه داده‌اند. ابتدا دمای یک سال روسازی آسفالتی در عمق‌های مختلف، دمای هوا و تابش آفتاب به صورت پیوسته از ۱۵ اکتبر ۲۰۱۲ تا ۱۴ اکتبر ۲۰۱۳ با انجام آزمایش میدانی جمع‌آوری شده است. با استفاده از مجموعه داده جمع‌آوری شده مدل‌های پیش‌بینی دمای عمق را توسعه داده‌اند. با داشتن داده‌های دمای هوا، پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی ممکن شده است. با توجه به اهمیت تعیین دمای حداکثر، حداقل و میانگین در درک دقیق تغییرات پیوسته دمای روسازی، تمرکز این پژوهش بر تعیین این دماها در عمق لایه‌های آسفالتی بوده است. در این مدل‌سازی متغیرهای مستقل عبارتند از تابش خورشید، دمای سطح و عمق مورد نظر و متغیر پاسخ نیز دمای عمق روسازی می‌باشد. حداکثر دما در هر عمق از روسازی وابسته به حداکثر دمای سطح و عمق مورد نظر از آن است. همچنین پارامتر تابش آفتاب می‌تواند حداکثر دمای آن را تحت تاثیر قرار داده و به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شده است.

تحلیل رگرسیون برای پیش‌بینی حداکثر دمای روسازی آسفالتی انجام شده است. دو مدل توسعه یافته به صورت رابطه (۱۶) و رابطه (۱۷) می‌باشد.

$$y_{max} = 2.5 + 0.19x_{max} - 25.6x - 0.0045S_{max} \quad (16)$$

$$y_{max} = 0.8 + 0.87x_{max} - 25.6x \quad (17)$$

که در این روابط y_{max} حداکثر دمای روزانه روسازی در عمق مورد نظر، درجه سلسیوس؛ x_{max} حداکثر دمای روزانه سطح روسازی، درجه سلسیوس؛ x عمق مورد نظر از سطح روسازی، متر؛ و S_{max} حداکثر تابش روزانه آفتاب، وات بر متر مربع است. حداکثر دمای سطح روسازی (x_{max}) می‌تواند با استفاده از پارامتر حداکثر دمای هوا تعیین شود. مدل این پارامتر به صورت رابطه (۱۸) است.

که عبارتند از درصد قیر مخلوط، نوع قیر، سطح تراکم و دانه‌بندی سنگدانه‌ها. داده‌های دمای روسازی در سه عمق مختلف و نیز دمای هوا برای مدت نه ماه جمع‌آوری شده است. برای مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار SPSS، تحلیل رگرسیون گام به گام انجام شده است. مدل توسعه یافته به صورت رابطه (۱۴) می‌باشد.

$$T = 0.94Sur + 0.94\sin\left(2\pi\frac{t}{24}\right) - 2.99\log(d) - 0.02comp + 0.02Air + 0.32BP + 0.17BT - 0.34 \quad (14)$$

که در این رابطه T دمای عمق، درجه سلسیوس؛ Sur دمای سطح، درجه سلسیوس؛ t زمان روز در سیستم ۲۴ ساعته؛ d عمق مورد نظر، سانتی‌متر؛ $comp$ سطح تراکم (تعداد ضربات نمونه مارشال)؛ Air دمای هوا، درجه سلسیوس؛ BP درصد قیر؛ و BT نوع قیر (یک برای قیر با درجه نفوذ ۴۰/۵۰ و دو برای قیر با درجه نفوذ ۶۰/۷۰) است.

۲-۶- مدل گدافا و همکاران

گدافا و همکاران [۲۵] با طراحی و ساخت چهار سیستم روسازی ضخیم در کانزاس، که ضخامت لایه‌های آسفالتی مشابه روش طراحی سازه‌ای دپارتمان حمل و نقل آن ایالت بوده است، آزمایش FWD را انجام داده‌اند. داماسنج‌ها درون حفرات ایجاد شده در لایه آسفالتی قرار داده شده است. داخل حفرات برای جلوگیری از یخ زدگی و خنک شوندگی قابل تبخیر، با روغن مناسب پر شده است. از حسگر مادون قرمز FWD برای اندازه‌گیری دمای سطح لایه آسفالتی بهره گرفته شده است. در این پژوهش، دمای نیمه عمق هر لایه (لایه آسفالتی و لایه اساس) به عنوان متغیر وابسته و دمای سطح، میانگین دمای هوای روز قبل، زمان روز در حین اندازه‌گیری و مقدار نیمه عمق هر لایه به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شده‌اند. رابطه (۱۵) برای پیش‌بینی دمای نیمه عمق لایه‌های روسازی ارائه شده است.

$$T_{pave} = -5.374 - 0.752T_{sur} + 0.022T_{sur}^2 + 2.016T_{ave} - 0.032T_{sur} \times T_{ave} + 1.549t_d - 0.022D \quad (15)$$

که در این رابطه T_{pave} دمای نیمه عمق لایه، درجه سلسیوس؛ T_{sur}

وضعیت گرمسیری کشور اندونزی که دارای شرایط آب و هوایی خاصی است، توسعه داده‌اند. اندونزی دارای تابش آفتاب زیاد، بارش و رطوبت هوای بالایی در طول سال می‌باشد. جاده ملی دِنپاسار - گیلیمانوک^۱ واقع در غرب بالی^۲ به عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شده است. دماسنج‌ها در عمق‌های مختلفی در عمق روسازی قرار داده شده است. در مجموع از ۳۳۶ مجموعه داده شامل پارامترهای دمای عمق، هوا و رطوبت برای توسعه مدل استفاده شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که دمای هوا همبستگی بالایی با دمای عمق روسازی دارد. مدل‌های رگرسیون خطی برای پیش‌بینی دمای عمق بر اساس دمای هوا و رطوبت محیط (به عنوان متغیر مستقل) توسعه داده شده است. مدل‌های توسعه یافته برای پیش‌بینی دما در سطح روسازی، عمق‌های ۲۰ و ۷۰ میلی‌متری به ترتیب به صورت رابطه (۲۲)، رابطه (۲۳) و رابطه (۲۴) می‌باشد.

$$T_{00} = 10.813 - 0.919RH \quad (22)$$

$$T_{20} = -6.898 + 0.687T_{Air} + 0.640T_{00} \quad (23)$$

$$T_{70} = 1.965 + 0.755T_{Air} + 0.331T_{00} \quad (24)$$

که در این روابط T_{00} دمای سطح روسازی، درجه سلسیوس؛ T_{20} دمای عمق ۲۰ میلی‌متری از سطح روسازی، درجه سلسیوس؛ T_{70} دمای عمق ۷۰ میلی‌متری از سطح روسازی، درجه سلسیوس؛ T_{Air} دمای هوا، درجه سلسیوس؛ و RH رطوبت نسبی محیط، درصد می‌باشد.

۲-۹- مدل آلبیاتی و علانی

در پژوهش انجام شده توسط آلبیاتی و علانی [۲۸] از تحلیل رگرسیون مدل پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی بر اساس پارامتر دمای هوا بهره گرفته شده است. داده‌های دمای هوا از سازمان هواشناسی کشور عراق آخذ شده و داده‌های دمای عمق با انجام آزمایش میدانی در پارکینگ دانشکده مهندسی عمران دانشگاه بغداد از ۲۷ آوریل تا ۱۶ دسامبر ۲۰۰۹ جمع‌آوری شده است. سازه روسازی شامل لایه روکش، لایه توپکا، لایه

$$x_{max} = 1.33a_{max} + 3.21 \quad (18)$$

که در این رابطه a_{max} حداکثر دمای روزانه هوا بر حسب درجه سلسیوس می‌باشد.

حداقل دمای عمق روسازی (y_{min}) بستگی به حداقل دمای سطح و عمق مورد نظر از آن دارد. به دلیل این که حداقل دمای روسازی در زمان شب یا سحرگاه رخ می‌دهد؛ تاثیر تابش خورشید کم بوده و این پارامتر در فرآیند توسعه مدل در نظر گرفته نشده و حذف شده است. مدل رگرسیونی پیش‌بینی حداقل دمای روسازی به صورت رابطه (۱۹) می‌باشد.

$$y_{min} = 1.84 + x_{min} + 20x \quad (19)$$

که در این رابطه x_{min} حداقل دمای سطح روسازی، درجه سلسیوس (از رابطه ۲۰)؛ و x عمق مورد نظر از سطح روسازی، متر است.

$$x_{min} = 0.925a_{min} + 6.76 \quad (20)$$

که در این رابطه a_{min} حداقل دمای هوا بر حسب درجه سلسیوس می‌باشد. این روابط نشان می‌دهد که حداقل دمای عمق روسازی همیشه بیشتر از حداقل دمای سطح و این مقدار نیز همیشه بیشتر از حداقل دمای هوا است. همچنین تحلیل رگرسیون برای پیش‌بینی میانگین روزانه دمای عمق روسازی بر اساس میانگین دمای سطح آن انجام شده و مدل رگرسیونی به صورت رابطه (۲۱) توسعه یافته است. خاطر نشان می‌شود که پارامتر تابش آفتاب به دلیل تاثیر کم، از فرآیند مدل‌سازی حذف شده است.

$$x_{avg} = 1.136a_{avg} + 4.956 \quad (21)$$

که در این رابطه x_{avg} میانگین روزانه دمای سطح روسازی، درجه سلسیوس؛ و a_{avg} میانگین روزانه دمای هوا، درجه سلسیوس می‌باشد.

۲-۸- مدل آریاؤن و همکاران

آریاؤن و همکاران [۲۷] مدل پیش‌بینی دمای لایه‌های آسفالتی را برای

1 Denpasar-Gilimanuk

2 Bali

$$T_{surf} = T_{air} - 0.00618Lat^2 + 0.2289Lat + 24.4 \quad (28)$$

$$T_d = T_{surf} (1 - 0.063d + 0.007d^2 - 0.0004d^3) \quad (29)$$

که در این روابط T_{surf} حداکثر دمای سطح لایه آسفالتی، درجه سلسیوس؛ T_{air} میانگین حداکثر دمای هفت روزه هوا، درجه سلسیوس؛ Lat عرض جغرافیایی قطعه روسازی، درجه؛ T_d دمای عمق لایه آسفالتی، درجه فارنهایت؛ و d عمق از سطح روسازی، اینچ؛ است. مدل‌های نهایی رگرسیونی برای پیش‌بینی دمای عمق توسط آصف‌زاده و همکاران [۲۹] به صورت رابطه (۳۰) و رابطه (۳۱) ارائه شده است.

$$T_{daily-minimum} = 2.8704 + 0.8900T_{air-min} + 1.26 \times 10^{-4} \times SR + 0.1759(T_{air-min}^2)^{0.25} + 15.2324D \quad (30)$$

$$T_d = F \cdot \bar{T}_{aV} + G \cdot N_Q + C \quad (31)$$

که در این روابط $T_{daily-maximum}$ و $T_{daily-minimum}$ به ترتیب حداقل و حداکثر دمای روزانه لایه آسفالتی، درجه سلسیوس؛ $T_{air-min}$ و $T_{air-max}$ به ترتیب حداقل و حداکثر دمای روزانه هوا، درجه سلسیوس؛ SR تابش خورشید، کیلوژول بر متر مربع؛ و D عمق مورد نظر، متر است.

۲-۱۱- مدل لی و همکاران

بر اساس تحلیل تاثیرات تجمعی شرایط آب و هوایی، دمای عمق روسازی به عنوان تابعی از میانگین دمای هوا (\bar{T}_{aV}) و کل تابش آفتاب (N_Q) مطابق رابطه (۳۲) تعریف می‌شود [۳۰].

$$T_d = F \cdot \bar{T}_{aV} + G \cdot N_Q + C \quad (32)$$

که در این رابطه F ، G و C ضرایب متغیرها و T_d دمای روسازی در عمق مورد نظر می‌باشد. فاکتورهای دیگری نیز غیر از دمای هوا و تابش آفتاب بر دمای روسازی تاثیرگذار است. با توجه به پژوهش‌های صورت

یبتدر، لایه اساس آسفالتی و نیز لایه زیراساس با مصالح دانه‌ای به ترتیب با ضخامت‌های چهار، پنج، شش، ۱۰ و ۳۰ سانتی‌متر بوده است. دماسنج‌ها در عمق‌های دو، هفت و ۱۲ سانتی‌متر از سطح روسازی جایگذاری شده‌اند. مدل توسعه یافته بر اساس پارامتر دمای هوا و عمق از سطح روسازی به صورت رابطه (۲۵) می‌باشد.

$$T_{pave} = 1.217T_{air} - 0.354Z \quad (25)$$

که در این رابطه T_{pave} دمای روسازی، درجه سلسیوس؛ T_{air} دمای هوا، درجه سلسیوس؛ و Z عمق از سطح روسازی، سانتی‌متر است.

۲-۱۰- مدل آصف‌زاده و همکاران

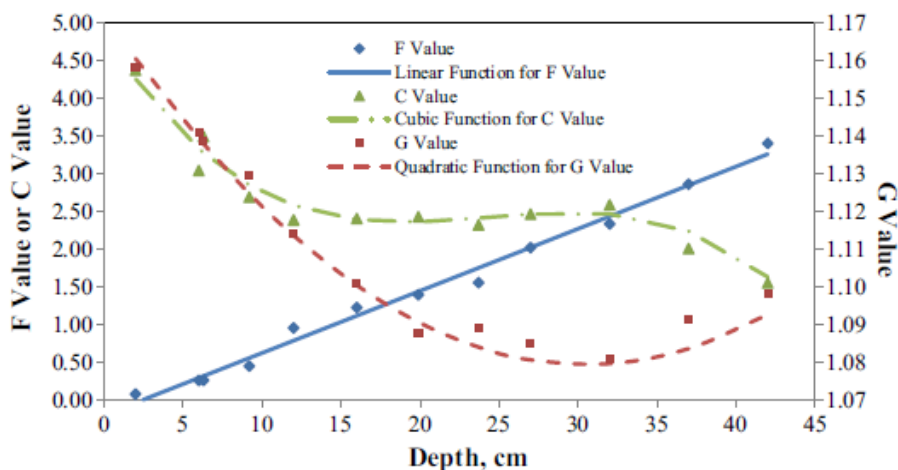
در این پژوهش با انجام برنامه پایش فصلی (SMP)، دمای هوا و روسازی در محل‌های مختلف به منظور تعیین مشخصات روسازی در محل، ارزیابی مدل‌های موجود پیش‌بینی دما و توسعه مدل‌های جدید برای افزایش دقت فرآیند طراحی روسازی به روش سوپریپو، برداشت شده است [۲۹]. این پژوهش بر اساس مدل‌های شارپ (رابطه ۲۶) و شارپ کانادا (رابطه ۲۷) توسعه یافته است.

$$T_d = T_{air(min)} + 0.051d - 0.000063d^2 \quad (26)$$

$$T_{pav} = 0.859T_{air(min)} + (0.002 - 0.007T_{air(min)})H + 0.17 \quad (27)$$

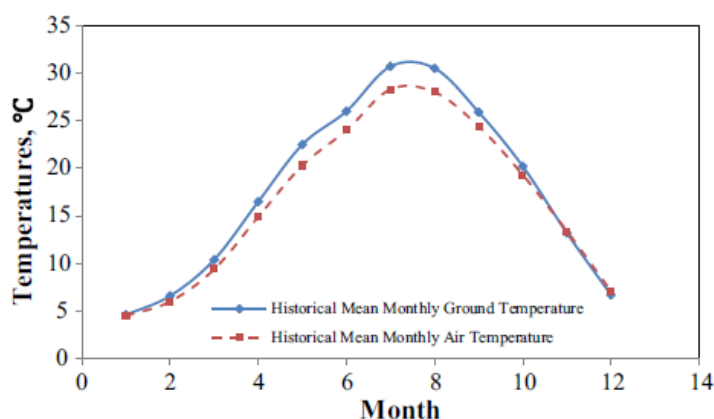
که در این روابط T_{pav} و T_d حداقل دمای روسازی در عمق، درجه سلسیوس؛ $T_{air(min)}$ حداقل دمای هوای یک روز قبل، درجه سلسیوس؛ d و H عمق مورد نظر، میلی‌متر است.

روابط ریاضی برای پیش‌بینی حداکثر دمای روسازی بر اساس مطالعات مدل‌سازی انتقال حرارت می‌باشد. برای توسعه معادلات رگرسیونی از پارامترهای دمای هوا، عرض جغرافیایی، تابش آفتاب و سرعت باد استفاده شده است. معادلات رگرسیونی به صورت رابطه (۲۸) و رابطه (۲۹) است.



شکل ۱. رابطه بین دما و ضرایب F، G و C در مدل لی و همکاران [۳۰]

Fig. 1. The relationship between temperature and coefficients of F, G, and C in Lee et al. model [30]



شکل ۲. مقایسه تاریخچه میانگین ماهانه دمای زمین و تاریخچه میانگین ماهانه دمای هوا (T_m) [۳۰]

Fig. 2. Comparison of historical mean monthly ground temperature and historical mean monthly air temperature (T_m) [30]

به دلیل ثابت بودن نسبی دمای زمین، تاریخچه میانگین ماهانه دمای هوا (T_m) تاثیر زیادی بر تغییر روند این دما دارد. بیان گر تغییرات بلند مدت دما می باشد و بر سیکل های دمایی زمین تاثیر می گذارد. رابطه بین T_m و تاریخچه میانگین ماهانه دمای زمین در شکل ۲ ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود این دو پارامتر همبستگی بالایی با یکدیگر دارند. برای بیان تاثیر دمای زمین در مدل در نظر گرفته شده و تاثیر دمای زمین با افزایش عمق با استفاده از عبارت $T_m.d$ در مدل لحاظ شده است.

گرفته توسط محققان مختلف، روسازی تحت تاثیر تغییرات دوره ای روزانه فاکتورهای آب و هوایی مانند دمای هوا و تابش آفتاب بوده و دارای تبادل حرارت ثابت با زمین نیز می باشد [۳۴ و ۳۵]. زمین دمای نسبی ثابتی دارد که به وسیله تغییرات بلند مدت آب و هوایی تعیین می شود. با افزایش عمق، تاثیر فاکتورهای آب و هوایی کاهش و اثر دمای زمین افزایش می یابد. در نتیجه دمای روسازی در عمق های زیاد، خیلی نزدیک به دمای زمین و کمتر تحت تاثیر شرایط آب و هوایی است. شکل ۱ تغییرات منظم ضرایب G ، F و C را با عمق نشان می دهد. ضریب F به صورت تابع خطی، ضریب G تابع درجه دوم و ضریب C تابع سهمی هستند.

جدول ۱. ضرایب روابط BELLS2 و BELLS3 [۳۸]

Table 1. Coefficients of BELLS2 and BELLS3 equations [38]

BELLS3	BELLS2	ضریب
+۰/۹۵۰	+۲/۷۸۰	β_0
+۰/۸۹۲	+۰/۹۱۲	β_1
-۰/۴۴۸	-۰/۴۲۸	β_2
+۰/۶۲۱	+۰/۵۵۳	β_3
+۱/۸۳۰	+۲/۶۳۰	β_4
+۰/۰۴۲	+۰/۰۲۷	β_5

آن پیشنهاد شده است. بعدها مدل BELLS توسط اداره راه فدرال آمریکا و بر اساس داده‌های فصلی برداشت شده در برنامه LTPP مورد استفاده قرار گرفته است [۳۷]. مدل توسعه داده شده به صورت رابطه (۳۴) می‌باشد.

$$T_d = \beta_0 + \beta_1 IR + [\log(d) - 1.25] + \beta_2 IR + \beta_3 T_{(1-day)} + \beta_4 \sin(hr_{18} - 15.5) + \beta_5 IR \sin(hr_{18} - 13.5) \quad (34)$$

که در این رابطه T_d دمای روسازی در عمق d لایه آسفالتی، درجه سلسیوس؛ IR دمای اندازه‌گیری سطح با استفاده از حسگر مادون قرمز دستگاه FWD، درجه سلسیوس؛ d عمق مورد نظر، میلی‌متر؛ $T_{(1-day)}$ میانگین حداقل و حداکثر دمای هوای روز قبل، درجه سلسیوس؛ و hr_{18} زمان روز در سیستم زمانی ۱۸ ساعته است. محاسبات از یک سیستم ۱۸ ساعته زمان‌های صعودی و نزولی که توسط [۳۱] ارائه شده، استفاده می‌کند. همچنین $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ ضرایب متغیرهای مدل بوده که در جدول ۱ ارائه شده است. به دلیل خطای حسگر مادون قرمز در اندازه‌گیری دمای سطح روسازی، مدل اولیه BELLS فقط برای دامنه دمایی ۱۵ تا ۲۵ درجه سلسیوس معتبر می‌باشد [۴]. این مدل در دماهای پایین، دمای لایه آسفالتی را بیشتر و در دماهای بالا، دمای لایه آسفالتی را کمتر پیش‌بینی می‌کند (دارای خطا است). مدل BELLS2 برای اصلاح خطای مادون قرمز، در نظر گرفتن اثر سایه و همچنین گسترش داده‌ها، بسط یافته است [۳۲ و ۴]. در این مدل، برای کاهش داده‌های مورد نیاز

در این پژوهش سه سایت روسازی انتخاب شده و دماسنج‌هایی در عمق‌های مختلف قرار داده شده است. این سایت‌ها در مناطق نسبتاً مرطوب، خشک و ساحلی کشور چین واقع شده و در معرض تابش مستقیم آفتاب می‌باشند. همچنین داده‌های دمای محل و تابش آفتاب قطعات روسازی و نیز داده‌های آب و هوایی شهر شانگهای برای دوره ۱۹ ساله از سازمان هواشناسی چین اخذ شده است. با داشتن حدود ۹۱۰۸۱ مجموعه داده، تحلیل رگرسیونی برای توسعه مدل پیش‌بینی دمای روسازی انجام شده و مدل توسعه یافته به صورت رابطه (۳۳) ارائه شده است.

$$T_d = (-0.008d + 0.884)\bar{T}_{dN} + (0.002d^2 - 0.152d + 2.924)N_Q - 4.745 \times 10^{-5}d^{-3} + 0.004d^2 - 0.007d + 1.454 + (0.006d + 0.203)T_m \quad (33)$$

که در این رابطه d عمق مورد نظر از سطح روسازی و بقیه متغیرها قبلاً تعریف شده‌اند.

۲-۱۲- مدل BELLS

عبارت BELLS از پنج حرف ابتدای نام توسعه‌دهندگان آن (Baltzer, Ertman, Larsen, Lukanen, Stubstad) تشکیل شده است [۳۱]. این مدل نیز از دسته مدل‌های رگرسیونی می‌باشد. در مطالعات انجام گرفته [۳۶ و ۳۱]، دمای موثر لایه آسفالتی در یک-سوم عمق لایه به جای نیمه عمق

جدول ۲. متغیرهای ورودی مدل‌های رگرسیونی پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی

Table 2. Input variables of Regression-Based depth temperature predictive models

متغیر ورودی مدل													مدل
عمق از سطح روسازی، درصد قیر	نوع قیر	تراکم مخلوط	زمان اندازه‌گیری دما	دمای زمین	رطوبت محیط	تابش آفتاب	سرعت باد	میانگین هوای روز قبل	حداقل و حداکثر دمای روزانه هوا	دمای سطح روسازی	دمای هوا		
✓											✓	رمدان و وهاب [۲۱]	
✓						✓					✓	دیفنדרفر و همکاران [۵ و ۶]	
✓						✓			✓			حسن و همکاران [۲۲]	
✓					✓	✓	✓		✓			ولاسکوئز و همکاران [۲۳]	
✓	✓	✓	✓	✓						✓	✓	طباطبایی و همکاران [۲۴]	
✓			✓					✓		✓		گدافا و همکاران [۲۵]	
✓						✓			✓			اسلام و همکاران [۲۶]	
✓					✓						✓	آریاوان و همکاران [۲۷]	
✓											✓	آلبیاتی و علانی [۲۸]	
✓						✓			✓			آصف‌زاده و همکاران [۲۹]	
✓				✓		✓					✓	لی و همکاران [۳۰]	
✓			✓					✓	✓			BELLS [۳۱]	

شده در این پژوهش، ارائه شده است. بدیهی است که هر چه تعداد متغیر ورودی یک مدل بیشتر باشد، آن مدل پیش‌بینی جامع و دقیق‌تری خواهد داشت. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود مدل‌های توسعه داده شده توسط طباطبایی و همکاران [۲۴] و ولاسکوئز و همکاران [۲۳] به ترتیب با هفت و پنج متغیر مستقل دارای بیشترین پارامتر ورودی مدل هستند. پارامترهای مربوط به مشخصات مصالح لایه مانند تراکم مخلوط، نوع قیر و درصد آن، فقط در مدل ارائه شده توسط طباطبایی و همکاران [۲۴] در نظر گرفته شده است. مدل توسعه یافته توسط لی و همکاران [۲۳] دارای متغیر ورودی دمای زمین می‌باشد. همچنین رمدان و وهاب [۲۱] نیز برای توسعه مدل پیش‌بینی دمای عمق لایه فقط از پارامتر دمای هوا بهره گرفته‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد، مهم‌ترین فاکتور تاثیرگذار در دمای روسازی دمای هوا بوده که به طور مستقیم تحت تاثیر پوشش ابر و تابش آفتاب می‌باشد.

از میانگین حداقل و حداکثر دمای هوا در روز قبل انجام آزمایش FWD استفاده می‌شود. همچنین مدل BELLS3 برای کاربرد در آزمایش‌های معمول FWD، که سطح روسازی عموماً برای مدت کمتر از یک دقیقه در سایه بوده و بارگذاری کمتر از ۳۰ ثانیه می‌باشد، توسعه داده شده است [۴].

۳- تحلیل حساسیت مدل‌ها نسبت به متغیرهای ورودی

پس از معرفی مهم‌ترین مدل‌های رگرسیونی توسعه یافته برای پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی، در این بخش به بررسی متغیرهای ورودی و تحلیل حساسیت مدل‌ها نسبت به این متغیرها پرداخته شده است. متغیرهای ورودی نقش قابل توجهی در انتخاب و دقت پیش‌بینی مدل تعیین دمای عمق لایه‌های آسفالتی دارند. با توجه به شرایط، نوع و تعداد داده‌های موجود و از طرفی دقت مورد نیاز، مدل مناسب برای تعیین دمای عمق لایه انتخاب می‌شود.

در جدول ۲ متغیرهای ورودی مورد نیاز مدل‌های رگرسیونی معرفی

جغرافیایی و تراز ارتفاعی محل روسازی بر دمای آن را پوشش دهد. لوکانن^۴ و همکاران [۴۰] رابطه‌ای جامع بین نسبت مدولار و دما را توسعه داده‌اند که عرض جغرافیایی به عنوان جایگزین سختی لایه آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین مارشال و همکاران [۴] نیز از این پارامتر در پژوهش خود بهره گرفته‌اند. مدل‌های توسعه یافته به دلیل عرض جغرافیایی متفاوت، چرخش زمین به دور خورشید و در نتیجه دریافت متفاوت (انرژی) تابش آفتاب، همچنین تاثیر تغییرات فصلی بر دریافت تابش آفتاب هنگام چرخش مدار زمین حول مسیری بیضی شکل و ... نمی‌توانند دمای لایه‌های آسفالتی را در مناطق دیگر با دقت قابل قبولی پیش‌بینی نمایند [۶].

دیفندر و همکاران [۵] روسازی واقع در ویرجینیا را با طول تقریبی ۲/۷ کیلومتر که ۱/۳ کیلومتر آن روسازی آسفالتی می‌باشد به ۱۲ قطعه (طول هر قطعه در حدود ۱۰۰ متر) تقسیم کرده‌اند. در این قطعات از ۱۱۵ حسگر برای اندازه‌گیری دما استفاده شده است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد در صورتی که مقاطع مختلف روسازی دارای مشخصات حرارتی یکسان باشند (مشخصات مصالح)، حداقل و حداکثر دمای روزانه روسازی، با دقت خوبی پیش‌بینی می‌شود.

زمانی که دما در طول روز به حداکثر مقدار خود می‌رسد، دمای سطح، عمق نزدیک به سطح و نیمه عمق افزایش می‌یابد. دمای سطح و عمق لایه آسفالتی حساسیت بالایی نسبت به زمان یا میانه روز که دمای هوا زیاد بوده، از خود نشان می‌دهد. بررسی تحلیل حساسیت با تغییر متغیرهای مستقل از ۲۵- تا ۲۵ درصد توسط گدافا و همکاران [۲۵] انجام شده است. همان طور در شکل ۳ مشاهده می‌شود افزایش یا کاهش نسبی دمای نیمه عمق لایه آسفالتی، ناشی از تغییر افزایشی یا کاهش در سطوح متغیرهای مستقل می‌باشد. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که متغیرهای مستقل دمای سطح، میانگین دمای هوای روز قبل و زمان روز در حین اندازه‌گیری دارای تاثیر مثبت و متغیر مستقل عمق اندازه‌گیری دما دارای تاثیر منفی در پاسخ یا همان دمای نیمه عمق لایه هستند. در این میان، دمای نیمه عمق لایه حساسیت بالایی نسبت به افزایش دمای سطح، افزایش یا کاهش میانگین دمای هوای روز قبل و نیز افزایش یا کاهش زمان برداشت در روز دارد. در حالی که نسبت به کاهش دمای سطح و نیز افزایش یا کاهش عمق اندازه‌گیری، حساسیت چندانی ندارد. از سوی دیگر در پژوهش‌های آریاوان و همکاران [۲۶] و لی و همکاران [۳۰]، دمای هوا به عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار در دمای عمق لایه‌های آسفالتی معرفی شده است.

متغیرهای ورودی مدل‌ها مانند تابش آفتاب، مقدار بارش باران، دمای هوا، سرعت و جهت باد، رطوبت نسبی هوا، اثر سایه^۱، عرض جغرافیایی^۲، زمان روز^۳ و ... دمای عمق لایه‌های آسفالتی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. به عنوان نمونه، یک پارامتر خاص که در مدل BELLS لحاظ شده، تاثیر سایه ایجاد شده ناشی از دستگاه FWD و وسیله یدک‌کش است. به دلیل این که فاصله حسگر مادون قرمز از جلوی سپر وسیله یدک‌کش در حدود نه متر می‌باشد؛ ممکن است این وسیله در محل بعدی انجام آزمایش FWD سایه ایجاد کند. به طور معمول هر آزمایش FWD در حدود سه دقیقه به طول می‌انجامد که در این حالت دمای سطح روسازی که اندازه‌گیری می‌شود، سطحی است که شش دقیقه در سایه قرار داشته است. تحقیقات [۳۹] نشان داده است که ۳۰ ثانیه تا شش دقیقه سایه ایجاد شده در سطح روسازی می‌تواند دمای سطح آن را حدود ۱/۵ تا ۵ درجه سلسیوس کاهش دهد. البته یک تاثیر مثبت سایه ایجاد شده این است که تغییرات سریعی که در سطح روسازی به دلیل تابش گذرا و لحظه‌ای آفتاب رخ داده را به حداقل می‌رساند. همچنین پترسون و ماهورا [۷] اثر سایه را پارامتر مهمی در دقت پیش‌بینی دمای عمق لایه آسفالتی دانسته‌اند.

دما در سطح روسازی و عمق‌های نزدیک به سطح، حساسیت زیادی به دمای هوا دارد [۲۲]. با افزایش دمای هوا، دمای لایه‌های بالایی روسازی و عمق‌های نزدیک به سطح آن افزایش می‌یابد [۳۲]. در نتیجه تغییر در دمای هوا تاثیر زیادی بر دمای سطح روسازی و عمق‌های نزدیک آن دارد؛ به طوری در دماهای بالا، دما در عمق دو سانتی‌متری از سطح لایه آسفالتی بیشتر از دمای هوا می‌باشد [۲۹]. نتیجه پژوهش ولاسکوئر و همکاران [۲۳] نشان می‌دهد که سرعت باد از پارامترهای مهم و تاثیرگذار در دمای عمق‌های نزدیک به سطح روسازی است. دما در عمق‌های مختلف روسازی آسفالتی وابستگی زیادی به دمای سطح، تابش آفتاب و عمق از سطح لایه آسفالتی دارد [۲۶]. همچنین تاثیر پارامتر رطوبت علاوه بر دمای هوا در پیش‌بینی دمای عمق لایه، زیاد می‌باشد [۲۷].

عرض جغرافیایی از پارامترهای مهم برای تعیین دما در مناطق مختلف می‌باشد. بدون در نظر گرفتن این پارامتر نمی‌توان دمای عمق لایه‌های آسفالتی را در مناطقی غیر از محل توسعه مدل به درستی پیش‌بینی کرد. تاریخچه داده‌های دمای میانگین هوا مورد استفاده باید تاثیر عرض

- 1 Shadow
- 2 Latitude
- 3 Time of Day

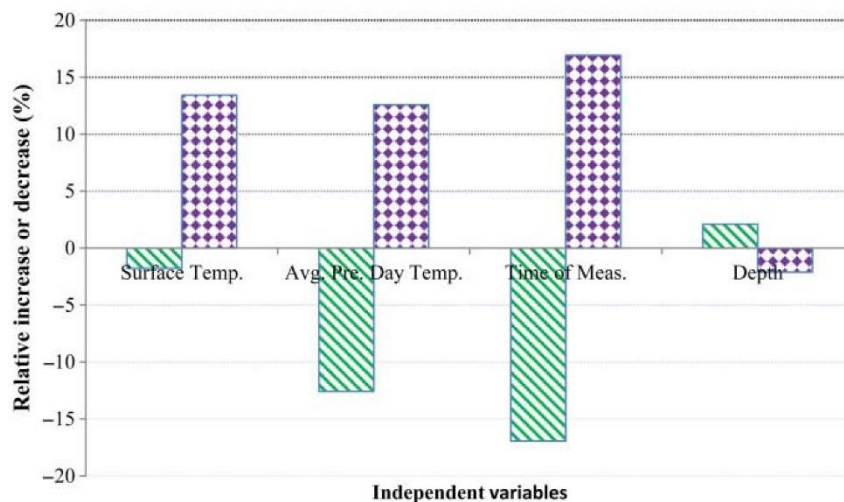


Fig. 3. Sensitivity analysis results of mid-depth pavement temperature to various parameters (Case study: Kansas, USA) [25]

شکل ۳. نتایج تحلیل حساسیت دمای نیمه عمق روسازی نسبت به پارامترهای مختلف (مطالعه موردی - کانزاس، آمریکا) [۲۵]

می‌باشد. به همین دلیل مدل پیش‌بینی دما در این عمق از سطح، توسعه داده شده و مدل از دقت خوبی با ضریب تعیین 0.94 برخوردار می‌باشد. استفاده تنها از پارامتر دمای هوا از نقاط ضعف این مدل است. نتایج پژوهش انجام شده توسط دیندرفر و همکاران [۵] نشان می‌دهد هنگامی که مقاطع روسازی دارای مشخصات حرارتی یکسانی بوده‌اند، حداقل و حداکثر دمای عمق روزانه لایه‌ها با دقت خوبی پیش‌بینی شده و مدل پیش‌بینی حداقل دمای روسازی نیز از دقت بالاتری برخوردار می‌باشد.

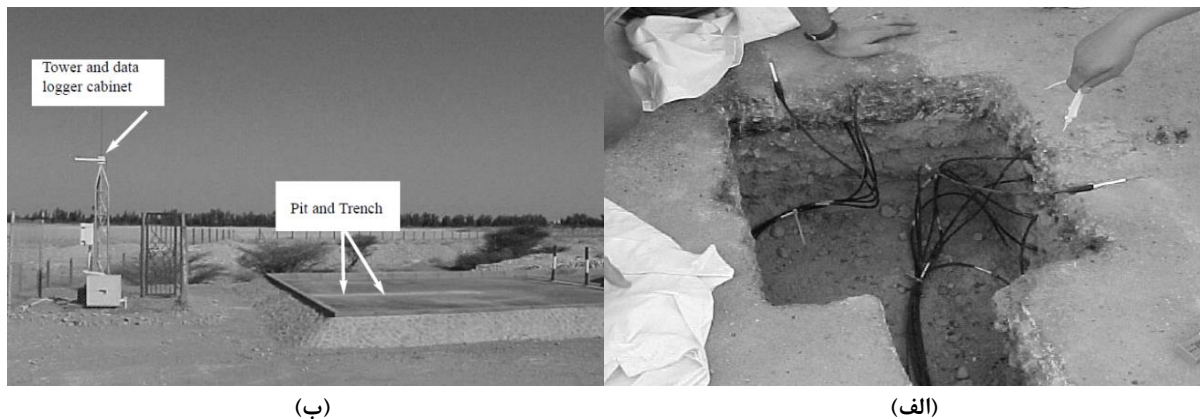
حسن و همکاران [۲۲] با حفر چاله‌ای مربعی شکل در ابعاد 500×500 میلی‌متر و عمق 480 میلی‌متر، حسگرهای دمایی را در عمق‌های مختلفی از سطح روسازی قرار داده‌اند (شکل ۴-الف). بعد از جایگذاری کامل این حسگرها و متعلقات آن‌ها (کابل و ...) چاله با مصالح اساس و بستر پر شده است. برای کاهش خطر آسیب دیدگی کابل‌ها و ... از اندود سیمانی به جای آسفالت داغ برای پر کردن چاله استفاده شده است. شکل ۴-ب محل آزمایش میدانی انجام شده را نشان می‌دهد. تناوب برداشت داده تابش آفتاب در هر دقیقه و میانگین آن در هر 15 دقیقه ذخیره شده و همچنین برای سایر داده‌ها این تناوب به صورت 15 دقیقه‌ای بوده است. مدل پیش‌بینی حداقل دما از دقت خوب و ضریب پیش‌بینی کم (شیب و عرض از مبدأ خط روند به

۴- بررسی عملکرد مدل‌ها

به منظور بررسی عملکرد^۱ مدل‌های رگرسیونی توسعه یافته، پارامترهای دقت^۲ با معیار ضریب تعیین^۳ (R^2)، اُریب (بایاس^۴) با معیار شیب و عرض از مبدأ خط روند^۵ و همچنین خطای جذر میانگین مربعات^۶ (RMSE) در صورت گزارش توسط توسعه دهنده مدل، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. هر چه مقدار ضریب تعیین به یک میل کند، دقت پیش‌بینی مدل بالاتر است. از سوی دیگر هر چه شیب خط روند به یک و عرض از مبدأ این خط به صفر نزدیک باشد، مدل دارای اُریب پیش‌بینی کمتری خواهد بود. پارامتر RMSE خطای تفاوت بین مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل و مقدار واقعی یا اندازه‌گیری شده می‌باشد و هر چه مقدار آن به صفر نزدیک‌تر باشد، مدل از عملکرد خوبی برخوردار می‌باشد [۴۱].

در پژوهش انجام شده توسط رَمدان و وَهاب [۲۱]، مشخص شده که حداکثر دمای لایه آسفالتی در عمق دو سانتی‌متری از سطح روسازی

- 1 Performance
- 2 Goodness-of-Fit
- 3 Coefficient of Determination
- 4 Bias
- 5 Trend Line
- 6 Root Mean Squared Error



شکل ۴. (الف) محل قرارگیری دماسنج‌ها در عمق‌های مختلف لایه آسفالتی؛ (ب) نمای کلی سایت آزمایش میدانی حسن و همکاران [۲۲]

Fig. 4. (a) Location of thermometers at different depths of the asphalt layer; (b) General view of Hassan et al. experimental site [22]

نتایج بررسی مدل اسلام و همکاران [۲۶] که با قرار دادن حسگرهای دمایی، داده‌های دمای سطح، عمق‌های ۵۰، ۱۰۰، ۲۶۳، ۳۴۰ و ۴۹۰ میلی‌متری از سطح روسازی جمع‌آوری شده است، نشان می‌دهد که در دو عمق ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متری از سطح روسازی مقادیر پیش‌بینی شده دما مشابه مقادیر اندازه‌گیری بوده و همبستگی زیادی با هم دارند. همچنین مدل دارای اُریب پیش‌بینی کمتری می‌باشد. در این پژوهش از دو نوع حسگر برای اندازه‌گیری مقادیر تابش آفتاب، دمای هوا و روسازی استفاده شده است. شکل ۵-الف محل ایستگاه هواشناسی و جعبه فولادی که دیتالاگر در آن قرار گرفته است را نشان می‌دهد. منبع تغذیه برق این ایستگاه از طریق انرژی خورشیدی می‌باشد. حفره‌ای به قطر ۳۷/۵ میلی‌متر ایجاد شده، سپس مصالح باقی مانده از داخل آن خارج شده است. حسگرهای دمایی به یکدیگر متصل شده (شکل ۵-ب) و به صورت قائم در عمق‌های مختلف لایه آسفالتی قرار داده شده‌اند. از سوی دیگر در پژوهش انجام شده توسط آریاوان و همکاران [۲۷]، مدل رگرسیون توسعه یافته دارای دقت خوبی بوده و تاثیر شرایط آب و هوایی (دمای هوا و رطوبت) در پیش‌بینی دمای عمق، زیاد بوده است. همچنین مقادیر دمای عمق پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری دارای مطابقت و همپوشانی خوبی با یکدیگر هستند.

ترتیب برابر $1/121$ و $-1/437$ برخوردار است. همچنین مدل پیش‌بینی حداکثر دما دارای دقت پایین و اُریب پیش‌بینی زیاد (شیب و عرض از مبدأ خط روند به ترتیب برابر $1/319$ و $3/160$) است. بررسی مدل ولاسکوئز و همکاران [۲۳] نشان می‌دهد مشخصات لایه آسفالتی تاثیر زیادی در دقت مدل نداشته و در فرآیند توسعه مدل حذف شده است. همچنین پارامتر سرعت باد دارای تاثیر زیادی در دمای عمق (به ویژه عمق‌های کم) می‌باشد. مدل‌های پیش‌بینی حداکثر و حداقل دمای روسازی توسعه داده شده از دقت مشابهی برخوردار هستند.

دقت بالای مدل پیش‌بینی توسعه یافته توسط طباطبایی و همکاران [۲۴] نشان از عملکرد خوب این مدل در پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی دارد. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که درجه عملکردی قیر دارای اهمیت زیادی به خصوص در مناطق گرمسیری است. همچنین مقادیر پیش‌بینی شده دمای عمق در برابر مقادیر اندازه‌گیری همبستگی زیادی با هم دارند. با این حال، این مدل برای پیش‌بینی دمای عمق در مناطق گرمسیری توسعه یافته و می‌تواند خطای بالایی در سایر مناطق آب و هوایی داشته باشد. مدل گدافا و همکاران [۲۵]، دمای نیمه عمق روسازی را با دقت خوبی پیش‌بینی می‌کند. همچنین دقت خوب و اُریب کم پیش‌بینی مدل نشان از عملکرد مناسب آن در تعیین دمای نیمه عمق لایه‌های آسفالتی می‌باشد.



شکل ۵. (الف) محل ایستگاه هواشناسی؛ (ب) حسگرهای دمایی در پژوهش اسلام و همکاران [۲۶]

Fig. 5. (a) Weather station location; (b) Temperature sensors in the study of Islam et al. [26]

(روکش شده) است. برای این روسازی‌ها مدل با ضریب تعیین ۰/۹۸ دارای دقت بسیار خوب و با شیب و عرض از مبدأ خط روند به ترتیب برابر ۰/۹۵۶ و ۱/۳۷۵ دارای آریب پیش‌بینی کم است. در حالی که این مدل در پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی در روسازی‌های تازه ساخت، دارای خطا می‌باشد. به طوری که مدل با ضریب تعیین ۰/۹۶ دارای دقت خوب و با شیب و عرض از مبدأ خط روند به ترتیب برابر ۰/۸۹۸ و ۰/۸۷۴ دارای آریب پیش‌بینی زیادی است.

در جدول ۳ مقایسه‌ای بین عملکرد مدل‌های رگرسیونی مورد بحث در این پژوهش برای پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی ارائه شده است. همان طور که در این جدول مشاهده می‌شود اکثر مدل‌ها از دقت خوب و قابل قبولی برخوردار هستند. با این حال مدلی که با پارامتر ورودی کم و قابل دسترس، دارای عملکرد مناسب و قابل قبولی باشد؛ مورد توجه بیشتری قرار می‌گیرد. مدل توسعه داده شده توسط طباطبایی و همکاران [۲۴] دارای دقت خوبی می‌باشد ولی دسترسی به داده‌هایی مانند تراکم مخلوط، نوع قیر و درصد آن و ... تا حدودی آسان نبوده و از طرفی این مدل برای مناطق با آب و هوای گرم توسعه یافته است. مدل‌های BELLS [۳۱] و گدافا و همکاران [۲۵] به داده‌های مانند تابش آفتاب نیازی نداشته و پارامترهای ورودی این مدل‌ها اغلب در دسترس هستند.

مدل‌های توسعه یافته توسط آصفزاده و همکاران [۲۹] به چهار دسته تقسیم می‌شود؛ میانگین دمای روزانه روسازی برای فصل‌های سرد و گرم و نیز حداقل و حداکثر دماهای روزانه عمق لایه آسفالتی. نتایج بررسی نشان می‌دهد که مدل‌های ارائه شده دارای ضریب تعیین و دقت بالایی هستند و اعتبارسنجی مدل‌ها با دقت خوبی انجام شده است. مدل دارای عملکرد مناسب با دقت پیش‌بینی بالا، آریب پیش‌بینی کم (شیب و عرض از مبدأ خط روند به ترتیب برابر ۰/۹۹۵ و ۰/۱۲۸) می‌باشد. از سوی دیگر نتایج بررسی مدل لی و همکاران [۳۰] نشان می‌دهد که دمای زمین تاثیر زیادی بر دمای روسازی دارد. مقادیر دمای پیش‌بینی شده در عمق‌های مختلف با مقادیر اندازه‌گیری همبستگی خوبی از خود نشان داده‌اند. همچنین مقایسه با دیگر مدل‌های توسعه یافته توسط لوکانن و همکاران [۴۰] و پارک^۱ و همکاران [۴۲]، نیز نشان از کارایی مدل فوق در پیش‌بینی دمای عمق‌های زیاد لایه‌های آسفالتی دارد.

برای بررسی عملکرد مدل BELLS، می‌توان به پژوهش صولتی‌فر^۲ و همکاران [۳۲] اشاره کرد. در این پژوهش برای تعیین دمای عمق لایه آسفالتی از هر دو روش اندازه‌گیری مستقیم و پیش‌بینی توسط مدل BELLS استفاده شده است. نتایج بررسی نشان می‌دهد مدل BELLS دارای قابلیت بالایی در پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی قدیمی

1 Park
2 Solatifar

جدول ۳. دقت مدل‌های رگرسیونی توسعه یافته توسط پژوهشگران مختلف

Table 3. The accuracy of Regression-Based models developed by various researchers

مدل	ضریب تعیین (R^2) و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)
رمدان و وهاب [۲۱]	R^2 مدل برابر ۰/۹۴ است.
دیفندرفر و همکاران [۵ و ۶]	با توجه مشخصات مقطع روسازی R^2 تعدیل شده مدل پیش‌بینی حداکثر و حداقل دمای روزانه لایه آسفالتی از ۰/۸۹ تا ۰/۹۴ متغیر است. مقدار RMSE نیز از ۲/۲۶ تا ۳/۹ درجه سلسیوس متغیر می‌باشد. همچنین R^2 تعدیل شده مدل پیش‌بینی حداکثر و حداقل دمای روسازی به ترتیب برابر ۰/۷۷ و ۰/۸۰ است. مقدار RMSE نیز به ترتیب برابر ۵/۸ و ۴/۳ درجه سلسیوس می‌باشد.
حسن و همکاران [۲۲]	R^2 مدل پیش‌بینی حداکثر و حداقل دمای روسازی به ترتیب برابر ۰/۸۵ و ۰/۹۷ است. خطای استاندارد پیش‌بینی نیز به ترتیب برابر ۳/۱۸ و ۱/۱۱ درجه سلسیوس می‌باشد.
ولاسکوئز و همکاران [۲۳]	R^2 مدل پیش‌بینی حداکثر و حداقل دمای روسازی به ترتیب برابر ۰/۹۵ و ۰/۹۶ بوده و خطای مدل‌ها نیز به ترتیب برابر ۳/۷۷۰ و ۲/۵۷۴ درجه سلسیوس می‌باشد.
طباطبایی و همکاران [۲۴]	R^2 مدل برابر ۰/۹۵ و انحراف استاندارد برابر یک می‌باشد.
گدافا و همکاران [۲۵]	R^2 مدل برابر ۰/۹۴ است.
اسلام و همکاران [۲۶]	R^2 مدل پیش‌بینی حداکثر دمای روزانه عمق روسازی بین ۰/۹۶ و ۰/۹۸ و برای مدل پیش‌بینی حداقل دمای عمق روزانه روسازی برابر ۰/۹۹ می‌باشد. همچنین R^2 مدل پیش‌بینی میانگین دمای عمق روزانه روسازی نیز برابر ۰/۹۲ است.
آریاوان و همکاران [۲۷]	R^2 تعدیل یافته مدل پیش‌بینی دماهای سطح، عمق ۲۰ و عمق ۷۰ میلی‌متر به ترتیب برابر ۰/۸۲، ۰/۹۸ و ۰/۸۰ است. همچنین مقدار RMSE مدل‌ها نیز به ترتیب برابر ۳/۹۷۰۶۱، ۱/۱۶۴۵۶ و ۲/۵۷۷۱۰ درجه سلسیوس می‌باشد.
آلبیاتی و علانی [۲۸]	R^2 مدل برابر ۰/۹۹ و انحراف استاندارد آن برابر ۳/۴۹ می‌باشد.
آصف‌زاده و همکاران [۲۹]	R^2 مدل پیش‌بینی حداکثر دمای روزانه عمق روسازی برابر ۰/۹۲ و برای مدل پیش‌بینی حداقل دمای عمق روزانه روسازی برابر ۰/۹۱ می‌باشد.
لی و همکاران [۳۰]	R^2 مدل برابر ۰/۹۷ و مقدار RMSE نیز برابر ۱/۷۰۲ درجه سلسیوس می‌باشد.
BELLS [۳۱]	R^2 مدل برای روسازی‌های تازه ساخت برابر ۰/۹۶ و برای روسازی‌های قدیمی برابر ۰/۹۸ است. همچنین مقدار RMSE نیز برای روسازی‌های تازه ساخت برابر ۵/۶۰۴ و برای روسازی‌های قدیمی برابر ۱/۰۹۶ درجه سلسیوس می‌باشد.

۵- پرداخت و کالیبراسیون محلی

ارزیابی دقت و عملکرد مدل‌های پیش‌بینی دمای عمق در شرایط متفاوت آب و هوایی، لزوم پرداخت و کالیبراسیون این مدل‌ها را برای استفاده از آن‌ها به جای اندازه‌گیری در محل دمای عمق نشان می‌دهد. به طور کلی دو رویکرد در پرداخت و کالیبراسیون این مدل‌ها وجود دارد؛ رویکرد اول تصحیح ضرایب پارامترهای مدل و ارائه مدلی با ضرایب جدید و رویکرد دوم ارائه ضریب تصحیحی برای مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل اصلی است. می‌توان گفت مدل پرداخت و کالیبره شده با رویکرد اول به علت در نظر گرفتن تاثیر تمامی پارامترهای مدل در متغیر پاسخ نسبت به مدل کالیبره شده با رویکرد دوم که صرفاً مقادیر محاسبه شده مدل را با مقادیر اندازه‌گیری تصحیح می‌نماید، دارای دقت بالاتر و اُریب کمتری خواهد بود [۴۳].

در این خصوص به عنوان نمونه می‌توان به مدل پارک و همکاران [۴۲] اشاره کرد که توسط آصف‌زاده و همکاران [۲۹] برای پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی در هر زمانی از روز کالیبره شده است. مدل توسعه یافته، دقت محاسبات بازگشتی مشخصات سازه‌ای لایه‌های آسفالتی حاصل از نتایج آزمایش FWD را افزایش داده است. در این پژوهش داده‌های دمای سطح و عمق لایه‌ها برای سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۱۶ در ادمونتون، کانادا، جمع‌آوری شده و از مدل توسعه یافته توسط پارک و همکاران [۴۲] برای پیش‌بینی دمای عمق لایه‌ها استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که همبستگی قوی بین مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری در ماه‌های سرد سال وجود ندارد. بنابراین داده‌ها به دو دسته ماه‌های گرم و سرد سال تفکیک شده و سپس با استفاده از این داده‌ها مدل پارک و همکاران [۴۲] کالیبره و اصلاح شده است. مدل‌های کالیبره شده برای ماه‌های گرم و سرد سال به ترتیب به صورت رابطه (۳۵) و رابطه (۳۶) می‌باشد.

$$T_z = 0.9511T_{Surf} + (0.1462z) \sin(7.5442t + 6.6341) \quad (35)$$

$$T_z = 0.8939T_{Surf} - 0.0385z + (0.1374z) \sin^2(2.2916 - 4.0067t) \quad (36)$$

که در این روابط T_z دمای عمق لایه آسفالتی، درجه سلسیوس؛ T_{Surf} دمای سطح، درجه سلسیوس؛ z عمق مورد نظر از سطح روسازی، سانتی‌متر؛ و t زمان اندازه‌گیری دما در کسری از روز می‌باشد. نتایج پژوهش نشان می‌دهد مدل‌های کالیبره شده از همبستگی و دقت خوبی با

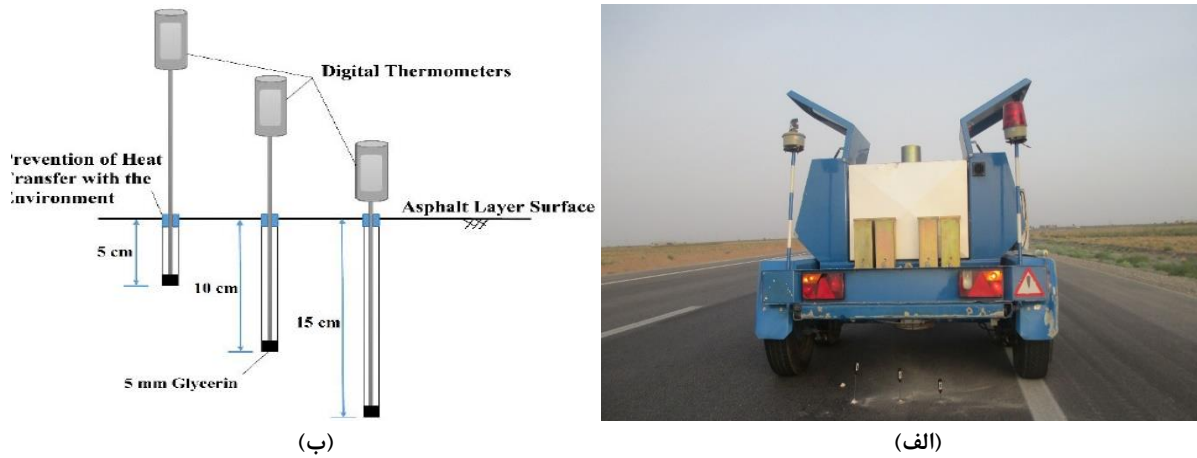
ضریب تعیین 0.93 برای ماه‌های گرم و سرد سال برخوردار هستند. همچنین شیب خط روند با مقدار 0.978 ، اُریب پیش‌بینی کمی برای مدل ارائه کرده است. بنابراین مدل‌های کالیبره شده قابلیت کاربرد در پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی را با اعمال تصحیحاتی برای روسازی‌ها و شرایط محلی متفاوت داشته و از دقت پیش‌بینی خوبی برخوردار می‌باشند.

در پژوهشی دیگر صولتی‌فر و همکاران [۳۲] پس از بررسی عملکرد ضعیف مدل BELLS در پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی در روسازی‌های تازه ساخت در مناطق با آب و هوای گرم، از روش رگرسیونی چند خطی برای توسعه مدل جدید استفاده کرده‌اند. در این پژوهش، از روش اندازه‌گیری مستقیم برای تعیین دمای عمق لایه‌های آسفالتی در حین انجام آزمایش FWD در ده سایت روسازی آسفالتی در دو استان خوزستان و کرمان بهره گرفته شده است. برای اندازه‌گیری دماها در نیمه و یک-سوم عمق لایه‌های آسفالتی از دماسنج دیجیتالی و برای دمای سطح از حسگر مادون قرمز FWD بهره گرفته شده است. شکل ۶-الف نمونه‌ای از روش اندازه‌گیری مستقیم دمای عمق و سطح لایه‌های آسفالتی را در حین انجام آزمایش FWD پژوهش فوق نشان می‌دهد. همچنین جزئیات محل قرارگیری سه دماسنج در عمق‌های مختلف لایه‌های آسفالتی در شکل ۶-ب ارائه شده است. برای جلوگیری از یخ‌زدگی و خنک‌شوندگی قابل تبخیر در انتهای چاله حفر شده از مایع گلیسیرین استفاده شده است.

مدل توسعه یافته به صورت رابطه (۳۷) است. شکل ۷-الف نتایج مقادیر دماهای پیش‌بینی در مقابل مقادیر اندازه‌گیری با استفاده از مدل BELLS اصلی و شکل ۷-ب مقادیر دماهای پیش‌بینی در مقابل مقادیر اندازه‌گیری با استفاده از مدل BELLS اصلاح شده را در روسازی‌های جدید نشان می‌دهد. همان طوری که در این شکل مشاهده می‌شود، مدل جدید توسعه یافته قابلیت پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی تازه ساخت را با دقت بسیار خوب (ضریب تعیین 0.97) و همچنین اُریب پیش‌بینی بسیار کم (شیب برابر 0.995 و عرض از مبدأ نزدیک به صفر، برابر 0.259 برای خط روند) دارد.

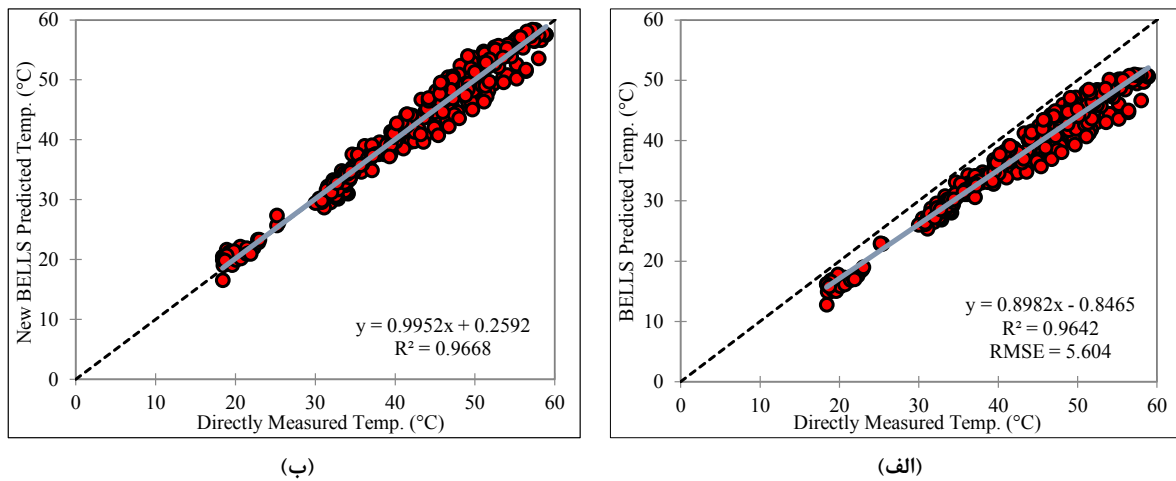
$$T_d = 1.725 + 1.022IR + [\log(d) - 1.25] \cdot [-0.419IR + 0.491T_{(1-day)} + 0.054IR \sin(hr_{18} - 13.5)] \quad (37)$$

که همه متغیرهای آن قبلاً تعریف شده است.



شکل ۶. (الف) اندازه‌گیری مستقیم دمای عمق لایه‌های آسفالتی حین انجام آزمایش FWD؛ (ب) جزئیات محل دماسنج‌ها در عمق‌های مختلف لایه‌های آسفالتی در پژوهش صولتی‌فر و همکاران [۳۲]

Fig. 6. (a) Direct measurement of the depth temperature of asphalt layers during FWD testing; (b) Detailed configuration of thermometers at different depths of asphalt layers in the research of Solatifar et al. [32]



شکل ۷. مقادیر دمای عمق پیش‌بینی در مقابل مقادیر اندازه‌گیری: (الف) پیش‌بینی توسط مدل BELLS اصلی؛ (ب) پیش‌بینی توسط مدل صولتی‌فر و همکاران (BELLS اصلاح شده) [۳۲]

Fig. 7. Predicted vs. measured values of depth temperature: a) BELLS model, b) Solatifar et al. model (Modified BELLS) [32]

۶- نتیجه‌گیری

همکاران [۳۳] به عنوان مدل اصلاح شده BELLS با دقت بالا توسعه یافته است.

• ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی در شرایط مختلف آب و هوایی و مصالح محلی، لزوم کالیبراسیون و پرداخت مدل‌های بومی را نشان می‌دهد. اغلب مدل‌های توسعه یافته برای مناطق و شرایط آب و هوایی خاصی می‌باشند؛ از این رو برای دستیابی به نتایج بهتر، دقیق‌تر و افزایش عملکرد مدل پیش‌بینی و جامعیت آن می‌توان پارامترهای دیگری مانند مشخصات مصالح را به عنوان پارامتر ورودی مدل در نظر گرفت و مورد بررسی و تحلیل قرار داد.

منابع

- [1] Kim, Y. R. and Lee, Y. C. (1995). "Interrelationships among Stiffnesses of Asphalt-Aggregate Mixtures", *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 64, pp. 575-609.
- [2] Park, H. M., Kim, Y. R. and Park, S. (2002). "Temperature Correction of Multiload-Level Falling-Weight Deflectometer Deflections". *Transportation Research Record*, Vol. 1806, pp. 3-8. doi: <https://doi.org/10.3141/1806-01>
- [3] Shao, L., Park, S. W. and Kim, Y. R. (1997). "Simplified Procedure for Prediction of Asphalt Pavement Subsurface Temperatures Based on Heat Transfer Theories", *Transportation Research Record*, No. 1568, pp. 114-123. doi: <https://doi.org/10.3141/1568-14>
- [4] Marshall, C., Meier, R. and Welch, M. (2001). "Seasonal Temperature Effects on Flexible Pavements in Tennessee", *Transportation Research Record*, No. 1764, Issue. 1, pp. 89-96. doi: <https://doi.org/10.3141/1764-10>
- [5] Diefenderfer, B. K., Al-Qadi, I. L. and Reubush, S. D. (2002). "Prediction of Daily Temperature Profile in Flexible Pavements", 81st Annual Meeting 'Transportation Research Board', Washington, D.C., USA.
- [6] Diefenderfer, B. K., Al-Qadi, I. L. and Diefenderfer, S. D. (2006), "Model to Predict Pavement Temperature Profile: Development and Validation", *Journal of*

در این مقاله به بررسی و تحلیل جامعی بر دوازده مدل رگرسیونی توسعه یافته برای پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی پرداخته شده است. معرفی مدل‌ها، بررسی نقاط قوت و ضعف، متغیرهای ورودی و تحلیل حساسیت مدل نسبت به آن‌ها، بررسی عملکرد و قدرت پیش‌بینی و در نهایت پرداخت و کالیبراسیون مدل‌ها در شرایط متفاوت محلی ارائه شده است. مهم‌ترین نتایج این پژوهش به شرح زیر است:

• مدل‌های رگرسیونی پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی جایگزینی ارزان و سریع برای اندازه‌گیری دما در محل می‌باشند. این مدل‌ها به دلیل سادگی و آسان بودن کار با آن‌ها، دقت و عملکرد خوب و قابل قبول و نیز ارائه رابطه ریاضی توسط بسیاری از پژوهشگران برای پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی توسعه یافته‌اند.

• مدل مورد استفاده باید بر اساس شرایط، نوع و تعداد داده‌های موجود و از طرفی دقت مورد انتظار از مدل انتخاب شود. معمولاً هر چه تعداد پارامترهای ورودی مدل بیشتر باشد، دقت پیش‌بینی آن افزایش می‌یابد. البته باید به این موضوع توجه شود که افزایش تعداد پارامترهای مدل، باعث پیچیدگی زیاد آن شده و نیازمند داده‌های بیشتر و ... می‌باشد.

• تحلیل حساسیت دمای عمق لایه‌های آسفالتی نسبت به متغیرهای ورودی نشان می‌دهد که دمای عمق حساسیت بالایی به دمای هوا به خصوص در ساعاتی از روز که هوا گرم‌تر می‌باشد، دارد. همچنین محققان مختلف، اثر سایه را پارامتر مهمی در پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی دانسته‌اند.

• عرض جغرافیایی از پارامترهای مهم برای تعیین دما می‌باشد. بدون در نظر گرفتن این پارامتر نمی‌توان دما را به دلایلی مانند دریافت متفاوت (انرژی) تابش آفتاب به علت عرض جغرافیایی متفاوت، چرخش زمین به دور خورشید و ... به درستی پیش‌بینی کرد. این پارامتر امکان پیش‌بینی نحوه توزیع دما در روسازی در سایر مناطق جغرافیایی را غیر از محل توسعه مدل می‌دهد.

• در بین مدل‌های مورد بررسی، مدل BELLS با توجه به جامعیت داده‌های مورد استفاده در توسعه مدل، عملکرد مناسب با دقت پیش‌بینی بالا و اُریب پیش‌بینی کم، در نظر گرفتن اثر پارامترهای مختلف از جمله اثر سایه دستگاه FWD، عرض جغرافیایی محل و ... به عنوان یکی از بهترین مدل‌های رگرسیونی پیش‌بینی دمای عمق لایه‌های آسفالتی شناخته می‌شود. در مورد روسازی‌های تازه ساخت (روکش نشده)، مدل صولتی‌فر و

- and State for Winter Road Maintenance”, *Journal of Applied Meteorology and Climatology (JAMC)*, Vol. 35, pp. 1352–1361. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1996\)035%3C1352:AANMOR%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1996)035%3C1352:AANMOR%3E2.0.CO;2)
- [16] Rayer, P. J. (1987). “The Meteorological Office Forecast Road Surface Temperature Model”, *Meteor. Magazine*, Vol. 116, pp. 180–191.
- [17] Chapman, L., Thornes, J. E. and Bradley, A. V. (2001). “Modeling of Road Surface Temperatures from a Geographical Parameter Database, Part. 1, *Stat. Meteor. Appl.*, Vol. 8, pp. 409–419. doi: <https://doi.org/10.1017/S1350482701004030>
- [18] Akihiro, F., Akira, S. and Teruyuki, F. (2012). “A New Approach to Modeling Vehicle-Induced Heat and Its Thermal Effects on Road Surface Temperature”, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 51. doi: <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0156.1>
- [19] Xu, B., Dan, Han-Cheng. and Li, L. (2017). “Temperature Prediction Model of Asphalt Pavement in Cold Regions Based on an Improved BP Neural Network”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 120, pp. 568-580. doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.04.024>
- [20] Minhoto, J. C., Pais, J. C. and Pereira, A. A. (2005). “Asphalt Pavement Temperature Prediction”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board (TRR Journal)*, Vol. 1, No. 1919. pp. 96-110. doi: <https://doi.org/10.3141/1919-11>
- [21] Ramadhan, R. H. and Wahhab, A. H. (1997). “Temperature Variation of Flexible and Rigid Pavements in Eastern Saudi Arabia”, *Journal of Building and Environment*, Vol. 32, No. 4, pp. 367-373, Printed in Great Britain. doi: [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(96\)00072-8](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(96)00072-8)
- [22] Hassan, H. F., Al-Nuaimi, A. S., Taha, R. and Jafar, T. M. A. (2005). “Development of Asphalt Pavement Temperature Models for Oman”, *Journal of Engineering Research*, Vol. 2, No. 1. pp. 32-42.
- [23] Velasquez, R., Marasteanu, M., Clyne, T. R. and Worel, B. (2008). “Improved Model to Predict Flexible Pavement Transportation Engineering, Vol. 132 Issue. 2. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2006\)132:2\(162\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2006)132:2(162))
- [7] Petersen, C. and Mahura, A. (2012). “Influence of the Pavement Type on the Road Surface Temperature”, *Danish Meteorological Institute, Copenhagen, Denmark*.
- [8] Herb, W. M., Stefan, M. and Heinz, G. (2006). “Simulation and Characterization of Asphalt Pavement Temperatures”, *Minnesota Department of Transportation (MNDOT), University of Minnesota*.
- [9] Fajing, P., Lei W., Jinke, J. and Wang, J. (2015). “A Research Review of Flexible Pavement Temperature Profile”, *International Forum on ‘Energy, Environment Science and Materials’ (IFEESM), Shenzhen, China*.
- [10] Irwin, R. S. and Boston, I. (2005). “Rigid and Flexible Pavement Design”, *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, No. 1919, Washington, D.C., USA*.
- [11] Kennedy, T., Huber, G., Harrigan, E., Cominsky, R., Hughes, C., Quintus, H. V. and Moulthrop, J. (1994). “Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave)”, *The Product of the SHRP Asphalt Research Program, National Research Council, Washington, D.C., USA*.
- [12] Mohseni, A. and Symons, M. (1998). “Effect of Improved LTPP AC Pavement Temperature Models on Superpave Performance Grades”, *Proceedings of 77th Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, D.C., USA*.
- [13] FHWA. (2017). “The Long-Term Pavement Performance Program”, *Publication No. FHWA-HRT-15-049, Turner-Fairbank Highway Research Center, 6300 Georgetow Pike, McLean, VA 22101*.
- [14] Solatifar, N. and Lavasani, S. M. (2020). “Development of An Artificial Neural Network Model for Asphalt Pavement Deterioration Using LTPP Data”, *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, Vol. 8, No. 1, pp. 121-132. doi: <https://dx.doi.org/10.22075/jrce.2019.17120.1328>
- [15] Shao, J. and Lister, P. J. (1996). “An Automated Now casting Model of Road Surface Temperature

- [31] Stubstad, R. N., Baltzer, S., Lukanen, E. O. and Ertman-Larsen, H. J. (1994). "Prediction of AC Mat Temperatures for Routine Load-Deflection Measurements, in 4th International Conference on the 'Bearing Capacity of Roads and Airfields', Minneapolis, Minnesota, USA.
- [32] 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>
- [33] Mohseni, A. (1998). "LTPP Seasonal Asphalt Concrete Pavement Temperature Models", Report FHWA-RD-97-103, Federal Highway Administration, Washington, D.C., USA.
- [34] Jia, L. and Sun, Y. (2008). "Asphalt Pavement Statistical Temperature Prediction Models Developed from Measured Data in China", *Plan, Build, and Manage Transportation Infrastructure in China*, pp. 723-732.
- [35] Sun, L. and Qin, J. (2006) "Prediction Model on Temperature Field in Asphalt Pavement", *J. Tongji Uni. (Nat. Sci.)*, Vol. 34, No. 4, pp. 480-483.
- [36] Baltzer, S. and Jansen J. M. (1994). "Temperature Correction of Asphalt-Moduli for FWD-Measurements", *Proc., 4th International Conference on the 'Bearing Capacity of Roads and Airfields'*, Vol. 1, Minneapolis, Minn.
- [37] FHWA. (1994). "LTPP Seasonal Monitoring Program: Instrumentation Installation and Data Collection Guidelines", Report No. FHWA-RD-94-110. McLean, VA.
- [38] AASHTO T317. (2009). "Prediction of Asphalt-Bound Pavement Layer Temperatures", American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., USA.
- [39] FHWA. (2016). "LTPP Guide to Asphalt Temperature Prediction and Correction", Publication Number: FHWA-RD-98-085.
- [40] Lukanen, E. O., Stubstad, R. and Briggs, R. C. (2000). "Temperature Predictions and Adjustment Factors Temperature Profile", 3th International Conference on Accelerated Pavement Testing (APT). Impacts and Benefits from APT Programs, Madrid, Spain.
- [24] Tabatabaie, S. A., Ziari, H. and Khalili, M. (2008). "Modeling Temperature and Resilient Modulus of Asphalt Pavements for Tropic Zones of Iran", *Asian Journal of Scientific Research*, Vol. 1, pp. 579-588. doi: [10.3923/ajsr.2008.579.588](https://doi.org/10.3923/ajsr.2008.579.588)
- [25] Gedafa, D. S., Hossain, M. and Romanoschi, S. A. (2014). "Perpetual Pavement Temperature Prediction Model", *Journal of Road Materials and Pavement Design*, Vol. 15, No. 1, pp. 55-65, doi: <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2013.852610>
- [26] Islam, M. R., Ahsan, S. and Tarefder, R. A. (2015). "Modeling Temperature Profile of Hot-Mix Asphalt in Flexible Pavement", *Journal of Pavement Research and Technology (IJPRT)*, Vol. 8, Issue. 8, No. 1, pp. 47-52.
- [27] Ariawan, A., Sugeng Subagio, B. and Hario Setiadji, B. (2015). "Development of Asphalt Pavement Temperature Model for Tropical Climate Conditions in West Bali Region", 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF-5), *Procedia Engineering*, Vol. 125, pp. 474-480. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.126>
- [28] Albayati, A. H. K. and Alani, A. M. M. (2015). "Temperature Prediction Model for Asphalt Concrete Pavement", 14th Annual International Conference on Pavement Engineering and Infrastructure, Liverpool, UK.
- [29] Asefzadeh, A., Hashemian, L. and Bayat, A. (2017) "Development of Statistical Temperature Prediction Models for a Test Road in Edmonton, Alberta, Canada", *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol. 10, Issue. 5, pp. 369-382. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.05.004>
- [30] Li, Y., Liu, L. and Sun, L. (2018). "Temperature Predictions for Asphalt Pavement with Thick Asphalt Layer", *Construction and Building Materials*, Vol. 160, pp. 802-809. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.145>

- Layer Temperature Prediction Model and Temperature Correction Via Falling Weight Deflectometer Deflections”, *Transport. Res. Rec. J. Transport. Res. Board*, No. 1764, pp. 97–111.
- [43] Solatifar, N. (2018). “Analysis of Conventional Dynamic Modulus Predictive Models of Asphalt Mixtures”, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*. (in Persian)
- for Asphalt Pavements”, Report FHWA-RD-98- 085, Department of Transportation, USA.
- [41] Solatifar, N. and Abbasghorbani, M. (2019). “Calibration of Regression Models Based on Viscoelastic Principles for Prediction of Dynamic Modulus of In-Service Asphalt Layers”, *Journal of Transportation Engineering*. (in Persian)
- [42] Park, D. Y., Buch, N. and Chatti, K. (2001). “Effective

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Sedighian-Fard, N. Solatifar, Analysis of Regression-Based Models for Prediction of Depth Temperature of Asphalt Layers – A Review, Amirkabir J. Civil Eng., 53(9) (2021) 3985-4006.

DOI: [10.22060/ceej.2020.18131.6793](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18131.6793)

